

Tadeusz Szkodny

Andrzej Fortuna

Instytut Automatyki  
Politechnika Śląska

ALGORYTM GENERACJI TRAJEKTORII ZADANEJ ZE ZDEFINIOWANĄ KINEMATYKĄ DLA  
MANIPULATORA IRb-6

ALGORITHM OF GENERATION REQUIRED TRAJECTORIES WITH DEFINED KINEMATICS  
FOR IRb-6 MANIPULATOR

АЛГОРИТМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТРАЕКТОРИИ С ОПРЕДЕЛЕННЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ  
СВОЙСТВАМИ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА IRb-6.

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono opis oryginalnego algorytmu komputerowego PLAN2, generującego trajektorie zadane ruchu członu roboczego. Kinematykę tych trajektorii definiujemy tylko w wybranych punktach, przez które ma przechodzić chwytak, przy czym punkty te mogą być dowolnie oddalone od siebie. Algorytm ten bazuje na formułach stanowiących analityczne rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki manipulatora IRb-6.

**Summary:** Originally PLAN2 algorithm for generation required trajectories with defined kinematics in this work is presented. Kinematics of this trajectories we must define only in points, over its a task required move. Distance between the points may be any value. This algorithm applied formulas, which are analytical solution of inverse kinematics problem of IRb-6 manipulator.

**Резюме:** В работе представлено описание оригинального алгоритма PLAN2, который генерирует требуемые траектории манипулятора. Кинематические свойства этих траекторий определены только в избранных пунктах, через которые должно проходить захватывающее устройство. Пункты траектории могут быть произвольно отдалены друг от друга. Алгоритм основан на формулах являющихся решением обратной кинематической задачи для манипулятора IRb-6.

## 1. Wstęp

Dla uproszczenia opisu będziemy stosować dalej skrót MRP-manipulator robota przemysłowego. Przestrzeń zewnętrzną MRP opisują jego współrzędne zewnętrzne położenia  $x, y, z$  i orientacji  $\Phi, \theta, \psi$  (kąty Eulera). Współrzędne te opisują chwytak względem wybranego układu odniesienia, niezależnie od struktury kinematycznej MRP. Przestrzeń wewnętrzną MRP opisują jego współrzędne wewnętrzne. Współrzędnymi wewnętrznymi MRP są współrzędne naturalne członów i siłowników [15]. Wartości zadane współrzędnych naturalnych siłowników są wynikiem uczenia robota [11] bądź wynikiem działania warstwy wyznaczania trajektorii ruchu [11], współpracującej z kamerą lub innym sensorem sceny.

Jednym z podstawowych problemów sterowania w robotach przemysłowych jest projektowanie algorytmów generujących trajektorie zadane.

W pracach [4,5,6,10] proponuje się algorytmy generacji trajektorii zadanej, bazujące na arbitralnej dyskretyzacji współrzędnych wewnętrznych MRP. Zdyskretyzowany opis przestrzeni zewnętrznej MRP otrzymuje się ze zdyskretyzowanego opisu przestrzeni wewnętrznej MRP. Trajektorię zadaną w przestrzeni zewnętrznej aproksymuje się wykorzystując tak zdyskretyzowany opis przestrzeni zewnętrznej MRP. Każdemu punktowi dyskretyzacji w przestrzeni zewnętrznej, aproksymującemu trajektorię zadaną, odpowiadają znane

zdyskretyzowane współrzędne wewnętrzne MRP. Wadami tych algorytmów jest potrzeba dużej pamięci, konieczność przeszukiwania dużych zbiorów stanowiących zdyskretyzowany opis przestrzeni wewnętrznej oraz brak możliwości zmniejszania błędu aproksymacji wynikającego z arbitralności dyskretyzacji przestrzeni wewnętrznej MRP.

W pracach [3,7,17] proponuje się metody iteracyjne wyznaczania współrzędnych wewnętrznych odpowiadających współrzędnym zewnętrznym punktu trajektorii zadanej. W tym sposobie wyznaczania współrzędnych wewnętrznych zbliżanie się do punktu trajektorii zadanej odbywa się w kolejnych krokach obliczeń iteracyjnych. Krok dyskretyzacji współrzędnych wewnętrznych w kolejnych krokach obliczeń iteracyjnych zależy od błędu współrzędnych zewnętrznych w poprzednim kroku iteracji. Metody iteracyjne nie wymagają dużej pamięci, gdyż dokonuje się tu obliczeń tylko dla punktów aproksymujących trajektorię zadaną. W tych metodach błąd aproksymacji trajektorii zadanej może być zmniejszany, ale zwiększa to liczbę kroków obliczeń iteracyjnych. W pracy [3] przedstawiono zmodyfikowaną metodę iteracyjną generacji prostoliniowego odcinka trajektorii zadanej. Modyfikacja ta polega na arbitralnym przyjęciu rozkładu błędów w przestrzeni zewnętrznej, co redukuje liczbę kroków obliczeń iteracyjnych. Jednak tak przyjęty rozkład błędów jest słuszny tylko na krótkich odcinkach. Nie można wyznaczyć długości granicznych tych odcinków, gwarantujących ograniczenie tych błędów dla dowolnej konfiguracji MRP. Wadą metod iteracyjnych jest konieczność wielokrotnych obliczeń iteracyjnych.

Zaletą metod bazujących na arbitralnej dyskretyzacji przestrzeni wewnętrznych i metod iteracyjnych jest prostota obliczeń, polegająca na stosowaniu tylko równań kinematyki prostej MRP. Jednak zaleta ta może być pułapką dla tych programistów, którzy nie przewidzieli wcześniej osobliwości kinematycznych MRP [15].

Formuły analityczne stanowiące rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki MRP umożliwiają projektowanie algorytmów generacji trajektorii obliczających współrzędne wewnętrzne punktów dokładnie leżących na trajektorii zadanej, w jednym kroku z dokładnością wynikającą z długości rejestrów komputera. Formuły te wymuszają na programistach konieczność przewidzenia alternatywnych rozwiązań dla stanów osobliwych MRP. Formuły analityczne stanowiące rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki MRP o 6 stopniach swobody przedstawiono w pracach [8,12,14]. Formuły te dla MRP o 5 stopniach swobody opracowano w pracy [9]. Jednak nie przytoczono w niej równania więzów członu roboczego [15]. Sugeruje to, że człon ten może realizować trajektorie zadane z 6 stopniami swobody, co jest niemożliwe.

Z przeglądu tego wyniku, ze prezentowane w pracach [3,4,5,6,7,9,10,17] modele kinematyki nie pozwalają projektować dokładnych i jednocześnie sztywnych algorytmów generacji trajektorii zadanej ze zdefiniowaną kinematyką dla MRP z liczbą stopni swobody mniejszą niż 6. Współautor tej pracy opracował modele kinematyki [15] MRP z liczbą stopni swobody mniejszą niż 6. W pracy [15] współautor przedstawił modele kinematyki prostej i odwrotnej z



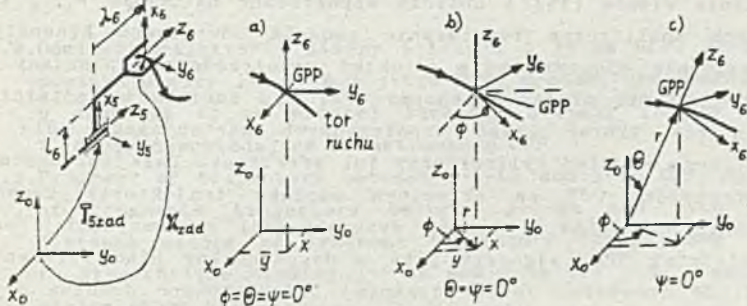
równaniami więzów dla MRP PR-02, IRb-6 i IRb-60. Modele te przedstawiono w postaci ciągłej i różniczkowej z uwzględnieniem osobliwości kinematycznych.

W punkcie 2 pracy opisano oryginalny algorytm generacji trajektorii zadanych dla manipulatora IRb-6. Algorytm ten wyznacza współrzędne wewnętrzne punktów dokładnie leżących na trajektorii zadanej w jednym kroku. Umożliwia także definiowanie kinematyki zadanej w postaci współrzędnych zewnętrznych punktów dowolnie oddalonych od siebie. W punkcie 3 opisano przykład liczbowy, będący wynikiem działania algorytmu generacji opisanego w 2 punkcie. W punkcie 4 sformułowano wnioski końcowe. Algorytm ten został napisany w języku FORTRAN 77 i uruchomiony na mc.μVAX 3800 w ośrodku ETO przy Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

## 2. Generacja trajektorii zadanych

Formuły stanowiące rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki MRP są podstawą do projektowania algorytmów generujących przebiegi współrzędnych naturalnych siłowników. Współrzędne te odpowiadają trajektorii zadanej obiektu manipulacji, opisanej w przestrzeni zewnętrznej robota. Algorytmy generujące współrzędne naturalne siłowników tworzą warstwę wyznaczania trajektorii ruchu, będącą elementem struktury funkcjonalnej układu sterowania robotami inteligentnymi [2]. Algorytmy te są niezbędnymi środkami programowymi sprzęgającymi pracę warstwy rozpoznawania z warstwą sterowania napędów [11].

W pracy [16] przedstawiono komputerowy algorytm PLAN2 generujący trajektorie chwytaka manipulatora IRb-6. Zadane współrzędne zewnętrzne punktów, przez które ma przechodzić generowana trajektoria, będziemy nazywać głównymi punktami podporowymi. Do generacji potrzebny jest opis wstępny trajektorii w postaci wartości współrzędnych zewnętrznych co najmniej dwóch głównych punktów podporowych, dowolnie oddalonych od siebie. Algorytm PLAN2 generuje dodatkowe punkty podporowe dla zdefiniowanej lub niezdefiniowanej kinematyki między kolejnymi głównymi punktami podporowymi.



rys.1. Kąty Eulera w układzie współrzędnych : a) kartezjańskim, b) cylindrycznym, c) sferycznym

Fig.1. Euler angles in follow coordinate systems : a) kartesian, b) cylindrical, c) spherical

W przypadku pojawienia się osobliwości kinematycznych algorytm PLAN2 podaje komunikat o tym stanie, podaje wartości współrzędnych naturalnych członów możliwe do przyjęcia i pyta użytkownika, które z podanych wartości przyjąć. Algorytm ten dla zdefiniowanej kinematyki opisano w pracy [16], a dla niezdefiniowanej kinematyki w pracy [1].

W niniejszej pracy opisane zostanie działanie algorytmu PLAN2 dla zdefiniowanej kinematyki trajektorii zadanej.

Algorytm ten zawiera cztery podstawowe segmenty, z których obliczenia przekazywane są do 21 segmentów pomocniczych. Segmenty podstawowe to:

- a) segment główny,
- b) segment ROZ1,
- c) segment ROZ2,
- d) segment ROZ3.

Dla uproszczenia opisu będziemy dalej stosować następujące skróty: GPP-główny punkt podporowy i DPP-dodatkový punkt podporowy.

Po uruchomieniu algorytm PLAN2 pyta o parametry  $l_6$  i  $\lambda_6$  opisujące chwytak (patrz rys.1). Następnie pyta : o liczbę  $GPP \leq 50$ , o współrzędne zewnętrzne i czas  $t$  kolejnego GPP, czy orientacja kolejnego GPP jest zdefiniowana. Jeśli orientacja jest zdefiniowana, to algorytm pyta, czy ma ją obliczyć. Jeśli tak, to pojawia się pytanie, w jakim układzie współrzędnych ma być obliczona : kartezjańskim, cylindrycznym czy sferycznym. Po zadeklarowaniu odpowiedniego układu współrzędnych wyznaczane są kąty Eulera, opisujące orientację danego GPP. Kąty te ilustruje rys.1. Jeśli orientacja zdefiniowana nie ma być obliczana, pojawia się pytanie o kąty Eulera GPP. Dla niezdefiniowanej orientacji GPP ustalany jest arbitralnie kąt  $\Psi$ . Kąty  $\Phi$  i  $\theta$  są obliczane ze współrzędnych zewnętrznych  $x, y, z$  (opisujących położenie aktualnego GPP).

Dla tak określonych współrzędnych zewnętrznych  $x, y, z, \Phi, \theta, \Psi$ , opisujących kolejny GPP, algorytm wyznacza macierz  $T_{5zad}$  [15], sprawdza czy spełnione jest równanie więzów [15] i oblicza współrzędne naturalne  $\theta'_1 - \theta'_5$  z formuł stanowiących analityczne rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki MRP IRb-6. Następnie algorytm pyta o układ współrzędnych opisujący kształt odcinka trajektorii między kolejnymi GPP. Dla odcinka w kształcie linii prostej należy wybrać układ współrzędnych kartezjański, dla odcinka krzywoliniowego - układ cylindryczny lub sferyczny. Dalej algorytm pyta o czas dyskretyzacji  $\Delta T$  na aktualnym odcinku trajektorii zadanej. Po zdefiniowaniu kształtów i czasów dyskretyzacji na wszystkich odcinkach między kolejnymi GPP algorytm pyta o dopuszczalny błąd położenia DP i orientacji DP chwytaka. Jeśli wcześniej zadeklarowano dowolną orientację chwytaka, wtedy algorytm arbitralnie przyjmuje  $DF=360$ . Dalej algorytm pyta o rodzaj generacji trajektorii, która można zadeklarować jako: swobodną, zgrubną i dokładną. Po zadeklarowaniu zgrubnej lub dokładnej generacji pojawia się pytanie o dopuszczalny błąd orientacji DFW.

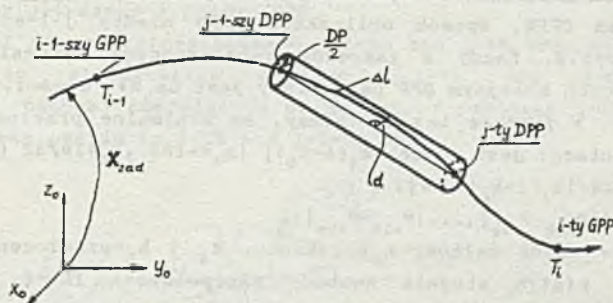
Dla swobodnej generacji algorytm wyznacza współrzędne zewnętrzne DPP, wynikające z zadeklarowanych wcześniej parametrów DP, DF i  $\Delta T$ ,



zapewniających deklarowany kształt odcinka trajektorii w przestrzeni zewnętrznej. Tak wyznaczone DPP ilustruje rys.2. Jeśli przez  $l$  oznaczymy długość odcinka trajektorii między  $i-1$ -szym i  $i$ -tym GPP, to długość  $\Delta l_j$  odcinka trajektorii między kolejnymi DPP można wyrazić następująco :

$$\Delta l_j = \min \left[ \frac{2 \cdot DF}{|\phi_i - \phi_{i-1}|} l, \frac{2 \cdot DF}{|\theta_i - \theta_{i-1}|} l, \frac{2 \cdot DF}{|\psi_i - \psi_{i-1}|} l, \frac{2 \cdot \Delta T}{|T_i - T_{i-1}|} l, \right. \\ \left. \Delta l(d = 0.5 \cdot DP) \right], \quad (1)$$

gdzie :  $\phi_i, \phi_{i-1}, \theta_i, \theta_{i-1}, \psi_i, \psi_{i-1}$  - kąty Eulera  $i$ -tego i  $i-1$ -szego GPP ;  $\Delta l, d, T_{i-1}, T_i$  - parametry zilustrowane na rys.2.  $\Delta l(d)$  jest długością odcinka trajektorii między kolejnymi DPP, zależną od odległości  $d$  zilustrowanej na rys.2.  $d$  jest odległością środka odcinka trajektorii  $\Delta l$  od prostej łączącej  $j-1$ -szy i  $j$ -ty DPP. Z rys.2 wynika, że im mniejsze  $d$ , tym mniejsze  $\Delta l$ . Przy takiej długości odcinków trajektorii można przypuszczać, że wszystkie punkty trajektorii opisane przez współrzędne z zakresów odpowiadających sąsiednim DPP nie wyjdą poza "trąbę" o średnicy DP, utworzoną przez kolejne cylindry zilustrowane na rys.2. Do wyznaczenia orientacji DPP algorytm przyjmuje liniową zmianę z długością  $l$  wzdłuż trajektorii dwóch kątów Eulera, a trzeci oblicza z równania więzów [15].



Rys.2. Odcinek trajektorii między  $i-1$ -szym i  $i$ -tym GPP.  $\Delta l$  - długość odcinka między  $j-1$ -szym i  $j$ -tym DPP.  $d$  - odległość środka odcinka o długości  $\Delta l$  od prostej łączącej  $j-1$ -szy i  $j$ -ty DPP.  $T_{i-1}$  i  $T_i$  - czasy odpowiadające zilustrowanym GPP

Fig.2. Fragment of trajectory between  $i-1$ -th and  $i$ -th GPP.  $\Delta l$  - length of fragments trajectory between  $j-1$ -th and  $j$ -th DPP.  $d$  - distance middle of fragment trajectory (which have length  $\Delta l$ ) to straightline binding  $j-1$ -th and  $j$ -th DPP.  $T_{i-1}$  and  $T_i$  - times assign shown GPP

Do obliczania czasu DPP algorytm także przyjmuje liniową zależność czasu od długości  $l$ . W przypadku gdy kolejne GPP różnią się tylko orientacją, rolę długości  $l$  przejmuje  $\max\{|\phi_{i-1} - \phi_i|, |\theta_{i-1} - \theta_i|, |\psi_{i-1} - \psi_i|\}$ . Wtedy  $d$  jest odległością środka odcinka trajektorii między kolejnymi DPP od

środku kuli o średnicy DP, pokrywającego się z GPP. Formuła (1) jest nadal słuszna. Po obliczeniu współrzędnych zewnętrznych DPP, algorytm sprawdza czy ten DPP jest z przestrzeni roboczej. Jeśli sprawdzany DPP wychodzi poza przestrzeń roboczą, następuje korekcja jego położenia, orientacji i czasu. Następnie obliczane są współrzędne naturalne członów  $\theta_1 + \theta_5$  oraz współrzędne naturalne siłowników  $\theta_{s1} + \theta_{s5}$ , odpowiadające temu DPP.

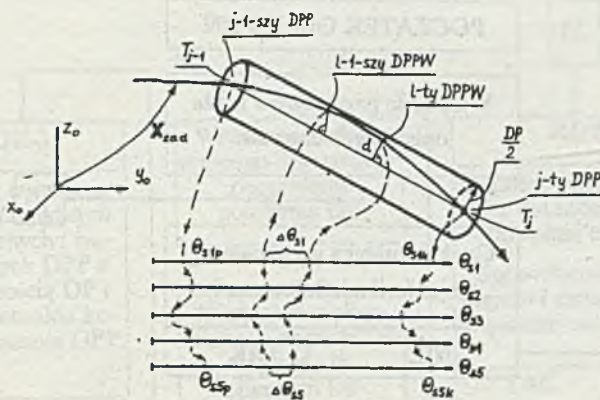
Dla niezbyt dużych wymagań dotyczących generacji trajektorii parametry DP DF,  $\Delta T$  mają stosunkowo duże wartości. Takim wartościom tych parametrów odpowiadają stosunkowo długie odcinki trajektorii między sąsiednimi DPP. Wtedy, przy zadeklarowanej swobodnej generacji trajektorii, przypuszczenia o lokalizacji jej wszystkich punktów we wspomnianej "trąbie" mogą być niesłuszne. Wynika to z tego, że trajektoria realizowana jest we współrzędnych wewnętrznych. Dla zapobieżenia wyjściu trajektorii poza "trąbę", przy stosunkowo dużych wartościach DP, DF i  $\Delta T$ , użytkownik może zadeklarować zgrubną generację trajektorii oraz parametr DFW. Wtedy algorytm wyznacza dwie grupy punktów podporowych: dodatkowe punkty podporowe zewnętrzne i dodatkowe punkty podporowe wewnętrzne. Dodatkowe punkty podporowe zewnętrzne są wyznaczone identycznie jak przy swobodnej generacji trajektorii i będziemy je oznaczać jak dotychczas skrótem DPP. Dodatkowe punkty podporowe wewnętrzne wynikają z podziału współrzędnych naturalnych siłowników (z przedziałów odpowiadających kolejnym DPP) i będziemy je oznaczać skrótem DPPW. Sposób obliczania DPPW między j-1-szym i j-tym DPP ilustruje rys.3. Każdy z zakresów współrzędnych naturalnych siłowników odpowiadających kolejnym DPP podzielony jest na N+1 części, gdzie N opisuje formuła (2). W formule tej zakładamy, że minimalne przełożenie katowe dla błędów orientacji jest równe  $|k_4(1-k_5)|$  ( $k_4 = -128$ ,  $k_5 = 19/32$  [13,15]):

$$N = E(2 \cdot XX / |k_4(1-k_5) \cdot DFW|),$$

$$XX = \max(|\theta_{s1k} - \theta_{s1p}|, \dots, |\theta_{s5k} - \theta_{s5p}|), \quad (2)$$

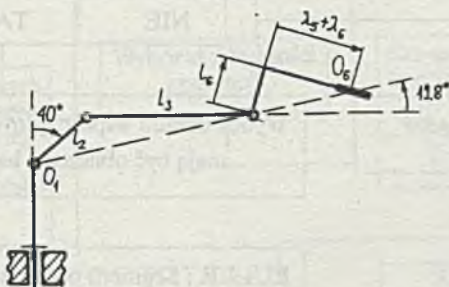
gdzie: E - część całkowita argumentu,  $k_4$  i  $k_5$  - przełożenia przekładni w czwartym i piątym stopniu swobody manipulatora IRB-6. Po wyznaczeniu współrzędnych naturalnych siłowników pierwszego DPPW na odcinku trajektorii między j-1-szym i j-tym DPP algorytm wyznacza jego współrzędne zewnętrzne i sprawdza czy jest wewnątrz cylindra o średnicy DP (zilustrowanego na rys.3). Jeśli ten DPPW jest poza cylindrem, to liczba N zostaje powiększona o 2 i powtórnie są wyznaczone współrzędne zewnętrzne pierwszego DPPW. Jeśli nowo obliczony pierwszy DPPW jest dalej poza wspomnianym cylindrem, to algorytm zwiększa liczbę N o 2 i czyni to aż do chwili, kiedy ten DPPW znajdzie się wewnątrz walca. Następnie dla tak zmodyfikowanej liczby N wyznacza współrzędne zewnętrzne kolejnego DPPW. Jeśli sąsiednie DPP różnią się tylko orientacją, wtedy rolę walca (zilustrowanego na rys.3) przejmuje kula o średnicy DP i środku pokrywającym się z DPP. Algorytm sprawdza zanieżenie każdego DPPW w przestrzeni roboczej. Jeśli sprawdzany DPPW wychodzi poza przestrzeń roboczą, to następuje korekcja jego położenia, orientacji i współrzędnych naturalnych siłowników. Do obliczania czasu DPPW algorytm przyjmuje liniową zależność od współrzędnych naturalnych siłowników.





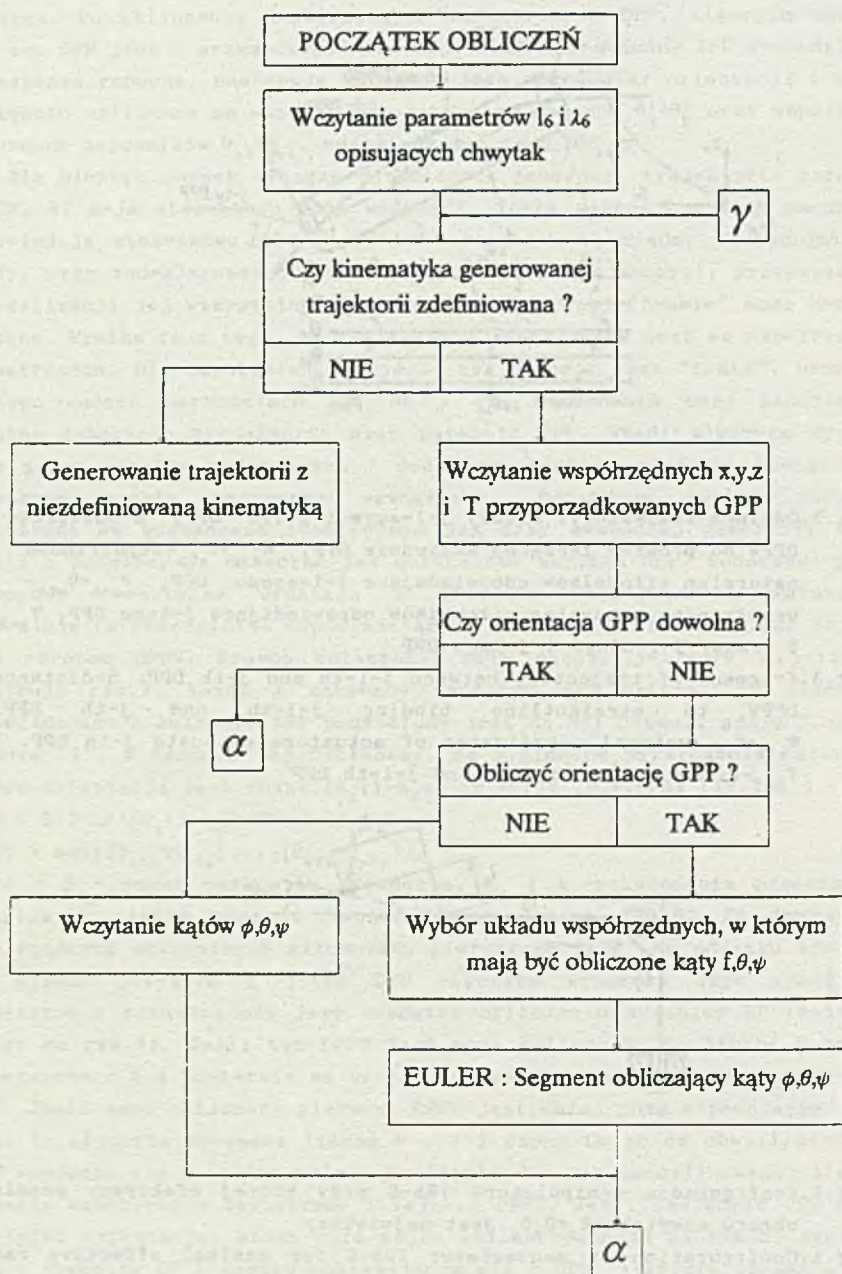
Rys.3. Odcinek trajektorii między j-1-szym i j-tym DPP,  $d$ -odległość DPPW od prostej łączącej sąsiednie DPP,  $\theta_{.1p} + \theta_{.5p}$ -współrzędne naturalne siłowników odpowiadające j-1-szemu DPP,  $\theta_{.1k} + \theta_{.5k}$ -współrzędne naturalne siłowników odpowiadające j-temu DPP,  $T_{j-1}$ ,  $T_j$ -czasy j-1-szego i j-tego DPP

Fig.3. Fragment of trajectory between j-1-th and j-th DPP.  $d$ -distance DPPW to straightline binding j-1-th and j-th DPP.  $\theta_{.1k} + \theta_{.5k}$ -natural coordinates of actuators adequate j-th DPP.  $T_j$ ,  $T_{j-1}$ -times assign to j-th and j-1-th DPP

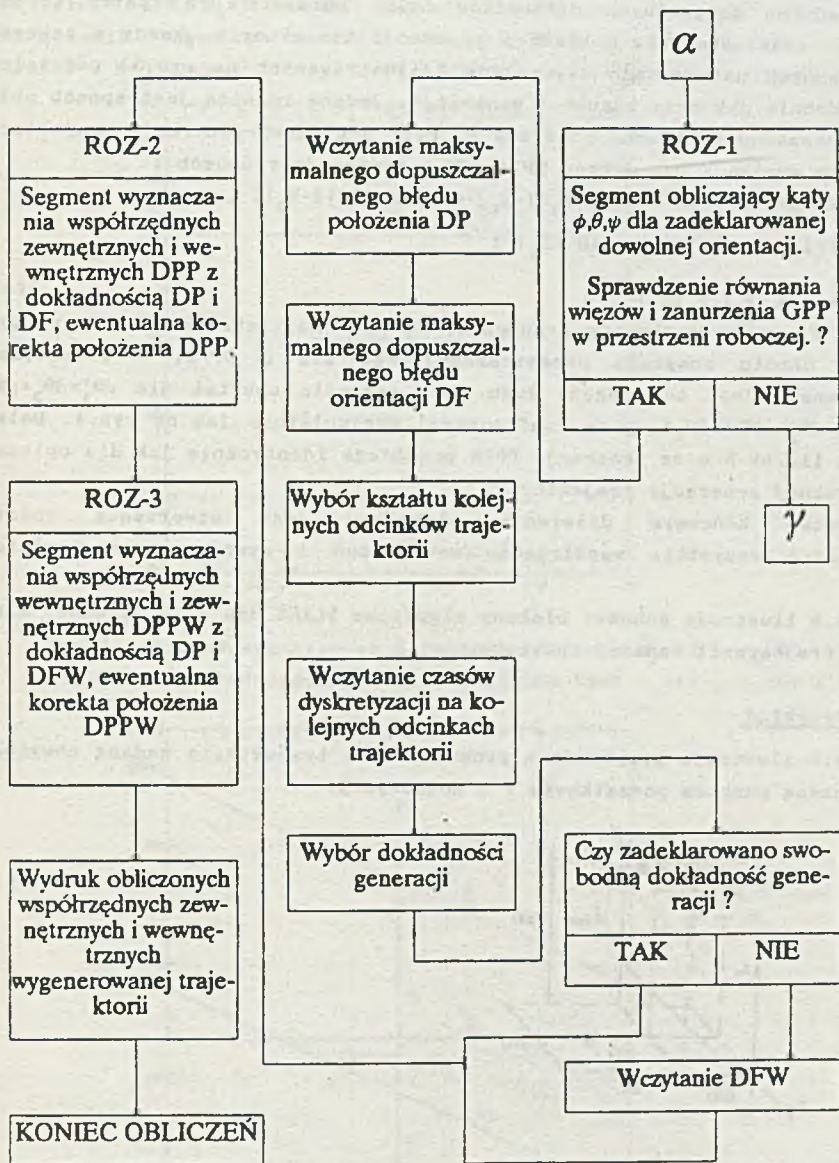


Rys.4. Konfiguracja manipulatora IRb-6, przy której efektywny promień obrotu chwytaka  $R_2 = 0,0_6$  jest największy

Fig.4. Configuration of manipulator IRb-6 for maximal effective radius rotation  $R_2 = 0,0_6$  of task







Rys.5. Schemat blokowy algorytmu PLAN2  
 Fig.5. Block diagram of PLAN2 algorithm

Przy zgrubnej generacji trajektorii algorytm uwzględnia w obliczaniu współrzędnych naturalnych siłowników tylko parametr DFW (patrz formuła (2)). Po zadeklarowaniu dokładnej generacji trajektorii każdy z zakresów współrzędnych naturalnych siłowników (zilustrowanych na rys.3) podzielony jest, podobnie jak przy zgrubnej generacji. Jedyną różnicą jest sposób obliczania początkowej liczby podziału  $N$ . Przy dokładnej generacji trajektorii liczba ta wynika z parametrów DP i DFW w następujący sposób :

$$N = E(XX/XY), \quad XY = \min[|k_4(1-k_5) \cdot DFW|/2, DP/(2 \cdot R_2)] ,$$

$$R_2 = [(l_2 \cos 40^\circ)^2 + (l_2 \sin 40^\circ + l_3)^2]^{1/2} + [(\lambda_5 + \lambda_6)^2 + l_6^2]^{1/2} , \quad (3)$$

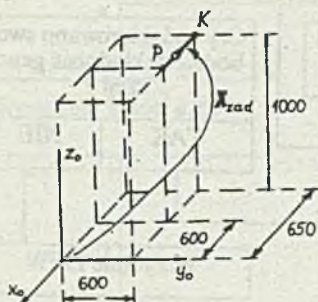
gdzie :  $E$  - część całkowita argumentu,  $R_2$  jest największym efektywnym promieniem obrotu chwytaka przemieszczającego się o  $DP/2$ , w przestrzeni zewnętrznej. Jest to długość łuku jaki zakreśla chwytak dla  $d\theta'_1 = d\theta'_3 = d\theta'_4 = d\theta'_5 = 0$  i  $d\theta'_2 \approx DP/(2R_2)$ , przy konfiguracji manipulatora jak na rys.4. Dalsza korekta liczby  $N$  oraz generacja DPPW przebiega identycznie jak dla opisanej już zgrubnej generacji trajektorii.

Efektym końcowym działania algorytmu jest utworzenie zbiorów opisujących wszystkie współrzędne wewnętrzne i zewnętrzne manipulatora IRb-6.

Rys.5 ilustruje schemat blokowy algorytmu PLAN2 dla zdefiniowanej kinematyki trajektorii zadanej chwytaka.

### 3. Przykład

Rys.6 ilustruje przykładową prostoliniową trajektorię zadaną chwytaka, ograniczoną punktem początkowym P i końcowym K.



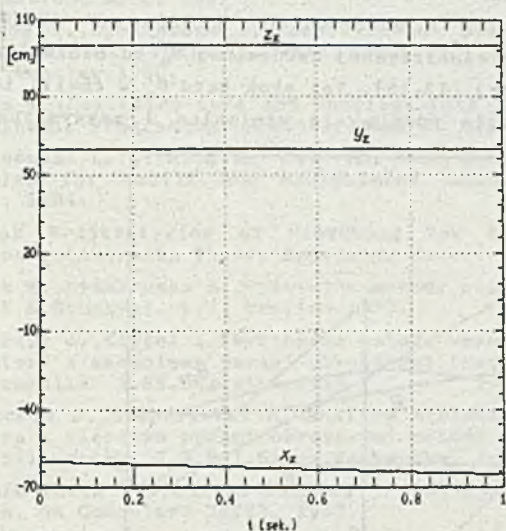
Rys.6. Trajektorja zadana  $X_{zad}$

Fig.6. Required trajectory  $X_{zad}$

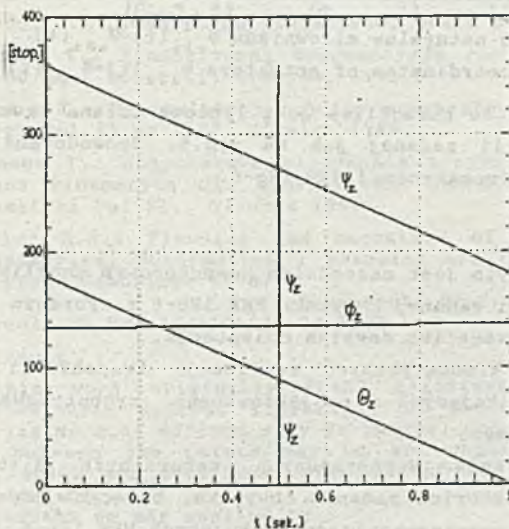
Współrzędne tych punktów są następujące :  $x_p = -0.60$  m,  $y_p = 0.60$  m,  $z_p = 1.0$  m,  $\phi_p = 135^\circ$ ,  $\theta_p = 179^\circ$ ,  $\psi_p = 359^\circ$ ,  $x_k = -0.65$  m,  $y_k = 0.60$  m,  $z_k = 1.0$  m,  $\phi_k = 137.29^\circ$ ,  $\theta_k = 1^\circ$ ,  $\psi_k = 180^\circ$ . Przyjmujemy następujące parametry wejściowe algorytmu PLAN2, definiujące kinematykę trajektorii z rys. 6 : parametry chwytaka  $l_6 = 0$  i  $\lambda_6 = 0.16$  m ; liczba GPP=2 (punkty P i K); współrzędne zewnętrzne GPP równe



odpowiednim współrzędnym punktu P i K; czas pierwszego GPP  $T_1=0$ , czas drugiego GPP  $T_2=1.0$  sek; kształt trajektorii - linia prosta; rodzaj generacji - zgrubny; czas dyskretyzacji  $\Delta T=0.004$  sek;  $DP=0.0002$  m;  $DF=60^\circ$ ,  $DFW=2^\circ$ . Wynikiem generacji jest 1283 DPP, które ilustrują rys.7 i rys.8.

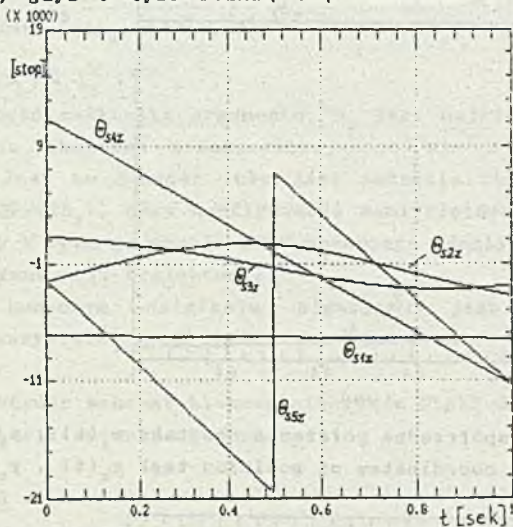


Rys.7a. Zadane współrzędne położenia chwytaka  $x_z(t)$ ,  $y_z(t)$ ,  $z_z(t)$ .  
 Fig.7a. Required coordinates of position task  $x_z(t)$ ,  $y_z(t)$ ,  $z_z(t)$



Rys.7b. Zadane współrzędne orientacji chwytaka  $\phi_z(t)$ ,  $\theta_z(t)$ ,  $\psi_z(t)$ .  
 Fig.7b. Required coordinates orientation of task  $\phi_z(t)$ ,  $\theta_z(t)$ ,  $\psi_z(t)$

Współrzędne  $y_z$  oraz  $z_z$ , wygenerowane przez algorytm PLAN2, są obciążone błędem mniejszym niż  $10^{-4}$  cm. Z rys.7b wynika, że kąt  $\Psi_z$  gwałtownie zmienia się dla  $t \approx 0.5$  sek. Skok ten jest spowodowany gwałtowną zmianą współrzędnej naturalnej piątego siłownika w tej chwili czasu, co ilustruje rys.8.  $\theta_{5z}$  zmienia się nagle między DPP o numerach 377 i 900, od  $-20357.896^\circ$  do  $6805.735^\circ$ , powodując zmianę współrzędnej naturalnej  $\theta'_5$  od minimalnej do maksymalnej wartości granicznej [13,15]. Ten skok kąta  $\theta'_5$  w chwili  $t \approx 0.5$  sek. równy jest  $360^\circ$ , gdyż o tyle różnią się minimalna i maksymalna wartość graniczna  $\theta'_5$ .



Rys.8. Zadane współrzędne naturalne siłowników  $\theta_{\cdot 1z}(t) + \theta_{\cdot 5z}(t)$   
 Fig.8. Required natural coordinates of actuators  $\theta_{\cdot 1z}(t) + \theta_{\cdot 5z}(t)$

Przykład ten pokazuje, że niemożliwa jest liniowa zmiana kąta  $\Psi$  między punktami P i K trajektorii zadanej jak na rys.6. Spowodowane jest to właściwościami struktury kinematycznej MRP IRb-6.

#### 4. Wnioski

- Przedstawiony tu algorytm jest narzędziem komputerowym umożliwiającym :
- planowanie trajektorii zadanej chwytaka MRP IRb-6 z wybranym kształtem toru ruchu i zdefiniowaną lub dowolną orientacją,
  - analizę możliwości kinematycznych realizacji trajektorii zadanych przez MRP IRb-6, wynikających z projektowanego zrobotyzowanego stanowiska technologicznego,
  - generowanie przebiegów współrzędnych naturalnych siłowników, odpowiadających trajektoriom zadanym chwytaka, będących jednocześnie wartościami zadanymi serwomechanizmów sterujących MRP IRb-6,
  - opracowanie warstwy wyznaczania trajektorii robota IRb-6 i IRp-6, które wyposażone są w identyczne manipulatory.

Przedstawiony algorytm jest podatny na modyfikacje, np. przez modyfikację segmentu pomocniczego, definiującego przestrzeń roboczą, możemy uwzględnić przeszkody, które należy ominąć.



## LITERATURA

- [1] Baraniec T.: Planowanie trajektorii minimalnoczasowych z dowolną kinematyką dla robota IRb-6. Praca dyplomowa, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1991.
- [2] Camarinka-Matos L.M.: Plan Generation in Robotics, IEEE J.Robotics and Automation, No-3, 1987
- [3] Dulęba I., Łysakowska B.: Zmodyfikowana metoda R.M.Taylor'a parametryzacji ścieżek prostoliniowych ruchu robota IRb-6. III K.K.Robotyki t.2, Wrocław 1990.
- [4] Gerke W.: Collision-free and Shortest Path for Industrial Robots Found by Dynamic Programming. Robotosysteme 1, 1985.
- [5] Goussenes L.: Strategies for Solving Collision Free Trajectories. Problem for Mobile and Manipulator Robots, Intern.J.Robotics Res. 3(4), 1984.
- [6] Jacak W.: Strategies of Searching for Collision-Free Manipulators Motions : Automata Theory Approach, Robotica 7(2), 1989.
- [7] Jacak W., Łysakowska B.: Dyskretne metody modelowania kinematyki robota. III K.K.Robotyki. t.2, Wrocław 1990.
- [8] Knapczyk J., Kisiel I.: Wektorowa metoda wyznaczania ruchu członów manipulatora z sześcioma parami obrotowymi (zadanie odwrotne) Z.N.Pol.Śl., s.Mechanika z.86, Gliwice 1987.
- [9] Knapczyk J., Stępniewski A.: Analiza kinematyczna i dynamiczna manipulatora z pięcioma parami obrotowymi metodą macierzową dla zadanej trajektorii ruchu. Z.N.Pol.Śl. s.Mechanika z.85. Gliwice 1985.
- [10] Lozano-Perez T.: Spatial Planning : Configuration Space Approach. IEEE Trans. on Computers 32(2), 1983.
- [11] Niederliński A.: Roboty przemysłowe, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 1981.
- [12] Paul R. P.: Robot Manipulators: Mathematic, Programming and Control. MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, 1983.
- [13] Szkodny T.: Dynamika manipulatorów, praca niepublikowana.
- [14] Szkodny T.: Kinematyczna dekompozycja ruchu członu roboczego robota IRb-60. K.K.Robotyki, Wrocław, 1990.
- [15] Szkodny T.: Manipulatory robotów przemysłowych - Modele matematyczne. Skrypt Pol.Śl.nr.1507, Gliwice 1989.
- [16] Szynawa T.: Komputerowe planowanie trajektorii minimalnoczasowych zadaną kinematyką dla manipulatora IRb-6. Praca dyplomowa, Instytut Automatyki Pol.Śl., Gliwice 1991.
- [17] Taylor R.M.: Planning and execution of straight-line manipulator trajectories, Robotmotion : planning and control.eds. M.Brady i in. MIT Press Cambridge 1983.

Recenzent: Prof.dr h.inż. Antoni Woźniak

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

Abstract:

In this work originally PLAN2 algorithm of generation required trajectories with defined kinematics is presented. Kinematics of this trajectories we must defined only in points, over its a task required move. Distance between the points may be any value. This algorithm applied formulas, which are analytical solution of inverse kinematics problem of IRb-6 manipulator.

This algorithm we may applied to :

- a) planning trajectories with required shape path (straightline, cylindrical, spherical) of move task;
- b) analysis of kinematic possibility realization of required trajectories;
- c) generation required value of actuators coordinates (adequates to required trajectories of task) for servo regulators;
- d) project of layer, which is functional element of structure control of IRb-6 and IRp-6 robots, which have identic manipulators.