

mgr inż. Wojciech J. KLIMASARA - PIAP, Warszawa (wklimasara@sg.piap.waw.pl)

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

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

Koncepcja kalibracji przemysłowych układów manipulacyjnych przy wykorzystaniu interferometrycznego systemu pomiarowego⁷.

W artykule przedstawiono ogólną koncepcję kalibracji z wykorzystaniem wielofunkcyjnego interferometrycznego laserowego systemu pomiarowego ROBOTEST. Omówiono cechy systemu, istotne z punktu widzenia możliwości jego wykorzystania do kalibracji układów manipulacyjnych. W celu weryfikacji danych metrologicznych systemu, podanych przez producenta, przeprowadzono serię badań. Pozwoliło to określić, które z funkcji pomiarowych systemu ROBOTEST można wykorzystywać do kalibracji. Przedstawiona koncepcja została zaadaptowana do potrzeb kalibracji robota przemysłowego URP-6, który będzie wykorzystany w pierwszych eksperymentach praktycznych.

The concept how to use the interferometrical measurement system for calibration of industrial manipulation systems

The general concept of calibration using the multifunctional interferometric laser measurement system called ROBOTEST, has been presented in this paper. The system characteristics that are very crucial when applying to calibration of manipulation systems have been described. The series of tests have been conducted in order to verify the system data given by the manufacturer; it has helped to find out which options of ROBOTEST to use for calibration purpose. The presented concept has been implemented for calibrating industrial robot URP-6 that will be used in first practical experiments.

1. WPROWADZENIE

Podstawowa zaletą systemów interferometrycznych z punktu widzenia badań pozycjonowania i odtwarzania trajektorii robotów jest to, że realizują one bezdotykowe metody pomiarowe. Są to więc pomiary bardzo rzetelne, których wyniki nie są obciążane błędami wynikającymi z

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

oddziaływania wzajemnego obiektu mierzonego i przyrządu pomiarowego. System pomiarowy nie jest też narażony na uszkodzenia i zniszczenie wskutek błędu działania obiektu mierzonego.

Stosując system pomiarowy do zadań kalibracyjnych należy dokładnie znać jego właściwości i rzeczywiste parametry metrologiczne, które często odbiegają od danych podawanych przez producenta. Dlatego taki system powinien być sprawdzony, przez porównanie jego wskazań ze wskazaniem przyrządu wzorcowego. Pozwoli to wybrać funkcje pomiarowe nadające się faktycznie do przeprowadzenia kalibracji. Umożliwi również określenie korekt uzyskiwanych wyników, aby otrzymać wiarygodne wartości pomiarów.

Mając tak zdefiniowany system pomiarowy można zaadaptować ogólną koncepcję kalibracji do konkretnego systemu manipulacyjnego. Do tego celu niezbędna jest znajomość modelu kinematyki, wykorzystywanego w układzie sterowania manipulatora. Pozwoli to określić źródła błędów, tzn. różnic rzeczywistej, odtwarzanej pozycji/trajektorii w stosunku do pozycji/trajektorii planowanej (idealnej). Na tej podstawie zostanie przyjęta lista parametrów podlegających weryfikacji w procesie kalibracji. Analiza modelu kinematyki posłuży również do zaplanowania eksperymentów kalibracyjnych, w tym do wytypowania konfiguracji i przemieszczeń manipulatora, w których wpływ na rejestrowane błędy ma tylko określona grupa parametrów.

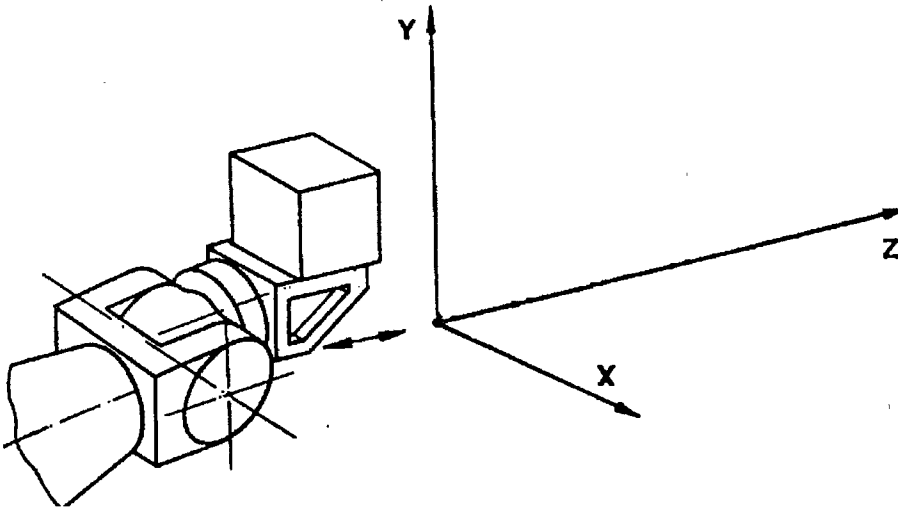
Zaprezentowana w artykule metodologia i plan badań będą wykorzystane w praktycznych eksperymentach, w ramach dalszej realizacji projektu badawczego.

2. CECHY SZCZEGÓLNE ZESTAWU ROBOTEST I MOŻLIWOŚCI JEGO WYKORZYSTANIA DO KALIBRACJI

System ROBOTEST mierzy współrzędne położenia głowicy sensorowej, zamocowanej do ramienia robota, względem głowicy interferometrycznej, którą umieszcza się na nieruchomym statywie. Wyniki pomiarów są opisane w układzie współrzędnych kartezjańskich związanym z głowicą sensorową (Rys. 1). System umożliwia realizację następujących pomiarów:

- 1) przesunięcia głowicy w kierunku x
- 2) przesunięcia głowicy w kierunku y
- 3) przesunięcia głowicy w kierunku z
- 4) kąta obrotu głowicy wokół osi x
- 5) kąta obrotu głowicy wokół osi y
- 6) kąta obrotu głowicy wokół osi z

Przestrzenią pomiarową jest wyobraźalny walec, o średnicy 20mm i maksymalnej długości 10.000mm, którego osią obrotu jest oś "Z" układu głowicy sensorowej. Pomiar współrzędnej "Z" jest pomiarem interferometrycznym. 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 μ m. Dokładność pomiaru współrzędnej "Z" zależy od prędkości przesuwu głowicy. Producent podaje, że przy prędkości 10m/s uzyskuje się rozdzielczość pomiaru $\pm 3\mu$ m, zaś przy prędkości 1m/s rozdzielczość pomiaru wynosi 0,3 μ m. System umożliwia pomiar odchyłń kątowych w zakresie $\pm 3^\circ$, przy rozdzielczości lepszej niż $\pm 0,03^\circ$.



Rys. 1. Układ współrzędnych głowicy sensorowej systemu ROBOTEST.

W celu zweryfikowania parametrów metrologicznych podawanych przez producenta systemu, przeprowadzono badanie jego właściwości metrologicznych. Do badań, jako wzorzec przesunięcia i obrotu wykorzystano stolik mikrometryczny mikroskopu warsztatowego produkcji firmy ZEISS z podziałką: $1\mu\text{m}$ – przesunięcia liniowe, oraz $3''$ (0.05°) przesunięcia kątowe. Do wyzwania pomiaru użyty został generator programowalny, który umożliwia otrzymanie dowolnej kombinacji impulsów wyjściowych. Głowica interferometryczna została zamocowana na statywie w odległości 3m od głowicy pomiarowej, która była ustawiona i zamocowana na stoliku mikrometrycznym. Stolik z kolei postawiono na stole o masywnej konstrukcji metalowej.

W ramach wzorcowania przeprowadzono następujące badania:

- Badanie stabilności wskazań – w ramach sesji pomiarowych trwających do 360 min., co 20min realizowany był cykl serii 10 pomiarów z częstotliwością 1Hz, przy częstotliwości próbkowania 200Hz,
- Badanie dokładności przy przesunięciach i obrotach głowicy - pomiary wykonywane były od wartości minimalnej do wartości maksymalnej, z podziałką 0.1mm i 0.1° ($6''$),
- Badanie zakresu pomiarowego kątów obrotu wokół osi „X” i „Y”,
- Badanie wpływu zmian współrzędnych punktu mierzonego (w obszarze pomiarowym głowicy sensorowej) na dokładność pomiaru kątów i współrzędnych „X” i „Y”,
- Badanie wpływu zmian współrzędnych punktu mierzonego na dokładność pomiaru interferometrycznego.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dane podawane przez producenta odbiegają od tych jakie uzyskano podczas pomiarów. Badania wykazały, że układ można uznać za stabilny po upływie około 2.5 godz. od chwili włączenia układu, a nie jak na to wskazuje kontrolka sygnalizacyjna po około 40 min. Czas stabilizacji około 40 min podawany przez producenta może więc dotyczyć tylko interferometru laserowego, nie zaś całego układu pomiarowego ROBOTEST. W przypadku pomiaru przesunięć błąd pomiaru wynosi $\pm 0.06\text{mm}$ dla pomiaru „X”, i sięga 0.3mm dla „Y”. Dużą niedogodnością jest brak zależności między przesunięciem a

błędem pomiaru. Błędy pomiaru obrotu wokół osi „Z” dyskwalifikują ten pomiar do wykorzystania w kalibracji. Na uwagę zasługuje jednak dokładność pomiaru odległości (oś „Z”) przy różnych przesunięciach i kątach. Błąd pomiaru w tym kierunku wynosi mniej niż 0.015mm dla odcinka o długości 200mm.

3. OGÓLNA KONCEPCJA WYKONANIA KALIBRACJI SYSTEMU MANIPULACYJNEGO PRZY ZASTOSOWANIU ZESTAWU ROBOTEST

Prezentowane rozważania dotyczą kalibracji statycznej systemu manipulacyjnego. Ten typ kalibracji [7] polega na identyfikacji źródeł błędów, powodujących niedokładności statycznego pozycjonowania. Rozróżnia się trzy rodzaje takiej kalibracji:

- 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.

Zakres prowadzonych prac obejmuje przygotowanie metodyki wykonywania kalibracji robota na poziomie przegubu i kalibracji geometrycznej, przy wykorzystaniu systemu ROBOTEST. Celem tej kalibracji jest wprowadzenie, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, niezbędnych poprawek do funkcji przeliczających zależności przemieszczenia poszczególnych par kinematycznych manipulatora od sygnałów czujników położenia napędów oraz do modelu kinematyki.

Warunkiem przeprowadzenia kalibracji na poziomie przegubu jest, aby układ sterowania posiadał funkcje przemieszczania poszczególnych stopni swobody, z możliwością odczytu bieżącej pozycji wewnętrznej, wyrażonej w elementarnych jednostkach przyrostu położenia napędu. Musi być też dostępny odczyt aktualnej pozycji narzędzia we współrzędnych zewnętrznych oraz specyfikacja funkcji przeliczających. Badanie kalibracyjne będzie polegać na przemieszczaniu głowicy sensorowej przy ruchu pojedynczego stopnia swobody i odczytanie zmian pozycji w systemie ROBOTEST. Dla par postępowych, gdzie mamy do czynienia z przemieszczeniem liniowym, będzie wykorzystywany pomiar interferometryczny odległości wzdłuż osi „Z”. Dla par obrotowych będą wykorzystywane pomiary kątów obrotu wokół osi „X” i „Y”. Ważnym zadaniem zespołu badającego będzie odpowiednie przygotowanie i zamocowanie głowicy na ramieniu systemu manipulacyjnego tak, aby jej pole sensorowe mieściło się w przestrzeni pomiarowej głowicy interferometrycznej. Zebrane wyniki będą porównywane z wartościami odczytanymi z układu sterowania systemu manipulacyjnego i uzyskanymi w symulacjach komputerowych funkcji przeliczających. Dalsza analiza i wnioskowanie zależeć będzie od konkretnych rozwiązań napędów.

Dla potrzeb rozważań nad kalibracją geometryczną przyjmiemy, że pozycja P narzędzia manipulatora, a w naszym przypadku jest to głowica sensorowa systemu ROBOTEST, jest opisana macierzą pozycji $T_POS [4 \times 4]$, wyrażoną następującą zależnością:

$$P = T_POS = T * T_TOOL \quad (1)$$

gdzie:

$T = A_1 * \dots * A_n$ - macierz $[4 \times 4]$ opisująca pozycję układu kołnierza, związanego z ostatnim członem manipulatora, w jego układzie bazowym O_0, X_0, Y_0, Z_0 .

T_TOOL - macierz $[4 \times 4]$ opisująca pozycję układu narzędzia manipulatora w jego układzie kołnierza O_n, X_n, Y_n, Z_n .

Macierz T_TOOL dla danego narzędzia jest stała. Najczęściej jej parametry są wprowadzane do systemu sterowania jako tzw. definicja narzędzia robota. Macierze A_i są uzależnione od parametrów opisujących poszczególne pary kinematyczne systemu manipulacyjnego:

$$A_i = f(q_i) \quad (2)$$

gdzie:

$$q_i = [\theta_i, d_i, \alpha_i]$$

spośród czterech parametrów wektora q_i w przypadku pary kinematycznej piątej klasy (o jednym stopniu swobody) trzy parametry są stałe i wynikają z konstrukcji złącza, a jeden jest zmienną:

θ_i - dla pary obrotowej,

d_i - dla pary postępowej.

Główna idea propozycji zastosowania systemu ROBOTEST do kalibracji geometrycznej polega na analizie opisu pozycji głowicy, a więc macierzy T_POS , i wyborze takich kierunków ruchu (przemieszczeń i rotacji), w których rejestrowana zmiana położenia zależy od ograniczonej liczby parametrów stałych. Do celów badań dla konkretnego manipulatora i konkretnego kierunku przemieszczeń zostanie zbudowana funkcja celu o postaci:

$$F = \Delta P - \Delta P_m \quad (3)$$

gdzie ΔP - zmiana pozycji wg. programu sterującego systemem manipulacyjnym (policzona w programie symulacyjnym) i ΔP_m - zmiana pozycji zmierzona.

Funkcja F będzie minimalizowana w obszarze badań dla danego kierunku przemieszczania głowicy pomiarowej.

4. ZAKRES I PLAN REALIZACJI KALIBRACJI MANIPULATORA ROBOTA URP-6

Do przeprowadzenia pierwszych prób kalibracji z wykorzystaniem systemu ROBOTEST wytypowano robota URP-6. Podstawowym powodem był fakt, że zespół realizujący projekt ma dostęp do pełnej dokumentacji układu sterowania tego robota, w tym do opisu modelu kinematycznego, który został zaimplementowany w oprogramowaniu sterującym robota. Przy budowie tego modelu, wykorzystano notację i metodykę zaproponowaną przez R. Paula¹, z modyfikacjami wynikającymi ze specyfiki manipulatora rozpatrywanego robota. Przyjęto następujące założenia:

¹ Paul R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981r.

- Manipulator zbudowany jest z sześciu członów ponumerowanych od 0 do 5, gdzie człon 0 jest nieruchoma podstawa robota, natomiast człon 5 (ostatni) jest zakończony kołnierzem, do którego montuje się narzędzie.
- Przeguby manipulatora są ponumerowane od 1 do 5, gdzie przegub i jest umieszczony między członami $i-1$ a i .
- Do opisu kinematyki wykorzystano zasady Denavita-Hartenberga.
- Z każdym członem związano lokalny kartezjański układ współrzędnych $O_i X_i Y_i Z_i$, przy czym układ związany z podstawą $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ został wybrany arbitralnie tak, że jego początek leży w punkcie przecięcia pierwszej i drugiej osi robota, oś Z_0 jest pionowa (oś obrotu członu 1) i skierowana ku górze, zaś oś X_0 jest równoległa do górnego ramienia robota w pozycji synchronizacji geometrycznej i skierowana w stronę kołnierza robota.
- Pozycję układu i w układzie $i-1$ opisuje macierz przejścia $A_i [4 \times 4]$.

Schemat kinematyczny manipulatora wraz z układami współrzędnych przedstawia Rys. 2. Tabela parametrów kinematycznych (według notacji Denavita-Hartenberga) dla tak przyjętych układów i konfiguracji zerowej (zwanej pozycją synchronizacji geometrycznej) wygląda następująco:

TABELA 1

Parametry D-H manipulatora robota URP-6.

Człon i	θ_i	θ_{i0}	d_i	a_i	α_i	$\cos \alpha_i$	$\sin \alpha_i$
1	θ_1^*	0	0		$\alpha_1 = +\frac{\pi}{2}$	0	1
2	θ_2^*	$+\frac{\pi}{2}$	0	a_2	$\alpha_2 = 0$	1	0
3	θ_3^*	$-\frac{\pi}{2}$	0	a_3	$\alpha_3 = 0$	1	0
4	θ_4^*	$+\frac{\pi}{2}$	0	0	$\alpha_4 = +\frac{\pi}{2}$	0	1
5	θ_5^*	0	0	0	$\alpha_5 = 0$	1	0

* - zmienne

θ_{i0} - wartość początkowa zmiennej θ_i w pozycji synchronizacji geometrycznej. Parametry a_2 , a_3 wynikają z konstrukcji manipulatora i wynoszą odpowiednio (wg dokumentacji):

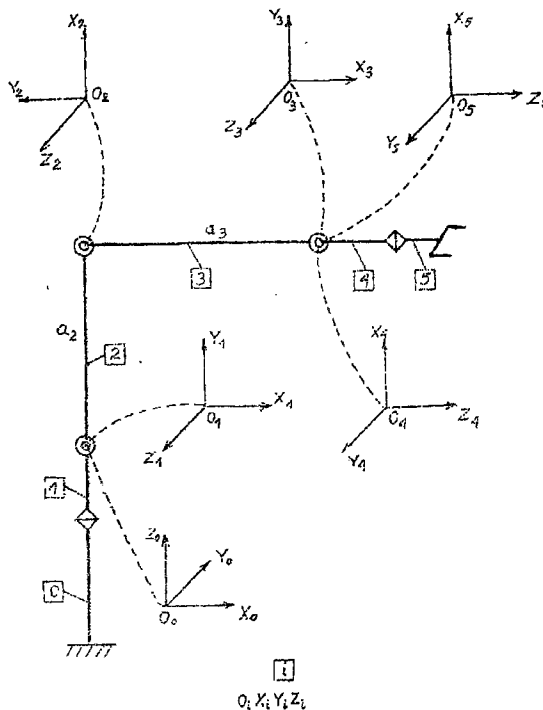
- $a_2 = 450$ mm – długość ramienia dolnego,
- $a_3 = 670$ mm – długość ramienia górnego.

Przyjęcie kątów 'alfa' jako zero lub $\pi/2$ oznacza przyjęcie założenia o równoległości bądź prostopadłości kolejnych osi 'z'. Jest to zgodne z dokumentacją konstrukcyjną robota. Przyjęcie kątów ' θ_{i0} ' jako zero lub $\pi/2$ oznacza przyjęcie pozycji synchronizacji geometrycznej jak na Rys. 2. W szczególności w pozycji tej ramię dolne jest ustawione pionowo, a ramię górne i nadgarstek poziomo. Pozycja synchronizacji geometrycznej jest ustawiana w programie, jako wartość położenia we współrzędnych wewnętrznych wyrażonych

w elementarnych jednostkach przyrostu położenia wału silnika, tzw. inkrementach. Jest ona weryfikowana dla każdego egzemplarza na etapie prób poprodukcyjnych.

Sposób i zakres postępowania przy kalibracji będzie zależał od źródła i charakteru błędów robota URP-6, które można podzielić na następujące grupy:

- Błędy wynikające z innych w rzeczywistości niż przyjęte w modelu długości ramion manipulatora – jako przemieszczenia będą wybierane ruchy liniowe wzdłuż osi "Z" głowicy sensorowej,
- Błędy wynikające z faktu, że kąt między osiami uznawanymi za prostopadłe w rzeczywistości nie jest kątem 90° a między osiami uznawanymi za równoległe nie jest 0° - badane będą kąty skręcenia głowicy sensorowej względem osi „X” i „Y”,
- Błędy wynikające ze złego określenia pozycji synchronizacji geometrycznej – badany będzie ruch liniowy w poziomie i w pionie wzdłuż osi "Z" głowicy sensorowej (po jej odpowiednim przemontowaniu),
- Błędy powstające przy przeliczaniu pozycji wału silnika (inkrementy) na współrzędne wewnętrzne wyrażone w jednostkach miary kątowej - kalibracja na poziomie przegubu zostanie przeprowadzona wg. zaleceń podanych w pkt. 3. Ponieważ w robocie URP wszystkie pary kinematyczne są obrotowe, więc w badaniach będą wykorzystane pomiary kątów obrotu głowicy sensorowej wokół osi „X” i „Y”. Przy badaniu osi piątej (Rys.2) będzie to wymagało zmiany mocowania głowicy w stosunku do pokazanego na Rys. 1.



Rys.2 Schemat kinematyczny manipulatora robota URP-6

5. PODSUMOWANIE

Analiza zestawu interferometrycznego ROBOTEST pod kątem jego zastosowań do zadań kalibracji systemów manipulacyjnych robotów przemysłowych wskazuje, że system ten daje duże możliwości przeprowadzenia różnorodnych badań, zaś wyniki pomiarów cechuje odpowiednia dokładność. Należy w tym miejscu wyraźnie zaznaczyć jeszcze jedną cechę tego narzędzia, zachęcającą do praktycznego wykorzystania. Zestaw ROBOTEST można zapakować do bagażnika samochodu osobowego, przewieźć do miejsca pracy robota, dość szybko rozstawić i zainstalować na miejscu planowanych prób. Pomiary przy pomocy zestawu przebiegają szybko i sprawnie. Trzeba jedynie pamiętać o koniecznym wygrzaniu systemu przez ok. 2,5 godziny. W pomiarach nie przeszkadza natomiast normalna praca sąsiednich maszyn i stanowisk. Próby mogą być więc prowadzone w czasie normalnej pracy zakładu.

Oczywiście wykonanie pomiarów i zebranie wyników to dopiero pierwsza część procesu kalibracji. Uzyskane dane muszą być przetworzone według odpowiednich algorytmów. Problem ten został w przedstawionym materiale jedynie zasygnalizowany i będzie przedmiotem dalszych prac w ramach projektu badawczego.

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] Klimasara W.: *Bezdotykowa metoda pomiaru parametrów funkcjonalnych robotów przemysłowych z wykorzystaniem laserowego systemu pomiarowego „ROBOTEST” V Krajowa Konferencja Robotyki, Wrocław, 1996.*
- [5] Klimasara W.: *Znormalizowane parametry i metody oceny własności funkcjonalnych robotów przemysłowych. VI Krajowa Konferencja Robotyki, Świeradów-Zdrój, 1998*
- [6] Geuens F. i in.: „Standardization of robotic cell calibration: the key to successful integration of OLP”, 28th ISIR, Detroit, USA 1997.
- [7] Klimasara W., Pilat Z., Stasiak T.: „Możliwości wykorzystania systemu pomiarowego ROBOTEST do oceny i weryfikacji parametrów kinematycznych robotów”, AUTOMATION 2000, Warszawa, 2000
- [8] Legnani G., Trevelyan J.: „Static calibration of industrial manipulators: a comparison between two methodologies”, 27th ISIR, Mediolan, Włochy 1996.
- [9] Caenen J. L., Angue J. C.: „Robot calibration”, 20th ISIR, Tokio, Japonia, 1989.