

Spis treści

1 Wstęp	2
1.1 Cel pracy	2
1.2 Zawartość pracy	2
2 Model manipulatora mobilnego	3
2.1 Model we współrzędnych uogólnionych	3
2.2 Ograniczenia nieholonomiczne dla platformy	4
2.3 Model w prędkościach pomocniczych	4
3 Odsprzęganie wejściowo-wyjściowe dla manipulatora mobilnego	6
3.1 Struktura układu sterowania	6
3.2 Odprzęganie według Yamamoto i Yuna	6
3.2.1 Specyfikacja podejścia	6
3.2.2 Algorytm sterowania	7
3.2.3 Badania symulacyjne	7
3.3 Odprzęganie z rozszerzonymi funkcjami wyjściowymi	7
3.3.1 Specyfikacja podejścia	7
3.3.2 Algorytm sterowania	7
3.3.3 Badania symulacyjne	8
4 Model satelity typu free-floating	10
5 Odsprzęganie wejściowo-wyjściowe dla satelity typu free-floating	11

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Cel pracy

1.2 Zawartość pracy

Rozdział 2

Model manipulatora mobilnego

Manipulator mobilny to platforma mobilna z zamontowanym na niej manipulatorem. Biorąc pod uwagę typ ograniczeń nałożonych kolejno na platformę i manipulator można wydzielić 4 typy manipulatorów mobilnych:

1. typ (h,h) - platforma i manipulator związane są ograniczeniami holonomicznymi,
2. typ (nh,h) - na platformę nałożone są ograniczenia nieholonomiczne, natomiast na manipulator ograniczenia holonomiczne,
3. typ (nh,nh) - ograniczenia nałożone na platformę i manipulator są nieholonomiczne. Taki rodzaj manipulatora mobilnego został przedstawiony w [6],
4. typ (h,nh) - na manipulator nałożone są ograniczenia nieholonomiczne, natomiast na platformę holonomiczne.

W tym rozdziale zostanie przedstawiony model manipulatora mobilnego typu (nh,h) . W szczególności w rozważanym manipulatorze platformą będzie monocykl, czyli robot mobilny klasy $(2,0)$. Za manipulator natomiast posłuży manipulator RTR. Rozważany manipulator mobilny przedstawiono na rys 1.

Przyjmy następujący wektor współrzędnych uogólnionych manipulatora mobilnego:

$$q = \begin{pmatrix} q_m \\ q_r \end{pmatrix} \in R^{n+p}, \quad (2.1)$$

gdzie $q_m = (x, y, \theta, \phi_1, \phi_2)^T \in R^n$ - wektor współrzędnych uogólnionych platformy mobilnej, $q_r = (q_1, q_2, q_3)^T \in R^p$ - wektor współrzędnych przegubowych manipulatora. Rozmiary przestrzeni wyniosą więc $n = 5$, $p = 3$.

2.1 Model we współrzędnych uogólnionych

Do wyprowadzenia równań manipulatora mobilnego wykorzystamy mechanikę Langrange'a. Lagranżjan L jest zdefiniowany jako różnica pomiędzy energią kinetyczną, a potencjalną układu

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q). \quad (2.2)$$

Równania ruchu przy braku sił działających na system są następujące

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0. \quad (2.3)$$

Lewą stronę równania (2.3) można przedstawić jako

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D(q). \quad (2.4)$$

Przy obecności sił zewnętrznych równanie (2.3) wygląda następująco

$$Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D(q) = F_e. \quad (2.5)$$

W naszym przypadku siły zewnętrzne F_e są sumą 2 składowych: $F_e = B(q)u + F_{nh}$, gdzie $B(q)u$ to uogólnione siły wejściowe(tj. wywierane na system przez elementy wykonawcze), a F_{nh} to siły więzów nieholonomicznych(tj. siły zapewniające spełnienie ograniczeń nieholonomicznych).

2.2 Ograniczenia nieholonomiczne dla platformy

W naszym przypadku platforma manipulatora mobilnego to monocykl, który w założeniu będzie poruszać się bez poślizgu wzdluznego i poprzecznego kół.

Warunek na brak poślizgu poprzecznego to

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0, \quad (2.6)$$

a warunki na brak poślizgu wzdluznego pierwszego i drugiego koła to:

$$\dot{x} \cos(\theta) + \dot{y} \sin(\theta) - L\dot{\theta} - R\phi_1 = 0, \quad (2.7)$$

$$\dot{x} \cos(\theta) + \dot{y} \sin(\theta) + L\dot{\theta} - R\phi_2 = 0. \quad (2.8)$$

Ograniczenia te są nieholonomiczne i można je przedstawić w postaci Pfaffa

$$A(q)\dot{q} = 0, \quad (2.9)$$

gdzie

$$A(q) = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & -L & -R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & L & 0 & -R & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Z [6] wiemy, że siła więzów nieholonomicznych równa jest $F_{nh} = A(q)^T \lambda$, gdzie λ to wektor mnożników Lagrange'a. Równanie (2.5) można więc teraz zapisać jako

$$Q(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D(q) = B(q)u + A(q)^T \lambda. \quad (2.11)$$

2.3 Model w prędkościach pomocniczych

Model postaci (2.11) posiada pewne wady: macierz B jest prostokątna i nie daje się odwrócić. W jawnej postaci występują również mnożniki Lagrange'a odpowiadające siłom tarcia statycznego zależnego od u, q, \dot{q}, t . Aby pozbyć się tych wad można przekształcić (2.11) do modelu wyrażonego w prędkościach pomocniczych.

Najpierw zauważmy, że ograniczenia (2.9) wymagają aby prędkości \dot{q} należały do jądra macierzy $A(q)$. Niech baza jądra $A(q)$ będzie zbiorem wektorów $\{g_1(q), g_2(q), \dots, g_m(q)\}$. Jeśli więc zapiszemy prędkość \dot{q} w następujący sposób

$$\dot{q} = \sum_{k=1}^m g_k(q) \eta_k = \begin{pmatrix} g_1(q), g_2(q), \dots, g_m(q) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_m \end{pmatrix} = G(q)\eta \quad (2.12)$$

to będzie ona spełniać ograniczenia (2.9). Wektor η nazywamy wektorem prędkości pomocniczych.

Zauważmy, że

$$A(q)G(q) = 0. \quad (2.13)$$

Biorąc transpozycje (2.13) otrzymamy

$$G^T(q)A^T(q) = 0. \quad (2.14)$$

Aby wyeliminować mnożniki Lagrange'a z (2.11) należy pomnożyć (2.11) lewostronnie przez G^T (dla czytelności pomińmy argumenty) i skorzystać z (2.14). Otrzymamy wtedy

$$G^T Q \ddot{q} + G^T C \dot{q} + G^T D = G^T B u + G^T A^T \lambda = G^T B u. \quad (2.15)$$

Zróżniczkujmy jeszcze (2.12) po czasie

$$\ddot{q} = \dot{G}\eta + G\dot{\eta}. \quad (2.16)$$

Po podstawieniu (2.12) i (2.16) do (2.15), otrzymamy model w prędkościach pomocniczych:

$$G^T Q(\dot{G}\eta + G\dot{\eta}) + G^T C G \eta + G^T D = G^T Q G \dot{\eta} + G^T(Q\dot{G} + CG)\eta + G^T D = G^T B u, \quad (2.17)$$

czyli

$$Q^* \dot{\eta} + C^* \eta + D^* = B^* u, \quad (2.18)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} Q^* &= G^T Q G, \\ C^* &= G^T(Q\dot{G} + CG), \\ D^* &= G^T D, \\ B^* &= G^T B. \end{aligned}$$

Rozdział 3

Odsprzęganie wejściowo-wyjściowe dla manipulatora mobilnego

Algorytm odsprzęgania wejściowo-wyjściowego jest wykorzystywany do sterowania manipulatorów mobilnych. Rozwiązuje on zadanie śledzenia zadanej trajektorii efektora $y_d(t)$ w przestrzeni zewnętrznej. Algorytm odsprzęgania wejściowo-wyjściowego wymaga pełnej znajomości modelu manipulatora mobilnego.

Istnieją dwie wersje tego algorytmu dla manipulatorów mobilnych (nh, h):

- oryginalny algorytm Yamamoto i Yuna [2][3]
- algorytm z rozszerzonymi funkcjami wyjściowymi[1]

3.1 Struktura układu sterowania

Obie wersje algorytmu mają identyczną strukturę układu sterowania. Składa się ona z dwóch pętli sprzężenia zwrotnego, które mają sprowadzić równania manipulatora mobilnego do liniowej postaci $\ddot{y}(t) = \zeta$, gdzie ζ jest nowym sterowaniem.

- pętla wewnętrzna - przekształca układ do postaci liniowej typu "podwójny integrator"
- pętla zewnętrzna - zapewnia realizację zadania tj. śledzenia trajektorii w uzyskanym układzie liniowym

3.2 Odprzęganie według Yamamoto i Yuna

3.2.1 Specyfikacja podejścia

Yamamoto i Yun założyli, że manipulator ma ustawić się w stałej konfiguracji o maksymalnej manipulowalności, natomiast zadanie jest realizowane głównie przez ruch platformy

3.2.2 Algorytm sterowania

3.2.3 Badania symulacyjne

3.3 Odprzeganie z rozszerzonymi funkcjami wyjściowymi

3.3.1 Specyfikacja podejścia

Odmiennie od podejścia Yamamoto i Yun'a w tym podejściu nie jest wymagany bezruch manipulatora. Może on czynnie uczestniczyć w realizacji zadania.

3.3.2 Algorytm sterowania

Funkcje wyjściowe mają wtedy postacie[1]:

$$\mathbf{y}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1(\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_r) \\ \mathbf{y}_2(\mathbf{q}_r) \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

gdzie $\mathbf{y}_1(\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_r)$ jest wektorem wybranych współrzędnych efektora w podstawowym układzie odniesienia (X_0, Y_0), a $\mathbf{y}_2(\mathbf{q}_r)$ to wektor wybranych współrzędnych efektora w lokalnym układzie odniesienia (X_P, Y_P) związanym ze środkiem masy platformy[1].

Algorytm odsprzęgania wejściowo-wyjściowego dla manipulatorów mobilnych złożony jest z dwóch pętli sprzężeń zwrotnych[1]:

- wewnętrznej pętli linearyzującej transformację wejście-stan
- zewnętrznej pętli linearyzującej transformację wejście-wyjście

Weewnętrzna pętla realizuje linearyzacje transformacji wejście-stan i wykorzystuje w tym celu prawo sterowania z rodziny algorytmów 'obliczanych momentów'[1]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{*-1}[\mathbf{C}^* \mathbf{z} + \mathbf{D}^* + \mathbf{Q}^* \mathbf{v}]. \quad (3.2)$$

Zewnętrzna pętla zapewnia linearyzacje transformacji wejście-wyjście i jest realizowana za pomocą prawa sterowania[1]:

$$\mathbf{v} = \Phi^{-1}[-\Phi \mathbf{z} + \zeta]. \quad (3.3)$$

Macierz $\Phi(\mathbf{q})$ jest następująca

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_m & \Phi_{mr} \\ 0 & \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_m} \mathbf{G} & \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_r} \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{y}_2}{\partial \mathbf{q}_r} \end{bmatrix}.$$

Prawo sterowania zewnętrznej pętli (3.3) wyprowadza się w następujący sposób:

Oblicza się pochodną funkcji wyjściowej $\mathbf{y}(\mathbf{q})$ po czasie:

$$\dot{\mathbf{y}}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_m} \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_r} \dot{\mathbf{q}}_r \\ \frac{\partial \mathbf{y}_2}{\partial \mathbf{q}_r} \dot{\mathbf{q}}_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_m} \mathbf{G} & \frac{\partial \mathbf{y}_1}{\partial \mathbf{q}_r} \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{y}_2}{\partial \mathbf{q}_r} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta \\ \dot{\mathbf{q}}_r \end{pmatrix} = \Phi(\mathbf{q}) \mathbf{z}, \quad (3.4)$$

$\dot{\mathbf{y}}(\mathbf{q})$ ponownie różniczuje się po czasie:

$$\ddot{\mathbf{y}} = \dot{\Phi} \mathbf{z} + \Phi \dot{\mathbf{z}}. \quad (3.5)$$

Stosując pierwszą pętlę (3.2) do modelu (??) mamy:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{v}. \quad (3.6)$$

Po podstawieniu zależności (3.6) do równania (3.5) uzyskamy:

$$\ddot{y} = \dot{\Phi}z + \Phi v. \quad (3.7)$$

Aby zapewnić linearyzację wejściowo-wyjściową należy więc użyć wejścia:

$$v = \Phi^{-1}[-\Phi z + \zeta]. \quad (3.8)$$

Po zastosowaniu algorytmu otrzymuje się więc funkcje wyjściowe w liniowej postaci:

$$\ddot{y} = \zeta. \quad (3.9)$$

System taki można sterować, na przykład za pomocą regulatora PD z korektą

$$\zeta = \ddot{y}_d(t) - K_d \dot{e}(t) - K_p e(t), \quad (3.10)$$

gdzie $\ddot{y}_d(t)$ - druga pochodna zadanej funkcji wejściowej,
 $e(t) = y_d(t) - y(t)$, $\dot{e}(t) = \dot{y}_d(t) - \dot{y}(t)$ - błąd i jego pochodna,
 $K_d > 0$, $K_p > 0$ - nastawy regulacji.

Warunki działania algorytmu Wyżej przedstawiony algorytm wymaga odwracalności macierzy Φ . Warunek jaki trzeba spełnić aby algorytm funkcjonował jest więc następujący:

$$\det(\Phi) = \det(\Phi_m)\det(\Phi_r) \neq 0 \quad (3.11)$$

3.3.3 Badania symulacyjne

Rozważany monocykl posiada dwa wejścia (sterowania obu kół), można więc odsprząc dwie współrzędne efektora. Podczas badań postanowiono odsprząć współrzędne x i y efektora w podstawowym układzie odniesienia (X_0, Y_0). Funkcja wyjściowa $y_1(q_m, q_r)$ ma więc postać

$$y_1(q_m, q_r) = \begin{pmatrix} x + ac_0 + l_2 c_{01} + l_3 c_{01} c_3 \\ y + as_0 + l_2 s_{01} + l_3 s_{01} c_3 \end{pmatrix}.$$

Funkcja $y_2(q_r)$ to wektor współrzędnych x , y i z efektora w układzie środka masy platformy (X_P, Y_P)

$$y_2(q_r) = \begin{pmatrix} a + l_2 c_1 + l_3 c_1 c_3 \\ l_2 s_1 + l_3 s_1 c_3 \\ s_3 l_3 + q_2 \end{pmatrix}.$$

Początkowe położenie platformy było równe $q_m(0) = (x(0), y(0), \theta(0), \phi_1(0), \phi_2(0)) = (0, 0, 0, 0, 0)$, a początkowa konfiguracja manipulatora była równa $q_r(0) = (q_1(0), q_2(0), q_3(0)) = (\frac{\pi}{2}, 0.2, -\frac{\pi}{2})$. Prędkości początkowe $\dot{q}(0)$ były równe zeru.

Parametry geometryczne ustalono jako: $l_2 = 0.3\text{m}$, $l_3 = 0.2\text{m}$, $a = 0.2\text{m}$.

Funkcje wyjściowe miały więc następujące wartości początkowe

$$y(q_m(0), q_r(0)) = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Wektor pochodnych \dot{y} równy był wektorowi zer.

Wybrano następujące trajektorie zadane $y_d(t)$

$$y_d(t) = \begin{pmatrix} 2t \\ -0.3 \cos(2t) \\ 0.5 \\ -0.3 \\ 0.2 \end{pmatrix}.$$

Błąd początkowy $e(t) = y_d(t) - y(t)$ i jego pochodna były więc równe

$$e(0) = \begin{pmatrix} -0.2 \\ -0.6 \\ 0.3 \\ -0.6 \\ 0.2 \end{pmatrix}, \quad \dot{e}(0) = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

W badaniach wykorzystano środowisko Matlab/Simulink.

Rozdział 4

Model satelity typu free-floating

Rozdział 5

Odsprzeganie wejściowo-wyjściowe
dla satelity typu free-floating

Bibliografia

- [1] Mazur A. *New approach to designing input-output decoupling controllers for mobile manipulators.* Bull. of the Polish Academy of sciences Tech. Sci. 53(1):31-37, (2005)
- [2] Yamamoto Y, Yun X. *Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator.* IEEE Trans. on Automatic Control, 39(6):1326-1332, (1994)
- [3] Yamamoto Y, Yun X. *Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators.* IEEE Trans. Robotics Automat, 12(5):816-824, (1996)
- [4] Mazur A, Arent K. *Lecture Notes in Control and Information Sciences,* 335:55-71 (2007)
- [5] Tchoń K, Jakubiak J. *Acceleration-Driven Kinematics of Mobile Manipulators: An Endogenous Configuration Space Approach,* pp.(469-476), (2004)
- [6] M. R. Flannery. *The Enigma of Nonholonomic Constraints.* American Association of Physics Teachers, 73(3):265–272, 2005.