

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

WPŁYW KINEMATYCZNYCH CHARAKTERYSTYK RUCHU CHWYTAKA NA POŁOŻENIA, PRĘDKOŚCI I PRZYSPIESZENIA OGNIW AGROROBOTA

Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób modelowania trajektorii ruchu chwytaka dla trapezowego, sinusoidalnego oraz wielomianowego profilu prędkości. Wyprowadzono różniczkowe równania ruchu zespołu pozycjonowania agroboty oraz rozwiązano proste i odwrotne zadanie kinematyki. Zbadano wpływ kinematycznych charakterystyk ruchu chwytaka na położenia, prędkości i przyspieszenia ogniw agroboty. Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów kinematycznych charakterystyk ruchu ogniw.

Słowa kluczowe: agrobot, modelowanie trajektorii ruchu, profil prędkości, ogniwa, charakterystyki ruchu

Wykaz oznaczeń

- λ_1, l_2, l_3 – długości poszczególnych ogniw, [m]
- θ_i – względne przemieszczenia kątowe ogniw, [rad]
- d_{ijk} – współczynniki bezwładności i symbole Christoffela [kgm^2]
- M_{ist} – moment statyczny ogniwa „i” [Nm]
- M_i – moment napędowy ogniwa „i” [Nm]
- x, y, z – współrzędne położenia chwytaka, [m]
- 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 ,
- a, b, c, d – współczynniki zależne od geometrii i położenia łańcucha kinematycznego, [m]

Wprowadzenie

Planowanie trajektorii manipulatorów o strukturze otwartego łańcucha kinematycznego jest istotnym problemem z punktu widzenia użytkownika. Panele sterujące, w które wyposażone są roboty umożliwiają niezależne sterowanie ruchem każdego z ogniw łańcucha kinematycznego. Złożenie ruchu ogniw wymusza określony ruch chwytaka w przestrzeni kartezjańskiej. Jednym z istotnych problemów związanych ze sterowaniem jest to, że charakter ruchu w przestrzeni wewnętrznej (zmiany w czasie współrzędnych uogólnionych) nie jest zachowany w przestrzeni kartezjańskiej. Zakładając, że ruch poszczególnych ogniw jest liniowy, to złożenie ruchu wszystkich ogniw nie powoduje liniowej zmiany położenia chwytaka manipulatora. Związane jest to z nieliniowym przekształceniem pomiędzy współrzędnymi uogólnionymi a kartezjańskimi określanym też jako proste zadanie kinematyki [Craig 1989]. Kolejnym problemem związanym z planowaniem trajektorii ruchu jest wyznaczenie przebiegu zmian prędkości i przyspieszeń ogniw w funkcji prędkości i przyspieszeń chwytaka co jest szczególnie istotne w przypadku agrorobota, gdyż ruchy łańcucha pozycjonowania nie są zdeterminowane jak w przypadku robotów, a zupełnie przypadkowe zależne od położenia zbieranych obiektów. Ponadto sterowanie ruchem poszczególnych ogniw jest niejako wymuszane przez ruch chwytaka. Najczęściej do opisu prędkości chwytaka wykorzystuje się trapezowy lub sinusoidalny profil prędkości. Aby możliwość kształtowania ruchu była większa zmiany położenia chwytaka można opisać wielomianem wyższego stopnia. Ma to znaczenie kiedy łączy się trajektorie odcinkami (sklejanie trajektorii). W takim przypadku podczas przejścia przez poszczególne punkty trajektorii należy zachować ciągłość prędkości i przyspieszeń aby nie było szarpnięć. Należy też pamiętać by trajektorie były gładkie zaś ich kolejne pochodne względem czasu powinny być funkcjami ciągłymi. Ciągłość położenia, prędkości i przyspieszeń zarówno chwytaka jak i ogniw jest istotnym warunkiem, który należy wziąć pod uwagę przy planowaniu trajektorii.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest ocena wpływu trzech wybranych profili prędkości chwytaka na przebiegi położenia, prędkości i przyspieszeń ogniw agrorobota. Rozpatrzony został ruch po prostej tak położonej w przestrzeni roboczej, aby wystąpił ruch we wszystkich parach kinematycznych łańcucha pozycjonowania agrorobota. Do analizy wybrano trapezowy (oznaczenie t), sinusoidalny (s) oraz wielomianowy (w) profil prędkości.

Ocena wpływu profilu prędkości chwytaka na przebiegi charakterystyk kinematycznych ogniw wymagała:

- zbudowania matematycznego modelu dynamiki zespołu pozycjonowania agroboty,
- rozwiązania prostego i odwrotnego zadania kinematyki,
- wyznaczenia kinematycznych charakterystyk ruchu ogniw dla każdego z analizowanych profili prędkości chwytaka.

Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci czasowych przebiegów położenia, prędkości i przyspieszeń ogniw dla każdego z wybranych profili prędkości.

Metodyka

Obiektem badań był zespół pozycjonowania agroboty o trzech stopniach swobody z parami kinematycznymi obrotowymi V klasy, których osie obrotu są kolejno: pionowa – obrót kolumny oraz dwie poziome.

Korzystając z notacji Denavita-Hartenberga wprowadzono układy współrzędnych związane ogniwami oraz podstawą łańcucha kinematycznego. 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 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 wprowadzono równania ruchu zespołu pozycjonowania agroboty:

$$\ddot{\theta}_1 d_{111} - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 d_{121} - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 d_{131} = M_1(t) \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}_2 d_{222} + \ddot{\theta}_3 d_{332} - \dot{\theta}_1^2 d_{121} - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 d_{232} + \dot{\theta}_3^2 d_{232} + M_{2st} = M_2(t) \quad (2)$$

$$\ddot{\theta}_3 d_{333} + \ddot{\theta}_2 d_{332} - \dot{\theta}_1^2 d_{131} + M_{3st} = M_3(t) \quad (3)$$

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

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

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

$$z = l_3 s_{23} + l_2 s_2 + l_1 \quad (6)$$

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

$$\theta_1 = \arctg2(y, x) \quad (7)$$

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

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

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

Trajektorie ruchu chwytaka określono w układzie współrzędnych związanym z podstawą agroboty. Parametryzacja czasem zadanego toru ruchu polegała na przyjęciu określonego prawa ruchu zmian współrzędnych chwytaka i ich pochodnych. Dokonując parametryzacji czasem zadanej trajektorii ruchu założono, że dla trapezowego i sinusoidalnego profilu prędkości czasy rozruchu i hamowania są identyczne i wynoszą 0,2 s. Dla trapezowego profilu prędkości założono ponadto, że $a_z = 5 \text{ m/s}^2$. Pozostałe składowe przyspieszenia wyznaczono tak, by czas trwania ruchu na poszczególnych współrzędnych był jednakowy. W przypadku sinusoidalnego profilu prędkości maksymalne przyspieszenie występujące w fazie rozruchu wyznaczono tak, by prędkość chwytaka na końcu tej fazy, będąca jednocześnie prędkością ruchu ustalonego, była identyczna jak dla profilu trapezowego. Aby czas ruchu dla profilu wielomianowego był identyczny jak dla profilu trapezowego i sinusoidalnego odpowiednio dobrano współczynniki wielomianu [Heimann 2001]. Wartości charakterystyczne zamierzonego toru ruchu zestawiono w tabeli 1.

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

Table 1. Characteristic values for planned movement trajectory of the grip for particular variants

Parametr	Oznaczenie	Współrzędne chwytaka		
Wartości początkowe	P_x [m]	0,4		
	P_y [m]	0,05		
	P_z [m]	1,5		
Wartości końcowe	K_x [m]	0,1		
	K_y [m]	0,5		
	K_z [m]	0,25		
Prawo prędkości		trapezowe	sinusoidalne	wielomianowe
Max. składowe przyspieszenia chwytaka	a_x [m/s]	-1,20	-1,88	-0,82
	a_y [m/s]	1,80	2,83	1,24
	a_z [m/s]	-5,00	-7,85	-3,43
Max. przyspieszenie chwytaka	a [m/s ²]	5,45	8,55	3,74
Max. składowe prędkości liniowej chwytaka	v_x [m/s]	-0,24	-0,24	-0,82
	v_y [m/s]	0,36	0,36	0,58
	v_z [m/s]	-1,00	-1,00	-1,62
Max. prędkość liniowa chwytaka	v [m/s]	1,09	1,09	1,70

Komputerowa symulacja ruchu agrorobota została przeprowadzona w programie Matlab (Simulink). Program podzielono na cztery współpracujące moduły w których:

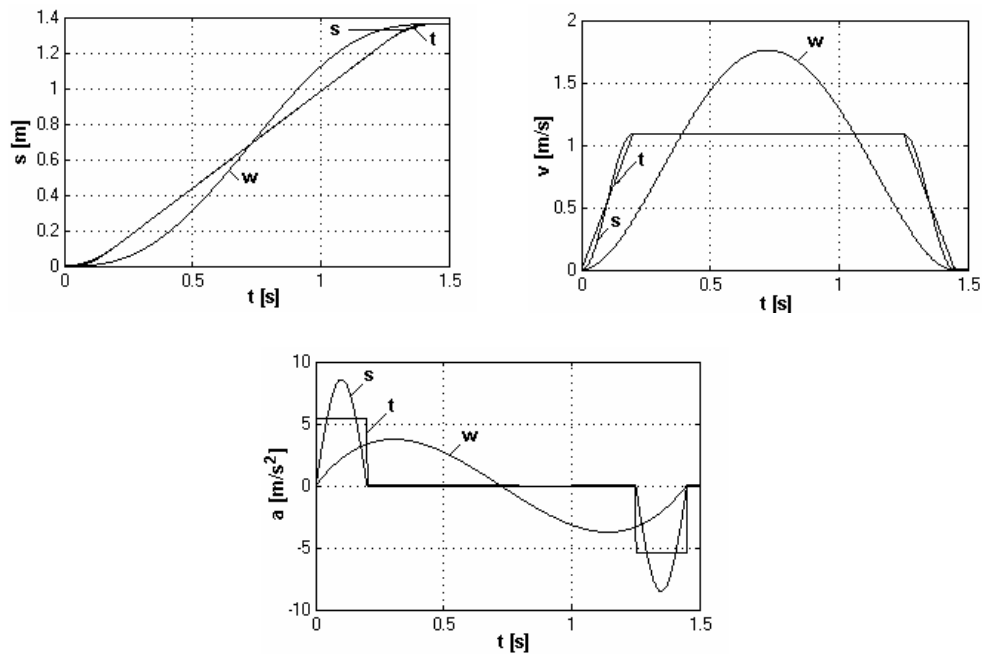
- generowano trajektorie ruchu chwytaka,
- rozwiązano odwrotne zadanie kinematyki,
- wyznaczono prędkości i przyspieszenia ogniw,
- wyznaczono charakterystyki rzeczywiste ruchu ogniw z uwzględnieniem podatności i tłumienia w układach napędowych.

Wyniki badań i ich analiza

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

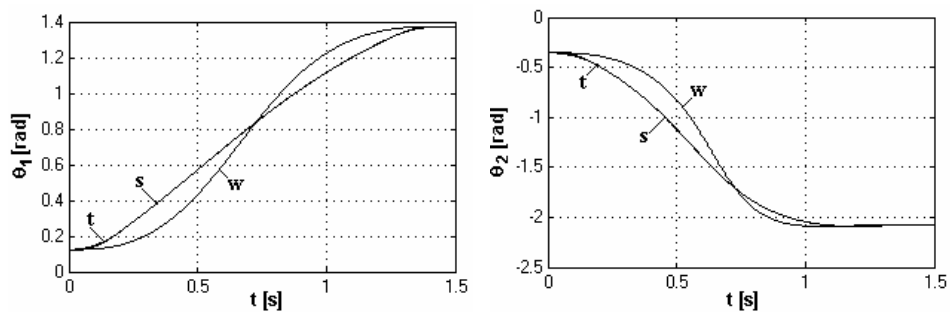
- długości ogniw wynoszą $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ m, zaś zakres względnych przemieszczeń kątowych w parach kinematycznych w przedziale od $\langle 0, 2\pi \rangle$,
- współczynniki sprężystości i tłumienia modelu Kelvina-Voigta, który wprowadzono w celu uwzględnienia podatności i tłumienia w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

Założone przebiegi kinematycznych charakterystyk ruchu chwytaka dla trzech wybranych profili prędkości przedstawia rys. 3.

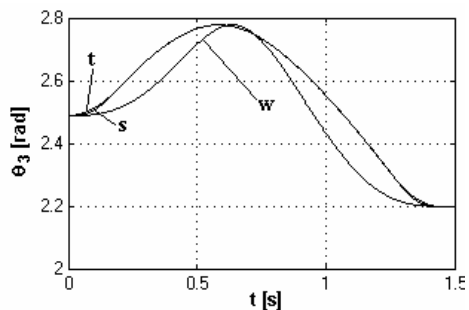


Rys. 1. Przebiegi kinematycznych charakterystyk ruchu chwytaka
Fig. 1. Kinematics characteristics of grip movement

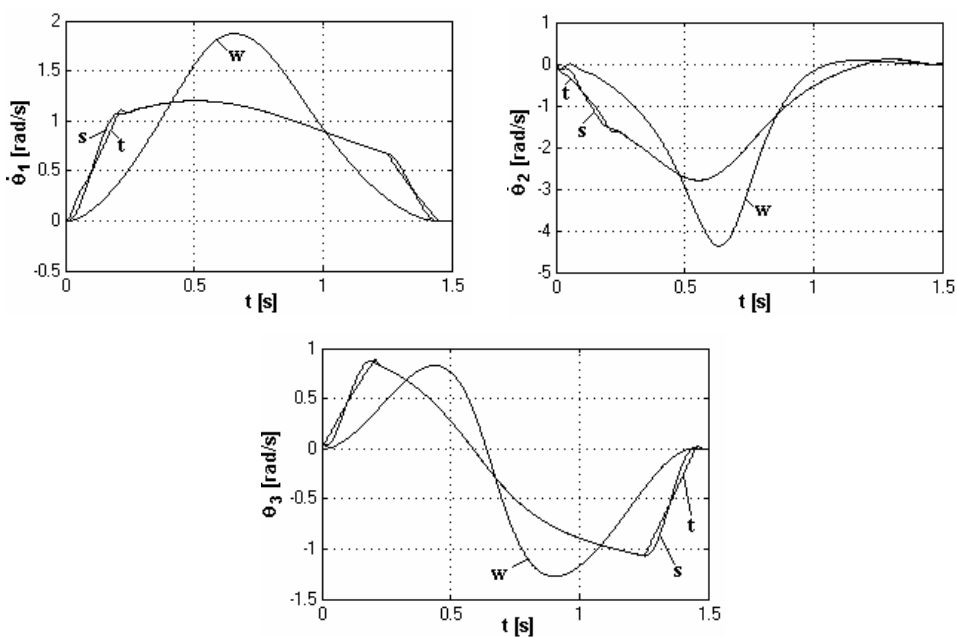
Uzyskane w wyniku całkowania numerycznego zależności (wzór nr 1, 2, 3) przebiegi położenia, prędkości i przyspieszeń kątowych ogniw w funkcji przyjętego profilu prędkości ruchu chwytaka przedstawiają rysunki 2, 3, 4.



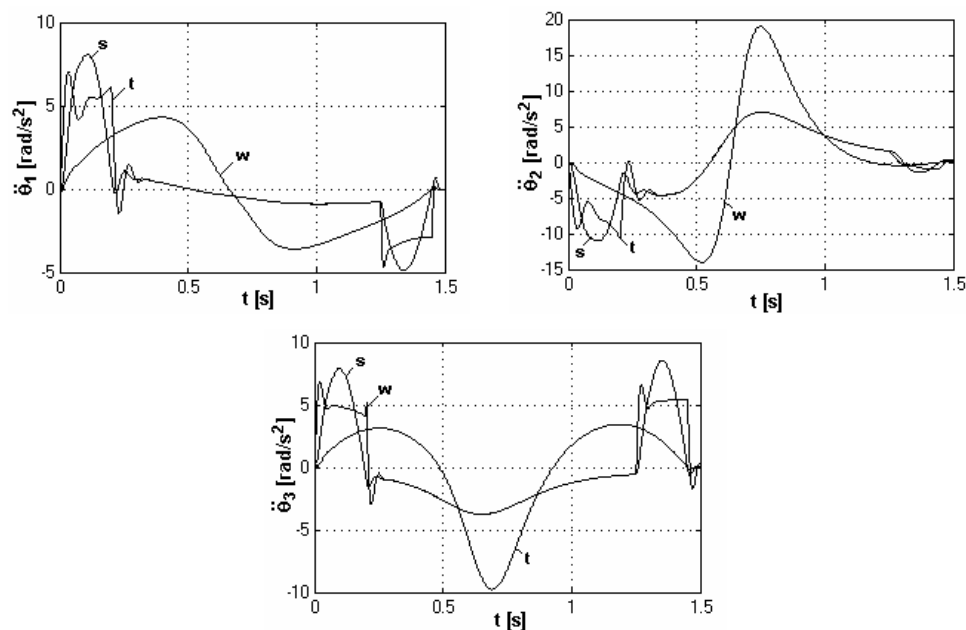
cd. rys. 2.



Rys. 2. Przebiegi przemieszczeń kątowych poszczególnych ogniw
 Fig. 2. Characteristics of angular relocations for individual cells



Rys. 3. Przebiegi prędkości kątowych poszczególnych ogniw
 Fig. 3. Characteristics of angular velocities for individual cells



Rys. 4. Przebiegi przyspieszeń kątowych poszczególnych ogniw
Fig. 4. Characteristics of angular accelerations for individual cells

Wnioski

W fazach ruchu nieustalonego (rozruch i hamowanie) największe wartości przyspieszeń kątowych ogniw zaobserwowano dla sinusoidalnego profilu prędkości chwytaka, najmniejsze zaś dla wielomianowego (rys. 4). Jednocześnie dla wielomianowego profilu prędkości zarejestrowano najmniejsze zaburzenia stanów równowagi dynamicznej co zdecydowanie ułatwić może sterowanie ruchem poszczególnych ogniw łańcucha pozycjonowania.

W fazie ruchu ustalonego przebiegi położenia, prędkości oraz przyspieszeń kątowych ogniw są identyczne dla trapezowego i sinusoidalnego profilu prędkości co wynika z identycznej prędkości liniowej chwytaka w tej fazie ruchu. Największa prędkość chwytaka dla wielomianowego profilu (rys. 1) wywołuje zjawiska niekorzystne w postaci największych prędkości i przyspieszeń kątowych ogniw.

Bibliografia

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

Heimann B., Gerth W., Popp K. 2001. Mechatronika. Komponenty – metody – przykłady. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.

IMPACT OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF GRIP MOVEMENT ON POSITIONS, SPEEDS AND ACCELERATIONS OF AGROROBOT CELLS

Summary

The paper presents a method of modeling a trajectory of grip movement for trapezoidal, sinusoidal and polynomial speed profile. Differential equations of movement of the agrorobot positioning unit were derived and simple and inverse kinematic problem was solved. Impact of kinematic characteristics of grip movement on positions, speeds and accelerations of agrorobot cells were analyzed. The simulation tests were carried out using Matlab program (Simulink). The results were presented in form of time kinematic characteristics of the cell movement.

Key words: agrorobot, modeling of movement trajectory, speed profile, cells, movement characteristics