

Arkadiusz BIERNACKI
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

SYSTEMY WIELOAGENTOWE JAKO NARZĘDZIE DO SYMULACJI SYSTEMÓW ZŁOŻONYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawowe informacje dotyczące systemów wieloagentowych: definicje, klasyfikacje i zastosowania. Omówiono rodzaje interakcji pomiędzy jednostkami systemu wieloagentowego oraz sposoby komunikacji. Opisano wykorzystanie systemu wieloagentowego jako narzędzia do komputerowych symulacji systemów złożonych. Przedstawiono przykłady wieloagentowych symulacji powstawania samoorganizacji w tych systemach.

Słowa kluczowe: systemy wieloagentowe, rozproszona sztuczna inteligencja, symulacje wieloagentowe

MULTI-AGENT SYSTEMS AS A TOOL FOR COMPLEX SYSTEMS SIMULATIONS

Summary. This paper presents basic information about multi-agent systems: definitions, classifications and applications. Interaction types amongst entities of a multi-agent system and communication methods are discussed. Multi-agent system as a tool for computer simulation of complex systems is described. Multi-agent simulation examples of emerging self-organizations in these systems are presented.

Keywords: multi-agent systems, distributed artificial intelligence, multi-agent simulations

1. Wprowadzenie

Systemy wieloagentowe są dynamicznie rozwijającą się interdyscyplinarną dziedziną nauki, która jest obszarem intensywnych badań w ostatnim dziesięcioleciu. System wieloagentowy składa się z autonomicznych jednostek obliczeniowych, zwanych agentami, oraz zbioru

zasad określających reguły interakcji pomiędzy tymi jednostkami. Systemy wieloagentowe stopniowo przenikają do różnych gałęzi nauk informatycznych. Stosowane są m.in. w:

- rozwiązywaniu zadań optymalizacyjnych [21] oraz w rozwiązywaniu zadań wymagających użycia programowania z ograniczeniami [14],
- inżynierii oprogramowania [8],
- sieciach komputerowych, m.in. do zarządzania siecią [33],
- systemach adaptacyjnych [16],
- zabezpieczeniu systemów informatycznych [22].

Systemy wieloagentowe zyskują również dużą popularność jako narzędzie do modelowania i symulacji zagadnień związanych z naukami przyrodniczymi, m.in. biologią, ekologią [18] oraz naukami humanistycznymi, np. socjologią [32, 35]. Wyniki tych symulacji często objaśniają mechanizmy, które stoją za powstawaniem zjawisk będących przedmiotem badań w tych naukach. Prace badawcze koncentrują się także na teoretycznej i eksperymentalnej analizie związków pomiędzy poszczególnymi jednostkami systemu oraz środowiskiem. Badane są struktury, jakie powstają w wyniku ewolucji różnych form interakcji pomiędzy agentami.

Niniejsza praca zawiera podstawowe informacje dotyczące systemów wieloagentowych: definicje, klasyfikacje i zastosowania. Omówiono rodzaje interakcji pomiędzy jednostkami systemu wieloagentowego oraz sposoby komunikacji. Przedstawiono zastosowania systemu wieloagentowego jako wygodnego narzędzia służącego do symulacji komputerowej systemów złożonych. Na podstawie przeglądu dotychczasowych badań prowadzonych w tej dziedzinie opisano wieloagentowe symulacje samoorganizacji, jaka powstaje m.in. w systemach biologicznych. Samoorganizacja ta polega m.in. na grupowaniu się i tworzeniu przez agentów formacji geometrycznych na płaszczyźnie, a także specjalizacji jednostek systemu oraz podziale prac pomiędzy nimi. Symulowane systemy charakteryzują się zdecentralizowanym nadzorem nad wykonywanymi zadaniami i prostotą budowy agentów. Pierwowzory takich systemów występują w przyrodzie, np. populacje owadów.

Dalsza praca zorganizowana jest następująco: w rozdziale 2 przedstawione zostają wiadomości teoretyczne dotyczące systemów wieloagentowych i ich podstawowe klasyfikacje. Omówiono rodzaje interakcji oraz komunikacji pomiędzy jednostkami systemu wieloagentowego. W rozdziale 3 zaprezentowano system wieloagentowy jako narzędzie do symulacji systemów złożonych oraz podano przykłady symulacji samoorganizacji z udziałem systemów wieloagentowych. Rozdział 4 stanowi podsumowanie pracy.

2. Podstawowe informacje i klasyfikacje

Do dalszych rozważań na temat systemów wieloagentowych konieczne jest wprowadzenie definicji agenta, agenta tropistycznego i historycznego oraz systemu wieloagentowego homogenicznego i heterogenicznego. Ponieważ w środowisku naukowym brak jest konsensusu dotyczącego definicji tych pojęć [34], poniżej podane definicje nie mają charakteru formalnego.

Agent jest fizyczną lub wirtualną jednostką obliczeniową osadzoną w środowisku. Wyposażony jest w sensory i efektory umożliwiające wymianę informacji z otaczającym go środowiskiem i komunikację z innymi agentami. Agent jest jednostką autonomiczną, może działać bez interwencji użytkownika systemu lub innych agentów. Działalność agenta najczęściej jest zdominowana przez dążenie do określonego celu lub wykonanie określonego zadania.

Systemem wieloagentowy to system, który zawiera: zbiór agentów $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, środowisko E , w którym osadzone zostały jednostki agentów, zbiór reguł R , które określają interakcje pomiędzy agentami i środowiskiem. Reguły te zostaną opisane szerzej w rozdziale 2.3.

Cechy charakterystyczne systemu wieloagentowego [34]:

- żaden z agentów nie posiada pełnych informacji o całym systemie,
- kontrola nad systemem jest rozproszona,
- dane w systemie są zdecentralizowane,
- działania agentów są asynchroniczne.

2.1. Agenci tropistyczni i hysteretyczni

Jednostki agentów dzielą się na tropistyczne i hysteretyczne. Agent tropistyczny charakteryzuje się odruchowymi reakcjami na stan środowiska, w którym został osadzony. Nie posiada symbolicznej wewnętrznej reprezentacji środowiska. Działania agenta są zdeterminowane przez bodźce zewnętrzne. Formalizując powyższe stwierdzenie – każdy agent tropistyczny a jest wyposażony w percepcję $Percept_a : \Sigma \rightarrow P_a$, która pozwala mu wyróżnić cechy P_a z danego zbioru stanów środowiska Σ . Zbiór działań agenta tropistycznego OP_a zależy bezpośrednio od bodźców zewnętrznych i może być przedstawiony jako funkcja decyzyjna łącząca operację z bodźcem: $Refleks_a : P_a \rightarrow OP_a$. Do opisu agenta a użyte zostają: zbiór odbieranych bodźców, funkcja percepcji oraz funkcja decyzyjna $a = \langle P_a, Percept_a, Refleks_a \rangle$ [7].

Agent hysteretyczny działa w oparciu o własne percepcje i doświadczenia. Wyposażony jest w zbiór stanów wewnętrznych S_a , które w sposób symboliczny odwzorowują stan otaczającego go środowiska i uaktualnianie są poprzez funkcję $Mem_a : P_a \times S_a \rightarrow S_{a+1}$. Posiada

mechanizm podejmowania decyzji określony funkcją $Decision_a : P_a \times S_a \rightarrow OP_a$. Funkcja percepcji jest analogiczna jak dla agenta tropistycznego $Percept_a : \Sigma \rightarrow P_a$. Agent histeryczny przedstawiony jest jako $a = \langle P_a, S_a, Percept_a, Mem_a, Decision_a \rangle$ [7].

Architektura najprostszych agentów histerycznych oparta jest zazwyczaj na automacie skończonym. Agent posiada pewną ilość stanów wewnętrznych, przejścia pomiędzy stanami są skutkiem oddziaływania pewnych bodźców zewnętrznych. Architektury zaawansowanych agentów histerycznych są bardziej skomplikowane, co umożliwia wyposażenie tych agentów w elementy sztucznej inteligencji [27].

2.2. Systemy homogeniczne i heterogeniczne

System wieloagentowy może zostać poddany klasyfikacji ze względu na zróżnicowanie jednostek agentów. System S , w którym każdy agent a_i posiada identyczne zadania $goal(a_i)$ do wykonania i podejmuje takie samo działanie $exec(a_i)$ do ich osiągnięcia oraz wiedza $knowledge(a_i)$ każdego agenta dotycząca środowiska jest taka sama, jest systemem homogenicznym. Zachodzi:

$$\forall a_i \in S \wedge \forall a_j \in S \\ goal(a_i) = goal(a_j) \wedge exec(a_i) = exec(a_j) \wedge knowledge(a_i) = knowledge(a_j)$$

W przypadku, gdy zachodzi:

$$\exists a_i \in S \wedge \exists a_j \in S, i \neq j \\ goal(a_i) \neq goal(a_j) \vee exec(a_i) \neq exec(a_j) \vee knowledge(a_i) \neq knowledge(a_j)$$

system jest systemem heterogenicznym.

2.3. Interakcje agentów

Interakcja definiowana jest jako rodzaj kolektywnej akcji składającej się z działań poszczególnych agentów. Działania te mogą być wykonywane pod wpływem działań, wiedzy bądź obserwacji innego agenta lub grupy agentów. Interakcje dotyczą dwóch aspektów działania agentów: współpracy podczas wspólnego rozwiązywania problemów postawionych przed agentami oraz współdziałania agentów dążących do realizacji własnych celów. W przypadku współpracy agenci dążą do osiągnięcia celu, którego, być może, nie udałoby się osiągnąć pojedynczemu agentowi. Agenci dążący do realizacji własnych celów starają się maksymalizować własne użyteczności, jednocześnie często współzawodnicząc z innymi agentami.

W zależności od tego, czy cele agentów w systemie są zbieżne, czy zasoby do ich osiągnięcia dla każdego agenta są wystarczające oraz czy agent może samodzielnie osiągnąć postawiony przed nim cel, można wyróżnić kilka rodzajów interakcji [7], które zostały przedstawione w tabeli 1 (zaczepnieta z [7]).

Tabela 1

Klasyfikacja interakcji w systemie wieloagentowym

	Wspólne cele	Wystarczające zasoby	Wystarczające umiejętności
Prosta współpraca	tak	tak	nie
Obstrukcja	tak	nie	tak
Skoordynowana współpraca	tak	nie	nie
Indywidualne współzawodnictwo	nie	tak	tak
Kolektywne współzawodnictwo	nie	tak	nie
Indywidualny konflikt zasobów	nie	nie	tak
Kolektywny konflikt zasobów	nie	nie	nie

2.4. Komunikacja agentów

Komunikacja służy do wymiany informacji pomiędzy agentami. Można wyróżnić następujące formy komunikacji [2]:

- Komunikacja poprzez obserwację środowiska. W systemie wieloagentowym nie jest dozwolona bezpośrednia komunikacja pomiędzy jego jednostkami. Agenci są w stanie rozróżnić elementy systemu – innych agentów oraz elementy środowiska. Elementy systemu nie przekazują żadnych informacji agentom. Informacje docierają do agenta tylko i wyłącznie na podstawie jego własnych percepcji otaczającego go środowiska. Kooperacja rozwija się poprzez naśladowanie działań innych agentów.
- Komunikacja stanu agenta. Agenci są w stanie pozyskać informacje o stanie wewnętrznym innych agentów. Agent może jawnie transmitować informacje o swoim stanie wewnętrznym, umiejętnościach, które z nim się wiążą itp. Transmisja jest skierowana do innego agenta lub do ich grupy. Agent może być także obserwowany przez innych agentów. Komunikacja tego typu może być działaniem nieświadomym lub obserwowany agent może ujawniać swój stan m.in. poprzez określone zachowania. Ten ostatni przypadek nazywany jest również komunikacją celu. Jako przykład może po-

służyć zachowanie pszczoły, która odkrywa źródło nektaru. Pszczoła wraca, a następnie swoim specyficznym zachowaniem wskazuje reszcie roju odnaleziony pokarm.

Komunikacja może odbywać się w sposób jawny i niejawny [2]. W pierwszym przypadku agent wysyła informację do innych agentów za pomocą nadajnika. Agent może być także wyposażony w pewne cechy zewnętrzne, których obserwacja dostarcza informacji innym agentom. Obserwowane może być także zachowanie agenta, np. jego sposób poruszania się itp. W przypadku komunikacji niejawnej, agenci wymieniają informacje poprzez modyfikację środowiska, w którym się znajdują. Metoda takiej komunikacji jest wykorzystywana m.in. w systemach biologicznych [21] i nazywana jest stygmergią. Wyróżnia się dwie formy stygmergii: sematectonic (ang.) i sign-based (ang.). Pierwsza polega na zmianie stanu pewnych elementów środowiska przez agenta; zmiany te wpływają na innych agentów bezpośrednio. Druga forma polega na zdeponowaniu przez agenta pewnych elementów w środowisku, np. na zostawianiu śladów feromonów, jak ma to miejsce w systemach mrówkowych [11], działając tym samym pośrednio na innych agentów.

Ze względu na topologię komunikacja może być scentralizowana lub zdecentralizowana [20]. W wersji scentralizowanej komunikacja odbywa się pomiędzy wyróżnionym agentem a grupą agentów podrzędnych. Agent może wydawać polecenia innym agentom lub koordynować ich współpracę. Zdecentralizowana wersja jest komunikacją pomiędzy agentami równorzędnymi. Komunikacja ta może mieć charakter konwersacji agentów.

3. Symulacje wieloagentowe systemów złożonych

System złożony to system składający się ze wzajemnie powiązanych ze sobą składników, które wchodzi w interakcje, w wyniku których produkowane są pewne wartości wyjściowe. Wartości wyjściowe są zazwyczaj nieprzewidywalne w dłuższym okresie czasu. Cechami charakterystycznymi takiego systemu są: rozproszona kontrola, organizacja składników systemu w pewne wzorce, adaptacja systemu do otaczającego go środowiska m.in. poprzez samoorganizację, posiadanie wielu poziomów organizacji [4]. Przykładami systemów złożonych mogą być:

- rynek finansowy, którego składnikami są inwestorzy, a wartością wyjściową kurs papieru wartościowego, będącego przedmiotem transakcji pomiędzy inwestorami,
- sieć komputerowa, której składnikami są stanowiska komputerowe, a jedną z wartości wyjściowych – ilość przesłanych danych pomiędzy tą siecią a siecią zewnętrzną.

Symulacja systemu złożonego z wykorzystaniem systemu wieloagentowego odznacza się tym, że symulowany system traktowany jest jako zbiór indywidualnych jednostek w odróżnieniu od modeli, w których symulowany system rozpatruje się w kategoriach zagregowa-

nych wartości lub cech, np. w ekonomii popyt i podaż. Symulacja nie jest przeprowadzana z globalnego punktu widzenia, lecz z punktu widzenia jednostki systemu. Wieloagentowa symulacja pozwala na określenie tych cech systemu w przyszłości, które nie mogłyby zostać wydedukowane z fizycznego systemu. Symulacja przyczynia się do wyjaśnienia zjawisk powstających w rzeczywistym systemie w wyniku wzajemnych interakcji jednostek tego systemu pomiędzy sobą i środowiskiem. Pomaga w określeniu wpływu różnych strategii stosowanych przez agentów na całość systemu. Interakcje pomiędzy jednostkami w systemie rzeczywistym na ogół nie są trywialne i nie sposób wyjaśnić ich przy użyciu prostych reguł. Jako przykład mogą posłużyć próby modelowania rynku finansowego [31]. Znaczący postęp w wielu dziedzinach nauki w ostatnich latach dokonał się m.in. poprzez rozpatrywanie praw rządzących światem makroskopowym jako wynikłych z reguł rządzących światem mikroskopowym. Zależności te są trudne do ustalenia analitycznie, najczęściej odkrywane są eksperymentalnie i w wyniku symulacji komputerowych. Te ostatnie, dzięki ciągłemu wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów, coraz wierniej naśladują symulowane systemy. Powyższe zagadnienia szeroko omawiane są w [4].

Zalety używania systemu wieloagentowego do symulacji wobec innych rozwiązań wynikają z jego charakterystyki, przedstawionej w rozdziale 2, m.in. asynchroniczności działania jednostek oraz rozproszonej kontroli nad systemem. Symulacje nie są sterowane ani synchronizowane w rytm taktów globalnego zegara, a czas modelowany jest przy użyciu metody kolejnych zdarzeń.

Według [23] symulator bazujący na systemie wieloagentowym powinien być wyposażony m.in. w:

- generator zdarzeń nieplanowanych, których źródło w systemie rzeczywistym może mieć miejsce np. poza środowiskiem,
- złożoność systemu rzeczywistego, m.in. poprzez umożliwienie strojenia parametrów symulacji, charakterystycznych dla modelowanego systemu,
- miary jakości i kosztu działań związanych z postrzeganiem środowiska i oddziaływaniem nań agentów,
- wielu agentów; interakcje pomiędzy agentami, mechanizmy komunikacji, która może być również zawodna,
- miary postępu realizacji zadania postawionego przed agentami, jeżeli takowe zostało im w ogóle przydzielone,
- możliwość uruchomienia symulatora i agentów w oddzielnych wątkach,
- model czasu.

Dostępnych jest wiele pakietów umożliwiających przeprowadzanie symulacji wieloagentowych, m.in.: Swarm [18], Teambots [3], StarLogo, Manta. Pakiety te posiadają swoje własne języki służące programowaniu symulacji bądź też udostępniane są w formie bibliotek

rozszerzających możliwości popularnych języków programowania o klasy wspomagające przeprowadzanie symulacji.

3.1. Przykłady symulacji systemów złożonych – symulacja samoorganizacji

Samoorganizacja jest przedmiotem dyskusji mającej odpowiedzieć na pytanie, jakie zależności zachodzą pomiędzy systemem złożonym a otaczającym go środowiskiem. Najczęściej system samoorganizujący się definiowany jest jako system, który potrafi dostosować samodzielnie swoją strukturę wewnętrzną do zmian zachodzących w otaczającym go środowisku [26]. Powstanie samoorganizacji jest uzależnione od celów postawionych przed systemem i jego jednostkami. Wśród mechanizmów przyczyniających się do samoorganizacji podstawową rolę pełnią metody interakcji i komunikacji pomiędzy jego elementami, opisane odpowiednio w rozdziałach 2.3 i 2.4.

3.1.1. Grupowanie i tworzenie formacji geometrycznych

Odwołując się do przykładów zaczerpniętych z przyrody, kolektywna działalność zwiększa szanse przetrwania jednostki, pozwala na jej specjalizację, a także daje możliwość edukacji uczestnikom kolektywu poprzez naśladowanie sprawdzonych wzorców zachowań innych jednostek zespołu. Grupowanie zwiększa odporność systemu i zmniejsza jego awaryjność. Pozwala na rozwiązanie zadań, które przerastają możliwości pojedynczej jednostki. Skutkiem ubocznym zespołowej działalności mogą być problemy związane z dostępem do dzielonych zasobów systemu.

Tak zwane grupowanie agentów może zostać rozważane w kontekście ich rozmieszczenia i poruszania się na płaszczyźnie. Pierwowzory takich zachowań zaobserwować można w systemach biologicznych, np. w populacjach owadów. Grupa agentów na danym obszarze może przyjmować następujące strategie dyslokacji [17]:

- safe-wandering (ang.); grupa agentów porusza się w wyznaczonym obszarze, agenci unikają kolizji pomiędzy sobą,
- following (ang.); agent porusza się za innym agentem zachowując przy tym m.in. określoną odległość,
- dispersion (ang.); grupa agentów rozprasza się na danym obszarze z zachowaniem określonej, minimalnej odległości pomiędzy agentami,
- aggregation (ang.); agenci grupują się w danym obszarze nie przekraczając przy tym określonej maksymalnej średnicy takiego skupiska,
- homing (ang.); grupa agentów ma za zadanie zlokalizować określone miejsce lub region.

Zagadnienia związane z tym tematem mają zastosowanie m.in. w: wojskowości, konstrukcjach zespołów robotów mających za zadanie przeszukiwanie danego obszaru [29], sy-

mulacji tłumu wirtualnych postaci [30]. Badania takie prowadzone są często przy zastosowaniu komputerowych programów symulujących roboty [3]. Symulacje te często są prowadzone na pewnym poziomie abstrakcji i uwzględniają tylko wybrane cechy środowiska rzeczywistego.

Przedstawiona klasyfikacja jest podstawą do badań nad bardziej zaawansowanymi strukturami, jakie mogą być tworzone przez grupę agentów. Prowadzone badania obejmują zasady tworzenia przez agentów homogenicznych takich formacji, jak łańcuchy, pasy złożone z kilku równoległych łańcuchów agentów [25]. Wykorzystanie formacji łańcuchów agentów do zadań transportowych omówiono w [6]. W celu przetransportowania grupy obiektów pomiędzy punktem, w którym znajdują się te obiekty, a miejscem docelowym, gdzie mają one zostać dostarczone, agenci tworzą formację geometryczną przypominającą łańcuch. Praca [25] opisuje również heterogeniczny system, w którym agenci podzieleni są na dwie grupy. Jedna z grup agentów ma za zadanie zgrupować się na niewielkim obszarze, natomiast celem drugiej jest otoczenie tego zgrupowania. Eksperymenty obejmują także tworzenie tzw. „swarm-bota”, będącego dynamiczną strukturą, składającą się z pojedynczych heterogenicznych agentów systemu. W zależności od swoich umiejętności agenci zajmują określone miejsca w strukturze. Jeśli zadaniem systemu jest przetransportowanie obiektu, to agenci posiadający zdolności transportowe umieszczani są w centrum struktury wraz z obiektem, który transportują. Obrzeża zgrupowania zajmują agenci wyposażeni w zdolności sensoryczne. „Swarm-bot” może dynamicznie rekonfigurować swoją strukturę np. podczas przechodzenia przez wąskie przejście pomiędzy przeszkodami. Zagadnienie kolektywnego transportowania pojedynczego obiektu omawiane jest też w [13].

3.1.2. Specjalizacja i przydział zadań

Poprzez specjalizację jednostki systemu dostosowują się do określonego rodzaju wykonywanych przez niego zadań. Adaptację agentów można rozpatrywać jako specjalizację poszczególnych jednostek bądź też grup agentów [1]. Przystosowanie to może mieć charakter dwojakiego rodzaju: statyczny – specjalizacja agenta jest odgórna i nie zmienia się w trakcie jego działalności lub dynamiczny – w trakcie swojej działalności agent adaptuje się do wykonywania określonego zadania. Efektem specjalizowania się agentów jest ewolucja systemu z homogenicznego w kierunku heterogenicznego. Przykładem mogą być różne warianty tzw. multi-agent foraging (z ang.). W rozpatrywanym dalej przykładzie dany jest pewien system wieloagentowy, w którym środowisko składa się z dwuwymiarowego obszaru. W centrum tego obszaru umieszczono bazę. W obszarze znajduje się też kilka przeszkód oraz obiekty różnych typów rozmieszczone losowo. Agenci mają za zadanie zlokalizowanie obiektów, przetransportowanie ich do bazy, w której obiekty są składane w kompleksowe struktury. Kompleksowa struktura zdefiniowana jest jako zbiór obiektów różnych typów. Agent może

pozostawić obiekt w bazie, jeśli obiekt ten jeszcze nie występuje w aktualnie budowanej strukturze. Początkowo w systemie znajdują się niekomunikujący się ze sobą agenci homogeniczni. W trakcie trwania symulacji agenci powinni wyspecjalizować się w dostarczaniu do bazy tylko jednego typu obiektu. Przykład taki rozważany jest w [19], gdzie do adaptacji agentów zastosowany został algorytm uczenia się ze wzmocnieniem. Funkcji kar i nagród podlegają poszczególne jednostki agentów, jak również system jako całość. Pojedynczy agent jest nagradzany, gdy może pozostawić transportowany obiekt w bazie. Jako kryterium oceny systemu przyjęto m.in. efektywność składania kompleksowych struktur oraz równomierność specjalizacji jego agentów.

Za pomocą systemu wieloagentowego symulowane są zagadnienia związane z alokacją zadań dla jego jednostek. Przykładem jest symulacja równoległego sortowania, której inspiracją jest kolektywne zachowanie mrówek [5]. W przykładzie tym jednostki systemu wieloagentowego poruszają się losowo w ograniczonym obszarze, na którym umieszczone są pewne elementy. Określono funkcję podobieństwa pomiędzy elementami. Agent może podnieść element z pewnym prawdopodobieństwem, które zależy od aktualnego stanu środowiska, w którym znajduje się agent. Jeśli wokół znajduje się wiele podobnych elementów, prawdopodobieństwo podniesienia takiego elementu jest mniejsze niż np. podniesienia elementu, wokół którego nie ma innych elementów lub znajdują się elementy niepodobne. Pozostawienie transportowanego elementu również określone jest pewnym prawdopodobieństwem. Jeśli agenta otaczają elementy podobne do tego, który jest przez niego transportowany, prawdopodobieństwo jest większe niż pozostawienie takiego elementu w miejscu, w którym nie znajdują się żadne inne elementy podobne do niego. Każdy agent może transportować co najwyżej jeden obiekt jednocześnie. Po upływie pewnego czasu od rozpoczęcia symulacji elementy zostają pogrupowane ze względu na swoje podobieństwo. Rozwinięciem tego pomysłu jest zastosowanie systemu wieloagentowego do klasteryzacji danych [10].

Do adaptacji agentów mogą zostać wykorzystane algorytmy uczenia maszynowego. Istotnym zagadnieniem jest optymalność wyuczonej strategii rozwiązania danego problemu. Jak wykazano, dla prostych zadań i wystarczająco długiego czasu przeznaczzonego na adaptację rozwiązania te często są optymalne [9].

Skutkiem ubocznym specjalizacji agentów są problemy związane z przydziałem zadań poszczególnym agentom.

Często w symulowanym systemie wykorzystane są równoległe, opisane powyżej, metody samoorganizacji i współpracy. Przykładem może być zapoczątkowany przez A. MackWortha projekt symulacji meczu piłki nożnej rozgrywanego przez roboty [15] oraz jego odmiany odbywające się w świecie wirtualnym, w których udział biorą agenci [12]. Mecz piłkarski agentów uważa się za doskonały obiekt badań dotyczący współpracy oraz kolektywnego współzawodnictwa w systemach wieloagentowych [28].

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe informacje dotyczące systemów wieloagentowych. Omówiono rodzaje interakcji pomiędzy jednostkami systemu wieloagentowego oraz sposoby komunikacji. Przedstawiono zastosowanie systemów wieloagentowych jako narzędzia, które może służyć do symulacji systemów złożonych.

LITERATURA

1. Bahceci E., Soysal O., Sahin., Erol.: A Review: pattern formation and adaptation in multi-robot systems. Tech. report CMU-RI-TR-03-43, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, October, 2003.
2. Balch T., Arkin R. C.: Communication in reactive multiagent robotic systems. *Autonomous Robots* 1995, Vol. 1(1), s.1-25.
3. Balch T., CMU's MultiRobot Lab: TeamBots Project, <http://www.teambots.org>.
4. Coveney P., Highfield R.: Granice złożoności: poszukiwania porządku w chaotycznym świecie. Prószyński i S-ka, Warszawa, 1997.
5. Deneubourg J. L., Goss S., Franks N., Sendova-Franks A., Detrain C., Chretien L.: The dynamics of collective sorting: robot-like ants and ant-like robots. *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats*, Paris, 1991, s. 356-365.
6. Drogoul A., Ferber J.: From Tom thumb to the dockers: Some experiments with foraging robots. In *Proc. Simulation of Adaptive Behavior*, 1993.
7. Ferber J.: Multi-agent systems. An introduction to distributed artificial intelligence. Addison-Wesley, USA, New York, 1999.
8. Giunchiglia F., Odell J., Odell G., Weiss G.: Agent-oriented software engineering III. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 2003., Volume 2585.
9. Kaelbling L. P., Littman M. L., Moore A.W.: Reinforcement learning: a survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1996, s. 237-285.
10. Kanade P. M, Hall L. O.: Fuzzy ants as a clustering concept. 22nd international conference of the North American fuzzy information processing society NAFIPS, 2003, s. 227-232.
11. Kawamura H., Ohuchi A.: Evolutionary emergence of collective intelligence with artificial pheromone communication. *Proceedings of IECON-2000*, Nagoya, Japan, 2000, s. 2831-2836.

12. Kitano H., Kuniyoshi Y., Noda I., Asada M., Matsubara H., Osawa E.: Robocup: A challenge problem for AI. *AI Magazine*, 1997, Vol. 18(1), s. 73-85.
13. Kube C. R., Zhang H.: Collective robotics: from social insects to robots. *Adaptive Behaviour*, 1993, Vol. 2(2), s.189-219.
14. Liu J., Jing H., Tang Y. Y.: Multi-agent oriented constraint satisfaction. *Artificial Intelligence*, 2002, Vol. 136, issue 1, s. 101-144.
15. Mackworth A. K., Sahota K.: Can situated robots play soccer? *Proc. Artificial Intelligence '94, Banff, AB, 1994*, s. 249-254.
16. Marida D., Cannataro M., Fabregat R.: Supporting an adaptive hypermedia system through a multiagent system (MAS-AHS). IiiA Research report, ref. IiiA 04-03-RR, Institut d'Informatica i Aplicacions, University of Girona, 2003.
17. Mataric M.: Designing and understanding adaptive group behavior. *Adaptive Behavior*, 1995, Vol. 4(1), s. 51-80.
18. Minar N., Burkhart R., Langton C., and Askenazi M.: The swarm simulation system. A toolkit for building multi-Agent simulations. Technical report, Swarm Development Group, June 1996, <http://www.swarm.org>.
19. Murciano A., Millan J., Zamora J.: Specialization in multi-agent systems through learning. *Biological Cybernetics*, 1997, No 76, s. 375-382.
20. Parunak H., Brueckner S. A.: Engineering swarming systems. *Methodologies and software engineering for agent systems*. Kluwer, 2004.
21. Parunak. H.: Go to the ant. *Engineering principles from natural agent systems*. *Annals of Operations Research*, 1997, No. 75, s. 69-101.
22. Peddireddy T., Vidal J. M.: A prototype multiagent network security system. In *Proceedings of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2003, s. 1094-1095.
23. Pollack Hanks N. E., Cohen S. R., Cohen P. R.: Benchmarks, testbeds, controlled experimentation and the design of agent architectures. *AI Magazine*, 1993, Vol. 14(4), s. 17-42.
24. Russel S. J., Norvig P.: *Artificial intelligence. A modern approach*. Prentice Hall, 1995.
25. Sahin E., Labella T. H., Trianni V., Deneubourg J. L., Rasse P., Floreano D., Gambardella L., Mondada F., Nolfi S., Dorigo M.: SWARM-BOT: Pattern formation in a swarm of self-assembling mobile robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hammamet, Tunisia, 2002*.
26. Schillo M., Fley B., Florian M., Hillebrandt, F., Hinck D.: Self-organization in multiagent systems. In *Proceedings of the Third International Workshop on Modelling Artificial Societies and Hybrid Organizations (MASHO)*, 2002.
27. Singh G. B.: *Intelligent agent architecture and applications*. U.S. Army Vetronics Institute 2nd Annual Workshop Series, 2002.

28. Stone P., Veloso M.: Multiagent systems: A survey from machine learning perspective. *Autonomous Robots*, 1997, Vol. 8, No.3, s. 345–383.
29. Sukthankar G., Sycara K.: Team-aware robotic demining agents for military simulation. <http://www-2.cs.cmu.edu/~softagents/iaai00/iaai00.html>.
30. Szarowicz A., Amiguet-Vercher J., Forte P.: Multiagent interaction for crowd scene simulation. Workshop on Autonomy Delegation and Control Interacting with Autonomous Agents – International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-01, August 4-10, Seattle, USA, 2001.
31. Takahashi H., Terano T.: Agent-Based approach to investors' behavior and asset price fluctuation in financial markets. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2003, Vol. 6, No. 3
32. Terna P.: Simulation tools for social scientists: Building agent based models with SWARM. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1998, Vol. 1, No. 2.
33. Vilo P., Marzo J. L.: Using a multi-agent system for network management. Lluís Fàbrega, CCIA 2002, Congrés Català de Intel·ligència Artificial, Castella de la Plana, Spain, October 24-25, 2002.
34. Weiss G.: *Multi-Agent Systems. An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison Wesley, Longman, 1999.
35. Younger S. M.: Discrete agent simulations of the effect of simple social structures on the benefits of resource sharing. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2003, Vol. 6, No. 3.

Recenzent Dr inż. Maciej J. Bargielski

Wpłynęło do Redakcji 20 lipca 2004 r.

Abstract

This paper presents basic information about multi-agent systems. Definitions, classifications, applications are given. Different kinds of agent – tropistic, hysteretic and kinds of multi-agent systems – heterogenous, homogenous are described. Taking goals of agents, their skills and available resources in a system into consideration, a few types of interaction amongst entities of a multi-agent system are distinguished: collaboration, competition, conflict over resources (tab. 1). Types of communication amongst tropistic agents are discussed: implicit, explicit, communication via observation, state communication, centralized, decentralized. Multi-agent system as a convenient tool for computer simulation of complex systems

is described. Examples of multi-agent simulations of emerging self-organizations in these systems are presented. Two kinds of self-organization in a system are simulated: gathering with geometrical pattern formation and specialization with labor division. When agents are gathering they can use different strategies: safe-wandering, following, dispersion, aggregation and homing. Agents can form geometrical patterns: lines, chains etc. Specialization and labor division make systems work more efficiently. Specialization can be statically assigned to system entities or can be obtained dynamically through machine learning algorithms. As examples of dynamically assigned specialization, simulation of multi-agent foraging and sorting is presented. At the end, RoboCup project is described as an example of multi-agents soccer simulation. This project is also the example of the system which encompasses all interaction amongst agents discussed in this paper.

Niniejsza praca jest wynikiem badań o symbolu BW-463/RAu2/2004

Adres

Arkadiusz BIERNACKI: Politechnika Śląska, Instytut Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-101 Gliwice, Polska, abiernacki@star.iinf.polsl.gliwice.pl