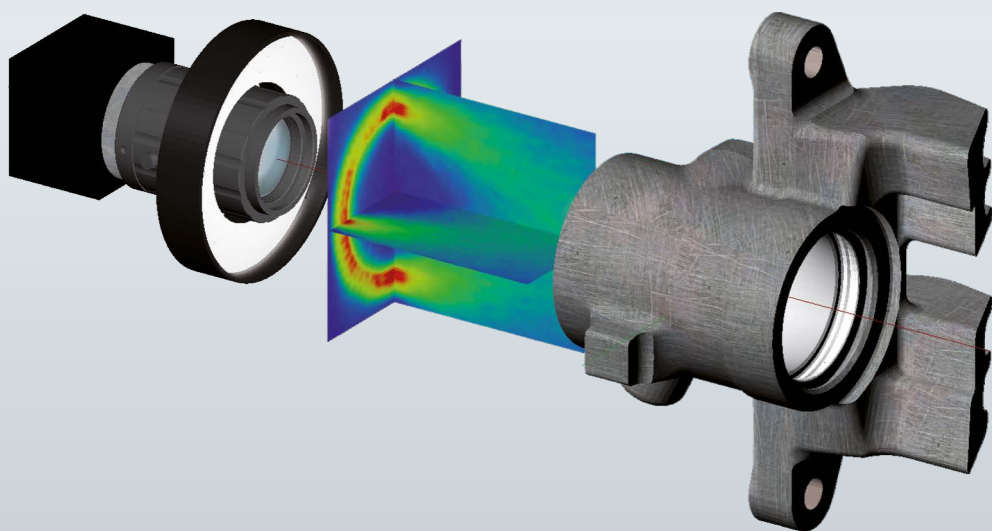


Jacek REINER

IDENTYFIKACJA I MODELOWANIE OPTYCZNE SYSTEMÓW WIZYJNEJ KONTROLI JAKOŚCI WYTWARZANIA



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Jacek REINER

**IDENTYFIKACJA I MODELOWANIE OPTYCZNE
SYSTEMÓW WIZYJNEJ KONTROLI
JAKOŚCI WYTWARZANIA**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013**

Recenzenci

Jan KOCH
Robert SITNIK

Opracowanie redakcyjne

Alina KACZAK

Korekta

Agnieszka ŚCIEPURO

Projekt okładki

Jacek REINER
Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-811-2

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 827/2013.

Spis treści

Wykaz skrótów	5
1. Wstęp	7
1.1. Geneza pracy, motywacja do podjęcia badań i cel	8
1.2. Struktura pracy	13
2. Systemy wizyjnej kontroli jakości wytwarzania	15
2.1. Kontrola wizualna i automatyzacja	15
2.2. Zastosowanie systemów wizyjnych	18
2.3. Obiekt, powierzchnia, wada	23
2.4. Metody i techniki akwizycji obrazów	27
2.5. Otoczenie i zakłócenia	37
2.6. Użytkownik systemów wizyjnych	39
2.7. Wdrażanie systemów kontroli wizyjnej	40
2.8. Projektowanie systemów wizyjnych	41
2.9. Symulacje w projektowaniu oświetlenia	45
2.10. Podsumowanie	49
3. Cel i zakres badań	51
4. Obrazowanie i metody symulacji propagacji światła	55
4.1. Detektory światła i kamery	55
4.2. Wielkości świetlne	57
4.3. Rozpraszanie światła na powierzchniach	61
4.4. Akwizycja obrazów	65
4.5. Renderowanie	66
4.6. Symulacje optyczne	72
4.7. Podsumowanie	74
5. Identyfikacja parametrów optycznych procesów akwizycji obrazów	77
5.1. Źródła światła i oświetlacze	78
5.1.1. Oświetlacze do systemów wizyjnych	78
5.1.2. Metoda pomiarów światłości w polu bliskim	80
5.1.3. Wyniki pomiarów oświetlaczy do systemów wizyjnych	81
5.1.4. Emitery światła	87
5.1.5. Luminacja na płaszczyźnie równoległej	92
5.1.6. Metoda pomiarów światłości z użyciem sfery obrazującej	93
5.1.7. Wyniki pomiarów skupionych źródeł światła	96
5.2. Parametry powierzchni	99
5.2.1. Pomiary mikroskopowe powierzchni	99
5.2.2. Metoda pomiarów BSDF z użyciem sfery obrazującej	103
5.2.3. Pomiary rozpraszania światła (BRDF)	106

5.3. Podsumowanie	112
6. Synteza modeli symulacyjnych	115
6.1. Weryfikacja modeli źródeł światła	116
6.1.1. Wirtualny goniometr	116
6.1.2. Detektor polarny do pomiarów światłości	117
6.1.3. Model źródła światła na bazie charakterystyki światłości	124
6.2. Weryfikacja modelowania powierzchni	127
6.2.1. Modelowanie struktury topograficznej powierzchni	130
6.2.2. Wirtualna sfera obrazująca	134
6.3. Modelowanie geometryczno-optyczne skupionych źródeł światła	140
6.4. Modelowanie geometryczno-optyczne oświetlaczy	144
6.5. Modelowanie źródeł światła na bazie danych pomiarowych pola bliskiego	152
6.6. Optymalizacja układu akwizycji obrazów	154
6.7. Podsumowanie	165
7. Walidacja na przykładach przemysłowych	167
7.1. Czoła wałeczków łożysk tocznych	167
7.2. Przeguby homokinetyczne	176
7.3. Wkręty kostne	182
8. Podsumowanie i wnioski	189
Aneks	197
Literatura	203
Streszczenie w języku angielskim	221

Wykaz skrótów

BRDF	– Dwukierunkowa funkcja rozpraszania światła na powierzchni (<i>Bi-directional Reflectance Distribution Function</i>)
BSDF	– Dwukierunkowa funkcja rozpraszania światła (<i>Bi-directional Scattering Distribution Function</i>)
BTDF	– Dwukierunkowa funkcja transmisyjnego rozpraszania światła (<i>Bi-directional Transmittance Distribution Function</i>)
CAD	– Komputerowo wspomagane projektowanie (<i>Computer Aided Design</i>)
Cax	– Komputerowe wspomaganie działań badawczych i inżynierskich (<i>Computer Aided eXercise (Analysis/Design/Manufacturing/etc.)</i>)
CCD	– Urządzenie (optyczne) z transferem ładunku (<i>Charge Coupled Device</i>)
CMOS	– Półprzewodnik z komplementarnymi tranzystorami unipolarnymi z metalową bramką izolowaną warstwą tlenków (<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>)
DOE	– Planowanie eksperymentu (<i>Design of Experiments</i>)
FFT	– Szybka transformata Fouriera (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FMEA	– Analiza przyczyn i skutków wad (<i>Failure Model Effects Analysis</i>)
FOV	– Pole widzenia (<i>Field of View</i>)
FWHM	– Szerokość połówkowa (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
GPU	– Procesor graficzny (<i>Graphics Processing Unit</i>)
H, V	– Pozioma, pionowa (<i>Horizontal, vertical</i>)
HDRC	– Kamera o dużym zakresie dynamicznym (<i>High Dynamic Range Camera</i>)
LED	– Dioda elektroluminescencyjna (<i>Light-Emitting Diode</i>)
MSA	– Analiza zdolności pomiarowej (<i>Measurement System Analysis</i>)
MTF	– Funkcja przenoszenia kontrastu (<i>Modulation Transfer Function</i>)
MV	– Systemy wizyjne (<i>Machine Vision</i>)
ODS	– Oprogramowanie do projektowania optycznego (<i>Optical Design Software</i>)
PSD	– Gęstość mocy spektralnej (<i>Power Spectral Density</i>)
R, G, B	– Czerwony, zielony, niebieski (<i>Red, Green, Blue</i>)
SGP	– Struktura geometryczna powierzchni
SMD	– Elementy do montażu powierzchniowego (<i>Surface Mounted Devices</i>)
SNR	– Stosunek sygnał–szum (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SPC	– Statystyczne sterowanie procesem (<i>Statistical Process Control</i>)
THT	– Elementy do montażu przewlekane (<i>Through-Hole Technology</i>)
TIS	– Całkowita moc promieniowania rozpraszane na powierzchni (<i>Total Integrated Scattering</i>)
UV/VIS/NIR	– Ultrafiolet/pasmo widzialne/bliska podczerwień (<i>Ultra-Violet/Visible/Near Infrared</i>)
θ	– Kąt incydencji względem normalnej (<i>Incidence angle</i>)
φ	– Kąt azymutalny (<i>Azimuth angle</i>)

1. Wstęp

Cele inżynierii produkcji od lat są niezmiennie – jak wytwarzać dobrze i tanio, coraz to bardziej innowacyjne produkty. Między konstrukcją nowych wyrobów, w tym materiałów a technologią istnieje nierozzerwalna symbioza. Z jednej strony nowe materiały i wyzwania konstrukcyjne zmuszają do rozwoju metod i narzędzi ich obróbki, z drugiej zaś strony nowe technologie odkrywają nowe możliwości dla konstruktorów. Przykładem takich nowych możliwości jest technologia szybkiego wytwarzania (*Rapid Prototyping*) [41] oraz technologia obróbki laserowej [126, 137, 230]. Oprócz miniaturyzacji wyrobów duże znaczenie nabiera interdyscyplinarność techniczna, w tym mechatronika [42]. W zakresie rozwoju technologii konieczna jest dwupostaciowość – „tylko tak dobrze potrafimy wytwarzać, jak dobrze potrafimy mierzyć”, dlatego od obecnych systemów pomiarowych oczekuje się nie tylko wskazania niezgodności geometrycznych ze specyfikacją wyrobu, ale również jego nadzorowania, a nawet sterowania jakością [95, 97, 111]. Dlatego rozwijane są metody, techniki i narzędzia kontrolno-pomiarowe dla skali makro-, mezo-, mikro- i nanowymiarów, a zwłaszcza:

- metody badania struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [19, 124, 327],
- techniki pomiarów współrzędnościowych [280],
- tomografia przemysłowa [232–236],
- optyczne i wizyjne systemy kontroli jakości [27, 108, 120, 170, 224],
- metody hybrydowe [53].

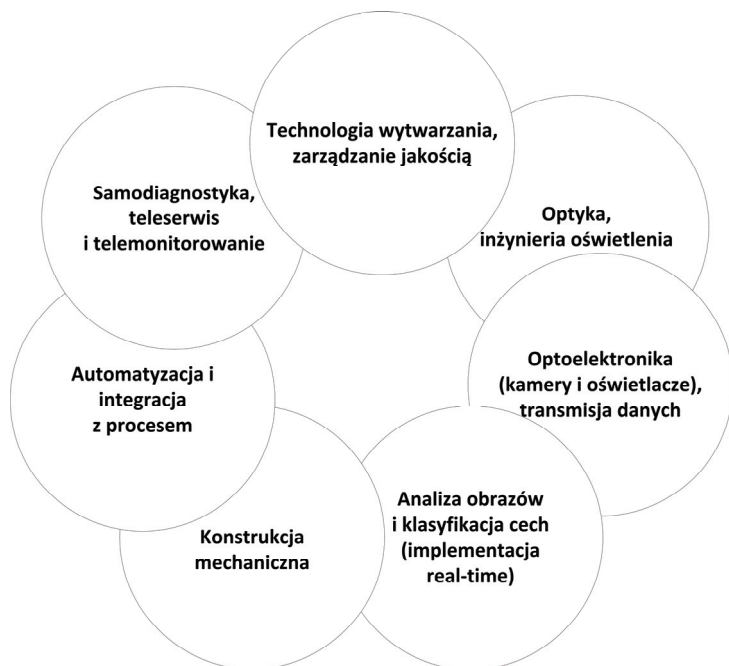
Kontrola jakości określa czy produkt nie różni się od specyfikacji, stąd wymaga pomiarów lub wykrywania cech, np. skaz albo błędów integralności montażowej. W takim sensie jest więc procesem sterowania jakością [202].

W założeniach Lean Manufacturing [330] kontrola jakości jest postrzegana jako działanie nietworzące wartości dodanej – więc marnotrawstwo. Uzasadnione jest, aby w pierwszej kolejności doskonalić procesy technologiczne, aby żadna dodatkowa kontrola nie była potrzebna. Jednak, gdy zmienność procesu wykracza poza przyjęte wąskie pola tolerancji, kilkudziesięciu a nawet kilkunastu ppm, wówczas staje się ona konieczna. Szczególne znaczenie odgrywają tu metody optyczne, zwłaszcza systemy wizyjne MV (ang. *Machine Vision*), od których oczekuje się bezdotykowości, wielokryterialności, dużej wydajności oraz dokumentowania przebiegu procesu i jego wyni-

ków. Istotne trudności dla projektantów takich systemów wynikają jednak z potrzeby zapewnienia dużej odporności na naturalną zmienność procesu i zakłócenia. Zmiany w dziedzinie technologicznej czy materiałowej, mieszczące się w zakresie przyjętych tolerancji, mogą bowiem wywołać zmiany na obrazie tak duże, że kontrola automatyczna uzna je jako niezgodność [38].

1.1. Geneza pracy, motywacja do podjęcia badań i cel

Tradycyjne, inżynierskie podejście do opracowania systemów wizyjnej inspekcji jakości wytwarzania czerpie wiedzę z mechaniki, optyki, optoelektroniki oraz teorii przetwarzania sygnałów, rozpoznawania wzorców i informatyki (rys. 1.1). Stąd też, poprzez swoją interdyscyplinarność, jest bardzo charakterystycznym przykładem mechatroniki [120], a jeszcze precyzyjnej optomechatroniki [59]. Wielu autorów podkreśla, że systemy wizyjne są rozwiązaniami specjalizowanymi, o bardzo ograniczonej uniwersalności i elastyczności [174], co wynika z wrażliwości procesu akwizycji i analizy obrazów na zmiany optyczne kontrolowanych powierzchni i krawędzi. Najważniejszym wymaganiem dla systemów wizyjnych jest skuteczność, odporność na zakłócenia i efektywność kosztowa.



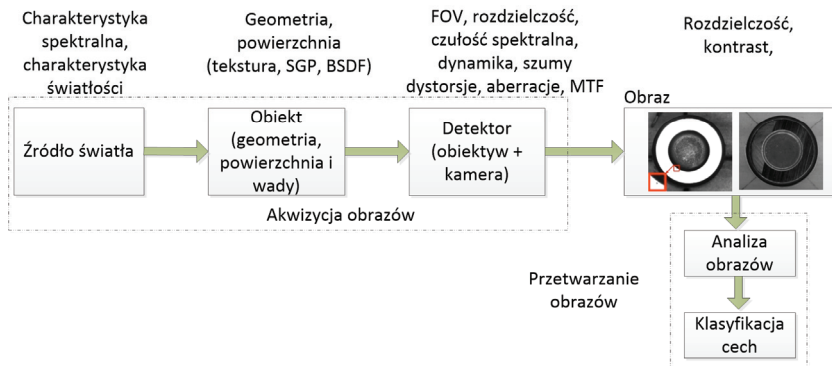
Rys. 1.1. Optomechaniczne ujęcie systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania

Za kluczowe zadania w procesie projektowania systemów wizyjnych wskazać należy:

- formułowanie wymagań jakościowych w dziedzinie optycznej,
- projektowanie optymalnego układu akwizycji obrazów,
- opracowanie skutecznych i odpornych algorytmów analizy obrazów,
- walidację metrologiczną opracowanych rozwiązań.

Specyfikacja wymagań jest podstawą każdego projektu technicznego, jednak jej opracowanie w przypadku wizyjnej kontroli jakości napotyka problemy. Okazuje się bowiem, że wymagania kontroli jakości w dziedzinie mechanicznej nie są wystarczające do opracowania metod optycznych. Algorytmy przetwarzania obrazów mierzą cechy na obrazie, ten zaś nie jest jednoznacznym odwzorowaniem sceny. Problem dotyczy szczególnie skaz powierzchni, których zmienność geometryczno-optyczna jest bardzo rozległa. Identyfikowanie ich cech oraz zmienności determinowane są przez dostępność przykładów. Niestety, zwykle, dostępne przykłady nie spełniają tego wymagania, nie stanowią też przypadków granicznych.

Fundamentalnym problemem w automatyzowaniu kontroli wizualnej lub wprowadzaniu pomiarów optycznych jest nie tylko zrozumienie, jakiego rodzaju informacje może pozyskać system wizyjny i na ich podstawie wyznaczyć opis ilościowy cech [174], ale również jaką zmiennością charakteryzuje się proces oraz jakie występują zakłócenia.



Rys. 1.2. Schemat systemu wizyjnej kontroli jakości

System wizyjny, w najogólniejszym przybliżeniu, składa się z modułu akwizycji obrazów oraz modułu przetwarzania obrazów. Akwizycja obrazów, zwana potocznie fotografowaniem, polega na rejestracji natężenia promieniowania świetlnego rozproszonego na powierzchniach. Kluczową rolę odgrywa tu sposób oświetlenia, gdyż ta sama powierzchnia może być bardzo różnie obrazowana, co pokazano na rys. 1.2. Dlatego problem doboru oświetlenia jest wskazywany jako najtrudniejsze zadanie przy opracowywaniu systemów inspekcji wizyjnej. Harding, Pernkopf i O’Leary uważają,

że w doborze oświetlenia wymagana jest intuicja i eksperymentowanie [113, 221]. Takie podejście kwestionuje jednak inżynierską poprawność projektowania, nie zapewniając powtarzalności, odtwarzalności i efektywności rozwoju produktu, tj. wyposażenia technologicznego. Wprawdzie, dla ułatwienia wyboru techniki oświetlania, producenci oświetlaczy oferują współpracę w doborze swoich produktów do specyficznych zastosowań. Pokazywane są nawet tzw. oświetlacze programowalne o rozszerzonej elastyczności ułatwiające eksperymentowanie. Ponadto, dla poprawy efektywności proponowane są metody planowania eksperymentów DoE (ang. *Design of Experiment*). Jednak usprawnienia takie nie dają rozwiązania optymalnego, są kosztowne i czasochłonne ze względu na potrzebę dostępu do obszernego wyposażenia laboratoryjnego.

Ważna jest również obserwacja, że projekty optomechatroniczne wymagają nie tylko wiedzy interdyscyplinarnej, ale rozwiązania lokalne w poszczególnych mikroobszarach mogą bardzo mocno oddziaływać na inne, odległe podsystemy. Przykładowo, zmiana w metodzie akwizycji, a nawet tylko jej parametrach, potrafi „wywrócić” dorobek włożony w opracowywanie algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech. Dzieje się tak, gdyż zmienia się kontrast na obrazach między obiektem a tłem, zmienia się również obrazowanie tekstury i zakłóceń. W konsekwencji tego, nawet niewielka zmiana parametrów materiałowych, lub parametrów obróbki, mimo że mieści się w zakresie tolerancji technologicznych, może istotnie zakłócać skuteczność algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech.

Ostatnim etapem projektowania i wdrożenia jest walidacja opracowanego rozwiązania, czyli ocena jego przydatności w kontekście użycia. Oznacza to, że samo spełnienie zapisów specyfikacji wymagań nie gwarantuje sukcesu biznesowego. System wizyjny może przecież wykrywać wszystkie wyspecyfikowane wady zgodnie z umową, jednak okazać się nieprzydatny w zmiennych i zakłóconych warunkach produkcyjnych. Zależnie od dojrzałości odbiorcy walidacja jest prowadzona w sposób bardziej lub mniej metodyczny i sformalizowany. Nawet, gdy nie znajduje tu zastosowania analiza zdolności systemów pomiarowych MSA (ang. *Measurement System Analysis*) bądź VDA 5 (niem. *Verband der Automobilindustrie*, Band 5), użytkownik systemu poddaje go testowaniu na wyrobach rzeczywistych. Oznacza to, że jeśli na etapie analizy problemu nie udało się dotrzeć do reprezentatywnego zbioru przykładów, to opracowane urządzenie, w ogólności model, odbiega od potrzeb. Oczywiście jego rozszerzenia na tym późnym etapie wyraźnie wpłyną na koszty i czas rozwoju całego systemu.

Dla projektów, od których wymaga się wysokiej jakości, zalecane jest ich prowadzenie zgodnie z modelem-V. Model ten wyraźnie oddziela projektowanie i implementację rozwiązania od jego testowania. Obie ścieżki przebiegają współbieżnie i odznaczają się komplementarnością zadań. Przykładowo, gdy opracowywana jest specyfikacja wymagań, jednocześnie powstają metody jej testowania. Na bazie takiego podejścia formułowane są najnowsze modele cyklu rozwoju oprogramowania,

zorientowane na testowanie TDD (ang. *Test Driven Development*) [21, 29]. Model-V bazuje jednak na podejściu wodospadowym, tj. zakładającym zamykanie poszczególnych faz cyklu rozwoju. W sytuacji gdy pełna informacja o zmienności procesu nie jest dostępna i usystematyzowana, zalecane są modele spiralne, podczas których zdobywana jest nowa wiedza, lub modele piłozębne charakteryzujące się punktami pośrednimi w postaci prototypów poziomych lub pionowych. Studium wykonalności technicznej projektu może być również formą takiego prototypu. Zgodnie z podaną koncepcją opracowano metodykę studium wykonalności systemów wizyjnych [247]. Metodyka ta wprowadza systematykę w pozyskiwaniu danych na podstawie rozszerzonej analizy FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*) [125, 180] o kryteria trudności akwizycji obrazów. Ponadto, dla zapanowania nad rozległością wyników opracowano system zarządzania obrazami wad [142]. Taka baza obrazów, za pomocą której łatwiej zapanować i zarządzać nad mnogością parametrów akwizycji, wyraźnie pomaga podnieść jakość algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech, gdyż pozwala na znacznie obszerniejsze ich testowanie. Niestety, rozwiązanie to nie wspiera tworzenia wiedzy o obrazowaniu wad, których fizyczne przykłady nie są dostępne. Przykłady przypadków granicznych wynikają wyłącznie z dostarczonych próbek, dlatego nie pozwalają na pełne przetestowanie opracowanych algorytmów. Ponadto, uzyskane obrazy reprezentują wynik działania konkretnej, sprzętowej metody i techniki akwizycji obrazów, nie uogólniając rozwiązania.

Podane obserwacje i brak skutecznych rozwiązań wspierających proces projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania, zainspirowały autora do poszukiwania rozwiązań w obszarze wirtualizacji.

Metody numeryczne komputerowego wsparcia działań inżynierskich CAx [57] lub CAE (*Computer Aided Engineering*) są powszechnie stosowane w budowie i eksploatacji maszyn. Do najważniejszych należy projektowanie geometryczne CAD (*Computer Aided Design*). Obecnie żaden poważny projekt inżynierski [256] nie jest zatwierdzany bez wcześniejszej weryfikacji konstrukcji metodą elementów skończonych FEM (*Finite Elements Methods*) [257]. Symulacje dotyczą również przepływów CFD (*Computer Fluid Dynamics*) oraz badania kinematyki i dynamiki systemów mechanicznych. Również powszechnie stosuje się takie techniki, jak: CAM (*Computer Aided Manufacturing*), CAPP (*Computer Aided Production Planning*), CAQA (*Computer Aided Quality Assurance*) itp. W przypadku automatyzacji wytwarzania lub jeszcze bardziej interdyscyplinarnej mechatroniki, modelowanie i symulacje integrują różne dyscypliny wiedzy [128, 136, 183, 222, 311], znajdując zastosowanie nawet do modelowania systemów biologicznych [299].

Jednak, dla postulowanego zastosowania, konieczne jest użycie modeli numerycznych propagacji światła. Są one wprawdzie stosowane w środowiskach CAD, ale wyłącznie do uproszczonej wizualizacji projektowanych wyrobów. Gdy od wizualizacji projektu 3D oczekuje się fotorealistycznego efektu, co jest pożądane do celów marketingowych, zastosowanie znajduje *rendering*, czyli grafika komputerowa [78, 322].

Inżynieria optyczna dysponuje kilkoma zaawansowanymi metodami i narzędziami ODS (*Optical Design Software*) umożliwiającymi badania symulacyjne propagacji fali elektromagnetycznej w zakresie optycznym (UV, VIS, NIR). Najpowszechniej są stosowane sekwencyjne albo niesekwencyjne metody śledzenia promieni. W ostatnich latach ich dostępność wyraźnie wzrosła, dzięki rosnącym mocom obliczeniowym komputerów, konkurencyjności cenowej oraz dostępności do wiedzy. Jednak budowanie modeli optycznych, których wyniki symulacyjne dobrze odzwierciedlają rzeczywistość, jest zadaniem złożonym i kosztownym ze względu na trudności w identyfikacji parametrów poszczególnych składników systemu i wrażliwość modeli symulacyjnych. Już nieznaczne nieprawidłowości geometryczne lub przybliżenia parametrów optycznych mogą skutkować bezużytecznością wyników symulacji, z uwagi na zbyt duży błąd wyników.

Dużo prostszych modeli symulacyjnych używa się w inżynierii oświetlenia zewnętrznego lub wewnętrznego. W tym przypadku stosuje się wiele uproszczeń. Powierzchnia jest dobierana z katalogu, na podstawie podobieństwa do rzeczywistości. Oświetlenie jest opisywane przez charakterystykę rozsyłu promieniowania. Takiego uproszczenia nie mogą jednak akceptować projektanci opraw oświetleniowych czy lamp samochodowych (projekcyjne i sygnalizacyjne), gdyż w takiej skali problemu dioda LED jest źródłem rozciągłym. Stąd analiza propagacji światła wymaga znacznie bardziej złożonych modeli i analizy w polu bliskim. Modelowanie takie prowadzone jest z użyciem oprogramowania do projektowania optycznego ODS.

Analiza różnych metod i narzędzi symulacyjnych propagacji światła zwraca uwagę na grafikę komputerową, która bardzo intensywnie rozwija metody kreowania wirtualnej rzeczywistości [316]. Akceptowane są tutaj liczne uproszczenia zjawisk fizycznych, w celu spełnienia kryterium wydajności generowania poszczególnych obrazów, zwłaszcza animacji. Jednak grafika komputerowa rozwija również algorytmy bazujące na poprawnych fizycznie modelach (ang. *physical-based rendering*). W celu uzyskiwania fotorealistycznych obrazów doceniono tu znaczenie zarówno modeli powierzchni, jak i najbardziej naturalnego, wielokierunkowego oświetlenia. Dzięki rosnącym mocom obliczeniowym (GPU i *cloud computing*) zwiększa się zastosowanie tych algorytmów. Rozwiązania takie nie są jednak adresowane do projektowania optomechatronicznego, gdyż zezwalają na daleko idące uproszczenia, a nawet kreatywne modyfikacje obrazu w celu osiągnięcia efektu fotorealistycznego. W zastosowaniu tym model symulacyjny jest środkiem do uzyskania obrazu, a nie jak w przypadku projektowania wirtualnego, podstawą wykonania system rzeczywisty.

Podjęto badania w zakresie możliwości i ograniczeń metod numerycznych propagacji światła, z grafiki komputerowej, umożliwiających wsparcie procesu projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania.

1.2. Struktura pracy

Przegląd tematyki z perspektywy technologii wytwarzania, kontroli jakości i automatyzacji zawiera rozdział 2. Obszerna analiza przykładów zastosowań systemów wizyjnych do pomiarów geometrycznych, inspekcji jakości powierzchni, inspekcji strukturalnej oraz przykładów z biologii i medycyny, umożliwiała generalizację problemów oraz wskazanie kierunków i ograniczeń w tej dziedzinie. Następnie scharakteryzowano przedmiot badania, tj. powierzchnię wraz z jej nieciągłościami, oraz dokonano systematyki pod kątem stosowanych metod i rozwiązań technicznych, a w kolejnym etapie scharakteryzowano zakłócenia, na jakie narażony jest system wizyjny. Niedostatki procesu projektowania systemów optomechatronicznych pokazano na bazie analizy cyklu ich rozwoju.

Mapę zadań badawczych w postaci macierzy procesowo-dziedzinowej przedstawiono w rozdziale 3. W ujęciu procesowym rozwoju systemów wizyjnych wyróżniono identyfikację parametrów komponentów, syntezę modeli symulacyjnych oraz opracowanie metod i techniki weryfikacji parametrów optycznych projektowanych rozwiązań. Wyszczególniono komponenty wchodzące w skład systemu akwizycji obrazów, tj. detektory wraz z obiektami, skupione i rozciągłe źródła światła oraz powierzchnie obiektów.

W rozdziale 4 usystematyzowano podstawową wiedzę o metodach propagacji światła. Scharakteryzowano metody i narzędzia grafiki komputerowej tj. *rendering* oraz dokonano przeglądu prac dotyczących zastosowania metod propagacji światła dla projektowania systemów wizyjnych. Rozdział jest adresowany do czytelnika, który nie jest ekspertem w zakresie metod optycznych.

Rozdział 5 ma charakter analityczny, tj. badania podstawowych składników systemu wizyjnego, pod kątem ich zastosowania w modelowaniu. Omówiono parametry optyczne oraz metody ich pomiarów. Do badań zastosowano skaterometr bazujący na sferze obrazującej oraz fotogoniometr pola bliskiego.

Metody budowania modeli symulacyjnych do projektowania systemów wizyjnych przedstawiono w rozdziale 6. Na wstępie omówiono opracowane narzędzia do weryfikacji parametrów emisyjności i rozpraszania światła, tj. goniometr wirtualny, sferę obrazującą, oraz skaterometr, których pozbawione są środowiska renderujące. Następnie pokazano metody modelowania punktowych źródeł światła LED, które są podstawą modelowania złożonych układów oświetlających, takich jak oświetlacze pierścieniowe, oświetlacze kopułkowe oraz oświetlacze ciemnego tła. W kolejnym etapie pokazano możliwości badań symulacyjnych układów akwizycji obrazów bazujących na wybranych technikach obrazowania.

W rozdziale 7 przedstawiono użyteczność opracowanych rozwiązań na przykładach trzech projektów przemysłowych. Dotyczą one inspekcji jakości powierzchni na przykładzie czoł wałeczków łożysk tocznych, inspekcji integralności strukturalnej

na przykładzie przegubów homokinetycznych oraz pomiarów optycznych na przykładzie wkrętów kostnych implantów medycznych.

W rozdziale 8 podsumowano uzyskane wyniki oraz wskazano na kierunki dalszych prac badawczo-rozwojowych w obszarze symulacji propagacji światła do projektowania optomechatronicznego.

2. Systemy wizyjnej kontroli jakości wytwarzania

2.1. Kontrola wizualna i automatyzacja

Zadania kontroli jakości realizowane przez człowieka na linii produkcyjnej dotyczą pomiarów oraz oceny atrybutywnej z zastosowaniem sprawdzianów lub oceny estetycznej metodą inspekcji wizualnej. W przypadku systemów pomiarowych powszechnie badana jest ich zdolność metrologiczna MSA (*Measurement System Analysis*) [76]. Badanie takie obejmuje powtarzalność i odtwarzalność metody pomiarowej GR&R (*Gage Repeatability and Reproducibility*), czyli identyfikację błędów pochodzących od przyrządu i od operatora. W przypadku kontroli atrybutywnej metodyka MSA4 wprowadza odpowiednią procedurę, która wymaga reprezentatywnego zestawu testowego próbek z przykładami równomiernie rozłożonych charakterystyk kontrolowanych cech. Zgromadzenie lub spreparowanie takiego zestawu jest często kłopotliwe. Ponadto, wielokrotnie używane próbki zmieniają swoje parametry, co w przypadku powierzchni kontaktowych wymaga ich rekaliibracji. Chcąc zastosować podobne podejście do oceny powtarzalności i odtwarzalności kontroli wizualnej, problem staje się jeszcze trudniejszy, gdyż tym razem dotyczy cech geometryczno-optycznych skaz powierzchni. Cechy optyczne powierzchni ulegają zmianie w funkcji czasu, zgromadzenie zaś pełnego zestawu skaz powierzchni o charakterystykach granicznych zwykle jest nierealizowalne.

Zasadne jest zatem pytanie, jaka jest skuteczność, powtarzalność i odtwarzalność inspekcji wizualnej? Badania prowadzone przez Smitha [281] pokazują, że skuteczność inspekcji wizualnej, tj. realizowanej przez człowieka, osiąga maksymalnie 80% po założeniu, że zadanie jest dobrze zdefiniowane. Newman porusza dodatkowo problem prawidłowego doboru tempa inspekcji. Gdy przez dłuższy czas nie są znajdowane defekty, zadanie inspekcji staje się nużące i rutynowe, co zmniejsza koncentrację [91]. Z drugiej strony, obiektywizm prowadzących kontrolę łatwo zostaje naruszony przez wynik inspekcji, tj. liczbę odrzuconych sztuk wyrobów [202].

Govindaraju, Pennathur i Mital przeprowadzili badania czynników oddziałujących na wydajność i jakość pracy człowieka przy linii produkcyjnej [107]. Zidentyfikowali

oni cztery kategorie wpływów: (1) fizyczny, obejmujący dyskomfort, ból i zmęczenie, (2) psychologiczny, dotyczący stresu, znudzenia i braku motywacji, (3) mentalny, ograniczający zdolność przetwarzania informacji, (4) sensoryczny, odnoszący się do ograniczeń zmysłu wzroku, słuchu, powonienia i odczuwania. Na podstawie czterech studiów przypadku wykazali znaczenie ergonomicznych i finansowych warunków pracy dla jej wydajności i jakości.

Należy zauważyć, że w przypadku inspekcji wizualnej, zapewnienie ergonomicznych warunków sensorycznych zwykle jest bardzo trudne, a często niemożliwe. Stosowane jest tu bowiem oświetlenie kierunkowe i lokalne, podnoszące kontrast między wadą a jej tłem. Jest ono zatem niezgodne z prawidłowym oświetleniem stanowisk pracy [5]. Szczególnie powierzchnie metalowe silnie refleksyjne, jak również wyroby szklane, mogą być przyczyną oślepiania pracownika, stanowiąc zagrożenie fotobiologiczne [11]. Ponadto, potrzeba inspekcji procesowej lokalizuje stanowiska inspekcji jakości w pobliżu obrabiarek, gdzie panuje hałas, co należy do negatywnych czynników ergonomicznych.

Hata, Matsuda i Kamido [114] prowadzili badania zdolności wizualnych człowieka w zakresie:

- dostrzegania zmian natężenia światła w odniesieniu do wartości otoczenia,
- dostrzegania zmian nasycenia kolorów w odniesieniu do wartości otoczenia,
- dostrzegania zmian kolorów zgodnie z modelem elips MacAdam,
- wyostrzania krawędzi zależnie od kontrastu,
- oceny wielkości wad zależnie od rozdzielczości,
- pozycjonowania wad zależnie od ich odległości od środka obszaru obserwacji,
- wrażliwości postrzegania defektów ciągłych.

Mimo że były one prowadzone z zastosowaniem zdjęć, a nie rzeczywistych obiektów, ich wyniki potwierdzają bardzo duże rozbieżności między decyzjami badanych, sięgające nawet 80%.

Tabela 2.1. Zestawienie mocnych i słabych stron kontroli prowadzonej przez człowieka

Mocne strony	Słabe strony
• Uczenie nowych typów wad, bez konieczności definiowania modelu matematycznego • Adaptacyjne uczenie nowych metod postrzegania wad • Adaptacyjne uczenie i filtrowanie zakłóceń powierzchni • Elastyczność na zmiany typów wyrobów	• Zależność od predyspozycji psychofizycznych inspektora • Zmienna niepewność inspekcji • Łatwość zakłócenia obiektywizmu • Mała wydajność, szczególnie problemów wielokryterialnych • Niezadowalająca jakość dokumentacji z kontroli

Nie można jednak pozostać jedynie przy krytyce inspekcji wizualnej. Oferuje ona zalety, nieosiągalne dla systemów automatycznych, dzięki zmysłom człowieka, jego inteligencji, zdolnościom motorycznym i komunikatywności. Zmysły pozwalają nie

tylko oglądać wadę, ale niekiedy ją dotknąć do identyfikacji i odróżnienia od zanieczyszczenia [165]. Inteligencja zapewnia uczenie na bazie opisu abstrakcyjnego i rozmytego, bez potrzeby matematycznego definiowania modelu każdej wady. Dzięki motoryce, warunki obserwacji i oświetlenia mogą zostać zmodyfikowane i optymalizowane dla danego problemu.

Ważna do dalszych rozważań jest konkluzja, że skuteczność inspekcji prowadzonej przez człowieka jest tym większa, im jest ona rzadsza [202], co jest przecież w konflikcie z założeniami statystycznej kontroli procesu (SPC) [305]. Statystyczna kontrola procesu opiera się bowiem na wnioskowaniu statystycznym, którego narzędziem jest estymator. Estymator zaś buduje swoją ocenę (wartość oczekiwana, wariancja, prawdopodobieństwo, etc.) na wynikach próby. Aby estymatory mogły być stosowane we wnioskowaniu statystycznym, muszą być nieobciążone, efektywne i zgodne. Czyli, charakteryzować się brakiem systematycznego odchylenia od szacowanego parametru, jak najmniejszą wariancją oraz jak największą pewnością przy jak najmniejszej liczbie próby. Stosowanych jest wiele metod i narzędzi SPC do oceny jakościowej procesów ciągłych i dyskretnych, np. karty kontrolne [228], [208]. Gawlik i in. zwracają jednak uwagę na brak adekwatności kart kontrolnych w warunkach nietypowych rozkładów prawdopodobieństwa, istnienie trendów okresowych, nieoczekiwanych zmian w wycentrowaniu nastaw, czy też ich zastosowania do krótkich serii [96].

We wnioskowaniu statystycznym [285] wyróżnia się dwa rodzaje błędów:

- błąd pierwszego rodzaju (*false positive*) – występuje, gdy odrzucamy hipotezę zerową, która w rzeczywistości jest prawdziwa,
- błąd drugiego rodzaju (*false negative*) – występuje, gdy nie odrzucamy hipotezy zerowej, która jest w rzeczywistości fałszywa.

Podane zasady przeniesione do kontroli jakości, po postawieniu hipotezy zerowej H_0 , że wyrób jest dobry, wskazują na dwa ryzyka: producenta i konsumenta. Ryzyko producenta związane jest z błędem odrzucenia dobrych wyrobów, ryzyko zaś konsumenta jest związane z przyjęciem złych wyrobów [202]. Konkluzja jest oczywista, ryzyko konsumenta może być minimalizowane przez zwiększanie częstości próbkowania. Dążenie do 100% próbkowania nie jest oczywiście warunkiem wystarczającym, gdyż konieczna jest wiarygodność danych pomiarowych. Skoro kontrola wizualna nie gwarantuje stacjonarności, konieczna jest jej automatyzacja, szczególnie gdy:

- wyroby mają status „odpowiedzialnych”, wpływających na bezpieczeństwo, zdrowie czy życie, np.: dla lotnictwa, medycyny, motoryzacji,
- estetyczny wygląd jest ważnym elementem oceny jakości przez klienta,
- produkcja jest zorganizowana zgodnie ze strategią „just-in-time”, czyli wielkość buforów bezpieczeństwa jest zredukowana do zera, a w konsekwencji nie ma elementów zamiennych czy zapasowych,
- koszty wynikające ze sprzedaży wadliwych produktów, jako koszty bezpośrednie zwrotów i napraw oraz koszty pośrednie utraty reputacji, są istotne,

- zmienność procesu nie jest możliwa do stabilizacji na poziomie wejściowym i procesów wytwarzania np. obróbki.

Podana analiza wskazała, że inspekcja wizualna, prowadzona przez człowieka, nie potrzebuje sformalizowanej specyfikacji wymagań i procesu uczenia, a ponadto oferuje bardzo dużą elastyczność na zmiany produktowe i jakościowe oraz dużą odporność na zakłócenia. Jednak kontrola taka charakteryzuje się bardzo ograniczoną powtarzalnością i odtwarzalnością. Jej poprawa nie jest możliwa do osiągnięcia przez zwiększenie częstości próbkowania, gdyż ta degraduje jakość. Największe ograniczenie wynika jednak z niestacjonarności tego procesu. Co jest związane ze zmiennością predyspozycji psychofizycznych człowieka oraz łatwością zakłócenia jego obiektywizmu oceny. Ponadto wymagania wydajnościowe oraz dokumentacji wyników i przebiegu procesu kontroli, szczególnie dla wyrobów odpowiedzialnych, uzasadniają potrzebę automatyzacji tego zadania. To z kolei będzie wymagało rozwiązania problemu algorytmizacji przebiegu kontroli oraz zapewnienia jego elastyczności i odporności na zakłócenia.

2.2. Zastosowanie systemów wizyjnych

Zastosowanie systemów wizyjnych jest bardzo różnorodne i ciągle się rozszerza. Sprzyja temu obniżanie kosztów komponentów, ich wyższe parametry (rozdzielczości kamer, przepustowości interfejsów komunikacyjnych, wydajniejsze jednostki obliczeniowe) oraz rosnąca dostępność wiedzy, implementacji algorytmów przetwarzania i analizy obrazów. Systemy wizyjne znajdują zastosowanie w: kontroli jakości, nawigacji, mediach i telekomunikacji, bezpieczeństwie i ochronie oraz diagnostyce medycznej.

W kontroli jakości wyróżnia się cztery główne obszary ich zastosowania w zakresie: pomiarów charakterystyk geometrycznych, inspekcji powierzchni, integralności strukturalnej oraz monitorowania przebiegu procesu, tzw. jakości operacyjnej [174]. Liczność doniesień wskazuje na rosnące znaczenie kontroli wewnątrzmaterialowej oraz kontroli materiałów i produktów naturalnych, tj. biologicznych i medycznych.

Inne spojrzenie, według danych sensorycznych [202], wyróżnia cztery typy obrazów: binarne, odcieni szarości, kolorowe oraz przestrzenne (*range*) inaczej zwane 3D. Również w tym przypadku obserwowane jest rosnące znaczenie innych technik sensorycznych, np.: termowizji, obrazowania hyperspektralnego, rozpraszania światła, X-ray, USG, SEM.

Dokonano przeglądu literaturowego w zakresie aplikacji systemów wizyjnych do kontroli jakości za lata 2002–2012, zgodnie z podaną klasyfikacją, zwracając uwagę na zgłaszane problemy i ograniczenia podczas projektowania takich systemów. Na końcu opracowanego przeglądu uzyskane wyniki odniesiono do przeglądu z okresu poprzedzającego, za lata 1994–2001, opracowanego przez Malamas i in. [174].

Pomiary geometryczne 2D i 3D

Podstawową metodą obrazowania przy pomiarach 2D jest rejestracja sylwetki obiektu, uzyskiwana przez podświetlanie (ang. *backlight*). Gdy taka technika oświetlania nie jest możliwa, zastosowanie znajdują metody oświetlania kierunkowego, umożliwiające uwypuklenie krawędzi. Ich ograniczeniem jest jednak okluzja skutkująca powstawaniem obszarów zacienionych, co zakłóca detekcję. W przypadku skanowania przestrzennego 3D zastosowanie znajdują metody światła strukturalnego [98], w tym triangulacji. Przykładowo, wiązka światła laserowego w postaci linii świetlnej, obserwowana pod kątem względem płaszczyzny projekcji, pozwala uwypuklić krawędź stanowiącą referencję pomiarową. Wynikiem obrazowania 2D i 3D jest chmura punktów o zmiennej intensywności, których pozycje podlegają konwersji na prymitywy geometryczne, przed wyznaczeniem miar odległości albo kąta.

Przeprowadzona analiza (patrz tab. Aneks A.1) wskazuje, że wizyjne pomiary geometryczne 2D i 3D są coraz powszechniej wprowadzane do zastępowania metod pomiarów stykowych (kontaktowych). W przeciwieństwie do metod mechanicznych umożliwiają rejestrację znacznie większej liczby punktów pomiarowych, a następnie ich przetwarzanie i analizę statystyczną. Nie zawsze jednak są odpowiednikiem pomiarów mechanicznych, gdyż nie pozwalają na dowolną rejestrację punktów pomiarowych, a przede wszystkim są wynikiem interakcji światła z powierzchnią. Oznacza to, że mechaniczny kontakt końcówki pomiarowej określa wyniki maksymalne, uśredniając profil wysokości, detektor optyczny zaś dostarcza wyników będących efektem interakcji światła z lokalną strukturą geometryczno-absorpcyjną powierzchni. Stąd metody optyczne są bardzo podatne na zakłócenia oraz czystość powierzchni. Przeprowadzona analiza zastosowań systemów wizyjnych do zadań pomiarowych zwraca również uwagę na „omijanie” problemu niepewności pomiarowych, przez projektantów. Podjęcie tego problemu ogranicza się wyłącznie do zagadnienia rozdzielczości przetwornika i pola widzenia lub do wskazania użycia algorytmów subpikselowych, zwiększających rozdzielczość. Wpływ układów optycznych i parametrów oświetlacza oraz metod kalibracji i jakości wzorców jest zaniedbywany. Brak uznanej metodyki walidacji optycznych systemów pomiarowych sprawia, że ocena zdolności metrologicznej takich systemów pozostaje ciągle w zakresie badawczym.

Inspekcja jakości powierzchni i wewnątrzmaterialowa

Systemy wizyjnej inspekcji jakości powierzchni i jakości wewnątrzmaterialowej są bezpośrednią odpowiedzią na potrzebę automatyzacji inspekcji wizualnej, w których kamery zastępują zmysł widzenia człowieka. W ramach omawianej grupy wydzielono podobszar powierzchni metalowych (patrz tab. Aneks. A.2) i niemetalowych (patrz tab. Aneks A.3) oraz podobszar materiałów transparentnych (patrz tab. Aneks A.4), dla których wykrywane są wady wewnątrzmaterialowe.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że w przypadku inspekcji powierzchni najistotniejszy problem dotyczy klasyfikacji i opisu wad. W zakresie rozwiązań technicznych jest dostrzegana ciągła problematyczność inspekcji powierzchni silnie refleksyjnych oraz swobodnych. Problem ten wynika z kierunkowości i wąskiej charakterystyki odbicia zwierciadlanego, co utrudnia detekcję promieniowania odbitego albo prowadzi do nasycenia przetwornika kamery. Jako skuteczne rozwiązania techniczne wskazywane są metody deflektometryczne, w których badana powierzchnia stanowi element toru obrazującego. Metodę taką zastosowano w opracowanym rozwiązaniu inspekcji tworzącej wałeczki łożysk tocznych, gdzie dzięki specjalnemu oświetlaczowi [248–250] i zastosowaniu kamer liniowych, wyeliminowano problem odbicia zwierciadlanego od powierzchni po szlifowaniu.

Druga grupa przeanalizowanych rozwiązań dla powierzchni silnie refleksyjnych stosuje metody analizy rozpraszania światła – skaterometrię. Metody ze względu na dużą czułość znajdują zastosowanie do badania powierzchni o bardzo wysokich klasach wykonania, np. zwierciadeł. Mimo że pokazywana jest korelacja między wynikami rozpraszania światła a strukturą geometryczną powierzchni nie stanowią one uznanej metody pomiarów chropowatości powierzchni.

Skuteczność wykrywania wad wewnątrzmaterialowych metodami wizyjnymi zależy od transmisyjności ośrodka oraz absorpcyjności wad, stąd ograniczony zakres ich stosowania. Dotyczy on głównie wyrobów szklanych i tworzyw sztucznych. Przykładowo, panele LCD/LED, w krótkim czasie wyparły szklane kineskopy, których wizyjna kontrola jakości była dużym wyzwaniem. Obecnie technologie tworzyw sztucznych zapewniają dużą czystość i brak porowatości, stąd tematyka kontroli takich wyrobów jest reprezentowana niszowo. Większego zapotrzebowania w przemyśle nabiera prześwietlanie materiałów nietransparentnych optycznie, realizowane za pomocą promieniowania X-ray. W takim przypadku do akwizycji obrazów stosuje się specjalne detektory lub konwertery promieniowania na pasmo widzialne. Zagadnienie to było bardzo intensywnie rozwijane przez wiele ośrodków w okresie poprzedzającym wymienione zestawienie. Tematyka obrazowania w zakresie promieniowania X-ray wykracza jednak poza zakres niniejszego opracowania.

Inspekcja integralności strukturalnej

Obszar aplikacji systemów wizyjnych dla kontroli strukturalnej dotyczy poprawności montażu i wykonania. Kontroli podlegają wyniki operacji technologicznych za pomocą metod pomiarowych lub bardzo prostych testów obecności i zliczania.

Przeprowadzona analiza (patrz tab. Aneks A.5) wskazuje, że realizacja podanych zadań jest związana głównie ze złożonością geometryczną oraz różnorodnością parametrów optycznych badanego obiektu. Gdy składniki kontrolowanego obiektu są wykonane z różnych materiałów lub mają różniącą się teksturę powierzchni, pojawiają się trudności w dobraniu optymalnych warunków akwizycji. Dlatego zadanie projektowania systemu akwizycji obrazów dotyczy również minimalizacji liczby oświetlaczy i kamer.

Przykładowo, w zrealizowanym projekcie inspekcji czół wałeczków łożysk tocznych opracowano rozwiązanie akwizycji, używając wprawdzie jednej kamery, ale rejestruje ona aż 5 zdjęć w różnych warunkach oświetleniowych i ekspozycji. Więcej szczegółów na temat opracowanego rozwiązania inspekcji zaprezentowano w rozdziale 7.1. Dla obiektów większych, wymagających wielokierunkowej obserwacji, minimalizacja liczby kamer może być osiągana przez dodatkową manipulację obiektem lub oświetlaczem i kamerą. Rozwiązanie takie opracowano dla inspekcji prawidłowości montażu ramy siedziska samochodowego. Problem kontroli obejmował 26 cech w czasie 14 sekund, opracowana metoda polegała na manipulacji kamerą za pomocą ramienia robota. Dla poprawy kontrastu między czarnym tłem i czarnymi elementami zastosowano liniowy oświetlacz laserowy. Opracowana metoda akwizycji wraz z algorytmami przetwarzania obrazów, umożliwia, nie tylko wykrywanie obecności wyspecyfikowanych elementów (tulejki nitów, etc.), ale również zapewnia ocenę prawidłowości ich montażu. Innym przykładem kontroli poprawności strukturalnej jest sprawdzanie obecności kulek w łożysku przegubu homokinetycznego. Opracowano metodę oświetlania strukturalnego pierścieniowego, dzięki której wyeliminowano zakłócenia obrazowania pochodzące od powierzchni koszyka i bieżni. Więcej na temat opracowanego rozwiązania przedstawiono w rozdziale 7.2.

Monitorowanie i sterowanie procesami

Monitorowanie i sterowanie procesami z użyciem systemów wizyjnych daje nowe możliwości oddziaływania na jakość wyrobu już podczas operacji technologicznych, a nie dopiero na etapie końcowym, tj. wytworzonego półproduktu lub produktu. Najistotniejsza trudność tego typu zadania wynika z dużej zmienności procesu oraz zakłóceń.

Przeprowadzona analiza (patrz tab. Aneks A.6) zwraca uwagę na największe znaczenie monitorowania procesów obróbki laserowej. Wynika to z selektywnego oddziaływania wiązki lasera (średnica plamki, np.: 0,1 mm, 0,2 mm, 0,6 mm), co wymaga znacznie precyzyjniejszego dopasowywania łączonych elementów. Ponadto oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem zależy od stanu powierzchni, stąd technologia taka jest wrażliwa na zanieczyszczenia. Monitorowanie szybkich procesów obróbki wymaga obrazowania i przetwarzania w czasie rzeczywistym strumieni sekwencji obrazowych. Tym razem jednak podstawowa technika obrazowania polega na rejestracji promieniowania emitowanego przez rozgrzany materiał, np. jeziorko spawalnicze. Istotnym problemem jest jednak emisyjność promieniowania od plazmy oraz odbicie wsteczne (ang. *backreflection*). Dla eliminacji jego wpływu na przesterowywanie przetwornika kamery stosuje się układy filtrów pasmowo-przepustowych oraz kamery o podwyższonej dynamice HDRC (ang. *High Dynamic Range Camera*). Poszukuje się również informacji w paśmie spektralnym emitowanego promieniowania od procesu, stosując analizę hyperspektralną [85] lub metody hybrydowe [272].

Kontrola materiałów i produktów naturalnych

Szczególnym wyzwaniem inspekcji wizyjnej są produkty naturalne, biologiczne, medyczne, takie jak: owoce, warzywa, rośliny, pieczywo, skóry, mięso, jaja, zwierzęta. Zaprezentowano kilka przykładów (patrz tab. Aneks A.7) w celu poszerzenia zakresu postrzegania problematyki wizyjnej kontroli jakości.

Przeprowadzone studium wskazuje na rozległość i trudności aplikacyjne systemów wizyjnych dla podanych zastosowań. Jednym z problemów jest różnorodność kontrolowanych charakterystyk. Graves identyfikuje aż 20 różnych zadań kontroli jakości dla produktów naturalnych, takich jak: analiza zawartości mieszanki, analiza kształtu, analiza tekstury, analiza zestawienia (strukturalna), wygląd, czystość, pokrycie, zliczanie, dekoracja, wtrącenia (inne obiekty), zanieczyszczenia powierzchni, klasyfikacja/sortowanie, dojrzałość, niedoskonałości integracyjne, wymiary geometryczne, opakowanie, sortowanie, areozole, pakowanie wielkogabarytowe, docinanie i cięcie [108]. Jedyne nieliczne z nich mają oczywistą charakterystykę ilościową, większość ma charakter jakościowy, np.: kształt, estetyczność, dekoracja, dojrzałość, stąd dla ich automatycznej kontroli wymagane jest opracowanie specyficznej metryki opisu i kryteriów opisu ilościowego.

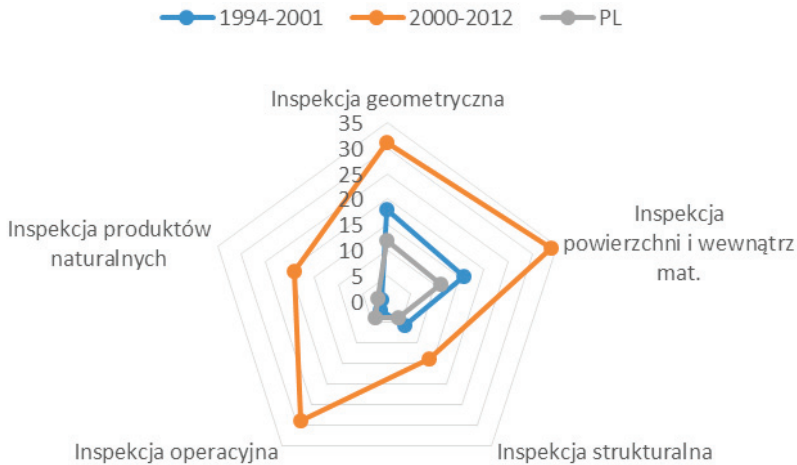
Kierunki rozwoju systemów wizyjnych na świecie i w Polsce

Opracowane zestawienie zastosowania systemów wizyjnych różnych obszarów, skonfrontowano z podobnym przeglądem za okres 1994–2001 [174]. Przyjęto założenie o statystycznej reprezentatywności obu prób, akceptując różne długości okresów obserwacji oraz intensyfikację publikacyjną w ostatnich latach.

Wcześniejszy przegląd zawiera 42 przykłady, nowszy 127, co oznacza trzykrotny przyrost ich liczby. Przegląd z lat 1994–2001 nie wskazuje na przykłady kontroli produktów naturalnych, nie ma tam też odwołań do polskich doniesień implementacyjnych. Autorowi udało się dotrzeć do 33 publikacji aplikacji polskich.

Tabela 2.2. Zestawienie licznych doniesień o aplikacjach MV i udział doniesień polskich

Kategoria inspekcji	Liczba prac 1994–2001	Liczba prac 2000–2012	Liczba prac (PL) 2000–2012	Przyrost liczby prac w świecie	Udział publikacji PL (2000–2012)
Geometryczna 2D/3D	18	31	12	72%	39%
Powierzchni i wewnątrzmaterialowa	16	34	11	113%	32%
Strukturalna	6	14	4	133%	29%
Operacyjna	2	29	4	1350%	14%
Produktów naturalnych	0	19	2	Nowa kat.	11%



Rys. 2.1. Porównanie liczby doniesień o aplikacjach MV

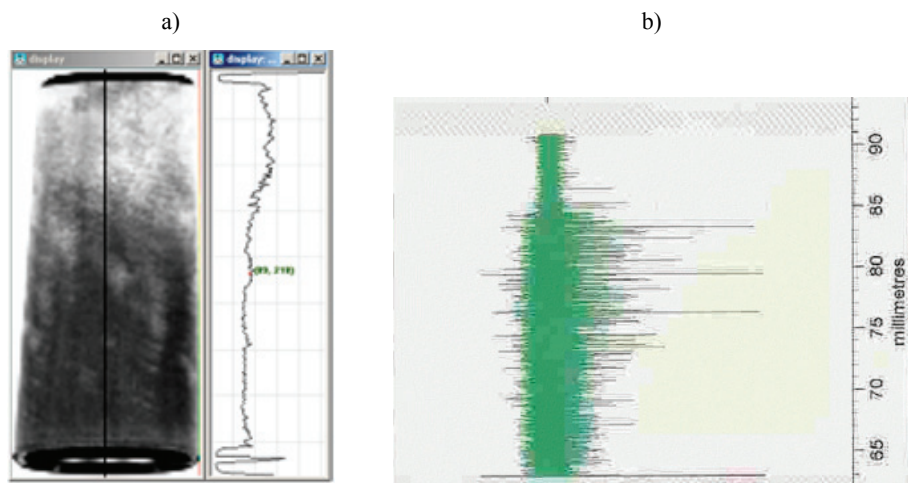
Z analizy zmian liczby doniesień, zestawionych w tabeli 2.2, można wnioskować, że gdy na świecie intensywnie rozwijane i wdrażane są systemy wizyjne dla inspekcji produktów naturalnych i inspekcji operacyjnej, w Polsce wdrożenia dotyczą głównie inspekcji geometrycznej, inspekcji powierzchni i wewnątrzmaterialowej oraz inspekcji strukturalnej. Powyższy obraz może być indykatorem opóźnienia aplikacyjnego w tym obszarze.

2.3. Obiekt, powierzchnia, wada

Dla oceny systemów wizyjnych, w pierwszej kolejności zwrócono uwagę na obiekty podlegające kontroli, a zwłaszcza ich powierzchnie charakteryzujące się topografią, teksturą, skazami oraz krawędzią ograniczającą. Geometria obiektu wyznacza położenie i orientację przestrzenną powierzchni, jego topografia to mikro ukształtowanie, a tekstura charakteryzuje parametry rozpraszania światła wynikające z jego absorpcyjności. Skazy powierzchni są lokalnymi nieciągłościami w zakresie topografii i absorpcyjności. Wszystkie cechy w dziedzinie optycznej silnie zależą od parametrów pobudzającej fali elektromagnetycznej oraz jej kierunku padania i obserwacji.

W kontekście stabilności parametrów optycznych powierzchni, ważna jest ich wrażliwość na zmiany składu chemicznego materiału, a szczególnie jego warstwy wierzchniej. W wyniku utleniania warstwy wierzchniej, zmienia się jej współczynnik załamania i rozpraszania światła oraz absorpcyjność powierzchni. Ponadto, nawet niewielkie zmiany parametrów obróbki, np. parametry skrawania lub geometria na-

rzędzia, powodują zmiany mikrotopografii powierzchni, co może silnie oddziaływać na obraz.



Rys. 2.2. Niejednorodność powierzchni wałka łożyska tocznego:
a) obraz i profil jasności, b) profil chropowatości

Przykładowo, na rysunku 2.2 pokazano obraz powierzchni tworzącej wałeczka stożkowego łożyska o zmiennej chropowatości. Mimo że zmiana ta mieści się w tolerancji chropowatości (R_a), to obserwujemy istotną zmianę jasności powierzchni, co wynika z innej charakterystyki rozpraszania światła.

Specyfikacja skaz powierzchni

Powierzchnia, która podlega inspekcji, jest nośnikiem albo tłem dla skazy lub wad. Stąd jej ukształtowanie geometryczne oraz charakterystyka rozpraszania światła decydują o kontraście, czyli rozróżnialności wady.

Typologia wad jest związana z różnymi kryteriami klasyfikacji, Hocken zawięza ją do materiału i technologii obróbki [116], ale źródłem wad może być również transport, przechowywanie oraz eksploatacja wyrobów. Taksonomia uytylitarna wskazuje na ich znaczenie funkcjonalne, z aspektem niezawodności oraz znaczenie estetyczne. Ponieważ istotnym składnikiem wartości produktu jest również estetyka, stąd mnogość zastosowań systemów wizyjnych do automatyzacji kontroli wizualnej, co szerzej omówiono w rozdziale 2.1.

Podstawowym dokumentem, porządkującym problematykę niedoskonałości powierzchni, jest norma PN-EN ISO 8785:2000 [3], która definiuje 31 typów skaz. Zawarte w niej definicje są kierowane do inspekcji wizualnej, stąd mają charakter poglądowych szkiców z lapidarnym komentarzem. Przedstawione skazy zostały sklasyfikowane jako

cztery grupy: wgłębienia, wypukłości, mieszane skazy powierzchni oraz miejscowe skazy powierzchni i wyglądu. Niestety, niektóre ze zdefiniowanych przykładów (por/pęcherz, pęknięcie/przełom, uskok, szczelina) nie są jednoznaczne, gdyż odwołują się do mechanizmu powstania wady a nie do jej wizualizacji. Ponadto, podane cechy charakterystyczne i parametry skaz powierzchni zdefiniowane są w dziedzinie geometrycznej, stąd są niewystarczające do opisu skaz wyglądu, takich jak odbarwienie czy plama.

Bardzo obszerną specyfikację wad powierzchni blach walcowanych na zimno przedstawia Barker i Brook, identyfikując 25 typów wad. Wady te sklasyfikowano jako: wady wzdłużne, wady poprzeczne, lokalne wtrącenia mechaniczne, plamy, duże wady powierzchniowe oraz wady grube [26]. W przykładzie inspekcji czoł wałeczków łożysk tocznych, Reiner i Mrzygłód definiują aż 31 typów wad, dzieląc je na materiałowe, procesowe i inne. Wady procesowe dotyczą zarówno niezgodności geometrycznych, np. brak centryczności, jak i wad powierzchni np. dominujący kierunek szlifowania. Dla ułatwienia identyfikacji przyczyny wady, wskazano źródło ich powstania, tj. kuźnia albo szlifiernia [244]. Dla prowadnicy zaworu silnikowego Pham i Alcock wyróżniają 9 wad, które dotyczą geometrii oraz powierzchni: pęcherz, garb, uszkodzenie fazki, zanieczyszczenie, błąd otworu, błąd szlifowania, wypływka na krawędzi otworu, błędny kąt i „przypalenie” [224]. Dla kontroli jakości powierzchni tworzącej wałeczka ściętego łożyska tocznego zdefiniowano 7 typów wad powierzchni: brak szlifowania, ubytek materiałowy, zakaleczenie, korozja, „przeszlif”, nierównomierna chropowatość i kroczkowanie [103]. Dla inspekcji blachy białej, pokrytej tlenkiem chromu CrO_2 , która znajduje zastosowania do produkcji puszek i konserw, Olsson i Gruber wskazują na problemy: korozji, laminowania, odcisków rolki, rys, złączy oraz kamieni [212]. Na powierzchniach po galwanizacji Byrne i Sheahn identyfikują następujące wady: matowość, przypalenie, brak pokrycia, nieprawidłowe pokrycie, szorstkość [47]. Pernkopf i O’Leary zaproponowali podział wad na powierzchni tworzącej wałeczka łożyskowego na 5 klas, nazywając je: wady materiałowe, wady szlifowania, zarysowania, otarcia oraz punkty [220]. Celin i Kmetić identyfikują wady na czołach wałeczków łożysk tocznych [52], są to głównie pęknięcia (w tym niewidoczne dla inspekcji wizualnej) oraz korozja. W przypadku powłok, na powierzchniach drutu nawojowego Stefani, Nagarajah i Willgoss wskazują wnęki, grudki, wtrącenia, oraz wady wytwarzania, takie jak brak pokrycia lub przewężenia [287]. Dla powierzchni lustrzanych, np. po procesie galwanizacji, Xue-wu i in. wyróżniają zalewkę, lukę, plamę olejową, złuszczenie, perforację, wybój oraz zarysowanie. [337]. Dla takich samych powierzchni Sails i in. ograniczają się jedynie do wgnieceń, wybojów i zadrapań [259]. Natomiast Seulin, Merienne i Gorria poszukują wszelkich odstępstw rozpraszania światła względem powierzchni wzorcowej [269].

Jak wynika z podanego przeglądu, nazewnictwo stosowane do określania wad jest bardzo niespójne i nieprecyzyjne. Dodatkowe trudności stanowi też tłumaczenie takich nieprecyzyjnych pojęć na język obcy, co pokazano w tabeli (załącznik A.8).

Do specyfikacji wad w szkle zastosowanie ma norma PN-76/B-13200 [1]. Specyfikacja ta wyróżnia 17 typów wad, klasyfikując je jako: wtrącenia ciał szklistych, wtrącenia ciał stałych, wtrącenia gazowe oraz błędy specyficzne. Mimo że norma wskazuje na metody obserwacji i oświetlania, to jednoznaczne ich odróżnienie często nie jest możliwe, np. kamienie z zestawu, kamienie z materiałów ogniotrwałych albo pęcherze, pęcherze włoskowate, pęcherze pękające i otwarte, pęcherze czyste. Gdy przykłady wad z normy nie wyczerpują problemu specyfikacji, producenci rozszerzają specyfikacje wymagań jakościowych do własnych potrzeb. Przykładowo, dla szkła kineskopów definiowane są dodatkowo takie wady, jak: zimne szkło, embriion, mikro-pęknięcia, pęknięcia i szarość [239]. W przypadku foli transparentnej, wytwarzanej metodą wytłaczania płaskoszczelinowego zidentyfikowano cztery grupy błędów: fałdy, żełe, pustki oraz smugi [94], podkreślając ogromne trudności ich wykrycia z uwagi na małe wymiary wad i transparentność materiału.

W kontekście inspekcji materiałowej zwraca uwagę rosnące znaczenie struktury wewnętrznej uzyskiwanej metodą prześwietlania promieniowaniem Roentgena (X-ray). Szczególnie elementy bezpieczeństwa w lotnictwie, budowie maszyn czy medycynie są coraz powszechniej badane za pomocą tomografii komputerowej [96]. Badanie takie umożliwia wykrywanie porowatości, pęknięć, korozji, wtrąceń, zanieczyszczeń, pęcherzy, oraz zmian geometrycznych [49]. W przypadku odlewów Fałęcki klasyfikuje około 50 typów wad [87]. Należą do nich różnego typu pęcherze i jamy skurczowe. Porowatość związana jest ze skupiskami pustek, często zanieczyszczonych piaskiem lub tlenkami, żużlem, piaskiem i metalami obcymi. Gdy wady te objawiają się na powierzchni obrabianego materiału, możliwa jest ich inspekcja wizualna lub wizyjna [298]. W przypadku wad wewnątrzmaterialowych najskuteczniejsza jest tomografia komputerowa.

Istotnym obszarem zastosowań MV jest elektronika i mikroelektronika. W przypadku płytek PCB, za wady procesu trawienia płytek przyjmuje się braki wytrawienia, niedotrawienia, nadżerki, zwarcia, przecięcia, braki otworów oraz przebicia [332]. Dla inspekcji płytek z krzemu polikrystalicznego, stosowanych do produkcji ogniw fotowoltaicznych, definiowane są mikro, poniżej 30 μm , i makrowady [56]. Wady dotyczą zarówno powierzchni, jak i pęknięć wewnętrznych. W przypadku płytek krzemowych do produkcji elementów półprzewodnikowych, kontrolowana jest nie tylko powierzchnia i ich czystość, ale również defekty struktury, takie jak błędy ułożenia, przerwy, wzniesienia oraz poprawność ścieżek [79]. W kontroli poprawności montażu obwodów elektronicznych definiowane są wady połączeń lutowniczych, takie jak niedostateczna ilość lutownia, nadmiar lutownia, nieprawidłowe położenie nóżek elementów [201]. W przypadku połączeń układów elektronicznych na płytkach montażowych kontrolowane są przerwy, zwarcia oraz przesunięcia i obroty elementów [219].

Inspekcji wizyjnej podlegają również połączenia spawane, np. technologią MIG/MAG (ang. *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), gdzie defektami są zbyt szero-

kie lub zbyt wąskie spoiny [265]. W przypadku spoin wykonywanych technologią laserową katalog wad rozszerzony jest o nieciągłości. Jednak, jak pokazano w rozdziale 2.2, coraz istotniejszą rolę odgrywa tu kontrola operacyjna, tj. przebiegu procesu, np. analiza kształtu jeziorka spawalniczego, co umożliwia nie tylko detekcję nieprawidłowości, ale również sterowanie parametrami procesu np. mocą lasera, pozycją ogniska wiązki.

Za przykład produktów trudnych do identyfikacji i klasyfikacji wskazywane są wady produktów naturalnych, takie jak drewno i jego półprodukty. Poruszana jest zwłaszcza kwestia braku jednoznacznych wytycznych definicji tekstur oraz braku reprezentatywnych przykładów wyrobów dobrych i złych. W przypadku desek obraz skali szarości nie zawiera dostatecznej informacji, aby wykryć sęki, pustki, pęcherze żywiczne, stąd wskazuje się na użyteczność skanowania wielodzielinowego (radiancja, rozpraszanie, topografia) [22]. Najistotniejsze działania w kierunku porządkowania tego obszaru wprowadził Kanadyjski Krajowy Urząd Klasyfikacji Tarcicy [9], publikując klasyfikację defektów w drewnie. Wyróżniono w niej trzy kategorie: wady naturalne, związane z rozwojem drzewa (np. różnego rodzaju sęki, kieszenie, osłabienia), wady wytwarzania, związane z obróbką i transportowaniem drewna (wyrwane lub rozdarte słoje, wyciągnięte włókna, przypalenia od narzędzia obróbkowego) oraz wady sezonowania, powstające podczas przesychania drewna (pęknięcia, wypaczenia). Podkreśla się, że specyfikacje takie wyraźnie wspierają rozwój systemów wizyjnej inspekcji jakości tarcicy [34].

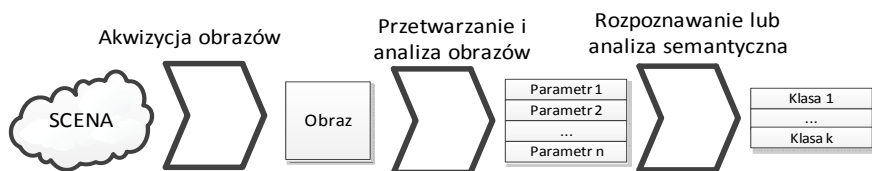
Jak pokazuje przeprowadzona analiza, mimo dokumentów normalizacyjnych (PN-EN ISO 8785:2000) i (PN-76/B-13200), nazewnictwo stosowane do określania wad jest bardzo różnorodne i niespójne. Jednym z powodów jest niedostosowanie specyfikacji do oceny automatycznej, wynikające ze zbyt ogólnych definicji adresowanych dla kontroli wizualnej. Najistotniejszą przyczynę należy jednak upatrywać w braku dostatecznej wiedzy technologicznej i materiałowej u projektantów systemów wizyjnych, czego dowodem jest częste sprowadzanie problemu wad powierzchni do „czarnych plam”. Tak dalekie uproszczenie nie pozwala na klasyfikację typów wad, które ze względu na kontrolę jakości jest niezbędne.

2.4. Metody i techniki akwizycji obrazów

Procesowa perspektywa systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania (rys. 2.3) wyróżnia:

- akwizycję, której celem jest transformacja sceny w obraz,
- przetwarzanie i analizę obrazów, w wyniku której uzyskiwane są cechy ilościowe,
- rozpoznawanie lub analiza semantyczna (np. klasyfikacja),

- procesy wspomagające, takie jak manipulacja, czyszczenie, samodiagnostyka, teleserwis i telemonitorowanie, zarządzanie danymi pomiarowymi.



Rys. 2.3. Diagram procesowy wizyjnej kontroli jakości wytwarzania

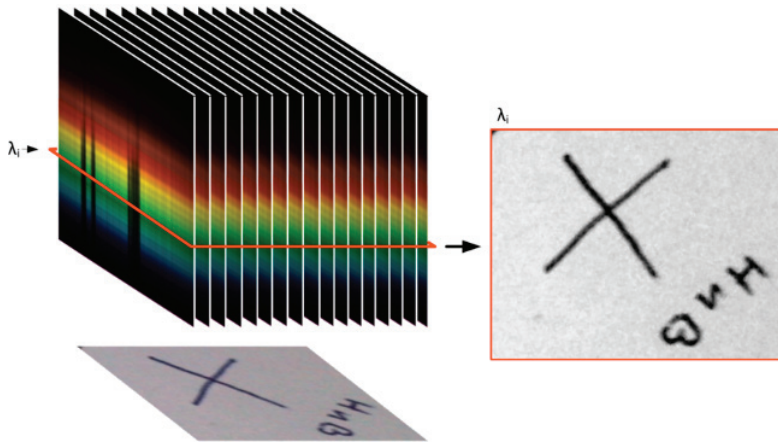
Podany model ma zastosowanie do wszystkich typów systemów wizyjnych (rozdział 2.2), choć w przypadku systemów pomiarowych 2D/3D, klasyfikacja nie jest obligatoryjna, za to znaczenia nabiera problem niepewności wyników.

Akwizycja obrazów

Akwizycja obrazów jest transformacją wielowymiarowej przestrzeni sceny w obraz, będący zapisem macierzowym jej radiancji w funkcji ekspozycji, podzielonej na elementy powierzchniowe – piksele. Ekspozycja określa przedział czasu rejestracji oraz kąt przestrzenny rejestracji fali świetlnej odbitej od powierzchni lub padającej bezpośrednio ze źródła światła.

W kamerach obraz tworzy się za pomocą macierzy elementów światłoczułych w technologii CCD (ang. *Charge Coupled Device*) lub CMOS (ang. *Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*) [69, 117]. W najprostszym przypadku jest rejestrowany obraz monochromatyczny tworzący macierz $N \times M$. W przypadku obrazów kolorowych najczęściej jest to również jeden obraz, ale kolejnym pikselom przyporządkowane są podstawowe kanały chromatyczne RGB, bądź obraz taki jest pozyskiwany współbieżnie trójkanałowo ($3 \times (N \times M)$). Rozwiązanie pierwsze, z filtrem mozaikowym (filtr Bayera), redukuje koszt i liczbę danych, ale równocześnie obniża rozdzielczość. Gdy informacja chromatyczna wymaga większej rozdzielczości spektralnej, rejestruje się wąskospektralne sekwencje, albo rejestruje się obrazy multispektralne pojedynczych linii, składając je w obraz hyperspektralny (rys. 2.4).

Rozdzielczość, czyli wymiar macierzy obrazowej ($N \times M$), wraz z wymiarem geometrycznym matrycy, stanowią główne parametry kamery. Na sensorze bowiem rejestrowany jest obraz sceny uzyskiwany w wyniku projekcji jej radiancji przez soczewkę. Zależnie więc od jej ogniskowej i odległości, tworzona jest płaszczyzna przedmiotu. W rzeczywistości jest to przedział o określonej głębi ostrości, zależnej od apertury obiektywu, która wraz z jego ogniskową wyznacza plamkę rozproszenia (*circle of confusion*). Dla ograniczenia aberracji, w tym dystorsji, stosuje się wielosoczewkowe układy obiektywów, które cechuje ogniskowa oraz jasność. Jasność określa maksymalny otwór względny przysłony, zależny od ogniskowej.



Rys. 2.4. Model danych przy obrazowaniu spektralnym [195]

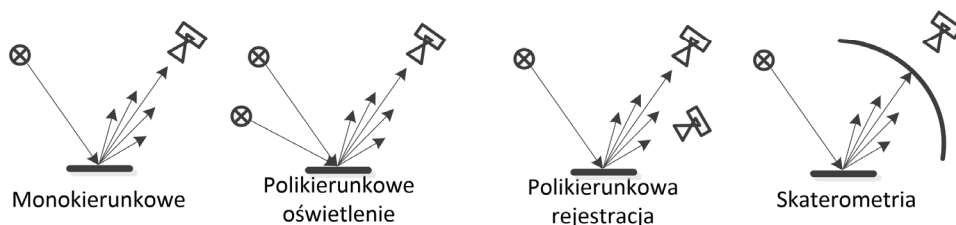
Promieniowanie optyczne, docierające do fotoczułej matrycy przez obiektyw, pochodzi bezpośrednio ze źródła promieniowania lub jest promieniowaniem odbitym i rozproszonym na powierzchniach obiektów sceny. Charakterystyka rozpraszania światła, tudzież jego odbicia, zależy od parametrów materiałowych i powierzchniowych oraz kąta jego padania i kąta obserwacji, a zwłaszcza:

- mikrotopografii powierzchni,
- tekstury i koloru powierzchni,
- materiału powierzchni,
- kąta promienia padającego (lub wypadkowej kątów i promieni),
- kąta obserwacji (lub wypadkowej kątów i promieni),
- chromatyczności światła,
- polaryzacji światła,
- koherencji światła.

Światło padające na detektor kamery po przetworzeniu tworzy obraz, którego jakość w systemach wizyjnych jest inaczej definiowana aniżeli w fotografii. W ujęciu socjologicznym jakość obrazów oceniana jest według atrybutów preferencyjnych i estetycznych, z ograniczeniem atrybutów emocjonalnych fotografującego i odbiorcy [140]. W przypadku jakości obrazów do automatycznej analizy, znacznie bardziej użyteczne są kryteria poprawności geometrycznej, kontrastu, ostrości, odwzorowania kolorów albo wynikające z teorii informacji. W ujęciu ostatnim ważna jest maksymalizacja informacyjna odpowiedzi optycznej, której pojemność informacyjna wynika z przestrzeni różnorodności, jak również zdolności wyróżniania przez system odbiorczy.

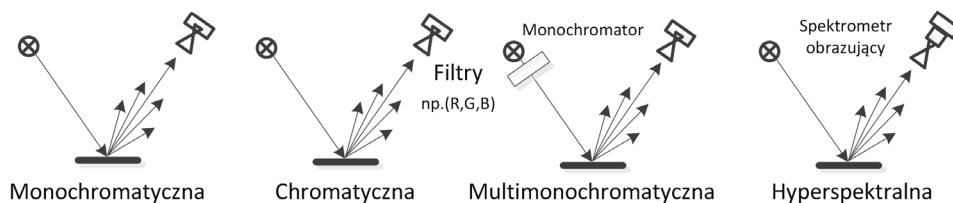
Ponieważ parametry materiałowe, geometryczne i powierzchniowe obiektu są zadane i stałe, więc głównymi zmiennymi zadania optymalizacyjnego stają się parametry

układu pobudzania optycznego oraz rejestracji odpowiedzi. Stopnie swobody w projektowaniu takich układów dotyczą układów oświetlania i rejestrowania obrazów. Przed próbą doboru/optymalizacji komponentów niezbędne jest uszczegółowienie funkcji celu, tj. wprowadzonej miary informacyjnej obrazu. Przestrzeń informacyjna różnorodności obrazu dotyczy przede wszystkim rozdzielczości oraz intensywności. Rozdzielczość przestrzenna określa powierzchnię uśredniania informacji w dyskretyzacji sygnału. Intensywność jest skwantowana amplitudowo, a dodatkowo ograniczona dynamicznie, ze względu na szумы układu oraz ograniczoną głębokość studni potencjału przetwornika obrazu i ograniczoną rozdzielczość przetwarzania A/C (np. 8/16 bit).



Rys. 2.5. Metody rejestracji obrazów w dziedzinie kierunkowości rozpraszania

Przestrzeń informacyjna obrazu może być rozszerzana przez pozyskiwanie dodatkowych obrazów, przy zmienionych warunkach kierunkowości pobudzenia i rejestracji (rys. 2.5), lub rozszerzana o składnik chromatyczny (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Metody rejestracji obrazów w dziedzinie chromatycznej

Wybór sposobu kodowania informacji wynika ze zdolności wyróżniania przez system odbiorcy, którym w przypadku systemów wizyjnej inspekcji jakości jest tor akwizycji obrazów, algorytmy przetwarzania i analizy obrazów oraz klasyfikacji cech. Wyróżnia się trzy główne metody analizy obrazów dla kontroli jakości.

Analiza intensywności (ang. *intensity*): defekty są wykrywane na podstawie progowania (segmentacji). Stosowane są metody zwiększania kontrastu, gdyż skuteczność tej metody zależy od różnicy poziomów intensywności między tłem a obiektem. Jest ona stosowana do wykrywania skaz powierzchni typu wgłębienia, wypukłości i plamy.

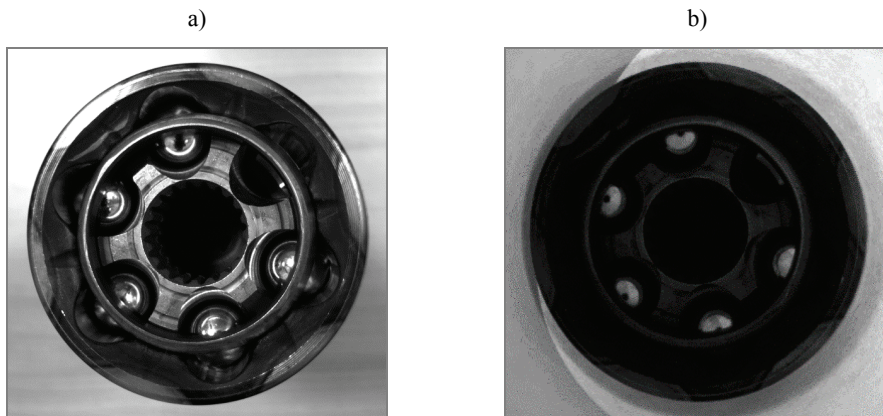
Analiza teksturowa (ang. *texture*): lokalne cechy badanej powierzchni są porównywane z referencyjnym modelem statystycznym [226]. Cechy te dotyczyć mogą róż-

nych dziedzin, np. przestrzennej, intensywności lub częstotliwościowej. Klasyfikacja oparta jest na pomiarze odległości między cechami obiektu i modelu w wielowymiarowej przestrzeni cech. Często stosowaną miarą podobieństwa jest odległość Mahanaobis, bazująca na macierzy kowariancji. Przykładem zastosowania analizy teksturowej jest kontrola jakości tekstyliów, dywanów, parkietów oraz produktów naturalnych. Analiza teksturowa jest prawdziwym wyzwaniem badawczym, gdyż bazuje na danych wielowymiarowych, przetwarzanych metodami MVA (ang. *Multivariate Data Analysis*) lub eksploracji danych (ang. *data mining*). Polemiczne jest stwierdzenie, że jest to metoda łatwa, bo oferuje bardzo obszerną wielowymiarową przestrzeń zmiennych do klasyfikacji [212], gdyż nie ilość, a jakość cech decyduje o skuteczności rozpoznawania wzorców [80].

Analiza wzoru rozproszeniowego światła (ang. *scattering*): rejestrowany jest rozkład kątowy intensywności promieniowania odbitego od powierzchni. Metoda znajduje zastosowanie do powierzchni bardzo gładkich, np. po obróbce szlifowaniem [138, 171]. Najbardziej intuicyjna, stąd najczęściej stosowana, jest analiza intensywności, której skuteczność bezpośrednio zależy od doboru metody akwizycji obrazów, a zwłaszcza metody oświetlania.

Strategie oświetlania

Strategie oświetlenia obiektu determinują odpowiedź optyczną powierzchni oraz jej elementów, tj. krawędzi i szlak. Przykład z rysunku 2.7 pokazuje, jak duże znaczenie dla osiąganego wrażenia wzrokowego odgrywa oświetlenie otaczające. Oba zdję-



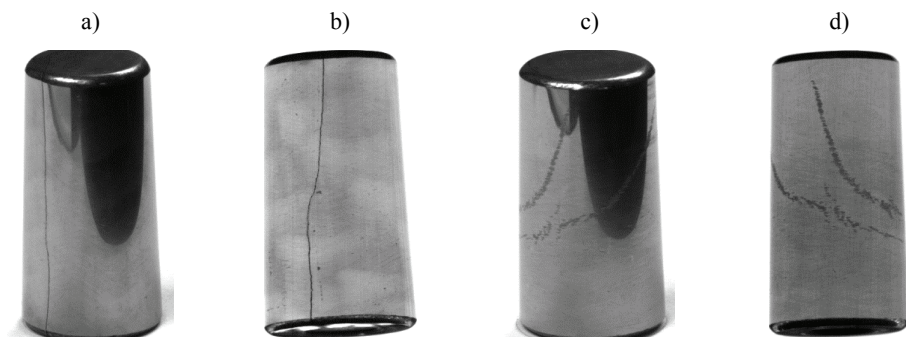
Rys. 2.7. Obiekt fotografowany w różnych warunkach oświetlenia:

a) oświetlenie biurowe, b) oświetlenie przez dyfuzor

cia zrobiono tą samą kamerą. W pierwszym przypadku zastosowano naturalne oświetlenie biurowe, w drugim przypadku obiekt został otoczony dyfuzorem z kartki papie-

ru, dla ujednolicenia oświetlenia otaczającego (globalnego). Pod kątem fotograficznego kryterium jakości, obraz (rys. 2.7b) nie pozwala dostrzec głębi obiektu, ani też zidentyfikować materiału, wobec czego zdjęcie nie jest fotorealistyczne. Jednak pod względem analizy obrazów, został on pozbawiony artefaktów świetlnych, wprowadzanych przez otoczenie, a kontrast między obiektami (kulki) i ich tłem (koszyk i bieżnia) został ujednolicony. Dlatego automatyczna analiza takiego obrazu jest dużo łatwiejsza i skuteczniejsza.

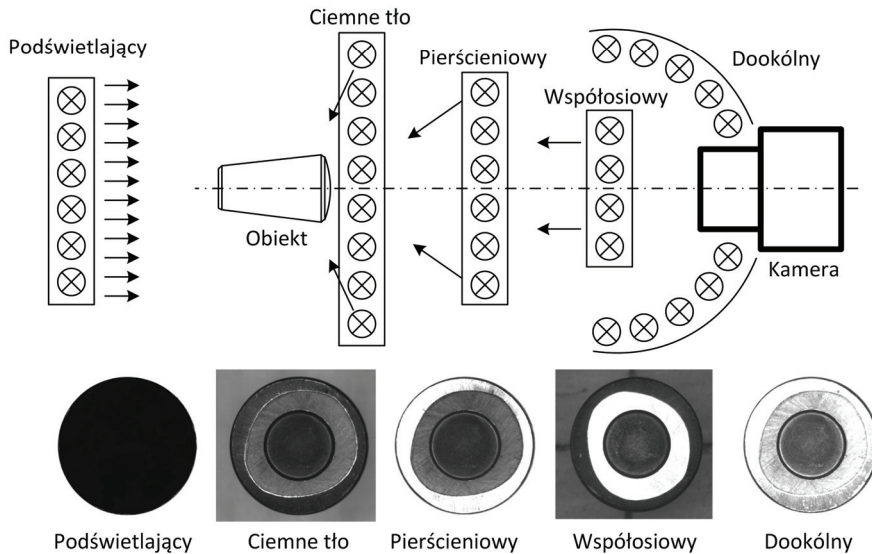
Do trudnych problemów inspekcji zalicza się powierzchnie silnie refleksyjne oraz niejednorodne geometrycznie, np. swobodne lub niejednorodne teksturowo [170]. Powierzchnie silnie refleksyjne bardzo selektywnie przekierowują promieniowanie oświetlające. Prowadzi to do przesterowania przetwornika kamery albo bardzo małego stosunku sygnał szum SNR (ang. *Signal to Noise Ratio*). Na rysunku 2.8 pokazano obrazy wałeczków łożysk tocznych, których powierzchnia tworząca charakteryzuje się chropowatością $R_a = 0,045$, co jest uzyskiwane w procesie szlifowania wieloetapowego. Gdy fotografowanie odbywa bez specjalnej metody oświetlania, na lustrzanej powierzchni uwidaczniają się elementy otoczenia, w tym oświetlacz i obiektyw kamery. W takiej sytuacji nie jest możliwe wykrywanie wad w obszarach zaciemnionych.



Rys. 2.8. Zdjęcia stożkowych wałeczków łożysk tocznych: a) i c) przy oświetleniu biurowym, b) i d) przy oświetleniu dedykowanym (patrz rys. 2.13)

Dzięki opracowaniu specjalnego oświetlacza [248] uzyskano jednorodność luminacji powierzchni, a dzięki zastosowaniu metody deflektometrii zwiększono kontrast dla wad kształtu (rys. 2.8b i d).

Podstawowe strategie i techniki oświetlania są dobrze omówione w literaturze [10]. Na wiele sposobów przedstawiany jest diagram wpływu kąta oświetlania na efekt obrazowania, pokazujący najważniejsze techniki, takie jak: podświetlanie, oświetlanie pod małym kątem, oświetlanie frontalne i współosiowe. Dodatkowo znaczenie ma stopień symetrii oświetlania względem osi obserwacji oraz szerokość rozsyłu światła i jego cechy chromatyczne, polaryzacja.



Rys. 2.9. Najważniejsze techniki oświetlania obiektów i uzyskane obrazy

W kontekście oświetlania w systemach wizyjnych fundamentalne jest stwierdzenie, że ma się do czynienia z polem bliskim oświetlacza. Oznacza to, że nie może on być rozpatrywany jako punkt rozsyłający światło, lecz jako źródło rozciągle, które oświetla powierzchnię obiektu wielokierunkowo.

W dalszej części przedstawiono przegląd najważniejszych metod oświetlania stosowanych w systemach wizyjnej kontroli jakości.

Technika podświetlania obiektu (ang. *backlight illumination*) wspiera obrazowanie absorpcji, tj. obiekt przesłania promieniowanie docierające do kamery, co tworzy jego sylwetkę, maksymalizując kontrast między krawędzią a tłem. W przypadku materiałów transparentnych wady lub struktury wewnętrzne przesłaniają światło, obrazując się jako ciemne obiekty na jasnym tle. Obrazowanie krawędzi jest podstawą pomiarów optycznych, gdyż obok adiustacji (kalibracji geometrycznej, w tym dystorsji), decyduje o niepewności metody pomiarowej [302], [169], [97]. Teoretyczna krawędź jest opisywana funkcją skokową, zatem jest nieciągła, np. jako funkcja Heaviside'a, która przyjmuje wartość 0 dla tła i wartość 1 dla obiektu

$$H(x) = f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Profil intensywności (jasności obrazu), przecinający krawędź zarejestrowaną na obrazie, jest funkcją ciągłą, o przebiegu zależnym od parametrów oświetlacza, parametrów obiektywu i kamery. Im wiązka światła podświetlającego jest lepiej skolimo-

wana (bardziej równoległa), tym zbocza krawędzi na profilu luminacji są bardziej strome [130]. Kolimowanie światła może być realizowane za pomocą telecentrycznych układów optycznych, reflektorów lub folii kolimacyjnej. Równoległa wiązka światła charakteryzuje się płaskim frontem falowym, do badania którego może być użyta kamera z mikrosoczewkami (ang. *wave front*). Jakość kolimacji wiązki zależy od dywergencji źródła i monochromatyczności promieniowania, stąd najlepsze parametry oferują źródła promieniowania laserowego. Algorytmy wykrywania krawędzi dokonują binaryzacji obrazu albo metodami gradientowymi [129] wyznaczają współrzędne jej przejścia z dokładnością podpixselową (ang. *subpixel accuracy*) [71]. Dla redukcji szumu wprowadza się algorytmy filtrujące oraz metody przesuwające punkt nieciągłości funkcji [292]. Przebieg profilu luminacji w poprzek krawędzi aproksymowany jest funkcją gaussowską [263], [170], co wymaga jednak niedopuszczenia do nasycenia przetwornika.

Technika ciemnego tła (ang. *dark field illumination*) polega na oświetlaniu powierzchni pod bardzo dużym kątem, 60–90°, względem wektora normalnej do powierzchni. Dla tak dużych kątów rozpraszanie światła, nawet na powierzchniach dyfuzyjnych, nabiera cech odbicia zwierciadlanego. Oznacza to, że do detektora, umieszczonego zgodnie z kierunkiem normalnej, dociera bardzo niewielka część energii, stąd obraz jest ciemny. Jednak wszelkie lokalne zakłócenia geometryczne, szczególnie o charakterze skokowym, wywołują rozpraszanie światła, które jest obrazowane jako rozjaśnienia. Metoda ta ma zastosowanie do wykrywania szkod powierchni i jej struktury topograficznej, np., grawerowanych oznaczeń. Jednocześnie jednak uwypuklane są również subtelne zanieczyszczenia mechaniczne (geometryczne) powierzchni, stąd powierzchnie przed inspekcją muszą być czyste. Oświetlenie typu ciemne tło stosowane jest zarówno w konfiguracji ponad-, jak i podpłaszczyznowej. Przykład takiego oświetlacza, zaprojektowanego do obrazowania powierzchni czołowej wkrętów kostnych, omówiono w rozdziale 7.3.

Oświetlenie frontalne, pierścieniowe (ang. *frontal, ring illumination*), jest najczęściej stosowaną metodą, w której powierzchnia obiektu oświetlana jest osiowo symetrycznie od strony kamery. Wielkość pierścienia emitującego umożliwia zmianę kąta incydencji światła, który decyduje o jej obrazowaniu. Dla dostosowywania takiego kąta zgodnie ze zmienną geometrią płaszczyzny wskazywane są rozwiązania z programowaną możliwością wyboru aktywnego obszaru emisji oświetlacza, co proponowane jest dla inspekcji punktów lutowniczych [145]. Należy jednak uwzględnić, że obrazowanie krawędzi dla tego typu oświetlenia będzie dostarczało różnych jej odwzorowań. Wynik zależy od kąta incydencji i szerokości wiązki, ale również od rzeczywistego, nieidealnego jej kształtu.

Wraz ze zmniejszaniem promienia pierścienia oświetlającego i współosiowym oddalaniem oświetlacza od obiektu, charakterystyka jego światłości staje się coraz bardziej równoległa. Dla zapewnienia współosiowości w niewielkiej odległości zastosowanie znajdują oświetlacze współosiowe (ang. *coaxial*). Taka charakterystyka rozsyłu

uzyskiwana jest dzięki zastosowaniu lustra półprzepuszczalnego, pełniącego rolę dzielnika optycznego wiązki (ang. *beam splitter*). W układzie takim kamera, niezależnie od zmiany kierunku normalnej powierzchni, zawsze rejestruje składową refleksyjną zgodną z kierunkiem padania światła. Dzięki temu, szczególnie dla powierzchni silnie refleksyjnych, dynamika zmiany natężenia światła odbitego w funkcji kąta jego padania i odbicia zostaje zawężona. Za przykład takiego zastosowania pokazywana jest powierzchnia folii aluminiowej z nadrukiem, cechująca się silnym refleksem. Zastosowanie oświetlenia frontального, pierścieniowego prowadzi do nasycenia przetwornika i braku możliwości kontroli poprawności nadruku.

Dla uzyskania wielokierunkowego, rozproszonego (miękkiego) oświetlenia stosowane jest oświetlenie dookólne, uzyskiwane za pomocą oświetlacza kopułkowego (ang. *dome*). Dzięki wielokierunkowości tego oświetlenia uzyskiwany jest efekt bezcieniowy, który ułatwia obrazowanie zmian absorpcyjności powierzchni. Efekt wielokierunkowości uzyskiwany jest przez rozpraszanie światła kierowanego na powierzchnię wewnętrzną półsfery, w której biegunie znajduje się otwór na obiektyw kamery.

Ważną grupę techniki iluminacji stanowi oświetlenie kierunkowe (ang. *spot*), które w przeciwieństwie do omówionych, łamie zasadę symetrii osiowej. Technika taka znajduje zastosowanie do pozyskiwania informacji o topografii powierzchni, określonej przez okluzję światła (cienie). Dla odróżnienia cieni na obrazie od absorpcyjnych, ciemnych powierzchni, stosuje się serie zdjęć z wielokierunkowym oświetleniem, np. dla odróżnienia krawędzi prawdziwej (ang. *true-edge*) od błędnej (ang. *false-edge*) [223]. Do analizy lica spoiny znajdujemy w literaturze oświetlacz składający się z czterech pierścieniowych sekcji diod LED [265]. Rozwiązanie takie umożliwiło wprowadzenie sterowanej wielokierunkowości oświetlania. W innym rozwiązaniu dla zwiększania kontrastu między obiektem sceny a jego otoczeniem zastosowano analizę sekwencji obrazów oświetlanych wielokierunkowo [161]. Technika wielokierunkowego oświetlenia ułatwia obrazowanie złożonych kształtów, np. pomiary ostrzy narzędzia do obróbki [162]. Dzięki niej możliwa jest również poprawa odporności układów analizy obrazów na zakłócenia optyczne, metodą śledzenia niezmienników sekwencji obrazów [49].

Do grupy oświetlenia kierunkowego należą również oświetlacze strukturalne, stosowane w skanowaniu 3D i 4D [98, 154, 279]. W triangulacji laserowej generowana jest płaszczyzna świetlna, która przecina powierzchnię badanego obiektu, tworząc profil kształtu. Dla „ostrego rysowania” takiego wzorca najczęściej stosuje się lasery diodowe małej mocy z soczewką cylindryczną lub soczewką Powella. Przy dużych powiększeniach należy jednak liczyć się z efektem plamkowania (ang. *speckle*), będącym wynikiem interferencji, która rozmywa krawędź linii świetlnej. Dla poprawy odporności takiej metody digitalizacji na wtórne refleksy świetlne od powierzchni swobodnych wewnętrznych, Reiner i Stankiewicz proponują metodę segmentacji predykcyjnej [252, 286]. Wiedza *a priori* o obiekcie, w postaci jego modelu CAD, jest użyta do sterowania procesem segmentacji przez dobór szerokości przedziału poszukiwania obrazu linii.

Ponadto, zastosowanie filtra Kalmana pozwoliło na poprawę odporności systemu na zakłócenia. Na powierzchniach obiektów wyświetlane są również inne wzorce geometryczne, np. kratownice, okręgi itd. Przykładowo, analiza kształtu okręgu na powierzchni umożliwiła poprawę dokładności wprowadzania boroskopu do kontroli otworów [36]. W innym przykładzie, kontroli poprawności montażu przegubów homokinetycznych, zastosowano projektor pierścieniowy w celu odróżnienia kulek łożyska od powierzchni bieżni i koszyka, co szerzej przedstawiono w rozdziale 7.2.

Dla kształtowania omówionej kierunkowości rozsyłu oświetlaczy, znajdują zastosowanie różne rozwiązania optyczne [73]:

- tradycyjna optyka refrakcyjna,
- mikrostruktury refrakcyjne,
- konwencyjne układy refleksyjne,
- reflektory fasetowe,
- optyka dyfrakcyjna.

Oprócz kierunkowości światła, istotne są jego parametry spektrometryczne oraz termiczne i mechaniczne parametry oświetlaczy. Oświetlacze LED wyparły niemal całkowicie inne źródła światła dla systemów wizyjnych, ze względu na szereg zalet w porównaniu z oświetleniem halogenowym czy fluorescencyjnym [10, 32, 177, 203].

Tabela 2.3. Porównanie parametrów źródeł światła

Parametr	LED	Halogen	Fluorescencyjne
Czas życia	●	◐	●
Elastyczność projektowa	●	◐	○
Kompaktowość	●	◐	○
Wydzielane ciepło	◐	○	●
Szybkość odpowiedzi	●	◐	○
Koszty/wydajność	◐	◐	◐
Intensywność	●	●	◐
Ekologiczność	◐	◐	◐
Sprawność	●	◐	○
Odporność na wibracje	●	◐	◐
Możliwość przyciemniania	●	◐	◐
Wierność odtwarzania koloru	◐	●	◐

● – bardzo dobry, ● – dobry, ◐ – dostateczny, ◐ – dopuszczający, ○ – niedostateczny

Jak wynika z zestawienia w tabeli 2.3, parametry diod LED są wyraźnie lepsze od źródeł halogenowych czy fluorescencyjnych, ustępując jedynie w wierności odtwarzania kolorów i ilości wydzielanego ciepła. Ich cenną cechą jest elastyczność projektowa, dzięki której, w łatwy sposób, można opracowywać i wykonywać układy oświetlające dla systemów wizyjnych.

Zagadnienie akwizycji obrazów wskazuje, że najważniejszym elementem ich projektowania jest ukształtowanie charakterystyki oświetlenia w dziedzinie kierunku rozpraszania lub spektralnej. Projektowanie takie musi uwzględniać jednak koszt, nie tylko pozyskania obrazów, ale również ich przetwarzania w czasie rzeczywistym, wynikającym z procesu technologicznego. Gdy dobór podstawowych technik oświetlenia nie spełnia wymagań, wówczas podejmowane jest projektowanie układów specjalizowanych, które oparte są przede wszystkim na diodach LED.

2.5. Otoczenie i zakłócenia

Nieprawidłowości działania systemów wizyjnych najczęściej objawiają się podczas ich wdrażania, kiedy opracowane rozwiązania zostają przeniesione do środowiska produkcyjnego i poddane zakłóceniom. W ramach analizy zakłóceń zewnętrznych zidentyfikowano pięć kategorii niepożądanych oddziaływań na systemy wizyjne:

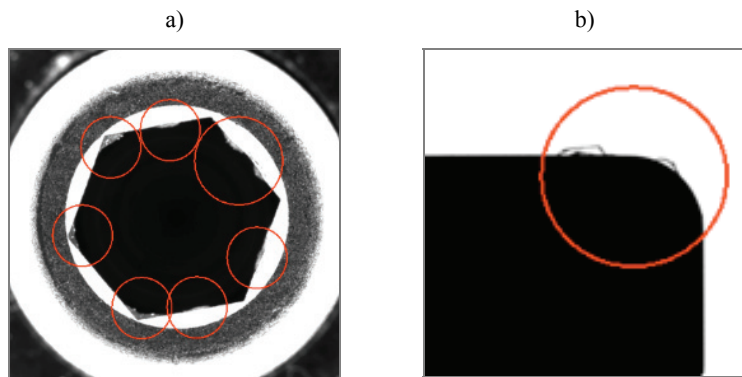
- światło zewnętrzne,
- zanieczyszczenia powierzchni badanych lub powierzchni elementów torów optycznych przez cząstki stałe lub ciecze,
- wpływ wibracji i uderów,
- zmiany temperatury,
- zakłócenia elektromagnetyczne.

Oświetlenie zewnętrzne wpadające przez okna, świetliki dachowe lub wewnętrzne oświetlenie hali w istotny sposób potrafi zakłócić działanie systemów wizyjnych. Problem taki jest ściśle związany z miejscem posadowienia stanowiska inspekcyjnego, a w przypadku światła słonecznego zależny również od warunków atmosferycznych i pory roku. Jego minimalizacja jest jednak stosunkowo prosta, przez stosowanie obudów lub osłon przestrzeni akwizycji obrazów albo selektywne chromatyczne oświetlanie i rejestrację obrazów przez filtry pasmowo-przepustowe.

Znacznie trudniejszym problemem jest zapewnienie czystości kontrolowanych powierzchni oraz torów optycznych. Obróbka ubytkowa wiąże się z pozostałościami wiórów, drobinek materiału lub ścierniwa oraz pozostałościami cieczy chłodzących. Zwykle w procesie technologicznym występuje operacja oczyszczania lub pasywacji powierzchni, która również może być przyczyną zalegania pozostałości ścierniwa w zagnieżdżeniach. Gdy do zadanej czystości wyrobu dąży się dopiero na końcu procesu, problematyczna staje się procesowa kontrola wizyjna, bardzo czuła na zabrudzenia powierzchni.

Przyczyną zanieczyszczeń na powierzchniach obiektów mogą być również włókna (rys. 2.10b), które pochodzą od rękawic lub ubrania ochronnego, środków czystości

lub wyściółek palet transportowych. Prowadzenie produkcji w pomieszczeniach *clean room* wyraźnie podnosi jej koszty, stąd decyzja o takich warunkach prowadzenia procesu musi być uzasadniona ekonomicznie. W kontekście zanieczyszczeń należy również zwrócić uwagę na skuteczność osłon i filtracji podczas obróbki z użyciem środków chłodząco-konserwujących. Jeśli jest ona niewystarczająca, to wokół urządzenia unosi się mgła, co skutkuje zanieczyszczeniem powierzchni optycznych, w konsekwencji pogarszając ich transmisyjność.



Rys. 2.10. Przykłady zakłóceń:

a) zanieczyszczenia w gnieździe pod klucz (korund), b) włókna na łbie wkręta

Środowisko produkcyjne jest źródłem wibracji, a często również uderów. Fale wibroakustyczne przenoszą się głównie przez ośrodki stałe (podłogę), ale również przez powietrze. Ponadto, każdy układ mechaniczny, w tym zarówno wysięgniki do mocowania kamer, oświetlaczy i kontrolowanego obiektu, charakteryzują drgania własne, których amplituda zależy od parametrów konstrukcyjnych. Problem ten, dla długiego czasu ekspozycji wywołuje rozmycie obrazu (ang. *image blurr*), w przypadku zaś wysokorozdzielczych kamer, działających w trybie przesuwnej migawki elektronicznej (ang. *rolling shutter*), krawędź na obrazie, zgodna z kierunkiem skanowania, zostaje zniekształcona. Znaczną, choć krótkotrwałą energię niosą uderzy, które mogą prowadzić do uszkodzenia układów elektronicznych, a zwłaszcza dysków twardych komputera.

Efekty zmiany temperatury w pierwszej kolejności są dostrzegalne dla oświetlaczy LED. Ich charakterystyki światłości silnie zależą od temperatury złącza, a ta od skuteczności chłodzenia. Temperatura złącza decyduje również o prądzie przepływającym przez diodę i spadku napięcia na złączu, stąd wymagana jest stabilizacja prądu diody. Ponadto, temperatura złącza diody LED decyduje o jej żywotności. W dalszej kolejności należy zwrócić uwagę na efekty związane z rozszerzalnością linową, której oddziaływanie dotyczy zarówno mierzonych obiektów, wzorców kalibracyjnych, elementów konstrukcyjnych oraz układów optycznych (tubusy obiektywów).

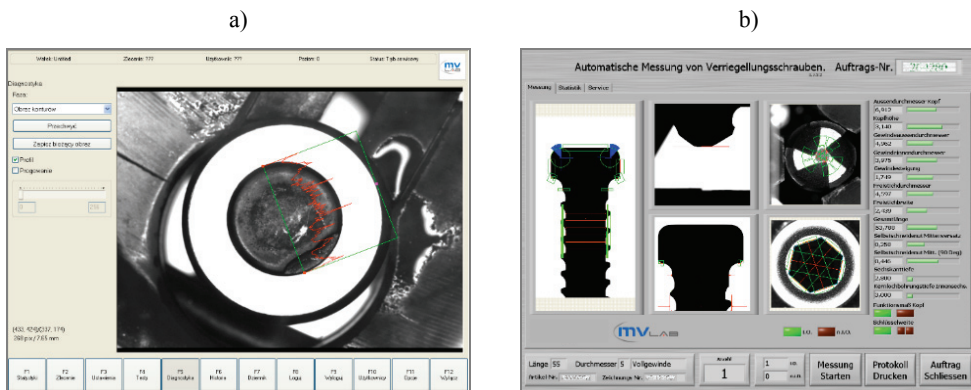
Zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej dotyczą emisyjności i podatności na energię przekazywaną przez falę elektromagnetyczną. W środowisku produkcyjnym istnieje wiele odbiorników dużej mocy, które, szczególnie przy sterowaniu impulsowym, są źródłem silnej emisyjności. Na emisyjność taką narażone są sieci komunikacyjne, w tym transmisji obrazów. Jeśli transmisja odbywa się w trybie asynchronicznym, tj. bez potwierdzeń, dla zwiększenia przepustowości interfejsu, to występuje zagrożenie zakłócenia danych pomiarowych (obrazów).

Zapewnienie odporności systemów wizyjnych w wymienionym zakresie wynika z dążenia do integracji, tj. kontroli procesowej. Oznacza to, że urządzenia inspekcji wizyjnej powinny pracować w hali produkcyjnej, nie zaś w czystych i klimatyzowanych laboratoriach metrologicznych.

2.6. Użytkownik systemów wizyjnych

Podczas fazy eksploatacji urządzenia dominującą rolę przejmuje operator. Istotne jest zatem, aby wymagana wiedza do obsługi urządzenia bądź parametryzacji była adekwatna do jego przygotowania. Celowe i konieczne jest zatem ograniczenie uprawnień i dostosowanie ich do roli operatora:

- poziom 0: jedynie wizualizacja wyników,
- poziom I: aktywowanie/deaktywowanie funkcji inspekcyjno-pomiarowych,
- poziom II: zmiany parametrów technologicznych, np. długości, średnice, pola tolerancji,
- poziom III: modyfikacje parametrów akwizycji obrazów, np.: ekspozycja, i ich przetwarzania np.: progowanie.



Rys. 2.11. Przykłady interfejsów operatora systemów wizyjnej inspekcji jakości:
a) czoła wałeczków łożysk, b) wkręty kostne

Zgodnie z wymaganiami systemu zarządzania jakością, wszelkie modyfikacje parametrów technologicznych muszą być rejestrowane. Najbardziej niebezpieczne ze względu na niezawodność systemu są modyfikacje w zakresie parametryzacji akwizycji i działania algorytmów, tj. na poziomie III. Jeśli nowe parametry nie były wprowadzone przez projektanta systemu, należy sądzić, że nie przewidział on potrzeby ich stosowania, stąd system nie został przebadany, co do skutków ich wprowadzenia. Zmiana może wprawdzie wprowadzać poprawę lokalną, ale trudno przewidywać, jak wpłynie na pozostałe funkcje systemu.

Udostępnienie modyfikacji na poziomie III jest tym częstsze, im dojrzałość systemu gorsza, tj. projektant miał niewystarczającą wiedzę o zmienności procesu, a jednocześnie zbyt mało czasu na zdobycie tej wiedzy podczas jego testowania.

Systemy kontrolno-pomiarowe oferują zwykle interfejs użytkownika GUI (ang. *Graphical User Interface*) dużo bardziej rozbudowany jak urządzenia automatyzacji wytwarzania. Jest to uzasadnione łatwiejszym diagnozowaniem nieprawidłowości rejestracji obrazu przez kamerę oraz możliwościami prezentacji wyników pomiarowych i parametryzacji ich działania.

Wizualizacja rejestrowanego obrazu, wraz z ilościową oceną jego parametrów (profil, histogram) umożliwiają szybkie zdiagnozowanie przyczyny nieprawidłowości. Drugim zakresem prezentacji są wyniki klasyfikacji i pomiarów, które po przetworzeniu statystycznym są źródłem informacji o procesie.

2.7. Wdrażanie systemów kontroli wizyjnej

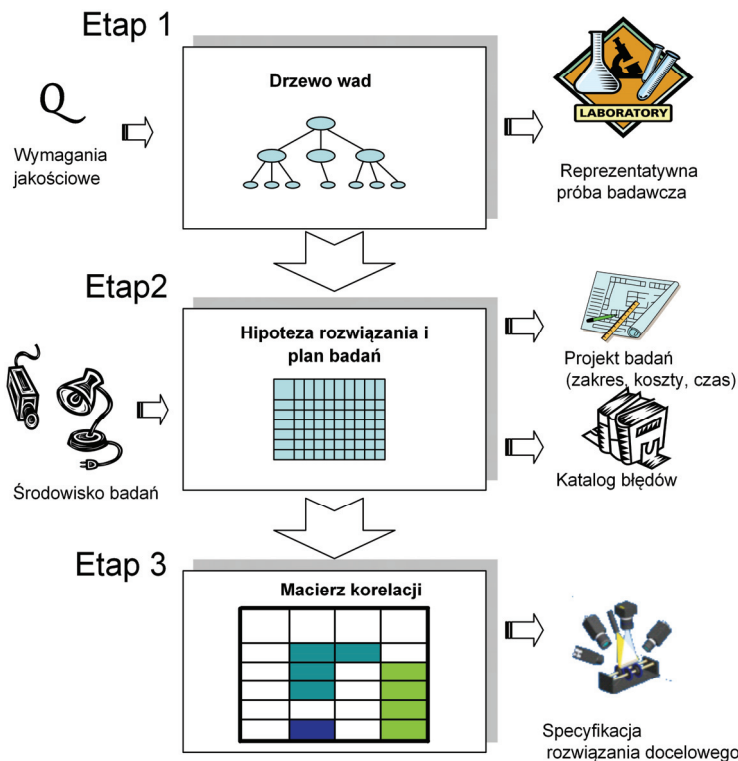
Urządzenie inspekcyjne jest realizacją metody akwizycji i implementacją algorytmów analizy obrazów. Dla działania automatycznego wymaga się integracji z procesem wytwórczym (*on-line*), tj. przepływem materiału i danych produkcyjnych. Stąd ważne zadanie odgrywają układy manipulacji obiektem, jego pozycjonowania względem układu akwizycji oraz układy rozdzielające i separujące, a dla procesu zarządzania danymi produkcyjnymi, komunikacja i protokoły sieciowe oraz serwery danych.

Nadrzędne, tzw. meta, wymagania dla systemu wizyjnego [174] obejmują jego: poprawność działania, niezawodność i odporność. Elementem bezpośrednio związanym z maszyną jest jej walidacja, której zakres zależy od wytwarzanych produktów. W zakresie najwęższym jest to deklaracja zgodności CE [6, 7, 8] i testy poprawności działania. Ich sformalizowany przebieg określa analiza zdolności systemów pomiarowych MSA (ang. *Measurement System Analysis*) bądź VDA 5 (niem. *Verband der Automobilindustrie*, Band 5). Zalecenia te wskazują na minimalną rozdzielczość pomiarową systemów oraz sposób wyznaczenia i kryteria akceptacji dla powtarzalności i odtwarzalności metody pomiarowej GR&R (ang. *Gage Repeatability and Reproducibility*).

Istotna jest również problematyka utrzymania ruchu (ang. *maintenance*), zapewniająca jak największą dostępność. Stąd, zgodnie ze strategią prewencyjnego utrzymania ruchu TPM (ang. *Total Productive Maintenance*), wprowadza się monitorowanie parametrów, analizę trendów, autodiagnostykę i autokalibrację oraz zdalny serwis i monitorowanie (teleserwis i telediagnostyka). Przykładowe rozwiązania wdrożeń, dotyczące kontroli czoł wałeczków łożysk tocznych, przegubów homokinetycznych oraz wkrętów kostnych, scharakteryzowano w rozdziale 7.

2.8. Projektowanie systemów wizyjnych

Gromadzenie wiedzy o procesie kontroli w dziedzinie optycznej jest fundamentalnym wymaganiem do osiągnięcia sukcesu projektowego. Zwykle jednak, początkowa liczba wad, ich przykłady i charakterystyka są niepełne, stąd niereprezentatywne. Do wsparcia tego procesu opracowano metodykę studium wykonalności projektów systemów wizyjnych [247].



Rys. 2.12. Schemat metodyki studium wykonalności MV [247]

Zgodnie z diagramem na rysunku 2.12 w pierwszym etapie budowane jest drzewo wad na podstawie wiedzy teoretycznej o wadach powierzchni, np.: powierzchnie metalowe po obróbce skrawaniem, szkło, drewno, które rozszerzane jest o charakterystykę technologiczną i jakościową. W ten sposób opisywane są założenia dla przykładów granicznych. Następnie przyporządkowywane są dostępne rzeczywiste przykłady wad i podejmowane działania w kierunku uzupełnienia brakujących przykładów.

W drugim etapie najpierw powstaje koncepcja rozwiązania, u której podstaw leży cel i kryteria jakościowe kontroli. Przykładowo, jeśli są to pomiary optyczne, np. średnica wałka, istotne jest ustalenie strategii pomiaru, ocena krawędzi, a następnie dobór i zaprojektowanie metody przetwarzania obrazów i ich pozyskiwania. W przypadku wad powierzchni, problem jest znacznie rozleglejszy ze względu na licznosc wad, trudności ich charakteryzacji geometryczno-optycznej oraz ograniczone możliwości preparowania fizycznych przykładów wad.

W kolejnym kroku prowadzony jest eksperyment lub eksperymenty akwizycji obrazów oraz ich wstępnej oceny. Podstawą takich eksperymentów są fizyczne przykłady obiektów oraz opracowanie stanowiska badawczego. Pierwszym etapem projektowania układu akwizycji jest ustalenie parametrów i pozycji sensora oraz parametrów obiektywu, zapewniających projekcję interesujących powierzchni trójwymiarowej sceny na płaszczyznę detektora. W analizie problemu wystarczające jest użycie modelu soczewki cienkiej, mimo że zaniedbuje on kilka błędów wprowadzanych przez układy rzeczywiste. Dobór oświetlenia, jak podkreślono, omawiając problematykę akwizycji obrazów, jest najbardziej wymagającym zadaniem. Czy rzeczywiście intuicja i eksperymentowanie są ciągle podstawą projektowania i optymalizacji oświetlenia w systemach wizyjnych jak wskazują K. Harding [113] i F. Pernkopf i P. O’Leary [221]?

Dalej omówiono wybrane przykłady doboru bądź projektowania układu oświetlającego dla systemów wizyjnych.

W przykładzie doboru oświetlacza dla miedzianych elektrod [47], G. Byrne i C. Sheahan opierali się na doniesieniach literaturowych, wybierając oświetlacz frontalny o dużej intensywności. Wybór taki nie jest optymalny, gdyż powierzchnie galwanizowane charakteryzują się silną refleksyjnością. Odbicie zwierciadlane prowadzi do nasycania przetwornika, zatem utraty informacji, co jest zauważalne na pokazanych przez autorów obrazach. Badany zacisk zawiera ponadto powierzchnie swobodne, co oznacza, że kierunek wektora normalnej powierzchni się zmienia, a w takim przypadku jest uzasadnione stosowanie światła wielokierunkowego i rozproszonego.

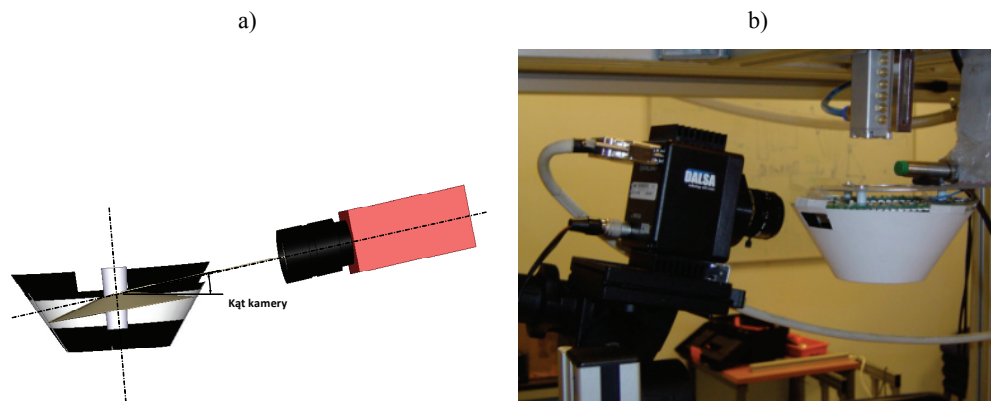
W innym przykładzie wykrywania mikrowad w płytkach krzemowych [56] stwierdzono, że po wypróbowaniu dostępnych oświetlaczy (ang. *ring*, *fiber-spot* i *backlight*) uzasadnione było zaprojektowanie własnego oświetlacza diodowego dla zakresu NIR. Z doniesienia wynika, że oświetlacz zbudowano na wzór kopułkowego, ale rozmieszczając 32 diody LED bezpośrednio na sferze, nie podając paramet-

trów światłości diod. Na przedstawionym zdjęciu widać, że są to diody soczewkowe, co wskazuje na wąską ich charakterystykę światłości. W związku z tym, należy wnioskować, że zapewnienie równomierności oświetlenia powierzchni błyszczącej płytki nie jest możliwe, a ponadto pojawia się problem silnych refleksów. Odpowiedzią na trudności w oświetleniu powierzchni swobodnych i błyszczących jest propozycja oświetlacza programowanego, wielokierunkowego [274]. Umożliwia on zmianę kątów padania światła przez wybór aktywowanej diody LED, co nazwane zostało oświetleniem adaptacyjnym.

W literaturze problemu znajdują się przykłady metodycznego podejścia do optymalizacji układów akwizycji, bazujące na metodach planowania eksperymentu DoE (ang. *Design of Experiments*) [188]. Jeden z przykładów przedstawia zastosowanie DoE do maksymalizacji poprawności rozróżniania obecności powłoki galwanicznej [47]. Przedstawiony przykład eksperymentu DoE ogranicza się do testowania dwupoziomowego trzech parametrów: odległości kamery od obiektu, w niewielkim zakresie zmienności, typu pokrycia (z pokryciem i bez) oraz czasu ekspozycji. System wizyjny traktowany jest jak *black-box*, stąd wyciągane wnioski są ogólne i niestety nieprecyzyjne. Czas ekspozycji wpływa wprawdzie na czas cyklu inspekcji, ale ekspozycja może być również skracana przez zwiększenie apertury (f-stop) lub czułości (ISO). Jednak, w rzeczywistości, ocenie podlegała różnica kolorów, która w badanym przykładzie zależy od parametrów powierzchni, parametrów oświetlenia oraz metody analizy i klasyfikacji. W takiej sytuacji nasuwa się wątpliwość, czy przeprowadzona analiza DoE umożliwia rzeczywiście zoptymalizowanie projektowanego systemu, czy potwierdziła jedynie wiedzę ogólną.

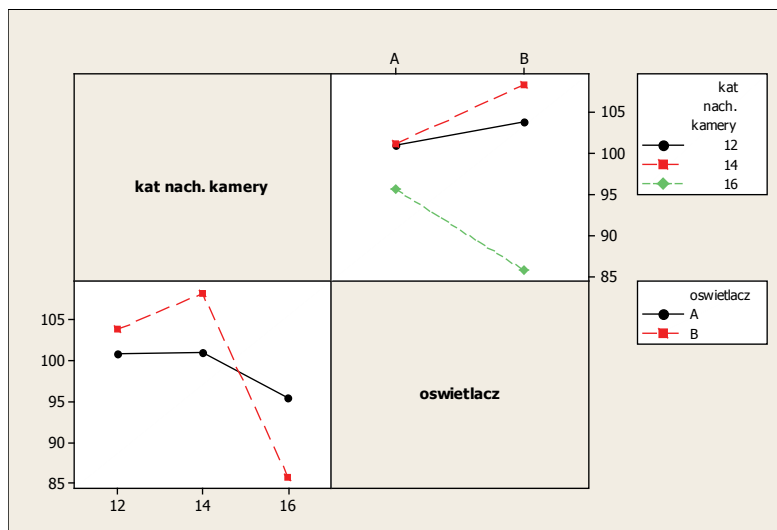
Inny przykład literaturowy dotyczy eksperymentalnej optymalizacji układu akwizycji obrazów do kontroli geometrycznej i strukturalnej płyty montażowej w zakresie dokładności. Zmienność układu dotyczy 6 czynników zdefiniowanych na dwóch poziomach: światło od otoczenia, odległość kamery od obiektu, chropowatość powierzchni oraz apertura i migawka. Każdy z eksperymentów powtórzono dla jednego z trzech specjalnie zaprojektowanych oświetlaczy. Wyniki pomiarów optycznych porównywano z wynikami pomiarów techniką współrzędnościową. W ten sposób zidentyfikowano, że krytyczne parametry to: oświetlenie zewnętrzne, odległość od obiektu, chropowatość powierzchni oraz czas migawki. Jednocześnie zauważono silną interakcję między oświetleniem zewnętrznym a czasem migawki, co umożliwiło zoptymalizowanie procesu akwizycji [348].

Dla zaprojektowanego układu oświetlacza specjalnego dla powierzchni tworzącej wałeczków łożysk tocznych [249, 250], zaplanowano eksperyment identyfikacyjny zgodnie z DoE. Badania miały na celu analizę wpływu materiału dyfuzora oświetlacza oraz kąta obserwacji kamery na kontrast między wadą a jej otoczeniem, gdzie materiał A był bardziej rozpraszający niż materiał B.



Rys. 2.13. Stanowisko badawcze wałeczków łożysk tocznych: a) schemat, b) zdjęcie

Plan eksperymentu obejmował zatem dwa czynniki: dwa rodzaje materiału rozpraszającego, zaś kąt kamery zmieniano na trzech poziomach 12, 14 i 16 stopni.



Rys. 2.14. Interakcje między czynnikami DoE

Na podstawie analizy efektów głównych dla średniej arytmetycznej średniej szarości oraz odchylenia standardowego szarości, wytypowano optymalne parametry układu oświetlenia i akwizycji: oświetlacz B – matowy; kąt nachylenia kamery – 14 stopni.

Podsumowując podane przykłady zastosowania DoE dla identyfikacji i optymalizacji układów obrazowania systemów wizyjnych, można stwierdzić, że pozwalają one wprawdzie rozszerzyć wiedzę o procesie, ale są kosztowne. Wynika to z potrzeby

budowania specjalnych stanowisk i oświetlaczy oraz zgodnie z metodyką DoE przeprowadzenia wielu eksperymentów. Dla ich niezależności stosowana jest randomizacja, która dodatkowo komplikuje przebieg badania. Stąd podejście takie wypierane jest przez poszukiwania heurystyczne oraz badania jednoczynnikowe, mimo że nie pozwalają one na wykrycie interakcji.

2.9. Symulacje w projektowaniu oświetlenia

Jednym z przykładów zastosowania modelowania i symulacji w projektowaniu jest badanie okluzji, tj. przesłaniania w układach oświetlających i obrazujących. Problem ten jest szczególnie istotny w skanowaniu 3D obiektów o dużej dynamice zmian wysokości. Występuje tu zarówno przesłanianie wiązki oświetlającej, jak i przesłanianie pola widzenia. Dla planowania widoku kamery znajdują zastosowanie algorytmy bazujące na teorii zbiorów, teorii grafów i obliczenia geometryczne. Jednak autorzy podkreślają potrzebę znacznej poprawy ich wydajności, dokładności i odporności. [264]. Na podstawie modelu CAD obiektu automatycznie wyznaczana jest pozycja kamery, gdy okluzja jest najmniejsza, lub dobierany jest minimalny zestaw widoków, aby cała powierzchnia obiektu była wizualizowana [308]. Za pomocą metod symulacyjnych wyznaczana jest niepewność skanowania przestrzennego metodą światła strukturalnego [323].

Zadaniem znacznie trudniejszym od planowania geometrycznego pozycji sensora wskazywane jest zagadnienie oświetlania, oraz problem obrazowania, gdyż wymaga wiedzy o fotometrii i radiometrii w polu bliskim [301], jak również wiedzy o rozpraszaniu światła na powierzchniach.

Symulacje propagacji światła znajdują powszechne zastosowanie w projektowaniu układów obrazujących i oświetleniowych, oświetlenia miejsc pracy i oświetlenia dekoracyjnego. Szczególnie użycie diod LED pozwala znacznie precyzyjniej kształtować rozsył światła opraw oświetleniowych. W literaturze raportowanych jest bardzo wiele przykładów projektowania układów oświetleniowych opartych na diodach LED z zastosowaniem narzędzi symulacyjnych [93, 190–193, 231, 294, 295, 314, 325].

Przykładowo, asymetryczny rozkład światłości oprawy lampy drogowej, ma spełniać wymagania normy, a jednocześnie oświetlać wyłącznie powierzchnię drogi i chodnika, zapewniając równomierne napromieniowanie. W ten sposób podniesiona zostaje sprawność układu oświetleniowego, zwłaszcza jeśli jest ona liczona w kontekście zużycia energii (kosztów) na jednostkę powierzchni drogi. Dla kształtowania takiego asymetrycznego rozkładu światłości zestawu diod LED dużej mocy, opracowano układ soczewkowy [61] oraz alternatywny układ z użyciem odbłyśników [60]. Komplementarnym zagadnieniem w przypadku projektowania układów LED jest zarządza-

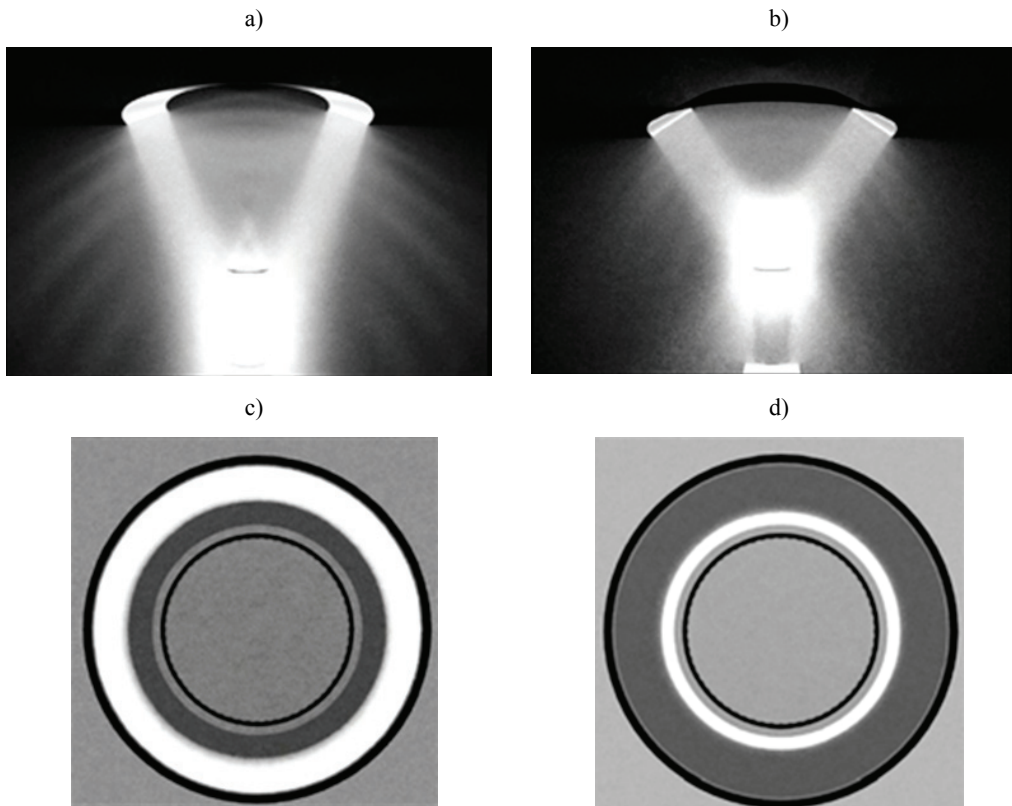
nie termiką. Opracowano projekt radiatora lampy drogowej o zwiększonej sprawności [62]. W innym, zrealizowanym projekcie, opracowano zintegrowaną lampę LED dla pojazdów oraz lampę pozycyjną z przewodem świetlnym. Do zaprojektowania podanych układów oświetleniowych użyto narzędzi symulacji optycznych. Zebrane doświadczenia umożliwiły sformułowanie metodyki projektowania układów oświetleniowych z użyciem narzędzi CAE [242].

W kontekście projektowania układu oświetlającego dla systemów wizyjnych znajdujemy przykład optymalizacji profilu intensywności oświetlenia powierzchni, dla skanowania kamerami liniowymi. Zaproponowano zastosowanie teorii regularyzacji i estymacji średniokwadratowej [139]. Układ oświetleniowy został zamodelowany analitycznie i jest optymalizowany jako funkcja sześciu zmiennych: pozycji, kierunku i intensywności. Przyjęto jednak bardzo istotne uproszczenia, gdyż charakterystyka źródła światła jest modelowana jako Lambertowska, co nie jest zgodne z charakterystykami oświetlaczy MV, a ponadto analizowany jest rozkład natężenia światła na powierzchni, a nie radiancja rejestrowa przez kamerę. Wirtualne projektowanie systemów wizyjnych wymaga obrazowanie powierzchni podlegającej kontroli lub pomiarom.

Projektowanie oparte na modelu CAD zastosowano do eksperymentalnej oceny efektów oświetlenia części do automatycznego montażu [141]. W innym projekcie pokazano możliwość weryfikacji działania metody deflektometrii dla zwiększenia kontrastu wad geometrycznych na powierzchniach silnie refleksyjnych [266–269]. W obu przykładach przyjęto jednak uproszczone, nierzeczywiste modele rozsyłu światła oraz jego rozpraszania na powierzchniach. Podobnie jak w przykładzie akwizycji obrazów wad metodą prześwietlania [181], źródło promieniowania jest modelowane jako punktowe, więc nie uwzględnia rozpraszania wiązki rzutowanej na detektor. W celu ograniczenia złożoności obliczeniowej modelu, na obrazy rzeczywiste X-ray nakładane są obrazy symulacyjne. Model sceny wraz z oświetleniem ma zastosowanie również w procesie segmentacji [162, 168]. Autorzy zwracają jednak uwagę na złożoność takiego podejścia, mimo że nie analizują problemu zmienności materiałowej i technologicznej wyrobów.

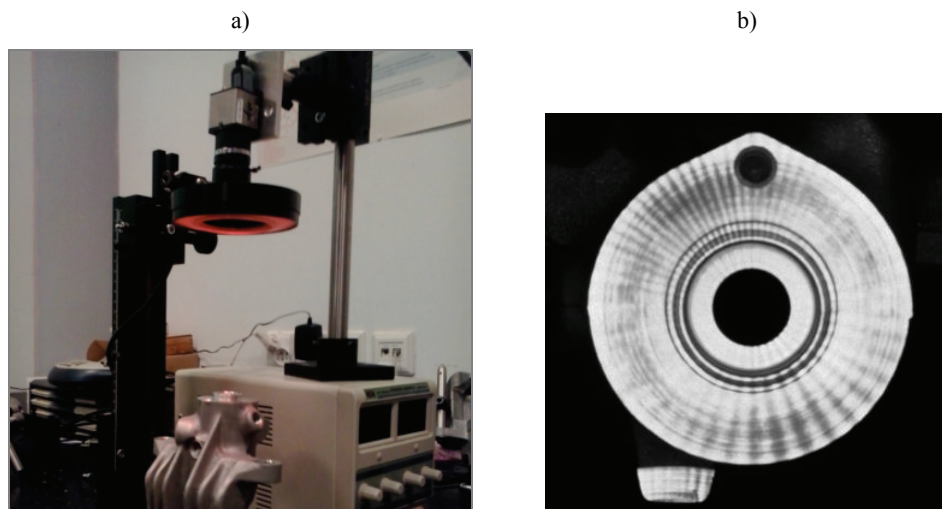
W publikacji *Rendering for machine vision prototyping* [240] autor opisał wyniki kształtowania charakterystyki oświetlaczy dla systemów wizyjnych przez zmianę ich geometrii oraz zmianę charakterystyki światłości powierzchni emitującej światło. Przedstawione na rysunku 2.15 obrazy pokazują niepełne oświetlenie powierzchni, co jest wynikiem zbyt wąskiej charakterystyki światłości lub nieprecyzyjnego jego kierowania. W ramach badań podjęto kształtowanie charakterystyki kierunkowej oświetlacza przez kształtowanie charakterystyk optycznych i kierunkowych poszczególnych emiterów. Brak narzędzi do weryfikacji opracowanych modeli uniemożliwił jednak ich ocenę oraz odniesienie do obiektów rzeczywistych. Podobne zastosowanie metod grafiki komputerowej przez Ko i in. nie rozwiązuje sformułowanych problemów [146]. Gruna i Irgenfrie proponują zastosowanie metod sy-

mulacyjnych do rozwoju systemów dla inspekcji płytek PCB oraz nawigacji robota [109, 127].

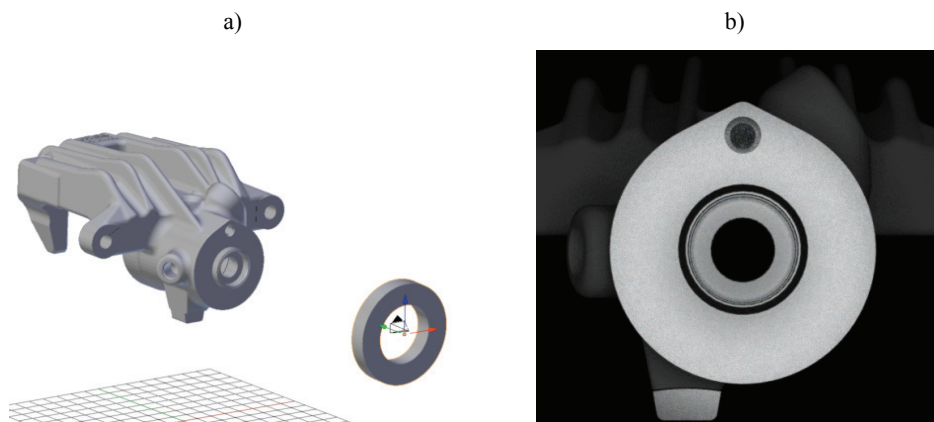


Rys. 2.15. Charakterystyki oświetlacza kształtowane geometrycznie oraz uzyskiwane obrazy:
a) i c) zbyt szeroko kierowany strumień świetlny, b) i d) zbyt wąsko [240]

Dla porównania wyników symulacji komputerowej propagacji światła z wynikami akwizycji obrazów, zestawiono stanowisko, jak pokazano na rys. 2.16a. Użyto kamery CMOS z oświetlaczem pierścieniowym Ring_LED. Za przykład obiektu do obrazowania wybrano element aluminiowy po obróbce – zacisk hamulcowy. Użyty obraz powierzchni czołowej po toczeniu przedstawiono na rys. 2.16b. Następnie opracowano model geometryczny układu akwizycji, odwzorowując układ rzeczywisty, korzystając z modelu CAD obiektu mechanicznego. Parametry optyczne powierzchni oraz parametry źródła światła sparametryzowano jako standardowe, tj. o charakterystykach lambertowskich. Uzyskany obraz syntetyczny pokazano na rys. 2.17b.



Rys. 2.16. Akwizycja obrazu zacisku hamulcowego: a) stanowisko, b) uzyskany obraz [329]



Rys. 2.17. Modelowanie akwizycji powierzchni zacisku hamulcowego:
a) model symulacyjny, b) wyrenderowany obraz [329]

Na obu obrazach (rys. 2.16b i 2.17b) widać różnice obejmujące:

1. Niejednorodność intensywności na powierzchni czołowej

Na powierzchni czołowej zacisku, na obrazie z kamery rzeczywistej, widoczne są radialne różnice intensywności. Ich przyczyną mogą być niejednorodności optyczne powierzchni powodowane zmianami geometrycznymi (np. falistość) lub niejednakową chropowatością bądź absorpcyjnością, np. utlenienie powierzchni. Efekt ten może być również powodowany niejednorodnością charakterystyki oświetlacza, zbudowanego z punktowych elementów świetlnych ułożonych promieniście po okręgach.

2. Różnica obrazowania pierścieni i fazek wokół otworu środkowego

Na obrazie renderowanym widoczne są ostre, kontrastowe pierścienie, w przeciwieństwie do obrazu rzeczywistego, gdzie pierścieni jest więcej. Zakładając poprawność odwzorowania geometrycznego obiektu, efekt ten należy tłumaczyć niepoprawnością parametryzacji powierzchni pierścieni lub różnicą charakterystyki rozsyłu światła między oświetlaczem rzeczywistym a wirtualnym. Należy również poddać szczegółowej analizie zgodność geometryczną obu powierzchni fazek, gdyż mimo iż mieszczą się w granicach tolerancji konstrukcyjno-technologicznej, różnice optyczne mogą być aż tak widoczne.

3. Wady krawędzi zewnętrznej

Po prawej stronie obrazu rzeczywistego, na krawędzi zewnętrznej widoczny jest uskok. Prawdopodobną jego przyczyną jest odstępstwo geometryczne między modelem referencyjnym a obiektem rzeczywistym z wadą.

4. W tle obrazu widoczne dalsze powierzchnie

W tle obrazu syntetycznego widoczne są dalsze powierzchnie badanego obiektu. Efekt taki wystąpi, gdy liniowość obu przetworników będzie różna (korekcja gamma) lub będą się one różniły zakresem dynamicznym. Przyczyną może być również oświetlacz wirtualny, lepiej doświetlający powierzchnie odległe lub emitujący niższe natężenie światła w kierunku osi symetrii.

Efekty osiągnięte przez grafików komputerowych, stosujących takie samo oprogramowanie, są daleko bardziej fotorealistyczne. Przy większym doświadczeniu, możliwe jest bowiem tworzenie obrazów tak doskonałych, że to właśnie ich perfekcjonizm jest jedyną przesłanką umożliwiającą odróżnienie ich od obrazów fotograficznych. Nie o taką fotorealizację obrazów jednak chodzi w projektowaniu systemów wizyjnej inspekcji jakości. Najważniejsza jest zgodność między wirtualnymi i rzeczywistymi komponentami systemów wizyjnych i wiedza o parametrach modeli symulacyjnych, na podstawie której będą mogły być wytworzone obiekty rzeczywiste, np. oświetlacze. Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne wskazują, że możliwe będzie spełnienie podanych celów.

2.10. Podsumowanie

Analiza skuteczności kontroli wizualnej prowadzonej przez człowieka wykazuje, że nie zapewnia ona oczekiwanej powtarzalności i odtwarzalności, dlatego konieczna jest jej automatyzacja. W tym celu znajdują zastosowanie systemy wizyjne, których aplikacje dotyczą pomiarów 2D i 3D, inspekcji powierzchni i wewnątrzmateriałowej oraz inspekcji integralności strukturalnej. Systemy wizyjne rejestrują światło odbite od kontrolowanych powierzchni, tworząc obrazy 2D. Obrazy te podlegają automatycznej analizie, w wyniku której uzyskiwane są cechy ilościowe podlegające klasyfikacji.

Specyfikacja jakościowa w dziedzinie mechanicznej nie jest jednak równoznaczna ze specyfikacją w dziedzinie optycznej. Ponadto, już niewielkie zmiany materiałowe, konstrukcyjne czy technologiczne, mieszczące się w zakresie tolerancji wyrobu, mogą powodować bardzo istotne zmiany obrazowania, które zakłócają skuteczność i poprawność kontroli automatycznej.

Z przeprowadzonej analizy wad powierzchni wynika, że są one bardzo niejednoznacznie nazywane i definiowane, co utrudnia komunikowanie w interdyscyplinarnym środowisku użytkowników i projektantów. Ponadto projektanci systemów wizyjnych często nie mają dostatecznie interdyscyplinarnej (optomechatronicznej) wiedzy.

Najistotniejsze znaczenie w procesie akwizycji obrazów odgrywa oświetlenie, którego dobór zależy od doświadczenia projektanta. Oświetlacze te oparte są na diodach LED, które mają zalety w porównaniu z innymi źródłami światła, oferując duże możliwości w zakresie projektowania oświetlaczy specjalizowanych.

Do najistotniejszych zakłóceń kontroli wizyjnej należą zanieczyszczenia, wibracje oraz oddziaływanie termiczne. Jeśli zostały one zaniedbane na etapie specyfikacji wymagań bądź projektowania, to w istotny sposób zakłóca proces wdrażania opracowanych systemów oraz wpłyną na koszt całego projektu. Zakłóceniem może okazać się również naturalna zmienność procesu, powodująca błędną klasyfikację dobrych wyrobów. Projektowanie MV opiera się na doświadczeniu projektantów i eksperymentowaniu. Elastyczne rozwiązania sprzętowe, np. sterowane oświetlacze, oferują zbyt ograniczone możliwości kształtowania strumienia świetlnego. Metodyczne podejście do planowania eksperymentów okazuje się nieefektywne w kontekście relacji uzyskanej nowej wiedzy do jej kosztu.

W procesie projektowania systemów oświetleniowych możliwe jest zastosowanie narzędzi symulacyjnych – generujących obrazy syntetyczne. Jednak nawet uzyskanie fotorealistycznego efektu renderowania nie zapewni wsparcia procesu projektowania, jeśli nie jest zagwarantowana zgodność między modelem symulacyjnym a jego odpowiednikiem rzeczywistym. Dostępne narzędzia grafiki komputerowej nie spełniają jednak tego wymagania.

3. Cel i zakres badań

Przeprowadzone studium kontroli jakości wytwarzania z zastosowaniem systemów wizyjnych zwraca uwagę na problemy w zakresie projektowania takich systemów, ponieważ:

- projektanci mają ograniczony dostęp do przykładów wad i przykładów obrazujących zmienności procesu,
- wymagania jakościowe w dziedzinie mechanicznej nie przekładają się bezpośrednio na specyfikację w dziedzinie optycznej,
- wrażliwość optyczna zmian jest znacznie większa niż tolerancje mechaniczne,
- klasyczne podejście do projektowania układów akwizycji bazuje na doświadczeniu i eksperymentowaniu,
- testowanie i optymalizacja algorytmów analizy obrazów, zwłaszcza w kierunku odporności, jest zależna od reprezentatywności bazy obrazów, a ta z kolei od dostępnych przykładów i technik akwizycji,
- wdrożenie i walidacja systemów wizyjnych wymaga kosztownego dopracowywania algorytmów przetwarzania obrazów, a niejednokrotnie również rozwoju układów akwizycji obrazów.

W odpowiedzi na podane fakty, zaproponowano wirtualizację projektowania optycznego systemów wizyjnych. Do jej realizacji wybrano metody i narzędzia grafiki komputerowej, gdyż:

- nie wymagają one tak niskopoziomowego modelowania układów optycznych, oświetleniowych i detektorów, jak jest to w przypadku oprogramowania do projektowania optycznego,
- wiedza niezbędna do opracowywania modeli symulacyjnych jest znacznie szerzej dostępna, stąd będą mogły być efektywniej użytkowane przez optomechaników.

Jako istotne problemy takiego podejścia zidentyfikowano konieczność zapewnienia prawidłowości modeli źródeł światła, powierzchni oraz detektorów.

Stąd nadrzędnym celem prowadzonych badań jest problem wirtualizacji procesu akwizycji obrazów, umożliwiający badania eksperymentalne podczas projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania. Badania symulacyjne takich systemów wymagają metod numerycznych propagacji światła oraz prawidłowych modeli

geometryczno-optycznych poszczególnych komponentów. Jednocześnie z badaniami w zakresie syntezy modeli symulacyjnych prowadzona jest analiza parametrów geometrycznych i optycznych obiektów rzeczywistych.

Pełen zakres badawczy przedstawiono w postaci macierzy procesowo-dziedzinowej (rys. 3.1). Wiersze macierzy wynikają z procesowego spojrzenia na problem symulacyjnego prototypowania systemów wizyjnych. Wyróżniono tu: identyfikację parametrów komponentów, następnie syntezę modeli symulacyjnych wraz z ich weryfikacją oraz ocenę przydatności uzyskanych wyników, tj. walidację.

Optyka i grafika komputerowa	Radiometria i BSDF	Obrazowanie	Rendering, Symulacje optyczne	
	Detektory Obiektywy i kamery	Źródła światła EmiteryOświetlacze	Obiekty Powierzchnie	
Analiza parametrów (pomiar)	Dystorsje i aberracje, MTF, czułości i liniowości	Światłość (Elektr./Opt./Term.)	Światłość w polu bliskim	Rozpraszanie światła (skaterometr)
Synteza modeli (symulacje)	Mapowanie tonalne	Modele skupione	Modele rozciągte	Modele BRDF
Weryfikacja	Odwzorowanie geometryczne i tonalne	Światłość	Światłość w polu bliskim	Rozpraszanie światła
Walidacja	Jakość powierzchni	Pomiary optyczne	Integralność strukturalna	

Rys. 3.1. Mapa zakresu badań do realizacji pracy

Kolumny macierzy wynikają z merytorycznych wymagań stawianych przez dziedzinę problemu. W przypadku procesu akwizycji obrazów są to detektory, źródła światła oraz obiekty. Ponieważ modele detektorów wraz z obiektywami, w środowiskach renderujących, oferują jedynie podstawowe możliwości konfiguracyjne, w zakresie: rozdzielczości i wielkości sensora, czasu otwarcia migawki, czułości ISO, korekcji gamma, trybu (monochromatyczny/kolor), ogniskowej lub kąta widzenia obiektywu oraz przesłony, stąd zdecydowano się na wyłączenie tych podstawowych badań poza obszar zakresu pracy. Wyniki badań rozszerzonych, zgodnie ze

standardem EMVA1288, takie jak liniowość, czułość i szum kamer, znajdują zastosowanie w dalszych etapach rozwoju metod modelowania optycznego. Podobnie jak rozszerzone parametry obiektywów (rozszerzone pod kątem grafiki komputerowej – nie optyki), takie jak aberracje oraz funkcja przenoszenia kontrastu MTF (ang. *Modulation Transfer Function*).

W ramach niniejszych badań problem obrazowania ograniczano do rejestracji natężenia światła za pomocą detektorów matrycowych monochromatycznych. Ograniczenie takie wynika z dominującego znaczenia metod analizy intensywności obrazów, co uzasadnia potrzeba wydajności i redukcji kosztów systemu. W przypadku potrzeby analizy obrazów barwnych, model detektora wymaga jedynie wprowadzenia równoległych kanałów chromatycznych.

W zakresie źródeł najistotniejsza jest charakterystyka światłości. W tym celu przeprowadzono badania z zastosowaniem sfery obrazującej oraz opracowano adekwatny detektor polarny w środowisku symulacyjnym. Przykłady źródeł ograniczono do diod LED, które jak wynika z przeprowadzonego studium, stanowią dominujące rozwiązanie w systemach wizyjnych. Przewidziano zamodelowanie geometryczno-optyczne diody LED, co stanowi przykład do modelowania innych emiterów światła oraz złożonych oświetlaczy.

Badanie oświetlaczy systemów wizyjnych wymaga pomiarów i analizy rozciągniętych źródeł światła. Stąd do pomiarów wytypowano fotogoniometr pola bliskiego. W przypadku modeli symulacyjnych przeanalizowano dwie najważniejsze konfiguracje oświetlacza bezpośredniego i pośredniego, które umożliwiają syntezę większości układów iluminacyjnych.

Określenie zakresu badanych powierzchni wynika z przeznaczenia badanego rozwiązania, które dotyczy kontroli jakości wytwarzania. Przeprowadzone studium zastosowań systemów wizyjnych wskazało, że powinny to być powierzchnie metalowe po obróbce skrawaniem. Stąd wytypowano trzy struktury topograficzne: izotropową, anizotropową oraz okresową. Pierwszy etap badań dotyczy możliwości pomiarów i użycia wyników obrazowania 2D i 3D powierzchni. Drugi etap badań dotyczy rozpraszania światła na tych powierzchniach, czyli pomiaru dwukierunkowej funkcji rozpraszania światła na powierzchni (BRDF). W ramach badań przeanalizowano możliwości modelowania zjawiska rozpraszania światła oraz opracowano metodę oceny jakości modelu symulacyjnego.

Dla wykazania użyteczności opracowanych metod i narzędzi symulacyjnych przedstawione zostaną trzy przykłady projektów przemysłowych:

- inspekcji jakości powierzchni, na przykładzie czół wałeczków łożysk tocznych,
- inspekcji integralności strukturalnej, na przykładzie przegubów homokineetycznych oraz
- pomiarów optycznych, na przykładzie wkrętów kostnych implantów medycznych.

Badania w zakresie symulacji i identyfikacji parametrów prowadzono wspólnie. Taka metodyka badań zwiększa ich efektywność, gdyż możliwości i ograniczenia symulacyjne wytyczają cele identyfikacji i sterują procesem weryfikacji. W pierwszej kolejności będą weryfikowane parametry podstawowe obiektów i modeli symulacyjnych, co będzie stanowiło bazę dla dalszego ich rozwoju.

Przyjęta metoda badań jest oparta na spiralnym cyklu rozwoju projektów [40] oraz modelach prototypowania, np.: piłozębnym (ang. *Sawtooth or Shark Tooth Models*), zaś prezentacja wyników w niniejszej monografii jest zgodna z modelem liniowym (wodospadowym).

4. Obrazowanie i metody symulacji propagacji światła

4.1. Detektory światła i kamery

Światło w zakresie widzialnym to określenie dla promieniowania elektromagnetycznego w zakresie ok. 380–780 nm rejestrowanym przez siatkówkę oka ludzkiego. Bardziej precyzyjna definicja mówi o promieniowaniu optycznym w zakresie fal elektromagnetycznych od 10 nm do 1 mm, co odpowiada trzem zakresom: ultrafiolet (UV), światło widzialne (VIS) i podczerwień (IR). Obecnie największe znaczenie zdobywają źródła światła emitujące fotony z przejść fazowych w atomach: diody elektroluminescencyjne (LED), lasery, lampy fluorescencyjne, kwarcowe i rtęciowe.

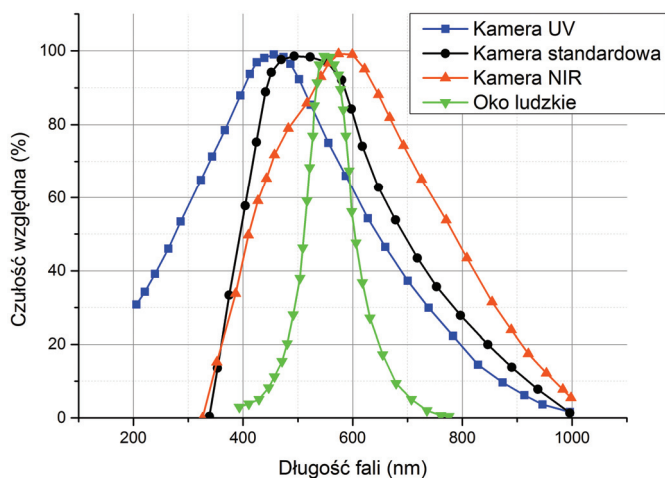
Fotometria zajmuje się charakteryzowaniem i badaniem odczuć wizualnych człowieka, gdzie układem optycznym jest oko, wyposażone w światłoczułą siatkówkę zbudowaną z fotoreceptorów. [83]. Fotoreceptory, mające różną czułość widmową, uzależnioną od pigmentu, są rozłożone nierównomiernie na jej powierzchni. Informacja o kolorach odbieranego światła odbierana jest za pomocą czopków (*cone*), o trzech różnych charakterystykach widmowych absorpcji [70]: niebieskiej ($\lambda_{\max}(S - \text{cone}) = 419 \text{ nm}$), zielonej ($\lambda_{\max}(M - \text{cone}) = 551 \text{ nm}$) i czerwonej ($\lambda_{\max}(L - \text{cone}) = 558 \text{ nm}$). Ich czułość dostosowana jest do warunków oświetlenia dziennego (fotopowego). Największe zagęszczenie na środku siatkówki tworzy plamkę żółtą, co zapewnia wysokorozdzielcze widzenie kolorów w osi wzroku. Drugi rodzaj fotoreceptorów to pręciki (*rod*), charakteryzujące się dużo większą czułością, co umożliwia widzenie nocne (skotopowe). Nie mają one jednak możliwości detekcji różnic widmowych promieniowania, stąd tworzony obraz jest monochromatyczny ($\lambda_{\max}(\text{rod}) = 498 \text{ nm}$). Wzrost ich zagęszczenia w miarę oddalania się od środka siatkówki wpływa pozytywnie na ostrość i skuteczność świetlną. Dla widzenia nocnego wynosi ona 1700 lm/W, zaś dla widzenia dziennego 683 lm/W [135].

Informacja z fotoreceptorów przekazywana jest do mózgu przez komórki nerwowe, a następnie przetwarzana i zapamiętywana w procesie przetwarzania równoległego, co jest przedmiotem badań psychologii i psychofizyki [147]. Zanim jednak światło trafi na siatkówkę, czoło fali świetlnej jest kształtowane przez soczewkę. W procesie

akomodacji następuje zmiana kształtu soczewki, więc jej ogniskowej oraz jej odległość od siatkówki. Rolę przysłony ograniczającej ilość dochodzącego światła do siatkówki pełni źrenica.

Podany układ optyczny pełni funkcję układu obrazującego, rejestruje zatem luminację powierzchni, która zależy od jej parametrów optycznych oraz intensywności źródła światła. Parametry optyczne powierzchni są opisywane przez charakterystykę rozpraszania światła. Źródło światła emituje promieniowanie zgodnie ze swoją charakterystyką światłości, która decyduje o natężeniu oświetlenia [261].

Istnieje jedynie ogólne podobieństwo między budową kamery a jej pierwowzorem – okiem ludzkim. Istotne różnice dotyczą rozdzielczości i postrzegania kolorów. Postrzeganie kolorów jest przedmiotem wielu teorii i modeli kolorymetrycznych. Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa (CIE) doprowadziła do standaryzacji charakterystyki czułości dla widzenia barwnego. Pierwsza pochodzi z roku 1931 i została określona na podstawie badań empirycznych widzenia oka ludzkiego w kącie 2° . W roku 1971 wydano drugą specyfikację dla szerszego kąta widzenia, 10° [86].



Rys. 4.1. Porównanie charakterystyk czułości spektralnej oka ludzkiego i wybranych kamer (na podstawie [92])

Jak pokazano na rys. 4.1, charakterystyki czułości widmowej oka ludzkiego i czułości kamer znacznie się różnią. W przypadku kamer zależą od właściwości materiałowych sensorów, metody konwersji (ang. *back*, *front illuminated*) oraz zastosowanych pokryć i filtrów. Bardziej szczegółowa analiza zwraca uwagę na różnice między czułością czopków oka ludzkiego a modelem kolorymetrycznym CIE1931 [70]. Są one kompensowane w procesie przetwarzania obrazów przez wprowadzenie współczynników wagowych w celu jak najwierniejszego odtwarzania kolorów i balansu bieli. Gdy zadaniem kamery jest pomiar wartości świetlnych fotometrycznych lub

kolorymetrycznych, np. światłości diod LED [46], [258] lub oświetlaczy [149], o niepewności pomiaru decydują właśnie charakterystyki czułości spektralnej. Typowe matryce z filtrem Bayera kamer kolorowych, nie zapewniają dostatecznej zgodności spektralnej z charakterystykami odniesienia CIE, dlatego kolorymetry obrazujące muszą być wyposażone w wysokiej jakości filtry chromatyczne.

Filtracja pasmowo-przepustowa rejestrowanego sygnału znajduje również zastosowanie w obrazowaniu, umożliwiając zwiększenie kontrastu lub odcięcie widma zakłócającego, np. w monitorowaniu jeziora spawalniczego, dla odcięcia emisyjności od plazmy [153].

4.2. Wielkości świetlne

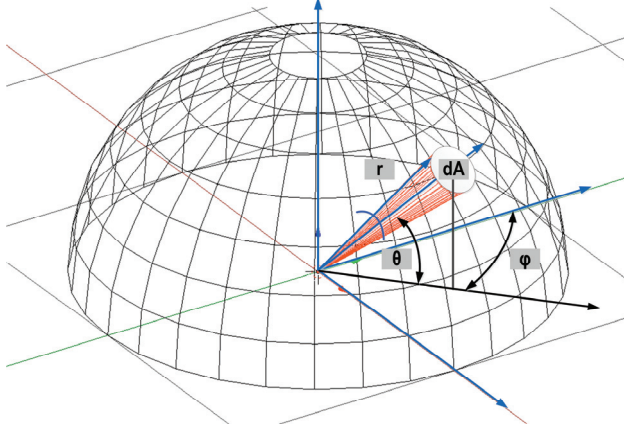
Dla ilościowej charakteryzacji promieniowania zdefiniowane są podstawowe wielkości radiometryczne, takie jak: energia, strumień energetyczny, natężenie promieniowania i napromieniowania oraz radiancja [349]. Gdy istotne jest wrażenie, jakie odbiera oko ludzkie, wartości te są korygowane o czułość widmową oka ludzkiego i nazywane strumieniem świetlnym, światłością, natężeniem oświetlania oraz luminacją. Gdy istotne jest odniesienie do długości fali, stosowane są jednostki spektrometrii.

Tabela 4.1. Podstawowe pojęcia w dziedzinie fotometrii, radiometrii i spektrometrii

Fotometria	Radiometria	Spektrometria
Energia promienista $Q_V [T]$ (<i>luminous energy</i>)	Energia $Q_e [J]$ (<i>radiant energy</i>)	Energia $Q_e(\lambda) [J]$ (<i>radiant energy</i>)
Strumień świetlny $\Phi_V [\text{lm}]$ lub moc świetlna (<i>luminous flux / power</i>)	Strumień energetyczny $\Phi_e [W]$ lub moc $P [W]$ (<i>radiant flux / power</i>)	Strumień energetyczny $\Phi_e(\lambda) [W]$ lub moc $P(\lambda) [W]$ (<i>radiant flux / power</i>)
Światłość $I_V [\text{cd}]$ (<i>luminous intensity</i>)	Natężenie promieniowania $I_e \left[\frac{W}{\text{sr}} \right]$ (<i>radiant intensity</i>)	Natężenie promieniowania $I_e(\lambda) \left[\frac{W}{\text{sr}} \right]$ (<i>radiant intensity</i>)
Egzytacja świetlna $M_V [\text{lx}]$ (<i>luminous exitance</i>)	Egzytacja energetyczna $M_e \left[\frac{W}{\text{m}^2} \right]$ (<i>radiant exitance</i>)	Egzytacja energetyczna $M_e(\lambda) \left[\frac{W}{\text{m}^2} \right]$ (<i>radiant exitance</i>)
Natężenie oświetlenia $E_V [\text{lx}]$ (<i>illuminance</i>)	Natężenie napromieniowania $E_e \left[\frac{W}{\text{m}^2} \right]$ Irradiancja (<i>irradiance</i>)	Natężenie napromieniowania $E_e(\lambda) \left[\frac{W}{\text{m}^2} \right]$ (<i>irradiance</i>)
Luminancja $L_V \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right]$ (<i>luminance</i>)	Radiancja $L_e \left[\frac{W}{\text{sr m}^2} \right]$ (<i>radiance</i>)	Radiancja $L_e(\lambda) \left[\frac{W}{\text{sr m}^2} \right]$ (<i>radiance</i>)

tryczne. Jak pokazano na diagramie rys. 4.1, czułości spektralne oka ludzkiego i kamer różnią się, stąd w przypadku układów obrazujących poprawne jest operowanie wartościami radiometrycznymi.

Definicja charakterystyk świetlnych odnosi się do elementu punkowego określonego w układzie sferycznym



Rys. 4.2. Układ współrzędnych sferycznych:

r – promień, θ – kąt inklinacji, φ – kąt azymutalny, dA – element powierzchni

Kąt bryłowy definiowany jest jako stosunek pola powierzchni do kwadratu promienia

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (4.1)$$

Powierzchnia pozorna albo powierzchnia projekcji jest rzutowaniem powierzchni w funkcji kąta incydencji względem normalnej:

$$dA_{s,proj} = dA_s \cos \theta \quad (4.2)$$

Strumień energetyczny Φ_e , odpowiada mocy P , określa energię promieniowania Q_e przechodzącego przez daną powierzchnię w jednostce czasu i jest definiowany, jako:

$$\Phi_e = P = \frac{dQ_e}{dt} \text{ [W]} \quad (4.3)$$

Strumień świetlny Φ_v to zredukowany strumień promieniowania zgodnie z krzywą czułości widmowej oka ludzkiego:

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} = K_m \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} V_\lambda d\lambda \text{ [lm]} \quad (4.4)$$

gdzie: $K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ – fotometryczny równoważnik promieniowania, $\Phi_{e,\lambda}$ – rozkład widmowy mocy promienistej (strumienia energetycznego), V_λ – względna skuteczność promieniowania monochromatycznego.

Natężenie promieniowania I_e odpowiada strumieniowi promieniowania emitowanemu w nieskończenie mały kąt bryłowy:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \left[\frac{\text{W}}{\text{sr}} \right] \quad (4.5)$$

gdzie w przypadku miary fotometrycznej mówi się o światłości, której jednostką jest candela.

Natężenie napromieniowania lub intensywność E_v określa ile mocy przenoszona jest przez jednostkę powierzchni:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_{s,\text{proj}}} = \frac{d\Phi_e}{dA_s \cos \theta} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (4.6)$$

w przypadku fotometrii jej jednostką jest lux.

Do pomiarów natężenia napromieniowania stosuje się fotodetektory. Do pomiarów mocy (strumienia energetycznego lub świetlnego) źródła światła stosuje się sfery całkujące (kule Ulbrichta). Jeśli we wnętrzu sfery, pokrytej materiałem rozpraszającym światło idealnie lambertowskie, umieszczone zostanie badane źródło światła o strumieniu Φ_0 , to stan oświetlenia jest efektem odbić wielokrotnych. W takim przypadku natężenie napromieniowania w dowolnym punkcie powierzchni jest sumą natężenia bezpośredniego E_B i pośredniego E_P , zgodnie z równaniem [349]:

$$E = E_B + E_P = E_B + \frac{\Phi_0 \rho + \Phi_0 \rho^2 + \dots + \Phi_0 \rho^n}{4\pi r^2} = E_B + \frac{\Phi_0 \rho}{4\pi r^2} \frac{1}{1 - \rho} \quad (4.7)$$

gdzie: r – promień sfery, ρ – współczynnik odbicia wewnętrznej powierzchni sfery.

Z zależności (4.7) wynika, że natężenie pośrednie E_P jest proporcjonalne do strumienia świetlnego, stąd konieczność wyeliminowania (przesłonięcia) promieniowania bezpośredniego podczas pomiaru, co jest realizowane przez przesłony (ang. *baffle*). W zależności od charakterystyki światłości, badane źródło światła montowane jest na obrzeżu sfery lub wewnątrz. Niepewność pomiarów za pomocą sfery całkującej zależy zatem od jej średnicy, charakterystyki rozpraszania światła na powierzchni wewnętrznej, absorpcyjności i refleksyjności elementów pomocniczych, takich jak uchwyty, przesłony, oraz jakości kalibracji [106].

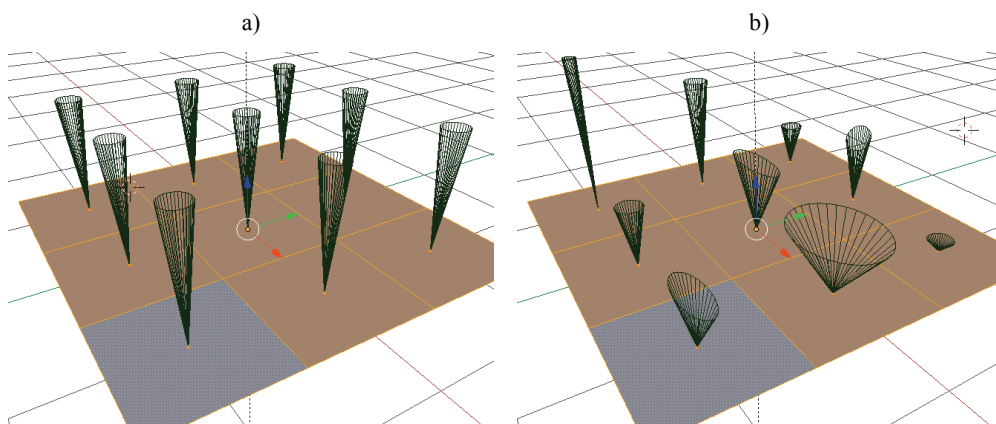
Radiancja (L_e lub luminacja w ujęciu fotometrycznym L_v) jest miarą odczucia intensywności światła, gdyż określa natężenie emitowane z określonej powierzchni w określonym kierunku. W przypadku emiterów światła odpowiada jaskrawości,

a w przypadku obiektów odbijających światło, jasności, która zależy od jasności tła oraz stanu adaptacji wzroku. Jest definiowana jako:

$$L = \frac{dI}{dA_{s,proj}} = \frac{dI}{dA \cos \theta}, \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{sr m}^2} \right] \text{ albo } \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (4.8)$$

gdzie: $A_{s,proj}$ – powierzchnia projekcji.

Charakterystyczną właściwością radiancji (luminacji) jest jej niezależność od odległości. W przypadku powierzchni emitującej światło lambertowskie, tj. gdy jego natężenie opisuje funkcja kosinusowa, wówczas luminacja takiej powierzchni jest niezależna od kąta obserwacji. Wynika to ze zmiany powierzchni pozornej, która również zmienia się z zależnością kosinusową, kompensując zmiany natężenia.



Rys. 4.3. Źródła rozciągłe: a) przestrzenie jednorodne i lambertowskie, b) przestrzenie niejednorodne i nielambertowskie

Podane definicje zakładają jednorodność przestrzenną i skupienie parametrów. W przypadku rzeczywistym zależy to od skali obserwacji. Powierzchnia emitująca światło może charakteryzować się różnym rozkładem przestrzennym, jak również kątowym natężenia światła.

Tabela 4.2. Różne konfiguracje źródeł rozciągłych

Przestrzenna: jednorodna Kątowa: lambertowska	Przestrzenna: niejednorodna Kątowa: lambertowska
Przestrzenna: jednorodna Kątowa: nie lambertowska	Przestrzenna: niejednorodna Kątowa: nie lambertowska

W praktyce przemysłowej źródło światła jest modelowane jako źródło punktowe, gdy odległość detektora przekracza 5 razy jego rozmiary [345]. Bardziej szczegółowe

analizy uzależniają odległość pola dalekiego od kształtu powierzchni emitującej, jak zestawiono w tab. 4.3 [193].

Tabela 4.3. Odległość pola dalekiego w funkcji kształtu powierzchni emitującej [193]

Kształt powierzchni emitującej	Wielkość	Współczynnik odległości
Liniowa	l – długość	$4,075 l$
Koło	d – średnica	$4,975 d$
Kwadrat	a – długość boku	$5,743 a$
Pierścień o szerokości $0,1 d$	d – średnica	$6,375 d$

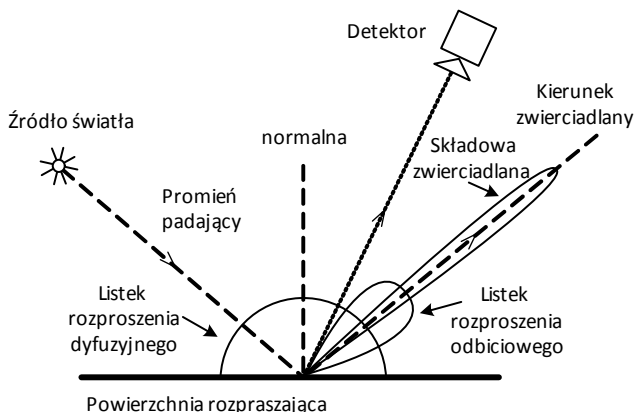
Jednorodność źródeł rozciągniętych jest definiowana przez ocenę ich intensywności:

$$\Delta E [\%] = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{\mu_E} \quad (4.9)$$

gdzie: $E_{\max}$, $E_{\min}$ – maksymalne, minimalne natężenie oświetlenia, μ_E – wielkość średnia natężenia.

4.3. Rozpraszanie światła na powierzchniach

Fala elektromagnetyczna padająca na powierzchnię może ulec odbiciu i rozproszeniu, zaabsorbowaniu lub przeniknąć przez obiekt. O odbiciu zwierciadlanym (ang. *specular direction*) mówimy, gdy cała energia jest przekierowywana wyłącznie pod kątem równym kątowi padania. Jednak w rzeczywistości, nawet na powierzchniach lustrzanych, następuje odbicie z rozproszeniem (ang. *specular spike*), w wyniku którego poszerza się kąt, wokół którego rozsyłana jest energia.



Rys. 4.4. Trzy składowe odbicia światła w funkcji kąta obserwacji [200]

O idealnym rozpraszaniu dyfuzyjnym (lambertowskim) mówimy wtedy, gdy niezależnie od kierunku padania strumienia świetlnego, ulega on podziałowi i rozsyłowi w pełnym kącie przestrzennym, z zachowaniem jednakowej luminacji, niezależnej od kierunku obserwacji.

$$L(\theta) = \text{const} \quad (4.10)$$

W rzeczywistości podczas rozpraszania światła na powierzchniach ma się do czynienia z kombinacją składowych, które tworzą rozproszenie odbiciowe (ang. *specular lobe*). Ponadto zjawisku może towarzyszyć zmiana amplitudy oraz fazy i częstotliwości fali.

Interakcja światła z powierzchnią zależy od wielu czynników makro- i mikroskopowych, z których najważniejsze to struktura topograficzna powierzchni, współczynniki załamania światła oraz współczynnik absorpcyjności [291]. W zależności od wielkości elementów, z jakimi fala świetlna wchodzi w interakcję, występują różne zjawiska, do objaśnienia których znajdują zastosowanie różne modele optyczne.

Uproszczona klasyfikacja modeli zjawisk oparta jest na relacji wielkości elementu rozpraszającego, np. średnicy cząstki D_p , w odniesieniu do długości fali λ

$$x = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (4.11)$$

co pozwala wyróżnić:

- $x \gg 1$ Gdy elementy powierzchni są dużo większe od długości fali, zachodzi rozpraszanie niesprężyste (np. Ramana, Brilloina, Comptona), któremu towarzyszy zarówno zmiana kierunku promieni, jak i transfer energii. Do wyjaśniania zjawiska ma zastosowanie optyka geometryczna.
- $x \approx 1$ Gdy długość fali jest porównywalna z elementami struktury, zachodzi rozpraszanie sprężyste, wyjaśniane teorią Mie, jego opis bazuje na modelu optyki falowej.
- $x \ll 1$ Gdy średnica cząstek jest mniejsza od długości fali, zachodzi rozpraszanie sprężyste (Rayleigha) bez zmiany energii, ale ze zmianą kierunku fali w wyniku jej emisji wtórej, dyfrakcji i interferencji, wyjaśnienie zjawisk wymaga modeli optyki falowej.

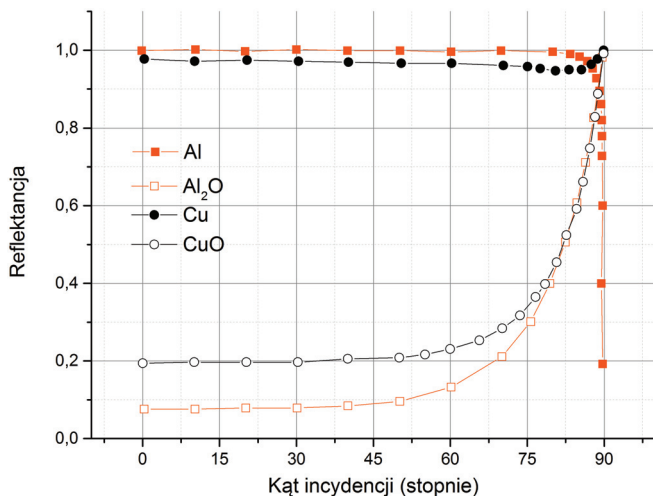
Do modelowania fizycznie poprawnego zjawiska rozpraszania, gdy cząstki nie są sferyczne mają zastosowanie metody SVM (ang. *separation of variables method*), SM (ang. *superposition method*) oraz TMM (ang. *T-matrix method*) czyli metoda macierzy-T [194]. Modele takie jednak znacznie wykraczają poza zdefiniowany zakres pracy.

Parametry optyczne materiału charakteryzowane są przez współczynnik załamania światła, który dla metali, w przeciwieństwie do dielektryków, jest podawany jako wartość zespolona. W ten sposób uwzględniona zostaje zarówno przenikalność, jak i przewodność w funkcji długości fali:

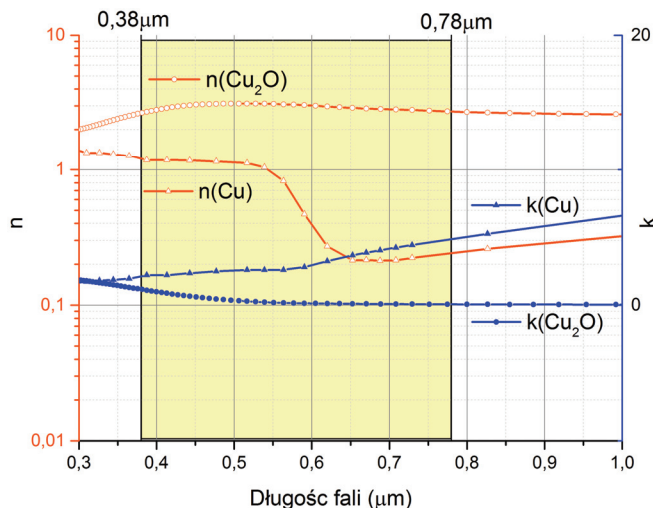
$$n = n + ik \quad (4.12)$$

gdzie: n – współczynnik załamania określający prędkość fazową, k – współczynnik ekstynkcji określający absorpcję dla światła przenikającego przez materiał.

Istotne jest, że charakterystyki refleksyjności w funkcji kąta, dla metali i ich tlenków, tworzących warstwę wierzchnią, różnią się, co pokazano na rys. 4.5.



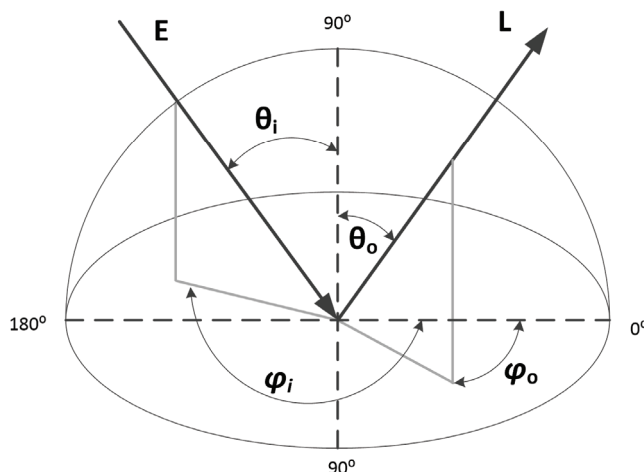
Rys. 4.5. Przykładowe charakterystyki refleksyjności w funkcji kąta incydencji (na podstawie [229])



Rys. 4.6. Współczynnik załamania światła (nk) dla Cu i Cu_2O w funkcji długości fali (na podstawie [229])

W przypadku warstwy tlenków widoczny jest spadek refleksyjności, co wyjaśnia, dlaczego utleniona powierzchnia wydaje się matowa. Ponadto, w przypadku metali współczynnik załamania światła jest również funkcją długości fali, czego skutkiem jest zmiana barwy, szczególnie wyraźna w przypadku ich tlenków.

O charakterystyce odbicia światła decyduje również struktura topograficzna powierzchni, która jest charakterystycznym wynikiem obróbki [209]. Powierzchnie anizotropowe odzwierciedlają swoją kierunkowość, również w odpowiedzi optycznej.



Rys. 4.7. Model układu sferycznego do definiowania charakterystyki rozpraszania

Do opisu wyglądu powierzchni (rozpraszania światła), obserwowanej i oświetlanej pod różnymi kątami (rys. 4.7), ma zastosowanie dwukierunkowa funkcja rozpraszania światła BSDF (ang. *Bi-Directional Scattering Distribution Function*), definiowana jako:

$$\text{BSDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = \frac{dL_o(\theta_o, \varphi_o)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} [\text{sr}^{-1}] \quad (4.13)$$

gdzie:

- θ – kąt incydencji względem normalnej,
- φ – kąt azymutalny,
- i, o – kierunek padania (ang. *incidence*) i rozpraszania (ang. *scattering*),
- dL – radiancja rejestrowana z kierunku (θ, φ) ,
- dE – natężenie napromieniowania padającego z kierunku (θ_o, φ_o) [204].

W ujęciu szczegółowym zależy również od długości fali λ . Funkcja BSDF może być rozważana oddzielnie dla refleksyjności BRDF (ang. *Bi-Directional Reflectance Distribution Function*) lub transmisyjności BTDF (ang. *Bi-Directional Transmittance Distribution Function*).

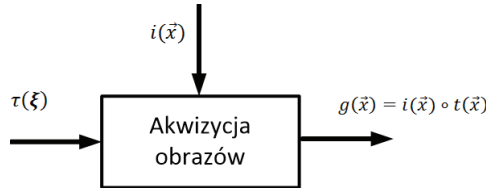
Funkcja BSDF jest symetryczna dla kierunku padania i odbicia oraz spełnia zasadę zachowania energii, w myśl której suma energii wypromieniowanej przez punkt w półsferze, nie może być większa od energii padającej.

Całkowita moc rozpraszania TIS (ang. *Total Integrated Scatter*) wyznaczana jest przez sumowanie wartości funkcji BSDF w pełnej przestrzeni sferycznej:

$$\text{TIS}(\theta_i, \varphi_i) = \iint \text{BSDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \cos(\theta_o) \sin(\theta_o) d\theta_o d\varphi_o \quad (4.14)$$

4.4. Akwizycja obrazów

Akwizycja obrazów w ujęciu teorii przetwarzania sygnałów może być definiowana jako wynik mapowania fizycznej tekstury powierzchni $\tau(\xi)$ na obraz $g(\vec{x})$, gdzie $\xi = (\xi, \eta)^T$, są współrzędnymi lateralnymi powierzchni, zaś $\vec{x} = (x, y)^T$ współrzędnymi obrazu w układzie kamery [33].



Rys. 4.8. Akwizycja obrazów w ujęciu teorii przetwarzania sygnałów [33]

Fizyczna tekstura powierzchni $\tau(\xi)$ definiowana jest za pomocą dwóch przestrzeni zmiennych komponentów: dwukierunkowej funkcji rozpraszania światła (BRDF) $\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o, \xi)$ oraz lokalnych wysokości powierzchni $\zeta(\xi)$.

$$\tau(\xi) := \begin{bmatrix} \rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o, \xi) \\ \zeta(\xi) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Lokalna charakterystyka rozpraszania powierzchni opisywana przez BRDF, zakłada jej homogeniczność i charakteryzuje jej wygląd z określonego kąta obserwacji (θ_o, φ_o) , dla określonego kierunku (θ_i, φ_i) jej oświetlenia. Oznacza to, że fizyczna tekstura powierzchni $\tau(\xi)$ definiuje wprawdzie bardzo obszernie charakterystykę optyczną powierzchni, ale problemem jest jej pozyskanie. Czas cyklu wytwórczego oraz aspekt kosztowy wymuszają redukcję $\tau(\xi)$ do komponentu $t(\vec{x})$. Owa redukcja dotyczy składowej chromatycznej, stąd dominuje obrazowanie monochromatyczne. Ponadto, rozdzielczość sferycznej funkcji BRDF jest redukowana przez minimalizację kątów oświetlenia powierzchni oraz obserwacji, co omówiono w rozdziale 2.4 i pokazano na rys. 2.5.

Jak pokazano schematycznie na modelu (rys. 4.8), obraz $g(\vec{x}) = i(\vec{x}) \circ t(\vec{x})$ jest wynikiem splotu komponentu fizycznej struktury powierzchni $t(\vec{x})$ z zakłóceniami jej homogeniczności $i(\vec{x})$, przy wyidealizowanym modelu układu optycznego i detektora. Przykładami tego typu zakłóceń są:

- przestrzenna zmiana iluminacji powierzchni,
- kosinusowa zależność czułości kamery w funkcji kąta obserwacji,
- winietowanie,
- przestrzennie zmienna czułość detektora,
- przestrzennie zmienna geometria topograficzna $\zeta(\xi)$.

Przestrzenna zmiana iluminacji powierzchni zależy od metody oświetlania. Niejednorodna czułość detektora i winietowanie są związane z układem obrazującym, zaś zmienna geometria topograficzna wynika ze zmienności wektora normalnego do powierzchni, co jest związane z geometrią, teksturą i skazami powierzchni. Podany model teoretyczny pomaga sformułować funkcję celu akwizycji obrazów w kontekście optymalizacji.

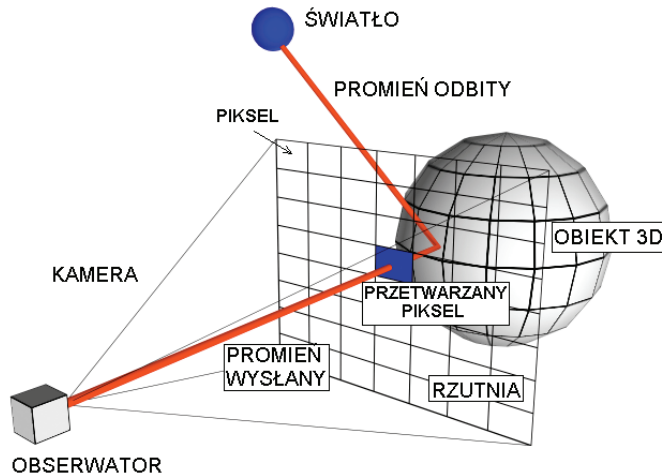
4.5. Renderowanie

Renderowanie jest podstawą współczesnej grafiki komputerowej, animacji, czyli szeroko rozumianej wizualizacji. W ujęciu inżynierskim termin „renderowanie” jest najbliższy znaczeniu: interpretować, odtwarzać, przekładać lub przenosić, stąd w kontekście grafiki komputerowej, oznacza wirtualne fotografowanie, czyli generowanie obrazów syntetycznych na podstawie opisu sceny. Do pełnego zamodelowania sceny konieczne są modele poszczególnych komponentów, tj. geometrii obiektów sceny, kamery, oświetlenia oraz algorytmy propagacji światła i jego interakcji z powierzchniami obiektów. Złożoność poszczególnych modeli decyduje o poziomie fotorealistyczności uzyskiwanych obrazów, ale jednocześnie o złożoności obliczeniowej.

Stosuje się różne metody renderowania: rzutowanie promieni (ang. *ray casting*), śledzenie promieni (ang. *ray tracing*) oraz metody oświetlenia globalnego, takie jak mapowanie fotonowe (ang. *photon mapping*) i metoda energetyczna (ang. *radiosity*). Najistotniejszą różnicą między nimi jest wydajność i fotorealistyczność. Metody bazujące na prawach fizyki, określane jako „*unbiased*”, są zgodne z rzeczywistością, ale wymagają znacznie większych zasobów obliczeniowych, co w kontekście realizacji sekwencji wideo ma istotne znaczenie. Bardzo intensywnie rozwijane są metody hybrydowe, np. SSPP (ang. *Stochastic Progressive Photon Mapping*) łączące oba cele.

W przypadku śledzenia promieni, najpopularniejszej metody fizycznie poprawnej, światło modelowane jest za pomocą promieni przenoszących energię o określonej długości fali. Zgodnie z zasadą Fermata, promienie świetlne przemierzają drogę, która

jest najkrótsza w czasie. W powietrzu, modelowane są zwykle jako linie proste. Interakcja promień – obiekt polega na wyznaczeniu punktów na powierzchni obiektów, które generują bezpośrednie odbicie do kamery. Jest to podejście parametryczne, wyznaczające prostą kierunkową w przestrzeni między pikselami detektora a punktami powierzchni obiektu.



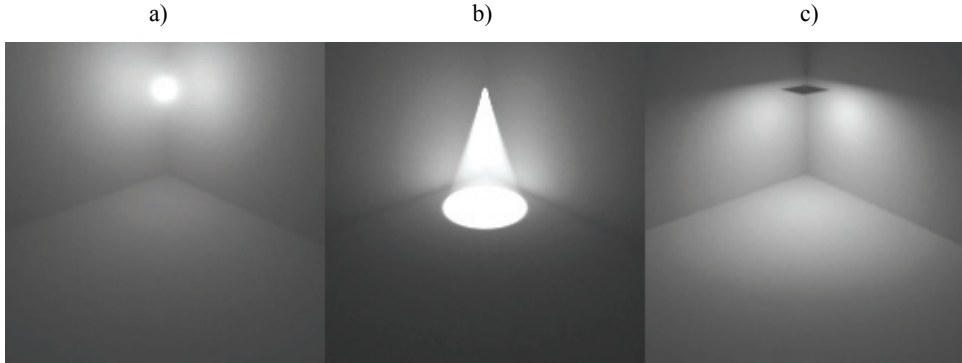
Rys. 4.9. Schemat generowania obrazów za pomocą metody śledzenia promieni (raytracing) [328]

Obiekty sceny to bryły 3D, których geometria powierzchni modelowana jest siatką. Siatka rozpięta jest na chmurze punktów, które digitalizują obiekt. Składa się z werteksów, krawędzi i powierzchni, które mogą być wielokątami lub trójkątami. Od jej gęstości zależy wierność odwzorowania geometrycznego, ale jednocześnie złożoność modelu. Dla optymalizacji kryteriów stosuje się dynamiczne próbkowanie powierzchni, zależne od jej zmienności geometrycznej oraz wygładzanie powierzchni przez interpolację wektorów normalnych powierzchni.

Kamera to detektor matrycowy natężenia światła wyposażony w dodatkowe funkcje przetwarzające pozyskany obraz. Ma punkt początkowy, związany z obserwatorem i rzutnią, odpowiednik macierzy światłoczułych pikseli. Może pracować w trybie monochromatycznym, kolorowym RGB, a nawet spektralnym. Zmiana czasu otwarcia migawki oraz czułości ISO, wpływa na ekspozycję. Liniowość konwersji optyczno-elektrycznej zależy od parametrów mapowania tonalnego, a dynamika jest zależna od pojemności struktury danych (8/16-bitowa) oraz korekcji gamma. W środowiskach symulacyjnych kamera pracuje w trybie generatora promieni „rzucanych” w kierunku sceny (ang. *ray casting* lub *back propagation*) albo jako powierzchnia, na którą rzutowana jest widoczna część geometrii sceny (ang. *rasterization*).

Obiektów, tak jak w rzeczywistych układach obrazowania, zapewnia dopasowanie geometryczne między polem widzenia a wielkością detektora. Decyduje o odległości

pracy, a wielkość otworu (apertura) o parametrach ekspozycji i głębi ostrości. Wprowadza również błędy rzutowania, tj. perspektywę, winietowanie, dystorsje i aberracje.



Rys. 4.10. Prymitywy oświetleniowe:
a) źródło punktowe, b) kierunkowe, c) powierzchniowe [LuxRender]

Źródło światła jest charakteryzowane przez charakterystykę spektralną i rozsyłu światła dla każdego punktu powierzchni emitującej. Stosuje się wiele uproszczeń, stąd źródło światła wypromieniowuje z każdego punktu swojej powierzchni jednakowe natężenie we wszystkich kierunkach, o jednakowej długości fali. W renderowaniu stosuje się prymitywy oświetleniowe, takie jak źródło punktowe, emiter kierunkowy lub powierzchniowy rys. 4.10.

Punktowe źródło światła emituje we wszystkich kierunkach jednakowe natężenie I . Emiter kierunkowy wysyła stałe natężenie światła w określonym kierunku, emiter zaś powierzchniowy, rozsyła światło o natężeniu korygowanym o charakterystykę kosinusową.

Równanie renderowania, zwane równaniem transportu światła (ang. *rendering equation*), pokazuje, że światło padające do obserwatora (kamery) z konkretnego punktu jest sumą energii emitowanej przez obiekt, w tym bezpośrednio z emitera, oraz światła odbitego:

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega) + \int_{\Omega} \text{BRDF}(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i \quad (4.16)$$

gdzie:

- $L_o(p, \omega_o)$ – radiancja wychodząca z punktu p w kierunku ω_o ,
- $L_e(p, \omega_o)$ – radiancja emitowana z obiektu (również od emitera) z punktu p w kierunku ω_o ,
- $\int_{\Omega} L_i(p, \omega_i)$ – suma radiancji z kąta bryłowego,
- $\text{BRDF}(p, \omega_o, \omega_i)$ – funkcja rozpraszania światła w punkcie p ,
- $|\cos \theta_i|$ – korekta kosinusowa.

Rozwiązanie równania (4.16) transportu światła nie jest możliwe efektywnie czasowo, stąd wprowadzanych jest wiele uproszczeń, np. ograniczenie sumowania do kierunków od źródła światła i powierzchni doskonale refleksyjnych lub transmisyjnych. Do obliczeń stosuje się metodę całkowania numerycznego MCM (ang. *Monte Carlo Method*). Polega ona na próbkowaniu zgodnie z zadaniem rozkładem zmiennej i obliczaniu wartości w wylosowanych punktach. Takie podejście umożliwia jej zastosowanie również dla funkcji nieciągłych. Błędy całkowania MCM maleją odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka z liczby próbek $\frac{1}{\sqrt{n}}$, zależą równocześnie od jakości

generatora losowego. Jakość przybliżenia numerycznego może być wyznaczona za pomocą twierdzenia Picka.

Rozkład światła definiuje geometryczną i energetyczną (radiometryczną) charakterystykę rozpraszania światła w każdym znalezionym punkcie powierzchni. Trudność zadania obliczeniowego wynika ze złożoności takiej charakterystyki, gdyż żaden z punktów sceny nie jest oświetlany źródłem punktowym światła. Rzeczywiście oświetlacze, np. emiterzy powierzchniowe czy też wielokierunkowe, są źródłami światła w polu bliskim, tak więc muszą być rozważane jako superpozycja różnych światłości elementarnych. Typowo w obliczeniach natężenia napromieniowania uwzględniana jest kosinusowa charakterystyka tłumienia strumienia świetlnego w funkcji pochylenia powierzchni oraz zmniejszanie intensywności w kwadracie odległości

$$dE = \frac{\Phi \cos \theta}{4\pi r^2} \quad (4.17)$$

gdzie:

- Φ – całkowity strumień świetlny,
- θ – nachylenie powierzchni,
- r – odległość od powierzchni.

Wsteczna propagacja promieni jest stosowana do poprawy efektywności obliczeniowej, jednak jej najistotniejszą wadą jest zaniedbywanie zjawiska cienia. Do obliczenia napromieniowania na powierzchniach, których punkty nie leżą na bezpośredniej ścieżce promieni od kamery, wprowadzono mechanizm generowania wstecznych promieni, nazywanych promieniami cieniowymi (ang. *shadow rays*).

Każdą powierzchnię cechuje charakterystyczne rozpraszanie światła, najpełniej opisywane za pomocą funkcji BRDF (4.3). Ze względu na trudności w uzyskiwaniu takich charakterystyk oraz złożoność obliczeniową, w grafice komputerowej mają zastosowanie modele zastępcze. Można uogólnić, że kryterium doboru algorytmów w grafice komputerowej jest wynik renderowania w sensie jakości obrazu i czasu jego tworzenia, co jest osiąganym nawet brakiem poprawności fizycznej, np. brakiem zachowania energii. Stąd podział modeli oświetlenia na trzy grupy [88]:

- modele zaniedbujące właściwości fizyczne powierzchni, zestrojone empirycznie, bardzo wydajne (światło otocznia, model Lamberta, model Phong, model Blinna-Phonga, funkcja rozbłyśku),
- modele fizyczne, bazujące na parametrach materiałowych oraz parametrach warstwy wierzchniej (model mikrościanek, funkcja szorstkości, współczynnik Frenela, model Cooka-Torrance'a, model HTSG),
- modele hybrydowe, łączące poprawność fizyczną i wysoką wydajność (model Straussa, model Warda, model Schlicka, model Ashikhmina-Shirleya, model Lafortune'a).

Jako fundamentalny model wskazywany jest empiryczny model Phong [225], wprowadzający chropowatość (szorstkość) do modelowania charakterystyki odbiciowo-rozproszeniowej. Cook i Torrance [66] rozwinęli opis matematyczny Torrance i Sparrova [307], do modelu bazującego na tzw. V-rowkach. He i in. [115] opracowali analityczny model refleksyjności powierzchni, składający się z trzech komponentów: zwierciadlanego, rozpraszania kierunkowego oraz jednorodnego, uwzględniając długość fali i jej kąt padania, dwa współczynniki chropowatości i indeks załamania światła. Oren i Nayar [213] zdefiniowali rozpraszanie nie-lambertowskie, używając mikropłaszczyzn o charakterystykach lambertowskich.

Klasyfikacja modeli rozpraszania światła w środowiskach renderujących podporządkowana jest ich aplikacjom, stąd specjalistyczne modele dla powierzchni matowych (ang. *matte*), transparentnych (ang. *glass*), połyskliwych (ang. *glossy*), metalowych (ang. *metals*) czy wielowarstwowych (ang. *layerd*).

Najprostszy sposób modelowania powierzchni, np. tworzyw sztucznych, używa wyłącznie komponentu dyfuzyjnego, a kolor wprowadza przez definicję absorpcyjności. Stosowane są tutaj dwa modele, lambertowski albo Oren-Nayar. Model dyfuzyjny Lamberta, charakteryzujący się jednakową we wszystkich kierunkach rozpraszalnością światła, bez składowej absorpcji oraz zgodnością punktu padania i punktu emisji światła. Model ten zaniedbuje chropowatość powierzchni, stąd dla powierzchni chropowatych, takich jak beton, tkaniny, piasek, nie znajduje zastosowania. Model refleksyjności Oren-Nayar jest oparty na mikropłaszczyznach tworzących rowki V, o charakterystyce dyfuzyjnej, stąd między sąsiadującymi powierzchniami zachodzi interakcja światła. Do opisu powierzchni definiowana jest szorstkość, jako miara rozkładu prawdopodobieństwa kątowego wektorów normalnych do mikropowierzchni oraz ich wielkości. Używane jest również pojęcie chropowatości, co jednak nie ma odniesienia do chropowatości w mechanice i inżynierii powierzchni. Stąd wartość zero oznacza powierzchnię idealnie płaską, im powierzchnia jest bardziej szorstka, tym więcej światła przekierowywanego jest w kierunku źródła światła (ang. *grazing angles*), nadając jej płaski wygląd.

Do modelowania dielektryków transparentnych (szkło, transparentne tworzywa sztuczne) stosowany jest model (*glass*), bazujący na współczynniku załamania światła IOR. Współczynnik ten jest podstawą do wyznaczenia kierunku załamania światła

(prawo Snella) oraz ilości światła transmitowanego przez granicę dwóch ośrodków (równanie Fresnela). Dla materiałów o silnej zmienności współczynnika załamania światła w funkcji długości fali, obliczany jest wynik dyspersji. Zmienny współczynnik załamania światła wprowadzany jest za pomocą równań Cauchy'ego lub Sellmeiera, będących zależnością empiryczną, albo poprzez wprowadzenie charakterystyk ujętych w tabelach.

Powierzchnie połyskliwe, uzyskiwane przez lakierowanie, modelowane są jako struktury warstwowe. Przykładowo, warstwa dyfuzyjna pokryta zostaje dielektrykiem w wyniku czego, część światła, która nie uległa odbiciu na powierzchni, ulega rozpraszaniu i absorpcji w warstwie niższej. Możliwe jest definiowanie grubości warstw i odległości między nimi w nanometrach, co oznacza modelowanie warstw cienkich, które wpływają szczególnie na charakterystykę odbicia zwierciadlanego. Przykładowo, bardzo realistyczny wygląd lakieru samochodowego „metalik” uzyskano z zastosowaniem struktury czterowarstwowej, jednak nie udało się w ten sposób zamodelować efektu perłowego [110].

Metale należą do najliczniejszej grupy materiałów przewodzących, których charakterystyka optyczna zależy od współczynnika załamania światła (IOR) oraz struktury topograficznej powierzchni. W przeciwieństwie do dielektryków przejrzystych, nie mają one składowej transmisyjnej, stąd główna część promieniowania jest odbijana, a zaledwie niewielka część jest absorbowana w warstwie nanometrycznej. Struktura powierzchni jest modelowana jako szorstkość mikroplaszczyny. Kolor metalu zależy głównie od współczynnika załamania światła (nk), który jest zależny od długości fali.

Podjęcie do modelowania rzeczywistych powierzchni wymaga jednak bardziej złożonych modeli, które są budowane z użyciem warstw (ang. *layers*) oraz teksturowania. Warstwy dają możliwość procesowego spojrzenia na wyznaczanie charakterystyki rozpraszania światła, teksturowanie zaś umożliwia lokalne parametryzowanie elementów tego łańcucha. Tekstury definiuje się przez obrazy, które mapowane są na powierzchni. Pozwalają parametryzować jej wysokość, barwę, współczynnik połyskliwości, rozpraszania. W przypadku teksturowania kolorów, mapa steruje parametrami dyfuzyjności [51]. W przypadku modyfikacji wysokości używane są mapy skoków (ang. *bump maps*) [39] lub mapy normalnych (ang. *normal maps*). Mapy skoków, jako obrazy monochromatyczne, pozwalają modyfikować jedynie położenie początku wektora normalnej. Mapy normalnych, zapisane jako obrazy kolorowe, umożliwiają parametryzację przestrzenną. W obu podejściach zmodyfikowane wektory normalnych wpływają na lokalnie współczynniki rozpraszania. Podejście takie jest wydajne obliczeniowo, jednak nie oddziałuje na sąsiedztwo liczonego punktu, stąd brak efektów cieni i przesłaniania. Rozwiązane takie oferują mapy przemieszczeń, które oddziałują na geometrię powierzchni, poprzez modyfikację siatki [64, 65]. Dla renderowania w czasie rzeczywistym, proponowane są kolejne odmiany takich map, jak np. dwukierunkowa funkcja tekstury BTF (ang. *bi-directional texture function*) [68], mapowanie odkształceń zależne od obserwacji VDM (ang. *view dependent displacement mapping*) [320] i inne.

4.6. Symulacje optyczne

Symulacje optyczne są powszechnie stosowane przez optyków do projektowania i optymalizacji układów optycznych, obrazujących i oświetleniowych. Można wyróżnić cztery główne metody modelowania:

- sekwencyjne śledzenie promieni,
- niesekwencyjne śledzenie promieni (ang. *ray tracing*),
- śledzenie pola (ang. *field tracing*) [334, 335] oraz
- metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD (ang. *Finite-Difference Time-Domain*) [262].

W przypadku układów obrazujących, np. obiektywów, w tym afokalnych, kryteria projektowania dotyczą ich ostrości, dystorsji, aberracji i zakresu częstotliwościowego. Analiza przebiegu promieni prowadzona jest sekwencyjnie, między poszczególnymi powierzchniami toru optycznego. Na powierzchniach nie występuje zjawisko rozpraszania. Sekwencyjne śledzenie promieni jest szybkie, stąd znajduje zastosowanie do optymalizacji i badania wrażliwości modelu (ang. *tolerancing*). Optymalizacja umożliwia automatyczne wyznaczanie parametrów układu, np. odległość między soczewkami, ich ogniskową, przy zadanych ograniczeniach i funkcji celu.

Drugi paradygmat propagacji światła, niesekwencyjny (NSC), umożliwia współistnienie wielu dróg optycznych w systemie, co jest wynikiem rozpraszania światła lub interferencji. W podejściu tym nie ma narzuconych dróg optycznych, których tworzenie jest wynikiem próbkowania Monte Carlo. Podejście takie jest zatem znacznie bardziej elastyczne, ale równocześnie wymaga dokładniejszych obliczeń. Model niesekwencyjny jest adresowany szczególnie do projektowania układów oświetleniowych oraz analizy światła zakłócającego (ang. *stray light*).

Pod kątem modelowania systemów akwizycji obrazów, a zwłaszcza oświetlenia, największe znaczenie odgrywa niesekwencyjne śledzenie promieni. Dostępnych jest wiele środowisk wspierających takie numeryczne modelowanie propagacji światła, m.in. ASAP, Fred, LightTool, Speos, TracePro, Zemax [289].

Środowiska symulacji optycznych oferują bogate biblioteki komponentów optycznych oraz narzędzia do pomiarów i weryfikacji wyników. W zakresie komponentów optycznych, z których budowany jest model, dostępne są soczewki sferyczne, asferyczne, stożkowe, eliptyczne i cylindryczne, pojedyncze, jak również w układach macierzowych. Ponadto, dostępnych jest wiele prymitywów geometrycznych, z których budowane są obiekty, również z użyciem operacji logicznych. Obiekty mogą być importowane jako modele CAD, przygotowane w zewnętrznych środowiskach, zapisane w różnych formatach danych. Liczba obiektów zależy od środowiska symulacyjnego, które może oferować 50–100 różnych obiektów.

Oprócz geometrii powierzchni, podstawą propagacji światła w modelu niesekwencyjnym jest podział promieni i ich rozpraszanie jako BSDF. Obok modeli podstawowo-

wych oferowane są modele analityczne, jak np. model rozpraszania gaussowskiego zdefiniowany zależnością [13]:

$$\text{BSDF}(\vec{x}) = A e^{-\frac{|\vec{x}|^2}{\sigma^2}} \quad (4.18)$$

gdzie:

A – współczynnik znormalizowany,

σ – szerokość rozkładu, gdy $\sigma > 5$ dąży on do rozpraszania lambertowskiego. Model ten występuje również w odmianach asymetrycznych.

Model rozpraszania ABg znajduje zastosowanie dla powierzchni izotropowych, których chropowatość jest mniejsza od długości fali. Zgodnie z nim rozpraszanie jest opisywane jako [13]:

$$\text{BSDF}(\vec{x}) = \frac{A}{B + |\vec{x}|^g} \quad (4.19)$$

Najdokładniejszym opisem charakterystyki optycznej danej powierzchni jest model BSDF. Gdy bazuje na danych pomiarowych, są one wczytywane z pliku danych i aproksymowane dla osiągnięcia wymaganej rozdzielczości sferycznej. Możliwe jest również opracowanie własnego modelu rozpraszania światła, który jest implementowany i dołączany do modelu NSC w postaci zewnętrznych bibliotek.

Drugą grupę elementów modelowania optycznego stanowią źródła światła. Dostępne są modele: diod LED, żarników, źródeł eliptycznych, gaussowskie, emitujące zgodnie z modelem danych ELUMDAT, IES i RayFiles. Ponadto, do dyspozycji projektanta są modele, których emisyjność kształtuje geometria albo jest ona obliczana przez zewnętrzny komponent. Intensywność diody LED, jako funkcja kąta θ względem normalnej jest modelowana jako [13]:

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 e^{-2 \left(\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right)} \quad (4.20)$$

gdzie:

α_x – kąt dywergencji w płaszczyźnie XZ ,

G_x – współczynnik „supergaussian” w kierunku X , i odpowiednio dla zmiennych z indeksem y . W przypadku diod LED, o charakterystyce gaussowskiej $G_x = G_y = 1$, podawana jest szerokość połowkowa charakterystyki rozsyłu w polu dalekim θ_{FWHM} , stąd:

$$\alpha_x = \frac{\theta_{FWHM}}{\sqrt{2 \ln(2)}} \quad (4.21)$$

W przypadku źródła bazującego na powierzchni obiektu, jego charakterystyka emisyjności jest opisywana prawdopodobieństwem:

$$P(\theta) = (\cos \theta^x) \quad (4.22)$$

gdzie:

- θ – kąt względem normalnej w danym punkcie powierzchni na zewnątrz obiektu,
- x – parametr użytkownika o znaczeniu $x = 0$, charakterystyka światłości jest równomierna w całej półsfery, $x = 1$ odpowiada charakterystyce lambertowskiej, dla innych wartości występuje wyłącznie kierunkowość zgodna z normalną do powierzchni [13].

O możliwościach analitycznych środowiska symulacyjnego decydują narzędzia pomiarowe, takie jak detektory prostokątne i powierzchniowe (swobodne), detektory polarne i detektory objętościowe. Detektory umożliwiają prezentację wyników rejestracji energii podczas symulacji, w jednostkach radiometrycznych lub fotometrycznych, oraz wizualizację rozkładów napromieniowania w układzie przestrzennym lub kierunkowym. Możliwa jest również analiza polaryzacji, długości fali oraz koherencji.

Podstawą obliczeń transportu światła jest śledzenie promieni (ang. *ray-tracing*). Do analizy światła rozproszonego, bardzo przydatna jest możliwość filtracji bazy danych promieni wygenerowanych podczas symulacji. Dla jej efektywności dostępne są filtry pozwalające zawęzić przeszukiwany zakres według kryterium interakcji z powierzchnią, liczby odbić, energią, długością fali. Poprawa wydajności ray-tracingu jest osiągana przez zawężenie obszaru/powierzchni próbkowania, decymację podziału siatki pokrywającej powierzchnię lub nawet ograniczenie śledzenia promieni wyłącznie do krawędzi obiektów.

4.7. Podsumowanie

Dokonano przeglądu podstawowej wiedzy z zakresu optyki i grafiki komputerowej, a zwłaszcza: widzenia, radiometrii i rozpraszania światła na powierzchniach, obrazowania, renderingu i symulacji optycznych. Najistotniejsze wnioski i spostrzeżenia, w kontekście projektowania systemów kontroli wizyjnej z użyciem metod numerycznych, są następujące.

Obraz pozyskiwany przez kamerę różni się od tego jaki postrzega człowiek, oznacza to, że studium wykonalności technicznej systemów wizyjnych musi bazować na obrazach, a nie wyłącznie na ocenie wizualnej.

Poprawny opis parametrów światła w kontekście systemów wizyjnych powinien operować na wartościach radiometrycznych, co wynika z innej czułości widmowej kamer i oka ludzkiego. Do opisu optycznych efektów rozpraszania światła ma zastosowanie funkcja BRDF, która uwzględnia kierunek padania wiązki oświetlającej

i kierunek obserwacji powierzchni, jak również wpływ charakterystyki spektralnej światła.

Obrazowanie jest stratną transformacją fizycznej tekstury powierzchni, wraz z zakłóceniami jej homogeniczności, na obraz, tj. dwuwymiarową mapę radiancji. Jej zakres informacyjny może być rozszerzany przez wprowadzanie kolejnych komponentów fizycznej struktury powierzchni, tj. dodawanie kanałów chromatycznych oraz kolejnych wartości funkcji BRDF. Celem projektowania systemów wizyjnych jest uzyskanie informacji o zakłóceniach jej homogeniczności (nieciągłości, skazy) przy minimalizacji stopni swobody BRDF i kanałów chromatycznych. Wynika to z potrzeby wydajności i aspektów ekonomiczności.

Grafika komputerowa oferuje coraz to wydajniejsze metody i narzędzia do wyznaczania rozkładów radiancji sceny, tj. wirtualnego fotografowania modeli. Do wyznaczania rozsyłu światła na powierzchniach dostępne są trzy klasy modeli: (1) eksperymentalne, bardzo wydajne, ale niepoprawne fizycznie, (2) bazujące na zjawiskach fizycznych, ale wymagające znacznych zasobów obliczeniowych oraz (3) hybrydowe. Dla wyboru najlepszego modelu stosowana jest ocena subiektywna

Symulacje optyczne są istotnym narzędziem projektowania układów obrazujących i oświetleniowych. Oferują one bardzo obszerne biblioteki modeli prymitywów geometryczno-optycznych i źródeł światła. Ponadto, w przeciwieństwie do narzędzi renderingu, oferują bardzo rozbudowane narzędzia pomiarowe i służące do weryfikacji wyników, a nawet przebiegu symulacji. Parametryzacja optyczna powierzchni bazuje jednak wyłącznie na modelach poprawnych fizycznie BSDF i ABg. W przeciwieństwie do metod grafiki komputerowej, modelowanie kamery z obiektywem oraz skaz powierzchni za pomocą teksturowania, wymaga znacznie większych nakładów i znajomości „niskopoziomowych” parametrów optycznych.

5. Identyfikacja parametrów optycznych procesów akwizycji obrazów

Znajomość parametrów komponentów systemów wizyjnych oraz ich możliwości integracyjne są fundamentalnym wyzwaniem dla projektantów. Wyzwanie to, w kontekście urządzeń optomechatronicznych, jest jeszcze większe, gdyż wynika z interdyscyplinarności, łączącej parametry mechaniczne, optyczne, elektryczne oraz termiczne.

Charakteryzowanie kamer przez technologię sensora (CCD, CMOS, HDRC), jego wielkość i rozdzielczość oraz interfejs komunikacyjny dla wielu zastosowań jest niewystarczające. Porównanie takich parametrów, jak liniowość, czułość spektralna, szumy okazuje się bardzo trudne lub nawet niemożliwe, ze względu na brak standaryzacji. Prowadzone są wprawdzie działania ujednolicające, np. EMVA1288, które pozostają jednak ciągle w zakresie zainteresowania wąskiej grupy projektantów i twórców kamer. W ramach przeprowadzonych badań [243] opracowano stanowiska pomiarowe i algorytmy przetwarzania obrazów zgodnie z zaleceniami EMVA1288, umożliwiające:

- pomiary czułości, liniowości i niejednorodności, z użyciem homogenicznego, monochromatycznego źródła światła,
- pomiary wpływu temperaturowego na ciemny prąd oraz
- pomiary spektralne, sprawności kwantowej przetwornika w zakresie jego czułości.

Uzyskane wyniki umożliwiają pełniejsze charakteryzowanie detektorów światła. Jednak pod kątem metod symulacyjnych, obecnie dostępne środowiska renderowania nie wspierają możliwości wprowadzania takich parametrów. Stąd uznano, że rozszerzone badania kamer wykraczają poza zakres niniejszej monografii.

Znaczenie jakości obiektywów, docenionej przez fotografów, rośnie wraz ze zwiększaniem rozdzielczości przetworników oraz potrzebą ograniczania niepewności pomiarowych systemów wizyjnych. Badania obiektywów, wraz ze współpracującymi kamerami, ale również oświetlaczami, nie wymagają kosztownej aparatury. Ich podstawą jest odpowiedni wzorzec oraz algorytmy do analizy obrazów wraz ze statystyczną obróbką wyników. Dzięki takim badaniom możliwa jest ilościowa ocena

aberracji, w tym dystorsji oraz funkcji przenoszenia kontrastu (MTF). Podobnie jak w przypadku rozszerzonych parametrów kamer, aktualnie dostępne środowiska renderujące bazują na uproszczonym modelu obiektywu, dlatego zagadnienie wykracza poza zdefiniowany zakres monografii.

W większości przypadków projektanci systemów wizyjnych sięgają po oświetlacze gotowe. Charakterystyki opisujące ich parametry są jednak nieprecyzyjne, stąd podstawą ich doboru jest testowanie, które wymaga dostępności do obszernej bazy sprzętowej. Gdy geometria wyrobu jest bardzo złożona lub występują ograniczenia konstrukcyjne, często podejmowana jest decyzja o projektowaniu i wykonaniu oświetlacza dedykowanego. Projektowanie takie wymaga rozwiązania problemów optycznego kształtowania charakterystyki rozsyłu światła, zasilania, odprowadzania ciepła oraz konstrukcji i technologii wykonania. Jedynie nieliczni producenci udostępniają obszerne dane wspierające ten proces, stąd często zachodzi potrzeba identyfikacji parametrów optycznych, elektrycznych i termicznych, a nawet mechanicznych takich układów optoelektronicznych.

Parametry struktury geometrycznej powierzchni, takie jak wskaźniki chropowatość profilu R , lub wskaźniki powierzchniowe S i objętościowe V [210], dla jej charakterystyki optycznej są dalece niewystarczające. Charakterystykę rozpraszania światła najlepiej opisuje dwukierunkowa funkcja rozpraszania światła na powierzchni BRDF, jednak jej uzyskanie wymaga specjalistycznej aparatury. Jeszcze większym wyzwaniem okazuje się umiejętność jej interpretacji oraz dalszego użycia.

W ramach niniejszego rozdziału omówiono problematykę identyfikacji parametrów optycznych źródeł światła, tj. oświetlaczy dla systemów wizyjnych oraz diod LED. Ponadto dokonano identyfikacji parametrów powierzchni metodami geometrycznymi i optycznymi.

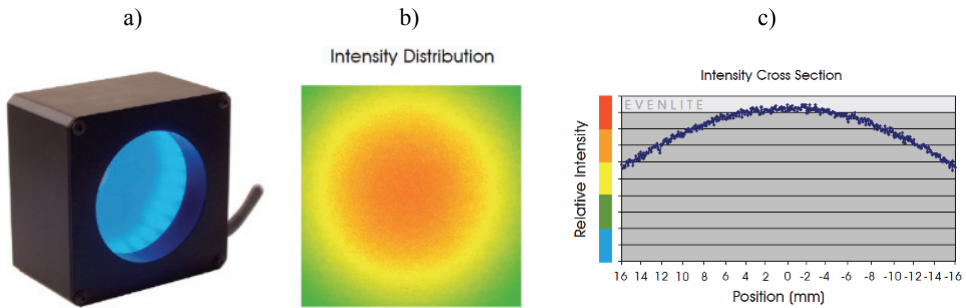
5.1. Źródła światła i oświetlacze

5.1.1. Oświetlacze do systemów wizyjnych

Układy akwizycji obrazów w systemach wizyjnych stosują szeroką paletę technik oświetleniowych. Oświetlacze dla systemów wizyjnych, w przeciwieństwie do lamp oświetleniowych zewnętrznych czy wewnętrznych, oświetlają obiekt w polu bliskim. Światło pada na badaną powierzchnię z wielu kierunków, stąd opis oświetlacza, jako źródła punkowego, przez charakterystykę światłości – nie jest przydatny.

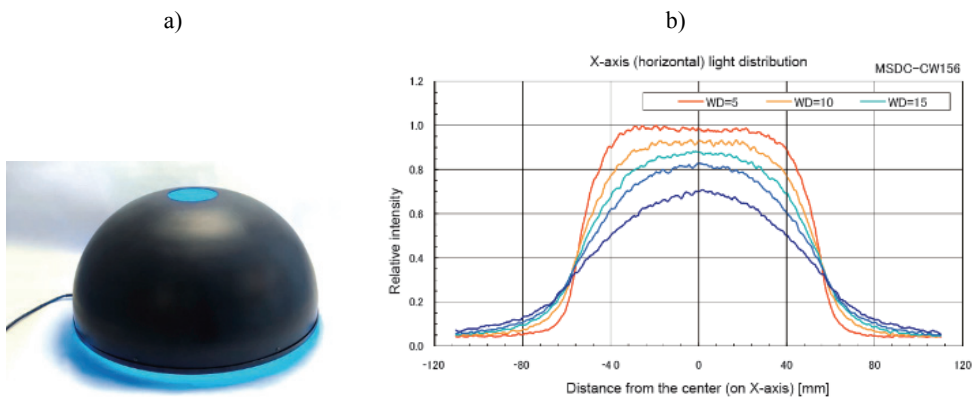
Brak metod prostego i jednoznacznego opisu oświetlaczy systemów wizyjnych skutkuje podawaniem charakterystyk zastępczych. Stąd w kartach katalogowych pojawiają się rozkłady natężenia oświetlenia na powierzchni prostopadłej do osi optycznej.

Przykładowo, dla oświetlacza kopułkowego rozpraszającego (rys. 5.1) znajdujemy: optymalną odległość pracy 12,7 mm oraz zakres pracy 12,7–50 mm. Dla zobrazowania zaleceń przedstawiony jest obraz rozkładu i profil natężenia oświetlenia na powierzchni, w optymalnej odległości pracy.



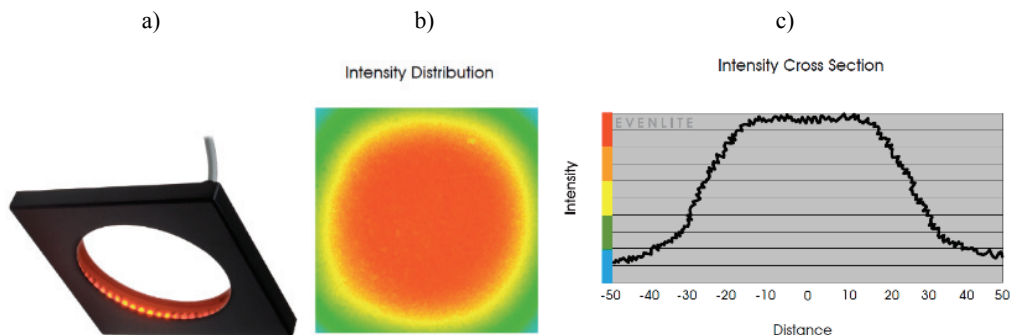
Rys. 5.1. Oświetlacz kopułkowy: a) zdjęcie, b) natężenie napromieniowania powierzchni ($z = 12,7$ mm), c) profil natężenia napromieniowania [12]

W innym przykładzie (rys. 5.2) są pokazane charakterystyki natężenia oświetlenia w funkcji odległości powierzchni od oświetlacza. Niestety, charakterystyki nie pokazują najważniejszej cechy tego typu oświetlacza, zdolności do wielokierunkowego oświetlania powierzchni, co jest realizowane przez rozpraszanie światła na powierzchni wewnętrznej kopułki. Stąd osiągany jest obraz „bezcieniowy” badanych powierzchni, co ma fundamentalne znaczenie dla akwizycji obrazów powierzchni silnie refleksyjnych, gdy celem jest wykrywanie zmian absorpcyjności, akwizycji obrazów, np. plam.



Rys. 5.2. Oświetlacz kopułkowy:
a) zdjęcie, b) profile natężenia naświetlenia powierzchni w funkcji odległości [14]

Jeszcze trudniejsze jest charakteryzowanie oświetlacza typu ciemne tło. Mapa natężenia (rys. 5.3) informuje wprawdzie o jednorodności oświetlenia w danej odległości, ale nie charakteryzuje skuteczności uwypuklania zmienności topograficznej powierzchni.



Rys. 5.3. Oświetlacz DarkField: a) zdjęcie, b) mapa natężenia napromieniowania ($z = 12,7$ mm), c) profil natężenia napromieniowania [12]

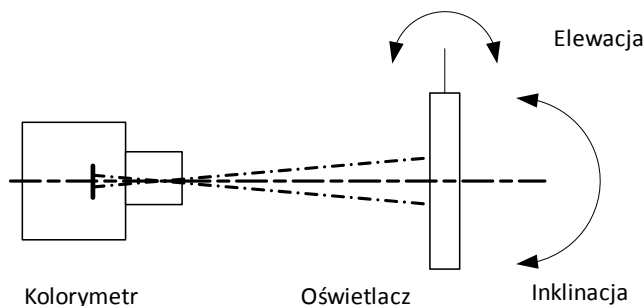
Podane przykłady wskazują również, że prezentowane parametry pochodzą z symulacji optycznych. Fakt ten nie jest krytyczny, pod warunkiem, że parametry rzeczywistych oświetlaczy nie odbiegają od tolerancji, które niestety nie są zdefiniowane.

W wyniku podanych problemów, większość wytwórców oświetlaczy dla systemów wizyjnych, charakteryzuje je jedynie bardzo ogólnie. Za to oferują możliwość i współpracę przy testowaniu i doborze rozwiązania optymalnego.

5.1.2. Metoda pomiarów światłości w polu bliskim

Do pomiarów rozkładów światłości w polu bliskim stosowane są fotogoniometry obrazujące. W takim układzie detektor matrycowy kolorymetru rejestruje luminację powierzchni źródła światła pod różnymi kątami obserwacji. Manipulacja źródłem światła lub detektorem realizowana jest za pomocą goniometru, np. dwuosiowego. Na podstawie pomiarów w polu bliskim, możliwe jest wyznaczenie zarówno rozkładu światłości w polu dalekim, jak i wygenerowanie pliku promieni (ang. *Rayfile*). Plik taki zawiera współrzędne wektorów (promieni), o zdefiniowanym początku, kierunku oraz wartości. Zależnie od możliwości pomiarowych urządzenia oraz formatu zapisu danych, początki promieni mogą być rozłożone na płaszczyźnie, sferze, walcu lub prostopadłościanie. Z każdym promieniem jest związana przenoszona moc, która może być wyrażana radiometrycznie, kolorymetrycznie lub spektrometrycznie.

Przykładowe rozwiązanie fotogoniometru pola bliskiego (firmy Radiant Zemax NFSM-4000), do pomiaru opraw oświetleniowych [149], który użyto podczas badań oświetlaczy systemów wizyjnych, pokazano na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Schemat fotogoniometru obrazującego

Urządzenie składa się z goniometru dwuosiowego o rozdzielczości kątowej 0,01 stopnia, kamery PFMS-1613F oraz spektrometriu. Kamera bazuje na 16-bitowym, chłodzonym przetworniku CCD o rozdzielczości 1024 pix na 1024 pix zapewniająca czułość 0,005 nit. Dla zgodności fotometrycznej jest wyposażona w filtr chromatyczny. Dla bardzo jaskrawych źródeł światła (do 10E9 nit) stosuje się tłumiące filtry szare. O polu widzenia i rozdzielczości przestrzennej układu decydują obiektywy, które wymagają kalibracji optycznej w zakresie dystorsji aberracji, winietowania oraz transmisyjności.

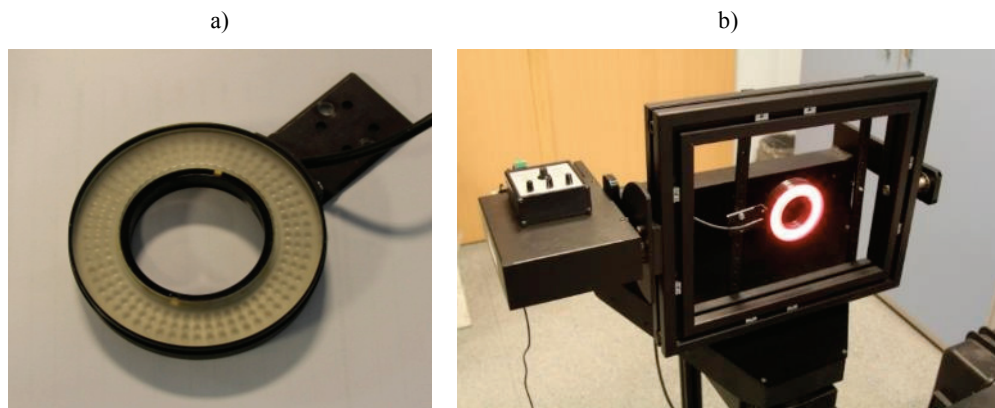
Tabela 5.1. Parametry obrazowania fotogoniometru w zależności od zastosowanego obiektywu

Ogniskowa obiektywu	Odległość pracy [mm]	Pole widzenia [mm]	Rozdzielczość [mm/pix]
$f = 50$ mm	1000/2000	445/915	0,43/0,89
$f = 85$ mm	1000/2000	260/556	0,25/0,54

Błąd takich pomiarów zależy głównie od poprawności kalibracji geometrycznej układu oraz korekcji błędów toru optycznego – (ang. *flat field*, *distorsion*). Jest on specyfikowany w zakresie dokładności, dla pomiarów fotometrycznych $\pm 3\%$ oraz dla pomiarów kolorymetrycznych: $\pm 0,003$, a w zakresie powtarzalności, odpowiednio: $\pm 0,05\%$ oraz $\pm 0,0006$. Współbieżnie z akwizycją obrazów rejestrowane są charakterystyki spektralne dla każdego z kątów inklinacji i azymutu ustawienia oświetlacza za pomocą spektrometriu, co umożliwia pomiary kolorymetryczne.

5.1.3. Wyniki pomiarów oświetlaczy do systemów wizyjnych

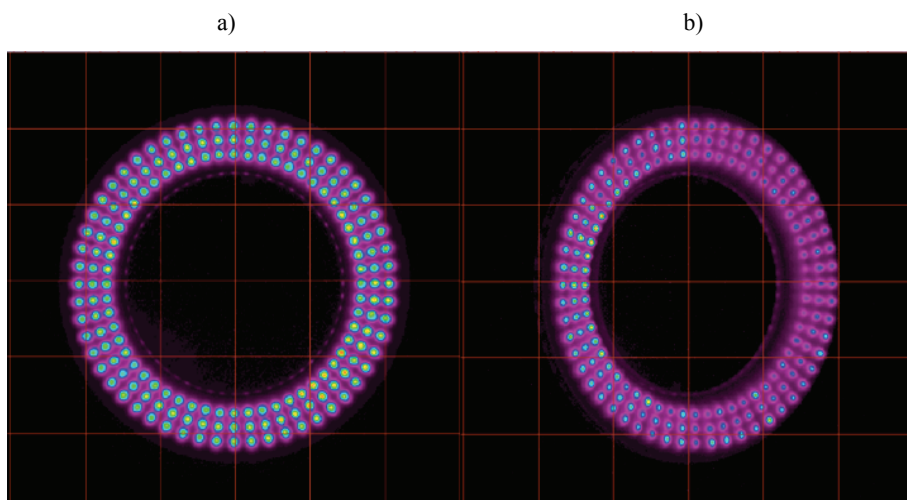
Do pomiarów charakterystyki rozsyłu światła w polu bliskim, oświetlacza pierścieniowego Ring_LED o średnicy 100 mm, użyto fotogoniometru obrazującego. Pole widzenia kamery 260 mm $\times$ 260 mm osiągnięto z zastosowaniem obiektywu $f = 85$ mm i odległości pracy 1 m.



Rys. 5.5. Zdjęcie badanego oświetlacza Ring_LED oraz układ pomiarowy

Kolorymetr obrazujący skonfigurowano w trybie fotometrycznym, przy pełnej rozdzielczości akwizycji, a do uzyskania informacji chromatycznej użyto spektrodiodometru. Pomiary zaplanowano z rozdzielczością $\Delta\varphi$ i $\Delta\theta = 15^\circ$. Oświetlacz zasilono ze źródła prądowego. Temperatura obudowy po 20 min ustabilizowała się na poziomie 46 stopni.

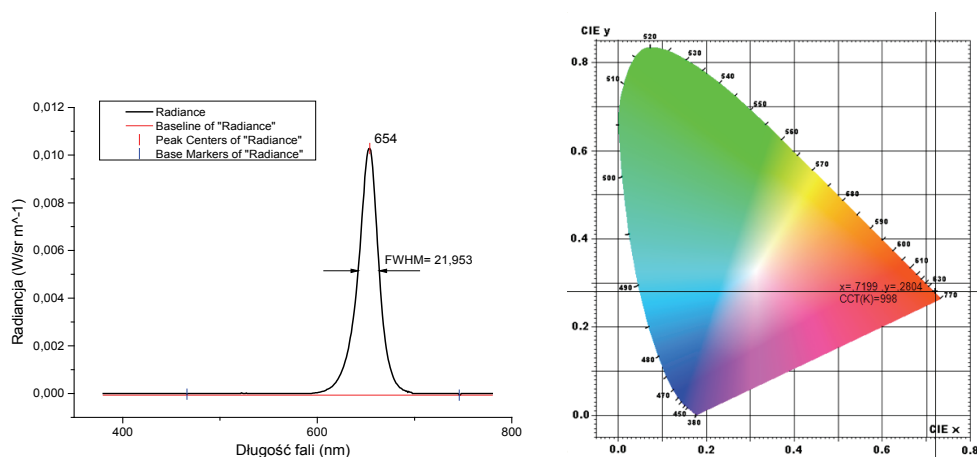
Zarejestrowano 90 obrazów rozkładów luminancji oświetlacza pod różnymi kątami. Dwa przykładowe, dla kąta $\varphi = 0^\circ$ i $\theta = 0^\circ$ oraz $\varphi = 30^\circ$ i $\theta = 30^\circ$ przedstawiono na rys. 5.6. Zastosowano różne zakresy skali luminancji dla ukazania szczegółów.



Rys. 5.6. Rozkłady luminancji oświetlacza dla kątów:

a) $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, b) $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$

Parametry kolorymetryczne oświetlacza wyznaczono na podstawie serii danych ze spektrometri. Charakterystykę spektralną dla frontalnej pozycji oświetlacza, na której zaznaczono dominującą długość fali świetlnej oraz szerokość połówkową, charakteryzującą monochromatyczność promieniowania pokazano na rys. 5.7. Zebrane dane spektralne posłużyły również do wyznaczenia współrzędnych kolorymetrycznych Cx Cy w modelu CIE.



Rys. 5.7. Charakterystyka spektralna i kolorymetryczna badanego oświetlacza

Na podstawie zebranych danych wyznaczono zostały rozkłady światłości w polu bliskim oraz parametry optyczne oświetlacza, przedstawione w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Wyniki pomiarów optycznych na podstawie integracji wszystkich wyników

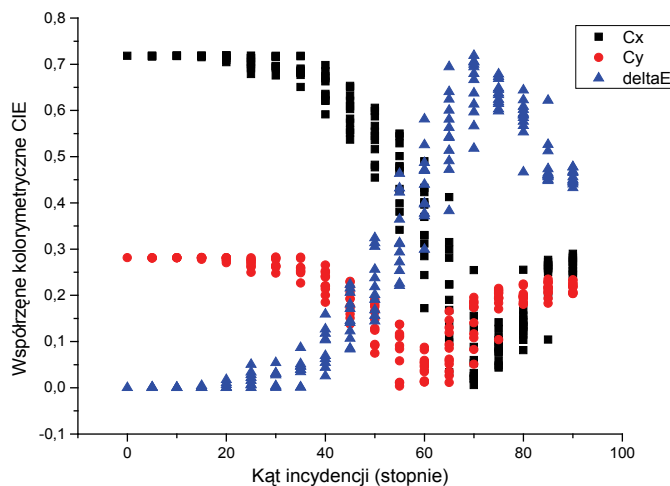
Lp.	Parametr	Dla $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ (widok frontalny)	Na podstawie wszystkich pomiarów
1	Całkowity strumień świetlny	n.d.	13,696 lm
2	Światłość max	22,396 cd	22,396 cd
3	Współrzędne kolorymetryczne Cx , Cy	0,7182, 0,2815	0,7145; 0,2828
4	Współrzędne kolorymetryczne u' , v'	0,5814; 0,5127	0,5758; 0,5127
5	CCT	998	998

Należy zaznaczyć, że całkowity strumień świetlny jest obliczony na podstawie sumowania wyników poszczególnych pomiarów, dla jego dokładniejszego wyznaczenia należałoby przeprowadzić pomiar za pomocą sfery całkującej (patrz rozdział 4.2).

Podczas analizy wyników kolorymetrycznych w funkcji kąta pomiaru zauważono wariację. Do jej analizy określono wartości Cx , Cy dla zmierzonych kątów azymu-

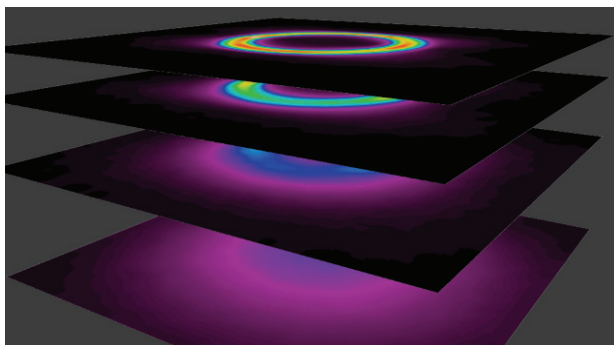
talnych w funkcji kąta inklinacji. Wyznaczono również błąd koloru (ΔE) względem pozycji frontalnej, którą przyjęto za referencyjną (rys. 5.6a)

$$\Delta E = \sqrt{(C_{x,\text{ref}} - C_x)^2 + (C_{y,\text{ref}} - C_y)^2} \quad (5.1)$$



Rys. 5.8. Zmiana współrzędnych kolorymetrycznych w funkcji kąta azymutalnego oraz błąd kolorów ΔE względem pozycji frontalnej

Wyznaczony błąd ΔE jest mniejszy od 1, stąd zmiana kolorów w funkcji obserwacji kątowej nie jest dostrzegalna dla oka ludzkiego.

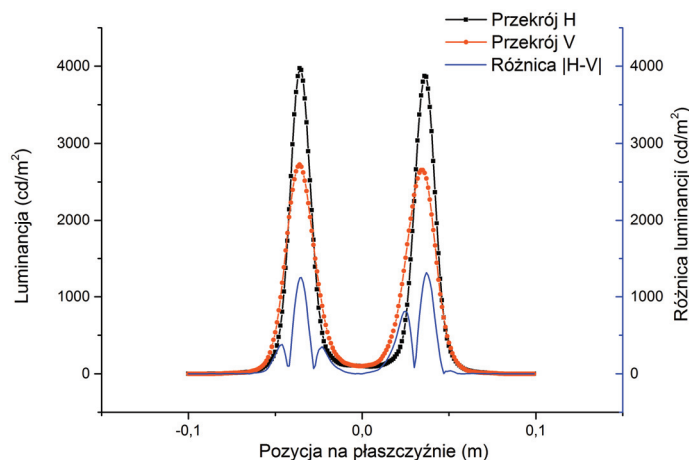


Rys. 5.9. Rozkłady luminacji na powierzchniach w różnej odległości (0 mm, 20 mm, 50 mm i 100 mm)

Do analizy właściwości oświetlacza w polu bliskim wygenerowano zestaw rozkładów luminacji na powierzchni 200 mm × 200 mm, przy rozdzielczości detektora

200 pix $\times$ 200 pix, w funkcji odległości, na bazie 1mln promieni. Przykładowe rozkłady pokazano na rys. 5.9.

Analiza rozkładu oświetlenia powierzchni w odległości większej niż 10 mm, ujawnia jego asymetrię. Dla dokonania ilościowej oceny różnic maksymalnej intensywności, wyznaczono profil natężenia oświetlenia w osi poziomej i pionowej (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Porównanie luminancji w przekroju poziomym i pionowym na płaszczyźnie w odległości 20 mm

Jak wyznaczono, w tabeli 5.3, maksymalna różnica między natężeniem oświetlenia na powierzchni, mierzonym w przekroju poziomym i pionowym, wynosi 32% i występuje w odległości 20 mm od powierzchni źródła światła.

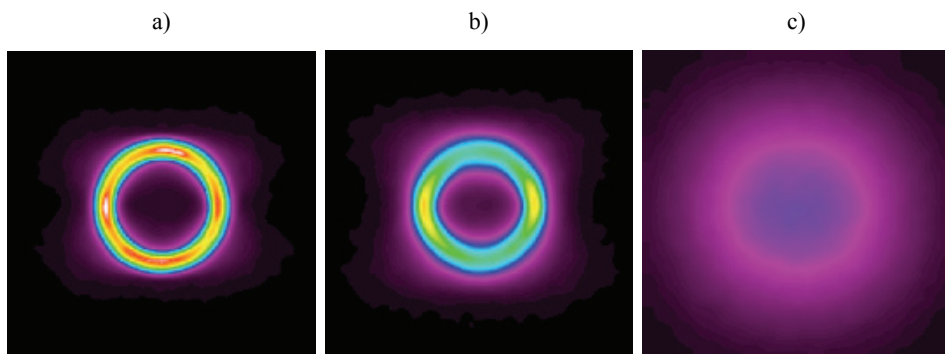
Tabela 5.3. Wyniki analizy różnicy maksymalnej luminancji dla przekrojów H i V w funkcji odległości ekranu

Odległość	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
Różnica H-V	1226	1266	776	467
Różnica	26%	32%	27%	21%

Nieznaczna różnica natężenia oświetlenia (ok. 2%) na powierzchni w odległości 0 mm wskazuje, że diody LED charakteryzują się zbliżoną mocą świetlną, a rozsymetryzowanie rozkładu luminancji powodowane jest przez różne charakterystyki światłości poszczególnych diod lub błędy montażu (pozycjonowania).

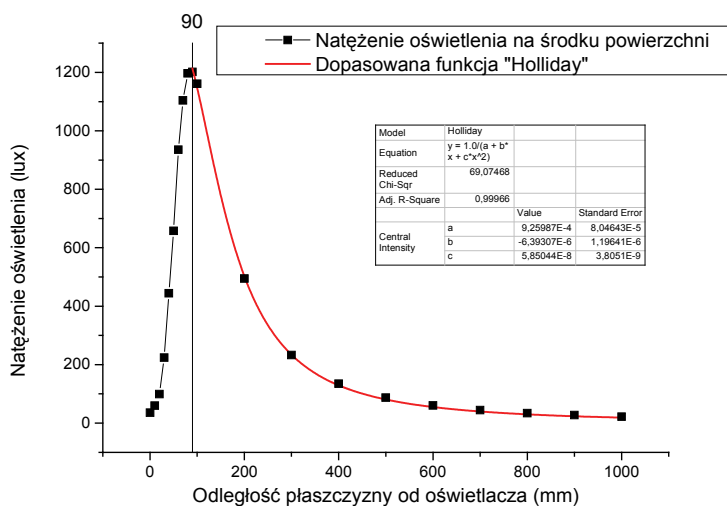
Kolejna analiza dotyczy zmiany natężenia oświetlenia na środku powierzchni w funkcji zmiany jej odległości od oświetlacza (rys. 5.12). Wynika z niej, że w osi oświetlacza, maksimum natężenia jest osiągane w odległości powierzchni 90 mm.

Powyżej tej wartości natężenie zmniejsza się zgodnie z odwrotnością równania drugiego rzędu, co wskazuje, że badany obszar powierzchni znajduje się w polu dalekim.



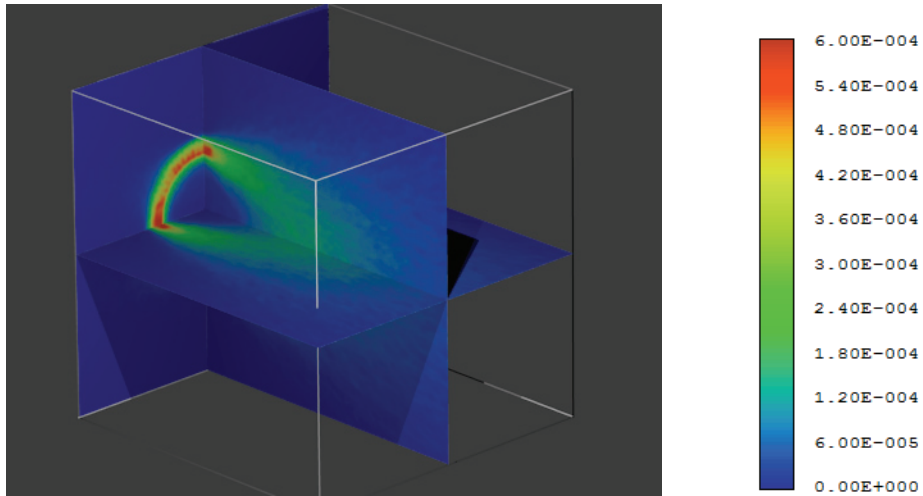
Rys. 5.11. Napromieniowanie na powierzchni w odległości: a) 0 mm, b) 20 mm, c) 100 mm

Uzyskane wyniki pomiarów światłości pola bliskiego wyeksportowano do pliku typu RayFile w celu ich późniejszego użycia do modelowania źródeł światła w środowisku symulacyjnym. Podczas generowania pliku ustala się liczbę promieni, która decyduje o rozdzielczości oraz stosunku sygnał–szum, wynikającym z próbkowania (SNR – *sampling*).



Rys. 5.12. Zmiana natężenia oświetlenia na środku powierzchni w funkcji odległości

Do wizualizacji rozsyłu światła przez oświetlacz opracowano model symulacyjny z użyciem detektora objętościowego w oprogramowaniu do symulacji optycznych.



Rys. 5.13. Wizualizacja strumienia świetlnego przechodzącego przez elementy objętościowe (warstwy)
(*Incident Flux W*)

Detektor taki umożliwia rejestrowanie strumieni świetlnych przechodzących przez warstwę (rys. 5.24). Skonfigurowano go geometrycznie jako $200 \times 200 \times 200$ mm, ustalając rozdzielczość 200 pix w każdym wymiarze. Uzyskane wyniki są zatem efektem całkowania po grubości warstwy 1 mm. Do symulacji użyto pliku zawierającego 1 mln promieni.

Przedstawiona wizualizacja pokazuje charakterystykę światłości złożonego układu oświetleniowego w polu bliskim, uzyskaną w wyniku pomiarów. Jest ona utworzona jako złożenie, map natężenia strumienia przechodzącego przez warstwę poziomą i pionową oraz mapy intensywności napromieniowania na płaszczyznę prostopadłą do osi optycznej.

5.1.4. Emitery światła

Aby uzyskać specyficzne charakterystyki oświetleniowe lub spełnić wymagania konstrukcyjne, projektuje się układy oświetlające. Jako źródło światła najczęściej używane są diody LED, które zestawia się w konfiguracji macierzowe $N \times M$ albo pierścieniowe $R_{\min}$, $R_{\max}$, ustalając odstęp między źródłami. Kierunkowość takich układów jest kształtowana przez:

- wybór charakterystyki światłości diody,
- geometryczne kształtowanie kierunku osi optycznej,
- dodatkowe elementy optyczne takie jak reflektory, dyfuzory, soczewki, etc.

Projektowanie oświetlaczy opartych na diodach LED jest znacznie bardziej wymagające pod względem konstrukcyjnym i technologicznym, aniżeli projektowanie

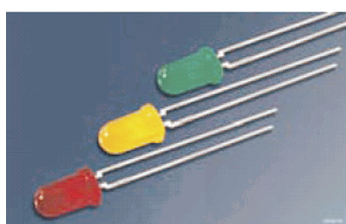
układów bazujących na lampach halogenowych, szczególnie jeśli w polu bliskim diody znajduje się układ optyczny np. soczewka lub reflektor. Stąd, konieczność wspierania procesu projektowania optycznego za pomocą symulacji optycznych, szeroko przedstawiona w literaturze. Jednak brak jest doniesień literaturowych o stosowaniu takich metod projektowania oświetlaczy do systemów wizyjnych.

Obecnie, do najpowszechniej stosowanych źródeł światła w systemach wizyjnych należą diody elektroluminescencyjne LED, ze względu na dużą światłość, długi czas życia, niewielkie wymiary i elastyczność projektową (patrz rozdział 2, tab. 2.3). Dostępne są jako tzw. białe lub monochromatyczne w zakresie VIS, NIR, UV. Pod względem montażu wyróżnia się dwie grupy: do montażu przewlekanego THT (ang. *Through-Hole Technology*) oraz do montażu powierzchniowego SMD (ang. *Surface Mounted Devices*). Pod względem optycznym oprócz długości emitowanej fali, najistotniejsza jest ich moc i charakterystyka rozsyłu. Ich światłość kształtowana jest głównie przez soczewkę, ale również przez kształt reflektora oraz emiter. Do dalszej analizy parametrów pod kątem modelowania optycznego oświetlaczy systemów wizyjnych wytypowano trzy typy diod, różniące się charakterystyką rozsyłu światła:

- z soczewką, o kącie świecenia 60° ,
- z soczewką, o kącie świecenia 70° ,
- bez soczewki, o kącie świecenia 120° .



LED z soczewką



LED w obudowie 3 mm



LED bez soczewki

Rys. 5.14. Zdjęcia przykładowych diod LED do montażu przewlekanego i powierzchniowego [214–216]

Dane przedstawione w tab. 5.4 pochodzą z kart technicznych produktów, gdzie zawarte są ponadto charakterystyki światłości, charakterystyki spektralne, charakterystyki napięciowo-prądowe oraz zależności optyczno-elektryczne. Ze względu na dużą rozpiętość parametrów optoelektronicznych, uzyskiwanych w procesie produkcji, wyroby są klasyfikowane jako tzw. biny.

W kartach katalogowych charakterystyki światłości podane są jako diagramy w układzie kartezyjańskim lub polarnym. Zamieszczane dane mają jednak charakter poglądowy, nie metrologiczny. Dostęp do danych charakteryzujących parametry

optyczne, w postaci plików danych, jest bardzo ograniczony. Jedynie nieliczni wytwórcy, udostępniają tzw. pliki promieni, które różnią się ich liczebnością, np. 100 k, 500 k i 1 M oraz formatem danych. Stąd spotykane są różne odmiany adresowane do konkretnych środowisk symulacyjnych. Choć nie zawsze pochodzą z pomiarów, gdyż ich źródłem są również symulacje optyczne, co z punktu widzenia użytkownika nie jest istotne. Rozszerzeniem charakterystyki optycznej są modele geometryczne obudów diod w standardzie IGS, SolidWorks lub STEP. Modele takie nie powinny mieć wpływu na generowaną charakterystykę światłości, ich celem jest wspieranie projektowania geometrycznego, rozmieszczenie elementów na płytkach montażowych, jak również umożliwienie wizualizacji 3D projektu.

Tabela 5.4. Parametry przykładowych diod LED

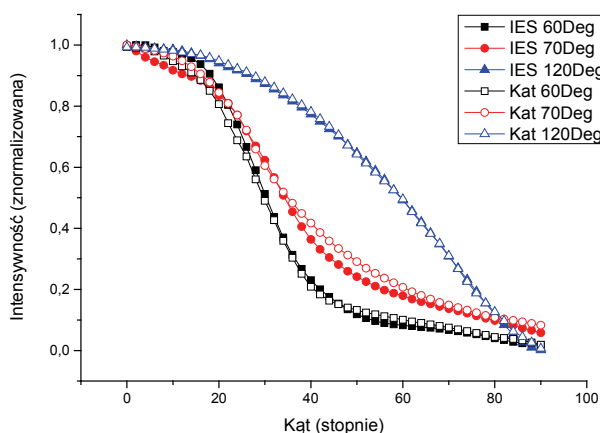
Kąt świecenia 2ϕ przy 50% I_V	60 stopni	70 stopni	120 stopni
TYP diody	SMD z soczewką	3 mm z soczewką	SMD
Kolor emisji	zielony	pomarańczowy	pomarańczowy
Światłość I_V (mcd)	90...224 ($I_V = 20$ mA)	180...450 ($I_V = 20$ mA)	355...900 ($I_F = 30$ mA)
Strumień świetlny Φ_V (lm)	210 mlm (typ) ($I_V = 20$ mA)	1200 mlm (typ) ($I_V = 20$ mA)	1900 mlm (typ) ($I_V = 30$ mA)
Sprawność optyczna	5 lm/W	11 ml/W	24 lm/W
Prąd przewodzenia I_F (mA), $T_A = 25$ °C	30 mA	30 mA	40 mA
Pobór mocy P_{tot} (mW), $T_A = 25$ °C	80 mW	80 mW	110 mW
Dominująca długość fali świetlnej λ_{dom} (nm)	570 (−3/+6)	606 (−6/+3)	606 (+/−6)
Literatura	[215]	[216]	[214]

Sporadycznie oferowane są również charakterystyki światłości diod LED zapisywane w formacie IES lub ELUMDAT. Formaty te rozwijane są przez branżę oświetleniową, dla wsparcia metod numerycznego wyznaczania natężenia oświetlenia na powierzchniach lub wizualizacji efektów dekoracyjnych [4]. Standardy te, oprócz informacji nagłówkowych, definiują światłość, zgodnie z zadeklarowaną rozdzielczością kątową w układzie sferycznym. Przykładowo, fotometria typu C jest stosowana do oświetlaczy architektonicznych oraz drogowych. Dla niej współrzędna biegunowa wykresu polarnego pokrywa się z pionową osią oświetlacza, a płaszczyzny fotometryczne 0–180 stopni pokrywają się z osią główną oświetlacza.

Tabela 5.5. Dane nagłówkowe z plików IES dla przykładowych diod

Kąt świecenia 2φ przy 50% I_V	60 stopni	70 stopni	120 stopni
Standard	IESNA:LM-63-95	IESNA:LM-63-95	IESNA:LM-63-95
Lumenów na lampę	0,21 lm	0,91 ml	1,9 lm
Mnożnik światłości	$\times 1$	$\times 1$	$\times 1$
Typ fotometryczny	C	C	C
Rozdzielczość obrotowa (pozioma 0–180)	2 stopnie	2 stopnie	2 stopnie
Rozdzielczość biegunowa (pionowa 0–360)	5 stopni	5 stopni	5 stopni

Na podstawie danych z plików IES wykreślono charakterystyki światłości, które zestawiono z charakterystykami katalogowymi (Kat), co pokazano na rys. 5.15.

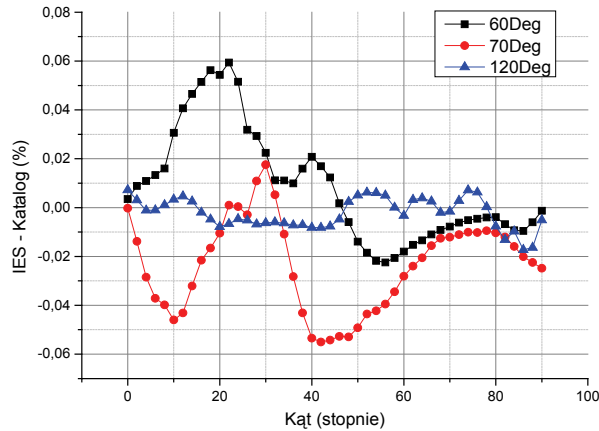


Rys. 5.15. Charakterystyki światłości wybranych diod LED odczytane z katalogu i plików IES

Dla lepszego zobrazowania różnic przedstawiono je na wykresie błędów na rys. 5.16.

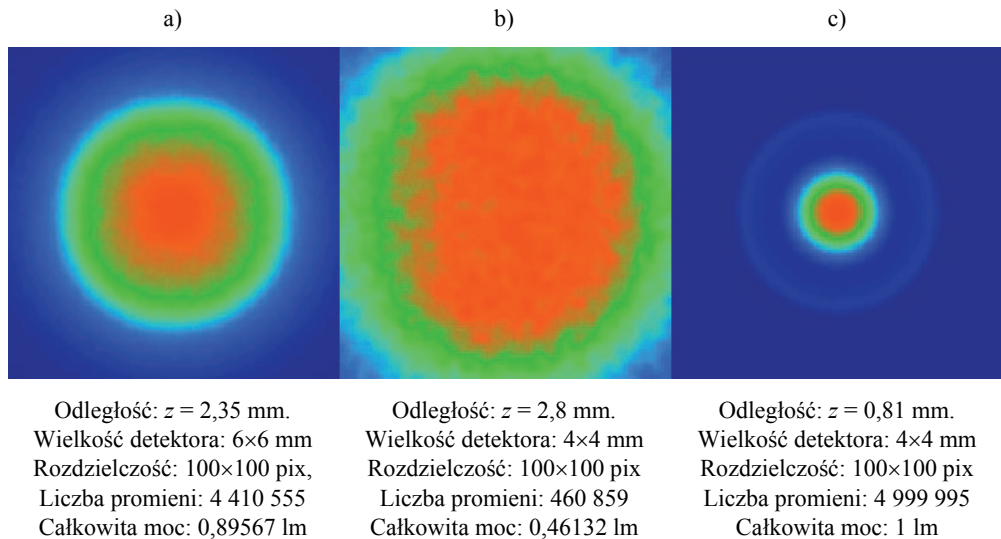
Z analizy porównawczej wynika, że maksymalny błąd 6% występuje dla charakterystyk 60 stopni i 70 stopni. W przypadku charakterystyki 120 stopni, błąd nie przekracza 2%. Błąd ten mieści się w przedziale tolerancji lub rozrzutów parametrów diod, klasyfikowanych w ramach jednego bina. Zapisywanie charakterystyki w formacie IES/ELUMDAT ułatwia jej przenoszenie między systemami pomiarowymi, wizualizacyjnymi oraz symulacyjnymi oraz wspiera charakteryzację źródeł asymetrycznych. Dla charakteryzacji optycznej diod w polu bliskim prezentowane są również mapy iluminacji, tj. natężenia oświetlenia na powierzchni w określonej odległości od źródła. Pozwalają one wstępnie ocenić jednorodność przestrzenną źródeł. Mapy takie uzyskiwane są zwykle na drodze symulacji przez umieszczenie detektora prostokątne-

go w zadanej odległości od źródła światła. Wielkość detektora odpowiada polu obserwacji, zaś liczba pikseli jego rozdzielczości. Możliwe jest również ich pozyskanie przez bezpośrednie oświetlenie matrycy kamery albo przez zarejestrowanie obrazu tworzonego na transparentnym, rozpraszającym ekranie.



Rys. 5.16. Różnica między światłością katalogową a światłością w plikach IES

Przykładowe dane informacyjne charakteryzujące jednorodność diod przedstawiono na rys. 5.17.



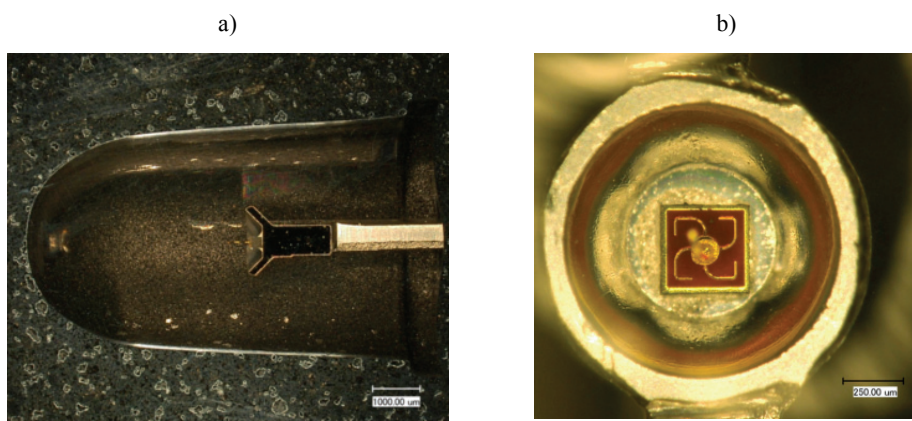
Rys. 5.17. Obrazy iluminacji powierzchni w polu bliskim, wybranych typów diod:

a) 60 stopni [215], b) 70 stopni [216], c) 120 stopni [214]

W podanym przykładzie wzajemne porównanie obrazów natężenia oświetlenia (rys. 5.17) i ich interpretacja ilościowa są jednak niemożliwe, ze względu na różne odległości pomiarów ($z_{60} = 2,35$ mm, $z_{70} = 2,8$ mm, $z_{120} = 0,81$ mm), różne wielkości detektorów (4 mm, 6 mm) oraz istotnie różną liczbę promieni użytych do symulacji (ok. 0,5 mln, albo 5 mln). Jedynie dla zgodnych warunków pomiarów lub symulacji, mogą one służyć do ceny jednorodności źródeł światła.

Parametry geometryczno-optyczne

Gdy istotny jest mechanizm kształtowania strumienia świetlnego, niezbędna jest wiedza o parametrach geometryczno-optycznych emiterów. Nie jest ona dostępna w dokumentacji, ale zgląd metalograficzny pozwala wizualizować dowolną płaszczyzną przekroju (rys. 5.18). Na uzyskanych przekrojach możliwe jest wymiarowanie geometrii komponentów. Należy jednak pamiętać, że takie układy optoelektroniczne cechują się bardzo istotnymi wariacjami produkcyjnymi, tj. wytwarzania i montażu, stąd wymiarowane przykłady mogą nie być reprezentatywne dla danej grupy.



Rys. 5.18. Fotografie przekroju diody LED:

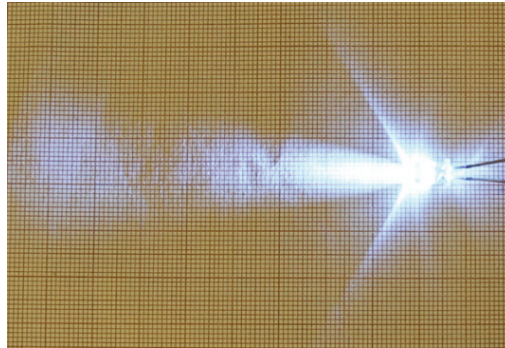
a) płaszczyzna współosiowa, b) płaszczyzna prostopadła do osi optycznej

Znacznie trudniejsze jest uzyskiwanie parametrów optycznych, takich jak charakterystyka światłości emitera czy funkcje BRDF poszczególnych powierzchni. Stąd są one dobierane na podstawie danych literaturowych, a następnie weryfikowany jest uzyskany efekt w polu dalekim (detektor polarny lub goniometr) lub polu bliskim.

5.1.5. Luminacja na płaszczyźnie równoległej

Najbardziej uproszczona metoda wizualizacji charakterystyki światłości diod LED polega na obserwacji ekranu, do którego bocznie zbliża się badane źródło światła.

Obserwowany obraz luminancji jest jednak superpozycją światłości w kierunku ekranu, dlatego nie jest tożsamy ze światłością diody.



Rys. 5.19. Luminacja na powierzchni równoległej do osi optycznej

Do ilościowej jego oceny proponuje się wyznaczenie linii brzegowej [121]. W przypadku jej wykreślenia „na oko”, należy liczyć się z błędem. Empirycznie wyznaczono powtarzalność, która na podstawie kilkunastu powtórzeń nie przekroczyła 8%. Algorytm wyznaczenia kąta stożka rozświetlania metodą segmentacji obrazu, nie daje rozwiązania bez wprowadzenia korekcji zmniejszenia luminacji. Interpolacja krawędzi, którą wyznacza człowiek, wynika z naturalnego przetwarzania obrazów przez mózg. Jak wspomniano, podana metoda nie daje wprawdzie znormalizowanych informacji ilościowych o rozsyśle, ale może być stosowana do oceny porównawczej.

5.1.6. Metoda pomiarów światłości z użyciem sfery obrazującej

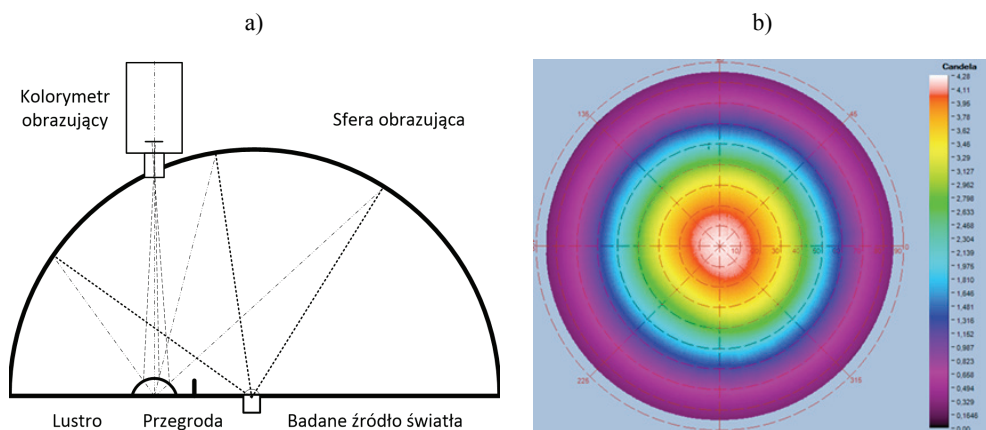
Pomiary światłości dotyczą pojedynczych pomiarów kierunkowych lub określenia bryły fotometrycznej. W przypadku światłości kierunkowej stosowana jest ława fotometryczna, ułatwiająca przeprowadzenie współosiowego pomiaru między źródłem światła a detektorem. W takiej konfiguracji dostrzegany jest problem błędu pomiarowego wynikający z niezgodności osi mechanicznej i osi optycznej źródła światła [185]. Dla diod LED zaleca się dwa układy pomiarowe (Condition A i B), różniące się odległością między źródłem światła. Dla warunku B odległość wynosi 100 mm, a dla warunku A 316 mm – apertura detektora 1 cm² [211]. Rozszerzona niepewność pomiarowa ($k = 2$) w przypadku konfiguracji A szacowana jest na 0,7%, w przypadku zaś konfiguracji B na 0,9% [186].

Do pomiarów charakterystyk światłości 2D/3D mają zastosowanie goniometri punktowe, goniometri obrazujące, układy z liniowo przemieszczanym detektorem [345],

z filtrem przesłaniającym [105], metody pomiarów rozkładów powierzchniowych, np. z użyciem macierzy sfer z lustrzaną powierzchnią [313] oraz sfery obrazującej. Podane metody pomiarów światłości mają również zastosowanie do identyfikacji parametrów powierzchni [290].

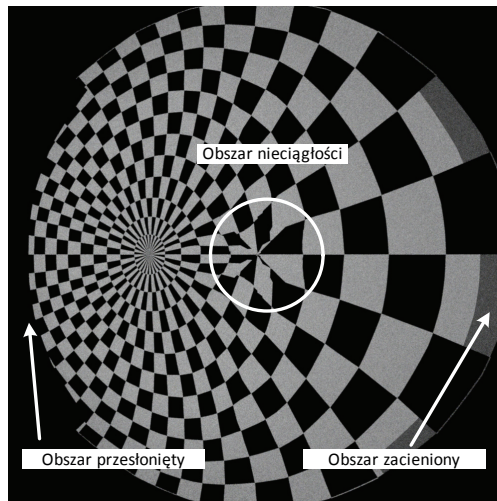
Metoda goniometryczna polega na pomiarze strumienia świetlnego w kierunku źródła, na pozycjach rozłożonych sferycznie. Jak wynika z równania (4.5), rozdzielczość mierzonej charakterystyki światłości zależy od rozdzielczości skanowania φ (azymut) oraz θ (elewacja) jak również apertury detektora, czyli powierzchni uśredniania. Zmiana kierunku pomiaru jest realizowana przez obrót badanego obiektu lub detektora, zależnie od konfiguracji kinematycznej goniometru. W celu wydłużenia drogi optycznej stosuje się goniometry z lustrem, które przez odpowiedni obrót zapewnia połączenie optyczne z odległym detektorem.

Najkrótszy pomiar charakterystyki pełnej bryły fotometrycznej jest wykonywany za pomocą sfery obrazującej. Zasada pomiaru polega na fotografowaniu powierzchni wewnętrznej sfery, która jest oświetlana przez badane źródło światła [258]. Jak przedstawiono to schematycznie na rys. 5.20, kamera (kolorymetr obrazujący), przez lustro wypukłe, rejestruje luminację na powierzchni wewnętrznej sfery, wywołaną przez mierzone źródło światła. Dla uniknięcia bezpośredniego oświetlenia detektora zastosowano przegrodę.



Rys. 5.20. Sfera obrazująca do pomiarów źródeł światła:
a) schemat, b) przykładowa mapa światłości w układzie sferycznym

Ze względu na przesunięcie między osią geometryczną i optyczną układu rejestrowany obraz jest obciążony dużymi zniekształceniami nieliniowymi. Dla ich zobrazowania zamodelowano układ pomiarowy, rys. 5.20a.



Rys. 5.21. Obraz wewnętrznej powierzchni sfery obrazującej z zaznaczonymi obszarami specjalnymi

Powierzchnię wewnętrzną zamodelowanej sfery pokryto rastrem szachownicy o stałej rozdzielczości radialnej $\theta = 7,5$ stopnia i stałym podzielniku azymutalnym 48 sektorów na obwód (rys. 5.21). Istotny jest obszar nieciągłości, którego położenie zależy od promienia, na którym znajduje się oś kamery. W takiej konfiguracji najmniej korzystne jest usytuowanie osi kamery blisko osi sfery, gdyż obszar nieciągłości przykrywa biegun na pozycji, gdzie obrazowana jest światłość w osi głównej. Z drugiej strony, przesunięcie osi optycznej względem osi mechanicznej skutkuje jednak ograniczeniem zakresu pomiarowego układu. Najprostsza metoda korekcji wyników pomiarowych w tym obszarze polega na ich ekstrapolacji, na bazie sąsiedztwa. W przypadku charakterystyk wąskokątnych pomiar taki obarczony jest istotnym błędem.

Kolejne dwa obszary, przesłonięty i zacieniony, wynikają z usytuowania przegrody, co skutkuje zawężeniem obszaru pomiarowego. Bardzo istotne znaczenie dla kalibracji układu ma obszar zacieniony, gdzie nie dochodzi oświetlenie bezpośrednie. Rejestrowana luminacja w tym obszarze wynika z odbić wyższych rzędów (ang. *stay light*), tak jak w sferze całkującej. Natężenie w przesłoniętym obszarze jest używane do kalibracji poziomu tła.

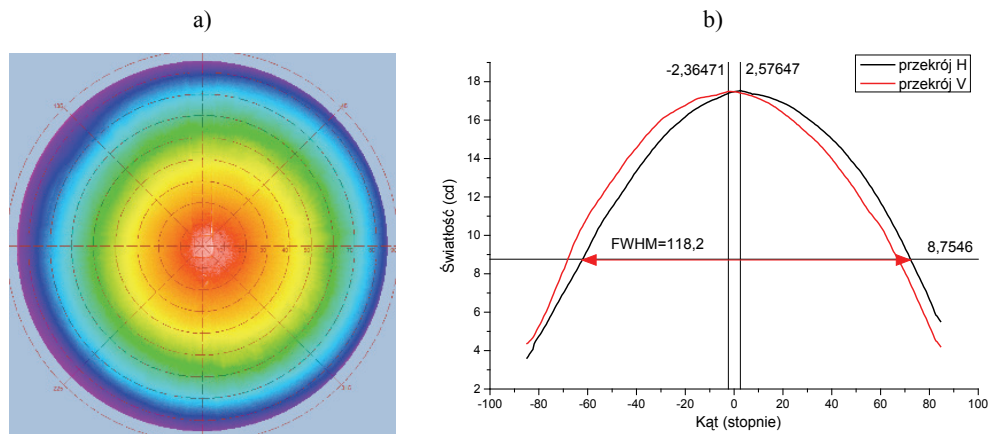
Dodatkowa adiustacja, wyrównująca niejednorodności rozpraszania światła i skalująca wartości w jednostkach światłości, prowadzona jest z użyciem lampy kalibracyjnej. Dla zapewnienia lambertowskiej charakterystyki wyjściowej lampa taka ma sferę całkującą na wyjściu. Emitowane światło jest stabilizowane temperaturowo za pomocą układów Peltiera oraz zasilane ze stabilizowanego źródła prądu. Światłość takiej lampy opisuje się przez zmierzoną charakterystykę światłości 3D i współrzędne kolorymetryczne.

Pomiar fotometryczny pełnej bryły światłości badanego źródła światła wymaga tylko jednego obrazu. W przypadku pomiarów kolorymetrycznych rejestrowane są trzy obrazy RGB. Rozdzielczość kątowna układu zależy od rozdzielczości detektora fotokolorymetru i nie jest liniowa, jak pokazano na rys. 5.21. Światłość wąskokątnych źródeł światła wymaga rejestratorów o dużej rozpiętości tonalnej. Zastosowanie mają tu kamery (kolorymetry obrazujące) z przetwornikami obrazowymi o rozszerzonej pojemności studni potencjału oraz przetwarzaniem 12–16-bitowym. Przy przetwarzaniu 16-bitowym możliwe jest osiągnięcie kontrastu 65536:1, co odpowiada zakresowi dynamicznemu $f\text{--}stop = 16$ lub gęstości optycznej 4.8.

5.1.7. Wyniki pomiarów skupionych źródeł światła

Celem badań było wyznaczenie wybranych parametrów optycznych, elektrycznych i termicznych diod LED z użyciem sfery obrazującej. Do ich realizacji użyto sfery obrazującej IS-IL (Radiant Zemax), wyposażonej w fotokolorymetr PM-1613F o rozdzielczości przestrzennej $1024 \text{ pix} \times 1024 \text{ pix}$ i dynamice 16-bitowej.

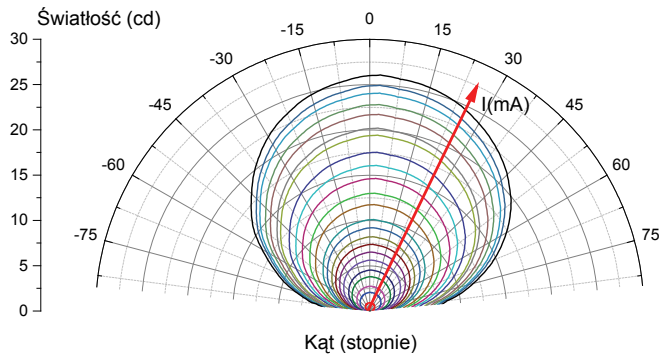
Uzyskaną mapę światłości, we współrzędnych sferycznych, pokazano na rysunku 5.22a.



Rys. 5.22. Zmierzona światłość LED dla $I_f = 210 \text{ mA}$:
a) mapa światłości, b) profile H i V światłości

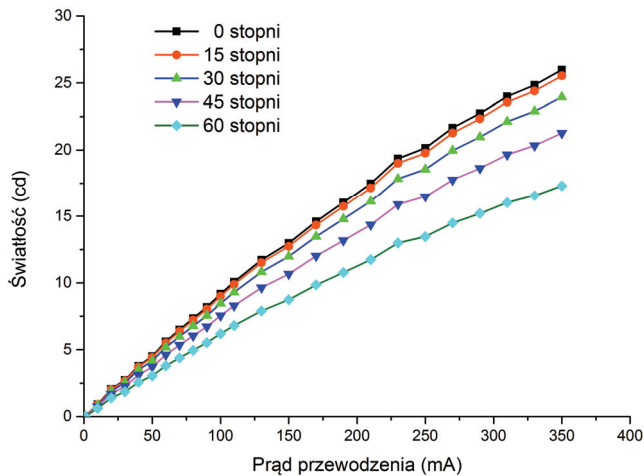
Wykres 2D światłości, we współrzędnych sferycznych, jest trudny do interpretacji ilościowej i porównania, dlatego wykreślono dwa przekroje, poziomy i pionowy, przez środek układu współrzędnych. Ich rozsynchronizowanie świadczy o błędzie pozycjonowania mechanicznego lub błędzie niepokrywania się osi optycznej z osią mechaniczną diody, błąd ten wynosi ok. 5 stopni.

Aby określić stabilność kształtu rozsyłu w funkcji prądu zasilającego, zarejestrowano obraz światłości w zakresie od 10 mA do 350 mA. Ich przekroje poprzeczne $\varphi = 0^\circ$, we współrzędnych polarnych, pokazano na rys. 5.23.



Rys. 5.23. Wpływ prądu przewodzenia na charakterystykę światłości

Dla wybranych kątów inklinacji, od $\theta_{\min} = 0^\circ$, $\theta_{\max} = 60^\circ$, z rozdzielczością $\Delta\theta = 15^\circ$, wyznaczono światłości kierunkowe rys. 5.24.



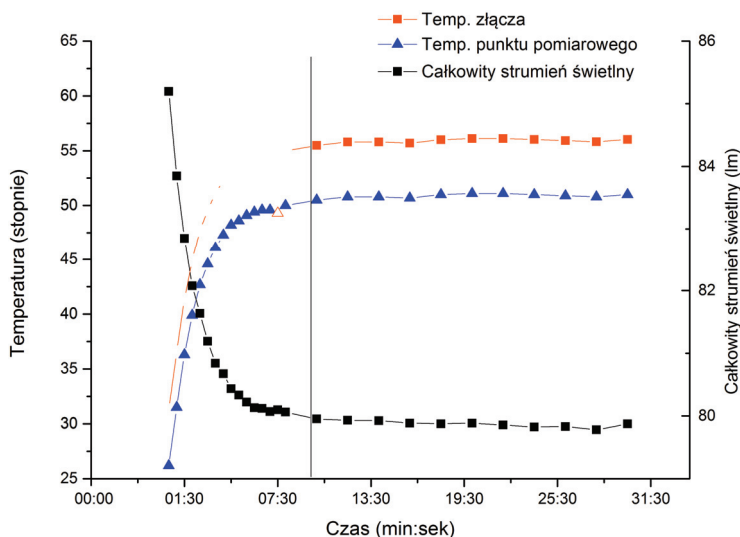
Rys. 5.24. Wpływ prądu przewodzenia na intensywność w danym kierunku

Uzyskane wyniki pokazują, jak zmienia się światłość w określonym kierunku, co jest podstawą do wyznaczenia współczynników wrażliwości układu. Pozwalają również na wyznaczenie całkowitego strumienia świetlnego w funkcji prądu zasilającego.

Badania parametrów optyczno-elektrycznych rozszerzono o składową temperaturę. Częstym błędem początkujących projektantów systemów LED jest zaniedby-

wanie wpływu temperatury. Światłość lub całkowity strumień świetlny są podawane w temperaturze złącza 25 stopni. Jest to temperatura referencyjna, odbiegająca od rzeczywistych warunków. Rzeczywisty strumień świetlny wyznaczany jest na podstawie charakterystyk po określeniu temperaturowego punktu pracy.

Dokonano rejestracji temperatury na kontakcie termicznym diody, napięcia na złączu i całkowitego strumienia świetlnego, w funkcji czasu. Wynik pomiarów diody LED, przy stałym prądzie zasilania $I_f = 100$ mA, przedstawiono na wykresie rys. 5.25.



Rys. 5.25. Wyniki pomiaru temperatury i całkowitego strumienia świetlnego diody LED w funkcji czasu

Temperaturę złącza wyznaczono zgodnie z

$$P_{Th} = U_f I_f \eta_{Th} \quad (5.2)$$

gdzie:

P_{Th} – moc termiczna na złączu (W),

U_f – napięcie na złączu (V),

I_f – prąd złącza (I),

η_{Th} – udział mocy termicznej.

Przyjęto, $R_{ThJS} = 6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$ oraz udział mocy termicznej $\eta_{Th} = 25\%$. Analiza uzyskanych

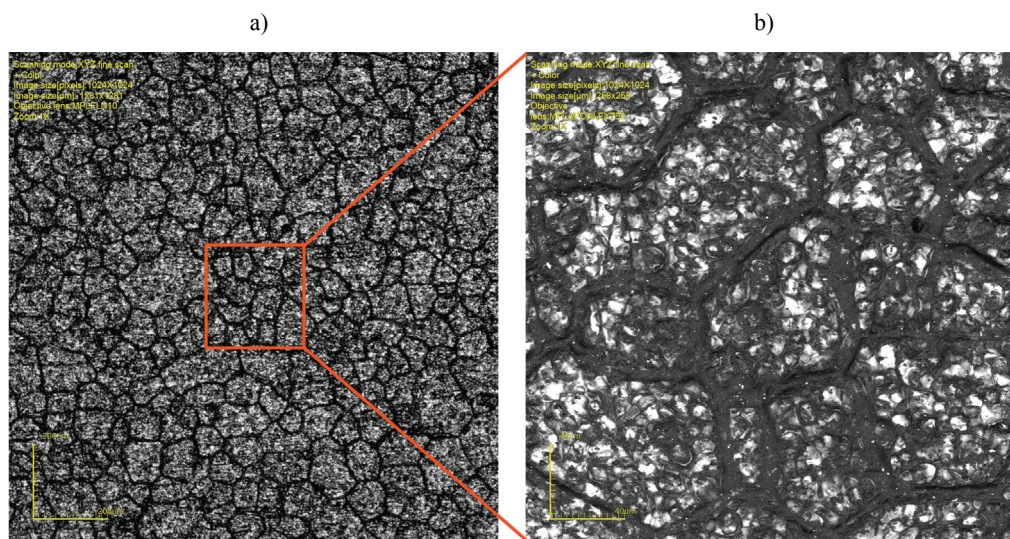
wyników wskazuje, że układ stabilizuje się termicznie po ok. 10 min, temperatura złącza osiąga wartość: $T_{J\text{stab}} (10\text{--}30 \text{ min}) = 55,76 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,13$ (t -studenta, $k = 2$), a całkowity strumień świetlny $\Phi_{\text{stab}} (10\text{--}30 \text{ min}) = 79,875 \text{ lm} \pm 0,034$ (t -studenta, $k = 2$).

Metoda pomiaru diody LED za pomocą sfery obrazującej umożliwia szybkie wyznaczenie światłości jako pełnej bryły fotometrycznej. Wyniki pomiarów są eksportowane zgodnie z formatem IES lub ELUMDAT, co ułatwia ich dalsze użycie przy modelowaniu pola dalekiego. Pomiary wielodziedzinowe, optyczno-elektryczno-termiczne, umożliwiają wyznaczenie współczynników, które są podstawą numerycznego badania wrażliwości układów oświetlających.

5.2. Parametry powierzchni

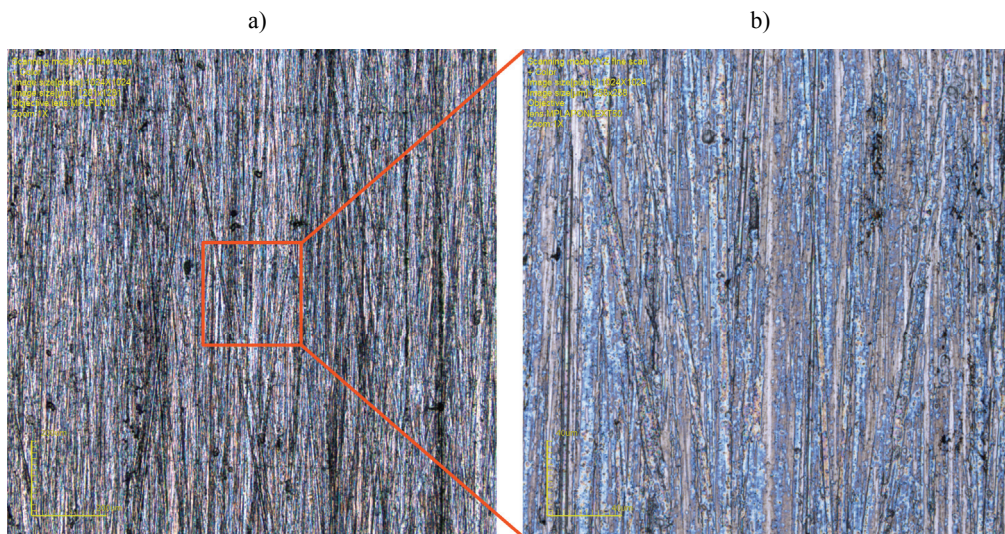
5.2.1. Pomiary mikroskopowe powierzchni

Do charakteryzacji powierzchni wytypowano trzy struktury topograficzne, izotropową, anizotropową oraz okresową, będącą wynikiem obróbki skrawaniem. Za fizyczne przykłady takich realizacji wybrano anodowaną powierzchnię aluminiową (Al_2O_3) oraz powierzchnię stalową (N9E) po szlifowaniu oraz po frezowaniu. Dokonano skanowania za pomocą laserowego mikroskopu konfokalnego (LEXT OLS4000), co umożliwiło uzyskanie informacji w postaci mapy topografii, obrazu barwnego powierzchni i obrazu intensywności (jasności). Uzyskane obrazy, przy powiększeniu $\times 10$ (obiektyw MPLFLN10) i powiększeniu $\times 50$ (MPLFLN50), pokazano na rysunkach 5.26–5.28.



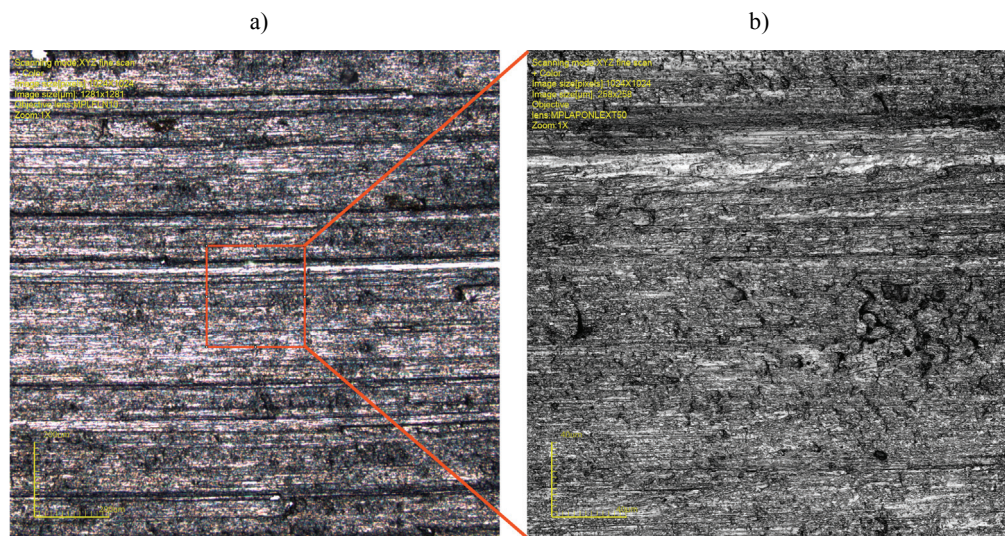
Rys. 5.26. Obrazy powierzchni aluminiowej anodowanej w powiększeniu:

a) $\times 10$, b) $\times 50$

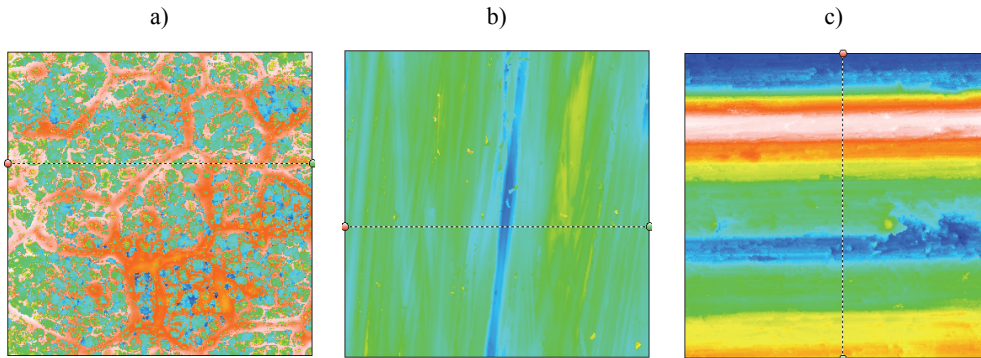


Rys. 5.27. Obrazy powierzchni stalowej szlifowanej w powiększeniu:
a) $\times 10$, b) $\times 50$

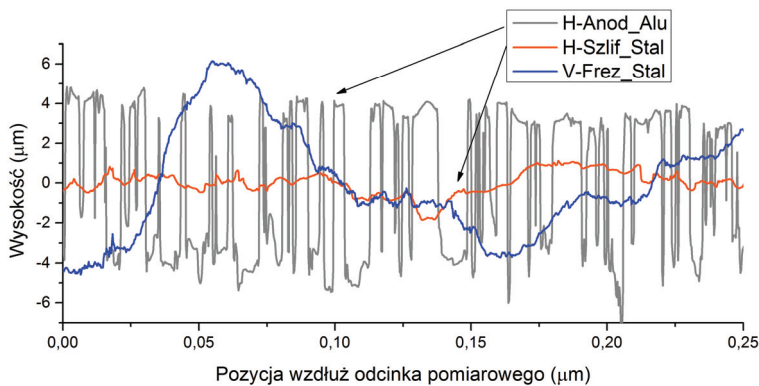
Analizę struktury topograficznej powierzchni prowadzono z zastosowaniem map wysokości. Obrazy w fałszywych kolorach oraz profile wysokości, wyznaczone dla zadanych położenia odcinka pomiarowego, pokazano na rysunkach 5.29 i 5.30.



Rys. 5.28. Obrazy powierzchni stalowej frezowanej w powiększeniu:
a) $\times 10$, b) $\times 50$



Rys. 5.29. Mapy wysokości z zaznaczonymi odcinkami pomiarowymi:
a) Anod_Al, b) Szlif_Stal, c) Frez_Stal



Rys. 5.30. Profile wysokości wzdłuż odcinków pomiarowych zmierzonych powierzchni

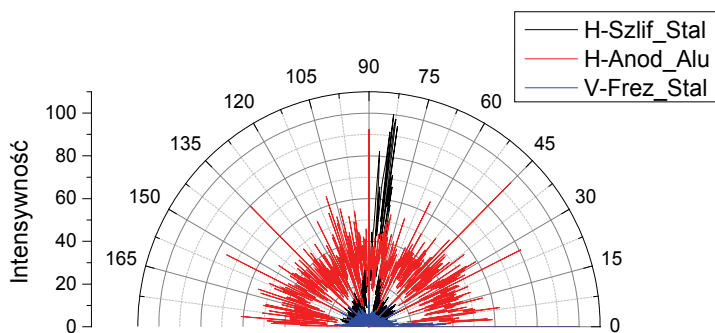
Powierzchnia szlifowana (Szlif_Stal) charakteryzuje się najmniejszą amplitudą zmiany wysokości, zaś powierzchnia po anodowaniu (Anod_Al) wykazuje duży udział składowych wysokoczęstotliwościowych (pików).

Do charakteryzacji ilościowej parametrów powierzchni wyznaczono wybrane parametry wysokości i parametry przestrzenne, zgodnie z normą ISO 25178 [15], co zamieszczono w tabeli 5.6.

Wyniki wskazują, że wysokość średniokwadratowa badanej powierzchni po szlifowaniu (Szlif_Stal) jest ok 5 razy mniejsza niż powierzchni po frezowaniu (Frez_Stal). Badana powierzchnia po anodowaniu (Anod_Al) ma ok. dziesięciokrotnie mniejszą asymetrię niż powierzchnie po obróbce skrawaniem. Do oceny anizotropowości powierzchni wyznaczono ich widmowy rozkład mocy, z użyciem transformaty Fouriera, a następnie przedstawiono wynik kąтового rozkładu mocy na diagramie biegunowym (rys. 5.31).

Tabela 5.6. Parametry wysokościowe powierzchni zgodnie z ISO 25178

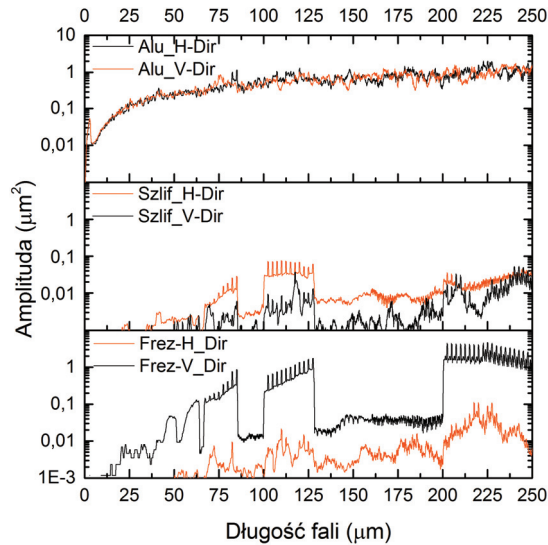
Lp.	Parametr	Powierzchnia aluminium	Powierzchnia szlifowana	Powierzchnia frezowana	Znaczenie parametru
	Oznaczenie	Anod_Al	Szlif_Stal	Frez_Stal	
Parametry wysokości					
1	Sq [μm]	3,67	0,547	2,80	Wysokość średniokwadratowa powierzchni
2	Ssk	-0,0508	-0,477	0,449	Asymetria
3	Sku	1,27	4,33	2,40	Kurtoza
4	Sp [μm]	6,18	6,53	6,75	Maksymalna wysokość piku
5	Sv [μm]	9,08	4,02	6,23	Maksymalna wysokość wgłębienia
6	Sz [μm]	15,3	10,6	13,0	Maksymalna wysokość
7	Sa [μm]	3,53	0,421	2,32	Średnia arytmetyczna wysokości
Parametry przestrzenne					
8	Sal [μm]	4,3	23,9	25,3	Długość autokorelacji
9	Str	0,0831	0,185	0,193	Wydłużenie struktury
10	Std [deg]	8,76	83,3	0,493	Kierunkowość struktury



Rys. 5.31. Kierunkowość spektrum mocy dla badanych próbek

Uzyskany wynik potwierdza, że powierzchnia po anodowaniu jest izotropowa, gdyż jej widmo mocy rozłożone jest równomiernie kątowno. Powierzchnia po szlifowaniu charakteryzuje się kierunkowością, wokół kąta 83 stopni. Powierzchnia po frezowaniu wykazuje również kierunkowość, jednak intensywność spektrum mocy jest niewielka, gdyż wynika ona z pojedynczych, stosunkowo głębokich, bruzd po narzędziu obróbkowym.

Dalsza analiza ilościowa uzyskanych profili wysokości, pod kątem chropowatości liniowej zgodnie z normą PN-ISO 4288 [2], wymaga w analizowanym przypadku dłuższych odcinków pomiarowych, stąd konieczne jest złożenie minimum czterech sąsiadujących obrazów powierzchni (ang. *stiching*).



Rys. 5.32. Średnie gęstości spektralne mocy dla kierunku poziomego i pionowego

W kontekście kształtowania odpowiedzi optycznej powierzchni istotna jest mikrochropowatość, tj. udział składowych wysokoczęstotliwościowych, co jest dostrzegalne na profilach wysokości (rys. 5.30). Dla tego typu analiz ma zastosowanie wyznaczenie gęstości mocy spektralnej PSD (ang. *Power Spectral Density*), bazujące na FFT (ang. *Fast Fourier Transform*). Dla map topografii (rys. 5.29), wyznaczono rozkłady PSD, oddzielnie dla kierunku poziomego i pionowego (rys. 5.32). Analiza uzyskanych wyników, potwierdza izotropowość powierzchni aluminium po anodowaniu, gdyż charakterystyki w obu kierunkach pokrywają się. W przypadku powierzchni szlifowanej i frezowanej nie ma wątpliwości, co do ich kierunkowości. W zakresie krótkich długości fali (do 200 μm) można mówić o pewnym podobieństwie składowych, choć w przypadku frezowania ich amplituda jest dziesięciokrotnie wyższa. Powyżej 200 μm , dominujący jest wpływ głębokich bruzd.

5.2.2. Metoda pomiarów BSDF z użyciem sfery obrazującej

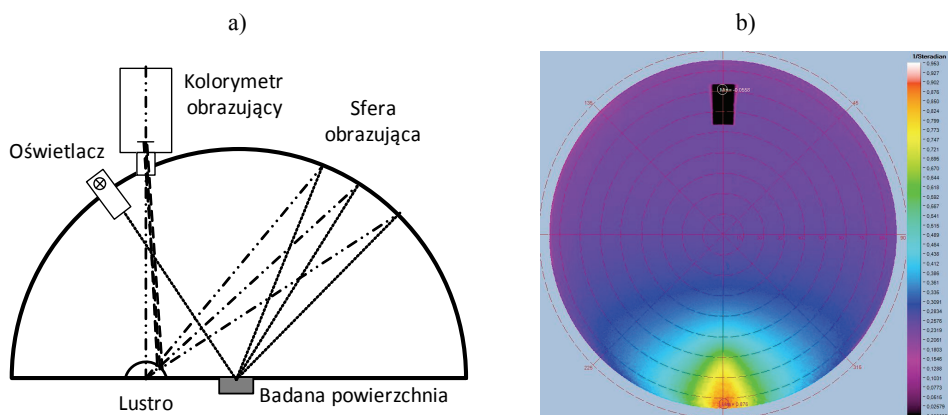
Podstawowa technika pomiarów rozpraszania światła używa gonioreflektometru. Metoda ta jest rozwinięciem pomiarów światłości z dodatkowym ramieniem pozycjonującym źródło światła oświetlające badaną powierzchnię. Układ taki charakteryzuje się dużą rozdzielczością kątową, 0,3 stopnia [326], nawet 0,1 stopnia [167], oraz pełnym zakresem pomiarów w półsfery. Za detektor może służyć radiospektrometr. Najistotniejszym ograniczeniem metody jest sekwencyjne uzyskiwanie danych pomiarowych. Dlatego przy rozdzielczości 0,5 stopnia, gdy zachodzi potrzeba zebrania po-

nad 46 milionów pomiarów, konieczne są metody redukcji czasu pomiarów. Bazują one na szybkiej akwizycji w trybie ruchu ciągłego albo na minimalizacji liczby pomiarów. Jest ona osiągana na podstawie oceny zmienności charakterystyki BRDF i wyznaczaniu funkcji bazowych, których kombinacje liniowe modelują charakterystykę rozpraszania światła dla danej powierzchni [179]. Matusik pokazuje modelowanie pełnej funkcji BRDF, jako kombinację liniową zaledwie 100 pomiarów goniometrycznych.

Kolejne podejście do pomiarów funkcji BRDF bazuje na analizie radiancji ekranu, na który kierowane jest rozpraszane promieniowanie. W rejestracji 9 obrazów syntezowana jest funkcja BRDF w pełnym zakresie półsfery [45]. W innych metodach pomiarów funkcji BRDF stosuje się lustro elipsoidalne do kierowania wiązki oświetlającej z projektora i zbierania obrazu rozproszeniowego za pomocą kamery [196].

Metoda pomiarów równoległych BRDF bazuje na sferze obrazującej [321], będącej opatentowanym rozwiązaniem firmy Philips, urządzenia zwanego Parousiameter [317]. Wdrożeniem podanej metody zajęła się firma Radiant Imaging (*Radiant Zemax* od 2012), konstruująca skaterometr IS-SA (*Imaging Sphere for Scatter and Appearance measurements*) [148].

Strumień światła z iluminatora rozprasza się na obszarze próbki ograniczonym przez aperturę i pada na wewnętrzną powierzchnię półsfery okalającej próbkę (patrz rys. 5.33a). Dzięki wypukłemu zwierciadłu projekcja rozkładu rozproszonego światła na wewnętrznej stronie kopuły zostaje zobrazowana na matrycy kamery CCD. Precyzyjne filtry i kalibracja (dystorsja, aberracja, winietowanie, transmisyjność) umożliwiają pomiary fotometryczne oraz kolorymetryczne. Do pomiarów spektrometrycznych używane jest monochromatyczne oświetlenie badanej powierzchni i szeroko-spektralna rejestracja odpowiedzi.



Rys. 5.33. Skaterometr: a) schemat zasady działania sfery obrazującej do pomiarów BRDF, b) indykatorysa rozproszeniowa

Najważniejszym zadaniem algorytmów przetwarzania uzyskanych obrazów radiancji/luminacji jest korekcja zniekształceń wynikających z nieosiowości układu oraz linearyzacja przestrzenna wynikająca z rzutowania powierzchni wewnętrznej półsfery na płaską powierzchnię detektora (patrz rys. 5.21). W dalszej części procesu przetwarzania wprowadza się korekcje światła rozproszonego (odbicia wyższego rzędu) oraz odbicia od krawędzi apertury. Ostatnim etapem kalibracji jest wyrównanie charakterystyki rozpraszania i kalibracja intensywności, realizowane z użyciem białego wzorca rozpraszania lambertowskiego. Uzyskany wzór rozproszeniowy (patrz rys. 5.33b), przedstawiający zależność funkcji BRDF od kąta inklinacji światła oświetlającego, prezentowany jest w układzie mapy 2D we współrzędnych sferycznych.

Najważniejszą cechą podanej metody pomiarów jest szybkość działania. W porównaniu z metodami pomiarów goniometrycznych, wystarcza bowiem jedno zdjęcie, lub trzy w trybie kolorymetrycznym, do rejestracji intensywności światła odbijanego w pełnym kącie półsfery 2π . Czas pomiaru jest zależny od refleksyjności materiału oraz intensywności światła padającego.

Niepewność pomiaru zależy w głównej mierze od poprawności procesu wieloetapowej kalibracji. Producent ocenia dokładność pomiarów fotometrycznych BRDF na $\pm 5\%$, a pomiarów chromatycznych $C_x C_y$ na 0,005. W kontekście powtarzalności krótkoterminowej podawane są odpowiednio wartości $\pm 1\%$ i 0,0006, w zakresie 80 stopni dla kątów oświetlania i rozpraszania.

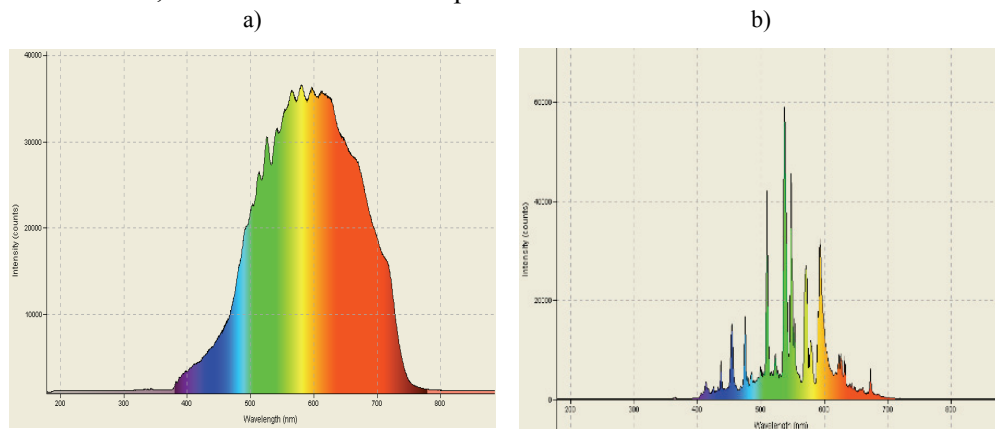
W ramach prowadzonych badań użyto skaterometru IS-SA-13-1 w konfiguracji z fotokolorymetrem PM-1613F o rozdzielczości przestrzennej $1024 \text{ pix} \times 1024 \text{ pix}$ i dynamice 16 bit. Jest on wyposażony w układ chłodzący Peltiera (-10 stopni), co redukuje szумы przetwornika, zwłaszcza w długich czasach ekspozycji, które występują podczas badania powierzchni o dużej absorpcyjności lub gdy moc oświetlacza i czułość kamery są niewielkie, np. dla zakresu UV. Przed przetwornikiem zainstalowany jest zestaw filtrów, umożliwiających pomiary fotometryczne, kolorymetryczne (filtry R, G, B) oraz spektrometryczne przy oświetlaniu światłem monochromatycznym.

Jako źródło oświetlenia zastosowano szerokospektralną lampę halogenową (rys. 5.34a) oraz lampę metalohalogenkową (rys. 5.34b), zapewniającą większą intensywność promieniowania w zakresie UV. Dzięki dodatkowemu ramieniu pozycjonowania oświetlacza poniżej badanej powierzchni możliwe jest prześwietlanie próbek transparentnych, w celu pomiarów ich transmisyjności (BTDF).

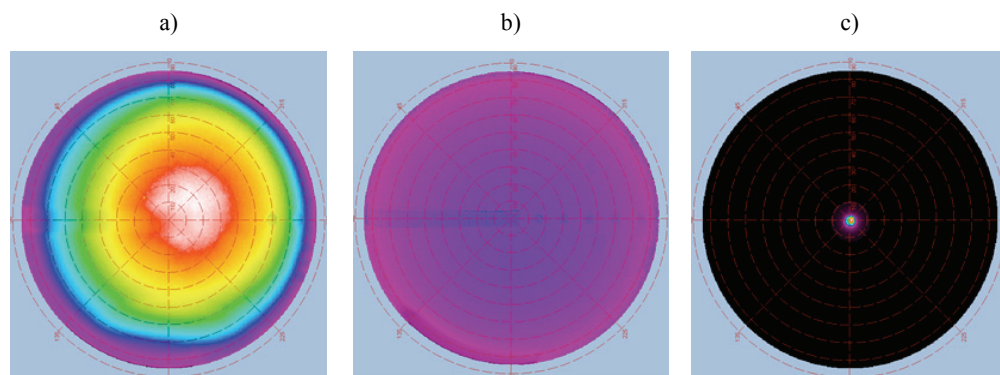
Jeśli powierzchnia wykazuje anizotropowość, tj. jej charakterystyka rozpraszania światła zależy nie tylko od kąta inklinacji, ale również kąta azymutu, znajduje zastosowanie dodatkowa oś napędowa obracająca próbkę.

Najistotniejszym ograniczeniem metody pomiarów skaterometrycznych jest zakres pomiarowy dla kątów incydencji, który wynosi maksymalnie 85 stopni, oraz nieliniowość rozdzielczości. Ponadto, wraz ze zmniejszaniem apertury pomiarowej, tj. powierzchni próbki, maleje intensywność światła odbijanego i rozpraszanego, co wymaga dłuższych czasów ekspozycji kamery. Istotnym ograniczeniem może okazać się również

wymaganie płaskości próbki. W przypadku powierzchni sferycznych, cylindrycznych, swobodnych, następuje nachodzenie na siebie charakterystyk rozpraszania od poszczególnych elementów powierzchni. Oznacza to, że znalezienie płaskiego obszaru, o średnicy powyżej 10 mm, dla pomiarów BRDF, rzeczywistych obiektów może okazać się bardzo trudne, a nawet niemożliwe do spełnienia.



Rys. 5.34. Charakterystyki spektralne lamp w pomiarach skaterometrycznych:
a) lampa halogenowa, b) lampa metalo-halogenkowa



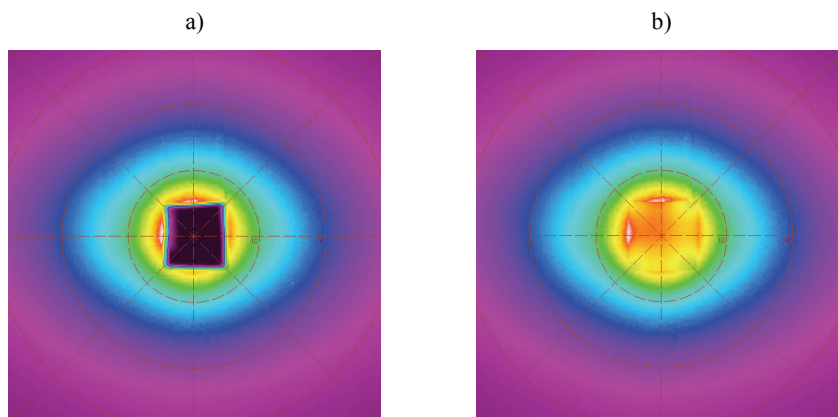
Rys. 5.35. Indykatrysy transmisyjne rozpraszania światła: a) papier, b) dyfuzor, c) filtr kolorowy

5.2.3. Pomiary rozpraszania światła (BRDF)

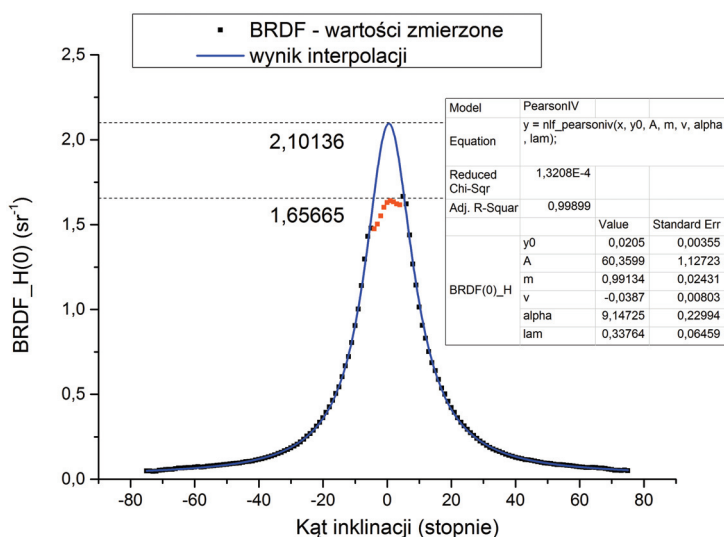
Do charakteryzacji optycznej podanych powierzchni użyto skaterometru (IS-SA Radiant Zemax). Przyjęto aperturę okrągłą o średnicy 20 mm, do oświetlania stosowano szerokospektralną lampę halogenową.

Korekcja dokładności pomiaru BRDF dla kąta 0°

W przypadku pomiaru charakterystyki BRDF metodą sfery obrazującej, dla kąta incydencji 0° zachodzi problem pokrywania się osi optycznej źródła światła z osią detektora. W przypadku sfery obrazującej IS-SA, gdzie otwierane są porty oświetlacza, powstaje obszar nieciągłości wyników pomiarów. Jest on interpolowany na podstawie wartości wskazanego obszaru. Obrazy rozproszeniowe przed i po interpolacji, które dowodzą utraty informacji, ale również mało precyzyjnej metody ich odtwarzania, pokazano na rys. 5.36.

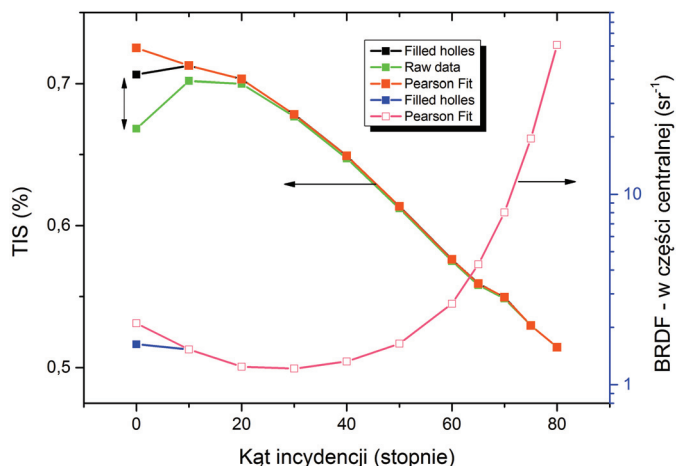


Rys. 5.36. Obraz rozproszeniowy wokół portu oświetlacza: a) przed korekcją, b) po korekcji



Rys. 5.37. Profil w przekroju poziomym zmierzony po korekcji i interpolowany

Na podstawie analizy kształtu rozkładów BRD dla różnych kątów dopasowano model opisujący funkcję BRDF, z zastosowaniem którego dokonano interpolacji brakującego obszaru danych. W przypadku badanej powierzchni najlepsze dopasowanie uzyskano z użyciem funkcji Pearsona. W wyniku interpolacji uzyskano korekcję BRDF o 27%. Wyniki zmienności całkowitego promieniowania rozproszonego TIS oraz maksymalnej wartości funkcji BRDF przedstawiono na rys. 5.38.



Rys. 5.38. Zmiana TIS i BRDF maksymalnej w funkcji kąta padania światła na powierzchni aluminium

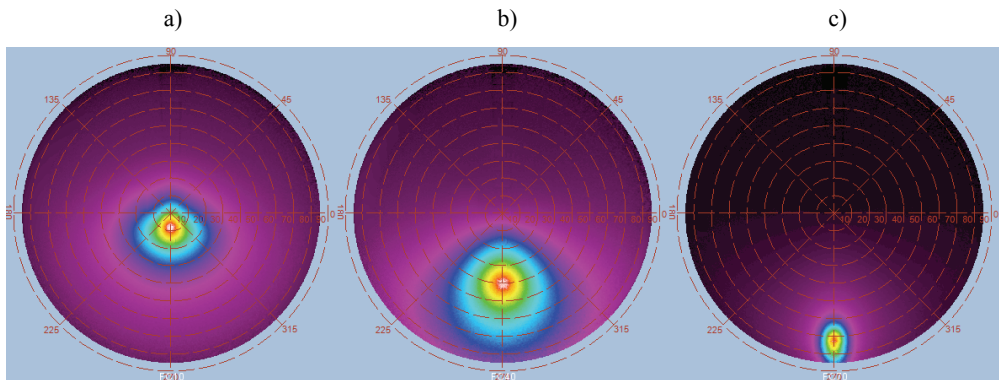
Metoda interpolacji wyniku pomiaru koryguje wyznaczenia wskaźnika BRDF dla kąta incydencji zgodnego z normalną powierzchnią. Wskazana funkcja interpolacyjna nie jest uniwersalna, stąd musi być wyznaczona dla każdego przypadku indywidualnie.

Powierzchnia anodowanego aluminium

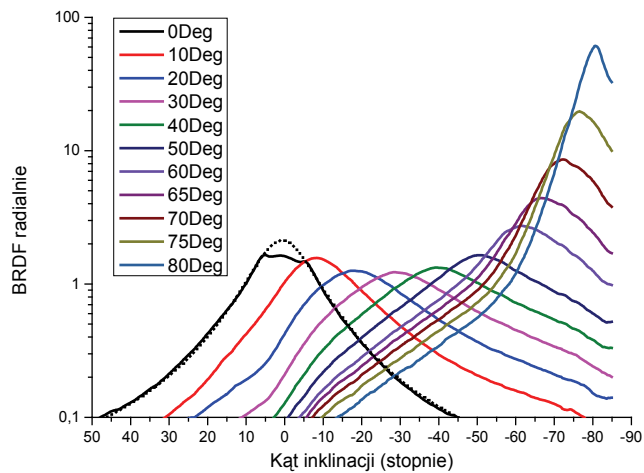
W wyniku pomiarów powierzchni anodowanego aluminium (rys. 5.26) uzyskano wzory rozproszeniowe BRDF w układzie sferycznym. Trzy wybrane dla kątów incydencji oświetlania 10, 40 i 70° zaprezentowano na rys. 5.39.

Zmiana intensywności w osi odbicia zwierciadlanego charakteryzuje się dużą dynamiką, co zobrazowano na wykresie ze skalą logarymiczną profilu radialnego BRDF, rys. 5.40.

Stromy przyrost natężenia w funkcji kąta oświetlania powierzchni należy tłumaczyć charakterystyką refleksyjności dla utlenionej powierzchni Al_2O_3 (patrz wykres na rys. 4.5). Wzory rozproszeniowe (indykatrysy rozproszenia) są owalne, co wynika z izotropowości badanej powierzchni.



Rys. 5.39. Wzory rozproszeniowe powierzchni aluminiowej anodowanej:
a) 10°, b) 40°, c) 60°

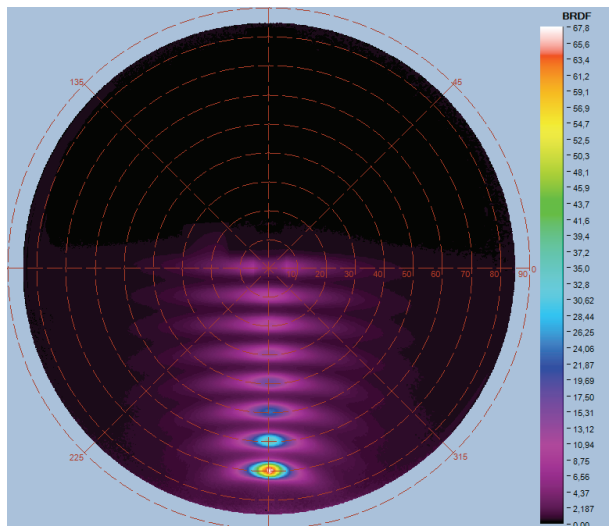


Rys. 5.40. Profile radialne BRDF w funkcji kąta incydencji światła
dla powierzchni anodowanego aluminium

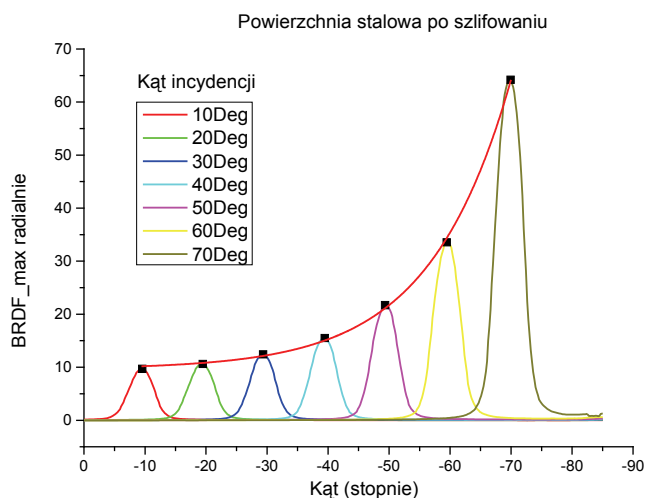
Powierzchnia po szlifowaniu

Przeprowadzono badania skaterometryczne powierzchni po szlifowaniu (rys. 5.27), złożenie obrazów rozproszeniowych pokazano na rys. 5.41.

Wykreślono profile radialne dla poszczególnych kątów incydencji, co pokazano na rys. 5.42.



Rys. 5.41. Złożenie obrazów BRDF powierzchni szlifowanej dla kątów 0–70°

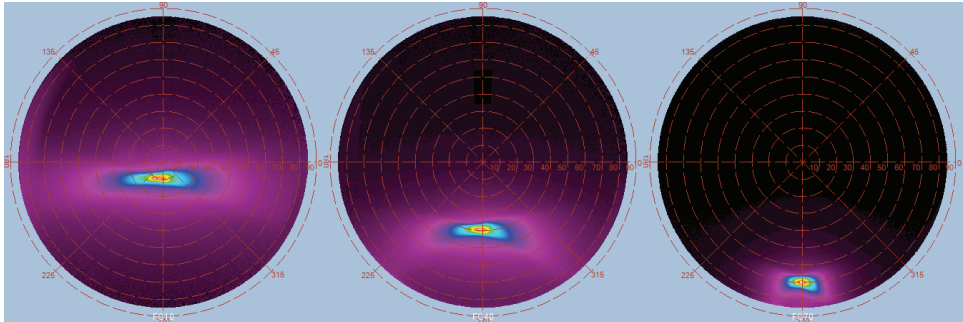


Rys. 5.42. Profile radialne funkcji BRDF dla różnych kątów incydencji światła

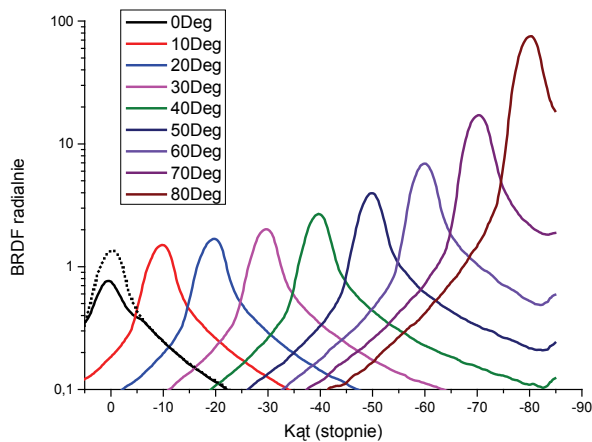
W porównaniu do wzorów rozproszeniowych powierzchni aluminium po anodowaniu, charakterystyki są znacznie węższe, co potwierdza bardziej lustrzany charakter powierzchni. Jednocześnie widoczna jest asymetria wzoru rozproszeniowego, co wynika z anizotropii badanej powierzchni. Eliptyczność ich wskazuje na anizotropowość powierzchni. Prostopadłość osi głównej elipsy należy tłumaczyć kierunkiem śladów szlifowania, który jest zgodny z płaszczyzną oświetlania.

Powierzchnia po frezowaniu

W wyniku pomiarów skaterometrycznych powierzchni po frezowaniu (rys. 5.28) uzyskano zestaw wzorów rozproszeniowych BRDF.



Rys. 5.43. Złożenie obrazów BRDF powierzchni frezowanej dla kątów oświetlenia 0–60°



Rys. 5.44. Zmiana intensywności BRDF powierzchni frezowanej w funkcji kąta incydencji

Wzory rozproszeniowe są asymetryczne i wydłużone, co świadczy o anizotropii i pofałdowaniu powierzchni. Ich orientacja, prostopadła względem kierunku oświetlania, pozwala ustalić, że kierunek śladów po narzędziu obróbkowym jest zgodny z płaszczyzną oświetlania. Wzory rozproszeniowe, w porównaniu z powierzchnią szlifowaną są jednak szersze, co jest powodowane większą amplitudą i krótszym okresem bruzd na powierzchni.

Z analizy zmienności profili radialnych BRDF wynika, że głębokie bruzdy na powierzchni, pozostawione przez narzędzie obróbkowe, są przyczyną dziesięciokrotnie większego tłumienia maksymalnego natężenia światła odbijanego. Dla większych

kątów incydencji, powyżej 60° , ich udział jest coraz to mniejszy, stąd charakterystyka się zawęża, a jej amplituda intensywnie wzrasta. Dynamika zmian BRDF dla zakresu kątów $0-80^\circ$ wynosi dwie dekady.

5.3. Podsumowanie

Dostępny jest bardzo szeroki wybór oświetlaczy do systemów wizyjnych, charakteryzujących się odmienną techniką i parametrami rozsyłu światła oraz parametrami radiospektralnymi. Oświetlacze takie pracują jednak w polu bliskim, stąd do ich charakteryzacji nie nadaje się opis zaniedbujący ich wymiar przestrzenny. Do pomiarów natężenia promieniowania w polu bliskim znajdują zastosowanie fotometry obrazujące. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów zidentyfikowano kilka cech przykładowego oświetlacza w zakresie niejednorodności światłości i parametrów kolorymetrycznych. Z użyciem płaszczyzny przekroju zobrazowano rozsył światła. Opracowane stanowisko badawcze światłości w polu bliskim umożliwia wygenerowanie charakterystyk w polu dalekim. Źródłowe dane pomiarowe przechowywane są w postaci plików promieni, tzw. RayFiles. Pliki te są importowane przez oprogramowanie do projektowania optycznego.

Gdy typowe oświetlacze systemów wizyjnych okazują się niewystarczające, np. z uwagi na ograniczenia konstrukcyjne, specyficzny sposób oświetlania obiektu w zakresie przestrzennym lub chromatycznym (polichromatycznym) wtedy zachodzi potrzeba opracowywania oświetlaczy dedykowanych. W tym przypadku diody LED są podstawowym komponentem używanych do ich opracowywania. Niestety, tylko nieliczni producenci oferują kompletny zestaw danych optyczno-elektryczno-termicznych, który jest niezbędny do modelowania układu oświetlającego. Jak potwierdzono w przeprowadzonych badaniach, bardzo duże możliwości pomiarowe oferuje sfera obrazująca. Z jej użyciem możliwe jest szybkie uzyskiwanie charakterystyki światłości 3D, tj. pełnej bryły fotometrycznej, w polu dalekim. Opracowane stanowisko pomiarowe oferuje możliwość zintegrowanych pomiarów wielodzielznowych, dzięki którym określone są zależności optyczno-elektryczno-temperaturowe, niezbędne do parametryzacji modeli symulacyjnych. Posłużyły one również do określenia różnicy między kształtem charakterystyki rozsyłu podanym w katalogach a światłością podaną w plikach IES, bądź wartościami zmierzonymi.

Wygląd powierzchni (ang. *surface apperance*) opisany jest przez obrazy barwne, mapy wysokości oraz dwukierunkową funkcję rozpraszania światła BRDF. Do jej pomiaru zastosowano skaterometr działający na zasadzie określenia rozkładu rozpraszania światła na powierzchni sfery. Metoda ta umożliwia szybkie pomiary funkcji BRDF i BTDF oraz jakościowe porównanie ich indykatrys rozproszeniowych. Dla punktu nieoznaczoności zaproponowano sposób interpolacji wyników, dla prezento-

wanego przykładu skorygowano wartość BRDF o 27%. Funkcja BRDF zakłada homogeniczność powierzchni, co można utożsamiać z polem dalekim. Analiza lokalnych nieciągłości powierzchni, np.: śladów narzędzia obróbkowego lub skaz powierzchni, wymaga mikroskopowego obrazowania topografii i tekstury. Ponieważ tekstury są bardzo kosztowną formą opisu powierzchni (czas skanowania i objętość danych), używa się obrazów barwnych powierzchni. Do ich uzyskiwania użyto laserowego mikroskopu konfokalnego. Metoda ta odznacza się dużą rozdzielczością *XYZ* i szybkością działania, jednak obrazowanie zboczy (kąt nachylenia) oraz odporność na zakłócenia zależą od powiększenia obiektywu. Badane algorytmy przetwarzania obrazów nie umożliwiły korekcji artefaktów na mapie wysokości, pochodzących od elementów powierzchni o silnej składowej odbiciowej skierowanej zgodnie z normalną. Stąd dla większych pól widzenia konieczne było łączenie obrazów (ang. *image stitching*). Wyniki rozszerzonych analiz SGP w dziedzinie przestrzennej i częstotliwościowej są niezbędne do pełniejszego opisu powierzchni, które będą używane jako mapy do teksturowania w modelach symulacyjnych.

6. Synteza modeli symulacyjnych

Fundamentalnym wyzwaniem stosowania wszelkich metod numerycznych jest określenie zgodności otrzymanych wyników z rzeczywistością, tj. walidacja. Podobnie jak w metrologii – wynik pomiaru bez określenia niepewności nie ma żadnej przydatności, to w przypadku symulacji, model bez weryfikacji – generuje wprowadzić dane, ale na ile są one wartościowe, a nawet bezpieczne, nie wiadomo.

Największą zgodność wykazują modele analityczne, jednak dla złożonych obiektów są trudne do opracowania, stąd rosnące znaczenie modelowania numerycznego lub modelowania bazującego na danych wielowymiarowych. W samej definicji „modelu” wbudowane jest już świadome uproszczenie odwzorowania rzeczywistości. Nieprawidłowości rezultatów symulacji mogą wynikać z różnorodnych przyczyn: przyjętych założeń lub metody modelowania, architektury modelu, parametryzacji poszczególnych składowych i ich interakcji, oddziaływania zakłóceń czy innych ukrytych czynników, etc. Stąd, jakość narzędzi symulacyjnych zależy od poprawności poszczególnych komponentów i interakcji między nimi oraz możliwości jakie oferują one w zakresie weryfikacji. Narzędzia projektowania optycznego dla modelowania niesekwencyjnego oferują: detektory natężenia napromieniowania, polarne detektory natężenia/światłości oraz bardzo rozbudowane możliwości śledzenia i filtracji promieni. Dzięki nim można przeanalizować wybraną ścieżkę optyczną z milionów promieni występujących podczas obliczeń. W przypadku środowisk grafiki komputerowej, ich najpoważniejszym ograniczeniem, jest brak takich narzędzi wsparcia dla weryfikacji modeli, co omówiono w rozdziale 4.5.

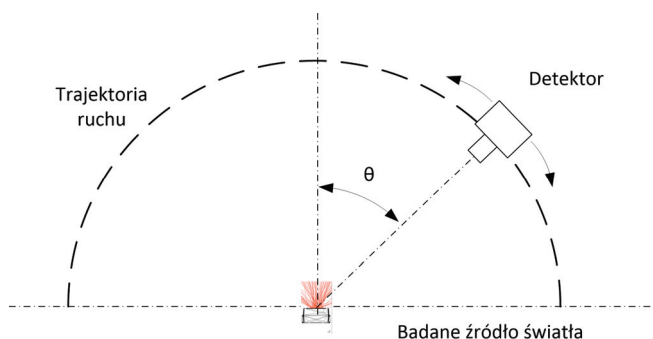
W pierwszym etapie badań podjęto zadanie rozwoju metod i narzędzi wspierających weryfikację stosowanych algorytmów symulacyjnych. Opracowano i przebadano detektor polarny światłości, a następnie oceniono poprawność modelu źródła światła parametryzowanego za pomocą danych IES. Następnie zbadano możliwości modelowania rozpraszania światła na powierzchniach, których efekt oceniono za pomocą opracowanego wirtualnego skaterometru. Zbadano możliwość modelowania geometryczno-optycznego skupionych źródeł światła.

W drugim etapie badano możliwości kształtowania strumienia świetlnego oświetlaczy dla systemów wizyjnych. Następnie zbadano możliwości zaprojektowania i optymalizacji układu akwizycji obrazów z użyciem metod symulacyjnych.

6.1. Weryfikacja modeli źródeł światła

6.1.1. Wirtualny goniometr

Goniometry umożliwiają precyzyjne pozycjonowanie kątowe, stąd ich zastosowanie do pomiarów charakterystyk światłości. Różne płaszczyzny pomiarów umożliwiają syntezę pełnej bryły fotometrycznej. Realizacja takiego przemieszczenia detektora względem źródła światła jest łatwa do zasymulowania w środowiskach renderujących wspierających generowanie animacji. Zamodelowanie ruchu detektora wymaga wskazania ścieżki (*path*), wzdłuż której będzie się poruszał detektor oraz określenia rozdzielczości kątowej. Dyskretyzacja taka jest związana z wyznaczeniem kolejnych punktów rejestracji obrazów podczas trybu animacji. O rozdzielczości pomiarowej układu decyduje również odległość detektora od obiektu.



Rys. 6.1. Schemat układu goniometru wirtualnego

Ze względów pomiarowych ważne jest jeszcze sparametryzowanie detektora (kamery), który rejestruje radiancję powierzchni emitera, rzutowaną przez układ obiektywu. Do pomiarów fotometrycznych wymagane jest zapewnienie:

- zgodności charakterystyki czułości widmowej z charakterystyką oka ludzkiego,
- liniowości konwersji luminacji na wartość ładunku elektrycznego,
- jednorodności przestrzennej całej matrycy.

Pole obserwowanej powierzchni pomiarowej zależy od kąta obserwacji (względem normalnej)

$$dA_{s,proj} = dA_s \cos \theta, \quad (6.1)$$

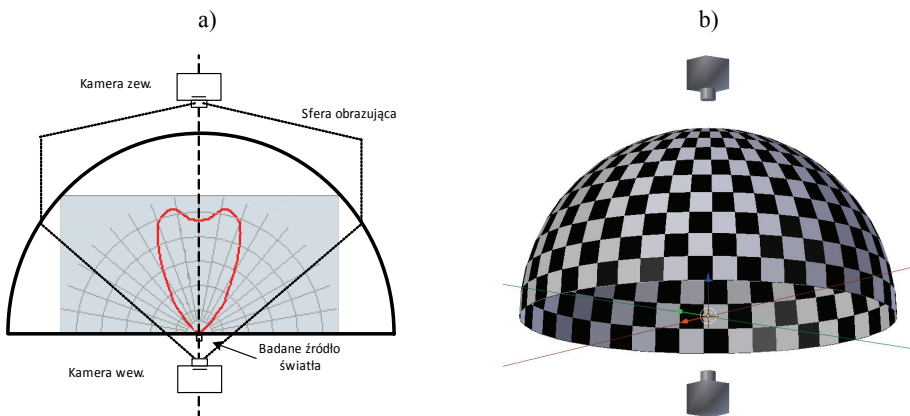
aby wyznaczyć natężenie światła, zmierzoną luminację należy skorygować o kosinus kąta obserwacji. Oznacza to jednocześnie, że parametryzację pola widzenia obiektywu kamery należy prowadzić w punktach skrajnych zakresu pomiarowego goniometru. Po ustalaniu parametrów ekspozycji, które muszą być jednakowe dla wszystkich rejestra-

cji, należy zwrócić uwagę na problem nasycenia przetwornika. Problem ten jest związany zarówno z pojemnością poszczególnych pikseli, jak i przetwarzaniem (kodowaniem). Przy 8-bitowym trybie pracy, dostępnych jest zaledwie 256 poziomów szarości. Dlatego uzasadnione jest użycie trybu 16-bitowego, oferującego kontrast 65536:1. Mierzona wartość natężenia promieniowania jest sumą poszczególnych wartości intensywności przetwornika optycznego po jego polu powierzchni. Stąd liczba pikseli decyduje również o dynamice układu rejestrującego.

6.1.2. Detektor polarny do pomiarów światłości

Do pomiarów światłości skupionych źródeł światła użyto sfery obrazującej z lustrem wypukłym (rozdział 5.2.2). Dzięki metodom symulacyjnym, uszczegółowiono problem nieliniowości i nieoznaczoności transformacji geometrycznych w takiej konfiguracji.

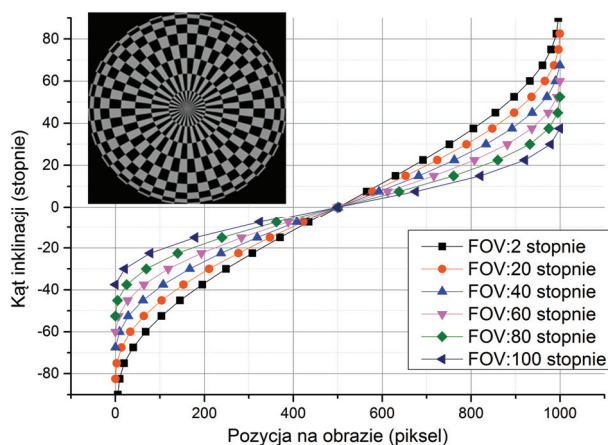
W przypadku projektowania urządzeń wirtualnych, projektanci mają znacznie większą swobodę działania, gdyż jest mniej ograniczeń konstrukcyjno-technologicznych. W przypadku sfery obrazującej możliwe jest umieszczenie kamery rejestrującej rozkład radiancji zarówno na wewnętrznej, jak i na zewnętrznej powierzchni sfery, w konfiguracji osiowej i pozaosiowej. Obok klasycznych kamer perspektywicznych, dostępne są kamery ortogonalne oraz panoramiczne. Kamery ortogonalne realizują w sposób wyidealizowany obrazowanie telecentryczne, gdyż nie występuje tu rozbieżność wiązki, a głębia telecentryczna jest w pełnym zakresie obrazowania. Brak również ograniczeń kosztowych, co w przypadku rzeczywistych obiektywów telecentrycznych o dużych polach widzenia jest istotnym kryterium. Unikalnym rozwiązaniem ze świata wirtualnego jest również kamera panoramiczna, pozwalająca rejestrować obraz wokół obserwatora w pełnym kącie bryłowym 4π .



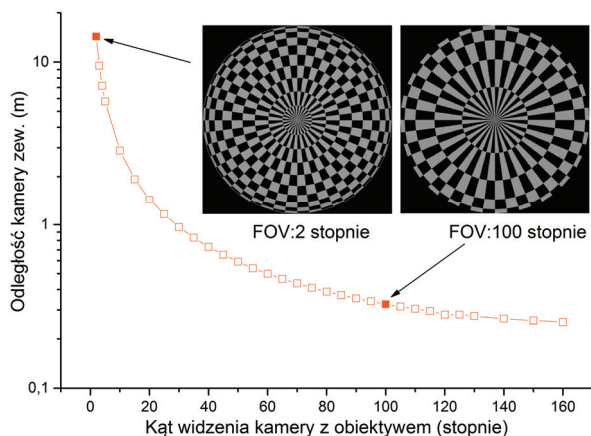
Rys. 6.2. Sfera obrazująca do pomiarów światłości: a) schemat, b) model

Do oceny poszczególnych rozwiązań wirtualnych sfer obrazujących, opracowano model geometryczny półsfery. Początek układu współrzędnych umieszczono w środku sfery. Na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej nałożono raster szachownicy, dzielący ją w kącie azymutalnym na 48 sektorów, a w kącie inklinacji na 12 pierścieni o szerokościątowej $\Delta\theta = 7,5^\circ$ (patrz rys. 6.2).

Użycie kamery perspektywicznej, oprócz problemu rzutowania powierzchni sferycznej na płaszczyznę, ujawnia problem perspektywy, tj. zmiany wielkości obiektu w funkcji odległości. Efekt perspektywy zależy od kąta widzenia obiektywu (ogniskowa i wielkość sensora). Z tego względu w osi obrazowania rozdzielczość jest najmniejsza.



Rys. 6.3. Obrazowanie kamerą perspektywiczną powierzchni zewnętrznej, obraz rastra (FOV = 40°) oraz krzywe kalibracji



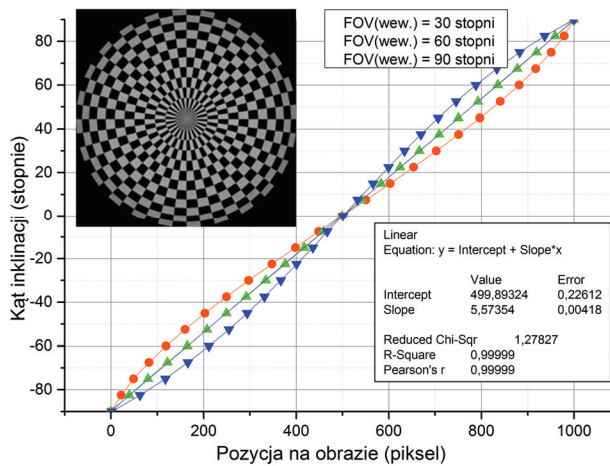
Rys. 6.4. Wpływ perspektywy zewnętrznej (kąt widzenia) na odległość kamery, przy stałym polu widzenia 500×500 mm

Wyniki obrazowania przedstawiono w postaci wykresu zależności kąta inklinacji od długości przestrzennej na sensorze, gdyż to ona decyduje o rozdzielczości układu. Analiza krzywych kalibracyjnych zwraca uwagę na ograniczenie zakresu kątów inklinacji powierzchni sfery. Największy zakres $\pm 90^\circ$ (dla bardzo małej rozdzielczości w zakresie skrajnych kątów powyżej 80°) uzyskiwany jest przy wąskokątnym obrazowaniu, więc z bardzo dużej odległości. Zawężanie kąta obserwacji, związane z oddalaniem płaszczyzny obiektu, odpowiada obrazowaniu telecentrycznemu.

W konfiguracji kamery perspektywicznej, rejestrującej obraz wewnętrznej powierzchni półsfery o promieniu r , przy kącie obrazowania $FOV = 60^\circ$, w odległości h

$$h = \frac{r}{\tan\left(\frac{FOV}{2}\right)} \quad (6.2)$$

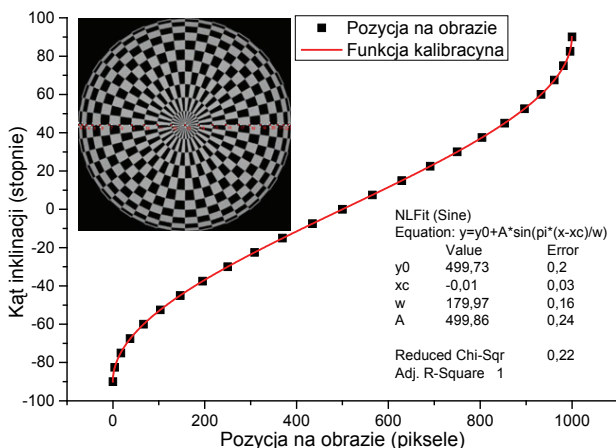
występuje rzutowanie liniowe.



Rys. 6.5. Obrazowanie kamerą perspektywiczną powierzchni wewnętrznej, obraz rastra oraz krzywe kalibracyjne

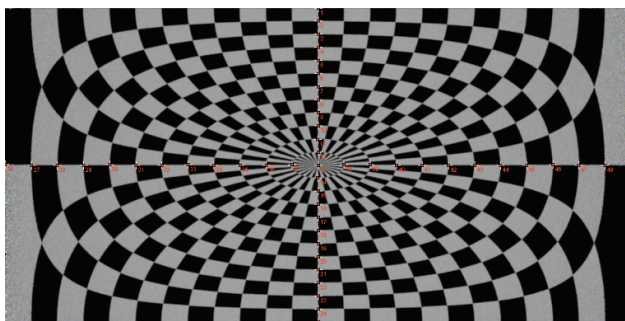
Jak pokazano na wykresie (rys. 6.5), dla kątów obserwacji powyżej 60° , biegun półsfery obrazowany jest z mniejszą rozdzielczością, zaś dla kątów mniejszych niż 60° , gorzej rejestrowane są obszary dużych kątów inklinacji. Dlatego do pomiarów charakterystyki światłości emiterów wąskokątnych, celowe jest stosowanie kamery z obiektywem o kącie widzenia 60° lub mniejszym.

Kolejnym modelem kamery w środowiskach renderujących jest kamera ortogonalna. Równoległy bieg promieni zapewnia, że obraz powierzchni sfery jest niezależny od kierunku jej obserwacji i odległości. Dla dostosowania pola widzenia służy parametr powiększenia ortogonalnego.



Rys. 6.6. Obrazowanie kamerą ortogonalną, obraz rastra powierzchni zewnętrznej/wewnętrznej oraz krzywa kalibracyjna

Jak potwierdza dopasowanie, krzywa kalibracji geometrycznej jest zgodna z funkcją kosinus (rys. 6.6), co wynika z rzutowania planarnej powierzchni sfery na płaszczyznę.

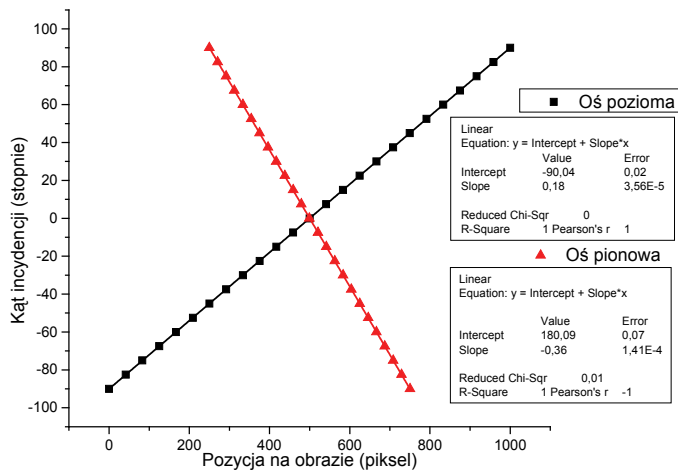


Rys. 6.7. Obraz wewnętrzny powierzchni sfery z naniesionym rastrem dla kamery panoramicznej (ograniczone do 2π)

W środowiskach renderujących stosuje się również kamerę panoramiczną inaczej zwaną dookólną. W tym przypadku, uzyskiwany obraz nie zależy od wielkości detektora, nie ma też możliwości parametryzowania obiektywu. Wynik obrazowania sfery wewnętrznej z rastrem, dla kamery umieszczonej w środku sfery $x, y, z = (0, 0, 0)$, przedstawiono na rys. 6.7. Obraz ten wyraźnie wskazuje, że transformacja geometryczna zachowuje liniowość wyłącznie w osiach głównych.

Współrzędne markerów w osiach V i H, odczytano z obrazu na narożach segmentów, tj. co $\Delta\varphi = 7,5^\circ$, $\Delta\theta = 7,5^\circ$, co umożliwiło wyznaczenie krzywych kalibracji.

Wyniki przedstawione w formie wykresu rozproszenia wraz z prostymi kierunku, potwierdzają liniowość i ukazują różne wzmocnienie (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Krzywe kalibracji geometrycznej osi głównych dla obrazu z kamery panoramicznej

Wyniki analiz geometrycznych transformacji zebrano w tabeli 6.1. Wynika z nich, że optymalnym rozwiązaniem pod kątem linearności transformacji jest zastosowanie kamery perspektywicznej z kątem obserwacji 60° , obrazującej wewnętrzną powierzchnię sfery.

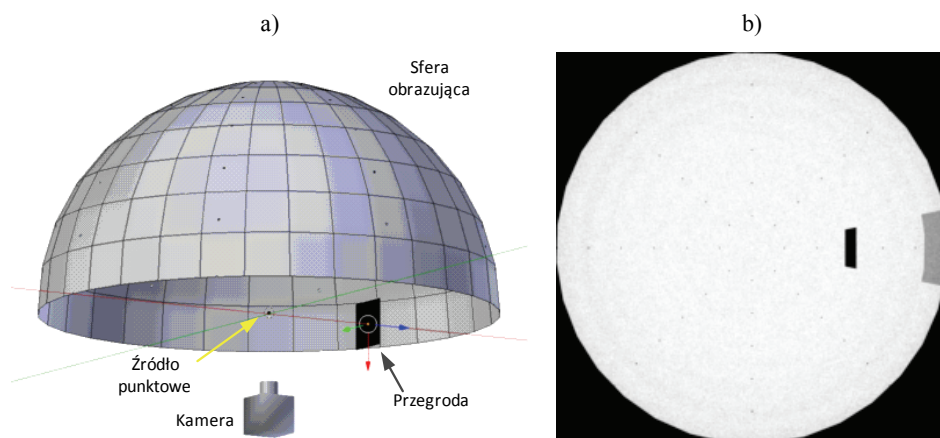
Tabela 6.1. Ocena dystorsji dla różnych metod obrazowania sfery wirtualnej

Typ kamery	Powierzchnia obrazowana	
	Wewnętrzna	Zewnętrzna
Perspektywiczna współosiowo ($FOV = 60^\circ$)	○	●
Perspektywiczna niewspółosiowo	●	●
Ortogonalna	○	○
Panoramyczna	●	nie dotyczy

Dystorsja: ○ brak, ○ słaba liniowa, ● silna liniowa, ● nieliniowa poza osiami głównymi, ● nieciągłości

W przypadku obrazowania powierzchni wewnętrznej sfery należy jednak uwzględnić problem przesłaniania, powodowany przez badane źródło. Łatwość deaktywowania geometrii i materiału rozwiązuje ten problem. Konfiguracja z kamerą ortogonalną do obrazowania zewnętrznej powierzchni sfery jest pozbawiona tego problemu, jednak wymaga ograniczenia zakresu kąтового do $\pm 80^\circ$ oraz implementacji algorytmu linearyzacji obrazu.

Dla zbadania poprawności odwzorowania energetycznego na całej powierzchni pomiarowej (ang. *flat field*), posłużono się punktowym źródłem światła. Generuje ono dookólną, równomierną charakterystykę światłości. Źródło światła umieszczono w środku układu współrzędnych (0, 0, 0). Badania prowadzono w trybie monochromatycznym 16-bitowym. Plan badań obejmował równomierność luminacji oraz wpływ parametrów optycznych powierzchni wewnętrznej sfery na odbicia wyższych rzędów (ang. *stray light*). Do badań użyto modelu sfery obrazującej z kamerą perspektywiczną obrazującą jej wnętrze przy odwzorowaniu geometrycznym liniowym ($FOV = 60^\circ$). Dodatkowo, w układzie umieszczono przegrodę o niewielkich wymiarach. Przez przesłonięcie promieniowania bezpośrednio padającego na obrazowaną powierzchnię sfery uzyskano informację o natężeniu rozproszonym.



Rys. 6.9. Sfera obrazująca: a) model, b) uzyskany obraz radiancji

Korekcja gamma wprowadza nieliniowe przekształcenie jasności obrazu w celu lepszego dopasowania obrazów syntetycznych do czułości oka ludzkiego, przez korekcję wykładniczą o podstawie γ , dla każdej wartości intensywności obrazu

$$L'[x, y] = L[x, y]^\gamma, \quad (6.3)$$

gdzie:

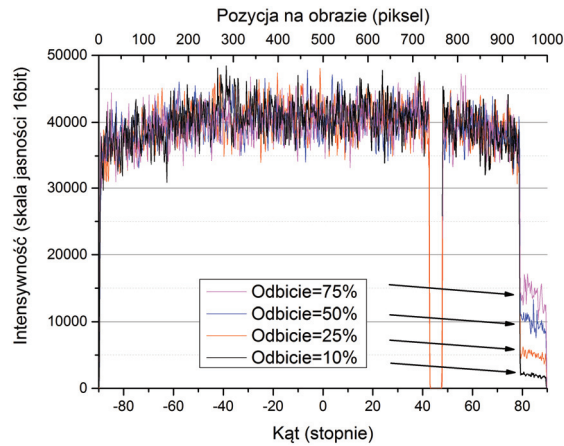
- $L'[x, y]$ – obraz wynikowy,
- $L[x, y]$ – obraz wejściowy,
- γ – współczynnik korekcyjny.

W przypadku pomiarów fotometrycznych lub radiometrycznych konieczne jest jej wyłączenie przez parametryzację $\gamma = 1$.

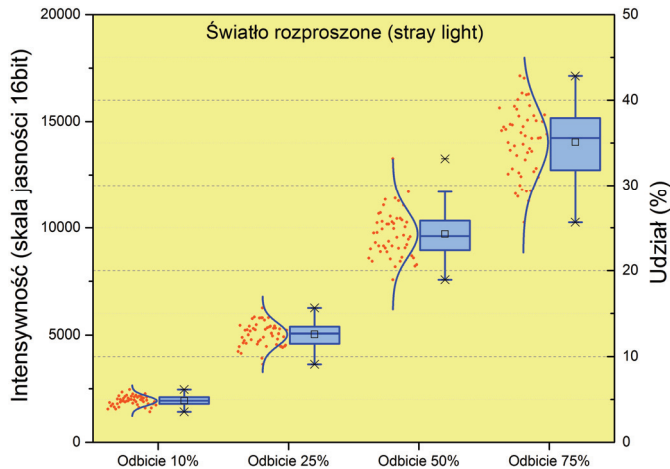
Przeanalizowano następnie wpływ parametrów refleksyjności powierzchni na powstawanie światła rozproszonego, tj. odbić wyższych rzędów. Powierzchnię sparamet-

tryzowano jako dyfuzor lambertowski z refleksyjnością 10%, 25%, 50% i 75%. Ustawienia ekspozycji kamery znormalizowano.

Na wykresie rys. 6.10 zestawiono profile jasności obrazów w przekroju poziomym, przez środek obrazu. Dla kątów powyżej 80° , z obszaru przesłoniętego przegrodą, odczytano wartości intensywności, które podają informacje o świetle rozproszonym wewnątrz sfery.



Rys. 6.10. Profile jasności obrazu, we współrzędnych obrazu i sfery, w funkcji refleksyjności powierzchni



Rys. 6.11. Światło rozproszone wewnątrz sfery dla różnych refleksyjności powierzchni

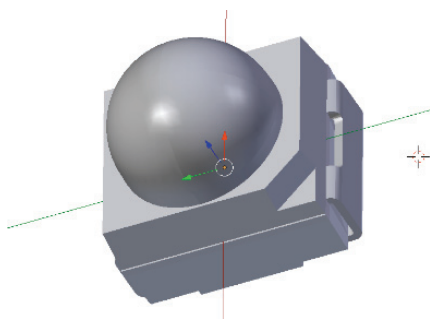
Odnosząc średnią intensywność światła rozproszonego do średniej intensywności w środku obrazu (zakres kątów $\pm 40^\circ$), wyznaczono udział światła niepożądanego

w wyniku końcowym. Przeprowadzone badania wskazują, że przy refleksyjności powierzchni wewnętrznej 75%, udział światła niepożądanego sięga aż 35%. Oznacza to, że układ staje się podobny do sfery całkującej, stosowanej do homogenizacji natężenia światła lub pomiarów całkowitego strumienia świetlnego (rozdział 4.2).

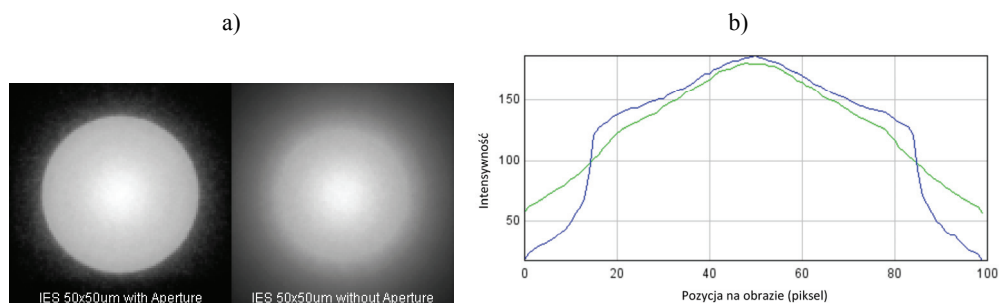
Do dalszych badań przyjęto parametryzację materiału sfery o refleksyjności 10%, akceptując błąd 5%.

6.1.3. Model źródła światła na bazie charakterystyki światłości

Do oceny jakości modelowania źródeł światła parametryzowanych za pomocą charakterystyki światłości, zwrócono uwagę na wpływ części mechaniczno-konstrukcyjnej diody na parametry optyczne oraz ocenę światłości. Pierwszy eksperyment polegał na rejestracji obrazu radiancji powierzchni oświetlanej za pomocą źródła modelowanego za pomocą struktury IES wraz z modelem geometryczno-materiałowym obudowy.



Rys. 6.12. Model geometryczny LED



Rys. 6.13. Luminacja na powierzchni 4×4 mm (100×100 pix) w odległości 0,81 mm:
a) obrazy, b) profile natężenia w osi x o współrzędnych y : 48–52

Opracowano model stanowiska składającego się z badanego źródła, transparentnej powierzchni stanowiącej ekran oraz kamery umieszczonej po nieoświetlonej stronie

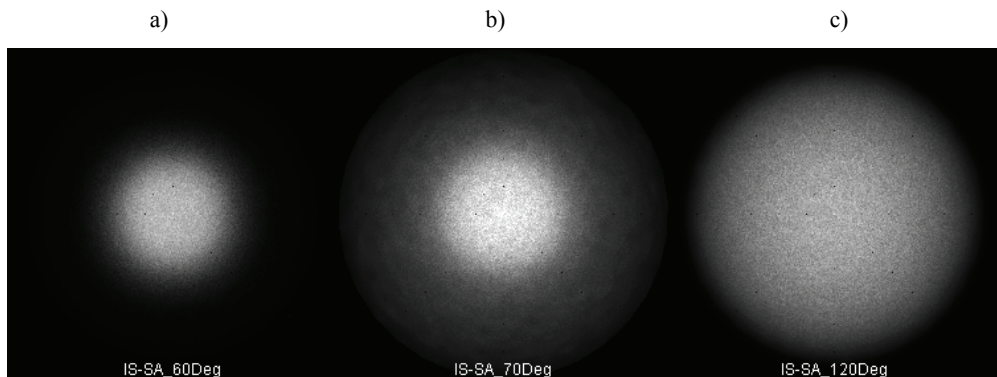
powierzchni. Powierzchni ekranu nadano właściwości rozpraszania lambertowskiego. Wyniki symulacji zaprezentowane na rys. 6.13 wskazują na ograniczanie rozsyłu światłości przez aperturę obudowy. W takim przypadku jest konieczna deaktywacja materiału obudowy (ang. *not rendering*).

Kolejny eksperyment symulacyjny jest wzorowany na mapach napromieniowania w polu bliskim i służy do oceny jednorodności emisyjności (rys. 5.17). Istotna jest w takim przypadku geometria emitera. Informacje o niej zawarte są w strukturze danych IES, co pokazano w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Parametry geometrii oświetlaczy LED odczytane z plików IES

Typ badanego emitera	60°	70°	120°
Szerokość oświetlacza [m] (płaszczyzna 90–270°)	0,0032	0,003	0.0028
Długość oświetlacza [m] (płaszczyzna 0–180°)	0,0028	0,003	0.0032
Wysokość oświetlacza [m]	0,0035	0,0046	0.0019

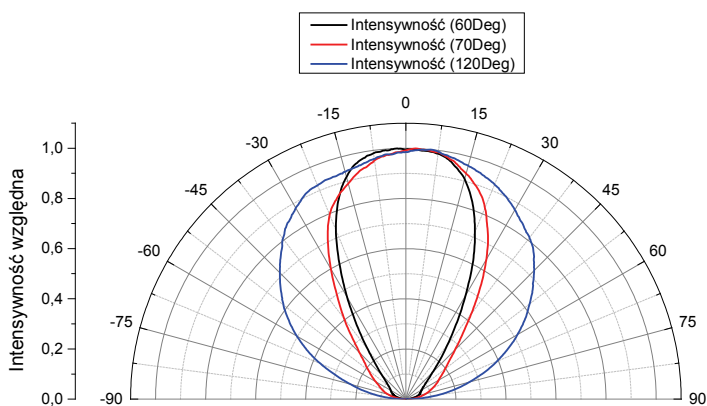
Dane te, charakteryzują cały oświetlacz nie zaś emiter, który jest źródłem promieniowania. W przypadku pola dalekiego, problem taki jest do zaniedbania, jednak czy wielkość emitera wpływa na kształt charakterystyki światłości diody? Przeprowadzono prosty eksperyment symulacyjny, umożliwiający porównanie wyników luminacji. Dla wybranej charakterystyki światłości (IES60Deg), przeprowadzono symulacje dla kolejnych wielkości emitera ($5 \times 5 \mu\text{m}$, $50 \times 50 \mu\text{m}$, $500 \times 500 \mu\text{m}$). Uzyskane wyniki rozkładu natężenia napromieniowania powierzchni dowodzą, że powierzchnia emitera nie wpływa na szerokość rozsyłu w polu dalekim. W przypadku emitera o powierzchni $5 \mu\text{m}^2$ zaobserwowano spadek intensywności o ok. 3,6% w stosunku do emiterów o powierzchniach $50 \mu\text{m}^2$ i $500 \mu\text{m}^2$.



Rys. 6.14. Rozkład światłości na detektorze polarnym dla różnych charakterystyk rozsyłu:
a) 60°, b) 70°, c) 120°

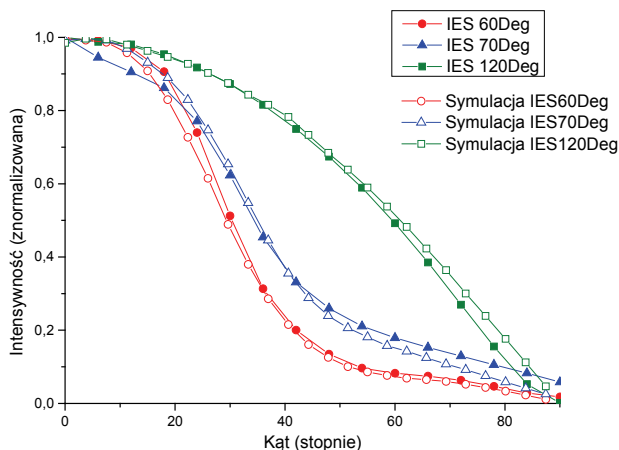
W celu oceny prawidłowości zamodelowania światłości posłużono się wirtualną sferą obrazującą. Wyniki symulacji pokazano na rys. 6.14.

Przez środek każdego z obrazów przeprowadzono linię (profil), wzdłuż której odczytano wartość intensywności. Współrzędne punktów przeskalowano do wartości kątowych i przedstawiono na diagramie rys. 6.15, zgodnie z wyznaczoną krzywą kalibracji.

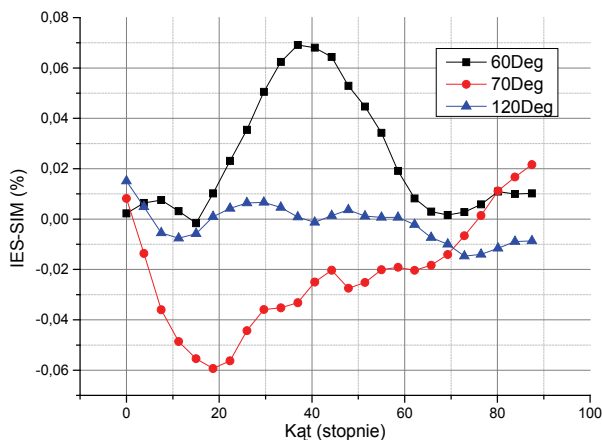


Rys. 6.15. Intensywność światła w układzie polarnym

Na wykresie w układzie kartezjańskim wyznaczono współrzędne kątowe, przy których intensywność spada do 50%. W ten sposób wyznaczono szerokości charakterystyk światłości między symulacją a konfiguracją, które są zgodne.



Rys. 6.16. Porównanie charakterystyk światłości na podstawie pliku IES oraz pomiarów symulacji



Rys. 6.17. Różnica między światłością z pliku IES a wynikiem symulacji

Przeprowadzone badania wykazały możliwość parametryzowania źródeł światła za pomocą struktur danych IES. Mimo normalizacji plików IES występowały problemy ich kompatybilności. Jednak ich format tekstowy i dostępność opisów umożliwiały łatwą korekcję. Zauważono, że model geometryczny może przesłaniać kąt przestrzennego rozsyłu promieniowania. Nie zaobserwowano istotnego wpływu wielkości powierzchni emitera, z zachowaniem jednakowego podziału siatki poligonów.

Na podstawie analizy różnic między charakterystykami z plików konfiguracyjnych IES i charakterystyk zmierzonych w środowisku symulacyjnym, można zauważyć, że w przypadku charakterystyki 120° maksymalna różnica nie przekroczyła 2%. W przypadku charakterystyk 60° i 70° osiągnęła 7%. Należałoby w takiej sytuacji dokonać dodatkowych pomiarów dla innych przekrojów (kątów azymutalnych).

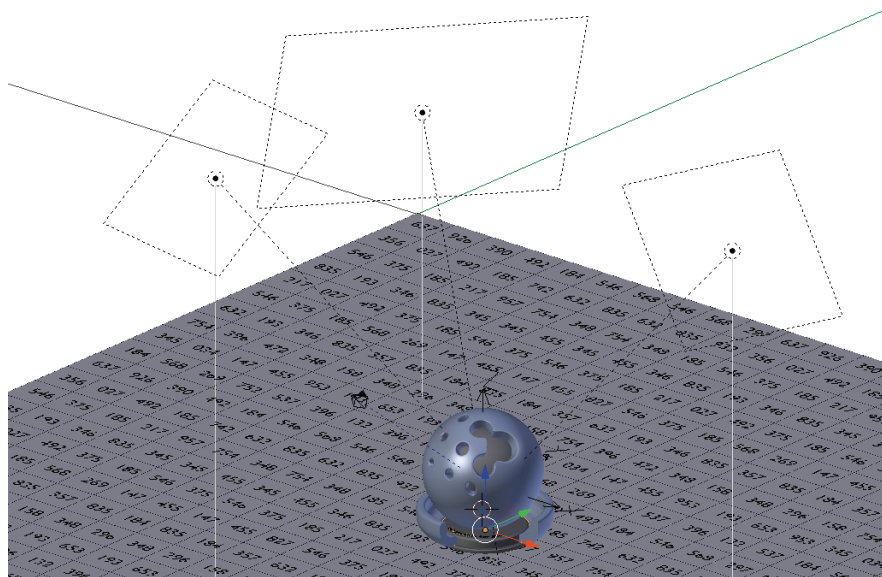
6.2. Weryfikacja modelowania powierzchni

Parametryzację modeli optycznych powierzchni i ich ocenę, w zastosowaniach grafiki komputerowej, prowadzi się subiektywnie. W pierwszym etapie dobierany jest model rozpraszania na podstawie materiału (szkło, metal, etc.), a następnie charakterystyki powierzchni (rozpraszająca, zwierciadlana, transparentna). Do oceny jakości parametryzacji przydatna jest wizualizacja efektu na prymitywach geometrycznych, takich jak kula, sześcian lub układ powierzchni swobodnych.

Drugie podejście do parametryzacji powierzchni stosuje nazwy symboliczne, odnoszące się do użytego materiału oraz charakterystyki powierzchni, wynikającej z obróbki lub jej stanu, np.: „szczotkowane aluminium” lub „skorodowana stal”. Zakres dostępnej parametryzacji wynika z zastosowanego modelu rozpraszania światła.

W przypadku metali zastosowanie znajduje model bazujący na zespolonym współczynniku załamania światła (nk). Struktura topograficzna powierzchni modelowana jest za pomocą V-rowków, jako izotropowa albo anizotropowa. Charakterystyczny wygląd powierzchni metalowych po obróbce skrawaniem osiągany jest przez rozsynchronizowanie jej kierunkowości, co nie zapewnia jednak efektu fotorealistycznego.

Najwygodniejszą formą parametryzacji optycznej powierzchni jest skorzystanie z katalogów i tzw. baz materiałów. Katalogi takie zawierają nazwy symboliczne i wyrenderowane obrazy standaryzowanego obiektu, którego powierzchnia pokryta jest ocenianym materiałem. Najczęściej obiektem takim jest układ warstwowy sfery z wyciętymi elementami, co zapewnia wielokierunkowość obserwacji.



Rys. 6.18. Scena do oceny jakości modelowania powierzchni [LuxRender]

Jednak najistotniejsze znaczenie w ocenie fotorealistyczności powierzchni, jak pokazano w rozdziale 2 na rys. 2.7, odgrywa oświetlenie globalne. Dlatego zawiera ono kilka komponentów kierunkowych. Dla najbardziej precyzyjnego odwzorowania oświetlenia stosuje się nawet mapy otoczenia (ang. *environment maps*) zapisane jako obrazy HDRI o dużej dynamice. Dzięki takiemu wzorcowi i oświetleniu prowadzi się subiektywną ocenę i wybór „materiału”. Wybrane przykłady z baz danych dwóch środowisk renderujących pokazano na rys. 6.19 i 6.20.

Istotna różnica między środowiskami renderującymi polega na obszerności i jakości udostępnianych bibliotek materiałów. Przykładowe zestawienie ilościowe w tab. 6.3 wskazuje, że najbardziej bogate biblioteki oferują kilka tysięcy pozycji, co wyraźnie podnosi efektywność modelowania.



Rys. 6.19. Prezentacja przykładowych materiałów kategorii metal w LuxRenderze (nazwy oryginalne)

HT Stainless Steel Brushed 2



HT Aluminum Brushed 2



Chrome



Rusty Iron - F



Iron



Rust



Rys. 6.20. Prezentacja przykładowych materiałów kategorii metale w MaxwellStudio (nazwy oryginalne)

Tabela 6.3. Liczba zdefiniowanych materiałów w bibliotece oprogramowania renderującego (05.2013)

Lp.	Nazwa środowiska renderującego	Liczba pozycji materiałów	Liczba metali	Dostępność
1	MaxwellRender	4079	419	komercyjny
2	Indigo	337	47	komercyjny
3	Thea render	155	15	komercyjny
4	LuxRender	61	8	darmowy
5	POV-Ray	brak	brak	darmowy
6	Yafa-Ray	brak	brak	darmowy

Jednak o jakości bibliotek materiałowych decyduje fotorealizacyjność zawartych w niej modeli (patrz rys. 6.20), która wynika również z niedoskonałości powierzchni. Charakterystyczna faktura po obróbce oraz skazy powierzchni, np: korozja, zarysowania, wgłębienia, uwiarygodniają bowiem oglądany obraz.

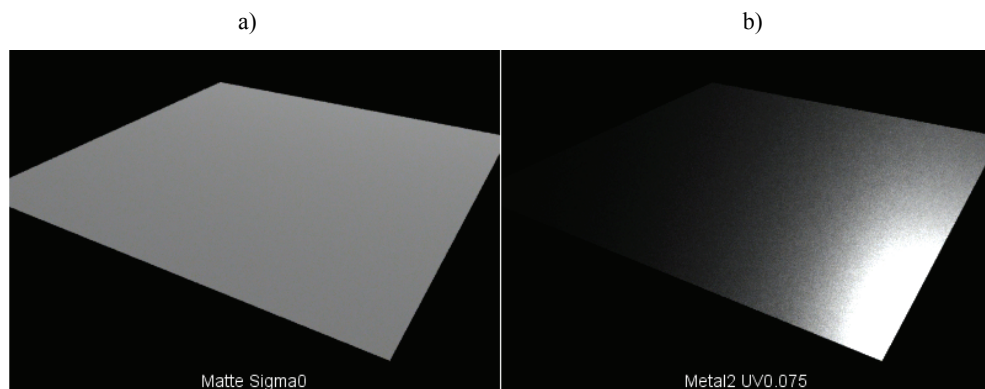
Efekt taki jest tworzony przez tekstuowanie powierzchni, czyli kształtowanie jej struktury topograficznej za pomocą map przesunięć (ang. *displacement maps*) oraz map absorpcyjności. Mapy wypukłości (ang. *bump maps*) albo (ang. *normal maps*) modyfikują z dużą rozdzielczością przestrzenną kierunki wektorów normalnej powierzchni, które są użyte podczas wyznaczania oświetlenia każdego punktu powierzchni. Mapy takie są tworzone przez grafików komputerowych, jako grafika bit-mapowa lub na podstawie obrazów rzeczywistych powierzchni.

Z punktu widzenia użytkownika, ograniczeniem jest tu brak standaryzacji w kompleksowym opisie materiałów i opisie ich stanu powierzchni. Sytuacja taka pozwala wprowadzić na konkurencyjność między środowiskami renderującymi, jednak przenoszalność modeli jest ograniczona.

6.2.1. Modelowanie struktury topograficznej powierzchni

Model do badań symulacyjnych zawiera powierzchnię o wymiarach $1,28 \text{ mm} \times 1,28 \text{ mm}$ oświetloną emitерem powierzchniowym ustawionym pod kątem 45° względem wektora normalnej powierzchni.

Pierwszy test obejmował porównanie modelu rozpraszania lambertowskiego i rozpraszania stosowanego dla metali. Model ten bazuje na wartościach pomiarowych współczynnika nk oraz parametryzacji szorstkości powierzchni za pomocą mikrorowków. Przyjęto izotropowość powierzchni metalowej, dla współczynnika szorstkości $UV = 0,075$.

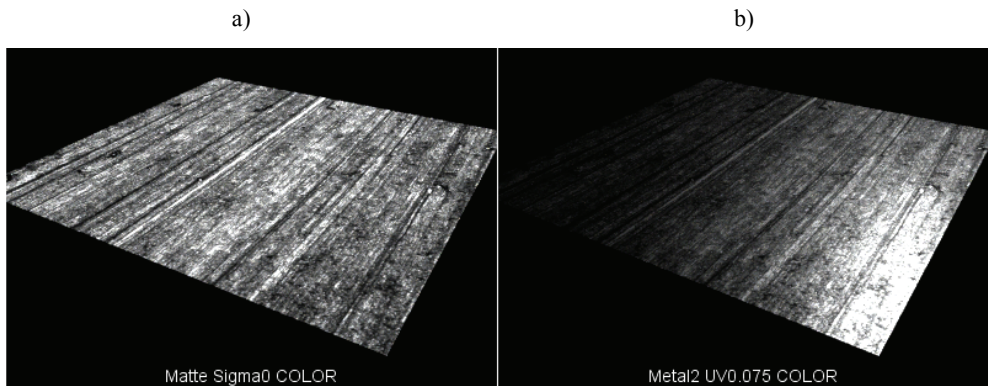


Rys. 6.21. Wyniki symulacji rozpraszania światła na powierzchni dla modelu:

a) dyfuzyjnego, b) metalu

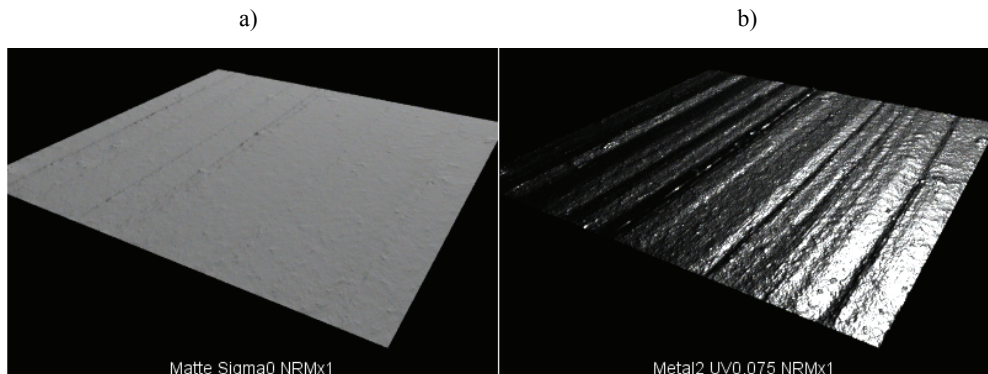
Uzyskany wynik potwierdza, że symetryczna i bezkierunkowa funkcja rozpraszania światła nie nadaje się do symulacji powierzchni metalowych, których rozpraszanie charakteryzuje kierunkowość, kształtowaną za pomocą współczynników szorstkości UV.

Na podstawie obrazu powierzchni wygenerowano mapę kolorów, która została nałożona jako tekstura na powierzchnię o charakterystyce rozpraszania lambertowskiego oraz na powierzchnię o rozpraszaniu charakterystycznym dla powierzchni metalowych.

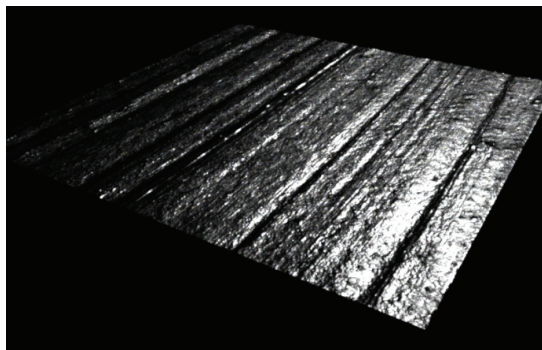


Rys. 6.22. Obrazy wyrenderowane podczas teksturowania mapą kolorów:
a) powierzchni matowej, b) powierzchni metalowej

Uzyskany efekt potwierdza, że mapa kolorów modyfikuje parametry modelu rozpraszania, nie przesłaniając go.



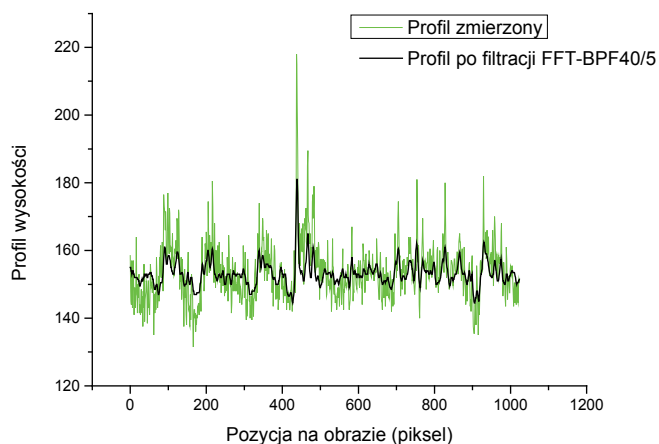
Rys. 6.23. Obrazy powierzchni po teksturowaniu normal maps:
a) dla rozpraszania dyfuzyjnego, b) dla rozpraszania (metal2)



Rys. 6.24. Obraz powierzchni uzyskany w wyniku teksturowania mapami normalnych i koloru powierzchni modelowanej jako metalowa

Jak wskazano przy omawianiu mapowania normalnych, ich ograniczeniem jest tworzenie okluzji oraz prawidłowe modelowanie krawędzi. Obraz pokazany na rys. 6.24 sprawia wrażenie pofałdowanego, ale prostoliniowa krawędź tworzy konflikt interpretacyjny.

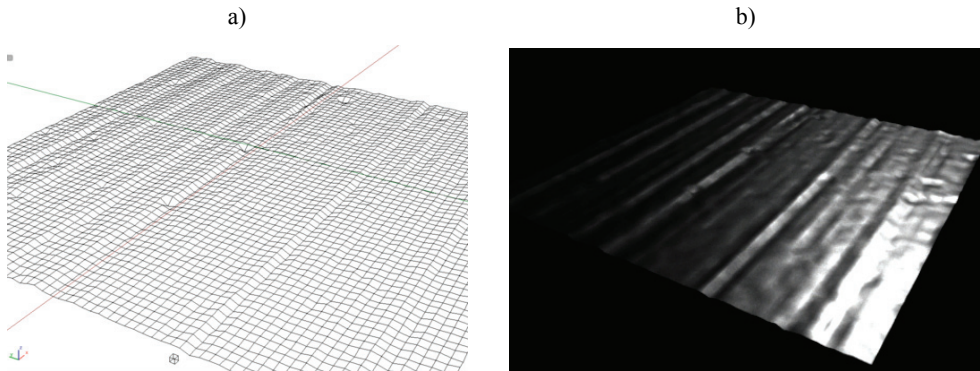
Podane ograniczenia przełamuje modyfikacja topografii siatki tworzącej powierzchnię obiektu. Do jej automatyzacji tworzone są mapy przemieszczeń. Najistotniejszy jest jednak problem wzrastającego kosztu obliczeniowego, który wynika z rosnącej rozdzielczości siatki, tj. liczby poligonów.



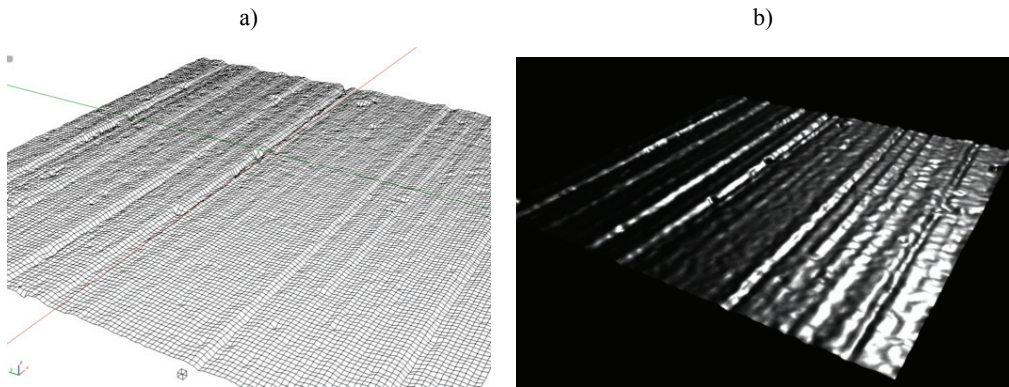
Rys. 6.25. Profile mapy wysokości, przed i po filtracji

Mapę przemieszczeń wygenerowano przez filtrację FFT obrazu wysokości, z użyciem filtra pasmowo-przepustowego o parametrach odcięcia $f_{\max} = 40$, $f_{\min} = 5$. Wynik filtracji przedstawiono jako profil w osi pionowej na środku obrazu przed i po filtracji.

Uzyskaną mapę użyto do modyfikacji siatki tworzącej powierzchnię przy podziale 32 i 128, dobierając wzmocnienie zgodne z amplitudą rzeczywistego profilu wysokości powierzchni (ok $15\text{ }\mu\text{m}$). Wynik renderowania pokazano na rys. 6.26 i 6.27.



Rys. 6.26. Mapa przemieszczeń 32×32 piksele: a) siatka, b) efekt renderowania

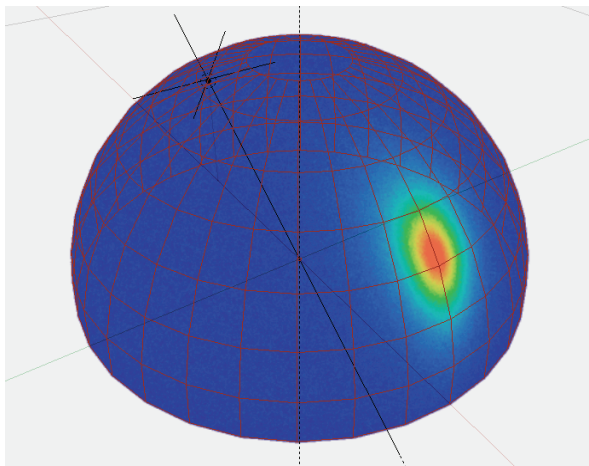


Rys. 6.27. Mapa przemieszczeń 128×128 pikseli: a) siatka, b) efekt renderowania

Obserwowany jest efekt uśredniania wprowadzany przez elementy siatki, zależny od ich wielkości. Dalsze zwiększanie rozdzielczości siatki nie poprawia efektu renderowania, gdyż mapa przemieszczeń ma zredukowaną rozdzielczość. Możliwe jest użycie tekstury o dużej rozdzielczości, ale wielkość modelu siatkowego rośnie potęgowo, co podnosi koszty obliczeniowe. W pierwszym kroku uzasadnione jest używanie map przesunięć do modelowania falistości powierzchni oraz lokalnych skaz powierzchni. Dalsze kształtowanie powinno stosować mapy normalnych oraz model rozpraszania z parametrami szorstkości powierzchni.

6.2.2. Wirtualna sfera obrazująca

W celu ilościowej oceny jakości zamodelowania rozpraszania powierzchni opracowano metodę porównania zmierzonej i renderowanej funkcji BRDF. W tym celu model detektora polarnego, opracowany w rozdziale 6.1.1, rozszerzono o źródło światła umieszczone na półokręgu wyznaczającym trajektorię ruchu, co daje możliwość zadawania kąta incydencji.



Rys. 6.28. Model sfery wraz ze wzorem rozprośzeniowym
(kąt incydencji 54°)

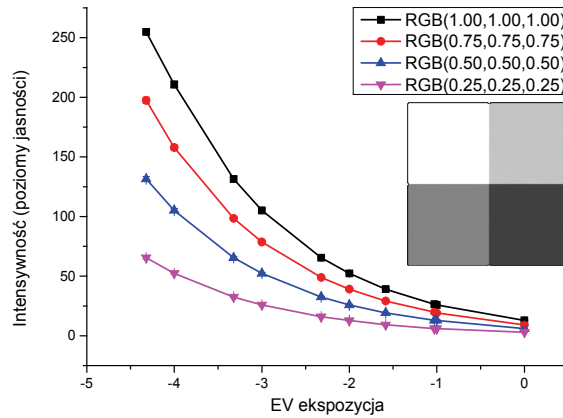
Dynamika intensywności światła odbijanego może być bardzo duża i zależy od charakterystyki optycznej powierzchni, ale również kąta padania światła. Do optymalizacji naświetlenia przetwornika (75%) stosuje się dobór parametrów ekspozycji, przez parametryzację przysłony, czasu migawki i czułości ISO. W celu porównania obrazów zarejestrowanych dla różnych parametrów ekspozycji EV konieczna jest zatem ich normalizacja. Do wyznaczenia krzywych kalibracyjnych zaproponowano analizę zmiany intensywności elementów obrazów w funkcji ekspozycji. W tym celu wyrenderowano dynamiczny (HDRI) obraz testowy powierzchni zawierającej 4 pola różniące się absorpcyjnością. Następnie zapisano obrazy, dokonując redukcji dynamiki do 8-bitów przez dobór parametrów ekspozycji, jak pokazano w tab. 6.4.

Następnie wyznaczono wartości średnie i odchylenia standardowe dla intensywności w każdym z podobszarów, co przedstawiono na wykresie rys. 6.29.

Uzyskany model zmiany intensywności w funkcji ekspozycji umożliwia normalizację obrazów rozprośzeniowych, gdy podczas ich rejestracji zastosowano różne parametry ekspozycji, a dynamika zmian znacznie wykracza poza zakres dynamiczny wynikający ze skali odcieni szarości.

Tabela 6.4. Parametry ekspozycji dla zapisywanych obrazów ($\gamma = 1$)

Lp.	<i>ISO</i> (czułość względna)	<i>t</i> [s] (czas migawki)	<i>N</i> (apertura względna)	<i>EV</i>
1	100	1	1	0
2	100	1	0,7	-1,0
4	100	3	1	-1,6
5	100	1	0,5	-2,0
8	100	5	1	-2,3
9	800	1	1	-3,0
10	100	10	1	-3,3
11	1600	1	1	-4,0
12	100	20	1	-4,3

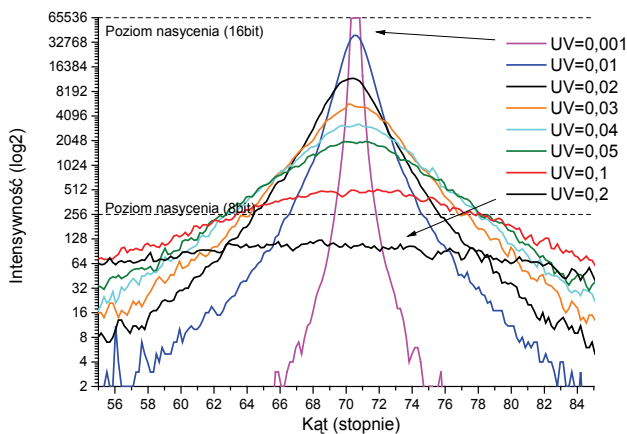


Rys. 6.29. Zmiana intensywność w funkcji ekspozycji EV

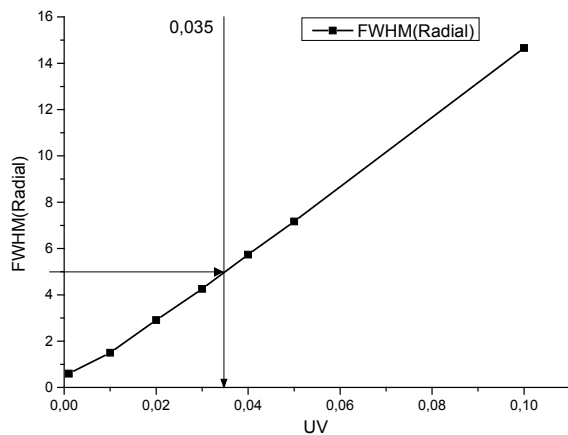
Kolejny etap badań dotyczy możliwości kształtowania charakterystyki BRDF za pomocą współczynników szorstkości UV w modelu rozpraszania oraz przez teksturowanie z użyciem map normalnych i map przemieszczeń. Wyniki zmiany wzoru rozproszeniowego w funkcji symetrycznego współczynnika UV przedstawiono w postaci wykresu profili na rys. 6.30.

Wyniki symulacji zapisano w trybie 16-bitowym, dzięki czemu nie była konieczna ich normalizacja. Zgodnie z oczekiwaniem wzory rozproszeniowe są symetryczne, zależność między ich szerokością połówkową a wartością UV jest liniowa (rys. 6.31).

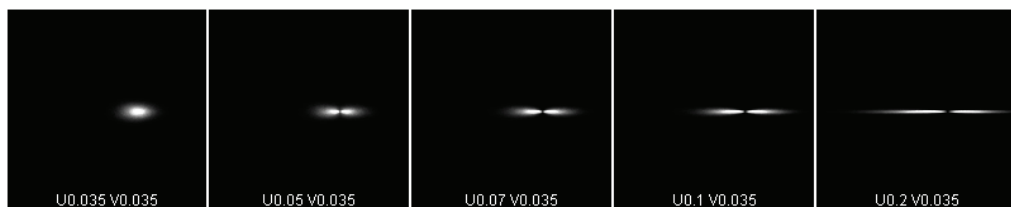
Uzyskany diagram umożliwia łatwe wyznaczenie parametrów UV modelu na podstawie oczekiwanej szerokości rozproszeniowej FWHM. Następnie przeprowadzono badanie możliwości kształtowania charakterystyki rozproszeniowej przez rozsynchronizowanie parametrów UV. Wyniki wybranych symulacji przedstawiono na rys. 6.32 i 6.33.



Rys. 6.30. Intensywność w przekroju radialnym przez wzór rozproszeniowy dla różnych wartości UV



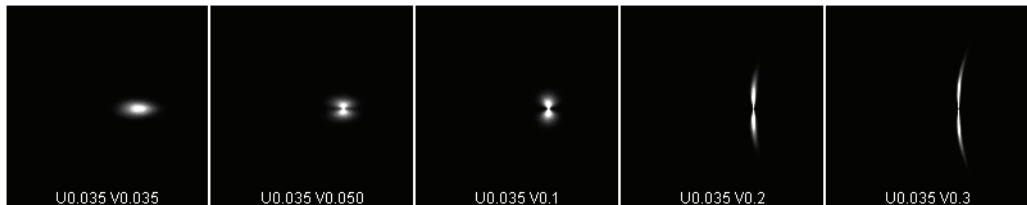
Rys. 6.31. Zależność szerokości charakterystyki rozpraszania w funkcji szorstkości UV dla powierzchni izotropowych



Rys. 6.32. Wynik modelowania anizotropii powierzchni U – const, V – zmienne

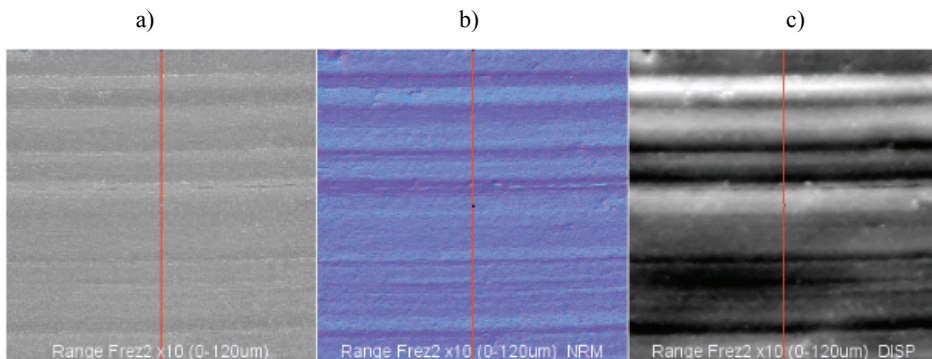
Rozsymetryzowanie parametrów UV umożliwia modelowanie anizotropowości powierzchni. W konfiguracji zamodelowanej komponent U modeluje V-rowki ułożo-

ne prostopadle do płaszczyzny oświetlania, dlatego wzór rozproszeniowy jest zgodny z płaszczyzną oświetlania (rys. 6.32). Komponent V, ułożony prostopadle, zawęża i rozszerza charakterystykę prostopadle do płaszczyzny oświetlania. Dodatkowo zauważamy, że przy azymutalnym rozciąganiu wzoru rozproszeniowego następuje opuszczanie skrajnych jego ramion (większy kąt inklinacji). Uzyskane wzory rozproszeniowe są bardzo skupione, aby je upodobnić do charakterystyk zmierzonych, konieczne jest ich intensywniejsze rozproszenie.



Rys. 6.33. Wynik modelowania anizotropii powierzchni U – zmienne, V – const

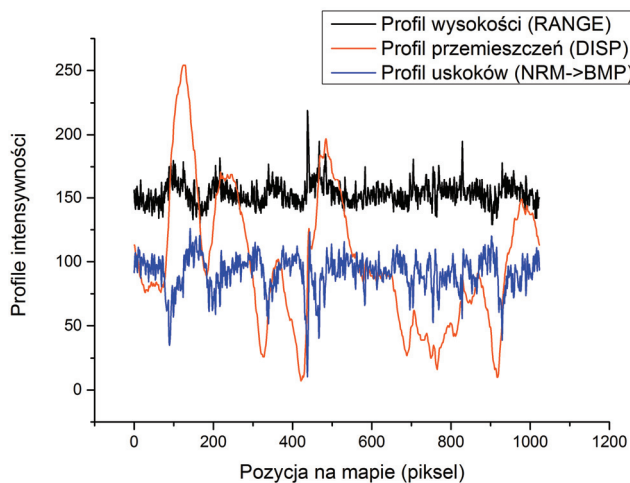
Zbadano możliwość kształtowania charakterystyki BRDF przez teksturowanie powierzchni za pomocą map normalnych. W tym celu wygenerowano zestaw map na podstawie pomiarów topograficznych powierzchni (rozdz. 5.2). Mapa taka cechuje się jednak znaczną ilością zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, co wymaga filtracji artefaktów. Na jej podstawie wygenerowano mapę normalnych i mapę przemieszczeń.



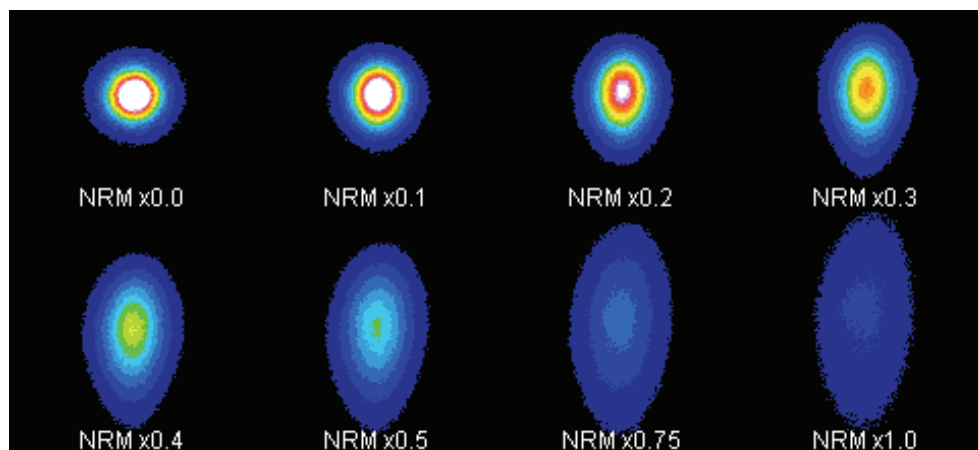
Rys. 6.34. Mapy: a) wysokości b) normalnych i c) przemieszczeń

Mapa normalnych jest kodowana jako składowe kolorów RGB, gdy konwertowana zostaje na obraz monochromatyczny, odpowiada mapie skoków (ang. *bump map*).

Jak wynika z analizy, profil uskoków jest wzmocnieniem i odwróceniem fazy profilu wysokości. Profil mapy przemieszczeń zawiera składowe niskoczęstotliwościowe.



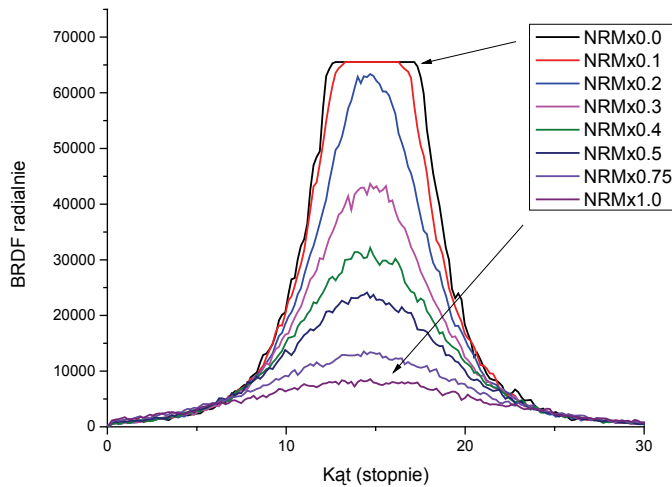
Rys. 6.35. Profile wysokości i intensywności mapy uskoków i normalnych



Rys. 6.36. Wpływ amplitudy mapy teksturowania na kształtowanie BRDF

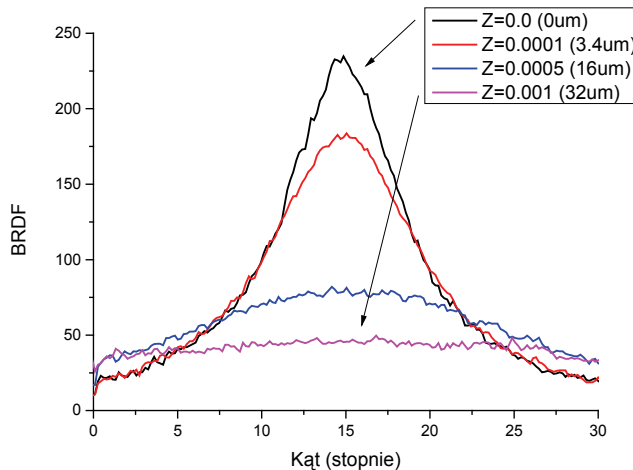
Wyniki analizy ilościowej kształtu i intensywności przedstawiono w postaci profili radialnych na rys. 6.37.

Zmiana kierunku mapy normalnych ma podobne oddziaływanie na kierunkowość rozpraszania jak kierunek UV. Uzyskane wyniki wskazują, że za pomocą map wysokości można znacznie bardziej wpływać na szerokość rozpraszania, niż za pomocą współczynników UV.



Rys. 6.37. BRDF w przekroju radialnym w funkcji wzmocnienia mapy normalnych

Modelowanie charakterystyki rozpraszania jest również możliwe przez modyfikację struktury geometrycznej powierzchni za pomocą map przemieszczeń, co pokazano rys. 6.27. Wyniki badania wpływu wysokości mapy, w postaci wykresów profili radialnych, pokazano na rys. 6.38.



Rys. 6.38. BRDF w przekroju radialnym w funkcji wzmocnienia mapy przemieszczeń

Kształtowanie rozpraszania za pomocą mapy przesunięć ma najsilniejsze oddziaływanie na charakterystykę rozproszeniową. Oznacza to, że analogicznie do modelowania lokalnych nieciągłości powierzchni, w pierwszej kolejności funkcja BRDF po-

winna być kształtowana za pomocą map przemieszczeń, następnie map normalnych, a ostatecznie za pomocą współczynników szorstkości powierzchni.

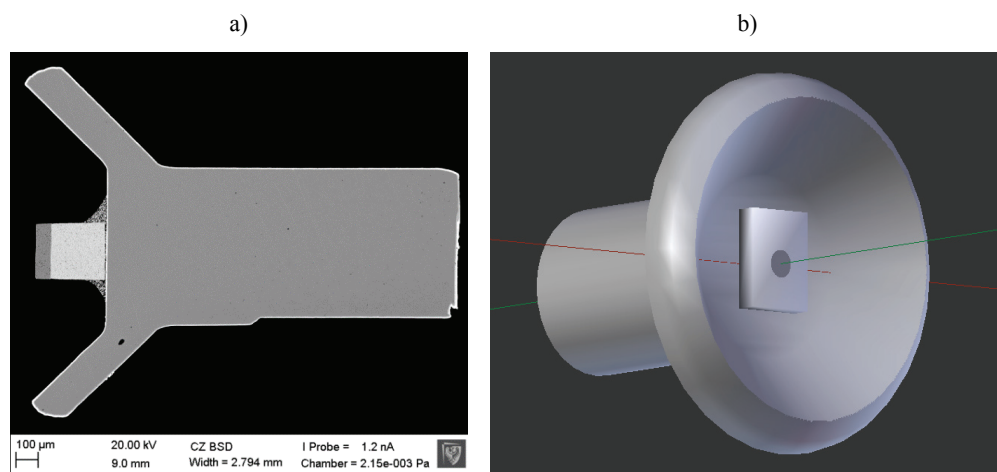
Istotne jest, aby mapy do teksturowania przenosiły również odpowiednie pasmo składowych niskoczęstotliwościowych. Składowe te zostają usunięte, gdy obraz mikroskopowy obejmuje zbyt mały obszar. Wtedy struktura topograficzna powierzchni, np. charakterystyczna topografia bruzd po narzędziu obróbkowym, nie zostaje odtworzona. Oznacza to, że przy doborze wielkości mapy należy kierować się zaleceniami dotyczącymi długości odcinka pomiarowego do wyznaczania chropowatości, co omówiono w rozdziale 5.2.1.

6.3. Modelowanie geometryczno-optyczne skupionych źródeł światła

Skupione źródła światła, jak np. diody LED, stanowią prymitywy konstrukcyjne złożonych układów oświetlających, stąd umiejętność ich modelowania i weryfikacji wyników symulacyjnych jest prerokwizytem modelowania systemów wizyjnych.

Modelowanie skupionych źródeł światła może być realizowane jako:

- model geometryczno-optyczny, tzw. *white-box*,
- model bazujący na charakterystyce światłości tzw. *black-box*.



Rys. 6.39. Dioda LED: a) obraz SEM przekroju, b) model geometryczny

Modelowanie geometryczno-optyczne źródeł światła polega na zdefiniowaniu jego poszczególnych komponentów, dzięki czemu odwzorowany zostaje układ optyczny kształtujący rozsył promieniowania. Najważniejsze to złącze półprzewodnikowe

(emiter) osadzone w zagłębieniu, którego ścianki tworzą reflektor kształtujący emitowaną wiązkę światła. Konstrukcja układu zależy od parametrów i często jest przedmiotem zastrzeżeń patentowych. Najistotniejszą zaletą takiego podejścia do modelowania jest możliwość badania wrażliwości, czyli wpływu poszczególnych elementów na charakterystykę rozsyłu oraz optymalizacja.

Podstawą modelowania geometryczno-strukturalnego jest posiadanie danych geometrycznych i optycznych, których dokładność wpływa na wynik modelowania [157, 189]. Na podstawie rys. 5.18 (z rozdz. 5) i 6.39a zmierzono wybrane wymiary geometryczne elementów diody LED, co zamieszczono w tab. 6.5.

Tabela 6.5. Wymiary geometryczne konstrukcji diody LED

Cecha	Wartość	Odchylenie standardowe
Wysokość emitera	70,74 μm	1,99
Długość emitera	295,93 μm	2,04
Szerokość emitera	328,30 μm	2,87
Średnica wewnętrzna reflektora duża	1165,34 μm	1,99
Kąt ścianki reflektora względem podstawy	132,29	1,18

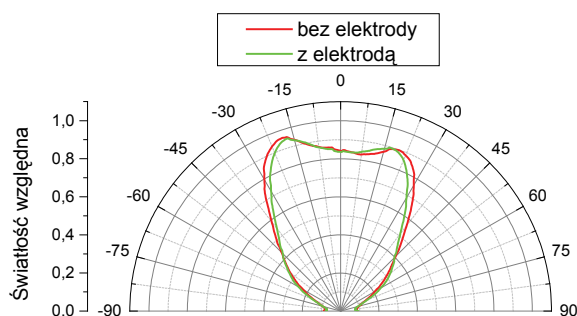
Dla wykonania pomiarów skorzystano z danych kalibracyjnych załączonych na zdjęciach, stąd, określenie całkowitej niepewności pomiarowej nie było możliwe.

Dla parametryzacji optycznej komponentów, charakterystykę światłości emitera przybliża się przez rozkład lambertowski [189]. Jednak diody o zwiększonej sprawności i mocy mogą bazować na bardziej zaawansowanych konstrukcjach, np. krawędziowych, gdzie między dwiema strukturami półprzewodnikowymi tworzony jest optyczny światłowod kierujący promieniowanie na zewnątrz w różne strony, stąd ich charakterystyka rozsyłu promieniowania jest silnie asymetryczna [175]. Wpływ na wartość strumienia świetlnego ma również usytuowanie elektrod zasilających złącze p - n [20]. W kontekście analizy optyczno-geometrycznej diod LED, Lockman porusza problem całkowitego wewnętrznego odbicia TIR (ang. *Total Internal Reflection*) i reabsorpcji promieniowania. Trudność w wyemitowaniu promieniowania wynika z małego kąta granicznego pierwiastków grup III–V (GaAs – powietrze $\theta_c = 16^\circ$) stanowiących podstawowy materiał półprzewodnikowy. Dla przeciwdziałania temu, próbuje się kształtować geometrię półprzewodnika jako kopułkową, co jest jednak kosztowne technologicznie. Druga metoda polega na hermetyzacji złącza półprzewodnikowego za pomocą transparentnych materiałów epoksydowych. Materiały te mają mniejszy współczynnik załamania ($n_i = 1,515$ – $1,565$) [23] niż wskazane półprzewodniki, stąd kąt graniczny jest większy ($\theta_c = 24,9^\circ$ – $25,8^\circ$).

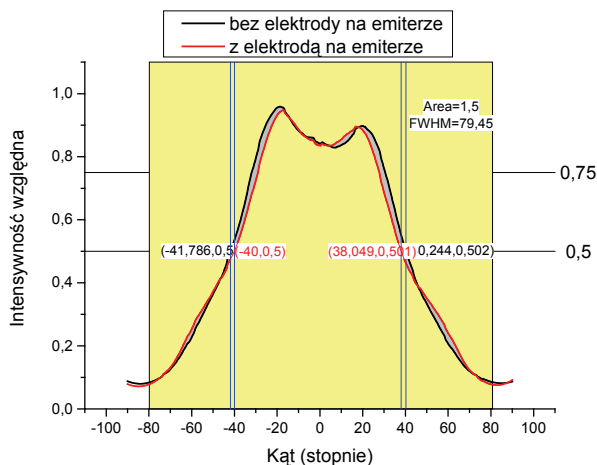
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (6.4)$$

Analizując budowę wewnętrzną diod LED, należy ponadto uwzględnić specyficzną konstrukcję diod białych. Istnieją trzy główne sposoby uzyskiwania światła polichromatycznego jako superpozycji: kolorów podstawowych trzech emiterów RGB; albo promieniowania podstawowego fioletowego i reemisji trzech warstw fosforu RGB; albo promieniowania podstawowego niebieskiego i reemisji barwy żółtej od warstwy fosforu [32, 293]. Problemem w zapewnieniu jednorodności charakterystyki kolorymetrycznej okazuje się utrzymanie jednakowej grubości warstwy fosforu [288]. Podnoszony też jest problem dużej wrażliwości chromatycznej układów wieloemiterowych, np. dla uzyskiwania światła białego [340].

W związku z tym przyjęto, że powierzchnie emitery mają charakterystykę rozsyłu lambertowską, a reflektor cechuje komponent odbiciowy. W pierwszym etapie uproszczono układ, pozbawiając go obudowy diody, czyli soczewki kształtującej ostatecznie strumień świetlny.



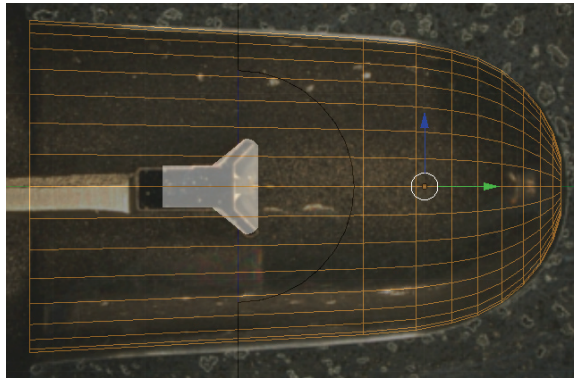
Rys. 6.40. Światłość w układzie biegunowym, emiter z elektrodą i bez elektrody



Rys. 6.41. Wykres profili intensywności z elektrodą i bez elektrody

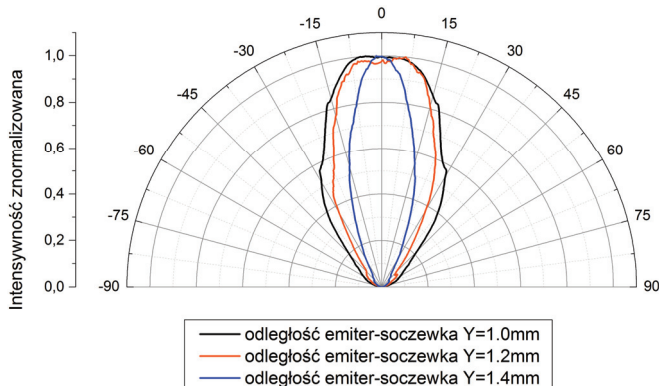
Efekt działania zamodelowanej diody zarejestrowano za pomocą opracowanej wirtualnej sfery obrazującej. W kolejnej symulacji rozszerzono model o kontakt elektryczny zasilający złącze (anoda). Jego wpływ zobrazowano na wykresie (rys. 6.40).

Rozszerzono następnie model o obudowę pełniącą rolę soczewki kształtującej rozsył światła. W modelowaniu posłużono się zdjęciami przekroju poprzecznego i wzdłużnego diody, które posłużyły jako szablony do rysowania siatki. Obiektowi nadano parametry materiałowe, jako PMMA poli(metakrylan metylu) o współczynniku załamania $n = 1,4914$ przy długości fali $\lambda = 0,5876 \mu\text{m}$.



Rys. 6.42. Model geometryczno-optyczny diody LED z soczewką

Do renderowania wybrano algorytm SPPM (*stochastic progressive photon mapping*) [55, 144]. Algorytm ten daje znacznie lepsze efekty, gdy źródło światła jest całkowicie otoczone przez materiał transparentny. W zamodelowanym przykładzie, charakterystyka światłości diody jest teraz kształtowana przez parametry geometryczne i optyczne soczewki na szczycie diody oraz odległość emitera od soczewki.



Rys. 6.43. Charakterystyki światłości diody dla różnych odległości emitera od soczewki

Jak wskazano na wstępie, najważniejszą zaletą modelu geometryczno-optycznego jest możliwość wygenerowania różnych przykładów światłości, parametrów kolorymetrycznych oraz zakłóceń [157]. Aby uzyskane wyniki były powiązane z rzeczywistymi urządzeniami optoelektronicznymi, niezbędna jest jednak szczegółowa wiedza o zmienności technologicznej procesu produkcyjnego, to jest tolerancji wykonania struktur oraz tolerancji montażu, które jednak nie są przedmiotem publikacji. Jak przybliżono wcześniej, rzeczywiste układy źródeł światła są dużo bardziej złożone. Przykładowo, diody białe, w których użyto warstwy fosforu, wymagają możliwości zamodelowania rozpraszania objętościowego o rozkładzie gradientowym.

Uzyskane wyniki modelowania potwierdzają duże możliwości kształtowania strumienia świetlnego z użyciem modelu geometryczno-optycznego. Podejście takie ma zalety w badaniu wrażliwości układów, czyli ocenie wpływu zmienności parametrów wyrobów. Jednak, dostępność do parametrów poszczególnych składowych stanowi pewne trudności. Jak pokazano, parametry geometryczne są łatwe do pozyskania, a na podstawie serii pomiarów można otrzymać dane o ich zmienności. Znacznie trudniejsze jest uzyskanie parametrów optycznych emitera i powierzchni reflektora. W przypadku układów bardziej zaawansowanych (diody krawędziowe, warstwy fosforyzujące, ich zamodelowanie wymaga znacznie bardziej rozbudowanych możliwości modelowania i algorytmów obliczeniowych.

6.4. Modelowanie geometryczno-optyczne oświetlaczy

Oświetlacz bezpośredni

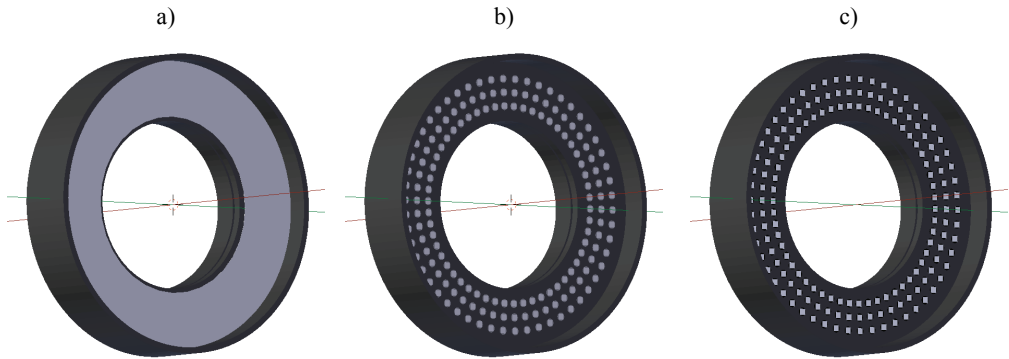
Modelowanie układów oświetleniowych polega na doborze i rozmieszczeniu pojedynczych źródeł światła oraz kształtowaniu charakterystyki światłości za pomocą układów optycznych. Do kształtowania charakterystyki używane są elementy transmisyjne (dyfuzory), refleksyjne (zwierciadła) oraz refrakcyjne (soczewki) [73].

Celem badań było określenie wpływu metod modelowania geometrii i charakterystyki światłości poszczególnych elementów na efekt działania całego złożonego oświetlacza dla systemów wizyjnych. Oświetlacz pierścieniowy zamodelowano geometrycznie, zgodnie z rzeczywistym oświetlaczem omówionym w rozdziale 5.1.3.

Modelowanie złożonych układów oświetleniowych może być realizowane na trzech poziomach szczegółowości:

- poziom I, powierzchni emitującej – poszczególne źródła światła są zagregowane, tworząc powierzchnię zastępczą, której przypisywana jest charakterystyka światłości,
- poziom II, poprawny geometrycznie – każdy z prymitywów oświetleniowych modelowany jest geometrycznie 2D poprawnie, jego elementom przypisywana jest charakterystyka światłości, tak jak pojedynczego emitera,

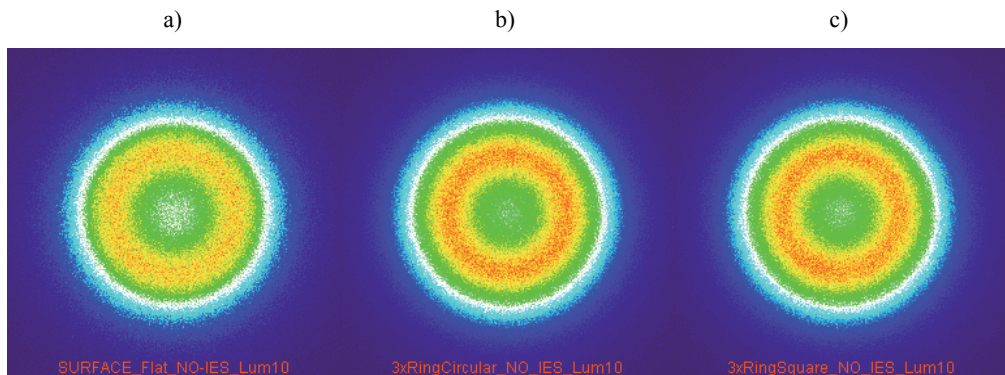
- poziom III, uproszczony – geometria prymitywu jest zredukowana do elementu siatki, a światłość opisywana jest przez charakterystykę pojedynczego emitera.



Rys. 6.44. Modele oświetlaczy pierścieniowych, z różną geometrią emitera:

a) poziom I, b) poziom II, c) poziom III

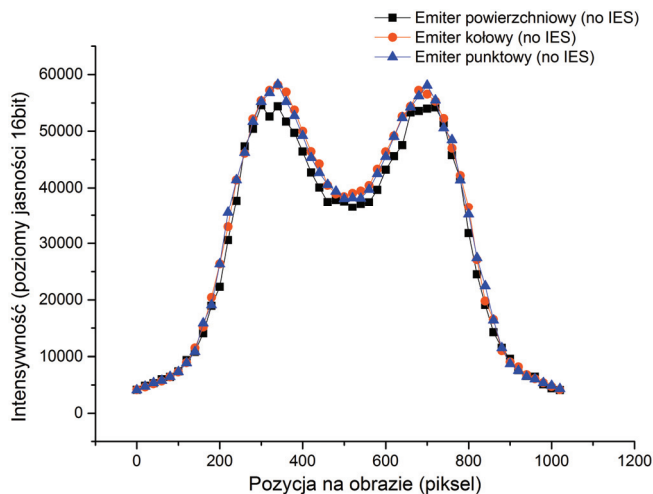
Do badań użyto źródeł światła o dwóch różnych charakterystykach światłości: 120° (NO-IES) oraz 60°. Ocenę efektu świetlnego prowadzono za pomocą analizy map natężenia napromieniowania w polu bliskim. Powierzchnię transmisyjną, lambertowską, oddalono 10 mm od powierzchni emitującej.



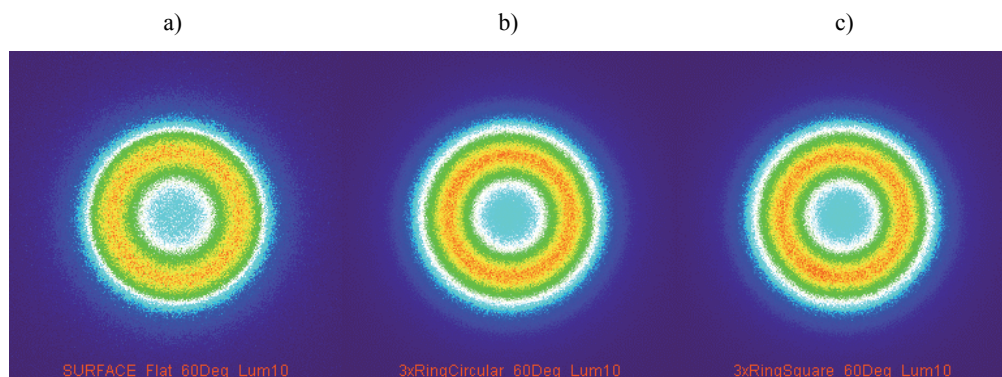
Rys. 6.45. Luminacja na powierzchniach oddalonych od oświetlacza IES 120 deg o 10 mm:

a) model poziom I, b) model poziom II i c) model poziom III

Do analizy ilościowej otrzymanych symulacji wyznaczono profile intensywności przechodzące przez środek każdego z obrazów, wyniki przedstawiono na wykresie rys. 6.46.



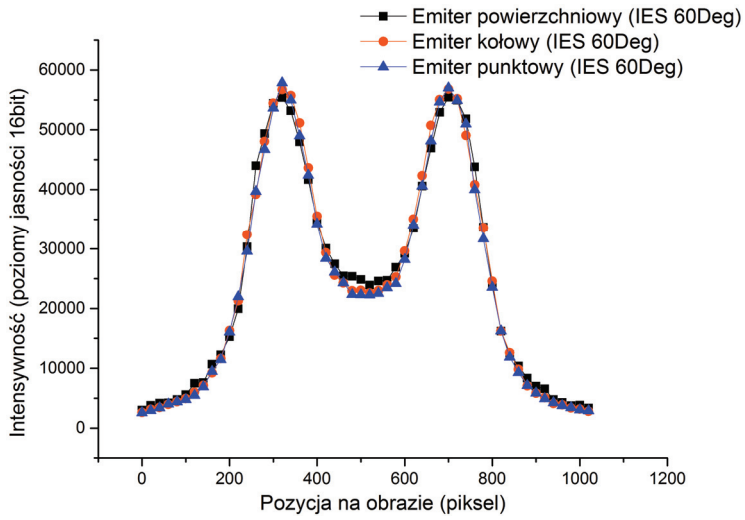
Rys. 6.46. Profile intensywności na powierzchni, przy oświetleniu szerokokątnym (120°)



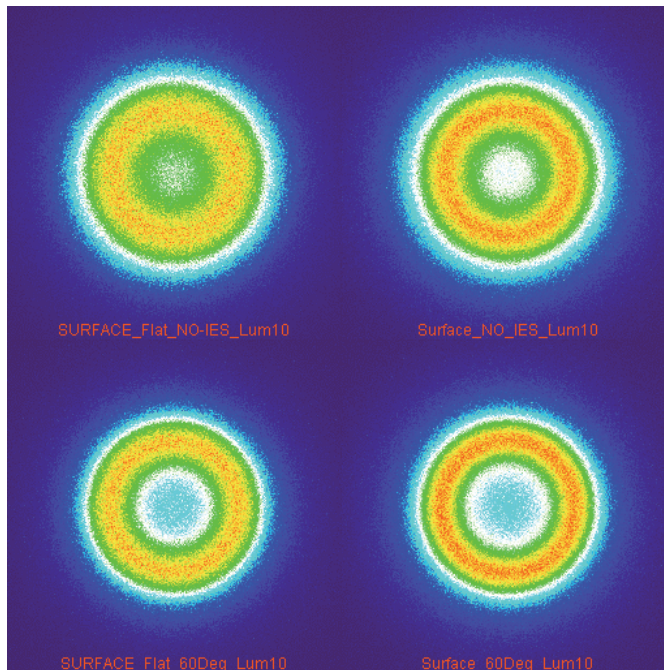
Rys. 6.47. Luminacja na powierzchniach oddalonych od oświetlacza IES 60 deg o 10 mm:
a) model poziom I, b) poziom II, c) poziom III)

Wyniki symulacji potwierdzają, że kształt pojedynczego emitery nie wpływa na charakterystykę oświetlacza. Jednak zastąpienie pojedynczych emitery przez powierzchnię zastępczą wymaga również wyznaczenia jej światłości zastępczej. Bez tej korekcji pojawiła się niezgodność ok. 3,5%.

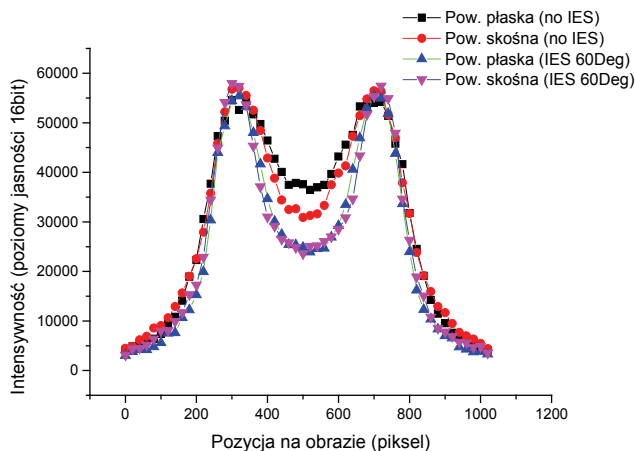
Kształtowanie charakterystyki oświetlacza prowadzono również przez zmianę kierunku osi optycznej emitery. Wprowadzono jej skośność, wysuwając na zewnątrz krawędź otworu wewnętrznego pierścienia emitery o 1 mm. Wyniki symulacji, dla dwóch różnych charakterystyk światłości emitery zaprezentowano na rys. 6.49.



Rys. 6.48. Profile intensywności na powierzchni przy oświetleniu wąskokątnym (60°)



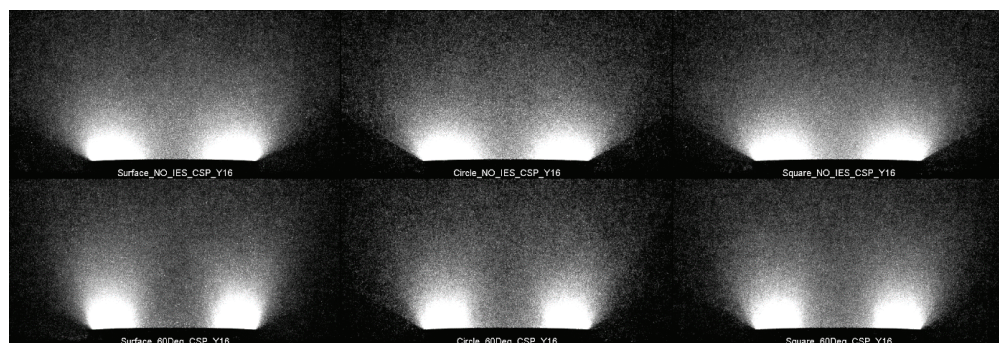
Rys. 6.49. Obrazy luminacji (w fałszywych kolorach) przy zmianie skośności powierzchni emitującej



Rys. 6.50. Profile intensywności przy zmianie skośności powierzchni emitującej

Analiza profili luminacji (rys. 6.50) potwierdza, że z użyciem emiterów o szerokiej charakterystyce światłości, wpływ nachylenia powierzchni emitującej jest większy niż w przypadku emiterów wąskokątnych.

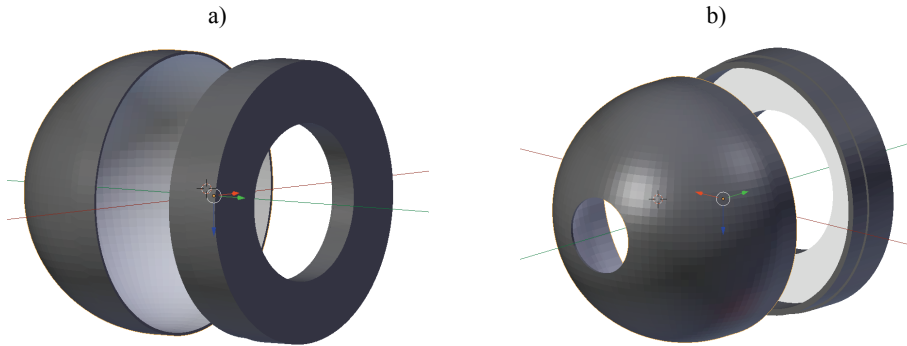
Aby jakościowo zobrazować charakterystyki rozsyłu światła przez źródła rozciągle, może być użyta również płaszczyzna przechodząca przez oś symetrii oświetlacza. Obraz taki przedstawia wprawdzie powierzchnię oświetlaną przez połowę oświetlacza, nie jest to jednak natężenie światła w przekroju, takie jak rejestruje detektor objętościowy (rozdz. 5, rys. 5.13). Wpływ składowej poza płaszczyznę przekroju może być minimalizowany przez wprowadzenie przesłony, jednak składowa przy ekranie, ze względu na duży kąt padania promieni, wywoła bardzo małe napromieniowanie, wobec czego obraz będzie bardzo zaszumiony.



Rys. 6.51. Luminacja na płaszczyznach przekroju poprzecznego (model poziom I, II, III oraz 120 deg(NO-IES), 60 deg)

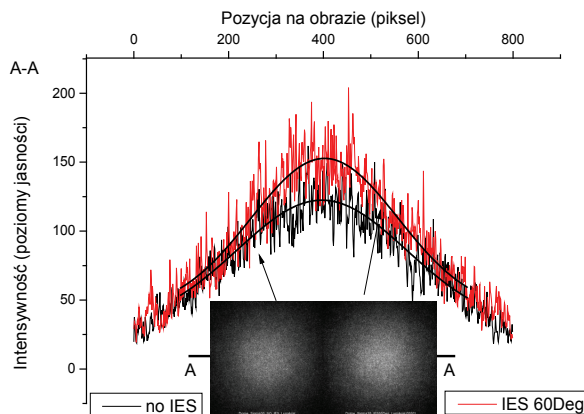
Oświetlacz pośredni

Przykładem oświetlacza pośredniego jest oświetlacz kopułkowy, którego cechą charakterystyczną jest wielokierunkowość rozsyłu światła w polu bliskim. Taka charakterystyka rozsyłu światłości uzyskiwana jest przez rozpraszanie światła kierowanego na powierzchnię wewnętrzną sfery.



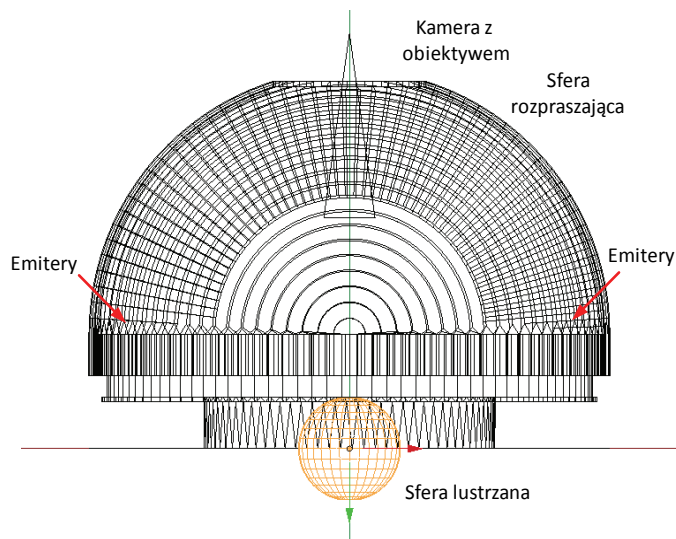
Rys. 6.52. Model geometryczny oświetlacza kopułkowego (rozsunięte elementy):
a) powierzchnia rozpraszająca, b) powierzchnia emiterów

W pierwszym etapie oceny parametrów optycznych takiego oświetlacza zobrazowano luminację powierzchni transparentnej w wyniku oświetlenia z odległości 70 mm. Obrazy wraz z wynikami analizy ilościowej za pomocą profilu intensywności pokazano na rys. 6.53. Uzyskane krzywe pokazują wprawdzie zmianę intensywności w centralnej części, nie umożliwiając jednak oceny lub porównania kierunkowości oświetlacza.



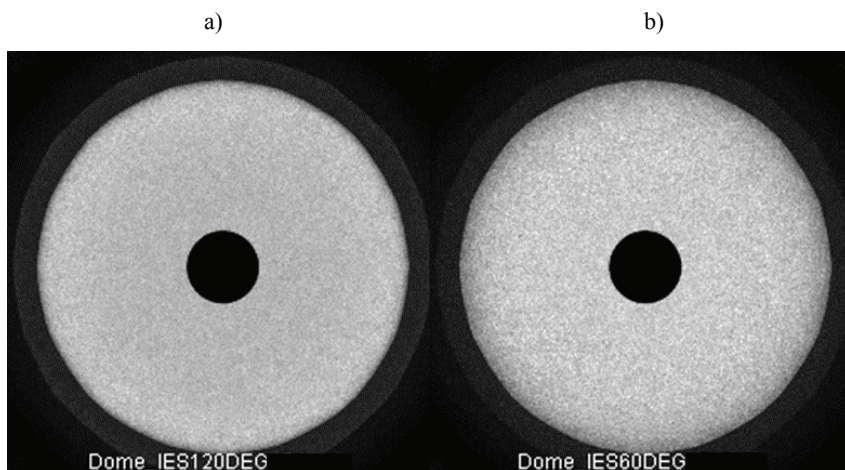
Rys. 6.53. Porównanie profili natężenia napromieniowania w polu bliskim, przez oświetlacz kopułkowy dla różnych emiterów

W celu lepszego porównania charakterystyki rozsyłu w polu bliskim, opracowano metodę rejestracji obrazu na sferze o lustrzanej charakterystyce powierzchni.



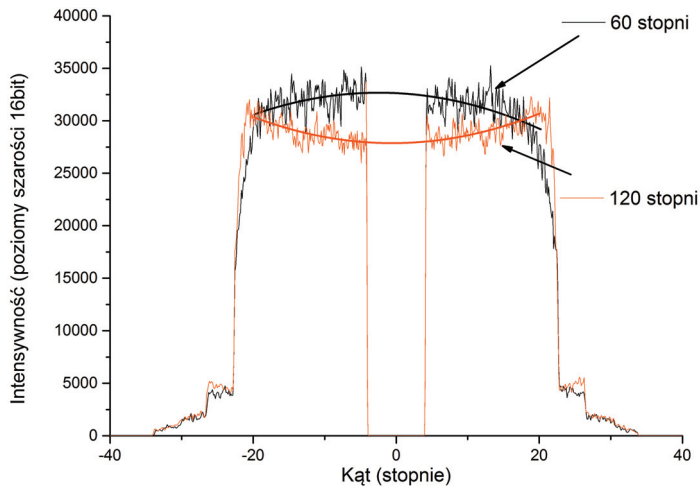
Rys. 6.54. Schemat układu do badania oświetlaczy kopułkowych

Do badania symulacyjnego przygotowano dwa modele oświetlaczy kopułkowych, różniące się szerokością charakterystyki emiterów (60° i 120°). Wyniki obrazowania pokazano na rys. 6.55.



Rys. 6.55. Rozkłady radiancji na sferach.
Oświetlacz kopułkowy, różne kąty rozsyłu emiterów: a) 120° , b) 60°

Czarne koło na środku obrazu jest wynikiem otworu w sferze, przez który prowadzone jest obrazowanie. Wyznaczono krzywe transformacji ze współrzędnych w układzie obrazu na współrzędne w układzie sferycznym kulki. Następnie wyznaczono profile luminacji, przechodzące poziomo przez środek obrazów (rys. 6.56). Dla ich filtracji zastosowano okno uśredniające o wysokości 8 pikseli, przy wymiarach obrazu 500×500 pikseli.

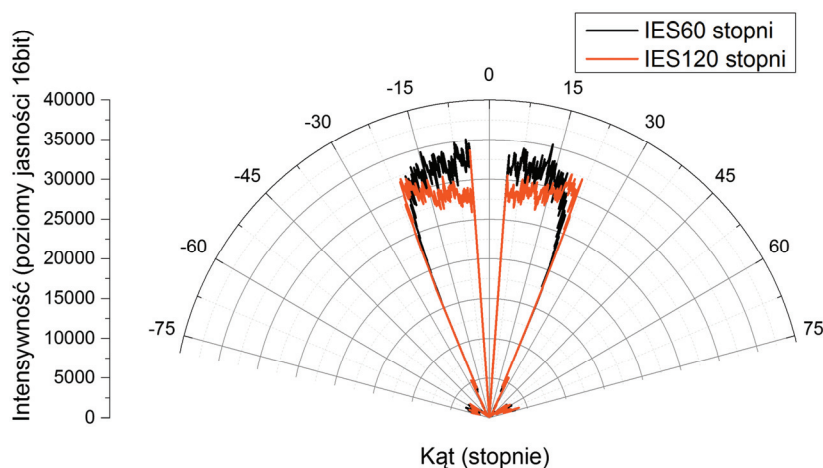


Rys. 6.56. Światłość oświetlacza kopułkowego w osi symetrii dla emitatorów o szerokości świecenia 60° i 120°

Otrzymany wykres rozsyłu światła w osi układu wyraźnie wskazuje na różnice między badanymi oświetlaczami w kontekście kierunkowości rozsyłu. W przypadku emitatorów wąskokątnych (60°), większe natężenie światła jest kierowane zgodnie z osią symetrii układu, obrzeża zaś są znacznie słabiej doświetlane. W przypadku emitatorów szerokokątnych, charakterystyka rozsyłu kąтового jest niższa na środku, co dowodzi, że cała powierzchnia dyfuzora nie jest równomiernie oświetlona.

Otrzymane wyniki symulacji pokazują dużą elastyczność kształtowania charakterystyki rozsyłu światła przez złożone układy oświetlające stosowane w systemach wizyjnych. Jednak trudność stanowi ich opis ilościowy. Najprostszy sposób polega na obrazowaniu natężenia na płaszczyznach prostopadłych do osi symetrii oddalonych od oświetlacza. Na podstawie progowania możliwe jest wyznaczenie izolinii, a następnie wykreślenie bryły fotometrycznej. Rozwiązanie takie wymaga jednak kilku pomiarów. Znacznie szybszą metodą jest analiza natężenia na płaszczyźnie przechodzącej przez oś symetrii oświetlacza. Jednak zawiera ona złożenie światłości z części nieprzesłoniętej oświetlacza. Wprowadzenie szczeliny dla odseparowania niepożądanych kierunków degraduje stosunek sy-

gnał–szum, bo zawężeniu ulega kąt/powierzchnia, z której rejestrowana jest energia. Dla złożonych oświetlaczy możliwe jest zastosowanie metody obrazowania pośredniego, np., przez powierzchnie sfery. W ten sposób osiągnięto pomiar kierunkowości rozsyłu światła.

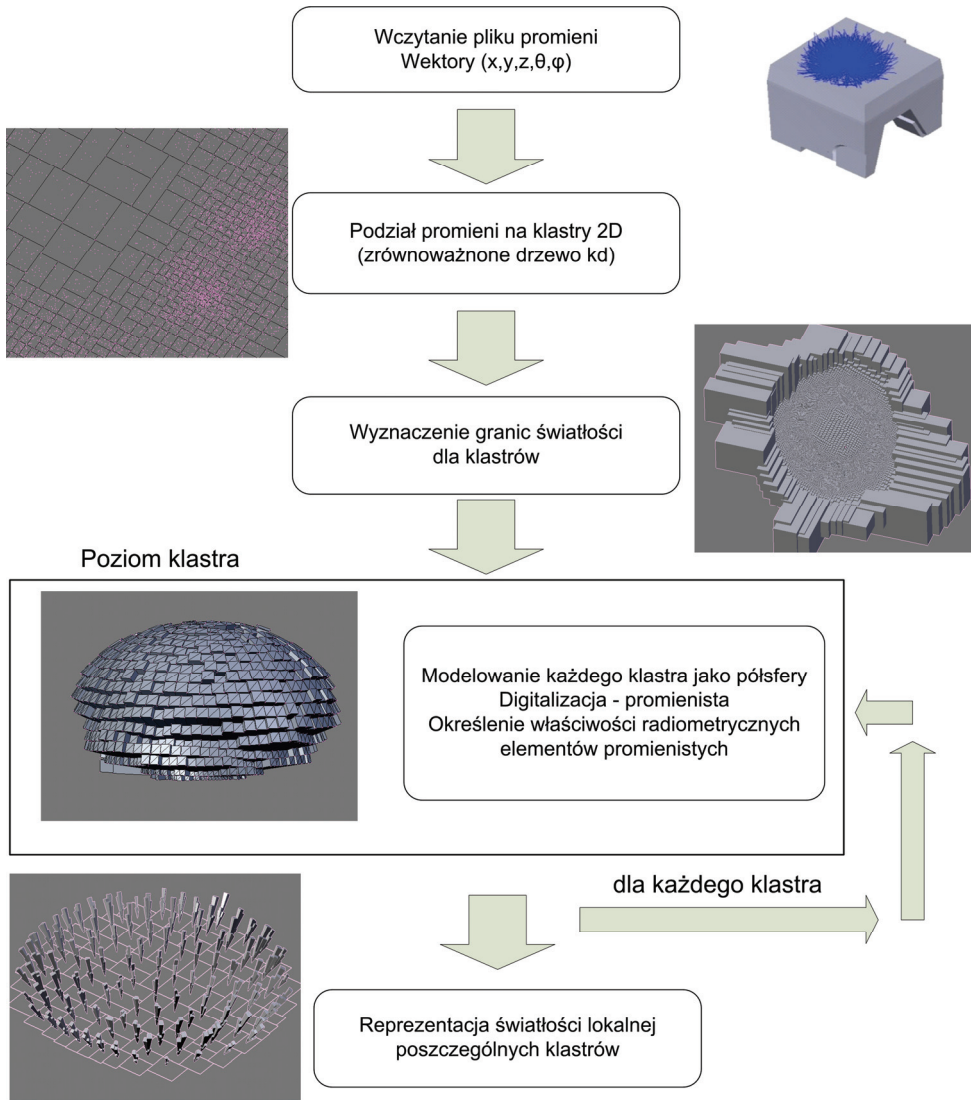


Rys. 6.57. Światłość w układzie polarnym oświetlacza kopułkowego w osi symetrii dla emiterów o szerokości świecenia 60° i 120°

6.5. Modelowanie źródeł światła na bazie danych pomiarowych pola bliskiego

Oprogramowanie do renderowania, w przeciwieństwie do symulacji optycznych, nie wspiera modelowania źródeł światła bazujących na danych pomiarowych w postaci plików RayFiles. Wyniki pomiarów światłości zapisywane są w różnych formatach. Najbardziej obszerny i szczegółowy jest tzw. plik promieni (ang. *RayFiles*), umożliwiający zapisanie bezpośrednich wyników pomiaru. Jest kilka standardów definiujących ten format. Generalnie, w pierwszej części znajduje się nagłówek, a za nim poszczególne wektory promieni, zapisane przez podanie współrzędnych początku i końca oraz wartości światłości lub natężenie promieniowania. Pliki promieni są czytane bezpośrednio przez algorytmy renderujące, jednak uzyskanie dużej rozdzielczości pomiarowej (próbkiowania), wymaga podania nawet kilku, kilkunastu milionów promieni.

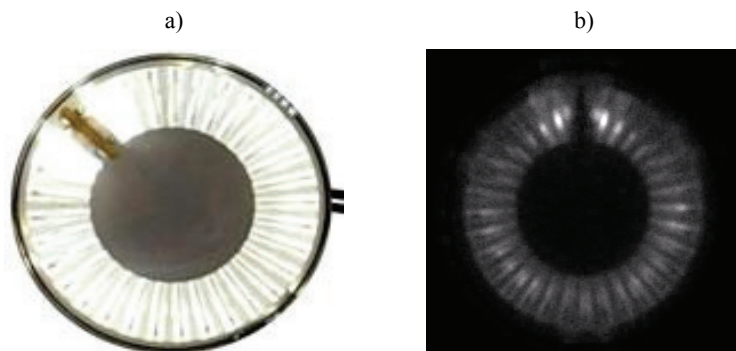
Dla podanego rozwiązania opracowano algorytm modelujący rozciągłe źródło światła na bazie pliku promieni [63]. Algorytm konwersji pomiarów z pliku promieni do reprezentacji mikroświatłości przedstawiono na rys. 6.58.



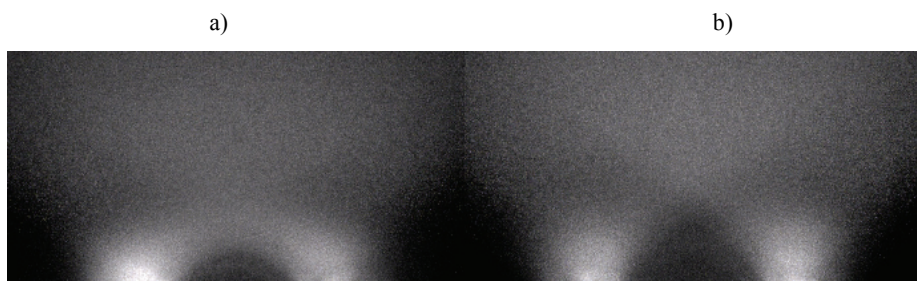
Rys. 6.58. Algorytm konwersji pomiarów do reprezentacji lokalnych światłości (na podstawie [63])

Dla weryfikacji działania opracowanego źródła światła wykonano pomiary (rozdz. 5.1.2) rzeczywistego oświetlacza [241] i wygenerowano plik RayFile, 10 mln promieni. Oświetlacz zawiera 2 diody LED zasilające światłowód, w którym wykonane są zagłębienia rozpraszające światło.

Charakterystykę oświetlacza zobrazowano za pomocą płaszczyzny przechodzącej przez oś symetrii.



Rys. 6.59. Oświetlacz LED: a) zdjęcie poglądowe, b) wyrenderowany obraz intensywności



Rys. 6.60. Radiancja płaszczyzny przechodzącej przez oś symetrii oświetlacza:
a) płaszczyzna YZ , b) płaszczyzna XZ

Asymetria na rysunku 6.60 wynika z bliskości płaszczyzny YZ do diody LED. Opracowane rozwiązanie dowodzi możliwości rozszerzania środowiska renderującego, gdy dostępne jest w wersji *open-source*. Należy jednak przyznać, że implementacja wymaga znacznego wysiłku informatycznego. Środowisko nie oferuje bowiem specjalnego interfejsu rozszerzeń, co wymaga gruntownego zapoznania z całą architekturą systemu. Ponadto rozwija się ono bardzo dynamicznie i utrzymanie długoterminowej kompatybilności wymaga dodatkowych nakładów. Optymalne byłoby przyjęcie opracowywanego rozszerzenia przez zespół zarządzający rozwojem.

6.6. Optymalizacja układu akwizycji obrazów

W niniejszym rozdziale zaprojektowano układ akwizycji obrazów w procesie kontroli jakości powierzchni wielowarstwowej układu kompozytowego. Powierzchnia ta zawiera kolorowy nadruk, który jest pokryty dwoma warstwami polimerowymi, których skład nie został ujawniony przez wytwórcę. Przedmiotem inspekcji są artefakty,

takie jak zanieczyszczenia i pęcherze większe niż 0,01 mm w części wewnętrznej kompozytu. Nie są nimi „drobne” rysy na powierzchni zewnętrznej. Z uwagi na wymagania technologiczne układ akwizycji obrazów powinien być zlokalizowany w obszarze jednej z rolek prowadzących. Konieczne jest zastosowanie detektora matrycowego, tak aby pojedynczy obraz obejmował szerokość 200 mm i długość 20 mm. Obrazowanie za pomocą kamery liniowej nie jest przedmiotem projektowanego rozwiązania.

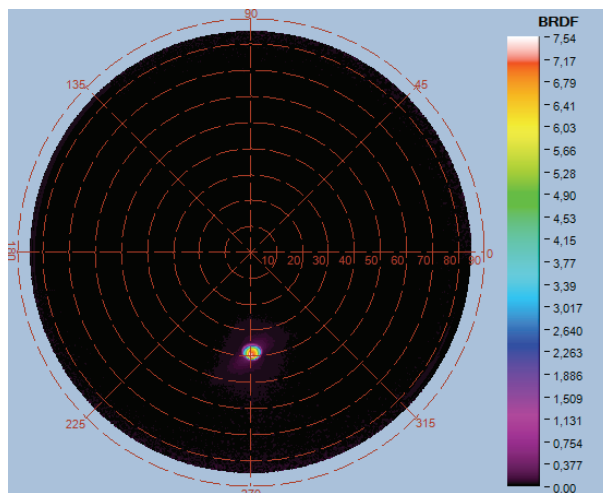
Trudności akwizycji obrazów wynikają z cylindrycznego ukształtowania powierzchni oraz jej połyskliwości. Dlatego kąt obserwacji powierzchni względem jej normalnej istotnie się zmienia, co przy wąskiej charakterystyce rozpraszania zwierciadlanego wpływa na równomierność luminancji.

W celu sprawdzenia koncepcji układu akwizycji podjęto badania symulacyjne, zgodnie z planem.

1. Identyfikacja parametrów optycznych obiektów.
2. Modelowanie geometryczne układu akwizycji.
3. Modelowanie rozpraszania światła na powierzchni.
4. Optymalizacja pozycji oświetlacza.
5. Optymalizacja charakterystyki światłości źródła światła.
6. Ocena wyników optymalizacji.

Zadanie 1. Identyfikacja parametrów optycznych obiektów

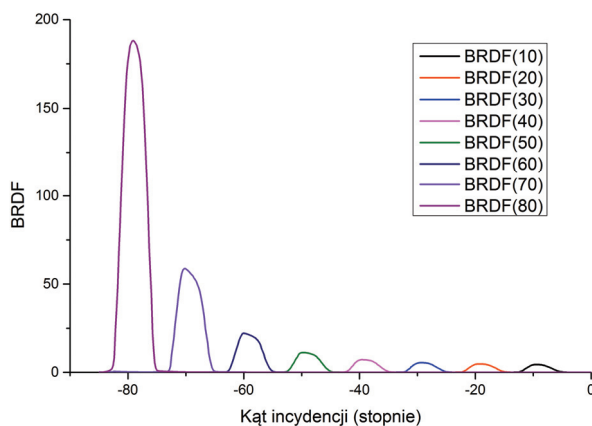
Przeprowadzono pomiary funkcji rozpraszania światła BRDF folii zgodnie z metodą opisaną w p. 5.2. Jeden z uzyskanych wzorów rozproszeniowych, dla kąta incydencji 40° pokazano na rys. 6.61.



Rys. 6.61. Wzór rozproszeniowy BRDF dla kąta incydencji 40°

Uzyskany wzór rozproszeniowy charakteryzuje się symetrią i silnym skupieniem, co dowodzi izotropii powierzchni oraz potwierdza jej silną refleksyjność.

Zestawienie profili BRDF dla kąta azymutalnego 270° , kąta incydencji światła w zakresie $10\text{--}80^\circ$ z rozdzielczością 10° , przedstawiono na rys. 6.62.

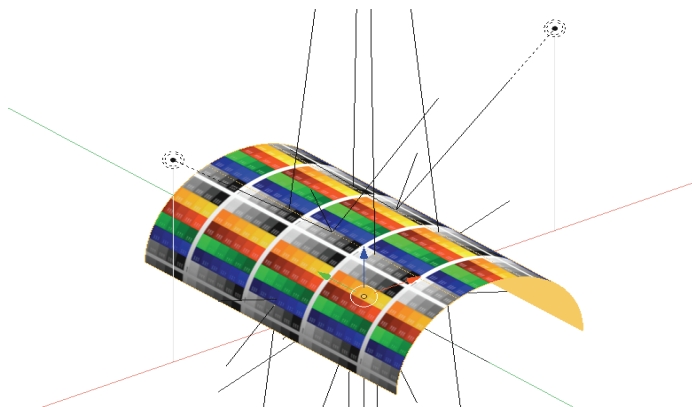


Rys. 6.62. Zestawienie profili radialnych funkcji BRDF w funkcji kąta incydencji światła

Wynik wskazuje, że wraz z wzrostem kąta inklinacji następuje wzrost odbitego natężenia światła. Wzrost ten jest szczególnie wyraźny dla kątów powyżej 70° .

Zadanie 2. Modelowanie geometryczne układu akwizycji

Opracowano model geometryczny stanowiska akwizycji obrazów folii przez zamodelowanie powierzchni walca oraz dobór rozdzielczości i wielkości przetwornika matrycowego kamery oraz ogniskowej obiektywu i odległości od powierzchni. Dwa



Rys. 6.63. Model akwizycji obrazów powierzchni walca

symetryczne oświetlacze zamodelowano jako źródła punktowe, tj. o jednorodnej dookólnej charakterystyce światłości.

W celu przetestowania poprawności geometrycznej układu, powierzchnię walca o charakterystyce rozpraszania lambertowskiego pokryto teksturą modyfikującą barwę powierzchni. Jako mapy do teksturowania użyto obrazu barwnego, o znanych wymiarach pól i współrzędnych kolorymetrycznych. Uzyskany wynik renderowania potwierdził poprawność geometryczną zaprojektowanego modelu.

Zadanie 3. Modelowanie rozpraszania światła na powierzchni

Środowisko renderujące oferuje kilka przygotowanych modeli materiałów i powierzchni, a dla bardziej zaawansowanych użytkowników możliwość parametryzacji modeli bazowych rozpraszania światła. Stosowane środowisko renderujące nie udostępnia jednak możliwości użycia wyników pomiarów BRDF. Jako najbardziej odpowiedni model rozpraszania powierzchni uznano model wielomodalny Cooka–Torrance’a, ponieważ jest on zalecany do modelowania układów wielowarstwowych, np. lakier samochodowy (CarPaint). Guenter i in. [110] wyznaczyli współczynniki dla modelu na podstawie badań eksperymentalnych oraz optymalizacji wieloczynnikowej. Jak pokazano w tabeli 6.6, model CarPaint wymaga zestrojenia aż 18 parametrów.

Tabela 6.6. Parametry modelu wielowarstwowego na podstawie [110]

Składowa	CarPaint (BMW339)	CarPaint (T8)	CarPaint (Manual)
Diffuse (kd)	0,012/0,015/0,016	0,012/0,015/0,018	0,64/0,064/0,64
Spec1 (ks1)	0,062/0,076/0,08	0,049/0,076/0,012	0,05/0,05/0,05
Spec2 (ks2)	0,11/0,12/0,12	0,1/0,13/0,18	0,07/0,07/0,07
Spec3 (ks3)	0,0083/0,015/0,016	0,007/0,065/0,077	0,04/0,04/0,04
M1	0,39	0,32	0,25
M2	0,17	0,11	0,1
M3	0,13	0,87	0,015
R1	0,92	0,15	0,95
R2	0,013	0,087	0,90
R3	0,9	0,9	0,7

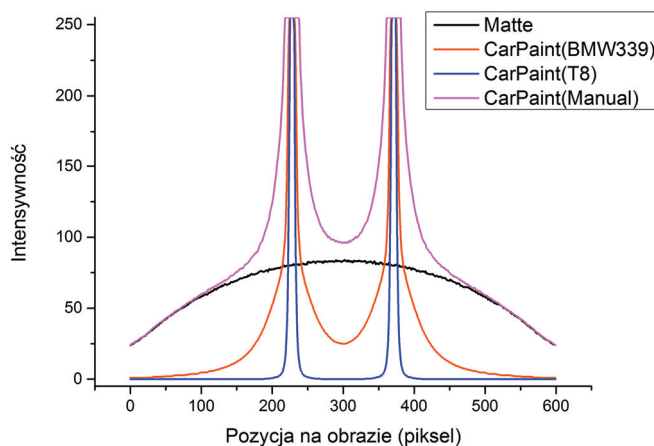
Dla trzech wybranych zestawów parametrów oraz powierzchni dyfuzyjnej lambertowskiej przeprowadzono eksperyment symulacyjny. Zastosowano oświetlenie powierzchni za pomocą dwóch źródeł punktowych. W wyniku symulacji uzyskano obrazy, dla których znormalizowano parametry ekspozycji.

Uzyskane obrazy wyraźnie pokazują problem niejednorodności luminacji powierzchni, a ponadto występowanie obszarów o bardzo dużej intensywności. W celu

ich analizy ilościowej wykreślono profil luminacji przechodzący poziomo przez środek każdego z obrazów (rys. 6.65).

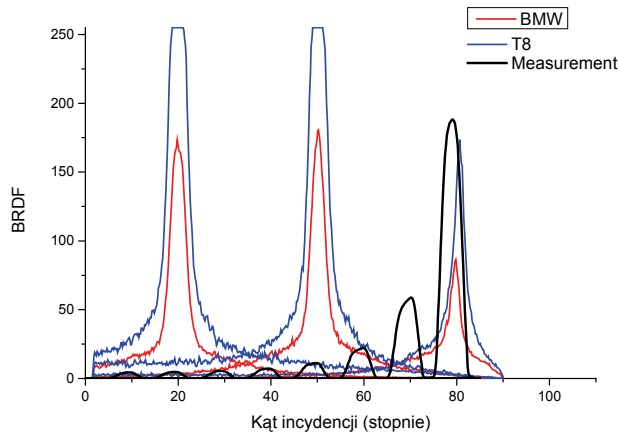


Rys. 6.64. Obrazy luminacji powierzchni dla różnych parametrów rozpraszania światła



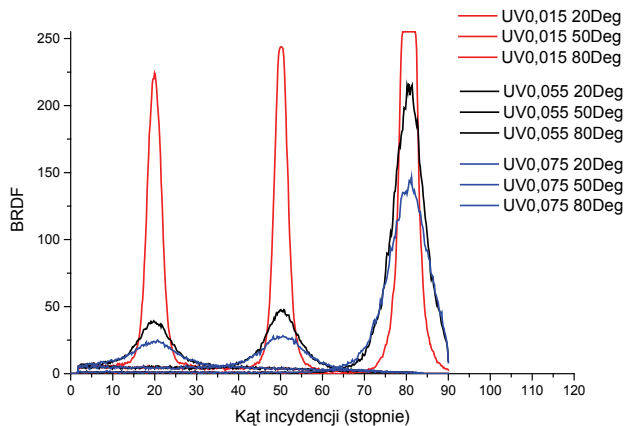
Rys. 6.65. Profile intensywności obrazów powierzchni wałka dla różnych parametryzacji rozpraszania światła

Uzyskane wyniki potwierdzają rozważania teoretyczne, że obraz powierzchni o rozpraszaniu lambertowskim charakteryzuje się równomierną intensywnością, której wartość odzwierciedla odległość powierzchni od kamery i jej luminancja nie zależy od kierunku obserwacji. W przypadku powierzchni modelowanej jako struktura warstwowa (CarPaint), cechującej się silnym odbiciem zwierciadlanym, na obrazach widoczne są jasne obszary, w których wartość intensywności osiąga nasycenie. Oświetlenie takie nie jest korzystne, gdyż w miejscu tym obraz nie zawiera informacji o wadach powierzchni. Szerokość wzoru rozproszeniowego jest zależna od parametrów modelu. Jednak istotny jest wynik porównania wyników pomiarów BRDF powierzchni rzeczywistej i wyników symulacji BRDF dla wytypowanych modeli rozpraszania (CarPaint) (rys. 6.66).



Rys. 6.66. Profile BRDF renderowane i zmierzone dla wybranych kątów incydencji

Analiza porównawcza profili BRDF wskazuje na istotne niezgodności zarówno w kontekście zależności natężenia maksymalnego w funkcji kąta, jak i kształtu przebiegu. Model wielowarstwowy rozpraszania dla kąta powyżej 50° wykazuje wyraźną redukcję maksymalnego natężenia, przeciwnie jak powierzchnia rzeczywista. Ponadto, model wielowarstwowy wyraźnie zawiera składową rozpraszającą, stąd przebieg funkcji BRDF dla małych wartości nie jest tak stromy jak w przypadku powierzchni rzeczywistej.



Rys. 6.67. Profile BRDF dla modelu „glossy surface” w funkcji szorstkości

Prawidłowe zestrojenie aż 18 parametrów nie jest możliwe manualnie. Należałoby w tym celu opracować rozwiązanie umożliwiające optymalizację wieloczynnikową [110]. Funkcją celu powinna być minimalizacja RMS dla wektora cech BRDF zmie-

zonego oraz wektora cech BRDF z symulacji. Dzięki dostępności parametrów modelu w postaci jawnej w plikach konfiguracyjnych środowiska renderującego, jest możliwe zastosowanie zewnętrznego algorytmu optymalizacyjnego.

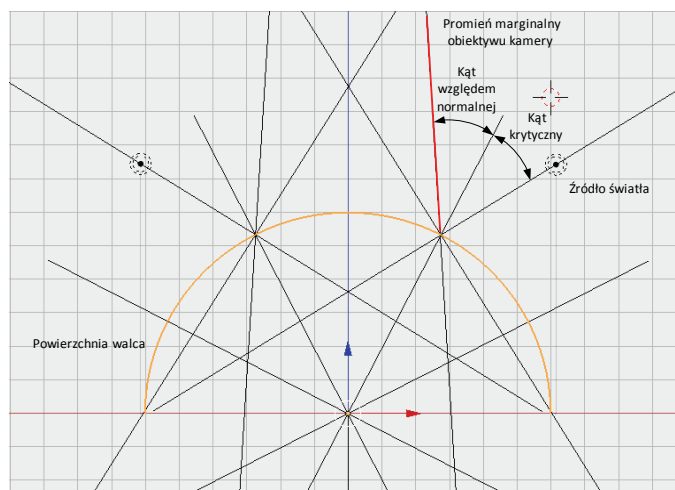
Do dalszych badań wytypowano znacznie prostszy model powierzchni połyskliwych (*glossy surface*), który umożliwia wprowadzenie współczynników szorstkości UV, tak jak wcześniej dla modelu „metal” w rozdziale 6.

Analiza profili funkcji BRDF będących wynikiem symulacji wykazuje większą zgodność z wynikami pomiarów, w zakresie zależności amplitudy maksymalnej do kąta incydencji, jak i stromości zboczy, niż model warstwowy. Dostrojenie modelu z zachowaniem jego izotropii pozostawia tylko jedną zmienną niezależną UV.

Do dalszych badań przyjęto model powierzchni „glossy surface” z parametrami szorstkości $UV = 0,055$, akceptując błąd występujący dla małych kątów incydencji, gdyż ze względu na cel zadania (doświetlenia części środkowej powierzchni) i geometrii układu dominujące znacznie odgrywają kąty powyżej 50° .

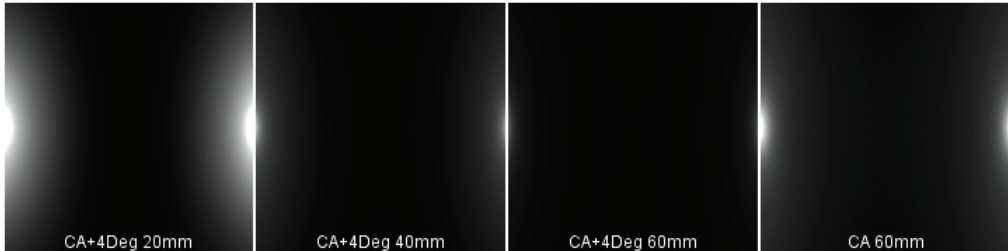
Zadanie 4. Optymalizacja pozycji oświetlacza

Wyniki symulacji (rys. 6.64) wyraźnie dowodzą, że oświetlacz musi zostać przesunięty poza kąt graniczny. W zamodelowanym układzie, kąt ten wynika z kąta obserwacji kamery (promień marginalny). Punkt przecięcia promienia marginalnego kamery z obrazowaną powierzchnią wyznaczono geometrycznie. W punkcie tym wyznaczono normalną, względem której określono kąt padania promienia marginalnego. Kąt ten nazwano kątem krytycznym. Środowisko modelowania geometrycznego, efektywnie wspiera wyznaczanie kątów poprzez możliwość wprowadzania dodatkowych, względnych układów współrzędnych, co zilustrowano na rys. 6.68.



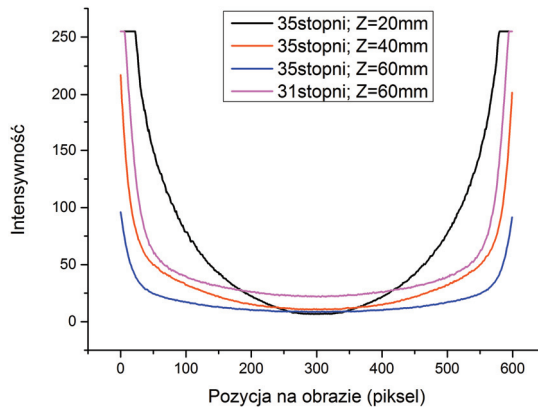
Rys. 6.68. Schemat wyznaczania kąta granicznego pozycji oświetlacza

Zgodnie z wyznaczonymi zależnościami umieszczono źródło światła punkowego na osi wyznaczającej kąt krytyczny (CA) w odległości 60 mm od badanej powierzchni. Wygenerowano obraz oznaczony „CA 60 mm”, a następnie zwiększono kąt położenia oświetlacza o 4° i wygenerowano obrazy przy zmianie odległości od powierzchni. Uzyskane obrazy przedstawiono na rys. 6.69.



Rys. 6.69. Obrazy natężenia światła przy ustawieniu oświetlacza dla różnych odległości i kątów

W celu ich ilościowej analizy wykreślono profile intensywności przechodzące poziomo przez środek każdego z obrazów.



Rys. 6.70. Profile intensywności dla różnych kątów i odległości oświetlacza

Analiza profili intensywności dla różnych kątów i odległości źródeł od powierzchni walca (rys. 6.70) potwierdza nierównomierność intensywności obrazu dla pełnego zakresu pola widzenia. Wraz z oddalaniem oświetlacza od powierzchni, charakterystyka w środkowej części staje się coraz bardziej płaska. Przy odległości 60 mm nierównomierność, definiowana jako szerokość przedziału w stosunku do pełnego zakresu nie przekracza 0,5% dla szerokości pola widzenia kamery ± 100 pikseli. Jednak układ taki charakteryzuje się bardzo małą sprawnością, gdyż jedynie niewielka część promieniowania kierowana jest na obrazowaną powierzchnię, co wyznaczono na pod-

stawie kryterium całkowego. Wyniki w tab. 6.7 potwierdzają, że zbliżanie oświetlaczy do środka oświetlanego pola podnosi luminację powierzchni.

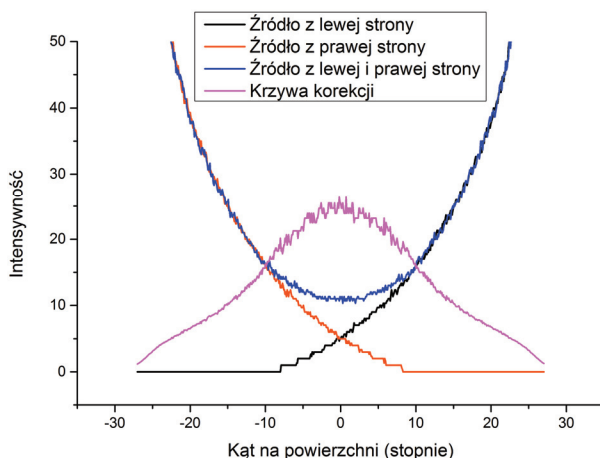
Tabela 6.7. Nierównomierność luminacji oraz kryterium całkowite

Pozycja oświetlacza	Nierównomierność		Kryterium całkowite		
	± 100 pix	± 200 pix	± 100 pix	± 200 pix	± 300 pix
$35^\circ/Z = 20$	6,2%	28,0%	2344	11303	43724
$35^\circ/Z = 40$	1,7%	8,2%	2453	6943	5697
$35^\circ/Z = 60$	0,5%	3,3%	1842	4453	19916
$31^\circ/Z = 60$	1,6%	6,9%	4714	11012	29409

Zadanie 5. Optimalizacja charakterystyki światłości źródła światła

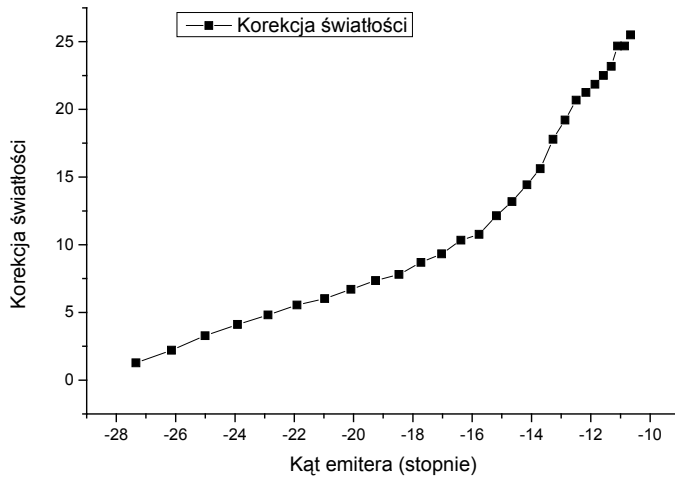
W celu maksymalizacji równomierności luminancji oraz maksymalizacji sprawności układu oświetlającego konieczne jest ukształtowanie jego charakterystyki światłości. Obraz syntetyczny (rys. 6.69b), uzyskany przy oświetleniu źródłem punktowym, pozwolił zidentyfikować parametry kierunkowe rozpraszania światła na powierzchni wraz z korekcją natężenia, wynikającą z kwadratu odległości. Obraz ten jest zatem podstawą wyznaczenia wartości funkcji celu, czyli odstępstwem od wartości stałej.

Zmiennymi w zadaniu optymalizacyjnym są: położenie źródeł światła (kąt i odległość) oraz charakterystyka światłości (natężenia w poszczególnych kierunkach). Ograniczeniem jest symetria układu oświetlaczy oraz minimalizacja kąta położenia źródeł światła, gdyż wpływa on na uwypuklanie rys na powierzchni. Jak ustalono w specyfikacji wymagań, rysy na transparentnej powłoce nie stanowią nieprawidłowości. Stąd w celu poprawy wydajności systemu analizy obrazów ich sygnał optyczny powinien być minimalizowany.



Rys. 6.71. Profile luminacji przy różnym oświetleniu oraz krzywa korekcji luminacji

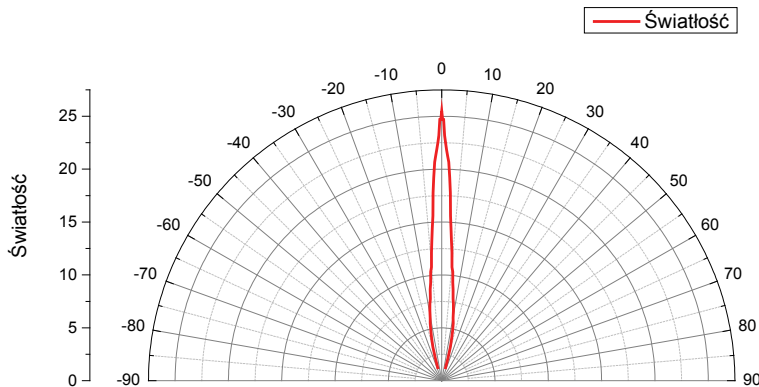
Poszukiwanie rozwiązania ograniczono do układu dwuwymiarowego. Przyjęto pozycję oświetlaczy punktowych, dla której wygenerowano obraz luminacji powierzchni.



Rys. 6.72. Krzywa korekcja światłości dla źródła punkowego

Uzyskany profil luminacji posłużył do wyznaczenia krzywej korekcji luminacji. Na jej podstawie wyznaczono korekcję światłości dla poszczególnych kątów charakterystyki rozsyłu. Wyniki pokazano na rys. 6.72.

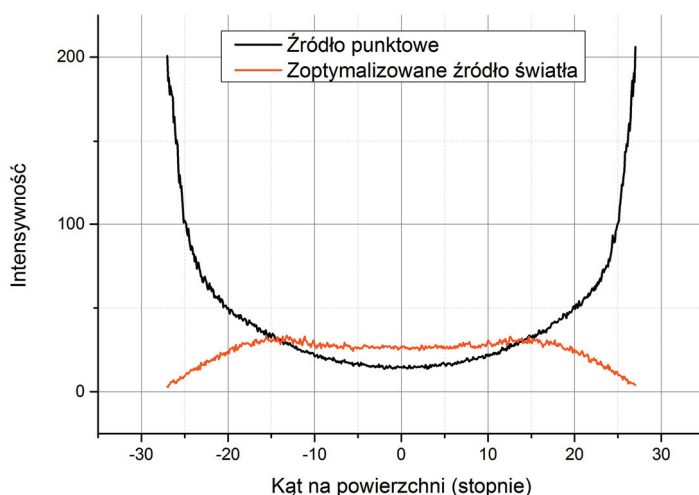
Uzyskana korekcja światłości reprezentuje wycinek krzywej rozsyłu projektowanego źródła światła. Przyjęcie jej symetryczności względem maksimum funkcji umożliwiło wykreślenie charakterystyki światłości zoptymalizowanego źródła światła.



Rys. 6.73. Wyznaczona charakterystyka światłości źródła światła

Zadanie 6. Ocena wyników optymalizacji

Wyznaczoną charakterystykę światłości, po redukcji rozdzielczości kątowej do 1° , wprowadzono do struktury IES. Następnie przeprowadzono symulację, której wynik, dla źródła punktowego oraz źródła z optymalną charakterystyką światłości przedstawiono na rys. 6.74.



Rys. 6.74. Profil intensywności obrazu przed i po optymalizacji

Zoptymalizowany rozkład luminancji charakteryzuje się dużo większą równomiernością i wyraźnie większą sprawnością. Sprawność wynika z ograniczania mocy światła kierowanej do obszarów, które nie są obrazowane.

Przeprowadzono optymalizację w układzie 2D dla maksymalizacji równomierności luminancji w obszarze obrazowanym oraz minimalizacji strat mocy źródła światła z użyciem metod symulacyjnych, pozwoliła uzyskać wytyczne dla projektowanego układu oświetleniowego. Realizując podany algorytm wykonano kilka uproszczeń dotyczących charakterystyki rozpraszania powierzchni oraz redukcji rozdzielczości kątowej wyznaczonej charakterystyki światłości, stąd jego empiryczna weryfikacja jest niezbędna. Jej główną trudnością jest dobór źródła światła o wyznaczonej charakterystyce światłości. Proponuje się, aby do modelu symulacyjnego wprowadzić charakterystykę źródła światła najbardziej zbliżonego i dokonać ponownej optymalizacji zmiennych określających pozycję i orientację źródeł. Drugie podejście polega na zaprojektowaniu układu kształtującego strumień świetlny za pomocą soczewek lub odbłyśników. Istotne jest również rozważenie parametrów układu w konfiguracji przestrzennej. Dla poprawy efektywności takiej optymalizacji uzasadnione jest skorzystanie z zewnętrznych algorytmów optymalizacyjnych.

6.7. Podsumowanie

Zadania w pakiecie syntezy modeli symulacyjnych podzielono na dwie grupy, pierwszą dotyczącą weryfikacji poprawności modeli symulacyjnych oraz drugą odnoszącą się do opracowywania nowych komponentów i systemów wizyjnych wraz z ich optymalizacją. Dostępnych jest wiele środowisk symulacyjnych, zarówno komercyjnych, jak i bezpłatnych, oferujących typowe zalety i ograniczenia dla swoich modeli biznesowych. Łatwość użytkowania, stabilność, ograniczone ujawnianie stosowanych rozwiązań versus, otwartość i dynamiczność zmian, przy kiepskiej dokumentacji końcowej, ale wiedzy tworzonej przez użytkowników i pasjonatów. Przeprowadzone testy wykazały, że nie wszystkie implementacje, etykietowane *physical-based rendering*, modelują poprawnie fizycznie wszystkie komponenty i zjawiska uczestniczące w procesie akwizycji obrazów, np.: ortogonalność kamery. Przeprowadzony zestaw testów umożliwia zweryfikowanie ograniczenia środowiska modelującego i renderującego.

W kolejnym etapie opracowano narzędzia wspomagające ocenę poprawności modelowania źródeł światła, przez pomiar ich światłości. W tym celu zamodelowano goniometr wirtualny, korzystając z możliwości animacji, jakie daje grafika komputerowa. Przeanalizowano możliwości i ograniczenia sfery obrazującej z wewnętrzną i zewnętrzną kamerą perspektywiczną, ortogonalną i panoramiczną. Dla podanych konfiguracji wyznaczono krzywe kalibracyjne oraz omówiono problem zakresu pomiarowego. Za optymalne rozwiązanie wskazano obrazowanie powierzchni wewnętrznej z obiektywem o kącie 60° , co zapewnia pełen zakres pomiarowy i liniowe odwzorowanie. Przeprowadzono również badania radiometryczne sfery, której rozpraszanie powierzchni jest źródłem odbić wyższych rzędów. Jak wyznaczono, przy refleksyjności tej powierzchni 10%, udział światła niepożądanego jest poniżej 5%.

Opracowana sfera umożliwiła weryfikację światłości powierzchniowych źródeł światła parametryzowanych za pomocą plików zewnętrznych w formacie IES. Potwierdzono prawidłowość kształtowania światłości, poza jednym z przypadków, gdzie dostarczony model geometryczny obudowy diody ograniczał rozsył.

W zakresie modelowania parametrów optycznych powierzchni przeanalizowano możliwości oferowane przez środowisko symulacyjne. Wyróżnikiem środowisk komercyjnych jest bogata baza materiałów, czyli powierzchni modelowanych jako struktury wielowarstwowe dla uzyskania jak najbardziej fotorealistycznego efektu. Do oceny jakości zamodelowania parametrów optycznych powierzchni użyto sfery obrazującej do pomiarów światłości, rozszerzając ją o oświetlacz, konstruując w ten sposób skaterometr. Porównanie wyników pomiarów BRDF uzyskanych z wirtualnego skaterometru i z urządzenia rzeczywistego umożliwia ocenienie jakości modelowania.

Modelowanie źródeł światła prowadzono jako trzy różne podejścia: model geometryczno-strukturalny skupionych źródeł światła, model geometryczno-strukturalny

oświetlacza bezpośredniego i oświetlacza pośredniego oraz model oświetlacza bazujący na danych pomiarowych. Jako model skupionego źródła światła wybrano diodę LED, której strukturę wewnętrzną zmierzono w zadaniu identyfikacji. Pokazano jak wpływa uwzględnienie elektrody zasilającej złącze półprzewodnikowe. Dla oświetlaczy złożonych porównano trzy sposoby ich modelowania: model powierzchni emitującej, model poprawny geometrycznie oraz model uproszczony. Wykazano, że model uproszczony jest najefektywniejszy. Zbadano również możliwość kształtowania światłości oświetlacza przez dobór charakterystyk poszczególnych emiterów oraz kształtowanie geometryczne ich rozmieszczenia przestrzennego. W przypadku oświetlacza pośredniego, kopułkowego, zaproponowano metodę oceny jego wielokierunkowości z użyciem sfery o lustrzanej powierzchni. Ponadto, opracowano metodę i algorytmy rozszerzające LuxRendera o tworzenie rozciągniętego źródła światła na podstawie pomiarów natężenia światła w polu bliskim.

Jako przykład modelowania układu akwizycji i jego optymalizacji wybrano powierzchnię silnie refleksyjną ukształtowaną na tworzącej walca. Trudności obrazowania matrycowego takiej powierzchni wynikają z różnorodności kątów normalnych powierzchni oraz wąskiej charakterystyki odbicia zwierciadlanego. Celem zadania projektowego była optymalizacja równomierności luminacji oraz maksymalizacja sprawności układu. Przedstawiono metodykę modelowania i optymalizacji z użyciem metod renderingu, zgodnie z którą wyznaczono optymalną charakterystykę światłości źródeł światła.

Wyniki zrealizowanych badań potwierdzają przydatność środowiska renderującego jako narzędzia wspierającego proces projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania klasy CAX.

7. Walidacja na przykładach przemysłowych

7.1. Czoła wałeczków łożysk tocznych

Wstępne przedstawienie problemu kontroli jakości czoł wałeczków łożysko tocznych, wskazywało na kilkanaście typów wad krytycznych, których dotychczasowa inspekcja bazowała na kontroli wizualnej. Kontrola taka nie gwarantowała dostatecznego bezpieczeństwa jakości, co omówiono w rozdziale 2.1, dla spełnienia wymagań odbiorców branży motoryzacyjnej i budowy maszyn. Brak systemów kontroli wizyjnej spełniających tak szeroko postawione wymagania w zakresie liczby typów wad, wydajności i odporności na zakłócenia, był uzasadnieniem do podjęcia prac badawczo-rozwojowych przez konsorcjum naukowo-przemysłowe: Instytut Technologii Eksploatacji z Radomia, Politechnikę Wrocławską Wydział Mechaniczny oraz Fabrykę Łożysk Tocznych z Kraśnika.

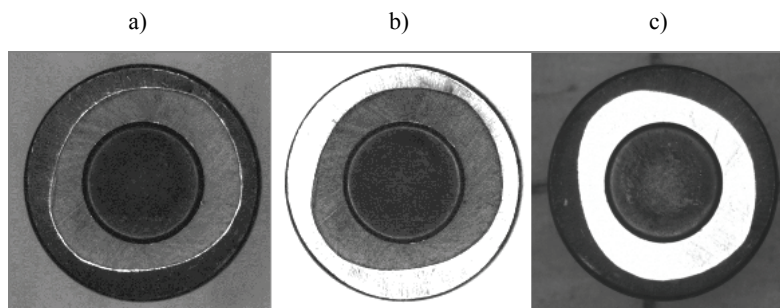
W pierwszym kroku porządkowania zakresu wymagań przeprowadzono studium wykonalności technicznej, zgodnie z opracowaną metodyką [247]. Po zgromadzeniu dostępnej dokumentacji jakościowej opracowano drzewo błędów, a następnie przeprowadzono rozszerzoną analizę FMEA-MV. Celem było wyłonienie tych wad, które są krytyczne, a jednocześnie są problematyczne ze względu na akwizycję obrazów i analizę przez system wizyjny. W określaniu współczynnika szkodliwości wad brano pod uwagę potencjalne skutki dla pracy łożyska. Wskaźnik trudności wykrywania był zależny od lokalizacji wady, jej kształtu, ale również kontrastowości. Na tym etapie okazało się, że mnogość typów wad, trudności z ich jednoznacznym opisem zależnym od metody obrazowania, a dodatkowo problem zmiany refleksyjności powierzchni, w wyniku utleniania, bardzo utrudnia projektowanie układu akwizycji obrazów. Celem zadania było takie obrazowanie, które umożliwi „proste” wykrywanie wszystkich typów wad, odporność na zakłócenia przemysłowe, gdyż stanowisko było przewidziane do integracji w linii produkcyjnej, zachowanie wydajności (2,5 szt/s) oraz minimalizacja kosztów. Określenie „proste” ma podkreślić brak złożoności obliczeniowej algorytmów, ze względu na reżim czasowy. Stąd koncepcję analizy obrazów zawężono do metod analizy intensywności.



Rys. 7.1. Fotografia wałeczka z wadą typu „podwójny szlif”

Z perspektywy charakterystyki optycznej, czoło wałeczka charakteryzują powierzchnie o różnej refleksyjności (powierzchnia szlifowana, dołek, ścieżce). Przykład czoła wałeczka, z ewidentną, wadą szlifowania czołowego, polegającą na braku ciągłości powierzchni pokazano na rys. 7.1. W kontekście obrazowania, obok refleksyjności istotny jest kształt powierzchni, a szczególnie kąt wektora normalnej powierzchni względem kamery i oświetlacza. W przypadku powierzchni czołowej, jest ona wycinkiem sfery, którą definiuje określony promień, pole tolerancji i chropowatość.

Przeprowadzono kilka eksperymentów, dobierając dostępne układy oświetlaczy w celu weryfikacji koncepcji oświetleniowych i optymalizacji.



Rys. 7.2. Obrazy powierzchni czołowej uzyskiwane w różnych konfiguracjach oświetlaczy:
a) ciemne tło, b) pierścieniowy, c) współosiowy

Zależnie od stosowanych technik oświetlania (rozdz. 2.4), uzyskiwano różne obrazy, co pokazano na rys. 7.2. Efekt uwypuklenia krawędzi z zastosowaniem oświetlacza typu ciemne tło (rys. 7.2a), rozjaśnienie tylko wadliwej powierzchni przy oświetleniu pierścieniowym (rys. 7.2b), albo rozjaśnienie poprawnej powierzchni szlifowanej przy jej oświetlaniu prostopadłym (rys. 7.2c).

Opracowany katalog wad obejmował 30 typów niezgodności geometrycznych oraz skaz powierzchni. Dla każdej wady starano się dysponować kilkoma jej przykładami,

choć trudno było uzyskać przykłady graniczne. Taki materiał badawczy był podstawą optymalizacji, której kryterium była:

- maksymalizacja kontrastu wada–tło,
- minimalizacja kontrastu zakłócenie–tło,
- minimalizacja liczby technik obrazowania (w dziedzinie kierunku rozpraszania światła oraz chromatycznej),
- minimalizacja kosztu rozwiązania.

Zmiennymi podlegającymi optymalizacji były parametry:

- oświetlenia (natężenie, długość fali, kierunek oświetlenia, rozpraszanie),
- ekspozycji (czas ekspozycji, przysłona),
- obiektywu (powiększenie, głębia ostrości).

Najistotniejszym ograniczeniem rozwiązania był czas cyklu wynikający z procesu produkcyjnego i potrzeby integracji z nim.

Optymalizację prowadzono metodami eksperymentalnymi i heurystycznymi.

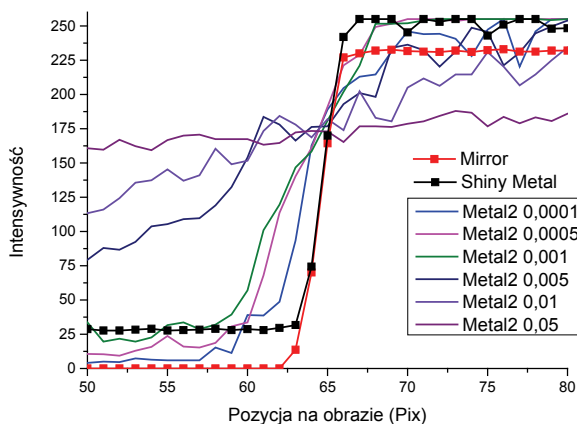
Jednocześnie podjęto działania zmierzające do opracowania modeli symulacyjnych propagacji światła. Na podstawie rysunku technicznego opracowano model geometryczny wałeczka. W pierwszym etapie przyjęto uproszczone modele rozpraszania światła na powierzchniach metalowych. Dla powierzchni dołka, która jest wynikiem procesu kucia i hartowania, przypisano komponent absorpcyjności 75% i nadano rozpraszanie modelu metal $UV = 0,3$. Do pierwszego modelu użyto oświetlacza pierścieniowego typu Ring_LED, którego wyniki pomiarów przedstawiono w rozdziale 5.1.3, wyniki zaś modelowania i symulacji w rozdziale 6.4. Oświetlacz umieszczono wstępnie w odległości 400 mm, dążąc do współosiowości oświetlenia. Taka konfiguracja zapewniła interakcję światła w polu dalekim. Parametry obiektywu dobrano na podstawie przyjętego pola widzenia $16,5 \times 16,5$ mm oraz przetwornika kamery, tj. rozdzielczości 330×330 pikseli i wielkości matrycy $1/2''$.

Pierwszym zadaniem symulacyjnym był dobór modelu rozpraszania powierzchni czołowej i jego parametryzacja. Oświetlacz pierścieniowy umieszczono w taki sposób, aby jego krawędź zewnętrzna obrazowała się na środku powierzchni czołowej. Przeprowadzono serię symulacji, dla których powierzchnię czoła wałeczka parametryzowano jako: zwierciadło (*mirror*), metal połyskliwy (*shiny metal*) oraz metal przy zmiennym parametrze szorstkości UV . Wyniki symulacji pokazano na rys. 7.3. W celu lepszej analizy ilościowej wyznaczono profile poprowadzone jako promień na czole wałeczka (rys. 7.4).

Analiza uzyskanych obrazów wyraźnie pokazuje znaczenie zjawiska rozpraszania światła. Jedynie obraz dla powierzchni lustrzanej pokazuje ostrą krawędź oświetlacza oraz maksymalny kontrast między częścią oświetloną a nieoświetloną. W miarę zwiększania szorstkości powierzchni, tak więc komponentu dyfuzyjnego, krawędź oświetlacza ulega rozmyciu. Dla wartości parametru UV powyżej 0,005, zbyt mały kontrast nie pozwala na rozróżnienie krawędzi.



Rys. 7.3. Obrazy czoła powierzchni w funkcji jej rozpraszalności

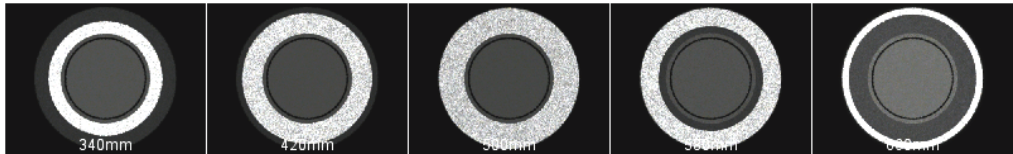


Rys. 7.4. Profil intensywności jako promień na czole wałeczka w funkcji modelu rozpraszania światła

Dla rozważanego przykładu powierzchni czołowej po szlifowaniu wielokierunkowym dobrano model *shiny metal* jako poprawnie odwzorowujący powierzchnię.

Drugim zadaniem symulacyjnym było określenie wpływu parametrów oświetlacza na efekt obrazowania sferycznej powierzchni czołowej, po szlifowaniu. Powierzchnia ta jest jasna jedynie w określonym zakresie odległości oświetlacza, zależnym od szerokości pierścienia, ale również ogniskowej obiektywu i odległości sensora. Eksperyment symulacyjny zautomatyzowano z użyciem funkcji animacji, dostępnych w środowiskach renderujących. Do jego skonfigurowania wy-

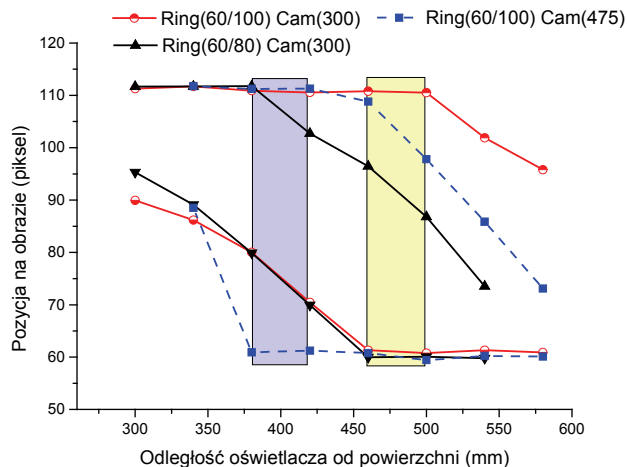
starczy podać trajektorię ruchu, z którą należy łączyć obiekt, w omawianym przykładzie oświetlacza. Następnie zdefiniować wielkość zmiany odległości, która jest zsynchronizowana z kolejnymi obrazami w sekwencji tworzącej animację. Dla porównania intensywności obrazów ustalono stałą ekspozycję. Wybrane obrazy odległości oświetlacza od powierzchni: 340, 420, 500, 580 i 620 mm pokazano na rysunku 7.5.



Rys. 7.5. Obrazy syntetyczne czoła wałeczka w funkcji odległości od powierzchni

Wyraźnie na nich widać, że dla niewielkiej odległości oświetlacza, jasna jest jedynie wewnętrzna część powierzchni, zaś przy zbyt dużej odległości tylko część zewnętrzna. Wynika to z wąskiej charakterystyki rozpraszania, gdyż na powierzchni po szlifowaniu czołowym dominuje odbicie zwierciadlane. Jednocześnie sferyczność powierzchni decyduje o kierunku wektora normalnej. Jeśli powierzchnia szlifowana zostanie określona jako rozpraszająca lambertowsko (*matte*), efekt nie będzie obserwowany.

Ocenę wpływu szerokości pierścienia oświetlającego oraz odległości kamery przeprowadzono z zastosowaniem modelu symulacyjnego. W przypadku zmiany odległości kamery z 300 mm na 475 mm dostosowano ogniskową obiektywu dla zachowania niezmiennego powiększenia.

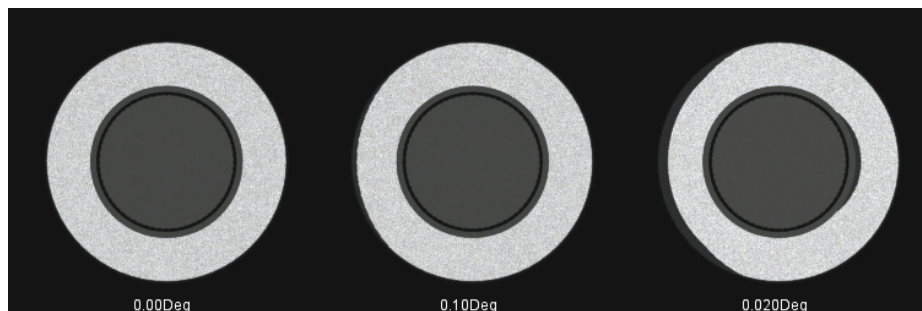


Rys. 7.6. Wpływ odległości oświetlacza na obrazowanie powierzchni szlifowanej

Dla analizy ilościowej wyników wyznaczono profil intensywności przechodzący poziomo przez środek obrazu. Ze względu na symetrię osiową obiektu ograniczono analizę profilu jedynie do pierwszej połowy, co pokazano na rys. 7.6.

Przy przyjętej konfiguracji powierzchni szlifowania cechowała się jednorodną luminacją w zakresie odległości 480–580 mm. Gdy oświetlacz był za wysoko, jedynie zewnętrzna część powierzchni kierowała światło do kamery, gdy był za nisko, jedynie powierzchnia wewnętrzna pozostawała rozjaśniona (rys. 7.5). Podobne analizy prowadzono, modyfikując średnicę oświetlacza oraz jego charakterystykę, co nie wpłynęło jednak na zmianę przyjętej pierwotnie koncepcji oświetlania.

Kolejne badanie dotyczyło wpływu osiowości pozycjonowania wałeczka na równomierność oświetlenia powierzchni szlifowanej. Pytanie takie kierowane jest przez konstruktorów układu manipulacyjnego do określenia metody i dopuszczalnych tolerancji. Uzyskane wyniki (rys. 7.7) wskazywały na bezpieczne obrazowanie powierzchni czołowej z zachowaniem tolerancji osiowości poniżej 0,05 stopnia. Oznacza to jednocześnie, że błędy geometrii powierzchni czołowej będą obrazowane jako ciemne obszary, co pozwoli na łatwą ich identyfikację.

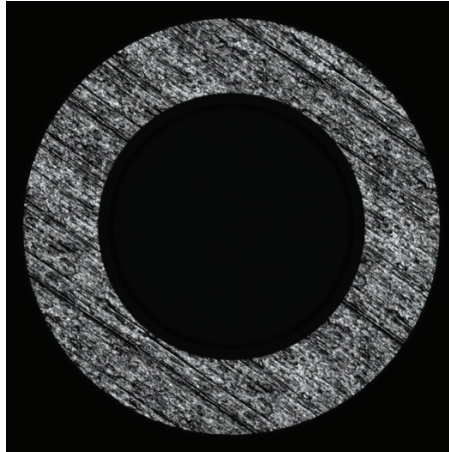


Rys. 7.7. Wpływ osiowości pozycjonowania wałeczka na obrazowanie powierzchni czołowej

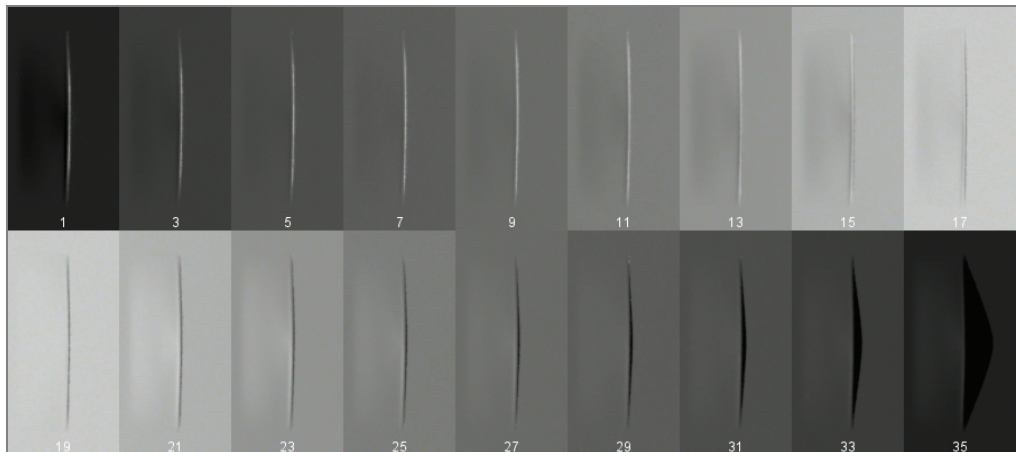
Oświetlacz pierścieniowy zapewniał wizualizację wad na czole i krawędziach wałeczka, jednak subtelne wady szlifowania nie były widoczne, obszar zaś dołka pozostawał niedoświetlony. Wady szlifowania zamodelowano z zastosowaniem teksturowania powierzchni. Korekta parametrów ekspozycji wpłynęła na kontrast tekstury, będący wynikiem rys od ściernicy, przy oświetleniu pierścieniowym, takim jak dla geometrii czoła (rys. 7.8).

W obszarze dołka są lokalizowane wady korozji, wypływek, odcisków oraz rozwarstwienia materiału (łuska). W celu oświetlenia powierzchni dołka, poszukiwano oświetlaczy typu ciemne tło. Dla dyskryminacji ognisk korozji od plam pozostających po procesie hartowania konieczne okazało się rozszerzenie przestrzeni cech, przez wprowadzenie informacji chromatycznej [245]. Opracowano rozwiązanie polegające na analizie obrazów powierzchni oświetlanej dwoma różnymi źró-

dłami monochromatycznymi. Różnica luminacji powierzchni oświetlanej światłem ($\lambda = 455 \text{ nm}$) i ($\lambda = 650 \text{ nm}$) umożliwiła pewną identyfikację plam korozji.



Rys. 7.8. Obraz powierzchni czołowej ukazujący wady szlifowania

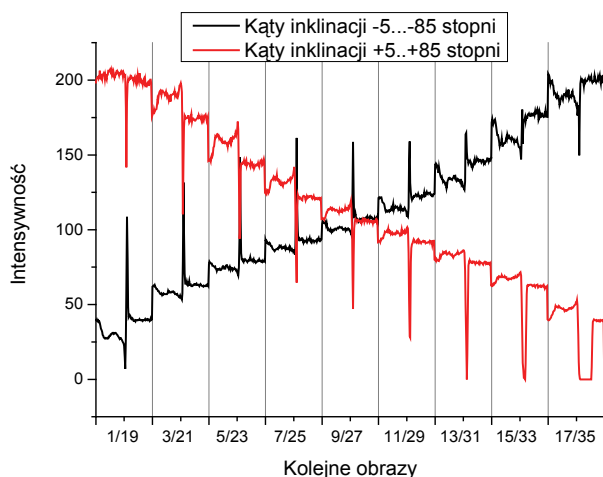


Rys. 7.9. Zestawienie kolejnych obrazów wady „rozwarstwienie materiału”
w funkcji kąta inklinacji wiązki oświetlającej

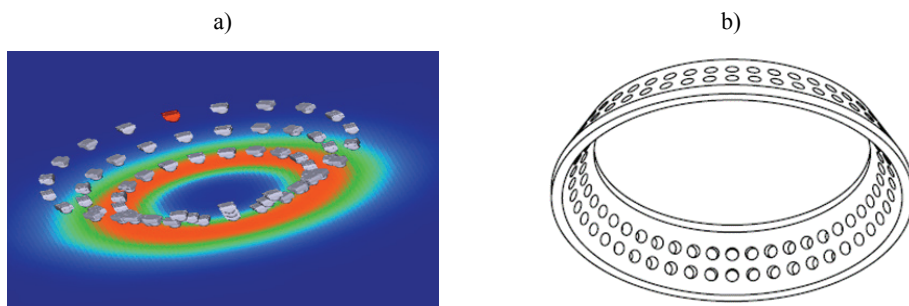
Metody symulacyjne były przydatne przy wykrywaniu rozwarstwienia materiału w dołku. Przy symetrycznym układzie oświetlającym kamerą umieszczoną w osi symetrii wałka nie uzyskano kontrastu między wadą a otoczeniem umożliwiającemu jej wykrycie. Ponadto, powierzchnia dołka wałeczka nie jest jednorodna, w wyniku wzajemnego ocierania wałeczków dochodzi na niej do lokalnych rozjaśnień, co nie narusza jakości wyrobu. Z zastosowaniem metod symulacyjnych podjęto testy oświetlania w ciemnym tle oraz

metody umożliwiające uzyskanie informacji o zmianie wysokości. Zamodelowano geometrycznie wadę rozwarstwienia materiału, a następnie przeprowadzono badania symulacyjne wpływu kąta oświetlenia na obrazowanie wady. Jeden z przykładów, przy zmianie kąta inklinacji od -85° do $+85^\circ$, z krokiem 10° pokazano na rys. 7.9.

Ilościowa zmiana intensywności, a szczególnie kontrastu wada-tło, została zobrażowana za pomocą profili intensywności (rys. 7.10) poprowadzonych przez zestawienie obrazów (rys. 7.9). Wraz z zwiększaniem kąta oświetlenia widoczny jest jasny rozbłysk na krawędzi wady albo tworzy się obszar zacieniony, zależnie od kierunku padania światła.



Rys. 7.10. Profile intensywności poprowadzone przez zestawienie obrazów przy zmiennym kącie inklinacji oświetlacza



Rys. 7.11. Zaprojektowany oświetlacz polichromatyczny:
a) wizualizacja charakterystyki światłości, b) pierścień pozycjonujący

Przeprowadzone badania pomogły w opracowaniu metody detekcji zmian topograficznych powierzchni. Polega ona na wielokierunkowym, pod dużym kątem względem normalnej, oświetlaniu powierzchni i analizie powstających cieni.

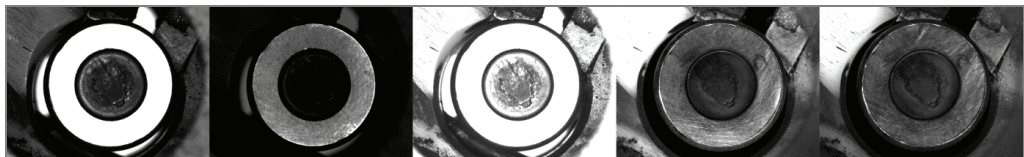
Do integracji rozwiązania docelowego zaprojektowano polichromatyczny oświetlacz LED (rys. 7.11). Zawiera on dwa pierścienie diod LED podzielone na sekcje kątowe 120° . Diody LED do montażu przewlekanego 3 mm, emitują promieniowanie $\lambda = 455$ nm (niebieski) albo $\lambda = 650$ nm (czerwony) o kącie świecenia 60° .

Na podstawie badań symulacyjnych zoptymalizowano ich rozłożenie kątowe w płaszczyźnie osi oświetlacza i płaszczyźnie prostopadłej do niej, dążąc do równomiernego oświetlenia powierzchni, a jednocześnie jak najdalszego umieszczenia oświetlacza względem badanej powierzchni. Wynika to z potrzeby zapewnienia odporności na zanieczyszczenia od cieczy chłodzących, używanych w procesie szlifowania. Zanieczyszczenia te są przenoszone przez powierzchnie bardzo dynamicznie pozycjonowanych wałeczków.



Rys. 7.12. Obraz głowicy wizyjnej do inspekcji czół wałeczków łożysk, pokazujący dwa oświetlacze

Opracowany system automatycznej inspekcji wizyjnej czół wałeczków łożysk tocznych (rys. 7.12) rejestruje aż pięć zdjęć (rys. 7.13), różniących się parametrami ekspozycji oraz technikami oświetlenia. Umożliwia identyfikację 31 typów wad z wydajnością 2,5 szt./s, umożliwiając bezpośrednią integrację z linią obróbki wałeczków tocznych.



Rys. 7.13. Zestaw zdjęć do inspekcji jakości czola wałeczka łożyska

W ramach współpracy Instytutu Technologii Eksploatacji z Radomia (Państwowy Instytut Badawczy), Fabryki Łożysk Toczących z Kraśnika oraz Politechniki Wrocławskiej, Wydział Mechaniczny, opracowano i wdrożono trzy systemy automatycznej inspekcji wizyjnej czół wałeczków łożysk tocznych (rys. 7.14). Rozwiązania te zostały zwalidowane w wymagających warunkach produkcji przemysłowej, a ponadto uzyskały kilka wyróżnień i nagród, krajowych i międzynarodowych, głównie w kategorii innowacyjności. Wyniki badań zostały szeroko upowszechnione [101, 102, 244, 245, 246, 343].



Rys. 7.14. Stanowisko do inspekcji czoła wałeczków łożysk

7.2. Przeguby homokinetyczne

Przeguby homokinetyczne (synchroniczne, równobieżne) umożliwiają przeniesienie momentu siły w układach niewspółosiowych, gdzie niezależnie od kąta wychYLENIA osi, część napędzająca i napędzana poruszają się z jednakową prędkością kątową. Znajdują zastosowanie w budowie maszyn i pojazdów. Przegub taki składa się z korpusu, bieżni, koszyka oraz kulek łożyskowych. Montaż łożyska odbywa się ręcznie, następnie przegub kierowany do automatycznego stanowiska smarowania i uszczelniania, od którego wymagana jest stuprocentowa kontrola poprawności montażu przegubu. Celem kontroli jest stwierdzenie poprawnej liczby kulek łożyskowych i ich prawidłowe rozmieszczenie.

Rozwiązanie nakreślonego problemu wymaga opracowania układu akwizycji oraz metody analizy obrazów i klasyfikacji, w wyniku której możliwe jest odseparowanie niepoprawnie zmontowanych przegubów. Istotne jest, aby opracowany system akceptował naturalną zmienność obiektu, tj. obrót koszyka, bieżni wewnętrznej i rozmieszczenie kulek, tak aby nie była konieczna dodatkowa operacja technologiczna poziomowania koszyka. Ponadto, aby nie wymagał ograniczania zbyt wielu stopni swobody w pozycjonowaniu, akceptował obrót przegubu wokół osi symetrii oraz nie wymagał zbyt wąskich pól tolerancji pozycji.



Rys. 7.15. Fotografie przegubu homokinetycznego:
a) zdjęcie poglądowe, b) z zaznaczonymi obszarami najjaśniejszymi

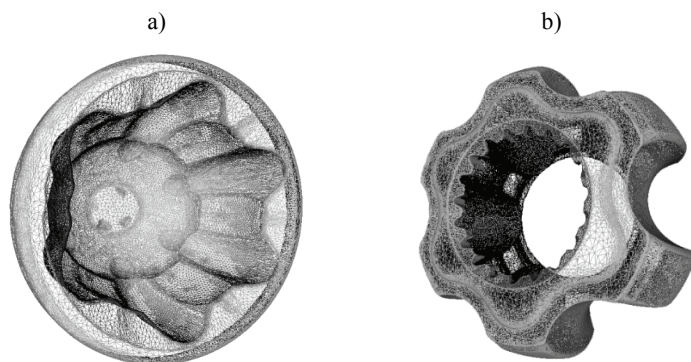
Pierwsze próby rejestracji obrazów wskazały, że przekoszenie bieżni i koszyka powoduje nie tylko zmianę pozycji kulek, ale różne ich przesłanianie przez koszyk prowadzący. Ponadto, jak pokazano na rys. 7.15b, zarejestrowano silny odbłysk od powierzchni koszyka na pozycji kulki. W przedstawionym przykładzie, w miejscu najintensywniejszej luminacji, brakuje jednak kulki. Jednocześnie pola powierzchni o intensywnej luminacji na powierzchniach kulek są niewielkie i rozłożone na różnych pozycjach.

Oznacza to, że nie jest możliwe opracowanie klasyfikatora bazującego na pozycji lub intensywności obiektów obrazu (plam), stąd konieczność rozszerzania przestrzeni cech.

Poszukując dodatkowych cech charakteryzujących elementy przegubu, poddano rozważaniom możliwość analizy zniekształceń geometrycznych wprowadzanych przez różne obiekty. W metodzie takiej lustrzana powierzchnia kulki, ze względu na małą chropowatość, pełni rolę zwierciadła wypukłego, które, występując w torze optycznym układu akwizycji, umożliwi rejestrację luminacji oświetlacza pierścieniowego. Dzięki symetrii kulki obraz oświetlacza nie powinien podlegać zniekształceniom nieliniowym, niezależnie od położenia kulek. W przypadku obrazowania przez powierzchnię koszyka i bieżni oczekuje się innego przedstawienia luminacji oświetlacza. Przeprowadzone analizy geometryczne wstępnie potwierdziły przydatność takiego podejścia. Do jego weryfikacji potrzebne byłoby wykonanie pierścienia oświetlającego, jednak jego optymalne parametry są trudne do wyznaczenia.

Zgodnie z zaproponowaną metodą projektowania wspomaganego symulacjami propagacji światła opracowano model symulacyjny stanowiska. W pierwszym kroku zamodelowano obiekt podlegający kontroli, tj. przegub homokinetyczny. Geometrię korpusu zewnętrznego oraz element bieżni wewnętrznej zeskanowano za pomocą

skanera optycznego GOM ATOS II. Uzyskane chmury punktów poddano oczyszczeniu, a następnie wygenerowano modele powierzchniowe STL. Modelowanie geometrii koszyka oraz kulek łożyskowych wykonano na podstawie rysunków technicznych i również wyeksportowano, jako modele powierzchniowe w formacie STL.



Rys. 7.16. Modele powierzchniowe (siatkowe) zeskanowanych elementów przegubu homokinetycznego:
a) korpus z bieżniami, b) rozdzielacz z bieżniami

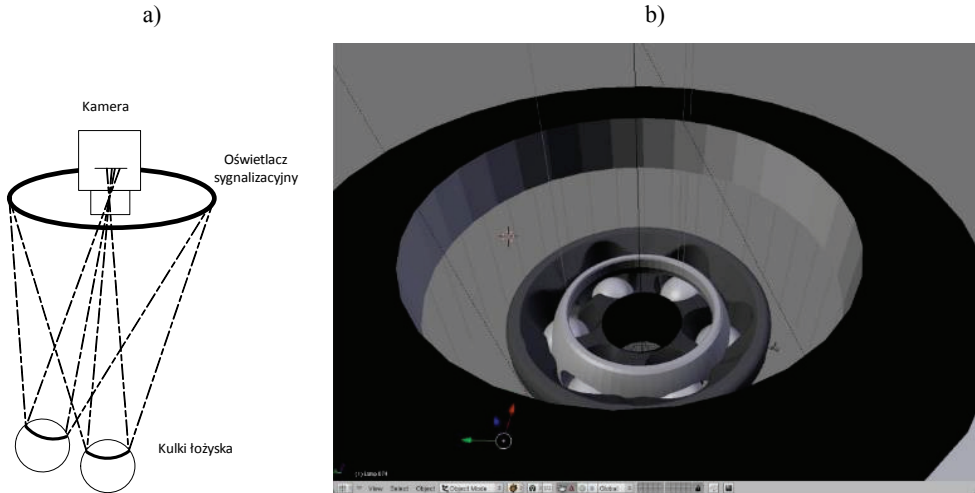
Do modelowania optycznych parametrów powierzchni zastosowano uproszczone modele rozpraszania światła przedstawione w tab. 7.1. Nie użyto teksturowania powierzchni ani też badania zgodności charakterystyki refleksyjności BRDF do odwzorowania parametrów powierzchni. Kształty składowych elementów przegubu, pozbawione płaskich powierzchni o średnicy minimum 10 mm, uniemożliwiłyby pomiary ich charakterystyk BRDF za pomocą metod i aparatury przedstawionej w rozdziale 5.2.2.

Tabela 7.1. Parametry rozpraszania światła w modelu przegubu homokinetycznego

Lp.	Powierzchnia	Model [LuxRender]
1	Kulka	Shiny metal
2	Koszyk	Metal2
3	Korpus	Metal2
4	Bieżnie zew. na korpusie	Shiny metal
5	Rozdzielacz	Metal2
6	Bieżnie wew. na rozdzielaczu	Shiny metal

Oświetlacz zamodelowano w postaci pierścienia o średnicy 250 mm i wysokości 25 mm. Jego elementom powierzchniowym nadano właściwości emisyjności lambertowskiej, modelując w ten sposób wyidealizowany dyfuzor. Kamere o rozdzielczości

640 × 480 pix skonfigurowano jako perspektywiczną, o kącie widzenia obiektywu 60°. Na podstawie pola widzenia, wielkości przetwornika kamery i ogniskowej obiektywu wyznaczono odległość pracy kamery.



Rys. 7.17. Stanowisko akwizycji obrazów przegubu:
a) schemat metody rejestracji, b) model symulacyjny

W wyniku symulacji uzyskano obrazy syntetyczne, których analiza i modyfikacje geometryczne układu oświetlającego umożliwiły lepsze zrozumienie występujących zależności oświetleniowych. Jednak dla potwierdzenia skuteczności zaproponowanego rozwiązania konieczne było rozszerzenie modelu geometrycznego przegubu o możliwość zmiany orientacji koszyka, bieżni i kulek. Narzędzia grafiki i animacji komputerowych oferują kilka metod umożliwiających określenie i zamodelowanie relacji między obiektami. Jednak nie jest to modelowanie poprawne fizycznie, stąd użytkownik musi w pełni definiować trajektorie ruchu poszczególnych obiektów, nie dopuszczając do kolizji.

Przeprowadzono serię symulacji, w wyniku których uzyskano potwierdzenie przydatności zaproponowanej koncepcji. W miejscach kulek widoczne były jasne pierścienie, a gdy ich brakowało obraz był ciemny. Gdy występowało przekoszenie bieżni i koszyka, obraz pierścienia był częściowy, gdy zaś brakowało kulki, pierścień świetlny lokalizowany na bieżni był zniekształcony.

Uzyskane wyniki umożliwiły przejście do drugiego etapu projektowania szczegółowego, tj. doboru rzeczywistych komponentów układu akwizycji i jego optymalizacji. Do wyznaczenia parametrów kamery i obiektywu przyjęto proporcje obrazu 4:3. Wielkość pola widzenia $FOV = 108 \times 81$ mm wyznaczono na podstawie średnicy zewnętrznej przegubu 73 mm powiększonej o ok. 10%. Dla rozróżniania szczegółów,

odbicia oświetlacza, przyjęto wstępnie rozdzielczość większą niż 0,2 mm/pix. Dobierając przetwornik o rozdzielczości VGA (640 × 480 pikseli) uzyskano rozdzielczość 0,17 mm/pix. Dla przyjętego pola widzenia i wielkości matrycy 1/2" (przekątna 8 mm, wielkość piksela = 9,9 μm) wyznaczono potencjalne odległości pracy dla wybranych ogniskowych obiektywu).

Tabela 7.2. Odległości kamery dla wybranych ogniskowych

Ogniskowa [mm]	Odległość pracy [mm]	Kąt widzenia [°]	Głębina ostrości (f/#=4) [mm]
12	216	28	37
16	289	21	37
24	433	14	37

Oświetlacz zamodelowano jako pierścień dyfuzyjny o wysokości 40 mm, grubości 4 mm i średnicy 160 mm. Jego parametry rozpraszające zamodelowano za pomocą rozpraszania objętościowego. Za dyfuzorem równomiernie rozłożono trzy pierścienie białych diod LED, dostępnych jako SMD montowane na taśmie. W rozwiązaniu takim, diody o mocy 1050 lm są oddalone od siebie o 16 mm. Producent określa ich kąt świecenia jako 120°, jednak dla symulacji dokonano pomiarów światłości na stanowisku opisanym w rozdziale 5.1.6. Uzyskaną charakterystykę światłości wprowadzono do oprogramowania symulacyjnego z użyciem opisów IES. W celu przesłonięcia światła rozproszonego wstecznie na dyfuzorze wprowadzono pierścień prostopadle ułożony względem dyfuzora pełniący rolę absorbera.

Wygenerowano obrazy przegubu zmodyfikowanego modelu, dla różnych wysokości i średnic oświetlacza, przy zmianie jego odległości od powierzchni przegubu oraz przy zmianie orientacji przegubu i koszyka wraz z bieżnią. Na podstawie uzyskanych obrazów wybrano rozwiązanie optymalne pod względem widoczności brakującej kulki przy przekoszeniu koszyka, z zachowaniem ograniczeń konstrukcyjnych. Na podstawie modelu symulacyjnego opracowano dokumentację konstrukcyjną i zalecenia technologiczne, na podstawie których zlecono wykonanie układu rzeczywistego.

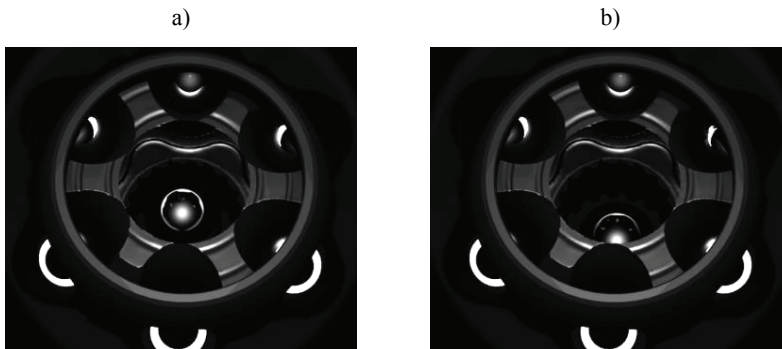
Obraz przegubu uzyskany na stanowisku rzeczywistym i wyrenderowany z dodatkowym doświetleniem globalnym pokazano na rys. 7.18. Obrazy różnią się tłem oraz poziomami intensywności i teksturą. Na obrazie rzeczywistym widoczne są jasne powierzchnie płoz, na których wsparto przegub, co zaniedbano w modelu symulacyjnym. Ponadto powierzchnie na obrazie syntetycznym są bardzo jednorodne, gdyż do ich modelowania użyto modeli izotropowych, bez teksturowania opisanego w rozdziale 6.2.1. Większe rozproszenie pierścieni świetlnych na powierzchniach kulek w układzie rzeczywistym wskazuje ponadto na silniejsze oddziaływanie światła rozproszonego. Mimo podanych różnic, choć trudnych do wyrażenia ilościowego, projektowanie układu akwizycji obrazów przegubu homokinetycznego ze wsparciem

symulacji optycznej okazało się bardzo cenne. Zweryfikowano koncepcję oświetlenia oraz sprawdzono poprawność konstrukcyjną i parametry optyczne źródeł światła oraz kamery z obiektywem.



Rys. 7.18. Obrazy przegubu z dodatkowym doświetleniem:
a) obraz z kamery, b) wynik renderowania

W wyniku demonstracji działania wirtualnego systemu kontroli, specyfikacja wymagań została rozszerzona przez użytkownika o potrzebę wykrywania kulki nadmiarowej w otworze wielowypustu. Oświetlacz pierścieniowy nie zapewniał jej obrazowania, gdyż w wyniku okluzji światła, kulka umieszczona centralnie nie była widoczna.



Rys. 7.19. Wyrenderowane obrazy przegubu – widoczna kulka nadmiarowa (na środku)
w dwóch różnych położeniach

Do rozwiązania tego problemu zaproponowano dodatkowy oświetlacz kierujący światło na powierzchnię w środku przegubu. Aby sprawdzić skuteczność rozwiązania, rozszerzono model symulacyjny, wprowadzając trzy wąskokątne diody LED umieszczone na pierścieniu wokół obiektywu. Wyniki symulacji potwierdziły poprawność koncepcji, rys. 7.19.

Przeprowadzono badania symulacyjne intensywności rejestrowanego odbicia światła od kulek i od powierzchni środkowej (bez kulki), dla przyjętej odległości oświetlacza, w funkcji kąta wychylenia bieżni. Uzyskane wyniki potwierdziły, że w zakresie dopuszczalnego wychylenia bieżni system prawidłowo wykrywa kulkę nadmiarową. Ponadto, na podstawie analizy obrazów uzyskano informację o aktualnym kącie bieżni, która została użyta do zabezpieczenia stanowiska automatycznego smarowania oraz uszczelniania.



Rys. 7.20. Fotografie stanowiska inspekcji przegubów homokinetycznych po wdrożeniu

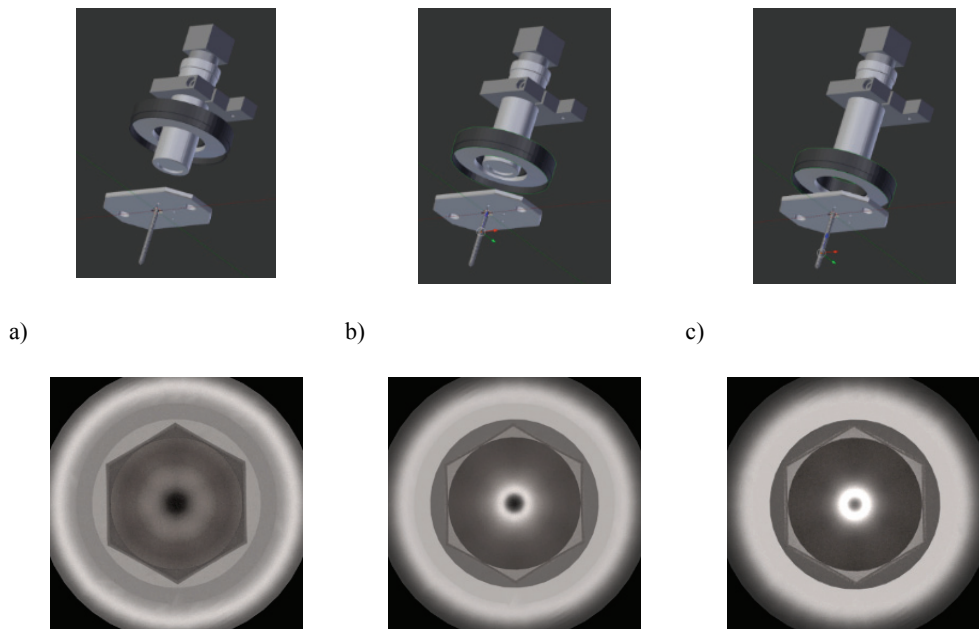
Podany przypadek użycia symulacji optycznych w procesie projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości strukturalnej, nie omawia problematyki przetwarzania i analizy obrazów oraz zarządzania jakością. Uzyskiwane obrazy z kamer nie są analizowane przez operatora, lecz w procesie automatycznym. Dzięki przedstawionym metodom symulacyjnym możliwe było również współbieżne opracowywanie i testowanie algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech, gdyż baza obrazów syntetycznych powstała bardzo szybko, zanim zakończono projekt konstrukcyjny oświetlacza i stanowiska kontrolnego. Podane wyniki wpłynęły na proces projektowania systemu inspekcji wizyjnej poprawności montażu przegubów homokinetycznych. Na podstawie opracowanego projektu wykonano dwa urządzenia przemysłowe, które zostały wdrożone na linii produkcyjnej (rys. 7.20).

7.3. Wkręty kostne

W niniejszym rozdziale wskazano na możliwości zastosowania metod symulacyjnych propagacji światła w obszarze pomiarów optycznych. Celem prezentowanego projektu było opracowanie układu wizyjnego pomiarów wkrętów kostnych do implantów medycznych. W omawianym przykładzie wkręty takie wykonywane są ze stopów tytanu albo stali chirurgicznej. Występują w dwóch średnicach ($\varnothing 4$ i $\varnothing 5$ mm)

oraz długościach od 20–120 mm. Wymagania kontroli jakości obejmują pomiary 16 cech, w tym średnic, długości, parametrów samonacinającego ostrza oraz gniazda sześciokątnego. System przewidziano do stuprocentowej kontroli procesowej. Jako element wytwarzania wyrobów medycznych projektowany system wymaga walidacji w tym spełnienia kryteriów zdolności urządzeń pomiarowych (MSA).

Do wizyjnego pomiaru cech konieczne było zastosowanie aż trzech kamer, a dwie cechy wymagały zastosowania metod kontaktowych. Większość cech jest mierzona na obrazie profilu wkręta. W tym przypadku zastosowano klasyczną metodę podświetlania. W celu osiągnięcia wymaganej dokładności i precyzji pomiarów zastosowano obiektyw telecentryczny oraz skolimowane źródło światła o długości fali $\lambda = 550$ nm. W ten sposób uzyskano korzystniejszą funkcję przenoszenia kontrastu (MTF) przez obiektyw współpracujący z wysokorozdzielczą kamerą. Najistotniejszym wyzwaniem tej części projektu było opracowanie metody adiustacji układu pomiarowego oraz opracowanie metody jej nadzorowania. W ramach rozwiązania tego problemu opracowano zestaw wzorców o charakterystykach geometrycznych i optycznych zbliżonych do punktu pracy układu pomiarowego.

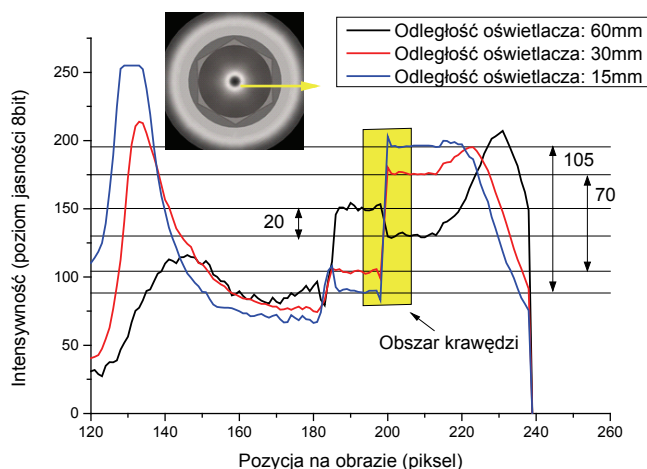


Rys. 7.21. Wpływ wysokości oświetlacza na obrazowanie gniazda sześciokątnego:
a) $z = 60$ mm, b) $z = 30$ mm, c) $z = 15$ mm

Drugi widok umożliwiał pomiary geometryczne gniazda sześciokątnego wkrętów kostnych. W pierwszym etapie projektowania wyznaczono podstawowe parametry obrazowania. Dla uzyskania pola widzenia $7,2 \text{ mm} \times 7,2 \text{ mm}$ przy rozdzielczości $3,0 \mu\text{m}$,

wynikającej z pola tolerancji $65\text{ }\mu\text{m}$, dobrano przetwornik CMOS o rozdzielczości $3840\text{ pix} \times 2748\text{ pix}$. W wypadku wielkości matrycy $1/2''$ i wielkości piksela $1,67\text{ }\mu\text{m}$, wyznaczono powiększenie obiektywu telecentrycznego $\times 0,6374$. Jednak tym razem konieczne było zastosowanie oświetlenia od strony kamery. Dla jego doboru użyto opracowanych metod symulacji propagacji światła.

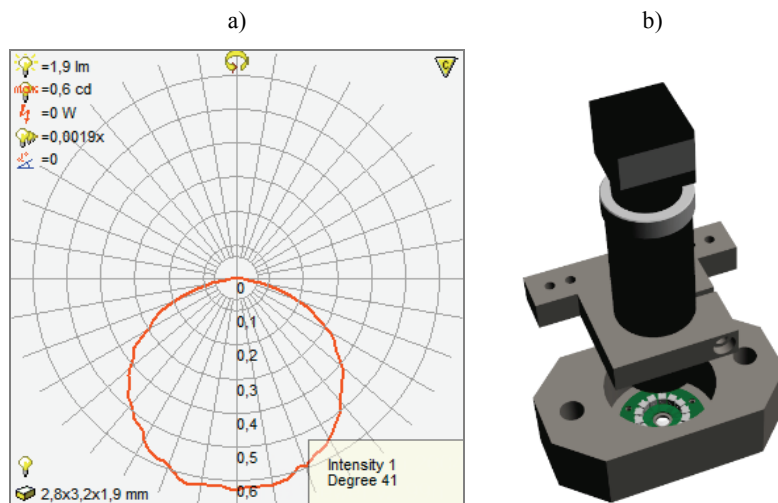
Opracowano model obiektu i układu akwizycji: tj. wkręt kostny, oświetlacz, kamera i obiektyw. Następnie sparametryzowano właściwości powierzchni wkręta. Jest on wykonany z tytanu, powierzchnia zewnętrzna jest piaskowana, powierzchnie zaś gniazda sześciokątne są wynikiem dłutowania (wyciskania). Do oświetlenia użyto modelu oświetlacza diodowego LED_Ring, zaprojektowanego i opisanego w podrozdziale 6.4.



Rys. 7.22. Profile jasności krawędzi (od osi wkręta) i zaznaczony kontrast

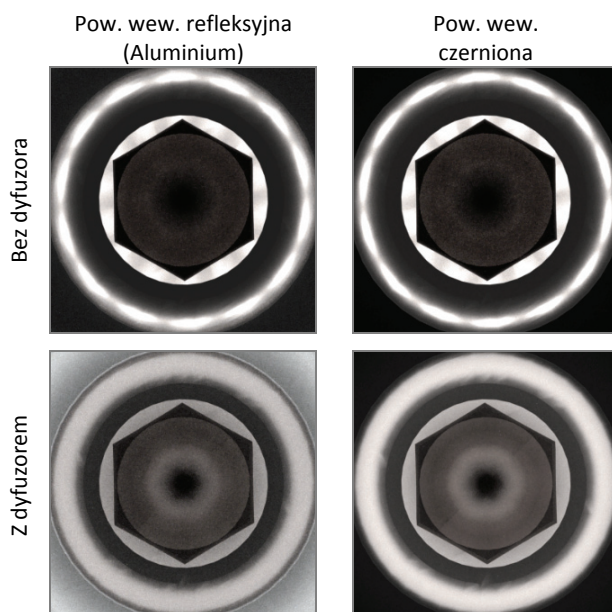
Przeprowadzona seria symulacji (rys. 7.21), podczas której badano wpływ wysokości oświetlacza na kontrast krawędź–tło (rys. 7.22), potwierdziła zalecenia teoretyczne, że miękkie światło uzyskiwane przez przejście przez dyfuzor oświetlacza nie zapewni wysokiego kontrastu na krawędzi, stąd zgodnie z zaleceniami dotyczącymi oświetlania nieciągłości powierzchni zaprojektowano oświetlacz typu ciemne tło.

Opracowano jego model symulacyjny, bazując na geometrii i charakterystykach światłości wytypowanych diod LED. Przyjmując wstępną średnicę oświetlacza ok. 25 mm , do jego budowy użyto 14 kątowych diod LED, przyjmując szerokokątną charakterystykę światłości (120°). Na tym etapie pojawiła się wątpliwość, jaka będzie równomierność natężenia oświetlanej powierzchni, wynikająca z przyjętej rozdzielczości kątowej rozłożenia emiterów, ich odległości i charakterystyki światłości.



Rys. 7.23. Oświetlacz ciemne tło:
a) charakterystyka światłości użytych diod, b) model symulacyjny

Dodatkowo zaprojektowano obudowę oświetlacza, stanowiącą część konstrukcyjno-montażową, przewidując jej wpływ na generowanie światła rozproszonego wewnątrz obudowy.



Rys. 7.24. Radiancja powierzchni łba, oświetlacz LED darkfield

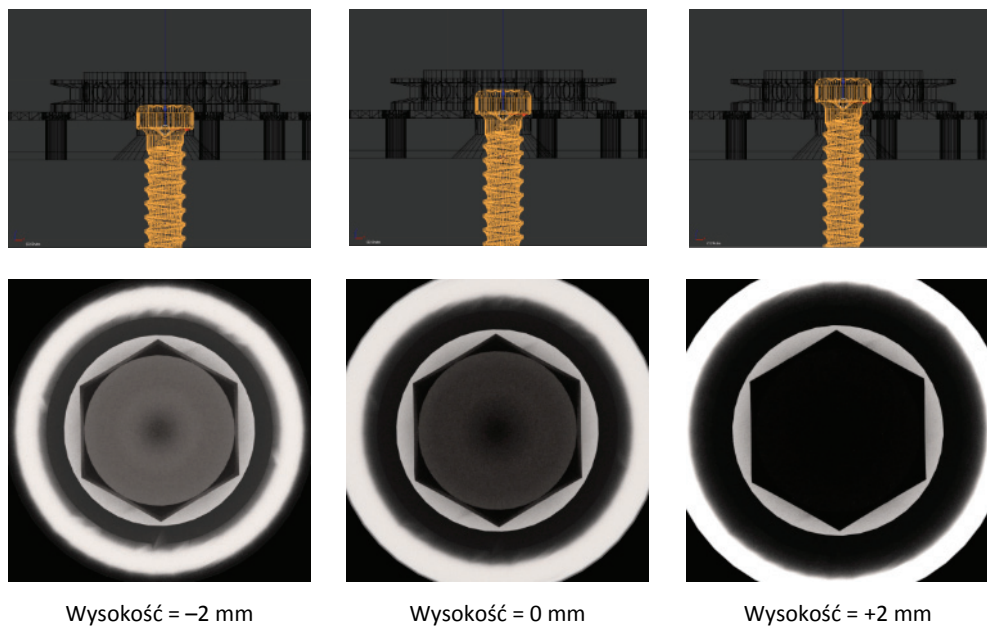
Na rysunku 7.24 przedstawiono obrazy uzyskane pod oświetleniem bezpośrednim powierzchni oraz po zastosowaniu dyfuzora. Zastosowanie dyfuzora redukuje zmienność poziomów jasności z 20% do ok. 5%, jednocześnie jednak zauważalne staje się rozjaśnienie otoczenia tła wkręta.

Uzyskane wyniki symulacji uzasadniają konieczność użycia pierścienia dyfuzyjnego w celu wyrównania radiancji powierzchni łba wkręta. Jednocześnie pokazują, że pierścień dyfuzyjny jest źródłem światła rozproszonego (ang. *stray light*), które odbija się na refleksyjnych, wewnętrznych powierzchniach obudowy. Eliminację tego efektu można osiągnąć przez zwiększenie absorpcyjności powierzchni, czyli jej czernienie.

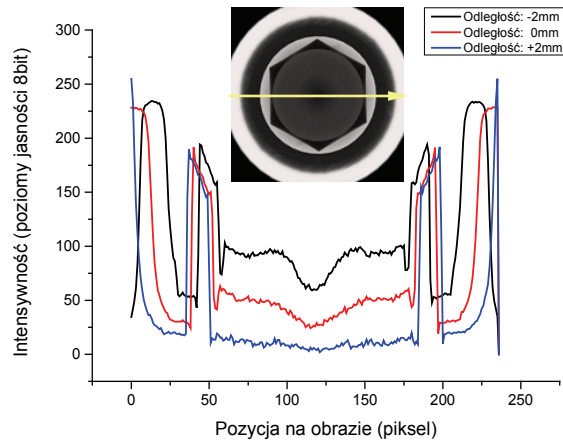
Przeprowadzone badania symulacyjne dostarczają również informacji na temat krawędzi zewnętrznej. Światło rozproszone (ang. *stray light*) doświetla krawędź prostopadłą łba wkręta, która nie odcina się skokowo, ze względu na promień zaokrąglenia.

Kolejne badanie symulacyjne dotyczyło wpływu błędów pozycjonowania wysokości lub wariacji długości wkręta na obrazowanie jego powierzchni czołowej. Wyniki symulacji, dla trzech wysokości: -2 mm, 0 mm i $+2$ mm, co przedstawiono na rys. 7.25.

Powiększenie obrazów jest wynikiem działania kamery perspektywicznej.

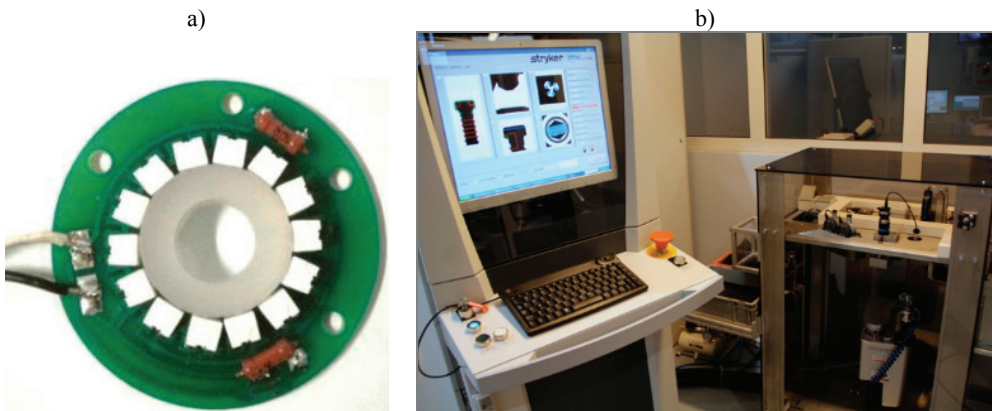


Rys. 7.25. Wpływ odległości łba wkręta od oświetlacza darkfield na obrazowanie



Rys. 7.26. Profile jasności na obrazach, w funkcji zmiany odległości od kamery i wysokości względem oświetlacza

Na podstawie uzyskanych wyników symulacyjnych zoptymalizowano układ akwizycji obrazów, który jest składnikiem systemu pomiarów optycznych wkrętów kostnych.



Rys. 7.27. Stanowisko do automatycznych pomiarów wizyjnych wkrętów kostnych:
a) oświetlacz ciemne tło, b) fotografia stanowiska

8. Podsumowanie i wnioski

Wysoka jakość wytwarzania powoduje, że proces kontroli wizualnej wymaga automatyzacji. Wprawdzie zdolność uczenia przez człowieka i jego elastyczność wyraźnie wyprzedzają możliwości urządzeń technicznych, ale jak wykazano, kontrolę wizualną charakteryzuje mała powtarzalność i odtwarzalność, co ogranicza lub nawet uniemożliwia spełnienie wymagań walidacji systemów wytwórczych, produkujących odpowiedzialne wyroby, np.: dla medycyny, lotnictwa, motoryzacji.

Wśród technicznych środków zapewnienia jakości duże znacznie odgrywają metody optyczne, a zwłaszcza wizyjne. Są one stosowane do pomiarów 2D/3D, inspekcji jakości powierzchni oraz kontroli wewnętrzmateriałowej, inspekcji integralności strukturalnej oraz coraz powszechniej do monitorowania i sterowania procesów i kontroli produktów naturalnych (nieprzetworzonych). Oferowane rozwiązania cechują się coraz to większą złożonością i interdyscyplinarnością, przez którą wpisują się w obszar optomechatroniki.

Proces kontroli wizyjnej obejmuje akwizycję, przetwarzanie i analizę obrazów oraz klasyfikację cech. Istnieje bardzo silny związek między poszczególnymi etapami tego procesu, tj. niewielka zmiana w technice oświetlenia może całkowicie zmienić efekt obrazowania, np. kontrast, pozycję krawędzi przedmiotu, co może zakłócić poprawność wyników analizy obrazów i klasyfikację cech. Najistotniejszą trudność w opracowywaniu algorytmów analizy obrazów stanowi zapewnienie odporności na naturalną zmienność procesu i zakłócenia. Wymaga to obszernej bazy obrazów do testowania, którą zapewnia proces akwizycji. Jednak dotychczasowe metody doboru oświetlenia i parametrów ekspozycji opierają się na podejściu eksperymentalnym. Ich celem jest maksymalizacja kontrastu wykrywanej cechy (krawędź, skaza), ale również zapewnienie odporności na zmienność cech, mieszczącą się w ramach tolerancji materiałowej, konstrukcyjnej i technologicznej wyrobów oraz zapewnienie odporności na zakłócenia i minimalizację kosztową opracowanego rozwiązania. Osiągnięcie celów optymalizacyjnych, w ograniczonym zbiorze przykładów obiektów i cech, na drodze heurystyki eksperymentalnej i „intuicji”, nie jest efektywnym i odtwarzalnym działaniem inżynierskim.

Zaproponowano zastosowanie metod i narzędzi numerycznej propagacji światła, dla wsparcia procesu projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania.

Celem takiego podejścia jest:

- budowanie bazy wiedzy jakościowej w dziedzinie optycznej i mechanicznej z zastosowaniem modeli,
- szybkie zweryfikowanie koncepcji układu akwizycji wizyjnej,
- zoptymalizowanie i uodpornienie projektowanego układu akwizycji obrazów,
- współbieżność procesu testowania i optymalizacji algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech, przez wcześniejsze dostarczenie bazy obrazów wirtualnych wad,
- przygotowanie do walidacji wdrażanego systemu wizyjnego poprzez możliwość rozszerzonego badania wrażliwości systemu akwizycji oraz algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji ich cech.

Stosowanie narzędzi CAx wspierających projektowanie w mechanice i budowie maszyn jest powszechnie stosowane. Mechatronika reprezentowana przez mechaników wprowadza interdyscyplinarność również w dziedzinie projektowania i symulacji wielodyscyplinowych. Jednak symulacje optyczne pozostają domeną fizyków, którzy używają ich do projektowania optycznego (ODS) metodami sekwencyjnymi albo niesekwencyjnymi. Powszechne jest również projektowanie oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego, użytkowego i dekoracyjnego, z zastosowaniem narzędzi symulacyjnych. **Oryginalną propozycją autora jest zastosowanie grafiki komputerowej do projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania.**

Najważniejszym narzędziem są tu algorytmy renderingu do fotorealistycznych wizualizacji oraz animacji. Metody i narzędzia takie, z uwagi na swoje „artystyczne” przeznaczenie, nie są adresowane do postulowanego zastosowania. W przeciwieństwie do oprogramowania do symulacji optycznych ODS (ang. *Optical Design Software*), nie oferują wsparcia procesu weryfikacji przebiegu promieni. Ze względu na projektowanie CAx fundamentalne jest jednak wymaganie zgodności między modelem symulacyjnym a systemem implementowanym na jego podstawie. Dla osiągnięcia takich wyników podjęto badania w zakresie możliwości i ograniczeń modeli numerycznych propagacji światła i metod syntezy modeli symulacyjnych oraz równolegle, identyfikację parametrów optycznych komponentów procesu akwizycji obrazów.

W wyniku zrealizowanych badań sformułowano następujące wnioski i spostrzeżenia w kontekście zastosowania renderingu do wsparcia procesu projektowania systemów wizyjnych.

1. Istnieje szeroka dostępność do wiedzy i narzędzi grafiki komputerowej, zarówno do rozwiązań komercyjnych, jak i darmowych. Narzędzia te wykorzystują najnowsze technologie informatyczne, takie jak wieloprocessorowość, przetwarzanie przez procesory graficzne (GPU) oraz przetwarzanie rozproszone w sieci, stąd są niezwykle wydajne. Szczególnie dynamicznie rozwijają się projekty typu otwartego oprogramowania, choć w tym przypadku obserwuje się braki w dokumentacji. Wiedza dotycząca

grafiki komputerowej jest bardzo rozległa, gdyż dotyczy zarówno umiejętności modelowania graficznego, jak i metod numerycznych propagacji światła i przykładów zastosowań. Dzięki jej dostępności, nie są wymagane duże inwestycje związane z jej pozyskaniem.

2. Rendering jest adresowany do odbiorcy masowego, bez gruntownego przygotowania optycznego. Jest nim przede wszystkim twórca, artysta, projektant architekt, stąd dokumentacja użytkownika często trywializuje opisy zjawisk fizycznych i metody ich modelowania, posługując się nieprecyzyjnym nazewnictwem. Sytuacja taka utrudnia przenoszalność projektów między różnymi środowiskami symulacyjnymi. Przykładowo, jedna z implementacji nazywa model rozpraszania światła na powierzchni „metal”, jednak nie ujawnia, jaki model matematyczny jest podstawą jego implementacji. W takiej sytuacji konieczne jest eksperymentalne zbadanie i ocena modelu lub analiza kodu źródłowego, jeśli jest to oprogramowanie typu *open-source*.

3. Dzięki uproszczeniom modelowania w środowiskach renderujących możliwe jest bardzo szybkie uzyskanie fotorealistycznego efektu symulacji. Jednak zastosowanie podanych metod i narzędzi do wsparcia procesu projektowania systemów wizyjnych wymaga pełnej zgodności fizycznej między modelem a rzeczywistym obiektem lub zapewnienia równoważności. Dla twórcy, artysty, czy projektanta liczy się efekt jego kreatywnych zabiegów, dopuszczający możliwość retuszowania dzieła. Dla projektanta inżyniera, konieczna jest wiedza, jaki błąd występuje między wynikiem uzyskanym na drodze symulacji a wynikiem uzyskanym w świecie rzeczywistym, oraz jak urzeczywistnić wirtualny projekt. Oznacza to, że dla środowiska grafiki komputerowej konieczne jest nałożenie zredukowanych wymagań jak dla ODS.

4. Do modelowania geometryczno-optycznego poszczególnych komponentów systemu wizyjnego, stosowane są daleko idące uproszczenia. W kontekście modelowania kamer, parametryzowana jest jedynie rozdzielczość i wielkość sensora oraz parametry ekspozycji (czułość ISO, szybkość migawki i korekcja gamma). Obiektów rozpatrywany jest jak soczewka cienka, dla której parametryzowana jest jedynie ogniskowa albo kąt widzenia oraz przysłona. W przypadku bardziej wymagających układów obrazowania, gdy charakterystyka liniowości i czułości spektralnej oraz szumy detektora są istotne, bądź w przypadku obiektywów, ich aberracji, dystorsji i funkcji przenoszenia kontrastu (MTF), konieczne jest sięgnięcie po narzędzia ODS albo implementacja własnych rozszerzeń algorytmów renderowania.

5. Do modelowania źródeł światła dostępne są prymitywy oświetleniowe, takie jak źródło punktowe, powierzchnia emitująca światło. Jednak dla modelowania systemów wizyjnych, najważniejsza jest możliwość kształtowania bryły fotometrycznej na podstawie charakterystyki światłości. Coraz powszechniejsze jest jej wprowadzanie jako struktury danych w formacie IES wspieranej przez charakterystyki spektralne. Niestety, mimo standaryzacji prowadzonej przez stowarzyszenie IESNA,

często dochodzi do niekompatybilności dotyczącej interpretacji tego formatu danych. Jednak, dzięki dostępności specyfikacji oraz jawnemu formatowi danych w postaci tekstowej, ich skorygowanie nie jest problematyczne. Format IES definiuje jednak światłość źródła skupionego, a w przypadku oświetlaczy MV zachodzi konieczność modelowania bryły fotometrycznej źródła rozciągniętego. Opracowana metodyka pomiarów z użyciem fotogoniometru pola bliskiego oraz analiza wyników umożliwia znacznie precyzyjniejsze scharakteryzowanie oświetlaczy systemów wizyjnych. W wyniku pomiaru uzyskiwany jest zbiór wektorów odzwierciedlających światłości kierunkowe powierzchni emitera. Do użycia tych danych pomiarowych, zapisywanych w postaci plików RayFile, opracowano i przebadano rozwiązanie analogiczne do stosowanego w ODS, które automatycznie generuje model źródła rozciągniętego. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowość algorytmów i ich implementacji. Jednak opracowanie takiego rozszerzenia oraz zapewnienie długoterminowego utrzymania jego zgodności implementacyjnej z dynamicznie rozwijającym się środowiskiem renderującym wymaga znacznych nakładów informatycznych.

6. W kontekście jakości modelowania źródeł światła zwrócono uwagę na brak narzędzi i metod umożliwiających ich weryfikację. W przypadku OSD detektory natężenia światła oraz detektory polarne, umożliwiające pomiary światłości należą do podstawowej ich funkcjonalności. W odpowiedzi na potrzebę rejestracji bryły fotometrycznej modelowanych układów, opracowano goniometr oraz detektor polarny. Przeprowadzono badania różnych konfiguracji z użyciem sfery obrazującej oraz kamery perspektywicznej, z rzutowaniem planarnym oraz panoramiczną. Układy zostały przebadane pod kątem zniekształceń geometrycznych oraz poprawności radiometrycznej. W wyniku badań zaproponowano rozwiązanie stosujące kamerę perspektywną obrazującą wewnętrzną powierzchnię sfery, zapewniając odwzorowanie liniowe. Zakłócenie radiometryczne od odbić wyższych rzędów, skutkujące powstaniem światła rozproszonego, jest minimalizowane przez ograniczanie poziomu rozpraszania światła do 5%. Opracowane rozwiązanie cechuje się prostotą implementacyjną i nie wymaga rozszerzania algorytmów renderujących.

7. Modelowanie wyglądu powierzchni jest największym wyzwaniem, zarówno dla podejścia *stricte* optycznego (ODS), jak i grafiki komputerowej. Ta druga, przede wszystkim oferuje katalogi materiałów, z których użytkownik dobiera najbardziej odpowiednie przykłady powierzchni. Od jego subiektywnej oceny zależy zgodność między modelem a jego rzeczywistym odpowiednikiem. Na wyższym poziomie zaawansowania udostępniana jest możliwość konfiguracji rozpraszania światła przez wybór modelu rozpraszania, oraz jego parametryzację. Dla metali jest to parametr anizotropowej szorstkości (UV), współczynnik załamania światła oraz teksturowanie. Mechanizm teksturowania opiera się na mapach (obrazach), które umożliwiają kształtowanie barwy powierzchni, jej struktury topograficznej (mapa

normalnych lub przemieszczeń), a często również poszczególnych komponentów zjawiska rozpraszania światła (dyfuzyjnego i odbiciowego). Mapy takie pozwalają na modelowanie anizotropii powierzchni, a szczególnie jej niedoskonałości i wad. Jak pokazały przeprowadzone badania, do ich uzyskania mają zastosowanie metody metrologii powierzchni, dzięki którym, na podstawie analizy w dziedzinie częstotliwościowej, możliwe jest określenie wymagań w dziedzinie przestrzennej. Trudności modelowania polegają jednak na prawidłowej parametryzacji modeli rozpraszania światła. Niezależnie, czy dotyczy to modeli fizycznych czy empirycznych, ich parametryzacja nie bazuje jednak na wartościach bezpośrednio zmierzonych w dziedzinie geometrycznej czy optycznej.

8. Środowiska renderujące nie oferują żadnego wsparcia w ocenie jakości zamodelowania zjawiska rozpraszania światła. Jest to szczególnie krytyczne, gdyż znajdują tu zastosowanie modele równoważne składające się z wielu komponentów. Opracowana metoda porównania wyników symulacyjnych BRDF, bazująca na wirtualnym skaterometrze, z wynikami rzeczywistych pomiarów, umożliwia ocenę poprawności modelowania. Dla obiektów, których pomiar BRDF nie jest możliwy za pomocą sfery obrazującej, zbadano zastosowanie wiązki o niewielkiej średnicy i rejestracji rozkładu natężenia światła rozproszonego na ekranie. Przeprowadzone badania wykazały, że kształtowanie charakterystyki rozpraszania światła w modelach symulacyjnych, powierzchni metalowych po obróbce skrawaniem, wymaga użycia teksturowania. Mapy takie muszą jednak zawierać dostateczny udział składowych niskoczęstotliwościowych, gdyż ślady po narzędziu obróbkowym nie zostaną prawidłowo odwzorowane. Stąd wysokorozdzielcze skanowanie SGP wymaga łączenia pojedynczych obrazów, jednak ich stosowanie silnie obciąża model pod względem złożoności obliczeniowej.

9. Środowiska renderujące nie oferują żadnej funkcjonalności w zakresie analizy propagacji światła i jej optymalizacji oraz badań wrażliwości. Zbadano możliwość użycia funkcjonalności animacji do automatycznego wyznaczania wpływu zmiany parametrów geometrycznych i optycznych sceny i obiektu. Przesunięcia liniowe i kątowe obiektów, w tym powiązania parametryczne, nie stanowią żadnej trudności implementacyjnej. Dzięki tekstowemu formatowi wprowadzania danych do rendera, modyfikacja parametrów geometrycznych, a nawet optycznych, w tym światłości i parametrów rozpraszania światła na powierzchniach jest dostępna. Stąd możliwość integracji zewnętrznych środowisk optymalizacji wielokryterialnej jest dostępna.

10. Zaproponowane modele geometryczno-optyczne oświetlaczy mogą być efektywną metodą wymiany informacji między wytwórcami komponentów a ich użytkownikami. Dostarczają parametry optyczne, które aktualnie nie są przekazywane. Upublicznienie modelu oświetlacza nie musi oznaczać ujawnienia jego wszystkich szczegółów konstrukcyjnych, co oferują modele równoważne.

Aby wykazać użyteczność przeprowadzonych badań i rozwiązań, podano wyniki opracowanych zadań realizacji rzeczywistych projektów, zakończonych wdrożeniem.

1. W projekcie kontroli czoła wałeczków łożysk tocznych dzięki symulacjom optycznym zweryfikowano koncepcję obrazowania sferycznej powierzchni wałeczka łożyska tocznego. Wyznaczono przedział odległości oświetlacza oraz wpływ osiowości pozycjonowania na obrazowanie. Modelowano wady powierzchni do weryfikacji koncepcji oświetlania i testowania algorytmów analizy obrazów.

2. W projekcie inspekcji poprawności montażu przegubu homokinetycznego zweryfikowano koncepcję obrazowania luminacji oświetlacza przez lustrzaną powierzchnię kulek i koszyka oraz zoptymalizowano geometrię oświetlacza strukturalnego. Zbadano skuteczność doświetlania kulki umieszczonej w środku, na dnie korpusu oraz określono zakres kątowy widoczności kulki.

3. W projekcie wkretów kostnych analizowano wpływ oświetlania na kontrast krawędzi sześciokątnego gniazda pod klucz. Dla projektowanego oświetlacza ciemnego tła oceniono wpływ kierunkowości diod LED i dyfuzora na jednorodność oświetlania powierzchni oraz wykryto wpływ dyfuzora i jakości wykonania powierzchni obudowy na światło rozproszone.

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań, należy stwierdzić, że jest możliwe wsparcie procesu projektowania systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania za pomocą metod i narzędzi symulacyjnych propagacji światła z grafiki komputerowej. Dzięki nim jest możliwa szybsza weryfikacja koncepcji układu akwizycji oraz jego optymalizacja. Ponadto skrócenie czasu projektowania i redukcja jego kosztów, osiągane są dzięki zrównoległaniu działań inżynierskich w zakresie optoelektroniki i programowania. Obszerna baza obrazów syntetycznych, z różnymi przykładami skaz oraz skutkami zmienności parametrów produkcyjnych i zakłóceń, umożliwia pełniejsze przetestowanie algorytmów analizy obrazów i klasyfikacji cech. W konsekwencji walidacja systemu wizyjnego może być lepiej przygotowana.

Kontynuację badań powinny stanowić prace nad zagadnieniem odwrotnym do modelowania powierzchni, tj. jak efektywnie, na podstawie pomiarów mechaniczno-optycznych modelować powierzchnie wraz ze skazami w środowiskach wirtualnych. W pierwszej kolejności należy rozwinąć problematykę modelowania skazy powierzchni, co jedynie zasygnalizowano w niniejszej pracy. Używany do badań skaterometr wymaga niestety dużych, płaskich powierzchni pól pomiarowych, stąd wynika jego ograniczone zastosowanie w przypadku rzeczywistych części maszyn. Konieczne jest zatem opracowanie metody umożliwiającej bardziej lokalny pomiar, ale jednocześnie dostarczenie informacji o składowych niskoczęstotliwościowych, gdyż ta w sposób istotny kształtuje charakterystykę BRDF. Rozwiązanie takie wymaga ponadto oceny zdolności pomiarowej, gdyż niepewność rozpraszania światła silnie zależy od parametrów geometryczno-absorpcyjnych powierzchni.

Przedstawiona w pracy metoda oceny jakości zamodelowania zjawiska rozpraszania światła wymaga rozwinięcia w kierunku automatycznego dostrojenia modelu. W pracy przedstawiono założenia do jej realizacji z użyciem wieloczynnikowej opty-

malizacji i danych pomiarowych. Osiągnięcie takich możliwości jest znaczącym krokiem w rozwoju metod projektowania, z użyciem symulacji propagacji światła.

Z punktu widzenia użytkowników przydatne byłoby tutaj rozszerzenie atlasu struktury geometrycznej powierzchni (np. Oczóś, Liubimov [209]) o jej charakterystyki BRDF. Katalog taki pozwoliłby znacznie efektywniej i precyzyjniej modelować optycznie powierzchnie metalowe po obróbce, ale również pomóc w kształtowaniu i opisie ich właściwości estetycznych.

W zakresie źródeł światła celowe jest opracowanie wirtualnego fotogoniometru. Dzięki niemu możliwa jest bardziej jednoznaczna ocena emiterów złożonych i rozciągłych. Opracowany algorytm modelowania źródeł rozciągłych na podstawie danych pomiarowych istotnie rozszerza funkcjonalność środowisk renderujących, jednak dalszy jego rozwój wymagałby jego oficjalnej integracji z głównym kodem środowiska renderującego. W przeciwnym razie jego pielęgnacja jest zbyt kosztowna.

Wyniki zrealizowanych badań jest również zweryfikowana propozycja charakteryzacji oświetlaczy MV za pomocą modeli geometryczno-optycznych. Należałoby zainteresować producentów oświetlaczy taką możliwością, dzięki której ich produkt będzie znacznie precyzyjniej charakteryzowany. Wymaga to jednak jednoczesnego rozwoju platformy symulacji optycznych do projektowania systemów wizyjnych. Zdaniem autora, osiągnięte wyniki badań są dobrą podstawą do podjęcia takich działań na poziomie rozwojowym i komercyjacyjnym.

Zgodnie z wynikami przeprowadzonej analizy literaturowej pod kątem aplikacji systemów wizyjnych, zasadna jest kontynuacja badań w kierunku projektowania wizyjnych systemów monitorowania i sterowania procesami. Wyzwanie to wymaga znacznie bardziej złożonego modelu obiektu, który nie jest stały w czasie. Występują tu również bardziej zaawansowane źródła promieniowania, szerokospektralne lub koherentne (laser).

Z całą pewnością omówione metody i narzędzia grafiki komputerowej nie sprostały postawionym wyzwaniom, ale zdaniem autora stanowią dobre przygotowanie do sięgnięcia po bardziej zaawansowane, nie zapominając jednak, aby *Everything should be made as simple as possible, but no simpler* [Albert Einstein].

Aneks

Tabela A.1. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do pomiarów 2D i 3D

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Binarne	Osiowość łożyska ślizgowego	2002	[75]
	Wymiarowanie płyt grzejnych	2002	[155]
	Wymiarowanie średnicy łożyska	2004	[159]
	Pomiar zużycia ściernic	2006	[292]
	Średnica wewnętrzna łożyska	2007	[112]
	Kompensacja zużycia elektrody EDM	2008	[338]
	Chropowatość powierzchni toczzonego wałka	2009	[270, 271]
	Wymiarowanie czoła wałeczków łożysk	2009	[245]
	Geometria zębów pił	2010	[342]
	Pomiary średnicy wałka	2011	[324]
Skala szarości i kolor	Właściwości fizykochemiczne materiałów	2003	[260]
	Pomiary części maszyn	2004	[309, 310]
	Pomiary objętościowe materiałów lewitujących	2005	[44]
	Pomiary parametrów geometrycznych cząstek kruszywa	2005	[197, 198]
	Pomiary średnicy łożyska	2005	[160]
	Rozpływność lutowia	2007	[28]
	Pomiary kąta obrotu	2010	[164]
	Pomiar chropowatości	2010	[24]
	Pomiary gwintów wewnętrznych	2011	[119]
	Pomiary cząstek	2011	[187]
3D-przestrzenny	Pomiary dużych obiektów	2004	[82]
	Płaskość i bicie dysków pił tarczowych	2008	[251]
	Matryca po elektrodrażeniu	2010	[30]
	Kontrola narzędzia i produktów	2010	[151]
	Pomiary średnicy drutu wykonanego z materiału z pamięcią kształtu	2010	[237]
	Pomiary narzędzi skrawających do obróbki	2011	[277]
	Kształt krawędzi przedmiotu po cięciu laserowym	2012	[276]
	Pomiary średnicy liny	2012	[278]
	Wymiarowanie długości okrągłaków	2013	[319]

Tabela A.2. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do inspekcji jakości powierzchni metalowych

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Skala szarości i kolor	Inspekcja powierzchni metalowych	2002	[34]
	Wady na powierzchniach prowadnic zaworów	2003	[224]
	Inspekcja połączeń lutowanych	2005	[84]
	Wady powierzchni zacisków po galwanizacji	2005	[47]
	Powierzchnie boczne i czołowe wałeczków łożysk	2006	[244]
	Powierzchnia szyn kolejowych	2007	[176]
	Pomiar chropowatości powierzchni	2007	[199]
	Właściwości narzędzi ściernych	2007	[133]
	Czoła wałeczków łożysk tocznych	2008	[52]
	Wykrywanie korozji	2009	[245]
	Powierzchnia boczna łożyska tocznego	2010	[74]
	Szlifowanie powierzchni tocznych wału korbowego	2011	[25]
	Powierzchnia kulek łożyskowych	2011	[77]
	Powierzchnia gwintów wewnętrznych	2011	[119]
Rozpraszanie światła	Inspekcja powierzchni podczas obróbki toczeniem	2001	[172]
	Ostrze noża/żyłki	2003	[173]
	Narzędzie obróbkowe przy toczeniu	2004	[166]
	Powierzchnie napawane	2008	[138]
	Parametry powierzchni	2011	[296]
3D-przestrzenne	Powierzchnia odlewów	2012	[152]

Tabela A.3. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do inspekcji jakości powierzchni niemetalowych

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Skala szarości i kolor	Pęknięcia na asfalcie	2005	[90]
	Płytki ceramiczne	2005	[207]
	Powierzchnia prętów paliwowych – energetyka atomowa	2005	[306]
	Ocena powierzchni betonu	2010	[347]
	Powierzchnia papieru (krzyżowanie linii)	2012	[255]
3D-przestrzenny	Topografia/chropowatość betonu	2012	[118]

Tabela A.4. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do inspekcji materiałów transparentnych

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Skala szarości i kolor	Ekrany monitorów CRT	2005	[218]
	Noski okularowe	2006	[104]
	Rury szklane	2006	[304]
	Wady w foliach polypropylenowych	2008	[94]
	Wady w szkłe	2011	[341]
	Wady powierzchni i wew. ogniw fotowoltaicznych	2011	[56]
X-RAY	Odlewy aluminiowe	2003	[182]
	Inspekcja odlewów	2006	[165]
	Inspekcja obręczy kół	2011	[49]

Tabela A.5. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do inspekcji integralności strukturalnej

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Obraz binarny	Poprawność struktury ścieżek	2006	[35]
Skala szarości i kolor	Poprawność zanitowania trzpienia	2006	[304]
	Zrobotyzowane wykrywanie brakujących klipsów	2008	[143]
	Poprawność montażu osłony łożyska tocznego	2009	[132]
	Kompletność montażu łożyska tocznego	2010	[333]
	Poprawność czoła wałeczków łożysk tocznych	2010	[101]
	Uszkodzenia beczek piwa	2010	[158]
	Poprawność uszczelnienia w łożyskach tocznych	2010	[331]
	Kompletność zacisków (nakrętki) na konstrukcji	2011	[184]
	Przykład inspekcji struktury układów scalonych	2012	[54]
3D-przestrzenny	Poprawność montażu SMD	2004	[273]
	Kontrola poprawności elementów pneumatycznych	2010	[150, 275]
	Poprawność montażu spłonki do naboju	2010	[303]

Tabela A.6. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do monitorowania i sterowania procesami wytwarzania

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Skala szarości i kolor	Monitorowanie cięcia i spawania laserowego	2002	[31]
	Automatyczne nawigowanie traktorem na polu	2003	[254]
	Kontrola materiałów tekstylnych	2005	[48]
	Monitorowanie jeziora spawalniczego	2005	[16]
	Monitorowanie procesów obróbki laserowej	2005	[272]
	Analiza ruchu, przepływu cząstek	2005	[50]
	Monitorowanie procesu obróbki laserowej CO ₂	2005	[89]
	Połączenia układów scalonych	2006	[219]
	Pomiary amplitudy wibracji	2007	[163]
	Adaptacyjne pozycjonowanie obróbki zdalnej	2008	[284]
	Wizja dla robotyki	2008	[300]
	Monitorowanie obróbki laserowej	2008	[134]
	Odczyt wskazań cyfrowego miernika temperatury dla automatyzacji kalibracji	2009	[315]
	Śledzenie szczeliny dla spawania laserowego	2009	[238]
	Monitorowanie jeziora spawalniczego	2009	
	Monitorowanie i sterowanie procesem cięcia laserowego z tlenem	2009	[81]
	Galvoscaner – automatyczna adiustacja	2009	[283]
	Monitorowanie jakości przetopu w spawaniu głębokim	2009	[122]
	Automatyczne nawigowanie pojazdem rolniczym identyfikacja położenia owoców	2010	[37]
	Nawigowanie robotem podczas operacji chirurgicznych	2010	[217]
	Monitorowanie pęknięcia połączeń montażowych	2010	[344]
	Pleciecie nici/włóczki	2011	[45]
	Kontrola połączeń spawanych technologią MIG	2011	[265]
	Monitorowanie procesu spawania	2011	[131]
	Wizyjna detekcja drgań obiektów	2011	[297]
	Monitorowanie procesu pęknięcia	2011	[100]
	Monitorowanie i sterowanie procesem spawania laserowego	2012	[123]
	Kontrola jakości przetopu w spawaniu głębokim	2012	[205]
3D-przestrzenne	Wizja dla robotyki	2012	[178]

Tabela A.7. Zestawienie przykładowych zastosowań systemów wizyjnych do inspekcji materiałów biologicznych

Typ sensoryczny	Aplikacja	Rok	Referencja
Skala szarości i kolor	Kolor złotych rybek	2002	[318]
	Inspekcja powierzchni desek	2002	[34]
	Masa włóknista i papier	2002	[34]
	Chropowatość powierzchni paneli	2004	[253]
	Inspekcja jakości owoców	2005	[18]
	Kontrola powierzchni paneli	2005	[227]
	Inżynieria tkankowa	2005	[336]
	Kontrola jabłek	2005	[312]
	Inspekcja tarcicy (drewno)	2007	[206]
	Ostrygi	2007	[67]
	Monitorowanie wzrostu zielonej sałaty	2008	[156]
	Strategia pielienia plantacji	2008	[99]
	Różne przykłady kontroli roślin i zwierząt	2009	[72]
	Klasyfikacja insektów	2009	[282]
	Odciski palców Tęczówka oka ludzkiego Rozpoznawanie twarzy Obrazy mikroskopowe	2009	[43]
	Rozpoznawanie gatunków zwierząt (dzikie/chronione)	2010	[37]
	Sortowanie rodzynek	2010	[17]
	Mięso wołowe	2011	[58]
	Badania kryminalistyczne	2011	[195]

Tabela A.8. Zestawienie anglojęzycznych nazw skaz powierzchni

Lp.	Występowanie	Nazwy skaz powierzchni	Źródło
1	Powierzchnie (wg normy PN-EN ISO 8785:2000)	Recession: groove, scratch, crack, pore, blowhole, shrinkage hole, chink, wane, concave buckle, dent, Raising: wart, blister, convex buckle, scale, inclusion, burr, flash, deposit, Combined surface imperfection: crater, lap, scoring, chip rest, Area or appearance imperfections: skidding, erosion, corrosion, pitting, crazing, spot, discoloration, streak, flaking,	[3]
2	Blachy walcowane na zimno	Skin lamination, seam, silver, scratch sticker wrench, chatter marks, coil break, edge stain, steel pitch and digs scrap marks, roll marks, pick-up, coil digs, indents, fleck scale, jet scale, scale pitch, sand pitch, rust spot carbon pick-up, feather marks, water strain holes, serrated edge, oxidized edge	[26]
3	Waleczki łożysk tocznych	Material flaw, grinding flaw, scratch, chafe mark, spot	[220]
4	Powierzchnia aluminium	Hole, crack	[346]
5	Powierzchni metalowe	Holes, stains, scratches, pilling, indentation, burrs and other ill-defined defects	[337]
6	Powierzchnie metalowe błyszczące	Burr, loophole, oil stain, peeling, perforation, pit, scratch	[337]
7	Blacha biała	Rust, lamination, rollmark, scratch, weld, stone	[212]
8	Drut nawojowy	Blister, lump, inclusion and manufacturing flaw (lack of coating, neck-downs)	[287]
9	Powierzchnia po galwanizacji	Surface quality, dimensional characteristics, deposit structure and deposit thickness	[47]
10	Powierzchnia po galwanizacji	Dent, bump, scratch	[259]
11	Powierzchnia po galwanizacji	Dull or burnt electroplating, no deposit, poor coverage, tarnish	[47]
12	Powierzchnie ceramiczne łożysk	Flaw and open crack, flake and close crack, scratch, wear	[339]

Literatura

- [1] *Wady szkła i wyrobów szklanych – Podział, nazwy i określenia*, PN-76/B-13200, 1976.
- [2] *Wymagania geometryczne wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni – Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową*, PN-ISO 4288:1997, 1997.
- [3] *Specyfikacje geometrii wyrobów, Skazy powierzchni, Terminy, definicje i parametry*, PN-EN ISO 8785:2000, 2000.
- [4] ANSI approved standard file format for electronic transfer of photometric data and related information: IES LM-63-02 (R2008), 2002.
- [5] *Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach*, PN-EN 12 464-1, 2004.
- [6] Dyrektywa 2004/108/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej oraz uchylająca dyrektywę 89/336/EWG, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 2004, 24–37.
- [7] Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 2006, 24–86.
- [8] Dyrektywa 2006/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 2006, 10–19.
- [9] *Canadian lumber grading manual*, SKU:0003, 2010.
- [10] *Machine Vision Illumination Techniques*: firstsight Vision. 2010.
- [11] *Bezpieczeństwo fotobiologiczne lamp i systemów lampowych*, PN-EN 62471:2010P, 2010.
- [12] *Advanced Illumination*, <http://www.advancedillumination.com>, dostęp: wrzesień 2013.
- [13] *Optical Design Program: User's Manual*: Radiant Zemax, 2013.
- [14] *Schott-Moritex*. Available: <http://www.schott-moritex.com>.
- [15] *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 71: Wzorce programowane*, PN-EN ISO 25178-71:2013-06E, 2013.
- [16] Aalderink B.J., Aarts R., Jonker J.B., Meijer J., *Experimental observations of the laser keyhole welding process of AA5182*, 2005.
- [17] Abbasgolipour M., Omid M., Keyhani A., Mohtasebi S., *Sorting raisins by machine vision system*, Modern Applied Science, Vol. 4, No. 2, 2010, 49–60.
- [18] Abdullah M., Fathinul-Syahir A., Mohd-Azemi B., *Automated inspection system for colour and shape grading of starfruit (Averrhoa carambola L.) using machine vision sensor*, Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 27, No. 2, 2005, 65–87.
- [19] Adamczak S., *Pomiary geometryczne powierzchni: Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [20] Ashdown I., Salisbury M., *A near-field goniospectroradiometer for LED measurements*, International Optical Design Conference: SPIE, 2007, 634215-634215-11.
- [21] Astels D., *Test-driven development: A practical guide*, Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 2003.

- [22] Astrand E., Astrom A., *A single chip multi-function sensor system for wood inspection*, [w:] Pattern Recognition, 1994. Vol. 3 – Conference C: Signal Processing, Proceedings of the 12th IAPR International Conference on: IEEE, 1994, 300–304.
- [23] Augerson C.C., Messinger J.M., *Controlling the refractive index of epoxy adhesives with acceptable yellowing after aging*, Journal of the American Institute of Conservation, 1993, 311–314.
- [24] Babu G.D., Babu K.S., Gowd B.U., *Evaluation of surface roughness using machine vision*, 2010 International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT): IEEE, 2010, 220–223.
- [25] Bamberger H., Hong E., Katz R., Agapiou J., Smyth S., *Non-contact, in-line inspection of surface finish of crankshaft journals*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 2011, 1–9.
- [26] Barker A., Brook R., *A design study of an automatic system for on-line detection and classification of surface defects on cold-rolled steel strip*, Optica Acta: International Journal of Optics, Vol. 25, No. 12, 1978, 1187–1196.
- [27] Batchelor B.G., *Machine Vision Handbook*, Springer London. Available: <http://www.springerreference.com/docs/html/chapterdbid/305774.html> (2012, lut. 03). 2012.
- [28] Bąkała M., Koszmider T., *System wizyjny do wyznaczania rozplywności lutów*, Automatyka, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Vol. T. 2007, 11, z. 3.
- [29] Beck K., *Test-driven development: By example*, Addison-Wesley, Boston 2003.
- [30] Bednarczyk J., Sioma A., *Zastosowanie metody wizji aktywnej do oceny stopnia odtworzenia matrycy dla wyrobów kształtowanych elektrodynamicznie*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, Vol. 14, 2010.
- [31] Beersiek J., *New aspects of monitoring with a CMOS camera for laser materials processing*, Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics: LIA, 2002.
- [32] Bessho M., Shimizu K., *Latest trends in LED lighting*, Electronics and Communications in Japan, Vol. 95, No. 1, 2012, 1–7.
- [33] Beyerer J., Puente L.F., *Suppression of inhomogeneities in images of textured surfaces*, Optical Engineering, Vol. 36, No. 1, 1997, 85–93.
- [34] Bharati M.H., *Multivariate Image Analysis and Regression for Industrial Process Monitoring and Product Quality Control*, Doctoral Thesis, McMaster University, Open Access Dissertations and Theses, Paper 1503, 2002.
- [35] Bhuvanesh A., Ratnam M.M., *Automatic detection of stamping defects in leadframes using machine vision: Overcoming translational and rotational misalignment*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 32, 2006, 1201–1210.
- [36] Biegelbauer G., Vincze M., *3D Vision-guided bore inspection system w Computer Vision Systems*, 2006 ICVS '06, IEEE International Conference on: IEEE, 2006, 22.
- [37] Billingsley J., *More machine vision applications in the NCEA*, Mechatronics and Machine Vision in Practice, J. Billingsley, R. Bradbeer (eds.), Springer, 2010, 333–343.
- [38] Billo R.E., Needy K.L., Barbe T.A., *The application of automatic identification and checkweigh for automated inspection in cellular assembly*, Quality Engineering, Vol. 10, No. 3, 1998, 427–435.
- [39] Blinn J.F., *Simulation of wrinkled surfaces*, Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, New York 1978, 286–292.
- [40] Boehm B., Egyed A., Kwan J., Port D., Shah A., Madachy R., *Using the WinWin Spiral Model*, A Case Study Computer, Vol. 31, No. 7, 33–44.
- [41] Böllinghaus T., Byrne G., Cherpakov B.I., Chlebus E., Cross C.E., Denkena B., Dilthey U., Hatsuzawa T., Herfurth K., Herold H., Kaldos A., Kannengiesser T., Karpenko M., Karpuschewski B., Marya M., Marya S.K., Matthes K.-J., Middeldorf K., Oliveira J.F.G., Pieschel J., Priem D.M., Riedel F., Schleser M., Tekkaya A.E., Todtermuschke M., Vereschaka A., von Hofe D., Wagner N.,

- Wodara J., Woeste K. (eds.), *Manufacturing Engineering*, [in:] K.H. Grote, E.K. Antonsson (eds.), *Springer Handbook of Mechanical Engineering*, Springer, 2009.
- [42] Boukas E.-K., Al-Sunni F.M., *Mechatronic systems: Analysis, design and implementation*, Springer, Berlin–Heidelberg 2011.
- [43] Bovik A.C., *The essential guide to image processing*, Academic Press, London, Boston 2009.
- [44] Bradshaw R.C., Schmidt D.P., Rogers J.R., Kelton K.F., Hyers R.W., *Machine vision for high-precision volume measurement applied to levitated containerless material processing*, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, 2005, 125108.
- [45] Branscomb D., Beale D.G., *Fault detection in braiding utilizing low-cost USB machine vision*, Journal of the Textile Institute, Vol. 102, No. 7, 2011, 568–581.
- [46] Bürmen M., Pernuš F., Likar B., *Automated optical quality inspection of light emitting diodes Meas*, Sci. Technol., Vol. 17, No. 6, 2006, 1372–1378.
- [47] Byrne G., Sheahan C., *Comparative analysis of vision systems for electroplating surface quality inspection*, International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 18, 2005, 3787–3801.
- [48] Carfagni M., Furferi R., Governi L., *A real-time machine-vision system for monitoring the textile raising process*, Computers in Industry, Vol. 56, No. 8–9, 2005, 831–842.
- [49] Carrasco M., Mery D., *Automatic multiple view inspection using geometrical tracking and feature analysis in aluminum wheels*, Machine Vision and Applications, Vol. 22, No. 1, 2011, 157–170.
- [50] Cassidy R., Morrow P.J., McCloskey J., *A machine vision system for quantifying velocity fields in complex rock models*, Machine Vision and Applications, Vol. 16, No. 6, 2005, 343–355.
- [51] Catmull E., *A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces*, Doctoral Thesis, Utah Univ. Salt Lake City, Dept. of Computer Science, 1974.
- [52] Celin R., Kmetič D., *Cracks in a roller-bearing*, Metalurgija, Vol. 47, No. 1, 2008, 69–72.
- [53] Chan V., Bradley C., Vickers G., *A multi-sensor approach to automating co-ordinate measuring machine-based reverse engineering*, Computers in Industry, Vol. 44, No. 2, 2001, 105–115.
- [54] Chen C.-S., Huang C.-L., Yeh C.-W., *A hybrid defect detection for in-tray semiconductor chip*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 2012, 1–14.
- [55] Chen J., Wang B., Yong J.-H., *Improved stochastic progressive photon mapping with metropolis sampling (en)*, Computer Graphics Forum, Vol. 30, No. 4, 2011, 1205–1213.
- [56] Chiou Y.-C., Liu J.-Z., Liang Y.-T., *Micro crack detection of multi-crystalline silicon solar wafer using machine vision techniques*, Sensor Review, Vol. 31, No. 2, 2011, 154–165.
- [57] Chlebus E., *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [58] Chmiel M., Słowiński M., Dasiewicz K., Florowski T., *Komputerowe systemy wizyjne w ocenie jakości mięsa wołowego*, Przemysł Spożywczy, vol. 65, nr 9, 2011, 45–47.
- [59] Cho H.S., *Opto-mechatronic systems handbook: Techniques and applications*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.
- [60] Cieszyński W., Mrzygłód M., Reiner J., *Odbłyśnikowy układ dla lampy LED, zwłaszcza drogowej*, zgłoszenie patentowe P 390630.
- [61] Cieszyński W., Mrzygłód M., Reiner J., *Soczewkowy układ optyczny lampy LED, zwłaszcza drogowej*, zgłoszenie patentowe P 390631.
- [62] Cieszyński W., Mrzygłód M., Reiner J., *Układ chłodzenia lampy LED, zwłaszcza drogowej*, zgłoszenie patentowe, P 390629.
- [63] Cieszyński W., Reiner J., Wojcik M., *Advanced light source with rays for rendering enginess*, International Light Simulation Symposium (ILISIS) 2012, Steinbeis-Edition, Norymberga 2012, 11–24.
- [64] Cook R.L., *Shade trees*, SIGGRAPH Comput. Graph, Vol. 18, No. 3, 1984, 223–231.
- [65] Cook R.L., Carpenter L., Catmull E., *The reyes image rendering architecture*, SIGGRAPH Comput. Graph, Vol. 21, No. 4, 1987, 95–102.

- [66] Cook R.L., Torrance K.E., *A reflectance model for computer graphics*, ACM Trans. Graph, Vol. 1, No. 1, 1982, 7–24.
- [67] Damar S., Yagiz Y., Balaban M.O., Ural S., Oliveira A.C.M., Crapo C.A., *Prediction of oyster volume and weight using machine vision*, Journal of Aquatic Food Product Technology, Vol. 15, No. 4, 2007, 3–15.
- [68] Dana K.J., van Ginneken B., Nayar S.K., Koenderink J.J., *Reflectance and texture of real-world surfaces*, ACM Trans. Graph, Vol. 18, No. 1, 1999, 1–34.
- [69] Daniilidis K., Klette R., *Imaging beyond the pinhole camera*, Springer, Dordrecht 2006.
- [70] Dartnall H.J.A., Bowmaker J.K., Mollon J.D., *Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, Vol. 220, No. 1218, 1983, 115–130.
- [71] Davies E.R., *Machine vision: Theory, algorithms, practicalities*, 3rd ed., Elsevier, Amsterdam, Boston 2005.
- [72] Davies E.R., *The application of machine vision to food and agriculture: a review*, The Imaging Science Journal, Vol. 57, No. 4, 2009, 197–217.
- [73] Davis A., *Microstructured optics for LED applications*, Reflexite Display Optics, 2002.
- [74] Deng Sier, Cai Weiwei, Xu Qiaoyu, Liang Bo, *Defect detection of bearing surfaces based on machine vision technique*, [in:] 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM): IEEE, 2010, V4-548–V4-554.
- [75] Derganc J., Likar B., Pernuš F., *A machine vision system for measuring the eccentricity of bearings*, Computers in Industry, Vol. 50, No. 1, 2002, 103–111.
- [76] Dietrich E., Schulze A., *Measurement process qualification: Gage acceptance and measurement uncertainty according to current standards*, Hanser Publications, Munich, Cincinnati 2011.
- [77] Do Y., Lee S., Kim Y., *Vision-based surface defect inspection of metal balls*, Measurement Science and Technology, Vol. 22, No. 10, 2011, 1–4.
- [78] Dobbins P., *3D rendering in computer graphics*, White Word Publications, Delhi 2012.
- [79] Dou L., Broderick M., *A new technique for automated wafer inspection and classification of particles and crystalline defects*, [in:] Proceedings on Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, IEEE/SEMI: IEEE, 1997, 180–184.
- [80] Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G., *Pattern Classification*, 2nd ed., Wiley, New York 2001.
- [81] Dufloy J., Fallahi Sichani E., de Keuster J., Kruth J., *Development of a real time monitoring and adaptive control system for laser flame cutting*, [in:] Proceedings of the 28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando, FL, USA, November 2–5, 2009, Orlando, FL, USA, 2009, 527–536.
- [82] Dunin-Barkovskii I.I., *Construction of system for controlling the dimensions of large-scale parts based on a 3D machine vision system*, Measurement Techniques, Vol. 47, No. 12, 2004, 1168–1173.
- [83] Ebner M., *Color constancy*, J. Wiley, Chichester 2007.
- [84] Edinbarough I., Balderas R., Bose S., *A vision and robot based on-line inspection monitoring system for electronic manufacturing*, Computers in Industry, Vol. 56, No. 8–9, 2005, 986–996.
- [85] Eriksson I., Kaplan A., *Evaluation of laser weld monitoring – A case study*, [in:] Proceedings of ICALEO, 2009, 1419–1425.
- [86] Fairman H.S., Brill M.H., Hemmendinger H., *How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data*, Color Research and Application, Vol. 22, No. 1, 1997, 11–23.
- [87] Fałęcki Z., *Analiza wad odlewów*, Skrypty Uczelniane, AGH, Kraków 1997.
- [88] Falski M., *Przegląd modeli oświetlenia w grafice komputerowej*, Praca magisterska, promotor A. Łukaszewski, Wydział Matematyki i Informatyki, Instytut Informatyki, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 2004.
- [89] Fang J., Yanbin C., Liqun L., Wu L., *Coaxial monitoring with a CMOS camera for CO₂*, [in:] Proceedings on Advanced Materials and Devices for Sensing and Imaging II, SPIE, Beijing, China, 2005, 101–109.

- [90] Feng X., Mathurin R., Velinsky S.A., *Practical, interactive, and object-oriented machine vision for highway crack sealing*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 6, 2005, 451–459.
- [91] Fernandez C., Platero C., Campoy P., Aracil R., *Vision system for on-line surface inspection in aluminum casting process*, [in:] Industrial Electronics, Control, and Instrumentation: Proceedings of the IECON '93. International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, IEEE, 1993, 1854–1859.
- [92] *Firstsight Vision, Shedding some light on machine vision, evaluation engineering*, Available: <http://www.evaluationengineering.com/search/article.php?aid=5205> (2012, wrz. 29).
- [93] Fournier F.R., *A review of beam shaping strategies for LED lighting*, [in:] Illumination Optics II, SPIE, 2011.
- [94] Gamage P., Xie S.Q., *A real-time vision system for defect inspection in cast extrusion manufacturing process*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 40, 2008, 144–156.
- [95] Gawlik J., Śladek J., Ryniewicz A., *Nadzorowanie urządzeń technologicznych i jakości wyrobów w procesie produkcyjnym*, Pomiary Automatyka Robotyka, vol. 15, nr 2, 2011, 127–145.
- [96] Gawlik J., Śladek J., Ryniewicz A., Kowalski M., Gaska A., *Wielofunkcyjna ocena jakości urządzeń technologicznych i wyrobów*, Inżynieria Maszyn, vol. 15, nr 3, 2010, 20–34.
- [97] Gawlik J., Śladek J., Ryniewicz A., Krawczyk M., Kupiec R., *Metrologia współrzędnościowa w inżynierii produkcji – dokładność pomiaru a dokładność wytwarzania*, Inżynieria Maszyn, vol. 15, nr 3, 2010, 7–19.
- [98] Geng J., *Structured-light 3D surface imaging: a tutorial*, Adv. Opt. Photon, Vol. 3, No. 2, 2011, 128–160.
- [99] Ghazali K.H., Razali S., Mustafa M.M., Hussain A., *Machine vision system for automatic weeding strategy in oil palm plantation using image filtering technique*, [in:] Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, ICTTA 2008, WASET, 2008, 1–5.
- [100] Giesko T., *Designing opto-mechatronic systems for fatigue process monitoring*, Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance, Vol. 46, No. 1, 2011.
- [101] Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A., *Advanced mechatronic system for in-line automated optical inspection of metal parts*, IJSSST, Vol. 11, No. 5, 2010, 36–41.
- [102] Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A., Czajka P., *Optomechatroniczny system do automatycznej kontroli jakości wyrobów w przemyśle*, Problemy Eksploatacji, Vol. 4, 2011.
- [103] Giesko T., Reiner J., Zbrowski A., *System wysokowydajnej kontroli jakości powierzchni wyrobów metalowych o wysokich klasach wykonania z wykorzystaniem optycznej inspekcji*, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2009.
- [104] Giesko T., Zbrowski A., *Modularyzacja systemów inspekcji optycznej do zastosowań w kontroli jakości*, Technologia i Automatyzacja Montażu, vol. 2, 2006.
- [105] Goesele M., Granier X., Heidrich W., Seidel H., et al., *Accurate light source acquisition and rendering*, ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, 2003, 621–630.
- [106] Gooch & Housego, *Eliminating LED Measurement Errors: Application Note (A16)*, Holden-Day 2001.
- [107] Govindaraju M., Pennathur A., Mital A., *Quality improvement in manufacturing through human performance enhancement*, Integrated Manufacturing Systems, Vol. 12, No. 5, 2001, 360–367.
- [108] Graves M., Batchelor B.G., *Machine vision for the inspection of natural products*, Springer, London, New York 2003.
- [109] Gruna R., Irgenfrie S., *Reflectance modeling in machine vision: applications in image analysis and synthesis*, Machine Vision – Applications and Systems, F. Solari, Ed., InTech, 2012, 227–246.
- [110] Günther J., Chen T., Goesele M., Wald I., Seidel H.-P., *Efficient acquisition and realistic rendering of car paint*, Proc. Vision, Modeling, and Visualization, 2005, 487–494.

- [111] Hamrol A., *Zarządzanie jakością z przykładami*, 2nd ed., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [112] Han Jian-hai, Zhao Shu-shang, Sun Wei, *Research on subpixel detecting on-line system based on machine vision for inner diameter of bearings*, [in:] IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007, ROBIO 2007, IEEE, 2007, 2049–2052.
- [113] Harding K., *The art of lighting science*, Available: http://www.visiononline.org/vision-resources-details.cfm/vision-resources/The-Art-of-Lighting-Science/content_id/320/id/6/newsType_id/0
- [114] Hata S., Matsuda Y., Kamido N., *Visual inspection systems and human sensitivity*, [in:] Proceedings on Eighth International Conference on Quality Control by Artificial Vision, SPIE, 2007, 1–7.
- [115] He X.D., Torrance K.E., Sillion F.X., Greenberg D.P., *A comprehensive physical model for light reflection*, SIGGRAPH Comput. Graph, Vol. 25, No. 4, 1991, 175–186.
- [116] Hocken R., Chakraborty N., Brown C., *Optical metrology of surfaces*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 54, No. 2, 2005, 169–183.
- [117] Holst G.C., *CCD arrays, cameras, and displays*, 2nd ed., JCD Pub.; SPIE Optical Engineering, Winter Park, FL, Bellingham, Wash, USA, 1998.
- [118] Hoła J., Sadowski Ł., Reiner J., Stankiewicz M., *Concrete surface roughness testing using nondestructive three-dimensional optical method*, [in:] NDE for Safety/Defektoskopie 2012, Czech Republic, 2012, 101–105.
- [119] Hong E., Zhang H., Katz R., Agapiou J., *Non-contact inspection of internal threads of machined parts*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 2011, 1–9.
- [120] Hornberg A. (Ed.), *Handbook of Machine Vision*, Wiley-VCH, 2006.
- [121] Hsieh W.-C., Chen Y.-Y., Lee Y.-C., A. Whang J.-W., *Design and measurement of TIR lens of MR16-compatible LED lamp without aspherical surface for high directivity*, [in:] Optical Modelling and Design: SPIE, 2010, 1–8.
- [122] Huang W., Kovacevic R., *Acoustic monitoring of weld penetration during laser welding of high strength steels*, 2009.
- [123] Huang W., Kovacevic R., *Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 2012, 1–14.
- [124] Humienny Z. (red.), *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS): Podręcznik europejski*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [125] Humphries N., Gare C., Dawson L.D., *FMEA in design, manufacture and service*, Murphy's law overruled, Vic, Productivity Strategies, Daylesford 1998.
- [126] Injeyan H., Goodno G.D., *High Power Laser Handbook*, 1st ed., McGraw-Hill Professional, New York 2011.
- [127] Irgenfried S., Tchouchenkov I., Wörn H., *CADaVISION: a simulation framework for machine vision prototyping*, [in:] Proceedings of 2nd International Conference on Computer Modelling and Simulation CSSim 2011, 59–67.
- [128] Jablonski R. (Ed.), *Recent Advances in Mechatronics*, 1st ed., Springer, Berlin, Heidelberg [u.a.] 2007.
- [129] Jähne B., *Digital image processing: Concepts, algorithms, and scientific applications*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, New York 1993.
- [130] Jahr I., *Lighting in machine vision*, Handbook of Machine Vision, Vol. 1, A. Hornberg (ed.), Wiley-VCH, 2006, 73–203.
- [131] Jamrozik W., Fidali M., Bzymek A., Timofiejczuk A., *Zastosowanie fuzji obrazów wizyjnych i termowizyjnych do monitorowania i diagnozowania procesu spawania*, Przegląd Spawalnictwa, vol. 83, nr 1, 2011, 27–36.
- [132] Jiang Guo, Duoyu Gu, Shuxiao Li, Yongshi Jiang, Hongxing Chang, *An automated vision-based inspection system for bearing gland covers*, Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, IITA 2009, IEEE 2009, 356–359.

- [133] Kacalak W., Bernat A., *Practical and theoretical aspects of abrasive tool surface reconstruction based on photometric stereo*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 53, No. 8, 2007, 21–24.
- [134] Kaierle S., *Process monitoring and control of laser beam welding*, *Laser Technik Journal*, Vol. 5, No. 3, 2008, 41–43.
- [135] Kalloniatis M., Luu C., *Principles of vision, Webvision: the organization of the retina and visual system*, H. Kolb, E. Fernandez, R. Nelson (eds.), University of Utah Health Sciences Center, Salt Lake City (UT), 1995.
- [136] Kaltenbacher M., *Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators*, 2nd ed., Springer, Berlin, New York 2007.
- [137] Kannatey-Asibu E., *Principles of Laser Materials Processing*, Wiley, Hoboken, N.J., 2009.
- [138] Kapłonek W., Łukianowicz C., *Zastosowanie skaterometrii laserowej i analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni regenerowanych przez napawanie laserowe i plazmowe*, *Advances in Materials Sciences*, Vol. 8, No. 2, 2008, 28–35.
- [139] Karjalainen P.A., Lappalainen T., *Optimization of illumination profiles in line-scan camera systems*, *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, No. 9, 2000, 1301.
- [140] Keelan B.W., *Handbook of Image Quality: Characterization and Prediction*, C R C Press LLC, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florence 2002.
- [141] Khawaja K., Maciejewski A., Tretter D., Bouman C., *Camera and light placement for automated assembly inspection*. Proceedings on IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, IEEE, Vol. 4, 1996, 3246–3252.
- [142] Kiełański J., Koch J., Reiner J., *Metodyka dla studium wykonalności projektów systemów wizyjnych sposobem na poprawę ich jakości w Inżynieria produkcji. Wiedza – wizja – programy ramowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006, 289–296.
- [143] Killing J., Surgenor B.W., Mechefske C.K., *A machine vision system for the detection of missing fasteners on steel stampings*, *Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, 2008, Vol. 41, 808–819.
- [144] Knaus C., Zwicker M., *Progressive photon mapping: A probabilistic approach*, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 30, No. 3, 2011, 25:1–25:13.
- [145] Ko K., Cho H., *Solder joints inspection using a neural network and fuzzy rule-based classification method*, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 23, No. 2, 2000, 93–103.
- [146] Ko N.-H., Lee Y.-S., Jung S.-C., Kim D.-C., Choi T.-I., O B.-H., Park S.-G., Lee E.-H., Lee S.G., *Computational imaging in machine vision system for automated optical inspection*, *Computational Optical Sensing and Imaging: Optical Society of America*, 2009, JTUC13.
- [147] Kolb H., Nelson R., Fernandez E., Jones B.W. (eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*, 2012.
- [148] Kostal H., Kreysar D., Rykowski R., *Application of imaging sphere for BSDF measurements of arbitrary materials*, *Frontiers in Optics*, 2008.
- [149] Kostal H., Kreysar D., Rykowski R., *Efficient measurement of large light source near-field color and luminance distributions for optical design and simulation*, *Novel Optical Systems Design and Optimization XII*, SPIE, 2009, 742908-1, 9.
- [150] Kowal J., Sioma A., *Metoda budowy obrazu 3D produktu z wykorzystaniem systemu wizyjnego*, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 4, No. 1, 2010, 48–51.
- [151] Kowal J., Sioma A., *Model 3D – kontrola jakości narzędzia i produktu*, *Mechanik*, vol. 83, nr 1/S, 2010, 110–117.
- [152] Kowal J., Sioma A., *Surface defects detection using a 3D vision system*. 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2012, 382–387.
- [153] Kowalick K., Kaierle S., Regaard B., *Process monitoring, Tailored Light 2*, R. Poprawe (ed.), Springer, Berlin, Heidelberg 2011, 427–451.

- [154] Kujawińska M., Węgiel M., Sitnik R., *Real-time 3D shape measurement based on colour structure light projection*. Proc. the 4th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, 2001, 324–332.
- [155] Lahajnar F., Bernard R., Pernuš F., Kovačič S., *Machine vision system for inspecting electric plates*, Computers in Industry, Vol. 47, No. 1, 2002, 113–122.
- [156] Lee J.W., *Machine vision monitoring system of lettuce growth in a state-of-the-art greenhouse*, Modern Physics Letters B, Vol. 22, Vol. 11, 2008, 953–958.
- [157] Lee S.J., *Light-emitting diode lamp design by Monte Carlo photon simulation*, Symposium on Integrated Optics, SPIE, 2001, 99–108.
- [158] Lees M., Campbell D., Keir A., *Machine vision for beer keg asset management*, J. Billingsley, R. Bradbeer (eds.), Mechatronics and Machine Vision in Practice, Springer, 2010, 125–137.
- [159] Lei L., *A machine vision system for inspecting bearing-diameter*. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004, IEEE, Hangzhou, China, 2004, 3904–3906.
- [160] Lei L., Zhou X., Pan M., *Automated vision inspection system for the size measurement of workpieces*. Proceedings of the IEEE on Instrumentation and Measurement Technology Conference 2005, IEEE, 2005, 872–877.
- [161] Leon F., *Enhanced imaging by fusion of illumination series*. Proc. of the European Symposium on Lasers and Optics in Manufacturing, Munich 1997, 1–12.
- [162] León F.P., Lindner C., van Gorkom D., *Surface segmentation by variable illumination*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 56, No. 1, 2007, 549–552.
- [163] Li Q., Wang S., Guan B., Wang G., *A machine vision method for the measurement of vibration amplitude*, Measurement Science and Technology, Vol. 18, 2007, 1477.
- [164] Li W., Jin J., Li X., Li B., *Method of rotation angle measurement in machine vision based on calibration pattern with spot array*, Applied Optics, Vol. 49, No. 6, 2010, 1001–1006.
- [165] Li X., Tso S.K., Guan X.-P., Huang Q., *Improving automatic detection of defects in castings by applying wavelet technique*, IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 53, No. 6, 2006, 1927–1934.
- [166] Li X., Wang L., Cai N., *Machine-vision-based surface finish inspection for cutting tool replacement in production*, International Journal of Production, Vol. 42, 2004, 2279–2287.
- [167] Light Tec, *REFLET Bench 3D (hemispheric) Scatterometer*, 2008.
- [168] Lindner C., Puente Leon F., *Model-based segmentation of surfaces using illumination series*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 4, 2007, 1340–1346.
- [169] Lira I., *Evaluating the measurement uncertainty: Fundamentals and practical guidance*, Institute of Physics Pub., Bristol, UK, Philadelphia, Pa, 2002.
- [170] Louban R., *Image Processing of Edge and Surface Defects: Theoretical basis of adaptive algorithms with numerous practical applications*, Springer, Heidelberg, New York 2009.
- [171] Łukianowicz C., *Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła*, Monografia Wydziału Mechanicznego – Politechnika Koszalińska, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [172] Łukianowicz C., Karpiński T., *Optical system for measurement of surface form and roughness*, Measurement Science Review, Vol. 1, No. 1, 2001, 151–154.
- [173] Łukianowicz C., Karpiński T., *Scatterometry of ground surfaces*, Measurement Science Review, Vol. 3, 2003, 21–24.
- [174] Malamas E.N., Petrakis E.G., Zervakis M., Petit L., Legat J.-D., *A survey on industrial vision systems, applications and tools*, Image and Vision Computing, Vol. 21, No. 2, 2003, 171–188.
- [175] Manninen P., *Characterization of diffusers and light-emitting diodes using radiometric measurements and mathematical modeling*, Praca doktorska, Helsinki University of Technology Faculty of Electronics, Communications and Automation Department of Signal Processing and Acoustics, 2008.
- [176] Marino F., Stella E., *ViSyR: a vision system for real-time infrastructure inspection*, InTech, 2007.

-
- [177] Martin D., *A practical guide to machine vision lighting*, Midwest Sales and Support Manager, Advanced Illumination, 2007.
- [178] Masakazu M.A., Katsuhiko M., Yusuke M., Hiroto Y., *Detection and pose estimation of piled objects using ensemble of tree classifiers*, Machine Vision – Applications and Systems, F. Solari (ed.), InTech, 2012.
- [179] Matusik W., *A data-driven reflectance model*, Doctoral Thesis, Citeseer 2003.
- [180] McDermott R.E., Mikulak R.J., Beauregard M.R., *The basics of FMEA*, Quality Resources, New York 1996.
- [181] Mery D., *Flaw simulation in castings inspection by radioscopy*, Insight, Vol. 43, No. 10, 2001, 664–668.
- [182] Mery D., *Crossing line profile: a new approach to detecting defects in aluminium die casting*, Lecture Notes in Computer Science, Image Analysis, J. Bigun, T. Gustavsson (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg 2003, 725–732.
- [183] Milella A., Di Paola D., Ciciirelli G. (eds.), *Mechatronic Systems, Simulation, Modelling and Control*, In-Tech, 2010.
- [184] Miles B., Surgenor B., *Machine vision for inspection: a case study*, Assembly line - theory and practice, W. Grzechca (ed.), InTech, 2011.
- [185] Miller C.C., *LED photometric calibrations at the National Institute of Standards and Technology and future measurement needs of LEDs*. Fourth International Conference on Solid State Lighting, SPIE, 2004, 69–79.
- [186] Miller C.C., Ohno Y., *Luminous intensity measurement of LEDs at NIST*. Proc. 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement, Gaithersburg, Maryland, USA, 2001.
- [187] Montenegro Rios A., Sarocchi D., Valdivieso A.L., Nahmad-Molinari Y., *Machine vision for size distribution determination of spherically shaped particles in dense-granular beds, oriented to pelletizing process automation*, Particulate Science and Technology, Vol. 29, No. 4, 2011, 356–367.
- [188] Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 8th Edition, Knovel 2013.
- [189] Moreno I., *LED intensity distribution*. The International Optical Design Conference 2006, Optical Society of America, 2006, 1–7.
- [190] Moreno I., Avendaño-Alejo M., Tzonchev R.I., *Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance*, Applied Optics, Vol. 45, No. 10, 2006, 2265–2272.
- [191] Moreno I., Muñoz J., Ivanov R., *Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array*, Optical Engineering, Vol. 46, No. 3, 2007, 1–.
- [192] Moreno I., Sun C.C., Ivanov R., *Far-field condition for light-emitting diode arrays*, Applied Optics, Vol. 48, No. 6, 2009, 1190–1197.
- [193] Moreno I., Sun C.-C., *LED array: where does far-field begin?*. 8th International Conference on Solid State Lighting, SPIE, 2008, 705811–.
- [194] Mroczka J., Binek P., *Metoda dodawania-podwajania w modelowaniu rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne*, Kongres Metrologii, 2007.
- [195] Mrzygłód M., Reiner J., *2D spectral methods for technical documents investigation*. International Conference Production Engineering 2011: Innowacje i Technologie Przyszłości, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011, 5–14.
- [196] Mukaigawa Y., Sumino K., Yagi Y., *High-speed measurement of BRDF using an ellipsoidal mirror and a projector*, Computer Vision and Pattern Recognition, 2007, CVPR '07, IEEE Conference, IEEE, 2007, 1–8.
- [197] Murtagh F., Qiao X., Crookes D., Walsh P., Basheer P.A.M., Long A., Starck J.-L., *A machine vision approach to the grading of crushed aggregate*, Machine Vision and Applications, Vol. 16, No. 4, 2005, 229–235.

- [198] Murtagh F., Qiao X., Walsh P., Basheer P., Crookes D., Long A., *Grading of construction aggregate through machine vision: Results and prospects*, Computers in Industry, Vol. 56, No. 8–9, 2005, 905–917.
- [199] Narayanan M.R., Gowri S., Krishna M.M., *On line surface roughness measurement using image processing and machine vision*. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2007.
- [200] Nayar S.K., Ikeuchi E., Kanade T., *Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives*, March 1989.
- [201] Nayar S.K., Sanderson A.C., Weiss L.E., Simon D.A., *Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian images*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 2, 1990, 208–218.
- [202] Newman T.S., Jain A.K., *A Survey of automated visual inspection*, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 61, No. 2, 1995, 231–262.
- [203] Nguyen F., Terao B., Laski J., *Realizing LED illumination lighting applications*. Fifth International Conference on Solid State Lighting, SPIE, 2005, 1–6.
- [204] Nicodemus F.E., *Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity*, Applied Optics, Vol. 9, No. 6, 1970, 1474–1475.
- [205] Nicolosi L., Abt F., Blug A., Heider A., Tetzlaff R., Höfler H., *A novel spatter detection algorithm based on typical cellular neural network operations for laser beam welding processes*, Measurement Science and Technology, Vol. 23, 2012, 15401.
- [206] Niskanen M., Silven O., *Machine vision based lumber grain measurement*. Proc. IAPR Conference on Machine Vision Applications, MVA 2007, 6, 2007, 408–411.
- [207] Novak I., Hocenski Z., *Texture feature extraction for a visual inspection of ceramic tiles*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005, IEEE, 2005, 1279–1283.
- [208] Oakland J.S., *Statistical Process Control*, 6th ed., Butterworth-Heinemann, Burlington, MA, 2008.
- [209] Oczóś K., Lûbimov V., *Struktura geometryczna powierzchni: Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [210] Oczóś K.E., Liubimov V., *Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D*, Mechanik, nr 3, 2008, 129–137.
- [211] Ohno Y., *Optical metrology for LEDs and solid state lighting*. Fifth Symposium Optics in Industry, SPIE, 2006, 1–8.
- [212] Olsson L.J., Gruber S., *Web process inspection using neural classification of scattering light*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 2, 1993, 228–234.
- [213] Oren M., Nayar S.K., *Generalization of Lambert's reflectance model*. Proceedings of the 21st annual conference on computer graphics and interactive techniques, ACM, New York, NY, USA, 1994, 239–246.
- [214] OSRAM, Hyper SIDELED: LS A67B, LO A67B, LY A67B (2012).
- [215] OSRAM, Hyper TOPLED® with Lens: LG T656, LP T656 (2012).
- [216] OSRAM, Hyper 3 mm (T1) LED, Diffused: LS 3366, LA 3366, LO 3366, LY 3366 (2012).
- [217] Ovinis M., Kerr D., Bouazza-Marouf K., Vloeberghs M., *Machine vision for the inspection of surgical tasks: applications to robotic surgery systems*, World Academy of Science, Engineering and Technology, No. 69, 2010, 338–344.
- [218] Perng D.-B., Chou C.-C., Chen W.-Y., *A Novel vision system for CRT panel auto-inspection*. Proceedings of the 2005 International Conference on Mechatronics, IEEE, Taipei, Taiwan, 2005, 622–625.
- [219] Perng D.-B., Chou C.-C., Lee S.-M., *Design and development of a new machine vision wire bonding inspection system*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 34, 2006, 323–334.

- [220] Pernkopf F., O'Leary P., *Visual inspection of machined metallic high-precision surfaces*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, No. 7, 2002, 667–678.
- [221] Pernkopf F., O'Leary P., *Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces*, NDT & E International, Vol. 36, No. 8, 2003, 609–617.
- [222] Petrone G., Cammarata G., *Recent advances in modelling and simulation*, I-Tech Education and Publishing, Wiedeń 2008.
- [223] Pfeifer T., Wiegiers L., *Adaptive control for the optimized adjustment of imaging parameters for surface inspection using machine vision*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 47, No. 1, 1998, 487–490.
- [224] Pham D.T., Alcock R.J., *Smart inspection systems: Techniques and applications of intelligent vision*, Academic Press, Amsterdam, Boston 2003.
- [225] Phong B. T., *Illumination for computer generated pictures*, Commun. ACM, Vol. 18, No. 6, 1975, 311–317.
- [226] Pietikäinen M., *Texture analysis in machine vision*, World Scientific, Singapore, River Edge, NJ, 2000.
- [227] Piuri V., Scotti F., Roveri M., *Visual inspection of particle boards for quality assessment*. Proceedings on ICIP 2005, Image Processing IEEE, IEEE, 2005, III–521.
- [228] Płaska S., *Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi*, Wydaw. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
- [229] Polyanskiy M., *Refractive Index Database*. Available: <http://refractiveindex.info/> (06.2013).
- [230] Poprawe R. (ed.), *Tailored Light 2*, Springer, Berlin, Heidelberg 2011.
- [231] Ramane D., Shaligram A., *Optimization of multi-element LED source for uniform illumination of plane surface*, Optics Express, Vol. 19, No. S4, 2011, A639.
- [232] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. I. Idea pomiarów, główne zespoły i ich funkcje*, Mechanik, vol. 84, nr 2, 2011, 112–117.
- [233] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. II. Tomografy i ich parametry, przykłady zastosowań*, Mechanik, vol. 84, nr 3, 2011, 226–231.
- [234] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. III. Tomografy i ich parametry, przykłady zastosowań*, Mechanik, vol. 84, nr 4, 2011, 326–331.
- [235] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. IV. Oprogramowanie, parametry dokładności i metody ich wyznaczania*, Mechanik, vol. 84, nr 5–6, 2011, 474–479.
- [236] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D*, vol. 57, nr 2, 2011, 220–223.
- [237] Rączka W., Sioma A., *Measurements of SMA properties using advanced optical methods*, Mechanics and Control, Vol. 29, No. 1, 2010.
- [238] Regaard B., Kaierle S., Heinemann S., Patwa R., Steinbrecher J.P., *Welding head for “self guided” laser welding*. Proceedings of the 28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando, FL, USA, 2009, 353–358.
- [239] Reiner J., *Systemy wizyjne w zapewnieniu jakości wytwarzania*, [w:] E. Chlebus, J. Gawlik (red.), *Inżynieria Maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, 23–30.
- [240] Reiner J., *Rendering for machine vision prototyping*. Proc. SPIE Optical Design and Engineering III, SPIE, Glasgow, United Kingdom, 2008, 1–8.
- [241] Reiner J., Cieszyński W., *Projekt lampy pozycyjnej światłowodowej LED*, Politechnika Wrocławska, Sprawozdania I24/2010/S-015, Wrocław 2010.
- [242] Reiner J., Cieszyński W., *Design, simulation and verification of LED illuminators*. International Conference Production Engineering 2011: Innowacje i Technologie Przyszłości, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011, 139–146.
- [243] Reiner J., Cieszyński W., Stankiewicz M., Mrzygłód M., Jednoróg A., Chlebus E., Wójcik M., *Oprogramowanie CAX i aparatura badawcza do symulacyjnego prototypowania układów*

- optomechatronicznych, zwłaszcza wizyjnej inspekcji jakości*, Raporty serii SPR, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji PWr., I24/2012/S-003, Wrocław 2012.
- [244] Reiner J., Mrzygłód M., *Inspekcja wizyjna jakości powierzchni metalowych po obróbce szlifowaniem*, [w:] *Inżynieria produkcji. Wiedza – wizja – programy ramowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006, 193–200.
- [245] Reiner J., Mrzygłód M., *Pomiary optyczne i inspekcja jakości powierzchni metalowych*. Proceedings of the 13th National & 4th International Conference “Metrology in Production Engineering”, Poznań, 2009, 391–396.
- [246] Reiner J., Mrzygłód M., *Wybrane metody inspekcji wizyjnej powierzchni metalowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej *Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*, Vol. 19, 2010, 71–76.
- [247] Reiner J., Mrzygłód M., Kiełański J., *Studium wykonalności dla projektów systemów wizyjnych*, [w:] T. Uhl (red.), *Projektowanie mechatroniczne*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2005, 43–50.
- [248] Reiner J., Mrzygłód M., Szeplik P., *Sposób optycznej detekcji wad powierzchni obiektów cylindrycznych, zwłaszcza wałków łożysk*, Patent Polska 379580, 31.03.2011.
- [249] Reiner J., Mrzygłód M., Szeplik P., *Układ do optycznej detekcji wad powierzchni obiektów cylindrycznych, zwłaszcza wałków łożysk*, Patent Polska 379579, 31.03.2011.
- [250] Reiner J., Mrzygłód M., Szeplik P., *Układ do optycznej detekcji wad powierzchni obiektów cylindrycznych, zwłaszcza wałków łożysk*, Patent Polska 379578, 31.03.2011.
- [251] Reiner J., Mrzygłód M., Tryba D., *Laserowy pomiar bicia i płaskości dysków pil tarczowych*, Napędy i Sterowanie, vol. 10, nr 6, 2008, 39–42.
- [252] Reiner J., Stankiewicz M., Wójcik M., *Predictive segmentation method for 3D inspection accuracy and robustness improvement*, [in:] P.H. Lehmann (ed.), *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, 73890A, SPIE, Monachium 2009, 1–8.
- [253] Rovati L., Pollonini L., Zanasi M., Sivieri D., Badiali M., *Design of an optical sensor for surface roughness measurements of wood based panels*. Sensors for Industry Conference, Proceedings the ISA/IEEE, 2004, 55–59.
- [254] Rovira-Más F., Zhang Q., Reid J.F., Will J.D., *Machine vision based automated tractor guidance*, International Journal of Smart Engineering System Design, Vol. 5, No. 4, 2003, 467–480.
- [255] Rusek G., Reiner J., Ptak R., Owoc M., Mrzygłód M., Cieśla R., *Polimorficzny skaner do kryminalistycznej ekspertyzy dokumentów w zakresie submikronowym*. XIV Wrocławskie Sympozjum Badania Pisma: Znaczenie aktualnych metod badań dokumentów w dowodzeniu sądowym, Wrocław 2012, 299–309.
- [256] Rusiński E., *Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [257] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [258] Rykowski R., Kostal H., *Novel approach for LED luminous intensity measurement*, Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XII, SPIE, 2008, 69100C–1.
- [259] Salis G., Seulin R., Morel O., Meriaudeau F., *Machine vision system for the inspection of reflective parts in the automotive industry*. Proc. of SPIE-IS & T Electronic Imaging, SPIE, 2007, 1–9.
- [260] Sankowski D., Mosorow W., *Skomputeryzowany system wizyjny przetwarzania i analizy obrazów próbek w wysokotemperaturowych metalurgicznych procesach przemian fazowych*, Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki, vol. 148, 2003.
- [261] Schaeffel F., *Processing of information in the human visual system*, [in:] A. Hornberg (ed.), Handbook of Machine Vision, Vol. 1, Wiley-VCH, 2006, 1–33.
- [262] Schneider B.J., *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*, elektronik Book, www.eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd, dostęp: wrzesień 2013.

- [263] Schröder G., *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen; kurz und bündig*, 7th ed., Vogel, Würzburg 1990.
- [264] Scott W., Roth G., Rivest J.F., *View planning for automated 3D object reconstruction inspection*, ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 1, 2003, 64–96.
- [265] Senthil Kumar G., Natarajan U., Ananthan S., *Vision inspection system for the identification and classification of defects in MIG welding joints*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., No. 12, 2011, 1–11.
- [266] Seulin R., Bonnot N., Merienne F., Gorria P., *Simulation process for the design and optimization of machine vision system for specular surface inspection*, Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology II, SPIE, Boston, MA, 2001, 1–12.
- [267] Seulin R., Merienne F., Gorria P., *Dynamic lighting system for specular surface inspection*, Machine Vision Applications in Industrial Inspection IX, Vol. 4301, 2001, 199–206.
- [268] Seulin R., Merienne F., Gorria P., *Machine vision system for specular surface inspection: use of simulation process as a tool for design and optimization*. International Conference on Quality Control by Artificial Vision, 2001, 147–152.
- [269] Seulin R., Merienne F., Gorria P., *Simulation of specular surface imaging based on computer graphics: application on a vision inspection system*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2002, 649–658.
- [270] Shahabi H.H., Ratnam M.M., *Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 46, 2009, 275–284.
- [271] Shahabi H.H., Ratnam M.M., *Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece in turning: a machine vision approach*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 48, 2009, 213–226.
- [272] J Shao., Yan Y., *Review of techniques for on-line monitoring and inspection of laser welding*, Journal of Physics, Conference Series: IOP Publishing Ltd., 2005, 101–107.
- [273] Shih C.-L., Ruo C.-W., *Auto-calibration of an SMT machine by machine vision*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 26, 2004, 243–250.
- [274] Sills K., Capson D., Bone G., *Specular-reduced imaging for Inspection of machined surfaces*. 2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision (CRV), 2012, 361–368.
- [275] Sioma A., *Zastosowanie systemów wizyjnych 3D w kontroli jakości wykonania elementów pneumatyki i hydrauliki*, Pneumatyka, vol. 1, 2010.
- [276] Sioma A., *Assessment of cutting edge defects using a vision method*, Acta Mechanica et Automatica, Vol. 6, No. 1, 2012, 57–62.
- [277] Sioma A., Struzikiewicz G., *Pomiary głowicy frezowej z wykorzystaniem systemu wizyjnego*, Świat Obrabiarek, vol. 6, nr 9–10, 2011, 8–10.
- [278] Sioma A., Tytko A., *Evaluation of the operational parameters of ropes*, Acta Mechanica et Automatica, Vol. 6, No. 1, 2012.
- [279] Sitnik R., *Odwzorowanie kształtu obiektów trójwymiarowych z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego*, Monografia habilitacyjna, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, Politechnika Warszawska, Warszawa 2010.
- [280] Śladek J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2011.
- [281] Smith B., *Six-sigma design (quality control)*, IEEE Spectrum, Vol. 30, No. 9, 1993, 43–47.
- [282] Solis-Sánchez L.O., García-Escalante J.J., Castañeda-Miranda R., Torres-Pacheco I., Guevara-González R., *Machine vision algorithm for whiteflies (Bemisia tabaci Genn.) scouting under greenhouse environment*, Journal of Applied Entomology, Vol. 133, 2009, 546–552.
- [283] Stache N., Stollenwerk A., Gedicke J., Olowinsky A., Knepper A., Aach T., *Automatic calibration of a scanner-based laser welding system*, Journal of Laser Applications, Vol. 21, 2009, 10.

- [284] Stache N.C., Dieckelmann J., Gedicke J., Olowinsky A., Aach T., *An image-based "click & weld"-method for laser beam positioning in micro welding applications*, ICALEO 2008, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2008, 343–352.
- [285] Stanisław A., *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*, wyd. 3., StatSoft, Kraków 2006.
- [286] Stankiewicz M., *Metoda triangulacji laserowej odporna na refleksy świetlne dla kontroli jakości geometrii wyrobu*, Praca doktorska, promotorzy T. Koch, J. Reiner, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2013.
- [287] Stefani S.A., Nagarajah C.R., Willgoss R., *A surface inspection technique for continuously extruded cylindrical products*, Measurement Science and Technology, Vol. 10, No. 2, 1999, N21–N25.
- [288] Steigerwald D., Bhat J., Collins D., Fletcher R., Holcomb M., Ludowise M., Martin P., Rudaz S., *Illumination with solid state lighting technology*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 2, 2002, 310–320.
- [289] Stevenson M., *Optical software: Optical Software: Which program is right for me?*, Institute of Physics and IOP Publishing, 2006.
- [290] Stil S.A., *Reflot-90 goniophotometer: User manual*, Stil, 2007.
- [291] Stover J.C., *Optical scattering: Measurement and analysis*, 2nd ed., SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash, USA, 1995.
- [292] Su J.C., Tarn Y.S., *Measuring wear of the grinding wheel using machine vision*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 31, 2006, 50–60.
- [293] Subcommittee IESNA, America, IESNA recommended practice for roadway sign lighting: Illuminating Engineering Society of North America, 2001.
- [294] Sun C.C., Moreno I., Lo Y.C., Chiu B.C., Chien W.T., *Collimating lamp with well color mixing of red/green/blue LEDs*, Optics Express, Vol. 20, No. 101, 2012, A75–A84.
- [295] Sun C.-C., Chien W.-T., Moreno I., Hsieh C.-T., Lin M.-C., Hsiao S.-L., Lee X.-H., *Calculating model of light transmission efficiency of diffusers attached to a lighting cavity*, Optics Express, Vol. 18, No. 6, 2010, 6137.
- [296] Synak R., Ryzko J., *Metody i aparatura do badania parametrów powierzchni przy wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła*, Elektronika, nr 11, 2011, 97–100.
- [297] Szydłowski M., Powalka B., *Chatter detection algorithm based on machine vision*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 62, No. 5–8, 2011, 517–528.
- [298] Świłło S., Perzyk M., *Automatic inspection of surface defects in die castings after machining*, Archives of Foundry Engineering, Vol. 11, No. 3, 2011, 231–236.
- [299] Tadeusiewicz R., Jaworek J., Kańtoch E., Miller J., Pięciak T., Przybyło J., *Wprowadzenie do modelowania systemów biologicznych oraz ich symulacji w środowisku MATLAB*, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2012.
- [300] Takeshi S., Naoya T., Ryosuke K., *Indoor mobile robot navigation by center following based on monocular vision*, [in:] X. Zhihui (ed.), *Computer vision*, In-Tech, Vienna 2008.
- [301] Tarabanis K., Allen P., Tsai R., *A survey of sensor planning in computer vision*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 1, 1995, 86–104.
- [302] Taylor J.R., *An introduction to error analysis*, 2nd ed., University Science Books, Sausalito, Calif, 1997.
- [303] Tellaeche A., Arana R., Maurtua I., *Automatic inspection of percussion caps by means of combined 2D and 3D machine vision*, Techniques World Academy of Science, Engineering and Technology, No. 64, 2010, 111–116.
- [304] Telljohann A., *Introduction to building a machine vision inspection*, Vol. 1, [in:] A. Hornberg (ed.), *Handbook of Machine Vision*, Wiley-VCH, 2006.

-
- [305] Thompson J.R., Koronacki J., *Statistical process control: The Deming paradigm and beyond*, 2nd ed., Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Fla, 2002.
- [306] Tokuhito A.T., Vadakattu S., *Inspecting a research reactor's control rod surface for pitting using a machine vision*, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 42, No. 11, 2005, 994–1000.
- [307] Torrance K.E., Sparrow E.M., *Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 57, No. 9, 1967, 1105–1112.
- [308] Trucco E., Umasuthan M., Wallace A., Roberto V., *Model-based planning of optimal sensor placements for inspection*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 2, 1997, 182–194.
- [309] Tyka A., Góralczyk A., *Wizyjne systemy pomiarowe do kontroli wymiarowej elementów maszynowych. Problemy konfiguracji systemu pomiarowego*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 50, nr 12, 2004, 15–17.
- [310] Tyka A., Góralczyk A., *Wizyjne systemy pomiarowe do kontroli wymiarowej elementów maszynowych. Część II. Praktyczna realizacja zadań pomiarowych*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 51, nr 2, 2005.
- [311] Uhl T., *System komputerowego wspomagania projektowania mechatronicznego*, vol. 48, nr 1, 2002, 14–17.
- [312] Unay D., Gosselin B., *Artificial neural network-based segmentation and apple grading by machine vision*. ICIIP 2005, IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2005, II–630.
- [313] Unger J., Wenger A., Hawkins T., Gardner A., Debevec P., *Capturing and rendering with incident light fields*. Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Szwajcaria, 2003, 141–149.
- [314] Van Derlofske J.F., *Computer modeling of LED light pipe systems for uniform display illumination*. International Symposium on Optical Science, 2001, 119–129.
- [315] Vázquez-Fernández E., Dacal-Nieto A., González-Jorge H., Martín F., Formella A., Alvarez-Valado V., *A machine vision system for the calibration of digital thermometers*, Measurement Science and Technology, Vol. 20, 2009, 65106.
- [316] Velho L., Frery A.C., Gomes J., *Image processing for computer graphics and vision*, 2nd ed., Springer, London 2009.
- [317] Wadmann S., *Optical Inspection of Test Surfaces*, Patent US 7.649.628 B2, 19 Jan. 2010.
- [318] Wallat G.K., Luzuriaga D.A., Balaban M.O., Chapman F.A., *Analysis of skin color development in live goldfish using a color machine vision system*, North American Journal of Aquaculture, Vol. 64, No. 1, 2002, 79–84.
- [319] Wang J., Gao W., Liao F., Masanori S., *Study on the development of automatic log scaling system based on machine vision*, Artificial Life and Robotics, 2013, 1–5.
- [320] Wang L., Wang X., Tong X., Lin S., Hu S., Guo B., Shum H.-Y., *View-dependent displacement mapping*, ACM Trans. Graph, Vol. 22, No. 3, 2003, 334–339.
- [321] Ward G., *Tools for lighting design and analysis*, [in:] *Global Illumination in Architecture and Theater*, Siggraph course notes, 7, 1996, 1–17.
- [322] Watt A.H., Watt M., *Advanced animation and rendering techniques: Theory and practice*, ACM Press, New York 1992.
- [323] Weckenmann A., Hartmann W., Weickmann J., *Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors*, Optical Systems Design, 2008, 1–12.
- [324] Wei G., Tan Q., *Measurement of shaft diameters by machine vision*, Applied Optics, Vol. 50, No. 19, 2011, 3246–3253.
- [325] Wheatley J.A., Benoit G.J., Anderson J.E., Biernath R.W., Freier D.G., Hoffend T.R., Hoyle C.D., Liu T.T., Lu J.D., Meis M.A., Savvateev V.V., Schardt C.R., Sousa M.E., Weber M.F., Nevitt T.J., *Efficient LED light distribution cavities using low loss, angle-selective interference transfectors*, Optics Express, Vol. 17, No. 13, 2009, 10612–10622.

- [326] White D.R., Saunders P., Bonsey S.J., van de Ven J., Edgar H., *Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces*, Applied Optics, Vol. 37, No. 16, 1998, 3450–3454.
- [327] Wieczorowski M., *Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [328] Wikipedia, *Śledzenie promieni*, http://pl.wikipedia.org/wiki/Śledzenie_promieni, dostęp: kwiecień 2013.
- [329] Wilczyński K., *Automatyzacja procesu kontroli wizualnej po przeprowadzonej obróbce mechanicznej zacisków hamulcowych*, Praca inżynierska, promotor J. Reiner, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2012.
- [330] Womack J.P., Jones D.T., *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*, 1st ed., Free Press, New York 2003.
- [331] Wójcicki T., Czajka P., Giesko T., *Automatyczna inspekcja montażu uszczelnień łożysk tocznych z wykorzystaniem komputerowych metod przetwarzania i analizy obrazów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika, z. 79 [273], 2010, 27–36.
- [332] Wu W.-Y., Wang M.-J.J., Liu C.-M., *Automated inspection of printed circuit boards through machine vision*, Computers in Industry, Vol. 28, No. 2, 1996, 103–111.
- [333] Wu Qinghua, Lou Xunzhi, Zeng Zhen, He Tao, *Defects inspecting system for tapered roller bearings based on machine vision*. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), IEEE, 2010, 667–670.
- [334] Wyrowski F., *Field Tracing for Unified Optical Modeling*, Frontiers in Optics, 2012, Laser Science XXVIII, Optical Society of America, 2012, FW4A.1.
- [335] Wyrowski F., Kuhn M., *Introduction to field tracing*, Journal of Modern Optics, Vol. 58, No. 5–6, 2011, 449–466.
- [336] Xu J., Ge H., Zhou X., Yang D., Guo T., He J., Li Q., Hao Z., *Tissue-engineered vessel strengthens quickly under physiological deformation: application of a new perfusion bioreactor with machine vision*, Journal of Vascular Research, Vol. 42, 2005, 503–508.
- [337] Xue-wu Z., Yan-qiong D., Yan-yun L., Ai-ye S., Rui-yu L., *A vision inspection system for the surface defects of strongly reflected metal based on multi-class, SVM Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 5, 2011, 5930–5939.
- [338] Yan M.-T., Huang K.-Y., Lo C.-Y., *A study on electrode wear sensing and compensation in Micro-EDM using machine vision system*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 42, 2008, 1065–1073.
- [339] Yang T., Wang L., Zheng D., *Image acquisition and segmentation for ceramic bearing ball surface inspection system*. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, Dalian, China, 2006, 8444–8447.
- [340] Ying S.P., Tang C.-W., Huang B.-J., *Characterizing LEDs for mixture of colored LED light sources*. International Conference on Electronic Materials and Packaging, EMAP 2006, IEEE, 2006, 1–5.
- [341] Yu W., *On-line defects inspection of floating glass by variable LED raster*. Proceedings on the MIPPR 2011: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications, SPIE, 2011, 1–7.
- [342] Yung-Cheng Wang, Jui-Chang Lin, Shih-Fong Chiu, *The automatic image inspection system for measuring dimensional parameters of a saw blade*. Proceedings on 8th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2010), IEEE, 2010, 1557–1561.
- [343] Zbrowski A., Giesko T., *Automatyzacja kontroli jakości wyrobów w linii technologicznej wytwarzania wałeczków łożysk tocznych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, vol. 2, 2008, 36–40.
- [344] Zbrowski A., Samborski T., Giesko T., Boroński D., Machniewicz T., *System pomiarowy do monitorowania pęknięcia połączeń montażowych stosowanych w przemyśle lotniczym*, Technologia i Automatyzacja Montażu, Vol. 3, 2010, 5–11.

-
- [345] Zhang J., *Linear moving-detector photometer: A new design concept*, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 33, No. 1, 2004, 75–86.
 - [346] Zheng H., Kong L. X., Nahavandi S., *Automatic inspection of metallic surface defects using genetic algorithms*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125, 2002, 427–433.
 - [347] Zhu Z., Brilakis I., *Machine vision-based concrete surface quality assessment*, J. Constr. Eng. Manage., Vol. 136, No. 2, 2010, 210–218.
 - [348] Zorcolo A., Escobar-Palafox G., Gault R., Scott R., Ridgway K., *Study of lighting solutions in machine vision applications for automated assembly operations*, Trends in Areospace Manufacturing 2009, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 26, 2009, 2011, 1–12.
 - [349] Żagan W., *Podstawy techniki świetlnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

Identification and optical modelling of machine vision for manufacturing quality

Modern technology nowadays is expected to meet the demands of high quality. When the variance of process parameters is impossible to stabilise within the tolerance limits or the occurrence of single deviations is critical, inspection of production becomes necessary. The inspection is more and more often realised with optical techniques, especially with the machine vision. Such systems, on the basis of image analysis, perform classification of products or provide quantitative results concerning their features. Yet, the requirements and tolerances in the mechanical domain differ from those of the optical domain. Moreover, designing of the image acquisition processes is based on experience and experimenting. Robustness of the developed algorithms is optimised late – not before the phases of implementation and validation. Therefore, the above method does not assure repeatable and reproducible development cycle of such systems.

In response to the above limitations, a research was conducted, concerning the application of numerical methods for light propagations, which would support the process of designing the systems of machine vision for inspection of production quality.

Simulation methods are applied for designing of machine technology and mechatronics, whereas optical simulations are the speciality of physics or computer graphics. Each of these domains has developed highly advanced solutions meeting the requirements of its users. However, neither of them is suitable for direct application in the process of machine vision systems' design. Within the scope of performed research, certain solutions from the field of computer graphics – rendering – were evaluated, expecting the best fulfilment of the demands of the proposed applications.

The research, concerning geometrical-optical modelling of machine vision systems, was carried out simultaneously with identification of the optical parameters of the image acquisition process. A special attention was paid to forming the luminous intensity of light sources and to modelling the phenomena of light scattering on surfaces. For verification, certain methods were developed, concerning measurement and analysis of the objects in real and virtual environment.

The practical value of the research results and the developed solutions were presented on examples of three real-life industrial projects: inspection of rolling bearings, inspection of homokinetic joints and the optical measurement of medical screws for implants.

The developed solutions are addressed for optomechanics design of machines and devices with computer-aided engineering (CAE). Due to virtualisation during design, the machine vision systems is more robust, the project cycle is shorter and therefore the laboratory research is more cost effective.

W monografii przedstawiono metodę projektowania stanowisk wizyjnej kontroli jakości wytwarzania z zastosowaniem metod numerycznych propagacji światła, tzw. renderingu, dotychczas stosowanego w grafice komputerowej. Badania skoncentrowano na procesie akwizycji obrazów obejmującym źródła światła, detektory oraz kontrolowane wyroby, uwzględniając zmienność ich cech powierzchni i wady. Pokazano możliwość optymalizacji układu oświetleniowego, gdy obrazowana powierzchnia jest silnie połyskliwa i złożona geometrycznie.

Użyteczność wyników badań i opracowanych rozwiązań przedstawiono na przykładzie trzech rzeczywistych projektów przemysłowych: kontroli jakości powierzchni czół wałeczków łożysk tocznych, kontroli integralności strukturalnej przegubów homokinetycznych oraz pomiarów optycznych wkrętów kostnych.

Przedstawione wyniki badań mogą być wykorzystane w projektowaniu optomechatronicznych maszyn i urządzeń z użyciem komputerowo wspomaganej inżynierii (CAE).



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni,
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-811-2