

Logika systemów wieloagentowych

Magdalena Kacprzak

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Systemy wieloagentowe (ang. *multiagent systems*) są źródłem wielu nowych narzędzi i technologii wspomagających analizowanie i projektowanie złożonych systemów komputerowych. Agent jest to system informatyczny posiadający zdolność rozwiązywania problemów oraz efektywnego działania w środowiskach charakteryzujących się dużą dynamiką i złożonością. Zazwyczaj jest on osadzony w konkretnym środowisku wraz z grupą innych agentów. Najważniejszymi cechami agentów są: umiejętność realizacji przypisanych im akcji w sposób elastyczny i umiejętność podejmowania autonomicznych decyzji w realizacji ustalonego celu. Systemy wieloagentowe stosowane są przede wszystkim tam, gdzie istnieje potrzeba, ze względów ekonomicznych lub bezpieczeństwa, zredukowania zasobów ludzkich i zastąpienia ich automatami: Internet, monitorowanie procesów przemysłowych, kontrola lotów międzyplanetarnych.

Systemy wieloagentowe możemy podzielić na dwie grupy. Jedną z nich tworzą systemy, w których wzajemne interakcje podyktowane są zrealizowaniem wspólnego celu, tzn. agenci współpracują, aby osiągnąć jeden cel, będący poza zasięgiem każdego z nich. Ich przeciwieństwem są grupy agentów realizujących swoje indywidualne, czasami sprzeczne cele. Zależności zachodzące pomiędzy takimi agentami przypominają grę, w której uczestnicy starają się jak najlepiej wypełnić swoje zadania i osiągnąć sukces. W obu grupach główny nacisk kładzie się na zdefiniowanie zasad współdziałania, kooperacji i koordynacji działań agentów, a także określenie protokołów komunikacji, negocjacji i osiągania kompromisów. Elementy te zapewniają działanie całego systemu w sposób eliminujący chaotyczne działanie jednostki i umożliwiające spójne i zorganizowane działanie grup agentów.

Charakterystyczną cechą systemów wieloagentowych jest ich różnorodność wynikająca z różnorodności dziedzin obliczeń, do których są stosowane. Tym samym nie jest możliwa jedna formalizacja pozwalająca na specyfikowanie i weryfikowanie wszystkich takich systemów. Wśród istniejących w literaturze propozycji wyróżnić można dwa główne nurty. Pierwszy obejmuje prace dotyczące najbardziej rozpowszechnionego i najszerzej opisanego modelu zwanego BDI, w którym stany agentów zdeterminowane są poprzez przekonania (ang. *beliefs*), pragnienia (ang. *desires*) i intencje (ang. *intentions*). Systemy BDI

należą do grupy systemów intencjonalnych, realizujących paradygmat praktycznego wnioskowania. Przykładami takiego podejścia są: formalizm A. Rao i M. Georgeffa [RG91], logiki KARO [vdHvLM99] i LORA [Woo00] oraz Teoria Kolektywnych Postaw Motywacyjnych [DKV03, DKV04].

Drugi nurt tworzą formalizmy bazujące na logice temporalnej [Eme90], zarówno czasu liniowego jak i rozgałęzionego, wzbogacone o elementy logiki epistemicznej [FHMV95] i deontycznej oraz nowe operatory umożliwiające modelowanie wspólnych działań agentów. Jednym z ciekawszych przykładów jest tutaj logika ATL (ang. *Alternating-time Temporal Logic*) [AHK98], będąca uogólnieniem logiki temporalnej CTL (ang. *Computational Tree Logic*), w której operatory ścieżkowe zastąpiono modalnościami pozwalającymi na opisywanie strategii agentów i grup agentów. Znane jest także rozszerzenie tej logiki o operatory wiedzy [vdHW02, JvdH04] i operatory deontyczne [JvdHW04]. Do tego nurtu zaliczyć należy również niniejszą rozprawę.

Główne cele pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie oryginalnej formalizacji systemów złożonych z wielu rozproszonych procesów pracujących w sposób współbieżny. Opisany system logiczny nosi nazwę RA-MAS (ang. *Reasoning About Multi-Agent Systems*). Traktuje on w sposób kompleksowy większość problemów związanych ze specyfikowaniem, walidacją i weryfikacją systemów agentowych. Zapewnia aksjomatyczne podejście, adekwatność systemu logicznego oraz jego mocną pełność. Ponadto umożliwia definiowanie i porównywanie na gruncie tego samego języka formalnego różnych systemów wieloagentowych. Dostarcza narzędzi do modelowania i charakteryzacji stanów mentalnych agentów, dostarcza różnych sposobów realizacji współdziałania agentów, wreszcie, umożliwia rozpoznawanie i rozwiązywanie sytuacji konfliktowych.

Elementy odróżniające RA-MAS od najczęściej stosowanych logik wieloagentowych, to:

- Wprowadzenie relacji konfliktu umożliwiające bezpośrednią (a więc łatwiejszą) charakteryzację kolizji oraz sprzecznych celów i motywacji agentów.
- Modelowanie w odmienny sposób wiedzy i przekonań agentów, pozwalające na odróżnienie informacji wynikających z obserwacji środowiska, a uzyskanych od innych agentów podczas procesu komunikacji.
- Zastosowanie operatorów umożliwiających porównywanie działań grup agentów oraz charakteryzowanie ich strategii (w szczególności strategii *de re* i *de dicto*).

- Zaproponowanie nowej struktury agenta, którego najistotniejszymi elementami są: kolejka zadań i zestaw metod, którymi agent może się posługiwać.

Model agenta

W proponowanym podejściu każdy agent posiada trzy podstawowe atrybuty: nazwę, zwaną *identyfikatorem*, ustalony zbiór narzędzi, które może wykorzystywać podczas swojego działania, zwanych *metodami* oraz *kolejkę zadań*.

Metody wyznaczają zakres umiejętności agentów i determinują wykonywane przez nich akcje. Są to krótkie algorytmy, które wyznaczają krok po kroku, co agent powinien zrobić, aby osiągnąć wyznaczony cel. Na przykład, agent organizujący aukcję może posiadać metody powodujące rozpoczęcie aukcji, rozesłanie ceny wywoławczej do agentów uczestniczących w aukcji, porównanie przysyłanych ofert itp.

Wybrane metody, zwane *aktywnymi*, mogą być realizowane na wyraźne polecenie innych agentów. Jednakże agent, wykonując odpowiednie akcje, samodzielnie podejmuje decyzję, na wykonanie których metod wyraża zgodę. Metody aktywne określają zakres usług jakie agent może wykonać na rzecz swoich współpracowników.

Metody są kluczowym elementem architektury agenta. Między innymi określają różne formy kooperacji i negocjacji. Najważniejsze metody związane są z komunikacją. Mogą one definiować wszystkie zasadnicze typy komunikacji, które znajdują zastosowanie w systemach wieloagentowych. Na przykład agent może mieć metody powodujące zadanie pytania, przesłanie informacji, prośbę o pomoc, sygnalizowanie błędu itp.

Metody są ustawiane w ciągi, nazywane kolejkami zadań. Kolejki wyznaczają harmonogram pracy agenta, czyli jego plan zajęć. Podobnie jak w świecie rzeczywistym, w planie tym mogą zachodzić zmiany związane ze zmianą stanu środowiska. Wówczas kolejka jest modyfikowana, poprzez usunięcie z niej niektórych zadań. Istnieje też możliwość dopisywania metod na początek lub koniec kolejki. Dołączenie nowego zadania na początku kolejki oznacza, że agent wstrzymuje dotychczasowe zajęcie i wypełnia najpilniejsze zadania, aby po chwili znów powrócić do przerwanej pracy. Kolejki zadań otwierają drogę do swobodnego komponowania przez agentów swoich działań, układania i zmieniania wcześniej zatwierdzonych planów oraz ich kontrolowania.

System dedukcyjny

RA-MAS jest logiką wielomodalną opartą na elementach logiki temporalnej, epistemicznej i algorytmicznej. Wykorzystuje następujące temporalne operatory: *E* - "*istnieje obliczenie*", *X* - "*w następnym stanie obliczenia*", *G* - "*we*

wszystkich stanach obliczenia” i U - “dopóki”. W odróżnieniu od logiki temporalnej, operatory te są parametryzowane zbiorami agentów. Pozwala to na specyfikację i analizę współpracy różnych grup agentów (tego samego systemu wieloagentowego lub różnych systemów wieloagentowych) na gruncie jednego systemu formalnego.

Język przedstawionej w pracy logiki, zawiera zestaw modalności, które pozwalają opisać stany lokalne agentów, a dokładniej ich wiedzę, przekonania, cele i aktywne metody: *knowledge*, *belief*, *goal*, *method*. Ponadto występują w nim operatory wyrażające dynamikę działań agentów. Formuła $possible(A, a)$ oznacza, że agent A może wykonać akcję a , formuła $\diamond Z\alpha$ wyraża własność, że po wykonaniu zbioru akcji Z warunek α może być prawdziwy, natomiast formuła $ER\Gamma\alpha$ zapewnia, że jeśli wszyscy członkowie grupy Γ wykonają swoje akcje, to warunek α może być prawdziwy. Z kolei formuła $conf(Z)$ określa własność zbioru Z oznaczającą, że należące do niego akcje są w *konflikcie*.

RA-MAS jest jedną z niewielu logik pozwalających na opisywanie w sposób jawny konfliktów. Jest to bardzo ważna własność, gdyż przy projektowaniu systemów rozproszonych niezmiernie istotna jest możliwość wykrywania i charakteryzowania zaistniałych sytuacji konfliktowych, a w rezultacie opracowania sposobów ich rozwiązania i unikania. Na przykład formuła:

$$\neg ER\{A, B\}true \Rightarrow (possible(A, a) \wedge possible(B, b) \Rightarrow conf(\{a, b\}))$$

obrazuje sytuację, w której agenci A, B nie mogą jednocześnie wykonać swoich zadań, gdyż są one konfliktowe.

Innym nowym elementem rozważanej logiki jest możliwość specyfikacji i wnioskowania o metodach agentów. Formuła:

$$\diamond\{qbadd(B, m)\}(EU\{B\}[\neg\alpha, finished(m) \wedge \alpha]),$$

gdzie $qbadd(B, m)$ jest akcją dopisania do kolejki zadań agenta B metody m , a $finished(m)$ jest zmienną stwierdzającą, że metoda m zakończyła się, wyraża że jeśli agent B zrealizuje w całości metodę m , to zapewni prawdziwość warunku α i do tego czasu $\neg\alpha$ będzie zachodzić. Oznacza to, że α jest rezultatem wykonania metody m . Inna formuła:

$$method(B, m) \wedge possible(A, qbadd(B, m)) \Rightarrow EU\{A, B\}[true, finished(m)]$$

charakteryzuje możliwość wykonania przez agenta B metody m na polecenie agenta A .

Nie zawsze w interesie agentów leży podejmowanie wspólnych działań i zobowiązań. Istnieją systemy, w których agenci walczą np. o dostęp do ograniczonych zasobów. Wówczas spełnienie pragnień jednej jednostki oznacza porażkę innej. Cenną cechą logiki RA-MAS jest możliwość opisywania takich sytuacji i tym samym wnioskowania o strategiach. Podobne właściwości ma logika ATL.

Jednakże nie są w niej wyrażalne własności agentów, takie jak posiadanie strategii *de re* oraz strategii *de dicto*. Strategia *de re* mówi o tym, że istnieje akcja, o której agent wie, że po jej wykonaniu zapewni sobie zwycięstwo bez względu na działania innych agentów:

$$\begin{aligned} & \forall_{a \in \text{Akcje}} (\text{possible}(B, a) \wedge \\ & \text{knowledge}(B.I, \wedge_{B_i \in \text{Agenci} \setminus \{B\}} \wedge_{a_i \in \text{Akcje}} (\text{possible}(B_i, a_i) \Rightarrow \\ & \quad \diamond \{a, a_1, \dots, a_n\} \alpha))) \end{aligned}$$

Strategia *de dicto* mówi o tym, że agent wie, że istnieje akcja, po wykonaniu której osiągnie on zwycięstwo, ale nie wie, którą akcję należy wybrać:

$$\begin{aligned} & \text{knowledge}(B.I, \forall_{a \in \text{Akcje}} (\text{possible}(B, a) \wedge \\ & \wedge_{B_i \in \text{Agenci} \setminus \{B\}} \wedge_{a_i \in \text{Akcje}} (\text{possible}(B_i, a_i) \Rightarrow \\ & \quad \diamond \{a, a_1, \dots, a_n\} \alpha))). \end{aligned}$$

Modelem semantycznym rozważanego języka jest rozszerzona struktura Kripkego. Stan globalny tej struktury składa się ze świata, opisującego środowisko oraz ciągu stanów mentalnych agentów. Stan mentalny agenta tworzą dwa zbiory formuł reprezentujące przekonania i cele. Należy zaznaczyć, że zarówno przekonania jak i cele zależą nie od świata, w którym agent się znajduje, ale od wcześniej zdobytych przez niego doświadczeń. Modelowanie przekonania jako zbiorów formuł pozwala na uniknięcie znanego problemu wszechwiedzy agentów, a w tym przypadku właściwie “wszechprzekonań”.

Wiedza, w przeciwieństwie do przekonania, jest modelowana za pomocą relacji równoważności zdefiniowanej w zbiorze stanów globalnych struktury. Idea ta jest zaczerpnięta z logiki epistemicznych.

Akcje są interpretowane jako relacje binarne w zbiorze stanów struktury Kripkego. Przyjęto, że pewne z nich nie mogą być równocześnie wykonane - są w konflikcie. Relacja konfliktu należy do formalizmu przedstawionej logiki.

Główne wyniki pracy

Głównym wynikiem pracy jest przedstawienie adekwatnego i pełnego systemu formalnego do specyfikowania systemów wieloagentowych i do wnioskowania o ich własnościach. Zdefiniowany został język umożliwiający specyfikację zachowań i właściwości agentów oraz jej weryfikację. Zdefiniowano też adekwatną semantykę dla tego języka. Dowód twierdzenia o pełności wzorowany jest na metodzie zaproponowanej dla logiki algorytmicznej w [Mir81]. Oparty jest on na kombinacji algebraicznej metody zastosowanej przez H. Rasiową i R. Sikorskiego dla logiki klasycznej [RS70] z metodą Kripkego użytą dla logiki modalnej [Kri63].

Zbadano metamatematyczne własności przedstawionej logiki. Udowodniono, że operacja semantycznej konsekwencji nie jest zwarta oraz, że nie zachodzi twierdzenie o dedukcji w klasycznym sformułowaniu dla rachunku zdań.

Najważniejszym faktem wynikającym z braku zwartości jest niemożność skonstruowania skończonego systemu dowodowego, dla którego prawdziwe byłoby mocne twierdzenie o pełności.

Kierunki dalszych badań i uwagi końcowe

Przedstawiony system formalny oferuje narzędzia do analizowania programów komputerowych, które kooperują i komunikują się ze sobą. Pozwala na wyrażanie, a następnie dowodzenie własności dotyczących zaistniałych kolizji i konfliktów. Jest także przydatny do badania poprawności protokołów determinujących zachowania agentów, tzn. sposobów porozumiewania się, wymiany informacji, negocjacji.

System logiczny RA-MAS został zastosowany do zweryfikowania dwóch systemów wieloagentowych: systemu organizującego sprzedaż i kupno towarów w oparciu o prosty schemat aukcji oraz system układający rozkład zajęć. Oba systemy, przy użyciu opisanej formalizacji, zostały wyspecyfikowane oraz przeprowadzono formalny dowód stwierdzający prawdziwość ich wybranych właściwości. Zaproponowany system układający rozkład zajęć został zaimplementowany w językach LOGLAN i JAVA. Implementacja jest dołączona do pracy.

Podjęty w pracy temat jest wielopłaszczyznowy i w niedalekiej przyszłości z pewnością zaowocuje dalszymi pracami badawczymi. Ważniejsze zagadnienia to: weryfikacja modelowa, zastosowania, znalezienie zestawu wygodnych reguł wnioskowania, zaproponowanie protokołów negocjacji i ich weryfikacji na gruncie przedstawionej logiki, rozwiązanie problemu zarządzania i korzystania przez agenta z wiedzy.

Jednym z ciekawszych problemów badawczych jest opracowanie weryfikacji modelowej dla zaproponowanej logiki. Weryfikacja modelowa polega na sprawdzeniu, czy formuła opisująca pewną właściwość danego systemu jest prawdziwa w modelu kodującym wszystkie jego możliwe obliczenia. Metoda ta, początkowo zdefiniowana do weryfikacji własności wyrażalnych w logikach temporalnych, obecnie została zaadoptowana dla wybranych logik agentowych [PL03, KP04].

Bibliografia

- [AHK98] R. Alur, T. A. Henzinger, and O. Kupferman. Alternating-time temporal logic. *LNCS*, 1536:23–60, 1998.
- [DKV03] B. Dunin-Kęplicz and R. Verbrugge. Evolution of collective commitments during teamwork. *Fundamenta Informaticae*, 56(4):329–371, 2003.
- [DKV04] B. Dunin-Kęplicz and R. Verbrugge. Tuning machine for cooperative problem solving. *Fundamenta Informaticae*, 63(2-3):283–307, 2004.
- [Eme90] E. A. Emerson. Temporal and modal logic. In J. van Leeuwen, editor, *Handbook of Theoretical Computer Science*, volume B: Formal Methods and Semantics of *LNCS*, pages 996–1072. Elsevier, Amsterdam, 1990.
- [FHMV95] R. Fagin, J. Y. Halpern, Y. Moses, and M. Y. Vardi. *Reasoning about Knowledge*. MIT Press, Cambridge, 1995.
- [Har84] D. Harel. A simple highly undecidable domino problem. In *Proc. Conf. on Logic and Computation*, Clayton, Australia, January 1984.
- [JvdH04] W. Jamroga and W. van der Hoek. Agents that know how to play. *Fundamenta Informaticae*, 63(2-3):185–219, 2004.
- [JvdHW04] W. Jamroga, W. van der Hoek, and M. Wooldridge. On obligations and abilities. *Deontic Logic in Computer Science, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3065:165–181, 2004.
- [KP04] M. Kacprzak and W. Penczek. A SAT - based approach to unbounded model checking for alternating-time temporal epistemic logic. *Synthese*, 142:203–227, 2004.
- [Kri63] S. A. Kripke. Semantical analysis of modal logic. *Zeitschrift für Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik*, 9:67–96, 1963.
- [Mir81] G. Mirkowska. PAL-Propositional Algorithmic Logic. *Fundamenta Informaticae*, 4:675–757, 1981.
- [PL03] W. Penczek and A. Lomuscio. Verifying epistemic properties of multi-agent systems via bounded model checking. *Fundamenta Informaticae*, 55(2):167–185, 2003.

- [RG91] A. S. Rao and M. P. Georgeff. Modeling rational agents within a BDI - architecture. *Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 1991.
- [RS70] H. Rasiowa and R. Sikorski. *The Mathematics of Metamathematics*. PWN, Warszawa, 1970.
- [vdHvLM99] W. van der Hoek, B. van Linder, and J.-J. CH. Meyer. An integrated modal approach to rational agents. In M. Wooldridge and A. Rao, editors, *Foundations of Rational Agency*, pages 37–75. Kluwer, Dordrecht, 1999.
- [vdHW02] W. van der Hoek and M. Wooldridge. Tractable multiagent planning for epistemic goals. In *Proc. of the 1st Int. Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'02)*, volume III, pages 1167–1174. ACM, July 2002.
- [Woo00] M. Wooldridge. *Reasoning about rational agents* . The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2000.