

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

BADANIA SYMULACYJNE AGROROBOTA W ASPEKTCIE DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA

Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób modelowania oraz wyniki komputerowej symulacji ruchu agrorobota, którego zespół pozycjonowania posiada trzy stopnie swobody. Analizę kinematyki przeprowadzono metodą macierzową. Równania ruchu wyprowadzono na podstawie równań Lagrange'a II rodzaju. Badania symulacyjne, dla trzech wybranych prędkości chwytaka, przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów błędów realizacji zamierzonego toru ruchu.

Słowa kluczowe: agrorobot, kinematyka, dynamika, symulacja, dokładność pozycjonowania

Wykaz oznaczeń

λ_1, l_2, l_3	– długości poszczególnych ogniw, [m]
θ_i	– względne przemieszczenie kątowe ogniw, [rad]
A_i	– macierz przekształcenia układów współrzędnych,
s_i, c_i, s_{ij}, c_{ij}	– oznaczenia funkcji trygonometrycznych sinus i cosinus kąta θ_i oraz sumy kątów θ_i i θ_j ,
m_i	– masy poszczególnych ogniw, [kg]
$J_{Z2}, J_{Z3}, J_{Y2}, J_{Y3}$	– masowe momenty bezwładności ogniw, [kgm ²]
d_{ijk}	– współczynniki bezwładności i symbole Christoffela, [kgm ²]
M_{ist}	– moment statyczny obciążający ogniwo i , [Nm]
$M_i(t)$	– uogólnione momenty obrotowe, [Nm]
p_x, p_y, p_z	– współrzędne położenia chwytaka w układzie związanym z podstawą agrorobota, [m]
$\arctg(y,x)$	– dwuargumentowa funkcja arctangens, która wyznacza wartość funkcji i uwzględnia w której ćwiartce układu współrzędnych leży wyznaczony kąt,

- a, b, c, d – współczynniki występujące w rozwiązaniu odwrotnego zadania kinematyki,
 a_P – maksymalne przyspieszenie punktu P dla zadanego toru ruchu, $[m/s^2]$
 V_{xP}, V_{yP}, V_{zP} – składowe prędkości punktu P dla zadanego toru ruchu, $[m/s]$

Wprowadzenie

Zautomatyzowanie czynności manipulacyjnych przy zbiorze owoców wymaga od maszyny manipulacyjnej wykonywania nie tylko złożonych, precyzyjnych i szybkich ruchów w przestrzeni roboczej, ale również rozpoznawania wybranych obiektów w tej przestrzeni i odpowiedniej orientacji chwytaka względem dojrzałych owoców. Złożoność czynności agrorobota i zbliżenie ich do czynności ludzkiej ręki stawiają wysokie wymagania w zakresie sterowania agrorobotem, które nie może być zdeterminowane i nie może odbywać się niejako „na pamięć”. W związku z tym agrorobot musi dokonywać analizy sytuacji przestrzennej i wyboru toru ruchu chwytaka w czasie rzeczywistym [Morecki i in. 2002]. Wymaga to zaprojektowania manipulatora mechatronicznego zbudowanego z podsystemów:

- sensorycznego – zadaniem którego byłaby identyfikacja i wyznaczenie wzajemnego położenia w przestrzeni chwytaka i dojrzałego owocu,
- sterującego – zadaniem którego byłoby sterowanie ruchem silników napędowych układu jezdnego, ogniw zespołu pozycjonowania oraz chwytaka,
- wykonawczego – w skład którego wchodzi układ jezdny, zespół pozycjonowania oraz chwytak,
- łączącego – stanowiącego wszelkie połączenia pomiędzy poszczególnymi podsystemami.

W przypadku zbioru owoców, gdzie wymagana jest bardzo duża dokładność pozycjonowania chwytaka, ze względu na ich delikatność, konieczna jest analiza błędów pozycjonowania dla różnych wartości prędkości roboczych.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest badanie i ocena wpływu kinematycznych charakterystyk ruchu na dokładność odwzorowania zamierzonego toru końca łańcucha pozycjonowania (w dalszej części pracy oznaczanego – P). W szczególności rozpatrzony został ruch po prostej tak położonej w przestrzeni roboczej, aby wystąpił ruch we wszystkich parach kinematycznych łańcucha pozycjonowania. Dla zadanego toru ruchu wyznaczono błędy pozycjonowania dla trzech wariantów prędkości liniowych punktu P. W celu oceny dokładności pozycjonowania zbudowano matema-

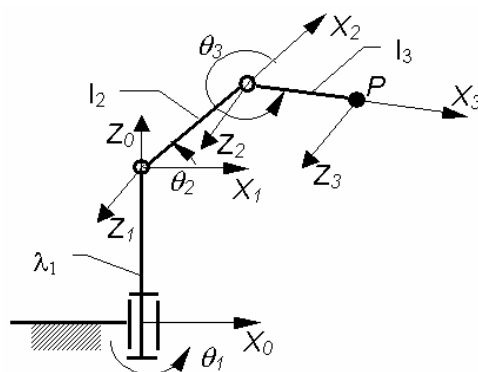
tyczny model dynamiki zespołu pozycjonowania agrorobota. Budowa tego modelu wymagała:

- rozwiązania prostego zadania kinematyki,
- rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki (wyznaczenia położeń, prędkości i przyspieszeń kątowych ogniw w zależności od położenia, prędkości i przyspieszenia punktu P),
- wyznaczenia energii kinetycznej i potencjalnej poszczególnych ogniw, a następnie wykorzystania równań Lagrange'a II rodzaju do wyprowadzenia różniczkowych równań ruchu ogniw.

Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów błędów realizacji zamierzonego toru ruchu.

Metodyka

Obiektem badań był zespół pozycjonowania agrorobota o trzech stopniach swobody umożliwiającym realizację ruchów przestrzennych (rys. 1).



Rys. 1. Schemat zespołu pozycjonowania agrorobota z wprowadzonymi układami współrzędnych Denavita-Hartenberga

Fig. 1. Agro-robot positioning system diagram with Denavit-Hartenberg systems of coordinates introduced

Korzystając z notacji Denavita-Hartenberga (Craig 1989) wprowadzono układy współrzędnych związane ogniwami oraz podstawą łańcucha kinematycznego (rys. 1). Następnie wyznaczono:

- macierze przekształceń pomiędzy poszczególnymi układami współrzędnych,
- wektory położenia środków mas poszczególnych ogniw łańcucha kinematycznego w układzie współrzędnych podstawy,
- współrzędne wektorów prędkości środków mas ogniw, w układzie współrzędnych związanym z podstawą,
- prędkości kątowe ogniw względem nieruchomego układu współrzędnych,
- prędkości kątowe ogniw względem chwilowo unieruchomionych układów współrzędnych, których początki leżą w środkach mas ogniw, a osie są równoległe do odpowiednich osi układów współrzędnych związanych z ogniwami.

Wykorzystując uzyskane zależności oraz równania Lagrange'a drugiego rodzaju wyprowadzono równania ruchu zespołu pozycjonowania agrorobota:

$$\frac{d^2\theta_1}{dt^2}d_{111} - 2\frac{d\theta_1}{dt}\frac{d\theta_2}{dt}d_{121} - 2\frac{d\theta_1}{dt}\frac{d\theta_3}{dt}d_{131} = M_1(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d^2\theta_2}{dt^2}d_{222} + \frac{d^2\theta_3}{dt^2}d_{332} - \left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)^2 d_{121} + \\ & - 2\frac{d\theta_2}{dt}\frac{d\theta_3}{dt}d_{232} + \left(\frac{d\theta_3}{dt}\right)^2 d_{232} + M_{2st} = M_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{d^2\theta_3}{dt^2}d_{333} + \frac{d^2\theta_2}{dt^2}d_{332} - \left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)^2 d_{131} + M_{3st} = M_3(t) \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} d_{111} &= J_{Y1} + J_{Y2}c_2^2 + J_{Y3}c_{23}^2 + \frac{1}{4}m_2l_2^2c_2^2 + m_3\left(l_2^2c_2^2 + l_2l_3c_2c_{23} + \frac{1}{4}l_3^2c_{23}^2\right) \\ d_{121} &= J_{Y2}s_2c_2 + J_{Y3}s_{23}c_{23} + \frac{1}{4}m_2l_2^2s_2c_2 + m_3\left(l_2^2s_2c_2 + \frac{l_2l_3}{2}(s_2c_{23} + c_2s_{23}) + \frac{1}{4}l_3^2s_{23}c_{23}\right) \\ d_{131} &= J_{Y3}s_{23}c_{23} + m_3\left(\frac{l_2l_3}{2}c_2c_{23} + \frac{1}{4}l_3^2s_{23}c_{23}\right) \\ d_{222} &= J_{Z2} + J_{Z3} + m_2\frac{l_2^2}{4} + m_3\left(l_2^2 + l_2l_3c_3 + \frac{l_3^2}{4}\right) \end{aligned}$$

$$d_{332} = J_{Z3} + m_3 \left(\frac{l_2 l_3}{2} c_3 + \frac{l_3^2}{4} \right), \quad d_{232} = m_3 \frac{l_2 l_3}{2} s_3, \quad d_{333} = m_3 \frac{l_3^2}{4} + J_{Z3}$$

$$M_{2st} = \left[m_2 \frac{l_2}{2} c_2 + m_3 \left(\frac{l_3}{2} c_{23} + l_2 c_2 \right) \right] g, \quad M_{3st} = m_3 \frac{l_3}{2} c_{23} g$$

Przeprowadzenie symulacji ruchu punktu P po zadanym torze, wymagało rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki. Dla badanego łańcucha kinematycznego wyznaczono położenie chwytaka w kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z podstawą:

$$p_x = c_1 c_{23} l_3 + c_1 c_2 l_2 \quad (4)$$

$$p_y = s_1 c_{23} l_3 + s_1 c_2 l_2 \quad (5)$$

$$p_z = l_3 s_{23} + l_2 s_2 + \lambda_1 \quad (6)$$

W wyniku rozwiązania układu równań (wzory nr 4, 5 i 6) ze względu na współrzędne konfiguracyjne $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, otrzymano (Graboś 2003):

$$\theta_1 = \arctg2(p_y, p_x) \quad (7)$$

$$\theta_2 = \arctg2(b, a) + \arctg2(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (8)$$

$$\theta_3 = \arctg2\left(\frac{\sqrt{1 - d^2}}{d}\right) \quad (9)$$

gdzie:

$$a = 2l_2 (p_x c_1 + p_y s_1)$$

$$b = 2l_2 (p_z - \lambda_1)$$

$$c = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + \lambda_1^2 + l_2^2 - l_3^2 - 2p_z \lambda_1$$

$$d = \frac{p_x^2 + p_y^2 + (p_z - \lambda_1)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}$$

Prędkości i przyspieszenia konfiguracyjne ogniw otrzymano przez różniczkowanie względem czasu zależności (wzór nr 7, 8 i 9).

Komputerowa symulacja ruchu agrorobota została przeprowadzona w programie Matlab (Simulink). Program podzielono na sześć współpracujących modułów [Graboś 2003]:

- tor ruchu chwytaka – w którym zadawane są początkowe i końcowe położenia punktu P oraz prędkości i przyspieszenia dla zadanej trajektorii ruchu,
- zadanie odwrotne kinematyki – w którym wyznaczone są współrzędne konfiguracyjne ogniów w funkcji położenia punktu P (wzór nr 7, 8 i 9.),
- prędkości i przyspieszenia ogniów – w którym wyznaczone są prędkości i przyspieszenia kątowe ogniów w funkcji położenia punktu P,
- charakterystyki rzeczywiste – w którym, poprzez całkowanie równań ruchu (wzór nr 1, 2 i 3), obliczane są rzeczywiste wartości charakterystyk ruchu ogniów z uwzględnieniem podatności i tłumienia w układach napędowych,
- zadanie proste kinematyki – w którym, na podstawie rzeczywistych charakterystyk ruchu ogniów wyznaczone są realizowane (rzeczywiste) położenia punktu P (wzór nr 4, 5 i 6),
- błędy pozycjonowania – obliczane jako wartość różnicy pomiędzy zadanymi i realizowanymi współrzędnymi punktu P.

Wyniki badań i ich analiza

W celu określenia wpływu kinematycznych charakterystyk ruchu na dokładność odwzorowania zamierzonego toru końca łańcucha pozycjonowania (punktu – P) zaplanowano trzy warianty obliczeń dla których wartości charakterystyczne zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości charakterystyczne zamierzonego toru ruchu chwytaka dla poszczególnych wariantów

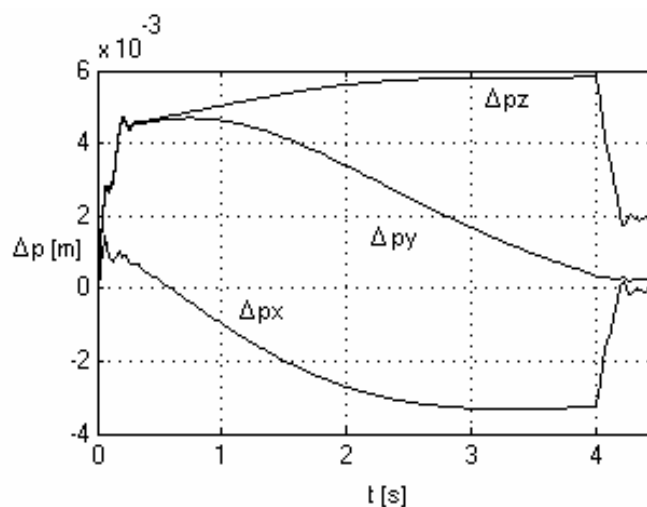
Table 1. Characteristic values of gripping device trajectory for individual variants

Parametr	Oznaczenie	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Początkowe wartości współrzędnych punktu P	p_x [m]	0,500		
	p_y [m]	0,500		
	p_z [m]	0		
Końcowe wartości współrzędnych punktu P	p_x [m]	-0,300		
	p_y [m]	1,250		
	p_z [m]	1,000		
Max. przyspieszenie punktu P	a_p [m/s ²]	1,855	9,276	18,551
Max. składowe prędkości liniowej punktu P	V_{xp} [m/s]	0,200	1,000	2,000
	V_{yp} [m/s]	0,188	0,938	1,875
	V_{zp} [m/s]	0,250	1,250	2,500
Max. prędkość liniowa	V_{max} [m/s]	0,371	1,855	3,710

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

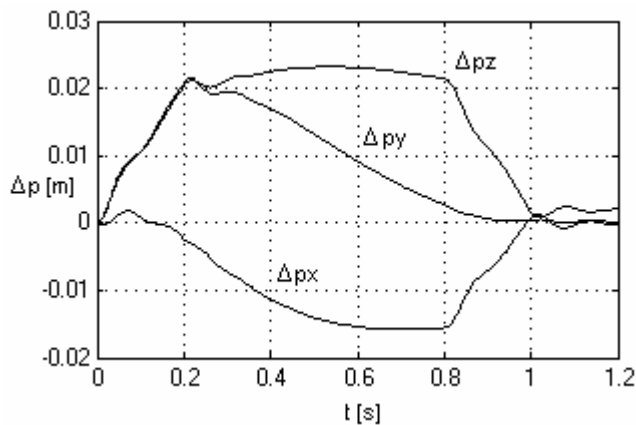
- przyjęte długości ogniw wynoszą $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ m,
- zakres względnych prędkości kątowych w parach kinematycznych przyjęto w przedziale od $\langle 0, 2\pi \rangle$,
- współczynniki sprężystości i tłumienia modelu Kelvina-Voigta, który wprowadzono w celu uwzględnienia podatności i tłumienia jednostek napędowych wynosiły odpowiednio $k=25000$ Nm/rad oraz $c=200$ Nms/rad,
- masy poszczególnych ogniw wynoszą $m_1=m_2=m_3=5,3$ kg, momenty bezwładności $J_{Y1}=J_{Y2}=J_{Y3}=J_{Z1}=J_{Z2}=J_{Z3}=0,442$ kgm² natomiast wartości J_{X1}, J_{X2}, J_{X3} jako istotnie mniejsze od pozostałych przyjęto równe zero.

W wyniku przeprowadzonej symulacji ruchu układu pozycjonowania agrorobota uzyskano przebiegi błędów położenia punktu P w czasie ruchu po zadanej trajektorii.



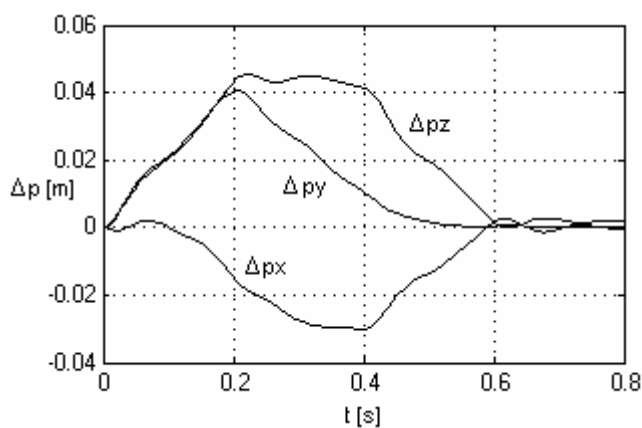
Rys. 2. Czasowe przebiegi błędów pozycjonowania punktu P dla wariantu I

Fig. 2. Time runs of positioning errors of P point for variant I



Rys. 3. Czasowe przebiegi błędów pozycjonowania punktu P dla wariantu II

Fig. 3. Time runs of positioning errors of P point for variant II



Rys. 4. Czasowe przebiegi błędów pozycjonowania punktu P dla wariantu III

Fig. 4. Time runs of positioning errors of P point for variant III

Wnioski

We wszystkich wariantach obliczeń, niezależnie od przyjętej prędkości roboczej, największą wartość osiąga błąd w kierunku osi z_0 - Δp_z . Spowodowane jest to dominującą rolą ugięć statycznych ogniw wynikających z uwzględnienia podatności jednostek napędowych.

Wraz ze wzrostem prędkości roboczej istotnie wzrasta błąd pozycjonowania. Największą wartość $\Delta p_z=0,045$ m osiąga dla III wariantu (dla prędkości $v=3,71$ m/s). Mniejsze wartości błędów zaobserwowano dla wariantu II - $\Delta p_z=0,023$ m oraz I - $\Delta p_z=5,836 \cdot 10^{-3}$ m. Wynika to głównie z większych sił bezwładności występujących przy większych prędkościach roboczych.

Zmiany błędów realizacji zamierzonego toru ruchu dla fazy ruchu ustalonego wynikają głównie ze zmian konfiguracji przestrzennej ogniów (położenie łańcucha kinematycznego w przestrzeni) , natomiast w fazach ruchu nieustalonego (rozruch i hamowanie) widoczne są dodatkowo zmiany wynikające z zaburzeń stanów równowagi dynamicznej ujawniające się w postaci drgań własnych tłumionych.

Dla przyjętej geometrii łańcucha pozycjonowania agroroboty niezbędne jest ograniczanie prędkości roboczych lub wprowadzenie układów sterowania, które umożliwiłyby zmniejszenie błędów pozycjonowania.

Bibliografia

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

Graboś A. 2003. Analiza osobliwych konfiguracji maszyn manipulacyjnych. Rozprawa doktorska. Płock.

Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K. 2002. Teoria mechanizmów i manipulatorów, WNT, Warszawa.

SIMULATIONS OF AGRO-ROBOT IN TERMS OF POSITIONING ACCURACY

Summary

The paper presents modelling methods and output of computer aided simulation of agro-robot movement, the positioning system of which has three degrees of free motion. The kinematics analysis was carried out with the matrix method. Motion equations were derived from the Lagrange equations of the second type. Simulations, for three selected speeds of the gripping device, were made using the Matlab (Simuling) application. The results were presented in a form of time runs of trajectory following errors.

Key words: agro-robot, kinematics, dynamics, simulation, positioning accuracy