

dr Barbara Siemiątkowska
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Politechnika Warszawska
mgr inż. Rafał Chojecki, Maciej Zajac
Politechnika Warszawska

SYSTEM NAWIGACYJNY ROBOTA MOBILNEGO ELEKTRON

W poniższym artykule omówiony zostanie system nawigacyjny robota mobilnego ELEKTRON. Przedstawiony algorytm umożliwi przemieszczanie się robota w nieznanym otoczeniu typu wnętrze. System składa się z następujących modułów tworzenie rastrowej mapy otoczenia na podstawie wskazań dalmierza laserowego, lokalizacja planowanie, bezkolizyjnej trasy. Istotną częścią omawianego algorytmu jest zastosowanie sieci komórkowych w procesie generowania trasy i wykorzystanie informacji o otoczeniu w procesie określania optymalnych sterowań – prędkości liniowej i kątowej.

THE NAVIGATION SYSTEM OF A MOBILE ROBOT ELEKTRON

In this paper a method of mobile robot navigation in an unknown indoor environment is presented. The robot is equipped with a laser range finder. The data of the 2D scanner are used to build the dual grid-based and feature-based map of an environment. Particle filters method is used for localization. The obstacles-free path is generated using cellular neural network. The method has been tested with the use of mobile robot ELEKTRON.

1. WSTĘP

Od początku lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku obserwujemy gwałtowny rozwój robotyki. Urządzenia zautomatyzowane są powszechnie wykorzystywane do wykonywania zadań, które są dla człowieka zbyt niebezpieczne (transport ładunków wybuchowych), żmudne (transport ciężkich ładunków), monotonne (odkurzanie dużych powierzchni) lub tam, gdzie wymagana jest duża precyzja i powtarzalność – montaż, malowanie itp. Rozwój automatyzacji jest możliwy dzięki trzem podstawowym czynnikom:

- rozwojowi technologii wytwarzania różnego rodzaju układów sensorycznych – dalmierzy laserowych, sonarów, kamer itp.
- wzrostowi możliwości obliczeniowych komputerów
- rozwojowi systemów komunikacyjnych.

Powszechnie stosowane przemysłe roboty są zwykle programowane w ten sposób, aby mogły wykonywać te same powtarzające się czynności. Od lat osiemdziesiątych dwudziestego zaczęto coraz częściej wprowadzać autonomiczne roboty mobilne.

Możliwość przemieszczania się znacznie zwiększa zakres zastosowań tych urządzeń, a wyposażenie w układy sensoryczne i stosowanie algorytmów sztucznej inteligencji umożliwia maszynom podejmowanie działań w sposób autonomiczny i dostosowanie do zmian zachodzących w środowisku. Robot powinien posiadać zdolność przemieszczania się, obserwowania i analizowania otoczenia w którym się znajduje i wykonywania działań. Jednym z ważniejszych zadań robotyki mobilnej jest rozwijanie systemów nawigacyjnych, które zwykle zawierają trzy podstawowe moduły:

- *budowa reprezentacji środowiska* – robot zbiera dane pomiarowe pochodzące z zewnętrznych układów sensorycznych np. dalmierzy laserowych, sonarów kamer itp. i na podstawie otrzymanych informacji buduje mapę otoczenia,
- *lokalizacja* – analizując dane pomiarowe i utworzoną mapę robot określa swoje położenie. Problem lokalizacji jest znanym zagadnieniem w historii ludzkości. Pierwsze systemy nawigacyjne, wykorzystujące metody korelacji danych i triangulacji zbudowali Fenicjanie. Pomimo, że zagadnienie to jest badane od lat, jest ono ciągle otwarte. Podstawową trudnością w pełnym rozwiązaniu problemu jest to, że na podstawie niedokładnej informacji (otrzymanej z sensorów robota) o położeniu przeszkód i obarczonych błędem danych o położeniu i orientacji pojazdu pochodzących z czujników wewnętrznych (odometrii), należy zbudować dokładną mapę otoczenia w czasie rzeczywistym bez konieczności zatrzymywania pojazdu.
- *planowanie działań* – robot po przekazaniu mu zadania powinien zaplanować optymalną kolejność działań. Typowym zagadnieniem robotyki mobilnej jest generowanie trasy do zadanego punktu i dotarcie do celu w możliwie krótkim czasie. Inne zadania to: przeszkanie pomieszczenia, rozpoznanie środowiska, wyszukanie zadanego obiektu, koordynacja pracy grupy robotów.

Opisany powyżej schemat przypomina działanie organizmów żywych. Ze względu na odporność systemów biologicznych na uszkodzenia oraz ich zdolność do uczenia się, naśladowanie ich w robotyce może być szczególnie użyteczne i warto projektować układy, które umożliwią wykonywanie wymienionych powyżej zadań przez elementarne jednostki obliczeniowe w sposób równoległy. W informatyce takimi układami są np. neuronowe sieci komórkowe (CNN)[1], które są wzorowane na działaniu siatkówki oka i dlatego są wykorzystywane w procesie przetwarzania obrazów. W systemach nawigacyjnych robotów mobilnych wykorzystywane są rzadko. W poniższej pracy przedstawiono oryginalne architektury sieci komórkowych, które umożliwiają planowanie działań dla pojedynczego pojazdu.

2. SPRZĘT

Baza jezdna robota jest sześciokołową platformą mobilną z napędem na wszystkie koła o wymiarach 500x380x220 mm (rys. 1). Kadłub robota został wykonany z aluminium i całkowicie osłania wszystkie elementy układu sterowania i zasilania. Zastosowany w robocie układ napędowy jest typu czołgowego: skręcanie odbywa się przez różnicowanie prędkości kół po prawej i lewej stronie robota. Do napędu pojazdu zastosowano dwa silniki prądu stałego o nominalnym napięciu zasilania 24 V, ze zintegrowanymi przekładniami.

Komputer pokładowy wraz z modułami sterującymi został umieszczony nad układem napędowym. W tylnej części robota, znajduje się panel sterowania zintegrowany z układem zasilania. Panel jest wyposażony w przełączniki odpowiedzialne za włączanie poszczególnych obwodów robota oraz aktywację napędów.

Źródłem zasilania robota są dwa połączone szeregowo akumulatory 12 V umieszczone w kadłubie lub zewnętrzny zasilacz o napięciu 24 V. Układ zasilania wyposażony został w przetwornice, dzięki którym na pokładzie robota dostępne są napięcia 5 V, 12 V i 24 V.

Robot ELEKTRON jest wyposażony w kilka niezależnych układów sensorycznych. Do podstawowych należą: układ pomiaru odometrycznego, inklinometry i opcjonalnie instalowane kompasy elektroniczne. Dodatkowo robot został wyposażony w skaner laserowy SICK LMS 200. Układ pomiaru odometrycznego składa się z dwóch przetworników obroto-

wo-impulsowych (enkoderów optycznych) umieszczonych w module napędowym. Zastosowano dwufazowe enkodery o rozdzielczości 1000 impulsów na obrót. Pomiar prędkości obrotowej odbywa się bezpośrednio na osiach kół.

Podstawowym elementem układu sterowania jest główny komputer pokładowy, zarządzający pracą całego systemu oraz realizujący wszystkie funkcje sterowania wysokiego poziomu. Wykorzystano tu jednopłytkowy komputer PCM-9579 EBX firmy Advantech. Jest to komputer z procesorem Celeron 650MHz, przeznaczony do zastosowań wbudowanych, wyposażony we wszystkie typowe elementy komputera klasy PC takie jak: grafika, dźwięk, Ethernet, sterowniki napędów dyskowych, porty równoległe i szeregowo RS-232, magistrala PCI. Dodatkowo komputer posiada magistrale PC-104 i PC-104+, magistralę RS-485, złącze pamięci Compact Flash pracującej w trybie IDE. Magistrale PC-104 i PC-104+, będące standardem dla komputerów wbudowanych umożliwiają łatwą rozbudowę i modyfikację układu sterowania przez dokładanie kart rozszerzeń.



Rys. 1. Robot ELEKTRON wyposażony w skaner laserowy

Bezpośrednie sterowanie wszystkich elementów wykonawczych robota (silniki, czujniki, itp.), a także wykrywanie i obsługa sytuacji awaryjnych są realizowane przez specjalizowany mikrokomputer sterujący. Jest on zbudowany na bazie mikrokomputera jednoukładowego firmy Atmel T89C51AC2, 8-bitowego układu rodziny MCS-51. Mikrokomputer ten, charakteryzujący się niskim zużyciem energii. Komunikacja mikrokomputera z głównym komputerem sterującym odbywa się za pomocą magistrali PC-104 komputera. Jedną z funkcji mikrokomputera sterującego jest sterowanie silnikami napędowymi robota (regulacja prędkości lub położenia). Do tego celu wykorzystano scalone regulatory PID.

Zadanie regulacji (pozycja zadana, prędkość zadana, przyspieszenie) oraz parametry regulatora (wzmocnienia wszystkich członów, częstotliwość próbkowania, ograniczenie wartości członu całkowitego) są przekazywane programowo.

3. REPREZENTACJA OTOCZENIA

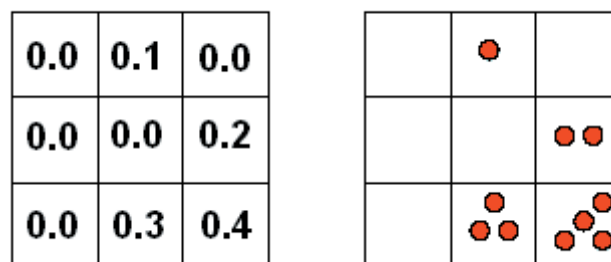
W opisywanej metodzie zastosowano dualną rastrowo-obiektową reprezentację sceny [2]. Otoczenie robota jest dzielone na regularne podobszary (kwadraty o boku 10 cmx10 cm). Każdemu podobszarowi odpowiada pewna komórka prostokątnej tablicy. W przeciwieństwie do klasycznej rastrowej reprezentacji, komórki mapy przechowują nie tylko wartości liczbowych określające stopień potwierdzenia hipotezy, że obszar odpowiadający danej komórce jest zajęty przez przeszkody, ale dodatkowo informację o rodzaju obiektu (fragment ściany, walec, obiekt nieregularny). Sieci komórkowe, które umożliwiają wykrywanie cech otoczenia i agregację danych zostały opisane w [2], [3]. Informacja o obiektach jest wykorzystywana w procesie lokalizacji pojazdu. Planowanie bezkolizyjnej trasy odbywa się na podstawie mapy rastrowej.

4. LOKALIZACJA ROBOTA

Aby robot mógł budować map otoczenia i mógł bezkolizyjnie się przemieszczać powinien znać swoje położenie w przyjętym globalnym układzie współrzędnych. W procesie lokalizacji zastosowano znaną z literatury [4] metodę filtrów cząsteczkowych. W przypadku filtrów cząsteczkowych położenie robota w chwili t jest opisywane przez zbiór cząstek $S^t = \{ x^i_t, w^i_t \}$ $i=1, \dots, N$. Każda cząstka reprezentuje pewne możliwe chwili t położenie robota i wagę określającą przekonanie, że robot może się w danym punkcie znajdować. Rozkład cząstek odzwierciedla rozkład funkcji gęstość prawdopodobieństwa, że robot znajduje się w pewnym obszarze przestrzeni. Rys. 2 przedstawia ideę opisywanej metody. Na rys. 2a) przedstawiono rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa, a na rys. 2b) odpowiadający mu układ cząstek.

Algorytm określania położenia robota składa się z następujących etapów:

- wartości x^i_t są możliwymi położeniami robota. Rozkład punktów odzwierciedla rozkład niepewności położenia robota. Wagi w^i_t określają stopień potwierdzenia hipotezy, że robot w chwili t jest w danym obszarze przestrzeni.,
- w kolejnych krokach na podstawie wskazań czujników odometrycznych – wartości u_t , dla każdej cząstki określane są przybliżone wartości x^i_{t+1} . Następnie dla każdej wartości x^i_{t+1} obliczany jest współczynnik dopasowania w^i_{t+1} . Współczynnik ten określa na ile przewidywane położenie cech otoczenia różni się od położenia obserwowanego w danym punkcie,
- wagi są normalizowane,
- określany jest nowy rozkład cząstek.



Rys. 2. Rozkład cząsteczek

Z każdą cząstką wiązana jest mapa otoczenia robota, w procesie planowania trasy przyjęto, że położenie robota jest określane przez cząsteczkę o największym znormalizowanym współczynnikiem dopasowania. Ilość wygenerowanych cząsteczek jest silnie zależna od niedokładności wskazań odometrii. W przypadku robota ELEKTRON błąd określania zmiany orientacji jest bardzo duży dane z odometrii są dodatkowo korygowane na podstawie informacji o globalnych cechach otoczenia np. kierunkach głównych [5].

5. PLANOWANIE BEZKOLIZYJNE ŚCIEŻKI

W praktycznych zastosowaniach robotów mobilnych pojazd oprócz planowania i realizowania trasy powinien wykonać także szereg innych zadań np. inspekcyjnych. Warto więc stworzyć system planowania trasy, który mógłby być realizowany sprzętowo i nie obciążał robota.

W systemach nawigacyjnych robotów mobilnych w procesie planowania bezkolizyjnej trasy najczęściej stosowana jest jedna z trzech metod:

- metoda histogramów kątowych [6], która umożliwia generowanie gładkiej bezkolizyjnej trajektorii w czasie rzeczywistym, ale w pewnych sytuacjach nie generuje drogi do celu,
- metoda potencjałów [7] w której obliczane jest pole sił oddziaływujących na robota i zakłada się, że robot jest przyciągany przez cel i odpychany przez przeszkody. W algorytmie tym można określić zakres oddziaływania przeszkód, ale podobnie jak w metodzie histogramów występują problemy minimów lokalnych.
- Metoda rozchodzenia się fali [8] w której cel jest źródłem rozchodzenia się energii. Jeśli komórka otrzymuje energię to przekazuje ją komórkom sąsiednim, proces jest kontynuowany, aż do momentu dotarcia do komórki reprezentującej położenie robota, W metodzie tej komórki odpowiadające podobszarom zajęтым przez przeszkody energii nie otrzymują. W algorytmie tym nie występują minima lokalne, ale wygenerowana trasa przebiega zwykle zbyt blisko przeszkód.

Idealnym narzędziem w procesie planowania trasy są sieci komórkowe(CNN), które mogą być realizowane przy pomocy układów elektronicznych i jednocześnie umożliwiają stworzenie takiego algorytmu planowania trasy który ma zalety metody potencjałowej - możliwość uwzględniania zakresu oddziaływania przeszkód na robota i jednocześnie nie posiada minimów lokalnych.

Komórkowe sieci neuronowe są opisywane w literaturze [1]. Schemat działania systemu wykorzystujący CNN 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:

- Inicjalizacja sieci:

Ustalane są wartości wag połączeń między poszczególnymi komórkami sieci:

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

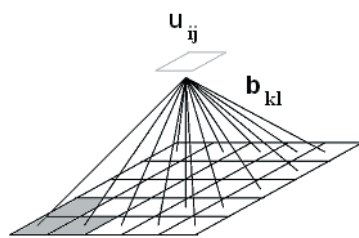
gdzie a_{ij}^{kl} waga łącząca komórkę x_{ij} z x_{kl} , a c_{ij} odpowiednia komórka mapy.

- Ustalenie wartości sygnałów zewnętrznych, wartości te określają zakres i siłę oddziaływania przeszkód na robota. Sposób określenia wartości sygnałów zewnętrznych u_{ij} przedstawia rys. 2. Wartość sygnału u_{ij} jest ważoną sumą wartości liczbowych określających stopień potwierdzenia hipotezy, że podobszary reprezentowane przez komórki mapy są zajęte przez przeszkody. Wartość sygnału u_{ij} zależy od zakresu oddziaływania przeszkód i odległości przeszkody od obszaru reprezentowanego przez daną komórkę.
- Ustalenie początkowej wartości komórek:

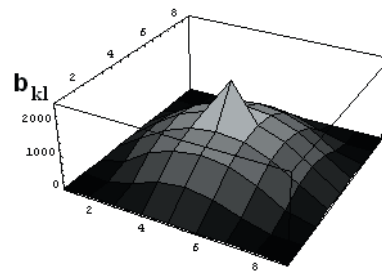
$$x_{ij}(t) = \begin{cases} T & \text{gdy } c_{ij} \text{ reprezentuje cel,} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \quad (3)$$

- Proces dyfuzji, stan komórki w chwili $t+1$ obliczany jest zgodnie ze wzorem:

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



Rastrowa mapa otoczenia



a)

b)

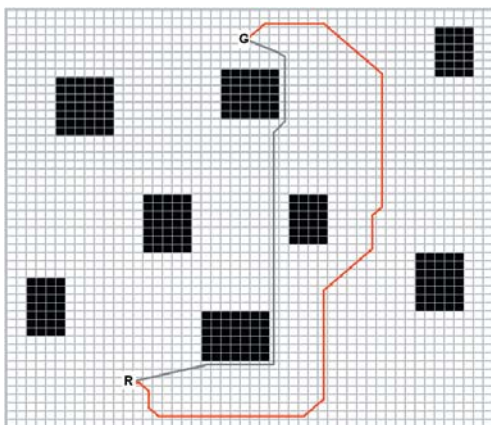
Rys. 3. Sposób określania oddziaływania przeszkód:

a) sygnały pochodzące od mapy, b) układ wag

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

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

Jeśli położenie robota jest reprezentowane przez komórkę c_{ij} to następne położenie jest wskazane przez komórkę c_{kl} , która posiada maksymalne pobudzenie. Na rys. 4 przedstawiono rastrową mapę otoczenia, komórki reprezentujące obszary zajęte przez przeszkody zaznaczone są czarnymi kwadratami, położenie robota oznaczono literą R , a celu literą G . Czarną linią zaznaczono trasę wygenerowaną przy pomocy opisywanej metody wykorzystującej sieci komórkowej, a szarą linią trasę wygenerowaną przy pomocy klasycznej metody rozchodzenia się fali.



Rys. 4. Porównanie metody rozchodzenia się fali z metodą wykorzystującą CNN i uwzględniającą siłę odpychania od przeszkód

6. METODA DYNAMICZNEGO OKNA

Prędkość kątowna i liniowa jest generowana przy pomocy zmodyfikowanej metody dynamicznego okna. W metodzie dynamicznego okna poszukiwanie optymalnych sterowań odbywa się w przestrzeni wyznaczonej przez prędkości liniowe i kątowe robota (v, ω). Przestrzeń poszukiwań jest zredukowana do wartości, które mogą zostać osiągnięte przy danych ograniczeniach dynamiki pojazdu i ograniczeń przyspieszenia liniowego i kątowego. Kolejne ograniczenia zakresu dopuszczalnych prędkości są spowodowane występowaniem w otoczeniu robota przeszkód. Przyjmujemy, że prędkości powinny być tak dobrane, aby robot mógł zatrzymać się przeszkodą w ciągu czasu Δt .

W pracy [9] jako optymalne prędkości w chwili $t+1$ przyjmujemy dopuszczalne wartości $(v(t+1), \omega(t))$, dla których funkcja $G(v(t+1), \omega(t))$, określona równaniem:

$$G(v, \omega) = \alpha \cdot h(v, \omega) + \beta \cdot dist(v, \omega) + \gamma \cdot vel(v, \omega) \quad (6)$$

osiąga maksimum gdzie:

$h(v, \omega)$ - określa w jakim stopniu robot zbliża się do celu i jest maksymalna, gdy robot jedzie na wprost celu,

$dist(v, \omega)$ - jest odległością trasy wyznaczonej przez dane prędkości od najbliższej przeszkody,

$vel(v, \omega)$ - wartość tej funkcji jest tym większa im większa jest prędkość liniowa pojazdu.

Parametry α, β, γ określają wpływ funkcji składowych na wartość funkcji $G(v, \omega)$.

W opisywanej w tej pracy metodzie funkcja $G(v, \omega)$ została określona następująco:

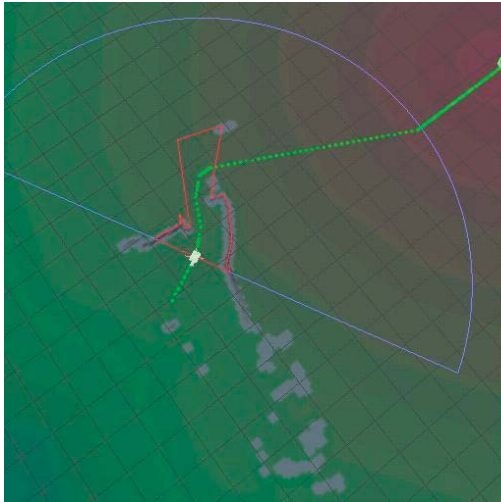
$$G(v, \omega) = \alpha \cdot h(v, \omega) + \beta \cdot diff(v, \omega) \quad (7)$$

$h(v, \omega)$ - jest maksymalna, gdy robot jedzie na wprost komórki o maksymalnym pobudzeniu,

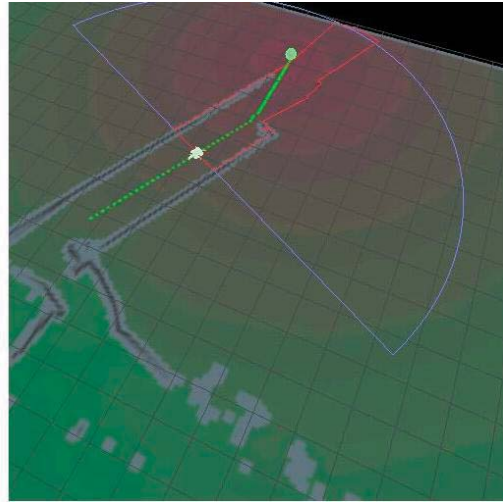
$diff(v, \omega)$ - jest różnicą między pobudzeniem komórki, która reprezentuje podobszar w którym znajdzie się robot w chwili $t+1$ przy sterowaniach (v, ω) , a pobudzeniem komórki reprezentującej położenie robota w chwili t . Ponieważ procesie dyfuzji uwzględniona jest informacja o odpychaniu robota przez przeszkody to funkcja $dist(v, \omega)$ może być pominięta.

7. EKSPERYMENTY

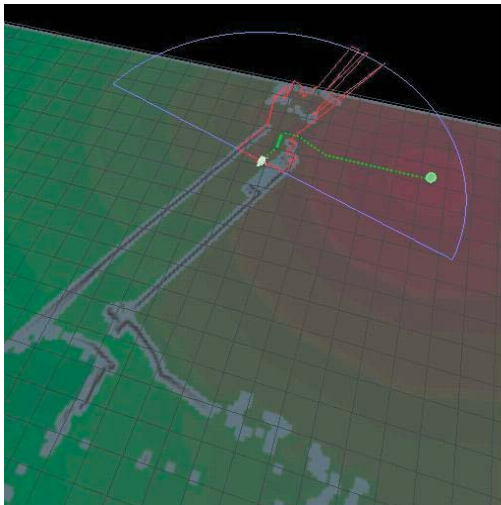
Eksperymenty były prowadzone w pomieszczeniach wydziału Mechatroniki PW. Zadaniem dla robota było stworzenie mapy otoczenia oraz zaplanowanie trasy i dojazd do wyznaczonego celu. W procesie lokalizacji położenie robota reprezentowane było przez 200 cząstek, wskazania odometrii zostały uzupełnione o informacje o kierunkach głównych otoczenia. W procesie planowania trasy wybierano cząsteczkę o maksymalnej wadze. Na rys. 5a) - 5e) przedstawiono etapy tworzenia mapy, generowania bezkolizyjnej trasy i położenie robota.



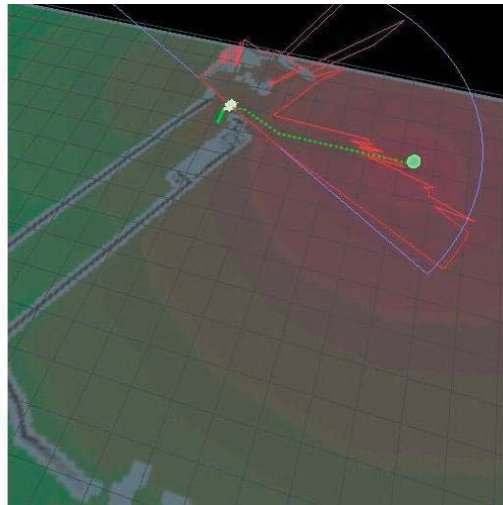
a)



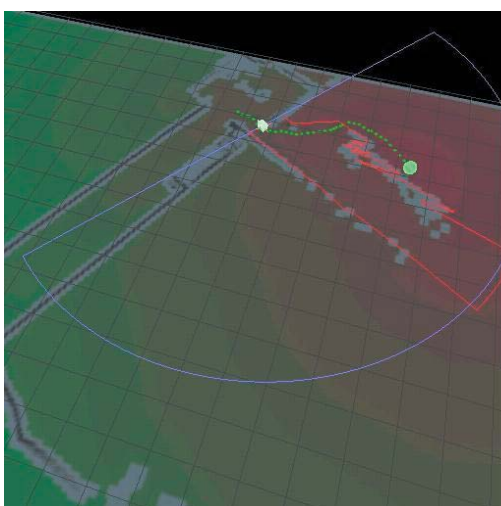
b)



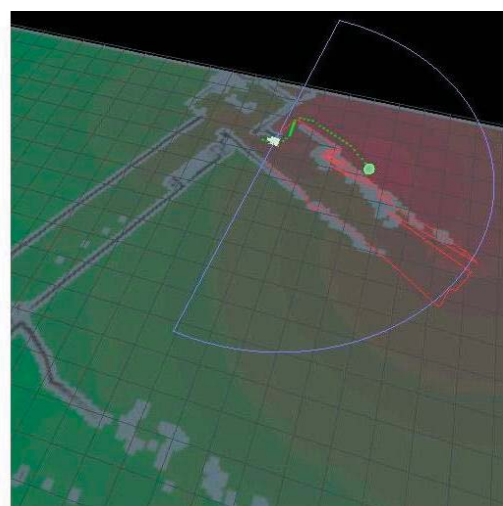
c)



d)



e)



f)

Rys. 5. Etapy tworzenia mapy i planowania bezkolizyjnej trasy

Czarnymi punktami zaznaczono wykryte przeszkody, fioletowe obszary określają pola w których uwzględniany jest wpływ przeszkód na zachowanie robota. Zaplanowaną trasę oznaczono zieloną linią, a położenie robota reprezentowane jest przez białą prostokąt.

8. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono system nawigacyjny robota mobilnego *ELEKTRON RI*. Przeprowadzone w otoczeniu typu wnętrze eksperymenty wykazują, że połączenie dualnej: rastrowo-objektowej reprezentacji otoczenia i zastosowanie sieci komórkowych w procesie planowania ścieżki umożliwi robotowi bezkolizyjne przemieszczanie się pojazdu przez dłuższy czas. Konstrukcja umożliwi przemieszczanie się pojazdu na zewnątrz budynków, dlatego w przyszłości planuje się stworzenie systemu, który umożliwi tworzenie dualnej reprezentacji 3D i generowanie bezkolizyjnej trasy w przestrzeni 3D.

Przedstawione w powyższym artykule prace były finansowane z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 1525/T11/2005/29.

LITERATURA

- 1 L. Chua, L. Young, Cellular Neural Network, *IEEE Transaction on Circuit System*, pp. 500-505, 1990
- 2 B. Siemiątkowska, Zastosowanie transformacji Hougha do tworzenia mapy i lokalizacji robota mobilnego, *Krajowa Konferencja Robotyki*, str. 371-380, 2006
- 3 A. Dubrawski., B. Siemiątkowska.: "A Neural Method for Self-Localization of a Mobile Robot Equipped with 2D Scanning Range Finder", Proc. of International Workshop on Intelligent Robotics Systems'97, Sweden, pp. 23-31, 1997
- 4 D. Fox , W. Burgard, S. Thrun , Probabilistic robotics, 2004
- 5 B. Siemiątkowska , Hybrydowa reprezentacja otoczenia robota mobilnego, *Pomiary, Automatyka Robotyka*, vol. 3, CD-ROM , 2007
- 6 J. Borenstein, Y. Koren, Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 7, pp. 1179-1187, 1989
- 7 K. A. Konolige, Gradient Method for Realtime Robot Control, *IROS*, pp. 639--646, 2000
- 8 O. Khatib, Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *International Journal of Robotics Research*, vol. 1, pp. 90-98, 1992
- 9 D. Fox , W. Burgard, S. Thrun , The dynamic window approach to collision avoidance, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 4 , pp. 23-33, 1997