

Tadeusz SZKODNY
Politechnika Śląska

WRAŻLIWOŚĆ POZYCJONOWANIA CHWYTAKA NA BŁĘDY PARAMETRÓW KINEMATYKI MANIPULATORÓW RODZINY IRb-6

Streszczenie. Wyznaczenie konfiguracji manipulatora, w których błąd położenia i orientacji elementu wykonawczego (np. chwytaka) jest najbardziej wrażliwy na błędy parametrów kinematyki, jest niezbędne do planowania pomiarów dla potrzeb kalibracji tych parametrów. Także ocena poprawności kalibracji tych parametrów powinna opierać się na pomiarach w najbardziej wrażliwych konfiguracjach. W pracy zaproponowano miary wrażliwości modelowanych błędów położenia i orientacji chwytaka manipulatorów IRb-6, IRp-6 i URP-6 na błędy parametrów kinematyki. Modele kinematyki tych manipulatorów mają 17 parametrów kinematyki. Obliczono te wrażliwości w 7776 punktach dyskretyzacji przestrzeni siłowników i wyznaczono 10 konfiguracji najbardziej wrażliwych na błędy parametrów kinematyki. Przeanalizowano w tych konfiguracjach wrażliwość błędu pozycjonowania chwytaka na błędy wszystkich i poszczególnych parametrów kinematyki.

THE SENSITIVITY OF GRIPPER'S POSITIONING TO ERRORS OF KINEMATICS' PARAMETERS OF SERIES OF IRB-6 MANIPULATORS

Summary. Estimation of the most sensitive configurations in which the error of position and orientation is most sensitive to errors of kinematics' parameters is essential for planning of measurements which are useful for calibration of these parameters. Particularly for estimation the correctness of calibration these measurements should be carried out in the most sensitive configurations. In this paper measures of sensitivity of model positioning errors of the gripper IRb-6, IRp-6 and URP-6 manipulators to errors of 17-th kinematics' parameters are proposed. Kinematics' models of motion of these manipulators possess this number of kinematics' parameters. Sensitivities in 7776 points of discretization space and ten most sensitive configurations to errors of kinematics' parameters are calculated. The sensitivity of error of the gripper's positioning to all and individual kinematics' parameters of these configurations are analysed.

1. Wstęp

Jednym z czynników ułatwiających programowanie robotów przemysłowych są systemy programowania autonomicznego robotów off-line [1]. Systemy te są ważne zarówno w programowaniu współczesnych zautomatyzowanych narzędzi przemysłowych, jak również

jako podstawa do badań z dziedziny robotyki [1, 2]. Systemy programowania automatycznego czynią roboty przemysłowe przyjaznymi dla użytkowników, gdyż pozwalają ilustrować za pomocą grafiki komputerowej zaplanowane działania. Systemy te wymagają między innymi znajomości komputerowych modeli ruchu do symulacji pracy manipulatora w celu automatycznego planowania działań robota.

Modele ruchu manipulatora stosowane w systemie programowania off-line muszą zapewnić odpowiednią zgodność modelowego manipulatora z jego rzeczywistym światem wewnętrznym. Manipulatory są złożonymi układami mechanicznymi i modelowanie ich jest trudne. Liczba parametrów modeli ruchu manipulatorów jest duża. Modele ruchu manipulatorów IRb-6, IRp-6, URP-6 mają 38 parametrów kinematyki i 110 parametrów dynamiki [3, 4, 5]. Aby zapewnić tę zgodność należy prowadzić kalibrację parametrów modelu na podstawie pomiarów rzeczywistych charakterystyk manipulatora. Kalibrację można przeprowadzić po wcześniejszym pozyskaniu parametrów modelu. Pozyskiwaniu temu może służyć pomiar lub odczyt z rysunku nominalnych parametrów kinematyki [7] i obliczanie parametrów dynamiki z wymiarów i rozkładów mas [1,5,6]. Pozyskane parametry są niezbędne do badań wrażliwościowych najistotniejszych parametrów charakterystyk manipulatora na poszczególne parametry modelu.

W pracy skupimy się na badaniach wrażliwościowych współrzędnych położenia i orientacji chwytaka manipulatorów: IRb-6, IRp-6, URP-6 – na błędy parametrów kinematyki. Metody praktyczne kalibracji kinematyki wykorzystują między innymi zlinearyzowany różniczkowy błąd modelu, opierający się na macierzy Jakobiego modelu kinematyki prostej względem parametrów geometrycznych [7, 8]. W metodach tych stosuje się także teorię identyfikacji minimalnokwadratowej parametrów kinematyki [7, 9, 10]. Jednym z etapów kalibracji są pomiary [7], które powinny być dokonywane dla konfiguracji, przy których błędy parametrów kinematyki powodują największe błędy pozycjonowania chwytaka. Konfiguracje takie będziemy nazywać konfiguracjami najbardziej wrażliwymi na błędy parametrów kinematyki.

Celem pracy jest wyznaczenie zbioru najbardziej wrażliwych konfiguracji manipulatorów IRb-6, IRp-6 i URP. W drugim punkcie zaproponowano miary wrażliwości pozycjonowania chwytaka na błędy parametrów kinematyki. W trzecim punkcie wyznaczono postać analityczną macierzy Jakobiego pozycjonowania chwytaka względem parametrów kinematyki. W czwartym punkcie przedstawiono wynik obliczeń programu komputerowego

WRAŻL. Wynikiem tym jest zbiór 10 najbardziej wrażliwych konfiguracji manipulatorów IRB-6, IRP-6 i URP-6. W piątym punkcie sformułowano wnioski.

2. Miary wrażliwości

Współrzędne położenia d_x, d_y, d_z orientacji Φ, Θ, Ψ chwytaka są funkcjami współrzędnych naturalnych i parametrów kinematyki. Φ, Θ, Ψ są kątami Eulera z – y – z [1]. Oznaczamy te parametry kinematyki przez $p_1 \div p_k$. Wartości tych parametrów odczytane z rysunku lub zmierzone będziemy nazywać wartościami nominalnymi i oznaczać przez p_{ok} . Wartości aktualne tych parametrów będziemy oznaczać przez p_k . Przyjmiemy, że różnice $p_k - p_{ok}$ są małe i można je aproksymować różniczkami dp_k .

Zatem

$$p_k = p_{ok} + dp_k, \quad 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

Obliczmy sumę ważoną dW^2 kwadratów maksymalnych wartości różniczkowych przyrostów współrzędnych położenia i orientacji chwytaka, spowodowanych zmianami różniczkowymi parametrów dp_k .

$$dW^2 = w_1 \cdot \max^2 [d(d_x)] + w_2 \cdot \max^2 [d(d_y)] + w_3 \cdot \max^2 [d(d_z)] + w_4 \cdot \max^2 (d\Phi) + w_5 \cdot \max^2 (d\Theta) + w_6 \cdot \max^2 (d\Psi) \quad (2)$$

Zastosujemy do obliczeń maksymalnych różniczkowych współrzędnych położenia i orientacji K – wymiarową przestrzeń Euklidesową, w której wersory \bar{e}_i spełniają równanie $\bar{e}_i \cdot \bar{e}_j = \delta_{ij}$, δ_{ij} jest funkcją Kroneckera. W przestrzeni tej wektor różniczkowy parametrów $d\bar{p}$ opisuje równanie:

$$d\bar{p} = \sum_{i=1}^K \bar{e}_i dp_i$$

Długość tego wektora:

$$dp = \left[\sum_{i=1}^K (dp_i)^2 \right]^{1/2}$$

Największy przyrost $d(d_x)$ spowodują przyrosty dp_i opisane wektorem $d\bar{p}^*$, równoległym do gradientu $\bar{\nabla} d_x$, czyli

$$\max[d(d_x)] = \bar{\nabla}d_x \cdot d\bar{p}^* = \sum_{i=1}^K \frac{\partial d_x}{\partial p_i} dp \cos \alpha_i, \quad \cos \alpha_i = \frac{\frac{\partial d_x}{\partial p_i}}{|\bar{\nabla}d_x|},$$

$$|\bar{\nabla}d_x| = \left[\sum_{j=1}^K \left(\frac{\partial d_x}{\partial p_j} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Stąd

$$\max[d(d_x)] = \frac{dp}{|\bar{\nabla}d_x|} \sum_{i=1}^K \left(\frac{\partial p_x}{\partial p_i} \right)^2 = \left[\sum_{i=1}^K \left(\frac{\partial d_x}{\partial p_i} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot dp$$

Podobnie można wyrazić składniki sumy (2). Zatem

$$dW^2 = \left\{ \sum_{i=1}^K \left[w_1 \left(\frac{\partial d_x}{\partial p_i} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\partial d_y}{\partial p_i} \right)^2 + w_3 \left(\frac{\partial d_z}{\partial p_i} \right)^2 + w_4 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial p_i} \right)^2 + w_5 \left(\frac{\partial \theta}{\partial p_i} \right)^2 + w_6 \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_i} \right)^2 \right] \right\} (dp)^2$$

Wrażliwością S_g błędu położenia i orientacji chwytaka na zmiany parametrów p_k będziemy nazywać iloraz

$$S_g = \frac{dW^2}{(dp)^2} = \sum_{i=1}^K \left[w_1 \left(\frac{\partial d_x}{\partial p_i} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\partial d_y}{\partial p_i} \right)^2 + w_3 \left(\frac{\partial d_z}{\partial p_i} \right)^2 + w_4 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial p_i} \right)^2 + w_5 \left(\frac{\partial \theta}{\partial p_i} \right)^2 + w_6 \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_i} \right)^2 \right], \quad (3)$$

gdzie $w_1 \div w_6$ - współczynniki wagi.

Wrażliwością parametryczną S_i błędu położenia i orientacji chwytaka na zmiany parametru p_i będziemy nazywać sumę:

$$S_i = w_1 \left(\frac{\partial d_x}{\partial p_i} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\partial d_y}{\partial p_i} \right)^2 + w_3 \left(\frac{\partial d_z}{\partial p_i} \right)^2 + w_4 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial p_i} \right)^2 + w_5 \left(\frac{\partial \theta}{\partial p_i} \right)^2 + w_6 \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_i} \right)^2 \quad (4)$$

Łatwo zauważyć, że

$$S_g = \sum_{i=1}^K S_i \quad (5)$$

Z formuły (3) możemy obliczyć wrażliwości S_g dla każdego punktu dyskretyzacji przestrzeni siłowników manipulatora. Obliczenia te umożliwiają określenie maksymalnej wrażliwości S_{gmax} i minimalnej S_{gmin} . Do opisu punktu dyskretyzacji z wrażliwością S_g względem zakresu zmian $[S_{gmin}, S_{gmax}]$ wprowadzimy wrażliwość względną S_{gw} .

$$S_{g^w} = \frac{S_g - S_{g \min}}{S_{g \max} - S_{g \min}} 100\% \quad (6)$$

Im większe S_{g^w} , tym bardziej jest wrażliwy punkt dyskretyzacji na błędy parametrów kinematyki. Im S_{g^w} jest bliższe zeru, tym mniej wrażliwy jest punkt dyskretyzacji. Przy pomiarach dla potrzeb kalibracji należy unikać punktów dyskretyzacji z S_{g^w} bliskim zeru. W takich punktach błędy parametrów kinematyki powodują najmniejsze błędy położenia i orientacji chwytaka.

3. Jakobian pozycjonowania chwytaka

W tym punkcie wyznaczamy macierz Jakobiego współrzędnych położenia i orientacji chwytaka manipulatora IRb-6 względem parametrów kinematyki. Z pracy [3] wynika, że współrzędne położenia d_x , d_y , d_z chwytaka względem układu bazowego manipulatora IRb-6 opisują następujące równania:

$$\begin{aligned} d_x &= l_2 S_1 S_2 - l_3 S_1 C_{23} - \lambda_5 S_1 C_{234} + l_6 (S_1 S_{234} C_5 \\ &+ C_1 S_5) - \lambda_6 S_1 C_{234}, \\ d_y &= -l_2 C_1 S_2 + l_3 C_1 C_{23} + \lambda_5 C_1 C_{234} + l_6 (-C_1 S_{234} C_5 \\ &+ S_1 S_5) + \lambda_6 C_1 C_{234}, \\ d_z &= \lambda_1 + l_2 C_2 + l_3 S_{23} + \lambda_5 S_{234} + l_6 C_{234} C_5 + \lambda_6 S_{234}. \end{aligned} \quad (7)$$

Kąty Eulera Φ , Θ , Ψ , opisujące orientację chwytaka względem układu bazowego manipulatora IRb-6, opisują następujące równania:

$$\Phi = 90^\circ + \Theta_1, \quad \Theta = 90^\circ - \Theta_{234}, \quad \Psi = 180^\circ + \Theta_5 \quad (8)$$

W równaniach (7) i (8) $S_i, C_i = \sin \Theta_i, \cos \Theta_i$; $S_{ij}, C_{ij} = \sin(\Theta_i + \Theta_j), \cos(\Theta_i + \Theta_j)$; $\Theta_{ijk} = \Theta_i + \Theta_j + \Theta_k$. Θ_i są współrzędnymi naturalnymi członów i zależą od współrzędnych naturalnych siłowników $\Theta_{s1} + \Theta_{s5}$ jak poniżej [3].

$$\Theta_1 = k_1^{-1} \Theta_{s1},$$

$$\Theta_2 = -\arccos \frac{AB^2 + BC^2 - [A_0 C - (h_2 / 2\pi) \Theta_{s2}]^2}{2 \cdot AB \cdot BC} + \alpha,$$

$$\Theta_3 = -\arccos \frac{DE^2 + EF^2 - [D_0 F - (h_3 / 2\pi) \Theta_{s3}]^2}{2 \cdot DE \cdot EF} + \beta - \Theta_2,$$

$$\alpha = \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - A_0 C^2}{2 \cdot AB \cdot BC}.$$

$$\beta = \arccos \frac{DE^2 + EF^2 - D_oF^2}{2 \cdot DE \cdot EF} \quad (9)$$

Parametry kinematyki występujące w równaniach (7) - (9) oznaczmy następująco:

$$p_1 = \lambda_1, p_2 = l_2, p_3 = l_3, p_4 = \lambda_5, p_5 = \lambda_6, p_6 = k_1, p_7 = AB, p_8 = BC, p_9 = A_oC, p_{10} = DE, p_{11} = EF, p_{12} = D_oF, p_{13} = h_2, p_{14} = h_3, p_{15} = k_4, p_{16} = k_5 \text{ i } p_{17} = l_6.$$

Macierz Jakobiego współrzędnych: $d_x, d_y, d_z, \Phi, \Theta, \Psi$ względem parametrów kinematyki $p_1 - p_{17}$ ma następującą postać:

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial p_1} & \frac{\partial d_y}{\partial p_1} & \frac{\partial d_z}{\partial p_1} & \frac{\partial \Phi}{\partial p_1} & \frac{\partial \Theta}{\partial p_1} & \frac{\partial \Psi}{\partial p_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial d_x}{\partial p_{17}} & \frac{\partial d_y}{\partial p_{17}} & \frac{\partial d_z}{\partial p_{17}} & \frac{\partial \Phi}{\partial p_{17}} & \frac{\partial \Theta}{\partial p_{17}} & \frac{\partial \Psi}{\partial p_{17}} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

4. Konfiguracje najwrażliwsze

Najwrażliwsze konfiguracje manipulatora IRb-6 mają wrażliwość względną S_g największą spośród wszystkich konfiguracji odpowiadających punktom dyskretyzacji przestrzeni siłowników [1]. Rodzi się tu pytanie: jak dokonać dyskretyzacji tej przestrzeni? Elementy macierzy J_p (patrz punkt 3) zależą od współrzędnych naturalnych członów $\Theta_1 \div \Theta_5$ oraz od współrzędnych naturalnych siłowników $\Theta_{s1} \div \Theta_{s5}$. W elementach tych występują tylko sinusy lub kosinusy $\Theta_1 \div \Theta_5$, inne funkcje tych współrzędnych nie występują. Dlatego górną granicą długości kroku dyskretyzacji w przestrzeni członów jest okres tych funkcji trygonometrycznych, czyli 360° . Dolną granicą tej długości może być także kąt bliski 0° , przy którym jesteśmy w stanie przeprowadzić obliczenia S_g dla każdego punktu dyskretyzacji. Kroki dyskretyzacji w przestrzeni członów i w przestrzeni siłowników wiążą równania (9). Przyjęcie kroku dyskretyzacji współrzędnych naturalnych członów równego 1° daje $1145664 \cdot 10^5$ punktów dyskretyzacji. Przyjęcie tej długości kroku dyskretyzacji współrzędnych naturalnych siłowników daje $1.852 \cdot 10^{21}$ punktów dyskretyzacji.

Program komputerowy WRAZŁ umożliwia obliczenia wrażliwości S_g, S_{g^*} i S_i zdefiniowanych w punkcie 2 dla zadeklarowanego zbioru punktów dyskretyzacji przestrzeni siłowników. Po zadeklarowaniu dyskretyzacji gwarantującej zmiany współrzędnych $\Theta_1 \div \Theta_5$

nie większe niż 30° program WRAŻL obliczył S_g , S_{g_w} i S_i w 7776 punktach. Następnie program ten wyznaczył 10 punktów najbardziej wrażliwych. Poniżej przedstawiono wyniki tych obliczeń dla $w_1 + w_6 = 1$; $w_1 + w_3 = 1$, $w_4 + w_6 = 0$ i nominalnych wartości parametrów kinematyki $p_i = p_{oi}$.

Wyniki obliczeń dla $w_1 + w_6 = 1$

Ekstremalne wartości S_g dla wszystkich 7776 punktów dyskretyzacji mają następujące wartości: $S_{g_{max}} = 0.799 \cdot 10^4$, $S_{g_{min}} = 0.152 \cdot 10^3$. We wszystkich tych 10 punktach $\Theta_{s1} = -937.591 \text{ rad.}$, $\Theta_{s2} = -68.078 \text{ rad.}$

Tablica 1

Lp.	1	2	3	4	5
$\Theta_{s5} [\text{rad}]$	-358.142	-318.348	-278.555	-238.761	-198.968
S_g	7985.9	7972.7	7961.0	7950.9	7942.4
$S_{g_w} [\%]$	100	99.8	99.6	99.5	99.4
Lp.	6	7	8	9	10
$\Theta_{s5} [\text{rad}]$	-159.174	-119.381	119.381	-79.587	79.587
S_g	7935.4	7929.9	7929.9	7926.1	7926.1
$S_{g_w} [\%]$	99.3	99.2	99.2	99.2	99.2

$\Theta_{s3} = -73.507 \text{ rad.}$, $\Theta_{s4} = 0. \text{ rad.}$ Zmienia się tylko Θ_{s5} . Wartości Θ_{s5} , wrażliwości S_g i S_{g_w} przedstawia tablica 1.

Tablica 2

Lp.	1	2	3	4	5
S_{15}	0.00135	0.00107	0.00082	0.00060	0.00042
S_{16}	62.990	49.770	38.105	27.996	19.441
Lp.	6	7	8	9	10
S_{15}	0.00027	0.00015	0.00015	0.00007	0.00007
S_{16}	12.443	6.999	6.999	3.111	3.111

Wrażliwości parametryczne S_i we wszystkich 10 najbardziej wrażliwych konfiguracjach (odpowiadających 10 najbardziej wrażliwym punktom) są następujące:

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 1.0, \quad S_6 = 1577.478, \quad S_7 = 5.084, \quad S_8 = 1.334, \quad S_9 = 1.017, \\ S_{10} = 10.151, \quad S_{11} = 0.719, \quad S_{12} = 0.521, \quad S_{13} = 2141.094, \quad S_{14} = 4179.55, \quad S_{17} = 1.0.$$

Zmieniają się tylko wrażliwości parametryczne S_{15} i S_{16} . Tablica 2 przedstawia te wrażliwości.

Z tablicy 2 wynika następujący zbiór p_i uporządkowany według malejącej wartości S_i dla pierwszych sześciu najbardziej wrażliwych konfiguracji: p_{14} , p_{13} , p_6 , p_{16} , p_{10} , p_7 , p_8 , p_9 , p_1 .

$p_2, p_3, p_4, p_5, p_{17}, p_{11}, p_{12}, p_{15}$. Dla tych konfiguracji błąd położenia i orientacji chwytaka jest najbardziej wrażliwy na zmiany parametru p_{14} (czyli h_3), a najmniej wrażliwy na zmiany parametru p_{15} (czyli k_4).

Zbiór p_i , uporządkowany według malejącej wartości S_i dla siódmej i ósmej najbardziej wrażliwej konfiguracji, ma postać: $p_{14}, p_{13}, p_6, p_{10}, p_{16}, p_7, p_8, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_{17}, p_{11}, p_{12}, p_{15}$. Dla tych konfiguracji błąd położenia i orientacji chwytaka jest najbardziej wrażliwy na zmiany parametru p_{14} (czyli h_3), a najmniej wrażliwy na zmiany parametru p_{15} (czyli k_4).

Zbiór p_i , uporządkowany według malejącej wartości S_i dla dziewiątej i dziesiątej najbardziej wrażliwej konfiguracji, ma postać: $p_{14}, p_{13}, p_6, p_{10}, p_7, p_{16}, p_8, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_{17}, p_{11}, p_{12}, p_{15}$. Dla tych konfiguracji błąd położenia i orientacji chwytaka jest najbardziej wrażliwy na zmiany parametru p_{14} (czyli h_3), a najmniej wrażliwy na zmiany parametru p_{15} (czyli k_4).

5. Wnioski

Zaproponowane w punkcie drugim wrażliwości: S_g, S_i i S_{g^w} umożliwiają porównywanie wpływu błędu wszystkich i poszczególnych parametrów kinematyki na błąd położenia i orientacji chwytaka manipulatorów IRb-6, IRp-6, URP-6. Porównywanie to umożliwia znalezienie zbioru najbardziej wrażliwych konfiguracji. W takich konfiguracjach błędy parametrów kinematyki najbardziej wpływają na błąd położenia i orientacji chwytaka. Dlatego pomiary dla potrzeb kalibracji parametrów kinematyki powinny odbywać się w konfiguracjach najbardziej wrażliwych.

Z wyników obliczeń w punkcie czwartym wynika, że dla współczynników wagi $w_1 + w_6 = 1.0$ w dziesięciu najbardziej wrażliwych punktach dyskretyzacji współrzędne naturalne siłowników $\Theta_{,1} + \Theta_{,4}$ nie zmieniają się, zmienia się tylko $\Theta_{,5}$. Wrażliwości parametryczne $S_{17} + S_{14}$ oraz S_{17} w tych punktach także nie zmieniają się, zmieniają się tylko wrażliwości S_{15} i S_{16} .

W metodach praktycznych kalibracji, wykorzystujących zlinearyzowany różniczkowy błąd modelu kinematyki prostej, potrzebne są obliczenia macierzy Jakobiego J_p . Dlatego wspomniany w tej pracy program komputerowy WRAŻŁ może być użyteczny do opracowania programu komputerowego, wspomagającego taką kalibrację.

LITERATURA

1. Craig J.I.: Wprowadzenie do robotyki. WNT, Warszawa 1993.
2. Yoshikawa T.: Foundations of robotics. Analysis and Control. MIT Press. 1990.
3. Szkodny T.: „Forward and inverse kinematics of IRb-6 manipulator”. Mech. Mach. Theory, vol. 30, no. 7, Pergamon Press 1995, pp. 1039-1056.
4. Szkodny T.: „Dynamics of industrial robot manipulators”. Mech, Mach. Theory, vol. 30, no. 7, Pergamon Press 1995, pp. 1056-1072.
5. Szkodny T.: „Dynamics Model of Industrial Robots Manipulators for Calibration Mass Parameters”. Proc. The Fourth Int. Conf. on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. European Center for Peace and Development. Russia, Moscow, August 1998.
6. Szkodny T.: „Linear Form of Dynamics Model in Relation to Mass Parameters of Industrial Robots”. Proc. Int. Conf. on Contribution of Cognition to Modelling CCM'98. International Association for Advancement of Modelling and Simulation. France, Lyon , July 1998.
7. Tchoń K.: „Calibration of Manipulator Kinematics: A Singularity Theory Approach”. IEEE Trans. on Robotics Automat., vol. RA – 8, no. 5, pp. 671-678, 1992.
8. Khalil W., Gautier M., Enguehard C.: „Identifiable parameters and optimum Configurations for Calibration”. Robotica, vol. 9, 1991, pp. 63-70.
9. Roth Z.S., Mooring B.W., Ravani B.: „An over view of robot calibration”. IEEE J. Robotics Automat., vol. RA – 3, no. 5, 1987, pp. 377-384.
10. Sayech S., Newman W.S.: „A new technique for solving robot calibration equations with partially known constrains”. Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, IEEE. 1994, pp. 387-392.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Leszek Trybus

Abstract

In this paper it is focused on sensitivity analyses of position and orientation coordinates of IRb-6, IRp-6 and URP-6 gripper with references to errors of kinematics' parameters. Practical methods of kinematics' calibration make use of linear differential error of model which based on the Jacobian of direct kinematics' model with respect to geometrical parameters [7,8]. These methods use theory of minimum-square identification of kinematics' parameters, too [7,9,10]. Measurements are one of the step of calibration [7]. These measurements should be carried out for configuration when the errors of kinematics' parameters cause the largest errors of the gripper's positioning. These configurations were named as the most sensitive to errors of kinematics' parameters.

In this paper a set of the most sensitive configurations of IRb-6, IRp-6 and URP-6 manipulators is obtained. In the second point measures of sensitivity of the gripper's positioning to errors of kinematics' errors are proposed. In the third point an analytical form of the Jacobian of the gripper's positioning with respect to kinematics' parameters is calculated. In the fourth point the result of calculations which is obtained with the help of computer program WRAZL is presented. Set of 10 most sensitive configurations of IRb-6, IRp-6 and URP-6 manipulators is a final result of the calculations. The measurements for estimation of the correctness of calibration should be carried out in the most sensitive configurations.