

mgr inż. Wojciech Klimasara, PIAP, Warszawa (wklimasara@sg.piap.waw.pl)

mgr inż. Zbigniew Pilat, PIAP, Warszawa (zpilat@sg.piap.waw.pl)

mgr inż. Tomasz Stasiak, PIAP, Warszawa (tstasiak@sg.piap.waw.pl)

Możliwości wykorzystania systemu pomiarowego ROBOTEST do oceny i weryfikacji parametrów kinematycznych robotów^{*1}

W artykule przedstawiono wpływ dokładności parametrów kinematycznych robota na jakość odtwarzanej trajektorii. Omówiono rozwój metod badania jakości odtwarzania trajektorii, realizowanych w laboratorium PIAP-LAB. Obecnie laboratorium to dysponuje nowoczesnym systemem do pomiarów parametrów ruchu robotów przemysłowych. ROBOTEST firmy POLYTEC jest systemem bazującym na interferometrii laserowej. Umożliwia on śledzenie trajektorii prostoliniowej głowicy pomiarowej zamontowanej na ramieniu robota jak również wykonywanie badań wg normy PN-EN 29283. Oprogramowanie współpracujące z systemem ROBOTEST umożliwia realizację badań zgodnie z wymaganiami stosowanej normy europejskiej. Stwarza też nowe możliwości oceny zgodności parametrów kinematycznych robota.

Possibilities of use of measurement system ROBOTEST for validation and verification of robots kinematics parameters

The paper presents an influence of robots kinematics parameters accuracy for quality of trajectory. Development of methods for trajectory testing, used in the PIAP-LAB laboratory is described. Actually the laboratory obtain a new touch-less system for measurement movements of the robot, including tests according to PN-EN 29283 standard. ROBOTEST from POLYTEC use a laser interferometer for measurement of distance and velocity. It enable tracing of straight-line trajectory of test head, mounted on the robot arm. Software supported the ROBOTEST realised function according to the requirement of European standards. The system give new possibilities for validation of robots kinematics parameters.

1. WPROWADZENIE

Jedną z podstawowych funkcji współczesnych robotów przemysłowych jest realizacja ruchu narzędzia po trajektoriach interpolowanych w przestrzeni kartezjańskiej: prostoliniowych i kołowych. Przy obliczaniu parametrów takiej trajektorii wykorzystywany jest model kinematyki manipulatora. Źródłem błędów, tzn. różnic rzeczywistej, odtwarzanej trajektorii w stosunku do trajektorii planowanej (idealnej) mogą być zarówno błędy modelu, nie uwzględnienie w modelu cech konstrukcji (podatności, luzy), jak też błędne wartości parametrów używanych

^{*} Referat prezentuje wyniki prac realizowanych w ramach projektu badawczego KBN, nr 7 T07B 038 017 pt. "Opracowanie metod kalibracji i diagnostyki robotów"

w obliczeniach modelu kinematyki (niespełnione wymagania o równoległości i prostopadłości osi, błędne długości członów).

Sam model, jego poprawność, prawidłowe działanie w całym obszarze, zakresie zmiennych wewnętrznych manipulatora, można sprawdzić poprzez symulacje komputerowe. Rzeczywista jakość trajektorii, uwzględniająca także błędy parametrów modelu oraz zjawiska, których model nie obejmuje, może być oceniona tylko w praktyce, na podstawie prób laboratoryjnych lub podczas pracy robota w stanowisku technologicznym. Do realizacji tego typu sprawdzenia niezbędne jest odpowiednie wyposażenie pomiarowe oraz metody oceny jakości ruchu i odpowiednie dla tych metod algorytmy.

2. WYMAGANIA NORMALIZACYJNE BADAŃ JAKOŚCI POZYCJONOWANIA I ODTWARZANIA TRAJEKTORII ROBOTÓW

W sytuacji gdy coraz więcej firm wdraża systemy zapewnienia jakości oparte o normy serii ISO 9000, rośnie także zainteresowanie normami określającymi zasady obiektywnego i niezależnego ustalenia cech jakościowych wyrobu. Umożliwia to firmom stosowanie jasnych kryteriów oceny dostaw. Normalizacją objęto również roboty przemysłowe, a w tym takie zagadnienia jak: terminologia, bezpieczeństwo, interfejsy mechaniczne, układy współrzędnych i charakterystyki funkcjonalne. Zgodnie z zapisem normy PN-EN 29946 [1] producent robota powinien podać w dokumentacji towarzyszącej informacje dotyczące różnych charakterystyk, w tym:

- ♦ dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego,
- ♦ dokładność i powtarzalność odwzorowania toru ruchu prostoliniowego.

Sposób badania tych charakterystyk, a więc wykonywania i zbierania wyników pomiarów, określa norma PN-EN 29283 [2].

Dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego jest wyznaczana w punktach PI-P5 leżących na przekątnych prostokąta wyznaczającego płaszczyznę rozpiętą na przekątnych sześcianu pomiarowego. Sześcian pomiarowy wpisany jest w przestrzeń roboczą manipulatora badanego robota. Sześcian powinien być umieszczony w tej części przestrzeni roboczej, która według przewidywań będzie najbardziej wykorzystywana. Wyznaczenie powtarzalności pozycjonowania wymaga wykonania serii 30 przestrzennych pomiarów położenia końcówki ramienia robota.

Wyznaczenie dokładności i powtarzalności odtwarzania prostoliniowej trajektorii ruchu wymaga wykonania pomiarów przestrzennych położenia końcówki ramienia robota podczas jej ruchu w kierunku osi z. Zazwyczaj zakłada się, że ruch odbywa się wzdłuż osi z układu współrzędnych (x,y,z) związanego z interfejsem mechanicznym manipulatora badanego robota. Przyjmuje się wykonanie 10 ruchów w kierunku +z oraz 10 ruchów w kierunku przeciwnym.

Każdorazowo norma podaje odpowiednie wzory do obliczenia wartości poszczególnych parametrów. Metoda przeprowadzenia pomiarów i zebrania wymaganych wyników należy już do zespołu badawczego. Uzyskanie wiarygodnych rezultatów jest uzależnione od wybranych metod i od odpowiedniego wyposażenia badawczego.

3. ROZWÓJ METOD BADANIA JAKOŚCI POZYCJONOWANIA I ODTWARZANIA TRAJEKTORII ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Metody badań pozycjonowania i śledzenia trajektorii robotów zmieniały się wraz ze zmianami dostępnych urządzeń pomiarowych. W przypadku pierwszych robotów badano tylko jakość

pozycjonowania. Stosowano czujniki mechaniczne, najczęściej zegarowe, z możliwością odczytu zmiany położenia czujnika o 0,01 mm lub nawet dokładniejsze. Zbieranie wyników pomiarów odbywało się ręcznie, przez wypełnianie specjalnych tabel i protokołów badań. Z czasem do przetwarzania wyników zaczęto wykorzystywać komputery. Rozwijano konstrukcje czujników. Budowano też specjalne stanowiska pomiarowe, gdzie odpowiednio montowano dwa lub trzy czujniki mechaniczne, a robot badany najechał na nie elementem pomiarowym (najczęściej w kształcie kuli). Pojawiły się także propozycje zastosowania nowych technik i elementów sensorycznych. Metody badań z wykorzystaniem czujników ultradźwiękowych okazały się za mało dokładne. Podobne wyniki uzyskano przy próbach zastosowania kamer wizyjnych. Największe możliwości z punktu widzenia omawianych badań stwarzają urządzenia wykorzystujące interferometrię laserową. Mają one tę zasadniczą przewagę nad czujnikami mechanicznymi, że działają bezdotykowo. Wyznaczanie charakterystyk funkcjonalnych robota przemysłowego przy użyciu dotykowych narzędzi pomiarowych jest trudne, a często ryzykowne. Istnieje bowiem niebezpieczeństwo uderzenia ramienia robota w czujnik pomiarowy co grozi jego uszkodzeniem. Systemy interferometryczne nie upowszechniły się jednak w laboratoriach badań robotów. Powodem jest ich cena. Stanowiska z takimi czujnikami są wielokrotnie droższe od stanowiska z czujnikami mechanicznymi.

4. SYSTEM ROBOTEST

Stosowany w laboratorium PIAP-LAB system pomiarowy ROBOTEST umożliwia wykonywanie bezdotykowych pomiarów położenia końcówki ramienia robota. Dołączone do systemu oprogramowanie pozwala na automatyczne obliczanie, na podstawie zebranych wyników pomiarów, parametrów funkcjonalnych zgodnie z normą europejską [2].

System pomiarowy ROBOTEST produkcji firmy POLYTEC GmbH jest laserowym interferometrycznym systemem pomiarowym, przeznaczonym do pomiarów względnych. Schemat systemu przedstawiono na Rys. 1.

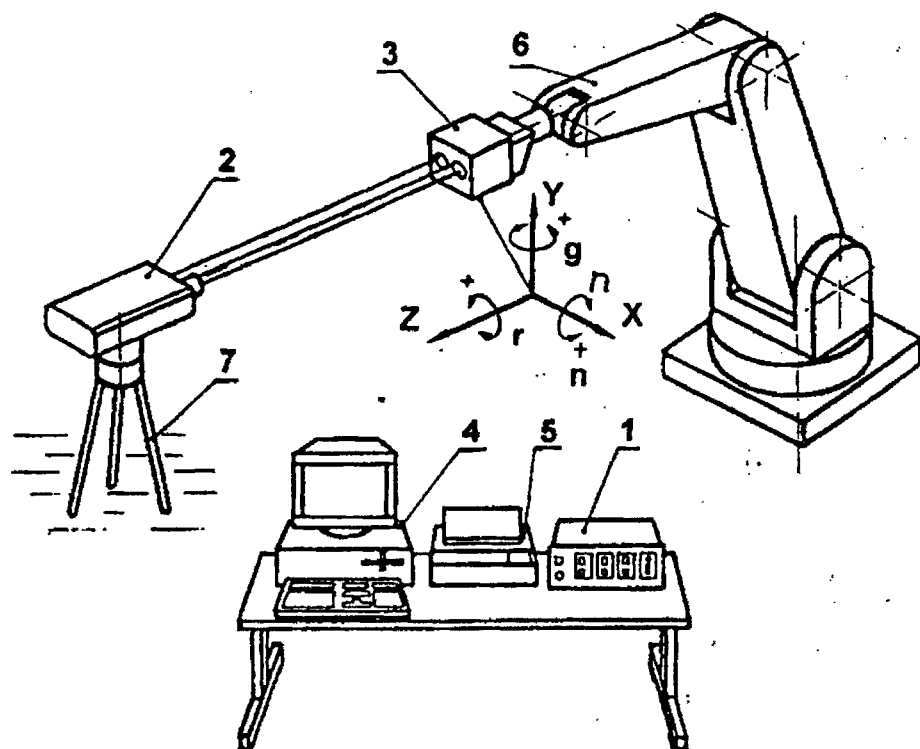
Przestrzenią pomiarową jest wyobrażalny walec o średnicy 20mm i maksymalnej długości 10.000mm.

W systemie zastosowano laser He-Ne o długości fali $\lambda = 633\text{nm}$. Moc wyjściowa lasera jest mniejsza niż 1 mW, a więc system zalicza się do urządzeń klasy 2 wg klasyfikacji podanej w normie PN-91 /T-06700. Oznacza to, że podczas użytkowania urządzenia nie ma wymogu stosowania środków ochronnych.

Pomiar współrzędnej "z" (Rys. 1) jest pomiarem interferometrycznym – zastosowano interferometr Macha – Zehndera [4]. Do pomiarów współrzędnych x, y oraz do pomiarów kątowych zastosowano analogowe detektory położenia PSD (ang. Position Sensitive Detector), które umożliwiają uzyskanie rozdzielczości lepszej niż 10 μm . Maksymalna prędkość mierzona wzdłuż osi "z" wynosi 10 m/s. Dokładność pomiaru współrzędnej "z" zależy od prędkości. Producent podaje, że przy prędkości 10 m/s uzyskuje się rozdzielczość pomiaru $\pm 3 \mu\text{m}$, zaś przy prędkości 1 m/s rozdzielczość pomiaru wynosi 0,3 μm . System umożliwia również pomiar odchyłen kątowych $\pm 3^\circ$ względem trzech współrzędnych x, y, z przy rozdzielczości lepszej niż $\pm 0,003^\circ$.

Pracą systemu steruje komputer osobisty typu PC, z zainstalowanym procesorem danych i sprzężony z zewnętrznym procesorem sygnałowym. Oprogramowanie zarządzające umożliwia m.in. zadeklarowanie sposobu wyzwania pomiaru. Dostępne są dwie opcje: z klawiatury komputera lub przy wykorzystaniu zewnętrznego sygnału taktującego „trigger”. Korzystając z

drugiego wariantu można zainstalować jako źródło sygnału „trigger” sterownik PLC. Dzięki temu można przeprowadzać długotrwałe badania bez nadzoru – program sterownika dba o wyzwolenie pomiaru w odpowiednich momentach czasowych. Oprogramowanie zarządzające pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego Windows 95. Zebrane dane pomiarowe można w prosty sposób przekształcić do postaci akceptowanej przez popularne programy biurowe, np. MS Excel, a następnie przetworzyć stosownie do ich dalszego przeznaczenia.



Rys. 1. System pomiarowy ROBOTEST - schemat budowy.

1-procesor sygnałowy OMS 600, 2- interferometr OMS 610, 3-głowica sensorowa OMS 620, 4- procesor danych OMS 650 (PC) 5-drukarka, 6-badany robot przemysłowy, 7-statyw

5. KONCEPCJA WYKORZYSTANIA SYSTEMU ROBOTEST DO OCENY I WERYFIKACJI PARAMETRÓW KINEMATYCZNYCH ROBOTÓW

Ocena i weryfikacja parametrów kinematycznych robota mieści się w szerszym zagadnieniu kalibracji. Dziedzina ta nabiera ostatnio szerszego znaczenia. Dawniej odnoszono proces kalibracji tylko do samego robota. Współcześnie mówi się o procesie kalibracyjnym, składającym się z wielu kroków, a kalibracja robota jest tylko jednym z nich. Jak wskazują badania i doświadczenia użytkowników, błędy narzędzia, części obrabianej, urządzeń współpracujących są poważną przyczyną problemów w czasie eksploatacji produkcyjnej instalacji zrobotyzowanych. Dlatego kalibracja powinna obejmować nie tylko samego robota lecz także jego otoczenie.

Na podstawie literatury dotyczącej kalibracji można przyjąć następujący jej podział:

I. kalibracja robota - proces mający na celu poprawienie dokładności robota przez modyfikację oprogramowania odpowiedzialnego za jego pozycjonowanie - obejmuje dokładną identyfikację zależności pomiędzy odczytami kodowników pozycji wewnętrznej a aktualną pozycją narzędzia robota w układzie kartezjańskim. Można wyróżnić trzy typy kalibracji robota:

1. **numeryczna** - ma na celu identyfikację odchyłeń od nominalnego zachowania bez wyznaczania źródeł błędów. Odchylenia te są tablicowane i przechowywane w systemie sterowania robota. Błąd dla żądanej pozycji może zostać przewidziany przez interpolację wartości zawartych w tablicy odchyłeń.
2. **statyczna** - identyfikacja źródeł błędów, powodujących niedokładności statycznego pozycjonowania. Najbardziej znane źródła błędów statycznych robota to: nierównoległość i nieprostokątność między osiami, podatność, luzy, sprzężenia mechaniczne, błędne długości członów. Można rozróżnić trzy rodzaje kalibracji statycznej:
 - kalibracja na poziomie przegubu - ma na celu określenie ścisłej relacji między sygnałem kodera pozycji wewnętrznej a aktualnym przemieszczeniem przegubu.
 - kalibracja geometryczna - ma na celu poprawienie modelu matematycznego robota, w celu skompensowania wpływu błędów geometrycznych (kąty i odległości między kolejnymi osiami).
 - kalibracja nie-geometryczna - ma na celu skompensowanie wpływu takich czynników jak luzy w przekładniach, podatność członów, wpływ temperatury, tarcie, histereza.
3. **dynamiczna** - identyfikacja źródeł błędów, powodujących efekty dynamiczne w czasie ruchu robota, związane z własnościami bezwładnościowymi członów i serwomotorów, zamocowaniem robota, obciążeniem, dodatkowym wyposażeniem, itp.

II. kalibracja narzędzia - w celu ścisłej lokalizacji tych części narzędzia (w odniesieniu do układu narzędzia), które oddziałują z obrabianymi przedmiotami.

III. kalibracja otoczenia - ma na celu określenie względnej lokalizacji robota i wszystkich obiektów wewnątrz przestrzeni roboczej.

IV. kalibracja przedmiotu obrabianego:

1. **kalibracja geometrii przedmiotu** - odpowiada na pytanie, czy geometria przedmiotu odpowiada tej użytej w modelu off-line lub CAD.
2. **kalibracja zadanych pozycji** - określenie zadanych pozycji na przedmiocie obrabianym.

V. kalibracja procesu - badanie zachowania całego wyposażenia danego procesu technologicznego. Ma na celu sprawdzenie czy proces symulacji odzwierciedla dokładnie rzeczywistość.

Jak z tego widać ocena i weryfikacja parametrów kinematycznych należy do kalibracji statycznej robota. Jest wiele sposobów przeprowadzania tej kalibracji, specyficznych dla stosowanych metod i algorytmów oraz wynikających z posiadanego wyposażenia pomiarowego. Punktem wyjścia jest zawsze model kinematyczny robota, który można zapisać jako:

$$T_{POS} = T_0^6 * T_{TOOL}, \text{ gdzie:}$$

T_{POS} - macierz opisująca pozycję narzędzia robota w zewnętrznym układzie współrzędnych,

$T_0^n = A_0^1 * A_1^2 * \dots * A_{n-1}^n$ - macierz opisująca model kinematyki manipulatora,

T_TOOL - macierz opisująca model kinematyki narzędzia.

Pozycja narzędzia obliczona według modelu zależy od zmiennych wewnętrznych oraz parametrów stałych modelu. Przy wykorzystaniu w opisie metodyki Denavita-Hartenberga, każda para kinematyczna jest zdefiniowana przez cztery parametry, z których trzy są stałymi, a czwarty zmienną (kąt dla pary obrotowej lub przesunięcie dla pary translacyjnej). Ogólna idea kalibracji statycznej polega na ustaleniu zależności między zmianami parametrów modelu robota a rzeczywistymi zmianami pozycji zewnętrznej jego narzędzia (położenia i orientacji).

Istotą koncepcji wykorzystania systemu ROBOTEST do kalibracji statycznej robota jest pomiar i rejestracja zmian pozycji zewnętrznej głowicy pomiarowej, traktowanej jako narzędzie robota, a następnie użycie uzyskanych informacji jako danych wejściowych w pakiecie symulacji z zaimplementowanymi funkcjami kalibracyjnymi.

6. PODSUMOWANIE

Aby przedstawiona ogólna koncepcja wykorzystania systemu ROBOTEST do oceny i weryfikacji parametrów kinematycznych robotów mogła być zrealizowana niezbędne są przygotowania i badania wstępne. Przede wszystkim konieczna jest weryfikacja samego systemu ROBOTEST. O ile można z pełnym zaufaniem podchodzić do odczytów interferometru, to dokładność wskazań elementów PSD nie jest do końca pewna. Należy zbadać stałość w czasie charakterystyk całego urządzenia. Trzeba też porównać wyniki uzyskane przy jego pomocy z układem odniesienia, np. stołem mikrometrycznym. Kolejnym problemem jest wybór i implementacja algorytmów do przetwarzania wyników pomiarów celem uzyskania zweryfikowanych parametrów kinematyki robota. Trzeba też opracować interfejsy software'owe pomiędzy systemem ROBOTEST a systemem symulacji, w którym będą sprawdzane algorytmy kalibracji. Prace te są przewidziane w dalszych etapach realizacji tematu badawczego wykonywanego wspólnie z zespołem z Wydziału MEiL Politechniki Warszawskiej.

LITERATURA

- [1] *PN-EN 29946:1994: Roboty przemysłowe. Przedstawianie charakterystyk.*
- [2] *PN-EN 29283:1992: Roboty przemysłowe. Metody badania charakterystyk funkcjonalnych.*
- [3] *ROBOTEST OPERATOR'S MANUAL for Polytec Robotest System*, Polytec, Niemcy, 1994.
- [4] Bauer H.: *Lasertechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Vogel Verlag, Würzburg, Niemcy 1991.
- [5] Klimasara W.: *Bezdotykowa metoda pomiaru parametrów funkcjonalnych robotów przemysłowych z wykorzystaniem laserowego systemu pomiarowego „ROBOTEST” V* Krajowa Konferencja Robotyki, Wrocław, 1996.
- [6] Klimasara W.: *Znormalizowane parametry i metody oceny własności funkcjonalnych robotów przemysłowych*. VI Krajowa Konferencja Robotyki, Świeradów-Zdrój, 1998
- [7] Geuens F. i in.: „Standardisation of robotic cell calibration: the key to successful integration of OLP”, 28th ISIR, Detroit, USA 1997.
- [8] Legnani G., Trevelyan J.: „Static calibration of industrial manipulators: a comparison between two methodologies”, 27th ISIR, Mediolan, Włochy 1996.
- [9] Ishii M.: „Kinematic calibration of a robot manipulator for integrated robot systems”, 20th ISIR, Tokio, Japonia, 1989.
- [10] Caenen J. L., Angue J. C.: „Robot calibration”, 20th ISIR, Tokio, Japonia, 1989.