

dr inż. Gabriel G. Kost

Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska w Gliwicach

Funkcja oceny zachowania planera bezkolizyjnych ścieżek robotów

Streszczenie: w pracy przedstawiono metodę wyznaczania funkcji oceny zachowania planera bezkolizyjnych ścieżek robotów manipulacyjnych, pracującego w oparciu o oktalną analizę przestrzeni. Wyznaczona funkcja oceny wynika z przyjętej zasady probabilistycznego sterowania działaniami planera i opiera się na funkcjach prawdopodobieństwa przejścia i osiągnięcia celu.

Evaluative Function of The Collision-Free Robot's Paths Planner

Abstract: The scope of the paper is the method of designating the evaluative function of the collision-free paths planner of manipulative robots, based on the octal analysis of space. The designated evaluative function is derived from the assumed principle of probability control of planner operation and is based on the functions of the probability of passage and destination.

1. Wstęp

Jednym z ważniejszych zadań robotyki jest poszukiwanie efektywnych metod wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii robotów manipulacyjnych. Obejmuje ono szereg istotnych zagadnień, których rozwiązanie jest niezbędne do skutecznego rozwiązywania problemu planowania trajektorii, począwszy od analizy przestrzeni, a na problemie optymalnego sterowania wyznaczonym ruchem robota kończąc. Efektywność każdego z nich jest podstawą skuteczności całej metody planowania.

W prezentowanej pracy przedstawiono sposób poprawy efektywności metody planowania opartej na oktalnym podziale przestrzeni i procesie probabilistycznego sterowania działaniami planera. Proces ten wykorzystano do oceny typowanych przez planer rozwiązań bezkolizyjnej ścieżki robota.

2. Zadanie planowania

Podstawowym elementem zadania planowania bezkolizyjnych ścieżek robota, jest analiza przestrzeni, w której się on porusza. Jedną z grup metod zajmujących się tym zagadnieniem są metody grafowe [1]. Ich specyfiką jest proces rastrowania przestrzeni, czyli jej podziału na typowe, dla danej metody, fragmenty przestrzeni zwane rastrami (metody rastrowe), w oparciu o które następuję wyznaczenie obszarów zajmowanych przez przeszkody robota, czyli przestrzeni kolizyjnej. Jej dopełnieniem jest przestrzeń bezkolizyjna w obszarze której może być wyznaczana bezpieczna (bezkolizyjna) ścieżka robota, rozumiana jako krzywa, będąca zbiorem punktów w przestrzeni (punktów węzłowych P_{wi}) osiąganych przez punkt charakterystyczny pozycjonowania robota związany z jego efektoem. Cechą charakterystyczną metod rastrowych jest

proces błędzenia, polegający na tym, że planer, identyfikowany w procesie planowania z robotem, typuje kolejny raster metodą prób i błędów. Dodatkowo, liczba możliwych kombinacji osiągnięcia wyznaczonego celu jest na tyle duża, że zadania tego typu prawie zawsze kwalifikowane są jako zadania NP-trudne [1,4,5]. Rezultatem takiego stanu rzeczy jest znaczący rozrost przestrzeni poszukiwania rozwiązania dopuszczalnego, której reprezentantem jest graf – drzewo decyzyjne, o wierzchołkach identyfikowanych z kolejno wytypowanymi w procesie planowania rastrami. Proces błędzenia powoduje, że drzewo to jest rozległe. W konsekwencji, jedynymi skutecznymi metodami jego analizy są metody przeszukiwania heurystycznego, pozwalające na znalezienie, wśród rozwiązań dopuszczalnych, rozwiązania spełniającego przyjęte kryterium optymalnościowe procesu planowania. Najczęściej jest nim kryterium najkrótszej drogi [1,4]. Stan ten sprawia, że dla robotów manipulacyjnych, techniki poszukiwania bezkolizyjnych ścieżek nie znalazły szerszego zastosowania w systemach programowania off-line robotów. Przykładem mogą tu być znane na rynku takie systemy programowania off-line robotów przemysłowych jak: IGRIP, eMPower (Robcad), COSIMIR Professional, Robsim itp., w których ocena kolizyjności programowanego ruchu robota opiera się wyłącznie na wizualnej interpretacji ruchu robota w zamodelowanej, wirtualnej przestrzeni, prowadzonej na bieżąco przez jego programistę [4].

2.1. Sterowanie probabilistyczne

Jedną z metod wyeliminowania procesu błędzenia jest zaadoptowanie zasady sterowania probabilistycznego [4]. Polega to na tym, że typowanie przez planer kolejnego rastra, następuje w oparciu o przyjętą funkcję rozkładu prawdopodobieństwa. Proces ten jest typowy dla metod probabilistycznych [1,4]. Dzięki takiemu podejściu uzyskiwane w zadaniu drzewo decyzyjne jest mniej rozległe, a sam proces jego przeszukiwania bardziej efektywny.

3. Adaptacja metody oktalnej do sterowania probabilistycznego procesem planowania

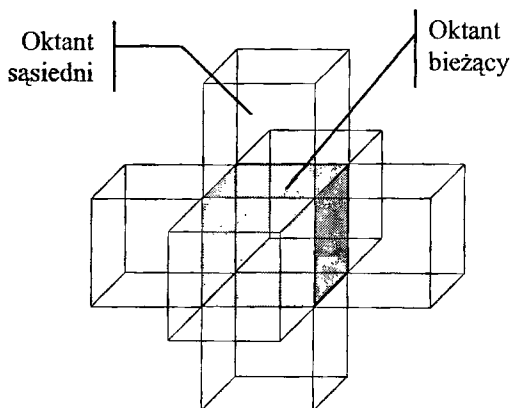
Przyjmijmy, że do rozwiązania zadania analizy przestrzeni w procesie planowania, wykorzystana zostanie metoda drzew oktalnych [5,2,3,4]. Jej istotną zaletą jest regularność prowadzonej analizy geometrycznej przestrzeni, przez co możliwe jest rekurencyjne zdefiniowanie jej wszystkich istotnych parametrów.

Z praktyki programowania robotów manipulacyjnych wynika, że każdy jego ruch w przestrzeni składa się z krótszych lub dłuższych etapów, których parametry geometryczne (ułożenie w przestrzeni, długość, kształt) zależą od miejsca w którym ruch jest programowany, na co wpływa obecność potencjalnych przeszkód w sąsiedztwie robota. Wiążąc te dwa elementy, możemy założyć, że proces planowania ruchu robota dokonywany w przestrzeni oktalnej, odbywać się będzie etapami (pomiędzy kolejnymi oktantami), które nazywać będziemy krokami planowania t_i . Zatem, dla każdej zaplanowanej ścieżki robota, jego ruch będzie sumą kolejno wyznaczonych kroków:

$$T = \bigcup_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

gdzie: i – kolejny, wyznaczony krok, n – liczba wszystkich kroków kształtujących planowaną ścieżkę.

Każdy krok t_i jest zatem fragmentem krzywej określającej planowaną ścieżkę, rozpiętej pomiędzy dwoma położeniami robota: bieżącym s_i i kolejnym - sąsiednim s_{i+1} (rys. 1).



Rys. 1. Zbiór oktantów sąsiednich

Położenia te, identyfikowane z każdym oktantem, określone są jednoznacznie i związane są z osiągnięciem jego środka geometrycznego, który określa kolejny punkt węzłowy P_{wi} poszukiwanej ścieżki. Z punktu widzenia procesu planowania, zrealizowanie przejścia do kolejnych, wyznaczonych przez planer, oktantów może być interpretowane jako sukces. Aby zatem wyeliminować proces błędzenia założmy, że działanie planera poddane jest rygorom pewnej określonej strategii Ψ [3,4] zgodnie z którą przebiega proces typowania oktantu wyznaczającego kolejny krok t_i poszukiwanej bezkolizyjnej ścieżki robota.

3.1. Funkcja oceny

Opierając się na dokonanych ustaleniach, działanie planera może zostać ocenione jako poprawne, jeżeli zachowa się on zgodnie z przyjętą procedurą, tj.: wytypuje kolejny sąsiedni oktant w oparciu o obowiązującą strategię Ψ , dzięki której zgodnie ze zdefiniowaną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa przyjętego procesu sterowania probabilistycznego pozwoli planerowi wytypować kolejny oktant i zrealizować przejście do niego. Oczywiście jest, że przyjęta strategia Ψ działania planera, musi umożliwić wytypowanie takiego oktantu sąsiedniego, który znajduje się w przestrzeni nie zajętej przez przeszkody robota (w przestrzeni bezkolizyjnej). Można równocześnie przyjąć, że strategia ta ma również możliwość typowania kolejnych oktantów (punktów węzłowych) zgodnie z przyjętym kryterium optymalnościowym, jakim jest najkrótsza ścieżka do celu, spośród wszystkich możliwych do zrealizowania propozycji. Jeżeli zatem, wytypowanie kolejnego oktantu, zgodnie z obowiązującą strategią działania, jest związane z sukcesem, to możemy przyjąć, że ocena tego działania jest pozytywna. W przeciwnym razie działanie planera oceniane jest negatywnie.

Próbując zaadaptować zaproponowany sposób nagradzania działań planera, do omawianego zadania planowania, możemy zidentyfikować wartość zdobywanej przez

planer nagrody z koniecznością zajścia warunku „udanego” przejścia do wytypowanego punktu węzowego (oktantu), jak i jego osiągnięcie. Jeżeli warunek ten zwiążemy z prawdopodobieństwem wytypowania w oparciu o obowiązującą strategię Ψ kolejnego punktu węzowego P_{wi} , to możemy przyjąć, że wartość nagrody r_i , jaką może zdobyć planer, jest równa:

$$r_i = p(P_{wi}) \cdot p(t_i) \quad (2)$$

gdzie: $p(P_{wi})$ – prawdopodobieństwo wytypowania kolejnego punktu węzowego (oktantu) planowanej ścieżki bezkolizyjnej w oparciu o Ψ , $p(t_i)$ – prawdopodobieństwo przejścia do wytypowanego P_{wi} .

Uzyskana wartość nagrody r_{i+1} (8) może być wykorzystana do określenia oceny działania planera, np. wg prostej zależności:

$$C = \max_{i \rightarrow \min} E \left[\sum_{i=1}^k \omega_i \cdot r(P_{wi}) \right] \quad (3)$$

gdzie:

- $E[\cdot]$ – uśredniona (estymowana) wartość zdobywanych ocen,
- ω_i – waga uzyskiwanych ocen określona dla kroku i wg odpowiedniej funkcji wag Ω ,
- $r(P_{wi})$ – funkcja nagród uzyskiwanych za zrealizowanie zaplanowanego ruchu do P_{wi} ,
- i – kolejny zaplanowany krok i .

Obok określonej wartości nagrody r_i (2), składnikiem funkcji oceny C (3) jest również funkcja wag [2,4], pozwalająca modyfikować wartość uzyskiwanej nagrody zależnie od lokalnych uwarunkowań miejsca, w którym został on wyznaczony przez planer dla kroku t_{i+1} , np. ze względu na bliskość przeszkody, czy odstępstwo od wymagań określonych przyjętą strategią planowania Ψ [2,4]. Dzięki uwzględnieniu w zależności (3) funkcji wag [2,4]:

$$\omega_i = \Omega(s_i) \quad (4)$$

możliwe jest przyjęcie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa w procesie sterowania probabilistycznego jako funkcji o stałym rozkładzie, której wartość nie zależy od lokalnych warunków geometrycznych sceny robota.

Dla przypadków dla których planer wytypuje kolejny oktant niezgodnie z obowiązującą strategią Ψ , czyli dla $\bar{\Psi}$, poszczególne wartości prawdopodobieństw są określone wartościami prawdopodobieństw zajścia zdarzeń przeciwnych.

3.2. Strategia Ψ

Wykorzystana w omawianym zadaniu strategia Ψ umożliwi planerowi zrealizowanie przejścia do wskazanego miejsca po najkrótszej ścieżce. Opiera się ona na połączeniu położenia początkowego, z którego planer rozpoczyna swoje działanie ze wskazanym miejscem końca planowanej ścieżki, linią geodezyjną LG (rys. 1) [3,4] i typowaniu tych oktantów, wyznaczających kolejne kroki t_i , których odległość δ od LG jest najmniejsza

spośród wszystkich oktantów sąsiednich [3]. Warunek ten, określa wartość wagi ω_1 , poprzez którą możliwe jest modyfikowanie zdobywanej przez planer oceny C (3) zgodnie z zależnością:

$$\omega_1 = \frac{1}{\delta} \quad (5)$$

co oznacza, że im środek wytypowanego oktantu jest położony dalej od LG tym ocena jaką zdobywa planer za swoje działanie jest mniejsza.

3.3. Prawdopodobieństwo wyznaczenia kolejnego punktu węzłowego

Dokonany podział oktalny przestrzeni sceny robota pozwala na wyznaczenie prawdopodobieństwa osiągnięcia wytypowanego zgodnie z Ψ oktantu s_{i+1} . Jeżeli parametrem podziału oktalnego p przestrzeni bezkolizyjnej sceny robota Π_w jest długość boku b^p oktantu, wtedy liczba oktantów N_w wynikająca z jej podziału oktalnego na poziomie p jest równa:

$$N_w = \frac{\Pi_w}{(b^p)^3} \quad (6)$$

Ogólnie, ze względu na możliwość wytypowania oktantu sąsiedniego s_{i+1} , powstałego na wyższym poziomie p niż oktant s_i można stwierdzić, że liczba sąsiednich oktantów pustych (rys. 1 i 2) należących do przestrzeni bezkolizyjnej jest równa:

$$N_w^p = (N_w - 1) + \sum_p (2^{3p} - 1) \quad (7)$$

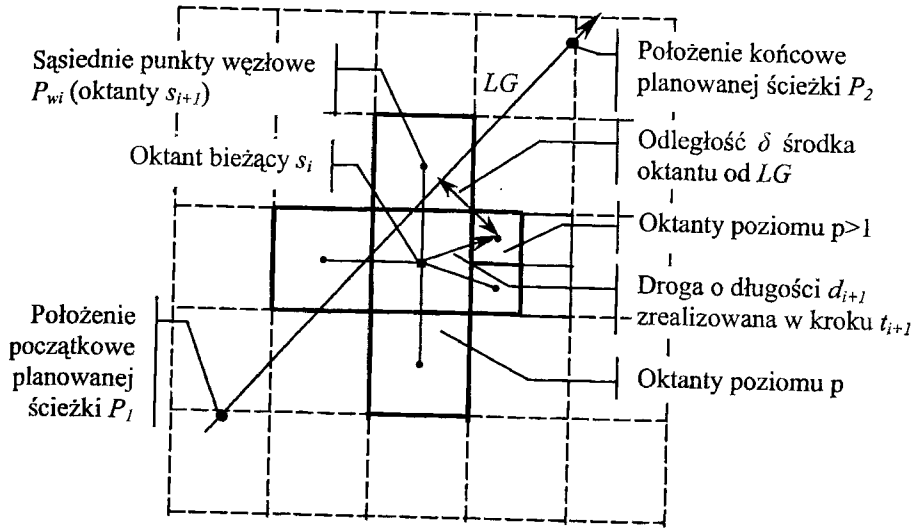
Opierając się na klasycznej definicji prawdopodobieństwa odniesionej do zagadnień geometrycznych, wybranie dowolnego rastra pustego na poziomie p zachodzi więc z prawdopodobieństwem:

$$p(s_{i+1}) = \frac{1}{N_w^p} = \frac{1}{(N_w - 1) + \sum_p (2^{3p} - 1)} \quad (8)$$

Zależność (8) określa więc poszukiwaną wartość funkcji prawdopodobieństwa osiągnięcia sąsiedniego oktantu pustego s_{i+1} przez planer.

3.4. Prawdopodobieństwo zrealizowania kroku t_i

Konstruując funkcję $p(t_i) = (s_i, s_{i+1})$ prawdopodobieństwa przejścia planera z oktantu bieżącego s_i do następnego s_{i+1} na przestrzeni jednego kroku t_{i+1} – podobnie jak miało to miejsce dla $p(s_{i+1})$ (7),(8) - kolejny krok planera (rys. 2) może się odbyć do stanu istniejącego na dowolnym poziomie p podziału oktalnego przestrzeni robota ($p > 0$). Dla takich warunków, ustalona wartość prawdopodobieństwa przejścia zrealizowanego, na przestrzeni jednego kroku t_{i+1} o długości równej d_{i+1} , pomiędzy dwoma sąsiednimi oktantami, wynosi:



Rys. 2. Układ zbioru oktantów sąsiednich (rzut na płaszczyznę).
 LG – najkrótsza linia łącząca P_1 i P_2

$$p(s_i, s_{i+1}) = \frac{d_{i+1}}{D_{P_{wi+1}}} \quad (9)$$

gdzie: d_{i+1} - długość drogi do wytypowanego oktantu sąsiedniego s_{i+1} , przy czym:

$$d_{i+1} = \begin{cases} b^0 & \text{dla } p = 0 \\ \left[\frac{(b^0 + b_{i+1}^p)^2 + (b_{i+1}^p)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{dla } p > 0 \end{cases} \quad (10)$$

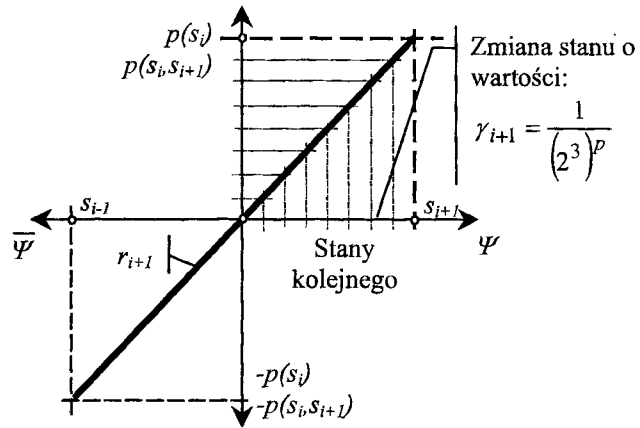
$D_{P_{wi+1}}$ - suma długości wszystkich dróg prowadzących do wszystkich oktantów sąsiednich s_{i+1} .

Z przeprowadzonego rozumowania wynika, że ustalona jak w (9) wartość prawdopodobieństwa przejścia zależy wprost od odległości związanego z nim punktu węzłowego P_{wi+1} . Wynika z tego, że im dłuższy krok t_i tym większa wartość prawdopodobieństwa przejścia. Warunek ten wymusza na planerze typowanie przejść do oktantów powstałych na możliwie najniższym poziomie p podziału.

3.5. Korekta wartości prawdopodobieństw

Ponieważ, planowanie odbywa się w przestrzeni oktalnej, w której mogą być dokonywane lokalnie kolejne podziały na poziomach $p > 1$, konieczne jest zweryfikowanie wartości zdobywanej nagrody (2), zależnie od wielkości oktantu jaki wytypował planer pewnym współczynnikiem proporcjonalności γ_{i+1} , $\gamma = (0, 1]$. Przy czym $\gamma = 1$, przyjmowane jest dla oktalnego podziału podstawowego (początkowego,

$p=0$) i $\gamma < 1$ proporcjonalnie do wielkości oktantów powstałych dla $p > 0$ (rys. 3). γ wyznacza zatem zależność pomiędzy prawdopodobieństwem wystąpienia oktantu s_i na poziomie początkowym p . Tym samym funkcję oceny r (2) ustala się w postaci:



Rys. 3. Wpływ parametru γ na wartości funkcji $p(s_i)$ i $p(s_i, s_{i+1})$

$$r_{i+1} = \begin{cases} \gamma_{i+1} \cdot (p(s_i) \cdot p(s_i, s_{i+1})), & \text{gd}y \quad s_{i+1} \in \Psi \\ 0, & \text{gd}y \quad i = 0, \quad p(s_i, s_i) = 0 \\ -\gamma_{i+1} \cdot (p(s_i) \cdot p(s_i, s_{i+1})), & \text{gd}y \quad s_{i+1} \in \bar{\Psi} \end{cases} \quad (11)$$

dla której współczynnik proporcjonalności γ określony został jako:

$$\gamma_{i+1} = \frac{1}{(2^3)^p} > 0, \quad p \geq 0 \quad (12)$$

i wynika on z konieczności dokonania podziałów, wytypowanego jako s_{i+1} oktantu.

4. Ocena podjętych działań

Reasumując, można więc stwierdzić, że wartość nagrody, jaką uzyska planer za wyznaczenie kolejnego oktantu s_{i+1} i przejście do niego, a tym samym kolejnego punktu węzłowego P_{wi+1} określającego kolejny krok t_{i+1} poszukiwanej ścieżkę bezkolizyjną, wyniesie wg (8), (9), (10) i (11):

$$r_{i+1} = \frac{\gamma_{i+1}}{(N_w - 1) + \sum_p (2^{3p} - 1)} \cdot \frac{d_{i+1}}{D_{s_i P_{wi+1}}} \quad (13)$$

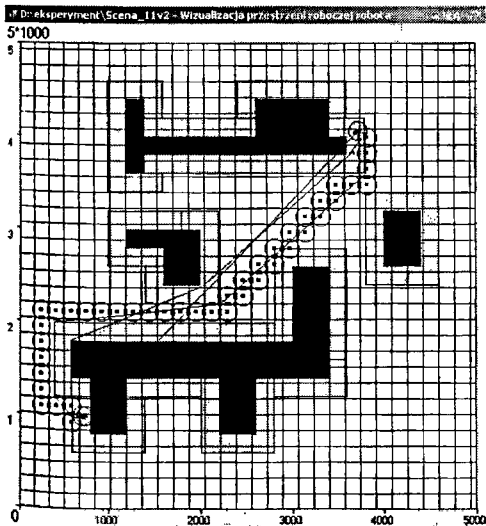
Podstawiając uzyskaną wartość nagrody (13) do (3) mamy, że dla potencjalnie możliwej ścieżki bezkolizyjnej wyznaczonej w ramach Ψ w oparciu o proces sterowania probabilistycznego, wartość oceny zachowania planera wyniesie:

$$C = \max_{i \rightarrow \min} \left[E \left(\frac{\sum_{i=1}^k \omega_i \cdot \gamma_{i+1}}{\left[(N_w - 1) + \sum_p (2^{3p} - 1) \right] \cdot D_s P_{w_{i+1}}} \cdot d_{i+1} \right) \right] \quad (14)$$

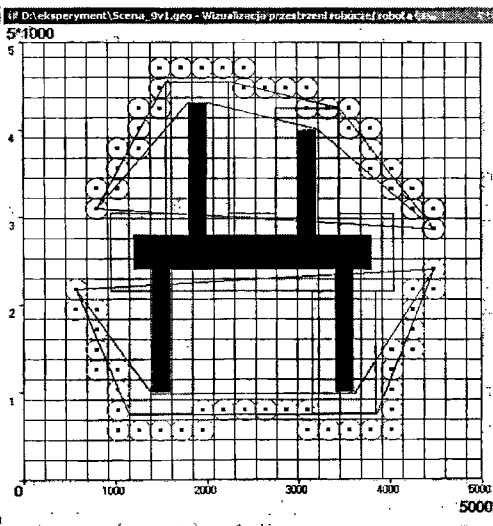
Zależność (14) można również uznać za proste kryterium optymalizacyjne poszukiwanej ścieżki mówiące, że najlepsza jest ta spośród znalezionych ścieżek, która umożliwi uzyskanie najwyższej oceny przy najmniejszej liczbie kroków planera. Równocześnie kryterium to powoduje, że planer w warunkach, gdy nie jest zdeterminowany sytuacjami przymusowymi, np. koniecznością osiągnięcia położenia końca planowanej ścieżki $s_k = P_2$ z odpowiednio dużą dokładnością, będzie wybierał – ze względu na $i \rightarrow \min$ (14) – takie rozwiązania (oktanty sąsiednie), które będą na możliwie najniższym poziomie podziału będą rozpoznane jako „puste”.

5. Przykład zastosowania metody

Celem zilustrowania skuteczności omawianej funkcji oceniania planera bezkolizyjnych ścieżek robotów manipulacyjnych (14), opracowano model planera, którego przykład działania pokazano na rysunku 4, 5 i 6. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że



Rys. 4. Bezkolizyjna ścieżka robota



Rys. 5. Eliminowanie minimów lokalnych

6. Wnioski

Zaprezentowany w pracy sposób oceniania zachowań planera bezkolizyjnych ścieżek robotów manipulacyjnych pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- dzięki oparciu wymaganych procesem sterowania probabilistycznego funkcji rozkładu prawdopodobieństwa (8) i (9) na parametrach geometrycznych przeprowadzanych podziałów oktalnych przestrzeni, uzyskano stosunkowo prostą ich postać, która jednoznacznie pozwala związać szanse osiągnięcia wyznaczonego położenia końca planowanej ścieżki z wymaganym poziomem podziałów oktalnych p , przy zachowaniu dążności do ich jak najniższego poziomu,
- związanie wartości prawdopodobieństwa przejścia () z długością wyznaczonego kroku t_i kształtuje jednoznacznie dążność planera do osiągnięcia celu przy możliwie najmniejszej ich liczbie, to zaś wzmacnia przyjęte w strategii Ψ kryterium optymalnościowe najkrótszej ścieżki,
- istotnym elementem opracowanego sposobu weryfikacji zachowań planera jest dyskretna funkcja wag, która pozwala na modyfikację zachowań planera przy przyjętym stałym rozkładzie funkcji prawdopodobieństwa,
- omówiona metoda, dzięki swojej prostocie może być w łatwy sposób aplikowana w systemach programowania off-line robotów, umożliwia ona również znaczące ograniczenie (wyeliminowanie) procesu poszukiwania heurystycznego otrzymywanego w procesie planowania drzewa decyzyjnego reprezentującego przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych [4].

Literatura

1. Dulęba I.: Metody i algorytmy planowania ruchu robotów mobilnych i manipulacyjnych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
2. Kost G.G.: Metoda unikania przeszkód w systemie automatycznego programowania robotów przemysłowych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Automatyzacja-Nowości i Perspektywy AUTOMATION 2004, PIAP, Warszawa 2004, str. 543-551.
3. Kost G.G.: Strategia poszukiwanie bezkolizyjnych ścieżek robotów. Materiały 8 Krajowej Konferencji Robotyki, Polanica Zdrój 2004, w druku. (Preprinty: str. 229-230).
4. Kost G.G.: Planowanie bezkolizyjnych ścieżek manipulacyjnych i stacjonarnych robotów przemysłowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Mechanika, z.148, Gliwice 2004.
5. Latombe J.C.: Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publisher, 1993.