ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994

Seria: MECHANIKA z. 115 Nr kol. 1230

Karol MILLER
Zakład Teorii Maszyn i Robotów
Politechnika Warszawska

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI NUMERYCZNEJ MODELI DYNAMIKI ROBOTA DELTA-4

Streszczenie. Prezentowana praca przedstawia robot Delta-4 oraz zawiera omówienie wybranych problemów modelowania jego geometrii i dynamiki. Przedstawione modele dynamiki zostały wyprowadzone bez powszechnie czynionych przez innych badaczy założeń upraszczających. Obliczenie momentów napędowych w silnikach za pomocą prezentowanych modeli przebiega prawie całkowicie analitycznie. Zamieszczono porównanie ilości operacji matematycznych przy zastosowaniu różnych modeli. Czas obliczeń dla prezentowanych pelnych i dotychczas stosowanych uproszczonych modeli jest porównywalny.

NUMERICAL EFFICIENCY COMPARISON OF DYNAMIC MODELS OF DELTA-4 ROBOT

Summary. The presented paper introduces robot Delta-4 and contains discussion of the selected problems appearing in modelling of its geometry and dynamics. Presented dynamic models have been derived without frequently made simplification. The calculation of motor torques for the designed trajectory is effected almost entirely analytical. The comparison of the operation count for different models is presented. The computation time for presented full and old simplified models are similar.

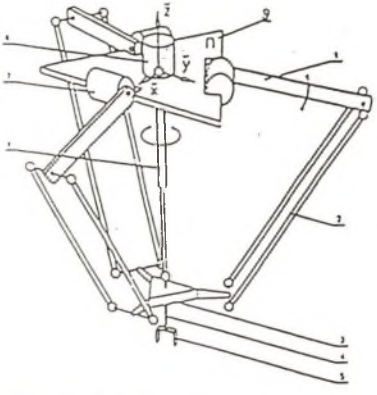
СРАВНИЕНИЕ ЧИСЛИЕННОЙ ЕФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ РОБОТА ДЕЛТА-4

Резюме: Работа представляет робота Делта-4 и избранные проблема моделированиа его геометрии и динамики. Показаны модели динамики выведены без часто деланыч упрощающих предположений. Определение моментов в двигателях проходит практически полностью аналитическим путем. Предстовлено сравниение количества численныч операций при исползовании розличных моделей.

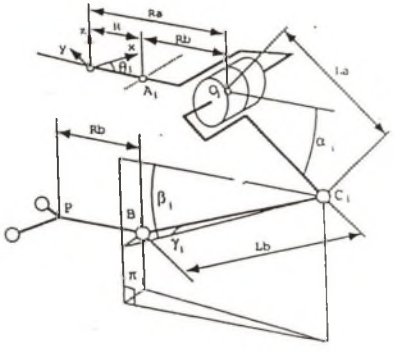
1. WSTĘP

Robot Delta-4 (rys.1), skonstruowany w Instytucie Mikrotechniki Politechniki w Lozannie, był wielokrotnie opisywany [1,2,8,9], toteż poprzestaniemy na krótkim przypomnieniu.

Robot Delta-4 składa się z trzech równoległych łańcuchów kinematycznych łączących bazę (9) z platformą ruchomą (3) (rys.1). Każdy z łańcuchów jest napędzany przez silnik bezpośredniego napędu (direct drive) (7), zamontowany na platformie bazy (9). Ruch platformy (3) jest wynikiem przemieszczeń ramion (1) połączonych z przestrzennymi równoległobokami tworzącymi przedramiona (2).



Rys. 1. Schemat robota Delta-4
Fig. 1. General lay-out of Delta-4 robot



Rys. 2. Parametry geometryczne robota Delta-4
Fig. 2. Dimensional parameters of robot Delta-4

Struktura geometryczna robota Delta-4 umożliwia przemieszczanie platformy ruchomej (3) w przestrzeni roboczej opisanej trzema współrzędnymi (x,y,z), odpowiadającymi trzem stopniom swobody robota. Platforma ruchoma pozostaje stale równoległa do płaszczyzny odniesienia Π. Nie jest możliwy także jej obrót względem osi prostopadłej do płaszczyzny platformy. Ta szczególna własność struktury geometrycznej robota Delta-4 jest uzyskana dzięki zastosowaniu przestrzennych równoległoboków (2).

Niezależny obrót chwytaka (5) napędzany przez silnik (6), który nie wpływa na pozostałe cechy kinematyki i dynamiki robota, jest jego czwartym stopniem swobody.

Konfiguracja robota, którą zajmiemy się dokładniej w prezentowanej pracy, składa się z następujących elementów:

- trzech identycznych obrotowych par kinematycznych (7) piątej klasy pomiędzy bazą a ramionami, tworzących między płaszczyznami łańcuchów kinematycznych kąty 120 stopni. Osie obrotu tych par leżą w jednej płaszczyźnie i są styczne do wspólnego okręgu,
- jednakowych ramion (1),
- trzech jednakowych par prętów równoległych tworzących przedramiona (2),

- platformy ruchomej (3), będącej trójkątem równobocznym połączonym w środkach swoich boków z przedramionami.

Oczywiście inne konfiguracje są dopuszczalne. Nie jest konieczne, żeby trzy równolegle łańcuchy kinematyczne były identyczne. Dla uproszczenia w dalszych rozważaniach będziemy traktować płaszczyznę II (rys. 1) jako poziomą, a płaszczyzny ruchu ramion (1) jako pionowe. Wielkości opisujące wymiary Ra, Rb, La, Lb, oraz kąty α_i, Θ_i, β_i, γ_i są zdefiniowane na rys. 2.

2. MODEL GEOMETRII ROBOTA DELTA-4

W piśmiennictwie można znaleźć różne modele geometrii robota Delta-4. W naszych rozważaniach będziemy stosować model zaproponowany przez prof. R. Clavela [1]. Odległość między punktem B platformy roboczej a końcem ramienia C jest równa długości przedramienia Lb (rys.2). Można to zapisać w formie następujących równań:

$$rh_i = [(R + L_a\cos(\alpha_i))\cos(\theta_i) - x]^2 + [(R + L_a\cos(\alpha_i))\sin(\theta_i) - y]^2 + \\ +[(L_a\sin(\alpha_i)) - z]^2 - L_b^2 = 0, \qquad (1)$$

gdzie: i=1,2,3; $R = R_a - R_b$. Powyższe równania będą służyć jako równania więzów holonomicznych w modelowaniu dynamiki robota Delta-4.

3. MODELE DYNAMIKI ROBOTA DELTA-4

3.1. Uproszczony model Newtona-Eulera

Według autora ogólne metody modelowania dynamiki robotów równoległych znane z literatury [4,5,6,7,10] nie nadają się do zastosowania w obliczeniach momentów napędowych dla zadanej trajektorii ruchu w czasie rzeczywistym w przypadku manipulatorów o skomplikowanym łańcuchu kinematycznym, do których należy robot Delta-4. Tak więc modelowanie jego dynamiki wymaga indywidualnego podejścia.

Obecnie stosowany do sterowania Deltą model [2] jest oparty na następującym założeniu upraszczającym: przedramiona (2) mają zerowe momenty bezwładności. Jeśli tak, to siły przenoszone na platformę (3) przez przedramiona (2) działają w ich kierunkach. Ułożenie równań równowagi sił dla platformy nie sprawia trudności (trzy niewiadome wartości sił w trzech równaniach równowagi - kierunki sił są znane). Dalsze wypisanie równań Newtona-Eulera dla przedramion i ramion prowadzi do wyznaczenia momentów napędzających w silnikach (7).

3.2. Model oparty na metodzie Lagrange'a

Robot Delta-4 ma trzy stopnie swobody. Wydaje się więc, że należy odpowiednio wybrać trzy współrzędne uogólnione, np. α_i, i=1,2,3, a następnie wyprowadzić trzy równania Lagrange'a drugiego rodzaju dla tych współrzędnych. Takie równania byłyby wzorami do obliczania nieznanych momentów napędzających. Jednakże z powodu złożoności modelu geometrycznego wypisanie funkcji Lagrange'a, a w szczególności jej pochodnych, używając tylko trzech współrzędnych uogólnionych, jest niezwykle skomplikowane i trudne.

Znacznie lepszym podejściem jest odpowiedni wybór sześciu współrzędnych uogólnionych (bo mamy trzy stopnie swobody i trzy rów. więzów (1)), które umożliwiłyby zbudowanie funkcji Lagrange'a. Jednocześnie ich liczba byłaby mniejsza niż liczba par kinematycznych piątej klasy robota.

Wybierzmy $\{q_j\} = \{x, y, z, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}, \quad j = 1, \ldots, 6.$ (2)

Stosujemy równania Lagrange'a z możnikami (elementarną dyskusję można znaleźć w [7]) w postaci:

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}) - (\frac{\partial L}{\partial q_j}) = Q_j + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i A_{ij}, \tag{3}$$

gdzie: j=1,..,6 - liczba współrzędnych uogólnionych; i=1,2,3 - liczba więzów (rów. (1)); L=T-V - funkcja Lagrange'a; T - energia kinetyczna; V - energia potencjalna; $A_{ij} = \frac{dh_i}{dq_j}$; λ_i - mnożniki Lagrange'a; Qj - uogólnione siły zewnętrzne. Jawną postać powyższych wzorów można znaleźć w [8].

Otrzymaliśmy 6 równań ruchu dla 3 nieznanych mnożników λ_i, i=1,2,3 i 3 nieznanych momentów napędzających Qj, j=4,5,6. Ich rozwiązanie jest elementarnie proste. Szczegóły można znaleźć w [9].

3.3. Model oparty na metodzie Hamiltona

Metoda modelowania polegająca na bezpośrednim zastosowaniu Zasady Hamiltona została szczegółowo opisana w pracy [8]. W wyniku jej zastosowania w przypadku robota Delta-4 otrzymuje się układ równań różnicowych:

$$[(\frac{\partial L}{\partial q_i})_n - \sum_{j=1}^{m} \lambda_j (\frac{\partial h_j}{\partial q_i})_n + Q_{in}]\Delta t + p_{i_{n+1}} - p_{i_n} = 0, \tag{4}$$

$$(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i})_n \Delta t + p_{i_n} \Delta t = 0, \tag{5}$$

gdzie p_i jest uogólnionym pędem w kier."i", "n" określa chwilę czasową, a "m" jest ilością przedziałów czasowych.

Dla rozwiązywania problemu odwrotnego dynamiki można przyjąć, że wartości następujących wyrażeń są znane:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}; \quad \frac{\partial L}{\partial q_i}; \quad \frac{\partial h_j}{\partial q_i} = A_{ji}.$$

Możliwe jest więc rozwiązanie układu (4,5) ze względu na szukane momenty Qj, j=4,5,6 w każdej chwili czasowej n. Sposób rozwiązywania można znaleźć w [8].

4. PORÓWNANIE ILOŚCI OPERACJI DLA RÓŻNYCH MODELI DYNAMIKI

Porównanie ilości operacji przy zastosowaniu trzech opisanych modeli przedstawiono w poniższej tabeli:

Tabela 1

Ilość operacji dla zastosowania modeli dynamiki robota Delta-4

Metoda	Liczba operacji			
	+i-	*	//	sin i cos
NE	55	77	1	6
LWOS	79	126	3	6
HWOS	67	96	6	6

NE - uproszczony model Newtona-Eulera (punkt 3.3.1.)
LWOS - pełny model Lagrange'a (punkt 3.3.2.)
HWOS - pełny model Hamiltona (punkt 3.3.3.)

5. WNIOSKI

Model oparty na metodzie Hamiltona wydaje się mieć wiele zalet w porównaniu z pozostałymi. Jest on około 1,3 razy szybszy niż model oparty na metodzie Lagrange'a i tylko ok. 1,25 wolniejszy niż uproszczony model Newtona-Eulera. W opinii autora najistotniejszą zaletą modelu Hamiltona jest to, że jako dane wejściowe do obliczenia momentów napędzających potrzebuje on tylko położeń i prędkości (nie przyśpieszeń). Pozwala to zaoszczędzić czas w obliczeniach kinematyki.

Prezentowana praca zawiera część pracy doktorskiej, którą autor wykonuje pod kierunkiem Prof. Adama Moreckiego z Politechniki Warszawskiej i Prof. Raymonda Clavela z Politechniki w Lozannie. Autor wyraża Im swoje najszczersze podziękowania za wszechstronną pomoc, twórcze rady i inspiracje.

LITERATURA

[1] R. Clavel: Concepcion d'un robot parallele a 4 degres de liberte, These No 922 (1991) EPFL, Lausanne.

[2] A. Codourey, R. Clavel , C.W. Burckhardt: Control algorithm and controller for the Direct Drive Delta Robot, in Proc. of IFAC Symposium on robot control, pp.169-177, Vienna 1991.

[3] Griffiths: The Theory of Classical Dynamics, Cambridge University Press 1985.

[4] Kleifinger, Khalil: Dynamic Modeling of Closed Loop Robots, in Proc. of 16th ISIR, Brussels 1986.

[5] T. Kokkinis , Y. Nakamura , D.Uecker : Dynamic Consideration and Motion Control Experiments for a Parallel Direct-Drive Robot Arm, in Proc. of ICAR 1991.

[6] Lin Shir-Kuan: Dynamics of Manipulators with Closed Chains. 1990 IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 6, no. 4, pp. 496-501

[7] J. Y. S. Luh, Zheng Y-F: Computation of input generalized forces for robots with closed kinematic chain mechanism. IEEE J. of Robotics and Automation, vol. RA-1 no.2, June 1985, pp.95-103.

[8] Miller K.: The Proposal of a New Model of Delta-4 Parallel Direct Drive Robot, in Proc. of '93 International Conference of Advanced Robotics, Nov. 1-2 1993, Tokyo, in print.

[9] Miller K.: Modelowanie dynamiki robota Delta-4 metodą Lagrange'a. Mat. Krajowej Konferencji Robotyki, Wrocław 22-25 wrzesień 93. (w druku).

[10] Y. Nakamura, M. Ghodoussi : Dynamics Computation of Closed-Link Robot Mechanisms with Nonredundant and Redundant Actuators. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, June 1989, pp. 294-303.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Buchacz

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

Abstract

Direct drive parallel robot Delta-4 (Fig.1), designed at Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, is made of three parallel kinematic chains linked at the travelling plate (3). Motions of the travelling plate are achieved by the combination of movements of arms (1), transmitted to the plate by the system of parallel rods (2). The structure of the robot enables only 3-dimensional translation of the travelling plate - no rotation is possible. The mechanisms maintains parallelism.

The concept of parallel robot requires a greater effort on the controller level because of mechanical coupling and inertia variation effects, which are directly reflected on each motor axis. The greatest difficulty lies in developing numerically simple dynamic model.

In the paper, simplified Newton-Euler based and "full" Lagrange based and Hamilton based dynamic models are briefly introduced. The breakdown and the comparison of the operation count for different model application is presented in Table 1.

The Hamilton based model appears to have many advantages in comparison with remaining ones. It is faster than Lagrange based "full" model and only a bit slower than simplified one. Moreover the application of it to calculate motor torques for given trajectory of the travelling plate requires only positions and velocities as input data. No accelerations are necessary.