

Marek Boryga, Andrzej Graboś
Akademia Rolnicza w Lublinie
Katedra Podstaw Techniki

MODELOWANIE TRAJEKTORII RUCHU ORAZ BADANIE DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA AGROROBOTA

Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób modelowania trajektorii ruchu w wybranych współrzędnych (kartezjańskich, cylindrycznych i sferycznych) oraz wyniki komputerowej symulacji ruchu agrorobota, którego zespół pozycjonowania posiada trzy stopnie swobody. Badania symulacyjne, dla trzech wybranych torów ruchu chwytaka, przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Przedstawiono rzeczywiste tory ruchu chwytaka agrorobota oraz czasowe przebiegi błędów realizacji zamierzonego toru ruchu.

Słowa kluczowe: agrorobot, modelowanie trajektorii ruchu, dokładność pozycjonowania

Wykaz oznaczeń

λ_1, l_2, l_3	–	długości poszczególnych ogniw, [m]
θ_i	–	względne przemieszczenia kątowe ogniw, [rad]
x_s, y_s, z_s	–	współrzędne środka sfery [m]
R_s, R_w	–	promień sfery i walca [m]
p_x, p_y, p_z	–	współrzędne położenia chwytaka, [m]
Ω_s, Φ_s	–	współrzędne sferyczne [rad]
Φ_w, z_w	–	współrzędne walcowe [rad], [m]
k_s	–	współczynnik sprężystości [Nm/rad]
c_t	–	współczynnik tłumienia wiskotycznego [Nms/rad]
p, k	–	indeksy wskazujące odpowiednio początkową i końcową współrzędną toru ruchu
r, u, h	–	indeksy wskazujące odpowiednio fazę rozruchu, ruchu ustalonego i hamowania

Wprowadzenie

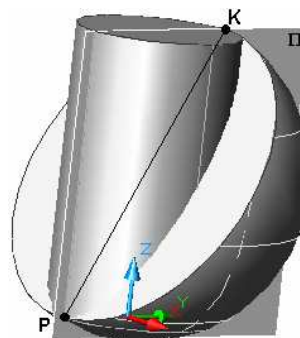
Zadanie planowania trajektorii ruchu manipulatorów jest zazwyczaj dekomponowane na dwa główne etapy:

- przestrzennego planowania trajektorii ruchu chwytaka i ogniw manipulatora (w przestrzeni roboczej),
- parametryzacji czasem polegającej na przyjęciu określonego prawa ruchu zmian współrzędnych uogólnionych i ich pochodnych.

Złożoność czynności agrorobota i zbliżenie ich do czynności ludzkiej ręki stawiają wysokie wymagania w zakresie planowania trajektorii, które nie jest zdeterminowane i nie odbywa się niejako „na pamięć”. Agrorobot musi dokonywać analizy sytuacji przestrzennej z wykorzystaniem systemów wizyjnych i wyboru toru ruchu chwytaka w czasie rzeczywistym. Zaproponowano by drugi etap planowania trajektorii ruchu chwytaka nie odbywał się poprzez parametryzację czasem współrzędnych uogólnionych i ich pochodnych, ale parametryzację czasem wybranego toru ruchu. Uciążliwe jest założenie z góry przebiegów przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń w parach kinematycznych w sytuacji gdy kolejne ruchy chwytaka są zupełnie różne i uzależnione od przypadkowego położenia zbieranych owoców. W przypadku zbioru istotna jest również bardzo duża dokładność odwzorowania zamierzonego toru ruchu chwytaka, by nie uszkodzić sąsiadujących z torem krzaków i niedojrzałych owoców. Stąd też konieczna jest analiza błędów pozycjonowania dla trajektorii ruchu charakterystycznych dla zbioru.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest ocena dokładności pozycjonowania agrorobota dla trzech wybranych torów ruchu. Rozpatrzony został ruch po sferze, po powierzchni walcowej oraz po prostej (rys. 1). W każdym przypadku planowana trajektoria wymuszała ruch we wszystkich parach kinematycznych łańcucha pozycjonowania.



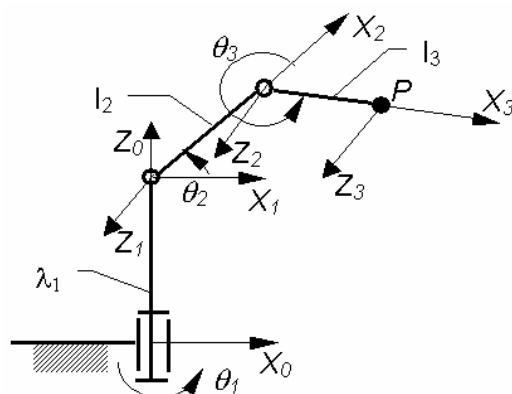
Rys. 1. Położenie prostej i powierzchni po których zaplanowano ruch

Fig. 1. Position of the straight line and the plane on which the movement was planned

W celu oceny dokładności ruchu chwytaka zbudowano matematyczny model dynamiki zespołu pozycjonowania agrorobota (Craig 1989). Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Przedstawiono rzeczywiste toru ruchu chwytaka agrorobota oraz czasowe przebiegi błędów realizacji zamierzonego toru ruchu.

Metodyka

Obiektem badań był zespół pozycjonowania agrorobota o trzech stopniach swobody umożliwiającą realizację ruchów przestrzennych (rys. 2).



Rys. 2. Schemat zespołu pozycjonowania agrorobota z wprowadzonymi układami współrzędnych wg notacji Denavita-Hartenberga

Fig. 2. Diagramme of agrorobot positioning system with the introduced co-ordinate systems according to Denavit-Hartenberg notation.

Budowa matematycznego modelu dynamiki tego zespołu wymagała:

- rozwiązania prostego zadania kinematyki,
- rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki,
- wyprowadzenia różniczkowych równań ruchu ogniów.

Trajektorie ruchu chwytaka określono w trójwymiarowym kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z podstawą agrorobota. Rozpatrzono następujące toru ruchu:

- ruch chwytaka po sferze (tor I), której współrzędne środka wynosiły $x_s=1\text{m}$, $y_s=0$, $z_s=1\text{m}$, natomiast promień $R_s=0,25\text{m}$,

- ruch chwytaka po powierzchni bocznej walca (tor II) wpisanego w ww. sferę przy czym promień walca R_w był równy połowie promienia kuli,
- ruch po prostej (tor III) położonej w płaszczyźnie π przechodzącej przez środek sfery i równoległej do płaszczyzny y_0z_0 .

Początek i koniec wszystkich wymienionych torów stanowią punkty o współrzędnych P i K, które są położone na linii przenikania sfery i walca w płaszczyźnie π (rys. 1). W przypadku ruchu po sferze współrzędne chwytaka określono we współrzędnych sferycznych:

$$\begin{aligned} p_x &= x_s + R_s \sin \Omega_s \cos \Phi_s \\ p_y &= y_s + R_s \sin \Omega_s \sin \Phi_s \\ p_z &= z_s + R_s \cos \Omega_s \end{aligned} \quad (1)$$

Dla przyjętego toru ruchu początkowe i końcowe współrzędne sferyczne wynoszą odpowiednio: $\Omega_{sp} = 5\pi/6$, $\Phi_{sp} = -\pi/2$, $\Omega_{sk} = \pi/6$, $\Phi_{sk} = \pi/2$.

Dla ruchu po powierzchni bocznej walca współrzędne chwytaka określono we współrzędnych cylindrycznych:

$$\begin{aligned} p_x &= x_s + R_w \cos \Phi_w \\ p_y &= y_s + R_w \sin \Phi_w \\ p_z &= z_w \end{aligned} \quad (2)$$

Początkowe i końcowe współrzędne cylindryczne wynoszą: $\Phi_{wp} = -\pi/2$, $z_{wp} = 1 - R_s \sqrt{3}/2$, $\Phi_{wk} = \pi/2$, $z_{wk} = 1 + R_s \sqrt{3}/2$. Ruch po prostej określono poprzez współrzędne początku i końca toru ruchu $P(1, -R_s/2, 1 - R_s \sqrt{3}/2)$ i $K(1, R_s/2, 1 + R_s \sqrt{3}/2)$. Parametryzacja czasem dla przedstawionych trajektorii ruchu polegała na przyjęciu trapezowego prawa prędkości dla wartości zmiennych w czasie. W przypadku ruchu po sferze zmiennymi w czasie były: Ω_s oraz Φ_s (wzór nr 1) dla ruchu po powierzchni bocznej walca: Φ_w i z_w (wzór nr 2) natomiast dla prostej z oraz y gdyż założony ruch odbywał się w płaszczyźnie π (rys.1). Dla wszystkich wybranych torów przyjęto, że całkowite czasy ruchu są sobie równe oraz czasy rozruchu i hamowania wynoszą $t_r = t_h = 0,2s$. Wartości charakterystyczne parametrów kinematycznych dla poszczególnych torów ruchu wyznaczono wg następujących zależności:

Dla toru I:

Przyspieszenie w fazie rozruchu i hamowania dla współrzędnej Φ_s założono równe $\ddot{\Phi}_s = 10 \text{ rad} / \text{s}^2$. Maksymalna prędkość wynosi

$$\dot{\Phi}_s = \ddot{\Phi}_s \cdot t_r \quad (3)$$

Na całkowitą drogę kątową dla współrzędnej Φ_s składają się droga rozruchu, ruchu ustalonego oraz hamowania

$$\Phi_{sr} + \Phi_{su} + \Phi_{sh} = |\Phi_{sk} - \Phi_{sp}| \quad (4)$$

gdzie: $\Phi_{sr} = \Phi_{sh} = \ddot{\Phi}_s \cdot \frac{t_r^2}{2}$, $\Phi_{su} = \frac{|\Phi_{sk} - \Phi_{sp}|}{2\dot{\Phi}_s}$.

Czas ruchu ustalonego wynosi

$$t_u = \frac{\Phi_{su}}{\dot{\Phi}_s} \quad (5)$$

Analogicznie, całkowita droga kątowa dla współrzędnej Ω_s wynosi

$$\Omega_{sr} + \Omega_{su} + \Omega_{sh} = |\Omega_{sk} - \Omega_{sp}| \quad (6)$$

przy czym $\Omega_{sr} = \Omega_{sh}$.

Po przekształceniach otrzymano przyspieszenie maksymalne dla współrzędnej Ω_s

$$\ddot{\Omega}_s = \frac{|\Omega_{sk} - \Omega_{sp}|}{t_r^2 + t_r \cdot t_u} \quad (7)$$

Dla toru II:

Przyspieszenie w fazie rozruchu i hamowania przyjęto równe $\ddot{\Phi}_w = 10 \text{ rad} / \text{s}^2$. Korzystając z analogicznych zależności uzyskano:

$$\dot{\Phi}_w = \ddot{\Phi}_w \cdot t_r \quad (8)$$

$$Z_{wr} + Z_{wu} + Z_{wh} = |Z_{wk} - Z_{wp}| \quad (9)$$

$$\ddot{Z}_w = \frac{|Z_{wk} - Z_{wp}|}{t_r^2 + t_r \cdot t_u} \quad (10)$$

Dla toru III:

Składowe przyspieszeń i przyspieszenie wypadkowe wynoszą:

$$\ddot{z} = \frac{|z_k - z_p|}{t_r^2 + t_r \cdot t_u} \quad \ddot{y} = \frac{|y_k - y_p|}{t_r^2 + t_r \cdot t_u} \quad \ddot{s} = \sqrt{\ddot{z}^2 + \ddot{y}^2} \quad (11)$$

Komputerowa symulacja ruchu agrorobota została przeprowadzona w programie Matlab (Simulink). Program podzielono na sześć współpracujących modułów:

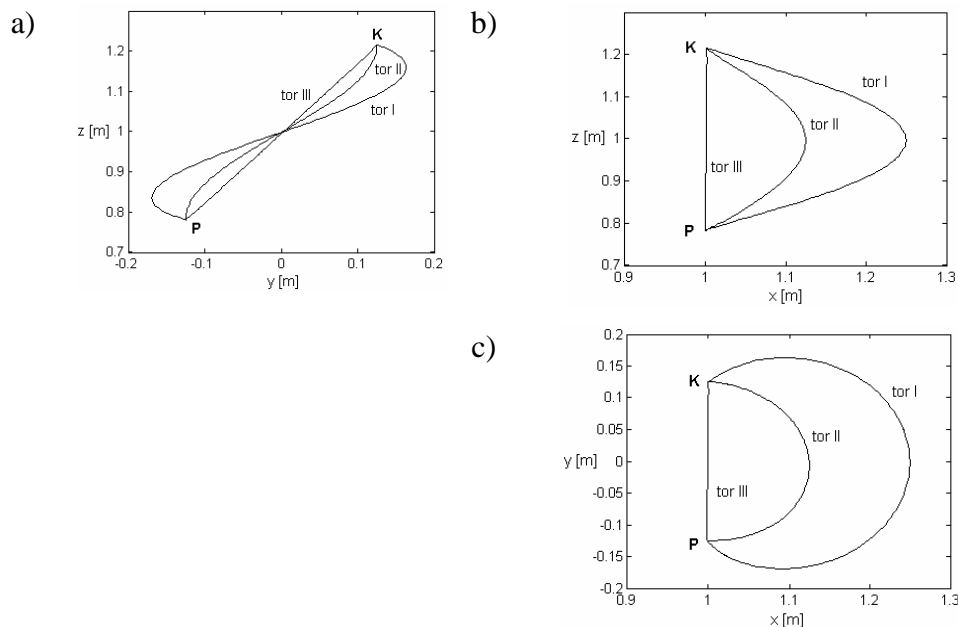
- tor ruchu chwytaka – w którym zadawane są początkowe i końcowe położenia toru ruchu oraz dokonywana jest parametryzacja współrzędnych wybranego toru ruchu,
- zadanie odwrotne kinematyki – w którym wyznaczane są współrzędne konfiguracyjne ogniw w funkcji położenia chwytaka,
- prędkości i przyspieszenia ogniw – w którym wyznaczane są prędkości i przyspieszenia kątowe ogniw,
- charakterystyki rzeczywiste – w którym, poprzez całkowanie równań ruchu, obliczane są rzeczywiste wartości charakterystyk ruchu ogniw z uwzględnieniem podatności i tłumienia w układach napędowych,
- zadanie proste kinematyki – w którym, na podstawie rzeczywistych charakterystyk ruchu ogniw wyznaczane są realizowane (rzeczywiste) położenia chwytaka,
- błędy pozycjonowania – obliczane jako wartość różnicy pomiędzy zadanymi i realizowanymi współrzędnymi chwytaka.

Wyniki badań i ich analiza

W przeprowadzonej komputerowej symulacji ruchu agrorobota przyjęto następujące, ważniejsze dane i założenia:

- przyjęte długości ogniw wynoszą $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ m, zaś zakres względnych przemieszczeń kątowych w parach kinematycznych przyjęto w przedziale od $\langle 0, 2\pi \rangle$,
- współczynniki sprężystości i tłumienia modelu Kelvina-Voigta, który wprowadzono w celus uwzględnienia podatności i tłumienia więzów wynosiły odpowiednio $k_s=25000$ Nm/rad oraz $c_t=200$ Nms/rad.

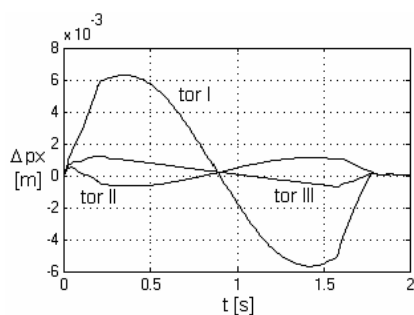
W wyniku przeprowadzonej symulacji ruchu układu pozycjonowania agrorobota uzyskano przebiegi realizowanych torów ruchu chwytaka. Tory te zostały przedstawione w trzech rzutach prostokątnych (rys. 3).



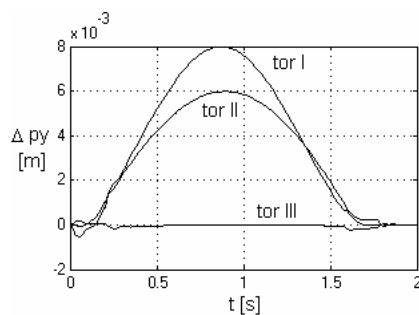
Rys. 3. Rzuty prostokątne realizowanych torów ruchu chwytaka: a) rzut z prawej, b) rzut główny, c) rzut z góry

Fig. 3 Orthogonal projections of the actual movement trajectories performed by the gripping device: a) right side view, b) principal view, c) top view

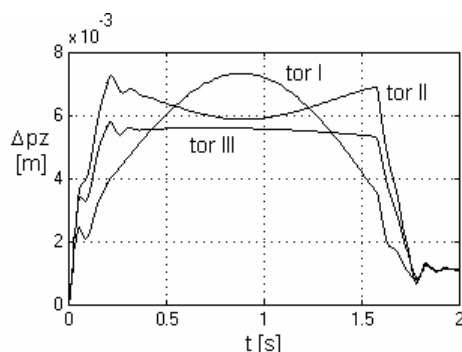
Przebiegi błędów położenia chwytaka w czasie ruchu po zadanej trajektorii przedstawiają rysunki 4, 5 oraz 6



Rys. 4. Czasowe przebiegi błędów w osi x_0
Fig. 4. Temporal trajectories of positioning errors in x_0 axis direction



Rys. 5. Czasowe przebiegi błędów w osi y_0
Fig. 5. Temporal trajectories of positioning errors in y_0 axis direction



Rys. 6. Czasowe przebiegi błędów pozycjonowania w kierunku osi z_0
Fig. 6. Temporal trajectories of positioning errors in z_0 axis direction

Wnioski

1. Największy błąd pozycjonowania występuje dla toru I (ruch po sferze), maksymalna jego wartość wynosi od 6 do $8 \cdot 10^{-3}$ m. Droga jaką ma do pokonania chwytak w czasie ruchu po sferze jest największa (rys. 4) stąd też, przy wprowadzonym założeniu równości czasów ruchu na poszczególnych torach, wartości przyspieszeń kątowych ogni, a zatem i sił bezwładności wpływających na błędy pozycjonowania, są największe dla toru I.
2. Największe błędy pozycjonowania w kierunku osi x_0 i y_0 zaobserwowano dla toru I (6 do $8 \cdot 10^{-3}$ m), zaś najmniejsze dla toru III (do $2 \cdot 10^{-3}$ m). Związane jest to głównie z bezwładnością układu. Błędy w kierunku osi z_0 wynikają zarówno z bezwładności jak i ugięć statycznych.
3. Zmiany błędów realizacji zamierzonego toru ruchu dla fazy ruchu ustalonego wynikają głównie ze zmian konfiguracji przestrzennej ogni, natomiast w fazach ruchu nieustalonego występują zaburzenia stanów równowagi dynamicznej ujawniające się w postaci drgań własnych tłumionych.
4. W dalszych badaniach dokonana zostanie analiza wpływu podatności i tłumienia więzów na dokładność pozycjonowania. Ponadto model zostanie uzupełniony o układy sterownia w celu zmniejszenia błędów pozycjonowania.

Bibliografia

Craig J.J. 1989. Introduction to Robotics. Mechanics and Control. Addison-Wesley Publ. Comp.

MODELLING OF MOVEMENT TRAJECTORY AND ANALYSIS OF ACCURACY OF AGROROBOT POSITIONING

Summary

The study presents a method of modelling of movement trajectory in selected coordinates (Cartesian, cylindrical and spherical) as well as the results of computer simulation of the agrorobot's movement, whose positioning system possesses three levels of freedom. The simulation tests, for three selected movement trajectories of the gripping device, were done in Matlab (Simulink) program. Real movement trajectories of the agrorobot's gripping device were presented, as well as temporal erroneous trajectories.

Key words: agrorobot, modelling of movement trajectories, accuracy of positioning