

Konrad Kułakowski*, Jarosław Wąs*, Marcin Szpyrka*

Dynamiczny model świata w sterowaniu autonomicznym robotem mobilnym**

1. Wprowadzenie

1.1. Przedstawienie problemu

Przedmiotem zainteresowania autorów jest problem sterowanie ruchem robota bądź grupy robotów dla równego podłoża w pewnej zamkniętej przestrzeni (*indoor environment*). Przyjęto założenie wstępnej znajomości topografii otoczenia, która może się jednak dynamicznie zmieniać (ruchome przeszkody, inne roboty). Robot ma do wykonania pewne zadanie – misję. W najprostszym przypadku polega ona na dotarciu do zadanego miejsca w rozpatrywanej przestrzeni. Ważnym elementem architektury systemu mającym wpływ na sposób planowania ścieżki robota jest właściwe dobranie reprezentacji wiedzy opisującej świat, w którym przyjdzie robotowi się poruszać. Przyjęty model świata powinien *przechowywać wiedzę o środowisku działania robota, umożliwiać przewidywanie zmian w tym środowisku oraz wspomagać efektywne planowanie trasy ruchu robota*.

1.2. Reprezentacja otoczenia a planowanie ruchu robota

Reprezentacja świata, na którą składa się m.in. reprezentacja mapy środowiska robota, a także zbiór istotnych cech samego robota (np. holonomiczny – nieholonomiczny, liczba stopni swobody), wpływają na wybór metody planowania ruchu robota.

W literaturze spotyka się trzy klasyczne metody reprezentacji otoczenia systemu inteligentnego sterowania robotem mobilnym: metryczną, topologiczną i hybrydową [1]:

- W reprezentacji metrycznej wykorzystuje się układ współrzędnych do opisu charakterystyki środowiska. Reprezentacja ta obejmuje dekompozycję przestrzeni na siatkę komórek, uwzględniając przy tym ich zajętość jako wartość binarną [1, 2] (lub wartość pośrednią rozumianą jako prawdopodobieństwo zajętości danej komórki).

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

** Praca częściowo finansowana przez MNiSW w ramach grantu: N516 024 32/2878

- Reprezentacja topologiczna posługuje się relacjami sąsiedztwa pomiędzy elementami środowiska. Relacja ta jest przedstawiana jako graf, w którym wierzchołki reprezentują określone elementy topologii, zaś krawędzie mówią o bezpośrednim połączeniu pomiędzy tymi elementami. W tym podejściu zakłada się, że robot jest w stanie rozpoznać miejsce – położenie, w którym się aktualnie znajduje.
- Reprezentacja hybrydowa próbuje łączyć dwa wcześniej opisane podejścia. Może ona korzystać z globalnej mapy topologicznej utworzonej z lokalnych map metrycznych [12] lub używać globalnej mapy metrycznej i bardziej szczegółowych map topologicznych [16].

Planowanie ruchu robota jest związane z przyjętą reprezentacją: dla reprezentacji topologicznej najczęściej są używane metody grafowe wraz z charakterystycznymi dla nich algorytmami, np. algorytm Dijkstry czy A^* [6, 10]. Natomiast dla reprezentacji metrycznej (tzw. siatek zajętości) są używane metody takie jak algorytm widoczności, algorytm Trulla [9].

1.3. Jaka reprezentacja świata?

Wybór właściwego sposobu opisu świata zależy od wielu czynników. Przede wszystkim od tego, w jakim otoczeniu robot będzie się poruszał, jakie informacje z otoczenia będzie musiał otrzymać oraz jaki charakter będzie miała pełniona przez niego misja. W przypadku problemu znajdowania ścieżki w literaturze można znaleźć zarówno przykłady wykorzystania podejścia topologicznego, jak i metrycznego [9]. Złożoność obliczeniowa większości algorytmów używanych w obu podejściach jest porównywalna i mieści się w klasie algorytmów wielomianowych [2, 9, 10]. Reprezentacje metryczne zazwyczaj wykorzystują więcej pamięci operacyjnej do przechowywania danych niż analogiczne reprezentacje topologiczne. Z drugiej strony, jako zaletę reprezentacji metrycznych wymienia się łatwość ich użycia razem z reaktywnymi komponentami architektur hybrydowych [9]. Warto też zwrócić uwagę na duże możliwości zrównoleglenia obliczeń prowadzonych przy wykorzystaniu takiej reprezentacji.

Rozpatrując przyjęte w sekcji 1.1 założenia oraz śledząc klasyczne metody reprezentacji wiedzy o otoczeniu systemu inteligentnego sterowania robotami mobilnymi, autorzy zainspirowali się możliwością włączenia w model świata wiedzy danej w postaci automatu komórkowego.

Automaty komórkowe są dobrym narzędziem do modelowania zmieniającego się w czasie otoczenia [13]. Wykorzystując prosty schemat działania, dzięki masywnie równoległej strukturze przetwarzania [7], są w stanie z powodzeniem symulować skomplikowane procesy. W literaturze można znaleźć przykłady zastosowania automatów komórkowych (*Cellular Automaton* – CA) do sterowania systemami wielorobotowymi, np: sterowanie zespołem robotów oparte na CA [2] czy system sterowania wieloma robotami CEBOT [3]. Wydaje się, że ten kierunek badań, przy uwzględnieniu niebanalnej odmiany automatów komórkowych, jaką są niehomogeniczne automaty komórkowe (dopuszczające m.in. nie-

jednorodną siatką czy niejednorodną regułą przejścia itd.), nadaje się doskonale do modelowania systemu złożonego z wielu robotów, operujących w pewnej zamkniętej przestrzeni.

W przekonaniu autorów, użycie niehomogenicznych automatów komórkowych jako dynamicznie zmieniającej się reprezentacji wiedzy o otoczeniu robota powinno mu umożliwić trafne przewidywanie możliwych zmian otoczenia, a co za tym idzie, skuteczne planowanie działania.

2. Automaty komórkowe w modelowaniu dynamiki otoczenia

2.1. Podstawy automatów komórkowych

Za twórcę idei automatu komórkowego uważa się J. Von Neumanna. Jego prace dostrzegł E.F. Codd, a po nim S. Wolfram, który w roku 1983 sklasyfikował istniejące wtedy rodzaje automatów komórkowych. Od tego czasu teoria automatów komórkowych podlegała dalszemu rozwojowi, zdobywając poczesne miejsce wśród metod służących modelowaniu zjawisk świata rzeczywistego. Ich zastosowanie można znaleźć w niemal każdej dziedzinie nauki, począwszy od modelowania zjawisk fizycznych (modele gazu FPH, HPH), licznych zastosowań w chemii (przykładowo synteza związków chemicznych) i biologii (na przykład modelowanie dynamiki populacji, modelowanie tłumy). Formalizm ten jest wykorzystywany także w badaniach geologicznych i geofizycznych (przykładowo tzw. samoorganizowalne zjawiska krytyczne), a nawet w naukach społecznych (formowanie opinii) oraz inżynierskich (kryptografia, optymalizacja ruchu miejskiego, modele sieci komputerowych itd.).

Automaty komórkowe są według definicji Ferbera *dyskretnym, dynamicznym systemem, którego zachowanie jest ściśle określone w warunkach lokalnych relacji*. Najbardziej znana definicja klasycznego automatu komórkowego opisuje go w postaci czwórki:

$$CA = (L, N, S, f) \quad (1)$$

gdzie:

- L – przestrzeń podzieloną na siatkę komórek,
- N – zbiór skończonych stanów,
- S – zbiór sąsiadów danej komórki,
- f – funkcja przejścia $f: S^n \rightarrow S$.

W ostatnich latach szczególne uznanie zdobyła grupa niehomogenicznych oraz asynchronicznych automatów komórkowych. Dla jej opisu powyższa definicja nie zawsze jest wystarczająca. Najogólniej rzecz ujmując *automat niehomogeniczny* to taki automat, który nie spełnia przynajmniej jednej z wymienionych poniżej właściwości dla każdej komórki siatki: jednakowy zbiór stanów, jednakowy zbiór reguł, jednakowy schemat sąsiedztwa, jednakowa metoda aktualizacji stanów. Natomiast *automat asynchroniczny* to taki, w którym aktualizacja stanów komórek nie przebiega jednocześnie, lecz w pewnej, zadanej kolejności.

W celu opisu szerokiej grupy niehomogenicznych i asynchronicznych automatów komórkowych w pracach [4, 5] zaproponowano definicję *ECAL*, czyli rozszerzonego automatu komórkowego:

$$ECAL = (C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f) \quad (2)$$

gdzie:

- C – zbiór komórek siatki $c \in C$,
- R_p – relacja przyległości,
- η – funkcja sąsiedztwa,
- S – zbiór stanów komórek,
- CON – zbiór konfiguracji komórek,
- r_{ext} – lokalna reguła,
- f – funkcja przejścia.

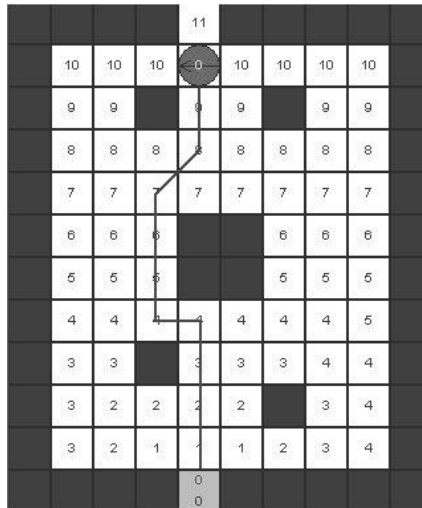
Zdefiniowany powyżej rozszerzony automat komórkowy *ECAL*, świetnie nadaje się do opisu świata z punktu widzenia robota mobilnego. Poprzednim, szeroko opisywanym, zastosowaniem tego automatu była dynamika tłumy ludzi [14, 15].

2.2. Symulacyjny i operacyjny model świata

Proces tworzenia modelu świata na potrzeby inteligentnego systemu sterowania robotem mobilnym został podzielony na dwa etapy. W pierwszym tworzony jest tak zwany *symulacyjny model świata*, który posłuży do analizy przyjętego rozwiązania. W drugim etapie model symulacyjny ulegnie niezbędnym rozszerzeniom tak, aby móc posłużyć jako model świata dla systemu działającego na konkretnej platformie sprzętowej. Model ten będzie wtedy nazywany *operacyjnym modelem świata*.

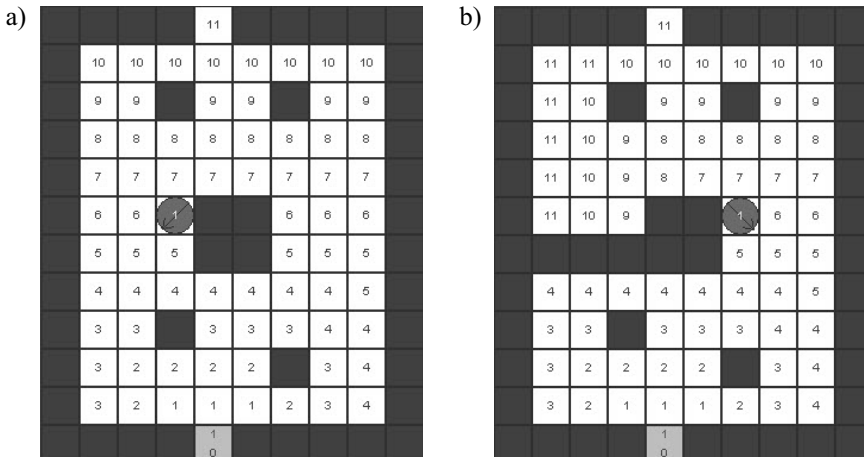
Punktem wyjścia do stworzenia symulacyjnego modelu działania robota mobilnego jest odtworzenie procesu decyzyjnego poruszających się ludzi [14]. Przyjmijmy sytuację, w której robot porusza się w przestrzeni reprezentowanej poprzez kwadratową siatkę automatu komórkowego. Aktualny cel (miejsce przestrzeni), który mobilny robot ma osiągnąć, jest traktowany jako źródło pola potencjalnego. Pole potencjalne jest propagowane na wszystkie komórki siatki. Ważną cechą omawianego modelu świata jest aktualizowanie wartości potencjału komórek siatki, należących do przestrzeni ruchu, w każdym kroku czasowym. Takie podejście pozwala na uwzględnienie dynamicznych zmian w świecie. Rozważmy następujący przypadek, w którym jeden robot porusza się wzdłuż gradientu pola potencjalnego, aby osiągnąć wyjście z pomieszczenia. Zdefiniowana tu funkcja kosztu uwzględnia, jako jedyne, kryterium odległości (w rozpatrywanej przestrzeni metrycznej).

Na rysunku 1 przedstawiony jest widok aplikacji symulującej poruszanie się robota po siatce automatu komórkowego. Robot reprezentowany poprzez koło umieszczone w komórce siatki porusza się w celu osiągnięcia zadanego celu (jaśniejsza komórka w dole zdjęcia), zgodnie z gradientem pola potencjalnego.



Rys. 1. Widok aplikacji. Robot reprezentowany w postaci koła, kierując się gradientem pola potencjalnego, osiąga jaśniejsze pole (o wartości gradientu 0) widoczne u dołu zdjęcia

W przypadku dynamicznym gradient pola potencjalnego musi być przeliczany w każdym kroku algorytmu. Rozważmy sytuację, w której robot doszedł w okolice środka plan-szy (rys. 2a) i nagle przed nim pojawiła się przeszkoda. W takiej sytuacji następuje ponowne przeliczenie wartości pola potencjalnego. W wyniku tej operacji robot zmienia swoją trasę tak, by nowo powstałą przeszkodę ominąć i dotrzeć do celu (rys. 2b).

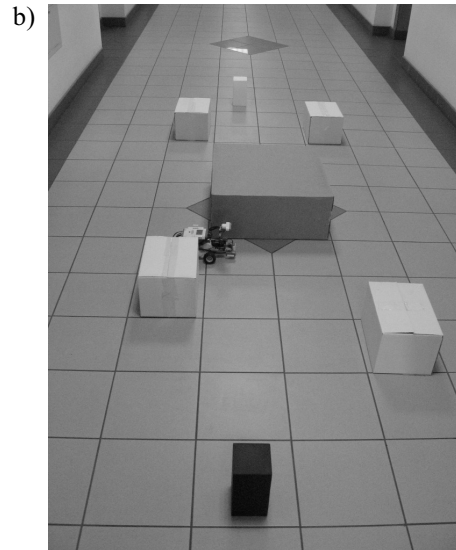


Rys. 2. Dynamiczne ustalanie marszruty: a) droga robota zostaje zagrodzona; b) robot rusza do celu wzdłuż aktualnie wyznaczonego gradientu potencjału

W prezentowanym podejściu *operacyjnym modelem świata* jest automat komórkowy rozszerzony o możliwość aktualizacji stanu wybranych komórek w czasie rzeczywistym. Aktualizacje te są wprowadzane przez system sterujący robotem na podstawie obserwacji otoczenia. Robot ma też możliwość symulacyjnej predykcji zachowania otoczenia w oparciu o reguły zapisane w automacie komórkowym oraz wybrania takiego wariantu zachowania, który okaże się najkorzystniejszy w perspektywie czasowej objętej symulacją.

2.3. Prace nad realizacją algorytmu

Realizacja naszkicowanego powyżej hierarchicznego algorytmu sterującego wymaga stworzenia odpowiedniego oprogramowania działającego na wybranej platformie sprzętowej. W chwili obecnej istnieje kilka przetestowanych prototypów realizacji sprzętowej skonstruowanych w oparciu o zestaw Lego Mindstorms NXT (rys. 3). Ich konstrukcja wraz z implementacją prostych algorytmów sterujących ma na celu pomóc w rozwiązaniu szeregu praktycznych problemów związanych ze sterowaniem robotem mobilnym. W testach do reprezentacji środowiska użyto automat komórkowy, za pomocą którego dobrano optymalną drogę ruchu robota. Wykonane testy dotyczą zarówno sytuacji, w której środowisko pozostaje statyczne, jak i sytuacji, w której środowisko zmienia się dynamicznie (zmiana położenia przeszkód w trakcie pracy robota). Zostały też rozpoczęte prace implementacyjne zmierzające do konstrukcji w pełni funkcjonalnego systemu inteligentnego sterowania wykorzystującego wiedzę zapisaną w postaci automatu komórkowego.



Rys. 3. Robot NXT (a); robot w trakcie pokonywania drogi od białego prostopadłościanu widocznego na górze zdjęcia do czarnego prostopadłościanu widocznego na dole zdjęcia (b)

3. Podsumowanie

Istotnym elementem architektury systemu inteligentnego sterowania jest sposób przedstawiania informacji o świecie oraz algorytmy, które tę wiedzę wykorzystują. Tym ważniejsze staje się poszukiwanie takich metod reprezentacji wiedzy, które z jednej strony jak najdokładniej opisują postawiony problem, a z drugiej oferują możliwość implementacji efektywnych algorytmów. W tym kontekście wykorzystanie nowej klasy niehomo-genicznych, asynchronicznych automatów komórkowych jako jednej z dostępnych reprezentacji wiedzy o przestrzeni ruchu robota wydaje się ciekawym i wartym dalszych prac pomysłem.

W pracy została przedstawiona jedna z testowych realizacji platformy sprzętowej, wykonana w oparciu o Mindstorms NXT [8] wraz z prostym, testowym algorytmem sterującym. Konstrukcja ta ma pomóc w rozwiązaniu szeregu praktycznych problemów związanych z implementacją proponowanej architektury. W chwili obecnej trwają prace nad budową docelowego systemu, zgodnego z zaproponowanym modelem architektonicznym, na platformie Mindstorms NXT. Na dalszym etapie prac przewidywane jest wykorzystanie jako platformy sprzętowej dla konstruowanego systemu robota kroczącego Hexor II [11].

Literatura

- [1] Ambroszkiewicz S., *Reprezentacja przestrzenna środowiska na podstawie kognitywnych map obiektowych*. Rozdział [w:] Postępy robotyki: Systemy i współdziałanie robotów, Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Tchonia, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2006.
- [2] Behring C., Bracho M., Castro M., Moreno J.A., *An Algorithm for Robot Path Planning with Cellular Automata C. Behring*. ACRI 2000, Springer-Verlag.
- [3] Cai A., Fukuda T., Arai, F., *Information sharing among multiple robots for cooperation in cellular robotic system*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, vol. 3, 1997.
- [4] Dudek-Dyduch E., Wąs J., *Formalizacja automatów komórkowych w zagadnieniach dynamiki pieszych*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 9, z. 3, 2005.
- [5] Dudek-Dyduch E., Wąs J., *Knowledge representation of Pedestrian Dynamics in Crowd. Formalism of Cellular Automata*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 4029, 2006.
- [6] Dechter R., Pearl J., *Generalized best-first search strategies and the optimality of A**. Journal of the ACM 32 (3), 1985.
- [7] Garzon M., *Models of Massive Parallelism*. Berlin, Springer 1995.
- [8] Lego: *Lego Mindstorms*. <http://mindstorms.lego.com/>, 2008.
- [9] Murphy R.R., *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, 2000, ISBN 0-262-13383-0.
- [10] Russel S.J., Norvig P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 1995, 2003, ISBN: 9780137903955.
- [11] Stenzel: *Projekt Hexor*. <http://www.stenzel.com.pl>, 2008.
- [12] Thrun S., *Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation*. Artificial Intelligence, 99(1), 1998.
- [13] Wolfram S., *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore, World Scientific 1986.

- [14] Wąs J., Gudowski B., *Simulation of strategical abilities in pedestrian movement using Cellular Automata*. Proceedings of 24th IASTED Modeling, Identification, Control Conference, Innsbruck, 2005.
- [15] Wąs J., Gudowski B., Matuszyk P.J., *Social Distances Model of Pedestrian Dynamics*. International Conference on Cellular Automata For Research & Industry, Perpignan, France, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4173, 2006.
- [16] Yeap W.K., Jefferies M.E., *Computing a Representation of the Local Environment*. Artificial Intelligence, 107(2), 1999.