

Dr inż. Rafał Kluz

Katedra Technologii Maszyn I Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska
E-mail: rkkmiop@prz.edu.pl

Dr inż. Andrzej Kubit

Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska
E-mail: akubit@prz.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp

Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska
E-mail: jszmiop@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński

Katedra Przeróbki Plastycznej
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska
E-mail: tomtrz@prz.edu.pl

Wpływ zmian temperatury na powtarzalność pozycjonowania robota przy montażu części o powierzchniach cylindrycznych

Keywords: *powtarzalność pozycjonowania, przestrzeń robocza robota, temperatura, prawdopodobieństwo połączenia części*

Streszczenie: W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ zmiany temperatury na błąd powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego. Wykazano, że po ustabilizowaniu się warunków termicznych błędy te można sklasyfikować jako błędy systematyczne. Wykazano również, że jeżeli w trakcie eksploatacji zrobotyzowanego stanowiska montażowego temperatura otoczenia nie może być wystarczająco ustabilizowana, błędy temperatury można opisać za pomocą jednostajnego rozkładu prawdopodobieństwa i w ten sposób uwzględnić w strukturze całkowitego błędu powtarzalności pozycjonowania. Błędy te na ogół stanowią niewielki udział w całkowitym błędzie robota, wówczas całkowity błąd powtarzalności pozycjonowania robota z dostateczną dokładnością można aproksymować normalnym rozkładem prawdopodobieństwa. W przeciwnym przypadku błąd ten może być przybliżony przy użyciu rozkładu płasko-normalnego. Wykazano że w zależności od wyboru miejsca realizacji zabiegu montażowego w przestrzeni stanowiska można uzyskać zarówno odmienne wartości prawdopodobieństwa połączenia części jak i różny wpływ błędów wywołanych niewielkimi zmianami temperatury na wartość tego prawdopodobieństwa. Uzyskane wyniki badań wskazują na potencjalne możliwości zwiększenia niezawodności procesu poprzez wybór miejsca w przestrzeni roboczej stanowiska charakteryzującego się najniższą wrażliwością na błędy spowodowane zmianami temperatury.

1. Wprowadzenie

Ważnym zagadnieniem z zakresu pracy zrobotyzowanego stanowiska montażowego jest problem zapewnienia wymaganego prawdopodobieństwa połączenia części, a więc zapewnienia wymaganej zdolności procesu montażu. Przydatność elementów do łączenia w jednostki montażowe jest pewną cechą zależną od konstrukcji elementu, sposobu łączenia i budowy stanowiska montażowego. Cechę tę można nazwać montowalnością. Podstawowym warunkiem osiągnięcia wysokiej niezawodności pracy stanowiska montażowego jest spełnienie warunku montowalności dla wszystkich łączonych części [14]. W rzeczywistości, na skutek pojawienia się błędów przypadkowych i systematycznych, nie zawsze w pełni można warunki te spełnić. W związku z tym za prawdopodobieństwo połączenia części można przyjąć stosunek liczby połączeń zmontowanych do liczby wszystkich połączeń. Z punktu widzenia niewodności pracy stanowiska korzystne jest zapewnienie wysokiego prawdopodobieństwa połączenia części gdyż skutkuje to zmniejszeniem kosztów jego eksploatacji na skutek mniejszej liczby przestojów [31].

Roboty przemysłowe będące głównym wyposażeniem stanowisk są dostarczane do użytkownika z bardzo skromną ilością informacji dotyczących ich dokładności. Najczęściej w dokumentacji technicznej podana jest jedynie informacja dotycząca powtarzalności pozycjonowania. Zasadniczo błędy pozycjonowania są wynikiem niedokładności wielu elementów robota. Do najważniejszych z nich można zaliczyć [2]:

- błędy sterownika spowodowane rozdzielczością urządzeń enkodera osi,
- algorytmiczne błędy interpolacji występujące podczas ruchu ramienia robota,
- błędy kinematyczne, które wynikają głównie z niedokładności kinematycznego modelu robota,
- błędy dynamiczne związane z układami serwomechanizmów, tarciami i bezwładnością podczas ruchu,
- błędy mechaniczne spowodowane niedokładnością wykonania, zużyciem węzłów, zużyciem łożysk oraz odchyłkami temperatury
- błędy wywołane podatnością ramion.

Najczęściej konstrukcja robotów złożona jest z belko-podobnych łączników (członów) o otwartym łańcuchu kinematycznym. Jeśli liczba członów robota wzrasta, struktura robota jest bardziej podatna na generowanie błędów związanych z dokładnością pozycjonowania, ze względu na niedokładności układu kinematycznego, bezwładność oraz zmianę temperatury środowiska pracy. W warunkach nieustabilizowanej temperatury pracy znaczący wpływ na dokładność robota wykazuje długość członów robota. Minimalizację efektu termicznego można uzyskać przez zastosowanie w konstrukcji robota materiałów o małej rozszerzalności cieplnej lub poprzez wdrożenie empirycznego modelu korekcji błędów na podstawie sygnałów wyjściowych z kilku czujników temperatury umieszczonych wewnątrz ramienia robota [30]. Aby uniknąć problemu rozszerzalności cieplnej łączników robota, producenci stosują termicznie stabilne materiały, takie jak tworzywa sztuczne wzmocnione włóknami lub stosują izolowane źródła ciepła [24]. Sam proces wytwarzania członów robota i węzłów kinematycznych wprowadza pewne różnice w wymiarach. W praktyce rzeczywista fizyczna pozycja zerowa i fizyczne położenie zerowe odczytywane przez sterownik robota jest obarczone błędami.

W wielu przypadkach znaczna część czynników wpływających na błąd robota podlega ciągłym zmianom, niekiedy przypadkowym, co prowadzi do różnic między modelami matematycznymi i charakterystykami rzeczywistymi [12, 15]. W literaturze przedmiotu można znaleźć prace mające na celu zmniejszenie błędów robota poprzez jego kalibrację, zastosowanie czujników laserowych i wizyjnych na końcówce interfejsu mechanicznego

robota [7, 13, 32], wybór miejsca optymalnego miejsca w przestrzeni robota [17] oraz wybór odpowiedniego kierunku dojazdu do pozycji nominalnej [16].

Procedura kalibracji robota składa się z czterech etapów [4]: modelowania, pomiaru, identyfikacji oraz kompensacji. W pracy [28] przeprowadzono analizę powtarzalności pozycjonowania robota ABB IRB1600 z wykorzystaniem trackera laserowego firmy FARO. Wyniki przedstawione przez autorów wykazały że przeprowadzenie kalibracji umożliwia trzykrotne zredukowanie błędu robota. W pracy [33] przedstawiono próbę kalibracji robota 6-DOF, z wykorzystaniem modelu MDH (Modified Denavit-Hartenberg model). Pomiar przeprowadzono z wykorzystaniem trackera Leica AT901 B. Maksymalna odchyłka pozycjonowania przed kalibracją wynosiła około 2500 μm , natomiast po kalibracji obniżono ją do wartości poniżej 1000 μm . Autorzy pracy [23] wskazują również trackery laserowe (tracker Faro Vantage) jako skuteczną metodę ustalania dokładności i powtarzalności odwzorowania zadanej trajektorii przez badanego robota. Ideę identyfikacji błędów dokładności i ich kalibrację z wykorzystaniem kamer CCD przedstawiono w pracy [1]. Zmierzona tą metodą odchyłka pozycjonowania robota przed kalibracją wynosiła 3250 μm , natomiast po kalibracji została zredukowana do 290 μm .

Powtarzalność pozycjonowania jest miarą zdolności robota do powrotu do tej samej pozycji [18], podczas gdy dokładność jest definiowana jako zdolność robota do precyzyjnego przemieszczania się do pożądanej pozycji w przestrzeni trójwymiarowej [18]. Procedury oceny powtarzalności i dokładności określono w międzynarodowej normie EN ISO 9283: 2003 [10].

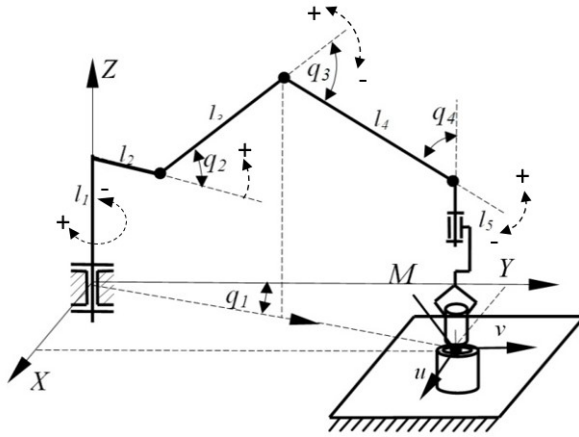
Mimo że wielu badaczy badało metody kompensacji błędów geometrycznych robotów, błąd związany z deformacją termiczną nie został szczegółowo omówiony w literaturze, jak zauważyli Eastwood i Webb w 2009 r. [8], Li i Zhao w 2016 r. [20]. Precyzja robotów i obrabiarek stale rośnie, co wymaga uwzględnienia coraz większej liczby czynników wpływających na ich dokładność. W rzeczywistych warunkach produkcyjnych w trakcie eksploatacji zrobotyzowanego stanowiska montażowego trudno jest zapewnić stabilne warunki otoczenia. Małe zmiany warunków otoczenia, w szczególności zmiany temperatury, są często przypadkowe. Dlatego skompensowanie ich wpływu wymaga zastosowania wizyjnych lub laserowych systemów pomiarowych, zwiększających koszt stanowiska [30]. W artykule przeanalizowano wpływ błędów wywołanych temperaturą na strukturę całkowitego błędu powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów zaproponowano metodykę sumowania błędów, którą wykorzystano do wyznaczenia wpływu zmian temperatury na prawdopodobieństwo połączenia części maszyn o powierzchniach cylindrycznych oraz zdolność jakościową procesu.

2. Błąd kinematyczny robota

Podczas realizacji procesu chwytak robota, w każdym momencie czasu, powinien zajmować całkowicie określone położenie w przestrzeni, zadane zaprogramowanymi wartościami współrzędnych konfiguracyjnych q_i . Dowolną pozycję charakterystycznego punktu M chwytaka (Rys. 1) można określić w przyjętym nieruchomym układzie współrzędnych $Axyz$ poprzez pewną funkcję współrzędnych konfiguracyjnych [6].

$$\begin{aligned}x &= x(q_1, q_2, \dots, q_n), \\y &= y(q_1, q_2, \dots, q_n), \\z &= z(q_1, q_2, \dots, q_n)\end{aligned}\tag{1}$$

W rzeczywistości wartości współrzędnych konfiguracyjnych odtwarzane są z pewnymi błędami Δq_i ($i = 1, 2, \dots, n$), w rezultacie czego rzeczywiste położenie części odbiega od zaprogramowanego (np. [27]). Miarą rozrzutu położenia lub orientacji rzeczywistych uzyskanych w wyniku n -krotnie powtarzanego ruchu o tym samym kierunku do położenia zadanego jest tzw. powtarzalność pozycjonowania robota [3].



Rys. 1. Struktura kinematyczna robota przemysłowego, realizującego proces montażu [17]

Jeżeli założy się, że błędy Δq_i zmiennych niezależnych q_i względem ich wartości nominalnych mają pewien dany rozkład normalny i że są one statystycznie niezależne to powtarzalność pozycjonowania będzie dwuwymiarową normalną zmienną losową będącą wektorem odchylenia położenia aktualnego od położenia nominalnego o parametrach określonych w następujący sposób [3]:

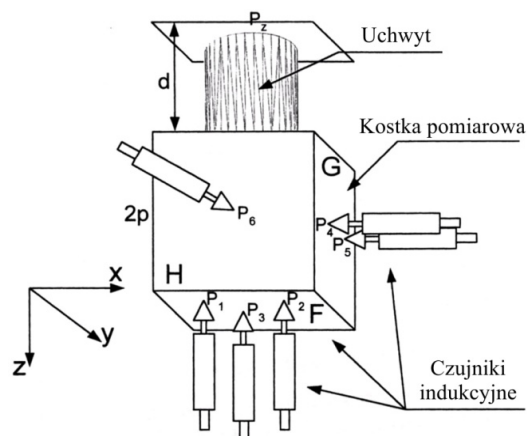
$$\sigma_{xk} = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial q_1}\right)^2 \sigma_{q_1}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial q_2}\right)^2 \sigma_{q_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial q_n}\right)^2 \sigma_{q_n}^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{yk} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial q_1}\right)^2 \sigma_{q_1}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial q_2}\right)^2 \sigma_{q_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial q_n}\right)^2 \sigma_{q_n}^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{zk} = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial q_1}\right)^2 \sigma_{q_1}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial q_2}\right)^2 \sigma_{q_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial q_n}\right)^2 \sigma_{q_n}^2} \quad (4)$$

Wyniki badań i ich analizę dla robota przemysłowego Mitsubishi RV- przedstawiono w pracy Kluza i Trzepiecińskiego [17]. Przeprowadzone badania wykazały, że błąd powtarzalności pozycjonowania robota w każdej z osi X, Y i Z kartezjańskiego układu współrzędnych można opisać za pomocą zmiennej losowej podlegającej normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa o wartości oczekiwanej równej 0 i odchyleniu standardowym σ_k ($N(0, \sigma_k)$).

Aby wyznaczyć błąd powtarzalności pozycjonowania robota montażowego, wykorzystano specjalne stanowisko pomiarowe, na którym mierzona jest pozycja bloku pomiarowego, zamontowanego w pneumatycznym chwytaku robota, za pomocą głowicy pomiarowej wyposażonej w sześć czujników indukcyjnych. Czujniki te wykonują odczyty na trzech powierzchniach sześcianu, prostopadłych względem siebie (Rys. 2).



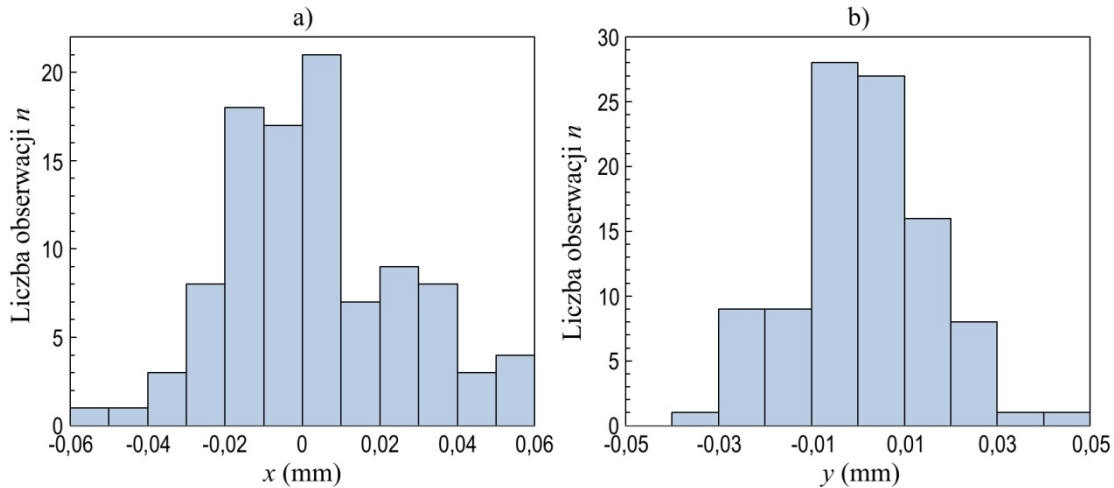
Rys. 2. System czujników indukcyjnych głowicy pomiarowej: P1-P6 – punkty pomiarowe; F, G, H – powierzchnie pomiarowe

Takie ustawienie umożliwia jednoznaczne określenie przesunięcia środka bloku testowego oraz powiązanie błędów kątowych i liniowych robota. Eksperymenty przeprowadzono za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczenia typu GT61 firmy TESSA, o zakresie pomiarowym ± 5 mm, błędzie histerezy $0,2 \mu\text{m}$ i współczynnika rozszerzalności liniowej $0,09 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$.

Badania powtarzalności pozycjonowania prowadzono w warunkach laboratoryjnych, zapewniających wymagane warunki otoczenia zarówno przez producenta jak i normę EN ISO 9283:2003. Aby nie doprowadzić do kolizji kostki pomiarowej z głowicą pomiarową i czujnikami robot między punktami poruszał się po linii prostej – interpolacja liniowa. W trakcie badań zauważono, że zmiana prędkości efektora od 10,7% do 65,1% prędkości maksymalnej nie wpływa w istotny sposób na wartość błędu powtarzalności pozycjonowania. Zwiększenie prędkości efektora z 65,1% do 100%, czyli do maksymalnej prędkości skutkowało znacznym wzrostem błędu (około 30%), dlatego badania prowadzono z maksymalną prędkością oraz obciążeniem maksymalnym (zgodnie z wymaganiami normy EN ISO 9283:2003), które dla robota Mitsubishi RV-M2 wynosi 2 kg. Daje to ponadto możliwość porównania uzyskanych wyników z maksymalną wartością błędu podaną w instrukcji robota ($\pm 0,1$ mm).

Tabela 1. Wartości parametrów zmiennych losowych błędu robota przemysłowego Mitsubishi RV-M2

Wartości współrzędnych konfiguracyjnych [rad]		Parametry normalnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa opisującego błąd robota wyznaczone na podstawie pomiarów				
		Zmienna losowa	Min [mm]	Maks [mm]	Odchylenie standardowe [mm]	Skośność
1	$q_1 = 0,5235$ $q_2 = 0,8726$ $q_3 = -1,3962$ $q_4 = -1,0471$	Parametry rozkładu wyznaczone teoretycznie: $\sigma_{xk} = 0,016$ mm, $\sigma_{yk} = 0,017$ mm, $\sigma_{zk} = 0,017$ mm				
		x	-0,032	0,043	0,014	0,067
		y	-0,054	0,057	0,018	0,287
		z	-0,051	0,050	0,017	0,075
2	$q_1 = 1,3963$ $q_2 = 0,3839$ $q_3 = -1,2217$ $q_4 = -0,7330$	Parametry rozkładu wyznaczone teoretycznie: $\sigma_{xk} = 0,021$ mm, $\sigma_{yk} = 0,016$ mm, $\sigma_{zk} = 0,016$ mm				
		x	-0,046	0,068	0,023	0,225
		y	-0,048	0,027	0,016	-0,406
		z	-0,053	0,059	0,018	0,045



Rys. 3. Histogramy przedstawiające błędy liniowe robota Mitsubishi RV – M2 w punkcie przestrzeni roboczej opisanej zbiorem współrzędnych uogólnionych podanych w tabeli 1, dla kierunku osi x (a) oraz y (b).

Wyniki pomiarów błędu powtarzalności pozycjonowania robota w dwóch przykładowych punktach przestrzeni roboczej przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 3. Testy statystyczne przeprowadzone na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wykazały, że błąd powtarzalności pozycjonowania może być opisany za pomocą zmiennej 2-D podlegającej rozkładowi Gaussa.

3. Błędy robota wywołane zmianą temperatury

Zgodnie z wymaganiami normy EN ISO 9283: 2003 [10] w sprawie kryteriów jakości i powiązanych metod badań manipulacyjnych robotów przemysłowych, badania muszą być prowadzone w stabilnych warunkach temperaturowych. W rzeczywistych warunkach produkcji temperatura otoczenia może się zmieniać, co ma bezpośredni wpływ na dokładność pozycjonowania robota.

W celu wyznaczenia błędu robota wynikającego ze zmiany temperatury otoczenia w założonym miejscu jego przestrzeni roboczej należy zmodyfikować schemat jego struktury kinematycznej oraz dokonać pewnych założeń. Kątowe wymiary ustawcze robota (wartości współrzędnych konfiguracyjnych q_i) należy przyjąć jako stałe, natomiast wymiary liniowe, które przykładowo w robocie RV – M2 nie mogą zmieniać swoich wartości należy zamodelować jako kinematyczne pary posuwisto – zwrotne, ustawiające się w położeniu l_i z odchyłką Δl_i . Jako odchyłkę Δl_i należy przyjąć wydłużenie członu ramienia robota o długości l_i spowodowane zmianą temperatury. Odchyłka Δl_i przyjmuje zatem postać funkcji zależnej od temperatury (T), współczynnika rozszerzalności liniowej (χ) i długości poszczególnych członów robota (l_i).

$$\Delta l_i = f(\chi, l_i, \Delta T) \quad (5)$$

Jeżeli ustawienie każdej z par kinematycznych obarczone jest pewnym błędem Δl_i to rzeczywista pozycja końcówki robota będzie przesunięta w stosunku do żądanej pozycji nominalnej o wektor p . Współrzędne końca tego wektora można zapisać w postaci:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n \frac{\partial X}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \quad (6)$$

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \quad (7)$$

$$\Delta z = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \quad (8)$$

Dla robota przemysłowego Mitsubishi RV-M2 będącego przedmiotem badań równania (6-8) przyjmują następującą postać:

$$\Delta x = \sin(q_1)\Delta l_2 + \sin(q_1)\cos(q_2)\Delta l_3 + \sin(q_1)\cos(q_2+q_3)\Delta l_4 + \sin(q_1)\cos(q_2+q_3+q_4)\Delta l_5 \quad (9)$$

$$\Delta y = \cos(q_1)\Delta l_2 + \cos(q_1)\cos(q_2)\Delta l_3 + \cos(q_1)\cos(q_2+q_3)\Delta l_4 + \cos(q_1)\cos(q_2+q_3+q_4)\Delta l_5 \quad (10)$$

$$\Delta z = \Delta l_1 + \sin(q_2)\Delta l_3 + \sin(q_2 + q_3)\Delta l_4 + \sin(q_2 + q_3 + q_4)\Delta l_5 \quad (11)$$

Znając wartość odchyłek Δl_i można w podany sposób wyznaczyć wartość błędu robota spowodowaną zmianami temperatury. Wyznaczenie odchyłek Δl_i na podstawie bezpośredniego pomiaru wymaga użycia specjalistycznego sprzętu pomiarowego. Ponadto luzy przekładni wywołujące błędy ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych Δq_i mogą częściowo kompensować temperaturowo wywołany wzrost długości poszczególnych członów robota. Korzystniejsze w tym przypadku jest wykorzystanie metody pośredniej, bazującej na znajomości układu kinematycznego robota. W tym celu dokonano pomiaru błędu robota w pięciu różnych punktach jego przestrzeni roboczej dokonując zmian temperatury Δt o 3°C , bez zmian współrzędnych konfiguracyjnych q_i , a następnie wyznaczono wartości odchyłek Δl_i rozwiązując układ równań:

$$\begin{cases} \Delta x_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial X}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \\ \Delta z = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \end{cases} \quad (12)$$

gdzie $k = 1, 2, \dots, n - 1$; n - liczba ramion robota.

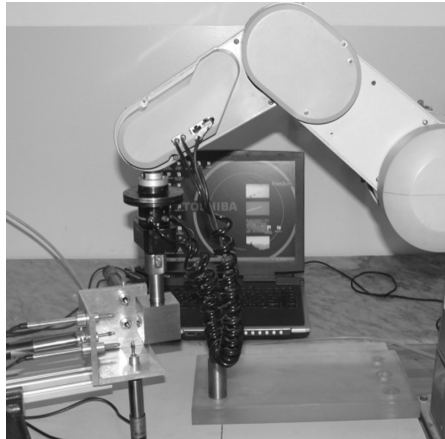
Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że wartości odchyłek Δl_i spowodowane zmianą temperatury wyniosły: $\Delta l_1 = 0,014$ mm, $\Delta l_2 = 0,005$ mm, $\Delta l_3 = 0,009$ mm, $\Delta l_4 = 0,007$ mm, $\Delta l_5 = 0,008$ mm. Aby ustalić czy błędy wywołane zmianą temperatury wpływają na charakter rozkładu zmiennej losowej błędu robota wywołanego błędami ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych przeprowadzono badania polegające na dojeździe kostką pomiarową (Rys. 4), do zadanego punktu w przestrzeni roboczej w dwóch różnych temperaturach otoczenia (20°C i 23°C) a następnie wyznaczano średnią arytmetyczną z próby, będącej zgodnym i nieobciążonym estymatorem wartości oczekiwanej μ .

Ponieważ badań dokonywano w punktach przestrzeni roboczej, dla których znane były wartości odchyłek standardowych błędu robota, do weryfikacji statystycznej badań wykorzystano parametryczny test istotności dotyczący wartości średniej. Dla każdej próby stawiano hipotezę o wartości przeciętnej $H: \mu = \mu_0$, tzn. że wartość przeciętna badanej cechy populacji jest równa danej liczbie μ_0 wyznaczonej podczas pomiaru błędu przy zwiększonej temperaturze otoczenia (tabela 2), przy założeniu, iż badana cecha populacji generalnej ma

rozkład $N(\mu, \sigma)$, wobec hipotezy alternatywnej $K: \mu = \mu_1 \neq \mu_0$. Do weryfikowania tej hipotezy wykorzystano statystykę testową U określoną wzorem:

$$U = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma} \sqrt{n} \quad (13)$$

która przy założeniu prawdziwości hipotezy $H: \mu = \mu_0$, dla liczby wyników pomiarów $n > 30$ [25], jest standaryzowaną zmienną losową normalną o rozkładzie $N(0,1)$. W trakcie badań pobrano próbę o licznosci $n = 100$.



Rys. 4. Widok głowicy pomiarowej wyposażonej w kostkę pomiarową i czujniki

W każdym z analizowanych przypadków, na poziomie istotności $\alpha=0.05$ wartość statystyki (11) nie należała do zbioru krytycznego $\left(-\infty, -u\left(1-\frac{1}{2}\alpha\right)\right) \cup \left(u\left(1-\frac{1}{2}\alpha\right), +\infty\right)$,

gdzie $u\left(1-\frac{1}{2}\alpha\right)$ jest kwantylem rzędu $1-\frac{1}{2}\alpha$ rozkładu $N(1,0)$. Nie było więc podstaw do odrzucenia hipotezy H . Oznacza to że błędy wywołane zmianami temperatury nie wpływają na postać rozkładu opisującego błędy robota lecz jedynie powodują zwiększenie lub zmniejszenie wartości średniej uzyskanych wyników. Wyniki pomiarów przemieszczenia chwytaka na skutek zmian temperatury oraz wartości średnie z próby w dwóch przykładowych punktach przestrzeni roboczej stanowiska montażowego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości błędu robota Mitsubishi RV – M2 wywołane zmianami temperatury otoczenia $\Delta T = 3^\circ\text{C}$

Współrzędne konfiguracyjne, (rad)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	$\bar{\Delta x}$ (mm)	$\bar{\Delta y}$ (mm)	$\bar{\Delta z}$ (mm)
$q_1 = 0,5235$ $q_2 = 0,8726$ $q_3 = -1,3965$ $q_4 = -1,0471$	0,008	0,014	0,009	0,007	0,016	0,011
$q_1 = 1,3963$ $q_2 = 0,3839$ $q_3 = -1,2217$ $q_4 = -0,7330$	0,017	0,003	0,004	0,020	0,003	0,006

Należy przy tym podkreślić że pomiary dokonywane były po ustabilizowaniu się warunków cieplnych otoczenia, tak aby wszystkie ramiona uzyskały jednakową temperaturę. W przypadku braku stabilizacji temperatury, bardzo trudno jest wyznaczyć wartości błędów robota, gdyż poszczególne ramiona robota nie zwiększają proporcjonalnie swej długości (wartości statystyki U (13) należą do zakresu krytycznego). Końcówka robota, zanim nastąpi stabilizacja cieplna mechanizmu będzie zmieniała swoją pozycję w stosunku do pozycji nominalnej, tzn. będzie przemieszczała się wewnątrz pewnego obszaru. Aby wyznaczyć ten obszar początek lokalnego układu odniesienia przyjęto w pozycji nominalnej. Aby zbadać jak będzie zmieniało się odchylenie pozycji tego punktu końcówki od jego pozycji idealnej, przyjęto że odchylenie Δl_r ustawienia jednej z par kinematycznych, które oznaczono liczbą r , będzie się zmieniało, a odchylenia dokładności ustawienia pozostałych par kinematycznych będą zachowywały stałe wartości. W tym celu należy Δl_r w równaniu (14):

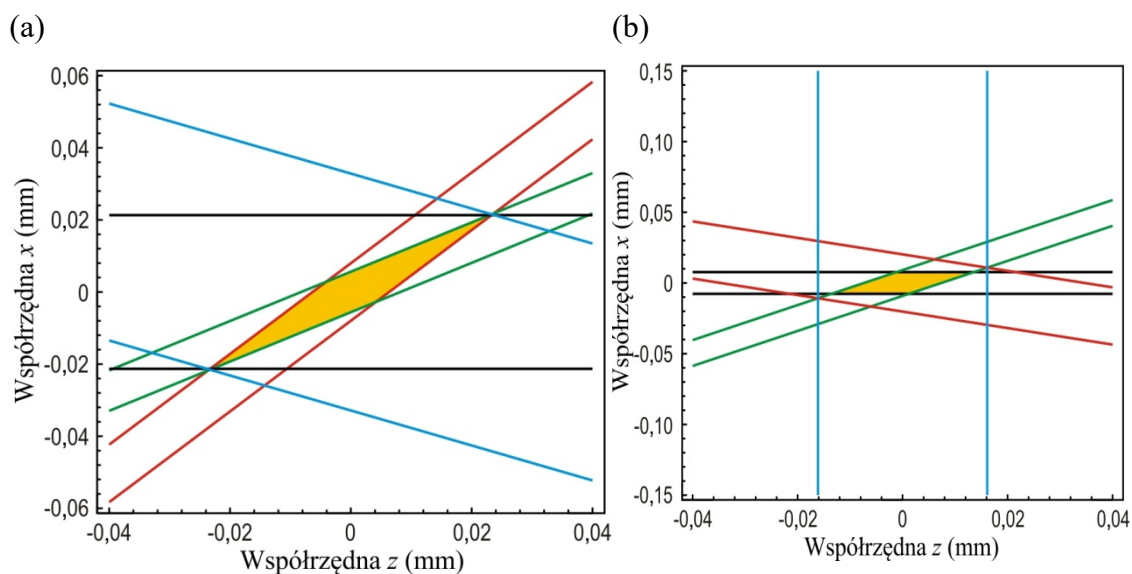
$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial l_1} \dots \frac{\partial Y}{\partial l_r} \dots \frac{\partial Y}{\partial l_i} \\ \frac{\partial Z}{\partial l_1} \dots \frac{\partial Z}{\partial l_r} \dots \frac{\partial Z}{\partial l_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta l_1(\chi_1, l_1, \Delta T) \\ \Delta l_r(\chi_r, l_r, \Delta T) \\ \Delta l_i(\chi_i, l_i, \Delta T) \end{bmatrix} \quad (14)$$

określające składowe wektora odchylenia końcówki roboczej od pozycji idealnej, przyjmując jako zmienny parametr.

Macierz różniczek zupełnych z równania (14) może być traktowana jako jacobianowa macierz współczynników wrażliwości robota na zmianę długości ogniów łańcucha kinematycznego spowodowanych oddziaływaniem temperatury. Zadanie to sprowadza się do znalezienia równania rodziny prostych równoległych we współrzędnych kartezjańskich:

$$\frac{\partial Y}{\partial l_r} z = \frac{\partial Z}{\partial l_r} y + \sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{\partial Y}{\partial l_r} \frac{\partial Y}{\partial l_i}}{\frac{\partial Z}{\partial l_r} \frac{\partial Z}{\partial l_i}} \right| \Delta l_i(\chi_i, l_i, \Delta T) \quad (15)$$

Dobierając odpowiednie wartości skrajnych odchyżeń Δl_i spowodowanych zmianami temperatury znajduje się dwie skrajnie położone proste z tej rodziny, określone równaniem (15). W taki sposób postępując kolejno w stosunku do wszystkich „umownych” par kinematycznych otrzymuje się wielobok dokładności pozycjonowania robota ze względu na błędy wywołane cieplnymi zmianami wymiarów liniowych robota, o równaniach tylu rodzin ile jest „umownych” kinematycznych par przesuwnych (o ilości boków $2n$). Wewnątrz niego znajdują się wszystkie możliwe wektory odchylenia pozycji końcówki roboczej od żądanej pozycji nominalnej. Znajdując najbardziej skrajne położenie wieloboku znajduje się największe przemieszczenie końcówki roboczej. Na rysunku 5 przedstawiono wieloboki tolerancyjne błędu robota wywołane zmianami temperatury w dwóch różnych punktach jego przestrzeni. Analiza rysunków wskazuje że maksymalne wartości błędów zależą nie tylko zmian temperatury, ale również od wyboru miejsca w przestrzeni robota. Otwiera to dodatkową drogę umożliwiającą zmniejszenie błędu robota poprzez wybór miejsca w jego przestrzeni charakteryzującego się najmniejszą wartością błędu, lub miejsca o najmniejszej wrażliwości na zmianę długości jego ramion spowodowaną zmianami temperatury.



Rys. 5. Wielobok błędu robota Mitsubishi RV-M2 spowodowanego zmianami temperatury w punkcie określonym współrzędnymi konfiguracyjnymi: (a) $q_1 = 0,5235$ rad, $q_2 = 0,6981$ rad, $q_3 = -0,3490$ rad, $q_4 = -1,0471$ rad; (b) $q_1 = 0,5235$ rad, $q_2 = 0,8726$ rad, $q_3 = -1,3962$ rad, $q_4 = -1,0471$ rad.

4. Randomizacja temperaturowego błędu robota

Błąd systematyczny wynikający ze zmiany temperatury może być kompensowany [np. 4, 9, 21, 29]. Wymaga to jednak to jednak ciągłego monitorowania wartości temperatury. Jeżeli natomiast robot pracuje w warunkach, w których nie ma możliwości ustabilizowania temperatury otoczenia wówczas poprawka jest nieznana. Związaną z nią wartość błędu można wyznaczyć na podstawie przewidywanego przedziału, w którym poprawka jest zawarta, czyli przyjąć się, że błąd systematyczny może przyjmować wartość z przedziału $\mu = (0 \pm \delta)$. W ten sposób można teoretycznie randomizować błąd systematyczny (temperaturowy).

Praktyczna randomizacja polega na zapewnieniu podczas badań rozrzutu błędów takich warunków, aby przy kolejnych pomiarach błąd systematyczny przyjmował przypadkowe wartości z przedziału $(0 \pm \delta)$ lub wartości skrajne. W tym przypadku wymagana jest jednak znajomość postaci rozkładu opisującego zmienność błędów systematycznych. Jeżeli na zrobotyzowanym stanowisku temperatura stabilizuje się na określonym poziomie, a najniższa temperatura pracy występuje równie rzadko jak najwyższa to randomizację błędu systematycznego można przeprowadzić z wykorzystaniem rozkładu normalnego, co znacznie upraszcza proces oceny dokładności robota.

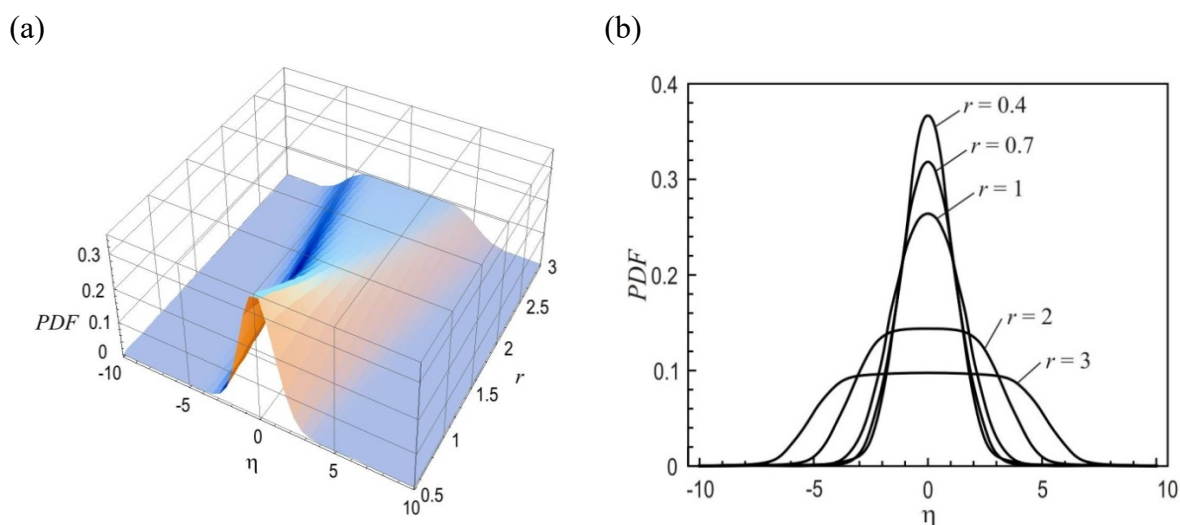
Jeżeli jednak istnieje jednakowe prawdopodobieństwo wystąpienia temperatury zarówno najniższej jak i najwyższej, to do uzmiennienia błędu należy wykorzystać rozkład jednostajny. Sytuacja taka może mieć miejsce w przypadku gdy nie nastąpi całkowita stabilizacja cieplna manipulatora. Splot rozkładu normalnego (powtarzalność) o funkcji gęstości $f_{Y_k}(y)$ i jednostajnego (błąd temperaturowy) o funkcji gęstości $f_{Y_l}(y)$ daje rozkład płasko-normalny. Funkcja gęstości tego rozkładu opisana jest zależnością:

$$PDF(\eta_y) = f_{Y_k+Y_l}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Y_l}(y) \cdot f_{Y_k}(s-y) \quad (16)$$

Funkcje gęstości tego rozkładu charakteryzują się na ogół stałą wartością w okolicach wartości oczekiwanej i zboczeniami opisanymi funkcją Gaussa (Rys. 6). Zakres stałości funkcji gęstości zależy od parametru r rozkładu, który określa stosunek odchylenia standardowego σ_t jego składowej prostokątnej do odchylenia standardowego σ_k jego składowej normalnej [11, 19]:

$$r = \frac{\sigma_t}{\sigma_k} \quad (17)$$

$$PDF(\eta_y) = \frac{1}{2\sqrt{6\pi r}} \int_{\eta-\sqrt{3}^*r}^{\eta+\sqrt{3}^*r} \exp\left[-\frac{\xi^2}{2}\right] d\xi \quad (18)$$



Rys. 6. (a) Funkcje gęstości rozkładu płasko-normalnego w zależności od współczynnika r oraz (b) wpływ wartości współczynnika r na kształt funkcji PDF

Z rysunku 6 wynika że jeżeli odchylenie standardowe σ_t błędu temperaturowego robota jest mniejsze lub równe wartości odchylenia standardowego σ_k błędu kinematycznego to postać rozkładu płasko-normalnego jest zbliżona do rozkładu Gaussa. Można więc założyć iż błąd całkowity powtarzalności pozycjonowania można w tym przypadku aproksymować w postaci normalnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa.

W celu weryfikacji przedstawionych założeń przeprowadzono badania powtarzalności pozycjonowania robota w punkcie pracy określonym współrzędnymi konfiguracyjnymi podanymi w tabeli 1, poz. 1 ($\sigma_y = 0,018$ mm). Wartości błędu robota Mitsubishi RV – M2 wywołane zmianami temperatury otoczenia w rozpatrywanym punkcie, po ustabilizowaniu warunków cieplnych wyniosły $\Delta y = \pm 0.016$ mm. Ze względu na fakt że celem badań była analiza wpływu błędów temperaturowych robota na strukturę całkowitego błędu powtarzalności pozycjonowania, badania prowadzono przy szerokim przedziale zmienności temperatury zapewniając w ten sposób znaczący wpływ tych błędów. W trakcie badań dokonywano zmian temperatury otoczenia w zakresie $\pm 3^\circ\text{C}$ bez oczekiwania na ustabilizowanie się temperatury ramion. Przyjęto również, że istnieje jednakowe prawdopodobieństwo wystąpienia temperatury z rozpatrywanego przedziału zmienności (rozkład jednostajny). Należy przy tym podkreślić, że podobny udział błędów temperaturowych może mieć miejsce przy mniejszych zmianach temperatury lecz w innych miejscach przestrzeni roboczej lub w przypadku robotów charakteryzujących się większą długością ramion [2, 7]. Założono, że błąd robota wywołany zmianami temperatury podlega

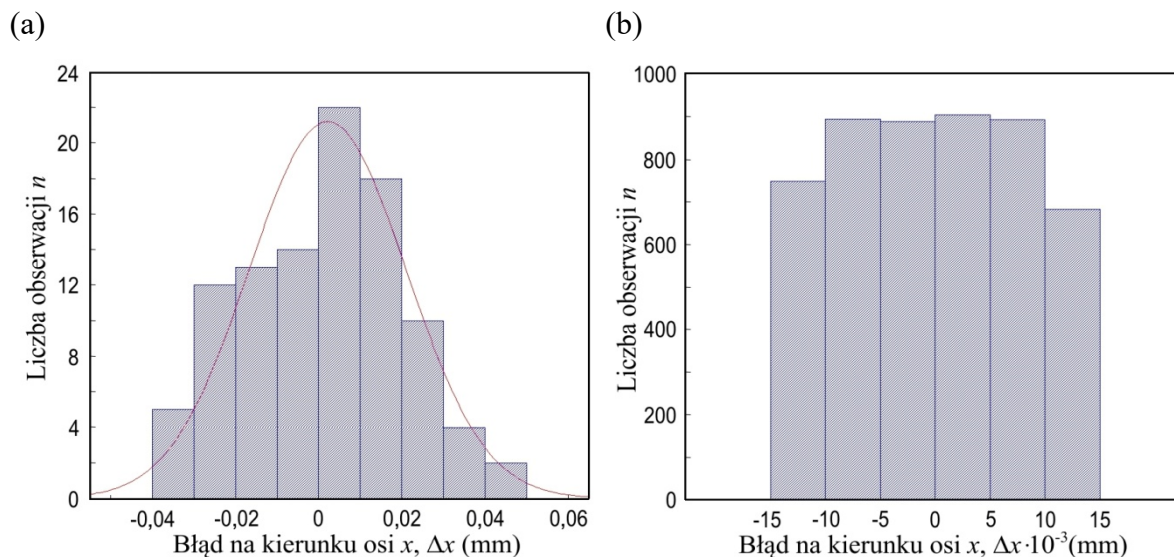
równomiernemu rozkładowi prawdopodobieństwa. Na tej podstawie wyznaczono wariancję randomizowanego rozkładu zmiennej losowej:

$$\sigma_t^2 = \frac{(\Delta y_{t\max} - \Delta y_{t\min})^2}{12} = 8.1 \cdot 10^{-5} \text{ mm} \quad (19)$$

Następnie wyznaczono wariancję rozkładu wynikowego:

$$\sigma_{\eta'}^2 = \sigma_{yk}^2 + \sigma_{yt}^2 = 3.89 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2 \quad (20)$$

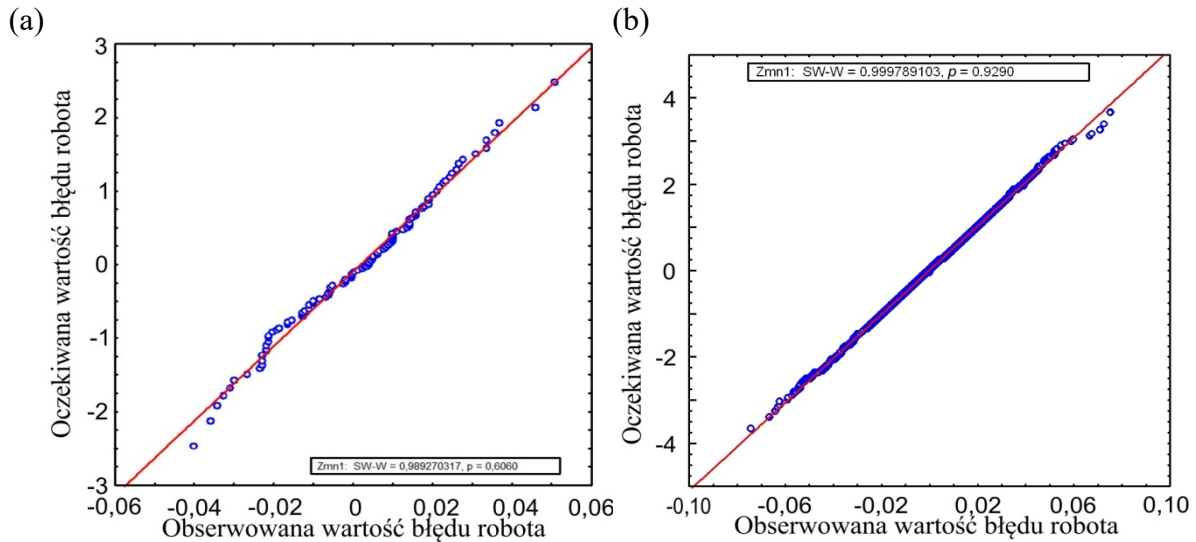
Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilk [25, 26] mających na celu sprawdzenie normalności rozkładu zmiennej losowej. W trakcie badań stawiono hipotezę zerową H_0 , że rozkład badanej cechy jest rozkładem normalnym oraz alternatywną H_1 , że rozkład badanej cechy nie jest rozkładem normalnym. Dla $\alpha = 0,05$, $n = 100$, stabilizowana wartość krytyczna $W(\alpha, n) = W(0,05; 100) = 0,964$ była mniejsza od wartości obliczonej, co oznaczało że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu uzyskanych danych. Histogramy uzyskanych wyników oraz wykres normalności uzyskanych wyników przedstawiono na rysunkach 7a i 8a.



Rys. 7. (a) Histogram wyników pomiaru błędu powtarzalności pozycjonowania robota z uwzględnieniem błędów temperaturowych oraz (b) histogram zmiennej losowej błędu robota wywołanych zmianami temperatury

Analiza wyników badań wskazuje, że w przypadku gdy odchylenie standardowe zmiennej losowej wywołanej zmianami temperatury (rozkład jednostajny) stanowi 50% odchylenia standardowego błędu kinematycznego robota to całkowity błąd robota z dostateczną dokładnością można aproksymować rozkładem normalnej zmiennej losowej. Ponieważ licznosc próby w przeprowadzonym eksperymencie $n = 100$ mogła być zbyt mała dla potwierdzenia przedstawionych założeń, przeprowadzono w dalszej części analizy badania symulacyjne.

W trakcie badań wygenerowano 5000 pseudolosowych wartości błędu podlegających rozkładowi normalnemu o parametrach uzyskanych na podstawie pomiarów (tabela 1) oraz rozkładu jednostajnego symulowanego w trakcie eksperymentu (rys. 7b).



Rys. 8. Wykres zgodności wyników eksperymentalnych(a) oraz wyników symulacji (b) błędu robota z rozkładem normalnym.

Następnie wyniki będące kompozycją przedstawionych rozkładów zmiennej losowej poddano badaniu zgodności z rozkładem normalnym. Również i w tym przypadku zastosowany test Shapiro-Wilk wykazał że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności uzyskanych wyników z rozkładem normalnym (rys. 8b). Wyniki przeprowadzonej symulacji potwierdzają zatem wyniku badań eksperymentalnych.

5. Prawdopodobieństwo połączenia części

Ważnym zagadnieniem z zakresu pracy zrobotyzowanego stanowiska montażowego jest problem zapewnienia wymaganego prawdopodobieństwa połączenia części. Zadania związane z robotyzacją montażu można znacznie ułatwić dokonując dekompozycji połączeń według kształtów powierzchni, którymi są złączane montowane części. Z tego punktu widzenia montaż typowych połączeń można rozpatrywać jako typowy szereg czynności łączenia części z powierzchniami płaskimi, walcowymi, stożkowymi, kulistymi, gwintowymi i in. . Wśród nich połączenia z powierzchniami cylindrycznymi stanowią około 40% ogólnej liczby połączeń [5]. Ponieważ w przeważającej liczbie przypadków roboty wykorzystywane są do realizacji procesu montażu części cylindrycznych z gwarantowanym luzem [22], w dalszej części pracy ograniczono się to takiego właśnie przypadku.

Błąd powtarzalności pozycjonowania robota powodujący względne przemieszczenie osi łączonych części stanowi dwuwymiarowa zmienną losową $X = [x, y]^T$ podlegająca normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa o macierzy kowariancji Λ_k i macierzy wartości oczekiwanych μ_k^T .

$$f(X) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Lambda_k|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X - \mu_k)^T \Lambda_k^{-1}(X - \mu_k)\right] \quad (21)$$

Elementy macierzy kowariancji Λ_k odpowiadają brzegowym odchyleniom standardowym przedstawionym w tabeli 1. Jeżeli w trakcie eksploatacji zrobotyzowanego stanowiska montażowego następują niewielkie zmiany temperatury powodujące losowe przemieszczenie wartości średnich błędów to całkowity błąd powtarzalności pozycjonowania

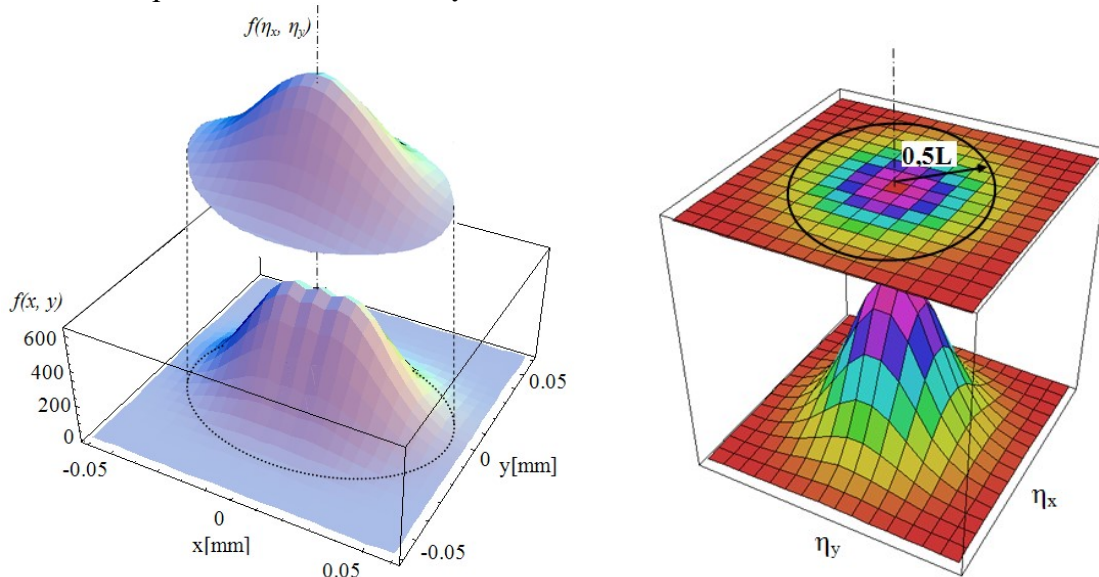
dla $r < 1$ można opisać dwuwymiarową normalną zmienną losową o macierzy kowariancji A_η i macierzy wartości oczekiwanych μ_η^T .

Prawdopodobieństwo połączenia części cylindrycznych jest prawdopodobieństwem zdarzenia, że odległość między ich osiami osiągnie pewną założoną wartość $0.5L(\eta_1, \eta_2)$, tzn. prawdopodobieństwo zdarzenia, że zmienna losowa opisująca odległość pomiędzy osiami kojarzonych części znajdzie się wewnątrz pewnego hipotetycznego cylindra o środku znajdującym się w punkcie nominalnym N i średnicy odpowiadającej luzowi montowanego połączenia L. Aby wyznaczyć wartość tego prawdopodobieństwa należy dokonać całkowania funkcji łącznej gęstości prawdopodobieństwa rozkładu błędu względnego przemieszczenia osi części w obszarze $O: \{ \eta_x^2 + \eta_y^2 \leq (0,5 L)^2 \}$:

$$P = \iint_{\eta_x^2 + \eta_y^2 \leq (0,5L)^2} \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Lambda_\eta|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\eta - \mu_\eta)^T \Lambda_\eta^{-1}(\eta - \mu_\eta)\right] d\eta_x d\eta_y \quad (22)$$

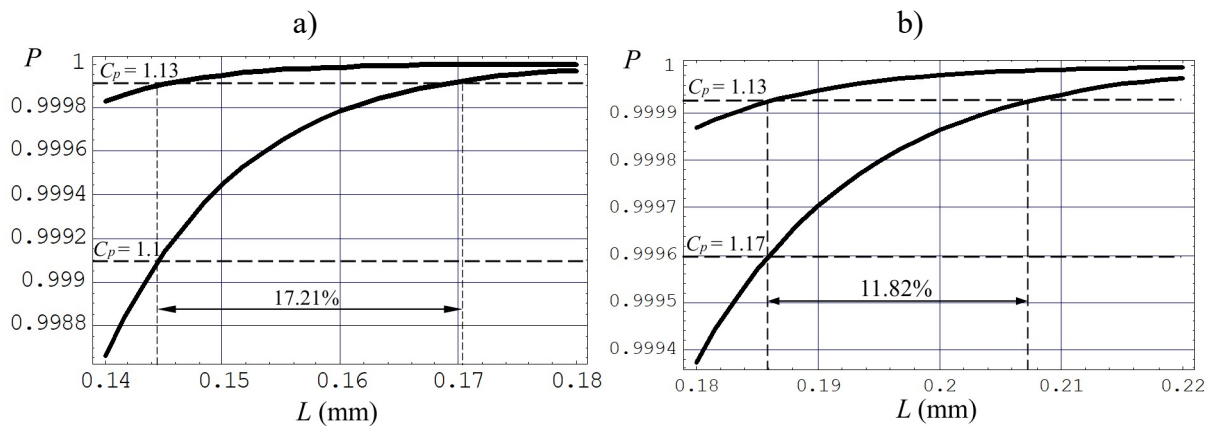
gdzie: Λ_η – macierz kowariancji zmiennej losowej błędu względnego przemieszczenia osi części,

μ_η^T – macierz wartości oczekiwanych zmiennej losowej błędu względnego przemieszczenia osi części.



Rys. 9. Sposób wyznaczania prawdopodobieństwa połączenia części cylindrycznych: a) zmienna losowa błędu przemieszczenia osi części $f(\eta_x, \eta_y)$, b) obszar całkowania zmiennej losowej $f(\eta_x, \eta_y)$

Wystąpienie zmian temperatury w trakcie realizacji procesu montażu prowadzi do zwiększenia błędu robota co skutkuje zmniejszeniem prawdopodobieństwa połączenia części i niezawodności całego procesu. W zależności od miejsca realizacji połączenia w przestrzeni roboczej stanowiska można uzyskać różną wartość prawdopodobieństwa połączenia części. W przypadku realizacji zabiegu montażowego w punkcie charakteryzującym się wartością błędów podaną w tabeli 1 poz. 1. zmiana temperatury powoduje obniżenie prawdopodobieństwa a zatem również zdolności jakościowej procesu C_p o 17,8% (z wartości 1,33 do 1,1). Zapewnienie wymaganego poziomu zdolności jakościowej procesu ($C_p = 1,33$) wymaga zwiększenia luzu połączenia o 17,21%.



Rys.10. Wpływ zmian temperatury na prawdopodobieństwo połączenia części: a) w punkcie określonym w poz.1 tab.1, b) w punkcie określonym w poz.2 tab.1

Z kolei w punkcie pracy robota odpowiadającym parametrom zamieszczonym w tabeli 1 poz. 2. dla luzu połączenia równego $L=0,145\text{mm}$ można uzyskać o 24,81% mniejszą zdolność jakościową procesu ($C_p = 1$). Wynika to z faktu, że w punkcie tym robot posiada znacznie większą wartość błędu powtarzalności pozycjonowania. Zmiana wartości temperatury również i w tym punkcie powoduje obniżenie zdolności jakościowej procesu z wartości $C_p = 1,33$ do $C_p = 1,17$ a więc o 12%. Zapewnienie wymaganego prawdopodobieństwa połączenia części (odpowiadającego zdolności jakościowej procesu na poziomie $C_p = 1,33$) jest możliwe poprzez zwiększenie luzu połączenia (o 12%). Zatem w zależności od wyboru miejsca realizacji zabiegu montażowego w przestrzeni roboczej stanowiska można uzyskać różny poziom zdolności jakościowej procesu oraz różny wpływ błędów związanych z brakiem możliwości ustabilizowania temperatury otoczenia na prawdopodobieństwo połączenia części.

6. Podsumowanie i wnioski

Roboty przemysłowe zostały z powodzeniem wykorzystane w wielu dziedzinach produkcji jak spawanie, zgrzewanie, manipulacja. W ostatnich latach wzrosło jednak zainteresowanie wielu ośrodków naukowych dotyczące możliwości wdrożenia ich do procesów wymagających dużej precyzji jak montaż czy pomiary. Zapewnienie wysokiej niezawodności tych procesów wymaga uwzględnienia wszystkich czynników wpływających na ich powtarzalność pozycjonowania. Do najważniejszych z nich można zaliczyć błąd kinematyczny wynikający z błędów ustawienia zaprogramowanych wartości współrzędnych konfiguracyjnych a także błędy wywołane zmianami temperatury otoczenia robota.

W pracy wykazano, że jeżeli w trakcie eksploatacji zrobotyzowanego stanowiska temperatura otoczenia może zmieniać się w niewielkim przedziale skorygowanie błędu z tym związanego może okazać się bardzo trudne. Przyjęcie wówczas maksymalnej wartości błędu wydaje się mało uzasadnione, gdyż błąd ten może być częściowo kompensowany błędem kinematycznym podlegającym normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa. Przeprowadzone badania wykazały, że błąd ten można w praktyczny sposób zrandomizować na podstawie spodziewanego przedziału zmienności w postaci jednostajnego rozkładu prawdopodobieństwa. W przypadku gdy stosunek odchylenia standardowego błędu temperaturowego σ_t do odchylenia standardowego błędu kinematycznego σ_l jest mniejszy niż $r < 1$, rozkład całkowitego błędu powtarzalności pozycjonowania z dostateczną dokładnością można aproksymować normalnym rozkładem prawdopodobieństwa. Gdy wartość współczynnika jest większa $r > 1$ błąd ten podlega rozkładowi płasko-normalnemu.

W pracy wykazano że wykonywanie zabiegu montażowego w niestabilnych warunkach otoczenia dotyczących temperatury wpływa na obniżenie prawdopodobieństwa połączenia części oraz zdolności jakościowej procesu. W zależności od wyboru miejsca w przestrzeni stanowiska zapewnienie wymaganego poziomu montowalności części wymaga zwiększenia luzu połączenia od 12 do 17%. W przeciwnym wypadku należy się liczyć ze zmniejszeniem zdolności jakościowej procesu a tym samym również obniżeniem niezawodności pracy stanowiska. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wymaganą niezawodność procesu można uzyskać poprzez wybór odpowiedniego miejsca realizacji procesu odznaczającego się najmniejszą wartością błędu oraz wrażliwością na zmianę warunków otoczenia

Literatura

1. Abderrahim M, Khamis A, Garrido S, Moreno L. Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators. [in:] Hua L K. Industrial Robotics- Programming, Simulation and Applications. ARS/pIV: Germany, 2006.
2. Angelidis A, Vosniakos G C, Prediction and compensation of relative position error along industrial robot end-effector paths. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2014; 15(1): 63-73.
3. Brethé J F, Vasselin E, Lefebvre D, Dakyo B. Modeling of repeatability phenomena using the stochastic ellipsoid approach. Robotica 2006; 24(4): 477-490.
4. Chen H, Fuhlbrigge T, Choi S, Wang J, Li X. Practical industrial robot zero offset calibration, Proceedings of the 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering; 2008 Aug 23-26; Washington; 2008. p. 516–521.
5. Cho N, Tu J F. Quantitative circularity tolerance analysis and design for 2D precision assemblies. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2002; 42(13): 1391-1401.
6. Craig J J. Introduction to robotics: Mechanics and control. Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
7. Du G., Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 2013; 29 (1): 484–492.
8. Eastwood S, Webb P, Compensation of thermal deformation of a hybrid parallel kinematic machine. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 2009; 25(1): 81-90.
9. Elatta A, Gen L P, Zhi F L, Daoyuan Y, Fei L. An overview of robot calibration. Information Technology Journal 2004; 3(1): 74-68.
10. EN ISO 9283:2003, Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods. Geneva: International Standards Organization, 2003.
11. Fotowicz P. Systematic effect as a part of the coverage material. Metrology and Measurement Systems 2010; 17(3): 439-446.

12. Gong C, Yuan J, Ni J. Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. *International Journal of Machine Tools Manufacturing* 2000; 40(14): 2119-2137.
13. Gürsel A, Bijan S. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory* 2005; 40 (8): 879–906.
14. Hameed Farhan U, Tolouei-Rad M, Osseiran A. Assembly modelling approach for special purpose machines. *Assembly Automation* 2018; 38 (2):158-172.
15. Heisel U, Richter F, Wurst K H. Thermal behaviour of industrial robots and possibilities for error compensation. *CIRP Annals* 1997; 46(1): 283-286.
16. Józwik J, Ostrowski D, Jarosz P, Mika D. Industrial robot repeatability testing with high speed camera Phantom. v2511. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2016; 10(32): 86-96.
17. Kluz R, Trzepieciński T, The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm. *Assembly Automation* 2014; 34(3): 285-295.
18. Kluz R, Trzepieciński T. Analysis of optimal orientation of robot gripper for an improved capability assembly process. *Robotics and Autonomous Systems* 2015; 74: 253-266.
19. Kluz R. Effect of temperature-induced errors on accuracy of robotised assembly stand with Mitsubishi RV-2 robot. *Technology and Automation Assembly* 2004; 2: 19-24.
20. Li R, Zhao Y. Dynamic error compensation for industrial robot based on thermal effect model. *Measurement* 2016; 88: 113-120.
21. Nguyen H N, Zhou J, Kang H J. A new full pose measurement method for robot calibration. *Sensors* 2013; 13(7): 9132-9147.
22. Pitchandi N, Perumaal S S, Irulappan M. Insertion force analysis of compliantly supported peg-in-hole assembly. *Assembly Automation* 2017; 37 (3): 285-295.
23. Płaczek M, Piszczek Ł. Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (3): 455–464.
24. Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools – a review: Part II: Thermal errors. *International Journal of Machine Tools Manufacturing* 2000; 40(9): 1257–1284.
25. Ruppert D. *Statistics and finance. An introduction.* New York: Springer, 2004.
26. Shapiro S S, Wilk M B. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 1965; 52(3/4): 591–611.

27. Shiakolas P S, Conrad K L, Yih T C. On the accuracy, repeatability and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *International Journal of Modelling and Simulation* 2002; 22(4): 1–10.
28. Slamani M., Nubiola A, Bonev I. Assessment of the positioning performance of an industrial robot. *Industrial robot: An International Journal*, 2012; 39(1): 57–68.
29. Wu Y, Klimchik A, Caro S, Furet B, Pashkevich A. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2015; 35: 151–168.
30. Yin S, Guo Y, Ren Y, Zhu J, Yang S, Ye S. Real-time thermal error compensation method for robotic visual inspection system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2014; 75(5-8): 933–946.
31. Yu H, Zhang G, Ran Y, Li M, Wang Y. A comprehensive and practical reliability allocation method considering failure effects and reliability costs. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(2): 244–251.
32. Yu Z, Shi Q, Wang H, Yu N, Huang Q, Fukuda T. .How to achieve precise operation of a robotic manipulator on a macro to micro/nano scale. *Assembly Automation* 2017; 37 (2):186-199.
33. Zhenhua W, Hui X, Guodong C, Rongchuan S, Sun L.: A distance error based industrial robot kinematic calibration method. *Industrial Robot: An International Journal*, 2014; 41(5): 439–446.