

Janina A. Jakubczyc, Maria A. Mach

WYBRANE ZAGADNIENIA WNISKOWANIA TEMPORALNEGO

1. Wstęp

Wnioskowanie – szczególnie o czasie i zmianach, a więc o danych, procesach, zdarzeniach itp. – jest obecne i w naukach specjalistycznych, i w życiu codziennym. Wnioskowanie nie może być nazwane kompletnym, gdy nie mówi nic o tym, jak wnioskujemy o zmianach. W sztucznej inteligencji (SI), której celem jest naśladowanie lub symulacja obliczeniowa ludzkiego myślenia, włączenie możliwości opisu i reprezentacji zmian jest wymaganiem koniecznym w ujęciu zarówno ogólnym, jak i szczegółowym. Potrzebę wnioskowania temporalnego prześledzimy na podstawie pięciu głównych, choć nie do końca rozłącznych, obszarów badawczych SI (jednak dobrze charakteryzujących problem).

2. Czas w obszarach sztucznej inteligencji

2.1. Bazy danych

Potrzeba aktualizacji baz danych wynika ze zmienności świata i naszej wiedzy o nim. Tradycyjne technologie baz danych nie są w stanie rozróżnić tych dwóch przyczyn. Czasami nie ma to znaczenia, jednak jest ważne wtedy, gdy istotna jest historia zmian, np. w bazie danych zawierającej informacje o zmieniającym się świecie. Wówczas konieczna staje się bezpośrednia reprezentacja faktów zależnych od czasu, tak by móc śledzić, co jest prawdziwe i kiedy. By poradzić sobie z takim problemem, konieczna jest jakaś forma wnioskowania zależnego od czasu.

Najprostszym proponowanym rozwiązaniem jest model, w którym występuje pewne uporządkowanie chronologiczne, np. system dat i relacji między nimi, gdzie każdy fakt posiada indeks czasu, w którym jest prawdziwy. W tym przypadku czas reprezentowany jest pośrednio. System ten ma sporo niedogodności, z których główną

wyduje się być konieczność bezpośredniego wprowadzenia ogromnej ilości informacji. Rozwiązaniem tego problemu może być przyjęcie założenia o trwaniu faktów, na przykład aksjomat stwierdzający, że jeśli fakt staje się prawdziwy w czasie t , to jest on prawdziwy aż do bezpośredniego stwierdzenia o fałszywości tego faktu w czasie późniejszym niż t (por. m.in. [KNMA94; VILA94]). Można dojść do wniosku, że tak naprawdę to istotne w tym wypadku są nie same fakty, ale zmiany, którym one podlegają. Sugeruje to potrzebę wprowadzenia bezpośredniego odniesienia do zmian. Tą drogą podążyli R.A. Kowalski i M. Sergot [KOSE86], wykorzystując logikę pierwszego rzędu, w której zdarzenia identyfikowane są poprzez indywidualne stałe, umożliwiające odniesienie się do otrzymanych stanów w okresach przed zdarzeniami i po nich. Natomiast głównym kierunkiem tworzenia i rozwoju temporalnych baz danych jest poszerzenie istniejących relacyjnych lub obiektowych baz danych oraz języków zapytań o aspekty temporalności. Interesującą pracę o relacyjnych bazach danych przedstawił K. Kania [KANI04]. Porusza w niej m.in. problemy związane z modelowaniem czasu, modelami konceptualnymi i logicznymi oraz z architekturą zarządzania temporalnymi bazami danych.

2.2. Systemy ekspertowe

O systemie ekspertowym można myśleć jak o bazie danych, w której możliwość wnioskowania stała się takim samym osiągnięciem, jak same dane (baza wiedzy). Jeśli będziemy przesuwac punkt równowagi na korzyść wnioskowania, znajdziemy się w czymś bardziej podobnym do dowodzenia twierdzeń.

Możliwości wnioskowania w systemie ekspertowym powinny być wspierane przez pewien rodzaj logiki. Jaki dokładnie rodzaj, będzie zależało od dziedziny, której będzie dotyczył system ekspertowy. Jeśli dziedzina zależy od czasu, powinna to być logika temporalna.

Wybór odpowiedniego modelu temporalnego jest uzależniony od czynnika ciągłości zmian. W odniesieniu do zmiennych podlegających ciągłym, płynnym zmianom, takich jak: temperatura ciała, wielkość produkcji, ceny akcji, ciśnienie, można zastosować wskaźniki zmian tych charakterystyk lub rachunek różniczkowy. Takie podejście umożliwia traktowanie wskaźników zmian jako formy opisu zmienności w czasie ze swoimi własnymi prawami. Wymaga ono rozpoznania koncepcji zmian: procesu lub stanów zmiany w przeciwieństwie do zmiany stanu (z czym mamy do czynienia w modelu „zmiany faktu”). W systemie powinien znaleźć się nowy element, opisujący sposób, w jaki zmiana stanów współdziała ze stanami, których zmiany rejestruje.

Przykład 1

System śledzi ceny akcji. Dla każdej ceny możemy zdefiniować następującą regułę:

Reguła	Przykład
Jeśli $C = C_0$ jest prawdziwe w czasie T	Jeśli cena akcji wynosi 20 zł w dniu 6.12.2004 r.
oraz $dC/dT = p$ jest prawdziwe w przedziale $[T, T']$,	oraz przyrost ceny wynosi w ciągu tygodnia 0,5 zł/dzień,
wówczas $C = C_0 + Z(T' - T)$ jest prawdziwe w T'	wówczas cena akcji wynosi $20 + 0,5 \cdot (13 - 7) = 23$ (zł) i jest prawdziwa w dniu 13 grudnia 2004 r.

Zdefiniowana reguła zmiany stanu cen ma wpływ na wartości cen w różnych momentach czasu. Najbardziej oczywistym sposobem zaimplementowania możliwości radzenia sobie z ciągłymi zmianami jest wykorzystanie osi liczb rzeczywistych do modelowania upływu czasu, gdzie każda liczba rzeczywista reprezentuje moment czasu. Jest to rozwiązanie przyjęte przez D. McDermotta [MCDE82]. Alternatywne zawężone rozwiązanie reprezentuje A.P. Galton [GALT90].

2.3. Planowanie

Zadaniem wielu systemów ekspertowych jest dostarczanie porad, np.: diagnozowanie, wybór kuracji, strategii postępowania, działania, możliwości wypracowania kolejnych działań. W takich sytuacjach ogromną rolę odgrywa planowanie. Zadanie to w zależności od stopnia złożoności rozwiązywane jest za pomocą systemu jednoagentowego lub wieloagentowego. Przed systemem jednoagentowym stawia się określony cel, przy założeniu, że zmiany środowiska są wyłącznie efektem działań podjętych przez agenta. Z tym rodzajem sytuacji dobrze radzi sobie rachunek sytuacyjny J. McCarthy'ego i P. Hayesa [MCHA69]. Nie jest on jednak wystarczający, gdy świat ulega zmianom również niezależnie od akcji agenta, a cel postawiony jest nie jednemu, lecz wielu agentom. Rodzi to konieczność uwzględnienia przekonań, zamierzeń, oczekiwań oraz współdziałania wielu agentów w dążeniu do wspólnego celu.

Uważa się, że by poradzić sobie ze złożonością planowania, konieczne jest wzbogacenie temporalnego schematu poprzez dodanie akcji i zdarzeń (nie po prostu zdarzeń punktowych, ale zdarzeń, które trwają jakiś czas), przyczynowości, intencji i tym podobnych. Jeśli sprawa dotyczy samego czasu, rozważania dotyczą elementarnych jednostek czasu, np. przedziału, który może być traktowany jako jednostka o swoich własnych prawach lub tylko jako zbiór wystąpień, a co za tym idzie, problem, czy akcja lub zdarzenie może objąć przedział jako całość (w przeciwieństwie do sposobu, w którym stan zajmuje przedział z racji objęcia punktów składających się na przedział). Takie przedziałowe podejście reprezentuje między innymi J.F. Allen [ALLE84].

Planowanie dodatkowo wymaga radzenia sobie z wieloma możliwymi sytuacjami w przyszłości. Prawie automatycznie nasuwa się rozgałęziony model czasu lub idea zbioru stanów świata McDermotta, wspomagana częściowym uporządkowaniem z rozgałęzieniem w przyszłość i z funkcją przypisania dat [MCDE82]. Nie ma zgody, czy czas powinien być rozgałęziony tylko w przyszłość, czy również w przeszłość. Wskazuje się, że wnioskowanie o przeszłości również jest wnioskowaniem hipotetycznym, stąd też nie widzi się powodu, dla którego uzasadnione byłoby traktowanie inaczej przyszłości niż przeszłości. Natura wnioskowania temporalnego powinna zatem odgrywać bardziej rozstrzygającą rolę w określaniu struktury modelu, niż robi to sama natura czasu.

Mechanizm planowania, gdy nie ma dostępu do właściwej teorii przyczynowości, jest nieefektywny. Efektywne planowanie wymaga zarówno przyczynowego wnioskowania w przód (co się stanie, jeśli wykona się takie a takie działanie), jak i przyczynowego wnioskowania w tył (co należy zrobić, by zaistniała taka a taka sytuacja). Planiści potrafią radzić sobie z dość długimi łańcuchami przyczyn i skutków oraz dopuszczają możliwe do przewidzenia działania, które w ostatniej chwili mogą narzucić zmiany planu. Ludzie posiadają jeszcze subtelniejsze zdolności, które najlepiej można scharakteryzować jako gotowość do improwizacji w nieprzewidzianych okolicznościach. Wymaga to nie tylko zerwania ustalonego planu, ale również pewnego rodzaju chłodnej kalkulacji, która umożliwi szybkie zrewidowanie planu, gdy zaistnieje taka konieczność. Sytuacja taka wymusza, by mechanizm planowania oraz cała wiedza o świecie, po którą można sięgnąć (włączając wiedzę przyczynową), były „w zasięgu ręki”. W takich sytuacjach, jak wiadomo z doświadczenia, trudno o racjonalne działanie.

2.4. Robotyka

Od robotów wymaga się, by byli ekspertami w swoich obszarach działań i dlatego wszystkie rozważania dyskutowane w odniesieniu do systemów ekspertowych znajdują również zastosowanie w odniesieniu do nich. Inteligencja robota przejawia się w możliwościach jego działania w świecie realnym, w interakcji z tym światem, i dlatego powinna naśladować wiele ludzkich umiejętności (podrozdział 2.5 odnosi się również do problemu robotyki).

Konieczność reakcji w czasie rzeczywistym jest niezwykle istotna. Bardziej niż gdzie indziej, SI może przynieść pożytek bliski badaniom człowieka oraz pojęć temporalnych, które rozwijają się, by umożliwić radzenie sobie ze zmieniającym się światem. Roboty, by móc poruszać się po świecie, muszą posiadać wiele umiejętności, które można ująć w dwóch kategoriach. Pierwsza to podstawowa i oczywista wiedza o świecie, dotycząca m.in. rozumienia tego, że rzeczy spadają, gdy zostaną upuszczone, że pewne materiały są śliskie, inne ciężkie czy elastyczne. Nasza intuicyjna wiedza o tych rzeczach została nazwana „naiwną fizyką” przez P.J. Hayesa

[HAYE78]. Jest ona „naiwna”, ponieważ poprzedza każdą techniczną wiedzę nabywaną w procesie uczenia się, która jest drugą kategorią umiejętności robota.

W rzeczywistości należy więc sprostać dwóm fizykom – naiwnej oraz naukowej – i traktować je jako obszary komplementarne. Oba rodzaje fizyki potrzebują wnioskowania temporalnego. Fizyka naukowa daje sobie radę z bardzo okrojoną ontologią temporalną, z rodzaju: stan S istnieje w czasie t , wykorzystując liniowy model czasu w postaci osi liczb rzeczywistych. Do rozważenia temporalnych podstaw naiwnej fizyki niezbędna jest dobra taksonomia rzeczy, które trwają w czasie (stanów, procesów, zdarzeń itp.). Jednym ze sposobów analizy tego problemu jest rozważenie go na gruncie rozumienia języka naturalnego.

2.5. Rozumienie języka naturalnego

Rozumienie języka naturalnego (RJN) dotyczy wszystkich wcześniej wymienionych kategorii, chociażby ze względu na potrzebę tworzenia interfejsu koniecznego do zapewnienia komunikacji pomiędzy człowiekiem a systemem. W tym przypadku potrzeba wnioskowania temporalnego jest oczywista, gdyż język naturalny jest pełen wyrażań odnoszących się do różnych rodzajów czasu i trwania, różnych rodzajów akcji, zdarzeń, stanów itp., tak samo jak modyfikatory gramatyczne, które jawnie dotyczą temporalnych cech świata.

Interesujące jest spostrzeżenie, że najważniejsze w języku jest to, iż gramatyka języka naturalnego zawiera w sobie pewną teorię świata: świat, jakim go widzimy. Faktem jest, że całość języka umożliwia nam interakcje ze światem, z powodzeniem sprawdzając wartość teorii jaką zawiera. Stąd analiza języka jest dobrym sposobem odkrywania struktury pojęć, które odnoszą się w istotny sposób do świata takiego, jakim on jest w rzeczywistości.

W SI szczególną uwagę poświęca się problemom wynikającym z narracji i dialogu. W logice mówimy o modelach jako o zbiorze zdań, który jest definiowany tak, by porządek, w jakim prezentowane są zdania w zbiorze, nie był fizyczny, ale uporządkowany po czasie. Narracja i dialog nie są zbiorami zdań, są natomiast sekwencją zdań wypowiedzianych po kolei, zgodnie z następstwem czasu. Ważność porządku, w jakim występują zdania, pokazuje przykład 2.

Przykład 2

Model narracji I:

Spadły ceny akcji firmy A.

Jan kupił akcje firmy A.

Jan otrzymał wysoka nagrodę pieniężną.

Można przyjąć, że przyczyną zakupu akcji firmy A był spadek ich ceny.

Model narracji II (po przestawieniu zdań):

Jan otrzymał wysoką nagrodę pieniężną.

Jan kupił akcje firmy A.

Spadły ceny akcji firmy A.

Można przyjąć, że przyczyną zakupu akcji firmy A było otrzymanie wysokiej nagrody pieniężnej przez Jana.

Przykład ten podkreśla jak może zmienić się znaczenie narracji, jeśli zmieniony zostanie porządek wypowiedzianych zdań. Wnioskowania te oczywiście nie są jedynymi możliwymi. Istnieje możliwość ich unieważnienia. Jest to sugestia, że do odpowiedniej teorii rozumienia narracji znajduje zastosowanie logika niemonotoniczna. Pierwszym systemem rozumienia języka naturalnego był Chronos B. Bruce'a [BRUC72].

3. Teoretyczne kwestie czasu

Klasyczne podejście do czasu ukonstytuowały prace Galileusza i Newtona, określające standardowe traktowanie czasu w fizyce (por. m.in. [MCHA69; MAKN90]). Standard ten bazuje na przyjęciu trzech podstawowych założeń. Pierwszym jest niezależność czasu od zmian. Drugim założeniem jest przyjęcie, iż czas jest pojęciem atomowym, składającym się z niezliczonej wielu wystąpień, których czas trwania jest zerowy. I ostatnim założeniem jest zasada, że stany świata są fundamentalne, a zmiany wynikają z interakcji stanów i czasu. Zmiany są więc produktem ubocznym relacji pomiędzy stanami i czasem.

Wszystkie wielkości fizyczne oprócz samego czasu wyrażane są jako funkcje dziedziny czasu. Zastosowano najprostszy sposób uwzględnienia zmian, którym jest dołożenie predykatu czasu, takiego by dla różnych momentów czasu t i t' prawdziwość wyrażenia $P(t)$ była różna od wyrażenia $P(t')$ (cena akcji 6 grudnia 2004 r. wynosiła 20 zł, a 13 grudnia 2004 r. wynosiła 23 zł).

Przykład 3

Mur Berliński zburzono w 1990 r.

Możliwe są następujące formy logiczne wynikające z powyższego zdania:

Mur Berliński stał w 1975 r.

Mur Berliński nie istniał w 2004 r.

Wszystkie zmiany można wyrazić w takiej samej formie logicznej:

$\text{zburzony}(\text{Mur Berliński}, 13.12. 2004) \wedge \sim \text{zburzony}(\text{Mur Berliński}, 11.01.1975).$

Przykład 4

Rozważmy inny przykład, tym razem z kinetyki elementarnej. Gdy rzucimy piłkę do góry, wówczas przez jakiś czas porusza się ona do góry, po czym zaczyna spadać. Zmianę tę przedstawia się jako fakt, w którym dla

$t_0 < t < t_1$ (gdzie t_0, t, t_1 – punkty czasu), $h'(t) > 0$ (gdzie h jest wysokością lotu piłki ponad pewien ustalony poziom, h' jest pierwszą pochodną po czasie).

Jeśli zachodzi relacja $t_1 < t < t_2$, to mamy $h'(t) < 0$. Dołączamy predykat $P(t)$ do wyrażenia $h'(t) > 0$ i mamy momenty czasu, w których $P(t)$ jest prawdziwe, i inne momenty czasu, w których jest nieprawdziwe – teoretycznie.

Zauważmy, że zmiany w powyższym przykładzie nie są reprezentowane. Pojawiają się jako produkt uboczny faktu, że pewne predykaty mają różne wartości prawdy dla różnych argumentów. Trudno wyrazić w języku kinetyki potoczne zdania wynikające z powyższego przykładu:

- zmienił się kierunek lotu piłki,
- nie zmieniła się prędkość lotu piłki.

Mimo wspomnianych ograniczeń zaletą tego standardu jest siła wyjaśniania i przewidywania, choć tylko w ograniczonych dziedzinach, np. w analizie ruchu planet i mniej dokładnie – balistyki. Radzi sobie również z rosnącą złożonością teorii fizycznych w szerokim spektrum problemów. Zawsze jednak wnioskowanie tego rodzaju ma charakter matematyczny, a przede wszystkim jest wnioskowaniem ilościowym. Zmiany można wyrazić tylko w postaci wartości numerycznych. Czas również jest reprezentowany jako system wartości numerycznych. Można zatem zidentyfikować pewien obraz czasu, który jest nierozzerwalnie związany z traktowaniem procesu zmian w fizyce. System czasu jest modelowany przez system liczbowy. Najczęściej wybierany jest system liczb rzeczywistych, ze względu na matematyczną ciągłość tego systemu, gdyż możliwe jest przeniesienie jej na ciągłość samego czasu istniejącego w fizyce.

Wymiar czasu jest widziany jako składający się z niezliczonej liczby bezwymiarowych wystąpień. W jaki sposób wymiar może powstać z agregacji czegoś, co nie ma wymiaru? Odpowiedź odwołuje się do niezliczonej liczby wystąpień, ale nawet intuicyjnie trudno przyjąć ten fakt bez zastrzeżeń. W każdym z tych niezliczonych wystąpień świat jest w pewnym stanie. Fakt, że stan świata w poszczególnych wystąpieniach jest różny, jest tym, co konstytuuje zmianę w świecie.

Nie ma wątpliwości, że nie może być to jedyny model opisu zmian i zdarzeń. Należy poszukiwać pełniejszego sposobu wnioskowania temporalnego. Problemy wynikające z podważania paradygmatu Newtona stanowią przesłanki do tworzenia systemów o szerszych możliwościach. Z powyższych rozważań można wysnuć wniosek, iż na gruncie fizyki powinno się poszukiwać ściśle matematycznego opisu funkcji, która przekształca wystąpienia w stany świata, oraz zapewnienia zgodności ze światem zewnętrznym. Realizacja tego zadania nie może odbyć się bez rozważenia wszystkich założeń paradygmatu Newtona oraz rozszerzenia o temporalne więzy integralności (por. [KKG98; MAWI03; MAWI04]).

3.1. Paradygmat Newtona w świetle potrzeb i możliwości wnioskowania temporalnego

Niezależność czasu od zmiany

Pierwszym zadaniem jest wypracowanie adekwatnej podstawy do reprezentowania obiektów, o których chcemy wnioskować. Potrzebujemy więc znaleźć dobry

sposób reprezentowania czasu i dobry sposób do reprezentowania zmian. Naturalnym sposobem jest paradygmat Newtona dyskutowany wcześniej. Polega on na ustaleniu pewnych ram czasu (temporalności), np. samego modelu czasu, a następnie nałożeniu na ten model zbioru struktur reprezentujących różne rodzaje zmian, które występują w czasie (takie jak procesy czy zdarzenia).

W modelach tego typu, jak potwierdza następujący cytat: „Absolutny, prawdziwy i matematyczny czas, sam w sobie oraz ze swej własnej natury, płynie jednostajnie bez odniesienia do czegokolwiek zewnętrznego...” [GHRG95, s. 185]. Alternatywną możliwością, związaną z nazwiskiem Leibniza, jest rozważenie zmian jako logicznie wcześniejszych od czasu (ze względu na pierwszeństwo, co było wcześniej). Innymi słowy, ustalenie jakiegoś rodzaju modelu zmian, a następnie zdefiniowanie pojęć temporalnych w odniesieniu do modelu. Jest to model, w którym czas nie istnieje niezależnie, gdyż został całkowicie zdefiniowany według wcześniej ustalonych pojęć dotyczących zmian. Taki model nazywany jest modelem zależnym od czasu. Celem zilustrowania różnic pomiędzy modelem zależnym i niezależnym od czasu posłużmy się przykładem:

Dwa zdarzenia $Z(1)$ i $Z(2)$ łączy relacja, która mówi, że zdarzenie $Z(1)$ poprzedza zdarzenie $Z(2)$ oraz że czas $t(1)$ poprzedza $t(2)$. Różnice dotyczą tego rodzaju relacji pomiędzy zdarzeniami i czasem.

W modelu niezależnym czasowo zbiór momentów czasu – zawierający $t(1)$ i $t(2)$ – dany jest od początku, razem z relacją następstwa, która określa, że $t(1)$ poprzedza $t(2)$. Każdemu zdarzeniu jest następnie przypisywany czas t tego wcześniej danego zbioru momentów czasu:

Zdarzenie $Z(1)$ wystąpiło w czasie $t(1)$, a zdarzenie $Z(2)$ wystąpiło w czasie $t(2)$. Zatem możemy powiedzieć, że zdarzenie $Z(1)$ poprzedziło zdarzenie $Z(2)$, co traktowane jest jako skrócony sposób stwierdzenia, że istnieje czas $t(1)$ i $t(2)$ taki, że $Z(1)$ występuje w czasie $t(1)$, a $Z(2)$ występuje w czasie $t(2)$ oraz $t(1)$ poprzedza $t(2)$.

W modelu zależnym od czasu najpierw mamy dany zbiór zdarzeń, a więc w tym przypadku zdarzenie $Z(1)$ i $Z(2)$ łącznie z siecią powiązań między nimi (jak przyczynowość, kolejność, równoczesność). Następnie identyfikowany jest czas w odniesieniu do relacji powiązań, np. jako równowartościowe klasy zdarzeń dla relacji równoczesności. By stwierdzić, że czas $t(1)$ poprzedza $t(2)$, można powiedzieć w uproszczeniu, że każde zdarzenie, które wystąpiło w $t(1)$ poprzedza każde zdarzenie, które wystąpiło w $t(2)$. Kiedy dokładnie wystąpiło zdarzenie, zależy od sposobu, w jaki czas jest przypisywany do zdarzeń, np.:

Zdarzenie Z wystąpiło w czasie t , jeśli zdarzenie Z należy do klasy równoczesnej t .

Modele czasowo zależne wydają się być bardziej satysfakcjonujące niż modele, w których **czas jest niezależny**. Bezpośrednio odczuwamy zmiany i zdarzenia, natomiast czasu nie doświadczamy bezpośrednio. W zasadzie wydaje się, iż czas jest dla nas pojęciem zależnym od wcześniejszej koncepcji zmian.

Niektóre aplikacje SI naturalnie faworyzują podejście do zależności czasu w rozumieniu narracji, w podejściu do planowania w systemie STRIPS R.E. Fikesa

i N.J. Nilssona [FINI93] i w niektórych formach zarządzania bazą danych, gdzie model temporalny tworzony jest stopniowo w krokach wprowadzania danych przez użytkownika. W ujęciu, w którym czas jest niezależny, wykonanie takiej operacji wymagałoby kompletnej struktury czasu danej na wstępie, jako rodzaju pustej tablicy, do której będą wpisywane dane w kolejności ich spływania. Problem polega na prawidłowej temporalnej lokalizacji lub na tym, że nie są znane relacje między danymi w momencie ich wprowadzania. Lepszym modelem w takim przypadku będzie umieszczenie tylko temporalnej pozycji oraz relacji korespondujących do faktów już wprowadzonych.

Czas jako niezliczona ilość nie trwających wystąpień

Rozmytość pojęcia „czas” ilustruje głęboko zakorzoną sprzeczność w sposobach myślenia o czasie, ujawniającą się w dwóch formach rzeczownika ‘czas’:

- niepoliczalny – spędziliśmy mnóstwo czasu razem,
- policzalny – widzieliśmy się kilka razy.

Wydaje się, że najbardziej fundamentalną kwestią, którą należałoby rozstrzygnąć w procesie tworzenia formalnego modelu czasu, jest, jak pogodzić ze sobą te dwa wyobrażenia o czasie.

Fakt, że liczby rzeczywiste tworzą zbiór różnych wystąpień, jest zgodny z naszą intuicją. Sam czas można podzielić na zbiór pojedynczych temporalnych jednostek (w tym przypadku wystąpień). Jak już wcześniej wspomniano, klasycznym pomysłem Newtona jest reprezentacja czasu jako liczb rzeczywistych. Płynną naturę czasu jako pewnego pojedynczego i nieprzerwanego strumienia reprezentuje matematyczna ciągłość osi liczb rzeczywistych. Ten obraz atomowej struktury czasu jest traktowany jako podstawowy. Ciągłość reprezentowana jest poprzez znaczenie złożonej konstrukcji definiującej nieskończoną podzielność liczb rzeczywistych. W obrazie tym wystąpienie jest niczym innym jak punktem potencjalnego podziału, istotną częścią czasu obejmującego raczej przedziały, które zostały właśnie utworzone. Punkt podziału ma znaczenie tylko wówczas, gdy oddziela dwa przedziały, a czas jest agregacją przedziałów, a nie punktów podziałów. Znaczenie tego poglądu wynika z dwóch podstawowych przyczyn:

- nacisk na nieskończoną podzielność jako na potencjalny, a nie ustalony fakt; stopniowe konstruowanie reprezentacji temporalnej, rezygnacja z przyjęcia jej z góry za daną;
- duże znaczenie idei przedziałów (jako przeciwnych wystąpieniom) jako fundamentalnych jednostek czasu, które zdają się lepiej współgrać z naszą intuicją.

Na podstawie tych przesłanek wydaje się, że łatwiej jest w tym przypadku zdefiniować odpowiednie podstawy modelowania wnioskowania temporalnego niż w przypadku zawilego modelu opartego na wystąpieniach sugerowanych w fizyce. Większość fundamentalnych pojęć temporalnych reprezentuje raczej przedziały niż wystąpienia. Wystąpienia bardziej naturalnie występują jako zjawiska pochodne, ograniczone punktowo przedziały, np. moment, w którym biegacz pokona milę.

Ogólnie abstrakcyjne pojęcie „wystąpienia” jest wytworem ludzkiej chronologii. Społeczeństwo bez zegarów nie będzie posługiwało się pojęciem oznaczającym godziny (np. 10.15) i obce będzie mu pojęcie doby podzielonej na nieskończony zbiór dokładnych godzin tak samo od siebie odległych.

W SI znajdujemy przykłady modeli bazujących zarówno na wystąpieniach, jak i na przedziałach. Jednak większym powodzeniem cieszy się model przedziałowy, zaproponowany przez J.F. Allena [ALLE84]. Trzeba wspomnieć, iż intuicyjna naturalność wynikająca z adaptacji podejścia przedziałowego jest równoważona przez większą prostotę formalną, która jest możliwa w modelu bazującym na wystąpieniach. Być może idealnym rozwiązaniem będzie usankcjonowanie obu – wystąpień i przedziałów – jako fundamentalnych jednostek w równym stopniu.

Pierwotność stanów i wtórność zmian i zdarzeń

Postrzeganie zmian odbywa się na podstawie dwóch źródeł, a mianowicie: pamięci i doświadczenia. Z jednej strony świadomość zmian pojawia się jako wynik porównania stanu właśnie doświadczanego ze stanem pamiętanym z wcześniejszych doświadczeń, np. zauważamy zmianę położenia księżyca na nieboskłonie, ale nie dostrzegamy poruszającego się księżyca. Z drugiej strony, jeśli zmiana następuje wystarczająco szybko, by móc ją śledzić, można doświadczyć zmiany bezpośrednio, bez odwoływania się do pamięci, np. biegnący kot, idący człowiek. Wówczas obserwujemy dwie rzeczy: biegnącego kota oraz fakt zmiany jego pozycji.

Taki model jest całkowicie ignorowany przez model zmieniających się stanów. Sposobem ujęcia zarówno zmiany, jak i zmiany stanu, jest odniesienie się do zmiany poprzez eksperymentalny model zmian, w przeciwieństwie do modelu historycznego, przez zmiany stanu. Każdą zmianę można traktować w kategoriach zarówno historycznych (sekwencja stanów), jak i eksperymentalnych (nowy rodzaj zmiany – stan zmiany). Podział ten ma zasadniczy wpływ na sposób reprezentowania zmian – i w języku potocznym, i w komputerowych językach formalnych potrzebnych do automatyzacji procesów wnioskowania temporalnego.

Najprostszym podejściem, bardzo bliskim paradygmatowi Newtona, jest przypisanie każdemu momentowi czasu stanu świata. Wówczas zmiana pojawia się naturalnie, jako konsekwencja przypisania różnych stanów świata do różnych momentów czasu. Modele tego rodzaju, w których zmiana pojawia się jako iloczyn przypisania stanów do momentów czasu, mogą być nazwane modelami zmian opartych na stanach. Nie są one modelami koniecznie L niezależnymi od czasu. Stany świata mogą być zdefiniowane wcześniej poprzez opisanie relacji porządku bezpośrednio na zbiorze stanów świata, a czas wprowadzony później – jedynie jako sposób przypisania wskaźników liczbowych do stanów z ich wewnętrznym porządkiem. Takie rozwiązanie zastosowali m.in. R.E. Fikes i N.J. Nilsson w 1971 r. w systemie STRIPS [FINI93].

Jaki rodzaj zmian może być reprezentowany w modelach bazujących na stanach częściowo zależy od konstrukcji modelu i informacji szczegółowych. Może okazać

się, że model bazujący na rachunku stanów jest poprawny i wystarczający, a więc można niekiedy przyjąć, iż historia świata jest po prostu uporządkowanym zbiorem stanów. Jednak nie zawsze oznacza to, że rozwiązanie to jest odpowiednie dla danej aplikacji. Często ważniejsze jest posiadanie modelu zmian odzwierciedlającego intuicyjne rozumienie lub język, w którym można wyrazić to rozumienie – a to znaczenie odbiega od modelu opartego na stanach świata.

Rozważmy relacje pomiędzy stanem „bycia właścicielem firmy” a zdarzeniem „nabycia firmy”. Jedynym modelem obliczeniowym jest przyjęcie „nabycia firmy” jako zdarzenia powodującego zmianę stanu. Można powiedzieć, że „nabycie firmy” ma zmienić stan, ze stanu nieposiadania na stan posiadania. Intuicyjnie stan „posiadania firmy” może być zdefiniowany jako stan będący wynikiem działania „nabycie firmy”. W takich sytuacjach, np. „nabywanie firmy” musi być zdefiniowane wcześniej jako bardziej pierwotny rodzaj zmiany. Język potoczny zawiera wiele opisów takich stanów (np.: złamany, nieżywy, ugotowany, przeczytany), których znaczenie musi być wyjaśnione poprzez wcześniejsze opisy zdarzeń. Stąd jedną z możliwości rachunku zmian jest postulowanie zdarzenia, które jest różne i niezależne od stanu. Można to potraktować jako granicę i rozpoznawać tylko te stany, które mogą być opisane przez zdarzenie. Można również mówić o rachunku zmian zdarzeń bazującym na rachunku zdarzeniowym zmian.

Bardziej realistyczne jest podejście mieszane, w którym zarówno stanom jak i zdarzeniom przyznaje się status pojęć pierwotnych. W takim modelu można wyspecyfikować relacje logiczne i przyczynowe, które zachodzą pomiędzy stanami i zdarzeniami, np.: zdarzenie prowadzenia promocji jakiegoś towaru przez firmę, jest logiczną implikacją stanu jego wyprodukowania, zdarzenie zatrudnienia jakiegoś specjalisty przez przedsiębiorstwo jest związane ze stanem braku takich w owym przedsiębiorstwie.

Powyższe rozważania ujawniają konieczność znacznego poszerzenia zaproponowanego przez Newtona obszaru reprezentowania zmian i wnioskowania temporalnego. W każdym przypadku należy podejmować decyzje, które mogą być zgodne lub sprzeczne z tym paradygmatem. Na jednym biegunie mamy obraz samego Newtona ze zbiorem wystąpień, z których każde jest przypisane do konkretnego stanu świata. Na drugim biegunie, jeśli odrzuciliśmy wszystkie założenia Newtona, mamy obraz, w którym podstawowymi elementami są zdarzenia i powiązania między nimi wyrażone przez relacje równoległości, następstwa itp.

3.2. Problem spełniania ograniczeń temporalnych

Problem spełniania ograniczeń temporalnych (PSOT) jest informatyczną technologią, która ma zastosowanie w reprezentacji i generowaniu odpowiedzi na zapytania o czasowe wystąpienia oraz czasowe relacje (por. m.in. [SCVI98; SCDE97]). Informacja jest reprezentowana jako problem spełniania ograniczeń (*Constraint satisfaction problem*) – PSO – gdzie zmienne oznaczają zdarzenia w czasie, a ograniczenia

określają możliwe czasowe relacje między nimi. PSO odnosi się do specjalnego rodzaju własności, które poza podstawowymi wymaganiami problemu muszą być odniesione do dodatkowych zewnętrznych cech strukturalnych. Wyjaśniając dokładniej, PSO wiąże się z problemami, które mogą być analizowane w kategoriach zbiorów zmiennych. Relacje pomiędzy zmiennymi w tych zbiorach są wyrażone w formie ograniczeń.

Popularność wykorzystania tego podejścia do wnioskowania temporalnego wynika z dwóch przyczyn:

1) reprezentacja akcji i zdarzeń, która wykorzystuje czas jako pojęcie pierwotne, wymaga określenia dodatkowych relacji między przyjętymi jednostkami czasu a faktami lub zdarzeniami oraz ograniczenia zbioru tych relacji do możliwych do wykonania;

2) PSO ma za sobą dość długi okres badań, stąd pewne rozwiązania mogą być z powodzeniem wykorzystane w PSOT.

Problem spełniania ograniczeń temporalnych obejmuje zbiór punktów i zmiennych przedziałowych wraz ze zbiorem binarnych ograniczeń na nich opisanych. Ograniczenie C_{ij} między parą zmiennych X_i i X_j jest opisane przez specyfikację zbioru dozwolonych relacji i zdefiniowane w następujący sposób:

$$C_{ij}^{def} = C(X_i, X_j) = (x_i r X_j) \vee \dots \vee (X_i r_k X_j), \text{ gdzie } C_{ij} = \{r_1, \dots, r_k\} \text{ lub } X_i \{r_1, \dots, r_k\} X_j.$$

Ograniczenia temporalne są klasyfikowane ze względu na różne kryteria, ale podstawowym jest klasa, do której należą relacje $r_1, \dots, r_k$ (tj. jak reprezentowany jest czas). Wyodrębnia się cztery podstawowe klasy:

1) jakościowe (symboliczne) ograniczenia punkt–punkt na parze punktowych zmiennych X_i, X_j , gdzie $r_i \in \{<, =, >\}$;

2) metryczne ograniczenia punkt–punkt na parze punktowych zmiennych X_i, X_j , gdzie $r_i \equiv X_j - X_i \in [a, b]$ natomiast a i b są stałymi;

3) jakościowe ograniczenia punkt–przedział między punktową zmienną a zmienną przedziałową, gdzie $r_i \in \{\text{przed, start, przez, koniec, po}\}$;

4) jakościowe ograniczenia przedział–przedział na parze przedziałów,

$$\text{gdzie } r_i \in \left\{ \begin{array}{l} \text{przed, po, spotyka, spotkany_przez} \\ \text{zachodzi_na, zachodzi_na_przez, trwa, zawiera} \\ \text{rozpoczyna, rozpoczety_przez} \\ \text{kończy, zakończony_przez, równy} \end{array} \right\}.$$

Wymienione wyżej klasy ograniczeń nie są jedynymi klasami. Coraz częściej wymuszone rzeczywistymi problemami pojawiają się klasy mieszane łączące wyżej przedstawione klasy (por. [MEIR91; KALA91]), lub powstają nowe klasy ograniczeń, np. rozmyta klasa ograniczeń [GODO95] czy periodyczna klasa ograniczeń [MORR95].

Każda klasa ograniczeń jest charakteryzowana przez relacje temporalne $\{r_1, \dots, r_k\}$, które tworzą zbiór podstawowych relacji temporalnych PRT (*basic temporal relations*). Wszystkie zbiory PRT spełniają dwa następujące warunki:

- ich elementy są wzajemnie rozłączne;
- połączenie wszystkich ich elementów stanowi pełne ograniczenie.

Forma ograniczeń jest fundamentalna dla PSOT, ponieważ wszystkie ograniczenia są opisane przez elementy zbioru PRT, a poszukiwanie rozwiązania polega na przetworzeniu podzbioru PRT. Rozwiązaniem PSOT jest spójne przypisanie każdej parze zmiennych jednej podstawowej relacji (*singleton labelling*). Spójność takiego przypisania jest definiowana zgodnie ze specyfiką semantyczną każdej klasy PSOT. Każda klasa ograniczeń wymaga oddzielnego zbioru specjalistycznych algorytmów (por. m.in. [GES95; SCDE97; BEEK92]).

PSOT koncentruje się na dwóch podproblemach: spójności, która jest ściśle związana ze znalezieniem jednego rozwiązania, oraz na znalezieniu minimalnej reprezentacji, która bezpośrednio opisuje relacje między temporalnymi zmiennymi.

Badania prowadzone są w trzech kierunkach. Pierwszy z nich koncentruje się na identyfikacji możliwych do śledzenia klas oraz na opracowaniu dla nich algorytmów wnioskowania. Drugi kierunek obejmuje doskonalenie algorytmów przeszukiwania. Dobrze poznane są dwie metody: przeszukiwanie w tył oraz przeszukiwanie iteracyjne. Pierwsza z nich działa szybko, lecz nie gwarantuje zakończenia z rozwiązaniem. Druga natomiast zapewnia otrzymanie prawidłowej odpowiedzi, lecz jest bardzo wolna ze względu na wykładniczą złożoność.

Istotnym ograniczeniem modelu PSOT jest założenie, że przedziały punktowe muszą być jednakowego typu tj. albo wszystkie przedziały muszą być domknięte, albo wszystkie otwarte, albo wszystkie otwarte z jednej lub drugiej strony. Takie założenie może prowadzić do problemów, np. jeśli wszystkie przedziały są zamknięte, wówczas przyległe przedziały posiadają wspólny punkt. Gdy sąsiednie przedziały odnoszą się do określenia prawdziwości lub fałszu jakiegoś zdarzenia, wówczas może wystąpić sytuacja, w której dane zdarzenie będzie zarówno prawdziwe jak i fałszywe (oczywiście rozpatrujemy tu podejście, w którym reprezentacja czasu jest bezpośrednia i niezależna od zdarzeń).

W nowszych propozycjach zamiast rachunku zdań lub rachunku kwantyfikatorów rzędu I poszerzonego o kwantyfikatory temporalne stosowane są mapy stanów Harela (por. m.in. [MAWI04; MAWI03]).

Potrzeba tak szerokiego potraktowania problematyki wnioskowania temporalnego pociąga za sobą powstawanie bardzo wielu rodzajów logik temporalnych do reprezentacji czasu i zmian, metod wnioskowania temporalnego, języków akcji. Reprezentatywne przykłady omówione zostały w dalszych rozdziałach niniejszego opracowania.

4. Rachunek sytuacyjny jako przykład podejścia modelowego do problematyki wnioskowania temporalnego

4.1. Wprowadzenie do rachunku sytuacyjnego

Rachunek sytuacyjny został zaproponowany przez J. McCarthy'ego w latach sześćdziesiątych [MCHA68] rozwijany był później przez tegoż autora we współpracy z P.J. Hayesem. Dokładne omówienia tego rachunku można znaleźć w licznych pracach (por. np. [HAJN96; LELE97; GILE99a; GILE99b; REIT00]), z tego względu nie wydaje się celowe ich powtarzanie w tym miejscu. Ograniczymy się jedynie do zwrócenia uwagi na najważniejsze własności tego rachunku. Do niezbędnego minimum ograniczono notację formalną na rzecz bardziej intuicyjnej. Formalizm rachunku sytuacyjnego można znaleźć w przytoczonej literaturze.

Rachunek sytuacyjny jest logiką drugiego rzędu, która w zamierzeniu jego twórców jest specjalnie przeznaczona do opisu dynamicznie zmieniającego się świata. Świat opisywany jest w kategoriach akcji i sytuacji. Każda możliwa historia świata stanowi ciąg następujących po sobie sytuacji. Szczególną sytuacją jest sytuacja S_0 , zwana początkową, czyli ta, w której nie zaszły jeszcze żadne akcje. Wszelkie kolejne sytuacje – będące termami pierwszego rzędu – wynikają z wykonania pewnych akcji. Akcje zatem powodują zmiany świata. Do podstawowych pojęć rachunku sytuacyjnego należy też zaliczyć funkcję binarną $do(\alpha, s)$ – oznacza ona sytuację następną po sytuacji s , a wynikającą z wykonania akcji α w sytuacji s . Akcje w rachunku sytuacyjnym oznaczane są poprzez symbole funkcyjne, sytuacje zaś – jak już wspomniano – są termami pierwszego rzędu.

Każda akcja ma swoje warunki wstępne, czyli zbiór wymagań, które muszą być spełnione, aby można było w bieżącej sytuacji wykonać akcję. W logiczny sposób wynika z tego konieczność wprowadzenia symbolu predykatowego $Poss(a, s)$, który oznacza, że w sytuacji s jest możliwe wykonanie akcji a .

Niezwyczajnie ważną cechą świata dynamicznego są prawa przyczynowo-skutkowe (*causal laws*), które mówią, w jaki sposób akcje wpływają na wartości cech tego świata¹. W rachunku sytuacyjnym prawa przyczynowo-skutkowe wyrażane są za pomocą tzw. aksjomatów skutkowych (*effect axioms*). Inną grupę niezwykle ważnych aksjomatów stanowią tzw. aksjomaty domykania (*frame axioms*), które są niezbędne do ustalenia, które cechy pozostają niezmiennie niezależnie od wykonania danej akcji. Nazwa tych aksjomatów związana jest z opisywanym w literaturze dotyczącej logik temporalnych tzw. problemem domykania wiedzy (szerzej na ten temat np. [GRAN99]). Ponieważ w ogólności liczba aksjomatów domykania jest nieskończona

¹ W opracowaniach angielskojęzycznych na określenie cech stosowane jest słowo *fluent*. Nie ma ono dokładnego odpowiednika w języku polskim. Tłumaczone jest – zależnie od okoliczności – jako „działanie”, „zmienna” lub „fakt”. W niniejszym opracowaniu przyjęto, że używane będzie słowo „cecha”.

(istnieje, bowiem niezliczona liczba cech świata, na które wykonywana akcja nie ma wpływu), w nowszych pracach bazujących na rachunku sytuacyjnym proponuje się zastąpienie tych aksjomatów aksjomatami stanów wynikowych (*successor state axioms*), które znacznie precyzyjniej opisują bezpośrednie efekty akcji [REIT00].

Opis sytuacji w rachunku sytuacyjnym składa się zatem w ogólności z następujących aksjomatów:

- aksjomatów warunków wstępnych akcji,
- aksjomatów skutkowych,
- aksjomatów stanów wynikowych,
- opisu sytuacji początkowej S_0 ,
- unikalnych nazw akcji.

Na zakończenie warto wspomnieć, że tradycyjnym zastosowaniem rachunku sytuacyjnego jest planowanie; powstały na ten temat liczne opracowania. Podejmowano także próby wykorzystania tej notacji w robotyce, jednak zostały one zarzucone ze względu na nieefektywność obliczeniową. Z nowszych prób warto wymienić zastosowanie rachunku sytuacyjnego do zbudowania inteligentnego osobistego asystenta bankowego [LELE97].

4.2. Rachunek sytuacyjny jako narzędzie realizacji adaptacyjnych baz danych – propozycja R. Reitera

R. Reiter [REIT00] zaproponował wykorzystanie rachunku sytuacyjnego jako narzędzia realizacji adaptacyjnych baz danych. Podejście to – w istocie bardzo ciekawe – można potraktować jako pierwszy krok na drodze do realizacji adaptacyjnych baz wiedzy. Zostanie ono poniżej krótko omówione.

Adaptacyjność baz danych Reiter rozumie jako konstrukcję baz zawierających specyfikację całego procesu ewolucji bazy, mającą stanowić formalne podstawy implementacji baz samoewoluujących, a zatem takich, które same dostosowują się do nowych informacji. Po raz pierwszy koncepcję tę Reiter zaproponował w pracy [REIT95]. Tam też znajduje się dokładna formalizacja jego propozycji.

Jako narzędzie realizacji adaptacyjnej bazy danych Reiter zaproponował rachunek sytuacyjny. Podstawową koncepcją wprowadzaną przez tego autora jest odejście od baz danych rozumianych w sposób tradycyjny, jako zbiory rekordów, na rzecz reprezentowania bazy w notacji rachunku sytuacyjnego. Konsekwencją tej propozycji jest traktowanie aktualizacji jako akcji w rachunku sytuacyjnym. Kompletny opis bazy i specyfikacja jej zachowań samoadaptacyjnych przypomina sytuację omówioną w punkcie poprzednim. Bazę danych i jej zachowanie Reiter proponuje opisać poprzez:

- opis relacji w bazie, przy czym relacje traktowane są jako cechy (por. przypis 1, s. 113), zatem każda relacja jest cechą, której ostatnim argumentem jest sytuacja,
- opis transakcji (będących akcjami w rachunku sytuacyjnym),

- specyfikację bazy początkowej – jest to analogia do sytuacji S_0 ; początkową bazę danych stanowią zdania w logice I rzędu,
- aksjomaty warunków wstępnych transakcji,
- aksjomaty wyników transakcji.

Należy zwrócić uwagę, że w takim ujęciu wszelkie aktualizacje bazy są wirtualne: baza danych, będąca zbiorem zdań logicznych, fizycznie pozostaje niezmienną. Zapytania kierowane do bazy również mają postać formuł rachunku sytuacyjnego.

Propozycja Reitera wydaje się ciekawa, jakkolwiek jest to zaledwie pierwszy krok do baz adaptacyjnych, ponieważ – poza przedstawieniem formalizacji i kilku przykładów – autor ten w istocie nie wskazuje, jak miałyby być realizowana adaptacyjność. Naszym zdaniem sednem tej propozycji, wartym dalszej uwagi, jest wybór rachunku sytuacyjnego jako narzędzia realizacji adaptacyjności, natomiast sama implementacja tego rachunku, opisywana przez Reitera, za adaptacyjną raczej nie może być uznana.

Dlaczego rachunek sytuacyjny wydaje się odpowiednim narzędziem do adaptacyjnego zarządzania wiedzą? Wydaje się, że odpowiedź wynika z tego, iż w języku tego rachunku sytuacje są termami, do których mogą odnosić się relacje. Jeżeli weźmie się pod uwagę, iż sytuacja może stanowić bardzo złożony opis, to traktowanie go jako termu i odnoszenie do niego relacji może w istotny sposób ułatwić zarządzanie wiedzą, przy założeniu, że wiedza zależna jest od sytuacji.

5. TAL jako przykład języka temporalnego

5.1. Wprowadzenie

Można wyróżnić dwa podstawowe podejścia do problematyki wnioskowania temporalnego – ujęcie oparte na modelach oraz ujęcie oparte na językach temporalnych, czyli przeznaczonych specjalnie do opisu rzeczywistości zmiennej w czasie, i wykorzystujące techniki automatycznego wnioskowania [BOL95]. Pierwsze zostało scharakteryzowane w poprzednim rozdziale na przykładzie rachunku sytuacyjnego i jego wykorzystania do realizacji adaptacyjnych baz danych, drugie zostanie przedstawione poniżej na przykładzie języka akcji temporalnych TAL (Temporal Action Language) i jego zastosowania do zarządzania kredytami.

5.2. Język TAL – najważniejsze cechy i idee²

Język TAL wywodzi się z logiki PMON opracowanej przez E. Sandewalla [SAND94; DOHE94]. Najważniejsze jego cechy, jako języka służącego do opisu zależności temporalnych, to: pojęcie i notacja czasu niezależna od akcji, możliwość definiowania zależności przyczynowych w oddzieleniu od definicji akcji oraz możli-

² Opracowanie na podstawie [KAGU98; DOGU98].

wość opisu interakcji współbieżnych. Sam język składa się z dwóch poziomów (warstw): języka tzw. powierzchniowego, używanego do opisu scenariuszy oraz języka tzw. bazowego, inaczej języka logiki zdarzeń, będącego uporządkowaną logiką predykatów I rzędu. Dowolny, poprawny opis scenariusza po przekształceniu w opis w języku bazowym zawsze stanowi skończony zbiór wff (*well-formed formulae*)³ I rzędu.

Warstwa języka powierzchniowego składa się z:

- wyrażen temporalnych,
- wyrażen wartościujących,
- wyrażen atomicznych,
- stwierdzeń narracyjnych,
- dodatkowych makrooperatorów i skrótów (jak np. operator przypisania, operator przypisania czasowego, operator okluzji).

Natomiast warstwa języka bazowego (logika zdarzeń) zawiera m.in. predykaty temporalne: HOLDS, OCCURS, OBSERVE, DUR, PER (dokładne definicje wymienionych predykatów można znaleźć np. w [DOGU98]).

Język powierzchniowy nie ma formalnej semantyki, posiada natomiast formalną składnię. Całość wnioskowania formalnego przeprowadzana jest po „przetłumaczeniu” opisu dokonanego w języku powierzchniowym na opis w języku bazowym. Opis (specyfikacja) scenariusza zdarzeń w języku TAL składa się z:

- opisu typów,
- definicji i opisu akcji,
- specyfikacji ograniczeń dziedzinowych,
- specyfikacji zależności temporalnych.

Jak widać, scenariusz napisany w języku TAL przypomina swoją strukturą program w dowolnym innym języku programowania.

5.3. TAL jako narzędzie wspomagające zarządzanie kredytami – przykłady reguł

Jako przykład wykorzystania języka TAL wybrano zarządzanie kredytami. Powodów takiego wyboru jest kilka. Po pierwsze, działalność związana z udzielaniem kredytów przez banki to przykład dobrze osadzony w realiach gospodarczych. Po drugie, zarządzanie kredytami to dziedzina złożona, co wynika z jej niejednorodności (kredyty są różnego rodzaju, różnie oprocentowane, niektóre mają odroczoną spłatę części odsetek itd.), a zatem kompleksowe zarządzanie kredytami może napotykać trudności i od dawna jest przedmiotem zainteresowania twórców systemów informatycznych. Każda tzw. podstawowa aplikacja bankowa pozwala – w różnym stopniu – zarządzać kredytami. Po trzecie, w problematyce kredytowej wyraźnie widoczny jest aspekt temporalny.

³ Termin *well-formed formula* używany jest w sztucznej inteligencji na oznaczenie poprawnie zbudowanego zdania logicznego zawierającego zmienne [RUNO95, s. 193].

Z aspektem czasowym spotykamy się już w definicji kredytu. Autorzy pracy [BOKA91] podają np. następującą definicję: „Kredyt to stosunek ekonomiczny, którego treścią jest odstąpienie przez jedną stronę (kredytodawcę) drugiej stronie (kredytobiorcy) określonej wartości w pieniądzu lub towarze, na warunkach zwrotu równowartości, z ewentualnym wynagrodzeniem (odsetkami) w ustalonym z góry terminie”. Oczywiście kwestia terminu (terminów) nie musi odnosić się wyłącznie do spłaty kredytu, lecz także do rozłożenia w czasie poszczególnych jego transz [KRZY96; GOMO98; JAKR97]. Szczegółowo sprawy te regulowane są w umowie kredytowej (por. art. 69 ust. 2 *Prawa bankowego* [BANK97]).

Z aspektem czasowym spotykamy się także w czasowym kryterium podziału kredytów, wedle którego dzieli się je na krótko-, średnio- i długoterminowe. Kolejnym przykładem aspektu temporalnego w problematyce kredytowej może być karencja, czyli opóźnienie spłaty części rat kredytu (por. np. [KRZY96; BOKA91]). Warto w tym miejscu zauważyć, że karencja to znakomity przykład tzw. akcji opóźnionej lub akcji z opóźnionym efektem: akcją jest w tym przypadku uruchomienie kredytu, jej zaś efektem opóźnionym – przesunięcie w czasie terminu pierwszej spłaty.

Na przykładzie zarządzania kredytami zaprezentujemy podejście do wnioskowania temporalnego oparte na językach. Przykłady reguł zostaną zakodowane w języku TAL. Przypomnijmy, że najważniejsze cechy tego języka to m.in.:

- przeznaczenie języka do operowania na danych o charakterze czasowym,
- możliwość definiowania akcji opóźnionych i akcji o opóźnionych efektach,
- możliwość przeprowadzania wnioskowania temporalnego,
- stosunkowo proste w interpretacji graficzne ilustracje wyników wnioskowania.

Do implementacji rozwiązań zapisanych w języku TAL można wykorzystać narzędzie o nazwie VITAL [KVDO97], opracowane na uniwersytecie w Linköping (Szwecja). Niewątpliwą zaletą tego narzędzia jest prosta obsługa i automatyczne dokonywanie translacji scenariusza z języka powierzchniowego (TAL) na język bazowy, dzięki czemu osoba konstruująca scenariusz nie musi być specjalistą w zakresie temporalnej logiki predykatów.

Poniżej zostaną przedstawione przykładowe reguły wnioskowania, wykorzystujące aspekt temporalny problematyki kredytowej, oraz ich zapis w języku TAL. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że reguły te nie stanowią całych scenariuszy, są to jedynie tzw. zależności temporalne.

Przykład 5

W chwili, gdy na koncie (np. na rachunku ROR) powstaje debet, bank wysyła do klienta monit (przykład na podstawie [KAGU98]). Zakładamy, że sprawdzanie salda dokonuje się na wszystkich rachunkach każdego dnia, stąd w regule notacja *forall t*.

forall t [[t] less(saldo, i0) -> I([t]monit)],

- gdzie: t – punkt czasowy; jego dokładna wartość zależy od przyjętej granulacji czasu, w problematyce kredytowej i w rozważanym przykładzie można przyjąć, że t oznacza konkretny dzień,
- $less$ – relacja porządkująca określona na dziedzinie liczb całkowitych,
- $saldo$ – zdefiniowana przez użytkownika zmienna typu *persistent*, co oznacza, że stosuje się do niej założenie inercji, mówiące, że jej wartość nie ulega zmianie dopóki nie zostanie wykonana na niej pewna akcja,
- I – makrooperator o ogólnej postaci $I([r]\alpha)$, określający, że formuła α jest prawdziwa w chwili r . Dopuszczalne są także postaci: $I((r, r']\alpha)$, $I([r, r']\alpha)$,
- $monit$ – zmienna zdefiniowana przez użytkownika, o wartościach logicznych (prawda lub fałsz).

Przykład 6

Jeżeli w terminie płatności kredytobiorca nie spłaci kredytu, to bank przenosi niespłaconą kwotę na rachunek kredytu przeterminowanego [KRZY96].

$forall\ t\ [Ct\ ([t]niespłacony) \rightarrow (Przenies(kwota) \ \&\ kwota == wysokosc)],$

- gdzie: *Przenies* – akcja zdefiniowana przez użytkownika, polegająca na przeniesieniu niespłaconej kwoty kredytu z rachunku kredytowego na rachunek kredytu przeterminowanego; definicja takiej akcji może wyglądać np. następująco:

$acs\ [t,t]Przenies(kwota) \rightarrow I([t+1]\ (balplus\ (przeterminowany) == kwota \ \&\ balplus\ (kredytowy) == -kwota)),$

przy czym *balplus* jest zdefiniowaną przez użytkownika funkcją powodującą zmianę stanu rachunku o określoną kwotę,

- Ct – z angielskiego *changes-to-true* – oznacza, że wyrażenie w nawiasie jest prawdziwe,
- niespłacony* – zmienna o wartościach logicznych; jej domyślną wartością jest fałsz, a zmiana na wartość prawda następuje wtedy, gdy zostanie przekroczony termin spłaty kredytu (co można zapisać np. jako $t > a$, gdzie t i a to punkty czasowe),
- wysokosc* – odczytana przez system wysokość nie spłaconej kwoty.

Przykład 7

Podobnie jak w przykładzie 6, przy czym dodatkowo po tygodniu od powstania debetu bank wysyła do klienta monit. Jest to przykład akcji z efektem opóźnionym: akcją jest powstanie debetu, efektem – wysłanie monitu.

$forall\ t\ [Ct\ ([t]niespłacony) \rightarrow (Przenies(kwota) \ \&\ kwota == wysokosc \ \&\ I([t+7]monit))].$

Powyższy zapis łączy w sobie rozwiązania z przykładów 5 i 6. Założono ponownie, że podstawową jednostką czasu jest dzień, stąd monit zostaje wysłany w chwili $[t + 7]$.

Przykład 8

Przykład dotyczący karencji: termin płatności pierwszej raty przypada po dwóch miesiącach od uruchomienia kredytu. Mamy tu do czynienia z akcją opóźnioną w stosunku do pewnego zdarzenia: zdarzeniem (zachodzącym w chwili t) jest uruchomienie kredytu, akcją – sprawdzenie, czy dokonano spłaty pierwszej raty kredytu i ewentualnie wysłanie monitu. Warto zauważyć, że w formule zależności (*dep*) wyrażono opóźnienie o dwa miesiące, jako że sprawdzenie dokonuje się w chwili $[t + 60]$, przy założeniu, że podstawową jednostką czasu jest dzień.

$$\begin{aligned} &acs\ [r,r]\ Sprawdz \leadsto [r]spr = false \rightarrow I([r]\ monit) \\ &dep\ forall\ t\ [Ct[t+60]\ equal(saldo, rata) \rightarrow I([t+60]spr = true)], \end{aligned}$$

gdzie: *acs* – ogólna definicja akcji *Sprawdz*, mówiąca, że jeśli w dowolnym punkcie czasowym zmienna *spr* ma wartość fałsz (*false*), czyli rata nie została spłacona, to należy wysłać monit (przy czym zmienna *monit* zdefiniowana jest tak samo jak w przykładzie 5),

r – punkt czasowy,

$\leadsto$ – operator oddzielający symbol akcji od jego definicji,

spr – zmienna zdefiniowana przez użytkownika, zmienna logiczna typu *durational*, czyli o określonej wartości domyślnej; w tym przypadku domyślną wartością zmiennej jest fałsz (*false*), co oznacza, że rata nie została spłacona,

equal – relacja porządkująca określona na dziedzinie liczb całkowitych,

saldo – zmienna zdefiniowana analogicznie jak w przykładzie 5.

6. Podsumowanie

Nie istnieje jedno, uniwersalne podejście do problematyki wnioskowania w warunkach temporalności. Można tę kwestię ujmować zarówno od strony modelowej, czyli modeli komputerowych tworzonych bądź adaptowanych specjalnie na potrzeby dziedziny i/lub problemu, jak i od strony logik (języków) temporalnych i metod automatycznego wnioskowania. Nie można powiedzieć, że któreś ujęcie jest lepsze. Jak pokazują zaprezentowane przykłady z dziedziny baz danych i bankowości, każde z nich ma swoje zalety i wady.

W artykule zaprezentowano najważniejsze kwestie związane z problematyką wnioskowania temporalnego, czyli wnioskowania, w którym czas stanowi cechę podstawową i jest ujęty oraz rozważany w sposób jawny. Skupiono się na dwóch obszarach. Pierwszy z nich to kwestie *stricte* teoretyczne. Są one niezwykle istotne,

ponieważ jakość wnioskowania zależy od tego, jaki model czasu zostanie wstępnie przyjęty, oraz od tego, czy model ten w połączeniu z metodą wnioskowania pozwala rozwiązać problemy natury logicznej, jakie pojawiają się przy opisie czasu. Obszar drugi dotyczy praktycznych podejść do wnioskowania w warunkach temporalności, oraz możliwości zastosowań tego wnioskowania. Omówiono dwa podstawowe ujęcia, modelowe i oparte na językach temporalnych, wraz z przykładami wykorzystania.

Biorąc pod uwagę zarówno liczbę spornych kwestii teoretycznych, jak i możliwości zastosowań praktycznych, można postawić tezę, że wnioskowanie w warunkach temporalności to ciekawy i obiecujący obszar badawczy.

Literatura

- [ALLE84] Allen J.F., *Towards a General Theory of Action and Time*, „Artificial Intelligence” 1984, nr 23, s. 123-54.
- [BANK97] Ustawa z dnia 29 sierpnia 1997 r. *Prawo bankowe*, DzU 1997, nr 140, poz. 939.
- [BEEK92] Beek V.P., *Reasoning about Qualitative Temporal Information*, „Artificial Intelligence” 1992, nr 58, s. 297-326.
- [BOKA91] Bogacka-Kisiel E., Karwowski J., *Bankowość (wybrane zagadnienia)*, AE, Wrocław 1991.
- [BOLI95] Bouzid M., Ligęza A., *Temporal Representation Based on Characteristic Functions*. Proc. FLAIRS-95: Eighth Florida Artificial Intelligence Symposium, 27-29 kwietnia 1995, s. 167-171.
- [BRUC72] Bruce B., *A Model for Temporal References and its Application in a Question Answering Program*, „Artificial Intelligence” 1972, nr 4 s. 1-25.
- [DOGU98] Doherty P., Gustafsson J., *Delayed Effects of Actions = Direct Effects + Causal Rules*, Linköping Electronic Articles in Computer and Information Science vol. 3, nr 1, <http://www.ep.liu.se/ea/cis/1998/001/>, 26 stycznia 1998.
- [DOHE94] Doherty P., *Reasoning about Action and Change Using Occlusion*, Proc. of 11th ECAI, Amsterdam, John Wiley and Sons Ltd., 1994.
- [FINI93] Fikes R.E., Nilsson N.J., *STRIP, a Retrospective*, „Artificial Intelligence” 1993, nr 59(1-2), s. 227-232.
- [GALT90] Galton A.P., *A Critical Examination of Allen's Theory of Action and Time*, „Artificial Intelligence” 1990, nr 42, s. 59-188.
- [GES95] Gerevini A., Schubert L., *Efficient Algorithms for Qualitative Reasoning about Time*, „Artificial Intelligence” 1995, nr 74(3), s. 207-248.
- [GHRG95] Gabbay D.M., Hogger C.J., Robinson J.A., Galton A., *Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming*, Clarendon Press, Oxford 1995.
- [GILE99a] Giacomo de G., Lespérance Y., Levesque H.J., *ConGolog, a Concurrent Programming Language Based on the Situation Calculus: Foundations*, <http://www.cs.toronto.edu/cogrobo>, 1999.
- [GILE99b] Giacomo de G., Lespérance Y., Levesque H. J., *ConGolog, a Concurrent Programming Language Based on the Situation Calculus: Language and Implementation*, <http://www.cs.toronto.edu/cogrobo>, 1999.
- [GODO95] Godo L., Vila L., *Possibilistic Temporal Reasoning Based on Fuzzy Temporal Constraints*, IJCAI-95, vol. 2, Morgan Kaufmann, Montreal 1995
- [GOMO98] Gospodarowicz A., Możaryn H., *Identyfikacja i szacowanie ryzyka kredytowego*, AE, Wrocław 1998.

- [GRAN99] *Adaptacyjne systemy zarządzania wiedzą* – projekt badawczy wykonany w ramach grantu KBN nr 1H02B 007 16. Akademia Ekonomiczna, Katedra Systemów Sztucznej Inteligencji, Wrocław 1999.
- [HAJN96] Hajnicz E., *Reprezentacja logiczna wiedzy zmieniającej się w czasie*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1996.
- [HAYE78] Hayes P.J., *The Naive Physics Manifesto*, [w:] D. Michie (red.), *Expert Systems in the Micro-electronic Age*, Edinburgh 1979.
- [JAKR97] Jaworski W.L., Krzyżkiewicz Z., Kosiński B., *Banki: rynek, operacje, polityka*, Poltext, Warszawa 1997.
- [KAGU98] Karlsson L., Gustafsson J., Doherty P., *Delayed Effects of Actions*, Proc. ECAI-98: 13th European Conference on Artificial Intelligence, John Wiley and Sons Ltd. Brighton, 1998, s. 542-546.
- [KALA91] Kautz H.A., Ladkin P.B., *Integrating the Metric and Qualitative Temporal Reasoning*, AAAI'91, Anheim, CA, s. 241-246.
- [KANI04] Kania K., *Temporalne bazy danych w systemach informatycznych zarządzania*, Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej im. K. Adamieckiego w Katowicach, Katowice 2004.
- [KKG98] Kania K., Kędzierski S., Gołuchowski J., *Zależności temporalne w modelowaniu i analizie procesów gospodarczych*, „Informatyka” 1998, nr 3(42).
- [KNMA94] Knight B., Ma J., *Time Representation: A Taxonomy of Temporal Models*, Artificial Intelligence Review nr 7, s. 401-419, Kluwer Academic Publishers 1994.
- [KOSE86] Kowalski R.A., Sergot M., *A Logic-based Calculus of Events*, „New Generation Computing” 1986, nr 4, s. 67-95.
- [KRZY96] Krzyżkiewicz Z., *Podręcznik do nauki bankowości*, Biblioteka Menedżera i Bankowca, Zarządzanie i Finanse, Warszawa 1996.
- [KVDO97] Kvamström J., Doherty P., *VITAL Research Tool*, 1997, <http://anton.ida.liu.se/vital/vital.html>.
- [LELE97] Lespérance Y., Levesque H.J., Ruman S.J., *An Experiment in Using Golog to Build a Personal Banking Assistant*, [w:] L., Cavedon, A. Rao, W. Wobcke (red.), *Intelligent Agent Systems: Theoretical and Practical Issues*, LNAI vol. 1209, Springer Verlag 1997.
- [MAKN90] Ma J., Knight B., *A General Temporal Theory*, „The Computer Journal” 1990.
- [MAWI04] Mazur Z., Wilczek A., *On State Diagrams Construction with Dynamic Constraints*, Foundations of Computing and Decision Sciences 2004 vol. 29, nr 1-2.
- [MAWI03] Mazur Z., Wilczek A., *Ograniczenia dynamiczne w modelowaniu zachowania obiektów*, [w:] *Problemy i metody inżynierii oprogramowania*, red. Z. Huzar, Z. Mazur, WNT, Warszawa 2003.
- [MCDE82] McDermott D., *A Temporal Logic for Reasoning about Processes and Plans*, „Cognitive Science” 1982, nr 6, s. 101-55.
- [MCHA69] McCarthy J., Hayes P., *Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence*, [w:] B. Meltzer, D. Michie (red.), *Machine Intelligence*, s. 463-502, Edinburgh U.P. 1969.
- [MEIR91] Meiri I., *Combining Qualitative and Quantitative Constraints in Temporal Reasoning*, Proc. AAAI-91: 9th National Conference on Artificial Intelligence vol. 1, AAAI Press/The MIT Press 1991.
- [MORR95] Morris R., Khatib L., Ligozat G., *Generating Scenarios from Specifications of Repeating Events*, Proc. TIME'95.
- [REIT00] Reiter R., *Knowledge in Action: Logical Foundations for Describing and Implementing Dynamical Systems*, <http://www.cs.toronto.edu/cogrobo>, 1 maja 2000 r.
- [REIT95] Reiter R., *On Specyfing Database Updates*, „Journal of Logic Programming” 1995 vol. 25, s. 25-91.

- [RUNO05] Russell S., Norvig P., *Artificial Intelligence. A Modern Approach*, Prentice Hall International Inc., Upper Saddle River 1995.
- [SAND94] Sandewall E., *Features and Fluents: A Systematic Approach to the Representation of Knowledge about Dynamical Systems*. Oxford University Press 1994.
- [SCDE97] Schwalb E., Dechter R., *Processing Temporal Constraint Networks*, „Artificial Intelligence” 1997.
- [SCVI98] Schwalb E., Vila L., *Temporal Constraints: A Survey*, „Constraints” 1998, nr 3(2/3), s. 129-149.
- [VILA94] Vila L., *A Survey on Temporal Reasoning in Artificial Intelligence*, „AI Communications” 1994, nr 7(1), s. 4-28.

TEMPORAL REASONING – SELECTED ISSUES

Summary

The paper deals with the problems of time representation, temporal reasoning and its applications in the artificial intelligence area.

First we present the motivation for reasoning about change, or broadly speaking: temporal reasoning, in the field of AI. We shortly depict and analyse 5 main research areas where temporal issues may be found: databases, expert systems, planning, robotics, and natural language understanding.

A significant part of the paper is devoted to theoretical questions, such as the origin of temporal logics and reasoning, Newtonian paradigm, time dependent and time independent models of the world.

The last part of the paper presents two main approaches to temporal reasoning: a model approach and an approach based on temporal languages. The first one is discussed using an example of the situation calculus and its application to adaptive databases. The second one is presented with the TAL language as an example.

Summing up, the paper is an attempt to order information about temporal representation, reasoning and its practical applications.

Keywords: time, change, temporal reasoning, temporal models.