

Michał GNATOWSKI\*, Jacek MALEC†

## MINIMALISTYCZNY MODEL WSPÓŁPRACY ROBOTÓW MOBILNYCH

W artykule poruszono problem organizacji współpracy robotów mobilnych o niejednorodnej strukturze. Rozważono przypadek, gdy do wykonania zadania konieczna jest współpraca kilku robotów. Dodatkowym ograniczeniem jest prostota systemu sterowania każdego z robotów. Zaproponowano prosty model współpracy i zweryfikowano go eksperymentalnie poprzez implementację wykorzystującą roboty Khepera o różniącej się morfologii.

### 1 WSTĘP

Badania nad sterowaniem robotów mobilnych datują się od momentu wyodrębnienia sztucznej inteligencji jako osobnej dziedziny badań. Pierwszy autonomiczny robot mobilny, Shakey, został stworzony pod koniec lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Od tego czasu robotyka, a w szczególności badania nad robotami autonomicznymi, posunęła się daleko naprzód. Niemniej jednak większość sukcesów, w tym praktycznych zastosowań, dotyczy metod sterowania indywidualnych robotów autonomicznych, podczas gdy sterowanie zespołami robotów pozostawało nieco na uboczu zainteresowań, głównie ze względu na złożoność problemu.

Systemy wielorobotowe są interesujące z wielu powodów. Jednym z nich jest możliwość zastosowania zespołu prostych, powtarzalnych i tanich robotów w miejsce jednego, złożonego i z konieczności kosztownego. Klasycznym przykładem takiego zastosowania jest potencjalna eksploracja odległych ciał kosmicznych — awaria jednego z robotów nie przeszkodzi w zrealizowaniu misji powierzonej zespołowi, podczas gdy awaria jedyne roboty może spowodować całkowitą porażkę misji.

Innym przykładem potencjalnego zastosowania systemów wielorobotowych może być zadanie wymagające różnorodności możliwości sensorycznych i zróżnicowanych działań ze strony systemu autonomicznego — może się wręcz okazać niemożliwe zrealizowanie pojedynczego robota spełniającego wszystkie wymagania. Np. w przypadku misji ratowniczych może zająć potrzeba użycia robotów o nietypowej morfologii (trąba słońca w gruzowisku po wybuchu gazu), o nietypowych sensorach (czułe powonienie prowadzące do źródła wycieku gazu, bardzo czułe

---

\*IPPT PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00 049 Warszawa, [mignat@ippt.gov.pl](mailto:mignat@ippt.gov.pl)

†Department of Computer Science, Lund University, Box 118, 221 00 Lund, Szwecja, [jacek@cs.lth.se](mailto:jacek@cs.lth.se), <http://www.cs.lth.se/~jacek/>

kamery podczerwone rejestrujące możliwość znalezienia żyjących ludzi), o nietypowych efektach (system jezdny pozwalający na poruszanie się po schodach, po linach albo we wnętrzu rury), itd.

Istnieje wiele interesujących problemów wartych rozważenia w dziedzinie systemów wielorobotowych. Jak zauważa np. Murphy [11], następujące zagadnienia można uważać za podstawowe:

- projektowanie systemów wielorobotowych jest zasadniczo trudniejsze od systemów jedno-robotowych;
- wiele robotów na scenie może wzajemnie sobie przeszkadzać w wykonaniu zadania;
- zespół może mieć kłopoty z rozpoznaniem przypadku, gdy jeden lub więcej członków zespołu staje się nieproduktywne;
- komunikacja między agentami nie jest trywialna (kiedy i co komunikować?);
- „właściwy” poziom indywidualizmu i autonomii w zespole powinien być dostosowany do zadania.

W naszych badaniach skupiliśmy się na przedostatnim z podanych problemów. Rozważyliśmy interesujący przypadek, gdy roboty wchodzące w skład zespołu są niejednorodne. Zakładamy, że do wykonania zadania koniecznych jest kilka robotów. Sytuację taką można opisać formalnie definiując różne zasoby (w naszym przypadku jednym z zasobów będzie morfologia robotów) i analizując jaką minimalną konfigurację robotów należy wykorzystać do osiągnięcia celu.

Praca została przedstawiona w następujący sposób: w rozdziale 2 przedyskutowano konieczność użycia modelu współpracy między robotami. Rozdział 3 przedstawia przyjęte przez nas założenia, sposób komunikacji między członkami zespołu, architekturę systemów sterowania robotów i ostateczną implementację, a także wyniki eksperymentów. W rozdziale 4 przedstawiono wyniki innych badań powiązanych tematycznie z naszymi. Pracę zakończono wnioskami i podsumowaniem.

## 2 MODELE WSPÓŁPRACY ROBOTÓW

Współpraca autonomicznych robotów, bądź ogólniej, autonomicznych agentów, jest przedmiotem intensywnych badań w dziedzinie rozproszonej sztucznej inteligencji<sup>1</sup> od wielu lat. Nienajnowszy, lecz wciąż aktualny przegląd tej tematyki można znaleźć w pracy [2].

Konieczność wprowadzenia modelu współpracy między członkami zespołu można w skrócie uzasadnić w następujący sposób:

---

<sup>1</sup>Distributed Artificial Intelligence

- bez modelu każdy poszczególny problem wymagający współpracy robotów musi być rozwiązywany od zera, bez możliwości skorzystania z doświadczeń zgromadzonych wcześniej w trakcie tworzenia modelu. Jest to zarówno nieefektywne, jak i prowadzi do większej liczby błędów w fazie implementacji systemu;
- model pozwala (w pewnych przypadkach) przewidzieć, a czasem nawet zagwarantować, że współpraca między członkami zespołu zaistnieje, że osiągną one zadany cel, a nawet, że zrobią to w zadanym czasie;
- model pozwala wprowadzić, a następnie formalnie przeanalizować, protokół komunikacji między robotami. Jest to o tyle istotne, że komunikacja jako taka nie jest konieczna (choć bardzo przydatna) do zagwarantowania współpracy. W szczególności, gdy roboty są proste (by nie rzec prymitywne) niezbędne są gwarancje, że zespół osiągnie pożądany stan współpracy. Bez modelu wydaje się to być a priori niemożliwe;
- do ustalenia sposobu komunikacji pomiędzy indywidualnymi agentami niezbędny jest model systemu sterowania każdego z nich (może to znaczyć wiele: architektura, model symulacyjny, specyfikacja, itp.). System sterowania, a dokładniej jego struktura i ograniczenia, narzuca możliwości ekspresyjne protokołu, który będzie używany do komunikacji między agentami;
- korzystając z modelu można z kolei (na meta-poziomie) rozważać, jaka wiedza musi być przekazana między agentami, w jakim celu i w jakiej chwili. Analiza taka jest całkowicie niezależna od przyjętych sposobu współpracy i protokołu komunikacji.

Modele współpracy możemy zaklasyfikować do jednej z poniższych grup będących pewną próbą skodyfikowania ciągłego spektrum możliwości:

- rozproszony, nieświadomy (grupa robotów, współpraca samoistna wymuszona przez otoczenie, bez świadomości aktorów o tym fakcie);
- rozproszony, świadomy (grupa równorzędnych robotów, współpraca inicjowana i akceptowana lub odrzucana przez uczestników, ale bez centralnej koordynacji);
- pośredni, hierarchiczny (grupa robotów, z których pewne są w stanie wymusić bądź wynegocjować współpracę, podczas gdy inne są tylko ślepyimi wykonawcami rozkazów);
- scentralizowany (przywódca decyduje o rodzaju i sposobie współpracy, reszta członków zespołu wykonuje jego polecenia). Ten przypadek można traktować jako skrajny — jeden system sterujący z rozproszonymi efektorami i sensorami, z komunikacją niezbędną do osiągnięcia pożądanego efektu. Bardziej zaawansowanym rozwiązaniem, także klasyfikowanym do tej grupy, byłby rozproszony system hierarchiczny (model „wojskowy”).

Zauważmy, że przyjęty model współpracy, a dokładniej rodzaj negocjacji prowadzących do współpracy, będzie wpływał na sposób komunikacji między agentami. Im bardziej rozbudowane

mechanizmy negocjacji zostaną przyjęte, tym większe wymagania będą musiały być spełnione przez protokół komunikacyjny, zarówno w warstwie semantycznej, jak i przepustowości kanałów. Dlatego też ograniczenia dotyczące rodzaju użytych robotów, złożoność (czy też prostota) ich systemów sterowania oraz przepustowość ich kanałów informacyjnych bezpośrednio ograniczają przestrzeń możliwych wyborów rodzaju współpracy. Jeden z takich przypadków został przedstawiony nieco bardziej szczegółowo poniżej.

### 3 WSPÓŁPRACA ZESPOŁU PROSTYCH ROBOTÓW MOBILNYCH

#### 3.1 PROBLEM

Punktem wyjścia do naszych rozważań jest minimalistyczna współpraca w modelu scentralizowanym. Rozważamy ją jako przeciwwagę do modelu rozproszonego, w którym współpraca zachodzi samoistnie. Istnieje wiele prac z zakresu nieświadomej współpracy samoistnej [10] pokazujących, że można doprowadzić do takiej współpracy w niektórych otoczeniach minimalnymi środkami obliczeniowymi. Jednak zagadnienie zagwarantowania współpracy w takiej sytuacji nie jest trywialne i często wymaga wprowadzenia wielu nienaturalnych ograniczeń i uproszczeń problemu.

W naszych doświadczeniach przyjęliśmy, że współpraca powinna zostać wymuszona i zadaliśmy pytanie, jak wiele, czy też raczej, jak mało komunikacji między robotami jest konieczne dla wykonania zadania. Jako zadanie wybraliśmy klasyczny problem poszukiwania obiektu i dostarczenie go w określone miejsce na scenie. Możemy sobie wyobrazić ten prosty problem jako model sytuacji przeszukiwania płonącego budynku w poszukiwaniu ofiar katastrofy.

Dodatkowo zakładamy, że do wykonania zadania niezbędny jest zespół robotów dysponujących różnymi zasobami. W przypadku naszych eksperymentów posłużyliśmy się robotami Khepera (opisanymi np. w pracy [14]) różniącymi się wyposażeniem. Jeden z robotów, przewodnik, posiada kamerę liniową, którą jest w stanie analizować (do pewnego stopnia) otoczenie i rozpoznawać kilka rodzajów obiektów. Natomiast drugi z robotów, nazywany dalej niewolnikiem, posiada chwytak, który może użyć do przeniesienia obiektu w inne miejsce. Zakładamy, że niewolnik jest w stanie korzystać ze swojej kamery tylko w celu rozpoznania przewodnika. Ponadto oba roboty wyposażone są w modemy radiowe umożliwiające (dość wolną: 19200 baud) komunikację. Obydwa roboty zostały pokazane na Rys. 1.

Problem powyższy uważamy za interesujący z następujących powodów:

- w wielu sytuacjach zasoby obliczeniowe bądź komunikacyjne użytych robotów mogą być ograniczone. Jest to szczególnie istotne, gdy zależy nam na jak najniższym koszcie robotów bądź też na wysokiej niezawodności. W związku z tym Khepery użyte w doświadczeniach to proste roboty bez dużych zasobów decyzyjnych, a do ich sterowania zastosowano proste systemy automatowe nie wymagające więcej niż prostego mikrokontrolera;
- założenia powyższe są istotne przy zadaniach wymagających gwarancji wykonania, a nie tylko statystycznego, czy wręcz organoleptycznego (co jest częstym założeniem, patrz



Rysunek 1. Przewodnik (z lewej) i niewolnik (z prawej).

Figure 1. The leader (left) and the slave (right).

np. [14]), potwierdzenia sukcesu (np. patrolowanie zamkniętego obszaru, poszukiwanie zbiega);

- istnieje ciekawa klasa zadań pozwalających na utratę robotów pewnego typu, ale nie innych (poszukiwania w gruzach, lawinach): tanie i proste roboty mogą być spisane na straty bez większych szkód, podczas gdy te dysponujące specjalistycznym wyposażeniem muszą być oszczędzane.

Można oczywiście dyskutować nad racjonalnością tych założeń. Przykładowo, można się zastanawiać jak bardzo zmienia się problem przy założeniu, że roboty są w stanie stworzyć własne mapy otoczenia (bądź jedną wspólną), a następnie w oparciu o nie planować swoją kooperację. Wymaga to jednak nieco większych zasobów obliczeniowych i bardziej złożonego modelu współpracy, co mamy zamiar pokazać w kolejnej pracy. Natomiast sam problem tworzenia mapy nie jest interesujący sam w sobie w tym kontekście: istnieje bogata literatura na ten temat (patrz np. [12]), a proste systemy tworzenia map i nawigacji dla robotów Khepera są przedmiotem projektów studenckich [9]. Uważamy za dużo istotniejsze przedyskutowanie minimalnych warunków koniecznych do zagwarantowania możliwości współpracy w zespole i sposobów jej wymuszenia.

Jednym z dalszych celów naszych doświadczeń jest przedstawienie pełnego spektrum możliwych modeli współpracy i analiza warunków jakie muszą być spełnione, aby dany rodzaj współpracy był najbardziej odpowiedni.

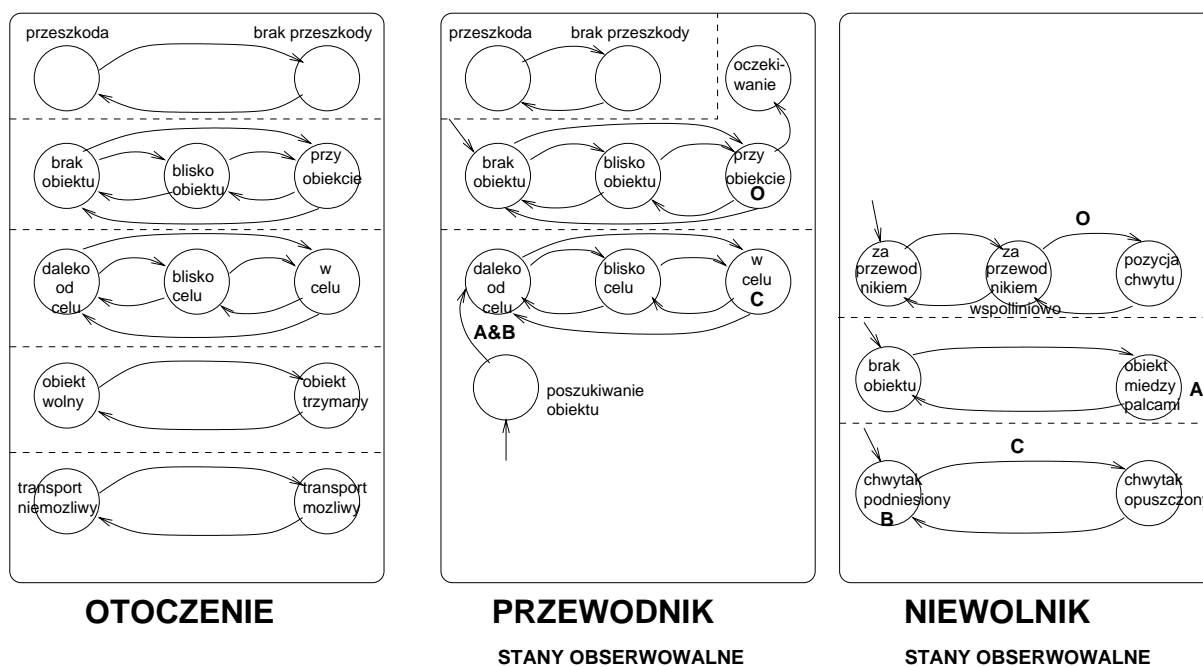
### 3.2 PRZYJĘTY MODEL

W ekstremalnym przypadku realizacja tak postawionego zadania nie wymaga żadnej komunikacji między członkami zespołu. Sterowanie zachowaniowe pozwala na implementację współ-

pracy wykorzystującej wyłącznie informacje przekazywane przez środowisko. Niemniej jednak współpraca taka zakłada stosunkowo dużą wiedzę o możliwych stanach otoczenia lub też takie dopasowanie otoczenia, aby interesujący stan współpracującego robota mógł być jednoznacznie określony na podstawie informacji sensorycznej.

W naszych eksperymentach przyjęliśmy nieco bardziej złożone otoczenie oraz możliwość przekazania informacji o stanie poprzez kanał komunikacyjny. Ponieważ (jak zostało to pokazane poniżej) liczba stanów koniecznych do rozróżnienia jest bardzo mała, wystarczającym protokołem są komunikaty binarne przekazywane w konkretnych sytuacjach na scenie. Szczegóły przedstawione zostały w części 3.4.

Punktem wyjścia do tworzenia zespołu robotów zdolnych wykonać postawione zadanie jest model automatowy, w którym należy rozróżnić interesujące stany otoczenia i wyróżnić z nich stany obserwowalne przez każdego robot. Stany (bądź ich zmiany) istotne dla dalszego funkcjonowania któregośkolwiek z robotów, a nieobserwowalne sensorami dostępnymi temu robotowi, muszą być zasygnalizowane przez drugi robot komunikatem (oczywiście pod warunkiem, że drugi robot jest w stanie ten stan otoczenia rozpoznać). Szkic automatu modelującego przedstawiony problem pokazany został na rysunku 2. Rysunek ten należy odczytać jako statechart



Rysunek 2. Model automatowy.

Figure 2. The automaton model.

(tzn. równoległe złożenie automatów), przy czym stany obserwowalne przez przewodnika i niewolnika odpowiadają odpowiednim stanom otoczenia. Zauważmy, że istnieją zarówno stany, o których przewodnik musi informować niewolnika, jak i takie, o których sam musi zostać poinformowany. Dla uproszczenia pominięto na rysunku większość etykiet prześć pozostawiając

tylko te, które odpowiadają komunikacji między robotami. Każda z etykiet występuje na rysunku dwukrotnie: raz w stanie generującym komunikat i raz przy przejściu następującym po odebraniu komunikatu.

Opisany przypadek jest jednym z najprostszych. Można łatwo wyobrazić sobie sytuacje, w których działania któregoś z robotów będą zależać od koniunkcji zaobserwowanych stanów przez więcej niż tylko jeden robot. Odpowiadający temu model formalny jest stosunkowo łatwy do wprowadzenia, natomiast jego konsekwencje dla komunikacji między członkami zespołu są przedmiotem naszych obecnych zainteresowań.

### 3.3 SYSTEMY STEROWANIA ROBOTAMI

Do implementacji systemów sterowania obydwu robotów użyto architektury hybrydowej, tj. składającej się z poziomu dyskretnego (automatu skończonego), odzwierciedlającego stany pracy robota, i poziomu ciągłego implementującego każde z zachowań przełączanych na poziomie dyskretnym. Istnieje wiele propozycji architektur pozwalających na systematyczne tworzenie sterowników hybrydowych (np. bliska nam praca [8]), ale ze względu na prostotę systemów zrealizowaliśmy je bezpośrednio, transformując automaty przedstawione na Rysunku 2 na oprogramowanie robotów. Poziom dyskretny w każdym z robotów składa się z kilku stanów, gdzie każdy ze stanów powoduje aktywację odpowiadającego mu zachowania.

### 3.4 IMPLEMENTACJA

#### 3.4.1 PRZEWODNIK

Przewodnik może znajdować się w jednym z poniższych stanów:

1. Poszukiwanie obiektu;
2. Dojście do obiektu;
3. Ustąpienie niewolnikowi;
4. Oczekiwanie na podniesienie obiektu;
5. Poszukiwanie pozycji docelowej;
6. Dojście do pozycji docelowej.

**POSZUKIWANIE OBIEKTU.** Robot poszukujący obiekt jedzie prosto sprawdzając cały czas dane z kamery i czujników podczerwonych. W tym trybie realizuje dwa zadania: gdy czujnik podczerwony da sygnał o przeszkodzie, robot obraca się w kierunku przeciwnym do przeszkody o kąt uzależniony od położenia przeszkody oraz, jeżeli w polu widzenia kamery pojawi się odpowiednio kontrastowe pole określające szukany przedmiot (patrz Rysunek 1), robot przechodzi w tryb dojścia do obiektu.

DOJŚCIE DO OBIEKTU I USTĄPIENIE NIEWOLNIKOWI. Jeżeli robot w polu widzenia kamery zobaczy obraz odpowiadający poszukiwanemu obiektowi, przerywa jazdę i obraca się tak, aby obraz szukanego obiektu znalazł się dokładnie w środku pola widzenia kamery, po czym jedzie prosto, czyli w stronę szukanego obiektu. W trakcie jazdy odchylenie obrazu obiektu od położenia środkowego jest na bieżąco korygowane. Zdarza się, że w trakcie tej operacji robot „gubi” obraz i przechodzi z powrotem do stanu poszukiwania. Gdy jednak robot dojedzie do szukanego obiektu (czyli czujniki podczerwone umieszczone z przodu robota rozpoznają przeszkodę), robot wysyła sygnał do znajdującego się za nim niewolnika, po czym skręca o  $90^\circ$  i odjeżdża tak daleko, żeby niewolnik miał dostęp do szukanego obiektu.

OCZEKIWANIE NA PODNIESIENIE OBIEKTU. Przewodnik oczekuje na sygnał od niewolnika oznaczający podniesienie obiektu i ustawienie się w szyku za przewodnikiem.

POSZUKIWANIE POZYCJI DOCELOWEJ. Po otrzymaniu sygnału od niewolnika przewodnik rozpoczyna poszukiwanie pozycji docelowej. Algorytm jest identyczny jak w trybie pierwszym, tylko szukany obiekt jest inaczej zdefiniowany (pozycja docelowa jest wyróżniona przez charakterystyczny obiekt znajdujący się przy niej).

DOJŚCIE DO POZYCJI DOCELOWEJ. Jeżeli robot w polu widzenia kamery zobaczy obraz odpowiadający obrazowi pozycji docelowej, to przechodzi do umieszczenia obrazu w środku pola widzenia kamery, po czym jedzie prosto w tym kierunku, ewentualnie korygując orientację. Gdy czujniki podczerwone rozpoznają przeszkodę oznacza to, że robot dotarł do żądanej pozycji i daje sygnał niewolnikowi nakazujący położenie transportowanego obiektu.

#### 3.4.2 NIEWOLNIK

Niewolnik znajduje się w jednym z poniższych stanów:

1. Podążanie za przewodnikiem;
2. Podniesienie obiektu;
3. Położenie obiektu.

PODAŻANIE ZA PRZEWODNIKIEM. Robot ma zdefiniowany (tylko i wyłącznie) obraz przewodnika i porusza się w ten sposób, żeby ten obraz był umieszczony w centralnym punkcie kamery.

PODNIESIENIE OBIEKTU. Po otrzymaniu sygnału od przewodnika robot jedzie prosto tak długo, aż chwytak wyczuje obiekt między swoimi ramionami. Wtedy robot zatrzymuje się, zamyka ramiona chwytaka i podnosi obiekt do góry (patrz Rys. 3), po czym robi obrót w stronę, w której spodziewa się przewodnika (założono obrót w prawo o  $90^\circ$ ) i jedzie prosto tak długo, aż faktycznie rozpozna znajdującego się przed nim przewodnika. W trakcie wykonywania tego





Rysunek 3. Niewolnik trzymający obiekt.

Figure 3. The slave holding the object.

zachowania niewolnik traci kontakt z przewodnikiem, który czeka z boku. Ryzyko „zgubienia się” robotów jest minimalne, niemniej jednak można rozpatrywać przypadki „poszukiwania się” robotów, wykorzystując np. mało używaną tu komunikację radiową. Następnie niewolnik ponownie przechodzi w stan podążania za przewodnikiem.

**POŁOŻENIE OBIEKTU.** Po otrzymaniu sygnału robot zatrzymuje się, opuszcza ramiona chwytaka i otwiera chwytak. Przedmiot zostaje odłożony w położeniu docelowym i zadanie zostaje w ten sposób wykonane.

#### 3.4.3 KOMUNIKACJA

W zadaniu tym komunikacja radiowa jest minimalna. Używane są dwa sygnały od przewodnika do niewolnika i jeden od niewolnika do przewodnika (po chwyceniu obiektu). Zadanie to można nawet zrealizować przy użyciu tylko jednego dyskretnego sygnału radiowego. W tym przypadku reakcja na sygnał zależałaby od tego czy niewolnik ma chwytak wolny czy zajęty. Jeżeli wolny, powinien podnieść obiekt, jeżeli zajęty — odłożyć.

## 4 PORÓWNANIE

Punktem zwrotnym w badaniach dotyczących współpracy robotów jest system (i związana z nim architektura) ALLIANCE zaproponowane przez Lynne E. Parker w połowie lat 90-tych [13]. Naczelnym założeniem ALLIANCE jest użycie do współpracy zespołu jednorodnych robotów. Roboty te są sterowane behawioralnie (patrz [15], gdzie opisano podstawowe zasady takiego stero-

wania), przy czym współpraca wymuszana jest poprzez przełączanie zbioru zachowań sterujących każdym z robotów korzystając z tzw. *zachowań motywacyjnych*. Architektura ALLIANCE proponuje tworzenie systemu sterowania robota jako hierarchicznego systemu zachowań, gdzie najwyższym poziomem hierarchii są zachowania motywacyjne aktywowane pod wpływem komunikacji z innymi robotami.

System ALLIANCE jest w pełni rozproszony, tzn. nie zakłada żadnego centralnego systemu nadzorującego współpracę, a opiera się na równoprawnych członkach zespołu. Do rozwiązania naszego prostego problemu ALLIANCE bez wątpienia byłoby dobrym narzędziem, choć przypuszczalnie zanadto skomplikowanym. Niemniej jednak nasze przyszłe badania zdążać będą w kierunku wyznaczonym właśnie przez Parker.

Nieco inne podejście zostało zaprezentowane w pracy [4]. Punkt wyjścia jest podobny do zaprezentowanego powyżej - zespół równoprawnych robotów o różniących się właściwościach, zmuszonych do współpracy w celu wykonania zadania. Jednak założenia dotyczące każdego z robotów są dużo wyższe: przyjmuje się, że robot, pomimo sterowania zachowaniowego, jest w stanie stworzyć stosunkowo wierny model otoczenia, nazywany *mapą*, a następnie na podstawie tej mapy wyekstrahować niezbędne działania które wymuszą współpracę i w efekcie doprowadzą do osiągnięcia celu.

Podejście to obdarzone jest pewną niekonsekwencją: sterowanie zachowaniowe w oparciu o złożony model otoczenia wydaje się nadmiernym uproszczeniem, a sama architektura systemu sterowania, pomimo realizacji wielowątkowej, zanadto przypomina klasyczny schemat percepcja—rozumowanie—działanie, aby mogła być efektywna w przypadku bardziej skomplikowanych problemów. Nieuniknienie muszą się wtedy pojawić wąskie gardła w przekazywaniu informacji między modułami systemu. Niemniej jednak koncepcja *ogniskowania mapy* (map focusing) jest interesująca i warta dalszych badań.

Dudek i Jenkin [5] opisują badania nad kolektywnym tworzeniem map otoczenia przez zespoły robotów. Jest to bez wątpienia jedna z najbardziej nośnych aplikacji, przydatnych w wielu dziedzinach. Niemniej jednak w naszym rozwiązaniu użycie mapy nie jest konieczne, zatem ten kosztowny proces obliczeniowy może być w pełni pominięty.

Godne wspomnienia są także prace zespołu Prof. Kasińskiego [7], rozważające agentowe systemy sterowania zespołem robotów. Podejście to jednak całkowicie oddziela pojęcie agenta (jednostka w systemie sterowania) od fizycznego robota i z tego względu zostało uznane za nieprzydatne w naszej analizie.

Najbliższa naszym zainteresowaniom jest praca Cai, Fukudy i Arai [3] w której rozważana jest konieczność wymiany informacji między współpracującymi robotami. Jednak autorzy ograniczają się w niej do zespołu robotów opartych na architekturze CEBOT, podczas gdy naszym zamiarem jest wprowadzenie nieco ogólniejszego modelu współpracy, niezależnego od architektury.

## 5 ZAKOŃCZENIE

Współpraca robotów w systemach wieloagentowych jest interesującym problemem będącym obszarem intensywnych badań w ostatnich latach (dobry ich przegląd można znaleźć np. w [6]). W niniejszej pracy rozważyliśmy różne możliwości rozwiązania problemu współpracy, wspomnieliśmy o jego zależności od rodzaju komunikacji między robotami i skupiliśmy się na najprostszym z możliwych rozwiązań w celu stwierdzenia, jak mało komunikacji jest niezbędne do rozwiązania prostego zadania. Zaproponowaliśmy także model oparty na dyskretnym opisie stanów otoczenia i stanów systemów sterowania współpracującymi robotami.

Oczywiście, rozwiązanie nasze może być uznane za prymitywne (w sensie komunikacji między robotami). Niemniej jednak pokazuje ono, że sensowna współpraca nie wymaga złożonych protokołów komunikacyjnych ani skomplikowanych systemów sterowania.

Dalszym ciągiem naszych prac będzie rozszerzenie zaproponowanego modelu na bardziej złożone architektury systemów sterowania i bardziej wymagające przypadki wymiany informacji (lub wiedzy) między współpracującymi robotami. Mamy nadzieję, że model ten okaże się na tyle ogólny, aby pozwolić na analizę koniecznych warunków zagwarantowania współpracy jeszcze przed wyborem architektury systemów sterowania - w ten sposób projektant systemu dostałby do ręki narzędzie pozwalające na analizę ułatwiającą podjęcie kosztownych decyzji dotyczących systemu wielorobotowego.

## PODZIĘKOWANIA

Praca ta powstała w wyniku współpracy Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk i Instytutu Informatyki (Institutionen för datavetenskap) Uniwersytetu w Lund. Współpraca ta była częściowo finansowana z grantów przydzielonych IPPT przez Polską Akademię Nauk oraz Instytutowi Informatyki Uniwersytetu w Lund przez Królewską Szwedzką Akademię Nauk. Autorzy dziękują także recenzentowi za cenne uwagi.

## LITERATURA

- [1] *VI Krajowa Konferencja Robotyki*, Wrocław, Poland, 1998. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
- [2] A. BOND and L. GASSER, editors. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufman, 1988.
- [3] Anhui CAI, Toshio FUKUDA, and Fumihito ARAI. Information sharing among multiple robots for cooperation in cellular robotic system. In *Proc. IROS 97*, pages 1768–1773, 1997.
- [4] Stefano CARPIN, Carlo FERRARI, Enrico PAGELLO, and Pierluigi PATUELLI. Bridging deliberation and reactivity in cooperative multi-robot systems through map focus. In Markus HANNEBAUER, Jan WENDLER, and Enrico PAGELLO, editors, *Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems*, LNCS, pages 35–52. Springer, 2001.
- [5] Gregory DUDEK and Michael JENKIN. *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, 1999.
- [6] Luca IOCCHI, Daniele NARDI, and Massimiliano SALERNO. Reactivity and deliberation: A survey

- on multi robot systems. In Markus HANNEBAUER, Jan WENDLER, and Enrico PAGELLO, editors, *Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems*, LNCS, pages 9–32. Springer, 2001.
- [7] Andrzej KASIŃSKI. Wieloagentowy system robotów mobilnych. Opis projektu. In *VI Krajowa Konferencja Robotyki* [1], pages 241–247.
- [8] Man LIN. *Analysis and Synthesis of Reactive Systems: A Generic Layered Architecture Perspective*. PhD thesis, Department of Computer Science, Linköping University, 1999. Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation No 613.
- [9] Jacek MALEC. DAT 125: AI for robots, an undergraduate course at Lund University. Course home page, 2000. [http://www.cs.lth.se/home/Jacek\\_Malec/dat125.html](http://www.cs.lth.se/home/Jacek_Malec/dat125.html).
- [10] Maja J. MATARIĆ. Minimizing complexity in controlling mobile robot population. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, pages 830–835, 1992.
- [11] Robin R. MURPHY. *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, 2000.
- [12] Ulrich NEHMZOW. *Mobile robotics: a practical introduction*. Applied Computing. Springer, 2000.
- [13] Lynne E. PARKER. ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(2):220–240, April 1998.
- [14] Krzysztof WIKTOROWICZ. Sterowanie autonomiczne robotem mobilnym Khepera. In *VI Krajowa Konferencja Robotyki* [1], pages 151–158.
- [15] Teresa ZIELIŃSKA and Andrzej CHMIELNIAK. Sterowanie zachowaniami zespołu robotów mobilnych. In *VI Krajowa Konferencja Robotyki* [1], pages 307–314.

## A MINIMALISTIC MODEL OF MOBILE ROBOT COOPERATION

The paper presents the problem of organising cooperation among heterogenous mobile robots. It is assumed that cooperation of a number of robots is necessary to achieve the goal. Another constraint is introduced by simplicity of the control system of each robot. A simple model of cooperation has been introduced and verified experimentally using Khepera robots with different sets of resources.