EDUKACJA FILOZOFICZNA ARTYKUŁY I ROZPRAWY
Vol. 48 2009

MICHAŁ TYBURSK1
Uniwersytet Wrocławski

FORMALIZACJA ROZUMOWANIA PRZYCZYNOWO-SKUTKOWEGO W LOGICE

Pragnę podziękować osobom, które miały wpływ na ostateczny kształt niniejszego tekstu: doktorowi Tomaszowi Furmanowskiemu, profesorowi Janowi Zygmuntowi, profesorowi Jackowi Hawrankowi, oraz opiniodawcy.

1. Wstęp. Przedmiotem niniejszego artykułu będzie metoda formalizacji rozumowań przyczynowo-skutkowych zaproponowana przez Raymonda Reitera[1]. W pracy tej zamierzamy naświetlić problem formalizacji pewnego szczególnego przypadku rozumowań przyczynowo-skutkowych, a mianowicie rozumowań dotyczących działań i zmiany oraz zwrócić uwagę na ich aspekt predykcyjny, jak i inercyjny. W tym celu rozwiążemy następujące zadanie:

Sformalizuj w logice predykatów taki oto scenariusz:

Scenariusz: Luck strzela z pistoletu do szklanej butelki. W stanie początkowym pistolet Lucka nie jest załadowany, a butelka nie jest rozbita. Założenia:

1. Luck jest strzelcem wyborowym, tzn. nigdy nie pudłuje.
2. Pistolet, którym posługuje się Luck jest niezawodny.
3. Jedynymi przyczynami zmian własności świata są działania Lucka. Wyróżnimy trzy działania: strzelanie z pistoletu, ładowanie pistoletu [1]

[1] R. Reiter: *The frame problem in the situation calculus: a simple solution (sometimes) and completeness result for goal regression,* w: *Artificial Intelligence and Mathematical Theory of Computation: Papers in Honor of John McCarthy,* Vladimir Lifschitz (red.). Academic Press, San Diego, CA, 1991, s. 359-380; R. Reiter: *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2001.

i czekanie. Wyróżnimy dwie własności świata, na które mają wpływ podane powyżej działania: bycie rozbitym oraz bycie załadowanym.

Oczekujemy, że w oparciu o podaną formalizację będzie można udzielać odpowiedzi na następujące pytania:

1. Czy butelka zostanie rozbita, jeśli Luck wykona następujący ciąg działań: załaduje pistolet, odczeka chwilę i wystrzeli z pistoletu? Oczekiwana odpowiedź: tak.
2. Czy pistolet będzie załadowany w wyniku wykonania przez Lucka następującego ciągu działań: załadować pistolet, odczekać chwilę, odczekać chwilę? Oczekiwana odpowiedź: tak.
3. Czy butelka zostanie rozbita po wykonaniu przez Lucka ciągu działań: odczekać chwilę, odczekać chwilę, załadować pistolet? Oczekiwana odpowiedź: nie.

Powyższe zadanie wymaga kilku słów komentarza. Scenariusz opisuje pewną historię dotyczącą inercyjnego systemu dynamicznego (dalej i. s. d.). W naszym przypadku i. s. d. jest środowisko, w którym działa Luck. Założymy, że jedynymi przyczynami zmian w i. s. d. są działania agenta. Agent jest to każda jednostka zdolna do wykonywania działań. W naszym przypadku agentem jest Luck. Własności i. s. d., które mogą ulegać zmianie w wyniku wykonania przez agenta działania w danym stanie i. s. d., będziemy nazywać fluentami. Przez stany i. s. d. rozumiemy ciągi działań. Stan początkowy jest to pusty ciąg działań. Zauważmy, że pewne fluenty pozostają inwariantne ze względu na dane działanie agenta. Przykładowo fluent *rozbita* pozostaje inwariantny ze względu na działanie *ładować.*

W wyniku aksjomatyzacji scenariusza otrzymamy teorię dotyczącą pewnego fragmentu historii i. s. d. w oparciu, o którą będziemy wnioskować o tym, jakie fluenty w i. s. d. ulegają zmianom w wyniku wykonania przez agenta działania w danym stanie i. s. d., oraz jakie fluenty w i. s. d. nie ulegają zmianom w wyniku wykonania przez agenta działania w danym stanie i. s. d. Innymi słowy, oddamy w logice aspekt predykcyjny oraz inercyjny rozumowań przyczynowo-skutkowych. Aksjomatyzacje tego typu odgrywają ważną rolę w sztucznej inteligencji. W oparciu o nie możliwe jest napisanie programu sztucznej inteligencji, który jest zdolny do przeprowadzenia określonego w scenariuszu rozumowania. Proces formalizacji scenariusza rozpoczniemy od opisu języka, którym będziemy się posługiwać.

2. Język rachunku stanów. Rachunek stanów[2] jest pewnym dialektem wielosortowej logiki drugiego rzędu i został zaprojektowany w celu modelowania systemów dynamicznych. Nie będziemy podawać dokładnej charakterystyki tego języka. Oprócz symboli spójników prawdziwościowych, nawiasów i kwantyfikatorów będziemy używać kilku charakterystycznych dla rachunku stanów symboli. Za pomocą liter $s,s_l,s_2,\ldots,s_„$, które nazwiemy zmiennymi stanów, będziemy reprezentować stany i. s. d.. Litery $a,a_l,a_2,\ldots,a_„$ będą reprezentować działania agenta. Nazwiemy je zmiennymi działań. Za pomocą liter $x,x_l,x_2,\ldots,y,y_l,y_2,\ldots$ będziemy reprezentować indywidua, które nie są ani działaniami, ani stanami. Litery te nazwiemy zmiennymi indywiduowymi. Stałą S_o oznaczymy stan początkowy i. s. d., który jest pustym ciągiem działań. Wyróżnimy symbol funkcyjny *do*(*a,s*), gdzie *a* będzie działaniem, α s stanem. Symbol ten oznacza wykonanie działania *a* w stanie *s*. Term stanu do(*podnosicA,do*)*isć*)*A*)S_O)) oznacza ciąg działań [mć(A), *podnosić(A)].* Jak łatwo zauważyć działania będziemy oznaczać za pomocą symboli funkcyjnych; na przykład *iść(x), kłaść,* etc. Przypominamy, że O-argumentowy symbol funkcyjny jest stałą. Dodajmy, że na przykład w symbolu funkcyjnym *podnosić(A),* który czytamy agent podnosi obiekt A, symbol *A* jest stałą indywiduową. Jak zaznaczyliśmy powyżej, własności i. s. d., które mogą ulegać zmianom

[2] W języku angielskim rachunek stanów to „situation calculus”. Wydawałoby się, że naturalnym tłumaczeniem tej nazwy byłby rachunek sytuacji. Zrezygnowaliśmy z tego naturalnego przekładu, ponieważ w języku polskim istnieje już ontologia sytuacji, czasami nazywana rachunkiem sytuacji, jak i teoria sytuacji. (Dokładny opis języka rachunku stanów znajduje się w pracy: R. Reiter: *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2001).

pod wpływem działań agenta, nazywamy fluentami. Wprowadzimy fluenty relacyjne, które są relacjami zależnymi od stanów i. s. d.. Będziemy reprezentować je za pomocą symboli predykatowych, których ostatnim argumentem będzie term stanu. Przykładowo *załadowany{x,s)* oznacza fluent relacyjny.

2.1 Aksjornatyczne ujęcie pojęcia stanu. Napisaliśmy, że stany i. s. d. są to ciągi działań. Intuicję tę Reiter oddaje w sposób aksjomatyczny[3]:

(1) = Jo(a_2,s_2) —» (a_x = a_2 a s, = s_2)J;

(2) VP{[P(5_0) *a Va,s(P(s) -» P(do(a,s)))]* -> VsP(s)};

(3) Vs-i(s<S_0);

(4) *Va,s,s'(s < do(a,s") <-> s < s').*

Omówimy krótko każdy z podanych powyżej aksjomatów. Aksjomat (1) formułuje warunek identyczności dla stanów. Otóż dwa stany są identyczne, gdy są identycznymi ciągami działań. Aksjomat (2) jest aksjomatem indukcji dla stanów. Powiada on, że zbiór stanów jest to najmniejszy zbiór złożony z S_o i zamknięty na operację *do.* W aksjomatach (3) i (4) występuje symbol <. Jest to symbol właściwego podciągu; przykładowo wyrażenie s<s' czytamy: stan s jest właściwym podciągiem stanu s', albo inaczej stan s' jest w wyniku wykonania przez agenta odpowiedniej liczby działań osiągalny ze stanu s. Wyrażenie s < s' jest skrótem wyrażenia s < s' v s = s'. Aksjomat (3) głosi, że żaden stan s nie jest właściwym podciągiem stanu . Wreszcie aksjomat (4) powiada, że stan s jest właściwym podciągiem stanu *do(a,s')* wtedy i tylko wtedy, gdy jest on właściwym podciągiem stanu s' lub jest identyczny ze stanem s'.

[3] R. Reiter: *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2001, s. 49-50.

3. Aksjomaty wstępnych warunków działania. Jak założyliśmy powyżej, jedynymi przyczynami zmian własności w i. s. d. będą działania agenta. Poprawna aksjomatyzacja scenariusza powinna wskazywać na to, jakie działania agent może wykonać w danym stanie i. s. d.. Przykładowo musi ona wskazywać na to, w jakich okolicznościach agent może załadować pistolet. W związku z tym przed osobą dokonującą aksjomatyzacji działań stoi zadanie wypisania aksjomatów specyfikujących warunki ich wykonalności. Spróbujmy sformułować tego typu aksjomat:

(5) Jeśli pistolet jest załadowany, to Luck może z niego wystrzelić.

W rachunku stanów zdanie (5) zapiszemy jak następuje[4]:

(6) *załadowany(s)* ® *Poss(strzelać,s).*

Binarny symbol predykatowy *Posst)a.s)* czytamy: możliwe jest wykonanie działania *a* w stanie *s*. Symbol predykatowy *załadowany(s)* jest warunkiem wstępnym działania strzelać. Zdanie (6) nie może pełnić funkcji aksjomatu warunków wstępnych działania, ponieważ jest fałszywe. Łatwo wyobrazić sobie sytuację, w której pistolet jest załadowany, ale Luck nie może z niego wystrzelić, ponieważ pistolet zepsuł się. Wydaje się, że istnieje proste rozwiązanie tego problemu polegające na wypisaniu wszystkich warunków wstępnych działania *strzelać.* Niestety warunków tego rodzaju jest dla większości działań nieskończenie wiele:

(7) *załadowany(s)* ∧ Ø*zepsuty(s)* ∧ Ø *znika(s)* ∧ Ø... —> *Poss(strzełać,s).*

Problem ten niełatwo rozwiązać nawet przy założeniu, że udało nam się wypisać wszystkie warunki wstępne danego działania. Przekonuje nas o tym proste rozumowanie. Załóżmy, że udało nam się wypisać wszystkie warunki wstępne działania *strzelać.* Załóżmy także, że w sta-

[4] Przyjmujemy konwencję, że zmienne wolne są domyślnie związane kwantyfikatorem ogólnym.

nie początkowym pistolet jest załadowany, symbolicznie *załadowany*(S_o). W tej sytuacji agent nadal nie jest w stanie udowodnić, że *Poss*(*strzelać*, S_o), ponieważ nie wie, czy pozostałe warunki wstępne działania *strzelać* są prawdziwe. Agent może obserwować środowisko i sprawdzić krok po kroku, czy pozostałe warunki są prawdziwe, ale ze względu na ilość tych warunków zadanie to trwałoby bardzo długo, a w najgorszym przypadku nie miałoby końca. Jako, że agent z reguły nie dysponuje pełną informacją o systemie, to sytuacje tego rodzaju mogłyby spowodować zablokowanie procesów decyzyjnych agenta.

Opisany problem jest nazywany w literaturze z zakresu sztucznej inteligencji problemem warunków wstępnych (*qualification problem*). Zaproponowano dwa wyjścia z tej patowej sytuacji: albo należy zrezygnować z logiki (na przykład na rzecz rachunku prawdopodobieństwa[5]), albo odpowiednio zmodyfikować lub rozszerzyć logikę dedukcyjną tak, aby przeprowadzanie rozumowań na temat warunków wstępnych było w niej wykonalne. Opowiedzenie się za drugą z tych propozycji doprowadziło do powstania logik niemonotonicznych[6], które umożliwiają formalizację rozumowań dotyczących warunków wstępnych działań, a ogólniej pozwalają na formalizację procesu zmiany przekonań. Wracając do naszego przykładu w logice niemonotonicznej łatwo oddać następujące rozumowanie: jeśli dane jest, że *załadowany*(*s*) oraz nie jest dane, że spełniony jest co najmniej jeden z warunków uniemożliwiających wystrzelenie z pistoletu, to wnioskuj, że *Poss*(*strzelać*,*s*). Jeśli następnie uzyskasz informację, że co najmniej jeden z warunków uniemożliwiających wystrzelenie z pistoletu jest spełniony, to anuluj wniosek, że *Poss*(*strzelać*,*s*). Pomimo istnienia logik niemonotonicznych, w niniejszym artykule przyjmujemy uproszczone rozwiązanie problemu warun-

[5] J. Pearl: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference.* Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 1988.

[6] W artykule *Cyrkumskrypcja: formalizacja rozumowania niemonotonicznego w logice drugiego rzędu* opisuję jeden ze sposobów formalizacji rozumowania niemonotonicznego zaproponowany przez J. McCarthy'iego i V. Ljfschitza (M. Tyburski: *Cyrkumskrypcja: formalizacja rozumowania niemonotonicznego w logice drugiego rzędu,* .filozofia Nauki", w druku).

ków wstępnych. Zgodnie z teorią Raymonda Reitera[7] nie bierzemy pod uwagę warunków, które mogłyby uniemożliwić wykonanie danego działania. Dla każdego działania $A(x_t,...,x_„)$ podamy następujący aksjomat warunków wstępnych działania:

(8) $Poss(A(x_t,...,x_n),5)\ \Pi_A\ (x, ,...,x_n, j)$.

Wyrażenie $\Pi_A(x_1,...,x_n,.y)$jest formułą logiki pierwszego rzędu ze zmiennymi wolnymi $x_l,...,x_{tt},s$, w której nie występuje symbol *do.* Dla działania *strzelać* otrzymujemy:

(9) *Poss(strzelać,s)* « *załadowany*(*s*).

4. **Aksjomaty skutku działania[8].** Wiemy już, w jaki sposób będziemy aksjomatyzować warunki wstępne działań. Należy zauważyć, że niektóre działania i fluenty pozostają ze sobą w relacji przyczynowej. Przykładowo wystrzelenie z pistoletu w naszym scenariuszu powoduje rozbicie butelki. Związki tego typu będziemy aksjomatyzować przy pomocy aksjomatów skutku działania. Wyróżnimy pozytywne aksjomaty skutku działania oraz negatywne aksjomaty skutku działania. Dla każdego działania $A(xj,...,x_n)$ i fluentu F pozostających ze sobą w związku przyczynowo - skutkowym istnieje pozytywny aksjomat skutku działania:

(10) $\Phi^+_F(t_l,...,t_a,do(A(x_l,...,x_n'),s))$.

Wyrażenie Φ^+_F oznacza warunek dla fluentu F, symbol $A(x_l,...,x_„')$ jest termem działania, a symbole $t_l,...,t_„$ są termami. Jeśli warunek Φ^+_F jest spełniony, to wykonanie działania $A(x_{lt}...,x_B)$ sprawia, że F staje się prawdziwe w stanie $do(A(xi,...,x_„),s)$. Przykładowo załadowanie

[7] R. Reiter: *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2001, s. 21.

[8] Tamże, s. 20.

przez agenta pistoletu powoduje, że pistolet jest załadowany. W naszym scenariuszu mielibyśmy dla działania *ładować* i fluentu *załadowany* następujący pozytywny aksjomat skutku działania:

(11) *załadowany* (*do*(*ładować*,*s*)).

Podobnie dla każdego działania A(x_{15}.i fluentu *F* pozostających ze sobą w związku przyczynowo-skutkowym istnieje negatywny aksjomat skutku działania:

(12) Φ^{-}_{f} ® Ø(t_1,..,,t_n,do(A(x_1,...,x_n),s)).

Wyrażenie Φ^{-}_{f} oznacza warunek dla fluentu *F*, symbol $A(x_1,...,x_n)$ jest termem działania, a symbole $t_1,...,t_n$ są termami. Jeśli warunek Φ^{-}_{f} jest spełniony, to wykonanie działania A(x_1,...,x„) sprawia, że *F* staje się fałszywe w stanie $do(A(x_l,...,x_n),s)$. Przykładowo wystrzelenie przez agenta z pistoletu powoduje, że pistolet nie jest załadowany. W naszym scenariuszu mielibyśmy dla działania *strzelać* i fluentu *załadowany* następujący negatywny aksjomat skutku działania:

(13) Ø*załadowany*(*do*(*strzelać*,)).

Podane przykłady mogą budzić w czytelniku wątpliwości. Dlaczego formuła (11) nie ma zgodnie z ogólną postacią aksjomatu skutku działania formy implikacji? Wyrażenie stanowi warunek zmiany wartości fluentu *F*. Nie zawsze tego rodzaju warunek chcemy lub możemy podać. W takiej sytuacji pomijamy go. W scenariuszu założyliśmy, że pistolet Lucka jest niezawodny i z tego powodu konsekwentnie pomijamy problem warunku zmiany wartości dla fluentu *załadowany.* Wydawałoby się, że należy aksjomat (11) zapisać jako:

14) Ø*załadowany*(*s*) ® *załadowany*(*do*(*ładować*,*s*)).

Nie byłby to zapis do końca poprawny, bowiem *załadowany(s)* nie jest warunkiem zmiany wartości dla fluentu *załadowany,* ale stanowi ujęty już przez nas aksjomatycznie wstępny warunek działania *ładować.*

5. Aksjomaty tła[9]. Wykonanie przez agenta działania, z jednej strony, prowadzi do zmiany wartości danego fluentu, z drugiej zaś strony, pewne fluenty pozostają ze względu na dane działanie inwariantne. Załadowanie pistoletu powoduje, że jest on załadowany, ale nie sprawia, że butelka zostaje rozbita. Aksjomaty, które specyfikują własności i. s. d., które są inwariantne ze względu na dane działanie nazywamy aksjomatami tła. Oto dwa przykładowe aksjomaty tła dotyczące naszego scenariusza:

(15) Ø *rozbita*(*s*) ® Ø *rozbita*(*do*(*ładować,s*));
(16) *rozbita*(*s*) ® *rozbita*(*do*(*czekać,s*)).

Aksjomat (15) powiada, że jeśli butelka nie jest rozbita w stanie *s,* to załadowanie pistoletu przez Lucka w stanie *s* nie powoduje, że zostaje ona rozbita. Natomiast aksjomat (16) powiada, że jeśli butelka jest rozbita w stanie *s, to* czekanie Lucka w stanie *s* nie powoduje, że przestaje ona być rozbita.

Z punktu widzenia osoby dokonującej aksjomatyzacji i. s. d. poważny problem stanowi liczba aksjomatów tła. Liczbę tę przy podanej w przykładzie formie aksjomatów szacuje się wzorem: » 2 x liczba działań x liczba fluentów[10]. Zadanie polegające na wypisaniu i poprawnej implementacji wszystkich aksjomatów tła jest w literaturze z zakresu sztucznej inteligencji nazywane problemem tła. Zakłada się, że rozwiązanie problemu tła powinno polegać na podaniu procedury generowania możliwej, najmniejszej liczby aksjomatów tła z aksjomatów skutku działania. Poniżej omawiamy, zaproponowane przez Reitera, częściowe rozwiązanie problemu tła umożliwiające redukcję liczby wszystkich aksjomatów występujących w teorii i. s. d. do liczby określonej wzorem: » liczba fluentów + liczba działań.

[9] Tamże, s. 22.
[10] Tamże, s. 27.

5.1 Postać normalna aksjomatów skutku działania. W rozwiązaniu problemu tła zaproponowanym przez Raymonda Reitera korzysta się z tzw. postaci normalnej aksjomatów skutku działania. Opiszemy teraz metodę transformacji pozytywnych (odpowiednio negatywnych) aksjomatów skutku działania w ich postać normalną[11]:

Wykonując kroki (i) oraz (ii) dla *k* pozytywnych (odpowiednio negatywnych) aksjomatów skutku działania przekształcisz każdy z tych aksjomatów w równoważne logicznie zdanie

W'_F -> $F\{x_i,...,x_n,do\{a,s)'),$ ->$F(x_l,...,x„,do(a,s)y),$

gdzie $\backslash[f'_F$ jest formułą, w której występują zmienne wolne $x_v,...,x_n,a,s.$

(i) Przekształć pozytywny (odpowiednio negatywny) aksjomat skutku działania

$F(t_l,...,t_n,do(a,s')'),$ (</>; -^—$F(t_l,...,t_n,do(a,s))),$

gdzie *a* jest termem działania w równoważne logicznie zdanie

a = a =r, a ...a $\%_b$ = t_n $\wedge(j)_F$ —»$F(x_l,...,x„,do(a,s)),$

(a = (ZAx_1 = $t_{\{}$ a ...a ą =t_n $\wedge(j)_F$ -*—$iF(x_l,...,x_n,do(a,sy)'),$ gdzie

są nowymi zmiennymi, które są różne od siebie i zmiennych występujących w zdaniu

$(j)_F$ -> $F(t_l,...,t_n,do(a,s)'),$ $(<t>_F$ -^-$tF(t_l,...,t„,do(a,s)')).$ $^{(ii)}$

(ii) Załóż, że zmienne są wszystkimi z wyjątkiem *s* zmiennymi występującymi w zdaniu

$(j)_F$ -> F(t_1,...,r„,ć/o(a,5)), (^ ^^$F(t_l,...,t_n,do(a,s)y),a$ następnie przekształć zdanie

$a = a/\backslash x_l = t_t$ A...A$\%_n$ =t_n $a(/)_f$ —> $F(x_[,...,x„,do(a,s')'),$

$(a = ot/\backslash x_l =t_t$ A...Ax_n =t_n a $<j>_F$ -^—$F(x_l,...,x„,do(.a,s)y)$

w równoważne logicznie zdanie

$\wedge y_l$,-,y„ $[a = a/\backslash x_{\{} =t_{\{}$ /\.../\x„ =t„ $a(/)_f$]^> $F(.x_[,...,x„,do(a,sy),$

[11] Tamże, s. 29 - 20.

(3y$_1$,...,y$_B$[a = aAx$_1$ a ...a x „ =*t$_n$* a 0$_f$] ->-*iF(x$_i$,...,x$_n$,do(a,s))).*

Otrzymane w ten sposób aksjomaty

-> *F(x$_l$,...,x$_n$,do(a,s))'\...Ai[f$_F$* *F(x$_l$,...,x$_n$do(a,s)),*

(y/j -W(x$_l$,...j$_B$,do(a,s))A...Ay‘ ~^—*iF(x$_l$,...,x$_n$do(a,s))),*

przekształć w logicznie równoważne zdanie

[yr}. vF(x,,...,x$_B$,ć/o(a,5')),

([y/^{l}$_F$ v... v *y^k$_F$*] -» -iF(^,...,*x„ ,do(a,s'))).*

W wyniku zastosowania powyżej opisanej procedury otrzymujemy:

Pozytywną postać normalną aksjomatu skutku działania

(17) *y$_F$(x$_l$,...,x$_n$,a,s)* -> F(x$_l$,...,x$_B$,do(a,s)).

Wyrażenie *y$_F$(x$_l$,...,x$_n$,a,s)* jest formułą pierwszego rzędu ze zmiennymi wolnymi *X^.^X^Ü^.*

Negatywną postać normalną aksjomatu skutku działania

(18) *Y$_F$(x$_l$,...,x$_n$,a,s)^-iF(x$_l$,...,x$_n$,do(a,s)).*

Wyrażenie *y$_F$(x$_l$,...,x$_n$,a,s)* jest formułą pierwszego rzędu ze zmiennymi wolnymi *x$_l$,...,x$_n$,a,s.*

Podaną procedurę zilustrujemy elementarnym przykładem. Dla działań *rzucać* (Luck celnie rzuca kamieniem do butelki), *strzelać* i fluentu *rozbita* mamy dwa aksjomaty skutku działania:

(19) *rozbita*(*do*(*rzucać,s*))
(20) *rozbita*(*do*(*strzelać,s*)).

W wyniku wykonania kroków (i) oraz (ii) mamy:

(21) *a* = *rzucać* ® *rozbita*(*do*(*a,s*));
(22) *a* = *strzelać* ® *rozbita*(*do*(*a,s*)).

Otrzymane aksjomaty przekształcamy w logicznie równoważne ich koniunkcji zdanie:

(23) *a* = *rzucać* Ú *a* = *strzelać* ® *rozbita*(*do*(*a,s*)).

Widzimy, że dzięki wprowadzeniu dodatkowej zmiennej *a* oraz zastosowaniu prostego przekształcenia logicznego uzyskaliśmy redukcję liczby aksjomatów skutku działania.

5.2 Aksjomaty domknięcia. W kilku miejscach tego artykułu wspominaliśmy o założeniu, że jedynymi przyczynami zmian w i. s. d. są działania agenta. Dodatkowo przyjmiemy, że tylko określone aksjomatycznie działania są przyczynami zmian. Z punktu widzenia osoby dokonującej aksjomatyzacji scenariusza dotyczącego i. s. d. oznacza to, że aksjomaty (17) i (18) określają wszystkie związki przyczynowe dla fluentu *F*. Intuicję tę ujmiemy ściśle wprowadzając tzw. aksjomaty domknięcia[12]:

(24) $\mathrm{F}(\mathrm{x}_1,\ldots,x_n,s)$ Ù $F(x_l,\ldots,x_n,do(a,s'))$ ® $\gamma^{-}{}_{\mathrm{F}}(\mathrm{x}_1,\ldots,xn,a,s)$,

(25) ØF\\$x_l,\ldots,x_n,s)$ Ù $F(x_l,\ldots,x_{ri},do(a,s))$ ® $\gamma^{+}{}_{\mathrm{F}}\ldots,x_n,a,s)$.

Aksjomat (24) powiada, że jeśli wartością logiczną *F* jest *prawda* w stanie *s* oraz wartością logiczną *F* jest *fałsz* w stanie *do*(*a,s*), będącym wy-

[12]Tamże, s. 31.

nikiem wykonania działania *a*, to wartością logiczną $\gamma^{-}_{F}(x_l,...,x_n,a,s)$ musiała być *prawda*. W analogiczny sposób należy interpretować aksjomat (25). Przykładowo, jeśli pistolet Lucka nie jest załadowany w stanie *s*, a następnie w wyniku wykonania przez niego działania *a* pistolet jest załadowany, to tym działaniem musiało być działanie *ładować*-.

(26) *załadowany*(*s*) Ù *załadowany*(*d.o*(*a*,*s*)) ® *a* = *ładować*.

5.3 Aksjomaty jednoznaczności nazw działań[13]. Aby aksjomaty (24) i (25) ujmowały zaproponowane założenie w sposób poprawny wprowadzimy aksjomaty jednoznaczności nazw działań. Aksjomaty te powiadają, że różne nazwy działań oznaczają różne działania. Dla działań *A* i *B* mamy:

(27) $A(x_1....,_{xn})$,

(28) $A(x_1.....,x_n) = A(y_1,...,y„)$ ® $x_1 = y_1$ Ù ... Ù $x_n = y_n$.

Aksjomat (28) powiada, że identyczne nazwy działań mają identyczne argumenty. Przykłady takich aksjomatów mogą stanowić następujące formuły:

(29) *strzelać* = *ładować*;

(30) *podnosić*(*x*) = *podnosić*(*y*) ® *x* = *y*.

5.3 Rozwiązanie problemu tła. Aksjomaty następnika stanu. Wprowadzone pojęcia prowadzą nas do kluczowego wyniku Raymonda Reitera umożliwiającego częściowe rozwiązanie problemu tła[14].

Twierdzenie (Reiter)[15]: Niech *T* będzie teorią pierwszego rzędu, z której wynika, że Ø\$$x_1$...,$x_n$,*a*,*s*($\gamma^{+}_{F}$ (x_1,,...,x_n,*a*,*s*) Ù γ^{-}F(x_1,...,x_n,*a*,*s*)).

[13] Tamże, s. 31.

[14] Jest ono częściowe, ponieważ dotyczy tylko działań deterministycznych. Więcej na ten temat piszemy w paragrafie 7.

[15] Tamże, s. 31.

Wówczas z teorii *T* wynika, że aksjomaty (17) i (18) wraz z aksjomatami (24) i (25) są logiczne równoważne zdaniu

(31)

$F(x_1, ..., x_n, do(a,s))$ « $\gamma^{+}_{F}(x_1, ..., x_n, a,s)$ Ú $F(x_1, ..., x_n,s)$ ÙØ $\gamma^{-}_{F}(x_1, ..., x_n,a,s)$.

Podane powyżej twierdzenie wymaga kilku słów komentarza. Gdyby z teorii *T* nie wynikało, że

Ø$ $x_1, ..., x_n, a,s(\gamma^{+}_{F}(x_1, ...,x_n, a,s)$ Ù $\gamma^{-}_{F}(x_1, ..., x_n, a, s))$,

to dla stałych $X_1,...,X_n,A,S$ mielibyśmy $\gamma^{+}_{F}(X_1,...,X_n,A,S)$ oraz $\gamma^{-}_{F}(X_1,...,A,S)$. Wówczas w oparciu o aksjomaty (17) i (18) łatwo udowodnić, że $F(X_1...,X_n,do(A,S))$ *oraz* Ø$F(X.,...,X_n,do(A,S))$.

Zdanie (31) będziemy nazywać aksjomatem następnika stanu. Aksjomat ten specyfikuje wszystkie związki przyczynowe między działaniem *a* i fluentem *F*. Jako, że jest on równoważny logicznie koniunkcji aksjomatów (17), (18), (24) oraz (25) to aksjomaty te będziemy pomijać. W związku z tym nasza aksjomatyzacja i. s. d. będzie składać się z aksjomatów następnika stanu, aksjomatów wstępnych warunków działania oraz aksjomatów jednoznaczności nazw działań. Jeśli dla każdego fluentu *F* podamy aksjomat następnika stanu, a dla każdego działania aksjomat warunków wstępnych działania, to pomijając aksjomaty jednoznaczności nazw działań liczba aksjomatów w teorii dotyczącej danego scenariusza i. s. d. będzie określona wzorem: ~ liczba działań + liczba fluentów[16].

6. Aksjomatyzacja scenariusza. Przejdziemy teraz do aksjomatyzacji podanego w paragrafie pierwszym scenariusza. Zgodnie z nim wyróżniamy działania *strzelać* (Luck strzela z pistoletu), *ładować* (Luck ładuje pistolet), *czekać* (Luck czeka) oraz fluenty *rozbitaty)* (Butelka jest rozbita w stanie *s), zaladowanyty)* (Pistolet Lucka jest załadowany w stanie 5). Zaczniemy od wypisania aksjomatów warunków wstępnych działania:

[16]Tamże, s. 34.

Aksjomaty warunków wstępnych działania

(32) *Poss*(*strzelać*,*s*) « *załadowany*(*s*),
(33) *Poss*(*ładować*,*s*) « Ø*załadowany* (*s*),
(34) *Poss*(*czekać*,*s*) « *prawda.*

Następnie podamy aksjomaty skutku działania, ich postać normalną oraz aksjomaty następnika stanu:

Aksjomaty skutku działania

(35) *załadowany*(*do*(*ładować*,s)),
(36) *rozbita*(*do*(*strzelać*,*s*)),
(37) Ø*załadowany* (*do*(*strzelać*,*s*)).

Postać normalna aksjomatów skutku działania

(38) *a* = *ładować* ® *załadowany*(*do*(*a*,*s*)),
(39) *a* = *strzelać* ® Ø*załadowany* (*do*(*a*,*s*)),
(40) *a* = *strzelać* ® *rozbita*(*do*(*a*,*s*)),
(41) *fałsz* ® Ø*rozbita*(*do*(*a*,*s*)).

Aksjomaty następnika stanu

(42)
załadowany(*do*(*a*,*s*)) « *a* = *ładować* Ú *załadowany*(*s*) Ù *a* = *strzelać*,
(43) *rozbita*(*do*(*a*,*s*)) « *a* = *strzelać* Ú *rozbita*(*s*).

Określimy stan początkowy i. s. d.:

(44) Ø*załadowany*(S_0),
(45) Ø*rozbita*(S_0).

Wreszcie podamy aksjomaty jednoznaczności nazw działań:

(46) *strzelać = ładować,*
(47) *strzelać = czekać,*
(48) *czekać = ładować.*

W rezultacie otrzymujemy teorię i. s. d., która może pełnić rolę czegoś w rodzaju dedukcyjnego symulatora i. s. d.. Przykładowo w oparciu o podaną aksjomatykę jest dowodliwe, że załadowanie pistoletu, odczekanie chwilę, a następnie wystrzelenie z pistoletu doprowadzi do rozbicia butelki, symbolicznie:

(49) *rozbita*(*do* (*strzelać*,*do(czekać*,*do*(*ładować,* So)))).

Przekonuje nas o tym następujący dowód:

W oparciu o (42) dowodliwe jest, że:

(50) *załadowany*(*do*(*ładować,* So)).

W oparciu o (42), (50) oraz aksjomaty jednoznaczności nazw działań dowodliwe jest, że:

(51) *załadowany*(*do*(*czekać*,*do*(*ładować,* So))).

W oparciu o (43) dowodliwe jest, że:

(49) *rozbita*(*do(strzelać*,*do*(*czekać*,*do*(*ładować,* So)))).

Powyższy dowód pokazuje, że istnieje taki ciąg działań, że wykonanie go przez agenta spowoduje rozbicie butelki. W analogiczny sposób da się rozstrzygnąć odpowiedzi na pytania 2 i 3 podane w scenariuszu. Zauważmy, że w dowodzie zdania (49) przyjęliśmy domyślnie, że dany ciąg działań jest wykonalny. Formalnie rzecz biorąc należy zawsze sprawdzić czy dany ciąg działań jest wykonalny. W tym celu korzystamy z aksjomatów warunków wstępnych działania. Przykładowo, aby udowodnić, że *rozbita*(*do*(*strzelać*,*do*(*czekać*,*do*(*ładować*, S_0)))) należy w pierwszej kolejności dowieść, że:

Poss(*do*(*ładować*, S_0)) Ù *Poss*(*do*(*czekać*,*do*(*ładować*, So))) Ù *Poss*(*do* (*strzelać*,*do*(*czekać*,*do*(*ładować*, *So*))))[17].

7. Uwagi końcowe. W niniejszym artykule przedstawiliśmy metodę formalizacji rozumowań przyczynowo - skutkowych w rachunku stanów Raymonda Reitera, a w szczególności opisaliśmy, zaproponowane przez niego, częściowe rozwiązanie problemu tła. Podejście to jest rozwiązaniem częściowym z kilku powodów.

Po pierwsze, w podanej przez nas aksjomatyzacji i. s. d. wpływ danego działania na dany fluent jest wyznaczony w sposób jednoznaczny. Innymi słowy zaproponowana aksjomatyzacja jest teorią deterministycznego systemu dynamicznego. Odzwierciedleniem tego faktu w naszym scenariuszu jest założenie, że Luck zawsze trafia do celu. Jest ono z pewnością nierealistyczne, ponieważ nawet wyborowy strzelec nie zawsze trafia do celu. Działanie *strzelać* ma charakter niedeterministyczny. Bliższy prawdzie aksjomat skutku działania moglibyśmy zapisać jak następuje:

(52) *rozbita*(*do*(*strzelać*,*s*)) v Ø*rozbita*(*do*(*strzelać*,*s*)).

Po drugie, w przedstawionym rozwiązaniu problemu tła występują tylko działania atomowe, tzn. takie działania, które nie są działaniami złożonymi. Tymczasem w rozumowaniach przyczynowo - skutkowych istotną rolę odgrywają działania złożone. Przykład takiej czynności stanowi działanie warunkowe:

(53) If *załadowany*, then *strzelać* else *ładować* endif.

Po trzecie, nasza aksjomatyzacja zakłada, że znany jest stan początkowy i. s. d.. Niestety w większości przypadków agent nie dysponuje pełną informacją na temat stanu początkowego tego rodzaju systemu.

[17]Tamże, 38.

Po czwarte, założyliśmy, że jedynymi przyczynami zmian w systemie dynamicznym są działania agenta. W rzeczywistym świecie zmiany wywołują nie tylko działania agentów, ale i prawidłowości przyrodnicze[18].

Istnieje z pewnością jeszcze wiele trudności, którym podana aksjomatyzacja nie jest w stanie sprostać. Należy jednak zaznaczyć, że istnieją propozycje dotyczące rozwiązania wyłożonych powyżej *explicite* problemów[19]. W ramach omawianego tu podejścia zaproponowano pewne rozszerzenia rachunku stanów, które umożliwiają aksjomatyzację scenariuszy dotyczących niedeterministycznych systemów dynamicznych, działań złożonych, niepełnej informacji o stanie początkowym i. s. d. oraz zmian wywoływanych przez prawidłowości przyrodnicze.

Summary

We discuss Reiter's formalization method of causal reasoning and his partial solution of the frame problem. In paragraph one, simple, causal reasoning scenario is presented. In paragraph two, language of situation calculus is discussed. In paragraph three, both action preconditions axioms and the qualification problem for actions are analyzed. In paragraph four, we introduce effect axioms. In paragraph five, not only frame axioms but the frame problem is presented as well. Next, explanation closure axioms, unique names axioms for actions and a partial solution to the frame problem are given. Paragraph six contains formalization of scenario described at the beginning of the article. Finally, comments about limitations of the presented method are made.

Key words: causal reasoning, Reiter's solution of the frame problem.

[18] Tamże, s. 35.

[19] R. Reiter: *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2001.