

Artur BABIARZ  
Politechnika Śląska

## PLANOWANIE ŚCIEŻKI ROBOTÓW Z ZASTOSOWANIEM METODY B-PPT\*

**Streszczenie.** Praca przedstawia przykłady planowania ścieżki manipulatorów robotów przemysłowych za pomocą metody B-PPT. Metoda B-PPT: Probabilistyczne planowanie trajektorii z zastosowaniem krzywych B-sklejanych łączy w sobie algorytm probabilistyczny oraz modelowanie współrzędnych naturalnych za pomocą krzywych B-sklejanych trzeciego stopnia. Planowanie ścieżki za pomocą metody B-PPT pozwala w prosty sposób otrzymać rozwiązanie zadania planowania ruchów robota. Przedstawiona postać metody B-PPT jest wynikiem analizy dotychczas rozwijanych metod probabilistycznych, takich jak PRM (Probabilistic Road Map) i RRT (Rapidly – exploring Random Trees).

## ROBOT PATH PLANNING USING B-PPT METHOD

**Summary.** This paper presents a new approach to path planning. We present results of robot path planning using B-PPT method. The method is based on probabilistic algorithms and B-splines curves of three degree. The B-PPT method is the result of analyzing PRM method and RRT method.

### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się bardzo duże zainteresowanie algorytmami, które pozwalałyby na automatyczne planowanie ruchów zarówno manipulatorów, jak i robotów mobilnych [1, 8, 9, 11]. 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 wykorzystanie dotychczasowych metod w biologii i genetyce, gdzie stosuje się ten opis do dokowania białek i projektowania nowych leków [3, 4].

Wszystkie wymienione problemy wiążą się z przemieszczeniem pewnego obiektu z położenia początkowego do końcowego, z pewnymi ograniczeniami nałożonymi na trajektorię. W przypadku planowania ruchów manipulatora należy przeprowadzić jego element wykonawczy z konfiguracji początkowej  $q_s$  do

\* Praca finansowana z BK 208/Rau1/2006 t. 2

konfiguracji końcowej  $q_g$ . Wynikiem tej operacji jest wyznaczenie dopuszczalnej ścieżki, która pozwoli nie tylko osiągnąć konfigurację końcową,  $q_g$ , ale także ominąć stacjonarne lub dynamiczne przeszkody. Do wykonania takiego zadania układ powinien dysponować modelem matematycznym manipulatora, opisem geometrycznym przestrzeni roboczej, członów manipulatora i chwytaka oraz algorytmami wykrywania kolizji.

Dodatkowo wprowadza się ograniczenia dotyczące przebiegu tego ruchu, np. minimalny czas lub minimalną energię sterowania. Tak postawiony problem staje się trudniejszy, gdy ma się do czynienia z robotami redundantnymi, ponieważ takie roboty charakteryzują się większymi możliwościami wykonywania danych ruchów.

## 2. Metody probabilistyczne

Rozwiązanie postawionego problemu planowania ścieżki ruchu wykorzystujące deterministyczne metody wymagało bardzo dobrej znajomości otaczającego obiekt środowiska oraz dokładnego modelu matematycznego zarówno otoczenia, jak i badanego obiektu. Przedstawiona poniżej metoda miała początek w pracy [17], w której to przedstawiono metodę planowania ruchów za pomocą tak zwanej mapy dróg. W pierwotnej wersji kolejne punkty docelowe były generowane deterministycznie. Dalsze badania i eksperymenty doprowadziły do powstania metody PRM (Probabilistic RoadMap). Głównym założeniem tej metody było uproszczenie aparatu matematycznego, a co za tym idzie – skrócenie czasu potrzebnego na obliczenia oraz stworzenie łatwego do implementacji algorytmu, który nie wymagałby dużych nakładów obliczeń numerycznych. Metoda PRM składa się z dwóch zasadniczych faz [12, 13]:

- z fazy wstępnego przetwarzania,
- z fazy zapytań.

W fazie wstępnego przetwarzania buduje się graf, z losowo wygenerowanych położen, w wolnej od przeszkód przestrzeni. Następnie w fazie zapytań dołącza się (do już istniejącego grafu z fazy pierwszej) położenie początkowe i końcowe oraz dokonuje się przeszukiwania grafu w celu połączenia ścieżką tych położen.

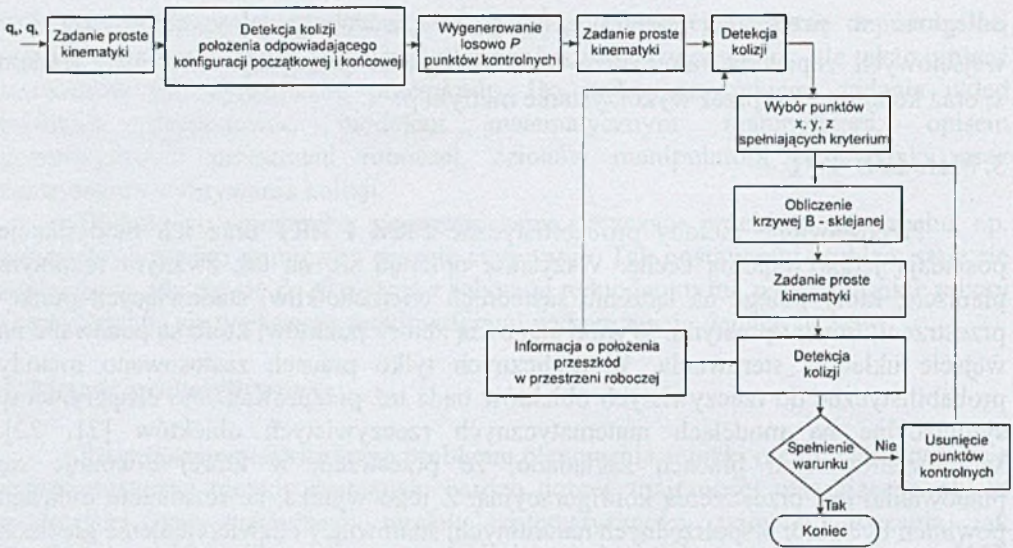
Alternatywą dla metody PRM stał się sposób planowania ruchów o nazwie Rapidly – exploring random Trees. Pomysłodawcą jest LaValle, który w [18] przedstawił pierwsze założenia i algorytm działania dla tej metody. Metoda RRT z założenia ma usuwać wady metody PRM, do których zaliczamy przede wszystkim problemy z planowaniem w wąskich gardłach oraz bardzo dużą liczbę generowanych punktów przestrzeni dla uzyskania zadowalającego wyniku. Ponadto, z uwagi na stosowanie dwufazowego algorytmu, zarzucono metodzie PRM brak możliwości zastosowania w planowaniu on – line (wynikało to z czasochłonnego przeszukiwania grafu po wykonanej fazie wstępnego przetwarzania). W podstawowej wersji metoda RRT polega na losowym generowaniu, począwszy od punktu startowego, kolejnych wierzchołków w wolnej od przeszkód przestrzeni. Wykorzystywana przestrzeń jest nazywana przestrzenią stanów. Do tego celu wykorzystuje się równanie stanu, gdzie  $x$  oznacza stan układu, a  $u$  wejście układu. Przez całkowanie funkcji  $f$  z czasem całkowania  $\Delta t$  nowy stan  $x_i$  jest wyznaczany jako funkcja stanu początkowego  $x_{initial}$  i wejścia  $u$ , wykorzystując całkowanie Eulera. Wprowadza się metrykę  $\rho$  określającą

odległość w przestrzeni stanów  $\rho(x_i, x_{i+1}) \leq \varepsilon$ . Dopuszczalny zbiór sygnałów wejściowych zapewnia minimalizowanie odległości pomiędzy aktualnym stanem  $x_i$  oraz kolejnym  $x_{i+1}$  przez wykorzystanie metryki  $\rho$ .

### 3. Metoda B-PPT

Przedstawione metody probabilistyczne PRM i RRT oraz ich modyfikacje posiadają jedną wspólną cechę. Wszystkie opierają się na tak zwanym lokalnym planiście, który polega na łączeniu sąsiednich wierzchołków, stanowiących punkty przestrzeni, liniami prostymi. Wyniki stanowią zbiory punktów, które są podawane na wejście układów sterowania. W nielicznych tylko pracach zastosowano metody probabilistyczne do rzeczywistych obiektów bądź też przeprowadzono eksperymenty symulacyjne na modelach matematycznych rzeczywistych obiektów [21, 22]. W prezentowanych pracach zakładano, że przestrzeń, w której dokonuje się planowania, jest przestrzenią konfiguracyjną. Z tego wynika, że rezultatem obliczeń powinien być zbiór współrzędnych naturalnych, stanowiący odzwierciedlenie gładkich i ciągłych funkcji będących wielomianami co najmniej 3 stopnia [10, 16]. Zakładanie, że obiekt może poruszać się tylko po liniach prostych, jest dużym uproszczeniem (wyjątek stanowi praca [19], w której zastosowano funkcje klasy  $C^1$ ). Ponadto opis ruchu jako funkcja liniowa eliminuje możliwość otrzymania prędkości i przyspieszenia obiektu przez obliczenie pochodnych takich funkcji w punktach połączenia prostych. Dużym problemem może być również wyznaczenie przestrzeni stanowiącej wolną i zajmowaną przez potencjalne przeszkody przestrzeń roboczą. Dla obiektów manipulacyjnych przestrzeń robocza jest często bardzo skomplikowana i trudna do opisu wzorami matematycznymi. W przypadku gdy nie posiada się wzorów analitycznych opisujących zadanie odwrotne kinematyki danego manipulatora, obliczenie na przykład 5 tysięcy razy zadania odwrotnego kinematyki metodami numerycznymi jest nieefektywne. Wiąże się to z narastającymi błędami numerycznymi, wynikającymi głównie z faktu, że metody numeryczne są wykorzystywane do obliczeń z pewnym zadanym błędem. Wraz ze wzrostem dokładności obliczeń numerycznych wydłuża się czas obliczeń. W pracach poświęconych metodom planowania probabilistycznego rzadko podaje się ograniczenia konstrukcyjne, co wprowadza uproszczenie obliczeń wynikające z wykonywania nieograniczonych ruchów przez badany obiekt [1, 2, 14].

Nazwa metody B-PPT pochodzi od skrótu Probabilistyczne planowanie trajektorii z zastosowaniem krzywych B – sklejaných. Zaproponowana metoda jest przeznaczona głównie dla manipulatorów robotów przemysłowych. Opiera się ona na zadaniu prostym kinematyki i planowaniu we współrzędnych naturalnych. Za genezę metody B-PPT można uznać analizę metod PRM i RRT, co w konsekwencji doprowadziło do wykorzystania niektórych cech obu tych metod i połączenia w całość z algorytmami projektowania krzywych B – sklejaných.



Rys.1. Schemat metody B–PPT

Z drugiej strony opisywana metoda jest uzupełnieniem dotychczasowych badań i powinna ona znaleźć zastosowanie głównie do planowania oraz generowania danych wejściowych w postaci funkcji wielomianowych, opisujących zmiany danych współrzędnych naturalnych, do układów sterowania, jak i modeli wykonanych na przykład w Simulinku [20]. Metoda B–PPT łączy w sobie wszystkie wymagania stawiane różnym metodom planowania ruchów. Jako wynik obliczeń otrzymuje się zmiany współrzędnych naturalnych opisane wielomianami dowolnego stopnia, zależnie od wymagań postawionych przez użytkownika. Ponadto metoda jest szybka i łatwa w użyciu ze względu na efektywne metody generacji krzywych B – sklejanych oraz zalety metod probabilistycznych. Schemat blokowy ilustrujący kolejność wykonywania operacji wchodzących w skład algorytmu metody B–PPT przedstawia rys. 2. Opis i szczegółową charakterystykę można znaleźć w [6, 7].

### 3.1. Kryterium wyboru

Zakładając, że  $T(q)$  oznacza wektor współrzędnych kartezjańskich, obliczony w zadaniu prostym kinematyki, dla wektora współrzędnych naturalnych  $q$  można wyprowadzić wzory w postaci [5]:

$$N_c = \{T(q_1) \in N \mid \|T(q_1) - T(q_t)\| = \min dist\} \quad (1)$$

$$N_c = \{T(q_1), T(q_2) \in N \mid \|T(q_1) - T(q_{stop})\| < \|T(q_2) - T(q_{stop})\|\}, \quad (2)$$

gdzie:

$q_1, q_2, q_{stop}$  – wektory współrzędnych naturalnych,

$\|\cdot\|$  – metryka euklidesowa.

Manipulatory są ponadto specyficznymi obiektami pod względem wykonywania ruchów. Jest to związane z problemami występującymi w położeniach osobliwych.

W związku z tym wprowadza się jeszcze jeden warunek, który powinien być spełniony przez testowany wektor określający daną konfigurację:

$$\det(\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)) \geq \varepsilon, \quad (3)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – mała liczba dodatnia,

$\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)$  – macierz jacobianowa dla danej konfiguracji,  $i=1, 2, \dots, n$ .

Danymi wejściowymi algorytmu metody B-PPT są:

$L$  – liczba generowanych losowo konfiguracji,

$\Delta$  – krok dyskretyzacji przestrzeni konfiguracyjnej,

$T_{\text{limit}}$  – horyzont czasowy, po którym algorytm podaje informację o nieudanej próbie, dla danych wejściowych, połączenia konfiguracji startowej z końcową,

$\mathbf{q}_{\text{start}}, \mathbf{q}_{\text{stop}}$  – wektor konfiguracji początkowej i końcowej,

$\varepsilon$  – mała dodatnia liczba.

### 3.2. Krzywe B–sklejane

Zastosowane w eksperymentach i symulacjach krzywe noszą nazwę otwartych jednorodnych krzywych B–sklejanych trzeciego stopnia [15]. Funkcje B–sklejane określa wzór:

$$B_i^3(t) = \begin{cases} \frac{1}{6}(2+t)^3 & -2 \leq t < -1, \\ \frac{1}{6}(4-6t^2-3t^3) & -1 < t \leq 0, \\ \frac{1}{6}(4-6t^2+3t^3) & 0 < t \leq 1, \\ \frac{1}{6}(2-t)^3 & 1 \leq t < 2, \\ 0 & t \geq 2. \end{cases} \quad (4)$$

Natomiast krzywe B–sklejane można opisać wykorzystując równanie:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-n-1} d_i B_i^n(t), \quad (5)$$

gdzie:

$N$  – liczba punktów kontrolnych,

$n$  – stopień funkcji B–sklejanej,

$d_i$  –  $i$ -ty punkt kontrolny krzywej.

Przepisując powyższe równanie dla danej współrzędnej naturalnej, otrzymuje się:

$$q^i = \sum_{j=0}^m p^j B_j^k(u), \quad (6)$$

gdzie:

$m$  – liczba punktów kontrolnych,

$k$  – stopień funkcji B–sklejanej,

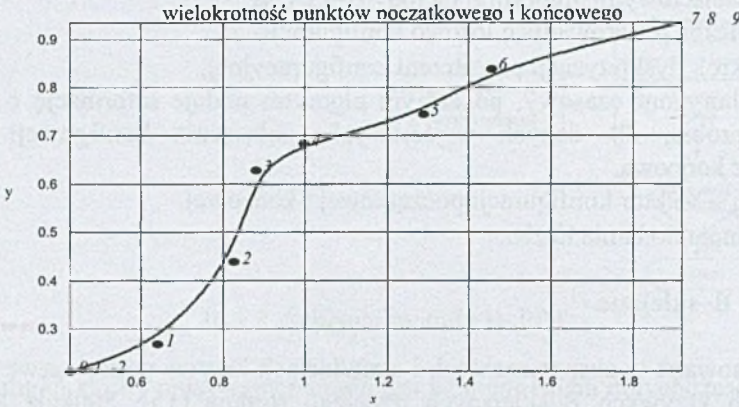
$q^i$  –  $i$ -ta współrzędna naturalna,  $i=1-n$ ,

$n$  – liczba stopni swobody robota,

$u$  – ustalony rosnący ciąg liczb,

$p^j$  – wylosowana w  $j$ -tej iteracji współrzędna naturalna, stanowiąca punkt kontrolny krzywej B-sklejanej, spełniająca warunek  $q_{\min}^i \leq p^j \leq q_{\max}^i$ .

W celu zagwarantowania interpolacji wartości początkowej i końcowej danej współrzędnej naturalnej wprowadza się wielokrotność tych wartości, która jest równa stopniowi funkcji B-sklejanej (rys. 2).

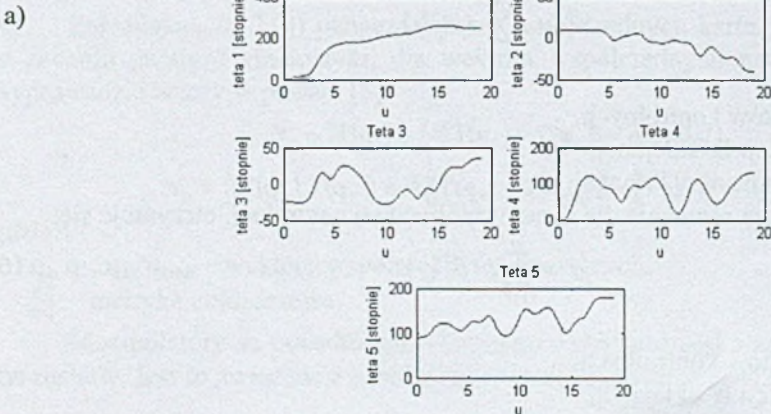


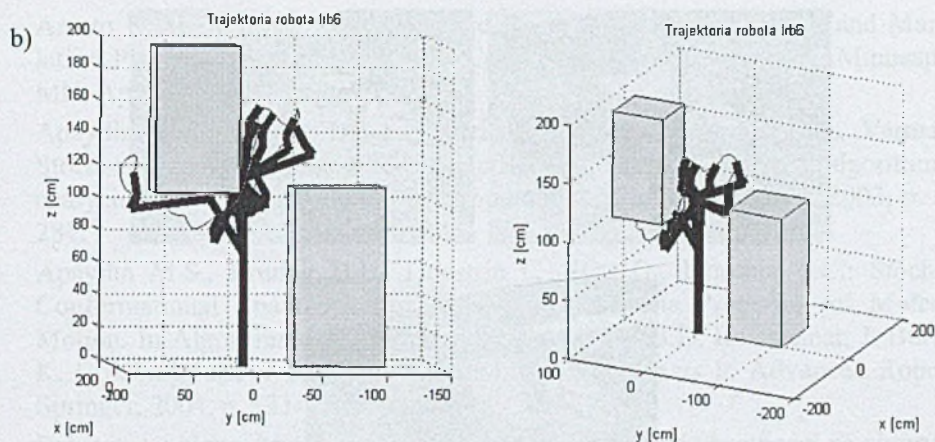
Rys.2. Przykład krzywej B-sklejanej

#### 4. Przykłady

Przedstawione przykłady dotyczą robota przemysłowego Irb6. W każdym przykładzie ustalono liczbę generowanych losowo konfiguracji oraz krok dyskretyzacji przestrzeni konfiguracyjnej.

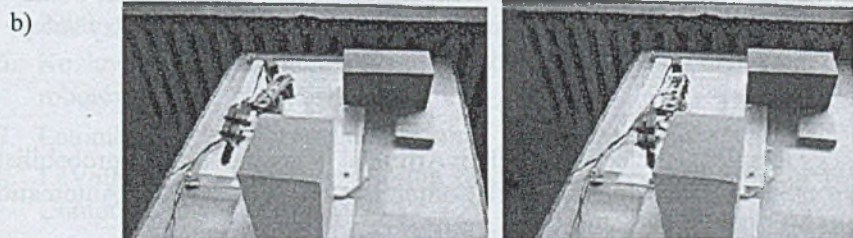
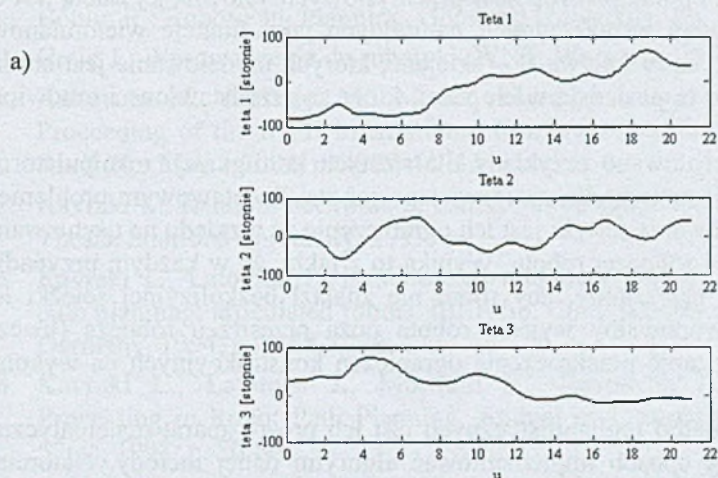
Rysunek 3 ilustruje przebiegi współrzędnych naturalnych oraz przebieg ścieżki w przestrzeni zewnętrznej robota. Parametry wejściowe: liczba konfiguracji: 200, liczba konfiguracji spełniających kryterium (1)+(3): 19, krok dyskretyzacji przestrzeni konfiguracyjnej:  $\Delta = 2^\circ$ , konfiguracja startowa:  $\mathbf{q}_{\text{start}} = [10^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$  oraz konfiguracja docelowa  $\mathbf{q}_{\text{stop}} = [250^\circ, 35^\circ, -30^\circ, 130^\circ, 180^\circ]$ .

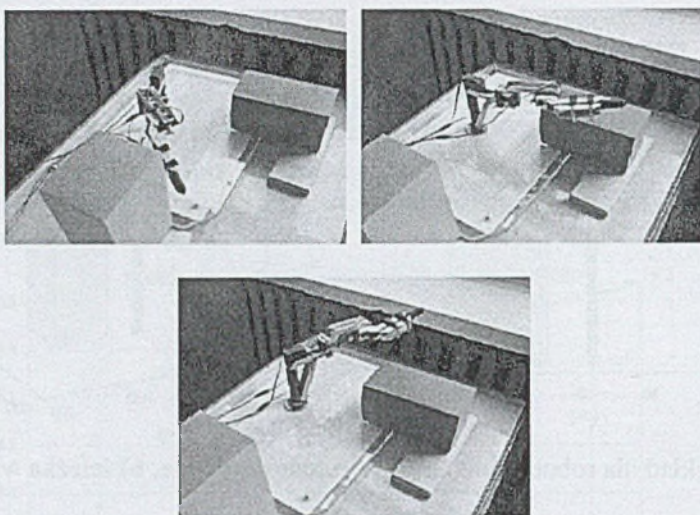




Rys.3. Przykład dla robota Irb6: a) współrzędne naturalne, b) ścieżka w przestrzeni roboczej

Drugi przykład został przeprowadzony na robocie dydaktycznym ROBIX. Zadana liczba konfiguracji wynosiła 100, wybrana liczba konfiguracji była równa 21, wektor konfiguracji początkowej miał postać  $\mathbf{q}_{\text{start}} = [-85^\circ; 0^\circ; 30^\circ]$ , a konfiguracja końcowa była określona przez wektor  $\mathbf{q}_{\text{stop}} = [40^\circ; 40^\circ; -10^\circ]$ , krok dyskretyzacji  $\Delta = 5^\circ$ . Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi współrzędnych naturalnych oraz ścieżkę robota.





Rys.4. Wyniki dla robota Robix: a) przebiegi współrzędnych naturalnych, b) ścieżka w przestrzeni kartezjańskiej

## 5. Wnioski końcowe

Zaprezentowana metoda planowania ścieżki ma głównie zastosowanie do planowania ruchów manipulatorów robotów przemysłowych. Główną jej zaletą jest to, że generuje ona przebiegi współrzędnych naturalnych jako funkcje wielomianowe 3 stopnia, a dodatkowo są to krzywe B – splecione, których modelowanie jest bardzo proste. Ponadto krzywe te posiadają wiele zalet, które są przedstawione i omówione w [15].

W pracy zaprezentowano przykłady dla różnych konfiguracji manipulatorów oraz wyniki weryfikacji metody dla rzeczywistego robota. Podstawowym problemem wszystkich metod planowania ścieżki jest ich ograniczenie ze względu na usytuowanie przeszkód w przestrzeni roboczej robota. Wynika to z faktu, że w każdym przypadku można tak rozmieścić przeszkody, aby robot nie znalazł bezkolizyjnej ścieżki lub pozytywny wynik powodowałby wyjście robota poza przestrzeń roboczą (inaczej mówiąc musiałyby wystąpić przekroczenie ograniczeń konstrukcyjnych na wykonywany ruch).

Główną zaletą metod probabilistycznych jest ich prosty aparat matematyczny, który pozwala w łatwy sposób implementować algorytm danej metody. Natomiast zasadniczą wadą tych metod jest brak powtarzalności danego rozwiązania, ponieważ za każdym razem można znaleźć rozwiązanie, ale będą się one różnić między sobą.

## LITERATURA

1. Aarno D., Kragic D., Christensen H.: Artificial potential biased probabilistic roadmap method. IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans 2004, p. 461-466.



2. Amato N. M., Wu Y.: A Randomized Roadmap Method for Path and Manipulation Planning. In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), Minneapolis, MN, Apr 1996, p. 113-120.
3. Apaydin M.S., Brutlag D.L., Guestrin C., Hsu D., Latombe J.C., Varma C.: Stochastic roadmap simulation: an efficient representation and algorithm for analyzing molecular motion.. J. Computational Biology, 10(3-4), 2003, p. 257-281.
4. Apaydin M.S., Brutlag D.L., Guestrin C., Hsu D., Latombe J.C.: Stochastic Conformational Roadmaps for Computing Ensemble Properties of Molecular Motion. In Algorithmic Foundations of Robotics V, J.D. Boissonnat, J. Burdick, K. Goldberg, and S. Hutchinson (eds.), Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer, 2004, p. 131-147.
5. Babiarez A.: Nowe kryterium przeszukiwania w metodzie bazującej na algorytmie PRM. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, 27-30 czerwca 2005, p. 289-294.
6. Babiarez A.: Planowanie ruchów manipulatorów z zastosowaniem metody probabilistycznej. VII Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie, Wiśła 2005.
7. Babiarez A.: Planowanie trajektorii manipulatorów z zastosowaniem krzywych B – sklepanych. Rozprawa doktorska, Gliwice 2005.
8. Bohlin R., Kavraki L.E.: Path Planning using Lazy PRM. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, p. 521-538.
9. Bohlin R.: Robot Path Planning. Göteborg University, Ph. D. Thesis 2002.
10. Craig J.: Wprowadzenie do robotyki. WNT, Warszawa 1995.
11. Kallmann M., Mataric' M.: Motion Planning Using Dynamic Roadmaps In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 26 - May 1 2004, p. 4399-4404.
12. Kavraki L.: Random networks in configuration space for fast path planning. PhD Thesis, Stanford University, 1995.
13. Kavraki L., Latombe J.: Randomized preprocessing of configuration space for path planning: articulated robots. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, Germany, 1994, p. 1764-1772.
14. Kavraki L., Latombe J., Motwani R., Raghavan P.: Randomized Query Processing in Robot Path Planning. Journal of Computer and System Sciences 57(1), 1998, p. 50-66.
15. Kiciak P.: Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. WNT, Warszawa 2000.
16. Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: Modelowanie i sterowanie robotów. PWN, Warszawa 2003.
17. Latombe J. C.: Robot motion planning. Boston, MA: Kluwer, 1991.
18. LaValle S. M.: Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. Computer Science Dept. 1998.

19. Nieuwenhuisen D., Kamphuis A., Mooijekind M., Overmars M. H.: Automatic Construction of High Quality Roadmaps for Path Planning. Utrecht University, technical report UU-CS-2004-068.
20. Szkodny T.: Modelowanie robota eksperymentalnego. Automatyizacja procesów dyskretnych. Robotyka i sterowniki programowalne. WNT, Warszawa 2004, p. 305-324.
21. Yu Y., Gupta K.: Sensor-based roadmaps for motion planning for articulated robots in unknown environments: some experiments with Eye-in-hand system. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, South Korea, 1999, (<http://www.ensc.sfu.ca/people/faculty/kamal/conference.html>).
22. Yu Y., Gupta K.: Sensor-based roadmaps: experiments with an Eye-in-hand system. Advanced Robotics, vol. 14, 2000, nr. 6, p. 445-550.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Kozłowski

### Abstract

This paper presents a new approach to the path planning problem. Recently the solution of this problem has based on probabilistic roadmap and rapidly-exploring trees. Hence we propose the new choosing criterion of neighbours ((1÷3) equations) and we describe the new planning methods for manipulators. The method is called B-PPT. The diagram block of this method shows figure 2. The base of B-PPT method is a cubic B – splines which are represented by (4) equation. The path planning by B-PPT method is made use of configuration space and forward kinematics.