

Tadeusz SZKODNY
Politechnika Śląska

POMIARY OPTYCZNE POŁOŻEŃ MANIPULATORA ROBOTA EKSPERYMENTALNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę obliczeń współrzędnych położenia w oparte na pomiarach optycznych kątów za pomocą tachimetrów. Zaproponowano formę kwadratową jako miarę błędu pomiaru położenia. Przedstawiono ustawienie tachimetrów względem toru jezdnygo manipulatora robota eksperymentalnego. Ustawienie wynika z analizy obszarów o najmniejszej wartości miary błędu pomiaru w otoczeniu tachimetrów. Wyznaczono także położenie listwy wzorcowej, w którym wartość średnia miary błędu pomiaru jest najmniejsza. Zaproponowano metodę wyznaczania odległości między tachimetrami za pomocą pomiarów listwy wzorcowej.

THE OPTICAL MEASUREMENTS OF EXPERIMENTAL ROBOT MANIPULATOR POSITIONS

Summary. In this paper the computation method of coordinate position using the optical measurements of angles by means the tachimeters is presented. A square form as measure of error measurement of position is proposed. The tachimeters' location in relation to experimental manipulator's drive track is presented. The location results from analysis of space in which value of measure of measurement errors is minimal. A pattern bar location in which an average value of measure of measurement errors is minimal has been evaluated. This analysis has been done in tachimeters' environment. An evaluation method of distance between tachimeters by means measurements of pattern bar is proposed.

1. Wprowadzenie

Do laboratorium Zakładu Robotyki i Automatykacji Procesów Dyskretnych zakupiono robot przemysłowy IRb-6 oraz tor jezdny LP-1. Manipulator tego robota zamontowano na torze jezdny LP-1 i zamocowano 6 enkoderów mierzących kąty obrotów każdego silnika napędzającego. Zaprojektowano i uruchomiono w Zakładzie system sterowania ruchem tego manipulatora. W dalszej części pracy robot ten będzie nazwany eksperymentalnym. System wykorzystuje stację roboczą Motorola MVME 167 z systemem operacyjnym Unix. System sterowania robota jest ciągle przedmiotem prac badawczych mających na celu jego

doskonalenie. Równocześnie z pracami projektowymi prowadzone są prace badawcze poświęcone: systemom sensorycznym robotów, modelowaniu, symulacji i planowaniu ruchu manipulatorów, w tym także manipulatorów IRb-6 [4]. Jednym z rezultatów tych badań jest niniejsza praca.

Błędy modelowania ruchu manipulatorów wynikają z pominięcia efektów podatności i luzów w przegubach oraz rozbieżności wynikłych z uproszczenia struktury robota poprzez przyjęcie dodatkowych założeń (np. prostopadłość osi). Identyfikację parametrów kinematyki robotów przeprowadza się poprzez pomiary położenia wybranych punktów manipulatora w wielu punktach przestrzeni roboczej [1,2]. W identyfikacji stosuje się kilka metod pomiaru współrzędnych położenia. Są to metody z zastosowaniem kamer CCD i wideo, metoda ultradźwiękowa, laserowa oraz metoda z zastosowaniem teodolitów lub tachimetrów.

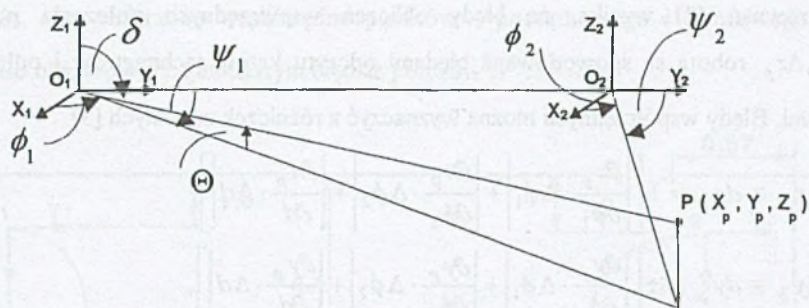
W pracy przedstawiono metodę pomiarów położenia robota eksperymentalnego, z zastosowaniem tachimetrów optycznych DALTHA 010.

W punkcie 2 przedstawiono charakterystykę metody pomiaru współrzędnych położenia punktów za pomocą tachimetrów. W punkcie 3 przedstawiono kryteria doboru ustawienia tachimetrów względem toru jezdnego robota i sposób ustawienia listw wzorcowych względem tachimetrów. W punkcie 4 przedstawiono sposób wyznaczania odległości między tachimetrami. W punkcie 5 przedstawiono wnioski.

2. Metoda pomiaru współrzędnych położenia

W punkcie tym przedstawiono metodę pomiaru współrzędnych położenia punktów za pomocą tachimetrów. Na rys.1 przedstawiono układy współrzędnych tachimetrów $x_1y_1z_1$, $x_2y_2z_2$ oraz mierzony punkt P . Tachimetry umieszczono w punktach O_1 i O_2 , z każdym związano układy współrzędnych. Płaszczyzny x_1y_1 oraz x_2y_2 nie muszą pokrywać się, muszą być natomiast równoległe. Przyjęto następujące oznaczenia:

- $x_1y_1z_1$ - układ współrzędnych związany z pierwszym tachimetrem,
- $x_2y_2z_2$ - układ współrzędnych związany z drugim tachimetrem,
- x_p, y_p, z_p - współrzędne punktu P względem układu $x_1y_1z_1$,
- ϕ_1 - kąt poziomy pierwszego tachimetru,
- ϕ_2 - kąt poziomy drugiego tachimetru,
- Θ - kąt pionowy.



Rys.1. Współrzędne kątowe punktu P

Fig.1. The angle coordinates of the point P

Do pomiaru współrzędnych x_p, y_p, z_p wykorzystano kąty ϕ_1, ϕ_2 i Θ . Tachimetry umożliwiają pomiar kątów ψ_1, ψ_2 i δ w gradach [3]. Z rys.1 wynikają następujące związki:

$$\phi_1 = 100 - \psi_1 \text{ [grad]}, \quad \phi_2 = 100 - \psi_2 \text{ grad}, \quad \Theta = 100 - \delta \text{ grad.} \quad (1)$$

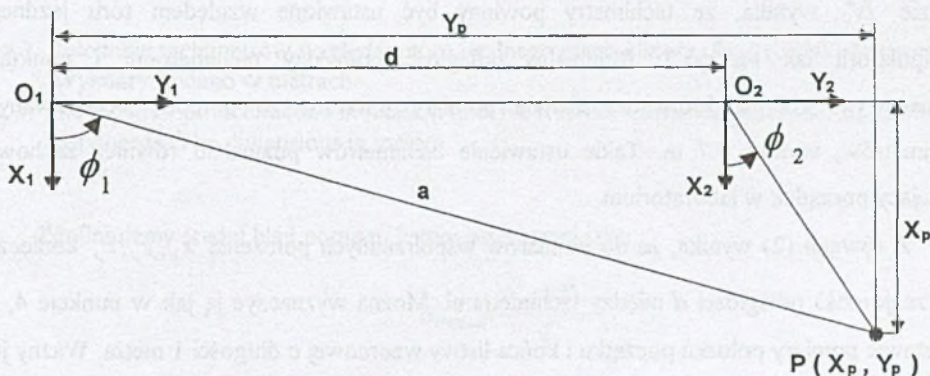
Dla osi y_1 $\psi_1 = 0$ [grad], dla osi y_2 $\psi_2 = 0$ grad, dla osi z_1 $\delta = 0$ grad.

Rys.2 przedstawia położenie punktu P na płaszczyźnie xy. Przyjęto dodatkowo następujące oznaczenia:

- a - odległość mierzonego punktu od środka układu współrzędnych x_1, y_1, z_1 na płaszczyźnie xy,
- x_p, y_p - współrzędne punktu P względem układu x_1, y_1, z_1 ,
- d - odległość pomiędzy tachimetrami.

Z rys.1÷2 wynikają następujące zależności trygonometryczne na współrzędne punktu P:

$$x_p = \frac{d}{\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2}, \quad y_p = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \phi_1}{\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2}, \quad z_p = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \Theta}{|\cos \phi_1| \operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2}. \quad (2)$$



Rys.2. Współrzędne punktu P na płaszczyźnie xy

Fig.2. The coordinates of the point P on xy plane

Z równań (2) wynika, że błędy obliczeń współrzędnych położenia punktu P $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p$ robota są spowodowane błędami odczytu kątów tachimetrów i odległości d między nimi. Błędy współrzędnych można wyznaczyć z różniczek zupełnych [3].

$$\begin{aligned}\Delta x_p \equiv dx_p &= \pm \left[\left| \frac{\partial x_p}{\partial \phi_1} \cdot \Delta \phi_1 \right| + \left| \frac{\partial x_p}{\partial \phi_2} \cdot \Delta \phi_2 \right| + \left| \frac{\partial x_p}{\partial d} \cdot \Delta d \right| \right], \\ \Delta y_p \equiv dy_p &= \pm \left[\left| \frac{\partial y_p}{\partial \phi_1} \cdot \Delta \phi_1 \right| + \left| \frac{\partial y_p}{\partial \phi_2} \cdot \Delta \phi_2 \right| + \left| \frac{\partial y_p}{\partial d} \cdot \Delta d \right| \right], \\ \Delta z_p \equiv dz_p &= \pm \left[\left| \frac{\partial z_p}{\partial \phi_1} \cdot \Delta \phi_1 \right| + \left| \frac{\partial z_p}{\partial \phi_2} \cdot \Delta \phi_2 \right| + \left| \frac{\partial z_p}{\partial \Theta} \cdot \Delta \Theta \right| + \left| \frac{\partial z_p}{\partial d} \cdot \Delta d \right| \right].\end{aligned}\quad (3)$$

3. Dobór ustawienia tachimetrów i listw wzorcowych

Zależności (3) pozwalają obliczyć błędy pomiaru współrzędnych położenia punktu P $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p$. Dla porównania tych błędów w poszczególnych punktach otoczenia tachimetrów obliczymy formę kwadratową

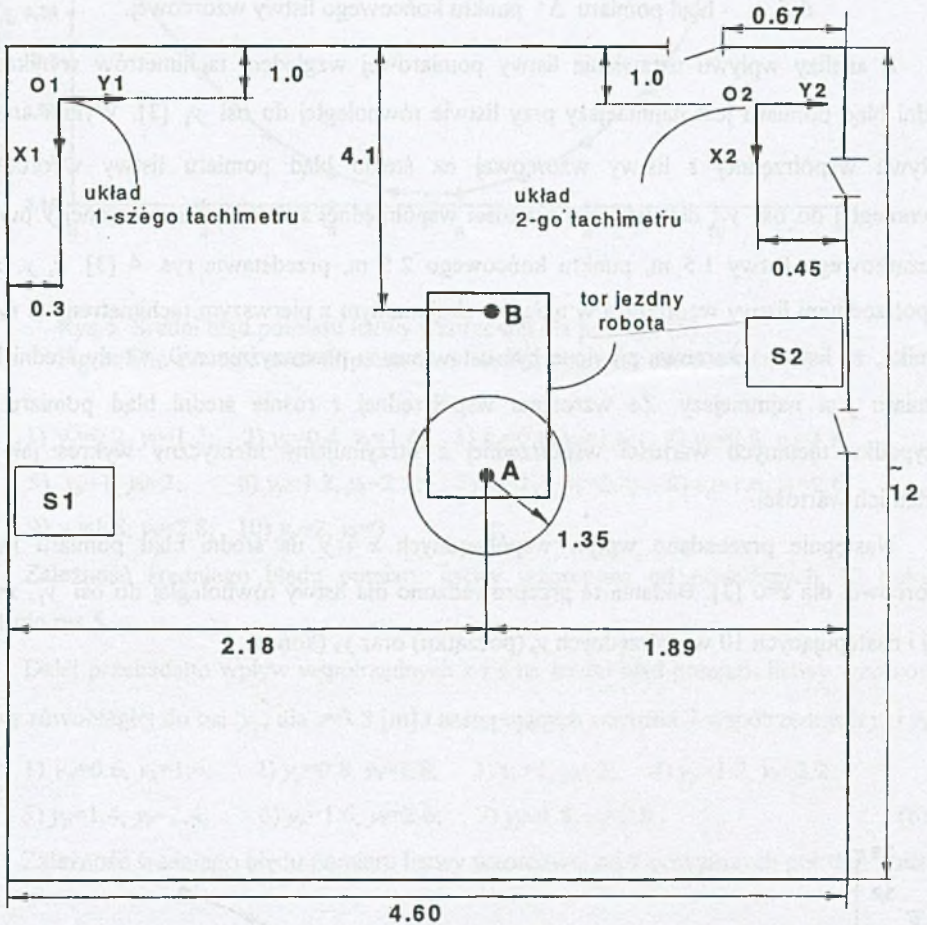
$$\Delta^2 = \Delta x_p^2 + \Delta y_p^2 + \Delta z_p^2, \quad (4)$$

którą potraktujemy jako miarę błędu pomiaru. Dalej formę tę będziemy nazywać krótko błędem Δ^2 .

Korzystając z metody pomiarowej współrzędnych położenia punktów, opisaną w drugim punkcie i równanie (4), opracowano program komputerowy analizujący błąd Δ^2 w otoczeniu tachimetrów [3]. Z przeprowadzonej w pracy [3] analizy obszarów o najmniejszym błędzie Δ^2 wynika, że tachimetry powinny być ustawione względem toru jezdnego manipulatora jak na rys.3. Minimalna odległość pomiędzy tachimetrami i punktami pomiarowymi robota, która umożliwiała pomiary optyczne za pomocą zastosowanych tachimetrów, wynosi 3.7 m. Takie ustawienie tachimetrów pozwalało również zachować istniejący porządek w laboratorium.

Z równań (2) wynika, że do pomiarów współrzędnych położenia x_p, y_p, z_p konieczna jest znajomość odległości d między tachimetrami. Można wyznaczyć ją jak w punkcie 4, na podstawie pomiaru położenia początku i końca listwy wzorcowej o długości 1 metra. Ważny jest dobór ustawienia listwy wzorcowej względem tachimetrów. Zadanie to polega na takim

ustawieniu, aby zmierzone współrzędne punktów - początkowego i końcowego listwy - należały do obszarów o najmniejszym błędzie pomiaru Δ^2 .



Rys.3. Położenie tachimetrów względem toru jezdnego manipulatora. S₁, S₂-szafy sterownicze. Wymiary podano w metrach

Fig.3. The location of tachimeters in relation to drive track of the manipulator. S₁, S₂-control cupboards. The dimensions in meters

Zdefiniujemy średni błąd pomiaru listwy wzorcowej jako:

$$\Delta_{\text{średnie}}^2 = \frac{\Delta_{pp}^2 + \Delta_{pk}^2}{2}$$

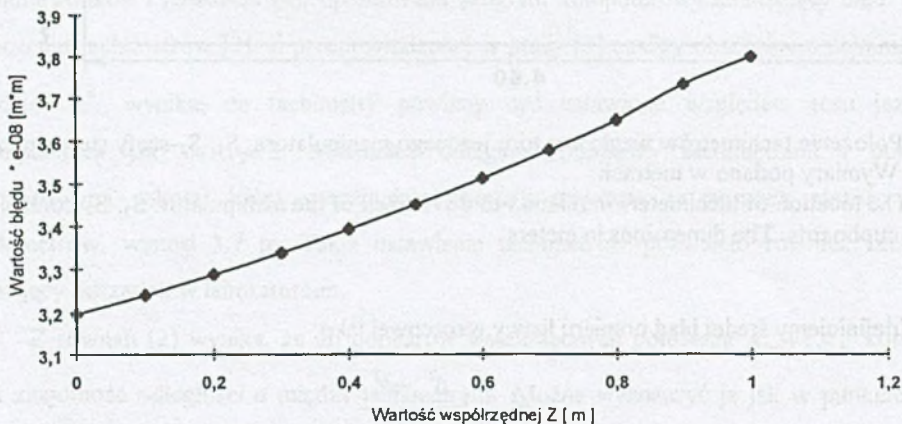
gdzie:

Δ^2_{pp} - błąd pomiaru Δ^2 punktu początkowego listwy wzorcowej,

Δ^2_{pk} - błąd pomiaru Δ^2 punktu końcowego listwy wzorcowej.

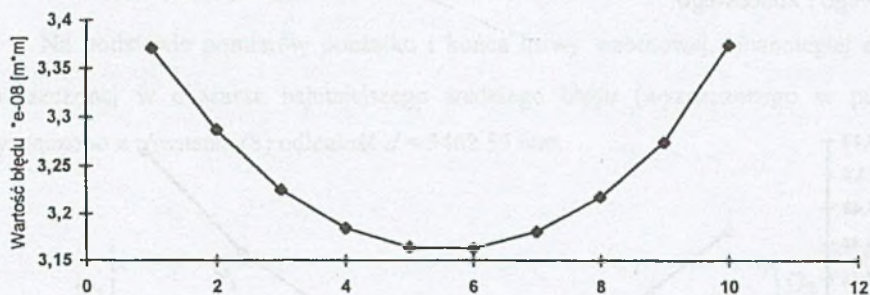
Z analizy wpływu ustawienia listwy pomiarowej względem tachimetrów wynika, że średni błąd pomiaru jest najmniejszy przy listwie równoległej do osi y_1 [3]. Wyniki analizy wpływu współrzędnej z listwy wzorcowej na średni błąd pomiaru listwy wzorcowej, równoległej do osi y_1 , dla ustalonej wartości współrzędnej $x=3.7$ m, współrzędnej y punktu początkowego listwy 1.5 m, punktu końcowego 2.5 m, przedstawia rys. 4 [3]. x , y , z są współrzędnymi listwy wzorcowej w układzie skojarzonym z pierwszym tachimetrem. Z rys. 4 wynika, że listwa wzorcowa powinna być ustawiona w płaszczyźnie $z=0$, wtedy średni błąd pomiaru jest najmniejszy. Ze wzrostem współrzędnej z rośnie średni błąd pomiaru. W przypadku ujemnych wartości współrzędnej z otrzymujemy identyczny wykres jak dla dodatnich wartości.

Następnie przebadano wpływ współrzędnych x i y na średni błąd pomiaru listwy wzorcowej dla $z=0$ [3]. Badania te przeprowadzono dla listwy równoległej do osi y_1 , $x=3.7$ [m] i następujących 10 współrzędnych y_p (początku) oraz y_k (końca):



Rys.4. Wpływ współrzędnej z na średni błąd pomiaru listwy wzorcowej

Fig.4. The influence of the coordinate z on average error of pattern bar measurement



Rys.5. Średni błąd pomiaru listwy wzorcowej dla położenia (5)

Fig.5. The average error of pattern bar measurement for the position (5)

- 1) $y_p=0.2, y_k=1.2$; 2) $y_p=0.4, y_k=1.4$; 3) $y_p=0.6, y_k=1.6$; 4) $y_p=0.8, y_k=1.8$;
 5) $y_p=1, y_k=2$; 6) $y_p=1.2, y_k=2.2$; 7) $y_p=1.4, y_k=2.4$; 8) $y_p=1.6, y_k=2.6$;
 9) $y_p=1.8, y_k=2.8$; 10) $y_p=2, y_k=3$. (5)

Zależność średniego błęd pomiaru listwy wzorcowej od powyższych 10 położenia ilustruje rys.5.

Dalej przebadano wpływ współrzędnych x i y na średni błąd pomiaru listwy wzorcowej, listwy równoległej do osi y_1 , dla $x=3.8$ [m] i następujących wartości 7 współrzędnych y_p i y_k :

- 1) $y_p=0.6, y_k=1.6$; 2) $y_p=0.8, y_k=1.8$; 3) $y_p=1, y_k=2$; 4) $y_p=1.2, y_k=2.2$;
 5) $y_p=1.4, y_k=2.4$; 6) $y_p=1.6, y_k=2.6$; 7) $y_p=1.8, y_k=2.8$. (6)

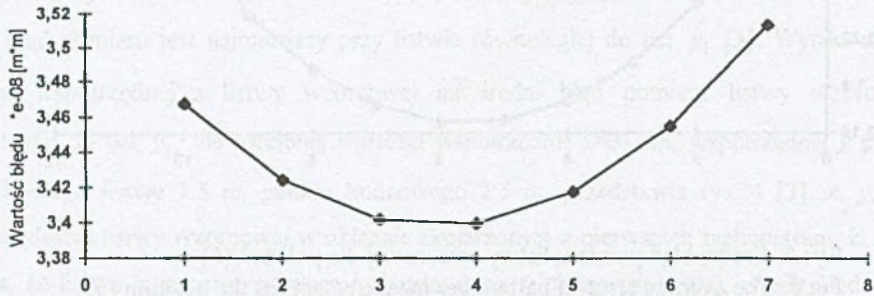
Zależność średniego błęd pomiaru listwy wzorcowej od 7 powyższych położenia ilustruje rys. 6.

Z rys.5 i 6 wynika, że najmniejszy błąd pomiaru występuje dla położenia listwy $x_p=x_k=3.7$ m, $y_p=1.4$ m, $z_p=z_k=0$ m, $y_k=2.4$ m. Widzimy także, że ze wzrostem współrzędnej x z 3.7 m do 3.8 m rośnie wartość błęd. Z badań [3] wynika, że błąd Δ^2 rośnie ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od okularów tachimetrów.

4. Wyznaczanie odległości między tachimetrami

Odległość d początków układów współrzędnych tachimetrów O_1 i O_2 wzdłuż osi y_1 występuje we wzorach (2) na współrzędne kartezjańskie obliczane z kątów ψ_1, ψ_2 i δ . Po umieszczeniu listwy metalowej będącej wzorcem długości 1 metra w obszarze o najmniejszym

średnim błędzie Δ^2 , możemy dokonać serii pomiarów kątów ψ_1 , ψ_2 i δ dla jej punktu początkowego i końcowego.



Rys.6. Średni błąd pomiaru listwy wzorcowej dla położenia (6)

Fig.6. The average error of pattern bar measurement for the position (6)

Na podstawie rys.7 i wzorów (1)-(2) możemy wyprowadzić następujące zależności matematyczne:

$$\begin{aligned} \left[(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2 + (z_p - z_k)^2 \right]^{1/2} &= d \cdot \left[\left(\frac{1}{\operatorname{tg} \phi_{1p} - \operatorname{tg} \phi_{2p}} - \frac{1}{\operatorname{tg} \phi_{1k} - \operatorname{tg} \phi_{2k}} \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\operatorname{tg} \phi_{1p}}{\operatorname{tg} \phi_{1p} - \operatorname{tg} \phi_{2p}} - \frac{\operatorname{tg} \phi_{1k}}{\operatorname{tg} \phi_{1k} - \operatorname{tg} \phi_{2k}} \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\operatorname{tg} \Theta_p}{\cos \phi_{1p} |\operatorname{tg} \phi_{1p} - \operatorname{tg} \phi_{2p}|} - \frac{\operatorname{tg} \Theta_k}{\cos \phi_{1k} |\operatorname{tg} \phi_{1k} - \operatorname{tg} \phi_{2k}|} \right)^2 \right]^{1/2} = \\ &= d \cdot f(\phi_{1p}, \phi_{2p}, \Theta_p, \phi_{1k}, \phi_{2k}, \Theta_k) = 1000 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (7)$$

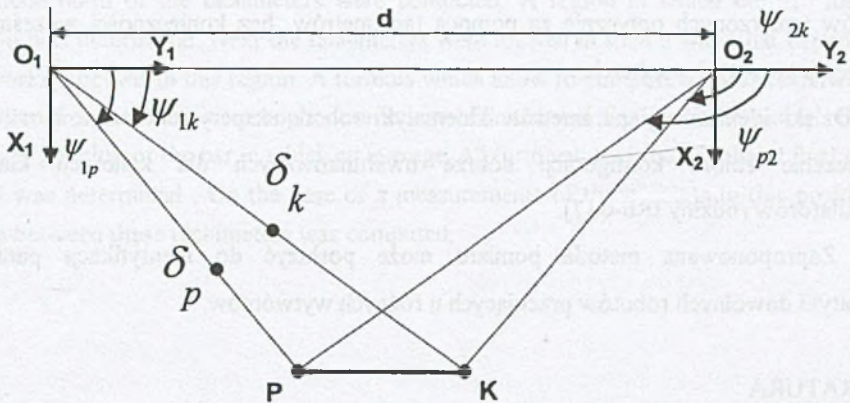
Zatem dla serii M pomiarów kątów punktów P i K wzorca metra, z minimalizacji sumy kwadratów

$$S = \sum_{i=1}^M \left[d - \frac{1000}{f(\phi_{1pi}, \phi_{2pi}, \Theta_{pi}, \phi_{1ki}, \phi_{2ki}, \Theta_{ki})} \right]^2,$$

wynika

$$d = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1000}{f(\phi_{1pi}, \phi_{2pi}, \Theta_{pi}, \phi_{1ki}, \phi_{2ki}, \Theta_{ki})} \text{ mm.} \quad (8)$$

Na podstawie pomiarów początku i końca listwy wzorcowej, równoległej do osi y_1 , umieszczonej w obszarze najmniejszego średniego błędu (wyznaczonego w punkcie 3), wyznaczono z równania (8) odległość $d = 3462.55$ mm.



Rys. 7. Ustawienie listwy wzorcowej względem tachimetrów; P, K-punkty początkowy i końcowy listwy

Fig. 7. The location of pattern bar in relation to the tachimeters; P, K-initial and final points of the bar

5. Wnioski

Błąd pomiaru można oszacować jako iloczyn $\Delta S = R_{\max} \Delta \varphi$. R_{\max} jest maksymalną odległością punktu pomiarowego od okularu tachimetru. Dla przestrzeni pomiarowej robota $R_{\max} \approx 4500$ mm. $\Delta \varphi$ jest dokładnością odczytu kąta tachimetru. Można przyjąć, że $\Delta \varphi \approx 1/4$ działki $= 0,39 \cdot 10^{-4}$ rad. Zatem $\Delta S \approx 4500 \cdot 0,39 \cdot 10^{-4} = 0,17$ mm. Dlatego błąd pomiaru jest rzędu dziesiątych milimetra.

Listwę wzorcową należy umieścić w środku obszaru o najmniejszym błędzie pomiaru, w płaszczyźnie $z=0$, możliwie jak najbliżej tachimetrów tj. $x=3.7$ m.

Ze względu na koszty związane z przygotowaniem stanowiska pomiarowego, zostały zakupione tachimetry optyczne DALTHA 010. Pomimo dużej dokładności pomiaru kątów wystąpiły pewne ograniczenia związane z ogniskową tachimetrów. Należało zapewnić odpowiednią odległość pomiędzy mierzonymi punktami a okularami wynoszącą 3.7 m.

Zakup nowoczesnych teodolitów elektronicznych zwiększyłby dokładność uzyskiwanych wyników, a także wzrósłby komfort pomiarów, gdyż automatycznie następowałoby pozyskiwanie wyników, bez konieczności stosowania długopisu i kartki.

Przedstawiona metoda została zastosowana do identyfikacji parametrów kinematyki manipulatora robota eksperymentalnego [5]. Wyniki tej identyfikacji wykorzystano w programie PLAN IRb-6, sterujący ruchem robota eksperymentalnego [6]. Program ten umożliwia programowanie w przestrzeni kartezjańskiej. Umożliwia osiągnięcie przez robot punktów zmierzonych optycznie za pomocą tachimetrów, bez konieczności wcześniejszego ustawienia go w tych punktach.

Dzięki identyfikacji parametrów kinematyki robota eksperymentalnego możliwe było wyznaczenie zbioru konfiguracji dobrze uwarunkowanych dla kalibracji kinematyki manipulatorów rodziny IRb-6 [7].

Zaproponowana metoda pomiaru może posłużyć do identyfikacji parametrów kinematyki dowolnych robotów pracujących u różnych wytwórców.

LITERATURA

1. Hollerbach J.M.: A Survey of Kinematic Calibration. The Robotics Review, ed. Khatib, O., Craig, J.J., Lozano-Perez T., MIT Press 1989.
2. Ishii M., Sakane S., Kakikura M.: Kinematic Calibration of Robot Manipulator for Integrated Robot Systems. Proc. 20-th Int. Symp. on „Industrial Robots”, 1993.
3. Wilk K.: Projekt stanowiska pomiarowego parametrów kinematyki manipulatora robota przemysłowego IRb-6. Praca dyplomowa, Zakład Robotyki i Automatyzacji Procesów Dyskretnych, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1998.
4. Praca zbiorowa: Robot inteligentny - interfejsy, planowanie zadań, badanie sterowań. Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, BK-201/RAu1/94-98, Gliwice 1994-98.
5. Szkodny T.: Modele kinematyki robota eksperymentalnego we współrzędnych enkoderów. Prace Instytutu Automatyki, Politechnika Śląska, BW-406/RAu1/98 t. 15. Gliwice 1998.
6. Strzępka M.: Algorytm planowania kinematyki trajektorii robota eksperymentalnego. Praca dyplomowa, Zakład Robotyki i Automatyzacji Procesów Dyskretnych, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
7. Szkodny T.: Well-conditioned sets of configurations for calibration of kinematic's parameters of IRb-6, IRp-6 and URP-6 manipulators. Systems Science, vol.24, no.4, 1998.

Recenzent: prof. dr hab.inż. L.Trybus

Abstract

In this work a position measurement method with help an optical instruments is presented. These instruments are tachimeters. A set of formulae was derived a which allow to compute the position coordinates of point from its angle coordinates. The angle coordinates were obtained from optical measurements. A square form Δ^2 was proposed as a measure of measurement error. This form is a sum of measurement errors of the position coordinates x , y , z . These errors were computed from total differential of the coordinates. The Δ^2 form values in neighbourhood of the tachimeters were computed. A region in which the Δ^2 form has minimum was determined. Next the tachimeters were located in such a way, that experimental robot workspace was in this region. A formula which allow to compute a distance between the tachimeters from measurement angle coordinates of initial and final point of pattern bar was derived. A position of the bar in which an average Δ^2 form value of the initial and final point is minimal was determined. On the base of a measurements of these points in this position the distance between these tachimeters was computed.