MECHANIKA		1-M/2011
CZASOPISMO TECHNICZNE	WYDAWNICTWO	ZESZYT 2 ROK 108
MECHANICS	POLITECHNIKT KRAKOWSKIEJ	ISSUE 2 YEAR 108

MARTA GÓRA, RYSZARD TRELA*

BADANIE CHARAKTERYSTYK SZTYWNOŚCI MANIPULATORA SZEREGOWEGO Z WYKORZYSTANIEM CZUJNIKÓW LINKOWYCH

DETERMINATION OF STIFFNESS CHARACTERISTICS OF SERIAL TYPE MANIPULATOR **BY USING WIRE SENSORS**

Streszczenie

W celu badania charakterystyk liniowej sztywności manipulatora o strukturze szeregowej wykonano stanowisko pomiarowe wykorzystujące platformę, na której zamocowane są trzy czujniki linkowe do pomiaru przemieszczenia. Badania wykonano na manipulatorze (robot przemysłowych S420F) o strukturze szeregowej i ruchliwości równej 6. Ze względu na małą masę ruchomą linek pomiarowych oraz ich napięcie wstępne, zbudowane stanowisko może być użyte także do pomiarów w warunkach dynamicznych, jak i do wyznaczania powtarzalności pozycjonowania manipulatora.

Słowa kluczowe: manipulator szeregowy, czujniki linkowe, charakterystyki sztywności

Abstract

In order to estimate linear stiffness characteristics of serial type manipulator a test rig was built using an platform with three wire-based sensors arranged in a pyramid configuration. This enables for measurement all components of linear displacement of the end-effector under changing quasi-static load. Measurements results are presented for a robot with 6 degrees of freedom (S420F). The proposed measuring system is described by backlash free design, negligible moving inertia and low force preload, making the measurements also possible in dynamic conditions.

Keywords: serial type manipulator, wire-based sensor, stiffness characteristics

^{*} Dr inż. Marta Góra, mgr inż. Ryszard Trela, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W diagnostyce robotów istotnym problemem jest badanie jego charakterystyk sztywności. Badanie sztywności robota przemysłowego polega na wyznaczeniu elementów macierzy sztywności [3] określającej odkształcenia sprężyste manipulatora występujące w wyniku działania obciążenia zewnętrznego, przyłożonego do członu roboczego. Manipulatory o strukturze szeregowej mają człony bardzo sztywne, jednak ich układy napędowe wykazują znaczące podatności m.in. ze względu na odkształcenia skrętne wałków napędowych i przekładni. Wykonanie serii pomiarów przy obciążaniu członu roboczego pozwala zaobserwować wielowymiarową mapę podatności pozwalającą wprowadzić korekcję sterowań przy przemieszczeniach pod różnym obciążeniem (co ma znaczenie przy chwytakach wielofunkcyjnych – do detali o różnych cieżarach). Otrzymane wyniki pozwalają na weryfikację stanu sprawności robotów i przydatności ich do określonych procesów wytwarzania. Charakterystyki sztywności robotów należą do podstawowych cech użytkowych robotów przemysłowych, które ulegają modyfikacji podczas eksploatacji. Szerzej na temat analizy sztywności statycznej i wpływu podatności ogniw manipulatorów szeregowych i równoległych na dokładność otrzymanej trajektorii przedstawiono w pracach [2, 5].

Celem artykułu było przygotowanie stanowiska i metody pomiarowej do wyznaczania elementów macierzy sztywności związanymi z przemieszczeniem liniowym. Metoda ta powinna charakteryzować się odpowiednią dokładnością pomiaru, przestrzenią pomiarową i brakiem wpływu na obiekt badany (manipulator) podczas pomiaru oraz małymi kosztami.





Fig. 1. Scheme of measuring platform with wire based sensors for determination of position vector of end-effector with respect to the base {*xyz*}

Przegląd metod pomiaru położenia w robotach przemysłowych przedstawiono w pracy [4]. Spełniając powyżej postawione kryteria, przygotowano układ pomiarowy (rys. 1) do wyznaczenia wektora pozycji członu roboczego względem układu {xyz} wykorzystujący linkowe czujniki przemieszczenia. Zmiany odległości pomiędzy punktem P członu roboczego a platformą pomiarową są mierzone za pomocą czujników linkowych. Każda z trzech linek nawija się na bęben znajdujący się w platformie pomiarowej, ze sprężyną

napinającą oraz z układem do pomiaru kąta obrotu bębna (rys. 2). Linki przenoszą tylko obciążenie wynikające z układu napinającego, które wynosi od kilku od kilkunastu N [1]. Wypadkowe obciążenie od sił napięcia linek zazwyczaj nie wpływa na rozkład obciążeń w mechanizmie prowadzącym człon roboczy. Przemieszczenie członu roboczego z platformą ruchomą względem nieruchomej wywołuje zmiany długości linek, które wyznacza się na podstawie sygnałów z czujników. Znając długości linek i odpowiednie współrzędne punktów platform, można wyznaczyć pozycję członu roboczego. Przedstawiony układ pomiarowy jest przydatny do pomiarów małych przemieszczeń przy wymuszeniach dynamicznych i pożądanej wysokiej dokładności.



Rys. 2a) Przykład czujnika linkowego o wymiarach 40/40/50 mm o dokładności 0,1 % przy zakresie pomiarowym 1 m [6], b) schemat mechanizmu nawijania linki [1]
Fig. 2a) Sample of wire sensor with main dimensions 40/40/50 mm and accuracy of 0,1% in a measurement range of 1m [6], b) scheme of the wire pulley [1]

2. Macierz sztywności manipulatora

Jako obiekt badań wybrano manipulator o strukturze szeregowej (robot przemysłowych S420F) i ruchliwości równej 6 (6 par obrotowych). Manipulatory takie stosowane są m.in. do paletyzowania, przenoszenia materiałów, precyzyjnego spawania łukowego, wysoko wytrzymałego zgrzewania w przemyśle samochodowym, malowania czy cięcia laserowego.

W celu wyznaczenia charakterystyk sztywności manipulatora jego człon roboczy został poddany obciążeniu zewnętrznemu (F_z), co spowodowało jego odchylenie od położenia początkowego (bez obciążenia). Otrzymane przemieszczenie członu roboczego było wynikiem małych przemieszczeń w połączeniach ruchowych. Wielkość tego odchylenia zależy od przyłożonego obciążenia i sztywności manipulatora.

Macierz sztywności [3] manipulatora o strukturze szeregowej przedstawia się jako:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X} & \frac{\partial F_y}{\partial X} & \frac{\partial F_z}{\partial X} & \frac{\partial M_x}{\partial X} & \frac{\partial M_y}{\partial X} & \frac{\partial M_z}{\partial X} \\ \frac{\partial F_x}{\partial Y} & \frac{\partial F_y}{\partial Y} & \frac{\partial F_z}{\partial Y} & \frac{\partial M_x}{\partial Y} & \frac{\partial M_y}{\partial Y} & \frac{\partial M_z}{\partial Y} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} & \frac{\partial F_y}{\partial z} & \frac{\partial F_z}{\partial z} & \frac{\partial M_x}{\partial z} & \frac{\partial M_y}{\partial z} & \frac{\partial M_z}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & \frac{\partial F_y}{\partial \theta} & \frac{\partial F_z}{\partial \theta} & \frac{\partial M_x}{\partial \theta} & \frac{\partial M_y}{\partial \theta} & \frac{\partial M_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & \frac{\partial F_y}{\partial \theta} & \frac{\partial F_z}{\partial \theta} & \frac{\partial M_x}{\partial \theta} & \frac{\partial M_y}{\partial \theta} & \frac{\partial M_z}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$
(1)

gdzie:

 X, Y, Z, α, β, γ
 – współrzędne wektora pozycji i macierzy orientacji członu roboczego manipulatora,

 F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z – współrzędne siły i momentu obciążenia zewnętrznego.



Ze względu na obciążenie siłą pionową F_z rozważano tylko liniowe zależności przemieszczenia członu roboczego od siły, czyli następujące elementy macierz **K**: $k_{13} = \partial F_z / \partial X$, $k_{23} = \partial F_z / \partial Y$, $k_{33} = \partial F_z / \partial Z$.

3. Wyznaczenie wektora pozycji członu roboczego

W celu badania charakterystyk liniowej sztywności manipulatora o strukturze szeregowej wykonano stanowisko pomiarowe (rys. 3) wykorzystujące platformę, na której zamocowane są trzy czujniki linkowe.





Końce linek zaczepiono do członu roboczego (chwytaka) manipulatora, który obciążano quasi-statycznie. Zamocowano czujniki na platformie pomiarowej zgodnie z osiami układu kartezjańskiego {*xyz*}.

Wyznaczono pozycję członu roboczego na podstawie zależności określających długość każdej z linek (l_i – długość *i* linki, gdzie *i* = 1, 2, 3) jako:

$$\|\mathbf{AP}\| = l_1, \, \|\mathbf{BP}\| = l_2, \, \|\mathbf{CP}\| = l_3 \tag{2}$$

Wykorzystując oznaczenia przedstawione na rys. 4, otrzymano:

$$l_1^2 = x_p^2 + (y_p - a)^2 + z_p^2$$

$$l_2^2 = x_p^2 + y_p^2 + z_p^2$$

$$l_3^2 = (x_p - b)^2 + y_p^2 + z_p^2$$
(3)

Rozwiązując równania (3), otrzymano kolejne składowe pozycji członu roboczego względem układu $\{xyz\}$ jako:

$$x_{p} = (l_{2}^{2} - l_{3}^{2} + b^{2})/(2b)$$

$$y_{p} = (l_{2}^{2} - l_{1}^{2} + a^{2})/(2a)$$

$$z_{p} = \pm (l_{2}^{2} - x_{p}^{2} - y_{p}^{2})^{1/2}$$
(4)

Wprowadzono ograniczenie tylko do jednej konfiguracji ze względu na sposób zamocowania czujników umożliwiający pomiar tylko dla $z_p > 0$ i w zakresie przestrzeni

roboczej układu pomiarowego, ograniczonej m.in. przez zakresy wysuwu linek i ich kąty względem podstawy [1].

4. Wyniki pomiaru

Człon roboczy robota przemysłowego S420F został poddany obciążeniu zewnętrznemu równemu 50% obciążenia nominalnego (obciążenie robocze) [6].

Pomiary wykonano w położeniu 1 (tab. 1 i 2) robota. Współrzędne kartezjańskie i konfiguracyjne określające położenie chwytaka względem układu związanego z podstawą manipulatora bez obciążenia zewnętrznego przedstawiono w tabeli 1, gdzie: *X*, *Y*, *Z* – współrzędne linowe, *w*, *p*, *r* – kąty obrotu osi układu określone względem ustalonego układu współrzędnych, θ_i – parametry D-H, gdzie *i* = 1, ..., 6. W tabeli 2 umieszczono współrzędne kartezjańskie i konfiguracyjne określające położenie chwytaka względem układu związanego z podstawą manipulatora z obciążeniem roboczym (ok. *F*_z = 500 N) zamocowanym do chwytaka. Współrzędne liniowe i kątowe położenia układu związanego z członem roboczym względem podstawy manipulatora umieszczone w tab. 1 i 2 odczytano z pulpitu sterowniczego włączonego manipulatora.

Ustalono warunki pomiaru polegające na monotonicznym zwiększaniu obciążenia, które następnie zmniejszano w tych samach quasi-statycznych warunkach. Próbę 1 wykonano, zwiększając obciążenie członu roboczego o 5 kg do masy max. 50 kg (rys. 4, wykres w1), następnie zmniejszano obciążenie co 5 kg (rys. 4, wykres w2).

Tabela 1

Współrzędne kartezjańskie i konfiguracyjne członu roboczego określone względem układu podstawy manipulatora dla położenia 1 bez obciążenia

Współrzędne kartezjańskie					
<i>X</i> [mm]	<i>Y</i> [mm]	<i>Z</i> [mm]	w [°]	p [°]	<i>r</i> [°]
-23,13	-2913,19	534,44	-89,47	75,2	-179,7
Współrzędne konfiguracyjne θ_i [°], $i = 1,, 6$					
1	2	3	4	5	6
-90,48	64,74	-5,27	181,98	-5,41	192,73

Na rysunku 4 przedstawiono zależności pomiędzy składowymi liniowymi przemieszczenia przestrzennego członu roboczego spowodowane zmieniającym się obciążeniem zewnętrznym, gdzie wyróżniono krzywą w1 – obciążania i w2 – odciążania. W przypadku współrzędnej x_p maksymalne ugięcie wynosi 0,81 mm, współrzędnej y_p maksymalne ugięcie wynosi 0,53 mm oraz współrzędnej z_p maksymalne ugięcie wynosi 3,5 mm.

Tabela 2

Współrzędne kartezjańskie i konfiguracyjne członu roboczego określone względem układu podstawy manipulatora dla położenia 1 z obciążeniem roboczym

Współrzędne kartezjańskie						
<i>X</i> [mm]	<i>Y</i> [mm]	Z [mm]	w [°]	p [°]	<i>r</i> [°]	
-23,17	-2913,20	534,38	-89,48	75,29	-179,80	
Współrzędne konfiguracyjne θ_i [°], $i = 1,, 6$						
1	2	3	4	5	6	
-90,48	64,74	-5,28	181,97	-5,41	192,73	

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany współrzędnych (x_p , y_p , z_p) wektora pozycji członu roboczego określone względem układu platformy pomiarowej spowodowane zmianą obciążenia (F_z). Dodatkowo zauważalne są zmiany położenia krzywych obciążania (w1) i odciążania (w2), czyli charakterystyki te wykazują tzw. pętlę histerezy we wszystkich trzech przypadkach współrzędnych. Spowodowane jest to najczęściej luzami i tarciem w parach kinematycznych manipulatora i układu pomiarowego.



Rys. 4a) Stanowisko pomiarowe do wyznaczania sztywności zredukowanej do środka członu roboczego robota przemysłowego S420F, b) otrzymane składowe przemieszczenia liniowego członu roboczego (S420F) pod wpływem zmieniającego się obciążenia pionowego (w1 – krzywa obciążania i w2 – odciążania)

Fig. 4a) Test stand for determination of manipulator stiffness reduced at the endeffector, b) obtained components of the end-effector linear displacement due to changing vertical load (w1 – loading w2 – unloading)





Kolejnym krokiem analizy otrzymanych wyników było oszacowanie charakterystyk sztywności liniowej dla manipulatora szeregowego (rys. 6). Zbudowane stanowisko (rys. 3) służy do wyznaczenia elementów macierzy sztywności **K** w przypadku działania sił zewnętrznych F_x , F_y , F_z (k_{jm} , j, m = 1, 2, 3) oraz momentów sił M_x , M_y , M_z (k_{jm} , j = 1, 2, 3, m = 4, 3, 6). W artykule rozpatrywano działanie zewnętrznej siły pionowej F_z , dlatego wyznaczono elementy k_{13} , k_{23} , k_{33} macierzy sztywności.





Na podstawie charakterystyk krzywych sztywności (w1 – krzywa obciążania, w2 – krzywa odciążania) wyznaczonych odpowiednio dla osi x, y, z wyznaczono współczynniki macierzy sztywności (1) na podstawie krzywej regresji. W ten sposób wyniki pomiarów zostały przybliżone zależnościami liniowymi. Otrzymano następujące elementy macierzy sztywności: $k_{13} = 550$ N/mm, $k_{23} = 1489$ N/mm, $k_{33} = 131$ N/mm. Oznacza to, że największą sztywność uzyskano w osi y, a najmniejszą w osi z. Podatność manipulatora w kierunku osi z jest największa w przypadku działania siły zewnętrznej F_z .

Zbudowane stanowisko może być użyte także do wyznaczania powtarzalności pozycjonowania manipulatora. Wykonano 5 powtórzeń cyklu obciążania i odciążania dla położenia 1 (tab. 1). Otrzymano przedziały niepewności (± 3σ) odchylenia od średniej (rys. 7), które wykazują dla osi z maksymalną odchyłkę 1,1 mm, dla osi x i y maksymalną odchyłkę 0,5 mm. Wynika stąd, że pomiary współrzędnych x i y są na granicy rozdzielczości zastosowanego układu pomiarowego.



 Rys. 7. Oszacowane przedziały niepewności wyznaczonych współrzędnych przemieszczenia liniowego członu roboczego manipulatora S420F (pięć powtórzeń)
 Fig. 7. Estimated uncertainty intervals of linear displacement components of S420F manipulator end-effector (five repetitions)

5. Wnioski

Przygotowano stanowisko i opracowano metodę pomiarów przemieszczenia liniowego członu roboczego mechanizmu z wykorzystaniem czujników linkowych rozpiętych pomiędzy środkiem członu roboczego (chwytaka) i nieruchomej platformy pomiarowej. Stosując proste przekształcenia matematyczne, uzyskano współrzędne pozycji chwytaka względem układu platformy stanowiska pomiarowego, następnie wykorzystano te zależności do wyznaczenia charakterystyk liniowych sztywności manipulatora zredukowanych do członu roboczego. Przygotowane stanowisko i metoda pomiarowa spełniają postawione kryterium odpowiedniej dokładności pomiaru, przestrzeni roboczej, a przy tym małymi kosztami oraz brakiem wpływu na badany obiekt podczas pomiaru. Wyznaczono powtarzalność pozycjonowania manipulatora.

Literatura

- [1] Góra M., Knapczyk J., Maniowski M., Estimation of platform pose and displacement of parallel mechanism using wire-based sensors, The Archive of Mechanical Engineering, Vol. 54, No. 4, 2007, 365-389.
- [2] Kozłowski K., Sauer P., Zastosowanie procesorów sygnałowych w sterowaniu robotów przemysłowych z elastycznością w złączach, WNT, Warszawa 2002.
- [3] Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K., Teoria mechanizmów i manipulatorów, Podstawy i przykłady zastosowań w praktyce, WNT, Warszawa 2002.
- [4] Poplawski J., Sultan I.A., *Position Sensing of Industrial Robots A Survey*, Information Technology Journal, 8 (1), 2007, 14-25.
- [5] T s ai L.W., Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [6] Roboty przemysłowe, PN-EN 29283.