



Jerzy Józwik

Dawid Ostrowski

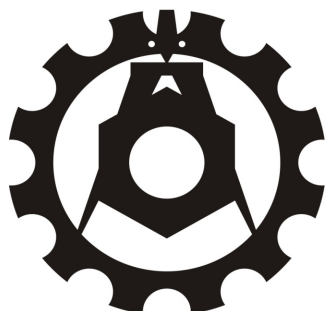
Wybrane problemy badawcze robotów przemysłowych



MONOGRAPHIE

Wybrane problemy badawcze robotów przemysłowych

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Jerzy Józwik
Dawid Ostrowski

Wybrane problemy badawcze robotów przemysłowych



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Lipski, Politechnika Lubelska

dr hab. inż. Olaf Ciszak, Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Paweł Majda, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Redakcja i skład: Krzysztof Dziedzic, Dawid Ostrowski

Fotografia na okładce: YASKAWA

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-235-2

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	7
Wprowadzenie	10
1. Podstawowe definicje robotyki.....	13
1.1. Definicja robotyki	13
1.2. Podstawowe definicje dotyczące robotów przemysłowych	14
2. Budowa i zastosowanie robotów przemysłowych	16
2.1. Budowa jednostki kinematycznej	16
2.2. Klasyfikacja robotów przemysłowych	16
2.3. Sterowanie.....	23
2.4. Rodzaje napędów	25
2.5. Zastosowania robotów przemysłowych	26
3. Dokładność robotów przemysłowych.....	33
3.1. Podstawowe definicje	33
3.2. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania	39
3.3. Źródła błędów dokładności i powtarzalności pozycjonowania.....	44
3.4. Metody badania dokładności robotów przemysłowych	47
3.5. Niepewność i czynniki na nią wpływające	63
3.6. Diagnostyka robotów przemysłowych.....	66
4. Metodyka badań eksperymentalnych.....	68
4.1. Przedmiot badań i stanowisko pomiarowe.....	68
4.2. Urządzenia pomiarowe	72
5. Badania dokładności robota z wykorzystaniem interferometrii laserowej.....	78
5.1. Przebieg pomiaru	78
5.2. Analiza wyników i wnioski.....	83
5.3. Szacowanie niepewności pomiaru interferometrem laserowym.....	89
6. Badania dokładności robota z zastosowaniem teleskopowego pręta kinematycznego	97
6.1. Przebieg pomiaru	97
6.2. Wyniki pomiarów	100
6.3. Szacowanie niepewności pomiaru kinematycznym prętem teleskopowym	105
7. Badania powtarzalności pozycjonowania robota z zastosowaniem szybkiej kamery wizyjnej	108
7.1. Przebieg pomiaru	108
7.2. Wyniki pomiarów	111
7.3. Szacowanie niepewności pomiaru szybkołatkową kamerą wizyjną.....	118
8. Badania powtarzalności pozycjonowania robota z zastosowaniem systemu pomiarowego PONTOS.....	121

8.1. Przebieg pomiaru	121
8.2. Wyniki pomiarów	123
Literatura.....	132
Spis rysunków.....	136
Spis tabel.....	143
Załączniki.....	144

Wykaz ważniejszych oznaczeń

AP	–	dokładność pozycji
AP_p	–	dokładność pozycjonowania
RP	–	powtarzalność pozycji
vAP	–	wielokierunkowe odchylenie dokładności pozycji
AD	–	dokładność odległości
RD	–	powtarzalność odległości
t	–	czas stabilizacji pozycji
OV	–	przeregulowanie pozycji
E	–	zmiennosc środka ciężkości pozycji osiągniętych
AT	–	dokładność ścieżki
RT	–	powtarzalność ścieżki
AP_x, AP_y, AP_z	–	dokładność pozycji w określonych kierunkach x, y, z
AP_a, AP_b, AP_c	–	dokładność orientacji dla zadanych kątów a, b, c
G	–	środek ciężkości zbioru osiągniętych pozycji
RP_l	–	promień kuli o środku w punkcie G
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	–	współrzędne środka ciężkości punktów osiągniętych w przestrzeni roboczej uzyskanej poprzez n -krotne najazdy do pozycji zadanej
x_c, y_c, z_c	–	współrzędne zadanej pozycji
x_j, y_j, z_j	–	współrzędne rzeczywistego położenia przy j -tej próbie osiągnięcia pozycji zadanej.
$\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$	–	średnie wartości kątów zadanej pozycji
a_j, b_j, c_j	–	wartości kątów j -tej pozycji osiągniętej
$P_1, P_2 \dots P_n$	–	punkty pomiarowe
S_a, S_b, S_c, S_j	–	odchylenia standardowe określonych parametrów
l_j	–	odległość pomiędzy j -tą pozycją osiągniętą a środkiem ciężkości osiągniętych pozycji
vAP_p	–	maksymalna odległość pomiędzy środkami ciężkości punktów osiągniętych między końcami różnych ścieżek pomiarowych
$vAP_\alpha, vAP_\beta, vAP_\gamma$	–	maksymalna różnica pomiędzy wartością średnią kątów osiągniętych na końcach różnych ścieżek pomiarowych
h, k_s	–	oznaczenia kierunku ścieżki pomiarowej
f_1	–	częstotliwość wiązki lasera
f_D	–	częstotliwość wynikająca z efektu Dopplera
c	–	prędkość światła
v_r	–	prędkość przesuwu reflektora ruchomego interferometru
L_r	–	przesunięcie reflektora ruchomego interferometru
N	–	liczba impulsów

λ	–	długość fali świetlnej
X, Y, Z	–	osie kartezjańskiego układu współrzędnych
v_f	–	prędkość liniowa przesuwu narzędzia (efektora)
n_p	–	liczba punktów pomiarowych
$A \uparrow, A \downarrow$	–	jednokierunkowa dokładność pozycjonowania
A	–	dwukierunkowa dokładność pozycjonowania
$R \uparrow, R \downarrow$	–	jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania
R	–	dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania
R_p	–	powtarzalność pozycjonowania w wybranej płaszczyźnie
B	–	osiowa wartość zwrotna
r	–	promień ścieżki o zarysie kołowym
Δ_o	–	średnia odchyłka okrągłości
U	–	niepewność rozszerzona pomiaru
k	–	współczynnik rozszerzenia
k_p	–	współczynnik powiększenia
u_c	–	złożona niepewność standardowa
u_A	–	niepewność standardowa szacowana metodą A
u_B	–	niepewność standardowa szacowana metodą B
u_{Bcos}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ błędu cosinusa
u_{BAbb}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ błędu Abbego
u_{Bdrm}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ błędu drogi martwej
u_{Bprz}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ maksymalnego błędu granicznego przyrządu
u_{BT}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ maksymalnego błędu granicznego czujnika temperatury
$u_{B\alpha}$	–	niepewność standardowa wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej α
u_{BP}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ błędu wycentrowania
u_{BE}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ błędu kalibracji
u_{BK}	–	niepewność standardowa kalibracji
u_{BR}	–	niepewność standardowa uwzględniająca wpływ rozdzielczości
E_K	–	błąd kalibracji
MPE	–	maksymalny błąd graniczny szacowany przez producenta (dla $k = 2$)

- MPE_T – maksymalny błąd graniczny sensora temperatury
- R_p – rozmiar pojedynczego piksela z uwzględnieniem współczynnika powiększenia
- l_{px} – wymiar pojedynczego piksela
- α – współczynnik rozszerzalności cieplnej
- $\Delta\alpha$ – odchyłka graniczna współczynnik rozszerzalności cieplnej
- MIG – metoda spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych (Metal Inert Gas)
- MAG – metoda spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych (Metal Active Gas)
- TIG – metoda spawania elektrodą nietopliwą (wolframową) w osłonie gazów obojętnych (Tungsten Inert Gas)

Wprowadzenie

Przedsiębiorstwa produkcyjne, chcąc utrzymać się na rynku muszą zachować konkurencyjność, umożliwiającą spełnianie wymagań klientów. Możliwe jest to między innymi poprzez zmniejszanie kosztów produkcji oraz podwyższanie niezawodności, jakości i trwałości produktu. Jedną z dróg do zwiększenia szybkości reagowania na potrzeby odbiorców jest automatyzacja i robotyzacja systemów produkcyjnych. Umożliwia ona bardziej efektywne wykorzystanie kwalifikacji pracowników, parku maszynowego oraz przyspieszenie i poprawę jakości produkcji.

Roboty pozwalają na odciążenie pracowników w trudnych i męczących czynnościach. W przeciwieństwie do człowieka, motoryka pracy robota jest stała. Oznacza to, że może on pracować bez zmniejszenia wydajności niezależnie od pory dnia, braku przerw czy ciężkich warunków pracy, związanych np. z nadmiernym hałasem, zapyleniem czy też szkodliwymi czynnikami chemicznymi. Roboty, swoje szerokie zastosowanie w przemyśle zawdzięczają elastyczności oraz możliwości programowania pracy według potrzeb. Wykorzystywane są w przemyśle samochodowym, metalowym, stoczniowym, spożywczym, chemicznym i wielu innych.

Ważną cechą robotów przemysłowych jest ich dokładność. Ma to szczególnie znacznie przy wykonywaniu czynności wymagających dużej precyzji podczas np. montażu czy obróbki mechanicznej elementów. Niestety, roboty tak jak wszystkie inne maszyny w czasie eksploatacji ulegają zużyciu, co objawia się między innymi pogorszeniem ich parametrów funkcjonalnych i właściwości użytkowych. Często pogarsza się dokładność i powtarzalność pozycjonowania. W celu zapewnienia wymaganej jakości wyrobów oraz odpowiednich warunków pracy, istotną jest kontrola stanu technicznego użytkowanych robotów, polegająca m.in. usystematyzowanym sprawdzaniu ich dokładności i powtarzalności pozycjonowania.

Celem pracy jest przedstawienie wybranych problemów badawczych oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego, metod i sposobów prowadzenia takich badań z zastosowaniem różnych metod pomiarowych. Założenia badawcze obejmują również ocenę czynników wpływających na parametry dokładności robotów przemysłowych.

Z uwagi na zgromadzony, monolityczny tematycznie materiał badawczy, monografia adresowana dla studentów wyższych uczelni technicznych i osób zainteresowanych zawodowo wykorzystaniem robotów w działalności produkcyjnej przedsiębiorstw. Monografia może być również pomocna młodym adeptom nauki rozpoczynającym pracę badawczą w zakresie oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów. Z monografii będą mogły korzystać także osoby zainteresowane poznawaniem metod i sposobów pomiaru oraz badaniami związanymi z oceną stanu technicznego robotów przemysłowych.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów. W pracy zaprezentowano gruntowną analizę literatury, stanowiącą podstawę realizowanych badań. Trzy pierwsze rozdziały poświęcono zagadnieniom teoretycznym oraz stosowanym w praktyce metodom badań eksperymentalnych.

W rozdziale I przedstawiono podstawowe definicje robotyki i jej działy oraz scharakteryzowano najważniejsze cechy robotów. Omówiono także podstawowe parametry charakteryzujące roboty przemysłowe.

Rozdział II dotyczy budowy i zastosowania robotów przemysłowych, a także ich klasyfikacji według określonych kryteriów. Podziału robotów dokonano uwzględniając: budowę mechaniczną robota, strukturę kinematyczną, sterowanie, liczbę stopni swobody oraz rodzaj napędu.

W rozdziale III zaprezentowano dane dotyczące dokładności robotów przemysłowych, zdefiniowano podstawowe parametry dokładności, dokonano analizy źródeł błędów oraz przedstawiono warunki i metody badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów. W rozdziale tym przytoczono również przykłady badań prezentowanych w literaturze fachowej z tego zakresu.

W rozdziałach IV–VIII przedstawiono część praktyczną pracy, wyniki badań eksperymentalnych, ich analizę i wnioski.

W rozdziale IV zaprezentowano metodykę badań eksperymentalnych, w której zawarto opis przedmiotu badań oraz zastosowanych narzędzi pomiarowych. W kolejnych rozdziałach opisano przebieg pomiarów wybranymi technikami, dokonano analizy uzyskanych wyników oraz sformułowano wnioski.

Rozdział V poświęcono ocenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów z wykorzystaniem interferometru laserowego. W rozdziale piątym dokonano oszacowania niepewności pomiaru uwzględniającej wpływ najważniejszych czynników na uzyskane wyniki.

W rozdziale VI zaprezentowano wyniki badań błędów robota przemysłowego z wykorzystaniem kinematycznego pręta teleskopowego QC20 Ballbar. Dokonano analizy zdolności robota do odtwarzania ścieżki o zarysie kołowym. Przeprowadzono szacowanie niepewności pomiaru wykorzystywanym systemem pomiarowym oraz dokonano analizy uzyskanych wyników w aspekcie szybkiej oceny niedokładności robota.

Rozdział VII i VIII poświęcono omówieniu i wykorzystaniu wizyjnych metod pomiarowych podczas badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.

W rozdziale VII zaprezentowano wyniki analizy niedokładności robota przemysłowego z wykorzystaniem szybkoklatkowej kamery wizyjnej. Omówiono metodykę pomiarów i przedstawiono uzyskane wyniki badań. Zaprezentowano proces szacowania niepewności pomiaru w określonych warunkach badawczych. Dokonano analizy wyników z uwzględnieniem niepewności pomiaru oraz określono możliwości badawcze zastosowanego systemu wizyjnego. Wskazano na jego zalety i wady w aspekcie badań robotów przemysłowych.

Rozdział VIII poświęcono badaniom dokładności robota przemysłowego z wykorzystaniem systemu optycznego PONTOS. W rozdziale tym przedstawiono możliwości identyfikacji zadanych pozycji efektora w przestrzeni roboczej. W oparciu o uzyskane wyniki badań wyznaczono dokładność i powtarzalność robota przemysłowego w ustalonych warunkach pomiarowych. Omówiono uzyskane wyniki badań i przedstawiono je w postaci graficznej.

W ostatnim, IX rozdziale zawarto podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz przedstawiono ograniczenia wybranych metod pomiarowych. Określono również znaczenie dokładności robotów w zastosowaniach przemysłowych oraz wskazano możliwe kierunki dalszych badań, jak również zakres i możliwości wykorzystania uzyskanych dotychczas wyników.

1. Podstawowe definicje robotyki

1.1. Definicja robotyki

Robotyka jest interdyscyplinarną dziedziną nauki i techniki, dotyczącą problematyki z zakresu mechaniki, projektowania, pomiarów, sterowania oraz eksploatacji robotów i manipulatorów. Obejmuje ona obszar zastosowań robotów w szeroko pojętej technice, badaniach naukowych, medycynie, budownictwie, transporcie czy rolnictwie.

W nauce o robotach, można wyróżnić następujące działy robotyki:

- ogólną,
- metrologiczną,
- przemysłową,
- pozaprzemysłową,
- maszyn lokomocyjnych,
- usługową,
- medyczną i rehabilitacyjną.

Robotyka ogólna obejmuje zakres zagadnień socjalnych oraz społecznych oraz tych, związanych z ekonomią, kształceniem, ochroną i bezpieczeństwem pracy. Do tego działu można zaliczyć również standaryzację terminologii oraz oznaczeń.

Robotyka metrologiczna związana jest z badaniem i opracowywaniem metod pomiarowych i diagnostycznych. Mogą one posłużyć między innymi do określania parametrów dynamicznych i kinematycznych robota, jego dokładności oraz stanu technicznego.

Robotyka przemysłowa zajmuje się zastosowaniem robotów i manipulatorów przemysłowych w obszarze robotyzacji procesów produkcyjnych, takich jak: spawalnictwo, odlewnictwo, lakiernictwo, nanoszenie powłok malarskich, montaż oraz obsługa maszyn przemysłowych. Obszar działań robotyki przemysłowej obejmuje zatem dynamicznie rozwijane elastyczne systemy produkcyjne oraz komputerowo zintegrowane systemy wytwarzania.

Robotyka pozaprzemysłowa dotyczy manipulatorów służących do prowadzenia badań i eksploatacji między innymi: przestrzeni podwodnych, prac konserwacyjnych oraz badawczych w przestrzeni kosmicznej, takich jak np.: naprawa satelitów komunikacyjnych, pobieranie próbek z innych planet, itp. Dział robotyki pozaprzemysłowej dotyczy również robotów wykorzystywanych przy usuwaniu skutków katastrof (np. elektrowni atomowych) oraz gaszeniu pożarów.

Robotyka maszyn lokomocyjnych jest związana z projektowaniem, mechaniką oraz sterowaniem ruchem maszyn kroczących lub nożno-kołowych. Podczas budowy tego typu maszyn stosuje się cechy charakterystyczne dla budowy i ruchu owadów i ssaków palchochodnych. Jednym z podstawowych zadań konstrukcyjnych w tym przypadku jest wybór możliwie najlepszego chodu robota.

Osiąga się to poprzez określenie modelu robota, jego struktury, liczby i konfiguracji kończyn, a także odpowiedni dobór układów sterowania i sensorów.

Robotyka usługowa dotyczy robotów o zwiększonym poziomie inteligencji maszynowej, posiadających specjalizowane funkcje lokomocyjne i manipulacyjne oraz wykonujących prace usługowe. Do nich należy zaliczyć: sprzątanie, pielęgnację i obsługę osób niepełnosprawnych, itp.

Robotyka medyczna i rehabilitacyjna zajmuje się robotami i manipulatorami wykorzystywanymi w medycynie. Do tej grupy robotów należy zaliczyć: roboty chirurgiczne, laparaskopy, wspomagające utracone funkcje kończyn ludzkich, protezy i ortezy, roboty obsługujące pacjentów. Przykład praktyczny stanowią roboty mobilne sterowane za pomocą ludzkiego głosu lub ruchów głowy, języka lub gałki ocznej. Najczęściej stosowane są jako wózki inwalidzkie [34].

1.2. Podstawowe definicje dotyczące robotów przemysłowych

Przed przystąpieniem do próby określenia czym jest robot przemysłowy, należy zdefiniować dwa podstawowe określenia zgodnie z normą ISO 8373, tj. manipulator przemysłowy i robot przemysłowy [59].

Manipulator przemysłowy to urządzenie konstruowane w celu całkowitego zastąpienia człowieka podczas wykonywania czynności manipulacyjnych w przemysłowym procesie produkcyjnym, sterowane ręcznie bądź automatycznie przy pomocy własnego układu sterującego stałoprogramowalnego lub układu zewnętrznego [59].

Robot przemysłowy jest natomiast urządzeniem automatycznym, zdolnym do wykonywania czynności manipulacyjnych w przemysłowym procesie produkcyjnym, posiadającym układ ruchu złożony z co najmniej dwóch osi oraz autonomiczny, programowalny układ sterujący. Zatem uwzględniając powyższe definicje, można wskazać zasadniczą różnicę pomiędzy robotem a manipulatorem przemysłowym. Manipulator wykonuje zamknięty cykl powtarzalnych ruchów według programu, którego nie można poddać edycji bez zmiany konstrukcji manipulatora. Robot natomiast, zdolny jest do realizacji dużej liczby zróżnicowanych czynności manipulacyjnych z wykorzystaniem sygnałów generowanych przez układ sterowania. Cykl ruchów manipulacyjnych oraz lokomocyjnych wykonywany przez robota jest najczęściej powtarzalny, jednak może on ulec zmianie w zależności od modyfikacji programu, podanych informacji czy stanu środowiska [24, 53, 59].

W literaturze technicznej można znaleźć wiele definicji opisujących robota przemysłowego. W każdej z nich, w różnym stopniu zostały wyszczególnione cechy charakteryzujące te urządzenia.

Encyklopedia Powszechna PWN definiuje robota jako „...*urządzenie (maszyna) przeznaczone do realizacji niektórych czynności manipulacyjnych, lokomocyjnych, informacyjnych i intelektualnych człowieka...*” [12].

Powyższą definicję rozszerza Niederliński stwierdzając, że „...roboty są narzędziami sterowanymi automatycznie, dającymi się zaprogramować do wykonania dużej liczby różnorodnych sekwencji precyzyjnych czynności manipulacyjnych, jak np.: uchwycenie przedmiotu, przemieszczenie przedmiotu (przeniesienie obrócenie), pozostawienie przedmiotu w określonej pozycji, w określonym miejscu (zakładanie, zdejmowanie). Sekwencje wymienionych czynności mogą być uzależnione od stanu obsługiwanego narzędzia oraz manipulowanego przedmiotu i mogą z kolei sterować obsługiwanym narzędziem...” [37].

W normie ISO 8373 definicję robota przemysłowego zapisano jako:

„...Manipulacyjny robot przemysłowy jest automatycznie sterowaną, programowaną, wielozadaniową maszyną manipulacyjną o wielu stopniach swobody, posiadającą własności manipulacyjne lub lokomocyjne, stacjonarną lub mobilną dla ważnych zastosowań przemysłowych” [59].

W pracy [47] określono podstawowe zadanie robotyki, czyli:

„...zastąpienie człowieka, imitujące zachowanie jego kończyn. Nadrzędnym celem jest więc odciążenie człowieka podczas wykonywania czynności niebezpiecznych bądź po prostu monottonnych...”

Norma ISO 8373 przedstawia również podstawowe parametry charakteryzujące roboty przemysłowe:

- liczba osi sterowanych, wynosząca zazwyczaj w zależności od robota od 2 do 7. Parametr ten decyduje o stopniu skomplikowania czynności, które robot jest w stanie wykonać. Każda z osi posiada określony zakres przemieszczeń kątowych lub liniowych,
- udźwig, czyli maksymalny ciężar, który może być podniesiony lub przemieszczony przez robota przemysłowego w inne miejsce,
- zasięg, definiowany jako promień obszaru, w ramach którego robot jest w stanie operować,
- prędkość ruchu, określająca z jaką maksymalną prędkością robot może poruszać każdą z osi. Parametr ten określany jest w rad/s dla osi obrotowych lub w mm/s dla osi liniowych,
- dokładność i powtarzalność, które określają precyzję ruchu robota; szerzej opisano je w dalszej części pracy (rozdział 3).

Analizując wszystkie przytoczone definicje można stwierdzić, że najważniejszymi cechami wyróżniającymi roboty przemysłowe są możliwość programowania oraz zdolność do wykonywania różnorodnych ruchów manipulacyjnych, w celu ułatwienia lub odciążenia człowieka od wykonywania trudnych, uciążliwych i monottonnych zadań.

2. Budowa i zastosowanie robotów przemysłowych

Kryteria klasyfikacji robotów przemysłowych w różnych źródłach literaturowych prezentowane są w różny sposób. Związane jest to z interdyscyplinarnym charakterem nauki o robotach. Co prawda, nie jest ona jeszcze w pełni sformalizowana, nie mniej jednak powiązana jest z wieloma dziedzinami, takimi jak: mechanika, sterowanie, inteligencja maszynowa lub zagadnienia społeczne. Ich ciągły rozwój utrudnia jednoznaczne sklasyfikowanie robotów przemysłowych. W pracy przedstawiono przykładowy podział robotów, uwzględniając takie kryteria jak: budowa, struktura kinematyczna, sterowanie oraz rodzaj napędu [4, 17, 37, 46–47].

2.1. Budowa jednostki kinematycznej

Maszyny manipulacyjne ze względu na sposób budowy jednostki kinematycznej można podzielić na: monolityczne, modułowe oraz pseudomodułowe.

Jednostki monolityczne to takie, które posiadają stałą strukturę kinematyczną. Tego typu jednostkę można co najwyżej uzupełnić elementami, dopuszczonymi przez producenta, takimi jak: chwytak, narzędzie czy opcjonalne zespoły ruchu [17, 35].

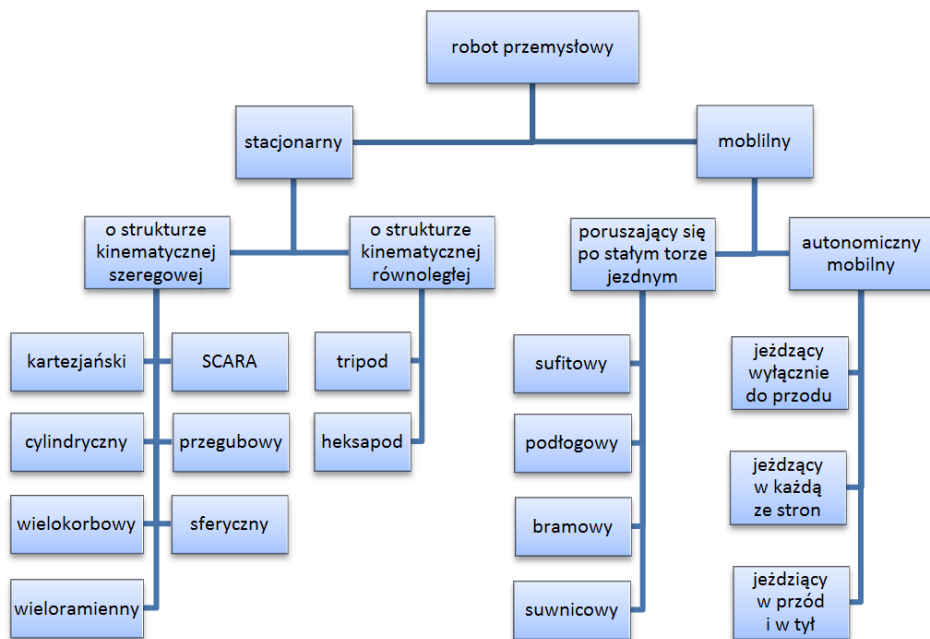
Jednostki modułowe dostarczane są przez producenta w postaci oddzielnych modułów (zespołów ruchu). W przypadku tego typu jednostek użytkownik sam składa z dostarczonych modułów mechanizm o zaprojektowanej według potrzeb strukturze kinematycznej. Chociaż liczba struktur, które są możliwe do złożenia nie jest ograniczana przez producenta, to z góry ustalany jest porządek łączenia poszczególnych modułów. Wymuszają to takie właściwości jak statyczna i dynamiczna wytrzymałość danej konstrukcji oraz charakterystyki napędów (np. udźwig) [17, 37].

Podobnie jak w przypadku rozwiązań monolitycznych, jednostki pseudomodułowe posiadają stałą strukturę kinematyczną, z możliwością wymiany wybranych zespołów ruchu. Z reguły są to elementy znajdujące się na końcach w łańcuchu kinematycznym danego zespołu ruchu, np. ramię górne, itp. [17, 35, 37].

2.2. Klasyfikacja robotów przemysłowych

Z uwagi na możliwość przemieszczania się, roboty przemysłowe można podzielić na roboty stacjonarne, które jako całość nie mogą przemieszczać się względem podłoża oraz roboty mobilne, które mają możliwość przemieszczania się względem podłoża. Biorąc pod uwagę ograniczenia ruchu robota względem podłoża można wyodrębnić roboty autonomiczne oraz roboty poruszające się po stałym torze jezdnym. Kryterium podziału robotów przemysłowych może być również struktura kinematyczną zespołów mechanicznych. Przykładową klasy-

fikację robotów przemysłowych uwzględniającą strukturę kinematyczną części manipulacyjnych przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Klasyfikacja robotów przemysłowych z uwzględnieniem struktury kinematycznej części manipulacyjnych [17]

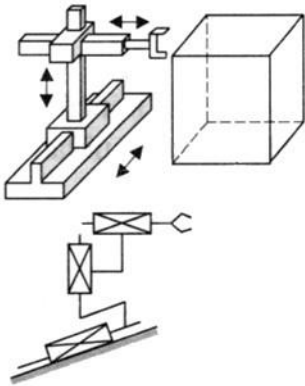
Manipulatory (jednostki kinematyczne robotów) składają się z członów połączonych za pomocą par kinematycznych. Wspomniane człony mogą być łączone na dwa sposoby [4, 17, 59]:

- szeregowo (tworząc otwarty łańcuch kinematyczny),
- równoległe (tworząc zamknięty łańcuch kinematyczny).

W ramach konstrukcji robotów stacjonarnych o szeregowej strukturze kinematycznej można wyróżnić grupy typowych rozwiązań, które cechują się pokrewnym układem zespołów ruchu. Podobieństwo dotyczy układu osi współrzędnych oraz formy przestrzeni roboczej. Do tej grupy robotów można zaliczyć rozwiązania konstrukcyjne, takie jak [17, 59]:

- robot o układzie kartezjańskim (rys. 2.2), który posiada prostokątny układ współrzędnych, trzy liniowe zespoły ruchu regionalnego oraz euklidesową przestrzeń ruchu roboczego,

a)



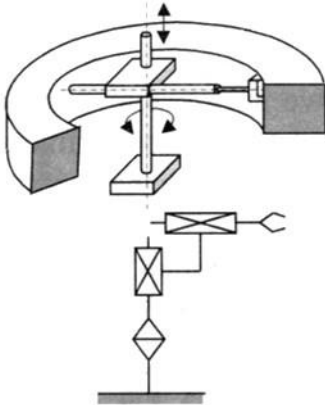
b)



Rys. 2.2. Robot o układzie kartezjańskim: a) struktura kinematyczna [17],
b) widok ogólny robota WEMO 16-HS [64]

- robot o układzie cylindrycznym (rys. 2.3), posiadający walcowy układ współrzędnych, dwa liniowe oraz jeden obrotowy zespół ruchu regionalnego oraz cylindryczną przestrzeń ruchu roboczego,

a)

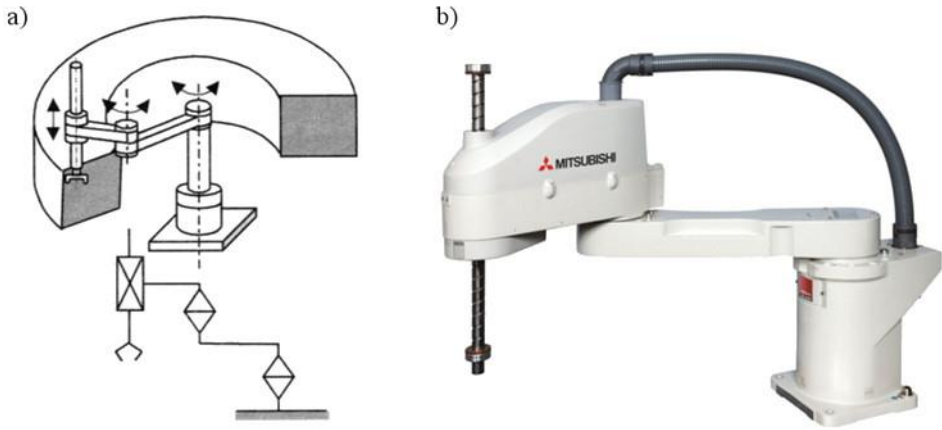


b)



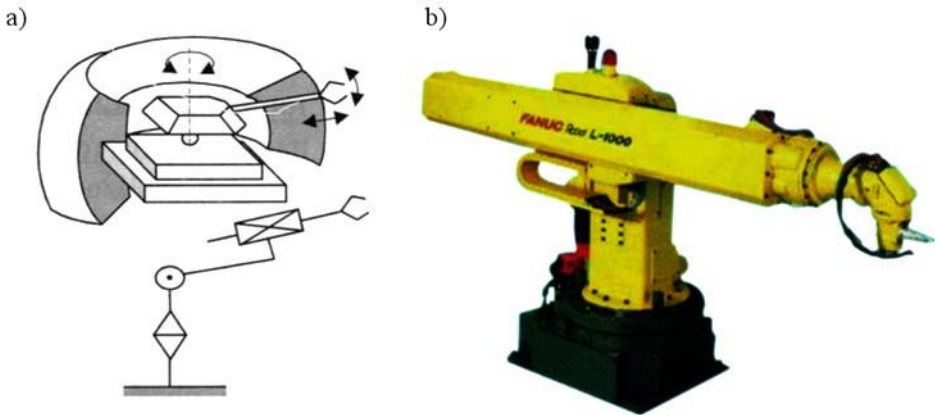
Rys. 2.3. Robot o układzie cylindrycznym: a) struktura kinematyczna [17],
b) widok ogólny robota DENSO [65]

- robot SCARA (ang. selectively compliant assembly robot arm), posiada dwa liniowe oraz jeden obrotowy zespół ruchu regionalnego (rys. 2.4). Osie par kinematycznych są do siebie równoległe. Nazwa robota pochodzi od jego zastosowań, czyli głównie realizowanych zadań montażowych.



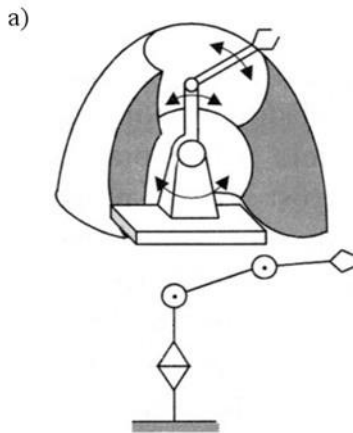
Rys. 2.4. Robot typu SCARA: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny robota MITSUBISHI z serii RH-SDH [66]

- robot o strukturze sferycznej (rys. 2.5), posiadający jeden liniowy oraz dwa obrotowe zespoły ruchu regionalnego. Jego struktura jest podobna, jak w przypadku robota SCARA, ale odróżnia się on przeznaczeniem i orientacją ramion. Głównym zastosowaniem tego typu robota jest obsługa linii produkcyjnej m.in.: przenoszenie, układanie oraz załadunek elementów.



Rys. 2.5. Robot o strukturze sferycznej: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny robota FANUC L-1000 [67]

- robot o strukturze przegubowej (rys. 2.6), posiada wszystkie osie obrotowe, często nazywany jest robotem antropomorficznym.



Rys. 2.6. Robot o strukturze przegubowej: a) struktura kinematyczna [17],
b) widok ogólny robota Comau Racer [70]

Dzięki odpowiedniej kombinacji wybranych z wyżej wymienionych struktur, możliwe jest konstruowanie rozwiązań o bardziej złożonych układach ruchu regionalnego, bądź ze zwielokrotnionymi łańcuchami kinematycznymi [17]. Przykładem takich rozwiązań są roboty wieloramienne przedstawione na rys. 2.7.

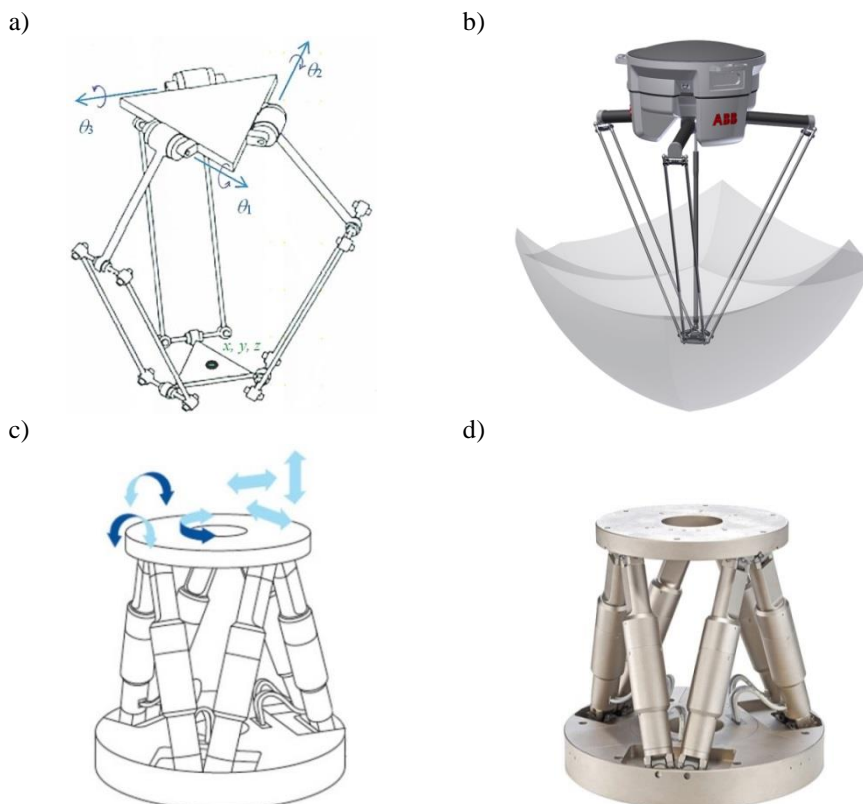


Rys. 2.7. Roboty wieloramienne: a) robot firmy Yaskawa z serii SDA [79],
b) robot firmy Yushin, [68], c) robot STAR Es-800s [69]

Poza strukturą jednostki kinematycznej, roboty mogą cechować się różnymi właściwościami mechanizmów, np. [17]:

- sposobem budowy mechanizmu jednostki kinematycznej,
- właściwościami napędowymi zespołów ruchu, związanymi głównie z charakterystyką napędów oraz wykorzystywanym w nich rodzajem energii.

Obok robotów o szeregowej strukturze kinematycznej można wyróżnić również podgrupę robotów stacjonarnych o strukturze równoległej. W przypadku tego typu robotów, podstawowym kryterium podziału jest liczba ramion (gałęzi) składających się na zamknięty łańcuch kinematyczny. W zależności od liczby ramion, można wyróżnić tutaj np. rozwiązania z trzema ramionami zwane tripodami bądź sześcioma ramionami zwanymi hexapodami. Strukturę kinematyczną tego typu robotów przedstawiono na rys. 2.8.

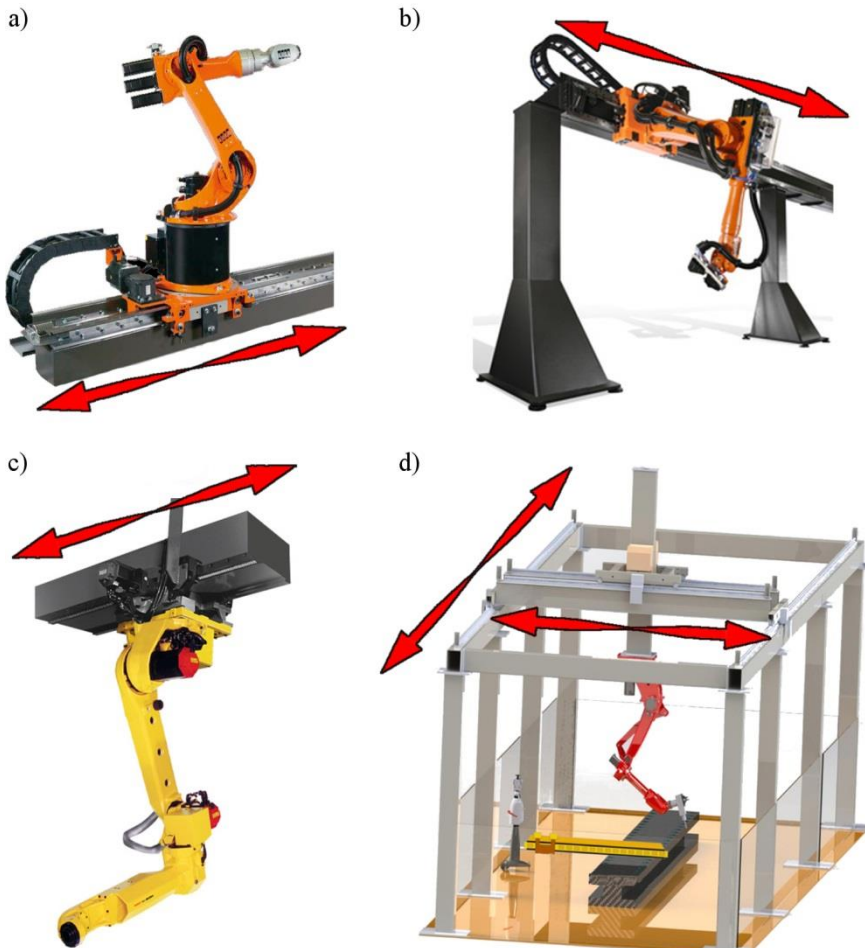


Rys. 2.8. Przykłady robotów równoległych: a) struktura kinematyczna robota typu „tripod” [48], b) widok ogólny robota ABB IRB 360 [71] c) struktura kinematyczna robota H-811 typu „hexapod” [72], d) widok ogólny [73]

Roboty o strukturze równoległej charakteryzują się znacznie większą sztywnością niż roboty o strukturze szeregowej, co umożliwia uzyskanie większej dynamiki manipulowania. Wadą tych robotów jest jednak mniejsza przestrzeń robocza członów roboczych [13, 34].

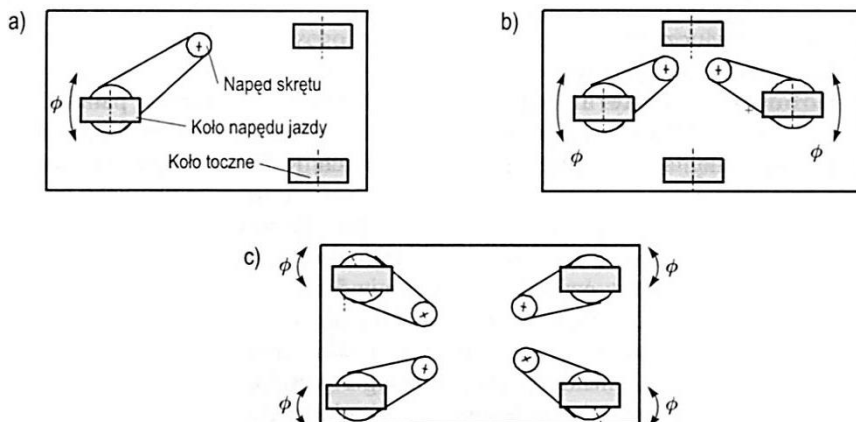
Roboty mobilne z uwagi na rozwiązania kinematyczne można podzielić na [17]:

- roboty poruszające się po stałym torze jezdny (rys. 2.9), których istotą jest połączenie zrobotyzowanej jednostki transportowej (robot transportowy) z jedno lub dwuosiowym torze jezdny,

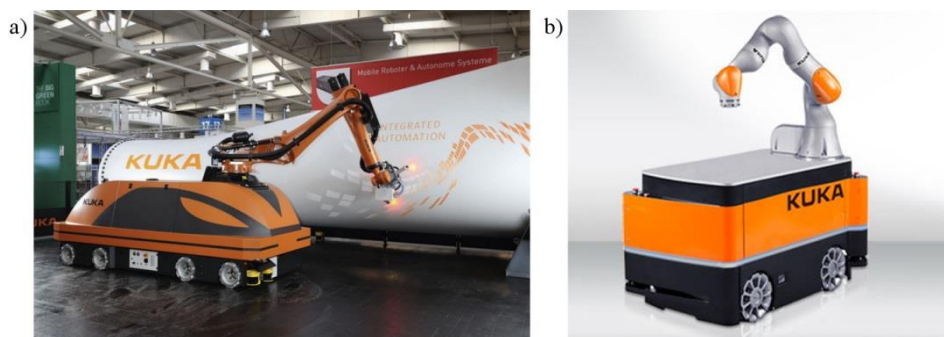


Rys. 2.9. Układy kinematyczne robotów poruszających się po stałym torze jezdny: a) podłogowym [74], b) bramowym [74], c) sufitowym [75], d) suwnicowym [76]

- mobilne roboty autonomiczne (robocary), które mogą przemieszczać się dowolną trasą, np. po hali fabrycznej. W tej grupie można wyróżnić roboty potrafiące poruszać się jedynie w przód (rys. 2.10a), przemieszczające się w przód i w tył (rys. 2.10b) oraz mogące jeździć wzdłuż i poprzek w każdą stronę (rys. 2.10c).



Rys. 2.10. Układy kinematyczne autonomicznych robotów mobilnych: a) poruszających się wyłącznie do przodu, b) jeżdżące w przód i w tył, c) jeżdżące w każdą stronę [17]



Rys. 2.11. Roboty mobilne zaprojektowane przez firmę KUKA [74]: a) KMR QUANTEC, b) KMR iiwa

Przykłady autonomicznych mobilnych robotów przemysłowych, zaprojektowanych przez firmę KUKA przedstawiono schematycznie na rys. 2.11.

2.3. Sterowanie

Z uwagi na sterowanie roboty dzieli się na klasy, które określają rodzaj i możliwości sterowania robotem. Rozróżnia się cztery główne klasy robotów przemysłowych: sekwencyjne, realizujące zadaną trajektorię, adaptacyjne oraz teleoperatory [17, 35].

Robot sekwencyjny wyposażony jest w sekwencyjny układ sterowania. Ruchy poszczególnych członów manipulatora realizowane są w określonym porządku. Praca robota ma charakter binarny (start- stop, on- off), natomiast ścieżka pomiędzy dwoma końcowymi położeniami binarnymi jest sterowana.

Robot realizujący zadaną trajektorię charakteryzuje się tym, że ustalona procedura sterowanych ruchów realizowana jest zgodnie z instrukcjami specyfikującymi zadaną prędkość w określonym położeniu oraz pozycję, która zazwyczaj uzyskiwana jest poprzez interpolację. Generowanie zadanej trajektorii możliwe jest dzięki zmiennej prędkości dla każdej osi ruchu.

Robot adaptacyjny posiada adaptacyjny, sensoryczny lub uczący się układ sterowania. Jako przykład można przytoczyć układy z możliwością dostosowywania się do realizacji zmiennych zadań poprzez wykorzystanie informacji sensorycznych lub zebranych doświadczeń, planowanie zadań oraz trening i nauczenie. Robot wyposażony w czujniki wizyjne ma możliwość korekcji ruchów w czasie pobierania elementów, montażu lub spawania łukowego. W przypadku sterowania sensorycznego ruchy robota wykonywane są zgodnie z sygnałami wyjściowymi pochodzącymi z czujników zewnętrznych. Sterowanie adaptacyjne realizowane jest poprzez nastawianie parametrów na podstawie uzyskanych w procesie detekcji warunków. Uczący się układ sterowania zmienia parametry lub algorytmy na podstawie doświadczenia uzyskanego podczas poprzednich cykli pracy.

Teleoperator posiada zdalne sterowanie realizowane przez operatora bądź komputer. Głównie zadania robotów z tego typu sterowaniem, to przenoszenie na odległość funkcji motorycznych i sensorycznych operatora.

Biorąc pod uwagę metodę programowania oraz możliwości komunikacji robota ze środowiskiem zewnętrznym, można wyróżnić trzy główne generacje [16–17, 35–36]:

I generacja – roboty nauczane,

II generacja – roboty uczące się,

III generacja – roboty inteligentne.

Roboty I generacji wyposażone są w pamięć, do której wprowadza się rozkazy dotyczące czynności, które później robot wykonuje bez dalszej ingerencji operatora. Roboty tej generacji nie mają możliwości samodzielnego zbierania informacji o otoczeniu pracy. Posiadają ograniczone właściwości funkcyjne i rzadko posiadają czujniki do gromadzenia informacji o środowisku zewnętrznym. Do tej grupy robotów można zaliczyć programowane manipulatory lub roboty przemysłowe niższego rzędu, stosowane do obsługi maszyn produkcyjnych (podawanie i odbieranie elementów). Charakteryzują się one stosunkowo dużym udźwigniem, wysoką dokładnością pozycjonowania oraz możliwością sterowania drogą i prędkością przesuwu. Jako cechy charakterystyczne robotów I generacji można wyróżnić [17, 35–36]:

- brak sprzężeń zwrotnych od stanu manipulowanego elementu, co oznacza, że manipulowanie jest sterowane w torze otwartym,
- konieczność dokładnego zaprogramowania ruchów ramion w ustalonym układzie współrzędnych,
- konieczność ustabilizowania współrzędnych punktu początkowego manipulowanego elementu.

Roboty II generacji mają możliwość rozpoznawania żądanego elementu w zbiorze, bez względu na jego kształt lub położenie. Jedną z zalet robotów II generacji jest zdolność do zmiany miejsca pracy względem poszukiwanego elementu. Jest to grupa robotów przemysłowych wyższego rzędu, charakteryzujących się większymi możliwościami i właściwościami technicznymi [17, 35–36].

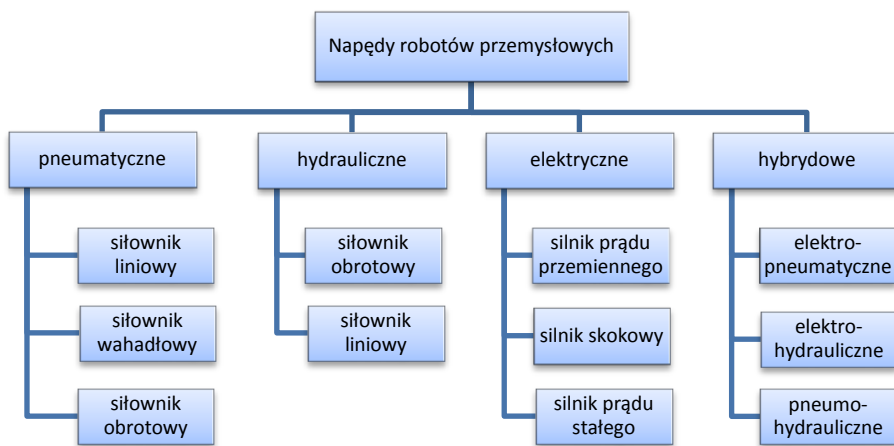
Cechą charakterystyczną robotów III generacji jest wykorzystywanie złożonych systemów rozpoznających, zbudowanych z kamer telewizyjnych bądź wielopunktowych przetworników dotykowych, rozmieszczonych w chwytaku. Dzięki integracji z komputerem o dużej mocy obliczeniowej, możliwa jest analiza oraz interpretacja obrazu, co z kolei pozwala na rozróżnienie kształtu i położenia przedmiotów [17, 46–47].

2.4. Rodzaje napędów

Współczesne roboty przemysłowe cechują się dużą liczbą ruchliwości związaną z liczbą osi, która zazwyczaj wynosi od 5 do 7. Za ruch każdej z osi odpowiada oddzielny układ napędowy. W celu realizacji ustalonej operacji technologicznej lub manipulacyjnej, konieczne jest sterowanie grupą elementów wykonawczych. Ze względu na rodzaj energii wykorzystywany do wprowadzenia w ruch mechanizmów robota, napędy dzieli się na [16–17, 52]:

- pneumatyczne,
- hydrauliczne,
- elektryczne,
- kombinowane (hybrydowe).

Ogólną klasyfikację napędów robotów przemysłowych przedstawiono na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Klasyfikacja robotów ze względu na rodzaj stosowanego napędu [17]

Obecnie znaczna część robotów posiada napędy elektryczne i jedynie w niewielkich wykorzystywany jest napęd pneumatyczny lub hydrauliczny. Związane jest to ze stosunkowo dużą, całkowitą sprawnością przetwarzania energii przez napędy elektryczne, co jest czynnikiem decydującym o zastosowaniu ich w robotyce [17, 46].

2.5. Zastosowania robotów przemysłowych

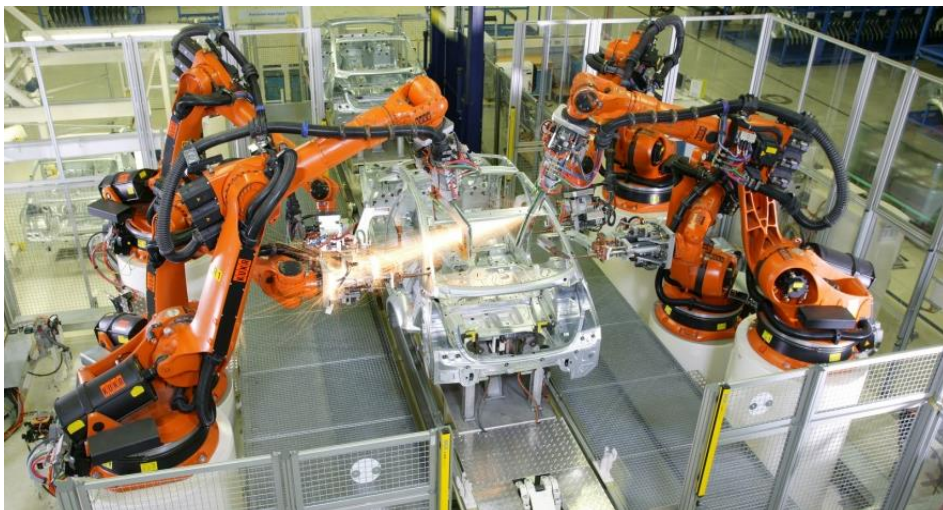
Robotyka jest jedną z najprężniej rozwijających się dziedzin wspomagających procesy wytwórcze. Zastosowanie robotów w wielu obszarach przemysłu jest bardzo szerokie. Głównymi gałęziami, w których najczęściej implementuje się tego typu maszyny, są: przemysł motoryzacyjny, elektryczny i elektroniczny, maszynowy, materiałowy oraz spożywczy. Kluczowym zadaniem podczas robotyzacji procesów produkcji jest obniżenie kosztów wytwarzania. Przyczynia się do tego szereg czynników wynikających z zastosowania robotów. Niepodważalny jest fakt, że roboty przemysłowe są w stanie wykonywać zadane czynności z dużo większą wydajnością, precyzją i szybkością niż człowiek. W pełni zautomatyzowane linie produkcyjne pozwalają przedsiębiorstwom podnieść konkurencyjność na rynku oraz osiągnąć oczekiwany wynik finansowy. Ponadto motoryka pracy właściwie eksploatowanego robota jest niezmienna. Oznacza to, że może on pracować bez przerw w produkcji ciągłej, a niejednokrotnie monotonne i męczące zadania wykonywane są z taką samą – wysoką powtarzalnością i dokładnością. Istotnym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem robotów przemysłowych są względy bezpieczeństwa na stanowisku pracy. Roboty pozwalają na zastąpienie pracowników zatrudnionych w szkodliwych dla ich zdrowia warunkach. Bardzo często roboty wykonują czynności, których człowiek z uwagi na możliwości fizyczne po prostu nie jest

w stanie wykonać. Wykorzystanie robotów w przemyśle jest uzasadnione ekonomicznie, szczególnie w przypadku dużych serii produkcyjnych oraz wytwarzaniu części, którym stawiane są wysokie wymagania jakościowe [4, 9, 24, 56].

Główne zastosowania robotów przemysłowych to:

- łączenie elementów (spawanie, lutowanie, zgrzewanie, klejenie),
- paletyzacja,
- obsługa maszyn,
- lakierowanie i malowanie,
- cięcie i obróbka mechaniczna,
- inżynieria odwrotna, metrologia.

Jednym z najpowszechniejszych zastosowań robotów przemysłowych są operacje łączenia elementów za pomocą różnych technik. W szczególności należy wyróżnić tutaj spawanie (MIG, MAG, TIG), lutowanie, zgrzewanie oraz klejenie. Integracja nowoczesnych technologii spawania oraz robotów przemysłowych (rys. 2.13) pozwala łączyć elementy z różnych materiałów z dokładnością, która bardzo często jest nieosiągalna przy wykorzystaniu konwencjonalnych metod. W przypadku klejenia (rys. 2.14), główną zaletą robotów jest ich zdolność do nanoszenia w sposób wysoce powtarzalny kleju na łączone elementy, co prowadzi do minimalizacji powstających części wadliwych oraz podwyższa jakość połączeń.

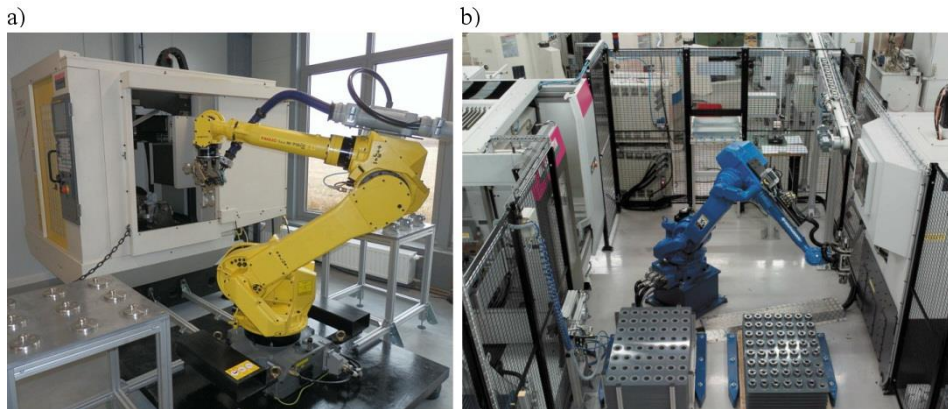


Rys. 2.13. Spawanie elementów struktury nośnej samochodu z zastosowaniem robotów przemysłowych [74]



Rys. 2.14. Zastosowanie robotów przemysłowych w operacjach klejenia [77]

Roboty przemysłowe z dużą skutecznością są stosowane do obsługi maszyn produkcyjnych, takich jak: prasy, maszyny do przetwórstwa tworzyw polimerowych, obróbki plastycznej, obrabiarki i centra obróbkowe (rys. 2.15), itp. Wykonują one operacje i zabiegi, takie jak załadunek lub rozładunek, a nawet obróbkę. Szczególne zastosowanie znajdują w przypadku, gdy elementy wytwarzane są w dużych seriach lub ich transport ze względu na wagę, bądź wymiary gabarytowe, jest uciążliwy dla pracowników.



Rys. 2.15. Zastosowanie robotów przemysłowych w obsłudze maszyn produkcyjnych, a) obsługa pojedynczej maszyny [78], obsługa wielu maszyn w gnieździe produkcyjnym [79]

Inny przykład zastosowania robotów w produkcji jest paletyzacja różnego rodzaju elementów, między innymi: opakowań, kartonów, worków, butelek oraz gotowych elementów (rys. 2.16). Wykorzystanie w tym celu robotów przemysłowych umożliwia znaczne zredukowanie kosztów związanych z koniecznością wyszkolenia bądź zatrudnienia pracowników o kwalifikacjach uprawniających do obsługi urządzeń transportowych. Korzyścią jest również zwiększenie bez-

pieczeństwa pracy oraz odciążenie człowieka przy wykonywaniu nudnych i powtarzalnych czynności, takich jak: sortowanie lub czynności wymagające znacznego wysiłku fizycznego, np. przenoszenia bardzo ciężkich elementów.



Rys. 2.16. Zrobotyzowane stanowisko do paletyzacji [80]

Szczególnym przypadkiem pracy ludzi w uciążliwych i szkodliwych dla zdrowia warunkach są operacje lakierowania powierzchni. Zastosowanie robotów do wykonywania tego typu czynności pozwala nie tylko zwiększyć bezpieczeństwo pracowników, ale również podnieść jakość lakierowania i ograniczyć zużycie materiałów (rys. 2.17). W przypadku lakierów i farb łatwopalnych, wykorzystuje się specjalne roboty malarskie posiadające szereg zabezpieczeń. Zabezpieczenia te dotyczą bezpieczeństwa (części robota wykonane są z materiałów iskrobezpiecznych) oraz szczelności korpusu ramienia, dzięki czemu mogą one pracować w trudnych warunkach środowiskowych, a także zagrożenia wybuchem.



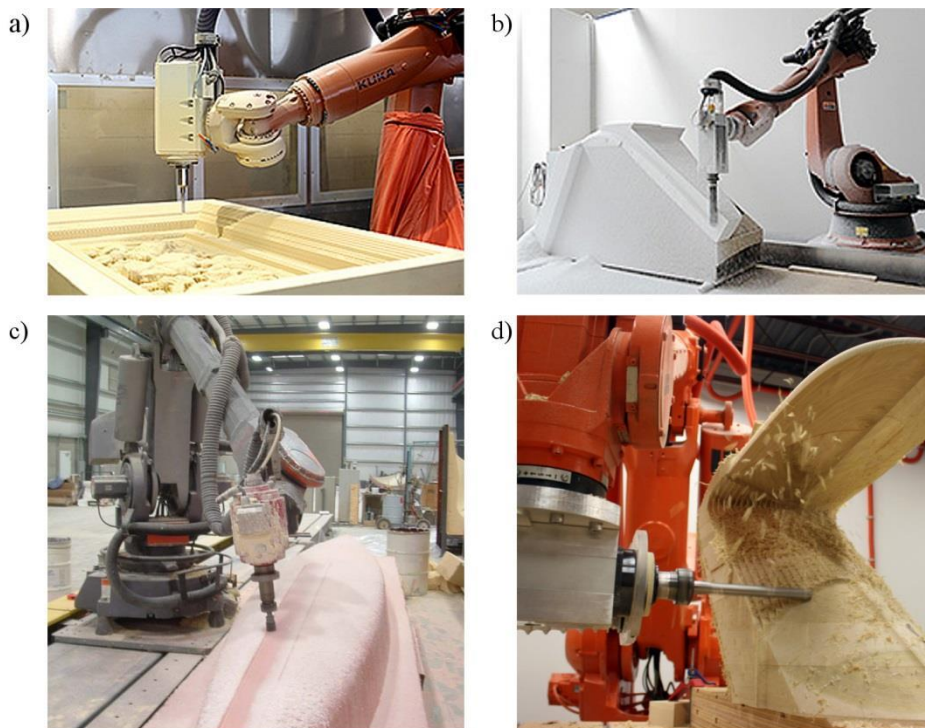
Rys. 2.17. Zrobotyzowane stanowisko lakierowania karoserii samochodu [81]

Ciekawym przykładem zastosowania robota w metrologii przemysłowej jest propozycja systemu pomiarowego firmy GOM. W systemie tym, robot stanowi integralną część układu pomiarowego ATOS ScanBox (rys. 2.18), służącego do w pełni zautomatyzowanych pomiarów współrzędnościowych 3D. Na ramieniu robota zamocowany jest skaner 3D. Dzięki zastosowaniu funkcji automatycznego uczenia, obliczane są wymagane położenia skanera, umożliwiające właściwy pomiar ustalonych cech kontrolnych oraz geometrii skanowanych części. Ścieżki ruchu ramienia robota są optymalizowane, dzięki czemu sekwencja poszczególnych pozycji jest ulepszana pod względem czasu wykonania cyklu pomiarowego. Przeprowadzana optymalizacja zapobiega również występowaniu kolizji. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów, w celu zapewnienia bezpieczeństwa, wykonywana jest symulacja ruchów w wirtualnym pomieszczeniu pomiarowym. Według informacji producenta, system ScanBox pozwala skrócić czas pomiaru i kontroli elementu o ponad połowę, w stosunku do tradycyjnych, kontaktowych urządzeń do pomiarów współrzędnościowych. System ten jest idealny w zastosowaniach przemysłowych, szczególnie w zrobotyzowanych liniach produkcyjnych różnych branż. W zależności od zastosowań oraz wymiarów mierzonych elementów, dostępnych jest dziewięć różnych modeli urządzeń [82].



Rys. 2.18. Zastosowanie robota przemysłowego do pomiarów współrzędnościowych 3D systemem ATOS ScanBox [82]

Oprócz obsługi maszyn produkcyjnych, roboty przemysłowe same mogą stanowić elementy robocze podczas operacji cięcia lub obróbki mechanicznej. Robot może manipulować obrabianym przedmiotem bądź narzędziem, według zaprogramowanych ścieżek. Często przy frezowaniu materiałów (takich jak: drewno, kamień, metal), cięciu plazmą, wierceniu i wielu innych, robot może wykazywać równoważne funkcje, jak stosowne do tych operacji obrabiarki. Stosowanie robotów przemysłowych może być również uzasadnione dla obróbki elementów o dużych wymiarach gabarytowych, w przypadku których obróbka na wieloosiowych centrach obróbkowych może okazać się zbyt kosztowna [36]. Znane są z literatury zastosowania robotów do obróbki otworów, krawędzi i obrzeży, wielkogabarytowych konstrukcji kompozytowych, metali nieżelaznych oraz drewna [8, 25–26, 55].



Rys. 2.19. Obróbka mechaniczna z zastosowaniem robotów przemysłowych:
 a) obróbka piaskowca [74], b) obróbka formy z polistyrenu [74],
 c) obróbka materiałów kompozytowych [83], d) obróbka drewna [84]

W przypadku obróbki mechanicznej szczególnie istotna jest znajomość dokładności pozycjonowania wykorzystywanego w tym celu robota. Pozwala to na określenie, czy robot jest zdolny do wykonania danego zadania obróbkowego z określoną tolerancją.

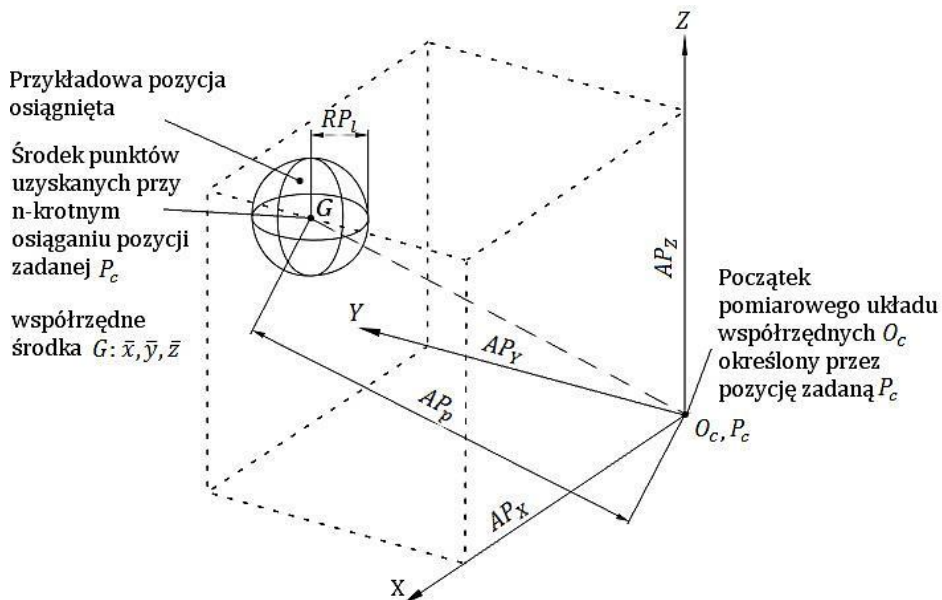
3. Dokładność robotów przemysłowych

3.1. Podstawowe definicje

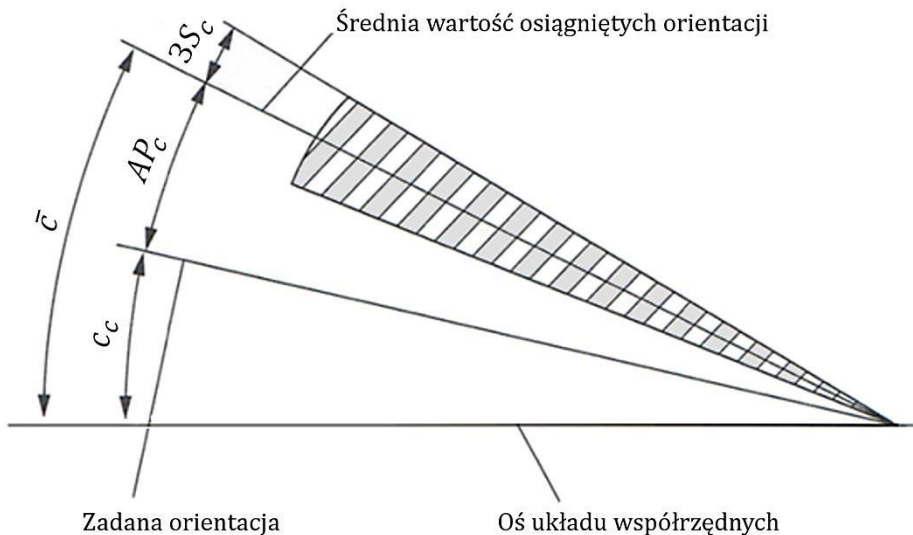
Dokładność robotów przemysłowych jest jednym z najważniejszych czynników determinujących działanie systemu produkcyjnego, którego są składnikiem. Podstawowe parametry opisujące dokładność robotów, to: dokładność pozycjonowania, powtarzalność pozycjonowania, wielokierunkowa zmienność dokładności pozycji, dokładność odległości, powtarzalność odległości, czas stabilizacji pozycji, powtarzalność odległości, przeregulowanie pozycji, pełzanie dokładności pozycji, zmienność, odchylenie ścieżki, powtarzalność ścieżki, odchylenie naroża, minimalny czas pozycjonowania oraz odchylenie ruchu oscylacyjnego [59].

Dokładność pozycji (AP), definiowana jest jako różnica pomiędzy zadaną pozycją a pozycją średnią, osiągniętą przez robota przy najeździe z tego samego kierunku (rys. 3.1). Parametr ten można podzielić na dwie składowe [60]:

- dokładność pozycjonowania (AP_p), czyli różnicę pomiędzy zadaną pozycją a środkiem ciężkości pozycji osiągniętych (rys. 3.1),
- dokładność orientacji (AP_a , AP_b , AP_c), czyli różnicę pomiędzy orientacją zadanej pozycji a średnią z pozycji osiągniętych (rys. 3.2).



Rys. 3.1. Dokładność pozycjonowania (AP_p) i powtarzalność pozycjonowania (RP) [60]



Rys. 3.2. Dokładność orientacji AP_c , gdzie: c_c – kąt położenia zadanego, \bar{c} – wartość średnia orientacji kątowych, $3S_c$ – rozrzut kątów w stosunku do wartości $\pm 3S_c$ [60]

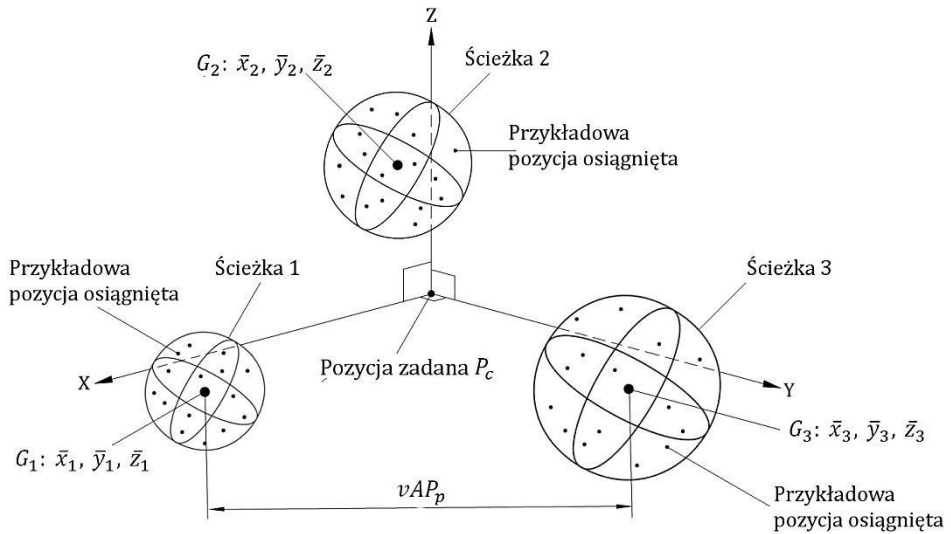
Powtarzalność pozycji (RP) – jest miarą rozrzutu odchyleń pomiędzy pozycjami osiągniętymi po n powtórzeniach, przy osiągnięciu jednakowej pozycji zadanej, przy najeździe w jednym kierunku (rys. 3.1). Dla zadanej pozycji powtarzalność pozycjonowana jest wyrażona poprzez:

- wartość promienia RP_1 sfery o środku w punkcie ciężkości G osiągniętych pozycji,
- rozpiętość odchyleń kątów $\pm 3S_a$, $\pm 3S_b$, $\pm 3S_c$ dla średnich wartości kątów, \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} , gdzie S_a , S_b , S_c są odchyleńmi standardowymi.

Wielokierunkowe odchylenie dokładności pozycji (vAP) – jest to odchylenie pomiędzy wartościami średnimi różnych pozycji osiągniętych przy n – krotnym dojeździe do pozycji zadanej w trzech ortogonalnych kierunkach.

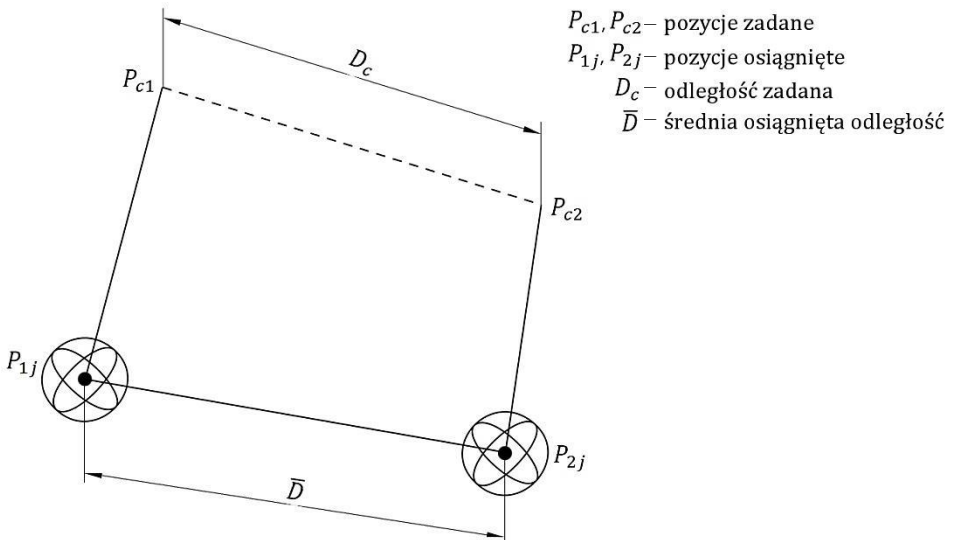
W celu zdefiniowania tej wielkości wykorzystuje się następujące parametry:

- vAP_p – maksymalna odległość pomiędzy środkami ciężkości punktów osiągniętych między końcami różnych ścieżek,
- vAP_a , vAP_b , vAP_c – maksymalna różnica pomiędzy wartością średnią kątów osiągniętych na końcach różnych ścieżek,



Rys. 3.3. Wielokierunkowe odchylenie dokładności pozycji vAP_p , G_1, G_2, G_3 – środki ciężkości osiągniętych pozycji o współrzędnych $\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j$, gdzie $j = 1, 2, 3$ [60]

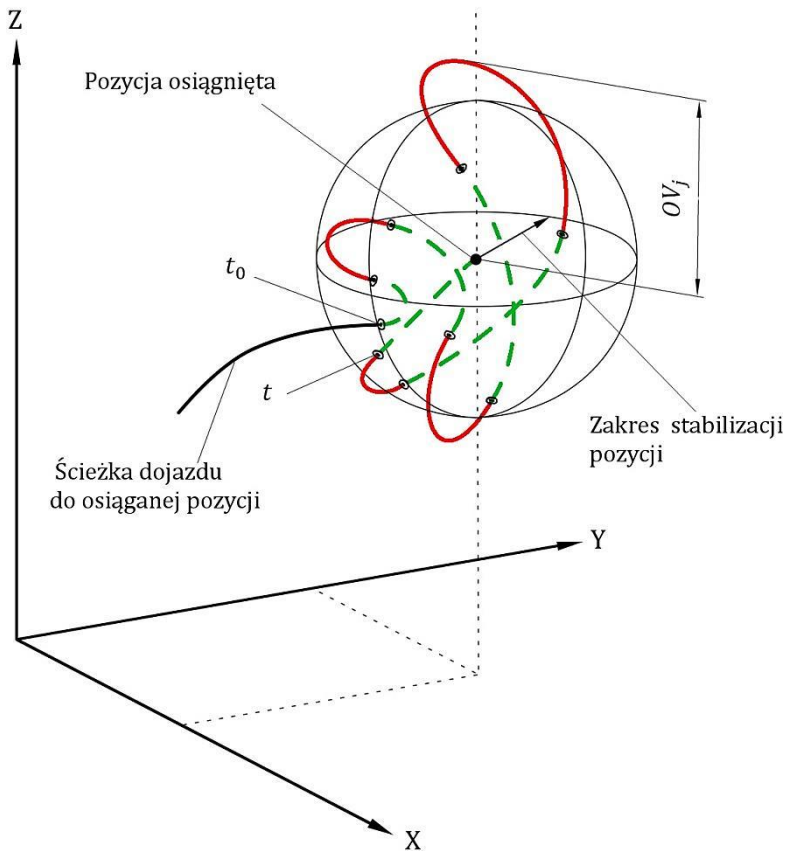
Dokładność odległości (AD_p) jest to odchylenie pozycjonowania oraz orientacji pomiędzy odległością zadaną a średnią odległością osiągniętą (rys. 3.4)



Rys. 3.4. Dokładność odległości [60]

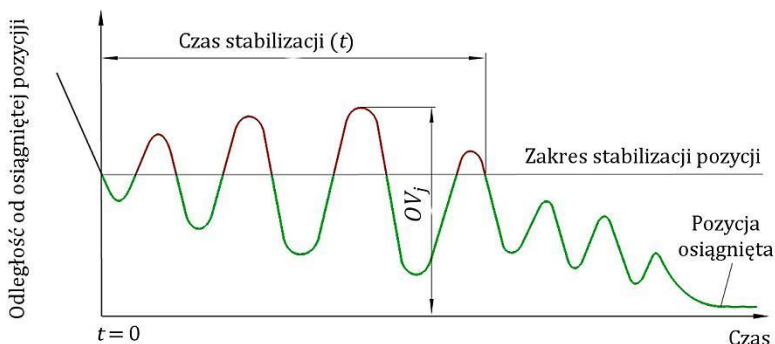
Powtarzalność odległości (RD) jest miarą rozrzutu pomiędzy osiągniętymi odległościami tej samej odległości zadanej, powtórzonej n razy w jednym kierunku.

Czas stabilizacji pozycji (t) definiowany jest jako czas, potrzebny do stabilizacji w pozycji osiągniętej. Mierzony jest od chwili wejścia efektora robota w dany zakres stabilizacji pozycji do momentu pozostania w tym zakresie (rys. 3.5). Z czasem stabilizacji pozycji powiązany jest inny parametr, tj. przeregulowanie pozycji.



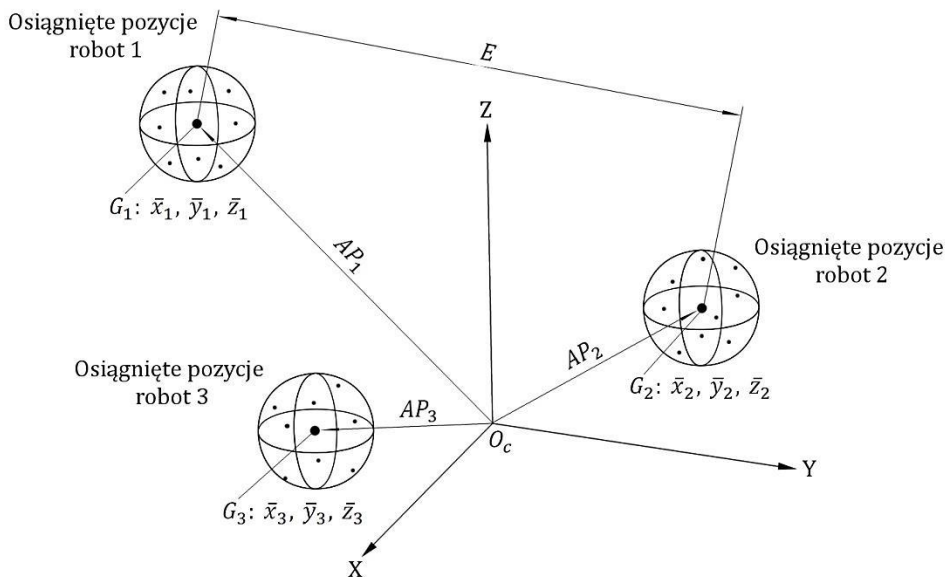
Rys. 3.5. Czas stabilizacji pozycji i przeregulowanie pozycji, t_0 – moment wejścia efektora robota w zakres stabilizacji pozycji, t – czas stabilizacji pozycji, OV_j – przeregulowanie pozycji w j – tym cyklu [60]

Przeregulowanie pozycji (OV) mierzone jest jako maksymalna odległość od osiągniętej pozycji po wyjściu efektora robota poza zakres stabilizacji pozycji. Parametr ten określa zdolność robota do dokładnego i łagodnego zatrzymania się na pozycji osiągniętej (rys. 3.6).



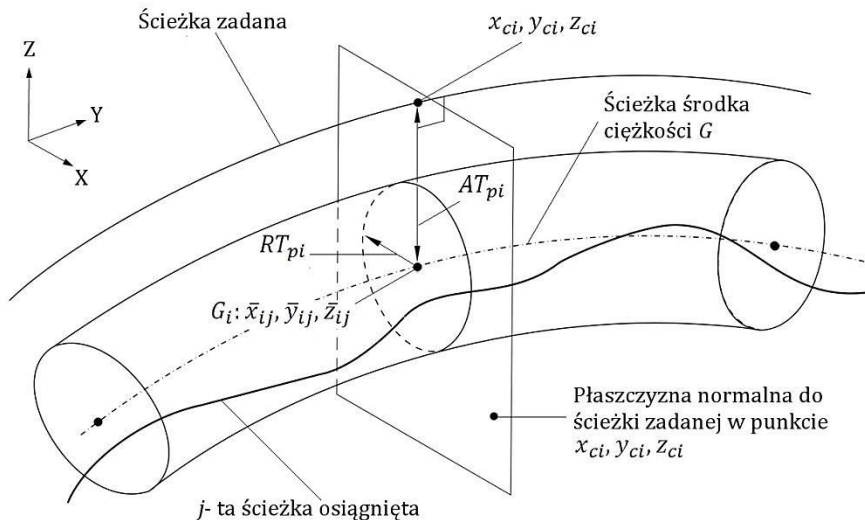
Rys. 3.6. Preregulowanie pozycji, OV_j – przeregulowanie pozycji w j -tym cyklu [60]

Zmienność (E) jest definiowana jako zmiana środka ciężkości pozycji osiągniętych, w przypadku zamiany robota z innym tego samego typu, przy zachowaniu jednakowych warunków środowiskowych, montażu oraz wykonywania identycznych sekwencji programowych. Wyrażana jest jako odległość pomiędzy dwoma środkami ciężkości, wyznaczona w testach dla dwóch robotów o największym odchyleniu osiągniętych pozycji (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Zmienność E , AP_1 , AP_2 , AP_3 – dokładność pozycjonowania testowanych robotów, G_1 , G_2 , G_3 – środki ciężkości, o współrzędnych \bar{x}_j , \bar{y}_j , \bar{z}_j , osiągniętych pozycji przez testowane roboty, gdzie $j = 1, 2, 3$ [60]

Istnieją również parametry związane z dokładnością i powtarzalnością odtworzenia przez robot zaprogramowanej ścieżki. Parametry te są niezależne od kształtu ścieżki, a ich ogólną interpretację graficzną przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Dokładność ścieżki AT i powtarzalność ścieżki RT, AT_{pi} – dokładność pozycjonowania ścieżki w i – tym punkcie ścieżki zadanej, AT_{pi} – ścieżki w i – tym punkcie ścieżki zadanej [60]

Dokładność ścieżki (AT) określa zdolność robota do przemieszczania efektora wzdłuż zadanej ścieżki n razy, w tym samym kierunku. Parametr ten determinują dwie składowe:

- dokładność pozycjonowania ścieżki (AT_p) jako różnica pomiędzy pozycjami tworzącymi zadaną ścieżkę a linią środka ciężkości zbioru ścieżek osiągniętych; obliczana jest jako maksimum odległości m punktów, znajdujących się na zadanej ścieżce od środka ciężkości G_i , uzyskanego w wyniku przeprowadzenia n powtórzeń;
- dokładność orientacji ścieżki (AT_a, AT_b, AT_c) definiowana jako różnica pomiędzy orientacjami zadanymi i średnią z orientacji osiągniętych.

Powtarzalność ścieżki (RT) natomiast, to stopień zgodności pomiędzy osiągniętymi ścieżkami, przy n – krotnej próbie odtworzenia tej samej ścieżki zadanej. Powtarzalność ścieżki wyrażana jest poprzez:

- odległość RT_p będącą wartością maksymalną RT_{pi} oraz równą promieniowi okręgu (znajdującego się na płaszczyźnie normalnej) o środku w punkcie, będącym środkiem ciężkości osiągniętych ścieżek (rys. 3.8);
- maksymalny rozrzut wokół wartości średniej kątów uzyskanych w różnych punktach pomiarowych.

Odchylenie ruchu oscylacyjnego wyznaczone jest wówczas, gdy ruch oscylacyjny jest wynikiem kombinacji nakładających się na siebie ścieżek. Badanie dokładności ruchu oscylacyjnego polega na wyznaczeniu błędu skoku oraz błędu częstotliwości ruchu oscylacyjnego. Ruch taki najczęściej wykorzystywany jest przy spawaniu łukowym. Ścieżka ruchu oscylacyjnego przypomina zęby piły z określonym skokiem oraz odległością jednego okresu przy ustalonej częstotliwości. Szczegółową analizę czynników wpływających na ogólną dokładność robotów zaprezentowano w rozdziale 3.3.

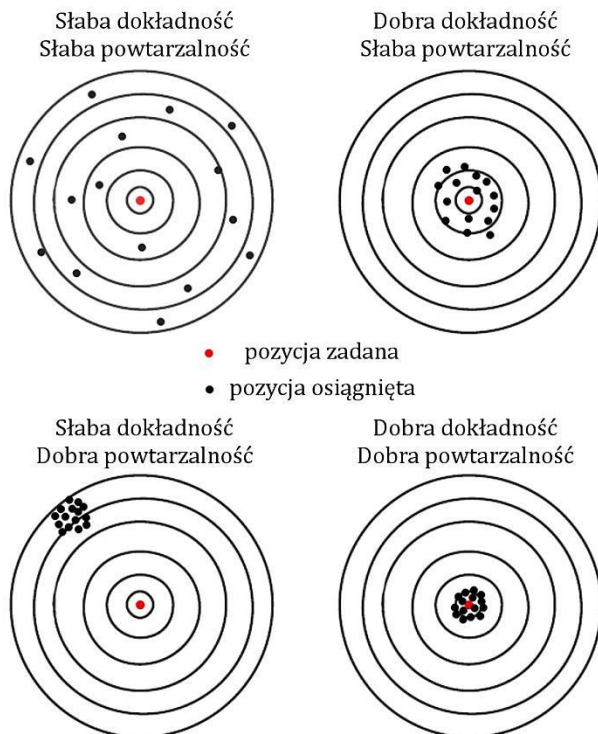
3.2. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania

Parametry dokładności i powtarzalności pozycjonowania w zależności od metody programowania robota, w różnym stopniu wpływają na ogólnie rozumianą dokładność robota przemysłowego. Powtarzalność pozycjonowania jest parametrem decydującym w przypadku, gdy robot programowany jest w trybie on-line, czyli na stanowisku roboczym. Programowanie starszych robotów odbywało się w sposób kontaktowy, gdzie ruchy robota ograniczane były za pomocą zderzaków mechanicznych rozmieszczonych w przestrzeni roboczej. Dziś metoda on-line ma charakter bezkontaktowy, gdzie manipulator w sposób ręczny lub za pomocą panelu sterującego (teach pendant'a) przemieszczany jest przez operatora do ustalonych punktów w przestrzeni. Pozycje oraz kąty poszczególnych przegubów są odczytywane przez sensory położenia, a następnie zapamiętywane. W momencie, gdy robot otrzymuje komendę powrotu do określonego punktu w przestrzeni, każdy z przegubów przemieszcza się według zapamiętanych wartości. W takim przypadku istotne jest jedynie to, aby robot osiągał zapamiętane (nauczone) punkty z wymaganą powtarzalnością.

Obecnie często wykorzystuje się systemy komputerowe umożliwiające programowanie robotów w przestrzeni wirtualnej (offline), poza stanowiskiem roboczym. Technika ta posiada wiele zalet w stosunku do programowania poprzez nauczanie. Pozwala między innymi na skrócenie czasu, w którym robot jest wyłączony z produkcji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku dużej zmienności procesów wytwórczych, co wiąże się z koniecznością częstej modyfikacji programu. Pozycje programowane metodą offline, definiowane są w przestrzeni, w odniesieniu do bezwzględnego lub lokalnego układu współrzędnych. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że warunki w przestrzeni wirtualnej ze względu na szereg czynników omówionych w podrozdziale 3.2, nie odzwierciedlają w pełni warunków rzeczywistych na stanowisku roboczym. Skutkiem tego są różnice pomiędzy pozycją zaprogramowaną a rzeczywistą pozycją osiągniętą przez robota. W tym przypadku o dokładności robota decyduje głównie parametr dokładności pozycjonowania [6, 11, 38–39, 41, 45, 52].

Literatura [16, 38, 43] wskazuje również, że roboty przemysłowe charakteryzują się wysoką powtarzalnością pozycjonowania, natomiast ich dokładność pozycjonowania jest niska. Oznacza to, że efektor robota osiąga wielokrotnie

określony punkt z dużą precyzją, jednak położenie tego punktu w przestrzeni znacznie odbiega od położenia zadanego (zaprogramowanego). Na rys. 3.9 przedstawiono w sposób graficzny różnicę pomiędzy powtarzalnością a dokładnością pozycjonowania, natomiast w dalszej części pracy zaprezentowano definicje poszczególnych parametrów dokładności robotów przemysłowych.



Rys. 3.9. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania [40]

Dokładność pozycjonowania

Jak już wcześniej zdefiniowano dokładność pozycji jest różnicą pomiędzy pozycją zadaną a średnią pozycją osiągniętą przez efektor robota przy najeździe z jednego kierunku.

Dokładność pozycji można obliczyć z następujących zależności:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (3.1)$$

$$AP_x = \bar{x} - x_c \quad (3.2)$$

$$AP_y = \bar{y} - y_c \quad (3.3)$$

$$AP_z = \bar{x} - z_c \quad (3.4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (3.6)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (3.7)$$

gdzie: $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – współrzędne środka punktów uzyskanych przy n -krotnym osiągnięciu pozycji zadanej,

x_c, y_c, z_c – współrzędne zadanej pozycji,

x_j, y_j, z_j – współrzędne j -tej pozycji osiągniętej.

Dokładność orientacji można obliczyć z następujących zależności:

$$AP_a = \bar{a} - a_c \quad (3.8)$$

$$AP_b = \bar{b} - b_c \quad (3.9)$$

$$AP_c = \bar{c} - c \quad (3.10)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j \quad (3.11)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j \quad (3.12)$$

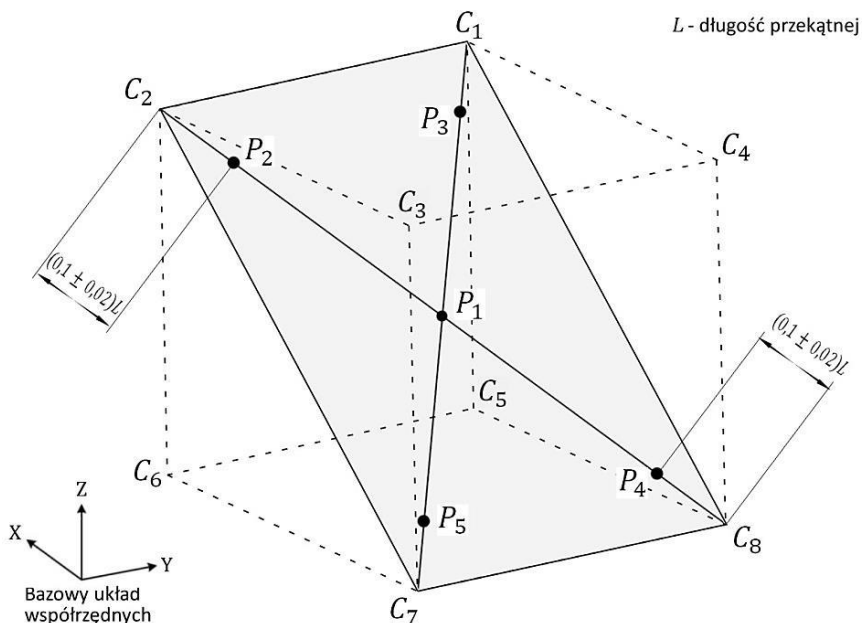
$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j \quad (3.13)$$

gdzie: $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ – średnia wartości kątów osiągniętych pozycji,

a_c, b_c, c_c – wartości kątów zadanej pozycji,

a_j, b_j, c_j – wartości kątów j -tej pozycji osiągniętej.

Według warunków testowych przedstawionych w normie ISO 9283, badania powinny być realizowane w przestrzeni sześcienniej o krawędziach równoległych bazowego układu współrzędnych. Punkty pomiarowe powinny znajdować się na jednej z płaszczyzn wewnętrznych ustalonego sześcianu. Ponadto płaszczyzna pomiarowa musi być oparta na dwóch jego przekątnych (rys. 3.10).

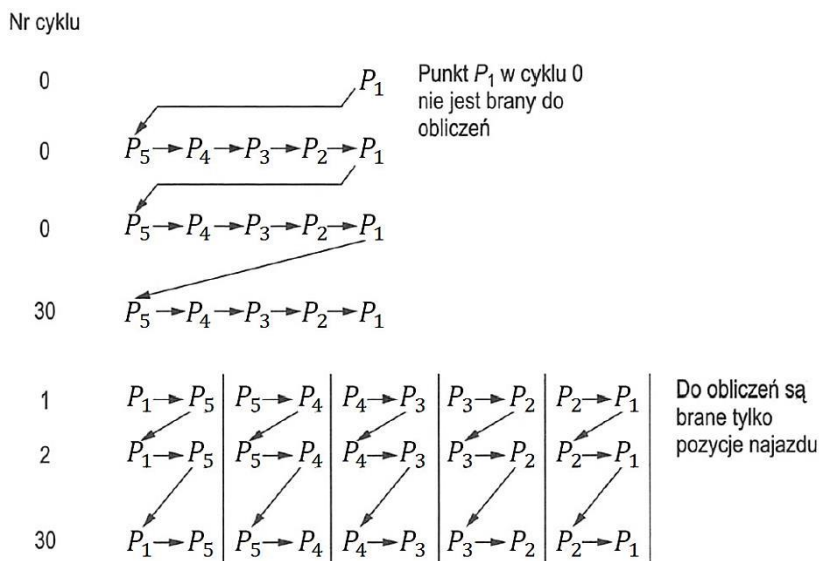


Rys. 3.10. Przykład płaszczyzny testowej [60]

Przykładowe warunki testowe podczas badania dokładności pozycjonowania przedstawiono w tab. 3.1, natomiast możliwe cykle ruchów robota na rys. 3.11. Rozpoczynając w pozycji P1 robot osiąga kolejne punkty ścieżki testowej P5-P4-P3-P2-P1, przy czym każdy z punktów pomiarowych (pozycji) musi być osiągnięty przy jednokierunkowym przemieszczeniu w każdym z określonych cykli. Punkt P1 jest środkiem sześcianu znajdującym się na przecięciu dwóch jego przekątnych. Norma określa również odległość pozostałych punktów (P2-P5) od końców przekątnych tj. $(10 \pm 2\%)$ długości przekątnej. Ustalone przejazdy powinny odpowiadać zaprogramowanym. Na ich podstawie oblicza się dokładność pozycji AP_p oraz orientację AP_a , AP_b , AP_c .

Tab. 3.1. Warunki testowe dla dokładności i powtarzalności pozycjonowania [60]

Obciążenie	Prędkość przesuwu efektora v_f	Pozycje	Liczba cykli
100 % obciążenia	100% 50% 10%	P1-P2-P3-P4-P5	30
Znamionowe obciążenie zredukowane do 10% (opcjonalnie)	100% 50% 10%		



Rys. 3.11. Możliwe cykle ruchów robota podczas badania dokładności pozycjonowania [60]

Powtarzalność pozycjonowania opisują następujące parametry [60]:

- RP_l – promień kuli o środku ciężkości pozycji osiągniętych G (rys. 3.1),
- rozpiętość odchyłeń kątów dla średnich wartości kątów, a_σ , b_σ , c_σ , gdzie S_a , S_b , S_c są odchyleniami standardowymi.

Powtarzalność pozycjonowania można obliczyć z następujących zależności:

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (3.14)$$

przy czym,

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (3.15)$$

zaś,

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (3.16)$$

oraz

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (3.17)$$

gdzie: \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej uzyskanej poprzez n -krotne osiągnięcie pozycji zadanej

x_j, y_j, z_j – współrzędne rzeczywistego położenia przy j -tej próbie osiągnięcia pozycji zadanej.

Powtarzalność orientacji dla zadanej wartości kątów pozycji zadane przyjmuje natomiast postać:

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (3.18)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (3.19)$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (3.20)$$

gdzie: a, b, c – wartości kątów zadanej pozycji,

a_j, b_j, c_j – wartości kątów j -tej pozycji osiągniętej

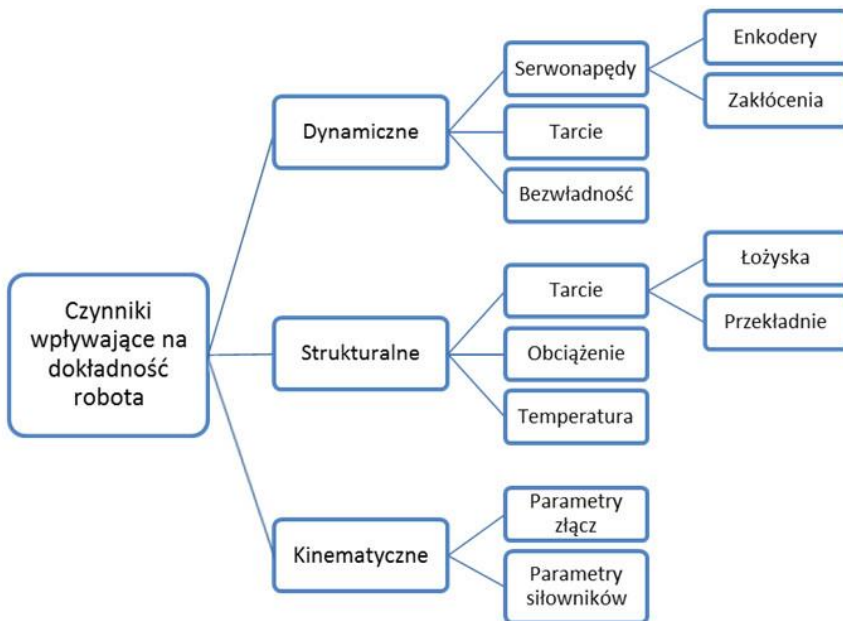
Procedura pomiarowa badania powtarzalności pozycjonowania wygląda analogicznie jak w przypadku badania dokładności pozycjonowania, zmieniają się natomiast algorytmy obliczeniowe (rys. 3.10).

3.3. Źródła błędów dokładności i powtarzalności pozycjonowania

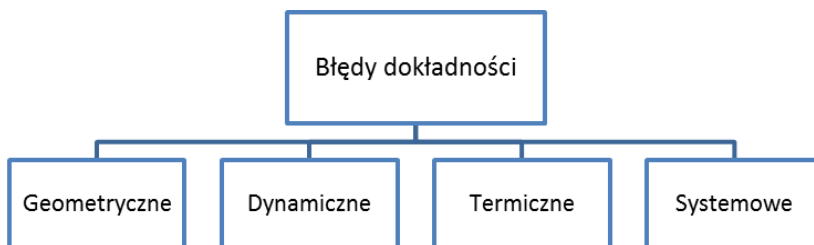
W literaturze specjalistycznej przytaczane są różne kryteria klasyfikacji błędów pozycjonowania robotów przemysłowych. W pracy [1] wyróżniono błędy geometryczne i niegeometryczne. Praca [10] definiuje błędy wpływające na dokładność robota, dzieląc je na trzy podstawowe grupy: dynamiczne, strukturalne oraz kinematyczne (rys. 3.12).

Według klasyfikacji przedstawionej na rys. 3.12, do dynamicznych źródeł błędów pozycjonowania robota zalicza się oddziaływania sił bezwładności i tarcia oraz niewłaściwą pracę serwomechanizmów i ich sterowników. Druga

grupa błędów, to błędy dotyczące czynników strukturalnych, takich jak: załadunek, temperatura oraz sztywność poszczególnych członów robota. Trzecia i zarazem mająca największy wpływ na dokładność pozycjonowania, to grupa błędów kinematycznych. Wynikają one głównie z dokładności geometrycznej wykonania poszczególnych części (wymiarowo kształtowej) oraz połączeń (montażu) i ich zdolności do realizacji złożonych ruchów w przestrzeni wielowymiarowej [10, 40].



Rys. 3.12. Zbiór czynników decydujących o pozycjonowania robotów przemysłowych [10]



Rys. 3.13. Źródła błędów pozycjonowania robotów przemysłowych wg [15]

Inny przykład klasyfikacji błędów został przedstawiony w pracy [15], w której wyróżniono cztery grupy błędów robotów przemysłowych tj.: błędy geometryczne, dynamiczne, termiczne oraz systemowe (rys. 3.13).

Błędy geometryczne

Struktura kinematyczna robota jest często określana za pomocą równań matematycznych, opisujących wzajemne położenie i orientację kolejnych członów robota. Istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność opisu takiego modelu jest znajomość wymiarów geometrycznych członów robota (długości). Biorąc pod uwagę ograniczoną dokładność procesów wytwórczych oraz stosowane tolerancje wymiarowe, błędy geometryczne robotów przemysłowych są nieuniknione. W modelu matematycznym wykorzystywanym przez kontroler robota przyjmowane są zaprojektowane wartości odbiegające od rzeczywistych, co powoduje, że obliczenia dotyczące kinematyki nie są idealne. Mogą one przejawiać się jako odchyłki położenia kąтового (rotacji), odchyłki położenia liniowego (prostokątności lub równoległości). Często nie są one uwzględnione w równaniach opisujących poszczególne mechanizmy robota. Bardzo istotne, a zarazem często pomijane, są tzw. błędy Abbego. Wynikają one z odchyłek równoległości i prostokątności powodujących, że odległość pomiędzy wierzchołkiem kąta i założonym punktem (najczęściej następnym złączem) zwiększa wartość błędów kątowych [1, 15].

Błędy dynamiczne

Z uwagi na różne zastosowania robotów przemysłowych oraz związany z tym niejednorodny charakter pracy, występują zróżnicowane obciążenia dynamiczne. Błędy dynamiczne wynikają głównie z działających sił bezwładności oraz wzbudzanych podczas przemieszczeń drgań (rezonansu). Modelowanie błędów dynamicznych oraz ich wpływu na ogólny stan robota jest bardzo skomplikowane oraz kosztowne. Z uwagi na to, występują istotne trudności przy próbie ich kompensacji. Z reguły w wielu przypadkach, tego typu błędy są pomijane. Powodem tego jest to, że występują one głównie wzdłuż ścieżki przemieszczenia a nie w wyznaczonych punktach, które robot ma osiągnąć. Jeżeli jednak wykorzystywane jest programowanie ciągłe – szczególnie w przypadkach, gdy wymagane są płynne ruchy ramienia robota wzdłuż ścieżki, będącej często bardzo skomplikowaną krzywą, błędy dynamiczne mogą mieć istotny wpływ na osiąganą dokładność [15].

Błędy termiczne

Błędy termiczne związane są z różnicami właściwości materiałów stosowanych na poszczególne elementy robotów przemysłowych. Tego typu błędy mają głównie charakter nieliniowy, co powoduje, że nie mogą być one kompensowane z wykorzystaniem prostych współczynników skali. Źródła ciepła powodujące błędy mogą być bardzo zróżnicowane i dotyczyć np.: łożysk, silników, układów napędowych, układów hydraulicznych, pneumatycznych, a także zmian tempe-

ratury otoczenia. Zmiany środowiskowe mają bardziej równomierny wpływ na wartości błędów dokładności z uwagi na brak lokalizacji źródeł ciepła w konkretnym punkcie. Niejednokrotnie, tego typu błędy zaliczane są do grupy błędów geometrycznych z uwagi na zjawisko rozszerzalności cieplnej powodujące zmianę wymiarów części składowych robota [14–15].

Błędy systemowe

Błędy systemowe są efektem czynników, takich jak: niewłaściwa kalibracja robota, luzy w układzie napędowym, niedokładność czujników oraz źle wyregulowane serwomechanizmy. Istotnym problemem w kontrolowaniu tego typu błędów jest ich identyfikacja oraz jednoznaczne oddzielenie od pozostałych źródeł błędów [15]. Problematyka kalibracji robotów przemysłowych oraz identyfikacji błędów pozycjonowania z nią związanych, jest analizowana w wielu pozycjach literaturowych [1, 10, 15–16, 38, 52, 54] przedstawionych w dalszej części pracy.

Niedokładność czujników staje się dzisiaj coraz mniej istotna z uwagi na coraz to lepsze ich parametry metrologiczne (dużą rozdzielczość, czułość, itp.). Zazwyczaj, jeśli występuje problem z czujnikiem, to ma on charakter katastroficzny, polegający na jego całkowitym uszkodzeniu.

Luzy w układach napędowych stanowią problem w przypadku poziomych osi obrotowych obciążonych grawitacyjnie. Dla innych osi, takich jak pionowe osie obrotowe, luz może być zmierzony oraz automatycznie kompensowany za każdym razem, gdy następuje zmiana kierunku ruchu.

Błędna regulacja serwonapędów może być identyfikowana dzięki odpowiednio dostosowanemu systemowi, który umożliwi rozpoznawanie błędów i wyświetlanie odpowiednich komunikatów, np.: o występujących w układzie oscylacjach, przeregulowaniu, niedoregulowaniu czy błędach stabilności. Większość robotów przemysłowych dostępnych na rynku posiada serwomechanizmy z fabrycznie wyregulowanymi układami bez uwzględnienia załadunku lub dla jego określonej wartości nominalnej. W rzeczywistości roboty przemysłowe wykonywane są do wykonywania różnorodnych zadań, w których wartość obciążenia jest zmienna, co może prowadzić do błędów dokładności pozycjonowania [15, 35, 37, 46–47].

3.4. Metody badania dokładności robotów przemysłowych

Badanie dokładności robotów powinno być przeprowadzane w określonych warunkach środowiskowych oraz w ustalonych cyklach. Robot będący przedmiotem badań powinien być w pełni wyposażony (w czujniki, ochronne kurtyny, itp.) oraz zainstalowany zgodnie z wymaganiami określonymi przez producenta. Istotne są również warunki środowiskowe, takie jak: temperatura ($20\pm 2^\circ\text{C}$), wilgotność, zanieczyszczenie powietrza, wysokość na jakiej zainsta-

lowany jest robot, drgania oraz oddziaływanie pola elektromagnetycznego. Zalecane warunki badań zawarte są w odpowiednich normach a także określone są przez producenta robota przemysłowego. Przed przystąpieniem do testu, robot powinien być utrzymywany przez 12 godzin w stałych warunkach termicznych. Przeciwwskazana jest również ekspozycja na działanie promieni słonecznych oraz innych źródeł ciepła [17, 57].

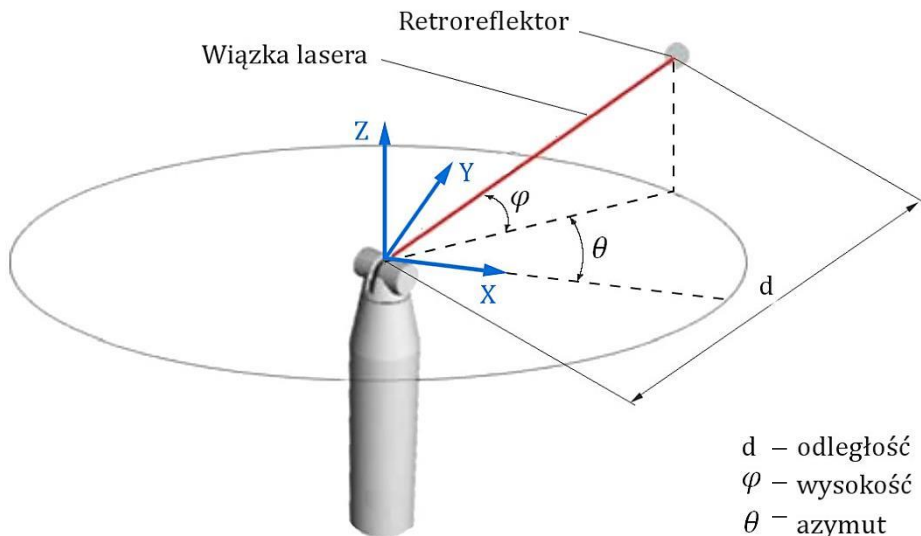
Podczas testu, najazd na każdą ustaloną pozycję powinien być przeprowadzony przy użyciu wszystkich osi robota. Należy również pamiętać o tym, by wszystkie zadane parametry były zgodne ze specyfikacją maszyny. Kształt oraz rozmiar ścieżek testowych należy ustalić adekwatnie do wielkości przestrzeni roboczej badanego robota [17, 51].

W literaturze można znaleźć przykłady zastosowania różnorodnych technik pomiarowych wykorzystywanych do identyfikacji dokładności i powtarzalności pozycjonowania oraz kalibracji robotów przemysłowych. Najczęściej wykorzystywane metody pomiaru odchyłek pozycjonowania, obejmują [17]:

- odczyt przemieszczeń poszczególnych par kinematycznych;
- wykorzystanie systemu kamer zamocowanych do sprzęgu robota lub przytwierdzonych do konstrukcji samego robota, których zadaniem jest zbieranie informacji o pozycji obiektu referencyjnego;
- dojazd do części referencyjnych za pomocą zainstalowanego jako efektora czujnika zegarowego (lub elektrycznego) i dojeżdżenie nim do określonych wcześniej punktów pomiarowych; technika ta jest jedną z najprostszych i najstarszych metod pomiaru położenia robota;
- triangulację laserową, opierającą się na wyświetlaniu plamki promienia lasera na powierzchni obiektu oraz jej obserwację za pomocą układu optycznego;
- zastosowanie interferometrii laserowej.

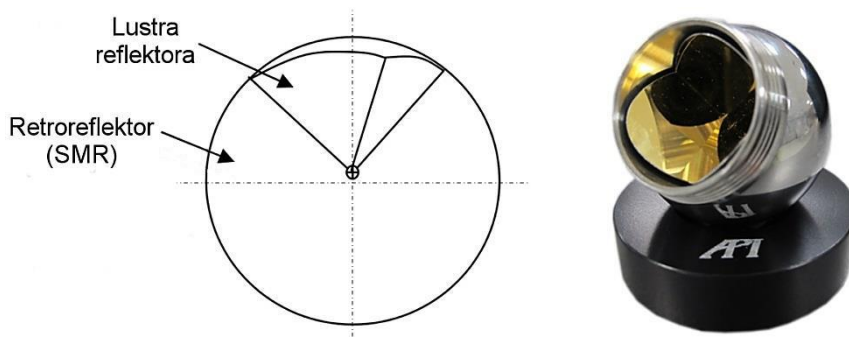
Jak wynika z analizy literatury jedną z najczęściej wykorzystywanych metod jest pomiar za pomocą trakerów laserowych (interferometru śledzącego), zaliczanych do współrzędnościowych systemów pomiarowych. Wśród systemów śledzących można wyróżnić dwa typy, tj. mierzące drogę w sposób bezpośredni (mierzony jest tylko przyrost drogi) oraz w sposób pośredni (w którym określane jest położenie rozpatrywanego punktu względem ustalonego punktu bazowego) [30, 32].

Zasada działania trakerów opiera się na połączeniu dwóch technik tj. interferometrii laserowej (opisanej szerzej w rozdziałach 4 i 5) umożliwiającej pomiar odległości oraz zastosowaniu enkoderów optycznych pozwalających na pomiar kąta w dwóch osiach (azymutu oraz wysokości) – rys. 3.14 [62].



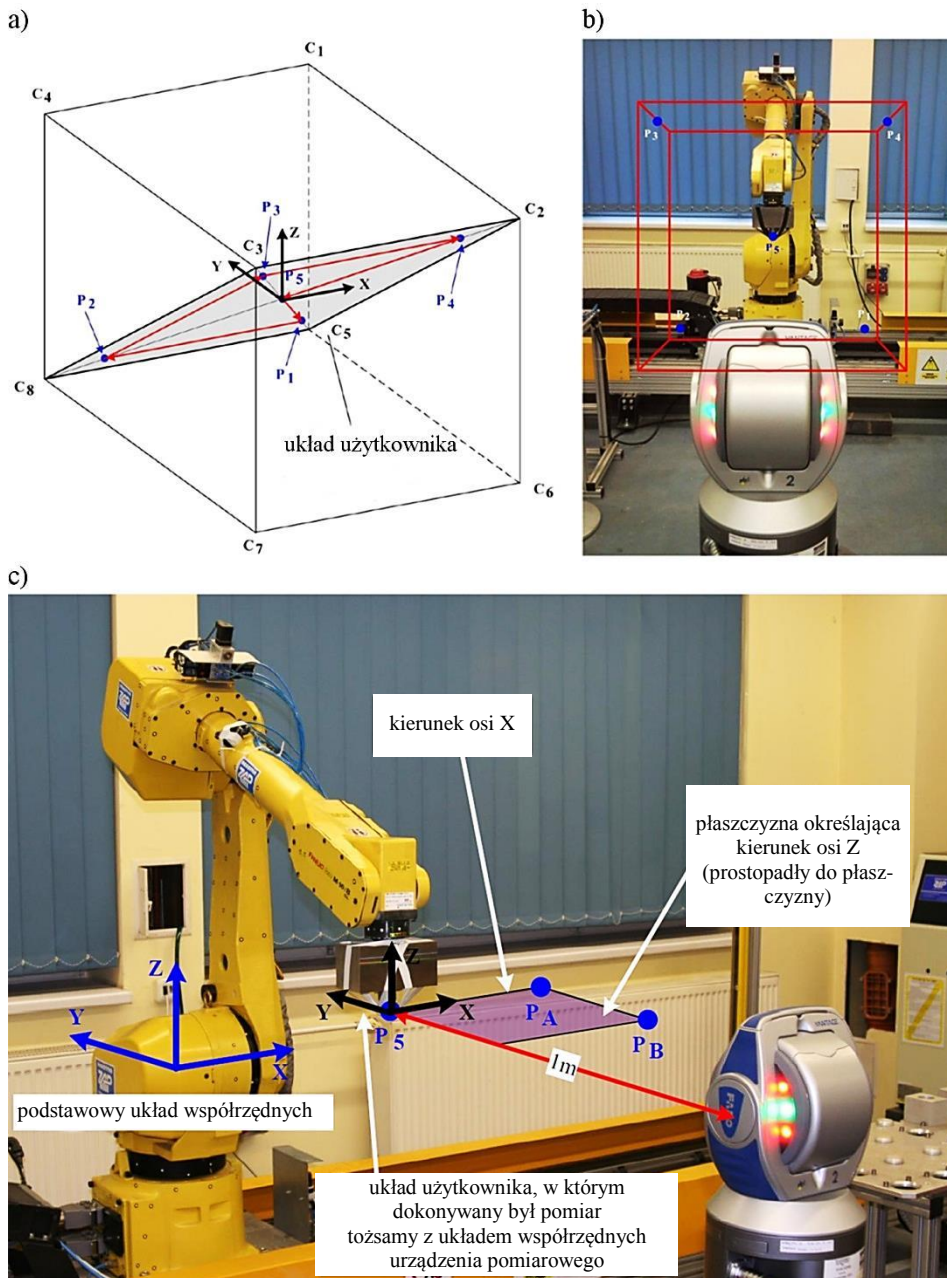
Rys. 3.14. Zasada działania trakera laserowego [62]

W przypadku trakerów, do odbicia generowanej przez urządzenie wiązki lasera wykorzystuje się retroreflektory o sferycznej budowie (SMR - Sphere Mounted Retroreflector). Lustra w retroreflektorze ułożone są pod odpowiednim kątem względem siebie w taki sposób, że miejsce ich styku (wierzchołek) pokrywa się dokładnie ze środkiem SMR (rys. 3.15). Umożliwia to precyzyjne określenie współrzędnych położenia retroreflektora w przestrzeni trójwymiarowej [7].



Rys. 3.15. Budowa retroreflektora trakera laserowego [7, 85]

W pracy [50] zaproponowano metodę pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania za pomocą trakera laserowego na przykładzie robota Fanuc M16iB. Przedstawiona w pracy metodyka badań określona została dla warunków przemysłowych.



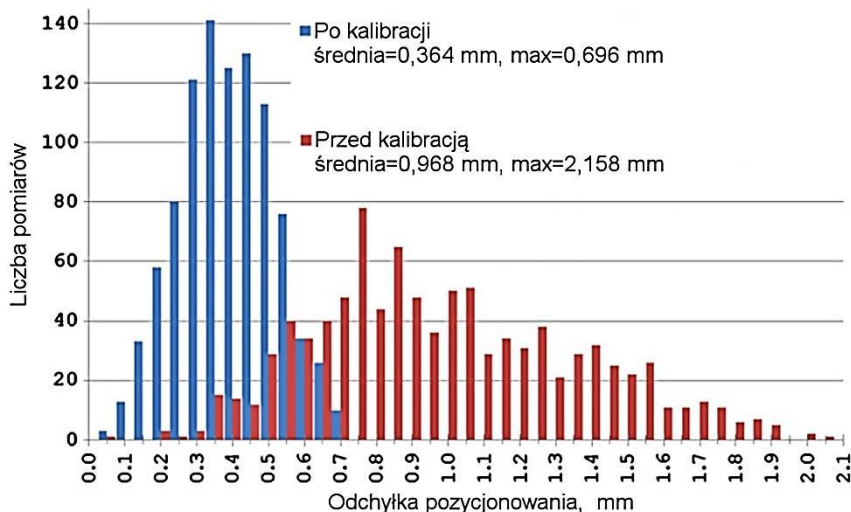
Rys. 3.16. Metodyka badania dokładności robota za pomocą trakera laserowego, a) płaszczyzna pomiarowa, b) położenie Laser Trackera w osi środka sześcienniej przestrzeni roboczej, c) układ współrzędnych urządzenia pomiarowego Faro Laser Tracker Ventage [49–50]

Autor pracy [50] zaproponował dwa warianty konfiguracji pomiarowej, tj. przypadek pełnego dostępu do badanego robota oraz przypadek ograniczonego dostępu. W warunkach przemysłowych podczas rzeczywistego cyklu pracy, dostęp do odpowiedniego miejsca mocowania retroreflektora na oprzyrządowaniu technologicznym jest ograniczony. W przestrzeni pracy robota zazwyczaj znajdują się elementy konstrukcyjne stanowiska, części na których przeprowadzane są operacje technologiczne itp. W takiej sytuacji przeprowadzenie pomiarów zgodnie z wymaganiami przedstawionymi w normie jest bardzo utrudnione lub niejednokrotnie niewykonalne. Jednak jak podaje autor [50], zaproponowana metodyka badań umożliwia zastosowanie zawartej w normie procedury obliczania parametrów powtarzalności i dokładności pozycjonowania robota.

Przykład zastosowania trackera laserowego przedstawiono również w pracy [2]. Autorzy publikacji podjęli próbę identyfikacji parametrów robota przemysłowego MOTOMAN SK120. Zmierzone parametry posłużyły do estymacji błędów pozycjonowania za pomocą wielomianów Fouriera.

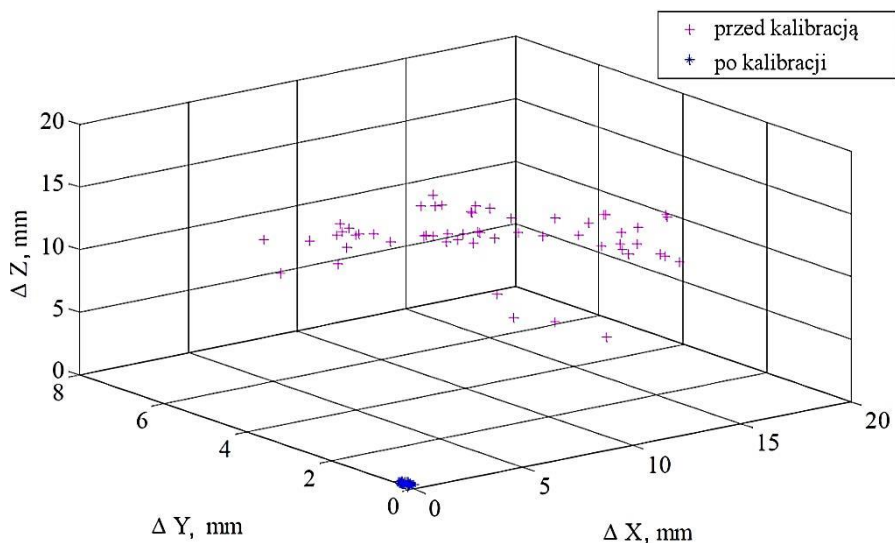
W pracy [43] przeprowadzono analizę powtarzalności pozycjonowania robota ABB IRB1600 z wykorzystaniem trackera laserowego firmy FARO. Deklarowana przez producenta dokładność pomiaru wzorca o długości 2,3 m oddalonego o 2 m przyjmuje wartość 22 μm , zaś powtarzalność pomiaru systemu wynosi 8 μm . Wyniki przedstawione przez autorów [43] wskazują, że powtarzalność pozycjonowania badanego robota zawiera się w przedziale 22–37 μm .

Analogiczną konfigurację pomiarową zastosowano w pracy [38], dotyczącej kalibracji wspomnianego wcześniej robota. Maksymalne odchyłki pozycjonowania wynosiły około 2100 μm , natomiast po przeprowadzeniu kalibracji zostały zredukowane do wartości wynoszących około 700 μm (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Odchyłki pozycjonowania przed i po kalibracji, mierzone za pomocą trackera laserowego FARO (wyniki pomiaru uzyskano dla obciążenia efektora masą równą 3 kg) [38]

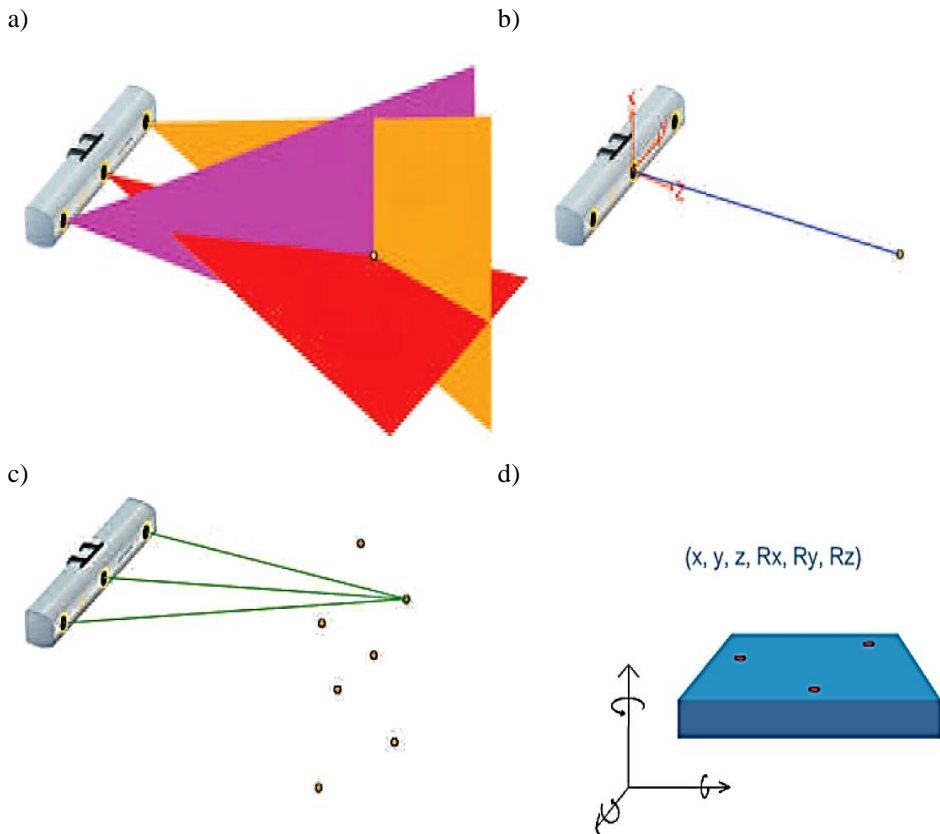
W pracy [54] przedstawiono próbę kalibracji robota 6-DOF, z wykorzystaniem modelu MDH (ang. Modified Denavit-Hartenberg model). Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem trakera Leica AT901 B (dokładność pomiaru systemem nie przekracza 10 μm na odcinku o długości 1m). Maksymalna odchyłka pozycjonowania przed kalibracją wynosiła około 2500 μm , natomiast po kalibracji obniżono ją do wartości poniżej 1000 μm (rys. 3.18).



Rys. 3.18. Odchyłki pozycjonowania przed i po przeprowadzeniu kalibracji robota, mierzone z wykorzystaniem trakera laserowego Leica AT901 B (wyniki pomiaru uzyskano dla obciążenia efektora masą równą 10 kg) [54]

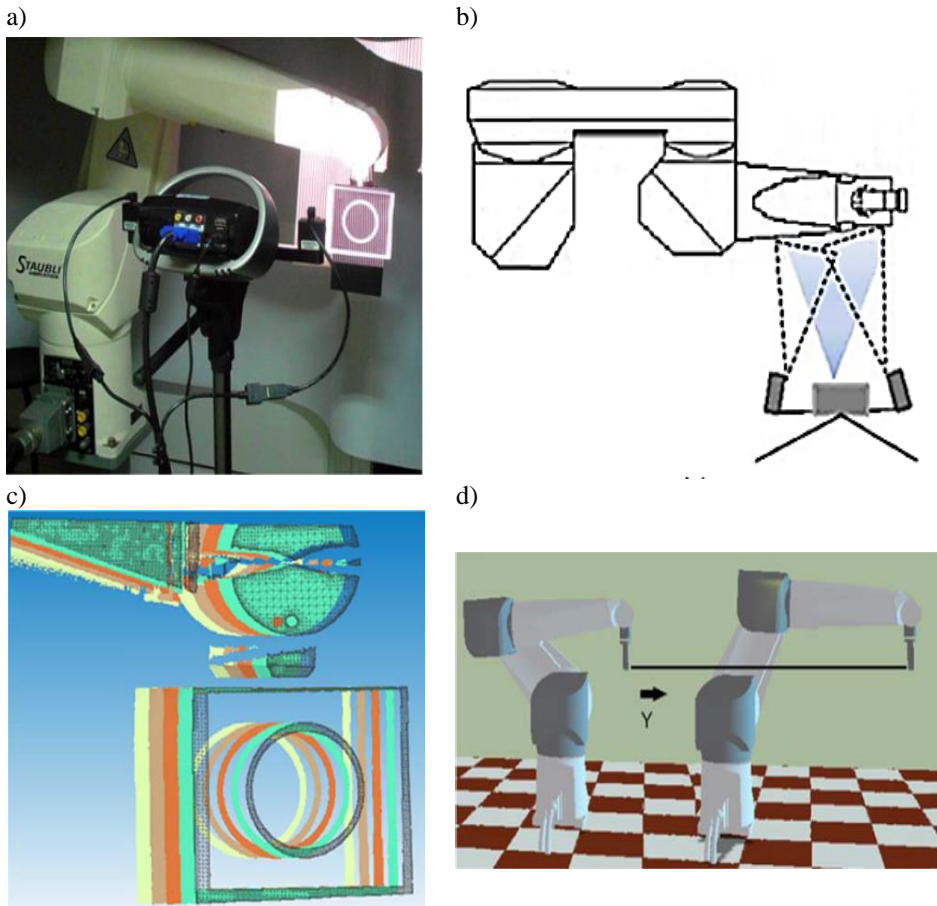
Autorzy pracy [51] wskazują również trakery laserowe jako skuteczną metodę ustalania dokładności i powtarzalności odwzorowania zadanej trajektorii przez badanego robota.

Ideę identyfikacji błędów dokładności z wykorzystaniem kamer CCD przedstawiono w pracy [1]. Autorzy wykorzystując system Krypton K600 dokonali pomiaru osiągniętych pozycji przez ramię robota ABB. Działanie systemu opiera się na detekcji światła podczerwonego emitowanego przez diodę LED zamontowaną na efektorze robota. Każda z trzech kamer CCD urządzenia rejestruje obraz w określonej płaszczyźnie. Płaszczyzny te przecinają się w punkcie położenia diody LED, wyznaczając jednocześnie jego pozycję w przestrzeni 3D (rys. 3.19 a, b). Dzięki zastosowaniu komputerowo sterowanego stroboskopa, system umożliwia śledzenie do 256 diod LED jednocześnie, co z kolei pozwala na określenie pozycji oraz orientacji obiektu w przestrzeni (rys. 3.19 c, d) [1]. Zmierzona tą metodą odchyłka pozycjonowania robota przed kalibracją wynosiła 3250 μm , natomiast po kalibracji została zredukowana do 290 μm .



Rys. 3.19. Zasada działania systemu Krypton K600: a) płaszczyzny, w których obserwowana jest dioda LED, b) punkt przecięcia płaszczyzn określający pozycję diody LED w przestrzeni 3D, c) śledzenie wielu diod LED jednocześnie, d) określenie położenia oraz orientacji w przestrzeni 3D obiektu [1]

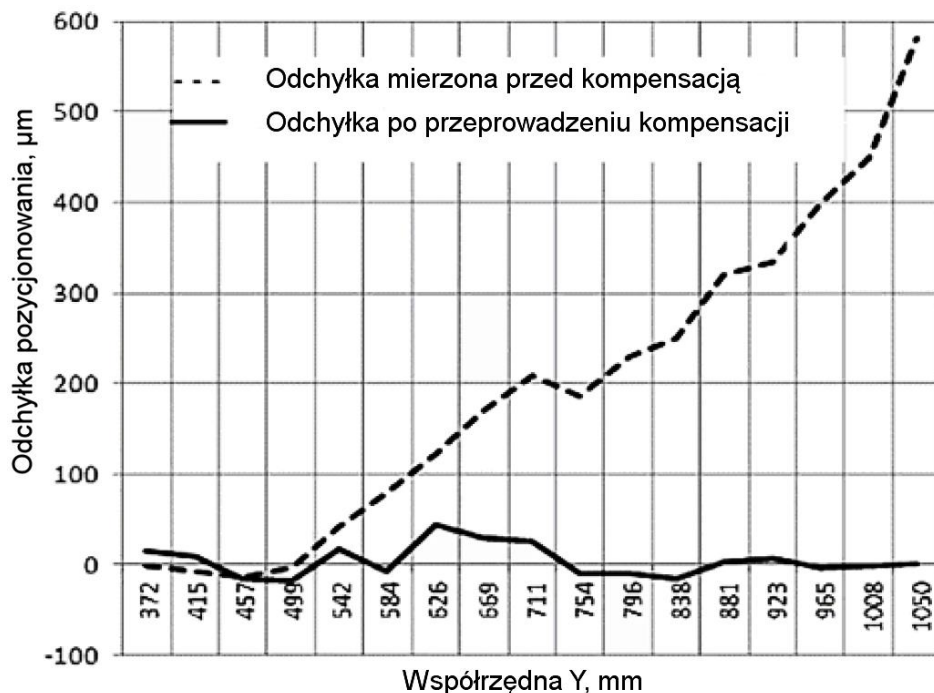
Ciekawe rozwiązanie zaproponowali autorzy pracy [3], wykorzystując do pomiarów skaner 3D IScan M300 firmy Imetrics o dokładności pomiaru $8\ \mu\text{m}$. Technika pomiaru za pomocą urządzenia 3D IScan M300 opiera się na analizie deformacji obrazu oświetlanego przedmiotu światłem białym (rys. 3.20). Zniekształcenie obrazu rejestrowane przez kamery jest adekwatne do kształtu oświetlanej powierzchni. W ten sposób uzyskuje się dane w postaci chmury punktów o znanych współrzędnych w przestrzeni wielowymiarowej. Pomiary prowadzono w ustalonych punktach pomiarowych znajdujących się na ścieżce przemieszczeń robota (rys. 3.20 c, d).



Rys. 3.20. Badanie powtarzalności pozycjonowania za pomocą skanera 3D IScan M300
 a) stanowisko pomiarowe, b) zasada działania, c) obraz z pięciu kolejnych pomiarów osiągniętych
 pozycji, d) ścieżka pomiarowa [3]

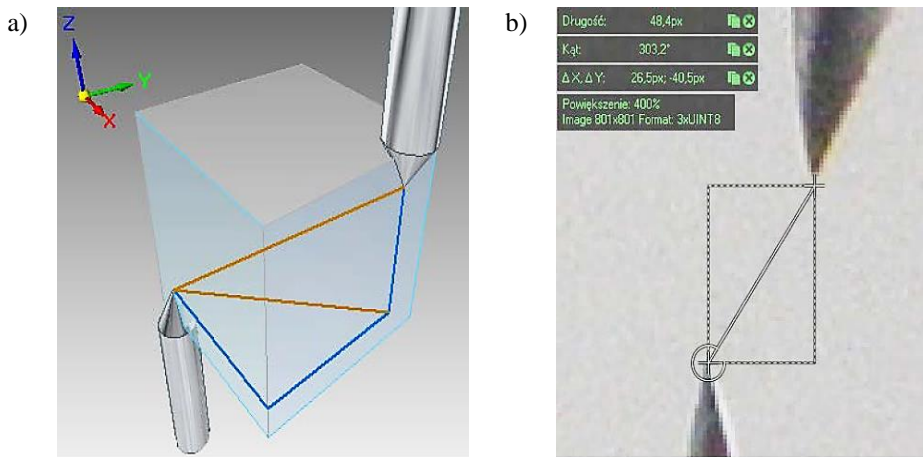
Zniekształcenie obrazu rejestrowane przez kamery jest adekwatne do kształtu oświetlanej powierzchni. W ten sposób uzyskuje się dane w postaci chmury punktów o znanych współrzędnych w przestrzeni wielowymiarowej. Pomiary prowadzono w ustalonych punktach pomiarowych znajdujących się na ścieżce przemieszczeń robota (rys. 3.20 c, d).

Maksymalna odchyłka pozycjonowania badanego ramienia robota (6 DOF) wynosiła około $600 \mu\text{m}$. W pracy [3] podjęto również próbę kompensacji błędów przy pomocy sztucznych sieci neuronowych (rys. 3.21).

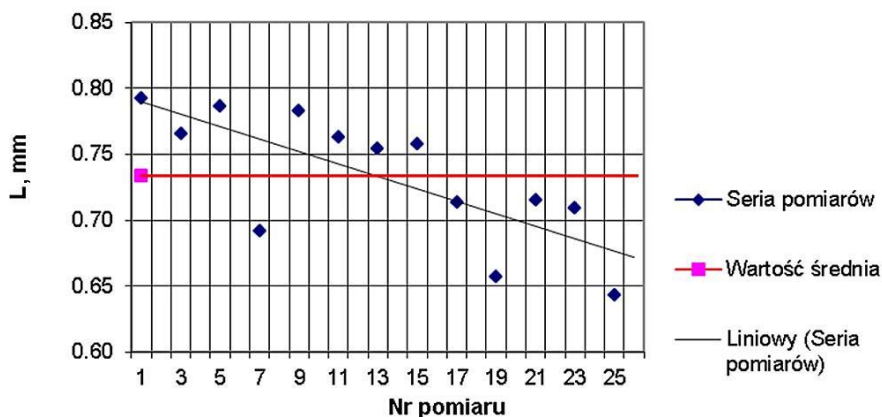


Rys. 3.21. Odchyłki pozycjonowania robota 6 DOF zmierzone w kierunku Y przed kompensacją oraz obliczone z zastosowaniem kompensacji za pomocą sztucznych sieci neuronowych [3]

W pracy [23] zaprezentowano oryginalne podejście do automatycznej kontroli pozycjonowania robota FS06L w elastycznym gnieździe wytwarzania. W tym celu zastosowano techniki wizyjne. Pozycje igieł - jednej zamocowanej w efektorze robota oraz drugiej w ustalonym, nieruchomym miejscu stanowiska (punkcie referencyjnym), fotografowano w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach. Igły wykorzystano jako wskaźniki systemu inspekcji wizyjnej Adaptive Vision Studio 3.1 Lite, w którym wykonywano pomiary geometryczne do oceny powtarzalności pozycjonowania (rys. 3.22). Pomiar polegał na określeniu odległości między igłami w trzech kierunkach przestrzeni. Obliczone odchyłki pozycjonowania w przeprowadzonym teście mieściły się w przedziale od $-90 \mu\text{m}$ do $+59 \mu\text{m}$. Badania przeprowadzone przez autorów pracy [23] wykazały malejący trend zmiany odległości pomiędzy igłami wraz z kolejnymi pomiarami rys. 3.23.



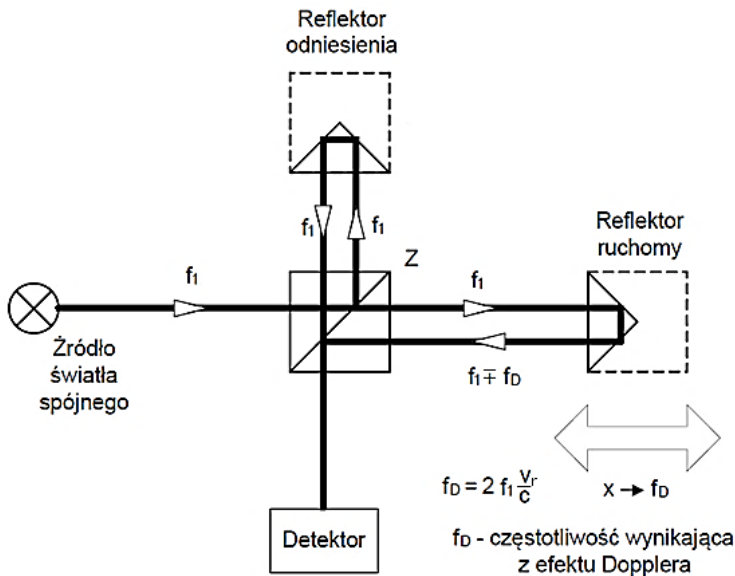
Rys. 3.22. Zasada pomiaru dokładności robota FS06L za pomocą igieł pomiarowych: a) model położenia igieł oraz mierzonych odległości, b) pomiar geometryczny odległości igieł w kierunku X i Z, w programie Adaptive Vision Studio 3.1 [23]



Rys. 3.23. Odległość pomiędzy igłami zmierzona podczas oceny powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego FS060L [23]

Podobną metodykę badań zastosowali autorzy pracy [20], wykorzystując do rejestracji obrazu szybkoklatkową kamerę wizyjną. W celu określenia powtarzalności pozycjonowania robota przeprowadzono analizę odchyłek odległości pomiędzy końcami liniałów kątowych.

Literatura [19, 21, 43, 52] wskazuje, że skuteczną metodą pomiaru odchyłek dokładności pozycjonowania może być wykorzystanie interferometru laserowego. Interferometr jest urządzeniem charakteryzującym się wysoką dokładnością pomiaru, często znacznie wyższą niż wymagana w stosunku do wartości wielkości mierzonej. Zasada działania urządzenia opiera się na zjawisku interferencji fali świetlnej (rys. 3.24).



Rys. 3.24. Uproszczony schemat działania interferometru laserowego [58]

Wiązka lasera generowana przez specjalną głowicę, pada na zwierciadło półprzepuszczalne, którego zadaniem jest rozdzielenie wiązki na dwie, wiązkę referencyjną oraz pomiarową. Jedna z nich (referencyjna) kierowana jest na nieruchomy reflektor odniesienia, natomiast druga na reflektor ruchomy (w przypadku robota zamocowany jako efektor). Obie wiązki po odbiciu od każdego z reflektorów wracają wzdłuż pierwotnych kierunków propagacji. Wiązki pochodzące z tego samego źródła światła są spójne zatem będą ze sobą interferować. Zinterferowana wiązka pada na detektor. Skutkiem przemieszczenia reflektora pomiarowego jest jedynie zmiana długości drogi światła powodująca wzajemne przesunięcie fazowe obu fal. Następuje modulacja intensywności nałożonych na siebie wiązek, która powtarza się co $\lambda/2$ długości fali. Zliczanie modulacji (tzw. prążków interferencyjnych) umożliwia wyznaczenie wartości przesunięcia reflektora pomiarowego L_r zgodnie z poniższym wzorem (3.25) [58]:

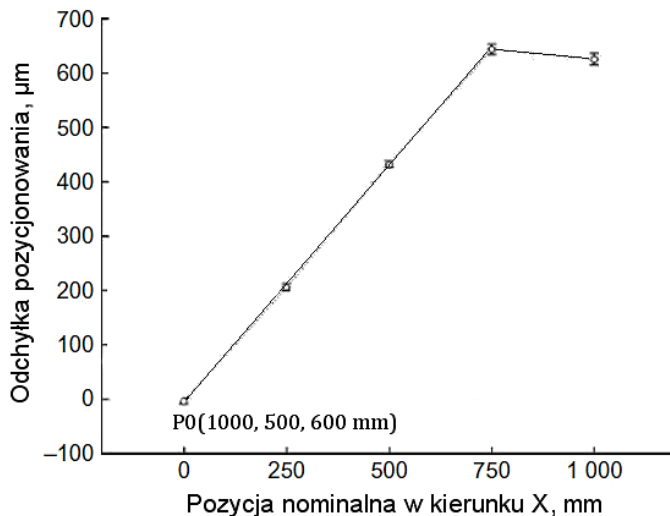
$$L_r = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.25)$$

gdzie: N – liczba impulsów,

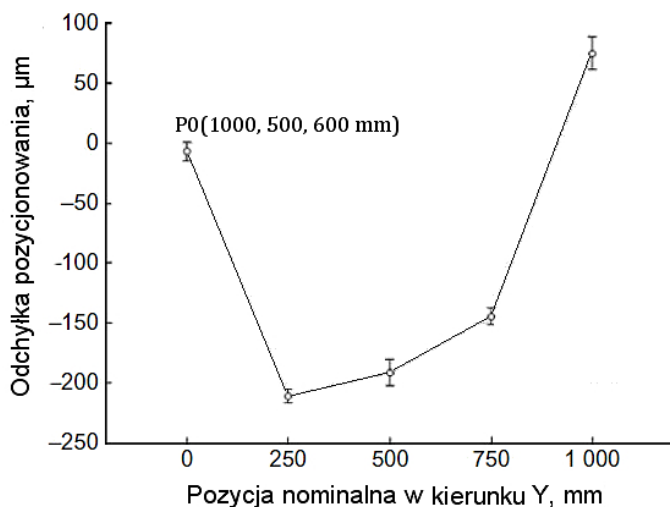
λ – długość fali świetlnej

W pracy [43] dokonano analizy powtarzalności pozycjonowania robota ABB IRB 1600 z wykorzystaniem interferometru laserowego. Pomiary przeprowadzono wzdłuż trzech ortogonalnych, liniowych ścieżek o długości 1000 mm – ścieżki poziome oraz 800 mm – ścieżka pionowa. Wszystkie trzy

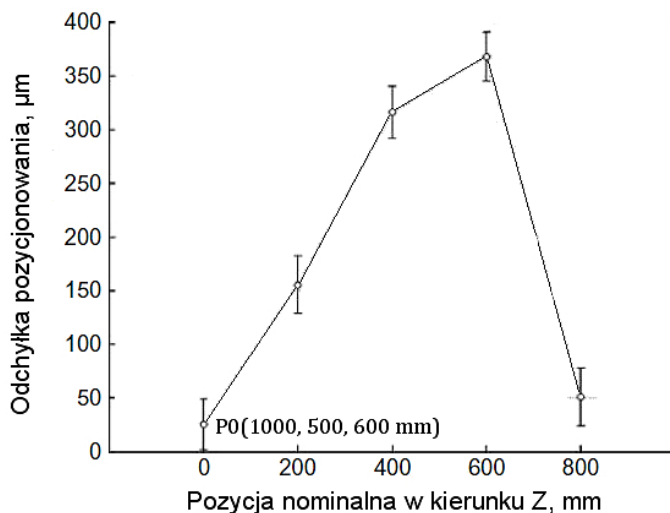
ścieżki miały początek w tym samym punkcie P0, którego współrzędne położenia w bazowym układzie robota wynosiły odpowiednio: $X = 1000$ mm, $Y = 500$ mm oraz $Z = 600$ mm. Każda ze ścieżek posiadała 5 pozycji pomiarowych. Pozycje pośrednie (między pozycją początkową P0 a pozycją końcową) zostały obliczone. Prędkość liniowa efektora wynosiła 100 mm/s. Ruchy robota zaprogramowano z odpowiednim dobiegiem do pozycji początkowej P0 (wynoszącym 10 mm). Robot zatrzymywał się w każdej pozycji pomiarowej, czas zatrzymania wynosił 5 sekund. Po osiągnięciu ostatniej pozycji następował bezpośredni liniowy ruch powrotny efektora do pozycji przesuniętej o wartość dobiegu (10 mm) względem pozycji P0. Ilość powtórzeń dla każdej osi wynosiła 30. Powtarzalność pozycjonowania w osiach poziomych mieściła się w zakresie od 6 μm do 14 μm natomiast w osi pionowej wynosiła 25 μm . Testy obejmowały również pomiar odchyłek pozycjonowania. Wartości odchyłek pozycjonowania nie przekraczały 650 μm (rys. 3.25–rys. 3.27).



Rys. 3.25. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi X, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43]

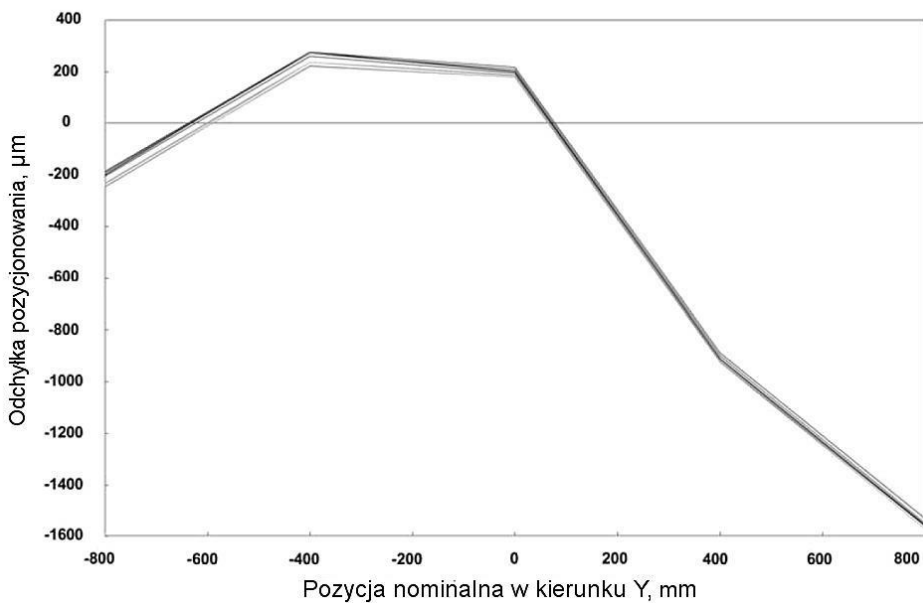


Rys. 3.26. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43]

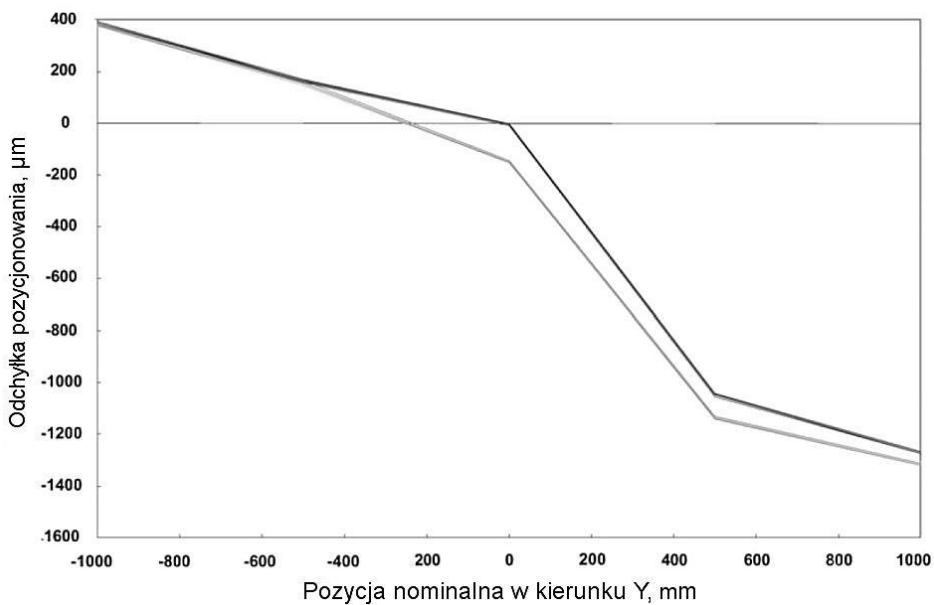


Rys. 3.27. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Z, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43]

W pracy [52] analogiczną metodą sprawdzono dokładność trzech robotów przemysłowych: Cloos Romat 310, The ABB IRB 6400S oraz KUKA KR125. Największe zarejestrowane odchyłki pozycjonowania mieściły się w przedziale od $-1600 \mu\text{m}$ do $+300 \mu\text{m}$ i dotyczyły robota Cloos Romat 310 (rys. 3.28).

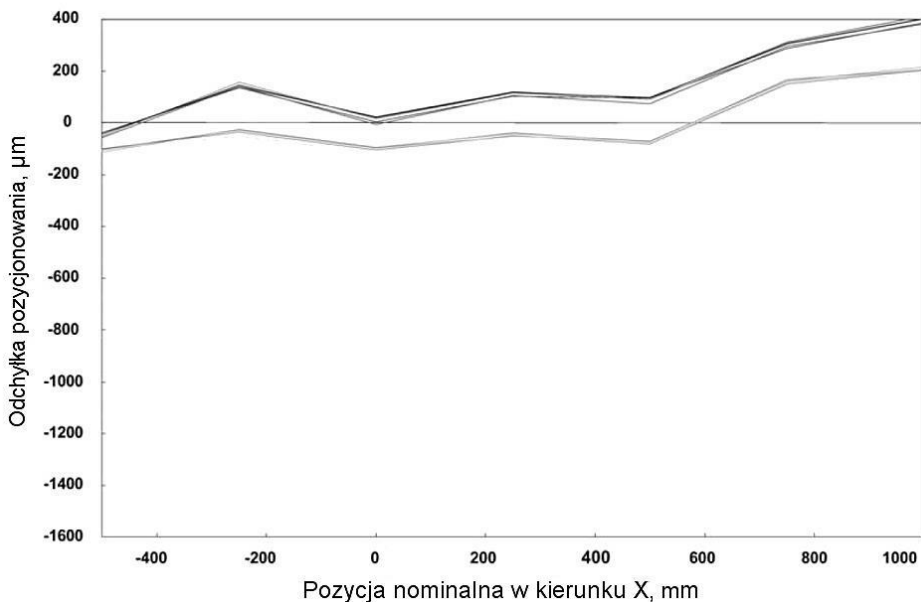


Rys. 3.28. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota Cloos Romat 310 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y [52]



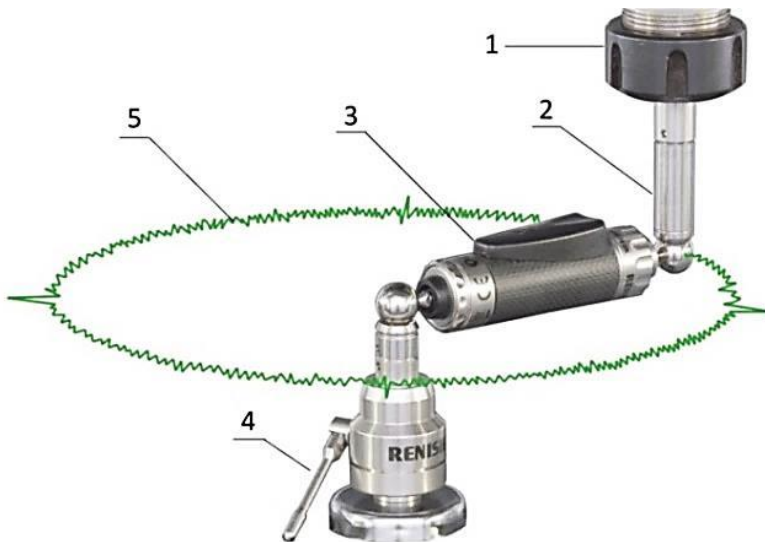
Rys. 3.29. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota KUKA KR125 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y [52]

W przypadku robota KUKA KR 125, również najwyższe odchyłki zarejestrowano podczas próby z przesunięciem liniowym wzdłuż osi Y (rys. 3.29) i zawierały się w zakresie od $-1400\ \mu\text{m}$ do $+400\ \mu\text{m}$). Trzeci z badanych robotów ABB IRB 6400 najwyższe odchyłki pozycjonowania (od $-150\ \mu\text{m}$ do $+400\ \mu\text{m}$) wykazał podczas przesunięcia liniowego wzdłuż osi X (rys. 3.30)



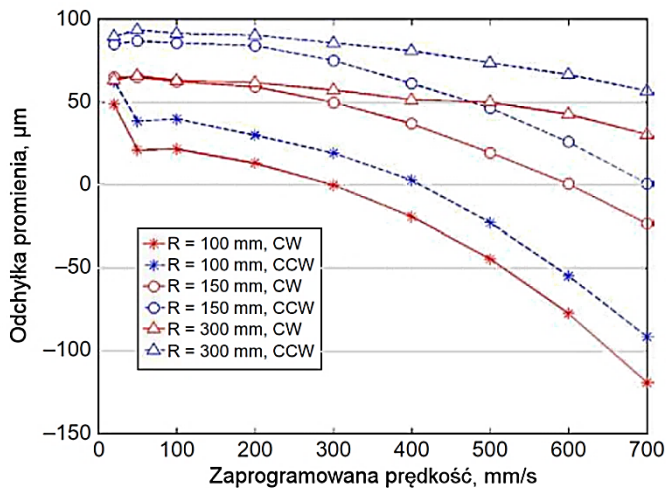
Rys. 3.30. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 6400 wzdłuż ścieżki równoległej do osi X [37]

Inną metodą, wykorzystywaną w badaniach dokładności robotów przemysłowych jest test kołowości realizowany za pomocą teleskopowego pręta kinematycznego, kulkowego typu Ballbar (rys. 3.31). Mimo, że test ten jest dedykowany obrabiarkom CNC, to często stosowany jest w badaniach dokładności geometrycznej robotów [18, 20, 42-43]. Pomiar polega na rejestracji odchyłki kołowości podczas wykonywania przez efektor robota ścieżki po torze kołowym w wybranej płaszczyźnie, dla ustalonej lokalizacji i posuwu. W chwytaku robota zamocowany jest uchwyt magnetyczny (1) natomiast na przygotowanym w tym celu stole, umieszczona jest podstawa magnetyczna (4). Pomiędzy elementami (1) oraz (4) umieszcza się skalibrowany na konkretną długość przetwornik przemieszczeń (3) o określonej długości, dokonujący pomiaru odchyłek promienia okręgu w całym zakresie ścieżki kołowej.

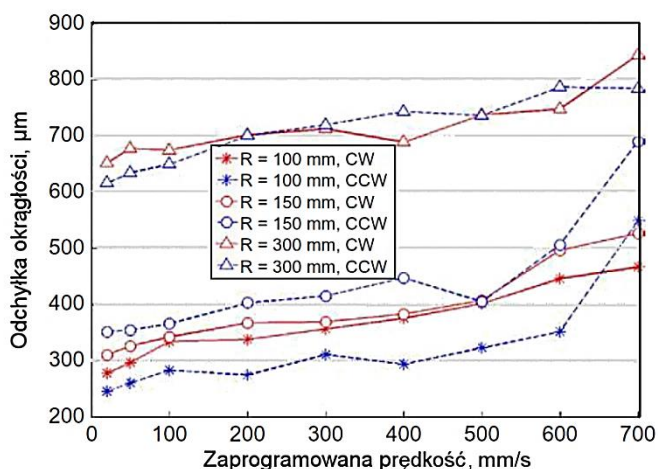


Rys. 3.31. Test z wykorzystaniem systemu pomiarowego QC200-W Ballbar, 1 – tulejka zaciskowa, 2 – uchwyt magnetyczny, 3 – przetwornik przemieszczeń, 4 – podstawa magnetyczna, 5 – kołowa ścieżka pomiarowa [88]

Możliwość zastosowania tej metody do badania dokładności robotów przemysłowych potwierdzają autorzy prac [18, 42–43]. W [42] dokonano porównania metod badania dokładności wybranych robotów przemysłowych. Zastosowanie kulkowego, teleskopowego pręta kinematycznego w przypadku robotów przedstawiono również w pracy [43].



Rys. 3.32. Odchyłki promienia w zależności od prędkości ruchu efektora robota po okręgu dla kierunku ruchu: CC – zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, CCW – przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara [43]



Rys. 3.33. Odchyłki okrągłości w zależności od prędkości ruchu efektora robota, promienia okręgu oraz kierunku ruchu (CC – zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, CCW – przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara) [43]

Przeprowadzone badania dotyczyły robota przemysłowego ABB IRB 1600 i realizowane były w dwóch płaszczyznach (YZ oraz XZ) dla zmiennych wartości promienia (100, 150 oraz 300 mm) i prędkości posuwowych w przedziale od 20 do 700 mm/s . Pomiaru dokonano w wybranym punkcie o współrzędnych (0, 65, 149 mm), w bazowym układzie współrzędnych robota. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy określili zależności pomiędzy zaprogramowaną prędkością ruchu efektora a rejestrowanymi odchyłkami.

Zaobserwowano wzrost odchyłki okrągłości (podczas ruchu kołowego w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara CCW) wraz ze wzrostem prędkości przesuwu efektora v_f . Maksymalna odchyłka okrągłości wynosiła około 900 μm (rys. 3.33) natomiast odchyłki promienia w zależności od prędkości v_f oraz wartości promienia R mieściły się w zakresie od około -120 μm do +100 μm (rys. 3.32).

3.5. Niepewność i czynniki na nią wpływające

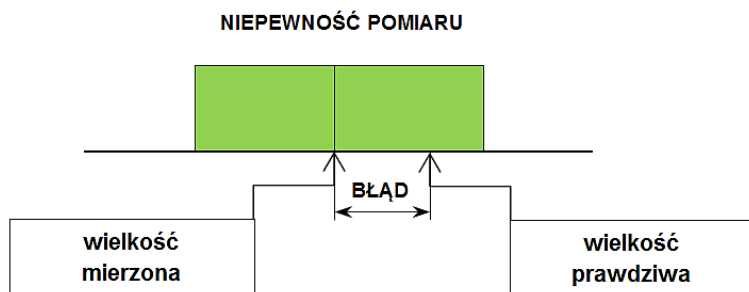
Do najważniejszych pojęć związanych z procedurami badawczymi i wyznaczeniem poszczególnych błędów, należy zaliczyć: dokładność, powtarzalność, rozdzielczość, niepewność, itp.

Dokładność jest pojęciem opisującym stopień zgodności wartości zaobserwowanej z wymaganiami specyfikacji dla określonej wielkości. W serii pomiarów o dużej dokładności tej samej wielkości, większość wyników będzie zbliżona do wartości prawdziwej (ewentualnie wzorcowej lub teoretycznej), a wyniki obarczone błędem przypadkowym będą od niej większe lub mniejsze. Im do-

kładniejsza jest metoda pomiaru, tym uzyskiwane wyniki są bliższe wartości prawdziwej (ewentualnie wzorcowej lub teoretycznej).

Obecnie teoria dokładności pomiarów (błędu pomiaru) została zastąpiona teorią niepewności pomiaru. Teoria niepewności jest powszechnie uznaną, uniwersalną i przyjętą przez wszystkie organizacje metrologiczne. Należy więc przyjąć, że dokładność pomiaru opisywana jest przez jego niepewność [44].

Niepewność (ang. *uncertainty*) to swego rodzaju „wątpliwość” co do wartości wyniku pomiaru. Prezentowana jest jako przedział wokół wyniku pomiaru, wewnątrz którego z określonym prawdopodobieństwem znajduje się wartość prawdziwa wielkości mierzonej (rys. 3.34). Z definicji zatem wynika, że niepewność to dodatni parametr, charakteryzujący rozrzut wartości danej wielkości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości prawdziwej (mezurandum), obliczony na podstawie uzyskanej informacji z pomiaru. Można wyróżnić niepewność standardową (ang. *standard uncertainty*) u lub $u(x)$, złożoną niepewność standardową $u_c(x)$ i niepewność rozszerzoną (ang. *expanded uncertainty*) U lub $U(x)$ lub $U_c(x)$.



Rys. 3.34. Graficzna prezentacja błędu oraz niepewności pomiaru

Niepewność standardowa (ang. *standard uncertainty* u , $u(x)$) to niepewność wyniku pomiaru wyrażona w postaci odchylenia standardowego (np. odchylenie standardowe średniej). Należy zaznaczyć, że niepewność standardowa jest wyrażona w postaci przedziału liczbowego w jednostce wielkości mierzonej.

Złożona niepewność standardowa (ang. *combined standard uncertainty* u_c , $u_c(x)$) to niepewność standardowa wyniku pomiaru określana, gdy wynik ten jest otrzymywany ze zmierzonych innych wielkości (niepewność pomiarów pośrednich obliczana z prawa przenoszenia niepewności pomiaru). Złożona niepewność standardowa u_c może być szacowana w oparciu składowe „statystyczne” i „poza-statystyczne”. Niepewność ta wynika nie tylko rozrzutu wielkości mierzonej (zmiany kolejnych wyników pomiarów wielkości mierzonej w pozornie identycznych warunkach) ale także innych czynników. Do nich można zaliczyć: niepewności związane z niepełną definicją wielkości mierzonej, niepewności związane z wykonywaniem pomiarów – wynikające z niedoskonałego układu pomiaru, niereprezentatywne pomiary, a także niepełną znajomość oddziaływań

otoczenia na sam pomiar. Ponadto, do źródeł niepewności pomiaru należy przypisać błędy obserwatora w odczytywaniu wskazań przyrządów (w tym systemu komputerowego), przybliżenia i założenia upraszczające, tkwiące w metodzie i procedurze pomiarowej. Do niepewności związanych z przyrządami pomiarowymi należy zaliczyć skończoną zdolność rozdzielczą przyrządów oraz niedokładne wartości przypisane wzorcom i materiałom odniesienia. Niepewności te szacowane są w oparciu o informacje zawarte w świadectwie kalibracji zastosowanych przyrządów, a także wszelkie inne informacje, np. efekty związane z pomiarami wielkości skorelowanych.

Niepewność rozszerzona (ang. *expanded uncertainty* (U , $U(x)$)) to wielkość określająca przedział wokół wyniku pomiaru, od którego oczekuje się, że obejmuje dużą część wartości, które w uzasadniony sposób można przypisać wielkości mierzonej. Niepewność rozszerzona uwzględnia współczynnik rozszerzenia.

Współczynnik rozszerzenia (ang. *coverage factor* k) jest to współczynnik liczbowy stanowiący mnożnik k złożonej niepewności standardowej u_c , $u_c(x)$, stosowany w celu uzyskania niepewności rozszerzonej (U , $U(x)$). Zwykle wartość współczynnika rozszerzenia k zawiera się w granicach od 2 do 3, jednakże dla specjalnych zastosowań k może być wybrany spoza tego przedziału. Dla większości zastosowań, w tym w praktyce laboratoryjnej, zaleca się przyjęcie wartości $k = 2$.

Oceny niepewności można dokonywać dwoma podstawowymi metodami. Ocena niepewności standardowej typu A może być oparta na każdej, prawidłowej metodzie statystycznego opracowania danych. Przykładem może być obliczanie odchylenia standardowego średniej dla serii niezależnych obserwacji albo też użycie metody najmniejszych kwadratów, w celu dopasowania krzywej do danych i obliczenie parametrów krzywej oraz ich niepewności standardowych.

Ocena niepewności standardowej typu B jest zwykle oparta o naukowy osąd badacza, biorącego pod uwagę wszystkie dostępne informacje, które mogą obejmować: wyniki pomiarów poprzednich, doświadczenie i wiedzę na temat zachowania i własności zarówno przyrządów, jak i badanych materiałów, informacje producentów przyrządów na temat ich właściwości, dane zawarte w protokołach kalibracji przyrządów i innych raportach oraz niepewności przypisane danym, zaczerpniętym z podręczników, informacje o pomiarach wielkości skorelowanych, itp. Ze względu na swego rodzaju subiektywne określenie prawdopodobieństwa w przypadku niepewności standardowej typu B, często mówi się o szacowaniu niepewności a nie jej obliczaniu.

W prezentowanej pracy wszystkie składowe statystyczne niepewności wynikające z rozrzutu wielkości mierzonej szacowano metodą A, zaś składowe pozastatystyczne szacowano metodą B, uwzględniając stosowny rozkład prawdopodobieństwa.

Powtarzalność (ang. *repeatability*) to stopień zgodności kolejnych wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych w tych samych warunkach pomiarowych. Warunki jakie powinny być spełnione aby obiektywnie

ocenić powtarzalność, to: ta sama procedura pomiarowa, ten sam diagnosta, ten sam przyrząd pomiarowy stosowany w tych samych warunkach oraz to samo miejsce i powtórzenie wykonywane w krótkich odstępach czasu.

Powtarzalnością pozycjonowania liniowego nazywamy stopień zgodności kolejnych wyników pomiarów położenia liniowego w prostokątnym układzie współrzędnych, wykonywanych z uwzględnieniem wymienionych w akapicie powyżej - niezmiennych warunków pomiarowych. W praktyce pomiarowej, powtarzalność pozycjonowania liniowego zespołu roboczego robota to zdolność osiągnięcia zaprogramowanego, zadanego punktu docelowego podczas wielu powtórzeń, wykonywanych w krótkich odstępach czasu.

Powtarzalnością pozycjonowania kąowego nazywamy stopień zgodności kolejnych wyników pomiarów położenia kąowego w biegunowym układzie współrzędnych, wykonywanych w tych samych warunkach pomiarowych. W praktyce pomiarowej, powtarzalność pozycjonowania kąowego zespołu roboczego robota, to zdolność osiągnięcia zaprogramowanego punktu docelowego podczas wielu powtórzeń wykonywanych w krótkich odstępach czasu.

Odtwarzalność (ang. reproducibility) to stopień zgodności wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych w zmienionych warunkach pomiarowych. Warunki, które mogą podlegać zmianom, są to m.in.: metoda pomiarowa, osoba wykonująca pomiar, przyrząd pomiarowy, wzorce, warunki otoczenia, czas.

Rozdzielczość pomiaru to najmniejsza zmiana wielkości mierzonej na jaką reaguje przyrząd pomiarowy. Wyrażana jest w jednostkach wielkości mierzonej. Z rozdzielczości pomiaru wynika błąd rozdzielczości, który wpływa na dokładność pomiaru [44].

3.6. Diagnostyka robotów przemysłowych

W ujęciu ogólnym „...diagnostyka jest nauką o procesach i metodach uzyskiwania informacji o obiekcie i jego otoczeniu oraz relacjach (oddziałyvaniach) występujących między nimi...” (robotem a człowiekiem) [27]. Obiektem diagnostyki może być każdy twór materialny lub abstrakcyjny. W takim ujęciu zakres diagnostyki jest bardzo szeroki, a charakter procesów diagnostycznych bardzo złożony. W technice, diagnostyka dotyczy oceny stanu technicznego maszyny bądź urządzenia technicznego na podstawie obserwacji skutków ich działania. Diagnostyka techniczna to również praktyczne czynności diagnostów z wykorzystaniem określonych systemów lub narzędzi diagnostycznych, zmierzające do określenia aktualnego stanu technicznego. Badania i ocena stanów technicznych umożliwia ustalenie przyczyn, a także przewidywanie zmian tych stanów.

Podstawowym zadaniem diagnostyki robota przemysłowego (ang. diagnostics – rozpoznanie, ustalenie) jest przypisanie mu jednej z dwóch cech, „zdolny” lub „niezdolny” do wykorzystania w danym procesie produkcyjnym. Diagnostowa-

nie to ustalenie stanu obiektu technicznego w chwili t_0 , w której jest wykonywane jego badanie diagnostyczne. Dodatkowo, ta dwustanowa ocena diagnostyczna może zostać uzupełniona o podanie przyczyny takiego przypisania. Przedmiotem diagnozy może być cały robot, zespół, podzespół, para kinematyczna, pojedyncza część a nawet cały system (np. zrobotyzowana linia produkcyjna). Wynik oceny diagnostycznej robota może być związany z chwilą bieżącą, bądź wynikać z prognoz w danym przedziale czasowym. Określony stan (zdolny/niezdolny) przypisywany jest na podstawie spełnienia (lub nie) przez robota kryterium zgodności ustalonych (mierzalnych) parametrów z ich wzorcowymi wartościami podawanymi przez producenta [27–28].

Informacje diagnostyczne uzyskiwane są w wyniku badań bezinwazyjnych, bez demontażu obiektu. Diagnoza, będąca wynikiem procesu diagnostycznego, może być związana z:

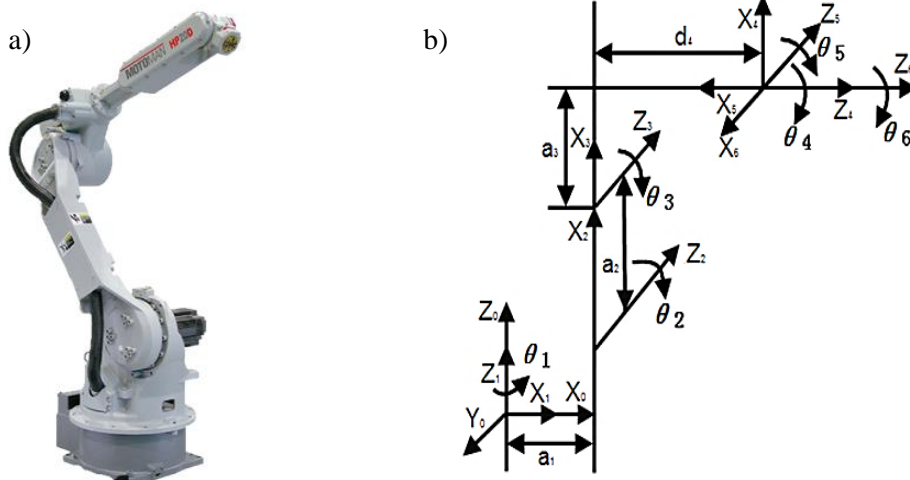
- określeniem przyczyny rozwoju bądź zmian stanu na podstawie genezy,
- oceną bieżącego stanu technicznego,
- prognozowaniem stanów przyszłych,
- realizacją wszystkich powyższych zadań.

W przypadku robotów przemysłowych kryterium zgodności w wielu przypadkach mogą stanowić parametry związane z dokładnością robota. Dotyczy to szczególnie zadań wymagających wysokiej dokładności i powtarzalności. Niska dokładność oraz powtarzalność pozycjonowania robota przemysłowego może bezpośrednio przekładać się na realizację wspomaganego procesu (np. jakość wytwarzanych części podczas obróbki mechanicznej lub orientowanie i pozycjonowanie podczas montażu). Diagnostyka pozwala odpowiednio wcześniej wyłączyć z procesu produkcyjnego roboty niespełniające kryteriów dokładności.

4. Metodyka badań eksperymentalnych

4.1. Przedmiot badań i stanowisko pomiarowe

Obiektem prowadzonych badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania był sześćoosiowy robot przemysłowy MOTOMAN HP20 firmy Yaskawa (rys. 4.1a). Jest to robot uniwersalny, charakteryzujący się dużym zakresem ruchów w poszczególnych osiach sterowanych i stosunkowo dużymi prędkościami ruchów w tych osiach (tab.4.1). Do podstawowych zastosowań manipulacyjnych robota należy zaliczyć: spawanie, pakowanie, operacje obróbkowe oraz montażowe dotyczące elementów małej i średniej wielkości. Maksymalny udźwignie robota wynosi 20 kg. Robot MOTOMAN HP20 sterowany jest z wykorzystaniem kontrolera YASNAC FS 100. Na rys. 4.1b przedstawiono strukturę kinematyczną robota MOTOMAN HP20. Wszystkie jego osie są osiami obrotowymi. Oś obrotu złącza 1 ma kierunek pionowy, natomiast osie złącz 2 i 3 są osiami poziomymi.

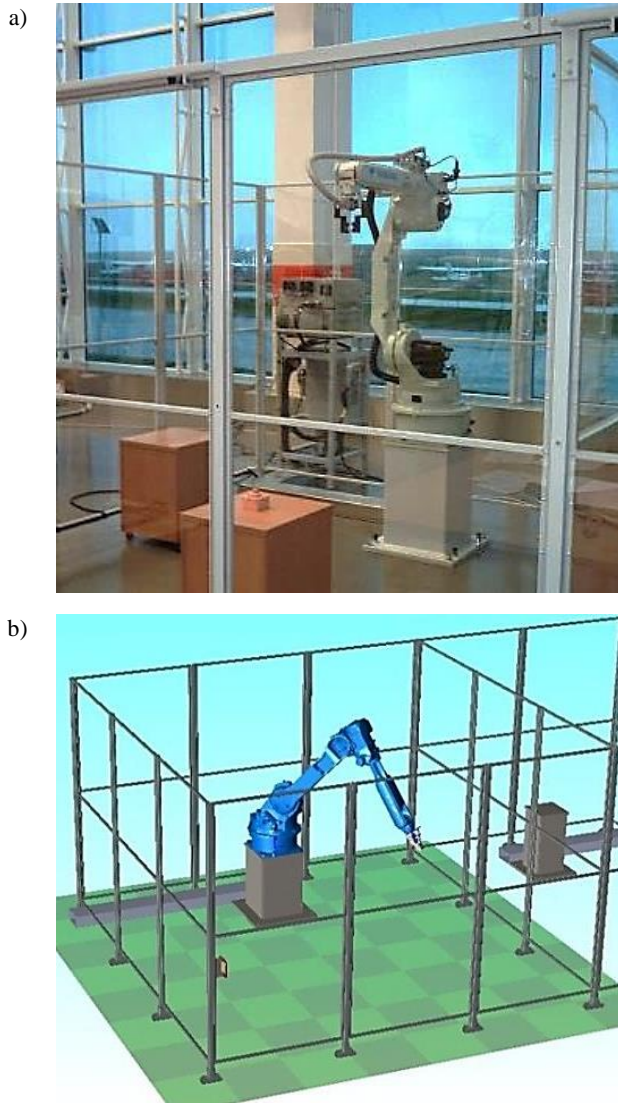


Rys. 4.1. Robot przemysłowy HP20: a) widok ogólny [85], b) struktura kinematyczna robota MOTOMAN HP20 [86]

Wymiary gabarytowe robota oraz zakres przestrzeni roboczej przedstawiono na rys. 4.2, natomiast dane techniczne zestawiono w tab. 4.1.

Tab. 4.1. Parametry techniczne robota MOTOMAN HP20 [87]

Parametr		Wartość
Liczba osi sterowanych		6
Maksymalny udźwig		20 kg
Powtarzalność pozycjonowania		0,06 mm
Maksymalny zasięg: - po osi prostopadłej do płaszczyzny podstawy - po osi równoległej do płaszczyzny podstawy		3063 mm 1717 mm
Masa robota		268 kg
Zakres ruchu robota	Oś S	±180°
	Oś L	+155° / -110°
	Oś U	+255° / -165°
	Oś R	±200°
	Oś B	+230° / -50°
	Oś T	±360°
Maksymalna prędkość	Oś S	197°/s
	Oś L	175°/s
	Oś U	187°/s
	Oś R	400°/s
	Oś B	400°/s
	Oś T	600°/s
Dopuszczalny moment maksymalny	Oś R	39,2 Nm
	Oś B	39,2 Nm
	Oś T	19,6 Nm
Dopuszczalny moment bezwładności	Oś R	1,05 kgm ²
	Oś B	1,05 kgm ²
	Oś T	0,75 kgm ²
Drgania	poniżej 4,9 m/s ²	



Rys. 4.3. Stanowisko pomiarowe, a) widok rzeczywisty, b) model 3D stanowiska pomiarowego

Badania dokładności i powtarzalności robota MOTOMAN HP20 prowadzono w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko pomiarowe zaprezentowano na rys. 4.3. Badany robot zamontowany był na stanowisku osłoniętym specjalnymi barierami ochronnymi, których zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa oraz utrzymanie stabilnych warunków pracy robota i wykonywanych pomiarów.

4.2. Urządzenia pomiarowe

W ramach badania dokładności robota przemysłowego Motoman HP20, wykorzystano następujące metody pomiaru odchyłek pozycjonowania: interferometrię laserową, pomiar odchyłek z wykorzystaniem teleskopowego, kulkowego pręta kinematycznego, pomiar za pomocą szybkiej kamery wizyjnej oraz pomiar z zastosowaniem bezkontaktowego systemu optycznego do identyfikacji współrzędnych 3D oraz analizy przemieszczeń.

Badania z wykorzystaniem interferometrii laserowej

Podczas badań zastosowano laserowy system pomiarowy XL80 firmy Renishaw, w którego skład wchodzi:

- laser generujący stabilną wiązkę promieniowania (rys. 4.4a);
- zestaw pomiarowych układów optycznych (rys. 4.4b);
- kompensator XC-80 z czujnikami temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza (rys. 4.4c);
- trójnóg ze stolikiem montażowym;
- oprogramowanie do rejestracji i analizy danych LaserXL.

Interferometr XL80 umożliwia pomiar odchyłek liniowych i kątowych (obrotowych), płaskości, prostoliniowości oraz prostopadłości. Deklarowana przez producenta dokładność pomiaru liniowego wynosi $\pm 0,5$ ppm i dzięki zastosowaniu kompensatora, pozostaje zachowana w całym zakresie zmian warunków środowiskowych (temperatury, ciśnienia, wilgotności powietrza). Podstawowe dane techniczne systemu przedstawiono w tab. 4.2.



Rys. 4.4. Podstawowe elementy interferometrycznego systemu laserowego XL80, a) laser, b) optyczne układy pomiarowe, c) kompensator z czujnikami [88]

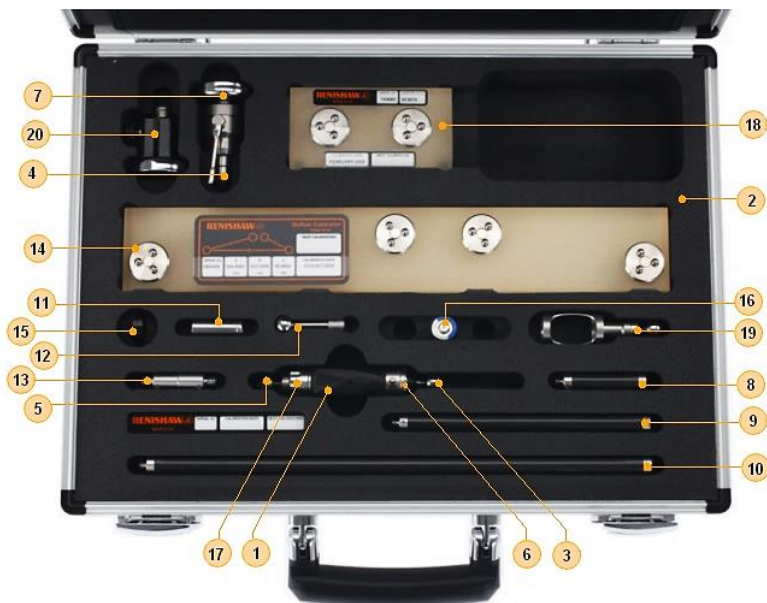
Tab. 4.2. Charakterystyka wykorzystywanego systemu laserowego XL80 [88]

Parametr	Wartość	
Zakres pomiaru liniowego	80 m	
Dokładność pomiarów liniowych	±0,5 ppm	
Stabilność częstotliwości lasera (1 rok)	±0,05 ppm	
Rozdzielczość	1 nm	
Maksymalna szybkość przesuwu	4 m/s	
Częstotliwość rejestracji danych	10 Hz–50 kHz	
Czas wstępnego nagrzewania	<6 minut	
Zakres temperaturowy zdefiniowanej dokładności	0–40°C	
Czujnik	Zakres	Dokładność
Czujniki parametrów środowiskowych	0–55°C	±0,1°C
Temperatura materiału	0–40°C	±0,2°C
Ciśnienie powietrza	6–1150 mbar	±1 mbar
Wilgotność względna (%)	0–95% bez kondensacji	±6% wilgotności względnej

Badania z wykorzystaniem teleskopowego pręta kinematycznego

W celu identyfikacji błędów robota niemierzalnych interferometrem laserowym zastosowano system z teleskopowym prętem kinematycznym QC20-W Ballbar firmy Renishaw (rys. 4.5). System umożliwia wykonanie testu kołowości dla różnych wartości promienia, w trzech płaszczyznach. Szczegółowe parametry urządzenia pomiarowego przedstawiono w tab. 4.4. Do podstawowych elementów systemu należą:

- zespół pręta kinematycznego kulkowego o długości 100 mm,
- zestaw drążków przedłużających o długościach 50, 150 oraz 300 mm,
- uchwyty magnetyczne,
- kalibrator,
- oprogramowanie do rejestracji i analizy danych.



Rys. 4.5. Zestaw diagnostyczny QC20-W Ballbar: 1 – pręt kinematyczny, 2 – walizka transportowa, 3, 5 – kulki czujnika, 4, 7 – zespół podstawy magnetycznej, 6 – pierścieni ochronny, 8, 9, 10 – przedłużacze pręta kinematycznego, 11 – uchwyt magnetyczny, 12 – kulka ustawcza, 13 – przedłużacz uchwytu magnetycznego, 14 – kalibrator, 15 – zestaw narzędzi, 16 – bateria, 17 – gniazdo baterii, 18, 19 – zestaw do testu na małym okręgu, 20 – adapter VTL [63]

Tab. 4.3. Dane techniczne wykorzystywanego systemu QC20-W Ballbar [88]

Parametr	Wartość
Rozdzielczość przetwornika	0,1 μm
Dokładność pomiarów Ballbar*	$\pm (0,7+0,003 \cdot L)$ μm
Zakres pomiarowy Ballbar	± 1 mm
Zakres przesuwu przetwornika	od -1,25 mm do +1,75 mm
Maksymalna szybkość próbkowania	1000 Hz
Zasięg transmisji danych (Bluetooth Klasa 2)	10 m
Temperatura pracy	0–40°C
* określona w zakresie temperatury 15–25°C L – długość, na której mierzony jest błąd	

Badania z wykorzystaniem szybkiej kamery wizyjnej

Badania dokładności robotów przemysłowych można dokonywać również z użyciem technik wizyjnych. W tym celu, wykorzystano szybkoklatkową kamerę wizyjną Phantom v2511 (rys. 4.6). Zastosowanie szerokokątnego czujnika CMOS w kamerze umożliwia rejestrację zdjęć w ultrawysokich prędkościach. Przy pełnej rozdzielczości zdjęcia (1280×800) prędkość rejestracji wynosi ponad 25 000 klatek na sekundę. Przy zmniejszonej rozdzielczości kamera pozwala na zapis z prędkością nawet do 1 000 000 kl/s. Urządzenie wyposażone jest w powszechnie stosowane złącza sygnałowe m.in. wejście kodu czasowego, dwa wejścia zasilania, wejścia GPS, synchronizacji kadru, spustu migawki, oraz porty HD-SDI które mogą być konfigurowane na wiele sposobów [89]. Szczegółowe dane techniczne urządzenia przedstawiono w tab. 4.4



Rys. 4.6. Kamera Phantom v2511 [89]

Tab. 4.4. Podstawowe dane techniczne kamery Phantom v2511 [89]

Parametr	Wartość
Wydajność/Szybkość	25 Gpx/s
Maksymalna szybkość rejestracji w największej rozdzielczości (1280×800)	Powyżej 25 000 kl/s
Maksymalna szybkość rejestracji w zredukowanej rozdzielczości (128×32)	1 000 000 kl/s
Minimalna szybkość rejestracji	100 kl/s
Parametry przetwornika CMOS:	
– wymiary	35,8×22,4 mm
– głębia bitowa	12 bit
– rozdzielczość	1280×800
– rozmiar piksela	28 μm
– czułość świetlna	ISO 100 000T; 32 000D mono ISO 10 000T; 6 400D color
Minimalny czas ekspozycji	1 μs (standard); 280 ns z opcją FAST
Czas rejestracji	2,6 s przy maksymalnej rozdzielczości
Pamięć	24 GB, 48GB, 96 GB pamięci RAM

Badania z wykorzystaniem systemu PONTOS HS

Oceny dokładności robotów przemysłowych można dokonywać również z zastosowaniem bezkontaktowych systemów optycznych do pomiarów przestrzennych. W pracy, badania realizowano z wykorzystaniem systemu PONTOS HS firmy GOM. Systemu PONTOS HS umożliwia obliczanie i analizę współrzędnych 3D, deformacji, prędkości oraz przyspieszeń mierzonego obiektu. Z punktu widzenia oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota najistotniejsza jest możliwość pomiaru przemieszczeń. Podstawowymi elementami składowymi systemu są kamery zamocowane na regulowanym statywie oraz przenośna stacja robocza. Podstawowe parametry urządzenia zaprezentowano w tab. 4.5.

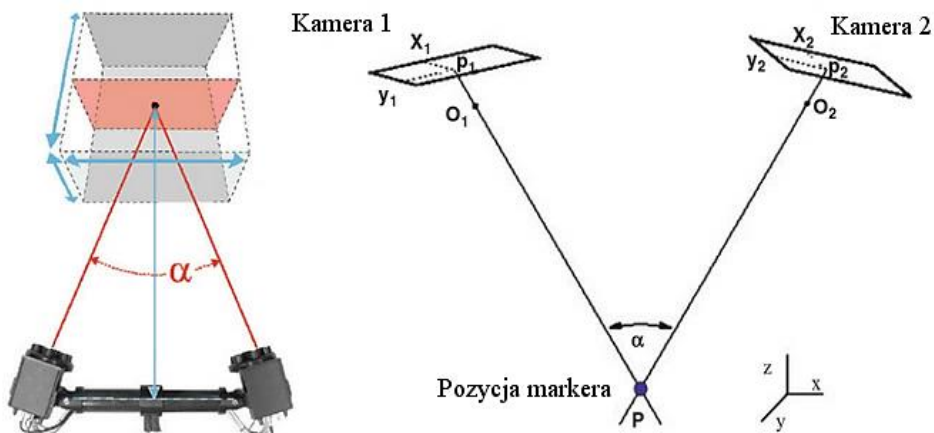


Rys. 4.7. Optyczny system pomiarowy GOM PONTOS [82]

Tab. 4.5. Podstawowe parametry systemu PONTOS HS [82]

Parametr	Wartość
Rozdzielczość	1280×1024 pikseli
Częstotliwość	500 Hz
Obszar pomiarowy	1 cm ² do 1 m ²
Dokładność pomiaru	zależna od obszaru pomiarowego, do 0,001 mm
Ilość punktów pomiarowych	nieograniczona
Wymiary czujnika	700×200×140 mm

Działanie systemu PONTOS opiera się na jednoczesnej rejestracji obrazu za pomocą dwóch zsynchronizowanych kamer. System precyzyjnie identyfikuje w przestrzeni trójwymiarowej położenie specjalnych punktów referencyjnych tzw. markerów, naklejanych na powierzchni obiektu. Markery mają zazwyczaj postać białych, okrągłych pól z czarną obwódką, zapewniającą odpowiedni kontrast ułatwiający analizę barw w skali odcieni szarości.



Rys. 4.8. Zasada pomiaru położenia punktu w przestrzeni [5]

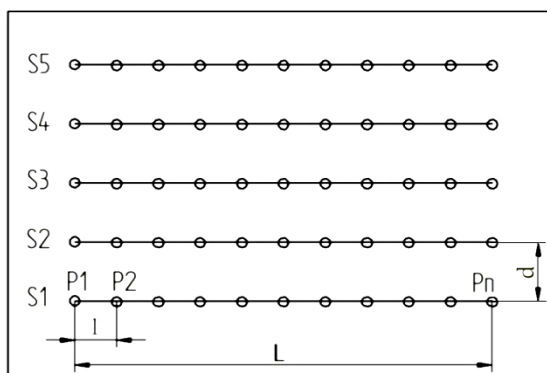
Pozycja w przestrzeni trójwymiarowej określana jest na zasadzie triangulacji przestrzennej (rys. 4.8) Oprogramowanie przyporządkowuje współrzędne 3D poszczególnym pikselom obrazu, porównuje poszczególne obrazy z kamer oraz oblicza przemieszczenia punktów odniesienia [5].

5. Badania dokładności robota z wykorzystaniem interferometrii laserowej

5.1. Przebieg pomiaru

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów ustalono metodykę badań. Autorzy zaproponowali własną metodykę badań, uwzględniając możliwości pomiarowe zastosowanego systemu oraz specyfikę pracy wykorzystywanego robota. Przyjęto przypadek ograniczonego dostępu do przestrzeni robota oraz miejsc mocowania optyki wykorzystywanej podczas pomiarów. Z uwagi na powyższe, realizacja pomiarów zgodnie z wymaganiami normy jest bardzo utrudniona. Przedstawiona własna metodyka jest zoptymalizowana ze względu na czas realizacji badań i możliwości oceny niedokładności robota w warunkach przemysłowych. Schemat metody pomiarowej przedstawiono na rys. 5.1. Z uwagi na możliwości techniczne pomiaru odchyłek dokładności za pomocą interferometru laserowego, przyjęto kartezjański układ współrzędnych X, Y, Z. Pomiar polegał na wykonaniu naprzemiennego, dwukierunkowego testu liniowego obejmującego 3 przebiegi. Zadana prędkość ruchu wynosiła $v_f = 50$ mm/s. W każdej z trzech wybranych płaszczyzn (wzdłuż osi X, Y oraz Z) określono po pięć równoległych ścieżek pomiarowych (S1-S5) w odległości $d = 250$ mm. Na każdej ze ścieżek wyznaczono punkty (P1-Pn) oddalone od siebie $l = 100$ mm, w których wykonywany był pomiar odchyłki pozycjonowania. Długości ścieżek (L) i liczba punktów pomiarowych (n_p) wnosili odpowiednio:

- wzdłuż osi X: $L_X = 1100$ mm, $n_p = 12$
- wzdłuż osi Y: $L_Y = 1500$ mm, $n_p = 16$
- wzdłuż osi Z: $L_Z = 900$ mm, $n_p = 10$



Rys. 5.1. Metodyka pomiaru odchyłek dokładności pozycjonowania z zastosowaniem interferometru laserowego

Przyjęte w pracy podejście określania płaszczyzn, liczby i położenia ścieżek wynika ze specyfiki pomiaru interferometrem laserowym oraz problemami z jego ustawianiem i justowaniem w przestrzeni. Pisząc „przestrzeni” autorzy mają na myśli ścieżki w płaszczyznach położonych pod pewnymi kątami do powierzchni poziomej (w różny sposób i w różnej konfiguracji), co jest niezwykle trudne - jeśli w praktyce w ogóle możliwe do wykonania zastosowanym systemem pomiarowym. Trudności te dotyczą głównie justowania systemu i uzyskania równoległości wiązki do kierunku ruchu podczas pomiaru. W przypadku sterowania robotów, ruch do zaprogramowanego punktu może odbywać się co prawda jako ruch liniowy, natomiast pojawia się pytanie, w jakim stopniu w rzeczywistości jest on „liniowy”, ponieważ nie jest „wyznaczany” przez żadne prowadnice. To stanowi kluczowe utrudnienie jeśli chodzi o zastosowanie interferometru laserowego do pomiarów w dowolnej płaszczyźnie. Oczywiście występują systemy laserowe, tzw. lasery śledzące, stosowane głównie do kalibracji współrzędnościowych maszyn pomiarowych, które można wykorzystać do oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. Taką metodykę badań dokładności robota z wykorzystaniem lasera śledzącego przedstawiono w pracach [49–50].

Wybór jednej płaszczyzny ścieżek równoległych jest przykładem skróconego procesu oceny niedokładności robota, zawiązując próby do realnego obszaru jego pracy w warunkach rzeczywistych. Należy stwierdzić, że badania całej przestrzeni roboczej robotów wymagałoby uwzględnienia nieskończenie wielu ścieżek, w nieskończenie wielu płaszczyznach równoległych do X-Y, X-Z, Y-Z (pomijając płaszczyzny pochylone do poziomu). Takie podejścia stwarza wiele trudności z optymalnym wyborem wariantów dyskretyzacji ścieżek w przestrzeni i ich położenia względem siebie. Problem wyboru płaszczyzny ścieżek, ich liczby, sposobu dyskretyzacji (odstępów, położenia) oraz wybór baz jest bardzo złożony i uwarunkowany szeregiem czynników, które często pozostają ze sobą we wzajemnych interakcjach. Dlatego, dla prostoty zagadnienia przyjęto zaprezentowany w pracy model pomiaru. Przedstawiony przykład stanowi punkt wyjścia do realizacji pełnego procesu badawczego, który należy dostosować do konkretnego robota. Wybierając zastosowaną w pracy metodykę warto wskazać na możliwości szybkiej i doraźnej oceny dokładności w warunkach przemysłowych, bez konieczności kompleksowego badania robota.

Robot Motoman HP20 programowany był w trybie offline. Przed pierwszym i po ostatnim punkcie pomiarowym zaprogramowano wyjazd w celu kompensacji błędu nawrotu. W ramach testu przeprowadzono próby bez obciążenia oraz z obciążeniem masą wynoszącą 8,6 kg. Wybór obciążenia był podyktowany najczęściej przemieszczaną masą przez efektor robota. Próby realizowano stosując liniowy algorytm pomiarowy. Konfigurację pomiarową podczas identyfikacji odchyłek pozycjonowania w kierunku osi Z przedstawiono na rys. 5.2. Analogiczne ustawienie zastosowano w przypadku pomiarów w pozostałych osiach X, Y, Z.

Generator lasera (1) zamocowano na trójnogu ze stolikiem montażowym. Zespół interferometru liniowego oraz reflektora odniesienia (2) zamocowano na stabilnym filarze (8) za pomocą uchwyty magnetyczny (6). Reflektor ruchomy (3) zamocowano w efektorze (chwytku) robota (9). Na filarze (8) zamocowano również kompensator (4) oraz jeden z czujników parametrów środowiskowych (5). Drugi czujnik przymocowano do bazy robota. Na rys. 5.2 a przedstawiono konfigurację pomiarową przy próbie bez obciążenia, natomiast na rys. 5.2 b konfigurację z obciążeniem (10) zamocowanym w efektorze robota (9).

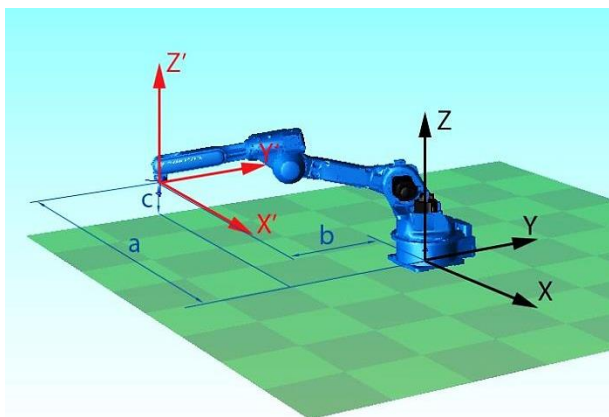


Rys. 5.2. Konfiguracja pomiarowa rozmieszczenia elementów systemu laserowego podczas: a) próby bez obciążenia, b) próby z obciążeniem, c) konfigurowanie toru pomiarowego z poziomu oprogramowania LaserXL, 1 – generator lasera, 2 – interferometr liniowy z reflektorem odniesienia, 3 – reflektor ruchomy, 4 – kompensator XC-80, 5 – czujnik parametrów środowiskowych, 6 – uchwyt magnetyczny, 7 – ramię robota, 8 – filar, 9 – chwytak robota, 10 – obciążenie

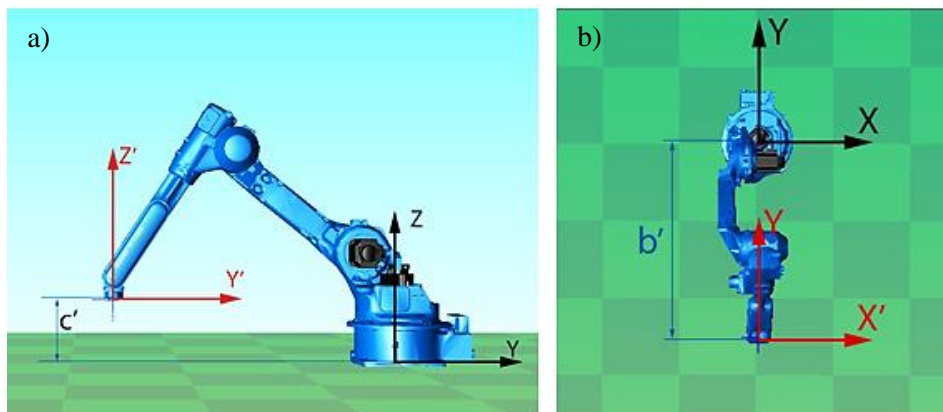
Przed przystąpieniem do pomiaru dla każdej linii pomiarowej przeprowadzono justowanie wiązki lasera. Właściwe ustawienie kątów lasera oraz układu optycznego jest niezbędne do osiągnięcia wymaganej mocy lasera. Proces ustawiania ułatwia regulowany stolik montażowy i status urządzenia wskazywany przez diody LED na obudowie generatora. Urządzenie podczas pomiaru podłączono za pomocą interfejsu do portu USB wykorzystywanego laptopa z oprogramowaniem LaserXL. W środowisku programu LaserXL skonfigurowano i prowadzono rejestrację danych pomiarowych. Warunki środowiskowe kontrolowano z wykorzystaniem czujników i kompensatora, będących wyposażeniem laserowego systemu interferometrycznego XL-80. Usrednione wskazania poszczególnych parametrów wynosiły odpowiednio: temperatura 21°C, ciśnienie 984 mbar, wilgotność powietrza 60%RH. Dane te wykorzystywane są również

przez system w celu kompensacji wpływu warunków środowiskowych na wynik pomiaru.

Na rys. 5.3 zaprezentowano położenie zdefiniowanego początku układu pomiarowego względem początku bazowego układu współrzędnych badanego robota, dla pomiarów liniowych wzdłuż osi Y oraz X. Definicja położenia początku pomiarowego układu współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota podyktowany był dostępnością przestrzenną mocowania elementów systemu pomiarowego oraz dostępnością badanej przestrzeni roboczej. Przesunięcie w kartezjańskim układzie współrzędnych wynosiło odpowiednio $a = 550$ mm w osi X, $b = 1500$ mm w osi Y, oraz $c = 450$ mm w osi Z.



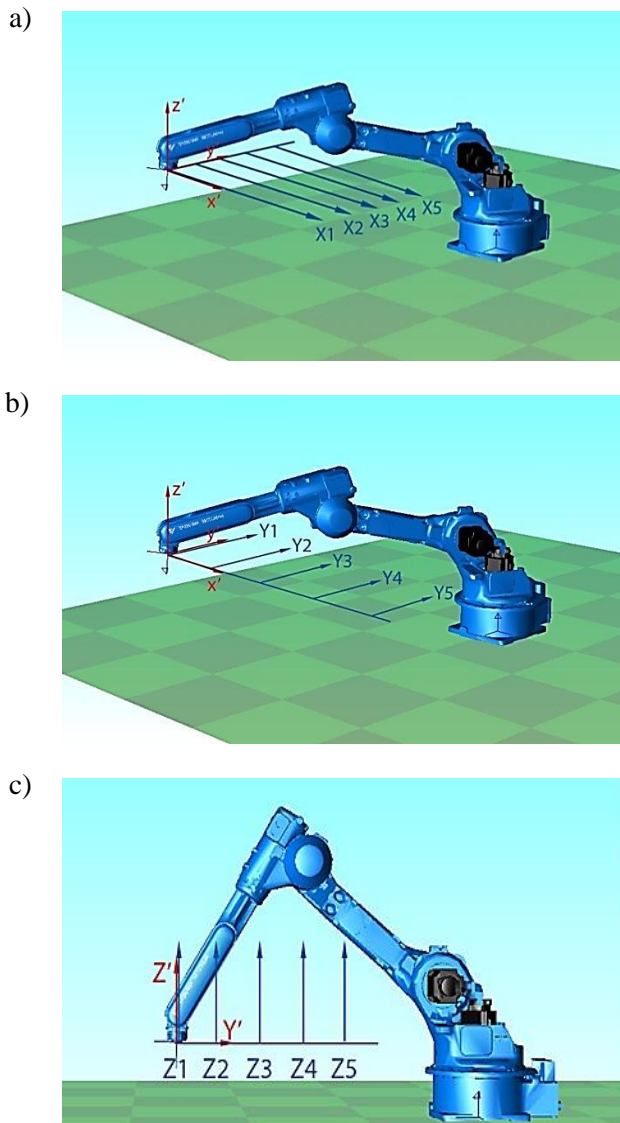
Rys. 5.3. Definicja położenia początku pomiarowego układu współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota, dla pomiarów liniowych wzdłuż osi X oraz osi Y



Rys. 5.4. Definicja położenia początku pomiarowego układu współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota, dla pomiarów liniowych wzdłuż osi Z: a) widok z boku, b) widok z góry

W analogiczny sposób zdefiniowano początek układu współrzędnych dla pomiarów wzdłuż osi Z (rys. 5.4). Przesunięcie w układzie kartezjańskim wynosiło $b' = 1500$ mm w osi Y, oraz $c' = 200$ mm w osi Z.

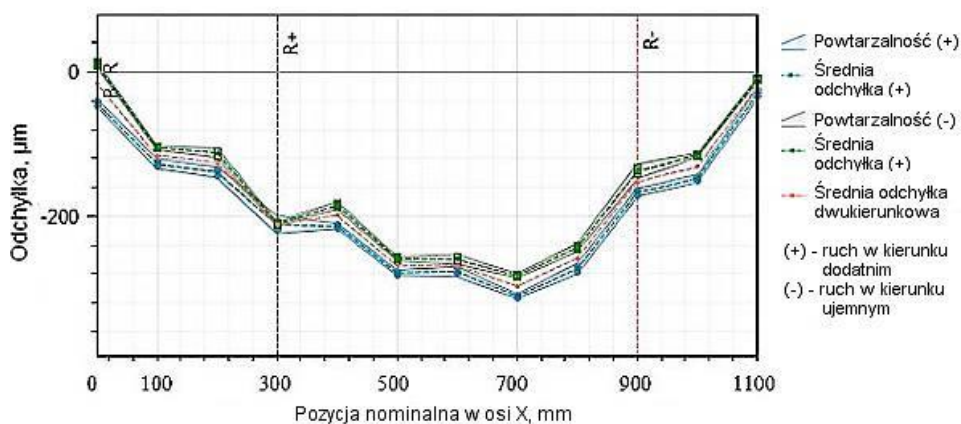
Rozmieszczenie poszczególnych ścieżek pomiarowych podczas pomiaru wzdłuż wybranych osi X, Y oraz Z przedstawiono na rys. 5.5.



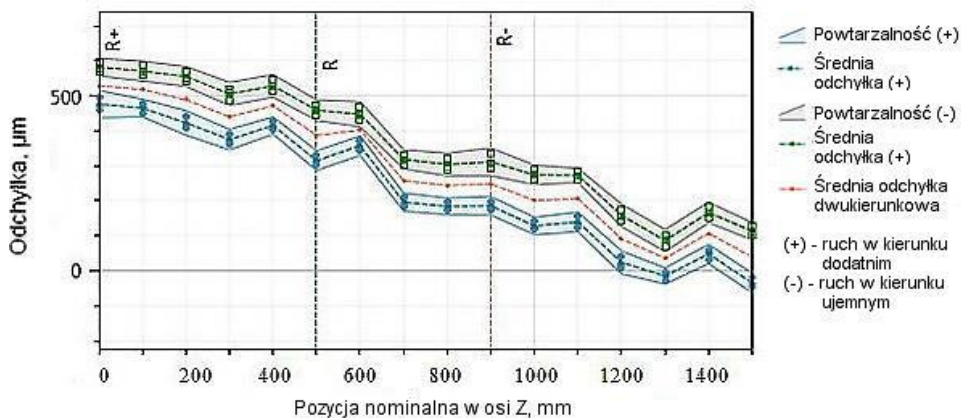
Rys. 5.5. Lokalizacja ścieżek pomiarowych w przestrzeni podczas pomiaru a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y, c) wzdłuż osi Z

5.2. Analiza wyników i wnioski

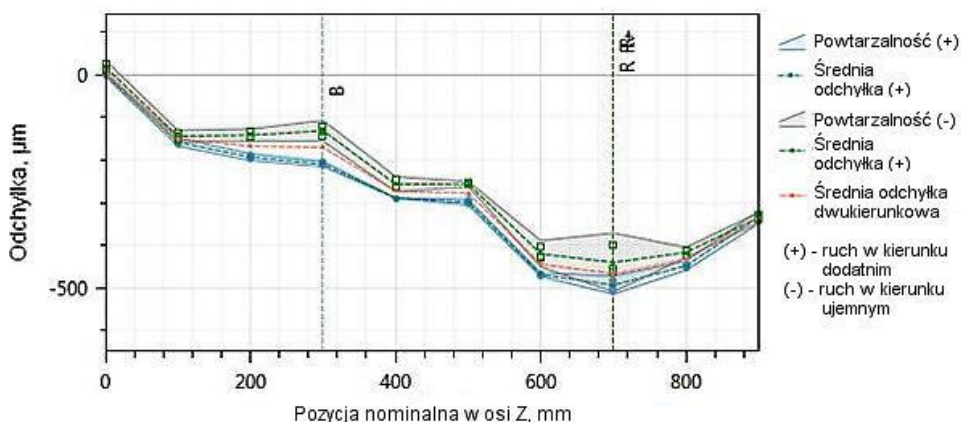
W celu analizy zarejestrowanych danych pomiarowych wykorzystano oprogramowanie XCal-View 2.2 umożliwiające między innymi generowanie wykresów oraz rozbudowaną analizę statystyczną wyników w oparciu o wybraną normę. Przykładowe wykresy prezentujące uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.6–rys. 5.8. Analogiczne charakterystyki sporządzono dla każdej ścieżki pomiarowej podczas pomiaru w kierunku osi X, Y, oraz Z, zarówno z ramieniem obciążonym jak i swobodnym. Wyniki tych prac zamieszczono w załącznikach 1–6 oraz 16.



Rys. 5.6. Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej X5, uzyskane podczas próby bez obciążenia



Rys. 5.7. Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej Y1, uzyskane podczas próby bez obciążenia



Rys. 5.8. Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej Z3, uzyskane podczas próby z obciążeniem

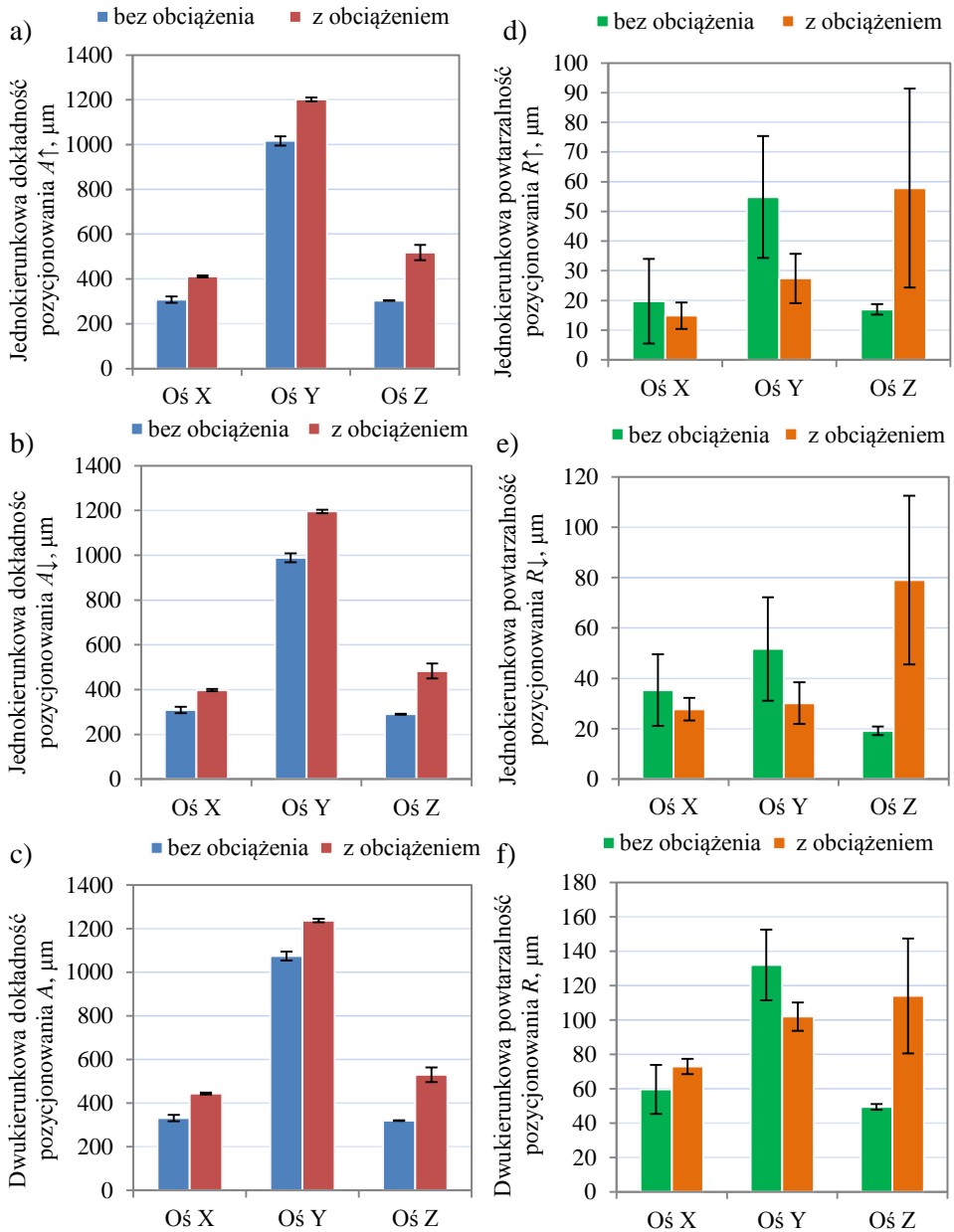
W próbie pod obciążeniem w ścieżkach pomiarowych równoległych do osi X, zarejestrowano odchyłki pozycjonowania mieszczące się w przedziale od $-346 \mu\text{m}$ do $+69 \mu\text{m}$. Dokonując analizy uzyskanych wyników zaobserwowano również, że w większej części obszaru pomiarowego odchyłki pozycjonowania przyjmują głównie wartości ujemne. Kształt charakterystyk w każdej ze ścieżek pomiarowych jest zbliżony, co świadczy o dużej powtarzalności pozycjonowania. Największe błędy osiąganego położenia występują w pobliżu środka ścieżki pomiarowej. Wraz z oddalaniem się od osi robota wzdłuż osi X, wartości odchyłek zmniejszają się, przy czym spadek ten jest bardziej intensywny na końcu ścieżek pomiarowych (800 – 1000 mm). Wyjątek stanowi ścieżka pomiarowa X5, w której błędy pozycjonowania zmniejszają się równomiernie w obu kierunkach. Największe odchyłki pozycjonowania zarejestrowano w ścieżce pomiarowej X1 znajdującej się najdalej od bazy robota oraz w ścieżce X5, znajdującej się najbliższej bazy robota. Kształt charakterystyk odchyłek pozycjonowania przy próbie z obciążeniem i bez obciążenia przyjmował powtarzalny i zbliżony charakter zmian. Wprowadzenie obciążenia skutkowało jedynie wzrostem wartości odchyłek pozycjonowania w całym obszarze pomiarowym bez zmiany charakteru ich przebiegu. Największe odchyłki przy próbie z obciążeniem zarejestrowano w ścieżce pomiarowej X4 ($428 \mu\text{m}$) w odległości 400 mm (punkt P4) od początku ścieżki pomiarowej.

Wartości odchyłek pozycjonowania mierzonych podczas próby bez obciążenia, w pięciu ścieżkach pomiarowych równoległych do osi Y mieszczą się w przedziale od $-70 \mu\text{m}$ do $+1342 \mu\text{m}$. W każdej ze ścieżek pomiarowych zarejestrowany przebieg charakterystyk błędów pozycjonowania jest podobny. Widoczna jest zmiana wartości odchyłek wraz ze zmianą odległości efektoru od bazy robota. Na całej długości ścieżki pomiarowej wartość odchyłek maleje z każdym kolejnym osiąganym punktem pomiarowym, w kierunku bazy robota.

Ponadto, większe wartości odchyłek pozycjonowania zarejestrowano w ścieżkach pomiarowych zlokalizowanych w jednej ze stron testowanej przestrzeni, zbliżonych do osi kolumny robota (Y4, Y5) a niż dla ścieżek Y1, Y2, Y3 znacznie oddalonych od osi kolumny robota. Podobnie, jak w przypadku pomiaru w ścieżkach pomiarowych równoległych do osi X, zadanie obciążenia skutkowało wzrostem wartości maksymalnych odchyłek w całym obszarze pomiarowym, bez istotnej zmiany kształtu charakterystyk. Odchyłki pozycjonowania w ścieżkach pomiarowych równoległych do osi Y, w próbie z obciążeniem mieszczą się w przedziale od $-120\ \mu\text{m}$ do $+1564\ \mu\text{m}$.

W ścieżkach pomiarowych równoległych do osi Z, przy próbie bez obciążenia, zarejestrowano odchyłki pozycjonowania mieszczące się w zakresie od $-456\ \mu\text{m}$ do $+193\ \mu\text{m}$. Wraz z przesunięciem ścieżki pomiarowej w kierunku bazy robota zaobserwowano zmianę charakteru przebiegu mierzonych odchyłek. W ścieżkach pomiarowych Z1 odchyłki przyjmują wartości głównie dodatnie, natomiast w kolejnych ścieżkach Z2, Z3, Z4 oraz Z5 charakterystyczna jest zmiana znaku na ujemny. Zaobserwowano także istotny wzrost wartości odchyłek pozycjonowania wraz z oddalaniem się od początku przyjętego pomiarowego układu współrzędnych. Analogicznie jak w przypadku pomiaru w ścieżkach równoległych do osi X oraz osi Y, obciążenie ramienia robota nie zmienia kształtu charakterystyk, ale powoduje wzrost wartości błędów pozycjonowania. Odchyłki pozycjonowania w ścieżkach pomiarowych równoległych do osi Z, przy próbie z obciążeniem zawierają się w przedziale od $-764\ \mu\text{m}$ do $+207\ \mu\text{m}$.

Parametry opisujące właściwości danego robota, takie jak: dokładność pozycjonowania, powtarzalność pozycjonowania oraz osiowa wartość zwrotna, zostały wygenerowane za pomocą programu XCal-View. Pomiary zrealizowano zgodnie ze standardem ISO 230:2006 zaś szczegółowe wyniki przedstawiono załączniku 16. Zastosowanie normy ISO230:2006 dedykowanej obrabiarkom sterowanym numerycznie podyktowane jest zgodnością wykonywania obliczeń parametrów dokładności na podstawie zrealizowanych pomiarów w środowisku programowym wykorzystywanego interferometru laserowego. Zasadność takiego podejścia można spotkać również w pracach [43, 49, 52]. Autorzy w pracy wskazali na alternatywne metody oceny niedokładności robotów w przypadku braku stosownych narzędzi i systemów pomiarowych do realizacji testów zgodnych z normą ISO 9283. Podejście takie jest podyktowane większą dostępnością interferometrów laserowych do pomiarów liniowych w osiach prostopadłych, niż systemów śledzących. Na wykresach słupkowych zaprezentowanych na rys. 5.9, przedstawiono uśrednione wartości odchyłek w zależności od badanej osi, kierunku ruchu oraz obciążenia ramienia robota.

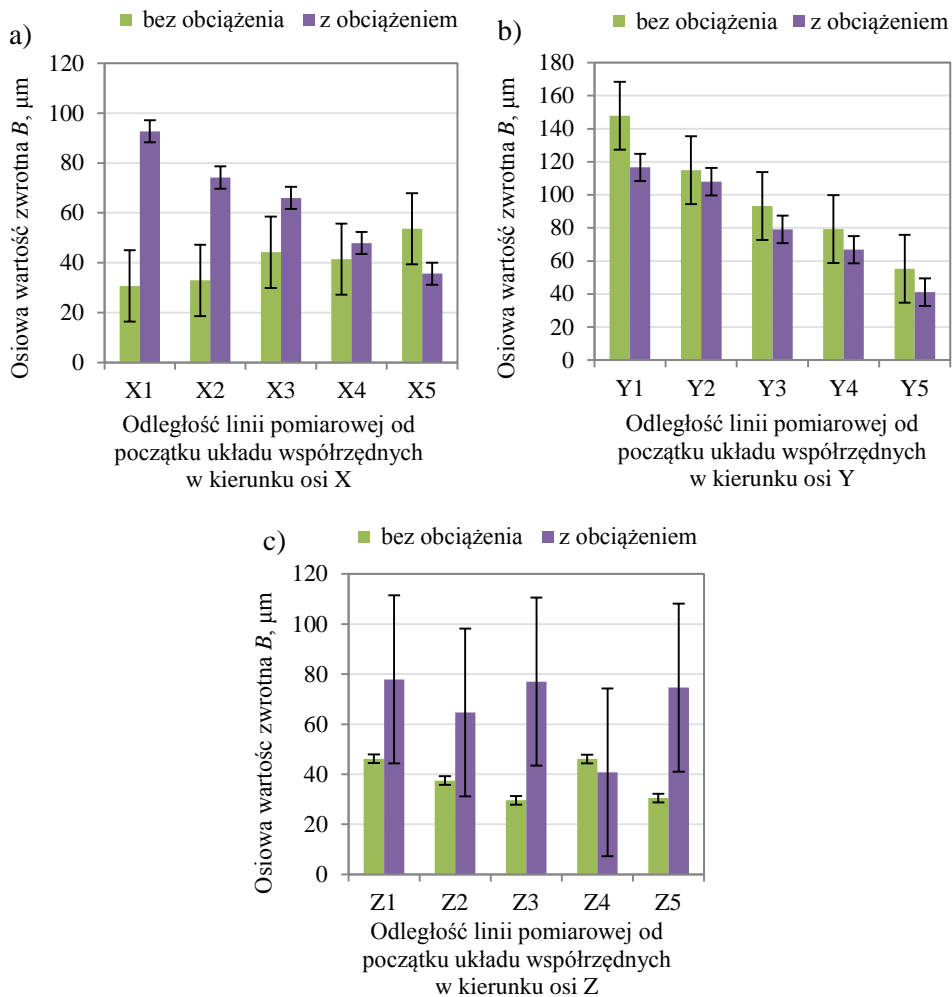


Rys. 5.9. Porównanie średnich wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota: a) jednokierunkowa dokładność pozycjonowania A_{\uparrow} , b) jednokierunkowa dokładność pozycjonowania A_{\downarrow} , c) dwukierunkowa dokładność pozycjonowania A , d) jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania R_{\uparrow} , e) jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania R_{\downarrow} , f) dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania R

Najgorszą średnią dokładność pozycjonowania bez obciążenia robot osiągnął podczas przesuwu wzdłuż osi Y ($A_{\uparrow} = 1016 \mu\text{m}$, $A_{\downarrow} = 989 \mu\text{m}$, $A = 1074 \mu\text{m}$). Średnia dokładność pozycjonowania podczas próby bez obciążenia w pozostałych dwóch osiach (X i Z) jest zbliżona co do wartości lecz lepsza niż w przypadku osi Y. Przykładowo, dokładność dwukierunkowa przy przesuwie wzdłuż osi X wynosi $A = 332 \mu\text{m}$ zaś wzdłuż osi Z $A = 320 \mu\text{m}$. Podczas próby z obciążeniem przy przesuwie w kierunku każdej z badanych osi, zauważalny jest spadek dokładności pozycjonowania. Analogicznie jak przy próbie bez obciążenia, najgorszą dokładność osiągnięto przy przesuwie wzdłuż osi Y ($A_{\uparrow} = 1202 \mu\text{m}$, $A_{\downarrow} = 1196 \mu\text{m}$, $A = 1237 \mu\text{m}$). Najlepszą średnią dokładność pozycjonowania z obciążonym ramieniem zarejestrowano przy przesuwie wzdłuż osi X ($A_{\uparrow} = 411 \mu\text{m}$, $A_{\downarrow} = 398 \mu\text{m}$, $A = 444 \mu\text{m}$). W przypadku testu wzdłuż osi Z, zarówno z obciążeniem jak i bez widoczny jest spadek dokładności pozycjonowania wraz ze zmniejszaniem odległości linii pomiarowej od bazy robota. Stwierdzono, że średnia dokładnością pozycjonowania (uwzględniając wszystkie osie), mieści się w przedziale od $289 \mu\text{m}$ do $1237 \mu\text{m}$.

Najwyższą średnią wartość powtarzalności pozycjonowania przy próbie bez obciążenia osiągnięto w osi Y ($R_{\uparrow} = 55 \mu\text{m}$; $R_{\downarrow} = 52 \mu\text{m}$; $R = 132 \mu\text{m}$), natomiast najniższą w osi Z ($R_{\uparrow} = 17 \mu\text{m}$, $R_{\downarrow} = 19 \mu\text{m}$; $R = 49 \mu\text{m}$). Można stwierdzić, że w przypadku osi Z zamocowanie obciążenia powodowało znaczny wzrost wartości powtarzalności pozycjonowania ($R_{\uparrow} = 58 \mu\text{m}$; $R_{\downarrow} = 79 \mu\text{m}$; $R = 114 \mu\text{m}$). Jednocześnie stwierdzono, że wzrosła również rozszerzona niepewność standardowa wyniku pomiaru, co w porównaniu z dwoma pozostałymi osiami świadczy, że osiągnięto znacznie gorsze wyniki. Badania wykazały (uwzględniając wszystkie osie), że robot przemysłowy Motoman HP20 charakteryzuje się powtarzalnością pozycjonowania na poziomie wartości średniej $132 \mu\text{m}$ i mniej.

Analizie poddano również osiową wartość zwrotną B mierzoną wzdłuż poszczególnych osi i linii pomiarowych (rys. 5.39). Podczas przesuwu wzdłuż linii pomiarowych równoległych do osi X podczas prób bez obciążenia, osiowa wartość zwrotna B zmniejsza się wraz przesunięciem linii pomiarowej w kierunku bazy robota, natomiast z obciążeniem przyjętą w pracy masą wartość błędu rośnie. Analizując niepewność pomiaru należy wskazać, że jest ona zdecydowanie większa w przypadku osi Z niż w osiach X i Y. Powodem wzrostu niepewności w osi Z jest znaczny rozrzut wyników pomiaru dla pionowego ruchu ramienia robota, szczególnie w próbie pod obciążeniem. W wielu przypadkach (zwłaszcza dla osi Y) nie ma możliwości wykazania różnicy osiowej wartości zwrotnej, ze względu na istnienie obciążenia lub jego brak. Powodem tego jest to, że istnieją wspólne obszary niepewności wyniku pomiaru.



Rys. 5.10. Wykres osiowej wartości zwrotnej (B) w zależności od odległości linii pomiarowej od początku układu współrzędnych, w wybranych kierunkach: a) w kierunku osi X, b) w kierunku osi Y, c) w kierunku osi Z

Pełna ocena parametrów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota wymaga dużego „upakowania” liczby płaszczyzn pomiarowych oraz prowadzenia testów przy różnych wartościach prędkości przesuwu efektora. Taki pełny model eksperymentu pozwala precyzyjnie określić analizowane błędy robota. Rozszerzenie zakresu badań, w przypadku zastosowania interferometru laserowego, powoduje jednak znaczne zwiększenie czasu niezbędnego na ich przeprowadzenie. Związane jest to z koniecznością ustawiania optyki urządzenia oddzielnie dla każdego obszaru pomiarowego. Z uwagi na przyjęte na wstępie ograniczenia, otrzymane wyniki stanowią jedynie podstawę oceny wybranej do testów przestrzeni roboczej robota.

5.3. Szacowanie niepewności pomiaru interferometrem laserowym

Tak jak każdy pomiar z wykorzystaniem systemu pomiarowego obarczony jest niepewnością, również w analizowanym w pracy przypadku wykorzystanie interferometru laserowego związane jest z określeniem niepewności pomiaru przy jego zastosowaniu. Niepewność pomiaru interferometrem laserowym obejmuje szereg składowych niepewności uwzględniających wpływ ważniejszych błędów wpływających na wynik pomiaru. Niepewności te są szacowane w oparciu o informacje zawarte w świadectwie kalibracji urządzenia ale także w oparciu o pomiary i dane statystyczne. W tab. 5.1 zaprezentowano określone na podstawie świadectwa kalibracji błędy i niedokładności wykorzystywanego podczas badań interferometru laserowego wraz z kompensatorem. Składowe niepewności pomiaru wynikające z rozrzutu wyników pomiaru szacowano metodą A zaś składowe pozastatystyczne szacowano metodą B.

Tab. 5.1. Określone na podstawie świadectwa kalibracji błędy i niedokładności interferometru laserowego (z kompensatorem) wykorzystywanego podczas badań

Dokładność pomiaru w oparciu o dane z kalibracji z pełnym kompensatorem podczas pomiarów liniowych dokładność systemu pomiarowego	±0,5 ppm
Błędy częstotliwości dla zastosowanego lasera	
Maksymalny błąd częstotliwości 1,6 MHz	0,003 ppm
Niepewność pomiaru ($k = 2$) +/-5,9 MHz	±0,01 ppm
Dla czujnika temperatury materiału	
Dokładność	±0,1°C
Maksymalny błąd czujnika	0,01°C
Niepewność ($k = 2$)	±0,04 °C
Dla czujnika temperatury powietrza	
Dokładność	±0,2°C
Maksymalny błąd czujnika	0,01°C
Niepewność ($k = 2$)	±0,04 °C
Dla czujnika ciśnienia	
Dokładność	±1 mbar
Maksymalny błąd czujnika ciśnienia	0,4 mbar,
Niepewność ($k = 2$)	±0,3 mbar
Dla czujnika wilgotności	
Dokładność	±6% RH,
Maksymalny błąd czujnika wilgotności	0,1 RH,
Niepewność ($k = 2$)	±2,8% RH

RH: wilgotność względna

Niepewność rozszerzona U wyznaczana jest na podstawie równania (5.1)

$$U = \pm u_c k \quad (5.1)$$

gdzie: u_c – złożona niepewność standardowa, k – współczynnik rozszerzenia

Złożoną niepewność standardową u_c , wyznaczono z równania (5.2)

$$u_c = \pm \sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^n u_{Bi}^2} \quad (5.2)$$

gdzie: u_A – niepewność standardowa szacowana metodą A (statystyczna),
 u_{Bi} – niepewności standardowe poza-statystyczne szacowane metodą B

Niepewność standardową u_A szacowaną metodą A wyznaczono na podstawie zależności (5.3)

$$u_A = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5.3)$$

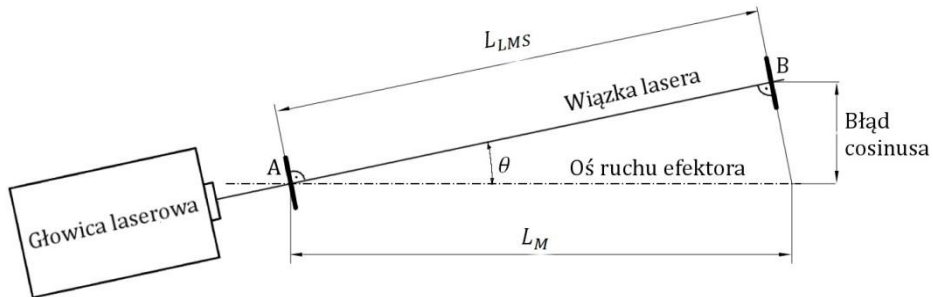
zaś sumę kwadratów składowych niepewności pozastatystycznych wyznaczanych metodą B, ze wzoru (5.4)

$$\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 = u_{BCos}^2 + u_{BAbb}^2 + u_{Bdrm}^2 + u_{Bprz}^2 + u_{BT}^2 + u_{B\alpha}^2 \quad (5.4)$$

Uwzględniając specyfikę pomiarów i sposób ustawienia poszczególnych składowych interferometru podczas pomiarów, wartości błędów cosinusa oraz błędu Abbego przyjęto jako nieistotne i w znikomym stopniu wpływające na wynik pomiaru. Dodatkowo należy wskazać, że zjawiska będące źródłem tych błędów są kontrolowane przez oprogramowanie systemu, zaś sam pomiar jest możliwy dopiero wówczas, gdy zostaną usunięte wszelkie źródła ich powstawania. Kolejnym powodem nie uwzględniania tego błędu jest to, że ich wartość są na tyle małe, że w stosunku do oczekiwanej dokładności pomiaru, wynikającą stąd niepewność można potraktować jako małą drugiego rzędu.

Błąd cosinusa

Błąd cosinusa powstaje wówczas, gdy wiązka lasera nie pokrywa się z osią ruchu ramienia badanego robota (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Schemat powstawania błędu cosinusa, wynikającego z braku równoległości wiązki światła laserowego do osi ruchu badanego obiektu

Zmierzona przez system pomiarowy odległość L_{LMS} na drodze z punktu A do punktu B, jest mniejsza od rzeczywistej drogi pokonanej przez ramię robota L_M , zgodnie z zależnością (5.5).

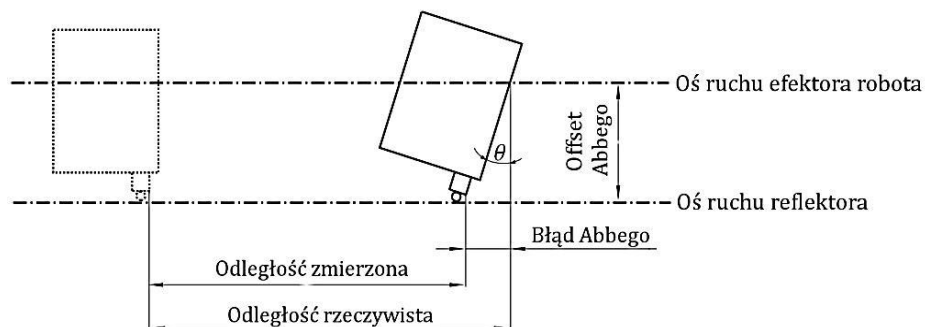
$$L_{LMS} = L_M \cdot \cos \theta \quad (5.5)$$

Minimalizacji błędu cosinusa należy dokonywać doprowadzając do równoległości wiązki laserowej w stosunku do kierunku ruchu zespołu przesuwnego robota. Przyjęto zatem, że niepewność uwzględniająca brak równoległości ścieżki światła laserowego do osi ruchu badanego obiektu jest bliska zeru $u_{BCos} \approx 0$. Podstawą do takiego założenia jest warunek realizacji przedmiotowego pomiaru dopiero wówczas, gdy błąd ten jest na tyle mały, że w ogóle umożliwia realizację pomiaru interferometrem. W analizowanym przypadku, podczas wykonywania pomiarów warunek ten został spełniony. Justowanie wykorzystywanego interferometru było kontrolowane z poziomu oprogramowania systemu pomiarowego, a błąd cosinusa był na tyle mały, że niepewność, której był źródłem można było pominąć.

Błąd Abbego

Z uwagi na to, że szacowanie błędu Abbego jest bardzo trudne [29–31], to w odniesieniu do badanego robota przyjęto, że wchodzi on jako część składowa odchyłek pozycjonowania i nie jest traktowany jako źródło niepewności pomiaru. Błąd Abbego wynika z ruchów kątowych ramienia robota z reflektorem w danym kierunku, kiedy pomiar dokonywany jest w miejscu oddalonym o pewne przesunięcie (o odległość zwaną offsetem Abbego) od rzeczywistego punktu przemieszczenia. Zatem, odległość rzeczywista jest inna od odległości

zmierzonej [29, 33]. Na rys. 5.12 przedstawiono schematycznie geometryczną interpretację powstawania błędu Abbego.

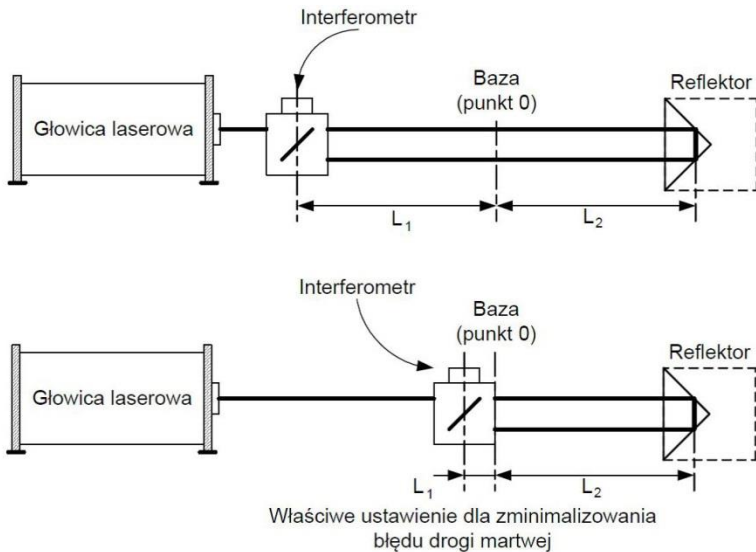


Rys. 5.12. Geometryczna interpretacja powstawania błędu Abbego [29]

W badanym przypadku offset Abbego zmierzał do zera, ponieważ reflektor był tak samo prowadzony jak efektor robota, w którym był zamocowany. Można zatem przyjąć, że wartość niepewności dąży również do zera, zatem założono, że $u_{BAbb} \approx 0$.

Błąd drogi martwej

Innym czynnikiem wpływającym na wynik pomiaru interferometrem laserowym jest błąd drogi martwej. Błąd drogi martwej powstaje w sytuacji, kiedy występuje brak kompensacji długości ścieżki wiązki laserowej. Zmiana długości ścieżki laserowej ma miejsce wówczas, gdy zmieniają się drastycznie warunki otoczenia wpływające na długość fali podczas pomiaru, np. zmienia się temperatura materiału, na którym posadowione są zarówno interferometr jak i reflektor, powodując między innymi zmianę ich odległości. Z uwagi na znikome zmiany temperatury podczas pomiarów w stosunkowo długim czasie, nieprzekraczające $1,23^{\circ}\text{C}$ oraz rodzaj podłoża, na którym posadowiono w/w elementy oraz brak zmiany jego wymiarów (stabilna płyta betonowa), czynniki te uznano za nieistotne z punktu widzenia realizowanego pomiaru. Z analizy literatury [29] wynika także, że błąd drogi martwej po spełnieniu zaleceń normy i właściwym rozmieszczeniu optyki stacjonarnej i ruchomej względem reprezentatywnego punktu zerowego (tzw. bazy), jest pomijalnie mały i wówczas nie ma potrzeby uwzględniania go w budżecie niepewności pomiaru. Błąd ten jest tym mniejszy, im bliżej znajduje się interferometr względem „bazy” (rys. 5.13). Właściwe ustawienie optyki systemu, minimalizujące wartość błędu drogi martwej przedstawiono na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Ustawienie optyki systemu, minimalizujące wartość błędu drogi martwej

Wynika stąd zatem, że niepewność standardowa uwzględniająca błąd drogi martwej jest bliska zeru $u_{Bdrm} \approx 0$

Niepewność uwzględniająca wpływ maksymalnego błędu granicznego interferometru

W analizie niepewności pomiaru interferometrem laserowym uwzględniono wpływ maksymalnego błędu granicznego interferometru, określonego jako MPE . Wartość błędu MPE przyjęto ze świadectwa kalibracji urządzenia. MPE nie obejmuje poprawek związanych z normalizacją wyników pomiarów do temperatury 20°C . Wynikającą stąd niepewność przyrządu (lasera) u_{Bprz} przy przyjęciu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa określono na podstawie zależności (5.6):

$$u_{Bprz} = \pm \frac{MPE}{2} x_{ij} \quad (5.6)$$

gdzie: MPE – maksymalny błąd graniczny,
 x_{ij} – aktualna pozycja zadana

Według dokumentacji interferometru laserowego wartość maksymalnego błędu granicznego MPE w pierwszym roku użytkowania wynosi $\pm 0,5$ ppm, zaś w kolejnych trzech latach ± 1 ppm. Z uwagi na okres eksploatacji interferometru MPE przyjęto na poziomie ± 1 ppm. Przedstawione powyżej wartości błędów określono w świadectwie kalibracji. Zostały one wyznaczone podczas pomiarów z wykorzystaniem stacji kompensacji warunków środowiskowych.

Niepewność uwzględniająca wpływ błędu granicznego sensora temperatury

W odniesieniu do realizowanych badań robota, w szacowaniu niepewności uwzględniono wpływ błędu granicznego sensora podczas pomiaru temperatury. Ogólna postać niepewności standardowej pomiaru temperatury u_{BT} przy wielu sensorach wykorzystywanych podczas eksperymentu i przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, może zostać wyznaczona ze wzoru (5.7):

$$u_{BT} = \pm \frac{\sum_{i=1}^n MPE_{T_i}}{n\sqrt{3}} \quad (5.7)$$

gdzie: MPE_{T_i} – maksymalny błąd graniczny sensora temperatury (wg danych technicznych wzorcowania podanych przez producenta $MPE_{T_i} = \pm 0,1^\circ C$),

n – liczba sensorów temperatury podczas badań

Dla rozważanego przypadku zmiany wartości temperatury podczas pomiarów nie przekraczały więcej niż $\Delta T = 1,23^\circ C$, zaś wartość niepewności standardowej pomiaru temperatury u_{BT} , przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wyznaczono na podstawie zależności (5.8).

$$u_{BT} = \pm \frac{MPE_T}{\sqrt{3}} \quad (5.8)$$

Wartość błędu granicznego MPE_{T_i} przyjęto zgodnie ze świadectwem kalibracji na poziomie $\pm 0,1^\circ C$.

Niepewność wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej

Uwzględniając możliwość rozszerzania się wzorca, wyznaczono również niepewność standardową wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej $u_{B\alpha}$. Niepewność standardowa wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej, przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, opisana jest równaniem (5.9):

$$u_{B\alpha} = \pm \frac{\Delta\alpha}{\sqrt{3}} \quad (5.9)$$

gdzie: $\Delta\alpha$ – graniczna odchyłka współczynnika rozszerzalności cieplnej.

Na podstawie literatury [29] przyjęto, że odchyłka graniczna współczynnika rozszerzalności cieplnej wynosi $\Delta\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ C}$, zaś wartość $\alpha = 11,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ C}$. Uwzględniając powyższe, niepewność standardową wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej u_α określono jako (5.10):

$$u_{B\alpha} = \pm \left(\frac{1,5}{\sqrt{3}} \cdot 10^{-6} \right) \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \quad (5.10)$$

Zatem ostatecznie, suma kwadratów niepewności szacowanych metodą B wynosi (5.11):

$$\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 = u_{Bprz}^2 + \left(\frac{\partial x_{ij}}{\partial (\Delta T)} \cdot u_T \right)^2 + \left(\frac{\partial x_{ij}}{\partial (\alpha)} \cdot u_{\alpha} \right)^2 \quad (5.11)$$

zaś złożona niepewność standardowa u_c , może być wyznaczona z równania (5.12):

$$u_c = \pm \sqrt{u_A^2 + u_{Bprz}^2 + \left(\frac{\partial x_{ij}}{\partial (\Delta T)} \cdot u_T \right)^2 + \left(\frac{\partial x_{ij}}{\partial (\alpha)} \cdot u_{\alpha} \right)^2} \quad (5.12)$$

W oparciu o przyjęte w pracy założenia, opracowano formuły obliczeniowe i wyznaczono wartości poszczególnych składowych niepewności. Dokonano również oceny niepewności pomiaru prób pod obciążeniem. Niepewność i jej składowe dla pomiaru odchyłek pozycjonowania w osiach X, Y, Z, przy maksymalnych przesuwach podczas badań, zawarto w tab. 5.2.

Tab. 5.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru interferometrem laserowym odchyłek pozycjonowania ramienia robota, dla przesułów maksymalnych odpowiednio w osiach X, Y, Z, zarówno z obciążeniem jak i bez obciążenia statycznego

Niepewność	X		Y		Z	
	1100 mm		1500 mm		900 mm	
	m=0 kg	m=8,6 kg	m=0 kg	m=8,6 kg	m=0 kg	m=8,6 kg
	przedział wartości niepewności [μm]					
u_A	$\pm 7,137$	$\pm 2,225$	$\pm 10,262$	$\pm 4,121$	$\pm 0,843$	$\pm 16,752$
u_{Bcos}	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$
u_{BAbb}	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$
u_{Bdrm}	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$
u_{Bprz}	$\pm 0,175$	$\pm 0,175$	$\pm 0,375$	$\pm 0,375$	$\pm 0,175$	$\pm 0,375$
u_{BT}	$\pm 0,058$	$\pm 0,058$	$\pm 0,058$	$\pm 0,058$	$\pm 0,058$	$\pm 0,058$
$u_{B\alpha}$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
u_c	$\pm 7,140$	$\pm 2,232$	$\pm 10,268$	$\pm 4,139$	$\pm 0,861$	$\pm 16,756$
$U(k=2)$	$\pm 14,28$	$\pm 4,464$	$\pm 20,536$	$\pm 8,278$	$\pm 1,722$	$\pm 33,512$

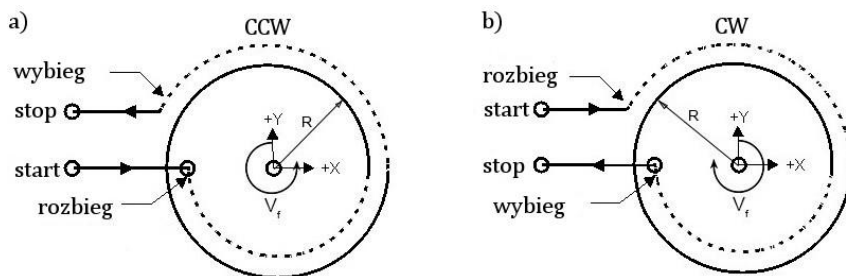
Należy nadmienić, że pomiary interferometrem są realizowane jako pomiary statyczne, tj. w określonych pozycjach i zazwyczaj bez obciążenia ramienia robota masami przemieszczanych elementów. Autorzy dostrzegają pewne możliwości badawcze oceny wpływu udziału masy robota w poszczególnych położeniach przestrzeni roboczej na powtarzalność pozycjonowania, co wykazały wyniki pomiarów podczas obciążenia statycznego efektora masą 8,6 kg. Oczywiście można by pokusić się o obciążenie ramienia robota większą masą (max. obciążenie badanego robota 20 kg), lecz z doświadczeń autorów wynika, że na długości ścieżki pomiarowej system ulega rozjustowaniu, z uwagi na zmianę ścieżki ruchu. Okazuje się, że przy dużych wysięgach i długich ścieżkach dochodzi do braku równoległości wiązki laserowej do ścieżki ruchu, co jest efektem zbaczania efektora spowodowanego wzrostem momentu gnącego i odkształcenia sprężystego ramion. Kolejnym problemem jest bezwładność przemieszczanej przez zespół ramion masy i utrzymanie zadanej pozycji (problem ze stabilizacją pozycji i przeregulowaniem pozycji) co dodatkowo ogranicza badania pod obciążeniem. W kolejnych rozdziałach, autorzy jako alternatywne sposoby oceny proponują wykorzystanie metod optycznych, mając na względzie ich zalety, takie jak: szybkość pomiaru, możliwość oceny błędów pod dowolnym kątem w stosunku do poziomu, bezkontaktowość pomiaru oraz brak problemów z justowaniem.

6. Badania dokładności robota z zastosowaniem teleskopowego pręta kinematycznego

6.1. Przebieg pomiaru

W teście oceny dokładności robota zastosowano teleskopowy, kulkowy pręt kinematyczny QC20-W Ballbar. Urządzenie pozwala na identyfikację m. in. błędów charakterystycznych dla obrabiarek sterowanych numerycznie, takich jak: odchyłka okrągłości, luzy (luz zwrotny, luz poprzeczny) oraz odchyłki prostopadłości i równoległości. Autorzy prac [18, 20, 42–43] wskazują na odchyłkę okrągłości jako reprezentatywną miarę niedokładności robota w dynamicznym teście podczas ruchu, opisującą zdolność realizacji ścieżki o zarysie kołowym. Należy wskazać, że taki rodzaj ścieżki jest często realizowany w warunkach przemysłowych pracy robota. Pomiar z zastosowaniem urządzenia QC20 Ballbar może być realizowany w jednej z trzech płaszczyzn XY, XZ oraz YZ. Dodatkowo realizacja testu w trzech płaszczyznach może być wykonywana z jednego (tego samego) zamocowania. Pozwala to na jednoczesną ocenę trzech ścieżek o zarysie kołowym z tego samego punktu w przestrzeni roboczej badanego robota.

Pierwszym etapem przed przystąpieniem to prac właściwych było ustalenie metodyki badań. Pomiary polegały na rejestracji odchyłek okrągłości dla danego promienia podczas wykonywania przez efektor robota ścieżki o zarysie kołowym w określonej płaszczyźnie, dla wybranej lokalizacji i wartości posuwu. W celu zapewnienia stałej, liniowej prędkości ruchu narzędzia (efektora) v_f , każdy zaprogramowany ruch pomiarowy zgodnie z zalecaną procedurą poprzedzony był rozbiegiem oraz zakończony wybiegiem. Pomiary prowadzono w płaszczyźnie XY w zakresie $0\text{--}360^\circ$ podczas ruchu w kierunku zgodnym (CW) – rys. 6.1b oraz przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara (CCW) – rys. 6.1a.



Rys. 6.1. Sposób pomiaru dokładności robota HP20 za pomocą teleskopowego pręta kinematycznego QC20-W Ballbar: a) przebieg testu w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara (CCW), przebieg testu w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (CW) [63]

Test kołowości wykonano przy trzech wartościach promienia r interpolowanego okręgu:

$r = 100$ mm (rys. 6.2 a),

$r = 150$ mm (rys. 6.2 b),

$r = 300$ mm (rys. 6.2 c).

oraz trzech różnych wartościach prędkości ruchu efektora:

$v_f = 50$ mm/s,

$v_f = 75$ mm/s,

$v_f = 100$ mm/s.

Dla każdej konfiguracji testu przeprowadzono po trzy powtórzenia. Każda zmiana długości teleskopowego pręta kinematycznego poprzedzona była kalibracją długości ramienia pręta teleskopowego QC20 Ballbar (rys. 6.3).



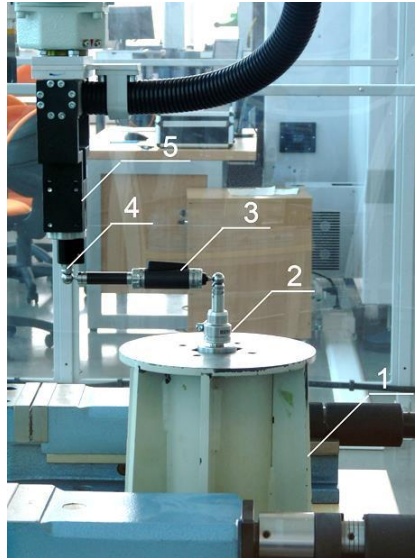
Rys. 6.2. Długości teleskopowego pręta kinematycznego zastosowane w teście kołowości:
a) $r = 100$ mm, b) $r = 150$ mm, c) $r = 300$ mm



Rys. 6.3. Sposób kalibracji teleskopowego pręta kinematycznego

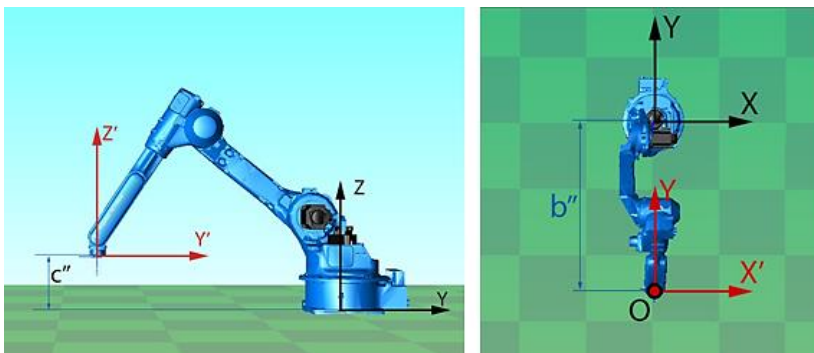
Na rys. 6.4 przedstawiono sposób zamocowania teleskopowego pręta kinematycznego na stanowisku pomiarowym. Podstawę magnetyczną, centrującą (2) zamocowano na stabilnym, szlifowanym stole pomiarowym (1) umieszczonym w centralnej części obszaru roboczego robota HP20. Takie usytuowanie środka zarysu kołowego w bazowym układzie współrzędnych robota, podyktowane jest najczęściej wykorzystywanym obszarem pracy robota. Nie oznacza to jednak, że jest to pozycja, w której należy oczekiwać największych wartości identyfikowanych błędów. Nie mniej jednak wybrana do analizy przestrzeń jest determinująca do realizowanych zadań roboczych badanego robota. Teleskopowy pręt kinematyczny (3) został umieszczony pomiędzy podstawą magnetyczną (2)

a uchwytem magnetycznym (4) zamocowanym w efektorze (chwytaku) robota (5). Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem systemu Ballbar 20 V5, Transmisja danych pomiędzy urządzeniem pomiarowym a systemem komputerowym odbywała się za pomocą technologii Bluetooth.



Rys. 6.4. Sposób zamocowania urządzenia QC20-W Ballbar na stanowisku pomiarowym, gdzie:
 1) stolik pomiarowy, 2) podstawa magnetyczna centrująca, 3) teleskopowy pręt kinematyczny,
 4) uchwyt magnetyczny, 5) chwytak robota (efektor)

Na rys. 6.5 zaprezentowano położenie początku zdefiniowanego kartezjańskiego układu współrzędnych X , Y , Z , stanowiącego miejsce usytuowania ośrodka okręgu wykonywanego podczas pomiaru.

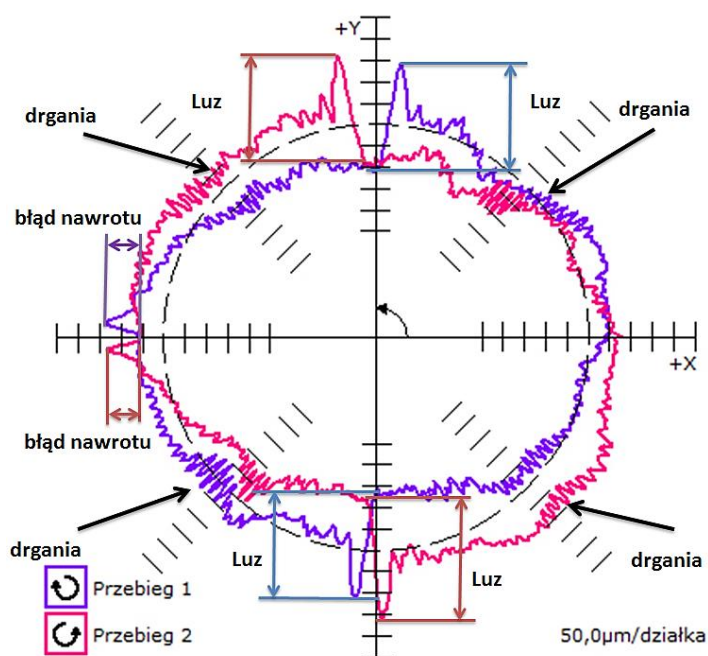


Rys. 6.5. Położenie środka okręgu w bazowym układzie współrzędnych robota:
 a) widok z boku, b) widok z góry

Na rys. 6.5 literą O oznaczono punkt środkowy w bazowym układzie współrzędnych, względem którego definiowano położenie promienia do realizacji ścieżki o zarysie kołowym podczas testu. Przesunięcie punktu środkowego w kartezjańskim układzie współrzędnych względem początku bazowego układu współrzędnych badanego robota wynosiło odpowiednio $b'' = 750$ mm w osi Y oraz $c'' = 200$ mm w osi Z.

6.2. Wyniki pomiarów

Wyniki badań oraz ich prezentację graficzną uzyskano z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania Ballbar 20 V5. Dla każdej konfiguracji testu pomiarowego, tzn. wartości promienia ścieżki o zarysie kołowym r oraz liniowej prędkości przesuwu efektora robota v_f , obliczono wartości średnie luzów, błędów i odchyłek, takich jak: luz zwrotny, błąd nawrotu, luz poprzeczny, odchyłka okresowa, błąd nadążania, odchyłka prostopadłości, odchyłki prostoliniowości, różnica odchyłki pozycjonowania oraz odchyłka okrągłości. Przykład identyfikacji błędów na podstawie uzyskanej charakterystyki zmian promienia przedstawiono na rys. 6.6.



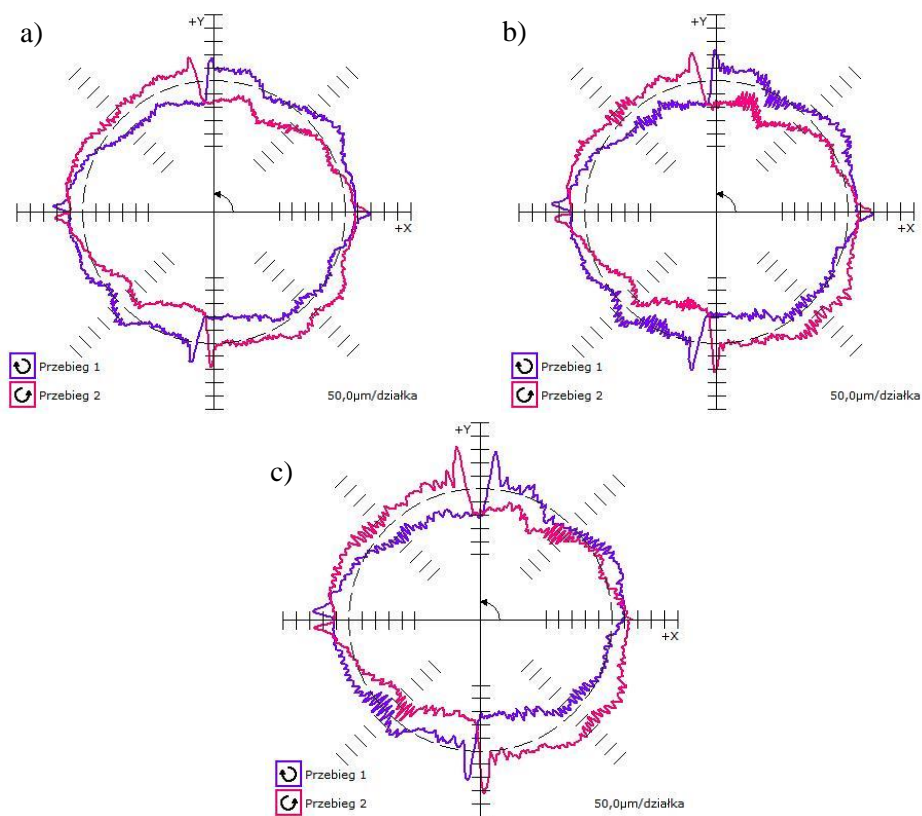
Rys. 6.6. Przykład analizy błędów na podstawie charakterystyki zmian promienia uzyskanej podczas pomiaru

Uzyskane wartości błędów i odchyłek wraz z procentowym ich udziałem w odchyłce okrągłości, jak również obliczone na podstawie algorytmów programu wartości średnie, przedstawiono kolejno w załącznikach 7–15.

Analizując mapy odchyłek dla testu okrągłości o promieniu $r = 100$ mm oraz $r = 150$ mm, zaobserwowano „uskoki”, charakterystyczne dla występowania luzu zwrotnego. Kształt zaobserwowanego podczas testu, rzeczywistego okręgu interpolowanego może świadczyć o występowaniu luzów w układach napędowych lub związane jest to z ich niedostateczną sztywnością. Na wykresach widoczne są również obszary, w których występuje zmiana odchyłki promienia o zwiększonej amplitudzie, szczególnie przy wyższych prędkościach posuwowych. Fakt ten może być przejawem powstawania drgań podczas realizacji ruchu efektora.

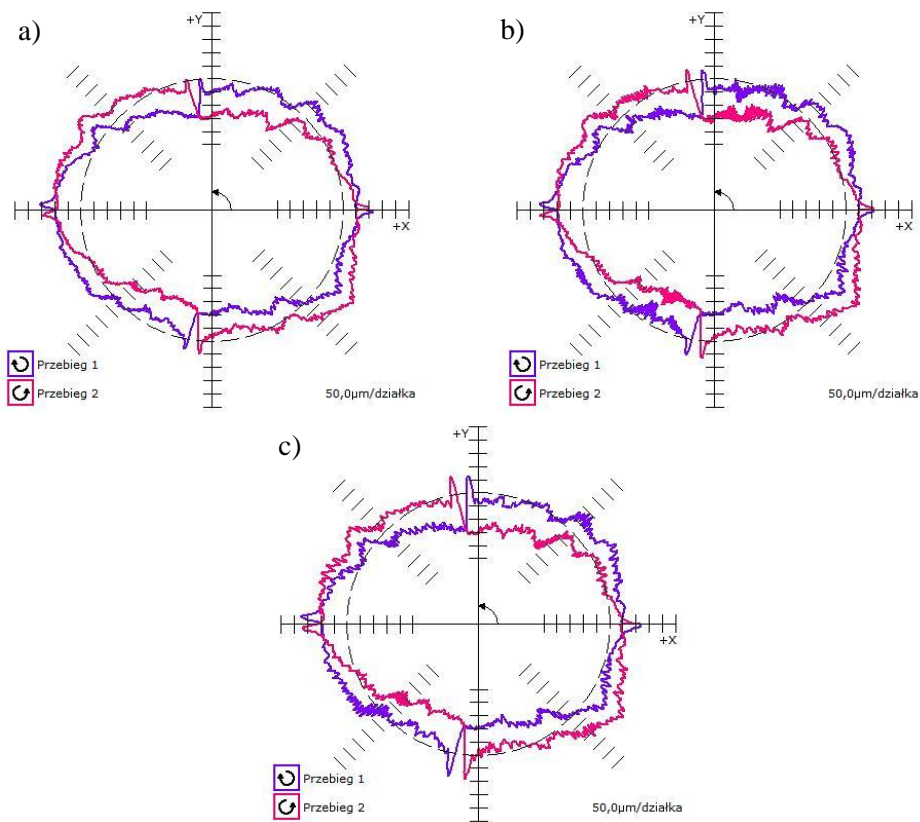
Mając na uwadze budowę robota, ocena wyników badań kinematycznym prętem teleskopowym została nakierowana na analizę uniwersalnych miar niedokładności, z których najważniejsza jest odchyłka okrągłości i przebieg ścieżki po zarysie kołowym. Jak wynika z analizy błędów identyfikowanych kinematycznym prętem teleskopowym, większość z nich odnosi się do osi kartezjańskich układów współrzędnych obrabiarek sterowanych numerycznie CNC. Z uwagi na to jednak, że błędy identyfikowane kinematycznym prętem teleskopowym mogą wynikać z powodów, które nie mają miejsca w odniesieniu do robotów (np. nierównomierne naprężenia liniału pomiarowego (brak liniału pomiarowego), źle dobranych parametrów liniowej kompensacji błędów, przegrzewania lub uszkodzenie śruby w jednej z osi (brak takich śrub lub błędu ustawienia prowadnic) skupiono się na ogólnych miarach niedokładności robotów przemysłowych. W szczególności wykazano możliwości dynamicznego pomiaru odchyłki okrągłości, co jest niewątpliwą zaletą systemu i możliwość oceny trajektorii kołowej o zadanym promieniu w dowolnej pozycji kątowej. Dodatkowo wskazano na możliwość pomiaru odchyłki okrągłości z jednego zamocowania, we wszystkich trzech prostopadłych płaszczyznach. To znacznie skraca przebieg testu diagnostycznego, przez co ocena niedokładności ogranicza odbywa się bardzo krótkim czasie (zaledwie kilku minut). Powoduje to, że metoda ta jest konkurencyjna w stosunku do innych technik badawczych. Wskazano również na możliwość identyfikacji odchyłki okrągłości dla różnych wartości promienia realizowanego ruchu po okręgu, sposobność oceny powtarzalności ścieżki i odchyłek promienia, co dodatkowo zwiększa możliwości pomiarowe i zakres oceny niedokładności robota.

Średnia odchyłka okrągłości Δ_0 podczas testu dla promienia $r = 100$ mm (rys. 6.7) wynosiła odpowiednio: 254 μm dla prędkości $v_f = 50$ mm/s, 281 μm dla prędkości $v_f = 75$ mm/s oraz 304 μm dla prędkości $v_f = 100$ mm/s. Największy średni procentowy udział w całkowitej odchyłce okrągłości miały luz zwrotny w kierunku osi Y (9–20%), błąd skali (14–17%) oraz błąd nawrotu (7–20%) – załączniki 7–9.



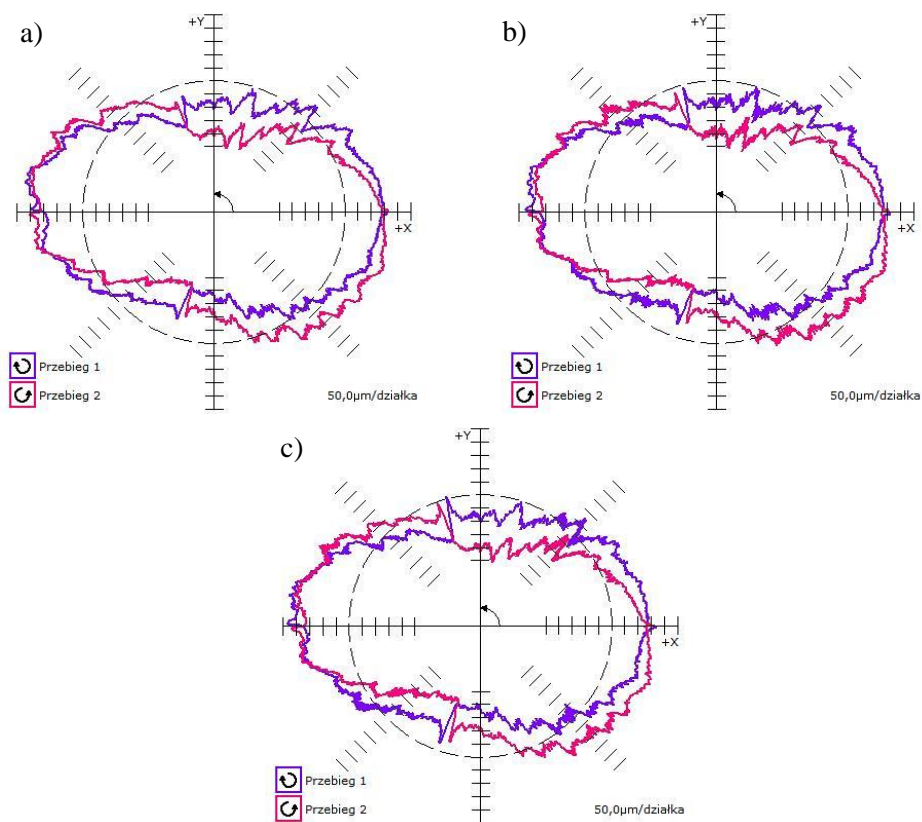
Rys. 6.7. Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 100$ mm:
 a) $v_f = 50$ mm/s, b) $v_f = 75$ mm/s, c) $v_f = 100$ mm/s

Podczas testu kołowości dla promienia $r = 150$ mm (rys. 6.8) największą średnią odchyłkę okrągłości ($\Delta_o = 334 \mu\text{m}$) zarejestrowano przy zadanej prędkości $v_f = 75$ mm/s, natomiast najmniejszą średnią odchyłkę okrągłości ($\Delta_o = 312 \mu\text{m}$) osiągnięto przy prędkości $v_f = 50$ mm/s. Największy średni procentowy udział w całkowitej odchyłce okrągłości miały błąd skali (23–28%) oraz błąd nadążania (14–17%) – załączniki 10–12.



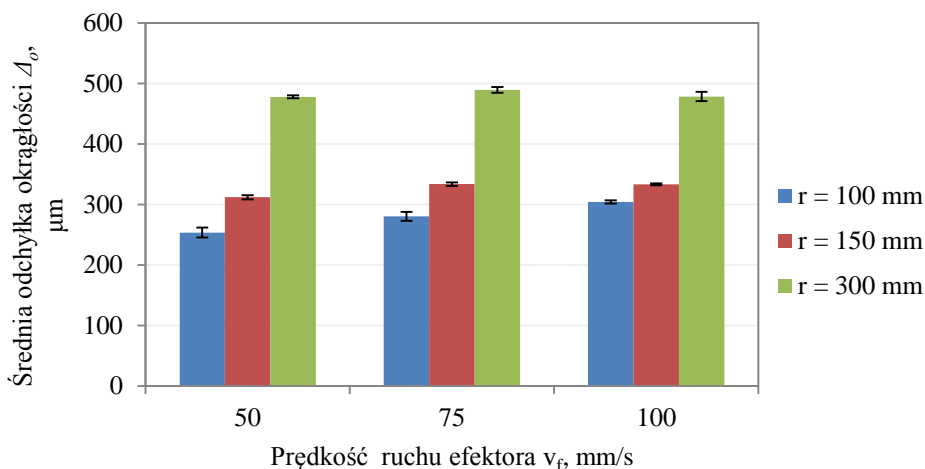
Rys. 6.8. Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 150$ mm:
a) $v_f = 50$ mm/s, b) $v_f = 75$ mm/s, c) $v_f = 100$ mm/s

Średnia odchyłka okrągłości w teście interpolacji kołowej o promieniu $r = 300$ mm (rys. 6.10), wynosiła $\Delta_o = 478$ μm dla prędkości $v_f = 50$ mm/s, $\Delta_o = 490$ μm dla prędkości $v_f = 75$ mm/s oraz $\Delta_o = 479$ μm dla prędkości $v_f = 100$ mm/s. Największy, średni procentowy udział w całkowitej odchyłce okrągłości wykazywał błąd skali (32–33%). Ponadto zaobserwowano duży wpływ błędu nadążania na całkowitą odchyłkę okrągłości (13–14%), co potwierdzają wyniki badań zawarte w załącznikach 13–15.



Rys. 6.9. Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 300$ mm:
 a) $v_f = 50$ mm/s, b) $v_f = 75$ mm/s, c) $v_f = 100$ mm/s

Głównym parametrem podlegającym ocenie była odchyłka okrągłości Δ_o . Zarejestrowane wartości odchyłki okrągłości mieszczą się w przedziale od $250 \mu\text{m}$ do $492 \mu\text{m}$. Analizując uzyskane wyniki oraz mapy odchyłek, zaobserwowano wzrost wartości odchyłki okrągłości wraz ze zwiększaniem promienia interpolowanego okręgu (rys. 6.10). Wzrost promienia ścieżki o zarysie kołowym wskazuje jednoznacznie na powstawanie błędu skali, o czym świadczy „spłaszczenie” charakterystyki zmian promienia w kierunku osi Y. Oznacza to, że dla dużych promieni, efektor przemieszcza się po zarysie owalnym lub elipsyjnym, którego dłuższa z osi pokrywa się z osią X przyjętego układu współrzędnych. Robot nie jest więc w stanie odtworzyć zarysu kołowego co wymaga kompensacji przemieszczeń wzdłuż osi sterowanych.



Rys. 6.10. Średnia wartość odchyłki okrągłości w funkcji prędkości liniowej przesuwu narzędzia v_f oraz długości promienia r interpolowanego okręgu

Należy mieć na uwadze, że pomiary z wykorzystaniem teleskopowego pręta kinematycznego QC20 Ballbar mają charakter lokalny. Pełna ocena dokładności robota wymaga przebadania całej przestrzeni jego pracy. Odchyłki promienia analizowano w płaszczyźnie XY wokół wybranego punktu przestrzeni roboczej. Badania przeprowadzono dla ramienia swobodnego. W celu dokonania szerszej oceny dokładności robota, należy zawsze prowadzić analogiczne pomiary w wielu punktach obszaru roboczego we wszystkich płaszczyznach XZ, XY oraz YZ. Ponadto istotnych informacji mogą dostarczyć próby przeprowadzone z obciążonym ramieniem. Podobnie, jak w przypadku pomiarów z wykorzystaniem interferometru laserowego, prowadzenie testów systemem QC20 Ballbar powinno być realizowane gdy robot znajduje się w stanie ustalonym cieplnie. Mimo wielu ograniczeń związanych z wykorzystaniem kinematycznego pręta teleskopowego podczas identyfikacji błędów robota przemysłowego, niska wartość niepewności pomiaru tym systemem stawia go na wysokiej pozycji podczas oceny dokładności realizacji ścieżki pomiarowej o zarysie kołowym.

6.3. Szacowanie niepewności pomiaru kinematycznym prętem teleskopowym

Niepewność pomiaru realizowanego kinematycznym prętem teleskopowym obejmuje szereg niepewności składowych, uwzględniających wpływ wszystkich błędów wpływających na wynik pomiaru. Podobnie jak dla interferometru laserowego, również dla pomiaru z użyciem kinematycznego pręta teleskopowego, niepewności te są szacowane w oparciu o informacje zawarte w świadectwie kalibracji urządzenia ale także w oparciu o pomiary i dane statystyczne. W tab. 6.1 zaprezentowano błędy i niepewności wykorzystywanego podczas

badania systemu. Dane te określono na podstawie świadectwa kalibracji urządzenia. Pozostałe składowe niepewności pomiaru kinematycznym prętem teleskopowym szacowano w oparciu o uzyskane wyniki metodą A zaś składowe pozastatystyczne szacowano metodą B.

Tab. 6.1. Błędy i niedokładności kinematycznego pręta teleskopowego wykorzystywanego podczas badań, określone na podstawie świadectwa kalibracji (przy temperaturze powietrza 19,3°C, ciśnieniu 1029mbar, wilgotności względnej 42,3%RH)

Błąd pozycjonowania	±0,5 μm
Błąd maksymalny	±0,19 μm
Niepewność ($k = 2$)	0,24 μm
Niepewność wzorca, dla zeroduru podczas kalibracji długości: 50, 100, 150, 300 ($k = 2$)	0,00085 μm

Niepewność rozszerzona pomiaru U systemem QC20 Ballbar wyznaczona jest z równania (5.1). Złożoną niepewność standardową u_c wyznaczono w oparciu o równanie (5.2), obejmujące składową wynikającą z rozrzutu wyniku pomiaru szacowaną metodą A (5.3) oraz składowe niepewności pomiaru wyznaczone metodą B, wynikające ze źródeł pozastatystycznych (6.1). Składowe pozastatystyczne wyznaczono jako sumę niepewności wycelowania u_{BP} , niepewności kalibracji u_{BK} i u_{BE} . Równanie (6.1) opisuje sumę kwadratów niepewności szacowanych metodą B.

$$\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 = u_{BP}^2 + u_{BK}^2 + u_{BE}^2 \quad (6.1)$$

Uwzględniając powyższe, złożona niepewność standardowa pomiaru kinematycznym prętem teleskopowym została wyznaczona na podstawie zależności (6.2):

$$u_c = \pm \sqrt{u_A^2 + u_{BP}^2 + u_{BK}^2 + u_{BE}^2} \quad (6.2)$$

Poszczególne składowe wyznaczono z uwzględnieniem danych zawartych na świadectwie kalibracji systemu. Zatem przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa składową u_{BP} wyznaczono jako (6.3), zaś składową u_{BK} wyznaczono z równania (6.4), przy założeniu rozkładu normalnego. Składową u_{BE} wyznaczono z równania (6.5) przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa.

$$u_{BP} = \pm \frac{0,5}{\sqrt{3}} [\mu m] \quad (6.3)$$

$$u_{BK} = \pm \frac{0,24}{2} [\mu m] \quad (6.4)$$

$$u_{BE} = \pm \frac{0,19}{\sqrt{3}} [\mu m] \quad (6.5)$$

W analizowanym przypadku, pominięto niepewność wynikającą z pomiaru temperatury i wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej. Założenie o nieistotności pominiętych niepewności przyjęto z uwagi na bezpośrednią kalibrację kinematycznego pręta teleskopowego QC20 Ballbar przed samym pomiarem i bardzo krótki czas realizacji pomiaru, zajmujący kilka minut. Autorzy pracy realizując pomiar w warunkach stabilnych termicznie, gdzie temperatura otoczenia nie zmieniała się więcej niż $0,2^{\circ}\text{C}$ założyli, że podczas pomiaru nie powstaną istotne zmiany długości ramienia pomiarowego podczas realizowanego testu. Zatem uwzględniając powyższe, te składowe niepewności uznano za nieistotne. Pominięto również niepewności wynikające z niedokładności wzorca wykonanego z zeroduru. Podstawą nieuwzględnienia niepewności rozszerzania się wzorca jest jego ekstremalnie niski (bliski zeru) współczynnik rozszerzalności cieplnej. Współczynnik ten jest praktycznie niezależny od temperatury, szczególnie w przedziale której realizowano badania (Zerodur w przedziale 0 to 50°C posiada średnią rozszerzalność cieplną na poziomie $0 \pm 0,007 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [90]).

W oparciu o przyjęte w pracy założenia opracowano formuły obliczeniowe i wyznaczono wartości poszczególnych składowych niepewności. Niepewność i jej składowe przy współczynniku rozszerzenia $k=2$ dla pomiaru odchyłki okrągłości kinematycznym prętem teleskopowym dla długości ramienia pomiarowego badań $r = 100 \text{ mm}$, $r = 150 \text{ mm}$ i $r = 300 \text{ mm}$ oraz prędkości ruchu efektor ramienia równej v_f (50, 75 i 100 mm/min) zawarto w tab. 6.2.

Tab. 6.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru odchyłki okrągłości ramienia badanego robota kinematycznym prętem teleskopowym

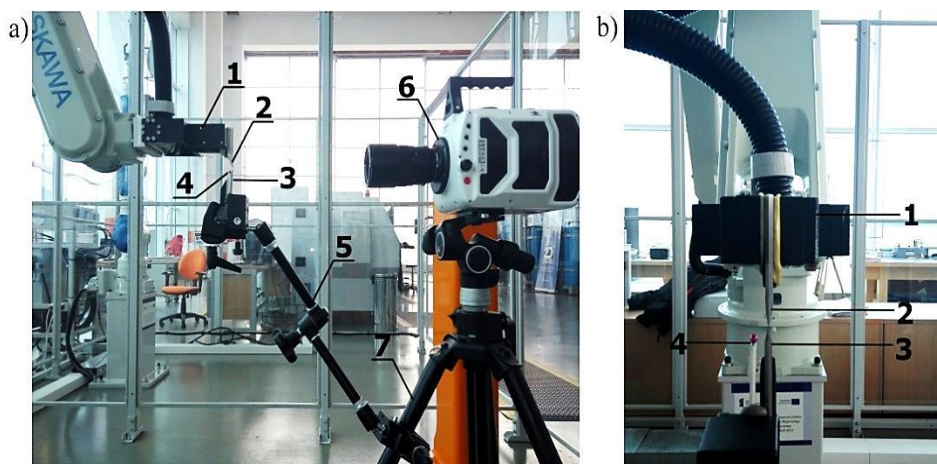
Niepewność	R = 100 mm			R = 150 mm			R = 300 mm		
	$v_f = 50$ mm/min	$v_f = 75$ mm/min	$v_f = 100$ mm/min	$v_f = 50$ mm/min	$v_f = 75$ mm/min	$v_f = 100$ mm/min	$v_f = 50$ mm/min	$v_f = 75$ mm/min	$v_f = 100$ mm/min
	przedział wartości niepewności [μm]								
u_A	$\pm 4,116$	$\pm 3,648$	$\pm 1,304$	$\pm 1,689$	$\pm 1,348$	$\pm 0,748$	$\pm 1,205$	$\pm 2,317$	$\pm 3,846$
u_{BP}	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$	$\pm 0,289$
u_{BK}	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$	$\pm 0,120$
u_{BF}	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$	$\pm 0,110$
u_c	$\pm 4,130$	$\pm 3,663$	$\pm 1,345$	$\pm 1,721$	$\pm 1,388$	$\pm 0,818$	$\pm 1,250$	$\pm 2,340$	$\pm 3,860$
$U (k=2)$	$\pm 8,260$	$\pm 7,326$	$\pm 2,690$	$\pm 3,442$	$\pm 2,776$	$\pm 1,636$	$\pm 2,500$	$\pm 4,680$	$\pm 7,720$

Uzyskane wyniki obliczeń niepewności rozszerzonej pomiaru (max. $\pm 8,26 \mu\text{m}$, przy $k = 2$ w analizowanym przypadku) pozwalają stwierdzić, że wykorzystanie kinematycznego pręta teleskopowego należy do jednego z najlepszych wyborów przy ocenie zdolności realizacji ścieżki o zarysie kołowym przez robota przemysłowy.

7. Badania powtarzalności pozycjonowania robota z zastosowaniem szybkiej kamery wizyjnej

7.1. Przebieg pomiaru

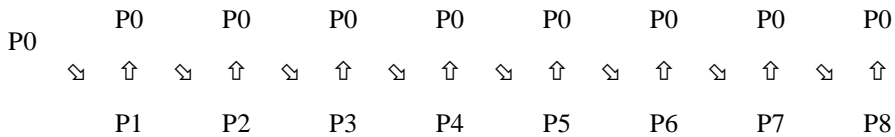
Badania powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego przeprowadzono z zastosowaniem szybko-klatkowej kamery wizyjnej Phantom v2511. Metoda bazuje na analizie rejestrowanego przez kamerę obrazu. Wykorzystanie oprogramowania komputerowego usprawnia proces rejestracji danych, np. poprzez możliwość śledzenia ustalonych punktów oraz automatyczne przeliczanie pikseli na wartość w określonej jednostce długości. Prace właściwe poprzedzono ustaleniem metodyki badań. Pomiary polegały na rejestracji odległości między dwoma punktami w wyznaczonej płaszczyźnie XZ. Jeden z punktów ustalono w końcówce krawędziowego liniału odniesienia zamocowanego na statywie (wierzchołek stały). Drugi punkt określono w końcówce ruchomego liniału krawędziowego zamocowanego w chwytaku robota (wierzchołek ruchomy). Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rys. 7.1



Rys. 7.1. Stanowisko pomiarowe: a) widok z boku, b) widok w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny pomiarowej; 1 – chwytak, 2 – liniał krawędziowy ruchomy, 3 – liniał krawędziowy stały, 4 – trzpień sondy pomiarowej, 5 – statyw ustalający pozycję liniału odniesienia, 6 – szybka kamera wizyjna Phantom V2511 z obiektywem makro

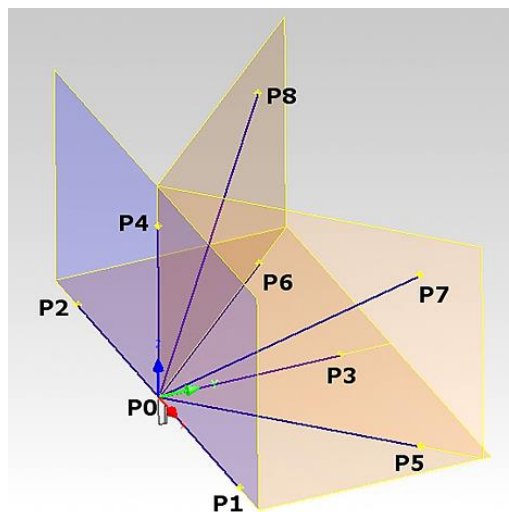
Chwytak robota wraz z liniałem ruchomym przemieszczał się zgodnie z ustalonym cyklem ruchów (rys. 7.2). Cykl polegał na odjeździe chwytaka robota do zadanych pozycji w przestrzeni roboczej, a następnie powrót to zadanej pozycji nominalnej P_0 o współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota $(0, -750, 200 \text{ mm})$. W pozycji P_0 realizowano postój czasowy równy 1,5 s, podczas którego wykonywany był pomiar odległości pomiędzy wierzchołkami liniałów. Powrót do pozycji nominalnej P_0 następował za każdym razem,

po osiągnięciu danej pozycji wyjazdu. Określono 8 pozycji najazdowych, których osiągnięcie odbywało się przy przemieszczeniu liniowym z innego kierunku (rys. 7.3). Kolejność osiąganych pozycji w cyklu przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Pojedynczy cykl ruchów

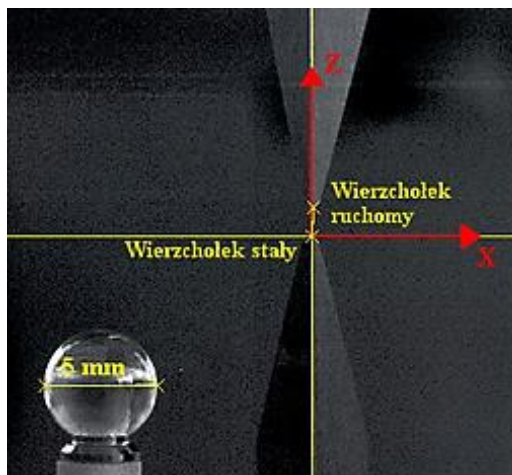
Z uwagi na ograniczoną długość zapisu ustalono liczbę cykli równą 8. Liczba 8 cykli jest optymalną zarówno z punktu widzenia czasu realizacji badań jak i liczby wymaganych danych do obliczeń i analiz. Badanie przeprowadzono dla prędkości liniowej ruchu chwytaka wynoszącej 750 mm/s. Zaznaczony na rys. 7.3 układ jest uwarunkowany dostępnością przestrzeni najazdowej do zadanego punktu nominalnego przy jednoczesnej możliwości łatwej obserwacji i rejestracji szybką kamerą wizyjną.



Rys. 7.3. Ścieżki przemieszczeń liniału w wybranych płaszczyznach z oznaczonymi pozycjami, P0 – pozycja nominalna, P1–P8 – pozycje wyjazdu chwytaka (efektora) robota w określonych kierunkach

Obraz rejestrowano z prędkością 100 kl/s w rozdzielczości 1024×768 pikseli. Zastosowano obiektyw Makro-Plannar 2/100 ZF.2 firmy Zeiss. Pomiar odległości (w kierunku X oraz Z) między wierzchołkami liniałów wykonywany był w płaszczyźnie pionowej XZ przechodzącej przez początek układu współrzędnych, zaznaczonej na rys. 7.3 niebieskim kolorem. Początek pomiarowego układu współrzędnych określono w końcówce wierzchołka stałego. Oprogramowa-

nie TEMA Motion automatycznie przelicza odległość w pikselach na wartość w milimetrach. Wymagane jest jedynie określenie współczynnika skali zaznaczając znaną długość i podając jej rzeczywistą wartość. W tym celu posłużono się kulką trzpienia pomiarowego o średnicy 5 mm (rys. 7.4). W celu zabezpieczenia przed kolizją odległość początkowa między wierzchołkiem stałym a ruchomym wynosiła odpowiednio: 58 μm w kierunku X oraz 1250 μm w kierunku Z (rys. 7.4). Do automatyzacji pomiaru wykorzystano funkcję oprogramowania umożliwiającą śledzenie wierzchołka ruchomego. Z uwagi na wyjazd wierzchołka ruchomego poza kadr i związane z tym gubienie jego pozycji, zastosowano uśpienie śledzenia w zadanym interwale czasowym.



Rys. 7.4. Widok w płaszczyźnie pomiarowej XZ

Oprogramowanie automatycznie rejestrowało odległość między wierzchołkami (w kierunku X i Z) w chwili przestoju po dojeździe do zadanej pozycji (P0).

Metody optyczne i wizyjne, to obecnie jedne z rozwijających się systemów w odniesieniu do prac badawczych maszyn i urządzeń, szczególnie tych, od których nie wymaga się mikrometrycznej ani nanometrycznej dokładności. Dotyczą one np. maszyn do obróbki drewna, ploterów frezujących, maszyn do przecinania wiązką lasera, plazmą czy strugą hydro-abrazyjną a także robotów przemysłowych. Największą zaletą metod optycznych pomiaru niedokładności jest ich bezkontaktowość i szybkość pomiaru. Nie oznacza to jednak szybkości identyfikacji błędów, ponieważ jest ona kalkulowana w oparciu o zarejestrowane obrazy za pomocą stosownych algorytmów. Najbardziej długotrwałym procesem w identyfikacji błędów metodami optycznymi jest dostosowanie odpowiednich algorytmów obliczeniowych wyznaczenia stosownych odchyłek i błędów. Jednak z użytkowego punktu widzenia, to czas samego pomiaru jest najistotniejszy w warunkach przemysłowych, gdzie każda sekunda „zajętości” – wyłączenia z użytkowania maszyny jest niezwykle cenna.

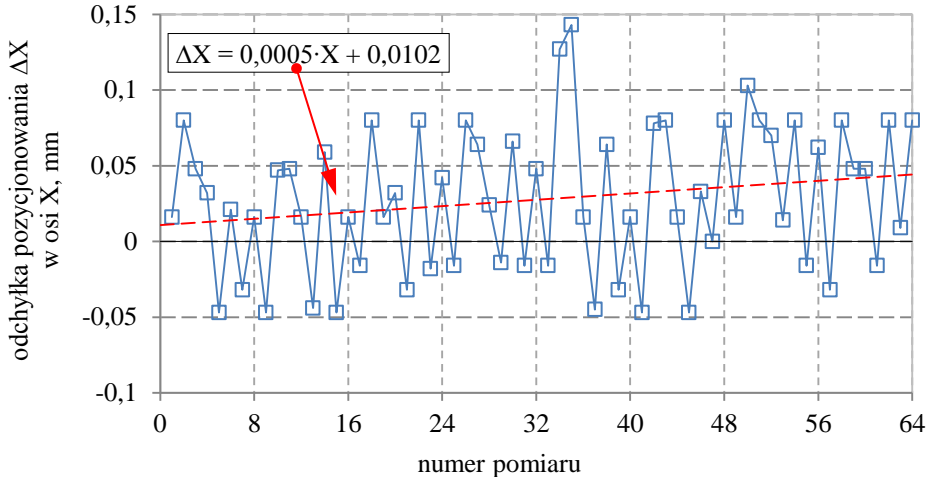
7.2. Wyniki pomiarów

Analizie poddano odchyłkę pozycji będącą różnicą nominalnej odległości między wierzchołkiem stałym i ruchomym (X_{zad} , Z_{zad}) i odległości osiągniętej (X_i , Z_i). (7.1), (7.2)

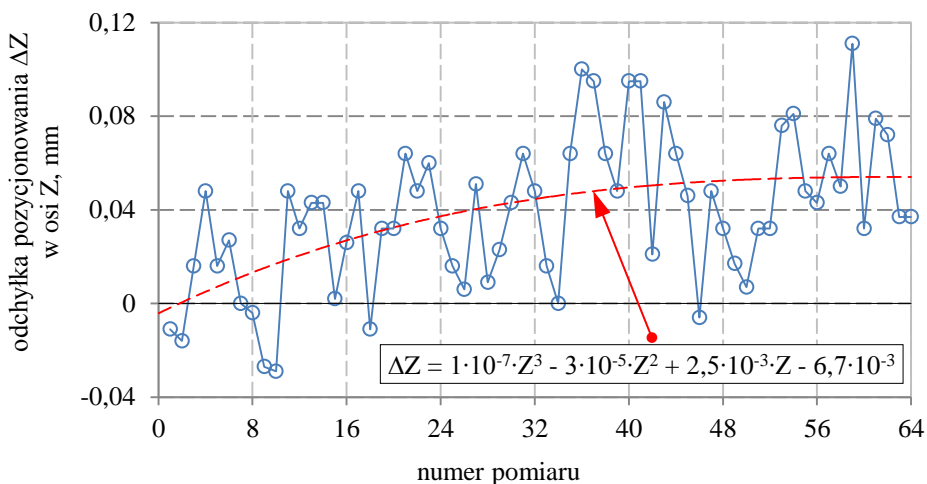
$$\Delta X = X_i - X_{zad} \quad (7.1)$$

$$\Delta Z = Z_i - Z_{zad} \quad (7.2)$$

Zarejestrowane wartości odchyłek pozycjonowania mieszczą się w przedziale od $-47 \mu\text{m}$ do $143 \mu\text{m}$ w kierunku osi X oraz w przedziale od $+29 \mu\text{m}$ do $+111 \mu\text{m}$ w kierunku osi Z. W przypadku pomiaru wzdłuż osi Z (rys. 7.6) zarejestrowano głównie odchyłki o wartościach dodatnich. Ponadto, wraz z kolejnymi pomiarami zauważalna jest tendencja wzrostowa wartości odchyłek mierzonych w tym kierunku.



Rys. 7.5. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX w kierunku osi X, w kolejnych pomiarach przy osiągnięciu pozycji nominalnej



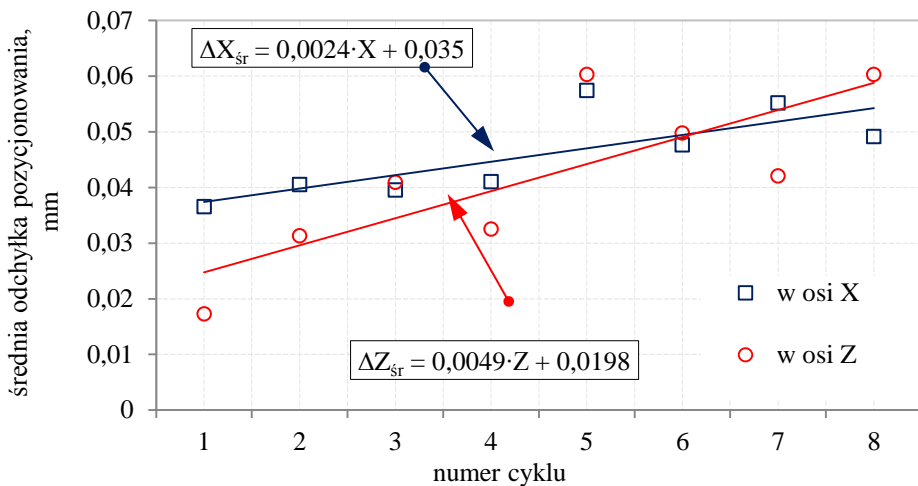
Rys. 7.6. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ w kierunku osi Z, w kolejnych pomiarach przy osiągnięciu pozycji nominalnej

Wartości dyskretne uzyskane z kolejnych pomiarów aproksymowano odpowiednio równaniami (7.3) w kierunku osi X oraz (7.4) w kierunku osi Z:

$$\Delta X = 0,0005 \cdot X + 0,0102 \quad (7.3)$$

$$\Delta Z = 1 \cdot 10^{-7} \cdot Z^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot Z^2 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot Z - 6,7 \cdot 10^{-3} \quad (7.4)$$

Na rys. 7.7 przedstawiono średnie wartości odchyłki pozycjonowania mierzonej wzdłuż osi X i Z, w kolejnych cyklach pomiarowych. Wartości te mieszczą się w przedziale od 37 μm do 57 μm w kierunku X zaś w kierunku osi Z w przedziale od 17 μm do 6 μm . W przypadku odchyłki w osi Z zauważalna jest większa zmienność wartości średniej w poszczególnych cyklach przemieszczeń. W obu przypadkach widoczna jest tendencja wzrostowa wartości średniej odchyłki wraz z kolejnymi cyklami. Wzrost ten jest jednak bardziej intensywny w przypadku odchyłki pozycjonowania mierzonej w kierunku osi Z. W obu przypadkach najniższe średnie wartości odchyłki zarejestrowano w pierwszym cyklu natomiast najwyższe w cyklu piątym.



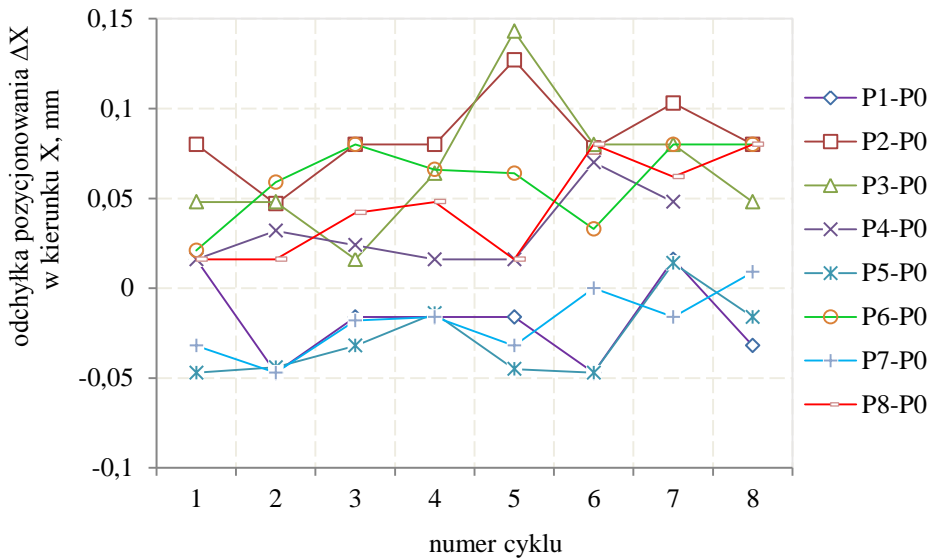
Rys. 7.7. Średnia wartość odchyłki pozycjonowania $\Delta X_{\text{śr}}$, $\Delta Z_{\text{śr}}$ mierzona w kierunkach X oraz Z, w kolejnych cyklach pomiarowych

Charakter zmian średniej odchyłki pozycjonowania $\Delta X_{\text{śr}}$, $\Delta Z_{\text{śr}}$ opisany funkcjami liniowymi przedstawiają odpowiednio równania matematyczne (7.5) oraz (7.6)

$$\Delta X_{\text{śr}} = 0,0024 \cdot X + 0,035 \quad (7.5)$$

$$\Delta Z_{\text{śr}} = 0,0049 \cdot Z + 0,0198 \quad (7.6)$$

Analizując uzyskane wyniki zaobserwowano wpływ kierunku dojazdu do pozycji nominalnej na wartość oraz kierunek odchyłki. Dla przykładu odchyłka mierzona wzdłuż osi X (rys. 7.8), przy dojeździe do pozycji nominalnej z punktów położonych po prawej stronie (P1, P5, P7) przyjmowała głównie wartości ujemne. Dla pozostałych kierunków dojazdu zarejestrowano jedynie wartości dodatnie.



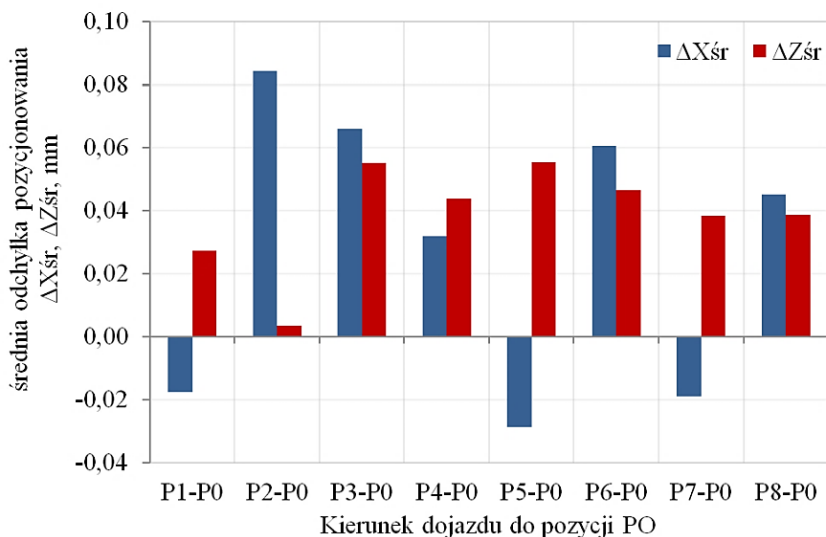
Rys. 7.8. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX mierzona w kierunku X, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu, w kolejnych cyklach pomiarowych

Analogiczny wykres zbudowano dla odchyłki mierzonej w kierunku Z (rys. 7.9). Wartości odchyłek przyjmują głównie wartości dodatnie, tylko w nielicznych przypadkach zarejestrowano odchyłki o wartościach ujemnych.



Rys. 7.9. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ mierzona w kierunku Z, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu, w kolejnych cyklach pomiarowych

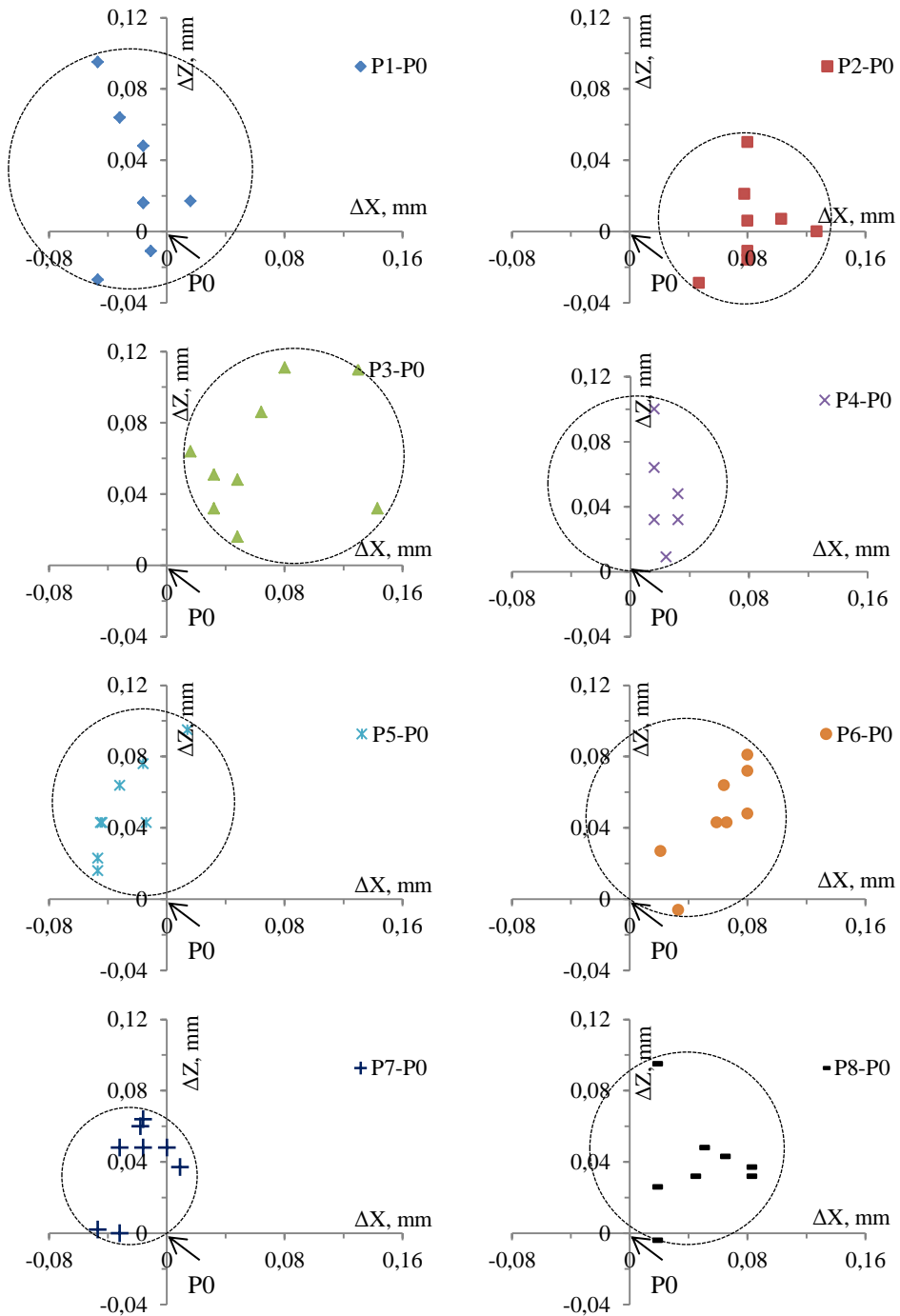
Średnie wartości odchyłek pozycjonowania mierzonych w poszczególnych osiach układu współrzędnych, przy osiągnięciu pozycji nominalnej z określonych kierunków, przedstawiono na rys. 7.10, zaś odpowiadające im niepewności pomiaru dla wybranych kierunków najazdu w tab. 7.2. Największa średnia odchyłka pozycjonowania ($\approx 84 \mu\text{m}$) wystąpiła w osi X, przy osiągnięciu pozycji nominalnej z punktu P2. W tym kierunku dojazdu wystąpiła również najniższa średnia odchyłka mierzona wzdłuż osi Z



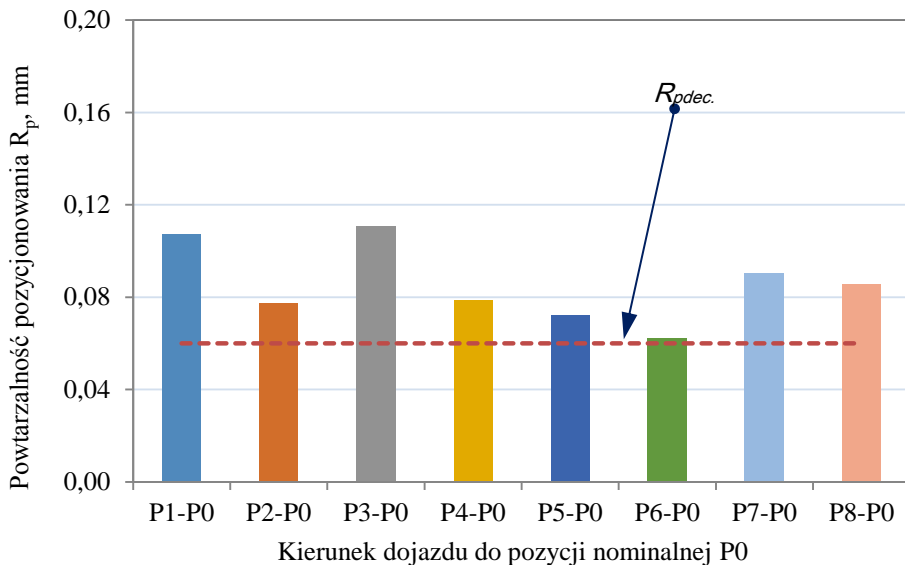
Rys. 7.10. Średnia wartość odchyłki pozycjonowania

Analizując mapę odchyłek pozycjonowania (rys. 7.11) można zauważyć charakterystyczne dla danego kierunku (z którego następuje dojazd do pozycji nominalnej) obszary, w których mieszczą się wartości odchyłek. Im większy jest rozrzut tych wartości tym gorsza jest powtarzalność pozycjonowania.

Powtarzalność pozycjonowania dla każdego kierunku dojazdu wyznaczono również z wykorzystaniem zależności 3.14–3.17. Z uwagi na pomiar w określonej płaszczyźnie, a nie przestrzeni trójwymiarowej, do obliczeń przyjęto jedynie współrzędne składowe X oraz Z. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 7.12)



Rys. 7.11. Mapa odchyłek pozycjonowania ΔX (mm), ΔZ (mm) od nominalnej (P0) osiąganą z różnych kierunków



Rys. 7.12. Wartość powtarzalności pozycjonowania R_p w płaszczyźnie pomiarowej XZ, w zależności od kierunku dojazdu do pozycji nominalnej

Obliczone wartości również wykazują wpływ kierunku dojazdu na wartość parametru powtarzalności pozycjonowania. Można wyróżnić kierunki z których robot podczas dojazdu do pozycji nominalnej osiąga najgorszą powtarzalność (np. P3-P0, P1-P0) oraz kierunki, w których powtarzalność jest najlepsza. Różnica między najwyższą a najniższą wartością parametru R_p , w wybranych kierunkach wynosi około 40 μm . Na wykresie (rys. 7.12) czerwoną linią oznaczono deklarowaną w dokumentacji robota powtarzalność pozycjonowania. Jak można zauważyć dla każdego kierunku dojazdu do pozycji nominalnej osiągnięto gorszą (wyższą wartość) powtarzalność niż deklarowana przez producenta. Należy jednak zaznaczyć, że powtarzalność ta została wyznaczona w innych warunkach niż podczas przedmiotowego w pracy pomiaru i jest obciążona inną wartością niepewności. Różnice te wynikają również z zastosowania innego systemu pomiarowego. Przyjmując jednak założenie, że wartość niepewności mogą różnić się nieznacznie i wynikać głównie z rozrzutu wielkości mierzonej i zastosowanego urządzenia pomiarowego, wartość powtarzalności pozycjonowania została przekroczona dla niemalże wszystkich kierunków najazdu od P1 do P8. Duże wartości niepewności pomiaru szybko-klatkową kamerą wizyjną wyznaczone w rozdz. 7.3 powodują, że do pomiarów wizyjnych należy podchodzić z dużą rezerwą. Niepewności te wynikają głównie z niepewności kalibracji systemu oraz dużego rozmiaru pojedynczego piksela. Wymaga to opracowania specjalnych procedur kalibracyjnych zmniejszających istotnie niepewność kalibracji w stosunku do wartości mierzonych odchyłek.

7.3. Szacowanie niepewności pomiaru szybkołatkową kamerą wizyjną

Analogicznie postępując jak dla poprzednich systemów, również dla pomiarów szybką kamerą wizyjną wyznaczono poszczególne niepewność pomiaru. Podstawowe dane kamery zaprezentowano w tab. 7.1.

Tab. 7.1. Dane pomiarowe szybkiej kamery wizyjnej określone na podstawie świadectwa kalibracji

Wielkość	Wartość
Rozdzielczość przetwornika: (przy szybkości rejestracji: 25 000 klatek/sek.) (przy szybkości rejestracji: 1 000 000 klatek/sek.)	1280×800 pikseli 128×32 pikseli
Minimalna szybkość rejestracji	100 klatek/sek.
Rozmiar pixela	28 μm,
Czułość świetlna	32000 mono, 6400 color

Niepewność rozszerzoną pomiaru szybką kamerą wizyjną wyznaczono z równania (5.1). Całkowitą niepewność standardową złożoną wyznaczono w oparciu o równanie (5.2) obejmujące składową wynikającą z rozrzutu wyniku pomiaru szacowaną metodą A (statystyczną) oraz składowe niepewności pomiaru wyznaczonych metodą B, wynikających ze źródeł poza statystycznych. Składową niepewność standardową u_A szacowaną metodą A, uwzględniającą rozrzut wartości mierzonej. Do wyznaczenia niepewności standardowej u_A wykorzystano równanie (5.3). Składowe poza statystyczne wyznaczono jako sumę niepewności wynikającej z rozdzielczości systemu u_{BR} i niepewności kalibracji u_{BK} na podstawie równania (7.1):

$$\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 = u_{BR}^2 + u_{BK}^2 \quad (7.1)$$

Uwzględniając powyższe, złożona niepewność standardowa pomiaru systemem wizyjnym została wyznaczona na podstawie zależności (7.2):

$$u_c = \pm \sqrt{u_A^2 + u_{BR}^2 + u_{BK}^2} \quad (7.2)$$

Poszczególne składowe wyznaczono z uwzględnieniem danych zawartych na świadectwie kalibracji systemu. Zatem, składową wynikającą z rozdzielczości u_{BR} wyznaczono z równania (7.3) przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa.

$$u_{BR} = \pm \frac{R_p}{\sqrt{3}} \quad (7.3)$$

gdzie:

$$R_p = \frac{l_{pxl}}{k_p} \quad (7.4)$$

Przyjmując z dokumentacji urządzenia rozmiar 1 piksela $l_{pxl} = 28 \mu m$ oraz współczynnika powiększenia $k_p = 2$, otrzymano $R_p = 28/2 = 14 \mu m$. Stąd, przyjmując prostokątny rozkład prawdopodobieństwa, wartość niepewności u_{BR} wyznaczono jako (7.5):

$$u_{BR} = \pm \frac{14}{\sqrt{3}} [\mu m] \quad (7.5)$$

Składową wynikającą z kalibracji u_{BK} , przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa wyznaczono z równania (7.6):

$$u_{BK} = \pm \frac{E_K}{\sqrt{3}} [\mu m] \quad (7.6)$$

Na podstawie danych technicznych uwzględniono rozróżnialność krawędzi równą 4 piksele, przyjmując zgodnie z dokumentacją rozmiar jednego piksela na poziomie $28 \mu m$ i współczynnik powiększenia $k_p = 2$, otrzymano błąd kalibracji E_K równy $56 \mu m$ (7.7).

$$E_K = l_{pxl} k_p \quad (7.7)$$

W oparciu o przyjęte w pracy założenia opracowano formuły obliczeniowe i wyznaczono wartości poszczególnych składowych niepewności. Całkowity budżet niepewności przy $k = 2$ dla pomiaru odchyłki pozycjonowania szybką kamerą wizyjną, przy najjazdach z wybranych kierunków, zawarto w tab. 7.2.

Tab. 7.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru odchyłek pozycjonowania badanego robota z wykorzystaniem szybkiej kamery wizyjnej dla wybranych kierunków najjazdu

Niepewność	Kierunek X		Kierunek Z	
	Ścieżka P2-P0	Ścieżka P3-P0	Ścieżka P5-P0	Ścieżka P6-P0
	Przedział wartości niepewności [μm]			
u_A	± 11	± 17	± 12	± 14
u_{BR}	± 8	± 8	± 8	± 8
u_{BK}	± 32	± 32	± 32	± 32
u_c	± 35	± 37	± 36	± 36
$U (k=2)$	± 70	± 74	± 72	± 72

Mimo wielu zalet systemów wizyjnych omówionych w pierwszej części rozdziału, autorzy dostrzegają również wiele wad, wśród których jest dwuwymiarowość obrazu na podstawie którego dokonuje się oceny niedokładności robota. Próba przestrzennej oceny niedokładności wymaga rzutowania na płaszczyznę 2D mierzonych wielkości, co wprowadza istotne błędy. Wadą jest także duża niepewność pomiaru wynikająca głównie z niepewności kalibracji systemu oraz

dużego rozmiaru pojedynczego piksela. Wykorzystanie systemów wizyjnych do wyznaczania parametrów niedokładności robota wymaga zatem opracowania metody kalibracji systemu dającej niepewność pomiaru znacząco mniejszą od wartości spodziewanych odchyłek pozycjonowania. Autorzy pracy wykorzystując metody optyczne mieli na względzie wskazanie możliwości tych systemów, zdając sobie sprawę z tego, że każdy z nich jest inny i posiada swoje specyficzne cechy warunkujące dokładność pomiaru. Autorzy w systemach optycznych upatrują jednak wielu zalet i szacują, że w niedalekiej przyszłości mogą one wyprzeć niektóre kontaktowe metody pomiarowe, zarówno w odniesieniu do robotów przemysłowych jak i obrabiarek. Powodem takiego poglądu jest możliwość realizacji pomiaru bezkontaktowego z bardzo dużymi prędkościami, sięgającymi nawet milion klatek na sekundę (np. w przypadku kamer wizyjnych). Pozwala to na śledzenie pozycji i pomiar błędów dynamicznych robotów w ruchu i pod obciążeniem. Badania realizowane systemami optycznymi (przy dużych prędkościach rejestracji) umożliwiają ocenę wpływu masy i jej bezwładności na zachowanie się maszyny lub robota (elementów wykonawczych: chwytaków, poszczególnych ramion, stołów, itp.) i ich błędy.

8. Badania powtarzalności pozycjonowania robota z zastosowaniem systemu pomiarowego PONTOS

8.1. Przebieg pomiaru

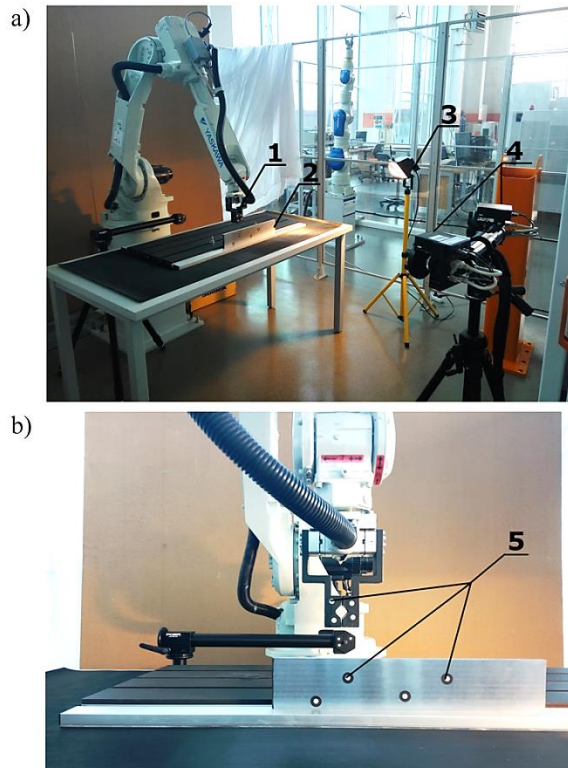
Badania przeprowadzono z zastosowaniem bezkontaktowego, optycznego systemu do pomiarów przestrzennych PONTOS firmy GOM. System pozwala obliczać i analizować współrzędne 3D, określać deformację, przemieszczenia, prędkości bądź przyspieszenia mierzonego obiektu. Pomiar powtarzalności pozycjonowania robota polega na rejestracji położenia w przestrzeni punktu umieszczonego na chwytaku robota podczas dojazdu do pozycji nominalnej. Pozycja osiągnięta przy pierwszym dojeździe do pozycji zaprogramowanej stanowiła punkt odniesienia, względem którego mierzono odchyłki pozycjonowania. System PONTOS bazuje na pomiarze przemieszczeń w przestrzeni specjalnych punktów pomiarowych tzw. markerów. Trzy markery naklejono na chwytaku robota. Istotnym zadaniem było zdefiniowanie w systemie układu współrzędnych. Określenie układu współrzędnych w systemie PONTOS przeprowadza się metodą 3-2-1, wybierając 3 punkty w przestrzeni wyznaczające płaszczyznę, następnie 2 punkty określające kierunek jednej z osi układu współrzędnych oraz 1 punkt określający początek tego układu. W tym celu wykorzystano nieruchomy obiekt referencyjny w postaci stalowej płyty umieszczonej na stole możliwie równoległe do jednego z kierunków układu współrzędnych robota (rys. 8.2 b). Na szlifowanej powierzchni liniału naklejono markery, za pomocą których zdefiniowano układ współrzędnych w systemie PONTOS.



Rys. 8.1. Kalibracja urządzenia PONTOS

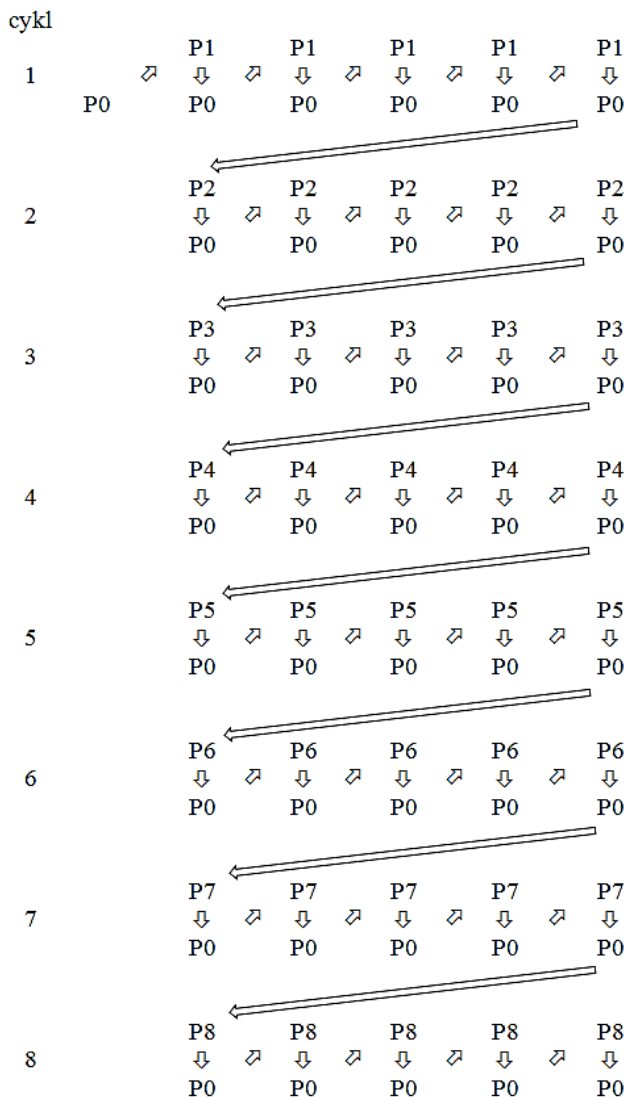
Przed przystąpieniem do pomiarów właściwych przeprowadzono procedurę kalibracji kamer urządzenia za pomocą specjalnego krzyża kalibracyjnego przedstawionego na rys. 8.1. Dokładność kalibracji wynosiła 9 μm .

Kolejnym krokiem był wybór obiektywu (w tym przypadku 35 mm) oraz ustawienie kamer w odpowiedniej odległości od robota umożliwiające śledzenie markerów w całym zakresie wyznaczonych ruchów. W celu właściwego oświetlenia podczas pomiaru, zastosowano reflektor doświetlający. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Stanowisko pomiarowe: a) stanowisko pomiarowe, b) markery na chwytaku robota oraz obiekcie referencyjnym; 1) chwytak robota, 2) obiekt referencyjny, 3) reflektor doświetlający, 4) kamery systemu PONTOS, 5) markery

Wybrane kierunki ruchu chwytaka z naklejonymi markerami oraz położenie punktu początkowego P_0 były takie same (rys. 7.3), jak w przypadku metody z zastosowaniem szybkiej kamery wizyjnej. Zmodyfikowano jednak cykl przemieszczeń. W tym przypadku każdy z cykli składał się z pięciu powtórzeń polegających na wyjeździe do określonej pozycji P_n (w jednym kierunku) i powrocie do pozycji początkowej P_0 , w której następował postój 1,5 sekundy. Analogiczne cykle wykonywano kolejno w każdym z kierunków, co przedstawiono w postaci schematu na rys. 8.3

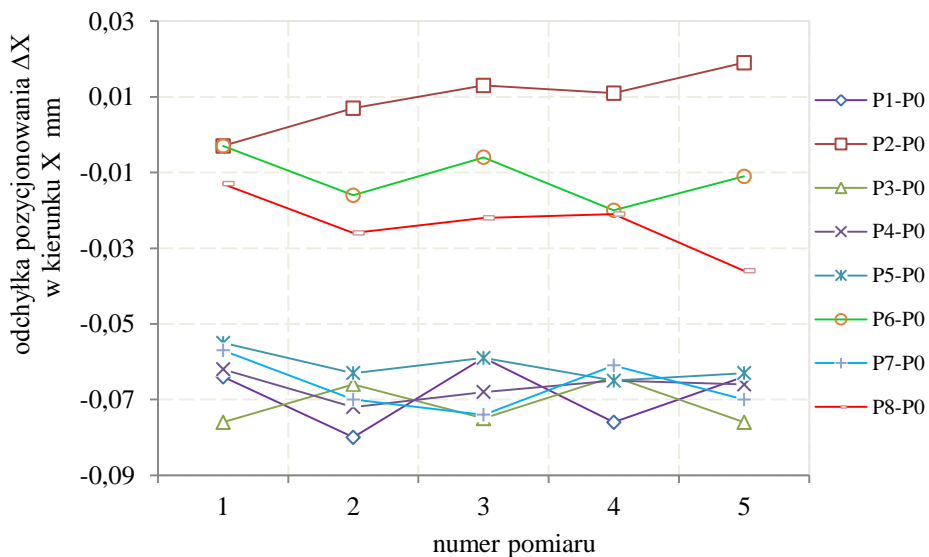


Rys. 8.3. Cykle ruchów podczas pomiaru

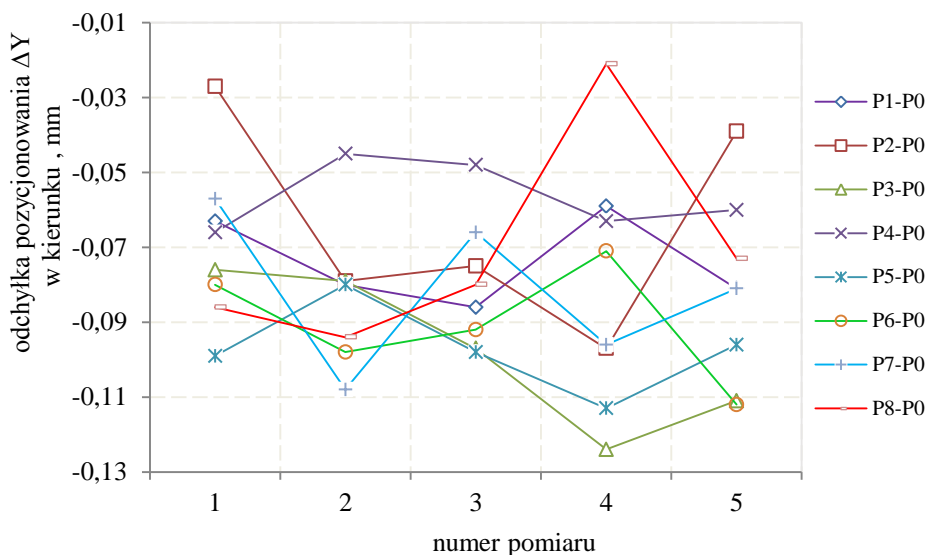
8.2. Wyniki pomiarów

Podstawą do analizy odchyłek i powtarzalności pozycjonowania było położenie w przestrzeni jednego z markerów naklejonych na chwytaku, po każdorazowym dojeździe do pozycji początkowej P0 o współrzędnych (0, -750, 200 mm). Dla każdego z momentów postoju przyjęto uśrednioną wartość odchyłki wyznaczoną z 50 zarejestrowanych klatek. Oprogramowanie systemu pomiarowego umożliwia automatyczne wygenerowanie wartości odchyłek

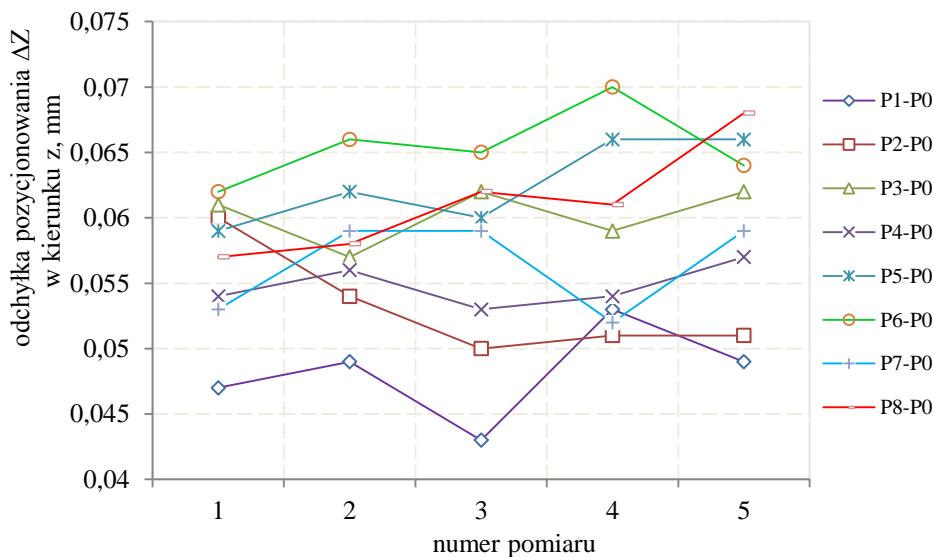
pozycjonowania ΔX , ΔY , ΔZ względem pozycji początkowej w poszczególnych kierunkach przestrzeni. Wartości te zaprezentowano w formie graficznej na rys. 8.4–rys. 8.6. W przypadku odchyłek mierzonych w osi X można wyróżnić trzy kierunki dojazdu do pozycji nominalnej (P2–P0, P3–P0, P8–P0), dla których wartości odchyłek są wyraźnie niższe niż dla pozostałych. Najwyższe wartości odchyłki pozycjonowania zmierzono w kierunku osi Y ustalonego układu współrzędnych. Najmniejszy rozrzut wartości (od $43\ \mu\text{m}$ do $70\ \mu\text{m}$) zarejestrowano dla odchyłek mierzonych w kierunku osi Z.



Rys. 8.4. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX mierzona w kierunku X, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu



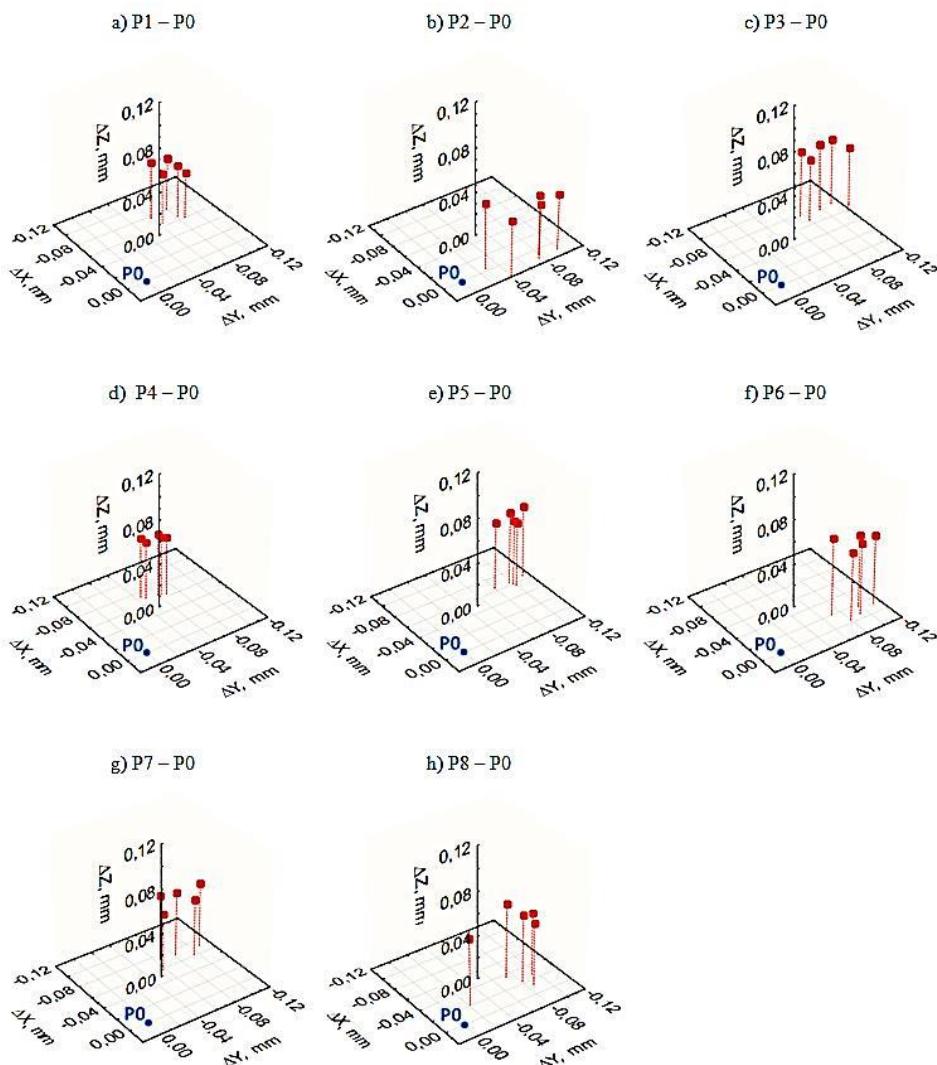
Rys. 8.5. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔY mierzona w kierunku Y, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu



Rys. 8.6. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ mierzona w kierunku Z, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu

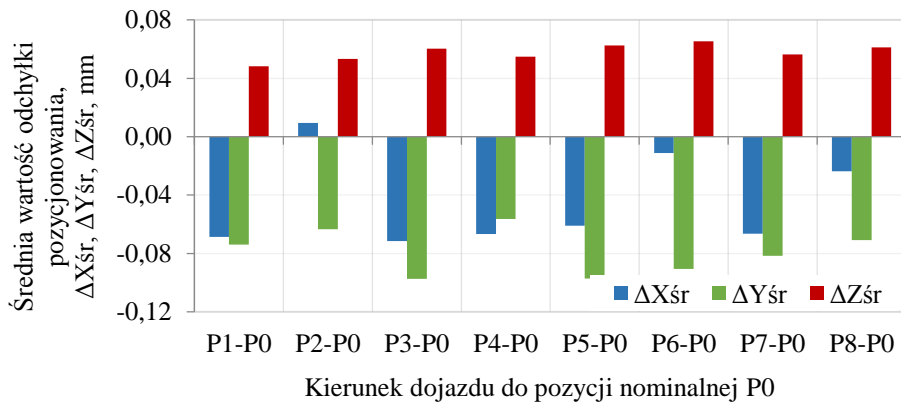
Zobrazowanie odchyłek pozycjonowania w przestrzeni trójwymiarowej (X, Y, Z) dla każdego kierunku dojazdu do pozycji początkowej P0 przedstawiono na rys. 8.7. Kolorem niebieskim oznaczono pozycję P0, natomiast punktami w kolorze czerwonym oznaczono uśrednione (z 50 klatek) wartości odchy-

łek zarejestrowanych podczas każdego z postojów w pozycji P0. Analizując wykresy zaobserwowano dla danego kierunku (z którego następuje dojazd do pozycji nominalnej) obszary, w których mieszczą się wartości odchyłek. Najmniejszy rozrzut wartości zaobserwowano w podczas przemieszczenia w kierunku P4–P0. Świadczy to zatem o najlepszej powtarzalności pozycjonowania spośród wszystkich ustalonych kierunków dojazdu do pozycji początkowej. Analogicznie można określić kierunki o największym rozrzucie tj. P2–P0 oraz P8–P0.



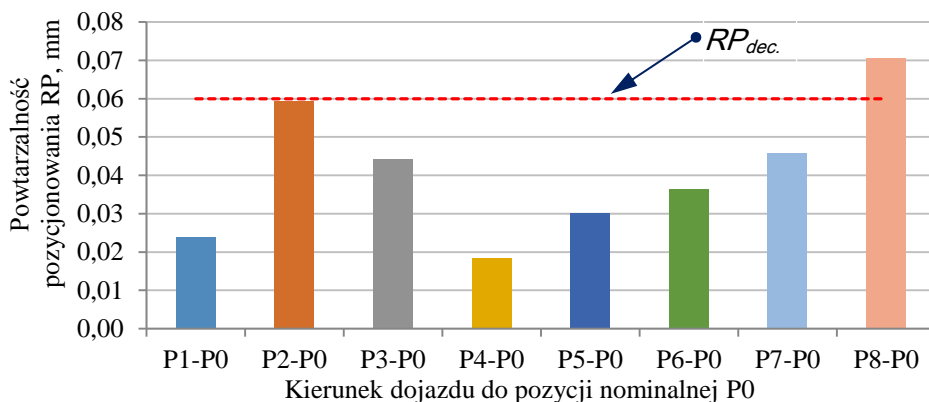
Rys. 8.7. Odchyłki pozycjonowania w przestrzeni trójwymiarowej XYZ dla poszczególnych kierunków dojazdu do pozycji początkowej P0

Średnie wartości odchyłek pozycjonowania zaprezentowano graficznie na rys. 8.8 i mieszczą się one odpowiednio w przedziałach od $-71\ \mu\text{m}$ do $9\ \mu\text{m}$ w kierunku X, od $48\ \mu\text{m}$ do $65\ \mu\text{m}$ w kierunku Y oraz od $-97\ \mu\text{m}$ do $-56\ \mu\text{m}$ w kierunku Z. Można zauważyć, że na średnią wartość odchyłki wpływ ma również kierunek, z którego osiągnięta jest pozycja nominalna P0. Największe średnie odchyłki zarejestrowano przy przesuwie z punktów: P3 (odchyłka w kierunku X i Y) oraz P6 (odchyłka w kierunku Z).



Rys. 8.8. Średnia wartość odchyłki pozycjonowania ΔX_{sr} , ΔY_{sr} , ΔZ_{sr} mierzona w kierunkach X, Y oraz Z, w poszczególnych kierunkach dojazdu do pozycji nominalnej

Zależności 3.14–3.17 posłużyły do wyznaczenia powtarzalności pozycjonowania. Parametr obliczono oddzielnie dla każdego z kierunków dojazdu do pozycji nominalnej P0. Wyniki zaprezentowano na wykresie kolumnowym rys. 8.9.



Rys. 8.9. Wartość powtarzalności pozycjonowania RP w przestrzeni, w zależności od kierunku dojazdu do pozycji nominalnej

Czerwoną linią oznaczono wartość powtarzalności pozycjonowania ($60\ \mu\text{m}$) deklarowaną przez producenta. Należy jednak zaznaczyć, że została ona wyznaczona w innych warunkach niż podczas przedmiotowego w pracy pomiaru i jest obciążona inną wartością niepewności. Nie mniej jednak zakładając, że wartości niepewności mogą różnić się nieznacznie i wynikać głównie z rozrzutu wielkości mierzonej, wartość powtarzalności pozycjonowania została przekroczona tylko dla jednego kierunku najazdu P8–P0. Najlepszą powtarzalność ($\approx 0,18\ \mu\text{m}$) osiągnięto przy przemieszczeniu z punktu P4. Średnia powtarzalność pozycjonowania ze wszystkich kierunków dojazdu do pozycji nominalnej wynosiła $41\ \mu\text{m}$.

Zestawienie maksymalnych i średnich odchyłek pozycjonowania, dokładności i powtarzalności dla różnych metod pomiarowych (niepewność pomiaru U ($k=2$)) zaprezentowano w załączniku 18. Należy jednak zastrzec, że zaprezentowano w nim różne rodzaje odchyłek i błędów wraz z podaniem niepewności ich wyznaczenia.

9. Zakończenie

Dokładność robotów przemysłowych zależna jest od wielu czynników. Przeprowadzone w pracy badania oraz analizy błędów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego wykazały dużą zbieżność uzyskanych wyników z wynikami przedstawianymi w publikacjach z tego zakresu.

Na parametry opisujące dokładność wpływ może mieć między innymi obszar pomiarowy w przestrzeni roboczej, czy kierunek ruchu ramienia robota, co potwierdza fakt osiągnięcia najmniejszej dokładności przy przesuwie w liniach pomiarowych równoległych do osi Y w przyjętym, kartezyjskim układzie współrzędnych przy pomiarze interferometrem laserowym. Wpływ kierunku dojazdu przy osiąganiu określonej pozycji na powtarzalność pozycjonowania potwierdziły również badania przeprowadzone z wykorzystaniem kamery wizyjnej oraz systemu optycznego PONTOS. W pracy określono także wpływ obciążenia ramienia robota masą (8,6 kg) na wynik pomiaru. Stwierdzono spadek dokładności pozycjonowania wraz z zadaniem obciążenia. Dodatkowe obciążenie ramienia powoduje zwiększenie odkształceń poszczególnych przegubów robota co negatywnie wpływa na jego dokładność pozycjonowania. Literatura wskazuje, że czynnikiem wpływającym na uzyskiwane wyniki może być czas stabilizacji cieplnej robota przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów. Fakt ten mogą potwierdzać wyniki uzyskane podczas pomiaru za pomocą kamery wizyjnej. Zaobserwowano wówczas wzrostową tendencję zmian wartości odchyłek pozycjonowania wraz z kolejnymi cyklami pomiarowymi.

W pracy wykorzystano między innymi typowe metody badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania obrabiarek sterowanych numerycznie (interferometr laserowy i test Ballbar) oraz metody bazujące na analizie rejestrowanego obrazu (tj. kamera wizyjna oraz system PONTOS). Zastosowane metody okazały się skutecznymi narzędziami do określenia kluczowych parametrów dokładności robota przemysłowego. Główny problem stanowi jednak określenie pozycji robota oraz ustalenie optymalnej strategii pomiarowej, z punktu widzenia pozyskania reprezentatywnych wyników, opisujących jednoznacznie dokładność badanych robotów. Funkcjami ograniczającymi strategii optymalnej są zazwyczaj czas pomiaru oraz wymagania stawiane systemom pomiarowym.

Interferometr laserowy pozwala realizować pomiary z wysoką dokładnością, która jest znacznie wyższa niż rząd wielkości dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych. Ponadto możliwe jest wykonywanie jedynie pomiarów przy przesunięciu liniowym w określonej płaszczyźnie. Każda zmiana płaszczyzny pomiarowej bądź kierunku przesuwu ramienia robota wymaga ponownego ustawienia układu optycznego. Zaletą jest natomiast automatyczna analiza danych pozwalająca określić parametry, takie jak dokładność czy powtarzalność pozycjonowania.

Błędy dokładności identyfikowane podczas testu kołowości z wykorzystaniem systemu Ballbar, odnoszą się do obrabiarek sterowanych numerycznie. Budowa i struktura kinematyczna przegubowych robotów przemysłowych jest bardziej złożona. Sposób interpretacji poszczególnych rodzajów błędów powinien być zatem adekwatny do budowy robota. Wartość mierzonych błędów jest bardzo wysoka w stosunku do zakresu wartości mierzonych i dokładności urządzenia, co również może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Należy więc podkreślić, że klasyczne procedury diagnostyczne dedykowane dla maszyn CNC, w przypadku robotów przemysłowych mogą być wykorzystane jedynie w ograniczonym zakresie. Jednakże ze względu na uzyskane wyniki obliczeń niepewności pomiaru, wykorzystanie kinematycznego pręta teleskopowego przy ocenie zdolności realizacji ścieżki o zarysie kołowym przez robot przemysłowy może okazać się jednym z najlepszych wyborów.

Szybkie kamery wizyjne mogą znaleźć zastosowanie w warunkach przemysłowych z uwagi na szybkość i łatwość pomiaru. Opcja śledzenia punktu ustalonego na wierzchołku ruchomym, znacznie przyspiesza proces zbierania danych. Śledzenie punktu odbywa się na podstawie analizy odcieni pojedynczych pikseli, więc należy pamiętać o zapewnieniu tła kontrastującego z obiektami (liniami kątowymi) między którymi odległość jest mierzona. Przedstawiona metoda wprowadza jednak pewne ograniczenia, a mianowicie możliwość rejestracji odchyłek jednocześnie tylko w dwóch kierunkach z uwagi na pomiar w płaszczyźnie równoległej do obiektywu. Próba przestrzennej oceny niedokładności wymaga rzutowania na płaszczyznę 2D mierzonych wielkości, co wprowadza istotne błędy. Bardzo istotną wadą jest także duża niepewność pomiaru wynikająca głównie z niepewności kalibracji systemu oraz dużego rozmiaru pojedynczego piksela. Wykorzystanie systemów wizyjnych do wyznaczania parametrów niedokładności robota wymaga zatem opracowania odpowiedniej metody kalibracji systemu, dającej niepewność pomiaru znacząco mniejszej od wartości spodziewanych odchyłek pozycjonowania.

Trzy pierwsze metody umożliwiają zatem pomiar w jedynie określonych płaszczyznach, co wymaga sprawdzenia całej przestrzeni roboczej i wyekstrahowania najgorszych wyników opisujących dokładność i powtarzalność pozycjonowania. Z uwagi na fakt, że roboty w praktyce przemysłowej przemieszczają się w przestrzeniach wielowymiarowych po złożonych trajektoriach, badania tego typu również powinny być realizowane w przestrzeni wielowymiarowej. Wyznaczenie błędu przestrzennego (wolumetrycznego) jest głównym celem podczas badania parametrów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. Rozwiązanie może stanowić wykorzystanie optycznego systemu PONTOS umożliwiającego pomiar położenia wybranych punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Trudność w określeniu dokładności pozycjonowania polega na precyzyjnym zdefiniowaniu układu współrzędnych w systemie pomiarowym. Układ współrzędnych w systemie pomiarowym definiowany jest m. in. na podstawie obiektu referencyjnego z naklejonymi punktami. Problemem

jest ustawienie obiektu referencyjnego w taki sposób, by osie układu współrzędnych w systemie pomiarowym idealnie pokrywały się z osiami układu zdefiniowanego w sterowaniu robota. W przypadku pomiaru w przestrzeni wielowymiarowej każde odchylenie od równoległości poszczególnych osi, wprowadza błąd podczas pomiaru odchyłki dokładności pozycji (robot przesuwają się o pewną wartość wzdłuż swojego układu współrzędnych, natomiast oprogramowanie mierzy względem swojego układu, który w takim przypadku może być obrócony/przesunięty względem układu robota). Przeprowadzone badania wykazały jednak możliwość określenia w stosunkowo łatwy sposób parametru powtarzalności pozycjonowania.

Dokładność i powtarzalność pozycjonowania są kluczowymi parametrami robotów przemysłowych, determinującymi ich zdolności użytkowe w procesach wspomagania różnych technologii wytwarzania. Do najważniejszych zastosowań tego typu maszyn można zaliczyć technologię ubytkowego kształtowania elementów maszyn, gdzie roboty wspomagają czynności takie jak ustawianie i orientowanie pozycji obrabianego przedmiotu lub narzędzia. Ponadto pełnią one funkcje transportowe i manipulacyjne. Szczególnie w technologii obróbki ubytkowej wysoka precyzja orientowania, mocowania i przemieszczania oraz stabilność pracy są niezwykle ważne i pożądane. Z analizy literatury fachowej oraz wyników pomiarów przedstawionych w niniejszej pracy wynika, że roboty charakteryzują się dokładnością gorszą kilka rzędów wielkości obrabiarki sterowane numerycznie. Dokładność robota, podobnie jak obrabiarek jest czynnikiem decydującym o możliwościach wytwórczych systemu oraz jego podatności na stany awaryjne. Niewłaściwa praca robota, jego obniżona dokładność i powtarzalność pozycjonowania negatywnie wpływa na końcowy efekt wytwarzania. Szczególne znaczenie ma to w przypadku elastycznych systemów wytwarzania np. elastycznych gniazdach obróbkowych czy elastycznych liniach montażowych.

Pomimo, że współczesne roboty charakteryzują się wysoką powtarzalnością, spełniającą wymagania większości zastosowań, to należy pamiętać, że parametr ten może ulegać pogarszaniu w czasie użytkowania procesu eksploatacji. Istotną jest zatem systematyczna kontrola stanu robota polegająca m.in. na sprawdzaniu parametrów takich jak dokładność czy powtarzalność pozycjonowania. Uzyskane na podstawie badań dokładności wyniki, mogą być dla technologów podstawą do oceny możliwości wykorzystania robota w elastycznym gnieździe obróbkowym. Ponadto mogą stanowić dane szeregu czasowego, na podstawie którego możliwe będzie prognozowanie stanów przyszłych robota oraz modelowania jego dokładności i powtarzalności pozycjonowania.

Literatura

- [1] Abderrahim M., Khamis A., Garrido S., Moreno L.: *Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators*, „Industrial Robotics- Programming, Simulation and Applications”, December 2006.
- [2] Alici G., Shirinzadeh B.: *A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing*, „Mechanism and Machine Theory”, 2005, vol. 40, no. 8, p. 879–906.
- [3] Angelidis A., Vosniakos G.Ch.: *Prediction and Compensation of Relative Position Error along Industrial Robot End-Effector Paths*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing”, 2014, vol. 15, no. 1, p. 63–73.
- [4] Appleton E., Williams D.J.: *Industrial Robot Application*, „Open University Press Robotics”, Stony Straford 1987.
- [5] Berger H., Möller M., Klein M.: *3D Motion Analysis of Cycling Biodynamics for Setup Efficiency and Prevention of Insuries*, „Topics in Modal Analysis II”, 2012, vol. 6, p. 221–226.
- [6] Bilek O., Samek D., Knedlova J.: *Offline Programming for Robotic Deburring Process of Aluminium Wheels*, „Manufacturing Technology”, 2013, vol. 13, no. 3, p. 269–275.
- [7] Burge J.H., Su P., Zhao Ch., Zobrist T.: *Use a commercial laser tracker for optical alignment*, „Optical System Alignment and Tolerancing”, 2007, vol. 6676, 66760E.
- [8] Chen Y., Dong F.: *Robot machining: recent development and future research issues*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2013, vol. 66, no. 9, p. 1489–1497.
- [9] Ciszak O.: *Computerowo wspomagane modelowanie i symulacja zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika”, 2011, vol. 83, no. 1, p. 55–61.
- [10] Conrad K.L., Shiakolas P.S., Yih T.C.: *Robotic calibration issues: accuracy repeatability and calibration*, „Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation”, Rio, Patras, Greece, 17–19 July, 2000.
- [11] Craig J.J.: *Introduction to Robotics. Mechanics and Control*, 3rd edition. Pearson Education Inc, Upper Saddle River 2005.
- [12] *Encyklopedia Powszechna PWN*, Warszawa 1987.
- [13] Gondek L.: *Analiza dokładności geometrycznej manipulatorów robotów przemysłowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [14] Gong C., Yuan J., Ni J.: *Nongeometric Error Identification and Compensation for Robotic System by Inverse Calibration*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2012, vol. 40, no. 14, p. 2119–2137.
- [15] Greenway B.: *Robot accuracy*. „Industrial Robot: An International Journal”, 2000, vol. 27, no. 4, p. 257–265.
- [16] Ha In-Chul: *Kinematic parameter calibration method for industrial robot manipulator using the relative position*, „Journal of Mechanical Science and Technology” 2008, vol. 22, p. 1084–1090.
- [17] Honczarenko J.: *Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie*, WNT, Warszawa 2010.

- [18] Józwick J., Kuric I., Ostrowski D., Dziedzic K.: *Industrial robot accuracy Testing with QC20-Ballbar Diagnostic System*, „Manufacturing Technology: Journal for Science Research and Production”, 2016, no.3, vol. 16. p. 519–524
- [19] Józwick J., Kuric I., Semotiuk L.: *Laser interferometer diagnostics of CNC machine tools*, „COMMUNICATIONS”, 2014, no. 3A, p. 167–173.
- [20] Józwick 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, vol. 10, no. 32.
- [21] Józwick J., Ostrowski D., Wieczorek M., Czarnowski M.: *Evaluation of accuracy and positioning repeatability of an industrial robot*, „Advanced technologies in designing, engineering and manufacturing: research problems” [Red:] Jachowicz T., Kłonica M., Lublin, Perfecta info, 2015, p. 146–156.
- [22] Józwick J., Pieško P., Krajewski G.: *Evaluation of QC10 ballbar diagnostics method for CNC machine*, „Maintenance and Reliability”, 2010, vol. 47, no. 3, p. 10–20.
- [23] Kiersztyn M., Wolszczak P., Płaska S.: *Automatyczna kontrola pozycjonowania robota w elastycznym gnieździe wytwarzania z zastosowaniem technik wizyjnych*, „Mechanik”, 2014, nr 8–9, s. 281–290.
- [24] Kost G., Łebkowski P., Węsierski Ł.N.: *Automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013.
- [25] Latos H., Mikołajczyk T.: *Surface shaping with industrial robot*, „1st International Conference Optimization of the Robots and Manipulators” Bucharest, Romania, 26–28 May, 2006.
- [26] Leali F., Vergano A., Pini F., Pellicciari M., Barselli G.: *A workcell calibration method for enhancing accuracy in robot machining of aerospace parts*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2016, vol. 85, no. 1, p. 47–55.
- [27] Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2004.
- [28] Lipski J.: *Diagnostyka procesów wytwarzania*, Lublin, Politechnika Lubelska, 2013.
- [29] Majda P.: *Modelowanie i eksperymentalna ocena dokładności przestrzennego pozycjonowania zespołów posuwowych obrabiarek sterowanych numerycznie*, Szczecin, Wydawnictwo ZAPOL, 2012.
- [30] Majda P., Dolata M., Nowak M.: *Determination of machine tool errors using tracking interferometer*, „Archives of Mechanical Technology and Automation”, 2014, vol. 34, no. 3, p. 23–34.
- [31] Majda P., Marchelek K.: *Dokładność geometryczna obrabiarek sterowanych numerycznie*, „Mechanik”, 2013, nr 2, s. 77–80.
- [32] Majda P., Pajor M.: *Szacowanie niepewności pomiaru przestrzennego błędu pozycjonowania maszyn technologicznych*, „Mechanik”, 2016, nr 11, s 1546–1550,
- [33] Majda P., Szwengier G., Jastrzębski R.: *New approach to modeling geometric errors in precision manufacturing machines*, „Advances in Manufacturing Science and Technology”, 2013, vol. 37, no. 3, p. 33–44.
- [34] Merlet J.K.: *Parallel Robots*, “Solid mechanics and its applications”, 2006, vol. 128,
- [35] Morecki A., Knapczyk J.: *Podstawy robotyki- Teoria i elementy manipulatorów robotów*, WNT, Warszawa 1999.

- [36] Musiał W.: *Zastosowanie robota przemysłowego do obróbki trudno obrabialnych stopów lotniczych ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni krzywoliniowych*, „IX FORUM ProCAx Mechanik”, 2011, nr 2, s. 141.
- [37] Niederliński A.: *Roboty przemysłowe*. WSiP, Warszawa 1981.
- [38] Nubiola A., Bonev I.: *Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker*, „Robotics and Computer – Integrated Manufacturing”, 2013, vol. 29, no. 1, p. 236–245.
- [39] Pan Z., Polden J., Larkin N., Van Duin S., Norrish J.: *Recent progress on programming methods for industrial robots*, „Robotics and Computer- Integrated Manufacturing”, 2012, vol. 28, p. 87–94.
- [40] 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, vol. 22, no. 3, p. 245–254.
- [41] Shirinzadeh B.: *Laser-interferometry based tracking for dynamic measurements*. „Industrial Robot: An International Journal”, 1998, vol. 25, no. 1, p. 35–41.
- [42] Slamani M., Joubair A., Bonev I.: *A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques*, „Industrial Robot: An International Journal”, 2015, vol. 42, no. 6, p. 572–585.
- [43] Slamani M., Nubiola A., Bonev I.: *Assessment of the positioning performance of an industrial robot*, „Industrial robot: An International Journal”, 2012, vol. 39, no. 1, p. 57–68.
- [44] Śladek J.: *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Kraków, Politechnika Krakowska, 2012.
- [45] Swevers J., Verdonck W., De Schutter J.: *Dynamic Model Identification for Industrial Robots*, „IEEE Control Systems Magazine”, 2007, vol. 27, no. 5, p. 51–78.
- [46] Szkodny T.: *Dynamika robotów przemysłowych*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [47] Szkodny T.: *Kinematyka robotów przemysłowych*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [48] Williams II R.L.: *The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions*, Ohio University, 2016.
- [49] Wiśniewski M.: *Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 2015.
- [50] Wiśniewski M.: *Propozycja metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych*, „Technologia i Automatyzaacja Montażu”, 2014, nr 3, s. 39–43.
- [51] Wiśniewski M., Żurek J., Cizak O.: *Metodyka badań dokładności i powtarzalności odwzorowania trajektorii robota przemysłowego Fanuc M-16iB*, „Technologia Automatyzaacja Montażu”, 2014, nr 4, s. 20–24.
- [52] Young K., Pickin C.G.: *Accuracy assessment of the modern industrial robot*, „Industrial robot: An International Journal”, 2000, vol. 39, no. 6, p. 427–436.
- [53] Zdanowicz R.: *Robotyzacja procesów technologicznych*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2002.
- [54] Zhenhua W., Hui X., Guodong Ch., Rongchuan S., Sun L.: *A distance error based industrial robot kinematic calibration method*, „Industrial Robot: An International Journal”, 2014, vol. 41, no. 5, p. 439–446.

- [55] Zieliński C., Mianowski K., Nazarczuk K., Szyrkiewicz W.: *A prototype robot for polishing and milling large objects*, „Industrial Robot: An International Journal”, 2003, vol. 30, no. 1, p. 67–76.
- [56] Żurek J., Ciszak O., Cieślak R., Suszyński M.: *Ocena i wybór robota przemysłowego metodą AHP*, „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji”, 2011, vol. 31, nr 2, s. 201–211.
- [57] Żurek J., Wiśniewski M.: *Metodyka badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego FANUC M-16iB*, „Technologia Automatykacja Montażu”, 2013, nr 1, s. 31–34.
- [58] Podręcznik użytkownika Interferometr Laserowy LSP–30 3D. Wrocław 2009, Rev, 1.0.2
- [59] *PN-EN ISO 8373:2001 Roboty przemysłowe- terminologia*
- [60] *PN-EN ISO 9283:1998 Roboty przemysłowe- Metody badania charakterystyk funkcjonalnych*
- [61] *ISO 230:2006*
- [62] OMC Technical Brief- Laser Tracker. Optical Metrology Centre, 2001
- [63] Renishaw Ballbar Help
- [64] <http://www.wadim.com.pl> (06.06.2016)
- [65] <http://www.asimo.pl> (06.06.2016)
- [66] <http://www.abcontrols.com> (06.06.2016)
- [67] <http://www.ohio.edu> (06.06.2016)
- [68] <http://www.plasticmachinerymagazine.com> (12.08.2016)
- [69] <http://www.plastigo.pl> (12.08.2016)
- [70] <http://www.robotyka.com> (06.06.2016)
- [71] <http://www.mecademic.com> (06.06.2016)
- [72] <http://www.physikinstrumente.com> (06.06.2016)
- [73] <http://www.motioncontroltips.com> (06.07.2016)
- [74] <http://www.kuka-robotics.com> (06.06.2016)
- [75] <http://www.fanuc.eu> (16.08.2016)
- [76] <http://www.interempresas.net> (16.08.2016)
- [77] <http://www.roboticstomorrow.com> (06.06.2016)
- [78] <http://automatykab2b.pl> (16.06.2016)
- [79] <http://www.yaskawa.eu> (16.06.2016)
- [80] <http://www.vekama.com> (16.06.2016)
- [81] <http://www.vanguardia-industrial.net> (16.06.2016)
- [82] <http://www.gom.com> (06.07.2016)
- [83] <http://advancedtechnologiesinc.com> (06.07.2016)
- [84] <http://www.impacrobot.com> (06.07.2016)
- [85] <http://www.robotraders.co.uk/> (24.07.2015)
- [86] <http://www.3dmeasurement.net>
- [87] <http://www.motoman.pl> (06.07.2016)
- [88] <http://www.renishaw.com> (27.07.2015)
- [89] <http://www.phantomhighspeed.com> (03.06.2016)
- [90] <http://www.continentaltrade.com>

Spis rysunków

Rys. 2.1. Klasyfikacja robotów przemysłowych ze względu na strukturę kinematyczną [17].....	17
Rys. 2.2. Robot o układzie kartezjańskim: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny robota [64]	18
Rys. 2.3. Robot o układzie cylindrycznym: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny robota [65]	18
Rys. 2.4. Robot typu SCARA: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny robota [66].....	19
Rys. 2.5. Robot o strukturze sferycznej: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny [67]	19
Rys. 2.6. Robot o strukturze przegubowej: a) struktura kinematyczna [17], b) widok ogólny [70]	20
Rys. 2.7. Roboty wieloramienne: a) robot firmy Yaskawa z serii SDA [79], b) robot firmy Yushin, [68], c) robot STAR Es-800s [69].....	20
Rys. 2.8. Przykłady robotów równoległych: a) struktura kinematyczna robota typu „tripod” [48], b) widok ogólny [71] c) struktura kinematyczna robota typu „hexapod” [72], d) widok ogólny [73] .	21
Rys. 2.9. Układy kinematyczne robotów poruszających się po stałym torze jezdny: a) podłogowym [74], b) bramowym [74], c) sufitowym [75], d) suwnicowym [76].....	22
Rys. 2.10. Układy kinematycznych autonomicznych robotów mobilnych: a) poruszających się wyłącznie do przodu, b) jeżdżące w przód i w tył, c) jeżdżące w każdą stronę [17].....	23
Rys. 2.11. Roboty mobilne zaprojektowane przez firmę KUKA [74]: a) KMR QUANTEC, b) KMR iiwa.....	23
Rys. 2.12. Klasyfikacja robotów ze względu na rodzaj stosowanego napędu [17]	26
Rys. 2.13. Spawanie elementów struktury nośnej samochodu z zastosowaniem robotów przemysłowych [74]	27
Rys. 2.14. Zastosowanie robotów przemysłowych w operacjach klejenia [77]	28
Rys. 2.15. Zastosowanie robotów przemysłowych w obsłudze maszyn produkcyjnych, a) obsługa pojedynczej maszyny [78], obsługa wielu maszyn w gnieździe produkcyjnym [79]	28
Rys. 2.16. Zrobotyzowane stanowisko do paletyzacji [80]	29
Rys. 2.17. Zrobotyzowane stanowisko lakierowania karoserii samochodu [81].....	30
Rys. 2.18. Zastosowanie robota przemysłowego do pomiarów współrzędnościowych 3D systemem ATOS ScanBox [82].....	31

Rys. 2.19. Obróbka mechaniczna z zastosowaniem robotów przemysłowych, a) obróbka piaskowca [74], b) obróbka formy z polistyrenu [74], c) obróbka materiałów kompozytowych [83], d) obróbka drewna [84].....	32
Rys. 3.1. Dokładność pozycjonowania (AP_p) i powtarzalność pozycjonowania (RP_j) [60]	33
Rys. 3.2. Dokładność orientacji AP_c , gdzie: c_c – kąt położenia zadanego, c – wartość średnia orientacji kątowych, $3S_c$ – rozrzut kątów w stosunku do wartości $\pm 3S_c$ [60]	34
Rys. 3.3. Wielokierunkowe odchylenie dokładności pozycji vAP , G_1 , G_2 , G_3 – środki ciężkości osiągniętych pozycji o współrzędnych x_j , y_j , z_j , gdzie $j = 1, 2, 3$ [60]	35
Rys. 3.4. Dokładność odległości [60]	35
Rys. 3.5. Czas stabilizacji pozycji i przeregulowanie pozycji, t_0 – moment wejścia efektora robota w zakres stabilizacji pozycji, t – czas stabilizacji pozycji, OV_j – przeregulowanie pozycji w j – tym cyklu [60]	36
Rys. 3.6. Przeregulowanie pozycji, OV_j – przeregulowanie.....	37
Rys. 3.7. Zmienność E , $AP1$, $AP2$, $AP3$ – dokładność pozycjonowania testowanych robotów, $G1$, $G2$, $G3$ – środki ciężkości, o współrzędnych x_j , y_j , z_j , osiągniętych pozycji przez testowane roboty, gdzie $j = 1, 2, 3$ [60]	37
Rys. 3.8. Dokładność ścieżki AT i powtarzalność ścieżki RT , AT_{pi} – dokładność pozycjonowania ścieżki w i – tym punkcie ścieżki zadanej, AT_{pi} – ścieżki w i – tym punkcie ścieżki zadanej [60]	38
Rys. 3.9. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania [40]	40
Rys. 3.10. Przykład płaszczyzny testowej [60].....	42
Rys. 3.11. Możliwe cykle ruchów robota podczas badania dokładności pozycjonowania [60].....	43
Rys. 3.12. Zbiór czynników decydujących o pozycjonowania robotów przemysłowych [10].....	45
Rys. 3.13. Źródła błędów pozycjonowania robotów przemysłowych wg [15]..	45
Rys. 3.14. Zasada działania trakera laserowego [62].....	49
Rys. 3.15. Budowa retroreflektora trakera laserowego [7, 85]	49
Rys. 3.16. Metodyka badania dokładności robota za pomocą trakera laserowego, a) płaszczyzna pomiarowa, b) położenie Laser Trackera w osi środka sześciennej przestrzeni roboczej, c) układ współrzędnych urzędzenia pomiarowego Faro Laser Tracker Ventage [49–50]	50
Rys. 3.17. Odchyłki pozycjonowania przed i po kalibracji, mierzone za pomocą trakera laserowego FARO (wyniki pomiaru uzyskano dla obciążenia efektora masą równą 3 kg) [38]	51

Rys. 3.18. Odchyłki pozycjonowania przed i po przeprowadzeniu kalibracji robota, mierzone z wykorzystaniem trakeru laserowego Leica AT901 B (wyniki pomiaru uzyskano dla obciążenia efektora masą równą 10 kg) [54]	52
Rys. 3.19. Zasada działania systemu Krypton K600: a) płaszczyzny, w których obserwowana jest dioda LED, b) punkt przecięcia płaszczyzn określający pozycję diody LED w przestrzeni 3D, c) śledzenie wielu diod LED jednocześnie, d) określenie położenia oraz orientacji w przestrzeni 3D obiektu [1]	53
Rys. 3.20. Badanie powtarzalności pozycjonowania za pomocą skanera 3D IScan M300: a) stanowisko pomiarowe, b) zasada działania, c) obraz z pięciu kolejnych pomiarów osiągniętych pozycji, d) ścieżka pomiarowa [3].....	54
Rys. 3.21. Odchyłki pozycjonowania robota 6 DOF zmierzone w kierunku Y przed kompensacją oraz obliczone z zastosowaniem kompensacji za pomocą sztucznych sieci neuronowych [3]	55
Rys. 3.22. Zasada pomiaru dokładności robota FS06L za pomocą igieł pomiarowych: a) model położenia igieł oraz mierzonych odległości, b) pomiar geometryczny odległości igieł w kierunku X i Z, w programie Adaptative Vision Studio 3.1 [23].....	56
Rys. 3.23. Odległość pomiędzy igłami zmierzona podczas oceny powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego FS060L [23].....	56
Rys. 3.24. Uproszczony schemat działania interferometru laserowego [58].....	57
Rys. 3.25. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi X, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43].....	58
Rys. 3.26. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43].....	59
Rys. 3.27. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 1600 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Z, P0 – początek pomiarowego układu współrzędnych zdefiniowanego w układzie bazowym robota [43].....	59
Rys. 3.28. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota Cloos Romat 310 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y [52].....	60
Rys. 3.29. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota KUKA KR125 wzdłuż ścieżki równoległej do osi Y [52]	60
Rys. 3.30. Liniowa odchyłka pozycjonowania robota ABB IRB 6400 wzdłuż ścieżki równoległej do osi X [37]	61

Rys. 3.31. Test z wykorzystaniem systemu pomiarowego QC200-W Ballbar, 1 – tulejka zaciskowa, 2 – uchwyt magnetyczny, 3 – przetwornik przemieszczeń, 4 – podstawa magnetyczna, 5 – kołowa ścieżka pomiarowa [88]	62
Rys. 3.32. Odchyłki promienia w zależności od prędkości ruchu efektora robota po okręgu dla kierunku ruchu: CC – zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, CCW – przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara [43].....	62
Rys. 3.33. Odchyłki okrągłości w zależności od prędkości ruchu efektora robota, promienia okręgu oraz kierunku ruchu (CC – zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, CCW – przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara) [43]	63
Rys. 3.34. Graficzna prezentacja błędu oraz niepewności pomiaru	64
Rys. 4.1. Robot przemysłowy HP20: a) widok ogólny [85], b) struktura kinematyczna robota MOTOMAN HP20 [86]	68
Rys. 4.2. Wymiary gabarytowe robota MOTOMAN HP20 i jego przestrzeni roboczej [87].....	69
Rys. 4.3. Stanowisko pomiarowe, a) widok rzeczywisty, b) model 3D stanowiska pomiarowego.....	71
Rys. 4.4. Podstawowe elementy interferometrycznego systemu laserowego XL80, a) laser, b) optyczne układy pomiarowe, c) kompensator z czujnikami [88]	72
Rys. 4.5. Zestaw diagnostyczny QC20-W Ballbar: 1 – pręt kinematyczny, 2 – walizka transportowa, 3, 5 – kulki czujnika, 4, 7 – zespół podstawy magnetycznej, 6 – pierścień ochronny, 8, 9, 10 – przedłużacze pręta kinematycznego, 11 – uchwyt magnetyczny, 12 – kulka ustawcza, 13 – przedłużacz uchwytu magnetycznego, 14 – kalibrator, 15 – zestaw narzędzi, 16 – bateria, 17 – gniazdo baterii, 18, 19 – zestaw do testu na małym okręgu, 20 – adapter VTL [63].....	74
Rys. 4.6. Kamera Phantom v2511 [89].....	75
Rys. 4.7. Optyczny system pomiarowy GOM PONTOS [82]	76
Rys. 4.8. Zasada pomiaru położenia punktu w przestrzeni [5]	77
Rys. 5.1. Metodyka pomiaru odchyłek dokładności pozycjonowania z zastosowaniem interferometru laserowego	78
Rys. 5.2. Konfiguracja pomiarowa rozmieszczenia elementów systemu laserowego podczas: a) próby bez obciążenia, b) próby z obciążeniem, c) konfigurowanie toru pomiarowego z poziomu oprogramowania LaserXL, 1– generator lasera, 2 – interferometr liniowy z reflektorem odniesienia, 3 – reflektor ruchomy, 4 – kompensator XC-80, 5 – czujnik parametrów środowiskowych, 6 – uchwyt magnetyczny, 7 – ramię robota, 8 – filar, 9 – chwytak robota, 10 – obciążenie	80

Rys. 5.3.	Definicja położenia początku pomiarowego układu współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota, dla pomiarów liniowych wzdłuż osi X oraz osi Y	81
Rys. 5.4.	Definicja położenia początku pomiarowego układu współrzędnych w bazowym układzie współrzędnych robota, dla pomiarów liniowych wzdłuż osi Z: a) widok z boku, b) widok z góry	81
Rys. 5.5.	Lokalizacja ścieżek pomiarowych w przestrzeni podczas pomiaru a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y, c) wzdłuż osi Z	82
Rys. 5.6.	Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej X5 uzyskane podczas próby bez obciążenia	83
Rys. 5.7.	Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej Y1, uzyskane podczas próby bez obciążenia	83
Rys. 5.8.	Odchyłki pozycjonowania wzdłuż wybranej ścieżki pomiarowej Z3, uzyskane podczas próby z obciążeniem	84
Rys. 5.9.	Porównanie średnich wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota: a) jednokierunkowa dokładność pozycjonowania $A\uparrow$, b) jednokierunkowa dokładność pozycjonowania $A\downarrow$, c) dwukierunkowa dokładność pozycjonowania A, d) jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania $R\uparrow$, e) jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania $R\downarrow$,.....	86
Rys. 5.10.	Wykres osiowej wartości zwrotnej (B) w zależności od odległości linii pomiarowej od początku układu współrzędnych, w wybranych kierunkach: a) w kierunku osi X, b) w kierunku osi Y, c) w kierunku osi Z	88
Rys. 5.11.	Schemat powstawania błędu cosinusa, wynikającego z braku równoległości wiązki światła laserowego do osi ruchu badanego obiektu	91
Rys. 5.12.	Geometryczna interpretacja powstawania błędu Abbego [29]	92
Rys. 5.13.	Ustawienie optyki systemu, minimalizujące wartość błędu drogi martwej	93
Rys. 6.1.	Sposób pomiaru dokładność robota HP20 za pomocą teleskopowego pręta kinematycznego QC20-W Ballbar: a) przebieg testu w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara (CCW), przebieg testu w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (CW) [63].....	97
Rys. 6.2.	Długości teleskopowego pręta kinematycznego zastosowane w teście kołowości:	98
Rys. 6.3.	Sposób kalibracji teleskopowego pręta kinematycznego	98

Rys. 6.4.	Sposób zamocowania urządzenia QC20-W Ballbar na stanowisku pomiarowym, gdzie: 1) stół pomiarowy, 2) podstawa magnetyczna centrująca, 3) teleskopowy pręt kinematyczny, 4) uchwyt magnetyczny, 5) chwytak robota (efektor)	99
Rys. 6.5.	Położenie środka okręgu w bazowym układzie współrzędnych robota: a) widok z boku, b) widok z góry	99
Rys. 6.6.	Przykład analizy błędów na podstawie charakterystyki zmian promienia uzyskanej podczas pomiaru	100
Rys. 6.7.	Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 100$ mm: a) $v_f = 50$ mm/s, b) $v_f = 75$ mm/s, c) $v_f = 100$ mm/s.....	102
Rys. 6.8.	Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 150$ mm:	103
Rys. 6.9.	Mapy odchyłek okrągłości Δ_o dla interpolowanego okręgu o promieniu $r = 300$ mm: a) $v_f = 50$ mm/s, b) $v_f = 75$ mm/s, c) $v_f = 100$ mm/s.....	104
Rys. 6.10.	Średnia wartość odchyłki okrągłości w funkcji prędkości liniowej przesuwu narzędzia v_f oraz długości promienia r interpolowanego okręgu	105
Rys. 7.1.	Stanowisko pomiarowe: a) widok z boku, b) widok w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny pomiarowej; 1 – chwytak, 2 – liniał krawędziowy ruchomy, 3 – liniał krawędziowy stały, 4 – trzpień sondy pomiarowej, 5 – statyw ustalający pozycję liniału odniesienia, 6 – szybka kamera wizyjna Phantom V2511 z obiektywem makro	108
Rys. 7.2.	Pojedynczy cykl ruchów.....	109
Rys. 7.3.	Ścieżki przemieszczeń liniału w wybranych płaszczyznach z oznaczonymi pozycjami, P0 – pozycja nominalna, P1–P8 – pozycje wyjazdu chwytaka (efektora) robota w określonych kierunkach.....	109
Rys. 7.4.	Widok w płaszczyźnie pomiarowej XZ.....	110
Rys. 7.5.	Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX w kierunku osi X, w kolejnych pomiarach przy osiągnięciu pozycji nominalnej	111
Rys. 7.6.	Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ w kierunku osi Z, w kolejnych pomiarach przy osiągnięciu pozycji nominalnej	112
Rys. 7.7.	Średnia wartość odchyłki pozycjonowania $\Delta X_{\text{śr}}$, $\Delta Z_{\text{śr}}$ mierzona w kierunkach X oraz Z, w kolejnych cyklach pomiarowych.....	113
Rys. 7.8.	Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX mierzona w kierunku X, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu, w kolejnych cyklach pomiarowych.....	114
Rys. 7.9.	Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ mierzona w kierunku Z, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu, w kolejnych cyklach pomiarowych.....	114

Rys. 7.10. Średnia wartość odchyłki pozycjonowania.....	115
Rys. 7.11. Mapa odchyłek pozycjonowania ΔX (mm), ΔZ (mm) od nominalnej (P0) osiągananej z różnych kierunków	116
Rys. 7.12. Wartość powtarzalności pozycjonowania R_p w płaszczyźnie pomiarowej XZ, w zależności od kierunku dojazdu do pozycji nominalnej	117
Rys. 8.1. Kalibracja urządzenia PONTOS	121
Rys. 8.2. Stanowisko pomiarowe: a) stanowisko pomiarowe, b) markery na chwytaku robota oraz obiekcie referencyjnym; 1) chwytak robota, 2) obiekt referencyjny, 3) reflektor doświetlający, 4) kamery systemu PONTOS, 5) markery	122
Rys. 8.3. Cykle ruchów podczas pomiaru.....	123
Rys. 8.4. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔX mierzona w kierunku X, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu.....	124
Rys. 8.5. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔY mierzona w kierunku Y, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu.....	125
Rys. 8.6. Wartość odchyłki pozycjonowania ΔZ mierzona w kierunku Z, przy osiągnięciu pozycji nominalnej P0 z wybranych kierunków dojazdu.....	125
Rys. 8.7. Odchyłki pozycjonowania w przestrzeni trójwymiarowej XYZ dla poszczególnych kierunków dojazdu do pozycji początkowej P0 ..	126
Rys. 8.8. Średnia wartość odchyłki pozycjonowania $\Delta X_{\text{śr}}$, $\Delta Y_{\text{śr}}$, $\Delta Z_{\text{śr}}$ mierzona w kierunkach X, Y oraz Z, w poszczególnych kierunkach dojazdu do pozycji nominalnej	127
Rys. 8.9. Wartość powtarzalności pozycjonowania R_p w przestrzeni, w zależności od kierunku dojazdu do pozycji nominalnej.....	127

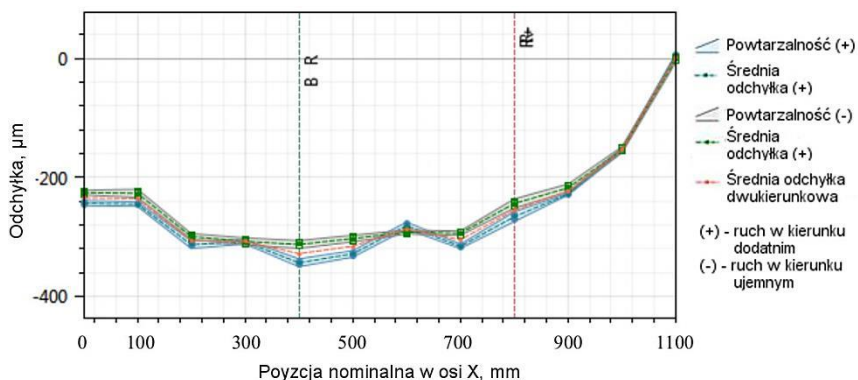
Spis tabel

Tab. 3.1. Warunki testowe dla dokładności i powtarzalności pozycjonowania [60]	42
Tab. 4.1. Parametry techniczne robota MOTOMAN HP20 [87]	70
Tab. 4.2. Charakterystyka wykorzystywanego systemu laserowego XL80 [88]	73
Tab. 4.3. Dane techniczne wykorzystywanego systemu QC20-W Ballbar [88]	74
Tab. 4.4. Podstawowe dane techniczne kamery Phantom v2511 [89]	75
Tab. 4.5. Podstawowe parametry systemu PONTOS HS [82]	76
Tab. 5.1. Określone na podstawie świadectwa kalibracji błędy i niedokładności interferometru laserowego (z kompensatorem) wykorzystywanego podczas badań	89
Tab. 5.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru interferometrem laserowym odchyłek pozycjonowania ramienia robota, dla przesuwów maksymalnych odpowiednio w osiach X, Y, Z, zarówno z obciążeniem jak i bez obciążenia statycznego	95
Tab. 6.1. Błędy i niedokładności kinematycznego pręta teleskopowego wykorzystywanego podczas badań, określone na podstawie świadectwa kalibracji (przy temperaturze powietrza 19,3°C, ciśnieniu 1029mbar, wilgotności względnej 42,3%RH)	106
Tab. 6.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru odchyłki okrągłości ramienia badanego robota kinematycznym prętem teleskopowym	107
Tab. 7.1. Dane pomiarowe szybkiej kamery wizyjnej określone na podstawie świadectwa kalibracji	118
Tab. 7.2. Niepewność i jej składowe podczas pomiaru odchyłek pozycjonowania badanego robota z wykorzystaniem szybkiej kamery wizyjnej dla wybranych kierunków najazdu	119

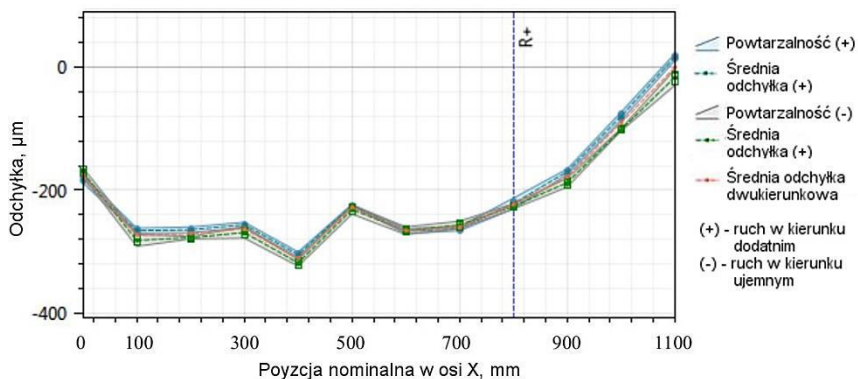
Załączniki

Załącznik 1

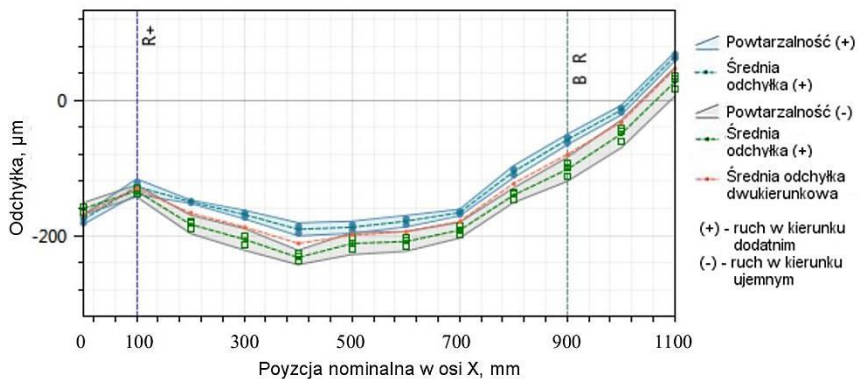
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku X, uzyskane podczas próby bez obciążenia



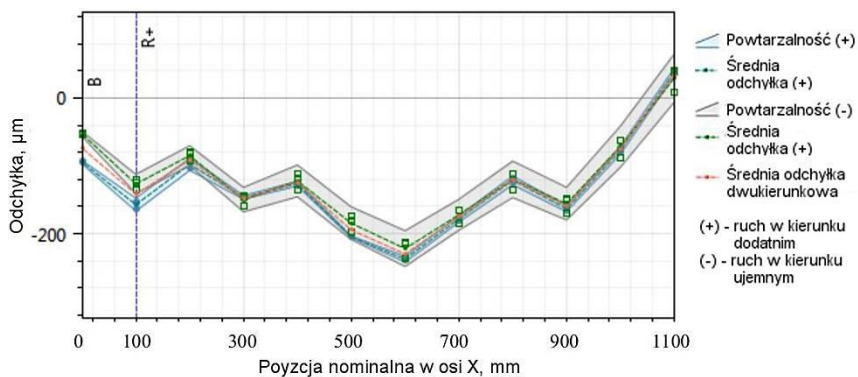
Rys. 1. z. 1 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X1, uzyskane podczas próby bez obciążenia



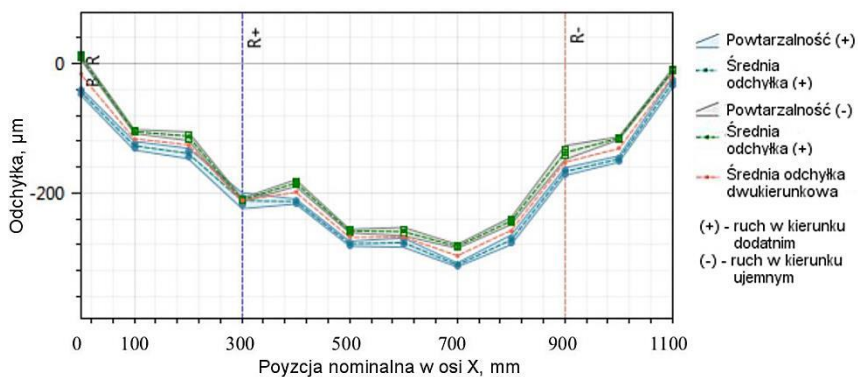
Rys. 2. z. 1 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X2, uzyskane podczas próby bez obciążenia



Rys. 3. z. 1 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X3, uzyskane podczas próby bez obciążenia



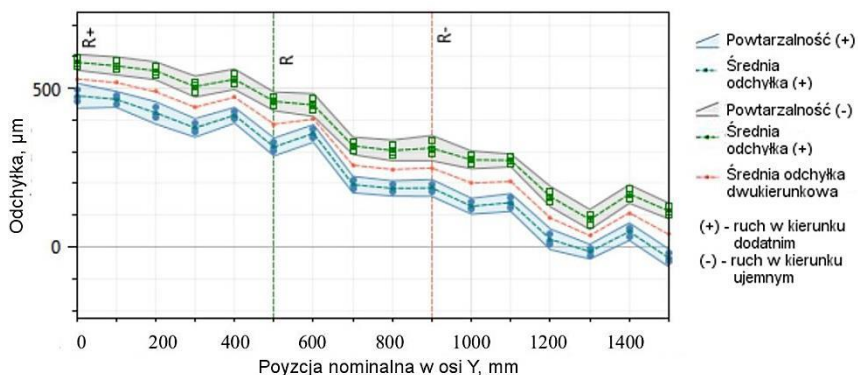
Rys. 4. z. 1 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X4, uzyskane podczas próby bez obciążenia



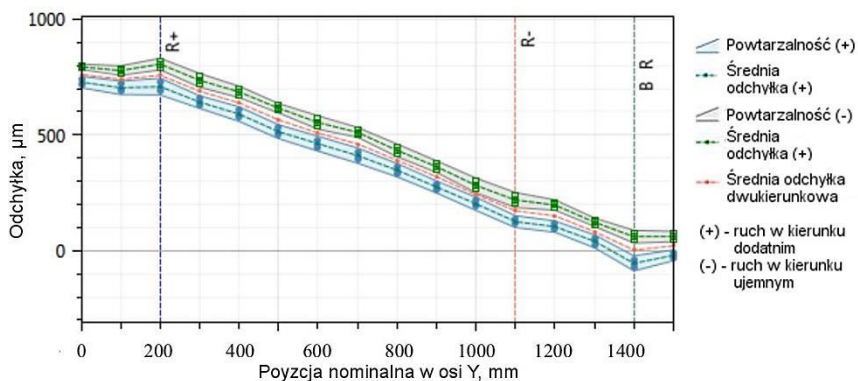
Rys. 5. z. 1 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X5, uzyskane podczas próby bez obciążenia

Załącznik 2

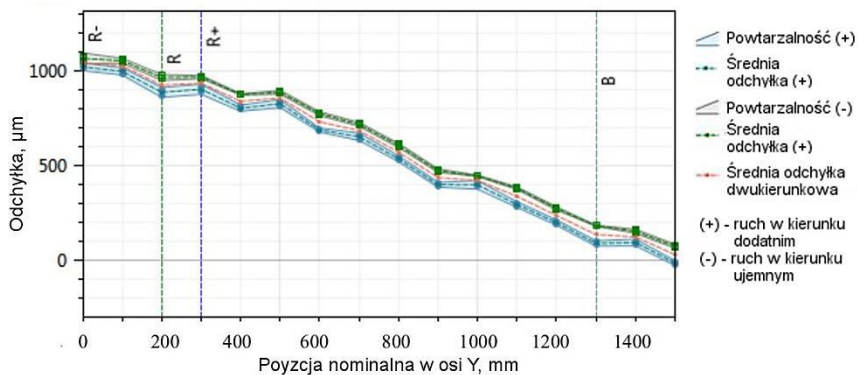
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku Y, uzyskane podczas próby bez obciążenia



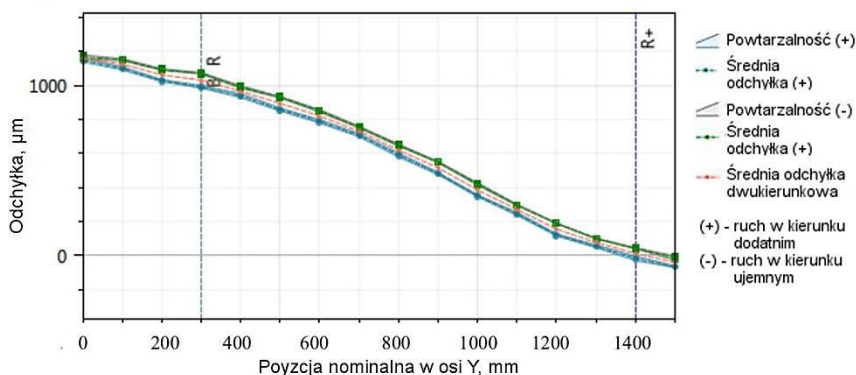
Rys. 1. z. 2 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y1, uzyskane podczas próby bez obciążenia



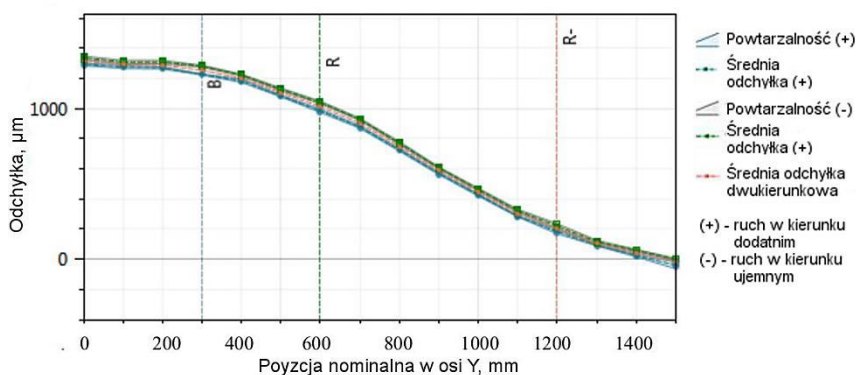
Rys. 2. z. 2 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y2, uzyskane podczas próby bez obciążenia



Rys. 3. z. 2 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y3, uzyskane podczas próby bez obciążenia



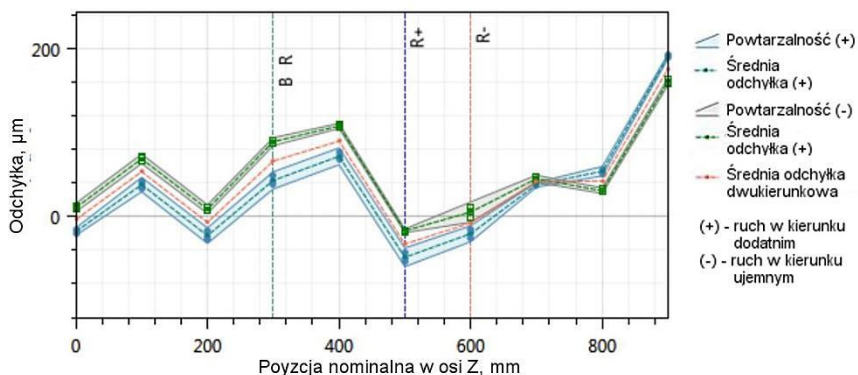
Rys. 4. z. 2 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y4, uzyskane podczas próby bez obciążenia



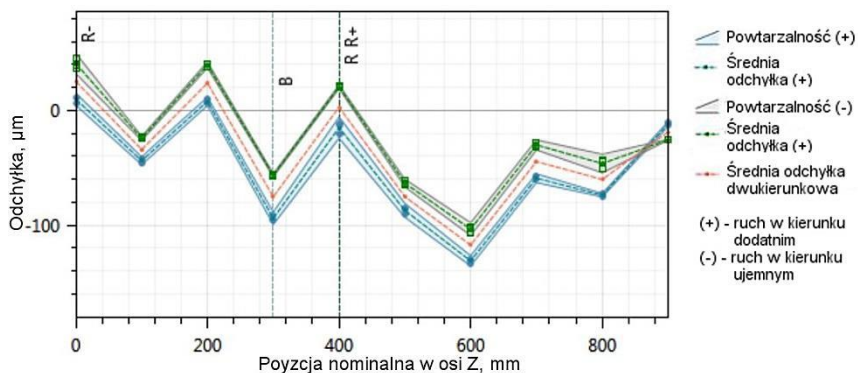
Rys. 5. z. 2 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y5 uzyskane podczas próby bez obciążenia

Załącznik 3

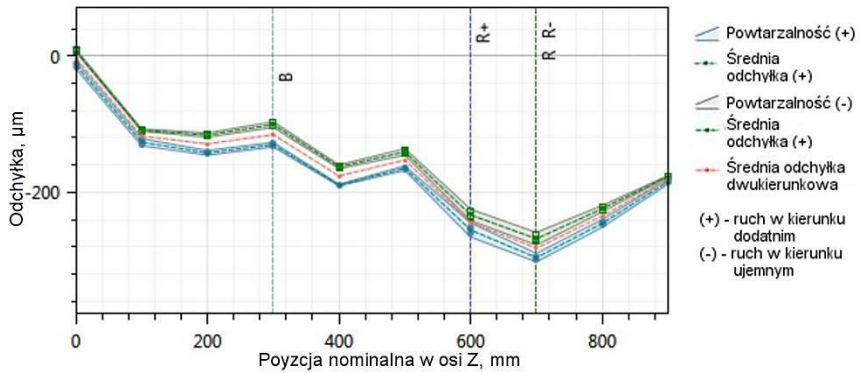
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku Z, podczas próby bez obciążenia



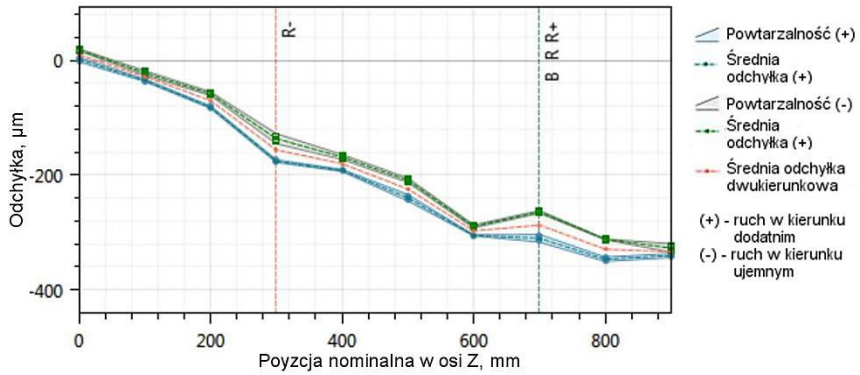
Rys. 1. z. 3 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z1, uzyskane podczas próby bez obciążenia



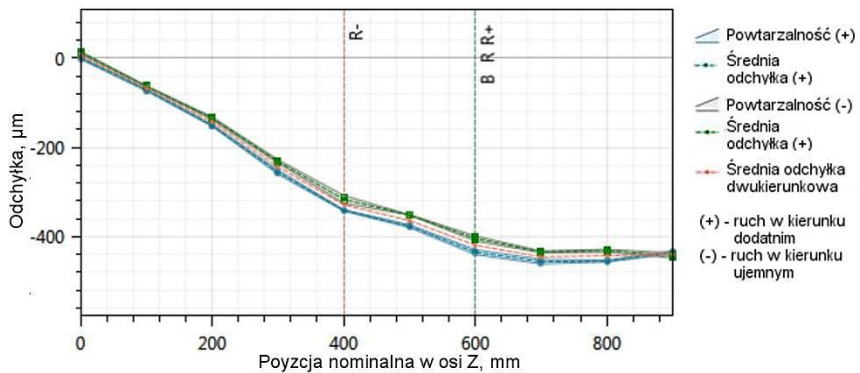
Rys. 2. z. 3 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z2, uzyskane podczas próby bez obciążenia



Rys. 3. z. 3 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z3, uzyskane podczas próby bez obciążenia



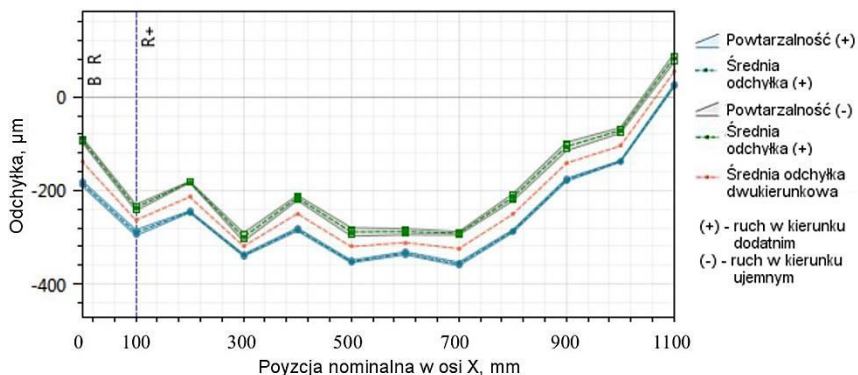
Rys. 4. z. 3 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z4, uzyskane podczas próby bez obciążenia



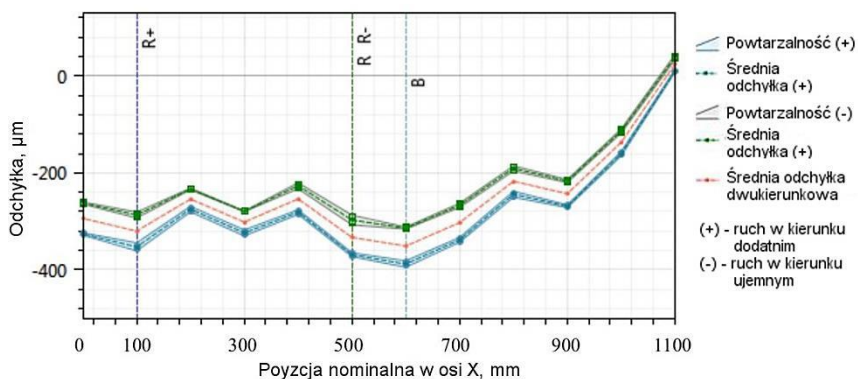
Rys. 5. z. 3 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z5 uzyskane podczas próby bez obciążenia

Załącznik 4

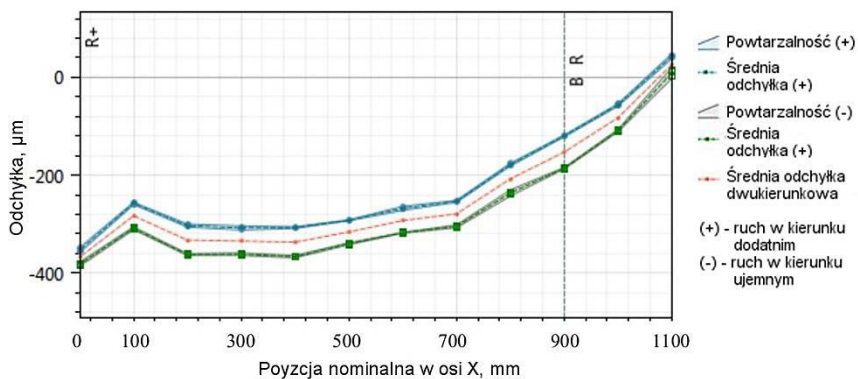
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku X, uzyskane podczas próby z obciążeniem



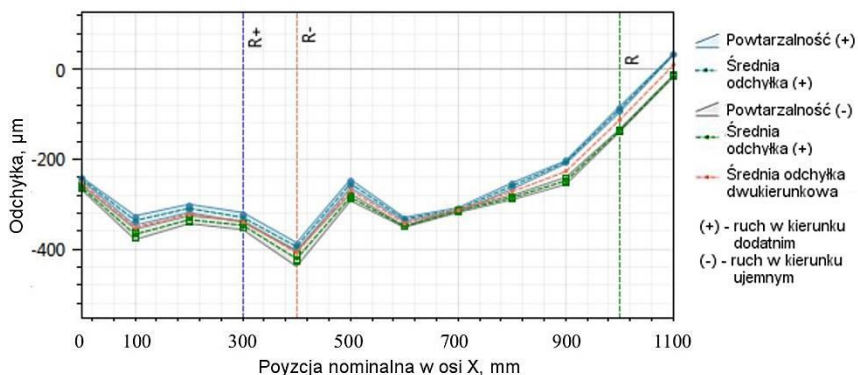
Rys. 1. z. 4 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X1, uzyskane podczas próby z obciążeniem



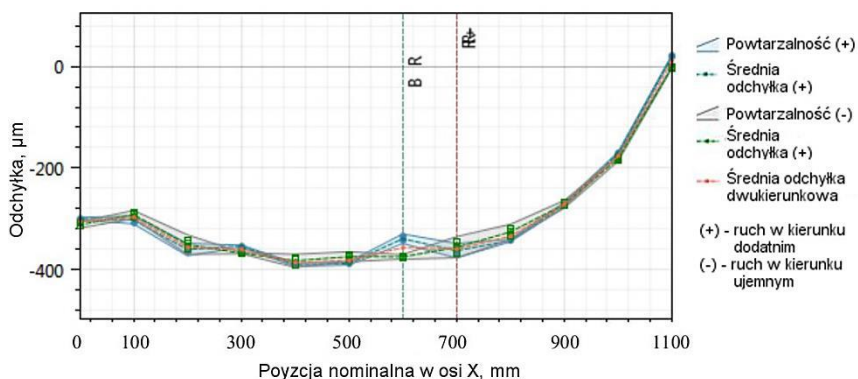
Rys. 2. z. 4 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X2, uzyskane podczas próby z obciążeniem



Rys. 3. z. 4 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X3, uzyskane podczas próby z obciążeniem



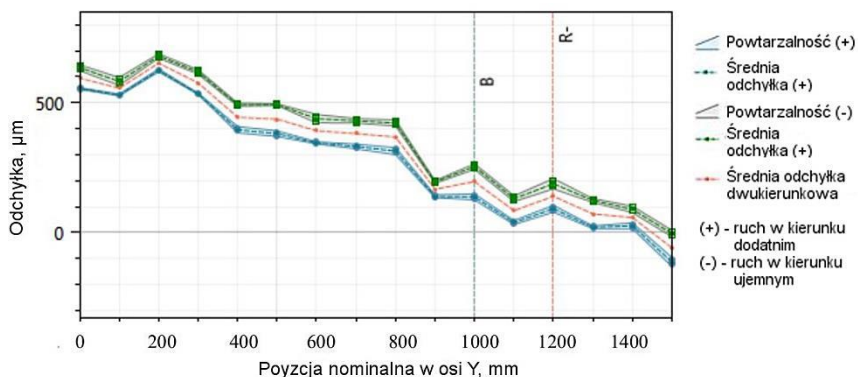
Rys. 4. z. 4 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X4, uzyskane podczas próby z obciążeniem



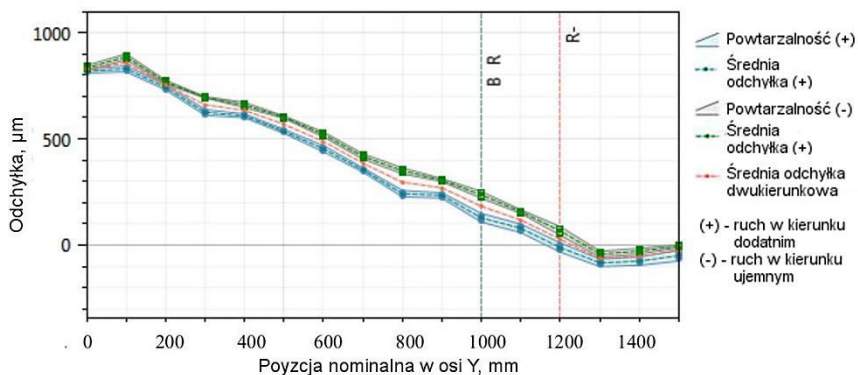
Rys. 5. z. 4 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej X5, uzyskane podczas próby z obciążeniem

Załącznik 5

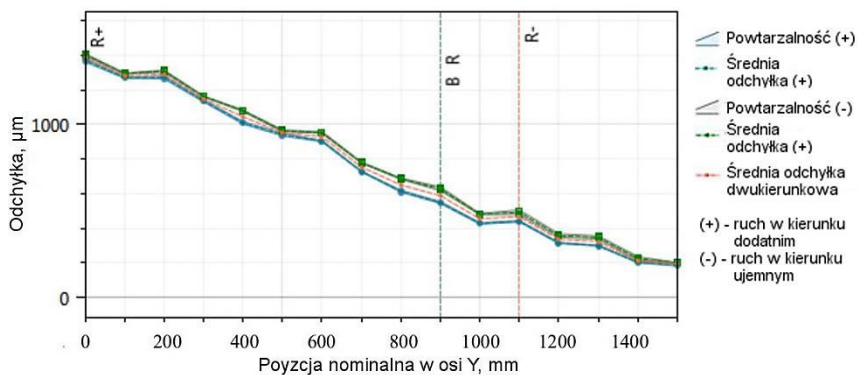
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku Y, uzyskane podczas próby z obciążeniem



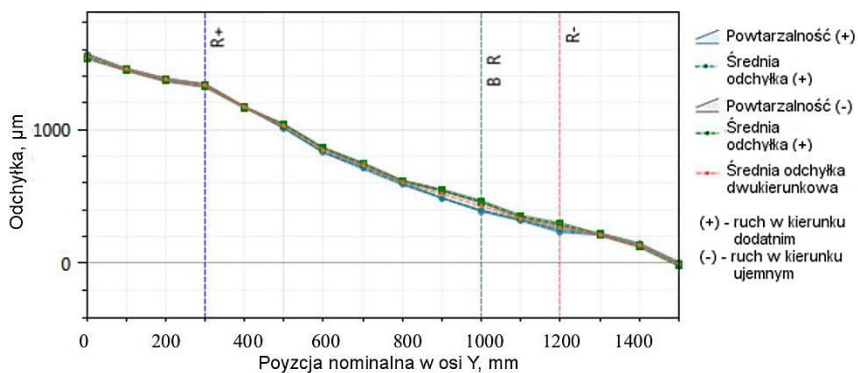
Rys. 1. z. 5 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y1, uzyskane podczas próby z obciążeniem



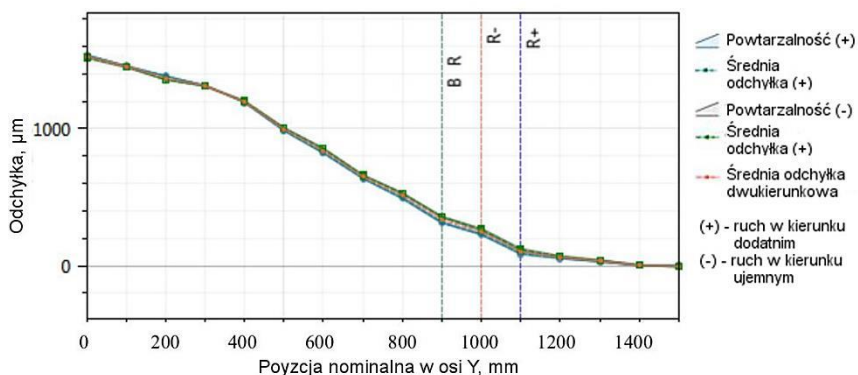
Rys. 2. z. 5 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y2, uzyskane podczas próby z obciążeniem



Rys. 3. z. 5 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y3, uzyskane podczas próby z obciążeniem



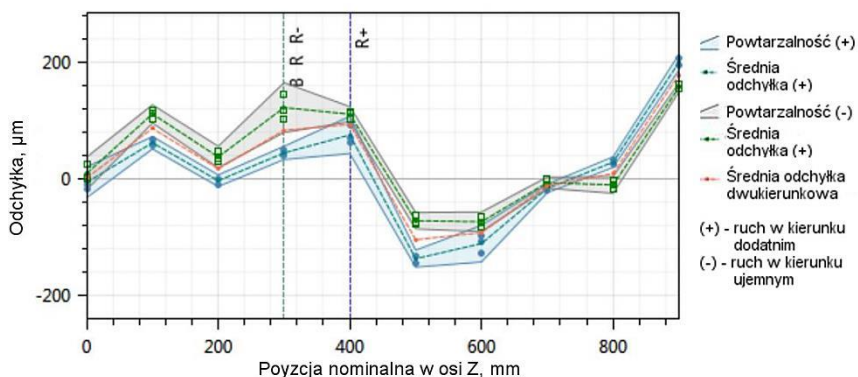
Rys. 4. z. 5 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y4, uzyskane podczas próby z obciążeniem



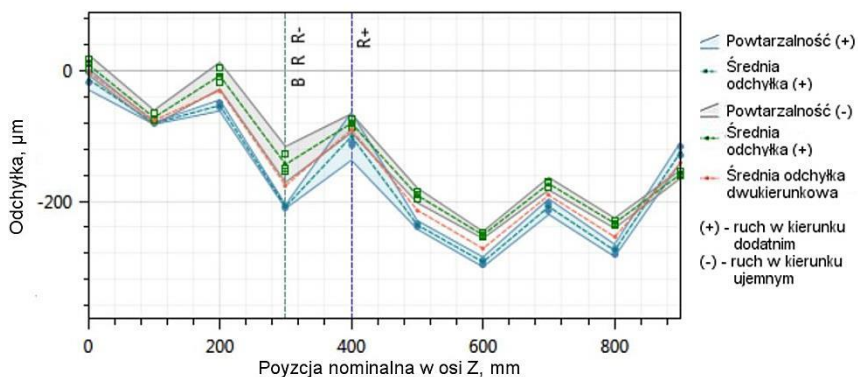
Rys. 5. z. 5 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Y5, uzyskane podczas próby z obciążeniem

Załącznik 6

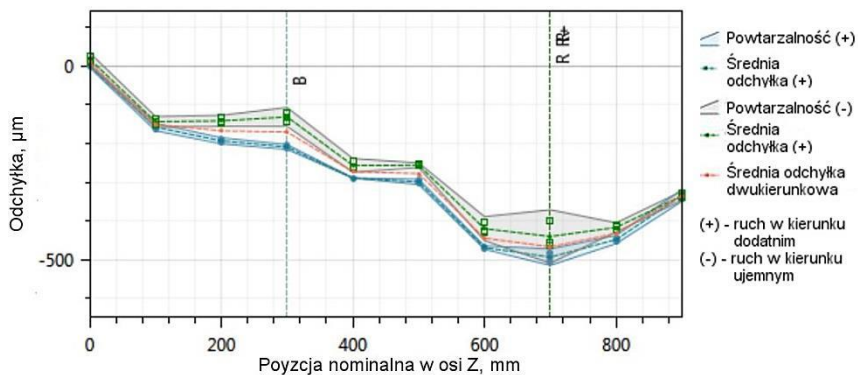
Wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego interferometrem laserowym, podczas przesuwu wzdłuż kierunku Z, podczas próby z obciążeniem



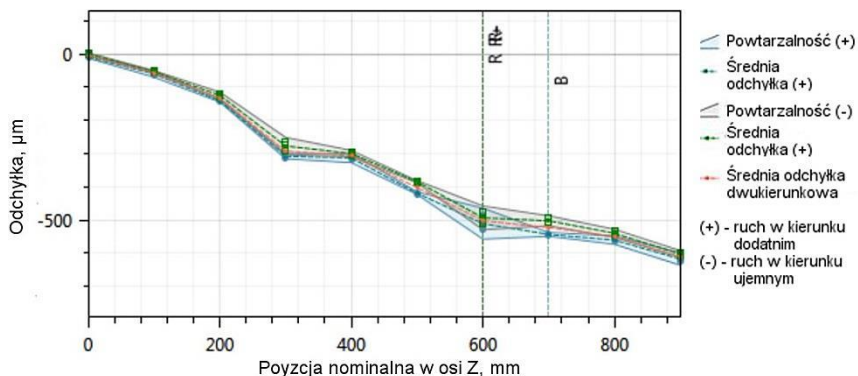
Rys. 1. z. 6 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z1, uzyskane podczas próby z obciążeniem



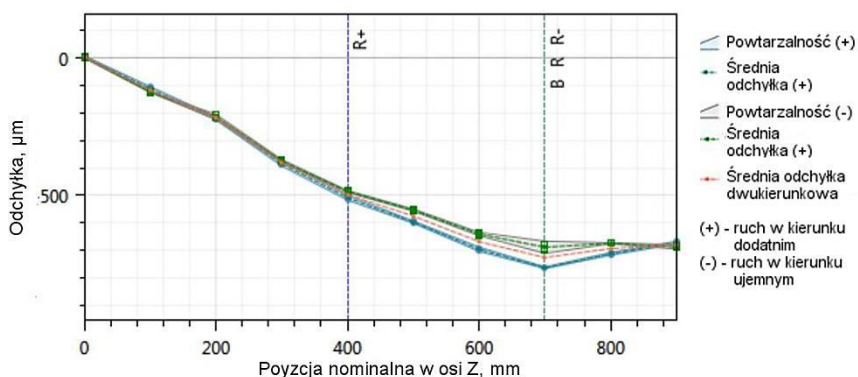
Rys. 2. z. 6 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z2, uzyskane podczas próby z obciążeniem



Rys. 3. z. 6 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z3, uzyskane podczas próby z obciążeniem



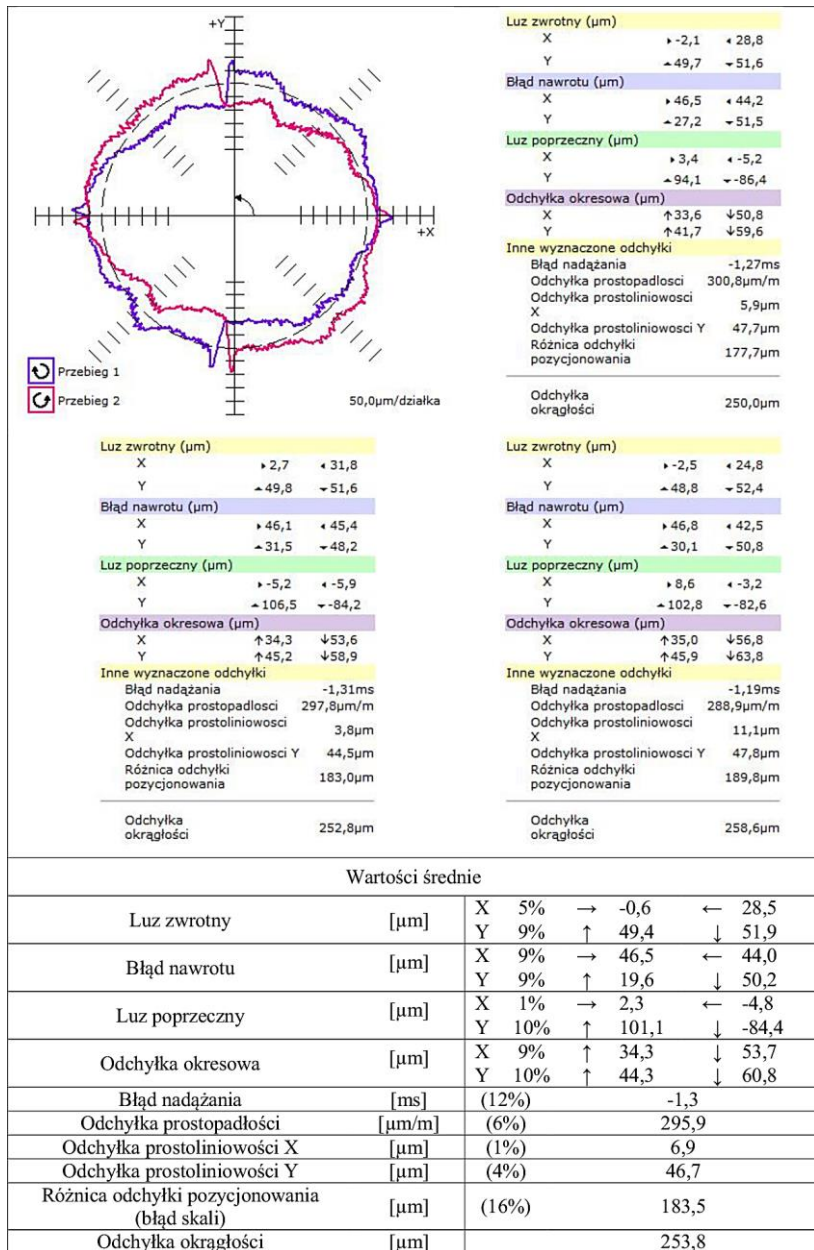
Rys. 4. z. 6 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z4, uzyskane podczas próby z obciążeniem



Rys. 5. z. 6 Odchyłki pozycjonowania wzdłuż ścieżki pomiarowej Z5, uzyskane podczas próby z obciążeniem

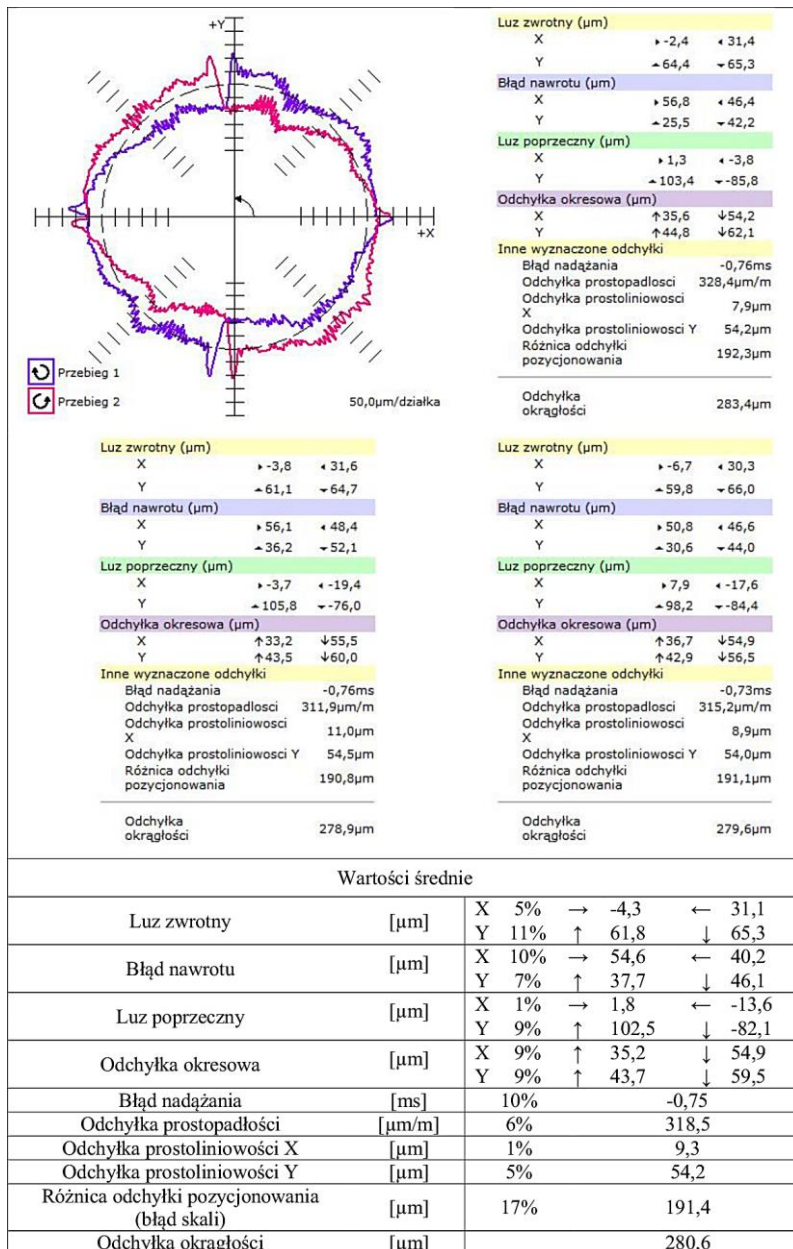
Załącznik 7

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 100$ mm, prędkość $v_f = 50$ mm/s



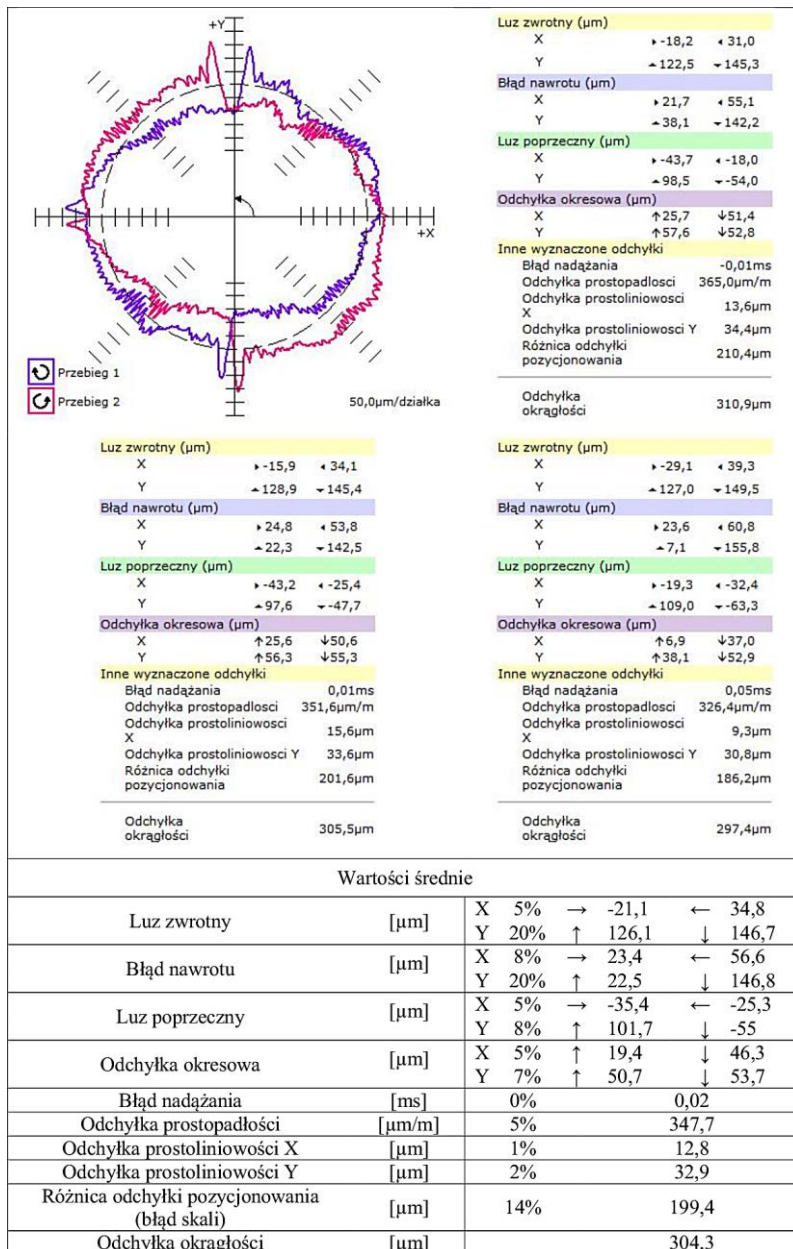
Załącznik 8

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 100\text{mm}$, prędkość $v_f = 75 \text{ mm/s}$



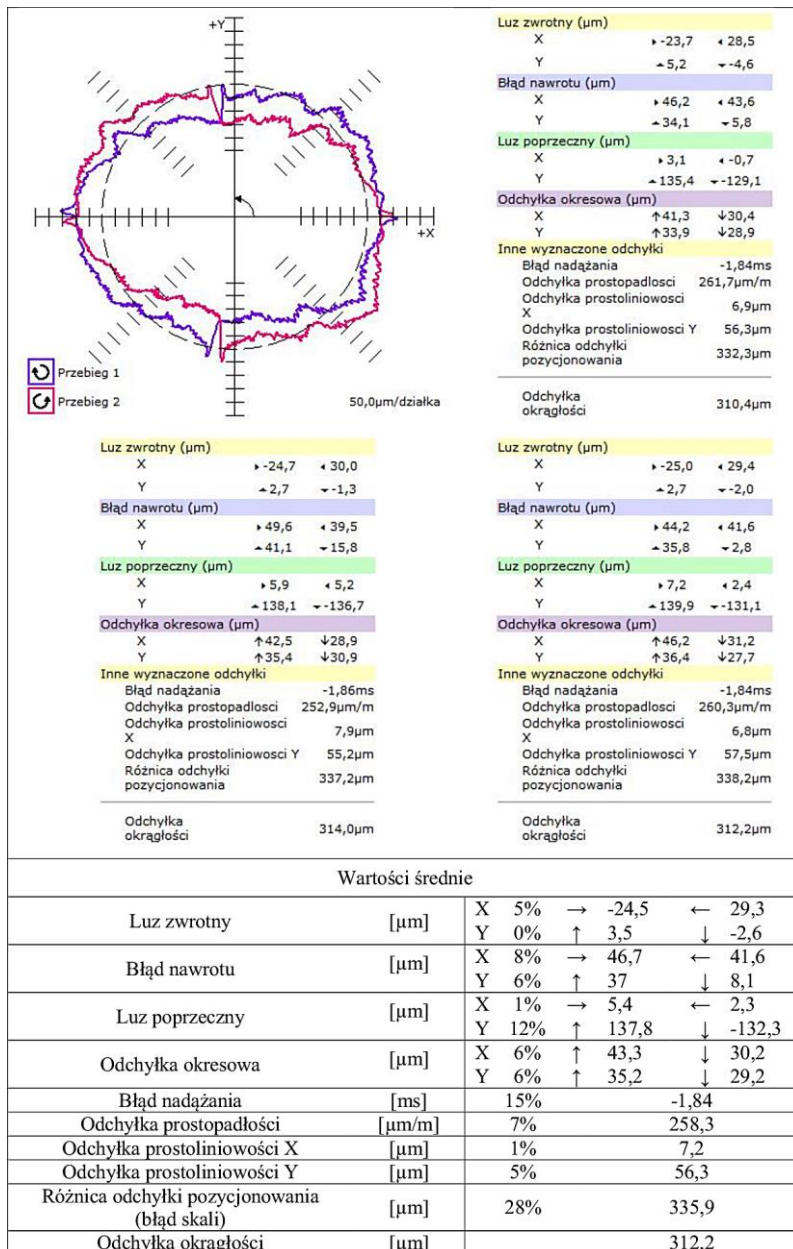
Załącznik 9

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 100$ mm, prędkość $v_f = 100$ mm/s



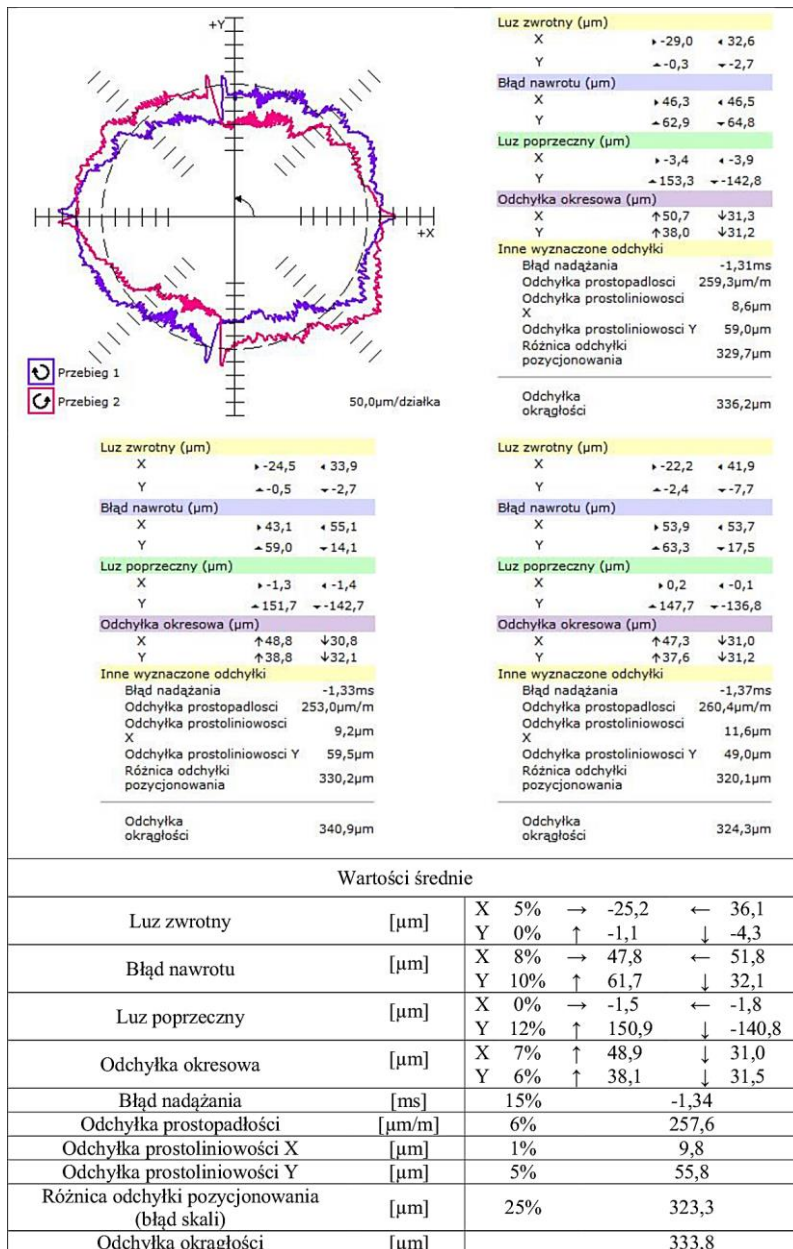
Załącznik 10

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 150$ mm, prędkość $v_f = 50$ mm/s



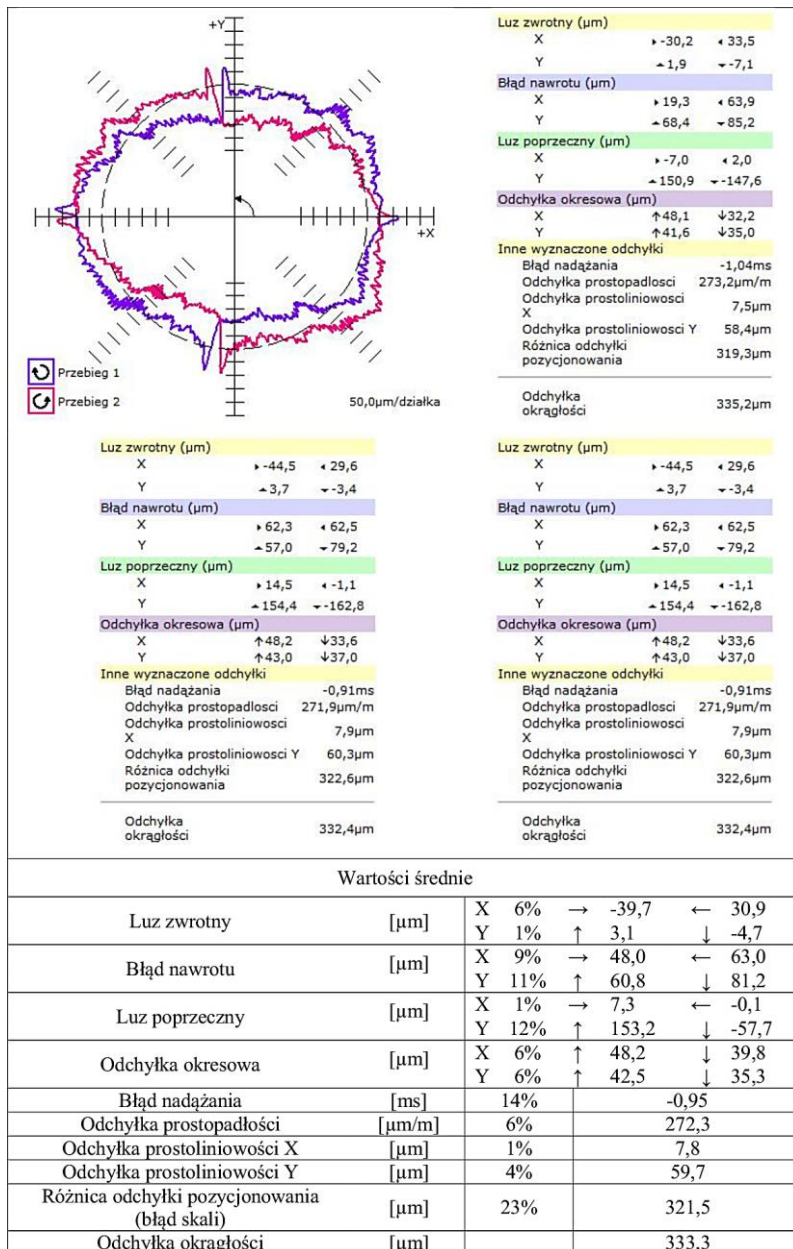
Załącznik 11

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 150$ mm, prędkość $v_f = 75$ mm/s



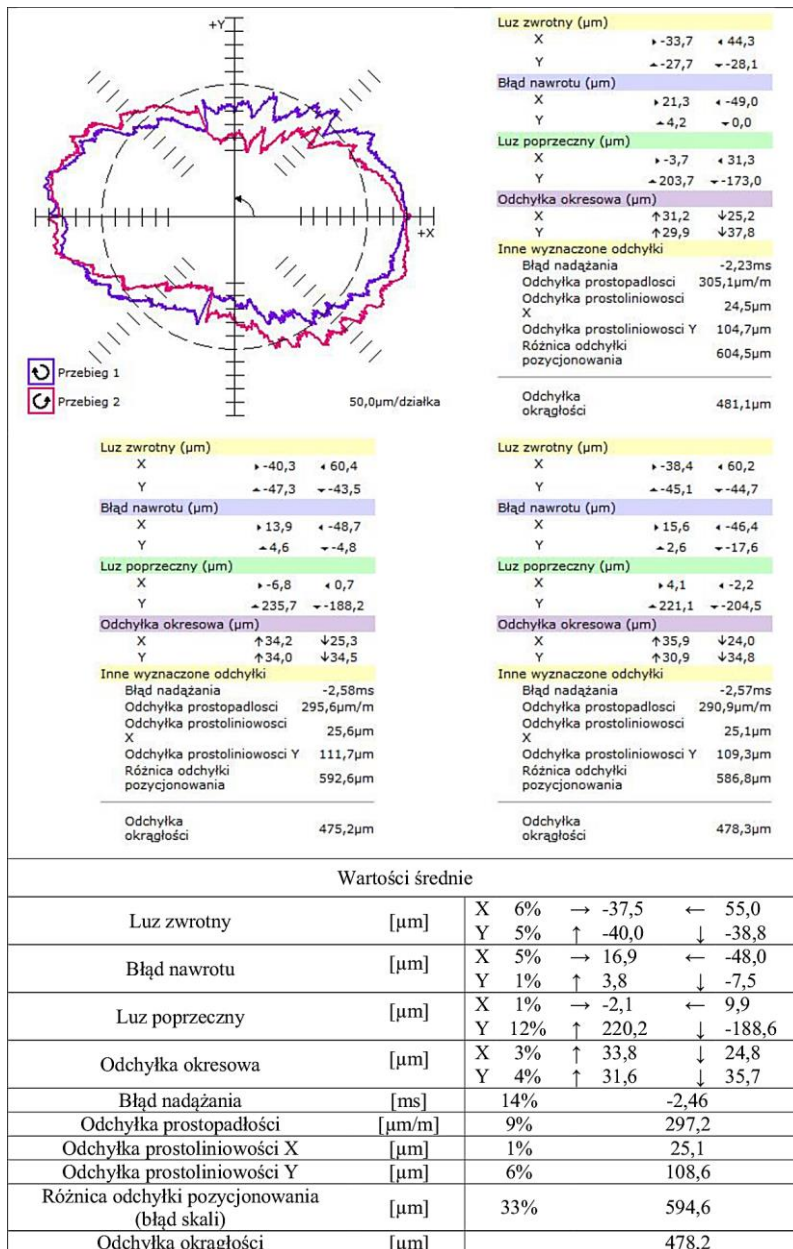
Załącznik 12

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 150$ mm, prędkość $v_f = 100$ mm/s



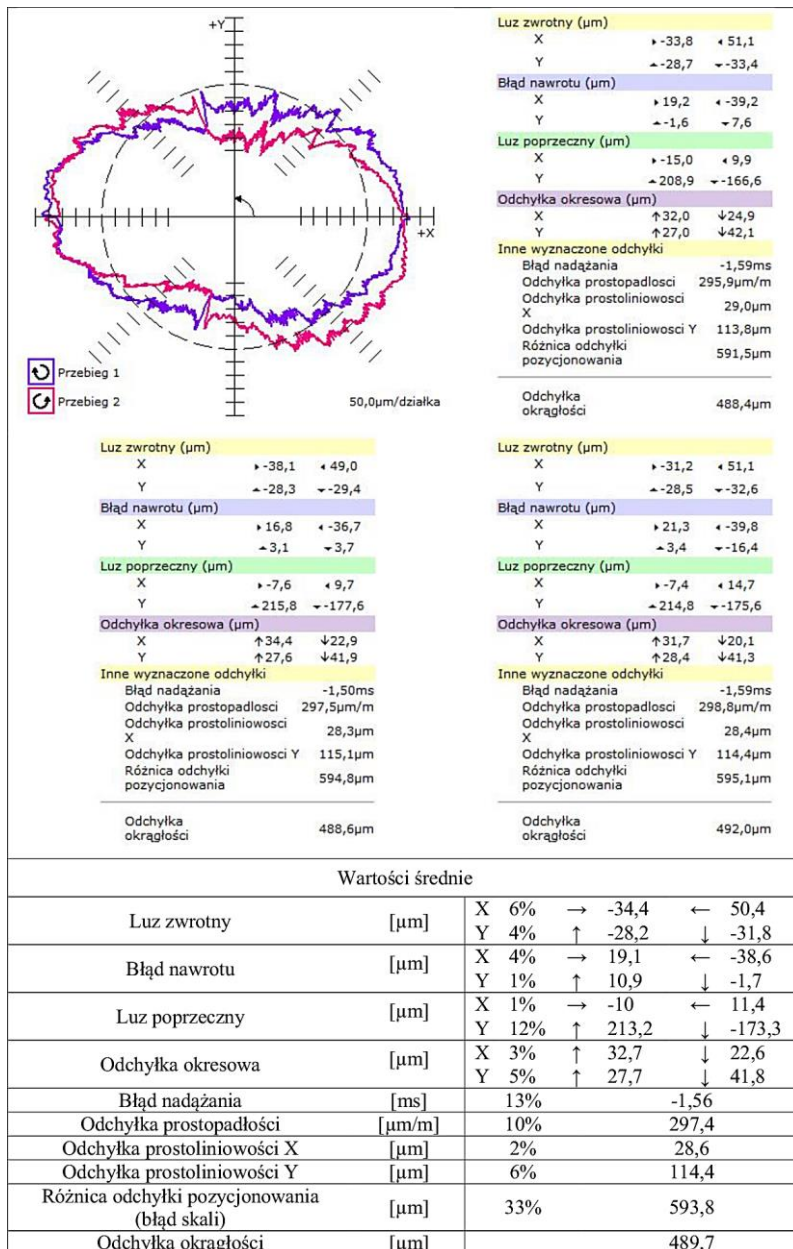
Załącznik 13

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 300$ mm, prędkość $v_f = 50$ mm/s



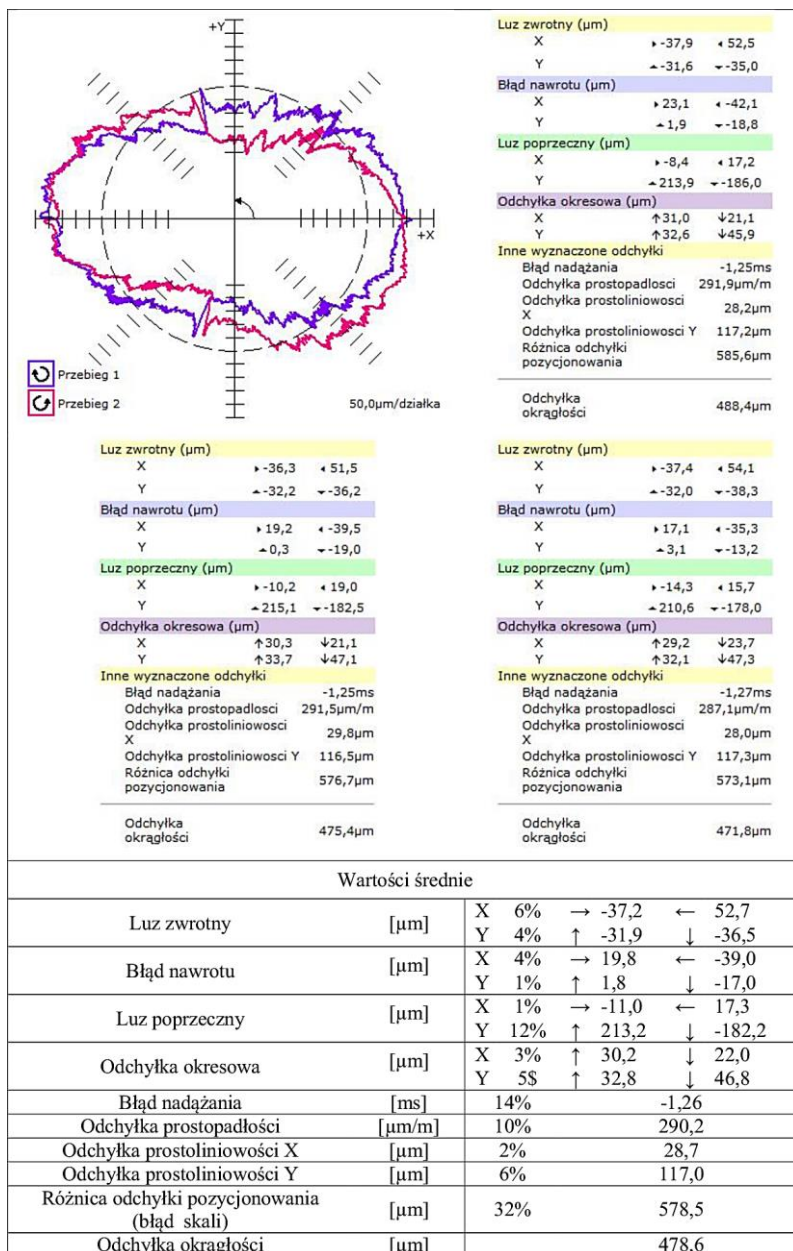
Załącznik 14

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 300$ mm, prędkość $v_f = 75$ mm/s



Załącznik 15

Wyniki testu kołowości QC-20 Ballbar, promień $R = 300$ mm, prędkość $v_f = 100$ mm/s



Załącznik 16

Dokładność i powtarzalność pozycjonowania oraz osiowa wartość zwrotna zgodne ze standardem ISO 230:2006

	Nr linii pomiarowej	Dokładność pozycjonowania [μm]			Powtarzalność pozycjonowania [μm]			Osiowa wartość zwrotna [μm] <i>B</i>	
		Jednokier.		Dwukierunkowa	Jednokier.		Dwukierunkowa		
		<i>A</i> ↑	<i>A</i> ↓	<i>A</i>	<i>R</i> ↑	<i>R</i> ↓	<i>R</i>		
bez obciążenia	Oś X	1	356,9	321,7	356,9	15,9	15,2	43,8	30,7
		2	330,3	319,8	345	17,1	26,1	51,3	32,9
		3	271,6	292,2	314,5	22,8	42,7	69,7	44,2
		4	285,5	312,8	312,8	18,7	71	71	41,4
		5	292,2	299,9	328,4	24,4	21,7	62,8	53,6
	średnia	307,3	309,28	331,52	19,78	35,34	59,72	40,56	
	Oś Y	1	578,2	552,8	669,7	78,5	80,1	201,7	147,9
		2	840	798,6	918,3	72,1	65,3	174,8	114,9
		3	1069,4	1031,7	1122,9	53,5	57	119,6	93,3
		4	1229	1204,3	1247,4	24,9	25	90,2	79,3
		5	1365,5	1356,4	1412,7	45,3	30,9	74	55,2
	średnia	1016,42	988,76	1074,2	54,86	51,66	132,06	98,12	
	Oś Z	1	253,9	184,9	253,9	22,1	24,3	61,2	46,2
		2	150,3	158,8	185,2	18,5	17,8	46,3	37,5
		3	294,5	287,5	312,1	20,7	18,6	43,2	29,6
4		355,9	354,8	370,5	12,9	17,5	55	46,1	
5		463,5	463,5	476,8	10,9	17,5	41,7	30,5	
średnia	303,62	289,9	319,7	17,02	19,14	49,48	37,98		
z obciążeniem	Oś X	1	388	402,1	454,3	12,6	19,3	103,6	92,7
		2	407,5	359,8	438,3	1,3	20	85,5	74,2
		3	406,3	406,1	433,9	10,6	22,4	69,5	66
		4	437,8	426,4	473,2	21,4	35	57	47,9
		5	415,9	394,4	417,9	28,5	41,9	49,6	35,6
	średnia	411,1	397,76	443,52	14,88	27,72	73,04	63,28	
	Oś Y	1	760,1	705	818,5	34	39,4	139	116,6
		2	942,6	954,8	1000,1	51,8	40,9	143,9	107,9
		3	1197,5	1210,3	1228,4	16,7	28	94,6	79,1
		4	1569,8	1573,3	1589	22,2	25	81,5	66,8
		5	1538,2	1535,7	1548,2	12,5	17,2	51	41,1
	średnia	1201,64	1195,82	1236,84	27,44	30,1	102	82,3	
	Oś Z	1	365,1	255,9	365,1	63,7	85,6	132,1	77,9
		2	303,4	281,7	325,1	72,8	54,8	94,9	64,7
		3	518,7	544	549,5	42,4	138,1	143,6	77
4		629,4	615,5	639,1	92,9	72	99,9	40,8	
5		774	717	774	17,4	44,5	99,6	74,6	
średnia	518,12	482,82	530,56	57,84	79	114,02	67		

Załącznik 17

Wyniki pomiaru odchyłek pozycji oraz wartości obliczonej powtarzalności pozycjonowania - pomiar szybkoklatkową kamerą wizyjną Phantom v2511

kierunek	x	z	\bar{x}	\bar{z}	l_j	\bar{l}	S_l	R_p
P1-P0	0,074	1,239	0,040	1,277	0,051	0,038	0,023	0,107
	0,011	1,223			0,062			
	0,042	1,298			0,021			
	0,042	1,266			0,011			
	0,042	1,266			0,011			
	0,011	1,345			0,074			
	0,074	1,267			0,035			
	0,026	1,314			0,039			
P2-P0	0,138	1,234	0,142	1,254	0,020	0,027	0,017	0,077
	0,105	1,221			0,050			
	0,138	1,239			0,015			
	0,138	1,256			0,005			
	0,185	1,250			0,043			
	0,136	1,271			0,019			
	0,161	1,257			0,019			
	0,138	1,300			0,047			
P3-P0	0,106	1,266	0,124	1,305	0,043	0,040	0,024	0,111
	0,106	1,298			0,019			
	0,074	1,282			0,055			
	0,122	1,301			0,004			
	0,201	1,314			0,078			
	0,138	1,336			0,034			
	0,138	1,282			0,027			
	0,106	1,361			0,059			
P4-P0	0,090	1,298	0,090	1,294	0,004	0,027	0,017	0,079
	0,074	1,282			0,020			
	0,090	1,282			0,012			
	0,082	1,259			0,035			
	0,074	1,350			0,059			
	0,074	1,314			0,026			
	0,128	1,282			0,040			
	0,106	1,282			0,020			
P5-P0	0,011	1,266	0,029	1,305	0,043	0,031	0,014	0,07
	0,014	1,293			0,019			
	0,026	1,314			0,009			
	0,044	1,273			0,036			
	0,013	1,345			0,043			
	0,011	1,296			0,020			
	0,072	1,326			0,048			
	0,042	1,329			0,027			

P6-P0	0,079	1,277	0,118	1,2965	0,044	0,028	0,019	0,086
	0,117	1,293			0,004			
	0,138	1,298			0,020			
	0,124	1,293			0,007			
	0,122	1,314			0,018			
	0,091	1,244			0,059			
	0,138	1,331			0,040			
	0,138	1,322			0,032			
	P7-P0	0,026			1,250			
0,011		1,252	0,046					
0,040		1,310	0,022					
0,042		1,314	0,026					
0,026		1,298	0,016					
0,058		1,298	0,021					
0,042		1,298	0,010					
0,067		1,287	0,028					
P8-P0		0,074	1,246	0,103	1,289	0,052	0,031	0,020
	0,074	1,276	0,032					
	0,100	1,282	0,007					
	0,106	1,298	0,010					
	0,074	1,345	0,063					
	0,138	1,282	0,036					
	0,120	1,293	0,018					
	0,138	1,287	0,035					

Załącznik 18

Zestawienie maksymalnych i średnich odchyłek pozycjonowania, dokładności i powtarzalności dla różnych metod pomiarowych (niepewność pomiaru U ($k=2$)).

Parametr	Metoda pomiaru																																							
	Interferometria laserowa						Test kołowości Ballbar						Wizyjna kamera		PONTOS																									
	Kierunek ruchu efektora						$r = 100$ mm		$r = 150$ mm		$r = 300$ mm		Odchyłka zmierzona wzdłuż osi X oraz osi Z		Odchyłka zmierzona wzdłuż osi X oraz osi Z																									
	X		Y		Z		v_f [mm/s]		v_f [mm/s]		v_f [mm/s]		ΔX	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ																							
	bo		zo		bo		zo		bo		zo		bo	zo	bo	zo	bo	zo																						
Maksymalna odchyłka pozycjonowania (dla Ballbar – odchyłka okrągłości)	346,8		391,9		1342,1		1535,9		458,6		764,4		253,8		289,9		310,1		320,1		335,9		334,5		479,8		489,6		499,3		140,0		111,0		80,0		124,0		43,0	
Odchyłka średnia pozycjonowania (dla Ballbar odchyłka okrągłości)	332,0		387,9		1320,4		1529,7		455,8		736,1		247,1		282,1		307,1		313,5		331,9		332,6		477,2		482,3		487,5		45,8		41,8		47,4		78,9		57,6	
Powtarzalność R , RP , Rp (R - dla interferometru, RP - dla systemu Pontos, Rp - dla kamery szybkiej wizyjnej)	59,7		73,0		132,0		102,0		49,5		114		-		-		-		-		-		-		-		-		85,5		-		41,1		-		-			
Dokładność A	331,5		443,52		1074,2		1236,8		319,7		530,6		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-			
Niepewność pomiaru U ($k = 2$)	$\pm 14,3$		$\pm 4,5$		$\pm 20,5$		$\pm 8,3$		$\pm 1,7$		$\pm 33,5$		$\pm 8,3$		$\pm 7,3$		$\pm 2,7$		$\pm 3,4$		$\pm 2,8$		$\pm 1,6$		$\pm 2,5$		$\pm 4,7$		$\pm 7,7$		± 72		-		-					

bo – bez obciążenia, zo – z obciążeniem



JERZY JÓZWIK jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (od 1998) oraz Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Chełmie (od 2007), gdzie pełni funkcję Zastępcy Dyrektora Instytutu Nauk Technicznych i Lotnictwa. Od 2012 roku kieruje Centrum Studiów Inżynierskich PWSZ w Chełmie. Członek Lubelskiego Towarzystwa Naukowego LTN oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Mechaników Polskich, a także Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją i Polskiego Towarzystwa Spawalniczego, w którym od roku 2015 pełni funkcję Przewodniczący Sekcji Naukowo-Technicznej PTS o. Lublin. Odznaczony Brązowym Krzyżem Zasługi Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej (2011). Ukończył Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej na kierunku: Mechanika i Budowa Maszyn na specjalnościach Technologia Maszyn oraz Przetwórstwo Tworzyw Wielkocząsteczkowych. Autor ponad 150 recenzowanych artykułów i publikacji naukowych, z zakresu monitorowania oraz diagnostyki obrabiarek i procesów obróbki ubytkowej. Współautor monografii (2014) oraz dwóch skryptów uczelnianych (2013, 2015), redaktor jednej monografii w języku angielskim (2009) oraz współredaktor dwóch kolejnych (2005, 2007). Współautor patentu i czterech zgłoszeń patentowych (2012, 2014, 2015). Promotor prac inżynierskich i magisterskich oraz promotor pomocniczy pracy doktorskiej. Pracował w Zakładach Remontowych Energetyki Warszawa oraz prywatnym przedsiębiorstwie WEZAN. Stażysta i wykładowca wielu kursów i szkoleń realizowanych ze środków Unii Europejskiej. Członek komitetów naukowych i organizacyjnych wielu konferencji zarówno o zasięgu krajowym jak i międzynarodowym. Członek komitetów naukowych i recenzent artykułów w czasopiśmie naukowych. Recenzent i członek Kapituły w ogólnopolskim konkursie na najlepszą pracę dyplomową ogłoszonym przez firmę Sandvik Coromant w Polsce. Aktywnie zaangażowany w działalność programu Erasmus+ i Ceepus, zarówno w Politechnice Lubelskiej jak i Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie. Nagradzany wielokrotnie przez J.M. Rektora Politechniki Lubelskiej i Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Chełmie.



DAWID OSTROWSKI, absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Ukończył studia inżynierskie na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (2014 r.) oraz studia magisterskich na kierunku Inżynieria Produkcji (2015 r.), specjalność: Projektowanie Procesów Technologicznych na Obrabiarki Sterowane Numerycznie prowadzonych przez Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej. Od 2015 roku pracownik Centrum Studiów Inżynierskich w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie. Współautor wielu publikacji z zakresu oceny dokładności robotów przemysłowych, diagnostyki maszyn oraz technologii laserowego stapiania proszków metali.

ISBN: 978-83-7947-235-2



9 788379 472352