

AUTOMATYCZNA KONTROLA POZYCJONOWANIA ROBOTA W ELASTYCZNYM GNIEZDZIE WYTWARZANIA Z ZASTOSOWANIEM TECHNIK WIZYJNYCH

Marcin KIERSZTYN¹, Piotr WOLSZCZAK², Stanisław PŁASKA²

1. WSTĘP

Roboty stosowane w elastycznych systemach produkcji jako środki transportu, a także jako maszyny prowadzące narzędzia lub przedmiot obrabiany podczas pracy, narażone są na błędy powtarzalności pozycjonowania. Błędy te mogą być powstawać w trakcie przełączania między programami pracy, a także w trakcie normalnej długotrwałej pracy (przegrzewanie i przeciążane napędów). Przyczynami powstawania błędów są również czynności przezbrajania chwytaka lub zmiany wyposażenia stanowiska, na przykład zastosowanie nowych typów pojemników do transportu półproduktów. W przypadku wykorzystywania pojemników z tworzyw lub skrzynek na opakowania szklane, pochodzących od różnych producentów, wymiary tych pojemników mogą różnić się istotnie. Błędy wykonania pojemników, niedokładność pozycjonowania, a zwłaszcza błędy powtarzalności pozycjonowania robota mogą prowadzić do kolizji. Proponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie technik wizyjnych, które pozwalają na wykonaniu precyzyjnych pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania chwytaka robota przy niewielki nakładzie środków na wyposażenie stanowiska [1-5].

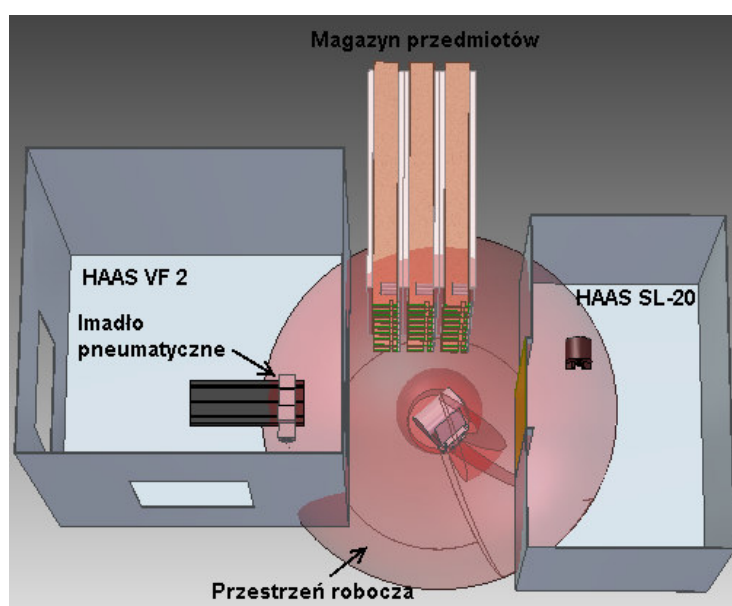
2. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań był robot FS06L firmy Kawasaki umieszczony w zintegrowanym gnieździe elastycznego wytwarzania, wyposażonym w pionowe

¹ Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Zamościu, ul. Pereca 2, 22-400 Zamość

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, ul. Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin, Poland

centrum obróbkowe VF-2 i centrum tokarskie SL 20 firmy Haas Automation oraz specjalizowany magazyn przedmiotów walcowych. Magazyn wyposażony jest w prowadnice zapewniające grawitacyjne transportowanie przedmiotów do miejsca odbioru przez ramię robota. Dodatkowo w obszarze roboczym pionowego centrum obróbkowego zamocowane jest imadło maszynowe pneumatyczne VMC-5P 130 firmy VERTEX. Celem badania była ocena powtarzalności pozycjonowania robota.



Rys. 1. Rzut perspektywiczny gniazdowej formy rozmieszczenia maszyn w przestrzeni roboczej robota Kawasaki FS06L

Na rys. 1 przedstawiono rozmieszczenie maszyn i magazynu przedmiotów w przestrzeni roboczej robota Kawasaki FS06L. Zastosowane gniazdowe rozmieszczenie maszyn spełnia wymagania dotyczące zasięgu pracy robota. Umieszczanie przedmiotu w pionowym centrum obróbkowym odbywać się będzie przez boczny otwór w osłonie obszaru roboczego obrabiarki. Dzięki temu rozwiązaniu uzyska się swobodny dostęp do obu obrabiarek.

Funkcjonowanie robota w zintegrowanym gnieździe elastycznego wytwarzania polega na przemieszczeniu ramienia pomiędzy zaprogramowanymi pozycjami. Najważniejszym parametrem zapewniającym prawidłowe funkcjonowanie gniazda jest dokładność dojazdu do zaprogramowanych pozycji. W tym celu wykonano badanie powtarzalności pozycjonowania robota [6].

3. METODYKA

Badanie powtarzalności pozycjonowania robota polegało na umieszczeniu igieł w ruchomym uchwycie chwytaka oraz w wybranym nieruchomym miejscu stanowiska. W sąsiedztwie igły nieruchomej przygotowano stanowisko do rejestracji obrazu. Następnie chwytak robota przemieszczano w różne, odległe pozycje w obszarze roboczym, po czym wracał on do punktu pomiarowego, gdzie wykonywane były zdjęcia obu igieł [7]. Na podstawie zdjęć wykonywane były pomiary położenia igieł ruchomej i nieruchomej.

Przebieg pomiaru obejmował następujące czynności:

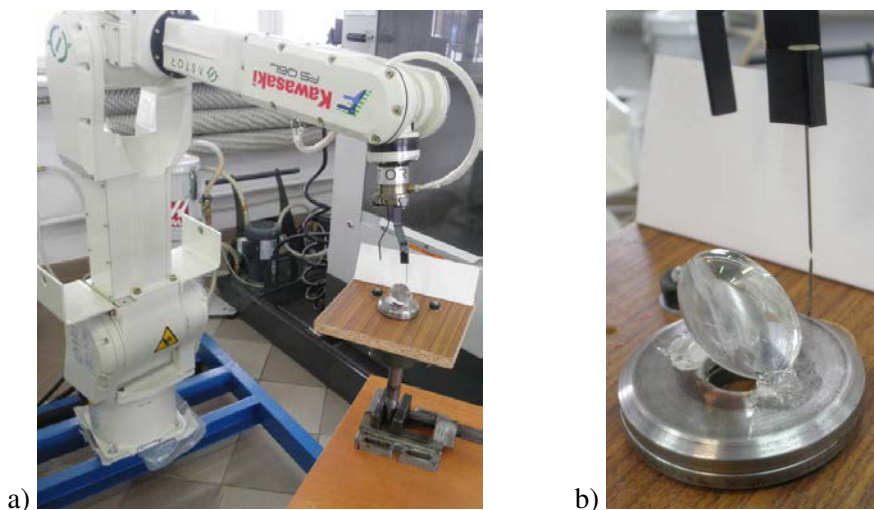
- umieszczenie igły w chwytaku,
- uruchomienie kontrolera D40F oraz robota Kawasaki,
- umieszczenie soczewki powiększającej na obrotowym stole przyrządu pomiarowego,
- umieszczenie przyrządu pomiarowego w przestrzeni roboczej robota,
- ustalenie punktu pomiaru w taki sposób, aby igła pomiarowa umieszczona w chwytaku robota znajdowała się nad igłą przyrządu pomiarowego w odległości ok. 0,5 - 1 mm,
- programowanie blokowe robota zgodnie z instrukcją użytkownika kontrolera D,
- wykonanie zaprogramowanych ruchów,
- wykonanie dwóch zdjęć w kierunkach prostopadłych do siebie, za pomocą aparatu cyfrowego używając funkcji samowyzwalacza,
- cykliczne odtwarzanie programu i wykonywanie zdjęć,
- pomiar zmiany pozycji igły na podstawie zdjęć, za pomocą algorytmu wizyjnego systemu pomiarowego przygotowanego w programie Adaptive Vision Studio 3.1 Lite,
- opracowanie wyników pomiaru.

Na rys. 2 przedstawiono przyrząd pomiarowy zbudowany z łożyskowanego stołu obrotowego, igły, ekranu oraz soczewki skupiającej. Igła umieszczona jest na stałe w osi obrotu stołu. Soczewka skupiająca umożliwia wykonanie ostrych zdjęć z bliskiej odległości za pomocą aparatu cyfrowego. Soczewka umieszczona była na stole obrotowym w stalowym pierścieniu. Biały ekran wyostrza krawędzie fotografowanych igieł. Na stole umieszczony był aparat cyfrowy. Błat stołu przymocowany był do oprawy łożyskowej. W blacie stołu wykonany był otwór na igłę pomiarową. Wysokość stołu była regulowana przez przemieszczanie oprawy łożyskowej na wałku, który zamocowano w imadle maszynowym. Obracanie stołem zapewnia wykonanie fotografii igieł pomiarowych w dwóch prostopadłych płaszczyznach bez zmiany odległości obiektywu oraz na jednakowej wysokości.

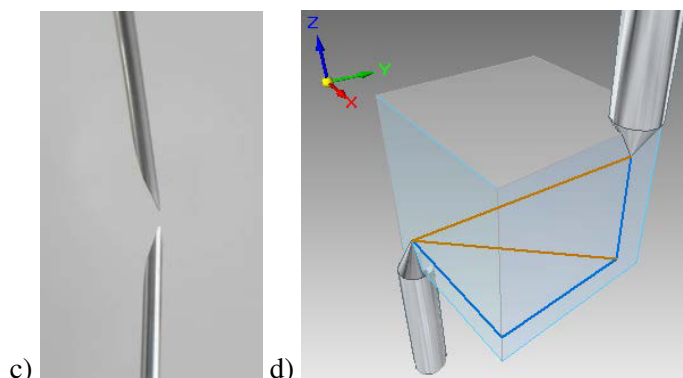


Rys. 2. Przyrząd pomiarowy

Jeden cykl pracy robota składał się z ruchów między trzema pozycjami robota. W jednej pozycji wykonywane były pomiary powtarzalności pozycjonowania (rys. 3a). Pozostałe pozycje znajdowały się w odległych punktach przestrzeni roboczej i wymagały wykonania ruchu we wszystkich osiach ruchomych robota. Wykonano 13 cykli pomiarowych. Podczas każdego cyklu wykonano dwa zdjęcia w dwóch płaszczyznach, prostopadłych względem siebie (rys. 3b).



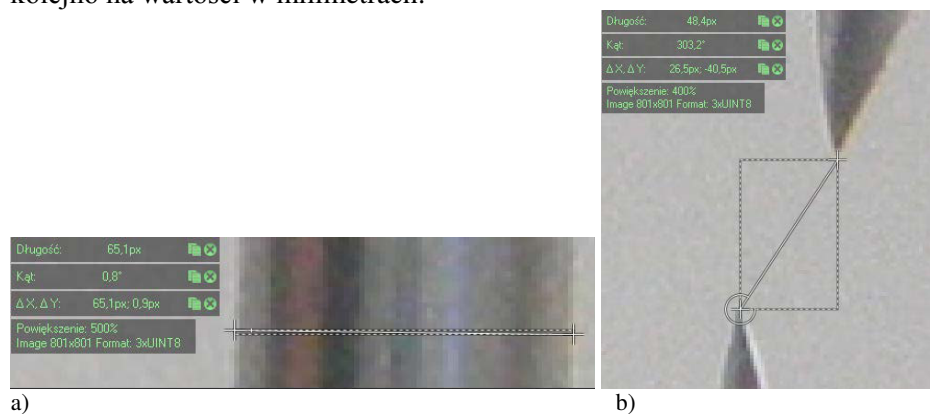
Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: a) ogólny widok robota podczas badania powtarzalności pozycjonowania, b) widok soczewki podczas pomiaru w jednym rzucie odległości między igłami ruchomą (umieszczoną w chwytaku) i nieruchomą,



Rys. 4. Zasada pomiaru położenia kiści chwytaka: a) igły w pozycji pomiarowej w płaszczyźnie YZ, b) rzut perspektywiczny obrazujący zasadę pomiaru (model lokalizacji igieł podczas pomiaru i mierzonych odległości).

Na rys. 4a przedstawiono igły w pozycji przygotowanej do pomiarów odległości. Natomiast na rys. 4b przedstawiono rzut perspektywiczny przedstawiający mierzone odległości. Układ współrzędnych obrazuje oznaczenia odcinków przedstawionych w tab. 1 oraz płaszczyzny niezbędne do wykonania fotografii.

Na podstawie obrazu przedstawionego na płaszczyznach XZ oraz YZ wykonano pomiary geometryczne wykorzystując środowisko do tworzenia programów inspekcji wizyjnej Adaptive Vision Studio. Na rys. 1a przedstawiono przykładowy obraz igły podczas pomiaru szerokości, a na rys. 5b przykładowy przebieg pomiaru w płaszczyźnie XZ (6 cykl pomiarowy). Pomiar średnicy igły, która w rzeczywistości miała średnicę 1 mm , wykorzystano do obliczenia wartości współczynnika skali i uzyskanego powiększenia. Uzyskane wyniki pomiarów w pikselach przeliczono kolejno na wartości w milimetrach.



Rys. 5. Przykład pomiarów geometrycznych a) pomiar średnicy igły (wzorec długości), b) pomiarów odległości między ostrzami igieł w kierunkach X i Z (wyniki własne)

4. WYNIKI POMIARÓW I ANALIZA

W tab. 1 przedstawiono wyniki pomiarów wraz z obliczonymi odległościami między końcami igieł pomiarowych. Odległość między końcami igieł wyznaczono z zależności (1). Odległości w pikselach zostały przeliczona na milimetry z zależności (2). Średnia wartość odległości igieł wynosi $0,733 \text{ mm}$.

$$L_{px} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

gdzie: X, Y, Z - odległości poszczególnych odcinków w pikselach.

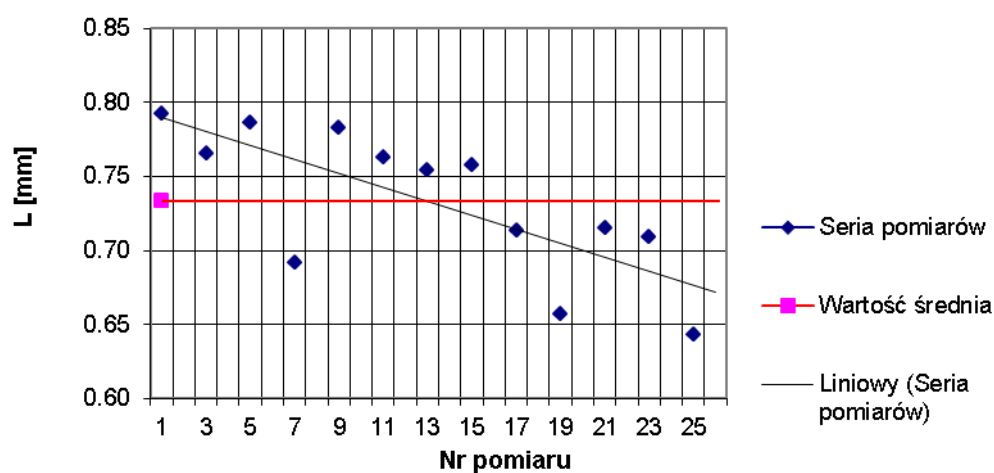
$$L = \frac{1\text{mm}}{D} \times L_{px} \quad (2)$$

gdzie: D – średnia arytmetyczna średnicy igły pomiarowej w pikselach,
 L_{px} – odległość między końcami igieł w pikselach.

Tabela 1. Wyniki pomiarów odległości między igłami (wyniki własne)

nr cyklu	Wyniki pomiarów					Odległość między ostrzami igieł	
	$X [px]$	$Y [px]$	$Z [px]$	$D_x [px]$	$D_y [px]$	$L_{px} [px]$	$L [mm]$
1	30,5	2,9	40,8	65,16	63,75	51,063	0,792
2	28,7	1,9	40,5	65,07	64,51	49,623	0,766
3	31,7	4,3	41,1	66,61	65,80	52,074	0,787
4	16,7	1,3	40,9	62,88	64,82	44,158	0,692
5	30,4	2,1	39,8	63,42	64,47	50,074	0,783
6	26,5	9,5	40,4	64,86	64,32	49,290	0,763
7	30,6	1,2	37,9	64,57	64,49	48,700	0,755
8	29,2	2,1	39,1	64,32	64,69	48,893	0,758
9	16,8	0,4	42,7	63,91	64,79	45,918	0,714
10	10,2	0,1	41,2	65,21	63,87	42,417	0,657
11	19,7	0,5	41,5	63,77	64,69	45,919	0,715
12	20,6	0,6	40,6	63,48	64,82	45,504	0,709
13	11,7	1,7	39,8	64,69	64,34	41,501	0,643
						Średnia	0,733
D_x, D_y - średnice igły $D [px]$ w kierunkach X i Y						Odchylenie standardowe	0.05

Rys. 6 przedstawia wyniki pomiarów odległości między ostrzami igieł oraz wyznaczoną wartość średnią. Odległość między igłami w kolejnych pomiarach ulegała zmniejszeniu, co przedstawiono za pomocą zależności liniowej.

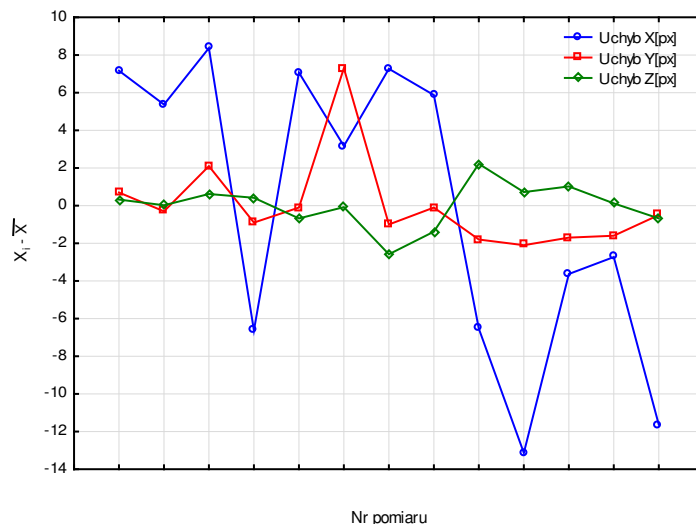


Rys. 6. Wyniki pomiarów odległości (—■—) między igłami podczas oceny powtarzalności pozycjonowania robota Kawasaki FS06L, wartość średnia (—◆—) oraz liniowe dopasowanie do wyników (linia trendu)

Z pokazanych na rys. 7 wyników pomiarów w postaci rzutów XZ i YZ wynika ich duża zmienność w kierunku X (tab. 1). Zmienność wyników pomiarów składowej X ma istotny wpływ na obliczoną wartość odległości L.

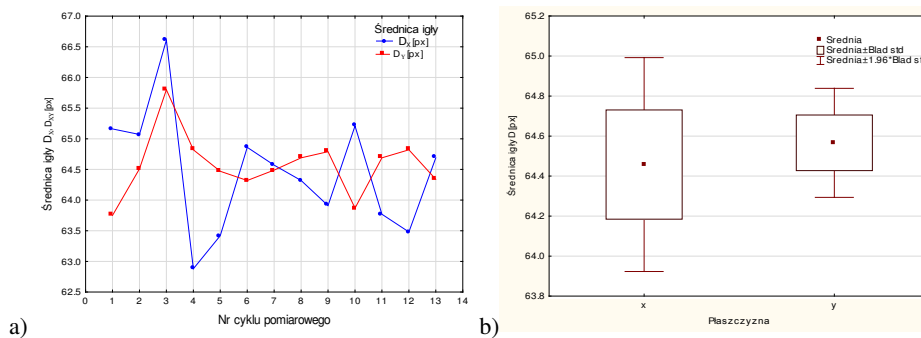
Tabela 2: Statystyki pomiarów odległości igieł w rzutach XZ i YZ, liczba wyników n=13 (wyniki własne)

	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
$X [px]$	23.33	10.20	31.70	7.71
$Y [px]$	2.20	0.10	9.50	2.47
$Z [px]$	40.48	37.90	42.70	1.18
$D_x [px]$	64.46	62.88	66.61	0.98
$D_y [px]$	64.57	63.75	65.80	0.50
$L [px]$	47.32	41.50	52.07	3.33
$L [mm]$	0.73	0.64	0.79	0.05



Rys. 7. Różnice wyników pomiarów odległości ostrzy igieł i wartości średnich w rzutach XZ i YZ: uchyby X (—○—), Y (—□—) i Z (—◇—) w pikselach (wyniki własne)

Dla sprawdzenia dokładności pomiarów, uzyskanych za pomocą przygotowanego stanowiska i systemu wizyjnego, analizowano wyniki pomiarów średnic igieł w kierunkach X oraz Y. Wyniki te przedstawiono na rys. 8 i stwierdzono, że pomiary średnic igieł wykonane w kierunku X obarczone są większym błędem niż wyniki pomiarów w osi Y.



Rys. 8. Wyniki pomiarów średnic igieł w kierunkach X i Y podczas kolejnych cykli pomiarowych; a) wyniki surowe, b) porównanie średnich i zmienności pomiarów (wyniki własne)

Na podstawie analizy wyników określono powtarzalność pozycjonowania robota. Obliczono, że dokładność pozycjonowania w trakcie testu mieściła się w zakresie $+0,059$ mm oraz $-0,090$ mm. Deklarowana przez producenta dokładność

pozycjonowania wynosi $\pm 0,100$ mm. Wyniki pomiarów potwierdzają zakresie tolerancji dokładności powtarzalności pozycjonowania robota określone przez producenta. Taka dokładność jest odpowiednia do prawidłowego funkcjonowania robota w elastycznym gnieździe wytwarzania i realizacji funkcji transportowych, w tym mocowania przedmiotów. Mocowanie przedmiotów do pierwszej operacji nie wymaga wyższej precyzji pozycjonowania. Przedmioty umieszcza się w uchwycie tokarskim, gdzie najczęściej początkową czynnością obróbczą jest planowanie powierzchni czołowej lub inne zabiegi obróbkowe mające na celu uzyskanie odpowiedniej tolerancji wymiarowo kształtowej przedmiotu.

Precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność pozycjonowania ma natomiast znaczenie podczas mocowania przedmiotu w szczękach imadła do wykonania drugiej operacji. Wymagane jest wówczas zastosowanie przyrządów pomocniczych takich jak zderzaki i szczęki z wcięciami pryzmatycznymi, które zapewnią precyzyjne zamocowanie przedmiotu z dokładnością wyższą niż dokładność pozycjonowania robota.

Zidentyfikowano przyczynę niedokładności pozycjonowania robota, którą było niewłaściwe posadowienie robota. W trakcie testowania był on posadowiony na prostokątnym stelażu, niezwiązany z podłożem. Podczas dynamicznych ruchów ramienia, w którym brała udział cała masa robota stelaż ulegał niewielkim przemieszczeniom, w szczególności w kierunku krótszego boku prostokątnego stelaży, czyli osi X.

5. WNIOSKI

Pomiar dokładności pozycjonowania przeprowadzono w celu sprawdzenia powtarzalności pozycjonowania ramienia robota. Wyniki badania są zgodne z danymi producenta.

Zastosowana metodyka wykorzystująca wizyjny system pomiarowy umożliwia:

- ocenę dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota,
- automatyzację okresowej kalibracji robota,
- archiwizację pomiarów geometrycznych,
- opracowanie raportu z oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota.

Zastosowanie zautomatyzowanej metody oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota jest przydatnym rozwiązaniem zarówno w przypadku procesu produkcyjnego o charakterze powtarzalnym jak również w przypadku produkcji krótkich serii w elastycznym systemie produkcji.

LITRATURA

- [1] ALBADA, G D.V., LAGERBERG, A., VISSER, J.M., *A low-cost pose-measuring system for robot calibration*. Tech. Rep. University of Amsterdam, Faculty of Mathematics and Computer Science, 1996.
- [2] MADDAHI Y., SEPEHRI, N., GHORABI H. AND MADDAHI A., *Testing robotic manipulators: improvement and experience*. W: Int. J. of Systems Applications, Engineering & Development. vol. 4, 2010, 35-45.
- [3] GÖTZ C., TUTTAS S., HOEGNER L., EDER K., STILLA U., *Accuracy evaluation for a precise indoor multi-camera pose estimation system*. Stilla U. et al (Eds) PIA11. W: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38, Munich, Germany, 2011, 97-102.
- [4] NEUMAYR R., ZSOMBOR-MURRAY P., O'LEARY P., *Precise pose measurement with single camera calibration for planar parallel manipulators*. W: Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 35, nrs 2, 2011, 201-213.
- [5] RENAUD P., ANDREFF N., DHOME M., MARTINET P., *Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration*. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 02, Lausanne, Switzerland, 2002, 1868-1873.
- [6] EVS-EN ISO 9283:2001. *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*.
- [7] GAN Y., DAI X., *Base frame calibration for coordinated industrial robots*. W: Robotics and Autonomous Systems. vol.59, nr 7-8, 2011, 563-570.