

Dr Barbara Siemiątkowska
Prof. Adam Borkowski
Instytut Podstawowych Problemów
Techniki PAN

ZASTOSOWANIE SIECI KOMÓRKOWYCH DO PLANOWANIA TRASY DLA ZESPOŁU ROBOTÓW

W poniższym artykule przedstawione zostanie zastosowanie sieci komórkowych do planowania trasy dla zespołu robotów mobilnych dążących do wspólnego celu. Przedstawione zostaną następujące rodzaje zachowań: zachowanie stadne oraz grupa zachowująca określony szyk.

Abstract.

This paper presents an application of Cellular Neural Network for path planning for a team of mobile robots. The robots have the same goal. Two kinds of team's behaviors are implemented: robots moving independently and formation control.

1. WSTĘP

Układy wielu robotów są ostatnio często spotykane w praktycznych zastosowaniach. Istnieje wiele zagadnień, które są trudne lub wręcz niemożliwe do zrealizowania przez pojedynczego robota, ale mogą być z powodzeniem wykonane przez zespół współpracujących ze sobą agentów. Do tego typu zagadnień należy zaliczyć zadania transportowe [2], ratownictwo, rozpoznawanie nieznanego otoczenia, detekcję skażeń [12], obróbkę powierzchni [4]. Jednym z kierunków badań jest tworzenie algorytmów umożliwiających poruszanie się robotów w formacji i stadzie [11]. Podstawowe problemy, które należy rozwiązać to tworzenie szyku lub stada, zmiana szyku i omijanie przeszkód [21].

Zwykle zadania które powinna wykonać grupa są dzielone na proste podzadania, które mogą być wykonane przez pojedynczego robota [8]. Umiejętność planowania bezkolidyjnej trasy jest jedną z podstawowych części każdego systemu nawigacyjnego robota mobilnego. Zagadnienie to jest studiowane w robotyce od wielu lat i można uznać je za rozwiązane w przypadku planowania ruchu dla pojedynczego robota. Do najczęściej stosowanych możemy zaliczyć:

„Grafowe” planowanie trasy - w metodzie tej wytyczane są drogi wolne od przeszkód, które następnie zapisywane są w postaci grafu. Zagadnienie planowania trasy jest

sprowadzane do zadania planowania najkrótszej drogi w grafie. Wytyczanie ścieżek odbywa się wieloma metodami. Jedną z nich jest tzw. "visibility graph", w której to metodzie mapa dróg jest generowana jako zbiór odcinków łączących wierzchołki wieloboków opisujących przeszkody. Innym podejściem jest generowanie grafu Voronoi, lub tzw. uogólnionych stożków [5], [19].

Metody potencjałowe - w tych metodach robot jest traktowany jako cząstka występująca w polu potencjałowym wytworzonym przez cel, który przyciąga robota, oraz przeszkody, które pojazd odpychają. Kierunek występowania największej siły przyciągania wyznacza kierunek przemieszczania się robota. Metoda ta jest szeroko opisywana w literaturze [5], [17], [18], [25]. Jednak jej podstawową wadą jest występowanie minimum lokalnych.

Metody rastrowe - polegają one na podziale obszaru poruszania się robota na podobszary, zwane komórkami i generowanie trasy jako ciągu wolnych od przeszkód komórek. Generowanie ciągu może odbywać się wieloma metodami. Do najważniejszych można zaliczyć: metody dyfuzyjne, sieci neuronowe, algorytmy genetyczne [5], [6], [22], [23], [24].

Planowanie trasy dla zespołu robotów jest zadaniem wiele bardziej skomplikowanym, gdyż roboty oprócz unikania kolizji z przeszkodami muszą unikać kolizji z innymi pojazdami. Metody planowania trasy dla zespołu robotów mobilnych możemy podzielić na dwie grupy:

Centralne planowanie [1], [7], [10], [13], [15] - w której drogi przejazdu są generowane centralnie dla wszystkich robotów. Przy planowaniu uwzględnia się problem unikania kolizji w czasie przejazdu.

Planowanie rozproszone [1], [3], [14], [16], [20] - w metodzie tej każdy z robotów planuje trasę niezależnie. Kolizje są rozwiązywane lokalnie.

Zaletą metody centralnego planowania trasy jest to, że w wyniku jej stosowania otrzymane ścieżki są optymalne. Przykłady takiego podejścia do zagadnień planowania możemy znaleźć w [6]. Podstawową wadą takiego podejścia jest to, że otrzymanie optymalnego wyniku jest bardzo czasochłonne. Stosując metody rozproszone trudno jest uzyskać optymalne rozwiązanie, natomiast czas podejmowania decyzji jest krótki.

2. STRUKTURA SYSTEMU

Sądzymy, że nie istnieją metody planowania trasy dla zespołu robotów, które są optymalne we wszystkich sytuacjach i wybór strategii jest ściśle związany z zadaniem, które jest wykonywane. W przedstawionej pracy zaproponowana będzie metoda, która umożliwi szybkie planowanie trasy i unikanie kolizji w przypadku, gdy roboty dążą do wspólnego celu. Opisany w poniższym artykule algorytm jest połączeniem wymienionych powyżej metod. W pierwszym etapie generowana jest w sposób wielorównoległy tzw. mapa dyfuzyjna, na podstawie której generowane są kolejne położenia robotów, a następnie w trakcie realizowania zaplanowanych wcześniej trajektorii rozwiązywany jest lokalnie problem unikania kolizji. System był testowany w sytuacjach, gdy roboty dążą do wspólnego celu niezależnie lub w stadzie i gdy roboty podążają do celu w określonym szyku.

Opisywana w pracy metoda jest modyfikacją metody dyfuzyjnej, która została opisana w pracy [23] i została przetestowana w przypadku planowania trasy dla pojedynczego robota.

Schemat działania systemu jest następujący: Otoczenie robota jest dzielone na podobszary - kwadraty. Każdej z komórek przypisywana jest jedna z etykiet: *wolna*, *zajęta*. Otoczenie jest reprezentowane w postaci neuronowej sieci komórkowej, w której komórki odpowiadają pewnym fragmentom (kwadratami) otoczenia. Dwie komórki sieci są połączone jeśli odpowiadające im podobszary przylegają do siebie. Wagi połączeń między komórkami opowiadają odległość euklidesowej między opowiadającymi podobszarami. Proces generowania trasy składa się z dwóch etapów - tworzenie mapy dyfuzyjnej, a następnie na jej podstawie generowana jest trasa. Pierwszy algorytmu krok składa się z następujących elementów:

a) Inicjalizacja sieci:

Ustalane są wartości wag połączeń między poszczególnymi komórkami sieci:

$$a_{ij}^{kl} = \text{dist}(c_{kl}, c_{ij}) \quad (1)$$

gdzie a_{ij}^{kl} waga łącząca komórkę x_{ij} z x_{kl} , a c_{ij} odpowiednia komórka mapy.

b) Ustalenie wartości sygnałów zewnętrznych:

$$u_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{gdy komórka jest fragmentem przeszkody} \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2)$$

c) Ustalenie początkowej wartości komórek:

$$x_{ij}(0) = \begin{cases} T & \text{gdy } c_{ij} \text{ reprezentuje cel} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (3)$$

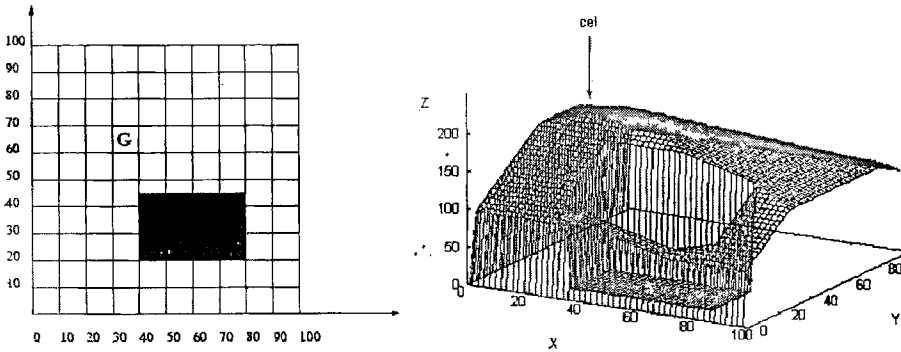
d) Proces dyfuzji:

$$x_{ij}(t+1) = u_{ij}(t) \cdot (x_{ij}(t) + \max_{kl \in N_r} (x_{kl}(t) - a_{ij}^{kl})) \quad (4)$$

Proces opisany równaniem (4) jest kontynuowany, aż do momentu osiągnięcia przez sieć stanu równowagi tzn:

$$\forall ij \quad x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) \quad (5)$$

Rysunek 1.b przedstawia postać mapy dyfuzyjnej dla otoczenia przedstawionego na rysunku 1.a. Klatki wolne od przeszkód zostały zaznaczone na czarno, cel został oznaczony literą G. Na rysunku 1.b wartość współrzędnej Z określa stopień pobudzenia neuronu o indeksie xy .



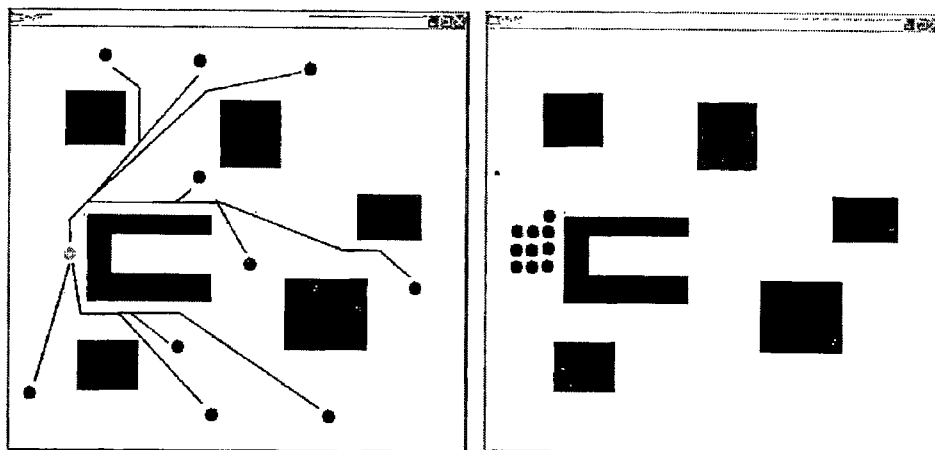
Rysunek 1: Postać mapy dyfuzyjnej dla zadanego otoczenia

3. PLANOWANIE TRASY

Generowanie trasy może odbywać się na podstawie wspólnej mapy dyfuzyjnej, gdyż jej postać nie zależy od położenia robotów, a jedynie od położenia celu i przeszkód znajdujących się w otoczeniu. Komórka zajęta przez robota jest jego położeniem początkowym, następnie położenie wskazuje komórka sąsiednia o maksymalnym pobudzeniu. Rysunek 2a przedstawia otoczenie, początkowe położenie robotów (czarne kółka) oraz celu (szare koło) i postać zaplanowanej trasy, a rysunek 2b końcowe położenie robotów. W celu uniknięcia kolizji między robotami zastosowano bardzo prosty mechanizm: Jeśli komórka c_{ij} jest zajęta przez robota i robot zmierza do komórki c_{kl} , to sygnałom u_{ij} i u_{kl} przypisywana jest wartość 0, a więc komórki c_{kl} i c_{ij} nie są dostępne dla innych robotów. Mechanizm ten nie tylko umożliwia unikanie kolizji, ale także tworzy mechanizm wymijania w przypadku, gdy roboty poruszają się po tej samej trasie, ale z różnymi prędkościami.

Opisywana metoda ma następujące zalety:

- Nie występują problemy związane z występowaniem lokalnych minimów, a problemy kolizji między robotami są rozwiązywane lokalnie.
- Metoda umożliwia łatwe wykrycie sytuacji, w której jeden z robotów jest otoczony przez przeszkody oraz sytuacji w której cel nie może być osiągnięty.
- Końcowa konfiguracja robotów jest osiągnięta automatycznie bez konieczności stosowania dodatkowych reguł.



a)

b)

Rysunek 2: Trasa zaplanowana dla robotów dążących do wspólnego celu

4. MODYFIKOWANIE ZACHOWAŃ ZESPOŁU

W przypadku stosowania neuronowych sieci komórkowych przyjęto, że szablon połączeń jest taki sam dla wszystkich komórek sieci, ale zmieniając dynamicznie wartości sygnałów wejściowych i sposób inicjalizacji sieci możemy zmieniać sposób zachowania się zespołu. W prowadzonych badaniach przeprowadzono eksperymenty umożliwiające osiągnięcie następujących zachowań grupy:

1. Roboty starają się otoczyć cel ruchomy
2. Roboty gromadzą się w niewielkim pomieszczeniu – zagrodzie.
3. Roboty dążą w stadzie do wspólnego celu
4. Roboty dążą do wspólnego celu zachowując określoną formację

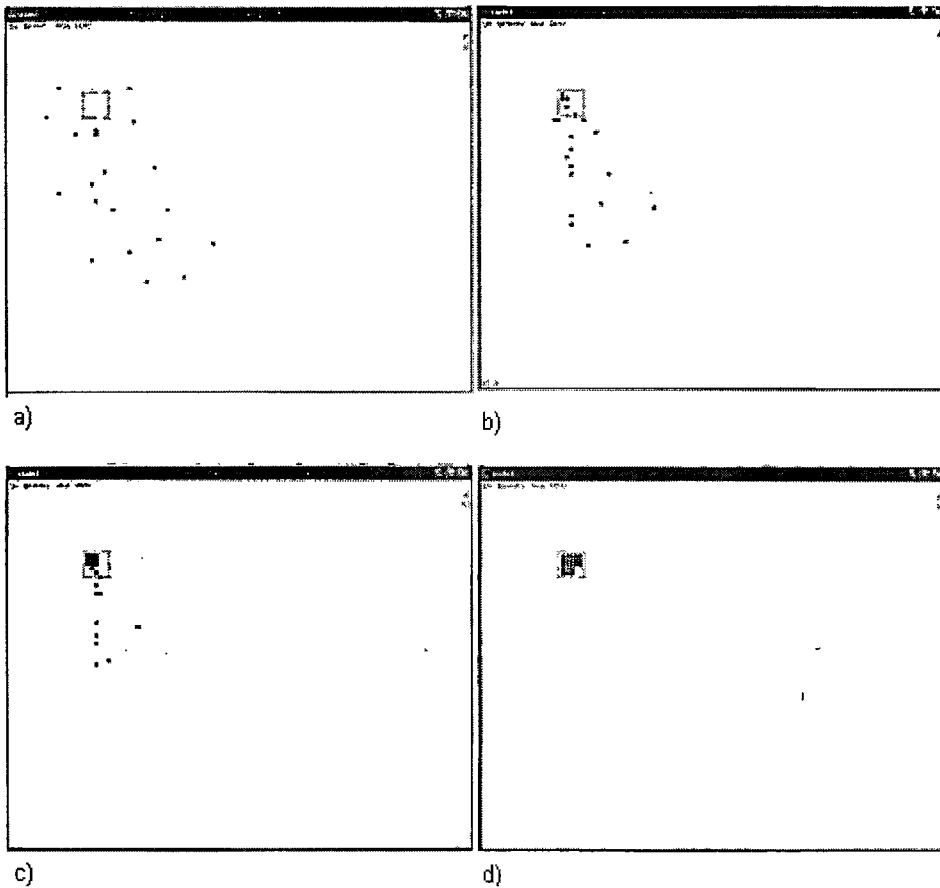
4.1 Roboty starają się otoczyć cel ruchomy

Aby roboty mogły otoczyć ruchomy cel, równanie (3) zostało zastąpione równaniem:

$$x_{ij}(0) = \begin{cases} T & \text{gdy } c_{ij} \in N_R \\ 0 & \text{wpp} \end{cases} \quad (6)$$

Fala dyfuzyjna rozchodzi się nie bezpośrednio od komórki, która jest celem, ale od wolnych od przeszkód komórek, które należą do jej sąsiedztwa, oznaczonego we wzorze (6) symbolem N_r .

Wartości komórek są zmieniane dynamicznie w sytuacji, gdy zmienia się cel.



Rysunek 3: Roboty gromadzące się w niewielkim pomieszczeniu

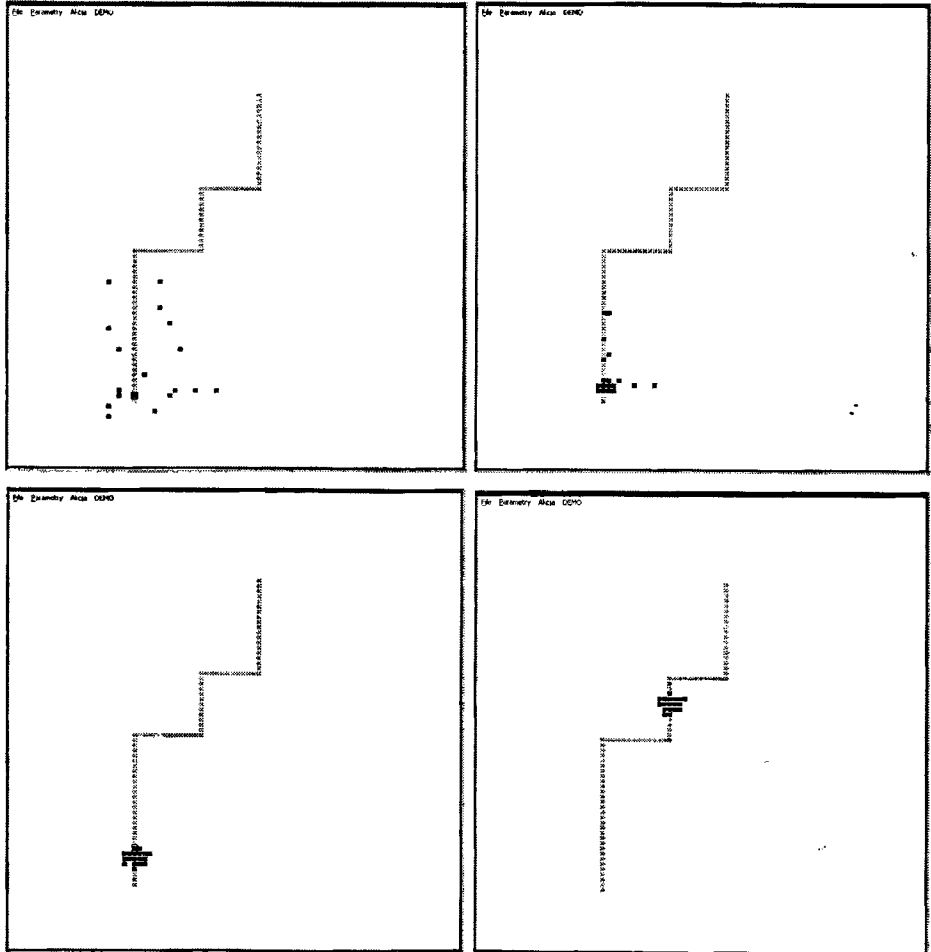
4.2 Roboty gromadzą się w niewielkim pomieszczeniu – zagrodzie

W przypadku, gdy roboty powinny się zgromadzić w niewielkim zamkniętym obszarze, podobnie jak w przypadku 4.1 równanie (3) jest zastąpione przez równanie:

$$x_{ij}(0) = \begin{cases} T & \text{gdy } c_{ij} = D \\ 0 & \text{wpp} \end{cases} \quad (7)$$

Cel do którego dążą roboty jest zmieniany dynamicznie. Roboty dążą do wolnej od przeszkód i robotów komórki, która znajduje się najdalej od „drzwi”. Komórka ta została oznaczona symbolem D . Mechanizm ten umożliwia uniknięcie sytuacji w której wejście zostanie zablokowane przez roboty, próbujące dostać się do wnętrza pomieszczenia.

Rysunek (3) przedstawia etapy działania sieci, gdy roboty gromadzą się w niewielkim pomieszczeniu. Rysunek 3.a przedstawia stan początkowy, 3.b i 3.c stany pośrednie, a 3.d - stan końcowy.

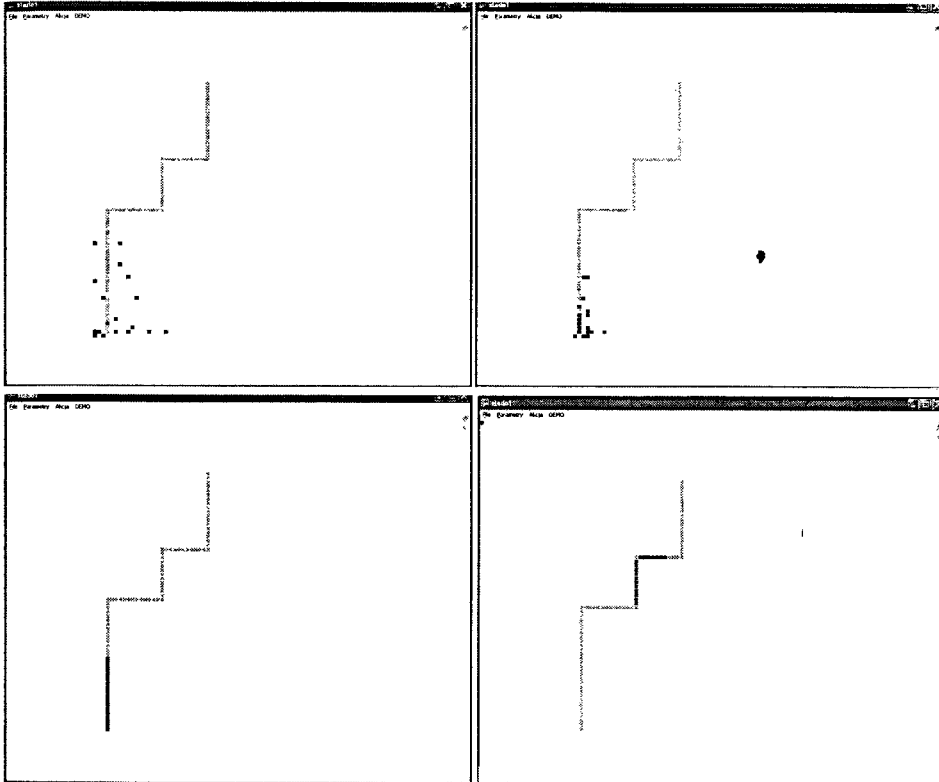


Rysunek 4: Stado robotów dążących do wspólnego celu

4.3 Roboty dążą w stadzie do wspólnego celu

W tej sytuacji planowanie odbywa się w dwóch etapach: w zespole wyznaczany jest robot – przewodnik stada. Planowana i zapamiętywana jest wolna od przeszkód trasa dla pojedynczego robota. W następnym etapie wyznaczany jest wspólny dla wszystkich (poza przewodnikiem) cel – wolna od przeszkód komórka znajdująca się bezpośrednio

za przewodnikiem. Cel zmieniany jest dynamicznie, tzn. zmiana położenia przewodnika powoduje zmianę celu. Mechanizm ten umożliwia gromadzenie się robotów w stadzie, rozproszenie w przypadku pojawienia się przeszkód i dążenie do wspólnego celu w grupie. Na rysunku (4) przedstawiono etapy formowania stada i stadne przemieszczanie się robotów.



Rysunek 5: Roboty dążących do wspólnego celu w szyku

4.4 Roboty dążą do wspólnego celu w szyku

Algorytm działania sieci jest podobny do algorytmu opisywanego w 4.3. Celem do którego dążą roboty nie jest pojedyncza komórka, ale zbiór komórek. W przypadku szyku torowego są to komórki w których w poprzednich krokach czasowych znajdował się robot przewodnik. Rysunek 5 pokazuje grupę robotów, które utrzymują szyk torowy.

5. WNIOSKI

W powyższym artykule przedstawiono zastosowanie sieci komórkowych do planowania trasy dla zespołu robotów mobilnych dążących do wspólnego celu. Testowano sytuacje, w których roboty dążą do celu statycznego lub ruchomego niezależnie i sytuacje, w których wymagane jest zachowanie określonego szyku. Schemat sieci komórkowej jest taki sam we wszystkich opisywanych sytuacjach, modyfikacji ulegają wartości początkowe komórek sieci i wartości sygnałów wejściowych. Stosując bardzo prosty mechanizm dyfuzji można modelować wiele zachowań grupowych. W przypadku, gdy otoczenie robotów jest statycznie występują problemy związane z występowaniem lokalnych minimów, a problemy kolizji między robotami są rozwiązywane lokalnie. Metoda umożliwia łatwe wykrycie sytuacji, w której jeden z robotów jest otoczony przez przeszkody, oraz sytuacji, w której cel nie może być osiągnięty. Końcowa konfiguracja robotów jest osiągnięta automatycznie bez konieczności stosowania dodatkowych reguł.

LITERATURA

- 1 T. Arai and J. Ota "Motion Planning of multiple mobile robots", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1761--1768, 1992
- 2 P. Aparicio and P. Lima., "Autonomous distributed control of a population of cooperative robots." SIRS'99, pp. 349--358, 1999.
- 3 K. Azarm and G. Schmidt, "A decentralized approach for the conflict-free motion of multiple mobile robots", Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1667 - 1674, 1996
- 4 T. Balch and R.C. Arkin., "Behavior-based formation control for multirobot teams., *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 926--939, 1998.
- 5 B. Barraquand , J.C. Langois , J. C. Latombe, "Numerical potential field techniques for robot path planning", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Man and Cybernetic, vol. 22(2), pp. 224 - 241, 1992
- 6 M. Bennewitz , W. Burgard , S. Thrun, "Optimizing schedules for prioritized path planning of multi-robot systems", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics Automation (ICRA), 2000
- 7 Z. Bien and X. Lee, "A minimum-time trajectory planning method for two robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8(3), pp. 414-418, 1992
- 8 S.J. Buckley, "Fast motion planning for multiple moving robots", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)", pp. 1419-1424, 1989
- 9 L. Chua and L. Young, "Cellular Neural Network", *IEEE Transaction on Circuit System*, pp. 500-505, 1990
- 10 L. Chun, Z. Zengand, and W. Chang., "A decentralized approach to the conflict-

- free motion planning for multiple robots", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)}, pp. 1544--1550, 1999.
- 11 M. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, D. Wilkes, "A taxonomy for multi-agent robotics.", *Autonomous Robots*, pp. 5--29, 1995.
 - 12 K. S. Evans, C. Unsal, J. S. Bay, "A reactive coordination scheme for many-robot system, *IEEE Trans. on Systems*, pp. 598--610, 1997.
 - 13 C. Ferrari and E. Pagello and J. Ota and T. Arai, "Multirobot motion coordination in space and time", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 25, pp. 219--229, 1998.
 - 14 Y. Guo and L.E. Parker, "A distributed and Optimal Motion Planning Approach for Multiple Mobile Robots", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp. 2612--2619, 2002.
 - 15 K. Kant and S. Zucker, "Towards Efficient trajectory planning, The path-velocity decomposition", *Journal of Robotics Research*, vol. 5(3), pp. 72--89, 1986
 - 16 S. Kato and S. Nishiyama and J. Takeno, "Coordinating mobile robot by applying traffic rules", *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*", pp.1535--1541, 1992.
 - 17 K. A. Konolige, "Gradient Method for Realtime Robot Control", *IROS*, pp. 639--646, 2000.
 - 18 O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", *International Journal of Robotics Research*, vol. 1, pp. 90-98, 1992
 - 19 J. C. Latombe, "Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers", MA Boston, 1992.
 - 20 S. Leroy, J. P. Laumond, T. Simeon, "Multiple path coordination for mobile robots: A geometric algorithm", Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)", 1999
 - 21 P. Levi, M. Becht, R. Lafrenz, and M. Muscholl, "Comros - a multi-agent robot architecture, *DARS-3*, pp. 235 -- 235, 1998.
 - 22 F. Marchese, "Cellular Automata in robot path planning", *LNCS*, pp. 116--125, 1997
 - 23 B. Siemiątkowska, "Cellular Neural Network for Path Planning", Proc. of SIRS", 125--130, 1994
 - 24 L. Steels", "Exploiting Analogical Representation", *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, pp. 176--180, 1990
 - 25 C. Warren, "Multiple robot path coordination using artificial potential fields", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp. 500-505", 1990