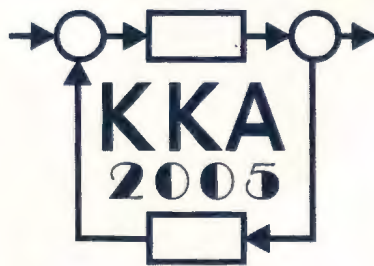


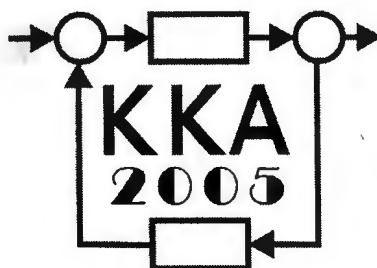
XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II



**Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk**

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-01-4

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

ROBOTY

NOWE KRYTERIUM PRZESZUKIWANIA W METODZIE BAZUJĄCEJ NA ALGORYTMIE PRM*

Artur BABIARZ

Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki,
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: Artur.Babiarz@polsl.pl

Streszczenie: W prezentowanej pracy przedstawiono propozycję nowego podejścia do planowania ruchów robotów, w szczególności manipulatorów, z zastosowaniem metody bazującej na algorytmie PRM oraz RRT. Ponadto przedstawiono pewne szczególne przypadki, w których może nastąpić zatrzymanie algorytmu i wykonywania dalszych obliczeń. W pracy przedstawiono również przykłady dla manipulatorów w przestrzeni 2D i 3D.

Słowa kluczowe: Planowanie ruchów, algorytm PRM, RRT, bezkolizyjna trajektoria.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się bardzo duże zainteresowanie algorytmami, które pozwalałyby na automatyczne planowanie ruchów, zarówno manipulatorów, jak i robotów mobilnych. Naukowcy zajmujący się grafiką komputerową i rzeczywistością wirtualną poszukują efektywnych metod do odwzorowywania rzeczywistych zachowań postaci oraz innych obiektów. Pojawiający się w tym miejscu problem opisu geometrycznego modelu spowodował wykorzystywanie dotychczasowych metod w biologii i genetyce, gdzie wykorzystuje się ten opis do dokowania białek i projektowania leków.

Wszystkie wymienione wyżej problemy wiążą się z przemieszczeniem pewnego obiektu z położenia początkowego do końcowego z pewnymi ograniczeniami na ruch (np. czas). W przypadku planowania ruchów manipulatora należy przeprowadzić jego element wykonawczy z konfiguracji początkowej q_s do konfiguracji końcowej q_g . Wynikiem tej operacji jest wyznaczenie trajektorii, która pozwoli nie tylko osiągnąć konfigurację końcową, q_g , ale także ominąć stacjonarne lub dynamiczne przeszkody.

Najczęściej, oprócz wyżej wymienionych wymagań dotyczących unikania kolizji, żąda się, aby dana trajektoria była optymalna ze względu na czas, zużyta energię lub drogę, jaką wykonuje końcówka wykonawcza manipulatora. Najdogodniejszym rozwiązaniem dla użytkownika byłoby zadanie układowi robota pożądanego punktu docelowego ruchu i pozostawienie układowi określenie liczby i położenia punktów pośrednich po-

trzebnych do osiągnięcia celu bez uderzenia manipulatora o przeszkodę. Do wykonania takiego zadania układ powinien dysponować modelem manipulatora, opisem geometrycznym przestrzeni roboczej, członów manipulatora i chwytaka oraz algorytmami wykrywania kolizji. W obecnym czasie jest znanych wiele metod planowania bezkolizyjnych trajektorii manipulatorów. Do najbardziej rozpowszechnionych należą metody oparte na:

1. sztucznych polach potencjałów,
2. zadaniu programowania dynamicznego,
3. funkcji kary,
4. losowej mapie dróg.

Powyższe metody można podzielić na dwie grupy różniące się informacją niezbędną do przeprowadzenia obliczeń. Niektóre z nich wymagają znajomości pełnego modelu kinematycznego i dynamicznego robota, a pozostałe opierają się tylko na znajomości podstawowych równań kinematyki. Szczegółowy opis i przykłady dotyczące metod bazujących na programowaniu dynamicznym i funkcji kary można znaleźć w [7, 15]. Bardzo interesującą grupę stanowią metody losowe. Można w niej wyróżnić:

1. PRM – Probabilistic RoadMap,
2. RRT – Rapidly-exploring Trees.

2. METODY LOSOWE

Głównym powodem powstania metod opierających się na losowym generowaniu kolejnych położenia w przestrzeni roboczej robota były wady szeroko stosowanej metody sztucznych pól potencjału [15]. Pierwsze kroki mające na celu wykorzystanie losowości w zadaniu planowania ruchów manipulatora przedstawiono w [5]. Przedstawiona metoda eliminowała wadę metody pól potencjałów, która polegała na możliwości ugrzęźnięcia w lokalnych minimach. W pracy [5] zastosowano próbę losowych „ucieczek” z lokalnego minimum. Następnie zauważono, że można zrezygnować całkowicie z pól potencjałów i zastosować powstałe algorytmy do robotów o bardzo dużej liczbie swobody n ($n \gg 6$). Kolejne badania doprowadziły do powstania metody PRM (Probabilistic RoadMap).

*Praca finansowana z BK-234/Rau-1/05 t.2.

2.1. Mapa dróg

Podstawą do powstania PRM była zaproponowana w [12] mapa dróg, z tą różnicą, że do budowy mapy zastosowano losową metodę generacji kolejnych miejsc, do których robot ma być doprowadzony [9,10]. PRM polega na losowym wygenerowaniu określonej liczby „wierzchołków” w wolnej od przeszkód przestrzeni roboczej. Następnie dokonuje się sprawdzenia, czy jest możliwość połączenia danych wierzchołków powstałej sieci oraz czy dany wierzchołek nie jest w tak zwanym niebezpiecznym regionie. Do tego celu wykorzystuje się wagę $w(x)$, dokładny opis można znaleźć w [8]. W ten sposób otrzymuje się mapę dróg, którą się przeszukuje od punktu startowego do końcowego w zależności od odległości między parą sąsiednich położeń (rys. 1):

$$N_c = \left\{ \tilde{c} \in N \mid D(c, \tilde{c}) \leq \max dist \right\}, \quad (1)$$

gdzie:

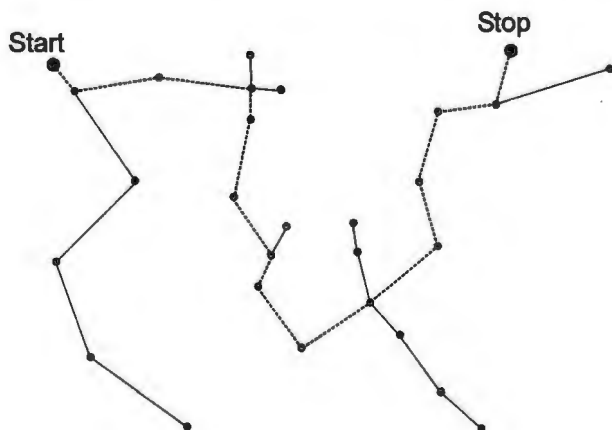
$$D(c, \tilde{c}) = \|c - \tilde{c}\|,$$

c – aktualne punkt,

\tilde{c} – punkt sąsiedni,

$\| \cdot \|$ – metryka euklidesowa.

W literaturze jest przedstawionych kilka sposobów przeszukiwania mapy dróg. W pracy [17] traktuje się powstałą sieć, jako graf niekierowany, a w [6] stosuje się algorytm A* do połączenia konfiguracji początkowej z końcową. Wybór kolejnych wierzchołków mapy jest uwarunkowany metryką, przegląd możliwych do zastosowania metryk i ich efektywność przedstawiono w [2].

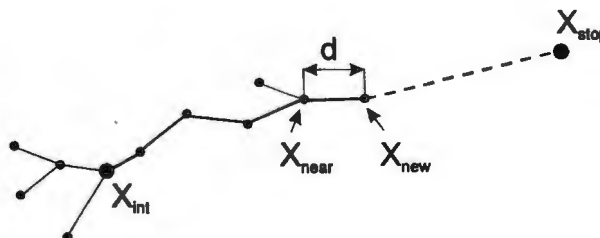


Rys. 1. Metoda PRM.

Problem w metodzie opartej na algorytmie PRM pojawił się w przypadku, gdy kolejne położenia znajdowały się w pobliżu przeszkód (w tzw. zagrożonym rejonie). Wówczas dokonuje się dodatkowego losowego generowania położeń, ale tylko wokół położenia znajdującego się w takim obszarze. Problem ten powodował, że w szczególnych przypadkach robot mógł nie znaleźć wyjścia z takiego obszaru i nie osiągał zamierzonego celu. Było to uwarunkowane sposobem doboru heurystyki.

2.2. Metoda RRT

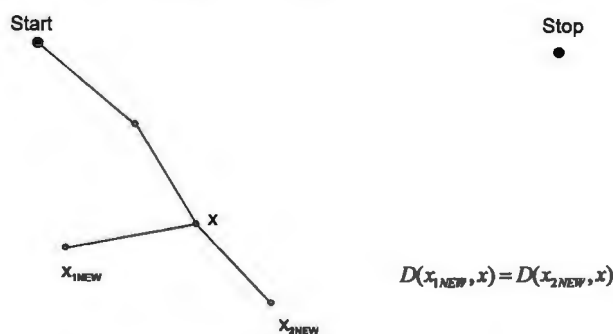
Natomiast w metodzie RRT [13, 14], nie dokonuje się generowania określonej liczby wierzchołków sieci, ale w każdym kroku poszukuje się sąsiedniego położenia, które będzie spełniało warunek $D(c, \tilde{c}) \leq \max dist$, co przedstawia poniższy rysunek:



Rys. 2. Metoda RRT.

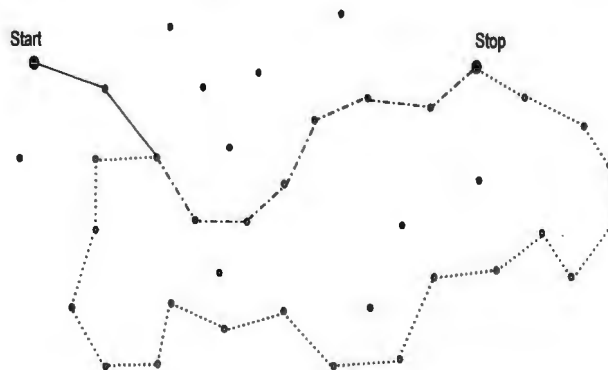
Wejściem do algorytmu RRT jest liczba kroków k oraz wartość metryki euklidesowej d .

Łatwo zauważyć, że można nie znaleźć poszukiwanego punktu w przestrzeni roboczej spełniającego tak postawione warunki. Ze względu na fakt, że kolejne punktu w przestrzeni są generowane losowo, może dojść do sytuacji, że dwa sąsiednie punktu mogą spełniać warunek $D(c, \tilde{c}) \leq \max dist$, jak na rys. 3.



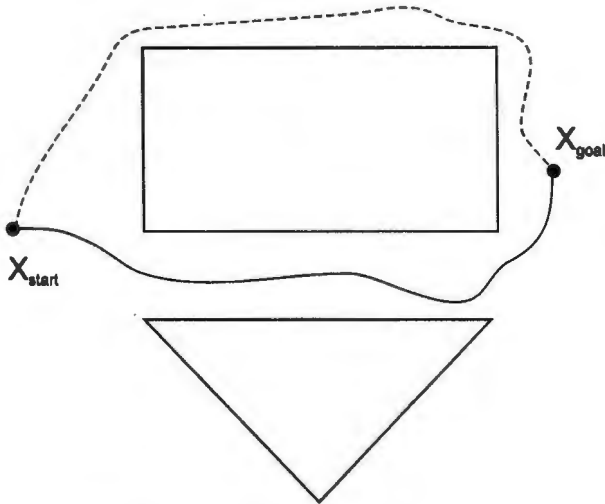
Rys. 3. Przykład sytuacji niejednoznacznej.

W takim przypadku może zaistnieć sytuacja, że punkt docelowy można osiągnąć na wiele sposobów. Każda z wybranych dróg jest poprawna (osiągnięcie położenia końcowego jest spełnione), ale mogą być to drogi nieoptymalne, ze względu na długość drogi zakreślonej przez element wykonawczy manipulatora (rys. 4).



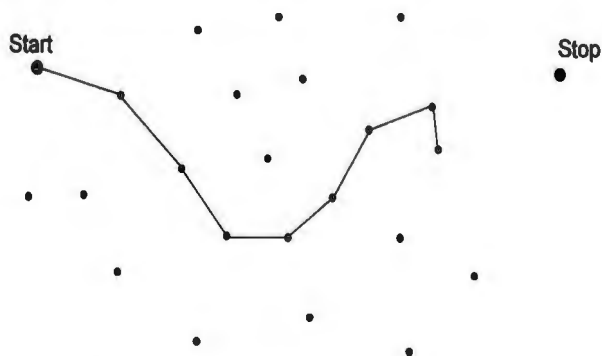
Rys. 4. Wybór niewłaściwego punktu sąsiedniego.

W tych przypadkach wybór drogi jest silnie zależny od kształtu mapy, który natomiast jest uwarunkowany wyborem wierzchołków ze względu na wartość wagi $w(x)$. Stosowanie wagi jako heurystyki może doprowadzić do sytuacji przedstawionej na rys. 5. W pracy [1] zaproponowano modyfikację wagi, która gwarantuje uniknięcie takiej sytuacji.



Rys. 5. Przejście przez wąski korytarz.

Ponadto można wygenerować optymalną drogę, zbliżyć się do punktu końcowego, ale nie mieć możliwości osiągnięcia tego punktu (rys. 6), ze względu na nie spełnienie warunku (1).



Rys. 6. Przykład sytuacji, w której nie jest możliwe osiągnięcie punktu docelowego.

3. SFORMUŁOWANIE KRYTERIUM WYBORU

Przedstawione metody bazujące na algorytmach losowych pozwalają na planowanie bezkolizyjnych ruchów robotów. Metody te znalazły szerokie zastosowanie w przypadku robotów mobilnych, jak i manipulatorów, a w szczególności ciał sztywnych z dużą liczbą połączeń ruchowych, które poruszają się w przestrzeni kartezjańskiej. W związku z tym, że kolejne położenia są generowane losowo można natknąć się na wyżej wymienione problemy. Jednym ze sposobów wyjścia, czy też ominięcia specyficznych przypadków jest zastosowanie przedstawionej poniżej modyfikacji kryterium wyboru kolejnych położenia, do których należy doprowadzić robota. Wprowadzenie zamiast kryterium (1)

dwóch nowych warunków gwarantuje eliminację problemów wcześniej przedstawionych. Proponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie następujących warunków:

$$N_c = \left\{ \tilde{c}_i \in N \mid D(c, \tilde{c}_i) = \min dist \right\}, \quad (2)$$

$$N_c = \left\{ \tilde{c}_i \in N \mid D(c_g, \tilde{c}_k) = \min D(c_g, \tilde{c}_i) \right\}, \quad (3)$$

gdzie:

c_g – położenie końcowe,

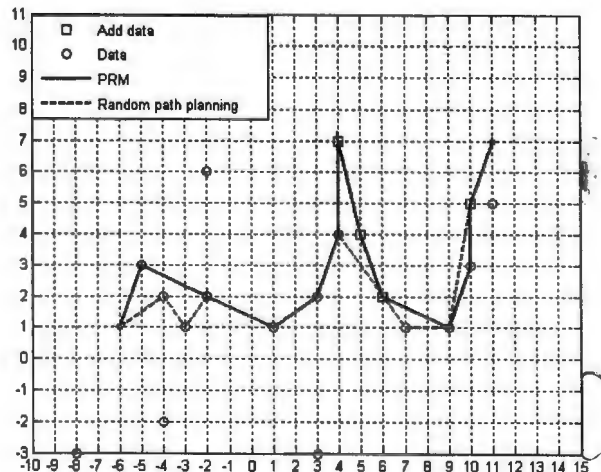
\tilde{c}_i – położenie spełniające warunki, $i=1, \dots, k, \dots, n$,

n – liczba wygenerowanych losowo punktów.

Wybór sąsiedniego położenia ze względu na najmniejszą odległość od położenia zajmowanego w danej chwili (warunek (2)) gwarantuje, że zostanie wykluczona sytuacja przedstawiona na rysunku 6. Stosując takie kryterium wyboru algorytm jest zawsze w stanie osiągnąć zamierzony cel, ponieważ w zbiorze wygenerowanych położenia zawsze znajdują się takie położenia, które spełniają ten warunek. Jednak nie gwarantuje on wyboru właściwego sąsiada (sytuacja z rys. 4). Wprowadza się dodatkowe kryterium (3), które eliminuje ten problem oraz powoduje wyjście z sytuacji przedstawionej na rys. 3. Warunek (3) decyduje o wyborze punktu w przestrzeni, dla którego metryka euklidesowa między badanym punktem, a zamierzonym punktem docelowym jest mniejsza.

4. PRZYKŁADY

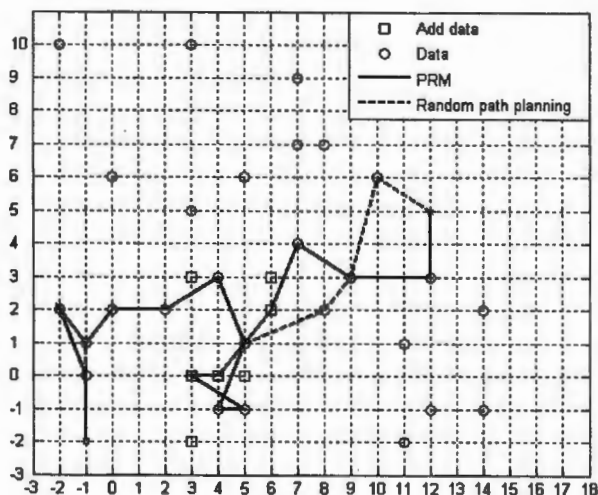
Pierwsze symulacje i badanie z zastosowaniem warunków (2), (3) przeszukiwania przestrzeni z wygenerowanymi losowo punktami przedstawia rys. 7 i 8. W przykładzie 1 punkt startowy ma współrzędne $P_s(-6, 1)$, a punkt końcowy $P_k(11, 7)$. Dla uproszczenia, powstała w ten sposób przestrzeń, została zdyskretyzowana z krokiem $\Delta=1$. Liczba wygenerowanych losowo punktów przestrzeni wynosi 17. Wartość metryki D dla metody PRM wynosiła $D < 4$.



Rys. 7. Przykład 1.

W piątym kroku przeszukiwania przestrzeni, w algorytmie PRM, należało wygenerować dodatkowe punkty przestrzeni (w liczbie 4, kwadraty na rys. 7), ponieważ żaden punkt nie spełniał warunku $D < 4$. W przypadku przeszukiwania z zastosowaniem warunków opisanych wzorami (2) i (3) w piątym kroku wartość metryki D do wybranego punktu wynosiła 4,24. Algorytm PRM osiągnął punkt docelowy w 12 krokach, a zaproponowany algorytm osiągnął ten sam punkt w 9 krokach, Droga, którą należy przebyć, z zastosowaniem PRM, wyniosła $S_{PRM}=28,79$, a z użyciem zaproponowanego kryterium $S_{RPP}=23,03$.

W przykładzie 2 wartości współrzędnych punktu startowego wynosiły $P_s(-1, -2)$, a punktu końcowego $P_k(12, 5)$. Krok dyskretyzacji, podobnie jak w przykładzie 1 wynosi $\Delta=1$, liczba wygenerowanych losowo punktów 30. Wartość graniczna metryki, dla PRM wynosi $D \leq 3$. Tak postawione kryterium spowodowało, że dla punktu o współrzędnych $P_i(5, -1)$ nie można znaleźć punktu sąsiedniego spełniającego warunek $D \leq 3$. W obszarze wokół tego punktu wygenerowano dodatkowe punkty przestrzeni w liczbie 10. Wówczas wybór padł na punkt o współrzędnych $P_{i+1}(3,0)$, widoczna pętla na rys. 8. Widać również, że punkt o współrzędnych $P_k(5,0)$ jest bliżej punktu P_i niż wybrany P_{i+1} .



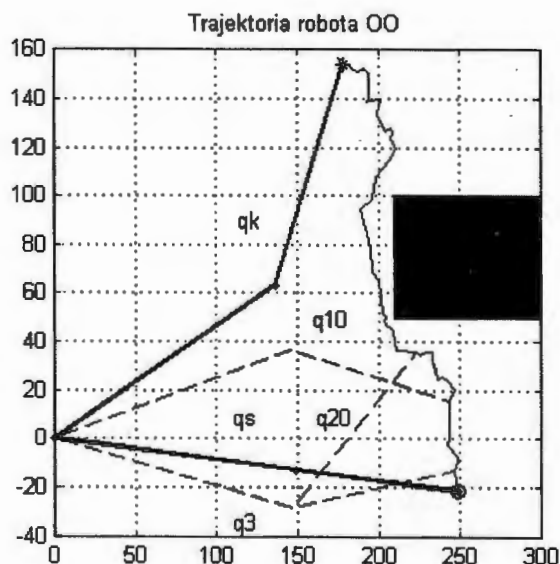
Rys. 8. Przykład 2.

Wartość drogi dla algorytmu PRM wyniosła 32,25, a dla zmodyfikowanego kryterium wyboru punktów sąsiednich 18,74.

Wykorzystując zaprezentowany sposób wyboru oraz algorytm z pracy [3] zaplanowano ruchy manipulatora płaskiego o dwóch stopniach swobody, a następnie dla manipulatora o 3 stopniach swobody w przestrzeni trójwymiarowej.

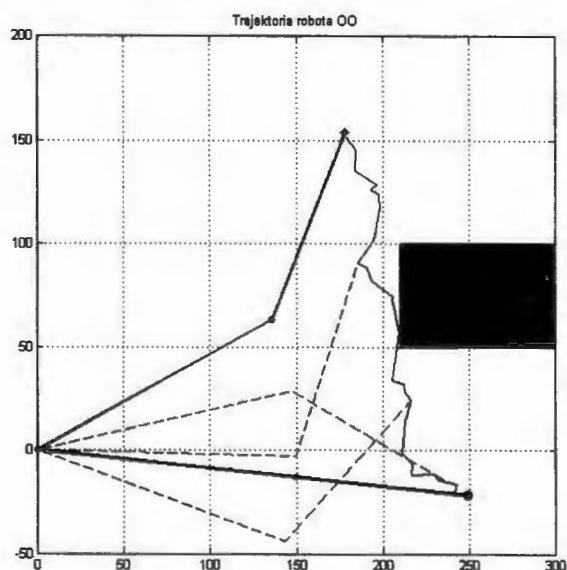
4.1. Manipulator płaski

Na rys. 9 przedstawiono pierwszy przykład dla manipulatora płaskiego o dwóch stopniach swobody. Rysunek przedstawia konfiguracje początkową $(\theta_1, \theta_2) q_s = [-25^\circ, 0^\circ]$ i końcową $q_k = [25^\circ, 40^\circ]$ oraz wybrane konfiguracje w krokach: 3, 10 i 20. Zaplanowane ruchy wygenerowano dla $k=500$ punktów początkowych. W 51 krokach osiągnięto zadany punkt końcowy.



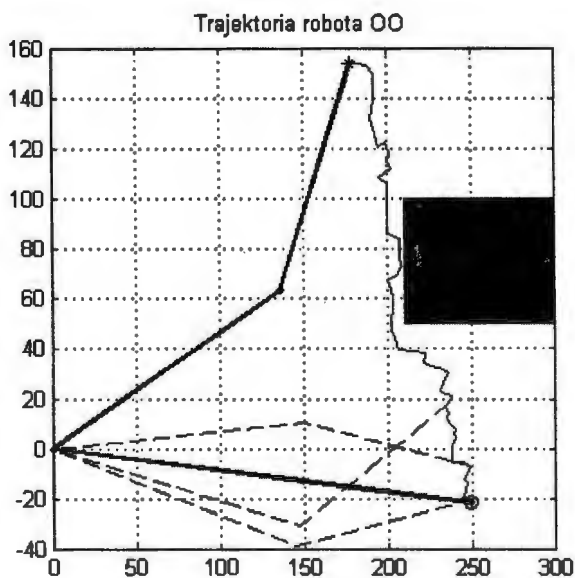
Rys. 9. Manipulator płaski, przykład 1

Dla tej samej liczby punktów początkowych przeprowadzono kolejną symulację i otrzymano wynik, który przedstawia rys. 10. W tym przykładzie punkt docelowy osiągnięto w 28 krokach (charakterystyczne położenie manipulatora w krokach 10 i 20 w porównaniu do przykładu 1).



Rys. 10. Przykład 2 dla liczby $k=500$.

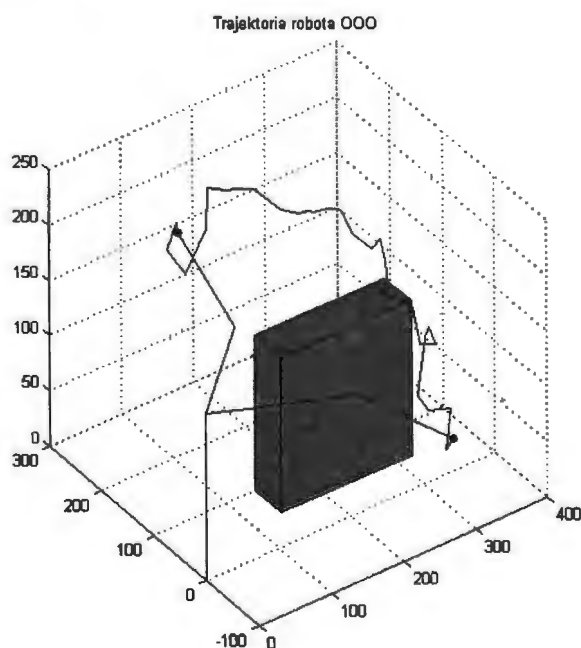
Następnie zwiększono liczbę punktów do $k=700$ i wykonano tą samą symulację. Punkt końcowy osiągnięto w 59 krokach, co przedstawia rys. 11. Można zauważyć, że główny wpływ na kształt trajektorii w przestrzeni roboczej manipulatora ma liczba punktów pośrednich (porównanie rys. 10 i 11, gdzie liczba punktów pośrednich, dla $k=700$, jest dwukrotnie większa niż w przykładzie 2 dla $k=500$).



Rys. 11. Przykład dla $k=700$.

4.2. Manipulator OOO

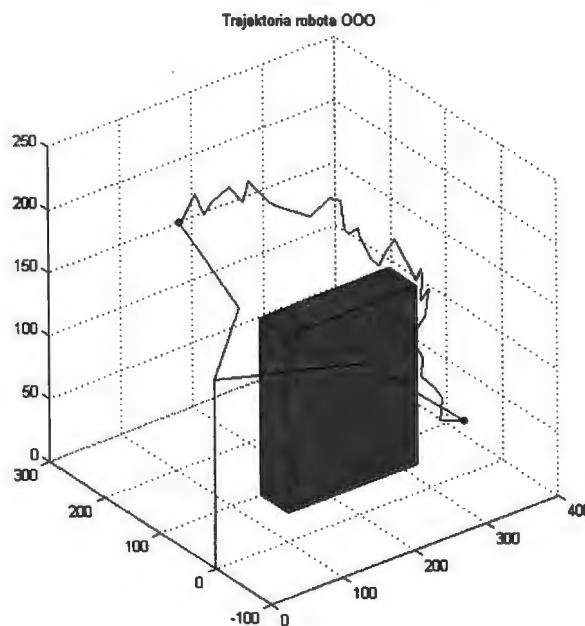
Kolejne przykłady dotyczą manipulatora o trzech parach obrotowych. Opis jego budowy oraz kinematyki znajduje się w pracy [4].



Rys. 12. Przykład dla manipulatora OOO, $k=500$.

Zaprezentowane przykłady zostały zasymulowane dla tych samych konfiguracji początkowej i końcowej. Wektor współrzędnych naturalnych określających konfigurację startową ma postać $q_s = [-25^\circ, 0^\circ, 30^\circ]$ (kolejno $\theta_1, \theta_2, \theta_3$), któremu odpowiada położenie w przestrzeni roboczej $P_s = (278,8; -88,1; 82,5)$, a konfigurację docelową określa wektor $q_e = [25^\circ, 40^\circ, -90^\circ]$. Współrzędne punktu końcowego w przestrzeni roboczej, odpowiadające wektorowi q_e , mają wartości $P_e = (141,3; 245; 173,5)$. Dla tak postawionego zadania otrzymano dwa

wyniki. W pierwszym przykładzie liczbę kroków ustalono na poziomie $k=500$ (rys. 12). Punkt końcowy został osiągnięty w 30 krokach. Drugi przykład (rys. 13) został zasymulowany dla $k=800$. W tym przypadku potrzebowano 34 kroków, aby doprowadzić manipulator do konfiguracji końcowej.



Rys. 13. Przykład 2, $k=800$.

5. PODSUMOWANIE

Przykłady dla manipulatora płaskiego, jak i poruszającego się w przestrzeni 3D zostały zasymulowane przez połączenie zadania prostego [11, 16] oraz algorytmu opisanego w pracy [3]. Wyniki symulacji potwierdzają efektywność zaproponowanej metody bazującej na algorytmach losowych. Otrzymywane trajektorie silnie zależą od liczby zadeklarowanych kroków, w których losujemy kolejne punkty, co widać na przedstawionych powyżej rysunkach. Pewną wadą metody jest brak powtarzalności (w kolejnych symulacjach, dla tej samej liczby k , otrzymuje się różny kształt trajektorii). Natomiast zaletą jest spełnianie podstawowego zadania, czyli przeprowadzenie manipulatora z konfiguracji początkowej do konfiguracji końcowej. Sposób planowania ruchów oraz sformułowane kryterium ma głównie zastosowanie w planowaniu bezkolizyjnych trajektorii dla elementu wykonawczego manipulatora.

THE NEW SEARCH CRITERION FOR METHOD BASED ON PRM

Abstract: This paper presents the selection criterion of neighbours. The criterion is used for the method which is based on probabilistic path planning. The choice criterion is described with (2) and (3) equations. We discuss situation when we have no choice of neighbour and we present application which guaranties escape of such problems. At the end we show results of simulations for two links manipulator (in 2D space) and three dof manipulator (in 3D space).

Literatura

- [1] Aarno D., Kragic D., Christensen H. (2004) Artificial potential biased probabilistic roadmap method. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, 461-466.
- [2] Amato N.M., Burchan Bayazit O., Dale L., Jones C., Vallejo D. (2000) Choosing good distance metrics and local planners for probabilistic roadmap methods. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**, 4, 442-447.
- [3] Babiarz A. (2004) *Planowanie ruchów robotów metodą losową. Automatyzacja procesów dyskretnych. Robotyka i sterowniki programowalne*. WNT, Warszawa.
- [4] Babiarz A., Szkodny T. (2004) *Programowanie robota ROBIX. Automatyzacja procesów dyskretnych. Robotyka i sterowniki programowalne*. WNT, Warszawa.
- [5] Barraquand J., Langlois B., Latombe J.C. (1992) Numerical potential field techniques for robot path planning *IEEE Trans. Sys. Man. Cybern.*, 224-241.
- [6] Bohlin R. (2002) *Robot path planning*. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg University.
- [7] Galicki M. (2000) *Wybrane metody planowania optymalnych trajektorii robotów manipulacyjnych*. WNT, Warszawa.
- [8] Kavraki L. (1995) *Random networks in configuration space for fast path planning*. PhD Thesis, Stanford University.
- [9] Kavraki L., Latombe J. (1994) Randomized preprocessing of configuration space for path planning: articulated robots. *IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Germany, 1764-1772.
- [10] Kavraki L., Latombe J., Švestka P., Overmars M. (1996) Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, **12**, 566-580.
- [11] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W. (2003) *Modelowanie i sterowanie robotów*. PWN, Warszawa.
- [12] Latombe J. C. (1991) *Robot motion planning*. Boston, MA: Kluwer.
- [13] LaValle S.M., Kuffner J.J. (2000) Rapidly-exploring random trees: progress and prospects, in: *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*.
- [14] LaValle S.M. (1998) Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning. TR 98-11, Computer Science Dept., Iowa State University.
- [15] Morecki A., Knapczyk J. (1999) *Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*. WNT, Warszawa.
- [16] Szkodny T. (1990) *Manipulatory robotów przemysłowych. Modele matematyczne*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [17] Švestka P., Overmars M. (1995) Probabilistic path planning. *Technical report UU-CS-1995-22*. Utrecht University.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4