

KALIBRACJA UKŁADU WIELOROBOTOWEGO Z ZASTOSOWANIEM TEODOLITÓW ELEKTRONICZNYCH

Streszczenie: Praca przedstawia metodę kalibracji układu dwóch współpracujących robotów IRP 6 (jeden z robotów wyposażono w tor jezdny) z zastosowaniem teodolitów elektronicznych sprzężonych z komputerem. Współrzędne i orientacje robotów określane są w układzie globalnym, wspólnym dla obu robotów, na podstawie pomiarów z dwóch teodolitów. Parametry modeli kinematycznych dobiera się na podstawie wyników optymalizacji odpowiednio dobranych funkcjonalów.

Abstrakt: The method of kinematic calibration of robot system, based on electronic theodolite technique of measurement has been presented.

1. WSTĘP.

Model kinematyki robota, ustalony fabrycznie, obarczony jest zwykle błędami wykonania części mechanicznej robota, błędami wynikłymi z pominięcia efektów podatności i luzów w przegubach, oraz rozbieżnościami wynikłymi z uproszczenia struktury robota poprzez przyjęcie dodatkowych założeń (np. prostopadłość osi). Korekta tych błędów na etapie produkcji jest kosztowna, a wyznaczone na podstawie wymiarów składowych kierunki osi, położenia punktów wymiarowych oraz geometria przestrzenna robota obarczone są dużą niepewnością. Dla częściowej korekty powstałych rozbieżności przeprowadza się kalibrację robotów. Kalibracja robota stanowi, w rozumieniu większości autorów [1],[2] procedurę pomiarową i obliczeniową, która ma na celu ustalenie lub korekcję zależności pomiędzy współrzędnymi wewnętrznymi robota (kątanymi w przegubach) oraz współrzędnymi zewnętrznymi (położenia i orientacji chwytaka w układzie globalnym). Ustalenie tej zależności może dotyczyć tylko fragmentu przestrzeni roboczej, albo wszystkich położen robota.

Kalibrację pojedynczych robotów przeprowadza się najczęściej poprzez pomiar współrzędnych i orientacji, wybranych punktów i elementów robota (najczęściej chwytaka) w wielu położeniach w przestrzeni roboczej, a następnie dobór parametrów modelu kinematyki, które minimalizują odpowiednio dobrany funkcjonal błądu (jest to tzw. *kalibracja parametryczna*).

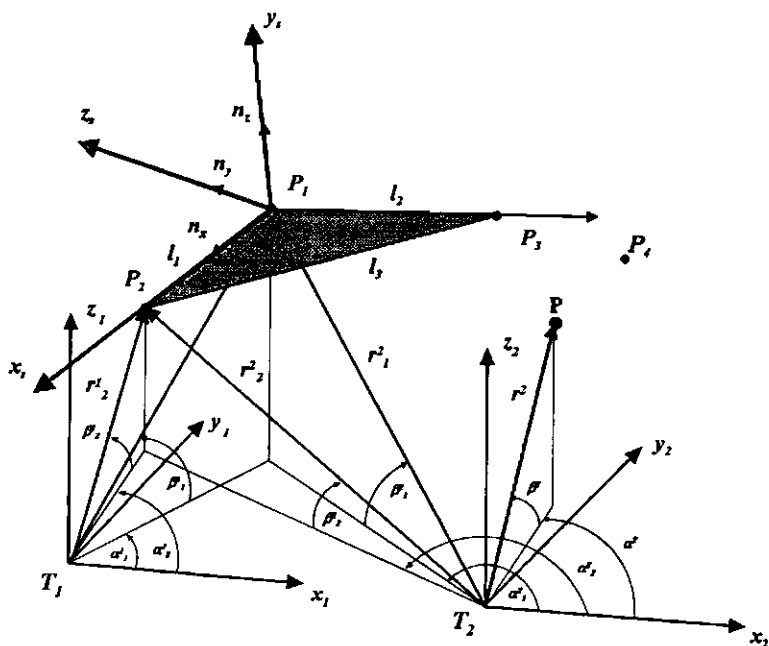
W kalibracji stosuje się kilka metod pomiaru współrzędnych punktów lub orientacji [2]. Najczęściej są to metody: kontaktowa (poprzez wykrycie styku punktów robota z punktami stanowiska pomiarowego o dokładnie znanych wymiarach), metoda pomiaru z zastosowaniem kamer CCD i wideo, metoda ultradźwiękowa, laserowa oraz metoda pomiaru z zastosowaniem teodolitów.

W prezentowanej pracy przedstawiono metodę kalibracji dwóch współpracujących robotów IRP 6 z zastosowaniem pomiarów przy pomocy teodolitów sprzężonych z komputerem.

Przedstawiona metoda i sposób pomiaru mogą posłużyć do kalibracji dowolnych robotów, a zestawione stanowisko pomiarowe wraz z oprogramowaniem może być wykorzystane do kalibracji robotów pracujących u różnych wytwórców.

2. UKŁAD POMIAROWY (zasada pomiaru).

Na rysunku 1 przedstawiono metodę pomiaru współrzędnych dowolnego punktu P robota w przestrzeni roboczej. Jeśli znane są współrzędne dowolnych trzech (niewspółliniowych) punktów robota, to można także wyznaczyć orientację elementu robota, z którym punkty są związane. Ze względu na fakt, że kalibracji podlegał system robotów, jako układ współrzędnych globalnych przyjęto układ rozpięty na punktach P_1, P_2, P_3 (tzw. punktach stałych) sztywno związanych z laboratorium pomiarowym. Teodolity umieszczono w punktach T_1 i T_2 laboratorium pomiarowego. Z każdym z nich związane układy współrzędnych teodolitów.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Pomiar współrzędnych punktu P przebiegał w następujących etapach:

1. Pomiar odległości pomiędzy punktami stałymi P_1, P_2, P_3 - l_1, l_2, l_3 .
2. Pomiar dwóch kątów (dla każdego z teodolitów i dla każdego z punktów stałych) pod jakimi widoczne są punkty stałe. Wyliczenia współrzędnych punktów T_1 i T_2 teodolitów w układzie globalnym.
3. Wielokrotny pomiar w różnych punktach przestrzeni roboczej wzorca pomiarowego o dobrze znanych wymiarach (z dokładnością do mikronów).
4. Korekcja wymiarów długościowych l_1, l_2, l_3 w oparciu o wyniki pomiarów wzorca i wyniki postępowania optymalizacyjnego oryginalnie zaproponowanego przez Autorów.

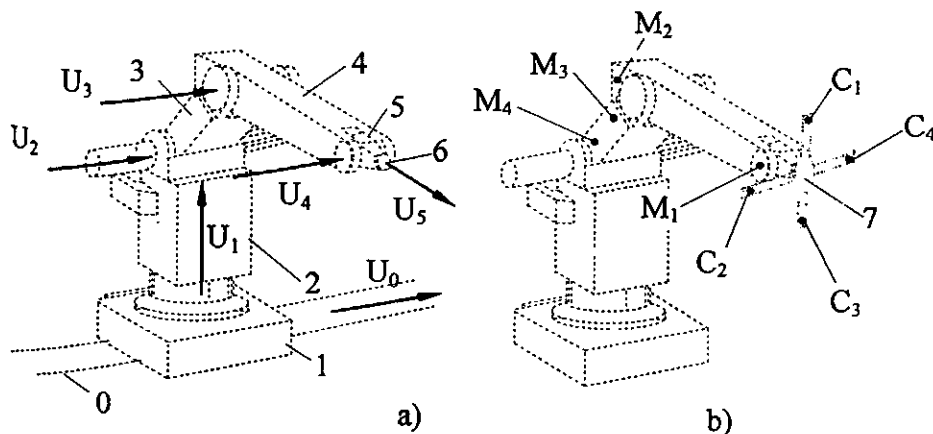
5. Pomiar dwóch kątów pod jakimi widoczny jest mierzony punkt P .
 6. Wyliczenia współrzędnych punktu P na podstawie wyników z punktu 5.
 Należy podkreślić, że etapy 1 do 4 wykonuje się tylko jeden raz przy inicjacji pomiarów, natomiast czynności 5 i 6 są właściwymi pomiarami współrzędnych punktów. Trzeba podkreślić że:

- pomiary doływają się półautomatycznie, tzn. po wycelowaniu lunety teodolitu są wczytywane do komputera i tam podlegają dalszej obróbce (po zakończonej sesji pomiarowej),
- punkty stałe P_1, P_2, P_3 wybierane są w pomieszczeniu laboratorium w oparciu o obliczenia optymalizujące niepewność pomiaru (ma być możliwie mała - opracowano specjalne procedury),
- teodolity umieszczane są w punktach laboratorium tak, że maksymalna niepewność pomiaru punktów P jest możliwie mała (opracowano specjalne procedury),
- ze względu na długi czas pomiaru ustawienia teodolitów w układzie globalnym są korygowane cyklicznie poprzez stosowanie procedur opisanych w punktach 1 do 4.

Przeprowadzone statystyczne analizy niepewności pomiarów dowodzą, że uzyskiwane niepewności pomiaru zależą silnie od dokładności pomiaru teodolitów. Ponieważ dokładności pozycjonowania robotów IRP 6 nie są wysokie, stanowisko pomiarowe wyposażono w teodolity niskiej dokładności firmy TOPCON (niskie koszty). Uzyskane z pomiarów niepewności pomiaru współrzędnych punktów nie przekraczały (niepewność średnia) 0.1 do 0.2 mm w zakresie ruchu robota 2 do 3m.

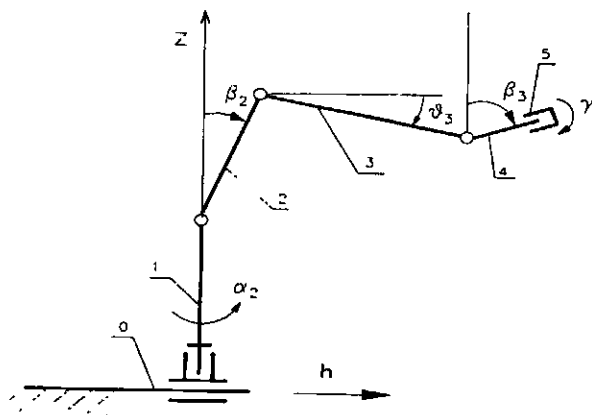
3. KALIBRACJA UKŁADU DWÓCH ROBOTÓW IRP 6.

Opracowane metody wykorzystano dla kalibracji układu dwóch współpracujących robotów IRP 6, z których jeden był zamocowany sztywno do podłoża (pięć stopni swobody), natomiast drugi umieszczono na torze jezdnym (sześć stopni swobody). Na rysunku (1a) pokazano numerację członów, oraz oznaczenia osi U_1, U_2, \dots, U_5 względnych obrotów w parach i osi U_0 ruchu postępowego manipulatora na torze jezdnym. Oznaczenia stosowane w przypadku obydwu manipulatorów są podobne, różnią się tylko wielkościami związanymi z ruchem po torze robota.



Rys.2. Układ kalibrowanych robotów.

Zgodnie z założeniami modelu kinematycznego przyjęto, że osie U_0 i U_1 oraz osie U_1 i U_2 przecinają się pod kątem prostym. Osie U_2, U_3, U_4 są równoległe (rys. 1a). Uwzględniając przyjęte założenia, schemat kinematyczny robota można przedstawić [3] jak na rysunku 3 (w poszczególnych przegubach zaznaczono miary kątów lub przesunięcia na torze robota).



Rys.3. Schemat kinematyczny kalibrowanych robotów.

Kalibracja układu robotów polegała na:

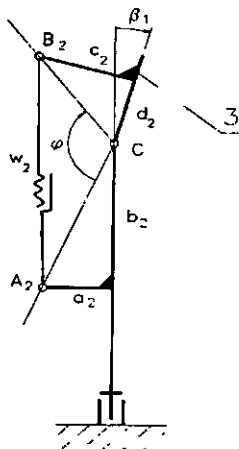
1. Wyznaczeniu parametrów modelu kinematyki (rys.3), przy których dokładności pozycjonowania robota są największe.
2. Wyznaczeniu położenia układów współrzędnych związanych z podstawami robotów w jednym globalnym układzie odniesienia.
3. Ustaleniu zależności pomiędzy jednostkami obrotu silników napędowych (tzw. inkrementami) a kątami w przegubach.

W ramach czynności wstępnych na ramionach manipulatora (rys. 1b) umieszczono markery M_1, M_2, M_3, M_4 , a na członie ostatnim specjalnie skonstruowaną głowicę (7) z punktami celowniczymi C_1, C_2, C_3, C_4 .

Kalibrację parametrów modelu kinematyki robota (punkty 1 i 2) przeprowadzono dokonując pomiarów położenia markerów M oraz punktów celowniczych C w różnych konfiguracjach i ustawieniach robota w przestrzeni roboczej. Zastosowano procedurę pozwalającą na prowadzenie kalibracji przy ruchach robota tylko w pojedynczych stopniach swobody. Parametry modelu (odległości pomiędzy osiami, ich prostopadłość i punkty przecięcia) weryfikowano poprzez pomiar współrzędnych punktów pomiarowych w ruchu w kolejnych stopniach swobody. Na podstawie wielu pomiarów dokonano wyliczeń (metodami optymalizacji) kierunków osi, ich punktów przecięcia oraz odległości pomiędzy osiami przy założeniu, że ich przebieg jest taki jak w przyjętym modelu kinematyki. Wyznaczenie kierunków przebiegu osi obrotu w przegubach, oraz kierunku przesuwu na torze jezdnym pozwoliło na jednoczesne oszacowanie położenia i orientacji układów współrzędnych związanych z robotami względem układu globalnego związanego z otoczeniem.

Jako przykład określenia zależności globalnego związanego z otoczeniem robotów (punkt 3) można wskazać metodę wyznaczania parametrów robota w drugim stopniu

swobody (oś obrotu U_2). Do obliczeń wykorzystać można zależności kinematyczne wynikające z napędu ramienia (3) manipulatora. Kąt obrotu członu (3) manipulatora IRp-6 względem członu (2) jest funkcją kąta obrotu jednego silnika. Układ sterowania zapewnia, że położenie katowe silnika napędzającego ten ruch jest proporcjonalne do zmiennej sterującej u_2 , której wartość jest równa odpowiedniemu rejestrowi w inkrementach. Niech współrzędną kątową członu drugiego będzie β_1 . W wyniku pomiarów markerów M_1 do M_4 w różnych punktach przestrzeni roboczej, po obliczeniach, otrzymuje się ciąg n wartości kąta $\hat{\beta}_{1,i}$ współrzędnej β_1 i odpowiadających im wartości u_{2i} . Zadanie polega na aproksymacji związku $\beta_1 = \rho(u_1)$. Można przypuszczać, że najlepszym estymatorem będzie funkcja realizowana przez rzeczywisty napęd osi manipulatora. Na rysunku 4 pokazano schemat napędu śrubowego mechanizmu realizującego wartość współrzędnej ϑ_2 (rys. 3).



Rys.3. Schemat napędu w drugiej osi robota.

Podczas działania napędu, odległość w_2 między punktami A_2 i B_2 zmienia się, co powoduje zmianę współrzędnej β_1 manipulatora. Z trójkąta A_2B_2C można napisać:

$$w_2^2 = a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 + d_2^2 - 2\sqrt{a_2^2 + b_2^2}\sqrt{c_2^2 + d_2^2} \cos \varphi$$

gdzie

$$\varphi = \pi + \beta_1 - \arctg(a_2/b_2) - \arctg(c_2/d_2)$$

Zakładając, że skok śruby napędu jest stały, można przyjąć liniową zmianę odległości między punktami umocowania napędu $A_2 B_2$ w zależności od kąta obrotu silnika u_2 :

$$w_2 = k_2 u_2 + w_{20}$$

Definiując wektor parametrów napędu osi FI:

$$p = [a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2 \ k_2 \ w_{20}]$$

można poszukiwać najlepszych parametrów przekładni, minimalizujących funkcjonal Z:

$$Z = \min_p \left(\sum_{i=1}^n (\hat{\beta}_{2,i} - \beta_{2,i})^2 \right)$$

Tak postawione zadanie ma sześć stopni swobody. Można tę liczbę zmniejszyć, przyjmując niektóre parametry jako znane. Na przykład, można przyjąć współczynnik k_2 (zależy od przełożenia przekładni śrubowej) przyjmując wartość podawaną przez producenta. Otrzymany w wyniku optymalizacji mechanizm jest mechanizmem zastępczym - jego parametry nie muszą odpowiadać rzeczywistości. Istotny jest fakt, że funkcja $\rho(u_i)$ realizowana przez mechanizm zastępczy, dobrze aproksymuje zmierzone wartości kąta β_1 . Przy kalibracji obu robotów przyjęto współczynnik k_2 według danych fabrycznych. Optymalizację w tym przypadku przeprowadzono za pomocą procedury typu simplex [4]. Przybliżenie wstępne dobrano na podstawie przybliżonych pomiarów dokonanych na robotach.

4. WYNIKI I WNIOSKI.

Opracowane procedury prowadzenia kalibracji oraz szacowań niepewności pomiaru zostały oprogramowane z wykorzystaniem środowiska MATLAB [4]. Oprogramowanie wraz z układem teodolitów stanowią stanowisko pomiarowe, które może być wykorzystane do kalibracji innych pojedynczych lub współpracujących robotów.

Na podstawie analizy wyników pomiarów sformułowano bogaty komentarz. Można podać przykłady wniosków diagnostycznych wypływających z procedur kalibracyjnych.

1. W procedurach optymalizacyjnych założono błędy, określające kryterium stopu, na poziomie 10^{-10} . Otrzymane w obliczeniach rozwiązania, dawały błędy aproksymacji rzędu 10^{-5} metra (setnych części mm). Taką dokładność aproksymacji uznano za bardzo dobrą.
2. Dokładność modelu robota w ruchu po torze ma kluczowe znaczenie dla szacowania dokładności położenia punktów chwytu robota. Dla oceny tej dokładności wykonano w kilku położeniach robota na torze pomiary kierunków osi U_1 (w różnych dniach oraz w różnych warunkach pracy robota) oraz punktów przez które ta oś przechodzi. Następnie obliczono współrzędne tych punktów przy założeniu, że znana jest pozycja początkowa robota oraz współczynniki prostej regresji. Maksymalny błąd współrzędnych punktów osi FI otrzymanych z pomiarów oraz z obliczeń mierzony odległością euklidesową wynosił 2 mm. Wynika stąd, że tor robota nie jest linią prostą oraz współczynniki regresji prostej toru obarczone są znacznym błędem.
3. W trakcie obliczeń optymalizacyjnych założono, że osie U_1 i U_2 muszą się przecinać. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzone dla przypadku gdy warunek przecinania osi nie obowiązuje wykazują, że obie osie nie przecinają się a odległość między nimi wynosi kilka dziesiątych mm.
4. Kąt pod jakim przecinają się osie U_1 wyznaczone w dwóch skrajnych położeniach robota na torze wynosi ok. 0.1 deg. Znaczy to, że na ramieniu robota o długości ok. 700 mm może pojawić się różnica położenia ok. 0.5 do 1 mm dla punktów chwytu robota.
5. Jeśli aproksymować tor robota prostą na kierunek której nie nakłada się ograniczenia że ma być prostopadła do osi FI to odchylenie kierunku toru od kierunku prostopadłego do osi FI wynosi kilka dziesiątych deg. Znaczy to, że niedokładność modelu może dać błąd końcówki robota rzędu 1 mm.
6. W ramach oceny powtarzalności robota w pracy bez obciążenia dokonano kilkadziesiąt pomiarów tej samej pozycji robota w kilku punktach przestrzeni roboczej. Zgodnie z

oczekiwaniemi pomiary wykazały powtarzalność robota mierzoną wartością średnią rzędu setnych części mm.

Autorzy pragną podkreślić, że przedstawione prace zostały wykonane w ramach programu PATIA na Politechnice Warszawskiej [4].

PIŚMIENICTWO

- [1] J.M.Hollerbach: *A Survey of Kinematic Calibration*. The Robotics Review, MIT 1989, ed. O.Khatib, J.J.Craig, T.Lozano-Perez.
- [2] Ishii M., Sakane S., Kakikura M.: *Kinematic Calibration of Robot Manipulator for Integrated Robot Systems*, 20 th International Symposium on Industrial Robots (1993).
- [3] Buśko Z., Frączek J.: *Opracowanie algorytmu kinematyki robota IRP 6*. PATIA 1994. Politechnika Warszawska.
- [4] *MATLAB High-Performance Numeric Computation and Visualization Software*. The Mathworks Inc. 1992. Users and Reference Guide. Optimization Toolbox.