

dr inż. Michał Gnatowski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

WIELOROBOTOWY SYSTEM TRANSPORTOWY

W artykule przedstawiono koncepcję zespołu wielorobotowego wykonującego zadanie transportowe w otoczeniu przemysłowym, na przykład w hali fabrycznej. Idea systemu polega na poruszaniu się grupy robotów po wcześniej zdefiniowanym, wspólnym grafie w ten sposób, że nie może wystąpić kolizja pomiędzy robotami, nie mogą się one zakleszczyć a droga robotów i czas realizacji zadania musi być optymalny dla całego zespołu. Ponadto prezentowany system jest systemem rozproszonym, z minimalną komunikacją pomiędzy agentami.

MULTIROBOT TRANSPORTATION SYSTEM

In this article a model of group of mobile robots which executes a transportation task in an industrial environment is presented. The robots move on a previously defined graph. The task is that collision or deadlock must not occur and the path and execution time must be optimal for the whole team. The presented system is distributed with minimal communication among agents.

1. WSTĘP

Wśród obecnie proponowanych wielu zastosowaniach robotów mobilnych można wyróżnić kategorie robotów użytkowych i przemysłowych. Roboty użytkowe pracują w bezpośredniej obecności człowieka i w pomieszczeniach przeznaczonych dla ludzi. Ścieżki po których poruszają się takie roboty są często zmienne i zależą od chwilowego położenia przeszkód. Takimi przeszkodami mogą być: znajdujący się tam ludzie, często przestawiane krzesła, inne meble, itp. W takim środowisku wygodne jest zastosowanie rastrowej mapy otoczenia ponieważ ścieżka robota może być zmienna i zależna od chwilowego umieszczenia przeszkód. W tego typu mapie do planowania ścieżki często stosuje się metody dyfuzji, oraz komórkowe sieci neuronowe [5, 6].

Innym rodzajem zastosowania robotów są roboty pracujące w środowisku przemysłowym, gdzie trasy po których roboty mogą się poruszać są ściśle wyznaczone i w przypadku znalezienia się przeszkody na trasie przejazdu robota, niedopuszczalne jest takie omijanie przeszkody, które wymaga zjechania z trasy. Przykładem takiego środowiska może być dowolna hala fabryczna, gdzie trasy wózków widłowych, oraz trasy przejść dla ludzi są oznaczone wymalowanymi liniami i zabronione jest poruszanie się poza wskazanym obszarem. Trasa takich robotów może być przedstawiona w postaci grafu. Poruszanie się robota po wyznaczonym wcześniej grafie może być zrealizowane na wiele sposobów. W najprostszym przypadku po zadanym grafie porusza się tylko jeden robot, lub roboty mogą się mijać bezkolizyjnie. Wtedy zadanie sprowadza się do znalezienia najkrótszej drogi i przejechania pomiędzy zadanymi punktami [12, 13].

W przypadku grafowej mapy otoczenia, w różny sposób można interpretować krawędź grafu. W pracy [10], wprowadzono pojęcie strategii „omijania” i „przepuszczania”, polegające na zjechaniu robota z krawędzi grafu i poruszaniu się równoległe do niego w celu ominięcia innego robota.

Graf po którym poruszają się roboty może być skierowany, co oznacza, że roboty mogą się poruszać tylko w jednym kierunku na danej krawędzi grafu. Ułatwia to sterowanie, ponieważ nie wystąpi sytuacja kolizyjna na krawędzi grafu, ale często uniemożliwia jazdę najkrótszą drogą.

Systemy wielorobotowe można podzielić na scentralizowane i zdecentralizowane. W pierwszych istnieje jednostka centralna, która podejmuje wszystkie decyzje a roboty są tylko elementami wykonawczymi. Większość obecnie stosowanych w przemyśle systemów jest zrealizowana w ten sposób. Przykładem realizacji zadania eksploracji obszaru z wykorzystaniem heterogenicznych robotów jest praca [8], gdzie wyróżnia się robota - koordynatora i roboty wykonawcze, które nie posiadają własnej autonomii. Robot – koordynator może być traktowany jako jednostka centralna. W innych systemach scentralizowanych często scena jest obserwowana przez kamerę i na podstawie tego obrazu jednostka centralna podejmuje decyzje o kolejnym ruchu każdego robota. Przykładem takich systemów są mecze rozgrywane przez drużyny robotów, gdzie każdy robot jest obserwowany przez kamerę umieszczoną nad boiskiem [14].

W systemach zdecentralizowanych każdy robot traktowany jest jako agent a cały system jest traktowany jak system wieloagentowy. W takim systemie istotny jest sposób komunikacji pomiędzy agentami. Można wyróżnić lidera, który decyduje o zachowaniu pozostałych agentów, lub wszyscy agenci są równoważni i wszelkie decyzje są podejmowane w procesie negocjacji [3]. Pierwsza z tych metod zawodzi, gdy lider ulegnie uszkodzeniu, lub wystąpią zakłócenia w komunikacji, druga ma tę wadę, że jest długotrwała, gdyż podjęcie każdej decyzji wymaga czasochłonnych negocjacji. Uwzględniając wady i zalety wszystkich metod komunikacji, wydaje się, że najlepsze rozwiązanie jest takie, gdzie agenci są równoważni, ich zachowanie wynika z przyjętych reguł postępowania a negocjacje dotyczą tylko rzadkich przypadków, których nie obejmują wcześniej zdefiniowane reguły [2]. Dobrym przykładem realizacji indywidualnych celów przez agentów działających we wspólnym środowisku, jest ruch uliczny, gdzie reguły panujące na drodze są znane każdemu kierowcy a znaki drogowe, sygnalizacja świetlna i sygnalizacja kierunkowskazami są sposobem komunikacji pomiędzy agentami-kierowcami. Szczegółowy opis pojęcia agenta, opis rodzajów i parametrów agenta jest przedstawiony w pracy [11].

Istnieje szereg rozwiązań pośrednich łączących w sobie sterowanie nadrzędne i pewne elementy autonomii robotów. Sterowanie zarówno hierarchiczne, jak i wieloagentowe jest zaproponowane w pracy [10]. W pracy [4] przedstawiono wykorzystanie kilku kontrolerów obszaru nadzorujących pracę robotów.

Istotnym elementem w tworzeniu zespołu robotów mobilnych jest protokół komunikacyjny, służący do wymiany danych pomiędzy agentami. Przegląd mechanizmów komunikacji jest przedstawiony w pracy [9].

Ze względu na praktyczne zastosowanie zespołu robotów w jakimś stopniu muszą one współpracować z człowiekiem. W przypadku systemów najbardziej autonomicznych operator może wyłącznie zlecać wykonanie zadania i całe zadanie będzie wykonane już bez udziału człowieka. W większości przypadków ingerencja operatora jest konieczna w znacznie większym stopniu. Prace nad przekazywaniem zadania dla całej grupy, bez jego jawnej dekompozycji przez jednego operatora są przedstawione w [7]. Wielorobotowy system inspekcyjno-interwencyjny, składający się z heterogenicznych robotów sterowany bezpośrednio przez operatora jest przedstawiony w [1].

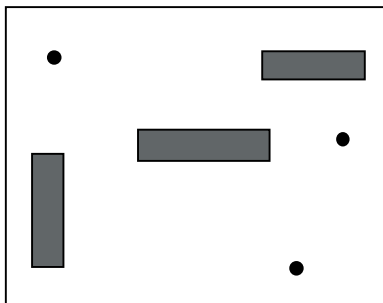
2. MODEL SYSTEMU

Celem pracy jest **zbudowanie modelu systemu umożliwiającego realizację zadania transportowego przez grupę robotów mobilnych, pomiędzy zadanymi punktami, na znanym obszarze**. Przyjęto następujące założenia:

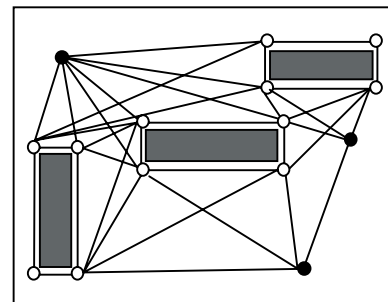
- Istnieje system umożliwiający robotom realizację ścieżki wzdłuż znanej krawędzi grafu;
- Jest możliwa komunikacja pomiędzy agentami znajdującymi się w bezpośredniej bliskości;
- Jest możliwa komunikacja pomiędzy węzłami wzdłuż krawędzi grafu;
- Roboty mogą poruszać się tylko do przodu i nie mogą się cofać;

Dla tak postawionych założeń, zaproponowano następujący model:

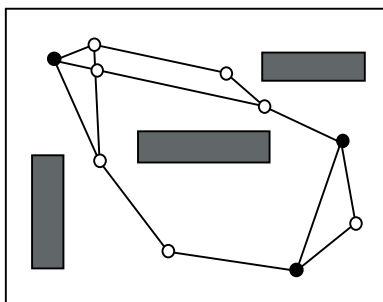
1. Pomiędzy zadanymi punktami (zwanymi dalej punktami docelowymi), tworzony jest nieskierowany graf ważony, którego te punkty są węzłami a wagi krawędzi grafu reprezentują odległość, czas lub koszt przejazdu pomiędzy węzłami. Ze względu na przeszkody i inne ograniczenia, mogą pojawiać się nowe węzły w grafie. Algorytm budowania grafu nie jest częścią prezentowanego modelu. Punkty docelowe i przykłady łączącego je grafu są przedstawione na rysunku 1. Kolorem czarnym zaznaczono punkty docelowe a kolorem białym węzły, które powstały w procesie budowania grafu. Każdy węzeł musi zawierać co najmniej dwie krawędzie, lecz zalecane jest, żeby było ich jak najwięcej.



Rys. 1a



Rys. 1b



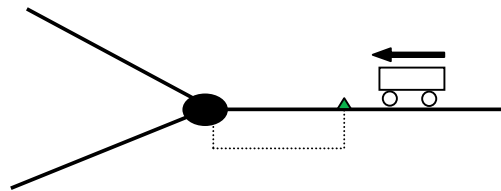
Rys. 1c

Rys. 1a – punkty pomiędzy którymi ma być wykonywany transport, wraz z przeszkodami;

Rys. 1b – graf zbudowany przez rozszerzenie przeszkód i połączenie węzłów ze sobą (nie zaznaczono węzłów, które powstały w wyniku przecięcia krawędzi grafu);

Rys. 1c – Przykładowy graf zbudowany pomiędzy zadanymi punktami. Białe koła oznaczają węzły powstałe w procesie tworzenia grafu.

2. Roboty mogą się poruszać tylko po krawędziach grafu i nie mogą z niego zjeżdżać nawet w celu ominięcia przeszkody lub innego robota;
3. Agentami w systemie są roboty i węzły grafu;
4. Roboty mogą się komunikować tylko z najbliższym węzłem, jeżeli znajdują się w jego pobliżu;
5. Roboty mogą pozostawać beczynne tylko gdy znajdują się w węźle grafu;
6. Na krawędzi grafu może znajdować się tylko jeden robot;
7. Węzły grafu mogą się komunikować tylko z najbliższymi węzłami (połączonymi krawędzią grafu);
8. System jest zdarzeniowy – zdarzeniem dla węzła jest zbliżanie się robota, oraz rezerwacja lub zwolnienie krawędzi przez sąsiedni węzeł. Zdarzeniem dla robota jest zbliżanie się do węzła. Przykład wygenerowania zdarzenia zbliżania się robota do węzła jest przedstawiony na rysunku. 2



Rysunek 2 – Zdarzenie dojazdu do węzła. Przejazd przez czujnik zamontowany na trasie generuje zdarzenie dla robota

9. Interakcja systemu z użytkownikiem odbywa się w ten sposób, że użytkownik może zlecić wykonanie zadania transportowego pomiędzy wybranymi punktami.

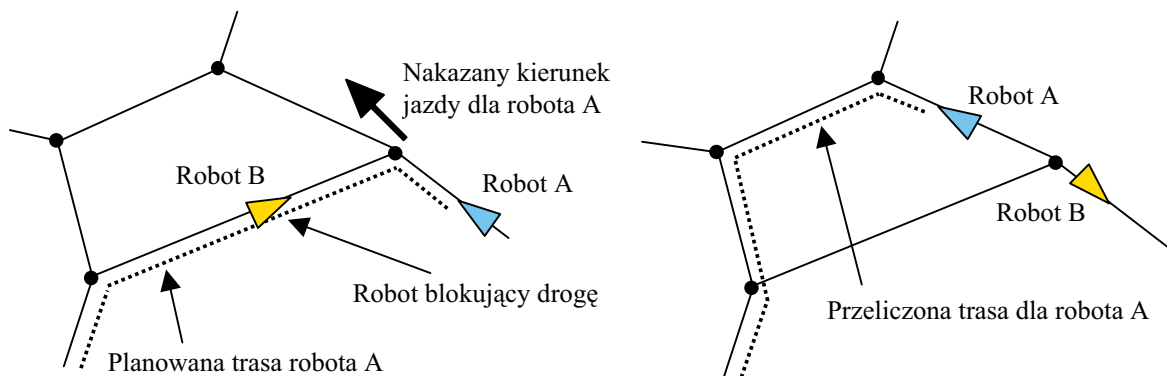
Operator zleca konkretnemu robotowi wykonanie zadania transportowego podając listę węzłów grafu, które robot ma za zadanie odwiedzić. Robot znając graf połączeń i swoje położenie, znajduje najkrótszą ścieżkę pomiędzy dwoma kolejnymi punktami listy a następujące jedzie wzdłuż znalezionej ścieżki, komunikując się z każdym agentem-węzłem w trakcie przejazdu.

AGENT ROBOT

Robot może znajdować się w trybach: {wolny, jazda, załadunek}. Jeżeli robot jest w trybie „wolny”, oznacza to, że robot znajduje się w węźle grafu i oczekuje na zlecenie zadania. Po otrzymaniu zadania robot zmienia tryb na: „jazda” i rozpoczyna realizację wyznaczonej wcześniej ścieżki. Po dojechaniu do pośredniego lub docelowego węzła, robot zatrzymuje się na ustalony wcześniej czas i przechodzi w tryb „załadunek”, co reprezentuje czas potrzebny na załadowanie lub wyładowanie przewożonego towaru.

Najistotniejszym elementem modelu jest jazda wzdłuż wyznaczonej ścieżki w sposób umożliwiający uniknięcie kolizji z innymi robotami realizującymi swoje zadania. Unikanie kolizji odbywa się pod wpływem zdarzenia dojazdu robota do węzła (rys.2), w sposób następujący:

1. Po odebraniu zdarzenia dojazdu do węzła, robot wysyła komunikat z informacją którą następną krawędzią ma zamiar jechać (ta czynność może być porównana z używaniem kierunkowskazów przez pojazdy zbliżające się do skrzyżowania);
2. Agent-węzeł wysyła robotowi jedną z trzech możliwych odpowiedzi:
 - Wyraża zgodę na przejazd (odpowiednik zielonego światła na skrzyżowaniu);
 - Nie wyraża takiej zgody i wysyła sygnał „stop” (odpowiednik czerwonego światła na skrzyżowaniu);
 - Nakazuje jazdę inną krawędzią. (odpowiednik policjanta sterującego ruchem na skrzyżowaniu i nakazującego jazdę w innym kierunku niż zamierzony);
3. W przypadku gdy robot dostał nakaz jazdy inną krawędzią, dokonuje on przeliczenia trasy od węzła, do którego prowadzi krawędź, na której znajduje się robot. (rys.3)



Rysunek 3 – Wzajemne blokowanie trasy przez 2 roboty. Robot A dostaje polecenie jazdy krawędzią inną, niż planowana

AGENT WĘZEŁ

Węzeł zna listę odchodzących od niego krawędzi grafu i ma komunikację z sąsiednimi agentami-węzłami. Jest ona używana do rezerwowania i zwalniania krawędzi grafu. Taka rezerwacja daje węzłowi informacje, którymi krawędziami roboty mogą się poruszać. W przypadku, gdy węzeł zezwala robotowi na przejazd, dokonuje on rezerwacji krawędzi grafu i informuje o tym przeciwny węzeł tej krawędzi.

Węzeł działa zdarzeniowo, w reakcji na trzy typy zdarzeń.

Zdarzenie zbliżania się robota.

W przypadku zdarzenia zbliżania się robota do węzła (rys. 2), działa on w następujący sposób:

1. Po otrzymaniu informacji o zbliżaniu się robota, agent-węzeł odbiera komunikat, którą następną krawędzią węzła robot chce jechać;
2. Jeżeli ta krawędź jest wolna, agent-węzeł zezwala na przejazd, rezerwuje nową krawędź i zwalnia tę, którą opuszcza robot;
3. Jeżeli ta krawędź grafu, którą chce jechać robot jest zajęta, agent-węzeł nie zezwala na przejazd i daje sygnał „stop”;

4. Jeżeli węzeł wykryje sytuację kolizyjną, to znaczy dwa lub więcej robotów chce jechać tą samą drogą w przeciwnych kierunkach, wtedy węzeł wysyła do losowo wybranego robota polecenie jazdy losowo wybraną wolną krawędzią. Taką sytuację przedstawia rysunek 3, na którym dwa roboty wzajemnie się blokują i jeden z nich zostaje skierowany na inną krawędź.

Zdarzenie zarezerwowania krawędzi przez inny węzeł.

W przypadku odebrania zdarzenia rezerwacji krawędzi przez inny węzeł, sprawdza on ile pozostało wolnych krawędzi i jeżeli wolna jest tylko jedna, zostaje ona zarezerwowana na potrzeby własne.

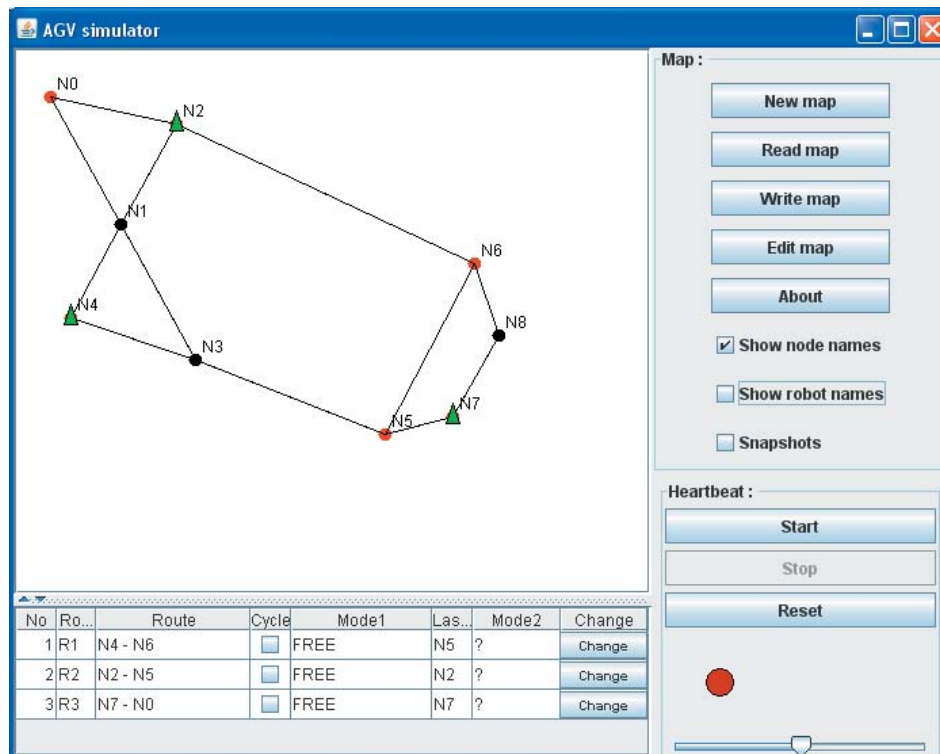
Zdarzenie zwolnienia rezerwacji krawędzi przez inny węzeł.

W przypadku odebrania zdarzenia zwolnienia krawędzi przez inny węzeł, dany węzeł działa w następujący sposób:

1. Jeżeli węzeł rezerwował wcześniej inną krawędź na potrzeby własne, to zostaje ona zwolniona;
2. Jeżeli jakiś robot został zatrzymany i oczekuje na zwolnienie tej krawędzi, od której zdarzenie zostało odebrane, to węzeł zezwala robotowi na przejazd.

3. SYMULACJE

W celu sprawdzenia poprawności modelu zbudowany jest symulator. Widok symulatora przedstawia rysunek 4.

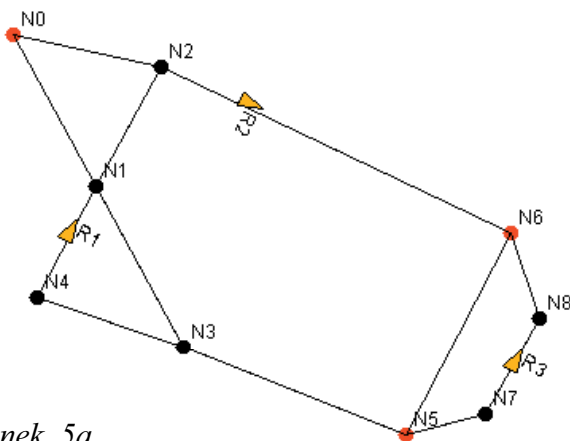


Rysunek 4 – Graf wraz z robotami i przypisane im trasy. Węzły oznaczone kolorem czerwonym oznaczają końce tras robotów. W tabeli przedstawiono trasy każdego z nich.

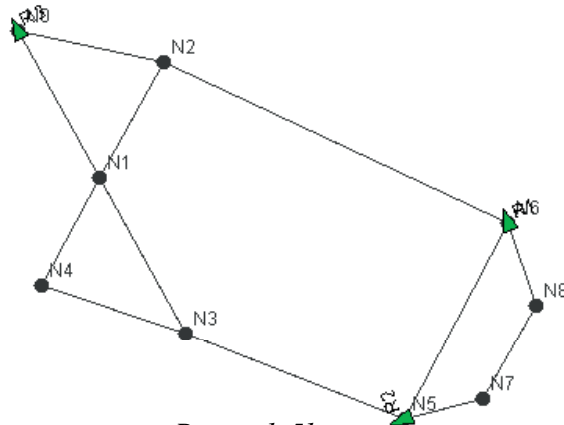
W symulatorze do poszukiwania najkrótszej drogi został zaimplementowany algorytm Floyda [13]. Po otrzymaniu zadania robot znając swoją pozycję sprawdza, czy znajduje się w węźle

początkowym trasy i jeżeli nie, to wyznacza sobie najkrótszą trasę do punktu początkowego. Następnie robot wyznacza swoją trasę do punktu docelowego. W prezentowanym przykładzie przedstawiono trasę bez punktów pośrednich. Z tabeli rysunku 4 widać, że robot R1 ma za zadanie przejechać z węzła N4, do węzła N6. Robot R2 jedzie od węzła N2 do węzła N5 a robot R3 jedzie od węzła N7 do węzła N0. Wszystkie roboty znajdują się w punkcie początkowym trasy.

Rysunek 5 przedstawia roboty w trakcie wykonywania zadania i po jego zakończeniu. Kolor zielony na rysunku 5b oznacza, że roboty są w trybie „wolny” i są gotowe do otrzymania następnego zadania.



Rysunek 5a



Rysunek 5b

Rysunek 5 – Roboty w trakcie wykonywania zadania (5a) i po jego zakończeniu (5b)

4. WNIOSKI

Miarą skuteczności systemu jest przede wszystkim jego bezkolizyjna praca, dla danego grafu, dla danej liczby robotów i dowolnych trasach. Kolejnym elementem oceny jest minimalizowanie czasu wykonania zadania przez całą grupę.

Cechą wyróżniająca prezentowany model jest zastosowanie dwóch rodzajów agentów – robota i węzła, oraz komunikacja ograniczona do niewielkich odległości, polegająca na komunikacji węzła z jego sąsiadami, oraz robota z najbliższym węzłem. Jest to zaleta systemu, gdyż praktyczne zrealizowanie komunikacji pomiędzy urządzeniami w warunkach przemysłowych na duże odległości może być trudne. System może być zastosowany dla dowolnie dużego grafu spełniającego podane ograniczenia. W systemie nie istnieje jednostka centralna. Wadą systemu jest konieczność pamiętania całego grafu przez każdy z robotów indywidualnie. W wypadku rozbudowy systemu i niewprowadzeniu aktualizacji lub błędnego wprowadzania danych do niektórych robotów, te roboty mogą działać nieoptymalnie lub błędnie.

W przyszłości planowane jest rozwinięcie systemu o następujące elementy:

- Możliwość zlecenia zadań dowolnemu robotowi. W chwili obecnej użytkownik zleca zadanie konkretnemu robotowi – planowane jest takie rozwinięcie systemu, żeby zadanie było realizowane przez najbliższego wolnego robota (może być to porównane z korporacją taksówkową, gdzie po zleceniu kursu, do klienta przyjeżdża najbliższa wolna taksówka). Może być to trudne do zrealizowania przy braku centralnej komunikacji, jednakże można do tego zastosować mechanizm rozchodzenia się informacji przez przekazywanie jej pomiędzy węzłami.

- W chwili obecnej nie istnieje mechanizm weryfikacji grafu i poza systemem leży takie zbudowanie grafu, które umożliwi bezkolizyjną pracę całego systemu. Planowane jest opracowanie algorytmu, który będzie weryfikował, czy graf umożliwia prawidłową pracę systemu, oraz proponował optymalną liczbę robotów.
- Obecnie roboty planują zawsze najkrótszą trasę. Planowana jest taka modyfikacja algorytmu, żeby roboty uwzględniały zadania innych robotów w planowaniu swojej trasy.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Będkowski, G. Kowalski, A. Masłowski. *Wielorobotowy mobilny system inspekcyjno-interwencyjny*, Krajowa Konferencja Robotyki, KKR 2008, tom II, 695-702;
- [2] M. Gnatowski *Wykorzystanie systemów wieloagentowych we współdziałaniu robotów mobilnych*, rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 2005.
- [3] Jacques Ferber. *Multi-Agent Systems*. Harlow: Addison Wesley Longman, 1999
- [4] E. Roszkowska, B. Kreczmer, A. Borkowski, M. Gnatowski – *Distributed supervisory control for a system of path-network sharing mobile robots*, Proceedings of the 3rd European Conference on Mobile Robots, ECMR'07, Freiburg, Germany, p.54-59
- [5] B. Siemiątkowska. *Uniwersalna metoda planowania trasy dla robota mobilnego*, Krajowa Konferencja Robotyki, KKR 2008, tom II, 545-554
- [6] B. Siemiątkowska *Coordination the motion of mobile robots using cellular neural network*, JAMRIS, vol.I, 2008, p.65-70
- [7] M. Skubic, D. Anderson, S. Blisard, D. Perzanowski, A. Schultz. *Using a hand-drawn sketch to control a team of robots*, Autonomous Robots, Volume 22, Number 4, May 2007, pp. 399-410(12)
- [8] M. Sławiński, W. Czajewski. *Eksploracja obszaru z wykorzystaniem zespołu heterogenicznych robotów mobilnych*, Krajowa Konferencja Robotyki, KKR 2008, tom II, 703-710;
- [9] P. Trojanek. *Mechanizmy komunikacji jawnej w programowych strukturach ramowych*, Krajowa Konferencja Robotyki, KKR 2008, tom II, 369-378;
- [10] W. Ulatowski, A. Masłowski *Sterowanie i współpraca pojazdów AGV*, Automation 2007, CD-Rom
- [11] G. Weiss. *Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England, 2000
- [12] R. Wilson *Wprowadzenie do teorii grafów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002, ISBN: 83-01-12641-8.
- [13] P. Wróblewski *Algorytmy struktury danych i techniki programowania*. Helion 2001, ISBN: 83-86718-91-9
- [14] www.robocup.org – strona internetowa projektu RoboCup.