



Politechnika Poznańska
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Instytut Technologii Mechanicznej
Zakład Projektowania Technologii

Rozprawa doktorska

MARCIN WIŚNIEWSKI

**BADANIA DOKŁADNOŚCI I POWTARZALNOŚCI POZYCJONOWANIA
ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH**

Poznań 2015

Promotor

dr hab. inż. Olaf Ciszak

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Politechnika Poznańska

*Składam serdeczne podziękowania
Promotorowi dr. hab. inż. Olafowi Ciszakowi,
za pomoc merytoryczną oraz cenne wskazówki.*

*Dziękuję przyjaciołom i najbliższym,
którzy mnie wspierali i mobilizowali w dążeniu do celu.*

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract.....	4
Słownik terminów	5
Wprowadzenie	9
1. Analiza literatury	10
1.1. Budowa robotów przemysłowych	10
1.2. Kinematyka robotów przemysłowych.....	12
1.3. Czynniki wpływające na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych	16
1.4. Kalibracja a pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.....	18
1.5. Sposoby sterowania ruchem robota przemysłowego i jego wpływ na zadaną pozycję.....	20
1.6. Wytyczne pomiaru dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych wg PN-ISO 9283 na przykładzie robota Fanuc M-16iB	23
1.7. Obliczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.....	28
2. Uzasadnienie tematu, zakres, cele i tezy pracy	32
3. Pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	33
3.1. Metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.....	33
3.2. Porównanie metod pomiaru dla dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	41
3.3. Autorska metoda pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	44
3.3.1. Opis urządzenia pomiarowego.....	44
3.3.2. Obciążenie nominalne i ustalenie położenia punktu TCP	47
3.3.3. Program pomiarowy i ustawienie urządzenia pomiarowego	48
3.3.4. Program rejestrujący położenie punktów pomiarowych – CamMeasure 10	51
3.3.5. Program do obliczeń dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	52

3.4. Przeprowadzenie pomiarów – obliczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	55
3.5. Analiza wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych uzyskanych na podstawie normy ISO 9283	57
3.6. Sprawdzenie uzyskanych wyników na zgodność z rozkładem normalnym.....	80
3.7. Sprawdzenie zdolności procesu pomiaru	96
4. Szybka metoda pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.....	105
4.1. Istota szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	105
4.2. Adaptacja szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych do warunków przemysłowych	112
4.3. Weryfikacja szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych	114
4.4. Zastosowanie metody prognozowania do określania powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych	121
5. Podsumowanie i wnioski.....	126
6. Bibliografia.....	128
Załączniki	133

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Streszczenie

Przedmiotem niniejszej dysertacji jest zagadnienie ustalania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. W pracy opisano badania, których celem było opracowanie nowej – szybkiej – metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych, z uwzględnieniem wytycznych zawartych w normie ISO 9283.

W pracy opisano zasady i metody pomiaru oraz zidentyfikowano i scharakteryzowano czynniki mające wpływ na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych. Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania zostały zrealizowane na podstawie autorskiej metody pomiaru dla wybranych robotów przemysłowych w dwóch wariantach: pełnego oraz ograniczonego dostępu do robota przemysłowego na stanowisku pracy.

W kolejnym etapie analizie poddano zmienność wyznaczonej wartości powtarzalności pozycjonowania względem przeprowadzonej liczby cykli pomiarowych, która umożliwiła określenie jej minimalnej liczby. Wyznaczone wskaźniki C_p i C_{pk} oraz przeprowadzone testy zdolności procesu, pozwoliły wykazać i potwierdzić jego dużą zdolność pomiaru.

Do określenia powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w zmieniającej się przestrzeni roboczej zastosowano metodę prognozowania. Przy zastosowaniu narzędzia regresji liniowej wykonane zostały badania analityczne dla robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L, a uzyskane wyniki wykazały niekorzystne dopasowanie linii regresji do rzeczywistych danych.

Przeprowadzone testy i badania w warunkach przemysłowych potwierdzają, że opracowana metoda pomiaru umożliwia znaczne skrócenie czasu pomiaru i wykonywanie procedur kontroli/testowania robotów przemysłowych na stanowiskach pracy w trakcie produkcji. Wyznaczone w ten sposób wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania dla ograniczonej liczby cykli pomiarowych nie wykazują znaczającej różnicy od uzyskanych wyników dla procedury zgodnej z normą.

Testing the Position Accuracy and Repeatability of an Industrial Robots

Abstract

The subject of this dissertation is the issue of determining the accuracy and repeatability of industrial robots positioning. The dissertation presents research that led to the development of new, rapid method of measurement accuracy and repeatability of industrial robots positioning in industrial conditions, taking into account the contained in the standard ISO 9283.

This paper describes the principles and methods of measurement, identified and characterized factors affecting the accuracy and repeatability of industrial robots positioning. Research of accuracy and repeatability of positioning were carried out on the basis of the author's method of measurement for selected industrial robots in two versions: full and limited access to an industrial robot at the workplace.

In the next step, was analyzed the variability of performed positioning repeatability value terms of the number of measuring cycles, which allowed to determine the minimum number of them. Designated C_p and C_{pk} indices and carried out process capability tests showed that the developed measurement process meets the quality requirements.

To determine the repeatability of positioning industrial robots in changing the workspace used method of forecasting. Using linear regression performed analytical tests for industrial robot Fanuc M-16iB/10L, and the results showed negative regression line fit to the actual data.

Tests and studies in industrial conditions confirm that the developed method for the measurement significantly reduces measurement time and performance of procedures of inspection / testing for industrial robots at work stations during the production process. Thus designated the accuracy and repeatability of positioning for a limited number of measurement cycles show no significant difference from the results obtained in accordance with the standard procedure.

Słownik terminów

W pracy stosowano następujące pojęcia podstawowe [1]:

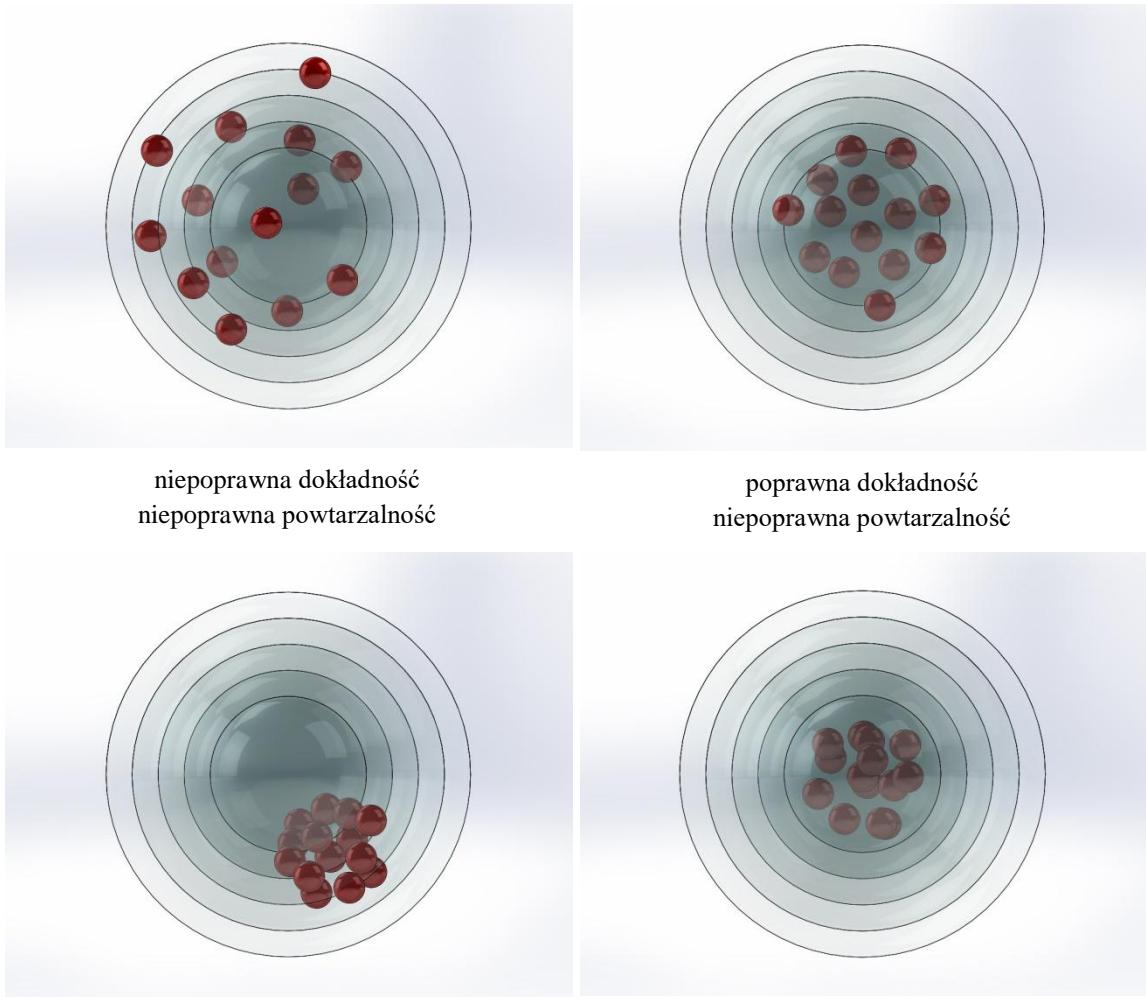
- **baza** – platforma lub struktura, do której przymocowany jest początek pierwszego członu struktury przegubowej;
- **bazowa** powierzchnia montażowa – powierzchnia łącząca robota z konstrukcją nośną dla niego przeznaczoną;
- **chwytak** – element roboczy zaprojektowany do uchwycenia i trzymania;
- **cykl** – pojedyncza realizacja programu użytkowego;
- **człon** – sztywna bryła, która zachowuje stałą relację między przegubami;
- **element roboczy** – urządzenie zaprojektowane specjalnie do zamocowania na interfejsie mechanicznym, aby umożliwić robotowi wykonanie jego zadań, np. chwytak, pistolet natryskowy;
- **instalowanie** – operacja polegająca na ustawieniu robota na jego miejscu i podłączeniu go do zasilania i źródeł mocy;
- **interfejs mechaniczny** – powierzchnia montażowa na końcu struktury przegubowej, do której jest przymocowany element roboczy;
- **kinematyka odwrotna** – zależność matematyczna, która wyznacza wartości współrzędnych połączeń na podstawie wartości w układzie współrzędnych narzędzia;
- **kinematyka prosta** – zależność matematyczna, która wyznacza wartości w układzie współrzędnych narzędzia, na podstawie wartości współrzędnych połączeń;
- **kiść** (osie dodatkowe) – zespół połączonych członów i napędzanych przegubów między ramieniem a elementem roboczym, który podtrzymuje, ustawia i orientuje element roboczy;
- **konfiguracja** – zestaw wartości położen przegubów równy liczbie osi podstawowych, który całkowicie determinuje ukształtowanie ramienia w każdej chwili;
- **manipulator** – maszyna, mechanizm składający się z kilku połączonych członów, które przemieszczają się wzajemnie w celu uchwycenia i/lub przemieszczenia obiektu (części lub narzędzia), zwykle o kilku stopniach swobody;
- **moment maksymalny** (moment obrotowy maksymalny) – moment (moment obrotowy), który może być wywierany ciągle na interfejs mechaniczny, (wykluczając efekt bezwładności), nie powodujący trwałego uszkodzenia mechanizmu robota;
- **nacisk maksymalny** – nacisk, który może być wywierany ciągle na interfejs mechaniczny, wykluczając efekt bezwładności, nie powodujący trwałego uszkodzenia mechanizmu robota;
- **normalne warunki użytkowania** – zakres warunków otoczenia (tj. temperatura, wilgotność) i innych parametrów, które mają wpływ na właściwości robota (takie jak niestabilność zasilania elektrycznego, pola elektromagnetyczne), przy których obowiązują właściwości robota wyspecyfikowane przez producenta;
- **obciążenie** – siła i/lub moment na interfejsie mechanicznym, które mogą być wywierane w różnych kierunkach ruchu, przy określonych warunkach prędkości i przyśpieszenia (obciążenie jest funkcją masy, momentu bezwładności oraz statycznych i dynamicznych sił przenoszonych przez robota);

- **obciążenie dodatkowe** – obciążenie, które może być przeniesione przez robota, ponad obciążenie znamionowe i przyłożone nie do interfejsu mechanicznego, lecz gdzie indziej – do struktury przegubowej (zwykle do ramienia);
- **obciążenie graniczne** – maksymalne obciążenie podane przez producenta, które może być przyłożone do interfejsu mechanicznego bez jakiegokolwiek uszkodzenia lub defektu mechanizmu robota, w określonych warunkach eksploatacyjnych;
- **obciążenie znamionowe** – maksymalne obciążenie, które może być przyłożone do interfejsu mechanicznego w normalnych warunkach użytkowania bez pogorszenia którejkolwiek wyspecyfikowanej właściwości;
- **operator** – osoba wyznaczona do uruchamiania, monitorowania i zatrzymywania planowanych operacji robota;
- **oś** – kierunek używany do sprecyzowania ruchu typu liniowego lub obrotowego robota;
- **pelzanie dokładności pozycji** – zmiana dokładności pozycjonowania w czasie;
- **pozycja** – kombinacja położenia i orientacji w przestrzeni;
- **pozycja kalibracji** – kreślona pozycja stosowana do ustalenia geometrycznych odniesień robota;
- **pozycja osiągana** – pozycja osiągnięta przez robota w odpowiedzi na pozycję zadaną;
- **pozycja zadana** (pozycja zaprogramowana) – pozycja określona przez program użytkowy;
- **praca automatyczna** – stan, w którym robot wykonuje zamierzony program użytkowy;
- **prędkość pojedynczego połączenia, prędkość pojedynczej osi** – prędkość danego punktu, wynikająca z ruchu określonego pojedynczego połączenia;
- **prędkość wzduż ścieżki** – zmiana położenia (pozycji) wzduż ścieżki w jednostce czasu;
- **przestrzeń maksymalna** – przestrzeń zdefiniowana przez producenta, w której mogą poruszać się części robota wraz z przestrzenią, w której może poruszać się element roboczy i obiekt manipulacji;
- **przestrzeń ograniczona** – fragment przestrzeni maksymalnej, wyznaczony przez urządzenia ograniczające;
- **przestrzeń operacyjna** – fragment przestrzeni ograniczonej, która jest aktualnie użytkowa podczas wykonywania wszystkich ruchów określonych przez program użytkowy;
- **przestrzeń robocza** – przestrzeń, która może być osiągnięta przez punkt odniesienia kości z dodaniem zasięgu obrotu lub przemieszczenia każdego połączenia kości (przestrzeń robocza jest mniejsza niż przestrzeń, która może być osiągana przez wszystkie przemieszczające się części manipulatora);
- **przyłącze elementu roboczego** – kołnierz na końcu struktury przegubowej, urządzenie ustalające lub dodatkowa część mocującą element roboczy na końcu struktury przegubowej;
- **przyspieszenie pojedynczego połączenia, przyspieszenie pojedynczej osi** – przyspieszenie danego punktu wynikające z ruchu określonego pojedynczego połączenia;
- **przyspieszenie wzduż ścieżki** – zmiana prędkości wzduż ścieżki w jednostce czasu;
- **punkt odniesienia kości** – punkt przecięcia dwóch *najgłębszych* osi dodatkowych (tj. tych, które zamykają osie podstawowe) lub, jeżeli one nie istnieją, określony punkt na najgłębszej osi dodatkowej;

- **punkt przejścia** – pozycja zadana (nauczona lub zaprogramowana), którą osie robota będą osiągać z odchyłką o wartości zależnej od przebiegu prędkości dojścia osi do tej pozycji i wyszczególnionych kryteriów przejścia (prędkość, odchylenie pozycji);
- **punkt TCP** – punkt środkowy narzędzia, punkt zdefiniowany dla danego zastosowania, odniesiony do układu współrzędnych interfejsu mechanicznego;
- **punkt zatrzymania** – pozycja zadana (nauczona lub zaprogramowana), która będzie osiągnięta przez osie robota zadaną prędkością równą zeru i bez odchyłki pozycjonowania;
- **ramię** (osie podstawowe) – zespół połączonych członów i napędzanych przegubów tworzących łańcuch kinematyczny, który ustawia położenie kości;
- **robot przemysłowy** – automatycznie sterowany, przeprogramowalny, uniwersalny manipulator programowalny w trzech lub więcej osiach, stacjonarny lub mobilny, przeznaczony do przemysłowej automatyzacji;
- **rozdzielcość** – najmniejszy przyrost przemieszczenia, który może być osiągnięty przez każdą os lub przegub robota;
- **sterowanie od pozycji do pozycji** – procedura sterowania, w której użytkownik może narucić robotowi przejście przez pozycje zadane bez określenia ścieżki, która jest między pozycjami;
- **sterowanie według ścieżki ciąglej** – procedura sterowania, w której użytkownik może narucić robotowi ścieżkę ruchu z zaprogramowaną prędkością między pozycjami zadanymi;
- **ścieżka** – uporządkowany zbiór pozycji;
- **trajektoria** – ścieżka wyrażona w funkcji czasu;
- **transformacja współrzędnych** – proces zmiany współrzędnych pozycji z jednego układu współrzędnych na drugi;
- **tryb pracy** – stan układu sterowania robota;
- **tryb pracy automatyczny** – tryb pracy, w którym układ sterowania robota działa zgodnie z programem użytkowym;
- **tryb pracy ręczny** – tryb pracy, w którym robot może być sterowany, np. przyciskiem, drążkiem sterowym, który wyłącza działanie automatyczne;
- **układ sterowania** – zestaw sterowania logicznego i mocy, który pozwala monitorować i sterować strukturą mechaniczną robota i komunikować się ze środowiskiem (tj. wyposażeniem i użytkownikami);
- **układ współrzędnych globalny** – stacjonarny układ współrzędnych odniesiony do Ziemi, który jest niezależny od ruchu robota;
- **układ współrzędnych interfejsu mechanicznego** – układ współrzędnych odniesiony do interfejsu mechanicznego;
- **układ współrzędnych narzędzia** – układ współrzędnych odniesiony do narzędzia lub elementu roboczego związanego z interfejsem mechanicznym (odniesiony do układu współrzędnych interfejsu mechanicznego);
- **układ współrzędnych podstawowy** – układ współrzędnych odniesiony do bazowej powierzchni montażowej;
- **układ współrzędnych połączenia** – układ współrzędnych odniesiony do osi połączenia; współrzędne połączenia, które określono w stosunku do poprzedzających współrzędnych połączenia lub do innego układu współrzędnych;

Dokładność pozycjonowania – różnica między pozycją zadaną i średnią pozycją osiąganą, gdy osiąganie pozycji zadanej następuje z tego samego kierunku.

Powtarzalność pozycjonowania – miara rozrzutu odchyleń między pozycjami osiągającymi przy osiąganiu tej samej pozycji zadanej z tego samego kierunku.



Porównanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania [2]

Wprowadzenie

Rynek robotów przemysłowych rozwija się od ponad 50 lat. Pierwszy robot mający za zadanie zastąpienie człowieka przy wykonywaniu powtarzalnej i niebezpiecznej pracy na linii produkcyjnej został zainstalowany w fabryce General Motors [3]. W tamtym okresie rynek robotów przemysłowych napędzała branża motoryzacyjna. Od 2010 roku liczba sprzedawanych robotów przemysłowych co roku przekracza 100 tysięcy sztuk [4].

Obserwując rozwój rynku robotów przemysłowych można zauważyc, że robotyzacja staje się coraz popularniejsza. Producenci wybierają prostsze rozwiązania, dzięki czemu instalacja robota jest coraz bardziej opłacalna. Silna konkurencja firm produkcyjnych skutkuje dalszymi inwestycjami w robotyzację, z czego korzystają przede wszystkim konsumenti, otrzymując tańsze i lepsze jakościowo wyroby [5].

Obecnie eksploatowane roboty przemysłowe charakteryzują się dużą powtarzalnością pozycjonowania. Przykładowo robot IRB 6620 firmy ABB ma dziesięciokrotnie większą powtarzalność pozycjonowania od robota IRb-6 firmy ASEA z lat 80 ubiegłego wieku. Mniejsza wartość dokładności i powtarzalności odczytana z charakterystyki robota przemysłowego świadczy o precyzyji jego ruchów. Dzięki temu możliwe jest powszechniejsze ich stosowanie nie tylko do zastępowania ciężkiej, fizycznej pracy człowieka odbywającej się niejednokrotnie w szkodliwych warunkach, ale także do realizacji precyzyjnych operacji procesów technologicznych. Podczas eksploatacji roboty przemysłowe, podobnie jak wszystkie maszyny, ulegają zużyciu, czyli tracą lub zmieniają swoje parametry. Należy zatem kontrolować ich stan techniczny, dokonując pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania. Pozwoli to uniknąć (w skrajnej sytuacji) zatrzymania stanowiska, a w konsekwencji nawet całej linii produkcyjnej. Systematyczna kontrola umożliwia bieżące monitorowanie poziomu jakości wykonywanych operacji i zagwarantuje stabilność pracy.

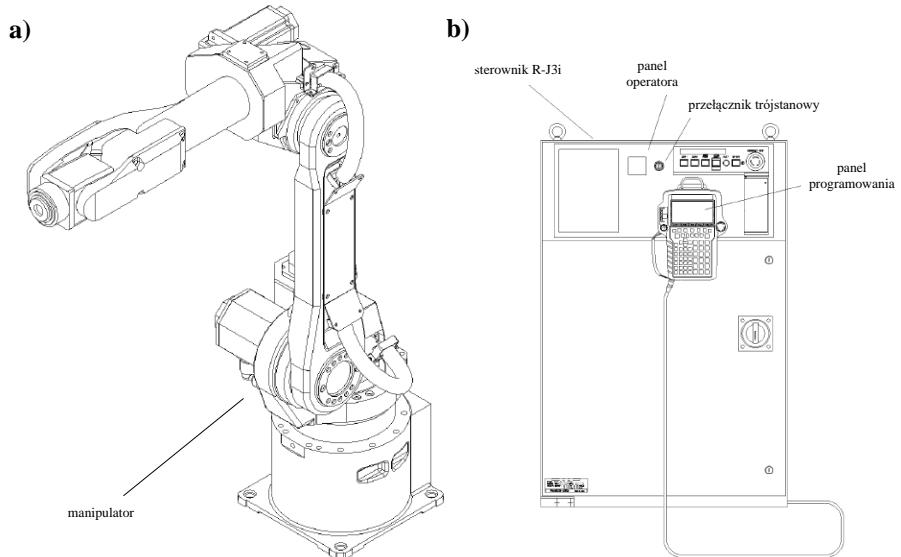
1. Analiza literatury

1.1. Budowa robotów przemysłowych

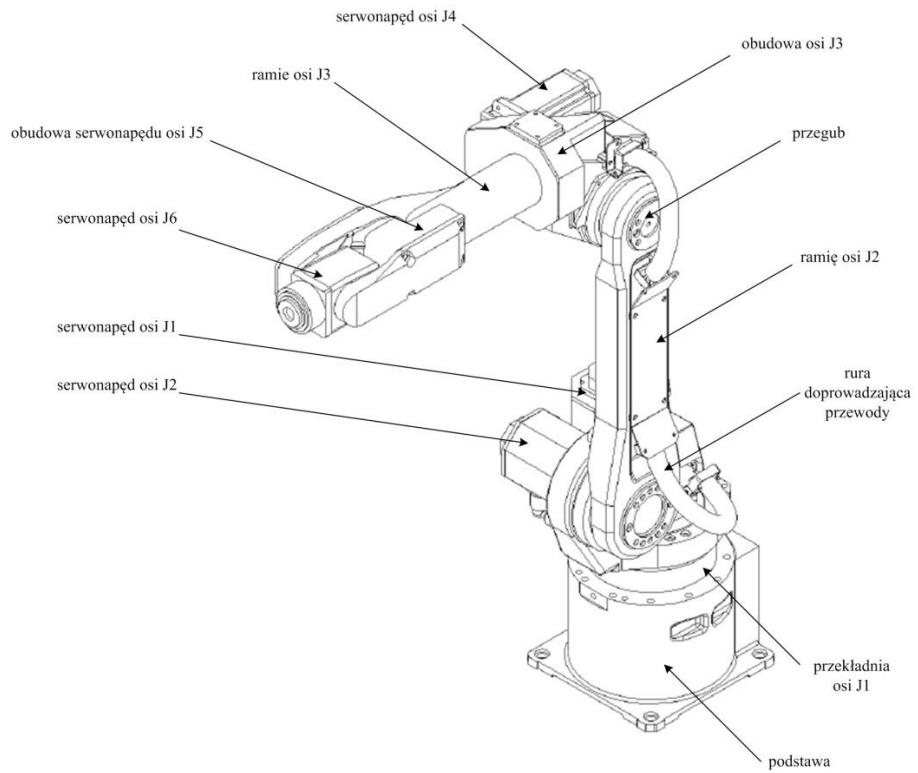
W budowie robotów można wyróżnić cztery główne podzespoły [6]:

1. manipulator – zbudowany jest z szeregu ogniw połączonych złączami, tworzącymi łańcuch kinematyczny; na jego końcu znajduje się efektor robota – najczęściej chwytak lub odpowiednie narzędzia; poszczególne złącza są napędzane zespołami napędowymi, tj. silnikami wraz z przekładniami lub siłownikami, które zapewniają ruchy efektora manipulatora w różnych kierunkach; manipulator wykonuje pracę robota przemysłowego, stąd często, chociaż niepoprawnie, oba pojęcia są utożsamiane i traktowane wymiennie;
2. układ zasilania – jego zadaniem jest przetworzenie energii pierwotnej dostarczanej do robota (najczęściej jest to energia elektryczna) na odpowiedni rodzaj energii, stosowny do rodzaju zespołów napędowych manipulatora; na ogół jest to zestaw wzmacniający mocy (w przypadku robotów z napędami elektrycznymi), kompresor z zespołem filtrów i zaworów (w jednostkach pneumatycznych) lub zasilacz hydrauliczny (w zespołach napędowych hydraulicznych);
3. system czujnikowy – dostarcza sterownikowi robota informacji o stanie manipulatora i jego otoczenia poprzez pomiar pozycji poszczególnych osi (w sposób ciągły) lub dyskretne czujniki położenia; rozróżnia się dwie grupy czujników:
 - wewnętrzne, związane z łańcuchem kinematycznym manipulatora, służące do pomiaru wzajemnych przemieszczeń i prędkości poszczególnych złącz;
 - zewnętrzne, stosowane do pomiarów wzajemnych położeń efektora robota i elementów otoczenia (np. czujniki zbliżeniowe, dotykowe czy systemy wizyjne);
4. sterownik – ma za zadanie zrealizować następujące funkcje:
 - przechować w pamięci sekwencje danych dotyczących pożądanych ruchów manipulatora,
 - zbierać i przetwarzać informacje z systemu czujnikowego robota,
 - inicjować i koordynować ruchy poszczególnych zespołów napędowych manipulatora,
 - komunikować się z innymi podzespołami stanowiska zrobotyzowanego.

Przykład budowy robota przemysłowego firmy Fanuc M-16iB przedstawiono na rys. 1.1 i 1.2. Wszystkie osie (sześć) napędzane serwomechanizmami prądu przemiennego przez przekładnie typu RV i RV-C wyposażone są w elektromechaniczne układy hamulcowe.



Rys. 1.1. Budowa robota przemysłowego firmy Fanuc [7]: a) manipulator, b) układy sterowania i zasilania

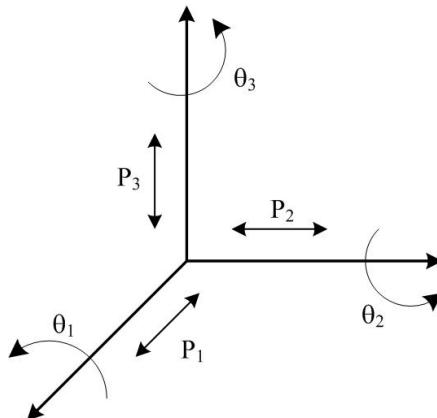


Rys. 1.2. Budowa manipulatora robota przemysłowego firmy Fanuc M-16iB [7]

Analizując budowę manipulatora robota przemysłowego (rys. 1.2) można dostrzec pierwsze potencjalne miejsca mające wpływ na dokładność jego pozycjonowania. Dokładność wykonania i montażu ogniw oraz złącz łańcucha kinematycznego wpływa na sztywność konstrukcji i jej luzy, które w określonych konfiguracjach robota przemysłowego mogą się sumować i uwidaczniać jako dodatkowe, niekontrolowane przesunięcie. Istotny wpływ na dokładność pozycjonowania ma również prawidłowy montaż oraz jakość systemów czujnikowych.

1.2. Kinematyka robotów przemysłowych

Manipulator jest otwartym łańcuchem kinematycznym złożonym z członów, które tworzą pary kinematyczne należące do odpowiednich klas. W przestrzeni trójwymiarowej człon sztywny posiada sześć stopni swobody (rys. 1.3) [8]. W celu osiągnięcia przez punkt TCP żądanego położenia w przestrzeni roboczej, stosuje się trzy stopnie swobody, zaś kolejne trzy pozwolą na jego zorientowanie.



Rys. 1.3. Liczba stopni swobody członu sztywnego [9]

Analizując liczbę graniczeń (więzów), wyróżnia się pięć klas połączeń członów, czyli pary kinematyczne od I do V klasy. W tabeli 1.1 zawarto oznaczenia par kinematycznych robotów przemysłowych. W konstrukcji współczesnych robotów przemysłowych stosowane są głównie połączenia członów V klasy, a więc pary o wzajemnym ruchu obrotowym lub liniowym [10].

Poznanie ograniczeń więzów niezbędne jest do obliczenia liczby stopni swobody łańcucha kinematycznego, ruchliwości i manewrowości.

Liczبę stopni swobody łańcucha kinematycznego robota można obliczyć ze wzoru:

$$w = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (1.1)$$

gdzie:

n – liczba członów ruchomych mechanizmu,

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 – liczba par kinematycznych, z których każda odbiera od pięciu do jednego stopnia swobody.

Ruchliwością mechanizmu nazywa się liczbę stopni swobody jego łańcucha kinematycznego obliczoną względem podstawy. Ruchliwość jest równa liczbie niezależnych napędów, które zapewniają określony ruch mechanizmu. Wzór określający ruchliwość dowolnego mechanizmu przestrzennego ma postać [11]:

$$r = w - 6 = 6(n - 1) - \sum_{i=1}^n ip_i \quad (1.2)$$

gdzie:

i – klasa pary kinematycznej,

p_i – liczba par klasy i .

Tabela 1.1. Oznaczenia par kinematycznych robotów przemysłowych [12]

Układ	Nazwa	Symbol
ruch postępowy wzdużny – teleskopowy	Y	
ruch postępowy poprzeczny	X, Y	
ruch obrotowy	A, C	
ruch obrotowy – przegub	B	
chwytak	–	
narzędzie	–	
połączenie stałe	–	

Manewrowością określa się liczbę stopni swobody łańcucha kinematycznego mechanizmu z unieruchomionymi członami: podstawą i ostatnim w łańcuchu kinematycznym.

$$m = r - 6 = 6(n - 2) \sum_{i=1}^n ip_i \quad (1.3)$$

gdzie:

i – klasa pary kinematycznej,

p_i – liczba par klasy i .

W robotyce przyjęły się terminy *oś robota* i *robot n-osiowy*. *Oś robota* oznacza oś obrotu lub przesuwu pary kinematycznej, a liczba osi jest równoznaczna z liczbą stopni ruchliwości. Oprócz parametrów syntetycznych, jakimi są liczby ruchliwości i manewrowości, mechanizm jednostki kinematycznej robota opisuje się przez podanie jego ogólnych właściwości geometrycznych, czyli tzw. struktury kinematycznej [8].

Zasady oznaczania osi współrzędnych, kierunków i zespołów ruchu, niezbędne do jednoznaczności zapisu szkicowego bądź syntetycznego struktury kinematycznej, przyjmuje się według międzynarodowych zaleceń stosowanych w technice obrabiarkowej [13] (EIA-RS 267A, ISO R 641), także zgodnie z polskimi normami [14]). Zasady te nie są jednak w pełni adekwatne do potrzeb opisu struktur jednostek kinematycznych robotów przemysłowych i jakkolwiek powszechnie znane, nie zawsze są stosowane przez międzynarodowych producentów i użytkowników techniki robotyzacyjnej [10].

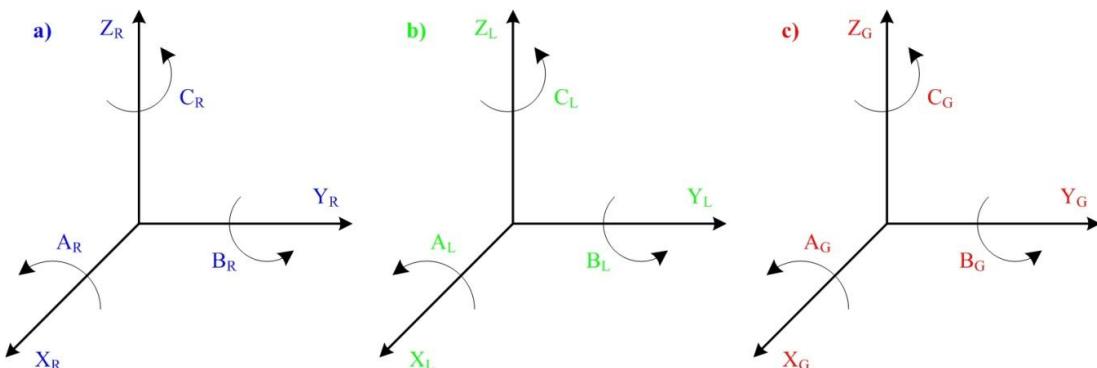
Analizując literaturę można określić zbiór zasad pomocnych przy określaniu osi współrzędnych, kierunków ruchu i zapisu struktury kinematycznej robotów [10] [15]:

1. stosuje się trzy układy odniesienia: a) lokalny (L) – orientowanie i chwytywanie manipulowanego obiektu, b) regionalny (R) który opisuje przemieszczenia ramion robota oraz c) globalny (G) dotyczący przemieszczania się robota względem stanowiska roboczego;

2. podstawowy układ osi współrzędnych jest układem prostokątnym, prawoskrętnym,

- w którym osie X i Z leżą w płaszczyźnie pionowej, przechodzącej przez ostatni zespół ruchu regionalnego (R) odcinka łańcucha kinematycznego w jego normalnym położeniu, przy czym osь X jest umieszczona równolegle do płaszczyzny podstawy robota;
3. za dodatni przyjmuje się zwrot ruchu: a) w przypadku ruchów liniowych (X, Y, Z) na zewnątrz mechanizmu, b) w przypadku ruchów obrotowych (A, B, C) – w kierunku prawoskrętnym, z uwzględnieniem dodatniego zwrota odpowiadających im osi układów współrzędnych X, Y, Z;
 4. układy osi dwóch pozostałych układów odniesienia – lokalny (L) i globalny (G), są identyczne (jeśli chodzi o kierunek i zwrot osi) z układem podstawowym oraz odpowiednio związane z ostatnim zespołem lokalnego (L) lub globalnego (G) odcinka łańcucha kinematycznego mechanizmu;
 5. zespoły ruchu (człony mechanizmu) oznacza się dużymi literami X, Y, Z, A, B, C, zaś odpowiednio do oznaczeń osi współrzędnych i rodzaju ruchu dodaje się indeks: g, r, l.
 6. syntetyczny zapis struktury łańcucha kinematycznego mechanizmu robota jest uporządkowanym zbiorem oznaczeń występujących w nim zespołów ruchu; zbiór rozpoczyna pierwszy po podstawie, a kończy ostatni – przed chwytką lub narzędziem;
 7. wielokrotność występowania zespołu ruchu danego rodzaju w tym samym odcinku łańcucha kinematycznego rozróżnia się przez numerowanie, a krotność łańcucha w obrębie całego mechanizmu lub jego wybranej części – przez zapis równolegloszeregowy;
 8. liczba stopni swobody jest równa liczbie osi robota.

Na rysunku 1.4 przedstawiono symbole stosowane przy tworzeniu schematów struktur kinematycznych manipulatorów wg normy VDI2861 [16].



Rys. 1.4. Układy odniesienia robota przemysłowego: a) regionalny (R), b) lokalny (L), c) globalny (G)

Liczبę możliwych wariantów struktur kinematycznych manipulatora określa się z według wzoru [13]:

$$V = 6^{DF} \quad (1.4)$$

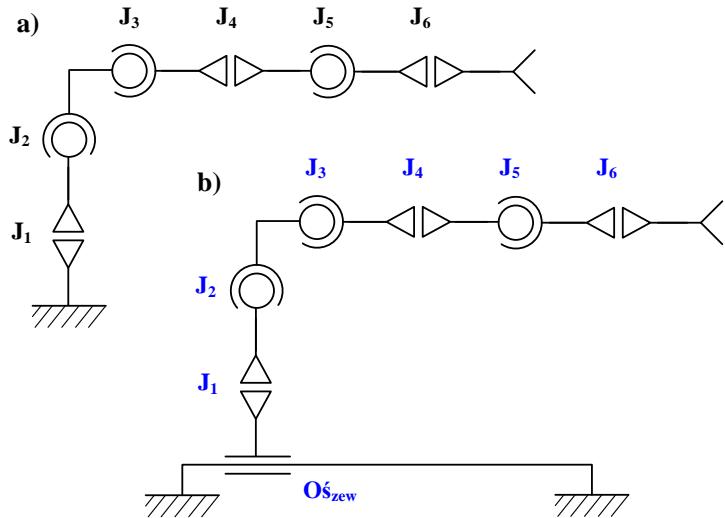
gdzie:

DF – stopnie swobody (ang. *degree of freedom*),

V – liczba kombinacji.

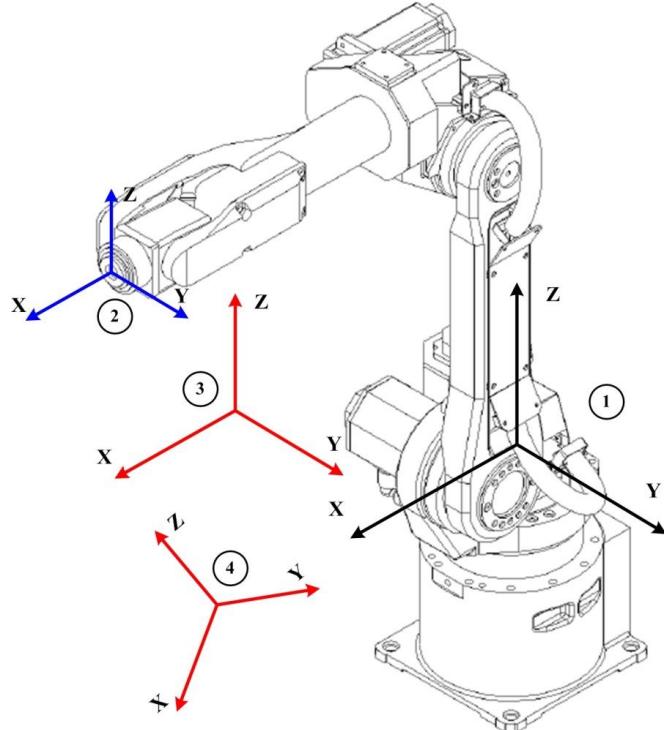
Dla robotów o sześciu stopniach swobody liczba możliwych kombinacji wynosi 46656 [8], jednak w rzeczywistości jest ona o wiele mniejsza ze względu na to, że wiele

struktur nie ma zastosowania praktycznego. Ograniczenie liczby stosowanych rozwiązań wynika z faktu, że wraz ze wzrostem liczby osi: 1) maleje dokładność układu, 2) przekazywanie napędu staje się trudniejsze, 3) czas obliczenia parametrów drogi przy sterowaniu ciągłym przez układ sterujący znacznie wzrasta oraz 4) każda dodatkowa osł powoduje wzrost kosztów. Schemat kinematyczny robota przemysłowego firmy Fanuc M-16iB przedstawiono na rys. 1.5,



Rys. 1.5. Schemat kinematyczny robota przemysłowego Fanuc M-16iB: a) zamocowany na stałej, b) zamocowany na torze jezdny

a położenie jego układów współrzędnych na rys. 1.6.



Rys. 1.6. Układy współrzędnych robota przemysłowego Fanuc M-16iB: 1) układ globalny (G), 2) układ narzędzia (lokalny [L]), 3) i 4) układ użytkownika (regionalny [R]) [7]

1.3. Czynniki wpływające na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych

Z analizy literatury [17] wynika, że *dokładność* manipulatora (część mechaniczna robota przemysłowego) to różnica odległości między punktem zadanym a rzeczywistym, natomiast *powtarzalność* to ciągłość uzyskiwania tej dokładności.

Współczesne manipulatory robotów przemysłowych, w większości charakteryzują się bardzo dobrą powtarzalnością, ale niezbyt dobrą dokładnością. Podstawowa metoda pomiaru położenia polega na zastosowaniu układów pomiarowych (np. rezolwer, enkoder) umieszczonych w każdym przegubie – na wale silnika napędzającym ten przegub lub bezpośrednio w samym przegubie, przy czym nie stosuje się bezpośredniego pomiaru pozycji narzędzia ani jego orientacji. Najczęściej pozycję narzędzia oblicza się na podstawie pomiaru kątów lub przesunięć przegubów, uwzględniając przy tym geometrię manipulatora i jego sztywność.

Manipulatory robotów przemysłowych są złożonymi mechanicznymi systemami manipulacyjnymi. Są to układy dynamiczne, nieliniowe, wielowymiarowe [18].

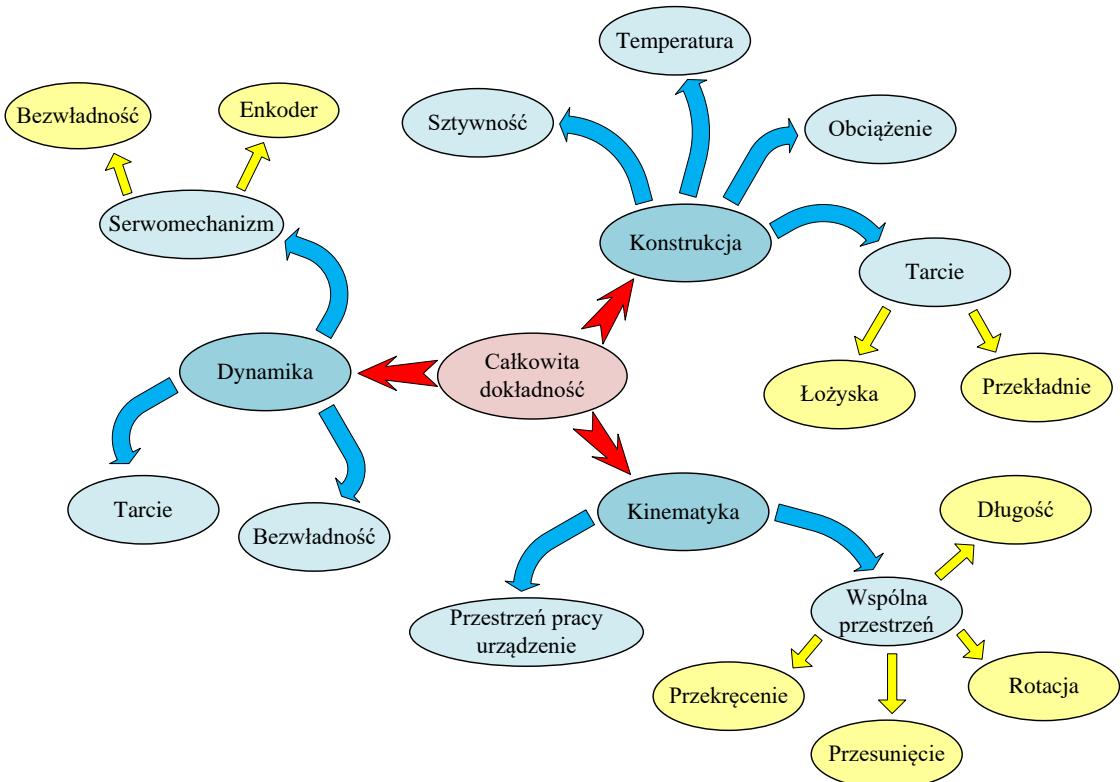
Na dokładność pozycjonowania mają wpływ:

- luzy w połączeniach przegubów,
- błędy przełożeń przekładni,
- tarcie,
- rozrzut wymiarów elementów składowych,
- skończona sztywność mechaniczna,
- dokładność obróbki elementów konstrukcyjnych manipulatora,
- błędy obliczeniowe,
- środowisko pracy,
- efekty elastyczne, takie jak ugięcia członów pod wpływem grawitacji lub innych obciążzeń, oraz
- wiele innych efektów statycznych i dynamicznych [17–30].

Większość z tych czynników jest niemierzalnych i podlega ciągłym, nieprzewidzianym zmianom, prowadząc do występowania różnic między rzeczywistymi charakterystykami a modelami matematycznymi. Różnice te można próbować zmieniać przez kalibracje [31] modeli matematycznych [18] przy założeniu dużej sztywności konstrukcji robota przemysłowego.

W innym przypadku dokładność może zostać poprawiana jedynie przez zastosowanie bezpośrednich czujników pozycji końcówki interfejsu mechanicznego robota (punktu TCP), np. czujników wizyjnych.

Podział błędów mających wpływ na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych ze względu na źródło ich występowania przedstawiono na rys. 1.7 [32].



Rys. 1.7. Źródła błędów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Na powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych wpływa więc w pierwszej kolejności rozdzielcość układu sterowania, czyli najmniejszy przyrost ruchu, który układ może rozpoznać. Jest ona obliczana jako całkowita droga, którą przebywa punkt odniesienia, podzielona przez 2^n , gdzie n jest liczbą bitów określającą rozdzielcość enkodera. Osie liniowe, a więc przeguby pryzmatyczne, charakteryzują się przeważnie lepszą rozdzielcością niż osie obrotowe, ponieważ linia prosta poprowadzona między dwiema pozycjami końcówki członu liniowego jest krótsza niż odpowiadający jej łuk, zakreślany przez końcówkę członu obrotowego [17]. Spong i Vidyasagar [17] w swoim opracowaniu udowodnili, że w przypadku osi obrotowych między członami występują silniejsze wzajemne sprzężenia kinematyczne i dynamiczne, co prowadzi do kumulowania błędów oraz do coraz większych problemów ze sterowaniem.

Inną hierarchię błędów pozycjonowania przedstawiają Grethelein [33], Kreidler [34], Schröer [35], Wang i Masory [36]:

- położenie przedmiotu obrabianego,
- narzędzie (położenie punktu TCP),
- brak kalibracji położenia przegubów,
- długości ramion i błędy kątowe,
- odkształcenia termiczne,
- luzy, elastyczności i niewspółosiowość,
- podatność ramion,
- rozdzielcość enkoderów położenia.

1.4. Kalibracja a pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Dias [37] w swojej pracy przedstawił procentowy wpływ poszczególnych błędów na dokładność pozycjonowania robotów przemysłowych, dzieląc je dodatkowo na dwie grupy: geometryczne i niegeometryczne źródła błędów (tab. 1.2.)

Tabela 1.2. Procentowy wpływ poszczególnych błędów na dokładność pozycjonowania robotów przemysłowych [37]

Geometryczne źródła błędów		Niegeometryczne źródła błędów	
brak kalibracji położenia przegubów	80–90%	podatność ramion bez obciążenia	3–4%
długość ramion i błędy kątowe	5–10%	podatność ramion z obciążeniem	5–8%
odkształcenia termiczne	0–10%	błędy pracy (np. tarcie)	1–2%
		błędy przypadkowe (np. rozdzielcość układu sterowania)	1–2%

Analizując dane literaturowe na temat pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania można stwierdzić, że na dokładność pozycjonowania najistotniejszy wpływ ma brak kalibracji robota lub jej nieprawidłowe przeprowadzenie [37]. Dlatego obecnie autorzy wielu publikacji naukowych skupiają się na opracowywaniu nowych metod kalibracji lub udoskonalaniu już istniejących. Stosują przy tym zewnętrzne urządzenia pomiarowe [38], [39], które dostarczają wartości liczbowych do zaawansowanych zagadnień matematycznych, m.in.: inżynierię odwrotną [40], wielomiany Fouriera [41], algorytmy genetyczne lub sieci neuronowe [42]. Uzyskane w ten sposób wyniki służą do korekty położenia całego łańcucha kinematycznego robota przemysłowego. Zastosowanie różnych metod kalibracji robota przemysłowego ma wpływ na jego dokładność [43].

Kevin, Conrad, Panayiotis, Shiakolas, Yih [44] uważają, że aż 97% błędów dokładności wynika z nieprawidłowego ustawienia robota w pozycji zerowej (braku kalibracji). Uważają również, że w niektórych przypadkach wykonywanie kalibracji nie jest konieczne i wystarczy przeprowadzić procedurę *remastering-u* polegającą na ustawieniu robota w pozycji 0 – *domowej* i zresetowaniu enkoderów. Powinna być wykonywana systematycznie od początku użytkowania robota [45]. Jeżeli po przeprowadzeniu procedury *remastering-u* nie otrzyma się satysfakcyjnej wartości dokładności, należy przeprowadzić kalibrację.

Ogólna zasada kalibracji polega na minimalizacji różnicy pomiędzy pozycją teoretyczną a rzeczywistą robota, natomiast modyfikacja modelu zależy od złożoności technik kalibracji [44], [43], [46], [39]. W programowaniu OLP (ang. *off-line*) dane aktualizacji pobierane są z wyników przeprowadzonej kalibracji robota [47].

Oprócz różnych technik pomiarowych (opisanych w podr. 3.1) istnieją również różne metody matematyczne kalibracji robotów. Można je ogólnie podzielić na lokalne i globalne [48].

Metody lokalne

W metodzie tej (zajmuje się nią przede wszystkim Diewal [49]) w określonym obszarze przestrzeni roboczej robota wykonuje się nieciągłe pomiary położenia punktów roboczych narzędzia (TCP) przez sekwencyjny przejazd po kratce trójwymiarowej 3D. Powstałe różnice pomiędzy najazdami mogą być zebrane jako wartości poprawek w formie tabeli w sterowaniu

i posłużyć do określania wpływu błędów na dokładność pozycjonowania [48]. Metody te mają jednak wady:

- pomiar jest czasochłonny, a wynik ważny tylko lokalnie,
- w przypadku punktów pośrednich konieczne jest wykonywanie interpolacji,
- błąd położenia należy mierzyć w różnych orientacjach i konfiguracjach,
- uwzględnienie podatności ramion robota wymaga wykonania wielu cykli pomiarowych ze zmiennym obciążeniem.

Zaletą tej procedury jest brak konieczności tworzenia modelu, a wyniki kalibracji można przenosić na różne rodzaje układów kinematycznych. Wdrożenie zależy jednak w bardzo dużym stopniu od stosowanego sterowania robotem.

Procedury globalne

W procedurze globalnej należy w pierwszej kolejności wykonać model badanego systemu, który następnie poprzez wielokrotne weryfikacje i identyfikacje, jest przybliżany do struktury rzeczywistej.

Robota przemysłowego można potraktować, jako jeden kompleksowy układ lub sumę mniejszych układów cząstkowych. To z kolei determinuje wybór metody kalibracji.

W koncepcji geometrycznej osie manipulatora są traktowane oddziennie, tzn. są przemieszczane i mierzone sekwencyjnie. Następnie dla każdej osi określana jest płaszczyzna ruchu i układ współrzędnych. Na końcu ze wzajemnych powiązań między poszczególnymi układami współrzędnych, wyznacza się transformację dla całej struktury kinematycznej. Ta procedura jest matematycznie dość prosta, jednak wykonanie pomiarów jest czasochłonne. Przyjmuje się przy tym uproszczone założenie, że czynniki wpływające na dokładność pozycjonowania oddziałują tylko na sąsiadujące osie i nie mają wpływu na pozostałe. Nie jest to jednak prawdą ponieważ, np. podatność konstrukcji ma wpływ na wszystkie osie robota.

Przeprowadzając kalibrację robota przemysłowego uznanego jako jeden system, parametry kompletnego modelu są określone za pomocą procedur numerycznych [50], [51], [52], [35], [33], [53], [54], [55], [44]. Dokonuje się pomiaru odchylenia rzeczywistego położenia manipulatora od zadanego dla odpowiedniej liczby punktów w przestrzeni roboczej. Następnie, wychodząc z modelu idealnego, dąży się do zminimalizowania normy euklidesowej całkowitego odchylenia poprzez wariację parametrów modelu. Minimalizacja błędu resztowego pozwala na najdokładniejsze odtworzenie zachowania się systemu.

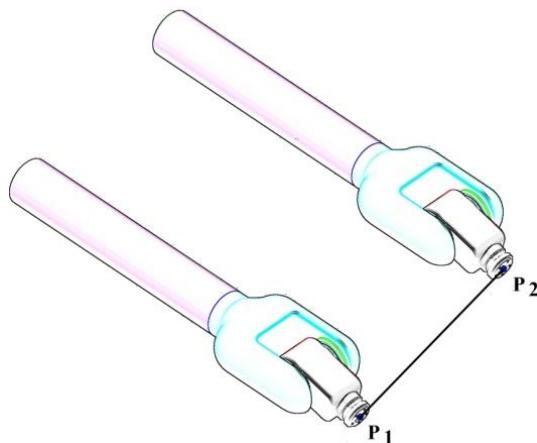
Do optymalizacji stosuje się często procedurę quasi-newtonowską [37], próbując również zastosować algorytmy genetyczne oraz inne metody [37]. Szczególną metodę opracował Trevelyan, w której użył algorytm rekurencyjny – filtr Kalmana do określenia zachowania się systemu [56]. Okazało się jednak, że wynik kalibracji był ważny tylko lokalnie i nie można go przenieść na cały obszar roboczy. W przypadku procedur opartych na teorii systemów, uzyskana dokładność jest również powtarzalna w stosunku do położień leżących poza pierwotnie zmierzonymi obszarami. Dlatego metoda oparta na teorii systemów jest najskuteczniejszą metodą kalibracji [33].

Rozpoznanie literaturowe możliwych metod pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych zostało przedstawione w rozdz. 3.1.

1.5. Sposoby sterowania ruchem robota przemysłowego i jego wpływ na zadaną pozycję

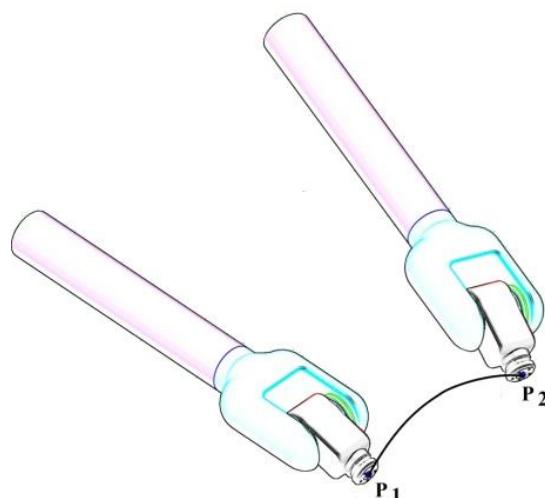
Można wyróżnić następujące rodzaje ruchu punktu TCP (np. Fanuc M-16iB):

- a) liniowy, w którym kontrolowane jest położenie punkt TCP z punktu startowego do docelowego; punkt TCP porusza się po linii prostej, a format ruchu jest określony w celu zapamiętania punktu końcowego; w ruchu tym należy ustawić prędkość ruchu wyrażoną w mm/sec, cm/min lub cal/min, np. L P[2] 500 mm/sec 100 CNT lub JP[2] 100% FINE (rys. 1.8);



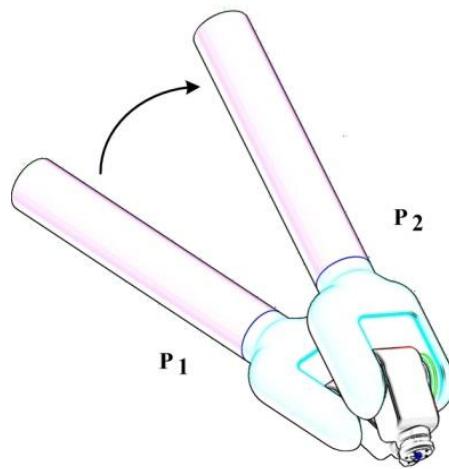
Rys. 1.8. Ruch liniowy L

- b) pojedynczej osi J (PTP) – podstawowy tryb przemieszczania robota do zadanej pozycji; robot przyspiesza wzduł wszystkich (lub prawie wszystkich) osi, porusza się z określoną szybkością przesuwu, zwalnia a następnie zatrzymuje się w określonym czasie; tor ruchu robota nie stanowi zazwyczaj linia prosta, a format ruchu jest określony w celu zapamiętania punktu końcowego [57]; w ruchu tym można ustawić prędkość jako procent maksymalnej prędkości ruchów robota, np. JP [2] 85% FINE; położenie punktu TCP nie jest kontrolowane (rys. 1.9);



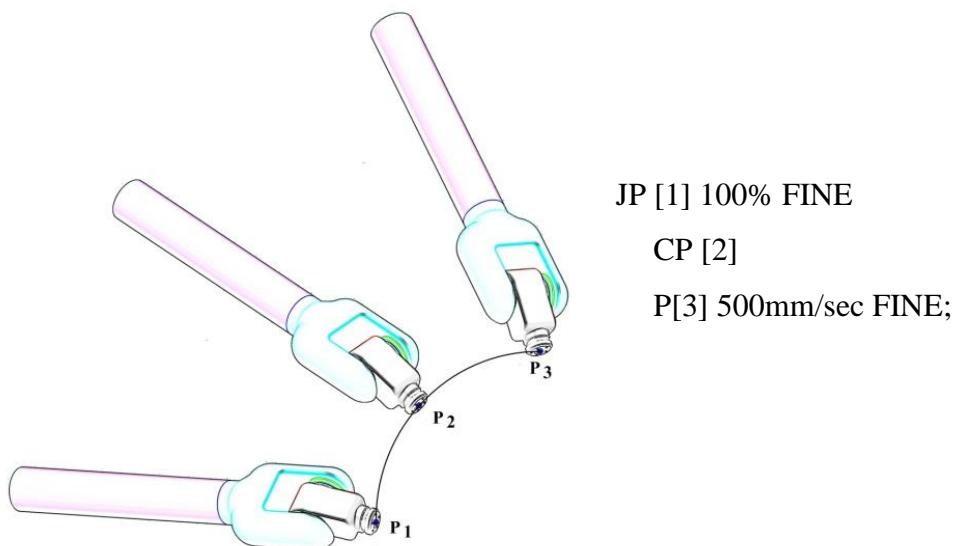
Rys. 1.9. Ruch pojedynczej osi J

c) obrotowy – punkt TCP podlega obrotowi od punktu początkowego do końcowego w czasie wykonywania instrukcji ruchu liniowego; orientacja narzędzia podczas przemieszczania jest kontrolowana poprzez podzielenie orientacji w punktach startu i docelowym [57]; w ruchu tym można ustawić prędkość w stopniach na sekundę, np. JP [2] 60 deg/sec FINE (rys. 1.10), a punkt TCP jest sterowany liniowo (jeżeli punkt końcowy narzędzia przemieszcza się);



Rys. 1.10. Ruch obrotowy

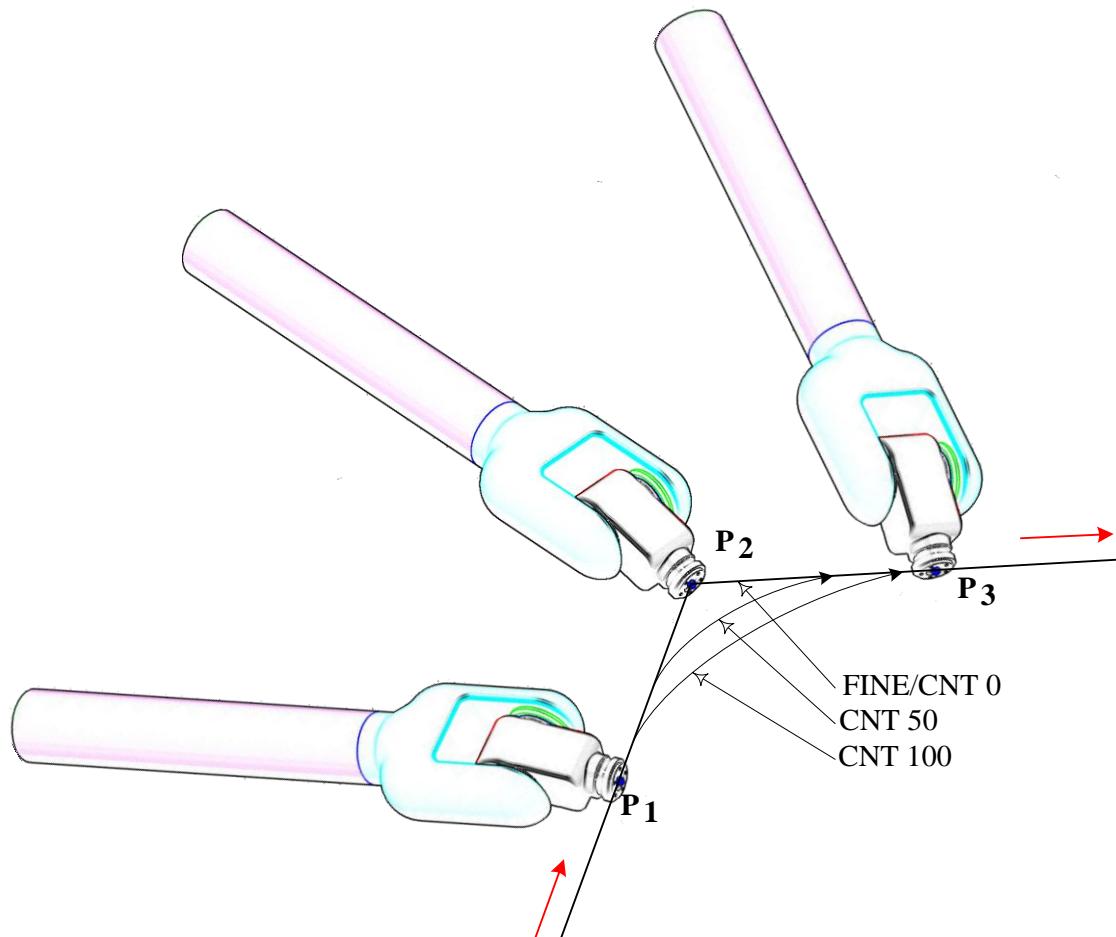
d) kołowy, w którym kontrolowane jest położenie punktu TCP z pozycji startowej przez punkt przejściową do docelowej; punkty przejścia oraz docelowy są zapamiętywane w jednej instrukcji; w ruchu tym można ustawić prędkość w mm/sec, cm/min lub cali/min, np. z P₁ (punkt startu) do P₃ przez P₂ położenie punktu TCP podczas ruchu jest kontrolowane dzięki obliczaniu odległości położenia w punkcie startu oraz punkcie końcowym [57] (rys. 1.11).



Rys. 1.11. Ruch kołowy CP

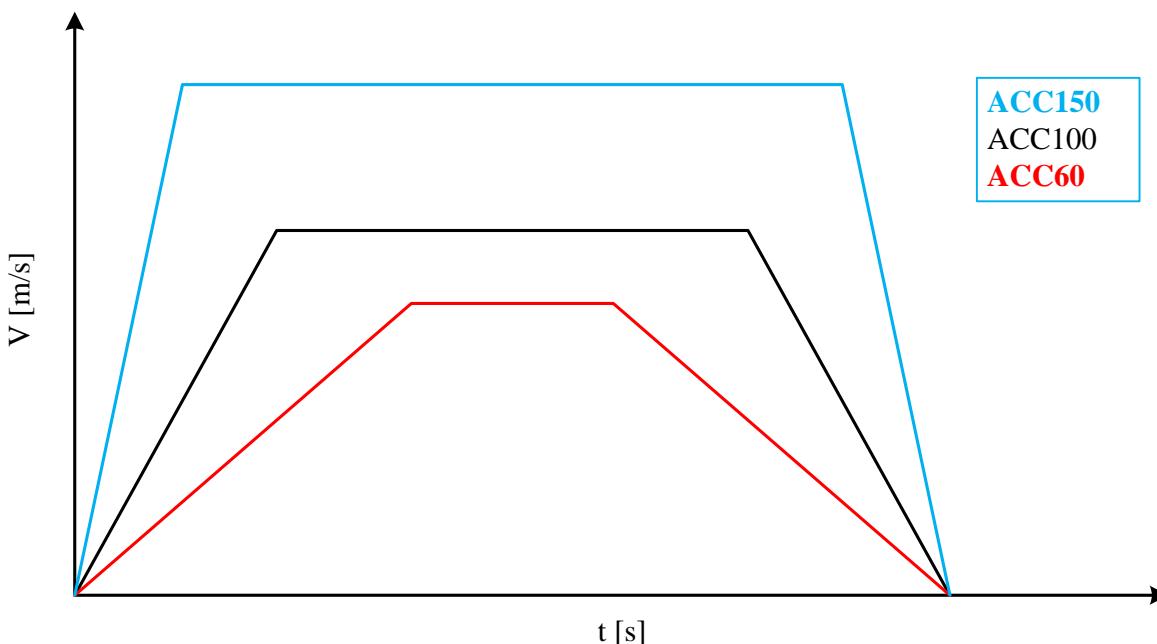
Przy każdym rodzaju wykonywanego ruchu można określić sposób osiągnięcia zadanej pozycji: pozycjonowanie zgrubne [12] i dokładne [10] (rys. 1.12). Jeżeli kolejne instrukcje pozycjonowania występują po sobie, można ustawić tzw. *wygladzenie trajektorii* – CNT (zgrubne). Punkt TCP przechodzi wtedy w pobliżu zadanego punktu (P_2). Wartość CNT może zmieniać w przedziale od 0 do 100. Gdy zostanie wybrana wartość 0, punkt interfejsu mechanicznego przemieszcza się najbliżej zadanej pozycji (P_2), a następnie do kolejnego punktu docelowego (P_3) bez zatrzymywania się w punkcie zadanym (P_2). W sytuacji, gdy określona wartość CNT wynosi, np. 50 lub 100, robot przybliża się do punktu docelowego (P_3), ale nie zatrzymuje się, tylko przemieszcza do następnej zadanej pozycji (P_3). Wielkość *zaokrąglenia trajektorii* jest obliczana i wyznaczana przez układ sterujący, a zależy między innymi od: wartości przyspieszeń poszczególnych osi robota, odległości między zadanymi pozycjami oraz wartości ustawionej prędkości realizowanego położenia.

Drugim sposobem osiągnięcia zaplanowanego położenia jest FINE (tłum. z ang. *precyzyjnie*): końcówka interfejsu mechanicznego osiąga dokładnie zdefiniowaną pozycję – P_2 (rys. 1.12), czyli wyhamowuje i zatrzymuje się w zadanym punkcie, a następnie wykonuje kolejną instrukcję ruchu [12].



Rys. 1.12. Sposoby dojścia do zadanej pozycji;
 P_1 – pozycja startowa, P_2 – pozycja zadana, P_3 – pozycja docelowa

W instrukcjach ruchu można dodatkowo sterować współczynnikiem prędkości dodając na końcu linii polecenie ACC. Współczynnik ten ustawia się w przedziale od 0 do 150% wartości początkowej określonej w sterowaniu robota (zdefiniowanej przez producenta), a zmieniając jego wartość steruje się przyspieszeniem i opóźnieniem ruchu punktu TCP do zadanej pozycji (rys. 1.13).

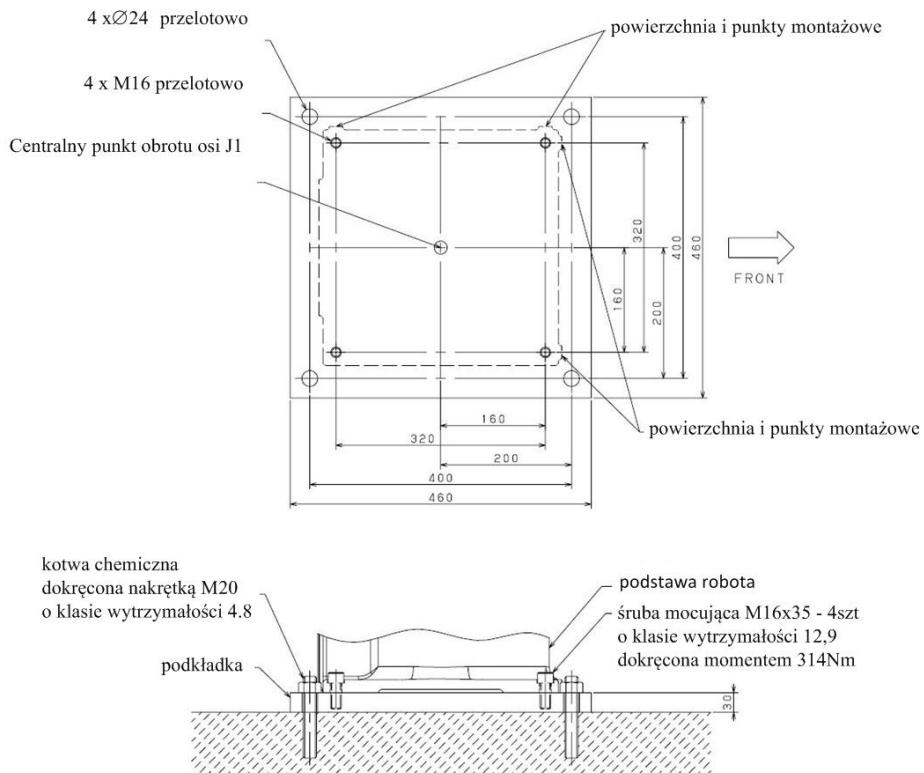


Rys. 1.13. Współczynnik sterowania prędkością ACC

Opisane powyżej sposoby sterowania ruchem robota przemysłowego mają w mniejszym lub większym stopniu wpływ na dokładność jego pozycjonowania. W zależności od wybranego sposobu osiągnięcia zadanej pozycji i wartości współczynnika prędkości (ACC) mogą uaktywnić się czynniki mające wpływ na dokładność i powtarzalność pozycjonowania opisane w rozdz. 1.3.

1.6. Wytyczne pomiaru dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych wg PN-ISO 9283 na przykładzie robota Fanuc M-16iB

W celu prawidłowego przeprowadzenia pomiaru charakterystyk funkcjonalnych robota przemysłowego Fanuc M-16iB należy go ustalić i zamocować zgodnie z instrukcją obsługi. Podkładka o grubości 30 mm jest mocowana do podłożu przy pomocy czterech kotew mocowanych chemicznie (pręt gwintowany osadzony w podłożu na zasadzie wklejania masą na bazie żywic) i dokręcona nakrętkami M20 wykonanymi w klasie wytrzymałości 1.8 z momentem 186 Nm. Do podkładki mocowana jest podstawa za pomocą czterech śrub M16 o klasie wytrzymałości 12.9, dokręconych momentem 314 Nm (rys. 1.14) [7].



Rys. 1.14. Przykład ustalenia i zamocowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB do badań dokładności [7]

Minimalna montażowa powierzchnia serwisowa wynosi $1,55 \text{ m}^2$, a realizacja finalnego etapu instalacji robota przemysłowego dotycząca kontroli wszystkich osi przy pomocy instalowanych czujników (powierzchnia kontrolna) wynosi $0,54 \text{ m}^2$. Wymiary określające powierzchnie serwisową i kontrolną przedstawia rys. 1.15 [7].

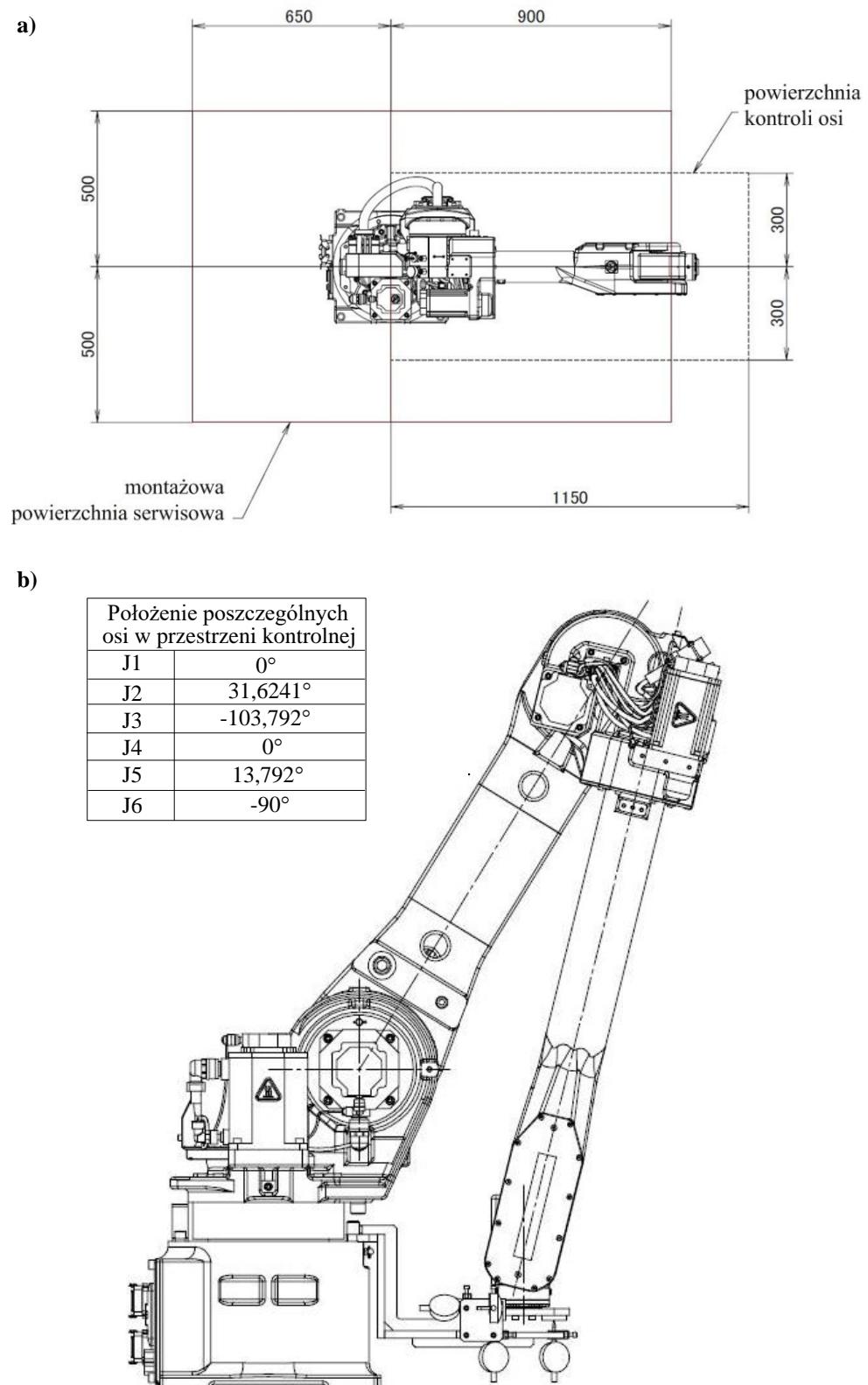
Następnie należy skontrolować temperaturę pracy robota przemysłowego (określona jest przez producenta – nie dotyczy badania pełzania charakterystyk pozycjonowania); producent określa dopuszczalną podczas pracy robota przemysłowego temperaturę otoczenia w zakresie od 0 do 45°C oraz podczas transportu i magazynowania od -20 do 60°C przy współczynniku temperaturowym równym $1,1^\circ\text{C}/\text{min}$ [7].

Użytkownik ma możliwość zmiany nastaw parametrów robota, które mogą mieć wpływ na badane charakterystyki. Podczas każdego pomiaru powinny być zachowane stałe warunki, a wartości parametrów należy zamieścić w protokole badań [58].

Badania robota przemysłowego Fanuc M-16iB przeprowadza się w warunkach pracy (warunkach środowiska) zalecanych przez producenta:

- dopuszczalna wilgotność względna otoczenia: 30–96%, bez kondensacji (nie większa niż 75 HR),
- w przypadku instalacji w środowisku o dużym zanieczyszczeniu (kurz, płyny słabo przewodzące, rozpuszczalniki organiczne, kwasy, gaz i/lub sól powodujące przyspieszenie korozji) należy stosować środki dodatkowej ochrony,
- przeciążenie powinno być mniejsze od 0,5 G,
- nie zaleca się instalacji powyżej 1000 m nad poziomem morza,

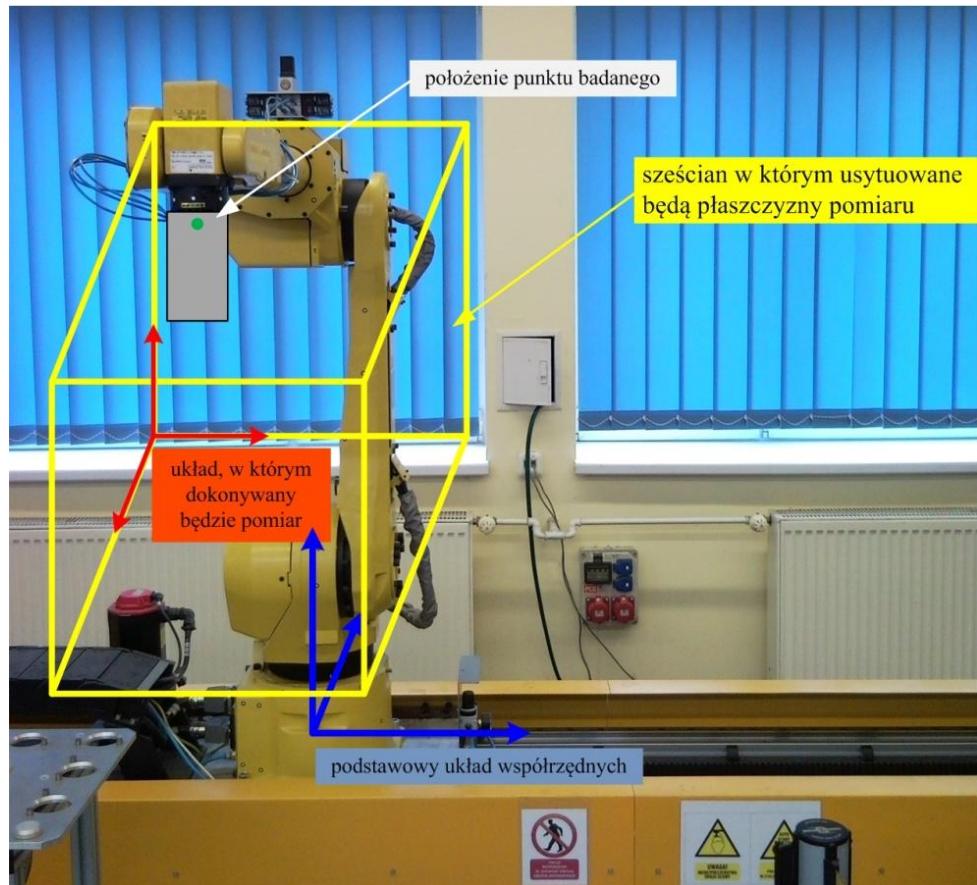
- w przypadku promieniowania jonizującego i niejonizującego (mikrofalowe, promienie ultrafioletowe, wiązki promieni lasera i/lub promieniowanie rentgenowskie) należy stosować dodatkowe ekranowanie.



Rys. 1.15. Wymagana przestrzeń serwisowa i ustawienia finalnego robota przemysłowego Fanuc M-16iB (a); pozycja i parametry ustawienia finalnego (b) [7]

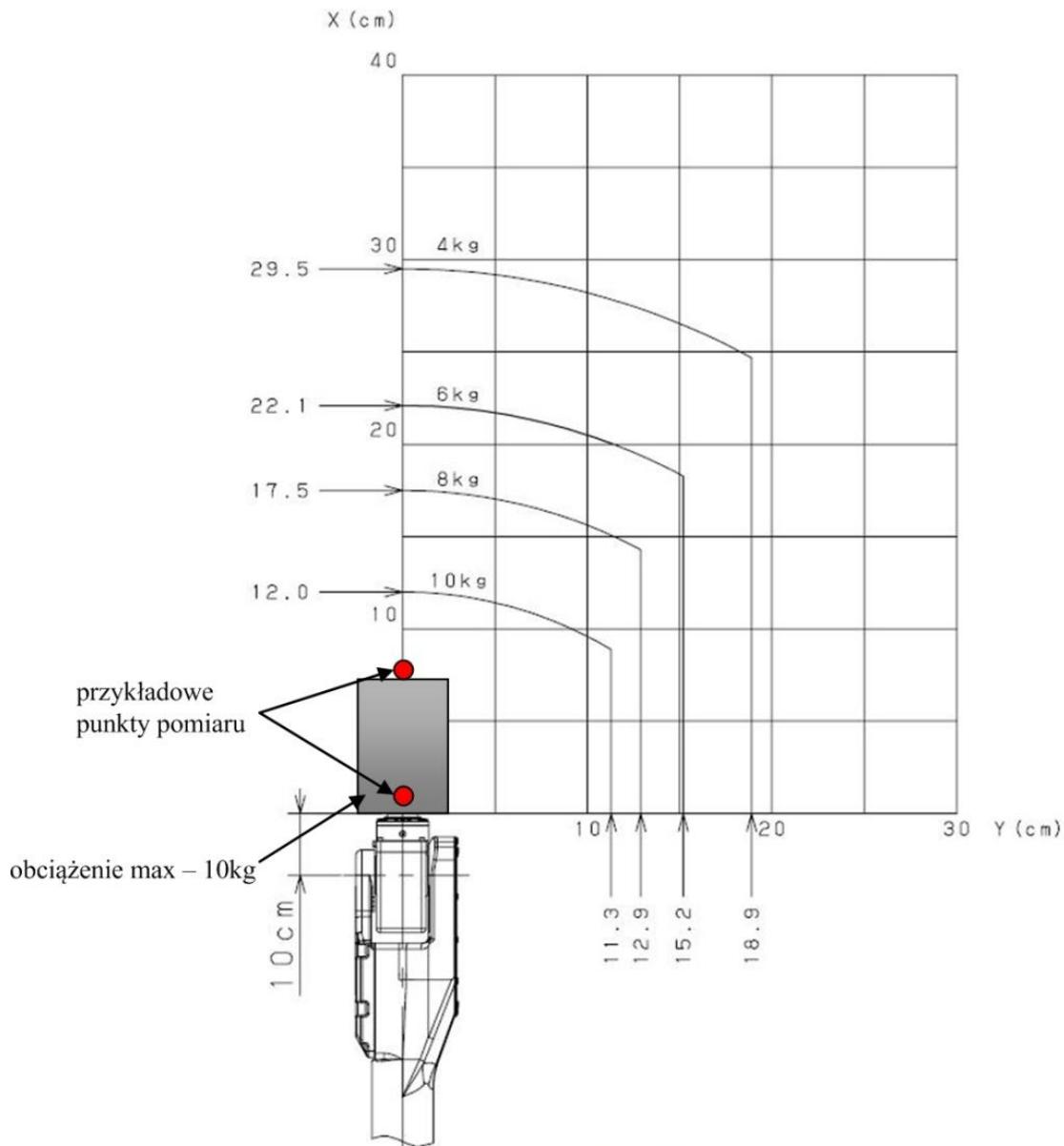
Dodatkowe warunki badań robota przemysłowego są następujące:

- osie układu współrzędnych powinny być równoległe do podstawowego układu współrzędnych (rys. 1.16),



Rys. 1.16. Przykład równoległego położenia układów współrzędnych robota przemysłowego Fanuc M-16iB [59]

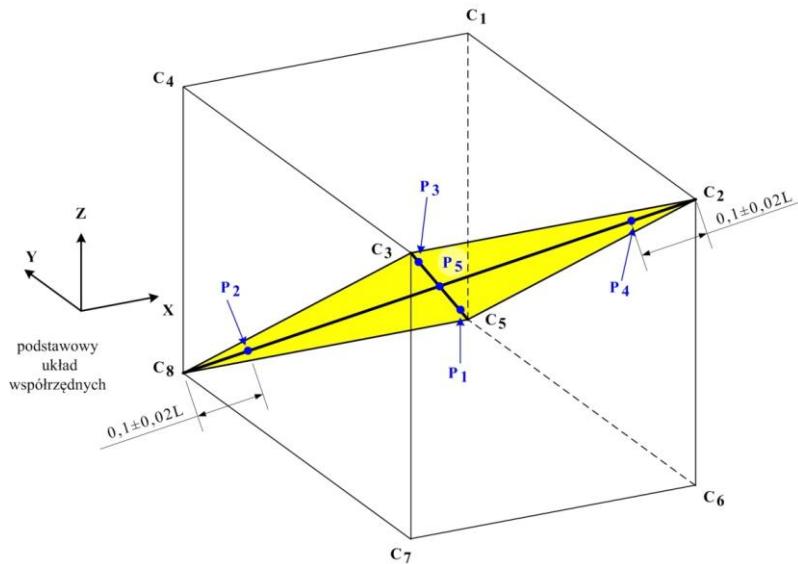
- badany punkt powinien być usytuowany względem interfejsu mechanicznego w odległości wynikającej z zaleceń producenta i zaznaczony w protokole badań (rys. 1.17),
- stosować, jeśli to możliwe, bezdotykowe metody pomiaru i wzorcowane przyrządy pomiarowe zapewniające reprezentatywność mierzonych wartości; całkowita niepewność pomiaru nie powinna przekraczać 25% wartości bezwzględnej mierzonego parametru,
- obciążenie interfejsu mechanicznego powinno wynosić 100% udźwigu nominalnego (masa, położenie przyrządów pomiarowych, położenie środka ciężkości, moment bezwładności) określonego przez producenta; w tym przypadku wynosi ono 10 kg (rys. 1.17) [7],
- przejścia między poszczególnymi badanymi położeniami powinny mieć maksymalną wartość,
- płaszczyzny pomiaru: umieszczone w najczęściej stosowanej przestrzeni roboczej – sześciannie; obejmujące jak największą objętość; krawędzie sześciianu równoległe do głównego układu współrzędnych; położenie punktu badanego zaznaczone w protokole badań (rys. 1.16),



Rys. 1.17. Położenie punktów pomiaru i zamocowania maks. obciążenia dla robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L [7]

- pomiary dokonywane w jednej z czterech płaszczyzn wewnętrznych ($C_1-C_2-C_7-C_8$, $C_2-C_3-C_8-C_5$, $C_3-C_4-C_5-C_6$, $C_4-C_1-C_6-C_7$) zawierających dwie przekątne sześcianu (podać w protokole badań); następnie na wybranej płaszczyźnie należy rozmieścić pięć punków P_1-P_5 położonych na przekątnych sześcianu; zaleca się stosowanie podstawowego układu współrzędnych robota przemysłowego, opisanego względem jego podstawy (rys. 1.16 i 1.18).

W przemieszczeniach interfejsu mechanicznego robota przemysłowego między wytypowanymi do badań punktami pozycjonowania P_1 – P_5 należy uwzględnić wszystkie zespoły układu jego ruchu [58], a minimalna liczba cykli pomiaru powinna wynosić 30 (przedział ufności jest większy przy większej liczbie cykli pomiarowych). Badanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego można przeprowadzić równocześnie przy sterowaniu pozycyjnym [58].



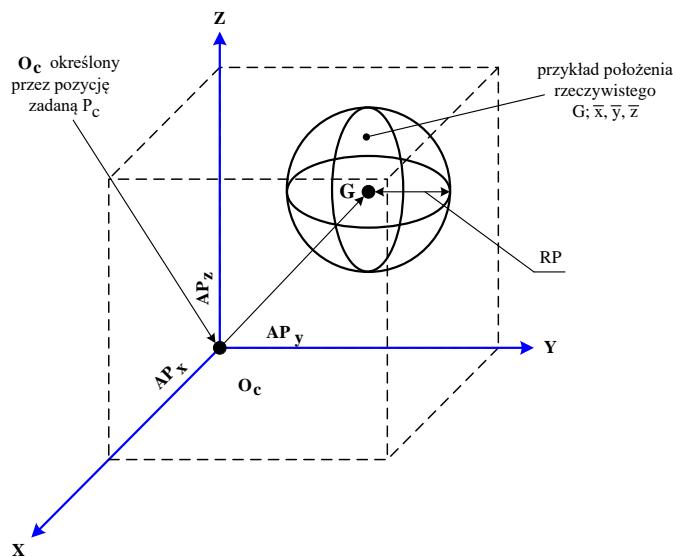
Rys. 1.18. Wytypowana płaszczyzna $C_2-C_3-C_5-C_8$ i punkty pomiarowe P_1-P_5 robota przemysłowego Fanuc M-16iB [58]

1.7. Obliczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Według PN-ISO 9283 dokładność pozycjonowania jednokierunkowego (AP) podaje odchyłkę między położeniem zadanym a wartością średnią położen rzeczywistych przy dochodzeniu do położenia zadanego z tego samego kierunku [58].

Rozpatrując rodzaj ruchu interfejsu robota przemysłowego podczas osiągania zadanej pozyycji, tzn. ruch liniowy lub obrotowy dokładność pozycjonowania jednokierunkowego można określić jako:

- różnicę między położeniem zadanym, a punktem będącym środkiem zbioru punktów przestrzeni roboczej (dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych) [58] (rys. 1.19);

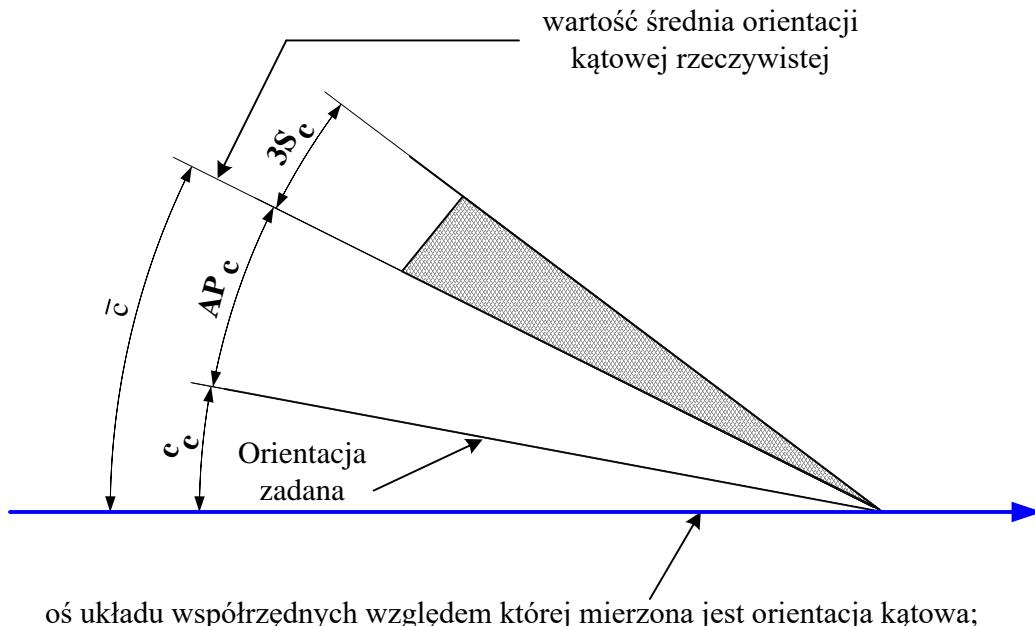


Rys. 1.19. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych [58]:

$AP_{x,y,z}$ – dokładność pozycjonowania jednokierunkowego dla osi x,y,z

RP – powtarzalność pozycjonowanie jednokierunkowego

b) różnicę między zadaną orientacją kątową a średnią wartością zbioru rzeczywistych orientacji kątowych (dokładność orientowania jednokierunkowego ruchów obrotowych) (rys. 1.20);



Rys. 1.20. Dokładność i powtarzalność orientowania jednokierunkowego ruchów obrotowych [58]:

AP_c – dokładność orientowania dla osi Z, \bar{c} – wartość średnia orientacji kątowych,
 $3S_c$ – rozrzut kątów w stosunku do wartości średnich $\pm 3S_c$, c_c – kąt polożenia zadanego

Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego (RP) jest miarą rozrzutu położen lub orientacji rzeczywistych uzyskanych w wyniku n-krotnie powtarzanego ruchu o tym samym kierunku do położenia zadanego według orientacji kątowej [58].

Definiowanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania jednokierunkowego

Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych robota przemysłowego (np. rys. 1.32) określają zależności (zgodnie z normą ISO 9283 [58]):

$$AP = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2} \quad (1.5)$$

gdzie:

$$AP_x = (\bar{x} - x_c), AP_y = (\bar{y} - y_c), AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (1.6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j; \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j; \quad (1.7)$$

w których:

\bar{x}, \bar{y} i \bar{z} – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej otrzymane przez n-krotne uzyskanie położenia zadanego;

x_c, y_c i z_c – współrzędne położenia zadanego;

x_j, y_j i z_j – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j-tym ruchu do położenia zadanego;

a dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów obrotowych zależności:

$$AP_a = (\bar{a} - a_c); \quad \bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j; \quad (1.8)$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c); \quad \bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j; \quad (1.9)$$

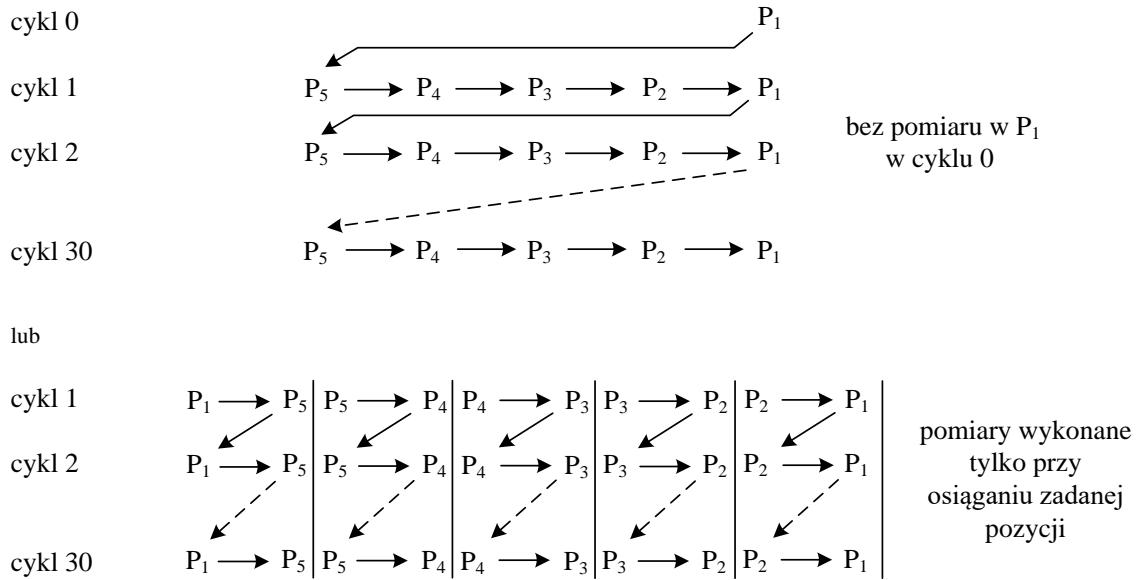
$$AP_c = (\bar{c} - c_c); \quad \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j; \quad (1.10)$$

gdzie:

a_c, b_c i c_c – kąty położenia zadanego,

a_j, b_j i c_j – kąty położenia rzeczywistego uzyskane przy j -tym powtórzeniu.

Interfejs mechaniczny robota przemysłowego przemieszcza się z położenia P_1 do położen P_5, P_4, P_3, P_2, P_1 , przy czym ich osiągnięcie powinno odbywać się z jednego kierunku (rys. 1.21) czyli tory ruchów podczas pomiarów powinny być zbliżone do zaprogramowanych. Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych AP oraz dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów obrotowych AP_a, AP_b, AP_c są obliczane dla każdego położenia punktu pomiarowego.



Rys. 1.21. Możliwe cykle pozycjonowania interfejsu mechanicznego robota przemysłowego [58]

Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych lub ruchów obrotowych końcówki interfejsu mechanicznego robota przemysłowego jest wyrażona przez:

- wartość RP , będącą promieniem kuli, której środek jest jednocześnie środkiem zbioru punktów jego przestrzeni roboczej:

$$RP = \bar{l} + 3S_I \quad (1.11)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j; \quad l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (1.12)$$

gdzie:

\bar{x}, \bar{y} i \bar{z} – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej uzyskanej przez n -krotne powtórzenie położenia zadanego,

x_j, y_j i z_j – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j -tym powtórzeniu położenia zadanego.

Rozrzut kątów $\pm 3S_a, \pm 3S_b, \pm 3S_c$ od wartości średnich $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$; gdzie S_a, S_b, S_c są odchyłkami znormalizowanymi rozkładu orientacji rzeczywistych:

$$S_I = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (1.13)$$

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (1.14)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (1.15)$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (1.16)$$

Powtarzalność pozycjonowania RP i odchyłki kątowe RP_a, RP_b , i RP_c są obliczane dla każdego badanego położenia interfejsu mechanicznego robota przemysłowego.

2. Uzasadnienie tematu, zakres, cele i tezy pracy

Celem ogólnym badań stanowiących podstawę dysertacji jest opracowanie szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych zgodnej z wytycznymi zawartymi w normie ISO 9283 [58], która pozwoli zmniejszyć liczbę cykli pomiarowych. Dzięki zastosowaniu metod prognozowania możliwe będzie określenie wartości powtarzalności pozycjonowania dla innych przestrzeni roboczej. Zakres pracy (cele szczegółowe) obejmuje zatem:

1. badanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów, w tym:
 - ustawienie robota przemysłowego i określenie płaszczyzny pomiaru;
 - ustalenie położenia punktu TCP (ang. *tool center point*);
 - opracowanie programów: rejestrującego położenie punktów pomiarowych oraz przeznaczonego do obliczeń dokładności i powtarzalności pozycjonowania;
2. pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych;
3. określenie wartości powtarzalności pozycjonowania dla różnych przestrzeni pracy na podstawie wybranej metody prognozowania;
4. opracowanie procedur komputerowych i przeprowadzenie z ich użyciem badań symulacyjnych.

Do realizacji celów szczegółowych zostanie zastosowane oprogramowanie komputerowe, przeznaczone do wyznaczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego oraz podczas badań symulacyjnych wybranej metody prognozowania. Porównanie wyników pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania pozwolą natomiast na zweryfikowanie wyników obliczeń komputerowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz wstępnych wyników badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych, sformułowano następujące tezy pracy:

1. Możliwe jest opracowanie metody pomiaru zmniejszającej czas trwania pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych o ok. 30% względem pełnego cyklu pomiarowego.
2. Możliwa do uzyskania wartość powtarzalności pozycjonowania w opracowanej metodzie pomiaru nie będzie zmieniać się o więcej/mniej niż 30% wartości nominalnej względem wartości uzyskanych przy pełnym cyklu pomiarowym.
3. Opracowana metoda pomiaru będzie miała zastosowanie w warunkach przemysłowych, wpływając w istotny sposób na procedurę kontroli robotów przemysłowych.

3. Pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

3.1. Metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Położenie w przestrzeni określonego punktu mechanizmu jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej, można określić dwoma sposobami za pomocą pomiarów:

- 1) uwzględniających wartości wygenerowane przez własne układy pomiarowe,
- 2) dokonanych sprzętem pomiarowym niezwiązanym z maszyną.

Pierwsza metoda pomiarowa jest mało dokładna, gdyż następuje sumowanie błędów pomiaru położenia poszczególnych zespołów łańcucha kinematycznego maszyny. Ponadto nie uwzględnia ona odkształcenia elementów mechanicznych [15].

Do drugiego sposobu można zaliczyć metody:

- a) mechaniczne:
 - stykowe, np. czujnik zębaty, czujnik inkrementalny, ramię pomiarowe FaroArm, maszyna współrzędnościowa,
 - bezstykowe, np. pneumatyczne czujniki przepływowe, czujniki indukcyjne;
- b) optyczne:
 - wizyjne, fotogrametryczne (np. skaner optyczny Atos),
 - laserowe, np. interferometr laserowy [60]; laser tracker [61], [42],
 - inkrementalne, np. czujnik inkrementalny,
- c) uwzględniające czas powrotu impulsu TOF (ang. *time of flight*):
 - światelnego,
 - dźwiękowego [62].

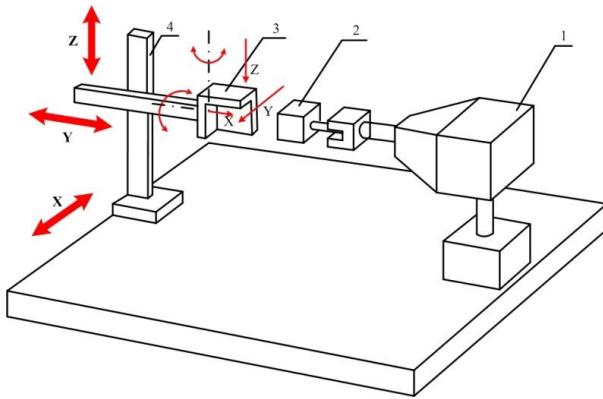
Prostą metodę kalibracji poprawiającą dokładność pozycjonowania przedstawia w swojej pracy Trevelyan [56]. Robot porusza się po punktach siatki zdefiniowanej na kawałku papieru milimetrowego ułożonego i ustalonego na stole. Następnie mierzone są odchylenia od tych punktów przy pomocy linijki lub suwmiarki. Procedura ta w latach 90-tych była wystarczająco precyzyjna i bardzo opłacalna, ale czasochłonna.

Inne rozwiązanie dotyczące powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego prezentuje Kluz [63], który przedstawia zależności określenia błędu wartości powtarzalności pozycjonowania robota w danym punkcie przestrzeni roboczej, bez konieczności prowadzenia czasochłonnych pomiarów całej przestrzeni pracy. Takie podejście pozwala na znalezienie optymalnego punktu, którego położenie może być następnie zastosowane w procesie montażu.

ad. a) Metody mechaniczne

Pomiar dokładności czujnikiem indukcyjnym – bezstykowym [64], [65]; stanowisko wykonano w Instytucie Techniki Produkcyjnej i Automatyzacji w Stuttgarcie [66].

Urządzenie pomiarowe składa się ze specjalnej głowicy (wyposażonej w bezkontaktowe czujniki indukcyjne) współpracującej z próbniakiem (kulą, sześcianem) umieszczonym w badanym miejscu jednostki kinematycznej maszyny (rys. 3.1). Zakres pomiarowy głowicy wynosi $\pm 12,5$ mm, a błąd pomiaru 0,1 mm [15]. Podobne rozwiązanie w swoich badaniach zastosował Kluz [63].

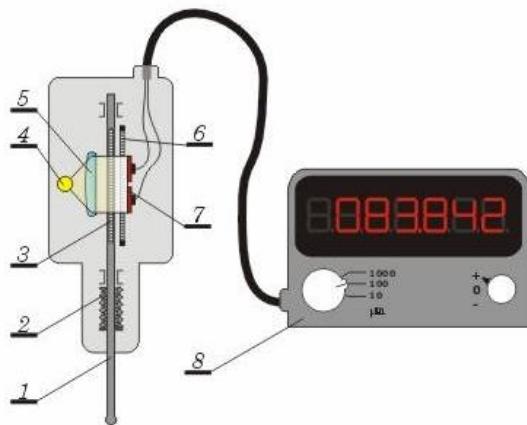


Rys. 3.1. Schemat wykonywania pomiarów błędów pozycjonowania [66]:

1 – jednostka kinematyczna maszyny manipulacyjnej, 2 – próbnik sprzęgnięty z chwytkiem, 3 – trójwymiarowa głowica pomiarowa wyposażona w bezkontaktowe czujniki indukcyjne, 4 – cyfrowy, trójwymiarowy układ pomiarowy stanowiska

Pomiar dokładności czujnikiem inkrementalnym i miernikiem cyfrowym – stykowo

Czujnik inkrementalny połączony z miernikiem cyfrowym (rys. 3.2) pozwala na wykonanie pomiaru położenia punktu TCP robota przemysłowego w jednym kierunku. Pomiędzy trzpieniem, a płaszczyzną obciążenia następuje styk (norma zaleca pomiary bezstykowe), a zmiana położenia trzpienia wyświetlana jest na ekranie miernika. W celu określenia położenia interfejsu we wszystkich trzech kierunkach, konieczne jest zastosowanie trzech jednakowych czujników ustawianych dla każdego z punktów pomiarowych P₁–P₅. Istnieje możliwość zastosowania tylko jednego czujnika, ale wiąże się to ze znaczącym zwiększeniem pracochłonności pomiarów, ponieważ każdorazowo należałyby przedstawić go względem trzech kierunków (X, Y, Z) [62].



Rys. 3.2. Czujnik inkrementalny [67]:

1 – trzpień pomiarowy, 2 – sprężyna powodująca nacisk pomiarowy, 3 – szklany wzorzec inkrementalny, 4 – źródło światła, 5 – kondensor, 6 – przeciwwzorzec, 7 – fotodiody, 8 – urządzenie wskazujące.

Metoda pomiaru przy pomocy ramienia pomiarowego FaroArm – stykowo

Urządzenie pomiarowe FaroArm pozwala na dokładne pomiary położenia punktu we wszystkich trzech kierunkach.

Konieczne jest zamocowanie do obciążenia nominalnego (przymocowanego do interfejsu mechanicznego robota przemysłowego) stałego wzorca – np. precyzyjnie wykonanej kuli.

W każdym punkcie pomiarowym należy dokonać pomiaru przy pomocy ramienia pomiarowego. Drugą możliwością jest połączenie stałe między robotem a ramieniem FaroArm (rys. 3.3).



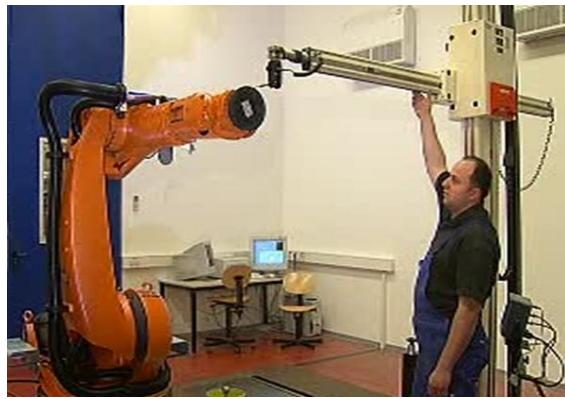
Rys. 3.3. Ramię FaroArm [68]



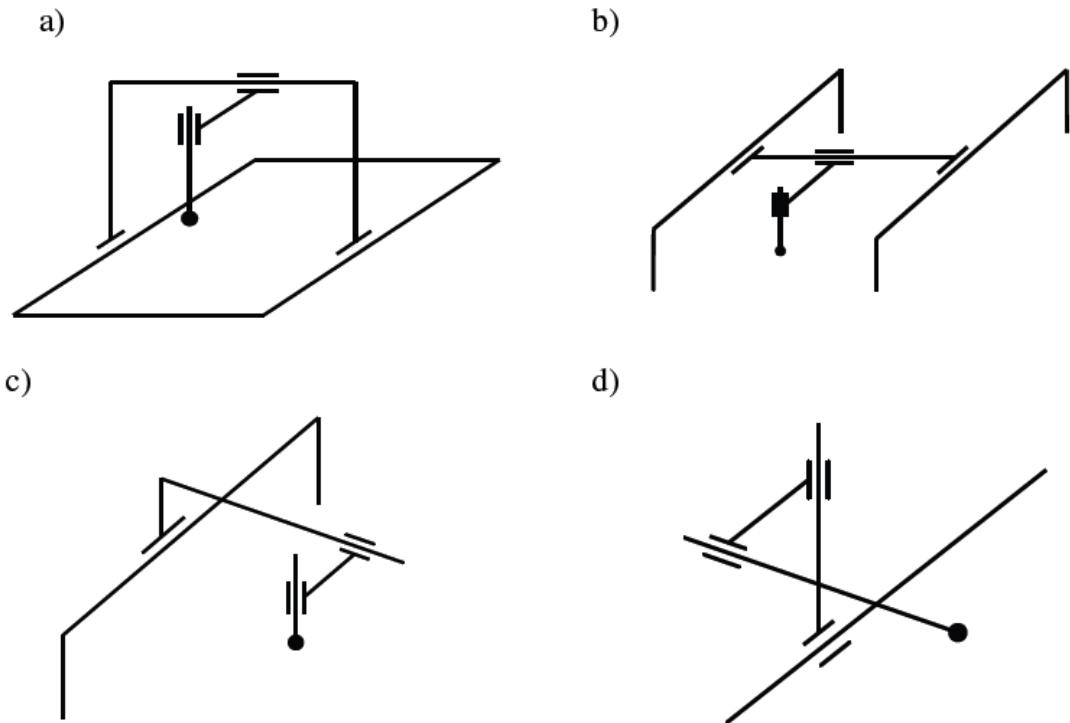
Rys. 3.4. Pomiar urządzeniem FaroArm [69]

Metoda pomiaru współrzędnościową maszyną pomiarową – stykowo

Metoda współrzędnościowa, inaczej zwana współrzędnościową techniką pomiarową, polega na pomiarze współrzędnych punktów pomiarowych, stanowiących podstawę do wyznaczania wszystkich elementów geometrycznych obiektu. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa (WMP) to urządzenie, którego zespoły przemieszczają się w określonych współrzędnych, przy czym co najmniej jeden z nich realizuje przesuw. Przemieszczenia wyznaczają kierunki osi układu kartezjańskiego X, Y, Z i definiują przestrzenny układ współrzędnych maszyny. Pomiar realizowany jest poprzez punktowy styk końcówki głowicy pomiarowej, najczęściej w postaci kulki, z powierzchnią mierzoną. Geometria końcówki oraz jej charakterystyka określana jest w procesie kalibracji, polegającym na pomiarze elementu wzorcowego przed rozpoczęciem właściwego pomiaru [70] [71] [72]. Wszystkie WMP składają się z zespołów: 1) głowicy pomiarowej, 2) pomiarowego z układem wskazującym oraz 3) nośnego – mechanicznego. Zespołami uzupełniającymi są układy: 1) przetwarzania danych pomiarowych oraz 2) napędowy. W zależności od konstrukcji maszyny elementami ruchomymi są stół lub portal. Rysunek 3.6 przedstawia cztery podstawowe rodzaje konstrukcji WMP [71], natomiast rys. 3.5 przykładowe urządzenie tego typu.



Rys. 3.5. Pomiar współrzędnościową maszyną pomiarową [73]



Rys. 3.6. Rodzaje konstrukcji WMP – schematy kinematyczne [71]:
a) portalowa, b) mostowa, c) wysięgnikowa, d) kolumnowa

Metoda pomiaru przy pomocy cięgna

Firmy DYNALOG i Motoman oferują system, w którym odległość pomiędzy punktem TCP, a punktem stałym można określić przy pomocy rozwijanego cięgna. Takie rozwiązanie jest stosunkowo tanie i łatwe w użyciu, ma jednak ograniczona dokładność. Znajduje zastosowanie wyłącznie do ustawiania pozycji zerowej robota przemysłowego [48].

Metoda ballbar [48]

Metoda ta jest podobna do opisanej poprzednio, jednak bardziej dokładna. Ramię zakończone kulami przymocowane jest z jednej strony do robota, a z drugiej do nieruchomego punktu znajdującego się wewnętrz badanej przestrzeni roboczej. Zmiana długości ramienia

rejestrowana jest za pomocą indukcyjnego przetwornika położenia. Najczęściej jednak ta metoda stosowana jest w pomiarach maszyn CNC (rys. 3.7).

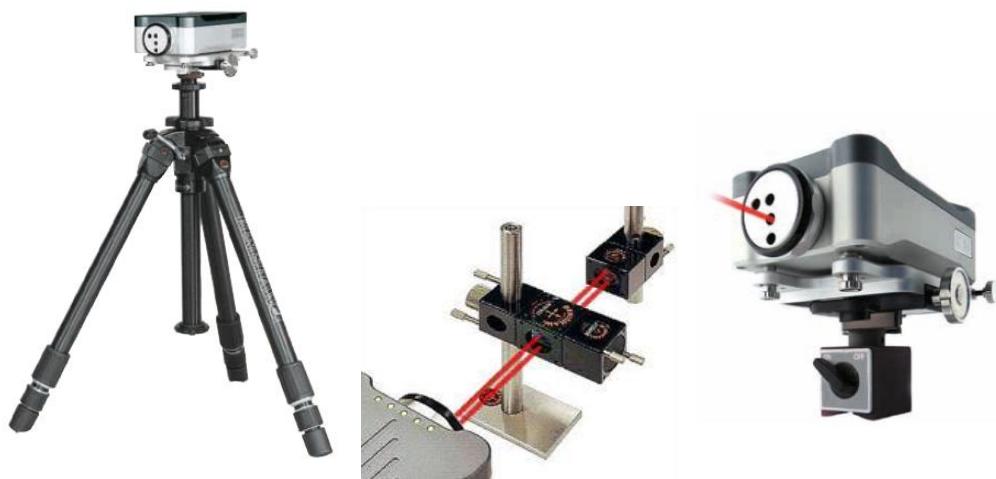


Rys. 3.7. Ballbar firmy Renishaw [74]

ad. b) Metody optyczne

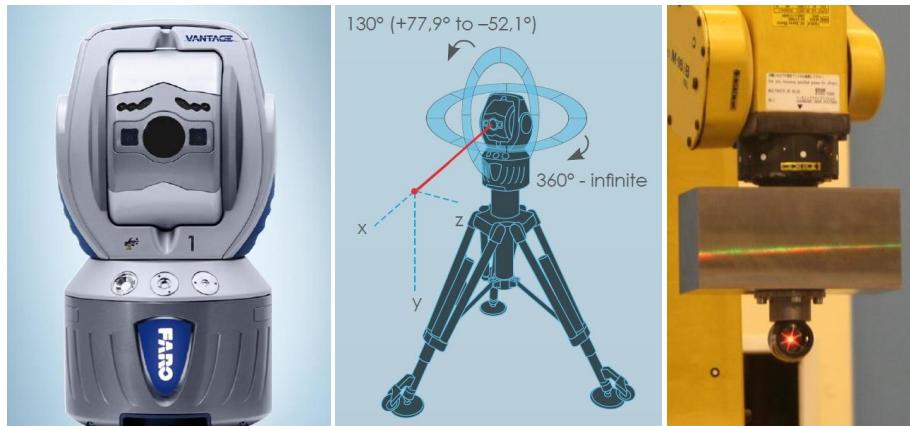
Pomiar dokładności interferometrem laserowym

Zaletą stosowania interferometrii w pomiarach charakterystyk funkcjonalnych robotów przemysłowych jest ich bardzo duża dokładność. Urządzenie (rys. 3.8) pozwala na dokładne pomiary położenia interfejsu mechanicznego i prędkości ruchu. Podobnie jak w przypadku czujnika inkrementalnego wymaga kilku takich samych urządzeń pomiarowych lub wielokrotnego przestawiania urządzenia dla każdego punktu pomiarowego. Interferometria wymaga także umieszczenia na interfejsie zwierciadła, odbijającego wiązkę, co wiąże się ze zmianą konstrukcji obciążenia interfejsu uwzględniającego wagę i kształt zwierciadła [62]. Pomiar dla jednej osi wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania, kilku punktów pomiarowych przedstawia autor [60].



Rys. 3.8. Interferometr laserowy firmy Renishaw [74]

Pomiar dokładności systemem Laser Tracker

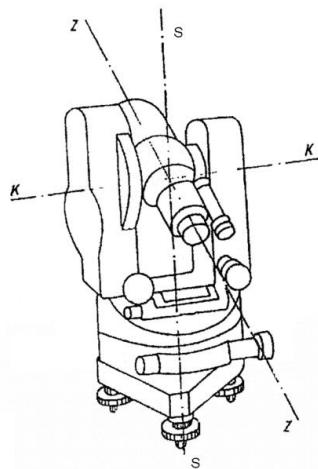


Rys. 3.9. Urządzenie Laser Tracker Vantage [75]

Urządzenie pomiarowe Laser Tracker (rys. 3.9) pozwala na dokładne pomiary położenia punktu we wszystkich trzech kierunkach jednocześnie. Konieczne jest zamocowanie do obciążenia nominalnego (przymocowanego do interfejsu mechanicznego robota przemysłowego) zwierciadła odbijającego wiązkę lasera [62].

Pomiar dokładności z zastosowaniem teodolitów [76], [77]

Stosując dwa teodolity (rys. 3.10), można określić położenie końcówki interfejsu mechanicznego w trzech kierunkach [78]. Pomiary należy przeprowadzić dla wszystkich punktów pomiarowych, co wiąże się z koniecznością użycia dziesięciu teodolitów lub przedstawiania dwóch dla każdego punktu pomiarowego.



Rys. 3.10. Teodolit [79]

Metoda pomiaru dokładności systemem pomiarowym TRITOP

System pomiarowy *TRITOP* (rys. 3.11) składa się z: 1) cyfrowego aparatu fotograficznego wyposażonego w matrycę CCD, 2) komputer przenośny, 3) urządzenie Bluetooth służące do bezprzewodowej komunikacji cyfrowej krótkiego zasięgu lub przewód z wtyczką USB, 4) dodatkowe, niebędące urządzeniami elementy pomocnicze np. statyw lub niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia pomiarów krzyże i liniały pomiarowe.

Umożliwia zastosowanie bardzo szerokiego zakresu pomiaru i wyznaczanie położenia wielu punktów jednocześnie, we wszystkich kierunkach. Ograniczeniem jest natomiast konieczność: 1) wykonania dużej liczby zdjęć punktów pomiarowych oraz 2) umieszczenia punktów charakterystycznych na obiekcie – markerów. Pomiar dokładności tą metodą może także wiązać się z długim i złożonym procesem przetwarzania danych wynikowych.



Rys. 3.11. System pomiarowy TRITOP [62]

Pomiar dokładności pozycjonowania skanerem optycznym Atos – wizyjna

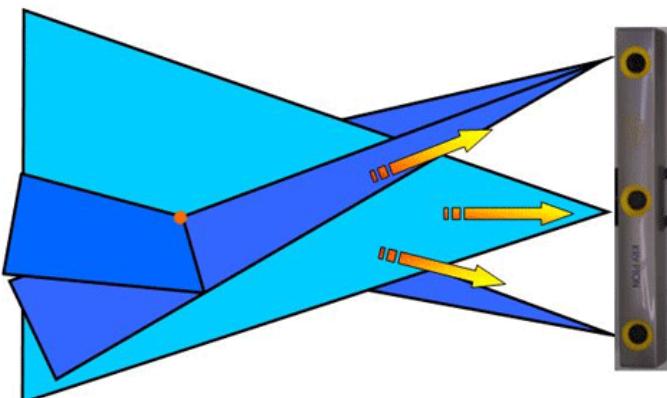
Istnieje możliwość zastosowania skanera Atos (rys. 3.12) do pomiaru powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego (lub innych charakterystyk funkcjonalnych). W tym przypadku skanowanie samego interfejsu mechanicznego lub zamocowanego na nim obciążenia jest bezcelowe. Konieczne jest umieszczenie bezpośrednio w przestrzeni pomiaru dodatkowego obiektu oraz przyjęcie na nim pewnego lokalnego układu współrzędnych, względem którego wykonuje się pomiar odchyłki. Badanie dokładności pozycjonowania robota przemysłowego poprzez skanowanie umożliwia przeprowadzenie pomiaru we wszystkich trzech kierunkach jednocześnie, ale jest to proces oddzielny dla każdego punktu pomiarowego. Ponadto metoda ta wiąże się z koniecznością przetwarzania dużej liczby danych, z których znaczna część nie przyczynia się bezpośrednio do uzyskania pożądanego wyniku [62].



Rys. 3.12. Przykład urządzenia skanującego Atos IIe firmy GOM [80]

Pomiar dokładności pozycjonowania systemem trzech kamer – Optical CMM

System zbudowany jest z trzech liniowych kamer CCD (rys. 3.13). Po wykryciu obiektu (oznakowanego specjalnymi markerami) rejestrowane jest jego położenie w przestrzeni. Warunkiem prawidłowego przeprowadzenia pomiaru jest położenie wszystkich punktów w przestrzeni pracy urządzenia. W rzeczywistości wiąże się to ze znaczącym zmniejszeniem wielkości sześciadanu pomiarowego.



Rys. 3.13. Rejestracja położenia punktu metoda opical CMM [81]

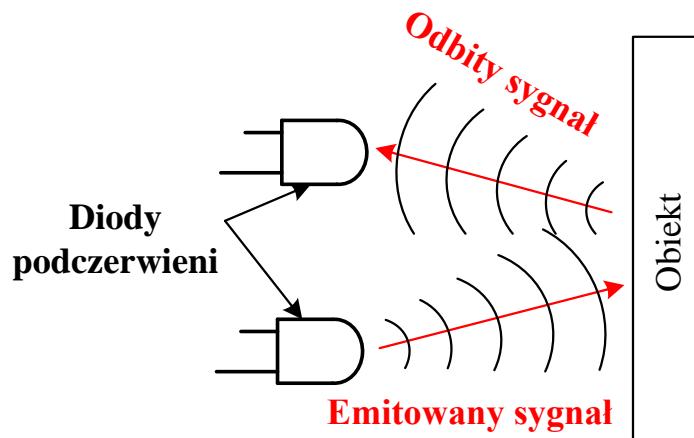
ad. c) Metody uwzględniające czas powrotu impulsu

Metoda ultradźwiękowa

Jest metodą bezkontaktową z zastosowaniem ultradźwiękowych czujników odległości [52], polegającą na pomiarze czasu wykrycia echa [82]. Do pomiaru wartości w trzech kierunkach (X, Y, Z) należy użyć zestawu czujników. W takiej sytuacji może wystąpić problem wzajemnego ich oddziaływania, a dokładność pomiaru okazać się niewystarczająca [48].

Metoda z zastosowaniem światła IR

Metoda z zastosowaniem czujników odległości IR (rys. 3.14), polegająca na pomiarze odległości poprzez obliczenie czasu trwania powrotu wyemitowanej wiązki podczerwieni [83]. Podobnie jak w metodzie ultradźwiękowej należy użyć zestawu czujników.



Rys. 3.14. Zasada działania czujników odległości IR [82]

Metoda pomiaru bezwładności

Procedurę tę opisuje Alban [84]. Badanie odbywa się za pomocą systemu nawigacji bezwładnościowej (np. w samolotach), który umożliwia pomiary dynamiczne. Wartości prędkości i lokalizacji można jednak uzyskać tylko poprzez integrację wartości dostarczonych przez akcelerometry. Prowadzi to do wzmacnienia szumu pomiaru, który jest ograniczony do kilku sekund [48].

Inny podział metod pomiaru powtarzalności pozycjonowania manipulatorów robota przemysłowego przedstawia Kluz [63], który dzieli je na trzy grupy.

1. Metody uwzględniające wymagania normy ISO 9283 [58] – w celu określenia błędu powtarzalności pozycjonowania robota konieczne jest przeprowadzenie serii pomiarów w skrajnych punktach przestrzeni roboczej, przy pełnym obciążeniu i z 100% prędkością. Sposób ten nie jest jednak praktyczny dla użytkowników ze względu na ograniczone informacje, które z niego można uzyskać [58], [85], [86].
2. Metody z zastosowaniem sieci neuronowych – nowoczesne oprogramowanie pozwala zaimplementować algorytmy stosujące sieci neuronowe. Duża liczba badań sugeruje, że mogą być one stosowane do określenia błędu powtarzalności pozycjonowania robota. Ich wyniki udowadniają, że metody te są bardzo dokładne, ale trudne do zastosowania w warunkach przemysłowych ze względu na znaczny zbiór danych wymagany do prawidłowego nauczenia sieci neuronowych. To z kolei wiąże się z koniecznością przeprowadzenia pomiarów w całym obszarze przestrzeni robota, jest czasochłonne i wymaga zaawansowanych urządzeń pomiarowych [87], [88].
3. Metody oparte na kinematyce robotów – pozwalały na identyfikację błędów powtarzalności pozycjonowania z uwzględnieniem wartości skrajnych błędów ustnień wewnętrznych współrzędnych $\pm\Delta q_i$. Zasadnicze problemy związane ze stosowaniem tych metod obejmują zagadnienie ustalania wartości $\pm\Delta q_i$ oraz fakt, że wyniki uzyskane za pomocą tych metod są w formie tzw. wielościanów lub wielokątów powtarzalności pozycjonowania [89], [32], [90].

Podsumowując należy stwierdzić, że w literaturze brakuje szczegółowych informacji dotyczących przebiegu badania powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych oraz warunków ich przeprowadzenia. Wiele firm produkujących roboty przemysłowe przeprowadza ich pomiary w swoich laboratoriach, jednak procedury i wyniki pomiaru objęte są tajemnicą i nie zostają opublikowane w ogólnodostępnej literaturze naukowej. Większa część danych literaturowych dotyczy procedur kalibracji (rozdz. 1.4) robotów przemysłowych, które z kolei powiązane są z pomiarem dokładności pozycjonowania.

3.2. Porównanie metod pomiaru dla dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Wybór metody pomiaru punktów w przestrzeni jest zależny od: 1) wielkości przestrzeni roboczej, w której znajdują się punkty pomiarowe oraz 2) wymaganej dokładności pomiarów.

Niektóre z opisanych wcześniej metod wymagają wprowadzenia modyfikacji w konstrukcji obciążenia nominalnego lub zastosowania dodatkowych znaczników pozwalających na przeprowadzenie pomiarów. W tab. 3.1 przedstawiono możliwości pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych określonymi urządzeniami pomiarowymi.

W celu porównania metod pomiaru przyjęto następujące kryteria oceny:

- 1) bezstykowość – określenie, czy dana metoda pomiaru wiąże się z bezpośrednim kontaktem z obciążeniem lub interfejsem robota,
- 2) wielokierunkowość – ustalenie możliwości pomiaru położenia interfejsu mechanicznego jednocześnie we wszystkich kierunkach przestrzeni,
- 3) dokładność pomiaru,
- 4) dostępność – możliwość zakupu niezbędnego urządzenia lub systemu pomiarowego oraz transportu,
- 5) pracochłonność – liczba czynności potrzebnych do wykonania pojedynczego pomiaru,
- 6) możliwość automatyzacji – określa stopień możliwości zautomatyzowania badań charakterystyk [62].

Porównanie metod pomiaru z uwzględnieniem powyższych kryteriów przedstawiono w tab. 3.2.

Tabela 3.1. Możliwości pomiaru wybranymi metodami określonej charakterystyki funkcjonalnej robota przemysłowego

Oznaczenie charakterystyki funkcjonalnej	M e t o d a p o m i a r u										
	Czujnik trzpieniowy	Czujnik inkrementalny	Czujniki indukcyjne – stanowisko	Ramie pomiarowe FaroArm	Interferometr laserowy	Laser Tracker	Teodolit	WMP	TRITOP	Skaner optyczny Atos	Optical CMM
AP – dokładność pozycjonowania	□	□	●	●	□	●	●	●	●	●	●
RP – powtarzalność pozycjonowania	□	□	●	●	□	●	●	●	●	●	●

● – możliwe do spełnienia, □ – pomiar tylko w jednym kierunku

- 43 -

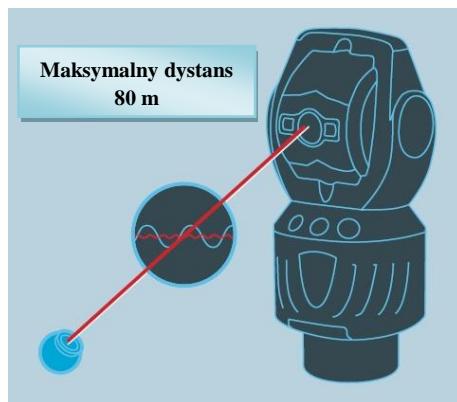
Tabela 3.2. Porównanie wybranych metod pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

Kryterium oceny	M e t o d a p o m i a r u										
	Czujniki trzpieniowe	Czujniki inkrementalne	Czujniki indukcyjne – stanowisko	Ramie pomiarowe FaroArm	Interferometr laserowy	Laser Tracker	Teodolit	WMP	TRITOP	Skaner optyczny Atos	Optical CMM
Bezstykowość	NIE	NIE	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK
Wielokierunkowość	NIE	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK
Dokładność	średnia	średnia	średnia	duża	b. duża	duża	średnia	duża	duża	duża	duża
Dostępność	duża	średnia	średnia	mała	średnia	mała	mała	średnia	średnia	mała	mała
Pracochłonność	duża	duża	średnia	średnia	duża	mała	duża	mała	średnia	średnia	średnia
Mozliwość automatyzacji	mała	mała	średnia	średnia	średnia	średnia	mała	duża	mała	mała	średnia

3.3. Autorska metoda pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

3.3.1. Opis urządzenia pomiarowego

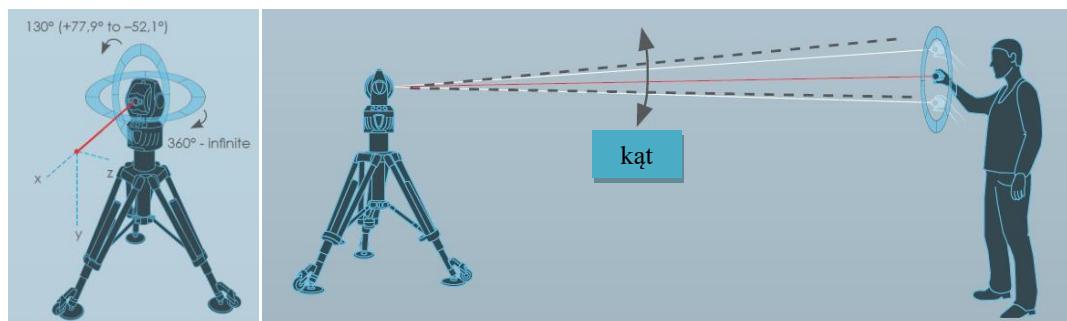
Do pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB zastosowano urządzenie pomiarowe firmy Faro – Laser Tracker Vantage (rys. 3.15 i 3.17), w którym do rejestracji położenia lustrzanej sondy pomiarowej – rys. 3.18 (SMR-a, ang. *spherically mounted retroreflector*) zastosowano zjawisko interferometrii świetlnej [91]. Wysyłana wiązka laserowa odbija się od luster SMR-a i wraca do urządzenia, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne określenie odległości między nimi (rys. 3.16).



Rys. 3.15. Pomiar odległości urządzeniem Laser Tracker Vantage [75]

Dwa enkodery rejestrują położenie kątowe w układzie współrzędnych horyzontalnych (elewacji i azymutu) głowicy wysyłającej wiązkę lasera. Zarejestrowana odległość między sondą a urządzeniem pozwala określić pozycję środka SMR-a, która w programie opisana jest wartościami X, Y i Z (w określonym przez operatora układzie współrzędnych). Dzięki ciągłej analizie różnicy długości wiązki laserowej (wysłanej i odbitej z częstotliwością tysiąca razy na sekundę [75]) możliwe jest dynamiczne śledzenie położenia sondy pomiarowej [92]. Zakres ruchu oraz możliwy sposób śledzenia położenia sondy przedstawiono na rys. 3.16.

W tabelach 3.3–3.5 zamieszczono szczegółowe dane techniczne dotyczące urządzenia Laser Tracker Vantage stosowanego przez autora w badaniach objętych niniejszą pracą.



Rys. 3.16. Zakres ruchu urządzenia Laser Tracker Vantage [75]



Rys. 3.17. Urządzenie pomiarowe Laser Tracker firmy Faro – Laser Tracker Vantage [75]

Tabela 3.3. Dokładności kątowe urządzenia Laser Tracker Vantage [75]

Poziomy pomiar odcinka	
Zakres [m]	ADM [mm]
2	0,044
5	0,064
10	0,098
20	0,170
30	0,240
40	0,312
50	0,382
60	0,452
70	0,524
80*	0,594

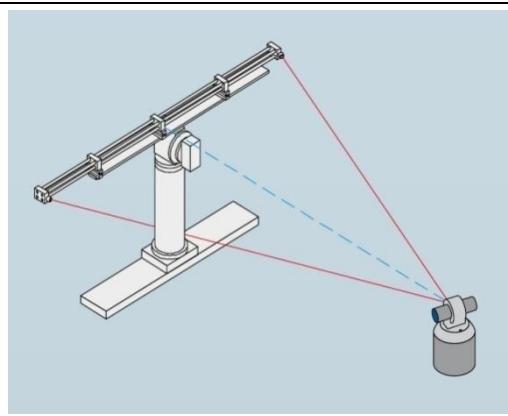
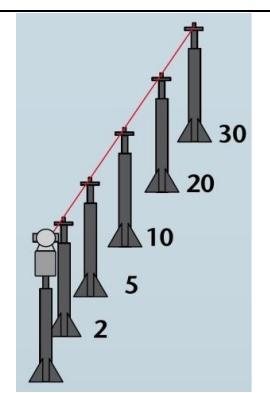


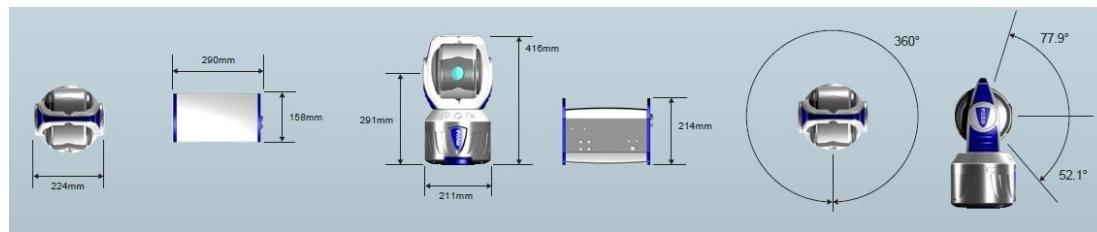
Tabela 3.4. Dokładności liniowe urządzenia Laser Tracker Vantage [75]

Liniowy pomiar odległości		
Długość [m]	Odległość [m]	ADM [mm]
2–5	3	0,018
2–10	8	0,022
2–20	18	0,030
2–30	28	0,038
2–40	38	0,046
2–50	48	0,054
2–60	58	0,062
2–70	68	0,070
2–80*	78	0,078





Rys. 3.18. Lustrzana sonda pomiarowa – SMR [75]



Rys. 3.19. Wymiary urządzenia Laser Tracker Vantage [75]

Tabela 3.5. Parametry urządzenia Laser Tracker Vantage [75]

Wymiar	Zakres	Środowisko pracy	Laser**	Pomiar odległości Tru-ADM***	Pomiar kątów***	Pole widzenia kamery
Rozmiar głowicy: (w × h): 224 mm × 416 mm Waga głowicy: 12,6 kg Rozmiar kontrolera: (l × d × h): 290 × 158 × 214 mm bez filtrów 316 × 158 × 214 mm z filtrami Waga kontrolera: 4,8 kg	w poziomie: 360°– nieskończony obrót w pionie: 130° (+77,9° to –52,1°) Minimalny zakres pracy: 0 m Maksymalny zakres pracy: 80 m* przy temp. 10°C 60 m przy temp. 35°C z sondą 1,5" i 7/8"	Wysokość nad poziomem morza: –700 m do 2,450 m Wilgotność: 0 to 95% bez kondensacji Temperatura pracy: –15°C do 50°C	633-635nm Laser 1 mW maks./cw Class II Laser Product	Rozdzielcość: 0,5 μm Częstotliwość próbkowania: 10000 punktów/sek Dokładność (MPE): 16 μm + 0,8 μm/m R0 Parameter (MPE) 16 μm	Dokładność kątowa (MPE): 20 μm + 5 μm/m Maksymalna prędkość kątowa: 180°/sec Poziom precyzji kątowej: ±2 sekundy kątowej	30°

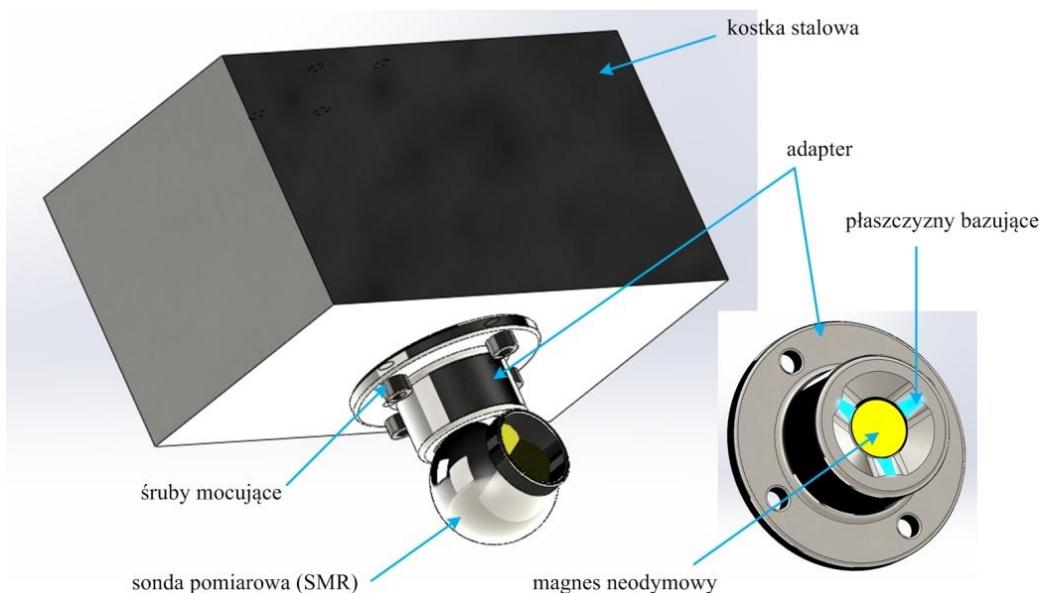
* Dla wybranych punktów. Szczegółowe dane techniczne można znaleźć na www.faro.com

** Produkt spełnia normy IEC 60825-1 2001-08.

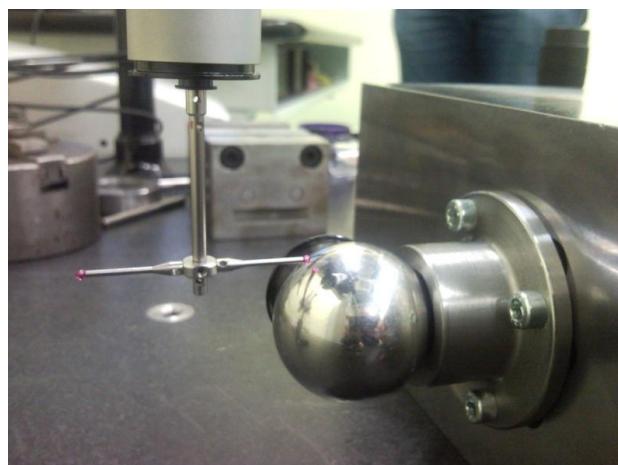
*** Dokładność MPE i pozostałe specyfikacje są obliczane na podstawie normy ASME B89.4.19–2006. Zmienność temperatury powietrza nie jest uwzględniana

3.3.2. Obciążenie nominalne i ustalenie położenia punktu TCP

Pomiary dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego należy przeprowadzić z obciążeniem nominalnym, które dla robota Fanuc M-16iB/10L wynosi 10 kg. W programie SolidWorks 2012 zaprojektowano i obliczono zespół pomiarowy składający się z: 1) kostki stalowej, 2) adaptera oraz 3) sondy pomiarowej o łącznej masie (z uwzględnieniem śrub mocujących) 10,004 kg. Po wykonaniu i zmontowaniu zespołu pomiarowego przystąpiono do określenia położenia środka SMR-a (względem płaszczyzny i osi mocowania w efektorze końcowym) przy pomocy maszyny współrzędnościowej DEA Global Image Clima 7.7.5. Uzyskano następujące wartości przesunięcia: $X = 0,118$ mm, $Y = -0,047$ mm, $Z = 124,757$ mm. Wprowadzono je do programu jako położenie punktu TCP, czyli punktu zdefiniowanego dla danego zastosowania, odniesionego do układu współrzędnych interfejsu mechanicznego. Model zespołu pomiarowego oraz pomiar położenia punktu TCP przedstawiono na rys. 3.20 i 3.21.



Rys. 3.20. Model zespołu pomiarowego [91]



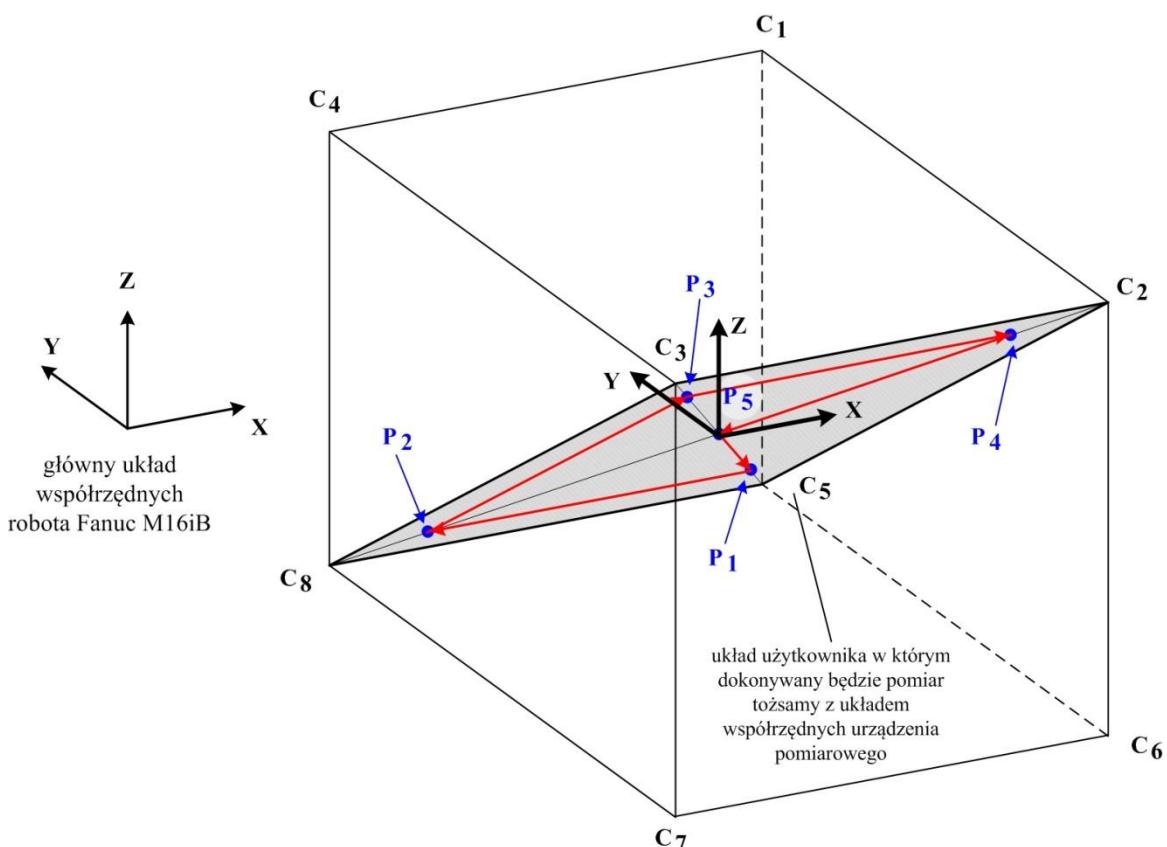
Rys. 3.21. Określenie położenia środka SMR-a na maszynie współrzędnościowej [91]

3.3.3. Program pomiarowy i ustawienie urządzenia pomiarowego

Przed wykonaniem pomiarów należy opracować program stabilizujący robota, z określeniem ruchu wszystkich osi w możliwie największym zakresie, wynikającym z wielkości przestrzeni roboczej. Dzięki temu temperatura wszystkich przegubów robota zostanie ustabilizowana.

Kolejną czynnością jest zamontowanie obciążenia nominalnego 10 kg i uruchomienie programu w trybie automatycznym trwającym 30 min. Po ustabilizowaniu temperatury należy opracować program pomiarowy: ruch pomiędzy pięcioma punktami położonymi na wcześniej wybranej płaszczyźnie pomiarowej, powtórzony 30 razy.

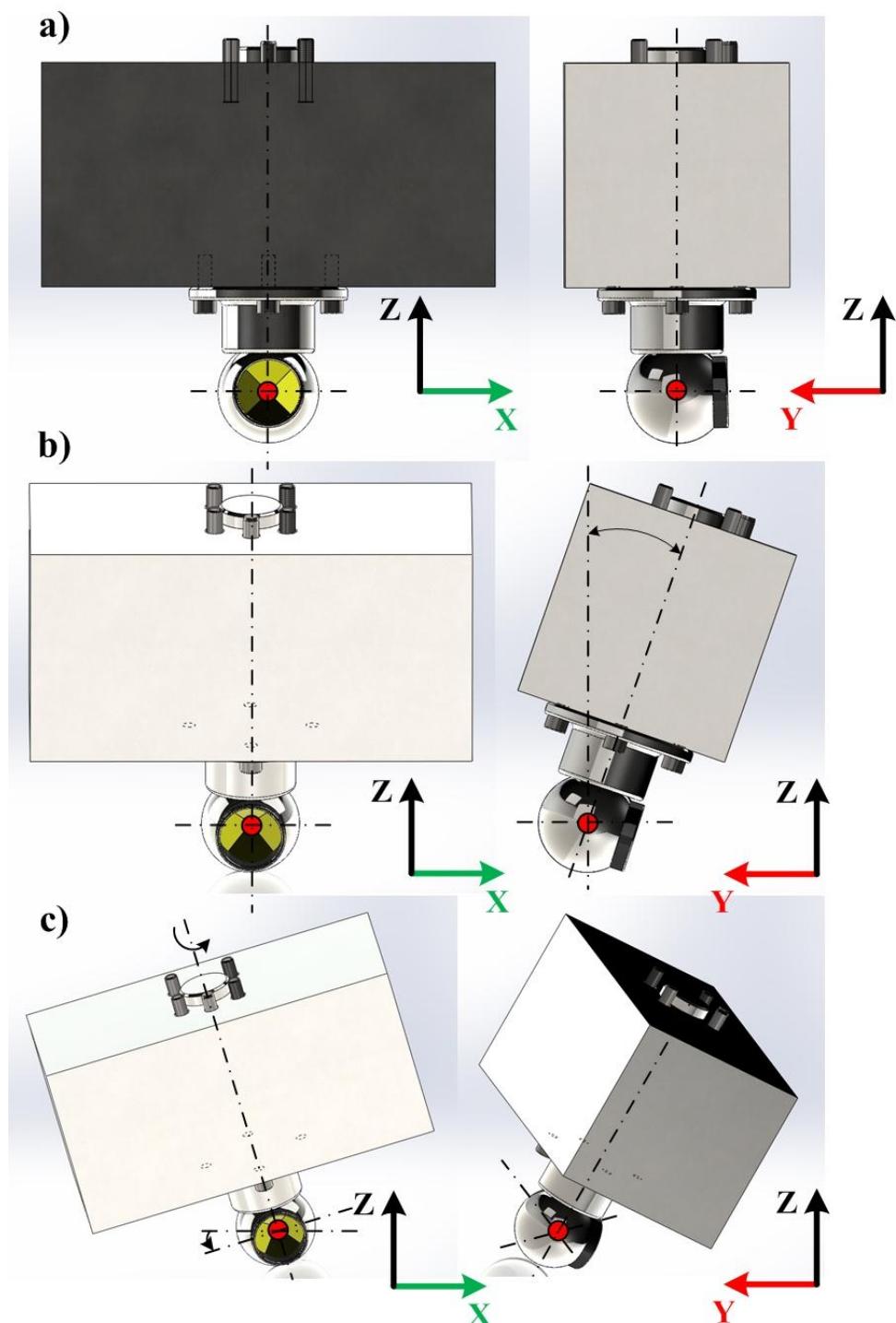
Układ współrzędnych użytkownika, w którym definiowane są punkty pomiarowe, należy umocować w punkcie P_5 z zachowaniem równoległości osi względem głównego układu współrzędnych robota przemysłowego. Położenie układu współrzędnych użytkownika przedstawiono na rys. 3.22.



Rys. 3.22. Płaszczyzna pomiarowa $C_2-C_3-C_8-C_5$ z położeniami punktów $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5$ i zaznaczonym torem pomiarowym [91]

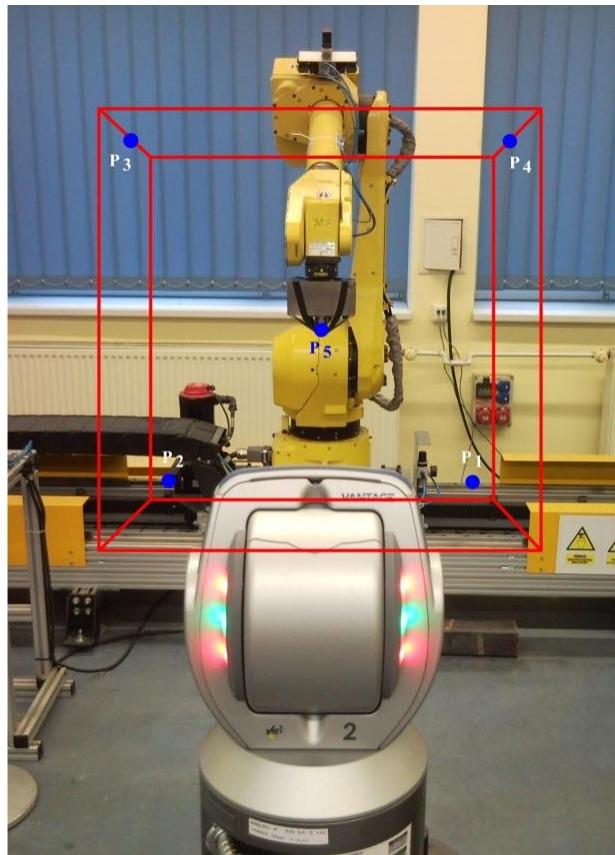
Podczas wykonywania programu położenie osi układu współrzędnych sondy pomiarowej (układ współrzędnych narzędzia) w kolejnych punktach pomiaru może być: 1) stałe (osie równoległe do osi układu współrzędnych użytkownika) lub 2) obrócone (względem osi X, Y, Z układu współrzędnych użytkownika).

Odpowiednie ustawienie położenia osi układu współrzędnych sondy pomiarowej spowoduje, że wiązka lasera będzie prostopadła do osi układu narzędzia. Przykład rotacji osi sondy przedstawiono na rys. 3.23.

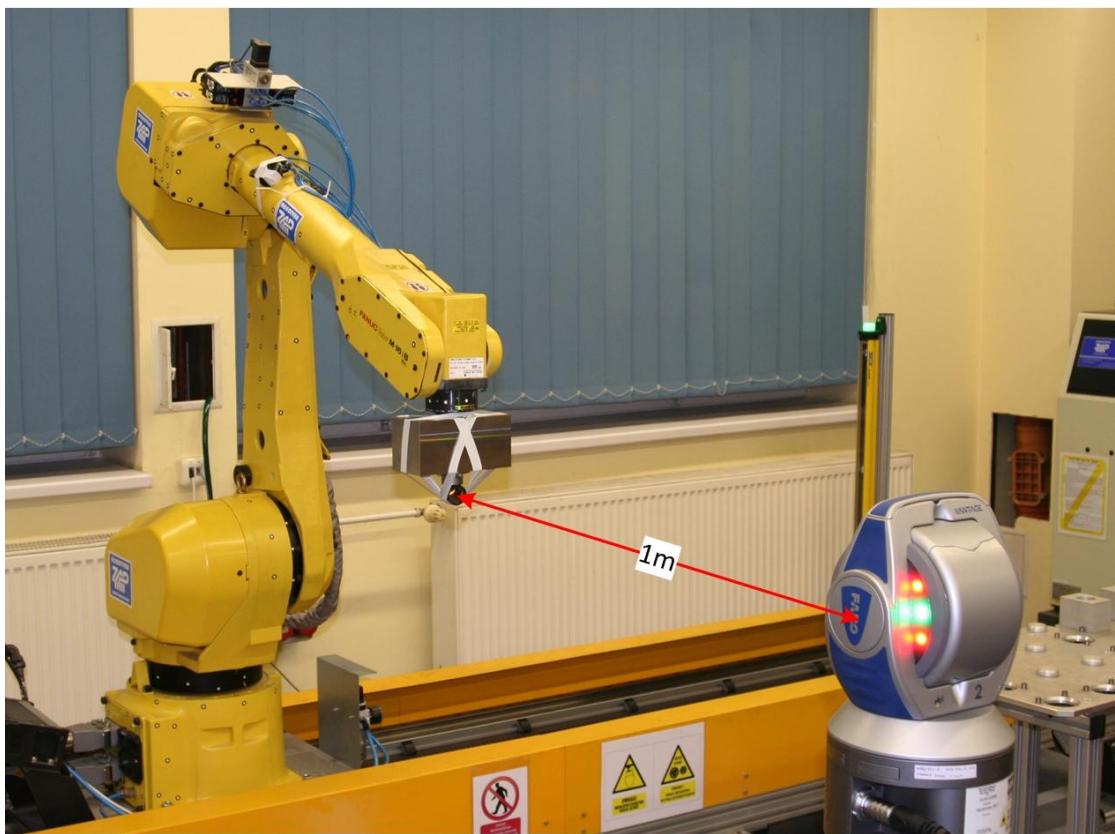


Rys. 3.23. Położenie osi sondy pomiarowej względem układu użytkownika: a) stałe, b) z rotacją względem osi X, c) z rotacją względem osi X i Z [91]

Kolejną czynnością jest ustawnienie urządzenia pomiarowego Laser Tracker-a w osi symetrii (jeśli to możliwe) [93] i pewnej odległości od środka sześcianu (punktu P_5), np. w odległości 1 m (rys. 3.24 i 3.25). Następnie należy zmierzyć położenie środka głowicy pomiarowej od podłoża, a zmierzone wartości umieścić w specjalnie opracowanym arkuszu kalkulacyjnym (opisany w dalszej części pracy).



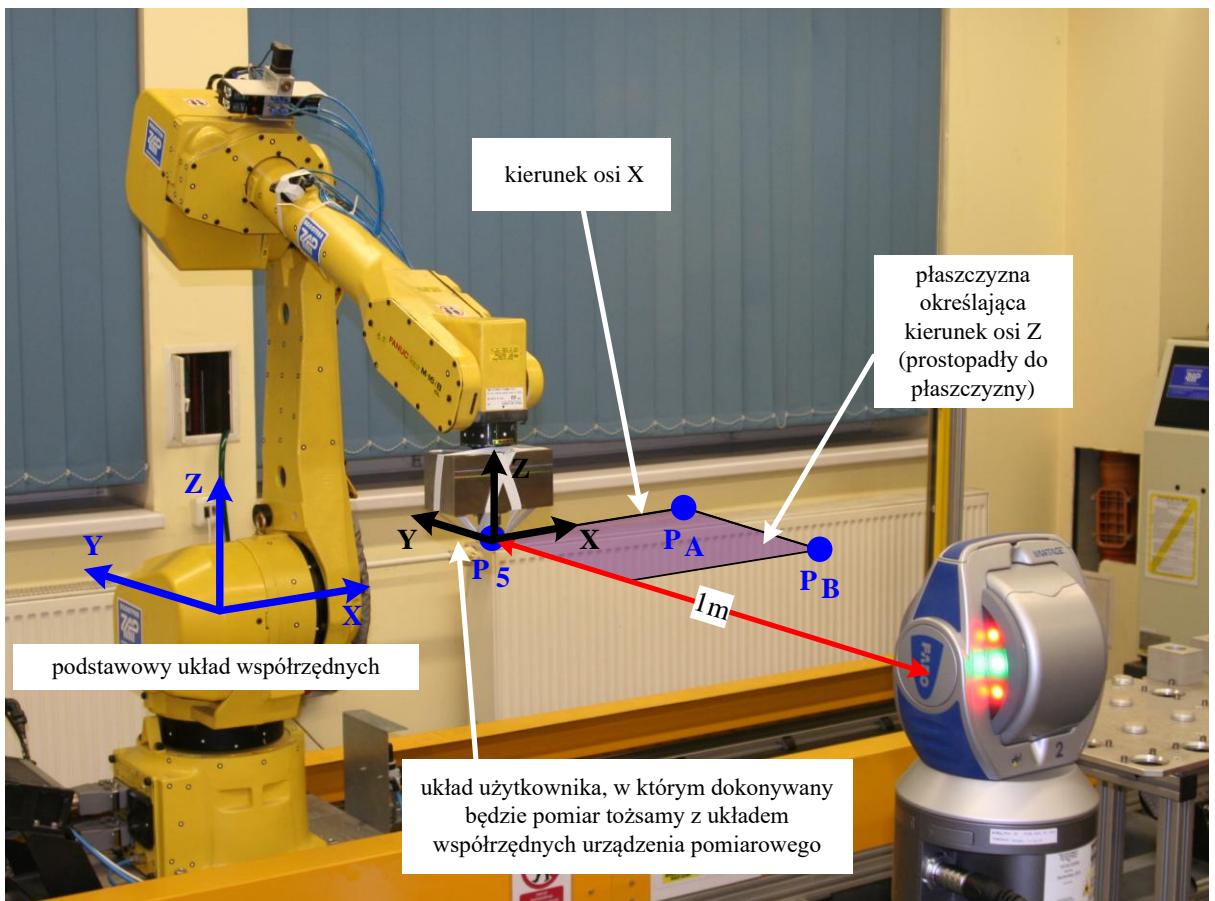
Rys. 3.24. Położenie Laser Trackera w osi środka sześciangu [91]



Rys. 3.25. Ustawienie urządzenia pomiarowego w odległości 1,0 m od środka sześciangu (punktu P₅) [91]

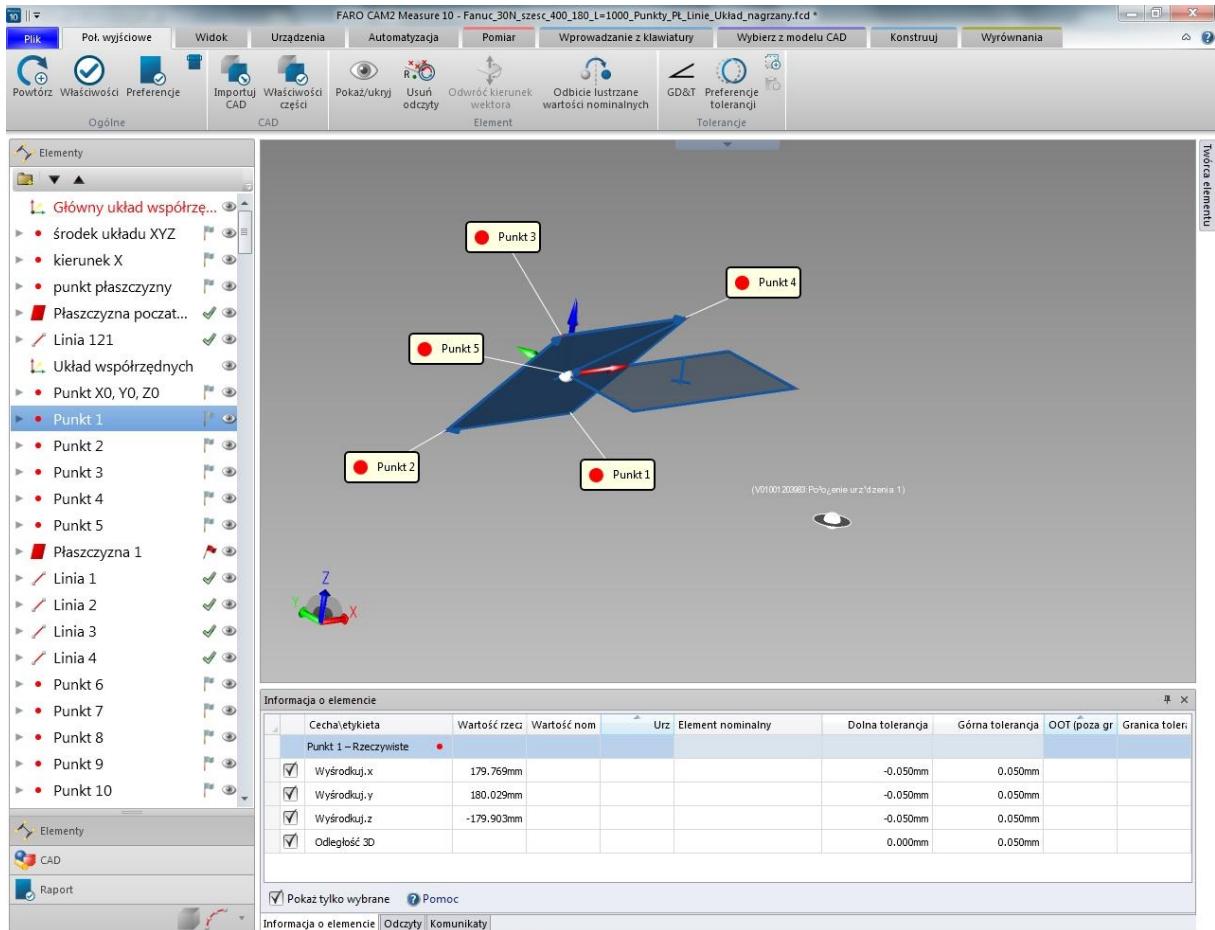
3.3.4. Program rejestrujący położenie punktów pomiarowych – CamMeasure 10

Do obsługi urządzenia Laser Tracker Venatge służy program CamMeasure 10, w którym należy opracować nowy projekt (program pomiarowy) do rejestrowania 30 powtórzeń ruchów pomiędzy punktami od P_1 do P_5 . Położenie środka układu współrzędnych urządzenia pomiarowego ustala się w punkcie P_5 przy pomocy trzech dodatkowych punktów, między którymi utworzone zostaną odcinki określające kierunki osi układu współrzędnych. Tworząc z punktów płaszczyznę, a następnie definiując jej zwrot, określa się kierunek i zwrot osi Z. Należy to uczynić w taki sposób, by osie układu współrzędnych były równoległe do osi głównego układu współrzędnych robota przemysłowego (rys. 3.26) i pokrywały się z układem użytkownika, w którym wykonywany będzie pomiar. Takie położenie układów współrzędnych ułatwia definiowanie wartości położen punktów od P_1 do P_5 podczas programowania robota oraz interpretację/analizę odczytów w programie CamMeasur 10.



Rys. 3.26. Układ współrzędnych urządzenia pomiarowego Faro Laser Tracker Vantage [91]

Następnie należy utworzyć 150 punktów (30 cykli pomiarowych po pięć punktów), w których będą wykonane odczyty położenia względem wcześniej zdefiniowanego układu współrzędnych. Na podstawie odczytów punktów pomiarowych można w programie tworzyć między innymi odcinki i płaszczyzny. Pozwoli to na dodatkową analizę wyników, np. odchylenia kątowego pomiędzy powstałymi płaszczyznami poszczególnych cykli pomiarowych. Przykład programu rejestrującego położenie punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 3.27.



Rys. 3.27. Widok okna projektu (programu pomiarowego) w programie CamMeasure 10 [59]

3.3.5. Program do obliczeń dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Do wyznaczenia dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego posłużyono się arkuszem kalkulacyjnym Excel 2007. Do wybranych komórek arkusza wprowadzono zależności matematyczne (wynikające m.in. z normy PN-ISO 9283) pozwalające obliczyć dokładność i powtarzalność pozycjonowania robota przemysłowego (rys. 3.28). Do arkusza wprowadzono ponadto dane dotyczące:

- 1) położenia punktu TCP względem układu współrzędnych interfejsu mechanicznego,
- 2) położenia punktu TCP względem głównego układu współrzędnych robota przemysłowego,
- 3) odległości punktu TCP od podłoża (płaszczyzny ustawienia Tracker-a),
- 4) długości boku pomiarowego i położenia Tracker-a.

Po wprowadzeniu powyższych danych obliczane jest położenie wierzchołków sześciangu (punkt 5., rys. 3.28), w którym dokonywany będzie pomiar oraz wyznaczane są współrzędne punktów pomiarowych P₁–P₅, które należy wprowadzić do programu robota przemysłowego (punkt 6., rys. 3.28).

PLASZCZYZNA POMIARU C2 – C3 – C8 – C5

1. Położenie punktu TCP

X	Y	Z
0.118	-0.047	124.757
W	P	R
0.000	0.000	0.000

[mm]

2. Położenie punktu TCP względem pomiarowego układu klateckiego XYZ = punkt P5

X	Y	Z
0.000	0.000	0.000
W	P	R
-180.000	0.000	-90.000

[mm]

3. Odległość punktu TCP od płaszczyzny ustawienia Trackera (podłoga)

Z_TCP	1190.000
-------	----------

[mm]

4. Rozmiar sześciangu pomiarowego i ustawienie Tracker-a

długość boku pomiarowego [mm]	540
długość boku sześciangu pomiarowego [mm]	675.000
odsuniecie o wierzchołka sześciangu pomiarowego w XYZ	67.5

[mm]

5. Ustawienie Tracker-a (źródła wiązki laserowej)

X	0
Y	-1000
Z	1190.000

[mm]

X punktu P5 pokrywa się z X urządzenia od punktu P5 (oś punktu P5 równoległa do osi Y) od "podłogi" punktu P5

5. Położenie sześciangu pomiarowego

C1	337.500	337.500	337.500
C2	337.500	-337.500	337.500
C3	-337.500	-337.500	337.500
C4	-337.500	337.500	337.500
C5	337.500	337.500	-337.500
C6	337.500	-337.500	-337.500
C7	-337.500	-337.500	-337.500
C8	-337.500	337.500	-337.500

6. Położenie punktów pomiarowych względem wspólnego układu współrzędnych.

P1	450.000	450.000	-450.000	-189.369	0.000	-103.310
P2	-450.000	450.000	-450.000	-189.369	0.000	-76.690
P3	-450.000	-450.000	450.000	-166.298	0.000	-70.428
P4	450.000	-450.000	450.000	-166.298	0.000	-109.572
P5	0.000	0.000	0.000	-180.000	0.000	-90.000

Rys. 3.28. Przykładowy arkusz podstawowych danych do obliczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego [59]

Po wstawieniu do arkusza odczytów pomiaru, obliczana jest wartość dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego (rys. 3.29–3.31).

pomiar_FANUC - Fanuc_Układ w TCP_P1_L=1000_dokl_i_powt_rotacja_w_Z.xlsx - Microsoft Excel

R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Feature	Property		Actual					
środek układu XYZ	Wyśrodkuj.x		0.000					
środek układu XYZ	Wyśrodkuj.y		0.000					
środek układu XYZ	Wyśrodkuj.z		0.000					
środek układu XYZ	Odległość 3D							
kierunek X	Wyśrodkuj.x		468.973					
kierunek X	Wyśrodkuj.y		0.000					
kierunek X	Wyśrodkuj.z		0.000					
kierunek X	Odległość 3D							
punkt płaszczyzny	Wyśrodkuj.x		469.054					
punkt płaszczyzny	Wyśrodkuj.y		-250.252					
punkt płaszczyzny	Wyśrodkuj.z		0.000					
punkt płaszczyzny	Odległość 3D							
Płaszczyzna początku układu XYZ	Płaskość		0.000					
Linia 121	Prostoliniowość		0.000					
Punkt X0, Y0, Z0	Wyśrodkuj.x		-0.014					
Punkt X0, Y0, Z0	Wyśrodkuj.y		0.019					
Punkt X0, Y0, Z0	Wyśrodkuj.z		0.008					
Punkt X0, Y0, Z0	Odległość 3D							
Punkt 1	Wyśrodkuj.x	449.412	449.412		0.03221195	0.00019817		
Punkt 1	Wyśrodkuj.y	449.646	449.646					
Punkt 1	Wyśrodkuj.z	-449.873	-449.873					
Punkt 1	Odległość 3D		0.000					
Punkt 2	Wyśrodkuj.x	-449.161	-449.161		0.02774137	0.00016276		
Punkt 2	Wyśrodkuj.y	449.009	449.009					
Punkt 2	Wyśrodkuj.z	-450.216	-450.216					
Punkt 2	Odległość 3D		0.000					
Punkt 3	Wyśrodkuj.x	-451.292	-451.292		0.04521230	0.00085503		
Punkt 3	Wyśrodkuj.y	-450.857	-450.857					
Punkt 3	Wyśrodkuj.z	449.510	449.510					
Punkt 3	Odległość 3D		0.000					
Punkt 4	Wyśrodkuj.x	449.455	449.455		0.04657731	0.00105100		
Punkt 4	Wyśrodkuj.y	-450.941	-450.941					
Punkt 4	Wyśrodkuj.z	449.871	449.871					
Punkt 4	Odległość 3D		0.000					

Rys. 3.29. Dane z programu pomiarowego (CamMeasure 10, rys. 3.27) wprowadzone do arkusza obliczeniowego [59]

Obliczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania					
Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych robota przemysłowego $AP = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2}$					
$AP_x = (\bar{x} - x_c)$ $AP_y = (\bar{y} - y_c)$ $AP_z = (\bar{z} - z_c)$					
P1	-0.935	-0.461	-0.221	1.0655595	Liczba pomiarów 30
P2	-0.824	-1.139	0.069	1.4069343	
P3	1.069	0.906	-0.452	1.4720179	
P4	-0.621	0.903	-0.164	1.1085754	
P5	0.063	0.002	0.055	0.0839824	
$\bar{x}, \bar{y} \text{ i } \bar{z}$ – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej otrzymane przez n-krotne uzyskanie położenia zadanego					
X	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}		
P1	449.065	449.539	-449.779		
P2	-449.176	448.861	-450.069	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j; \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j;$	
P3	-451.069	-450.906	449.548		
P4	449.379	-450.903	449.836		
P5	-0.063	0.002	0.055		
$x_c, y_c \text{ i } z_c$ – współrzędne położenia zadanego					
Xc	Yc	Zc			
P1	450.000	450.000	-450.000		
P2	-450.000	450.000	-450.000		
P3	-450.000	450.000	450.000		
P4	450.000	-450.000	450.000		
P5	0.000	0.000	0.000		
$x_j, y_j \text{ i } z_j$ – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j-tym ruchu do położenia zadanego					

Rys. 3.30. Wyniki dokładności pozycjonowania robota przemysłowego [91]

Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych				
				$RP = \bar{l} + 3S_l$
$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j; =$				0.01334
$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$				
$\bar{x}, \bar{y} \text{ i } \bar{z}$ – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej uzyskanej przez n-krotne powtórzenie położenia zadanego,				
$x_j, y_j \text{ i } z_j$ – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j-tym powtórzeniu położenia zadanego.				
$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}$ – rozrzut punktów				0.00879379
RP	lj	1sr	Sl	
P1	0,032	0,388504	0,012950	0,006420
P2	0,029	0,378165	0,012606	0,005307
P3	0,032	0,409174	0,013639	0,006187
P4	0,058	0,514131	0,017138	0,013461
P5	0,022	0,270473	0,009016	0,004426
			0,01307	0,007854

Rys. 3.31. Wynik powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego [59]

3.4. Przeprowadzenie pomiarów – obliczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Podsumowując powyższe rozważania należy stwierdzić, że aby prawidłowo przeprowadzić pomiary dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych, należy wykonać czynności opisane w rozdz. 3.3, tj.:

1. każdy pomiar zapisać jako osobny plikw programie CamMeasur 10 i Microsoft Excel,
2. wygenerować raport w programie CamMeasure 10 (w formacie Excel-a),
3. przenieść uzyskane wyniki do arkusza pomiarowego, które automatycznie zostaną obliczone jako wartość dokładności i powtarzalności pozycjonowania (rys. 3.30 i 3.31),
4. zgodnie z normą [58] należy przygotować raport końcowy przedstawiony na rys. 3.32.

PRZYKŁAD PROTOKOLU BADAŃ																															
ROBOT Producent: FANUC Typ: M16iB Model Nr: 10L Seria Nr: E-26466 Polozenie montażowe: STACJONARNY Wersja oprogramowania:	UKŁAD STERUJĄCY R-J1C A05B-2512-B150 STACJONARNY																														
MIEJSCE BADAŃ: POLITECHNIKA POZNANSKA LABORATORIUM ROBOTYKI UL. PIOTROWO 3 61-965 POZNAN WARUNKI ŚRODOWISKOWE: STALE Temperatura otoczenia: 21/22°C Warunki inne niż normalne:																															
Uwaga – komentarz dotyczy warunków nie mieszczących się w przewidzianym zakresie CZAS NAGRZEWANIA: 30 MIN APARATURA: LASER TRACKER VANTAGE <ul style="list-style-type: none"> - Typ: Laser Tracker - Model Nr: Vantage - Seria Nr: - Komentarz: 																															
WYKAZ WYKONANYCH BADAŃ ZGODNIE Z ISO 9293: <ol style="list-style-type: none"> 1) Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego. 2) Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego. 3) Zmienność dokładności pozycjonowania wielokierunkowego. 4) Dokładność i powtarzalność odwzorowania odcinka. 5) Czas stabilizacji położenia. 6) Przegubowanie pozycjonowania. 7) Pelzanie charakterystyk pozycjonowania. 8) Dokładność i powtarzalność odwzorowania toru. 9) Odchylenia odwzorowania toru. 10) Dokładność, powtarzalność i fluktuacja prędkości odwzorowania toru. 11) Minimalny czas pozycjonowania. Podatność statyczna. 																															
Płaszczyzna pomiarowa: Długość boku sześciangu pomiarowego 100mm.																															
<ul style="list-style-type: none"> a) C₁ – C₂ – C₃ – C₄, b) C₂ – C₃ – C₈ – C₅, c) C₃ – C₄ – C₅ – C₆, d) C₄ – C₁ – C₆ – C₇. 																															
Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Obciążenie</th> <th>Predkość</th> <th>P₁</th> <th>P₂</th> <th>P₃</th> <th>P₄</th> <th>P₅</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100%</td> <td>100%</td> <td>AP = 0,077 AP_x = 0,063 AP_y = 0,039 AP_z = 0,021</td> <td>AP = 0,177 AP_x = -0,17 AP_y = -0,017 AP_z = 0,048</td> <td>AP = 0,128 AP_x = 0,124 AP_y = 0,011 AP_z = 0,032</td> <td>AP = 0,034 AP_x = -0,002 AP_y = -0,02 AP_z = -0,028</td> <td>AP = 0,099 AP_x = 0,077 AP_y = 0,013 AP_z = -0,062</td> </tr> <tr> <td>50%</td> <td>50%</td> <td>AP = AP_x = AP_y = AP_z =</td> <td>AP = AP_x = AP_y = AP_z =</td> <td>AP = AP_x = AP_y = AP_z =</td> <td>AP = AP_x = AP_y = AP_z =</td> <td>AP = AP_x = AP_y = AP_z =</td> </tr> </tbody> </table>		Obciążenie	Predkość	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	100%	100%	AP = 0,077 AP _x = 0,063 AP _y = 0,039 AP _z = 0,021	AP = 0,177 AP _x = -0,17 AP _y = -0,017 AP _z = 0,048	AP = 0,128 AP _x = 0,124 AP _y = 0,011 AP _z = 0,032	AP = 0,034 AP _x = -0,002 AP _y = -0,02 AP _z = -0,028	AP = 0,099 AP _x = 0,077 AP _y = 0,013 AP _z = -0,062	50%	50%	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =									
Obciążenie	Predkość	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅																									
100%	100%	AP = 0,077 AP _x = 0,063 AP _y = 0,039 AP _z = 0,021	AP = 0,177 AP _x = -0,17 AP _y = -0,017 AP _z = 0,048	AP = 0,128 AP _x = 0,124 AP _y = 0,011 AP _z = 0,032	AP = 0,034 AP _x = -0,002 AP _y = -0,02 AP _z = -0,028	AP = 0,099 AP _x = 0,077 AP _y = 0,013 AP _z = -0,062																									
50%	50%	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =	AP = AP _x = AP _y = AP _z =																									
Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>RP</th> <th>lj</th> <th>lśr</th> <th>Sl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td> <td>0,032</td> <td>0,388504</td> <td>0,012950</td> <td>0,006420</td> </tr> <tr> <td>P2</td> <td>0,029</td> <td>0,378165</td> <td>0,012606</td> <td>0,005307</td> </tr> <tr> <td>P3</td> <td>0,032</td> <td>0,409174</td> <td>0,013639</td> <td>0,006187</td> </tr> <tr> <td>P4</td> <td>0,058</td> <td>0,514131</td> <td>0,017138</td> <td>0,013461</td> </tr> <tr> <td>P5</td> <td>0,022</td> <td>0,270473</td> <td>0,009016</td> <td>0,004426</td> </tr> </tbody> </table>			RP	lj	lśr	Sl	P1	0,032	0,388504	0,012950	0,006420	P2	0,029	0,378165	0,012606	0,005307	P3	0,032	0,409174	0,013639	0,006187	P4	0,058	0,514131	0,017138	0,013461	P5	0,022	0,270473	0,009016	0,004426
	RP	lj	lśr	Sl																											
P1	0,032	0,388504	0,012950	0,006420																											
P2	0,029	0,378165	0,012606	0,005307																											
P3	0,032	0,409174	0,013639	0,006187																											
P4	0,058	0,514131	0,017138	0,013461																											
P5	0,022	0,270473	0,009016	0,004426																											
Badania przeprowadził: Data: Badania sprawdził: Data:																															
Strona 1 / 2																															
Strona 2 / 2																															

Rys. 3.32. Raport pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L

3.5. Analiza wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych uzyskanych na podstawie normy ISO 9283

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowy przeprowadzono dla robotów przemysłowych firmy:

- Fanuc M-16iB,
- Kuka KR 16,
- Panasonic TA 1400.

Pomiary przeprowadzono w różnych konfiguracjach uwzględniających:

- odległość urządzenia pomiarowego względem punktu P₅ (np. 2,25 m, 1 m),
- długość boku pomiarowego: od 45 do 900 mm,
- brak rotacji osi pionowej obciążenia nominalnego względem osi X i Z,
- rotację osi pionowej obciążenia nominalnego względem osi X i Z,

przykładową konfigurację przedstawiono w tab. 3.6.

Tabela 3.6. Przykładowa konfiguracja pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

robot:	Fanuc M-16iB/10L
długość boku sześciangu pomiarowego [mm]:	45 mm
odległość urządzenia [mm]:	1000 mm
rotacja układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10kg):	brak
prędkość:	100%

Przykłady wyników pomiaru przedstawiono w tab. 3.7.

Tabela 3.7. Wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L

Bez rotacji układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg)						
L = 1000 mm						
ROBOT						
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L	
Prędkość:	100%	Udźwig	10kg			
Długość boku sześciangu pomiarowego [mm]	45,00	odległość urządzenia [mm]	1000,00			
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9						
	APx	APy	APz	AP	RP	
P1	0,021	0,050	0,060	0,081	0,021	
P2	-0,033	0,054	0,092	0,112	0,016	
P3	0,025	0,064	0,091	0,114	0,027	
P4	-0,152	0,051	0,089	0,183	0,025	
P5	0,098	0,030	0,038	0,109	0,016	
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego						
RP = 0,027						
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta						
RP = 0,100						
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?	TAK					
ROBOT						
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L	
Prędkość:	100%	Udźwig	10kg	odległość urządzenia [mm]	1000,00	
Długość boku sześciangu pomiarowego [mm]	450,00	odległość urządzenia [mm]	1000,00			
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9						
	APx	APy	APz	AP	RP	
P1	-0,072	0,027	-0,079	0,111	0,065	
P2	-0,738	-0,259	0,097	0,788	0,046	
P3	0,139	0,298	-0,183	0,377	0,044	
P4	-0,376	0,250	-0,034	0,453	0,020	
P5	0,210	0,013	0,001	0,210	0,037	
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego						
RP = 0,065						
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta						
RP = 0,100						
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?	TAK					

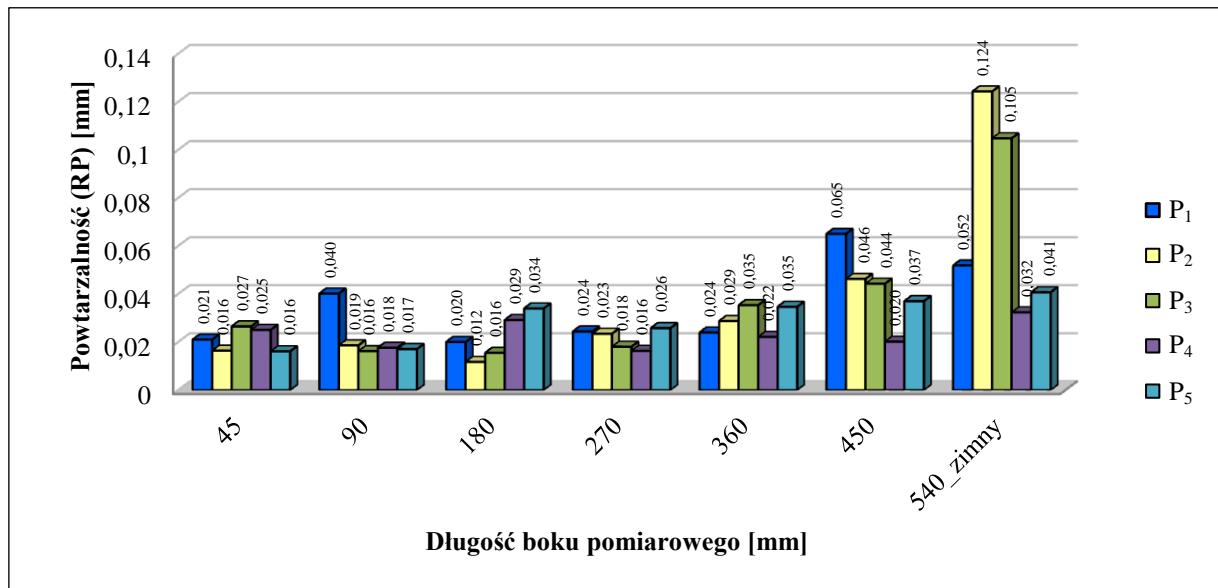
Tabela 3.7. cd.

Bez rotacji układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg)																																																																														
L = 2240 mm																																																																														
ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 180,00 odległość urządzenia [mm] 2240,00				ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 720,00 odległość urządzenia [mm] 2240,00																																																																										
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9				Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>-0,139</td><td>0,099</td><td>0,159</td><td>0,234</td><td>0,018</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>-0,315</td><td>0,011</td><td>0,214</td><td>0,380</td><td>0,012</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>-0,011</td><td>0,113</td><td>-0,114</td><td>0,161</td><td>0,012</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>-0,259</td><td>0,059</td><td>-0,087</td><td>0,279</td><td>0,024</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,025</td><td>0,027</td><td>0,045</td><td>0,058</td><td>0,022</td></tr> </tbody> </table>					APx	APy	APz	AP	RP	P1	-0,139	0,099	0,159	0,234	0,018	P2	-0,315	0,011	0,214	0,380	0,012	P3	-0,011	0,113	-0,114	0,161	0,012	P4	-0,259	0,059	-0,087	0,279	0,024	P5	0,025	0,027	0,045	0,058	0,022	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>-0,634</td><td>-0,139</td><td>-0,063</td><td>0,652</td><td>0,030</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>-0,886</td><td>-0,686</td><td>0,184</td><td>1,136</td><td>0,044</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>0,686</td><td>0,517</td><td>-0,299</td><td>0,909</td><td>0,026</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>-0,672</td><td>0,501</td><td>-0,050</td><td>0,840</td><td>0,024</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,012</td><td>0,002</td><td>0,018</td><td>0,022</td><td>0,026</td></tr> </tbody> </table>				APx	APy	APz	AP	RP	P1	-0,634	-0,139	-0,063	0,652	0,030	P2	-0,886	-0,686	0,184	1,136	0,044	P3	0,686	0,517	-0,299	0,909	0,026	P4	-0,672	0,501	-0,050	0,840	0,024	P5	0,012	0,002	0,018	0,022	0,026
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	-0,139	0,099	0,159	0,234	0,018																																																																									
P2	-0,315	0,011	0,214	0,380	0,012																																																																									
P3	-0,011	0,113	-0,114	0,161	0,012																																																																									
P4	-0,259	0,059	-0,087	0,279	0,024																																																																									
P5	0,025	0,027	0,045	0,058	0,022																																																																									
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	-0,634	-0,139	-0,063	0,652	0,030																																																																									
P2	-0,886	-0,686	0,184	1,136	0,044																																																																									
P3	0,686	0,517	-0,299	0,909	0,026																																																																									
P4	-0,672	0,501	-0,050	0,840	0,024																																																																									
P5	0,012	0,002	0,018	0,022	0,026																																																																									
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,024				Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,044																																																																										
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100				Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100																																																																										
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK				Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK																																																																										
Bez rotacji układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg)																																																																														
L = 2060 mm i zmiana prędkości ruchu, długość boku pomiarowego 900 mm																																																																														
ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 900,00 odległość urządzenia [mm] 2060,00				ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 900,00 odległość urządzenia [mm] 2060,00																																																																										
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9				Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>0,143</td><td>-0,386</td><td>-0,971</td><td>1,054</td><td>0,034</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>0,766</td><td>-1,712</td><td>-0,804</td><td>2,041</td><td>0,041</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>1,365</td><td>1,616</td><td>-0,912</td><td>2,304</td><td>0,040</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>2,782</td><td>-1,198</td><td>-0,768</td><td>3,125</td><td>0,033</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,009</td><td>0,046</td><td>0,009</td><td>0,048</td><td>0,025</td></tr> </tbody> </table>					APx	APy	APz	AP	RP	P1	0,143	-0,386	-0,971	1,054	0,034	P2	0,766	-1,712	-0,804	2,041	0,041	P3	1,365	1,616	-0,912	2,304	0,040	P4	2,782	-1,198	-0,768	3,125	0,033	P5	0,009	0,046	0,009	0,048	0,025	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>0,166</td><td>-0,327</td><td>-0,983</td><td>1,049</td><td>0,032</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>0,769</td><td>-1,525</td><td>-0,830</td><td>1,898</td><td>0,029</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>1,416</td><td>1,730</td><td>-0,975</td><td>2,440</td><td>0,032</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>2,791</td><td>-1,180</td><td>-0,797</td><td>3,133</td><td>0,058</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,032</td><td>0,005</td><td>0,021</td><td>0,038</td><td>0,022</td></tr> </tbody> </table>				APx	APy	APz	AP	RP	P1	0,166	-0,327	-0,983	1,049	0,032	P2	0,769	-1,525	-0,830	1,898	0,029	P3	1,416	1,730	-0,975	2,440	0,032	P4	2,791	-1,180	-0,797	3,133	0,058	P5	0,032	0,005	0,021	0,038	0,022
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	0,143	-0,386	-0,971	1,054	0,034																																																																									
P2	0,766	-1,712	-0,804	2,041	0,041																																																																									
P3	1,365	1,616	-0,912	2,304	0,040																																																																									
P4	2,782	-1,198	-0,768	3,125	0,033																																																																									
P5	0,009	0,046	0,009	0,048	0,025																																																																									
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	0,166	-0,327	-0,983	1,049	0,032																																																																									
P2	0,769	-1,525	-0,830	1,898	0,029																																																																									
P3	1,416	1,730	-0,975	2,440	0,032																																																																									
P4	2,791	-1,180	-0,797	3,133	0,058																																																																									
P5	0,032	0,005	0,021	0,038	0,022																																																																									
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,041				Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,058																																																																										
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100				Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100																																																																										
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK				Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK																																																																										
Z rotacją układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg) względem osi Z																																																																														
L = 1000 mm																																																																														
ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 360,00 odległość urządzenia [mm] 1000,00				ROBOT Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L Prędkość: 100% Uchwyt 10kg Długość boku sześciangu pomiarowego [mm] 900,00 odległość urządzenia [mm] 1000,00																																																																										
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9				Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzn C2 – C3 – C5 – C9																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>-0,161</td><td>0,032</td><td>-0,068</td><td>0,178</td><td>0,031</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>-0,378</td><td>-0,233</td><td>0,036</td><td>0,446</td><td>0,029</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>0,245</td><td>0,186</td><td>0,154</td><td>0,344</td><td>0,017</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>-0,406</td><td>0,050</td><td>0,214</td><td>0,461</td><td>0,016</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,041</td><td>0,019</td><td>0,031</td><td>0,055</td><td>0,030</td></tr> </tbody> </table>					APx	APy	APz	AP	RP	P1	-0,161	0,032	-0,068	0,178	0,031	P2	-0,378	-0,233	0,036	0,446	0,029	P3	0,245	0,186	0,154	0,344	0,017	P4	-0,406	0,050	0,214	0,461	0,016	P5	0,041	0,019	0,031	0,055	0,030	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>APx</th><th>APy</th><th>APz</th><th>AP</th><th>RP</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td><td>-0,560</td><td>-0,349</td><td>-0,142</td><td>0,675</td><td>0,050</td></tr> <tr> <td>P2</td><td>-0,832</td><td>-1,010</td><td>0,197</td><td>1,323</td><td>0,040</td></tr> <tr> <td>P3</td><td>1,287</td><td>0,844</td><td>-0,447</td><td>1,602</td><td>0,059</td></tr> <tr> <td>P4</td><td>-0,532</td><td>0,924</td><td>-0,088</td><td>1,070</td><td>0,047</td></tr> <tr> <td>P5</td><td>0,065</td><td>0,023</td><td>0,034</td><td>0,077</td><td>0,046</td></tr> </tbody> </table>				APx	APy	APz	AP	RP	P1	-0,560	-0,349	-0,142	0,675	0,050	P2	-0,832	-1,010	0,197	1,323	0,040	P3	1,287	0,844	-0,447	1,602	0,059	P4	-0,532	0,924	-0,088	1,070	0,047	P5	0,065	0,023	0,034	0,077	0,046
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	-0,161	0,032	-0,068	0,178	0,031																																																																									
P2	-0,378	-0,233	0,036	0,446	0,029																																																																									
P3	0,245	0,186	0,154	0,344	0,017																																																																									
P4	-0,406	0,050	0,214	0,461	0,016																																																																									
P5	0,041	0,019	0,031	0,055	0,030																																																																									
	APx	APy	APz	AP	RP																																																																									
P1	-0,560	-0,349	-0,142	0,675	0,050																																																																									
P2	-0,832	-1,010	0,197	1,323	0,040																																																																									
P3	1,287	0,844	-0,447	1,602	0,059																																																																									
P4	-0,532	0,924	-0,088	1,070	0,047																																																																									
P5	0,065	0,023	0,034	0,077	0,046																																																																									
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,031				Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego RP = 0,059																																																																										
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100				Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta RP = 0,100																																																																										
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK				Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie? TAK																																																																										

Tabela 3.7. cd.

Z rotacją układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg) względem osi Z L = 2240 mm								
ROBOT					ROBOT			
Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L					Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L			
Prędkość: 100% Udźwig 10kg					Prędkość: 100% Udźwig 10kg			
Długość boku szcianu pomiarowego [mm]	90,00	odległość urządzenia [mm] 2240,00						
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9								
P1	-0,046	0,003	-0,061	0,077	RP	0,028		
P2	-0,046	-0,022	-0,014	0,053	RP	0,022		
P3	0,087	-0,001	0,084	0,121	RP	0,020		
P4	-0,227	-0,029	0,083	0,244	RP	0,023		
P5	0,003	0,015	0,004	0,016	RP	0,020		
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego								
RP = 0,028								
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta								
RP = 0,100								
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?	TAK							
Z rotacją układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg) względem osi Z i X L = 1000 mm								
ROBOT					ROBOT			
Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L					Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L			
Prędkość: 100% Udźwig 10kg					Prędkość: 100% Udźwig 10kg			
Długość boku szcianu pomiarowego [mm]	360,00	odległość urządzenia [mm] 1000,00						
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9								
P1	-0,011	0,164	0,100	0,192	RP	0,044		
P2	-0,317	-0,078	0,176	0,370	RP	0,027		
P3	0,253	0,304	-0,120	0,413	RP	0,028		
P4	-0,424	0,255	0,034	0,496	RP	0,020		
P5	0,026	0,014	0,039	0,049	RP	0,044		
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego								
RP = 0,044								
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta								
RP = 0,100								
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?	TAK							
Z rotacją układu narzędzi (obciążenia nominalnego 10 kg) względem osi Z i X L = 2240 mm					ROBOT			
Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L					Producent: FANUC Model M16iB Typ: 10L			
Prędkość: 100% Udźwig 10kg					Prędkość: 100% Udźwig 10kg			
Długość boku szcianu pomiarowego [mm]	90,00	odległość urządzenia [mm] 2240,00						
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9								
P1	0,035	0,010	-0,020	0,042	RP	0,034		
P2	-0,037	-0,013	0,009	0,040	RP	0,024		
P3	0,078	0,027	0,064	0,105	RP	0,025		
P4	-0,228	-0,003	0,067	0,238	RP	0,022		
P5	0,053	0,015	0,006	0,055	RP	0,020		
Zmierzona max wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego								
RP = 0,034								
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta								
RP = 0,100								
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?	TAK							

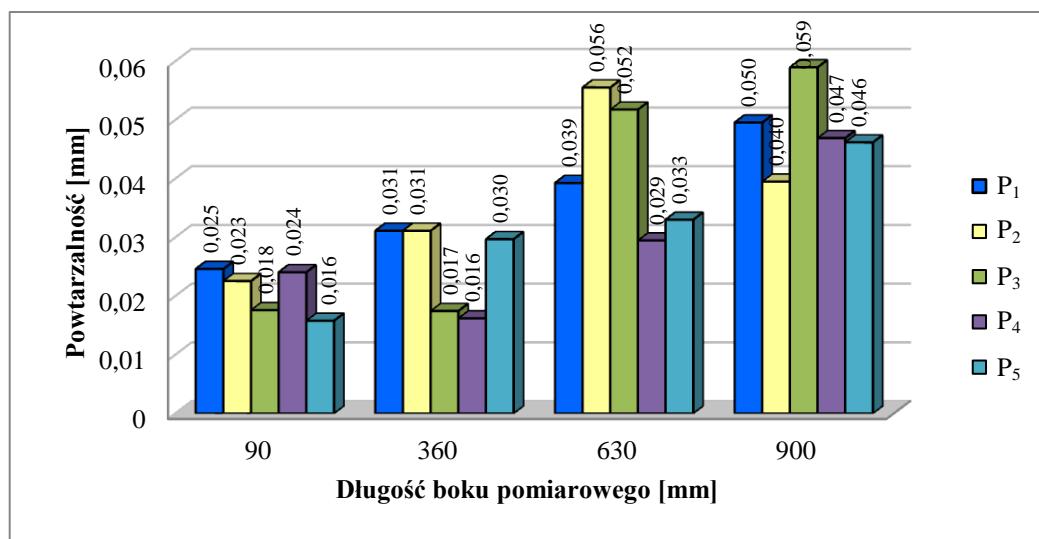
Na rysunkach 3.33–3.49 przedstawiono wyniki pomiarów powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w różnych konfiguracjach.



Rys. 3.33. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m bez rotacji układu współrzędnych narzędziwa

Można zauważyć (rys. 3.33), że w odległości 1 m od punktu P₅ ze zwiększeniem wymiaru boku sześcianu pomiarowego zwiększa się wartości powtarzalności pozycjonowania, np. dla punktu P₂ i boku o długości 360 i 450 mm następuje zwiększenie o 58,62%, a dla boku o długości 450 i 540 (540_zimny) mm o 169,56%.

Wartości powtarzalności pozycjonowania dla boku o długości 540 mm (540_zimny) znaczco wzrastają względem mniejszych długości boków. Wynika to z braku stabilizacji temperaturowej robota przemysłowego podczas wykonywania pomiarów.

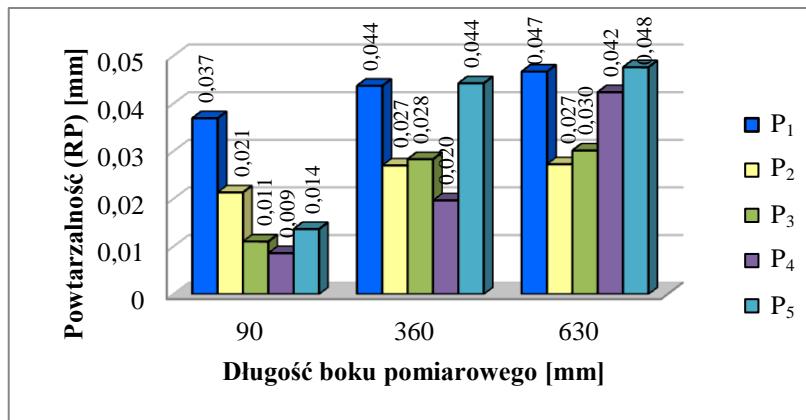


Rys. 3.34. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z

W kolejnym wariancie związanym z rotacją układu współrzędnych narzędzia względem osi Z (rys. 3.34) zauważać można zmianę wartości powtarzalności pozycjonowania między sześcielanami o długości boków 360 i 630 mm w punktach:

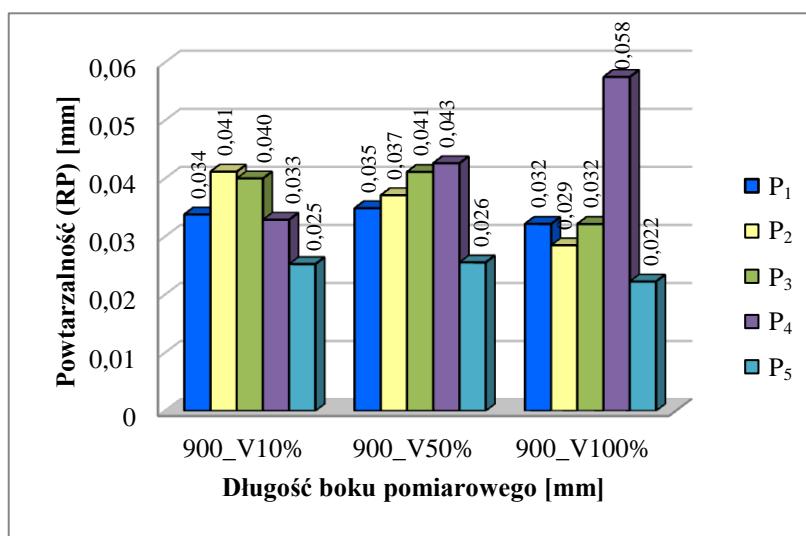
- P_2 – wzrost o 0,025 mm (80,65%),
- P_3 – wzrost o 0,035 mm (205,88%).

Kolejne zwiększenie długości boku pomiarowego do 900 mm nie spowodowało tak dużych zmian.



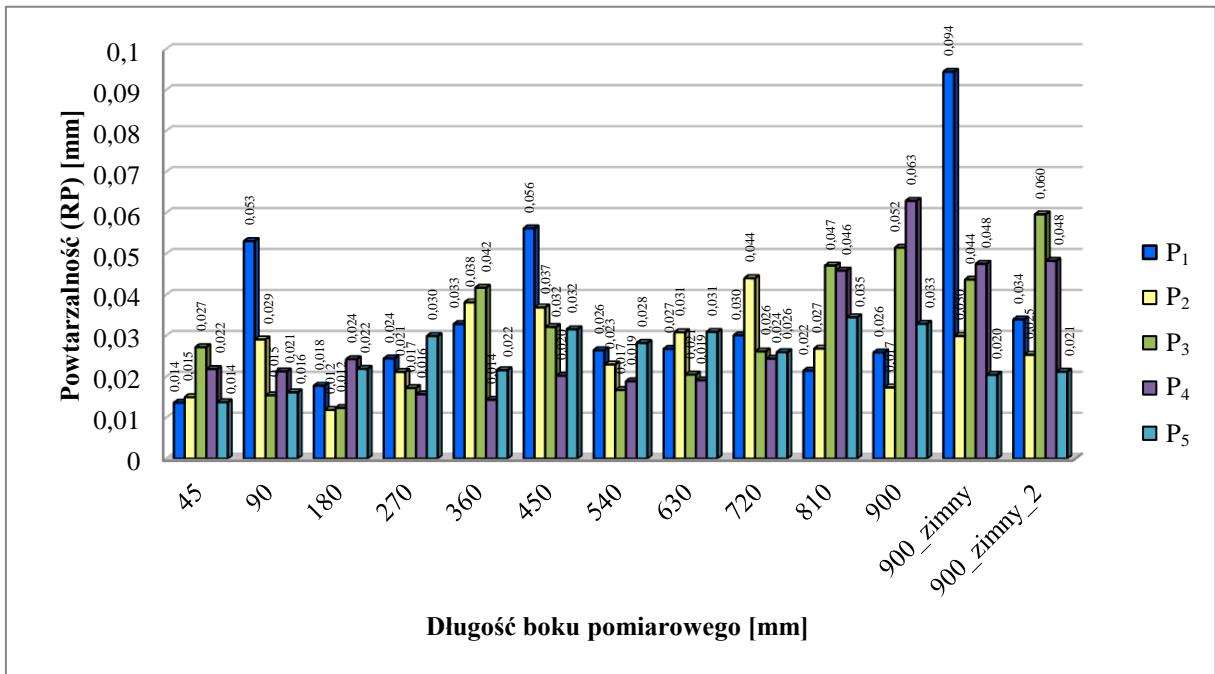
Rys. 3.35. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z i X

W wariancie uwzględniającym rotację układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i X (rys. 3.35) zauważać można podobną zmianę wartości powtarzalności pozycjonowania w przedziale od 0,009 mm (min. wartość dla P_4 o dł. boku 90 mm) do 0,048 mm (maks. wartość dla P_5 o dł. boku 630 mm), która wynosi 0,039 mm. Dodatkowo wprowadzona rotacja osi X spowodowała zwiększenie częstości występowania wartości do ca 0,04 mm w porównaniu z wynikami uzyskanymi podczas pomiaru tylko z rotacją osi Z.



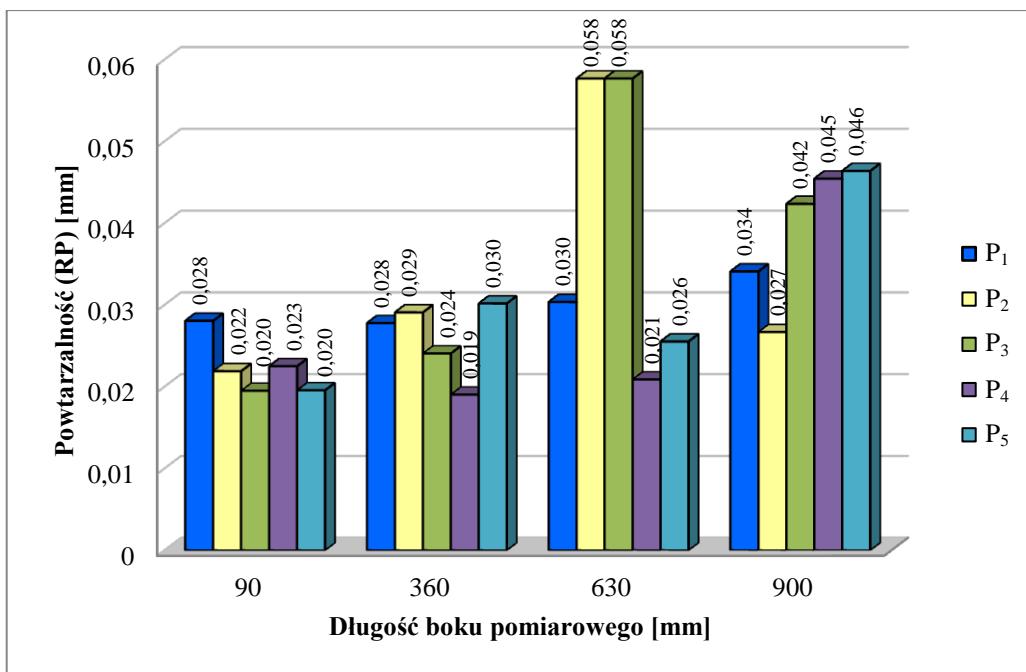
Rys. 3.36. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,06 m bez rotacji układu współrzędnych narzędzia i ze zmianą prędkości ruchu

Rozpatrując wariant ze zmienną prędkością ruchu dla stałej długości boku sześcianu pomiarowego 900 mm (rys. 3.36) zauważać można, że zmiana prędkości z 10% na 50% nie wpływa w istotny sposób na wartość powtarzalności pozycjonowania. Przejście z 50% na 100% prędkości skutkuje natomiast jej zwiększeniem o 34,88% dla punktu P₄, a zmniejszeniem dla pozostałych punktów (P₁, P₂, P₃, P₅).



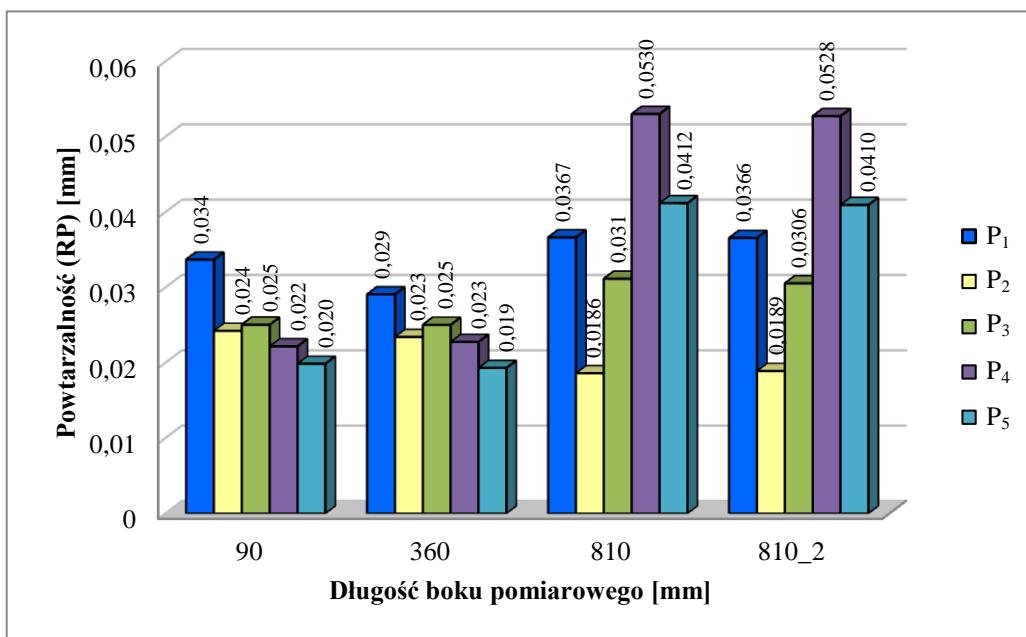
Rys. 3.37. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m bez rotacji układu narzędzi

Z rysunku 3.37 wynika, że wartość powtarzalności pozycjonowania dla odległości 2,24 m od punktu P₅ nie zwiększa się w sposób uporządkowany. Wyniki dla boków o długości 90 i 450 mm dla punktu P₁ zdecydowanie różnią się od pozostałych. Znaczący wzrost wartości RP można natomiast zauważać w przypadku boku o długości 900 mm (900_zimny – robot został poddany pomiarom przed stabilizacją temperaturową): w porównaniu do boku o długości 45 mm zmiana wynosi aż 571,42%. Jednak po stabilizacji temperaturowej wartość ta ulega zmniejszeniu do 142,86%.



Rys. 3.38. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z

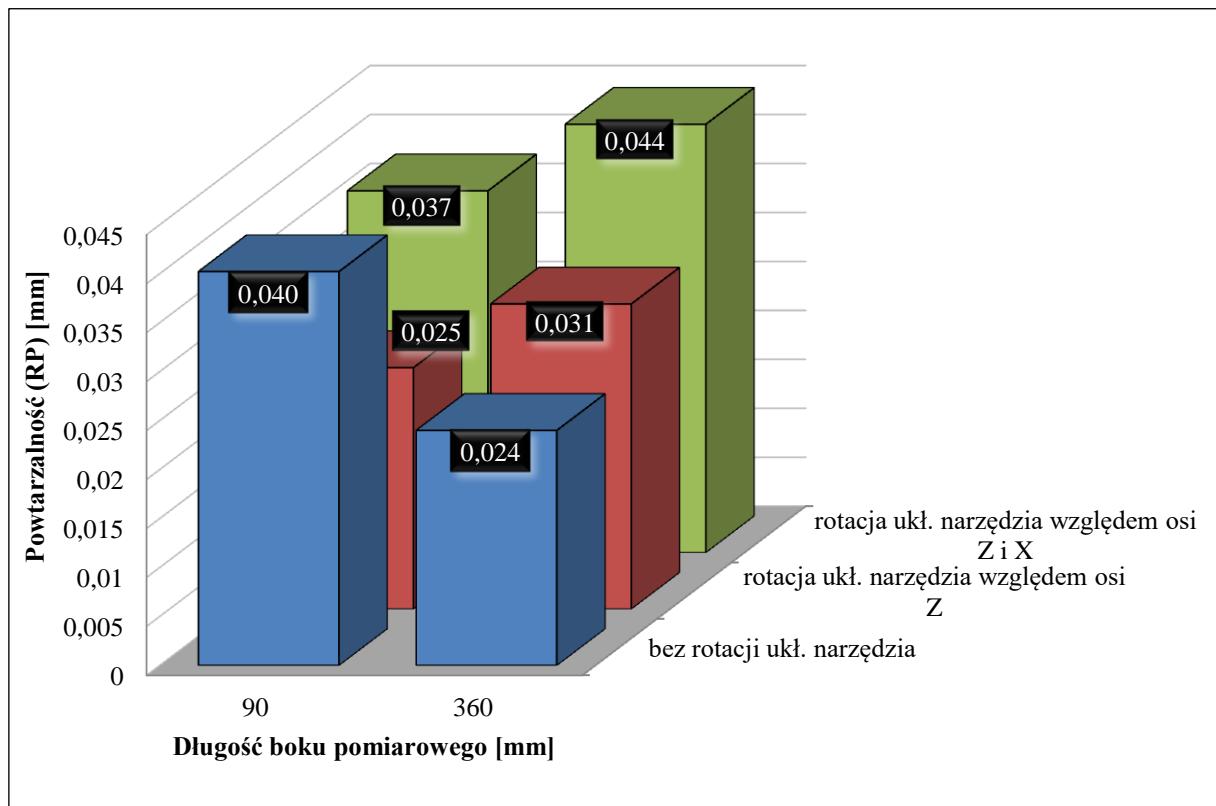
W kolejnym wariantie związanym z rotacją układu współrzędnych narzędzia względem osi Z (rys. 3.38) zauważać można zmianę wartości powtarzalności między bokiem o długości 360 a 630 mm dla punktu P₂ – o 0,029 mm (100%), zaś przy długości boku 900 mm wartość ta uległa zmniejszeniu o 0,002 mm (6,9%). Dla punktów P₁ i P₃ ze zwiększeniem długości boku pomiarowego zwiększa się również wartość powtarzalności pozycjonowania.



Rys. 3.39. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z i X

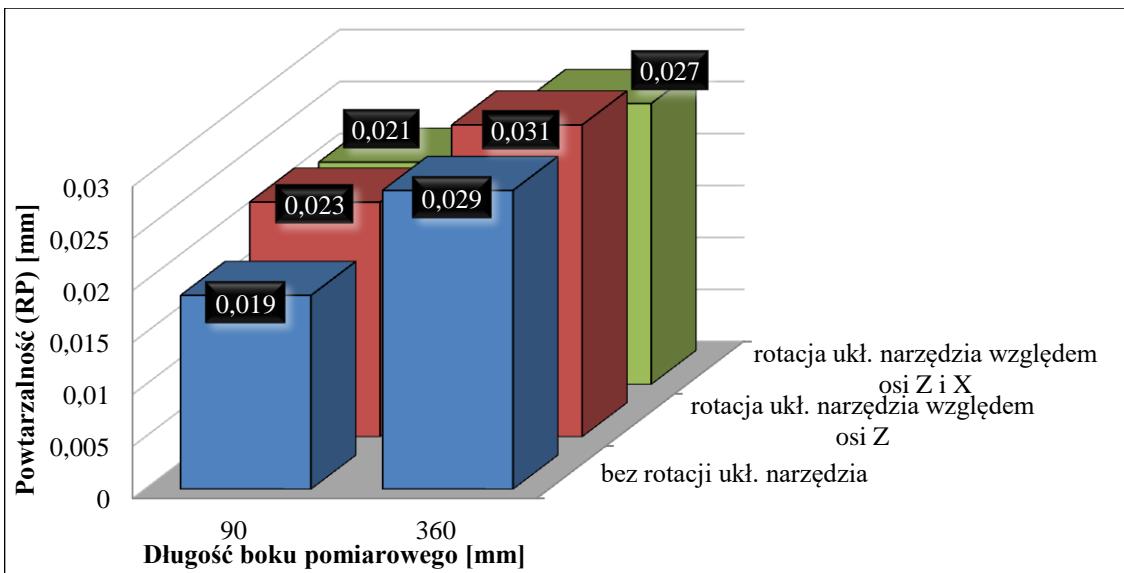
W wariantie uwzględniającym rotację układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i X (rys. 3.39) zauważać można, że dla boku o długości 90 i 360 mm we wszystkich punktach wartość powtarzalności zmienia się nieznacznie. Wyraźny wzrost następuje dla punktu P₄ i boku o długości 810 mm wynosząc 0,031 mm, co stanowi wzrost o 140,91%. Wyniki drugiego pomiaru praktycznie pokrywają się z pierwszym. Wartości zmieniają się o dziesięcne części mikrometra, co daje różnice na poziomie 1,6% (pomiar pierwszy: P₂ = 0,0186 mm; pomiar drugi: P₂ = 0,0189 mm).

Na rysunku 3.40 porównano wpływ rotacji układu współrzędnych narzędzia na wartość powtarzalności pozycjonowania. Uwzględniono boki sześciadanu pomiarowego o długościach 90, 360 i 810 mm w dwóch odległościach od punktu P₅, tj. 1 m i 2,24 m. Ze względu na czytelność wykresów wyniki zaprezentowano osobno dla każdego punktu pomiarowego P₁–P₅.



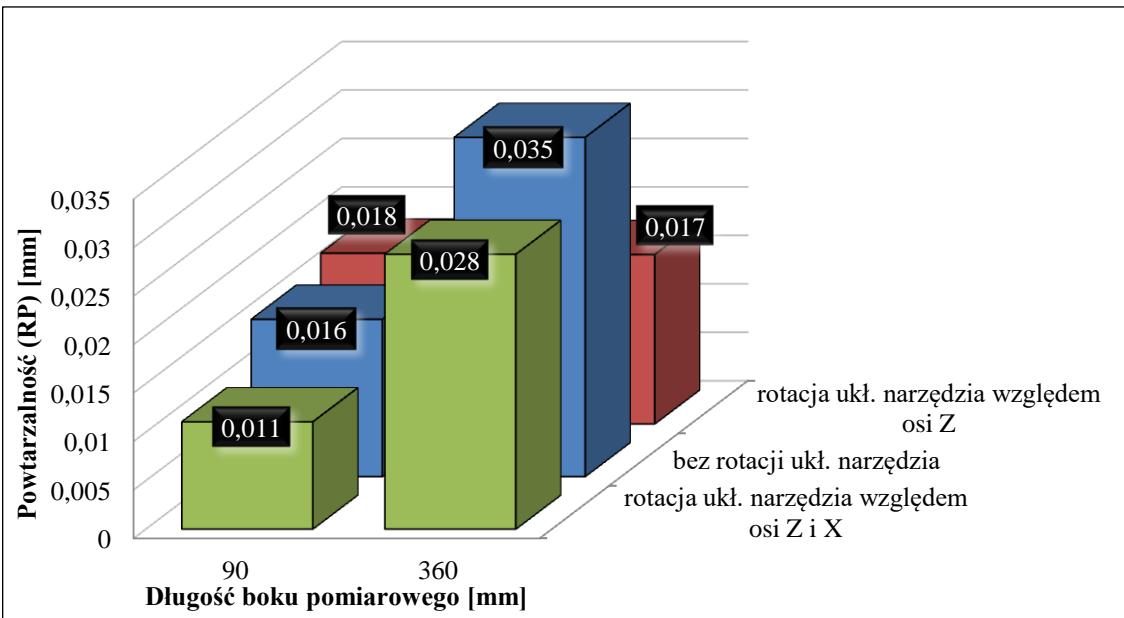
Rys. 3.40. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 1,0 m, długości boku pomiarowego 90 i 360 mm dla punktu P₁

Z analizy rys. 3.40 wynika, że rotacja układu narzędzia dla boku o długości 360 mm zwiększyła wartość powtarzalności o 0,02 mm (83,33%). Dla boku o długości 90 mm rotacja układu współrzędnych narzędzia względem osi Z spowodowała zmniejszenie wartości powtarzalności o 0,015 mm (37,5%).



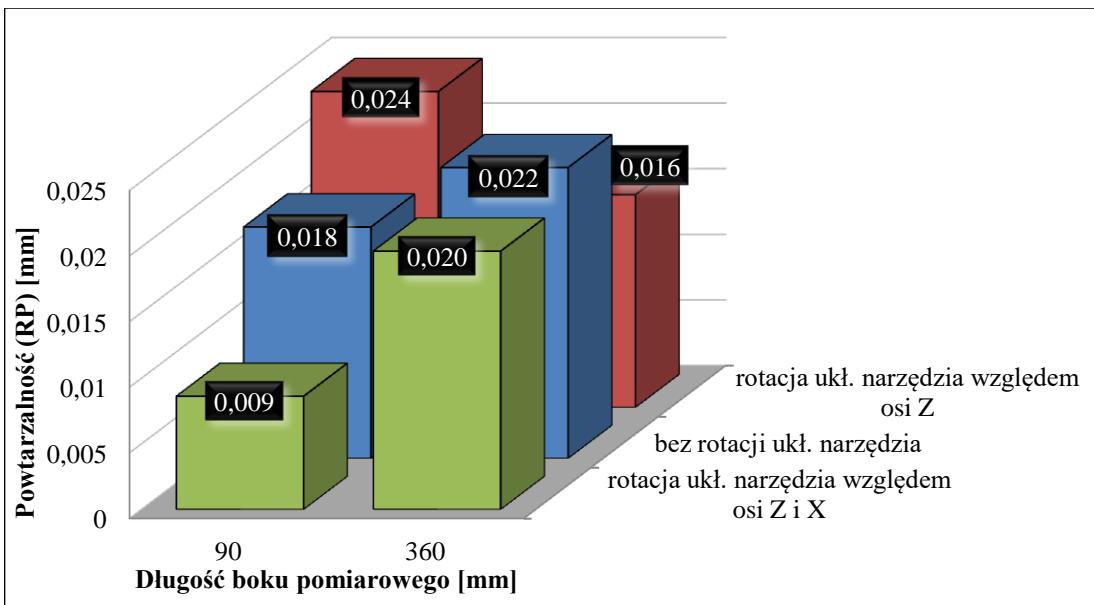
Rys. 3.41. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 1,0 m, długości boku pomiarowego 90 i 360 mm dla punktu P₂

Analizując rys. 3.41 dotyczący punktu P₂ zauważmy można, że rotacja układu współrzędnych narzędzia nie wpłynęła znacząco na zmianę wartości powtarzalności. Dla punktu P₂ i obu długości boków wartość powtarzalności zmieniała się maks. o 0,004 mm.



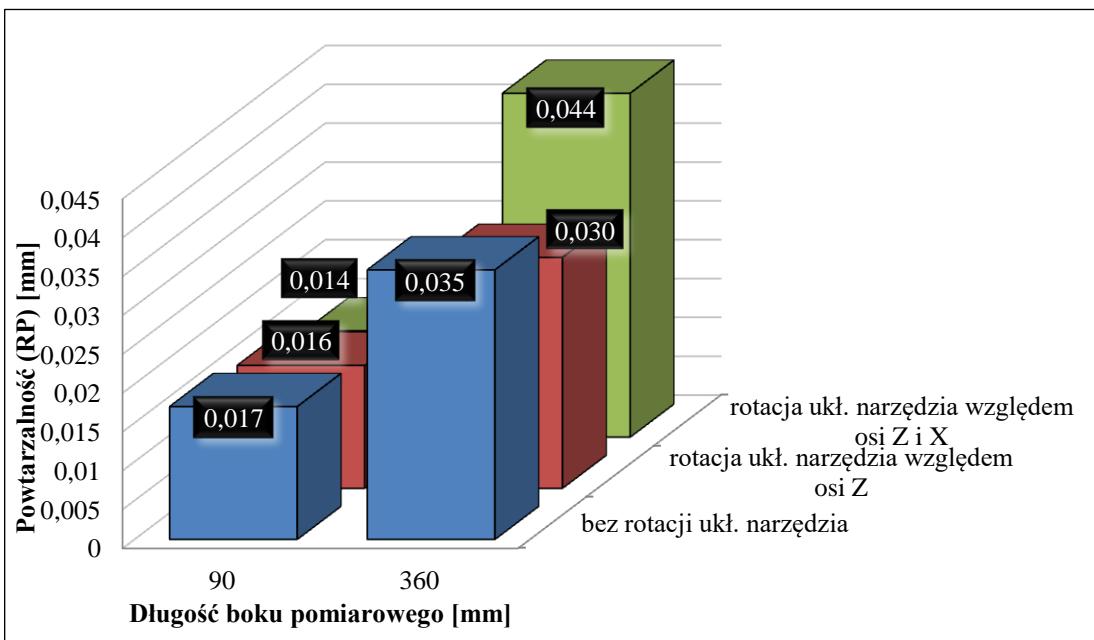
Rys. 3.42. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 1,0 m, długości boku pomiarowego 90 i 360 mm dla punktu P₃

Dane zawarte na rys. 3.42 wskazują, że dla boku o długości 90 mm rotacja układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i X spowodowała zmniejszenie wartości powtarzalności o 0,005 mm. Stosując rotację układu współrzędnych narzędzia względem osi Z, dla boku o długości 360 mm uzyskano znaczącą, bo aż o 0,018 mm (51,43%) zmianę wartości powtarzalności.



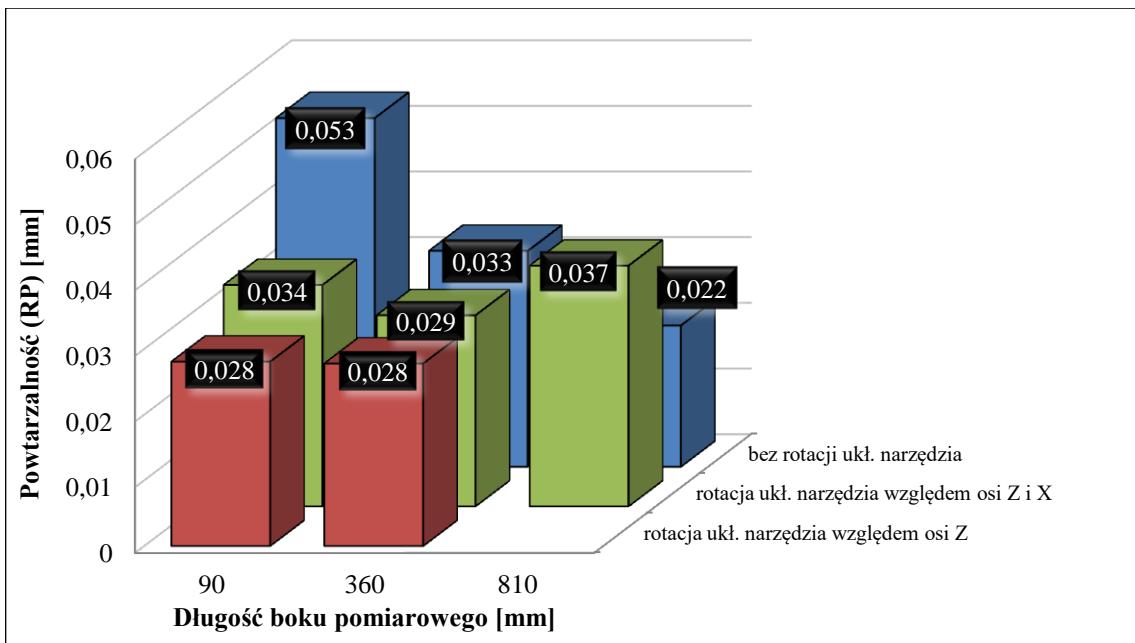
Rys. 3.43. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 1,0 m, długości boku pomiarowego 90 i 360 mm dla punktu P₄

Z rysunku 3.43 wynika, że dla boku o długości 90 mm rotacja układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i X pozwoliła zmniejszyć wartość powtarzalności pozycjonowania o 50%, natomiast dla boku o długości 360 mm zmiana wyniosła 0,002 mm, co stanowi 9,1%.



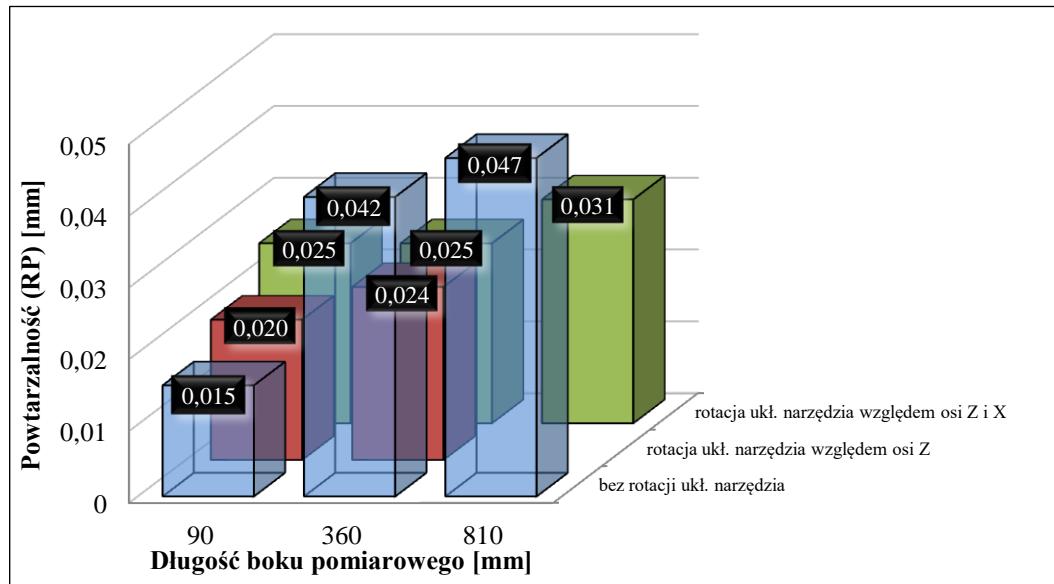
Rys. 3.44. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 1,0 m, długości boku pomiarowego 90 i 360 mm dla punktu P₅

Na przedstawionym powyżej wykresie (rys. 3.44) widać, że dla boku o długości 90 mm rotacja układu narzędzi względem osi Z i X zmniejszyła wartość powtarzalności. Jednak dla drugiego przedstawionego boku nastąpił wzrost o 0,009 mm (25,7%).



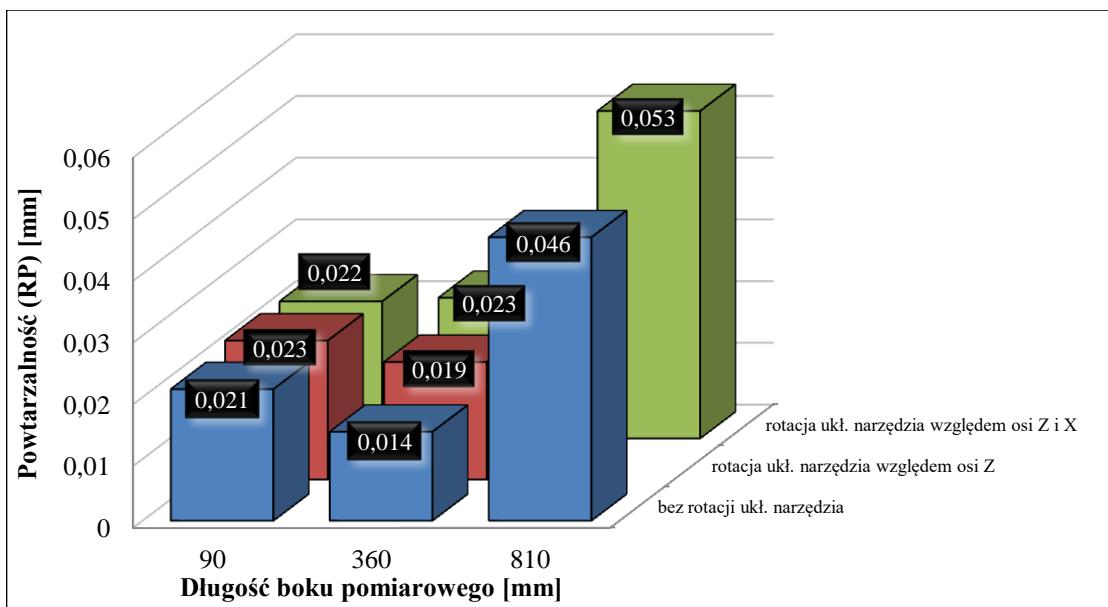
Rys. 3.45. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 2,24 m, długości boku pomiarowego 90, 360 i 810 mm dla punktu P₁

Z rysunku 3.45 wynika z kolej, że rotacja układu współrzędnych narzędzia nie miała istotnego wpływu na wartość powtarzalności dla boku o długości 360 i 810 mm, natomiast dla boku 90 mm zmniejszona została o prawie 100%.



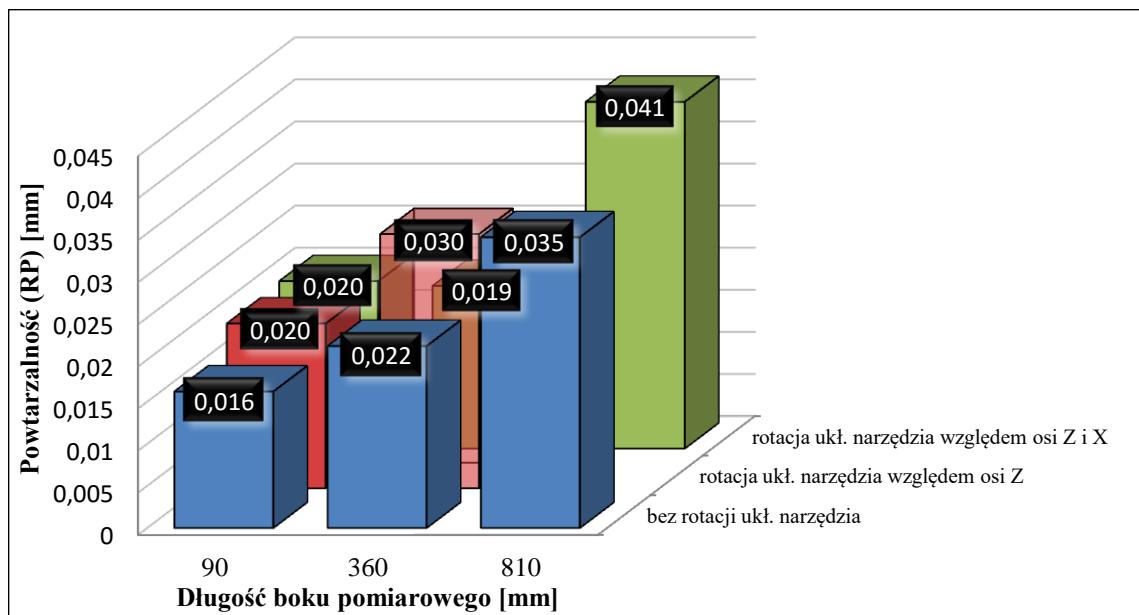
Rys. 3.46. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 2,24 m, długości boku pomiarowego 90, 360 i 810 mm dla punktu P₂

Wyniki uzyskane dla punktu P₂ i boku o długości 90 mm (rys. 3.46) pozwalają stwierdzić, że rotacja układu współrzędnych narzędzia spowodowała wzrost wartości powtarzalności o 0,01 mm (ok. 66%), a dla boków o długości 360 i 810 mm zauważono zmniejszenie wartości powtarzalności.



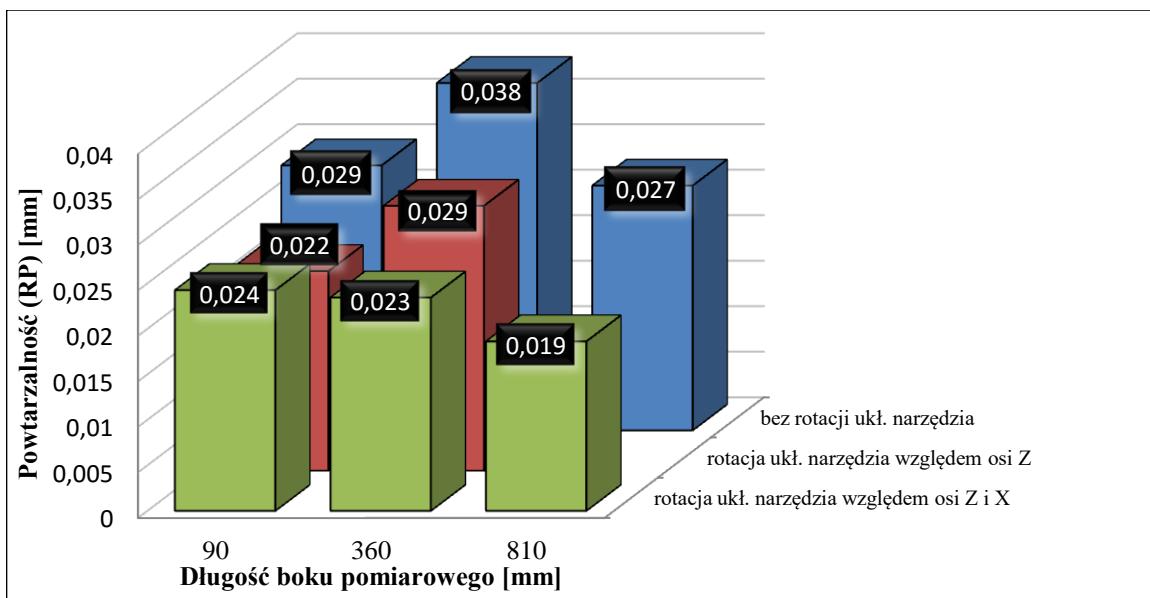
Rys. 3.47. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 2,24 m, długości boku pomiarowego 90, 360 i 810 mm dla punktu P₃

Z rysunku 3.47 wynika, że dla boku o długości 90 mm rotacja układu narzędzi nie wpłynęła na wartość powtarzalności, a dla boków o długości 360 i 810 mm nastąpił wzrost o 0,009 mm (64,13%) i 0,008 mm (17,4%).



Rys. 3.48. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 2,24 m, długości boku pomiarowego 90, 360 i 810 mm dla punktu P₄

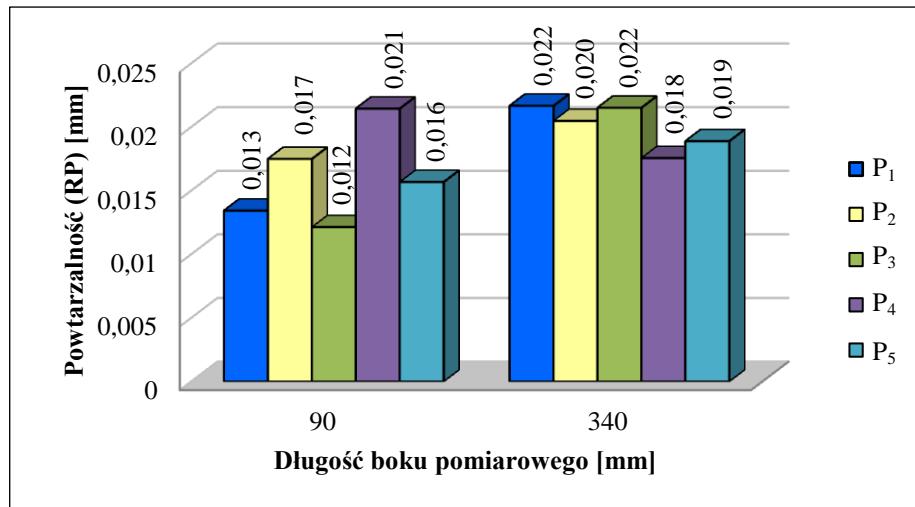
Analizując rys. 3.48 dotyczący powtarzalności punktu P₄ zauważać można podobny rozkład wartości jak dla punktu P₃. W rozpatrywanym przypadku rotacja układu współrzędnych narzędzi względem osi Z spowodowała zwiększenie wartość powtarzalności pozycjonowania dla boku o długości 360 mm.



Rys. 3.49. Porównanie powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – odległość 2,24 m, długości boku pomiarowego 90, 360 i 810 mm dla punktu P₅

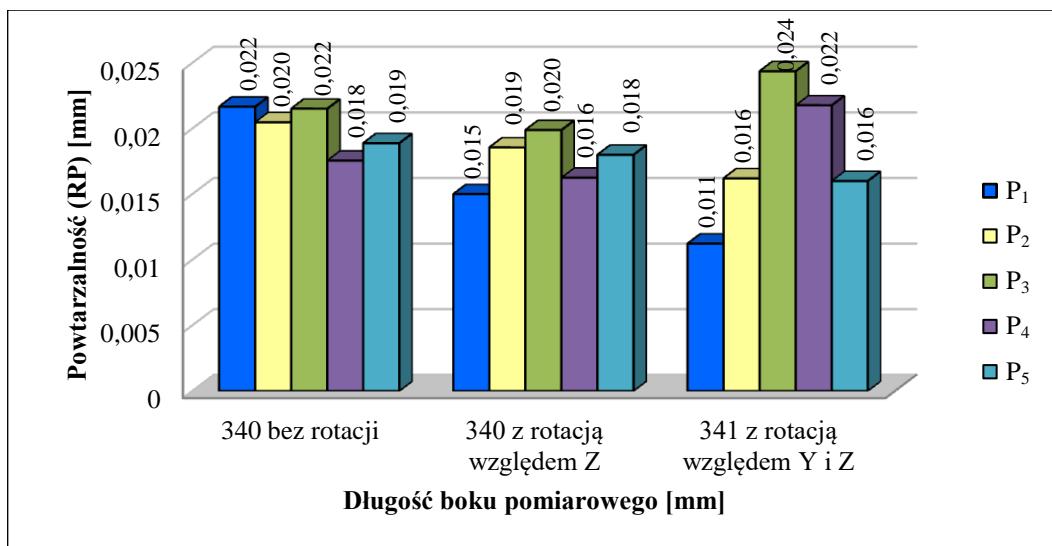
Z rysunku 3.49 dotyczącego punktu P₅ wynika, że największe wartości powtarzalności wystąpiły dla boku o długości 360 mm, a najmniejsze dla 810 mm. Zauważać można również, że rotacja układu współrzędnych narzędzi zmniejsza wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego.

Kolejne badania powtarzalności pozycjonowania dotyczyły robotów Panasonic TA 1400 i Kuka KR 16.



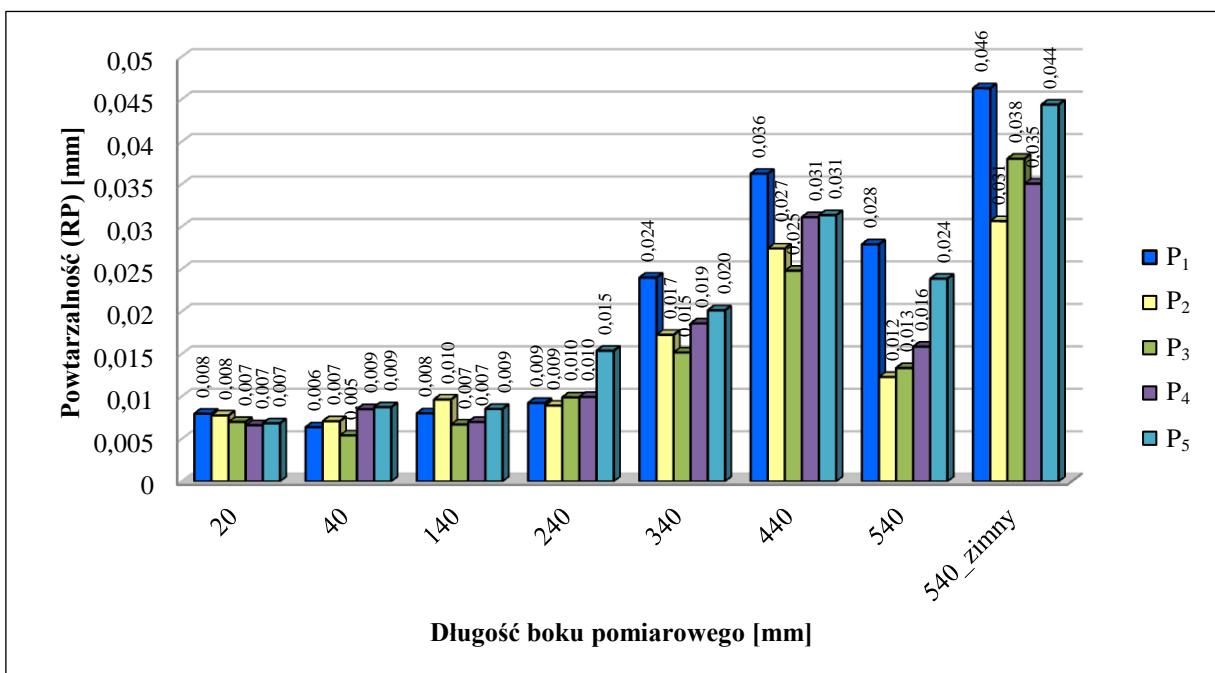
Rys. 3.50. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 1,91 m bez rotacji układu narzędzi względem osi Z i Y

W odległości 1,91 m od punktu P₅ pomiędzy bokami o długości 90 i 340 mm dla punktu P₃ następuje największa zmiana wartości powtarzalności pozycjonowania o 0,01 mm, co stanowi wzrost o 83,33% (rys. 3.50).



Rys. 3.51. Powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 1,91 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z i Y

W kolejnym wariantie badań związanym z rotacją układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i Y (rys. 3.51) zauważać można zmniejszenie wartości powtarzalności dla punktów P₁, P₂ i P₄, a dla punktu P₃ i P₅ wzrost o odpowiednio 0,002 i 0,004 mm.



Rys. 3.52. Powtarzalność pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,2 m bez rotacji układu narzędzia

Dane zawarte na rys. 3.52 wskazują, że w ośmiu przypadkach doszło do przekroczenia dopuszczalnej wartości powtarzalności pozycjonowania równej 0,03 mm:

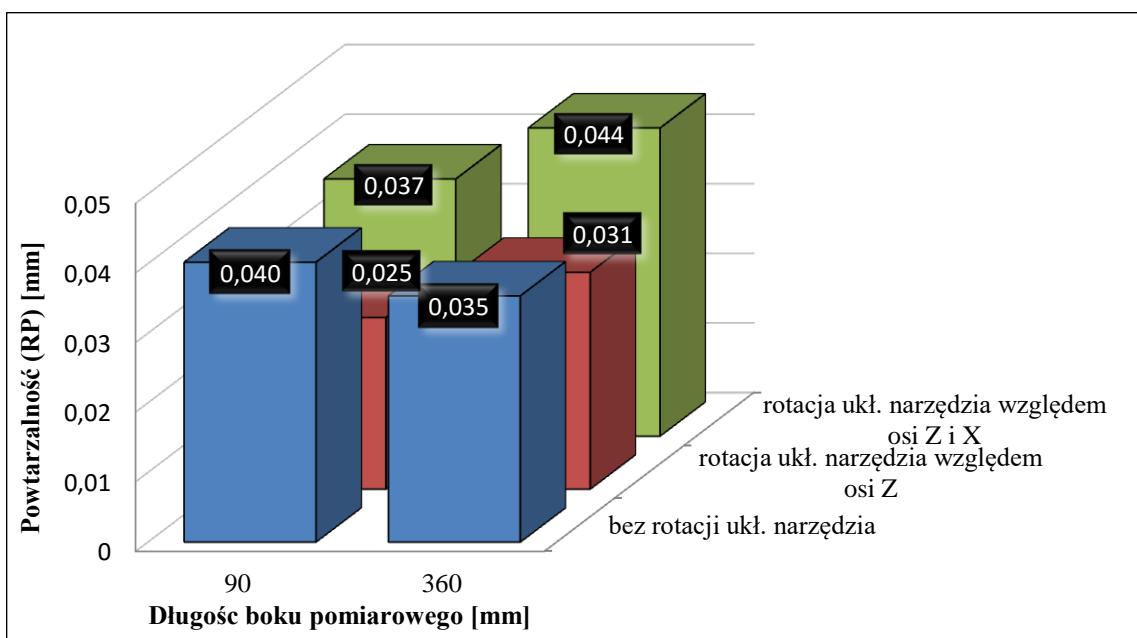
- sześciian o boku 440 mm: w punkcie P₁ o 0,006 mm (20%); P₄ o 0,001 mm (3,4%) i P₅ o 0,001 mm (3,4%),

- sześciyan o boku 540 mm i nieustabilizowany cieplnie robot – wartość powtarzalności wszystkich punktów przekroczyła górną granicę określoną przez producenta robota przemysłowego.

Zauważać można, że dla boków sześciianu pomiarowego o długości do 240 mm zmiany wartości powtarzalności są niewielkie i zmieniają się w zakresie od 0,001 do 0,008 mm.

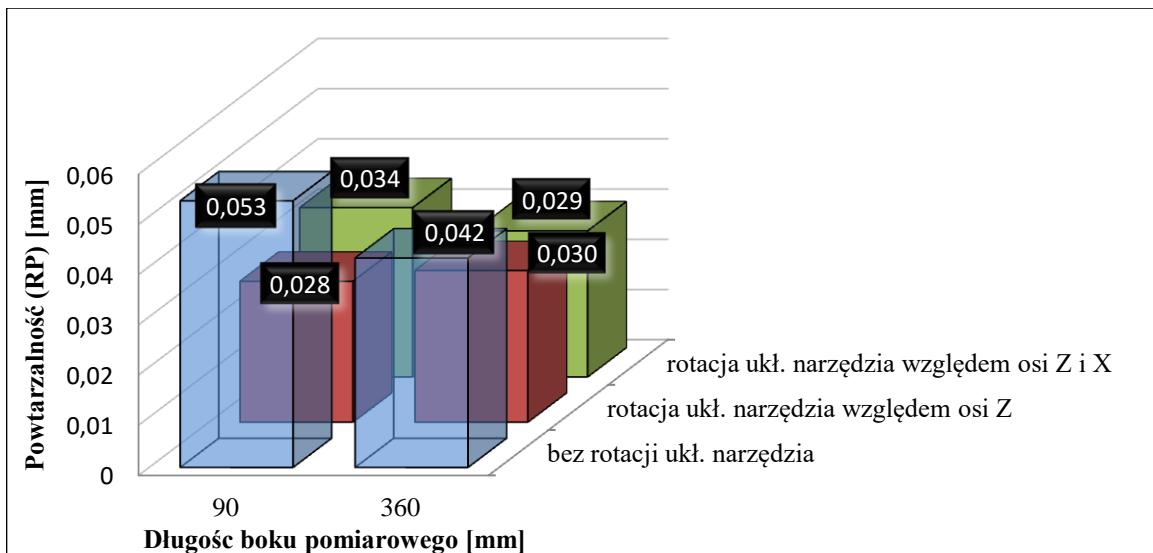
Na podstawie normy dotyczącej badań obrabiarek [94] określono, że wartością RP podawaną w raporcie końcowym i przyjmowaną jako wartość powtarzalności badanego robota przemysłowego, powinna być wartość maksymalna uzyskana z pomiarów punktów P₁ do P₅.

Maksymalne wartości parametru RP dla robotów przemysłowych Fanuc, Panasonic i Kuka przedstawiono na rys. 3.53–3.57.



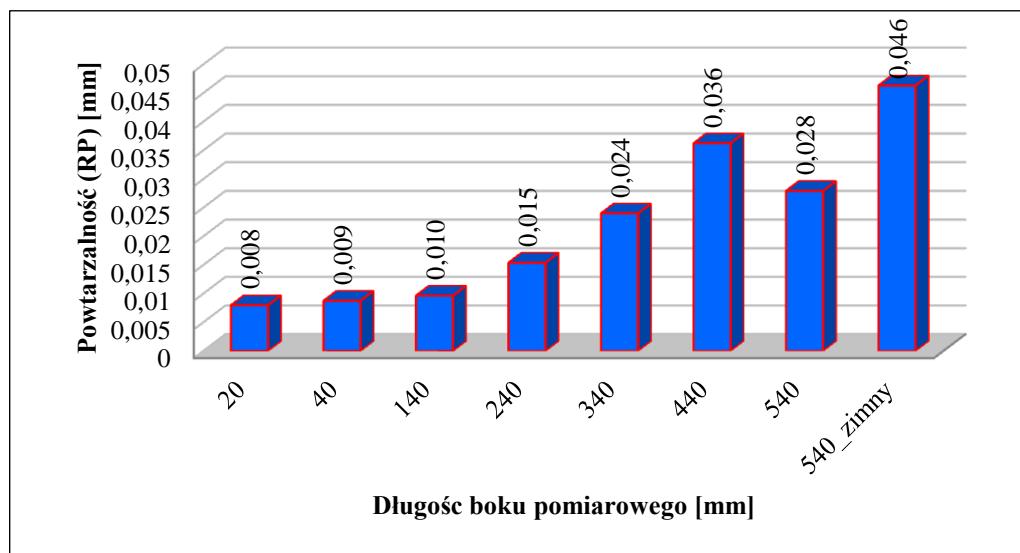
Rys. 3.53. Największe wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m

Z analizy rysunku 3.53 wynika, że w odległości 1,0 m od punktu P₅ pomiędzy bokami o długości 90 i 360 mm dla wartości największych RP maksymalna różnica wynosi 0,008 mm i dotyczy rotacji układu narzędzi względem osi Z i X. Stanowi to 8% wartości maksymalnej podanej przez producenta (0,1 mm). W pozostałych wariantach różnica wynosi mniej niż 0,008 mm.



Rys. 3.54. Największe wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m

Z rysunki 3.54 wynika, że zwiększenie odległości pomiarowej o 1,24 m nie miało wpływu na wartość maksymalną RP dla pomiarów wykonanych z rotacją układu narzędziowa względem osi Z. Nieznacznej zmianie uległa wartość RP dla pomiarów bez rotacji układu narzędziowa (zwiększenie) i z rotacją układu narzędziowa względem osi Z i X (zmniejszenie).

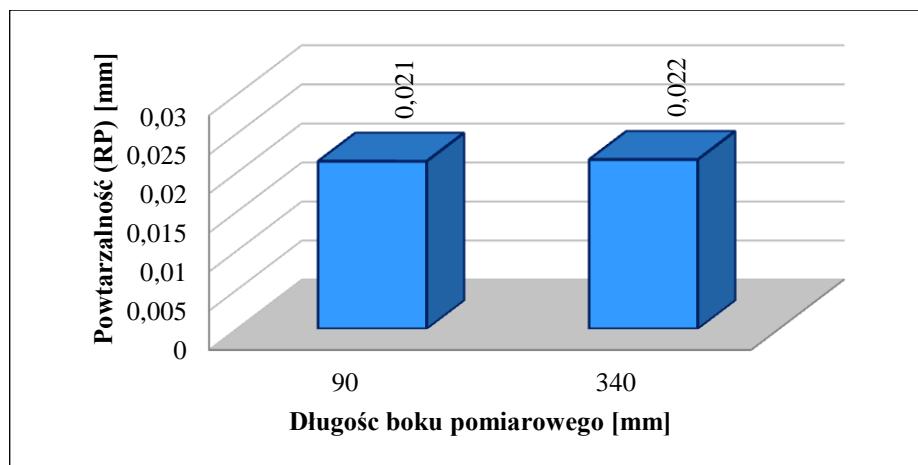


Rys. 3.55. Maksymalne wartości powtarzalność pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,2 m bez rotacji układu narzędziowa

Dane zawarte na rys. 3.55 wskazują, że w dwóch przypadkach zostały przekroczone dopuszczalne wartości powtarzalności pozycjonowania o 0,03 mm, tzn. dla sześcianów o bokach:

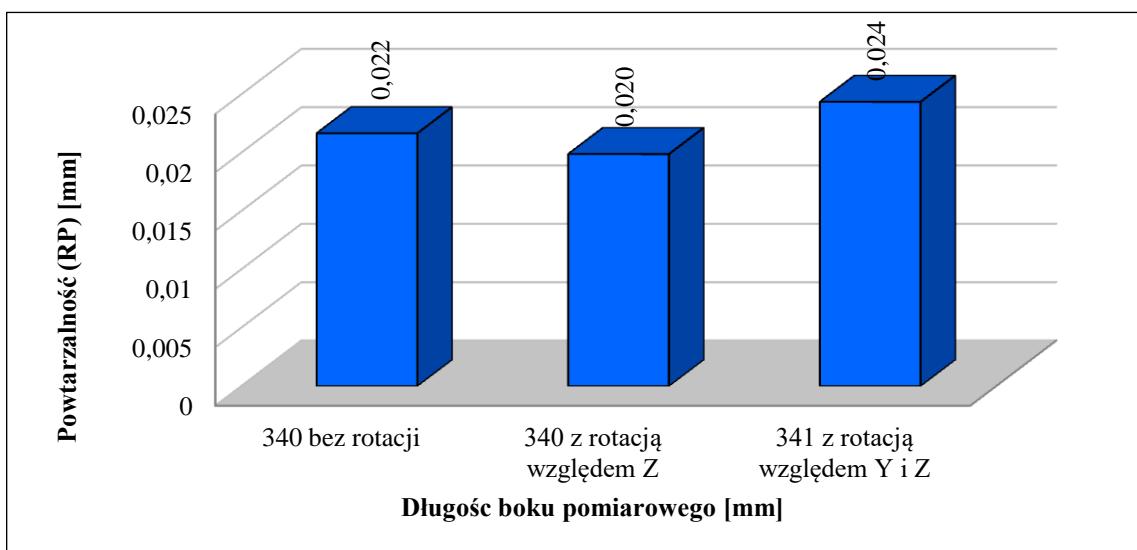
- 440 mm: 0,006 mm (20%),
- 540 mm i nieustabilizowanego ciepnego robota: 0,016 mm (53,34%).

Ponadto zauważać można, że dla boków o długości do 240 mm zmiany wartości powtarzalności są niewielkie i zmieniają się w zakresie od 0,001 do 0,007 mm.



Rys. 3.56. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 1,91 m bez rotacji układu narzędzi względem osi Z i Y

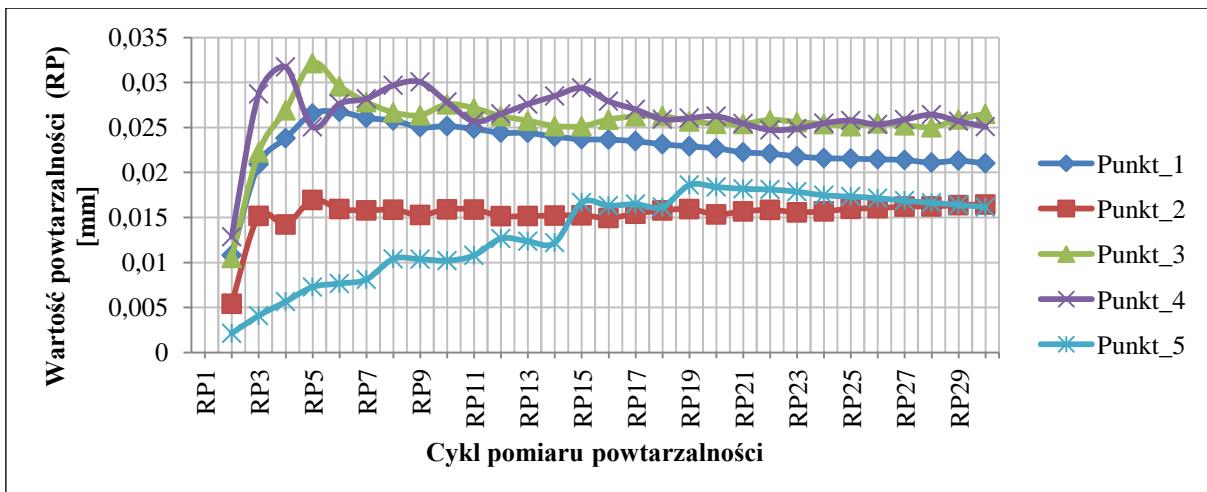
Z rysunku 3.56 wynika, że w odległości 1,91 m od punktu P₅ pomiędzy bokami o długości 90 i 340 mm dla wartości maksymalnych powtarzalności pozycjonowania nastąpiła zmiana jej wartości o 0,001 mm, co stanowi wzrost o 4,5%.



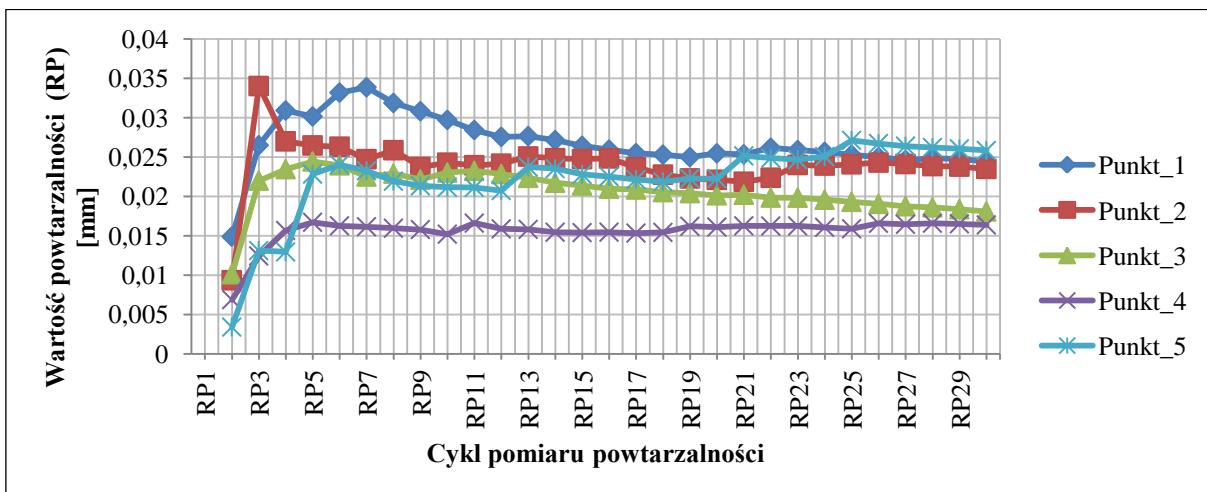
Rys. 3.57. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 1,91 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z i Y

W kolejnym wariantie związanym z rotacją układu współrzędnych narzędzia względem osi Z i Y (rys. 3.57) zauważać można, że maksymalna wartość powtarzalności względem pomiaru bez rotacji układu zmieniała się w zakresie $\pm 0,002$ mm.

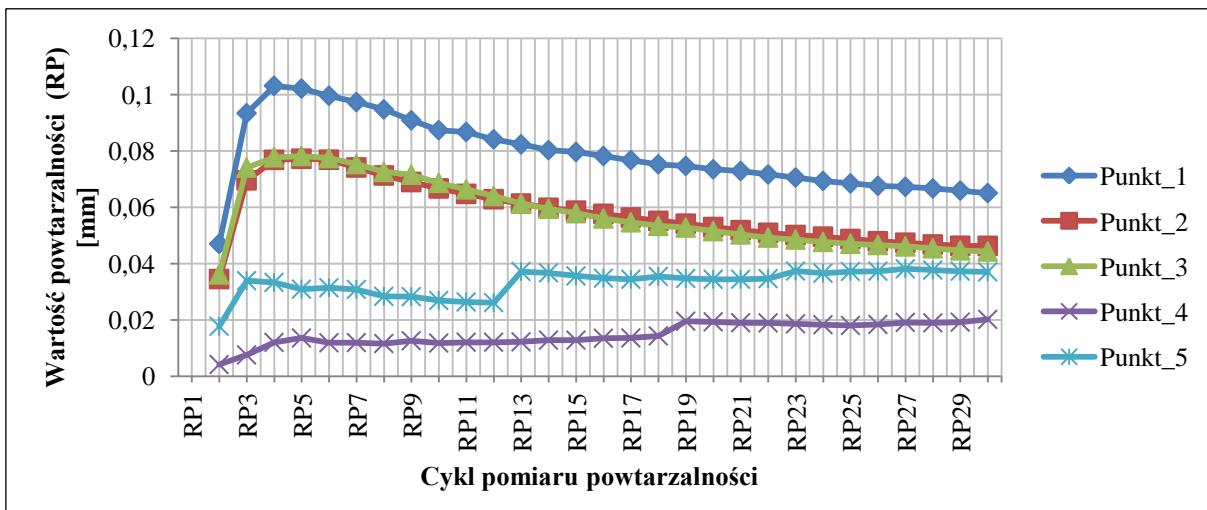
Następnie wyniki pomiaru poddano analizie polegającej na obliczeniu wartości powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych dla wszystkich 30 wykonanych cykli pomiarowych (ze względu na zależności matematyczne wartość RP możliwa jest do obliczenia dla minimum dwóch cykli), tzn. od dwóch aż do trzydziestu. Pozwoliło to przedstawić zmiennosć RP względem liczby cykli dla danego punktu pomiarowego. Przykładowe wykresy zmiennosci wartości powtarzalności przedstawiono na rys. 3.58–3.74.



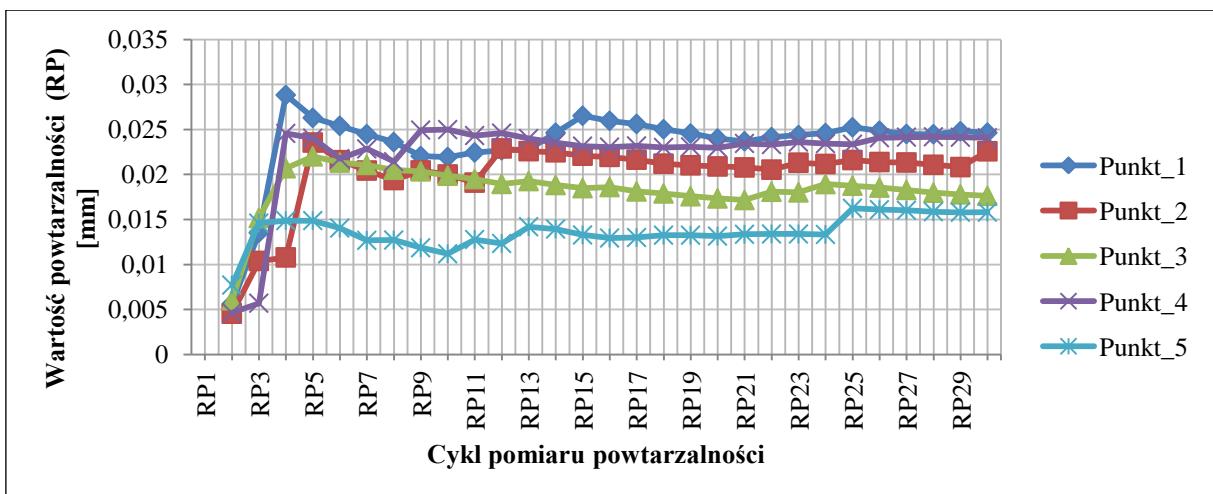
Rys. 3.58. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m bez rotacji układu narzędzi dla sześcianu o boku 45 mm



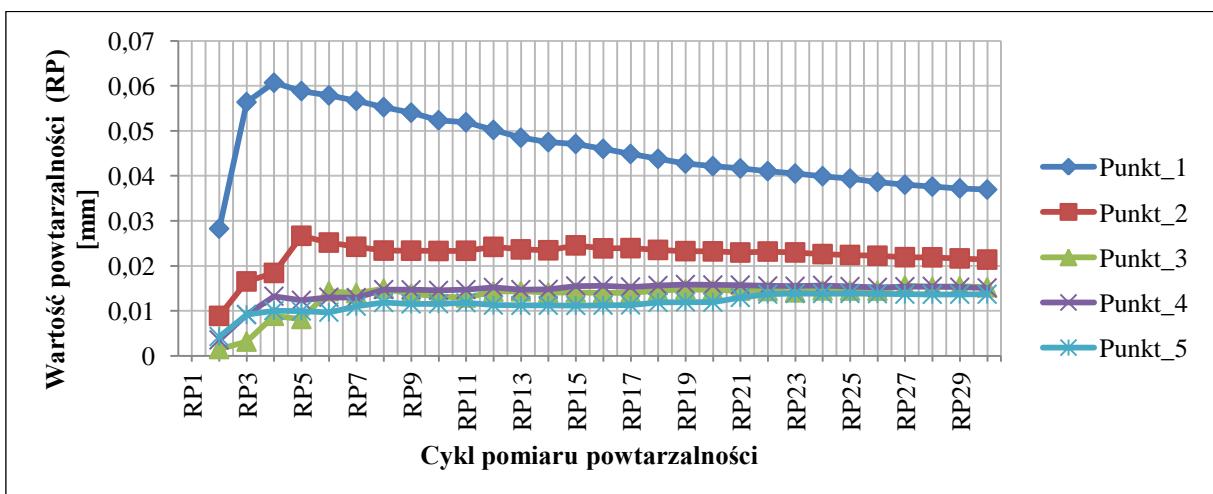
Rys. 3.59. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m bez rotacji układu narzędzi dla sześcianu o boku 270 mm



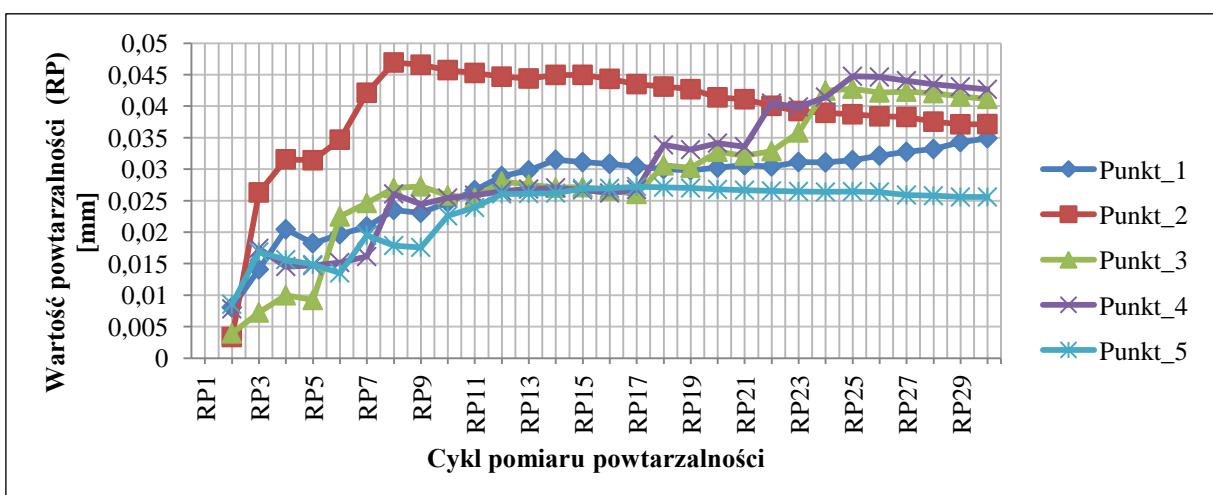
Rys. 3.60. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m bez rotacji układu narzędzi dla sześcianu o boku 450 mm



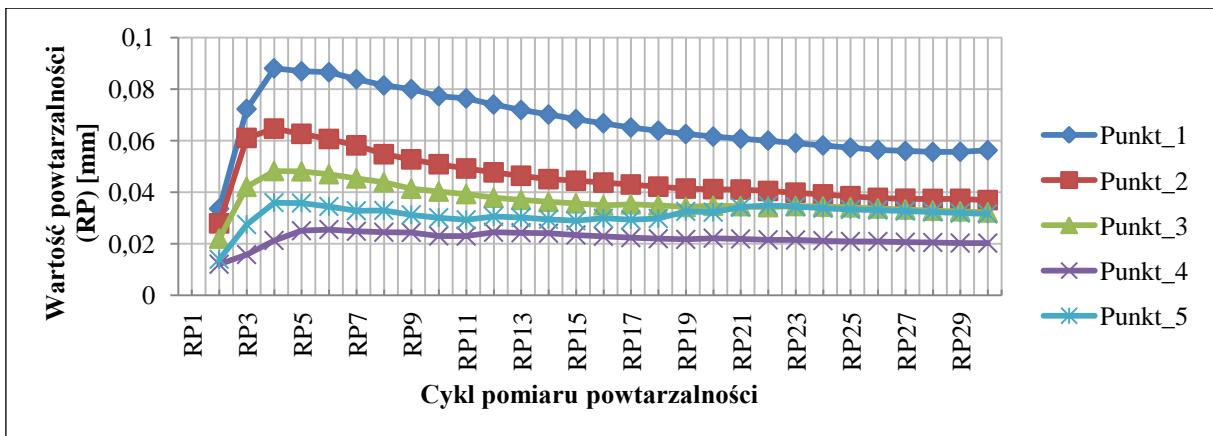
Rys. 3.61. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z dla sześcianu o boku 90 mm



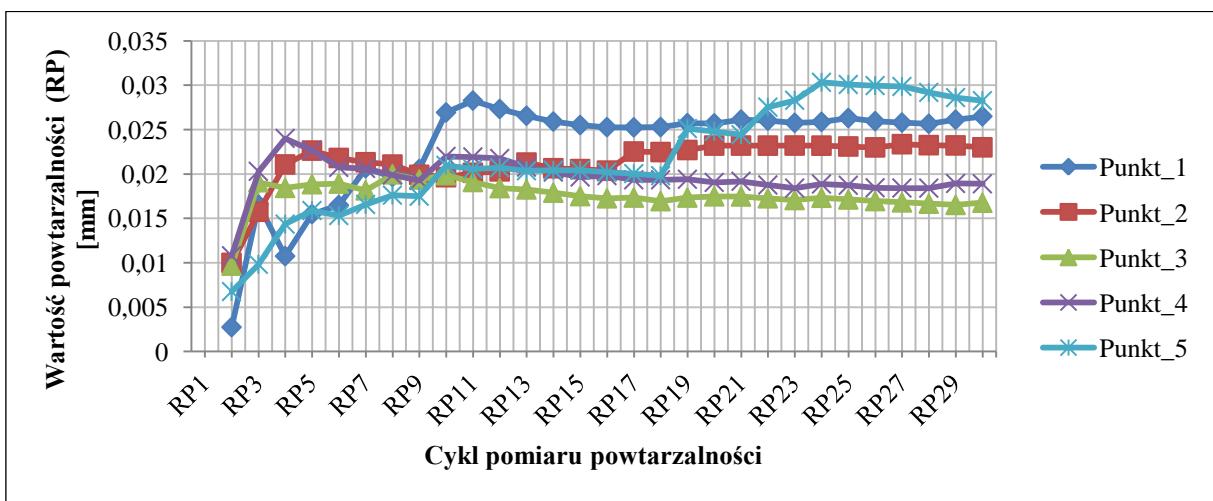
Rys. 3.62. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z i X dla sześcianu o boku 90 mm



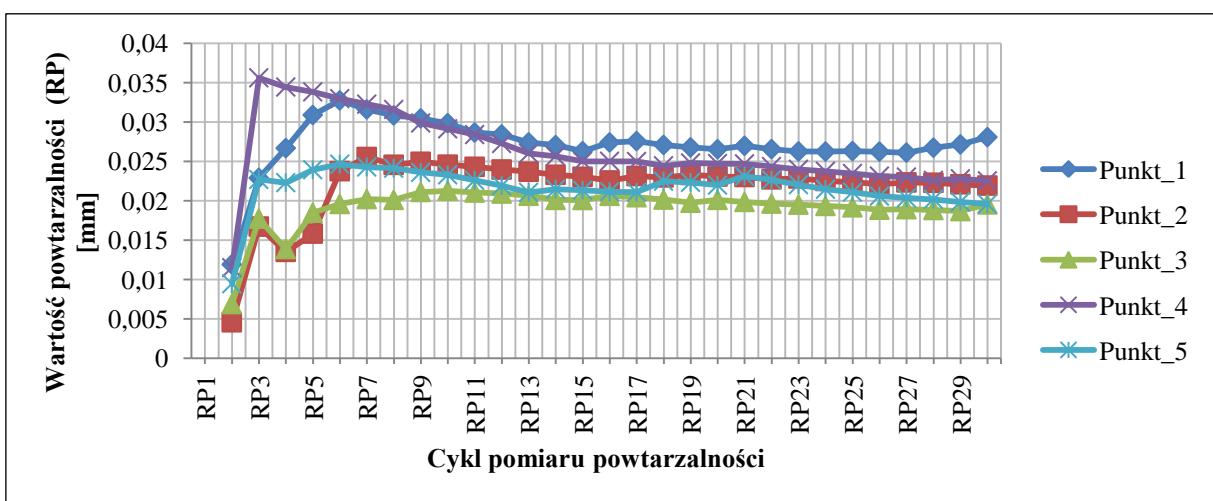
Rys. 3.63. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,06 m bez rotacją układu narzędzi dla sześcianu o boku 900 mm i prędkości 50% wartości maksymalnej



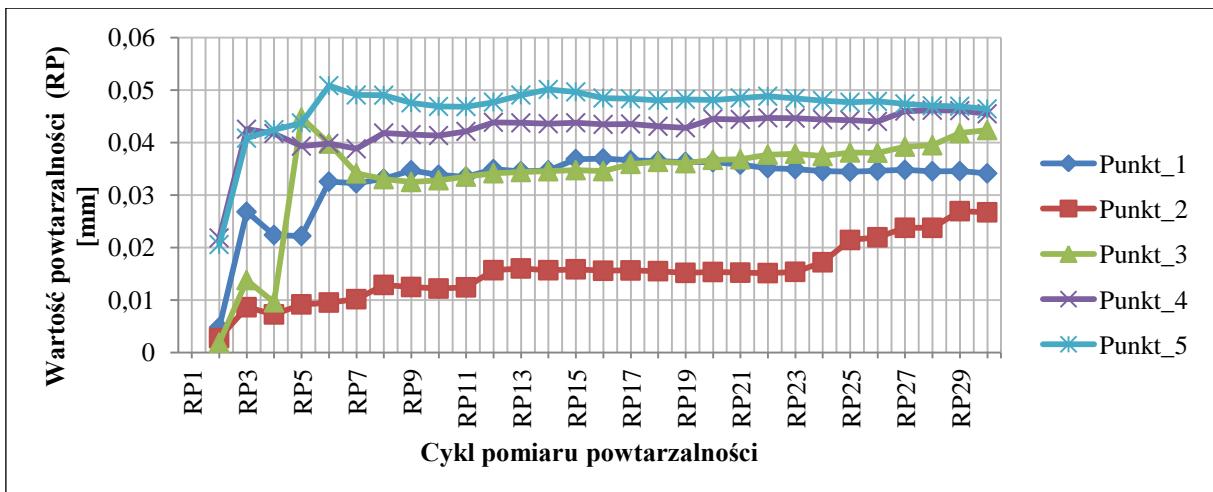
Rys. 3.64. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m bez rotacji układu narzędzi dla sześcianu o boku 450 mm



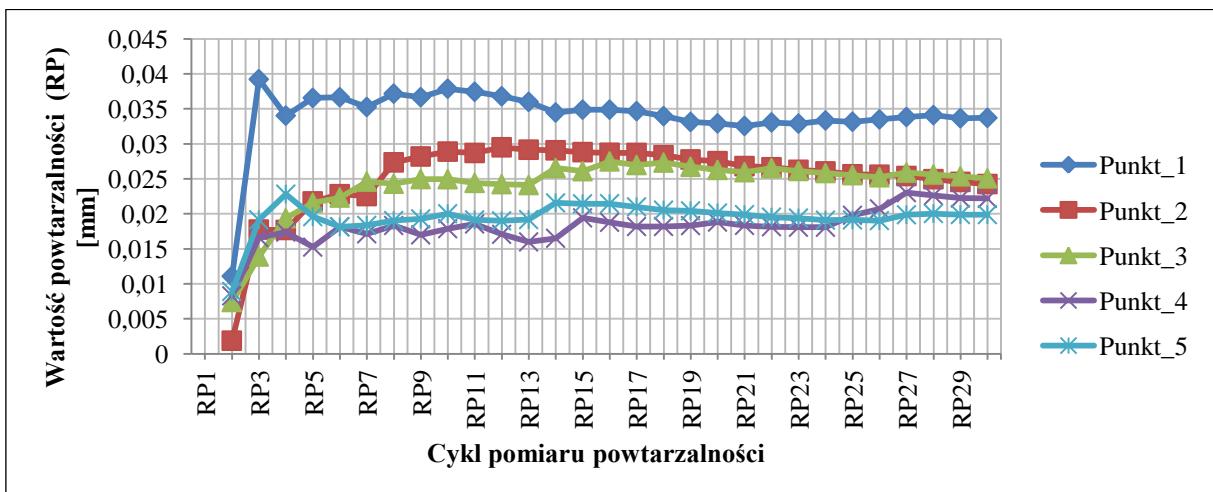
Rys. 3.65. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m bez rotacji układu narzędzi dla sześcianu o boku 540 mm



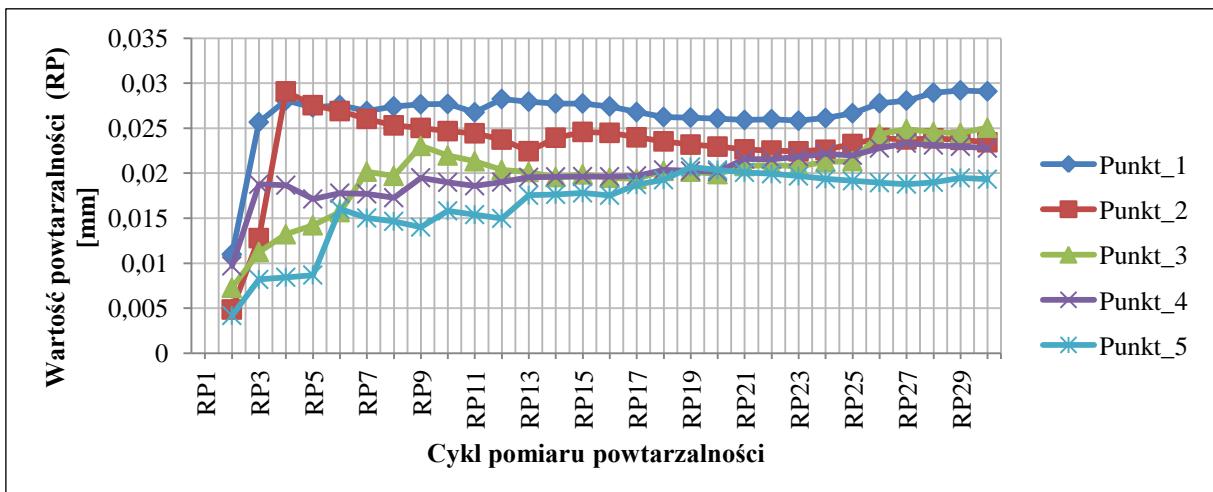
Rys. 3.66. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z dla sześcianu o boku 90 mm



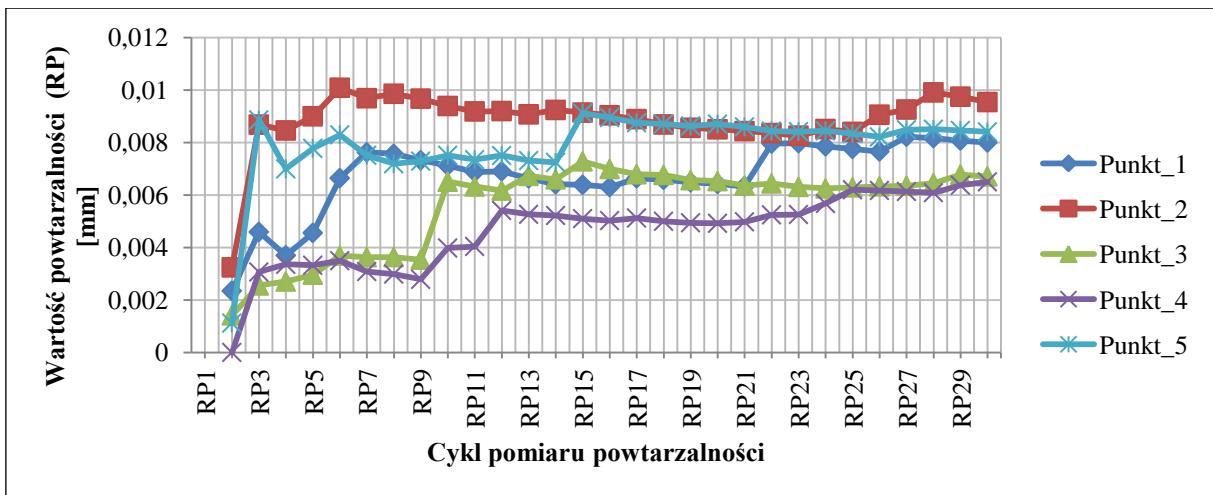
Rys. 3.67. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z dla sześciangu o boku 900 mm



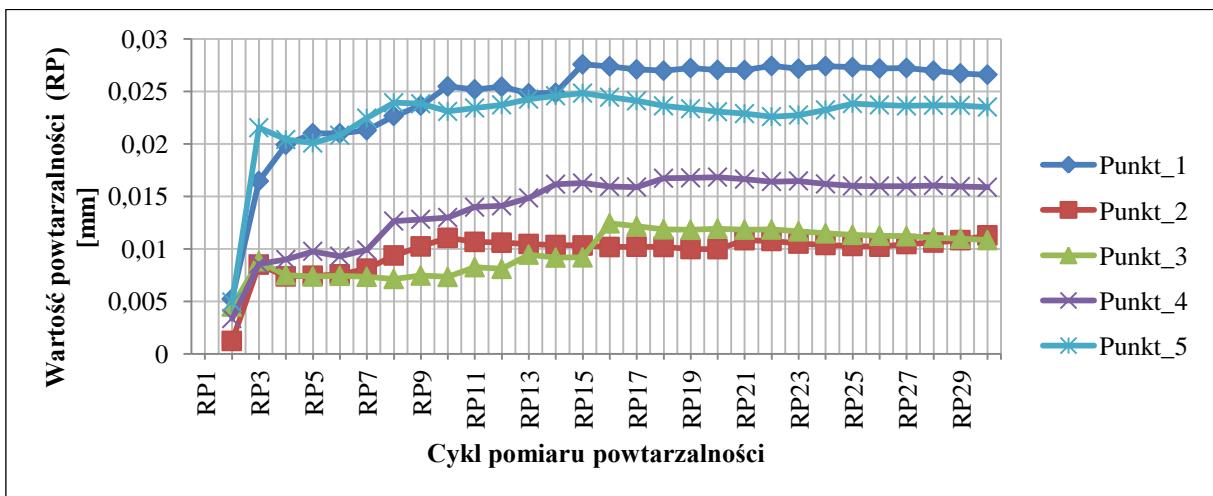
Rys. 3.68. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z i X dla sześciangu o boku 90 mm



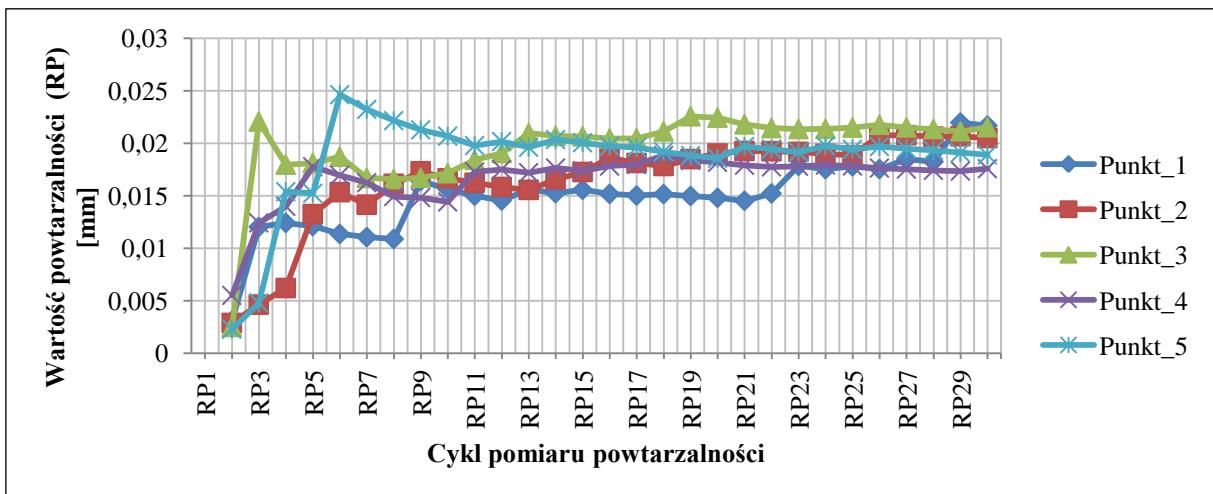
Rys. 3.69. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędzi względem osi Z i X dla sześciangu o boku 360 mm



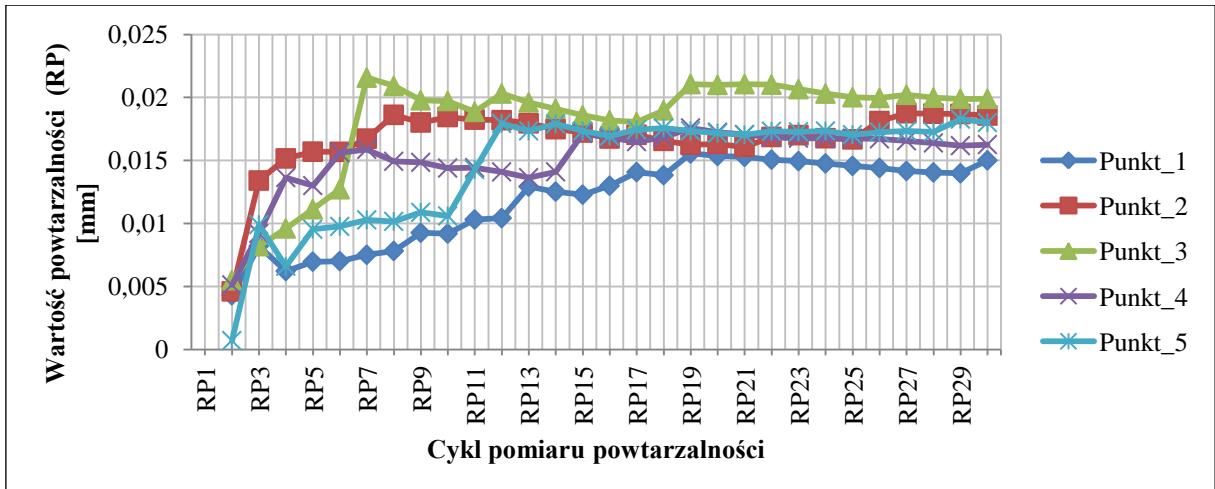
Rys. 3.70. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16 bez rotacji układu narzędzia dla sześcianu o boku 140 mm



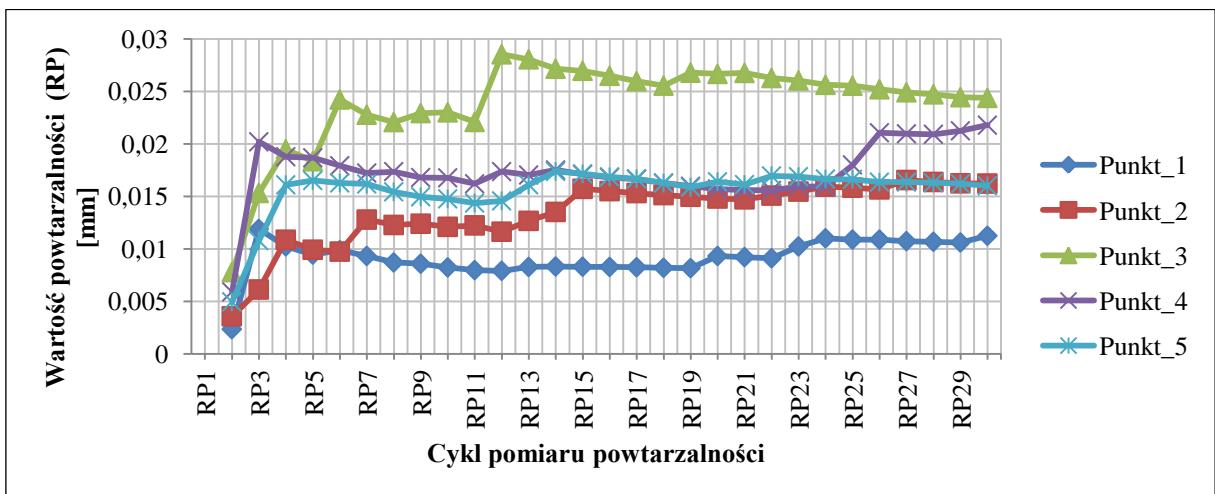
Rys. 3.71. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16 bez rotacji układu narzędzia dla sześcianu o boku 540 mm



Rys. 3.72. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 bez rotacji układu narzędzia dla sześcianu o boku 340 mm



Rys. 3.73. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 z rotacją układu narzędzia względem osi Z dla sześcianu o boku 340 mm



Rys. 3.74. Zmiany wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 z rotacją układu narzędzia względem osi Z i Y dla sześcianu o boku 340 mm

Na podstawie uzyskanych wyników (i graficznego ich przedstawienia) można stwierdzić, że wartość powtarzalności pozycjonowania (RP) zaczyna *stabilizować się* pomiędzy piątym a siódmym cyklem pomiarowym. Występujące różnice wynoszą od kilku do kilkunastu mikrometrów.

W normie dotyczącej badań obrabiarek [94] wartość powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego wylicza się z minimum pięciu odczytów wartości punktów pomiarowych. Uwzględniając uzyskane wyniki pomiaru powtarzalności pozycjonowania i informacje zawarte w normie [94], w celu udowodnienia tez pracy, przyjęto minimalną liczbę cykli równą osiem, a następnie sprawdzono, czy uzyskane wyniki są zgodne z rozkładem normalnym (rozdz. 3.6).

3.6. Sprawdzenie uzyskanych wyników na zgodność z rozkładem normalnym

Analizie poddano wartości l_j wyliczone ze wzoru:

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (7.1)$$

gdzie:

\bar{x}, \bar{y} i \bar{z} – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej uzyskanej przez n -krotne powtórzenie położenia zadanego,

x_j, y_j i z_j – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j -krotnym powtórzeniu położenia zadanego.

Tabela 3.8. Przykładowe zestawienie wartości l_j dla punktu P₁ robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L

Pomiar j	x_j	y_j	z_j	l_j
1	-450,141	449,591	-449,025	0,023415
2	-450,142	449,606	-449,025	0,009007
3	-450,143	449,606	-449,026	0,008591
4	-450,138	449,612	-449,02	0,010376
5	-450,129	449,624	-449,014	0,022629
6	-450,142	449,615	-449,021	0,008181
7	-450,145	449,61	-449,026	0,005615
8	-450,137	449,623	-449,018	0,015336
Średnia wartość x, y, z	-450,14	449,6109	-449,022	

Na podstawie obliczeń dla $n = 8$ cykli pomiarowych (7.2) przyjęto trzy klasy (warianty cech):

$$k = \sqrt{n} = \sqrt{8} = 2,828 \quad (7.2)$$

gdzie:

k – liczba klas,

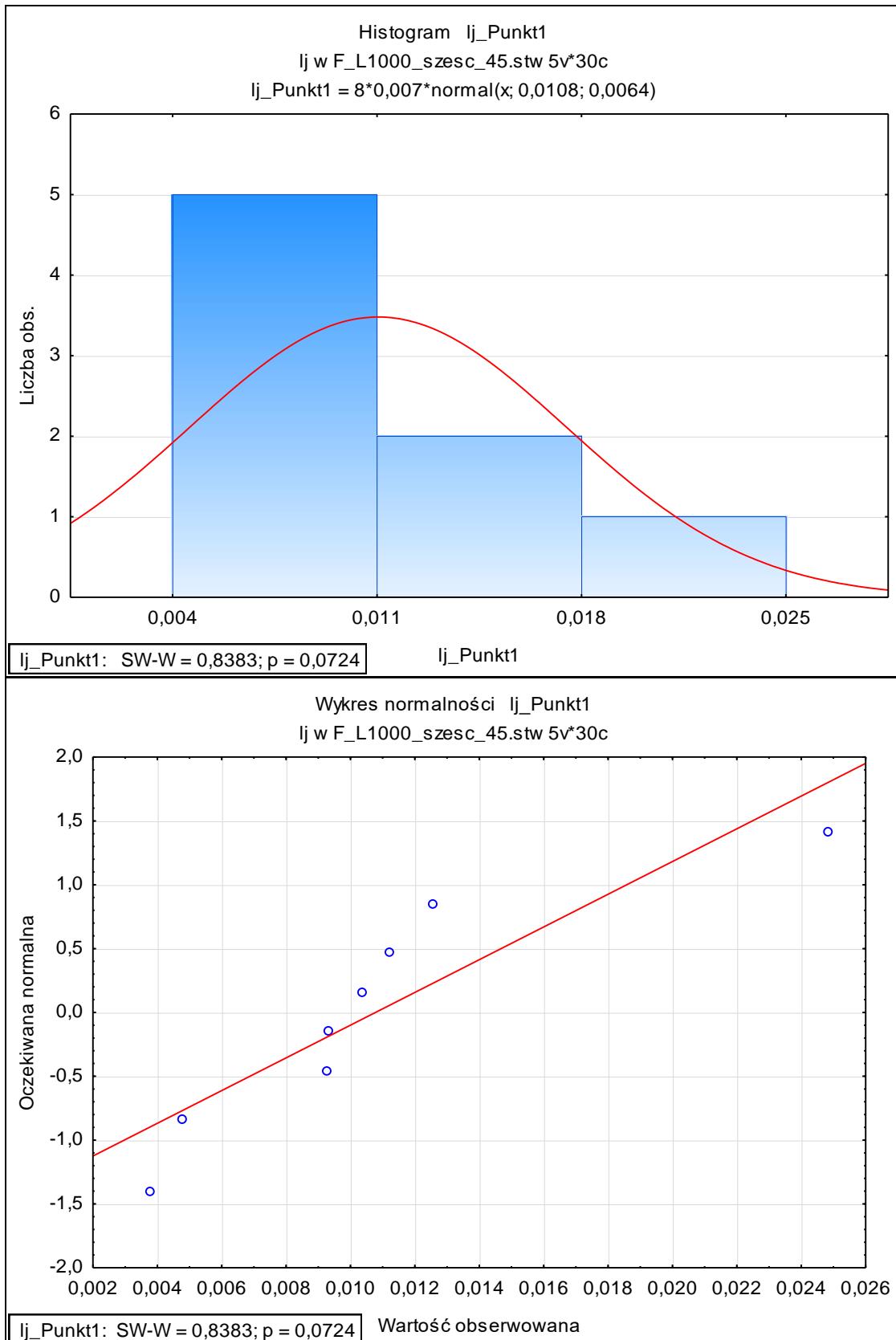
n – liczebność grupy [95].

Postawiono hipotezę zerową: H_0 – rozkład danej zmiennej jest rozkładem normalnym. W takiej sytuacji odrzucenie hipotezy zerowej jest równoznaczne z tym, że dana zmienna nie ma rozkładu normalnego. Podczas badań dokonano pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania dla sześcianu o boku od 45 do 900 mm. Sprawdzenie hipotezy zerowej wykonano w programie STATISTICA10 testem Shapiro-Wilka (W) [95] dla wszystkich uzyskanych wyników – załącznik 1. zawierający trzy warianty: 1) brak rotacji układu narzędzi, 2) rotację narzędzi względem osi Z i 3) osi Y.

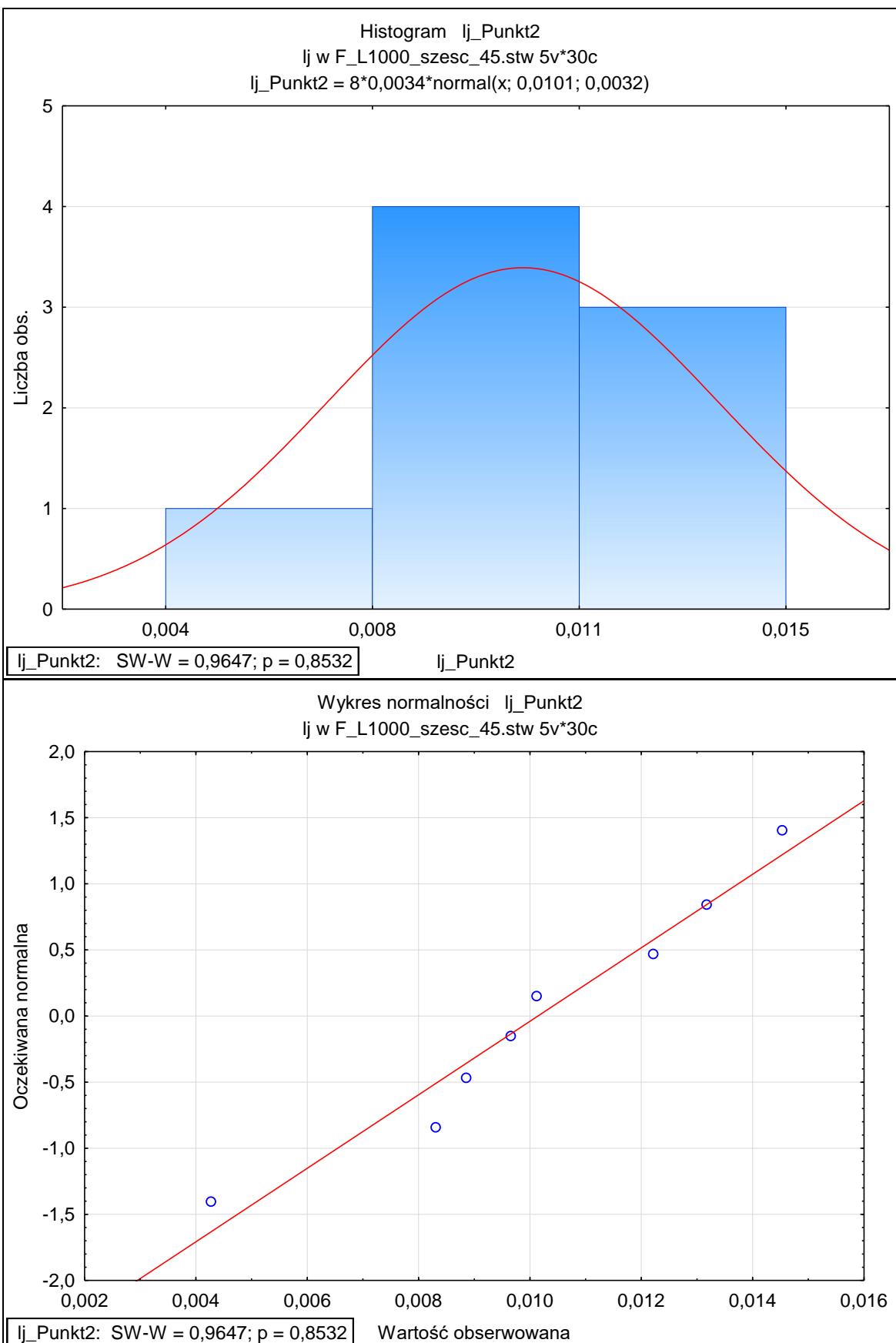
Uzyskane wyniki nie są podstawą do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 .

Przykładowe wyniki analizy statystycznej przedstawiono na rys. 3.75–3.89.

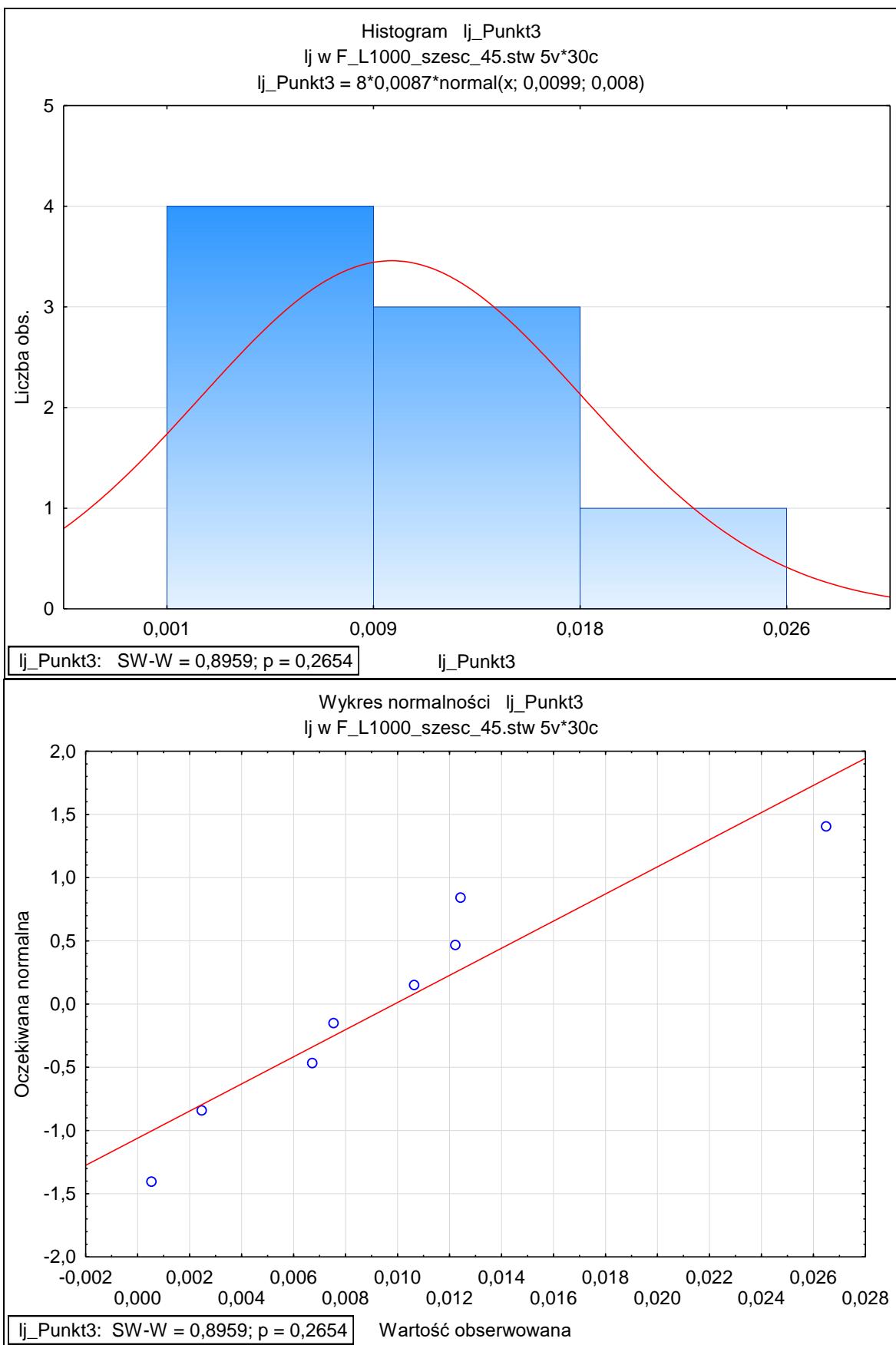
Robot przemysłowy Fanuc M-16iB/10L pomiar F_L1750_szesc_900



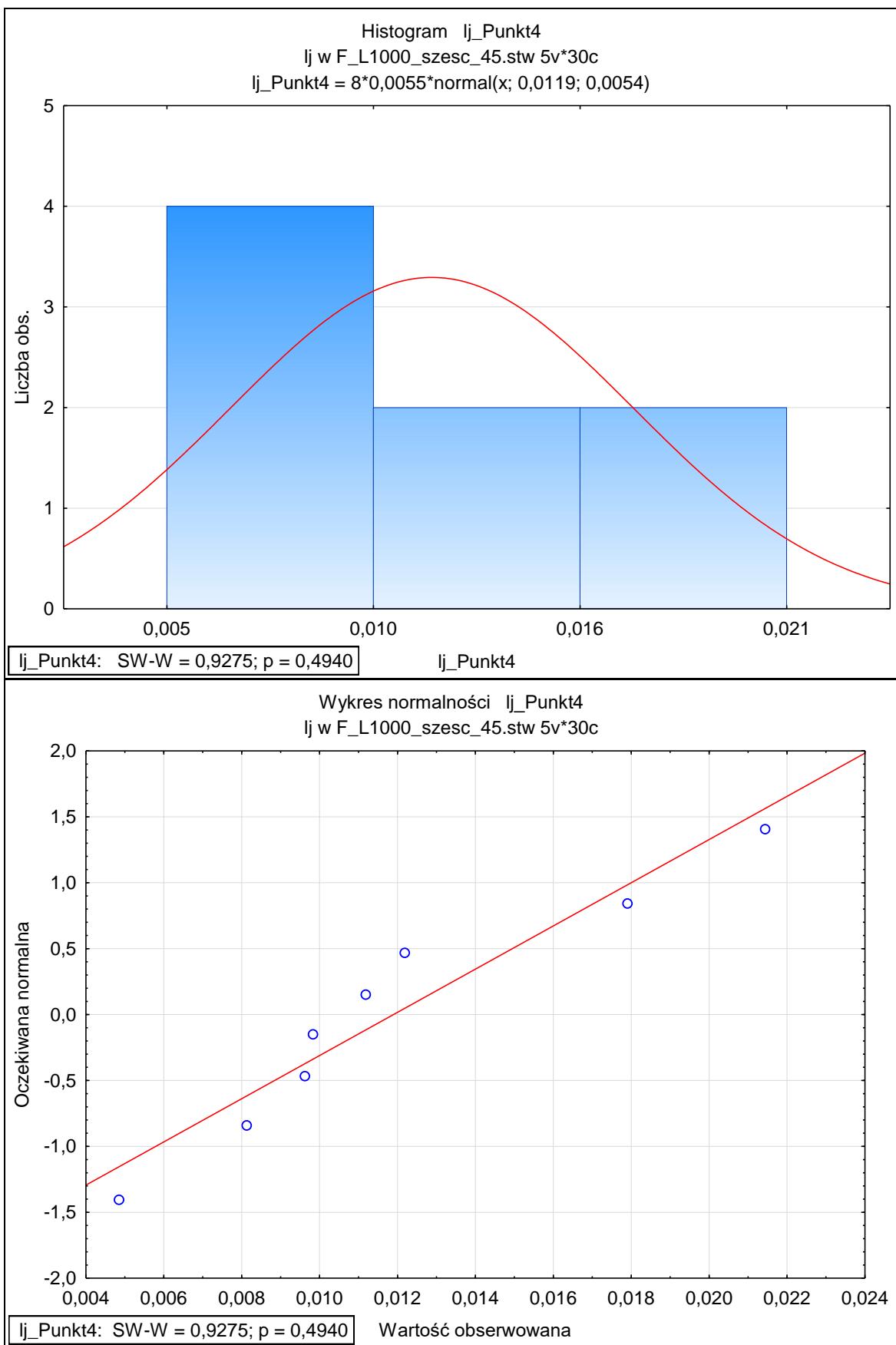
Rys. 3.75. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 1 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm



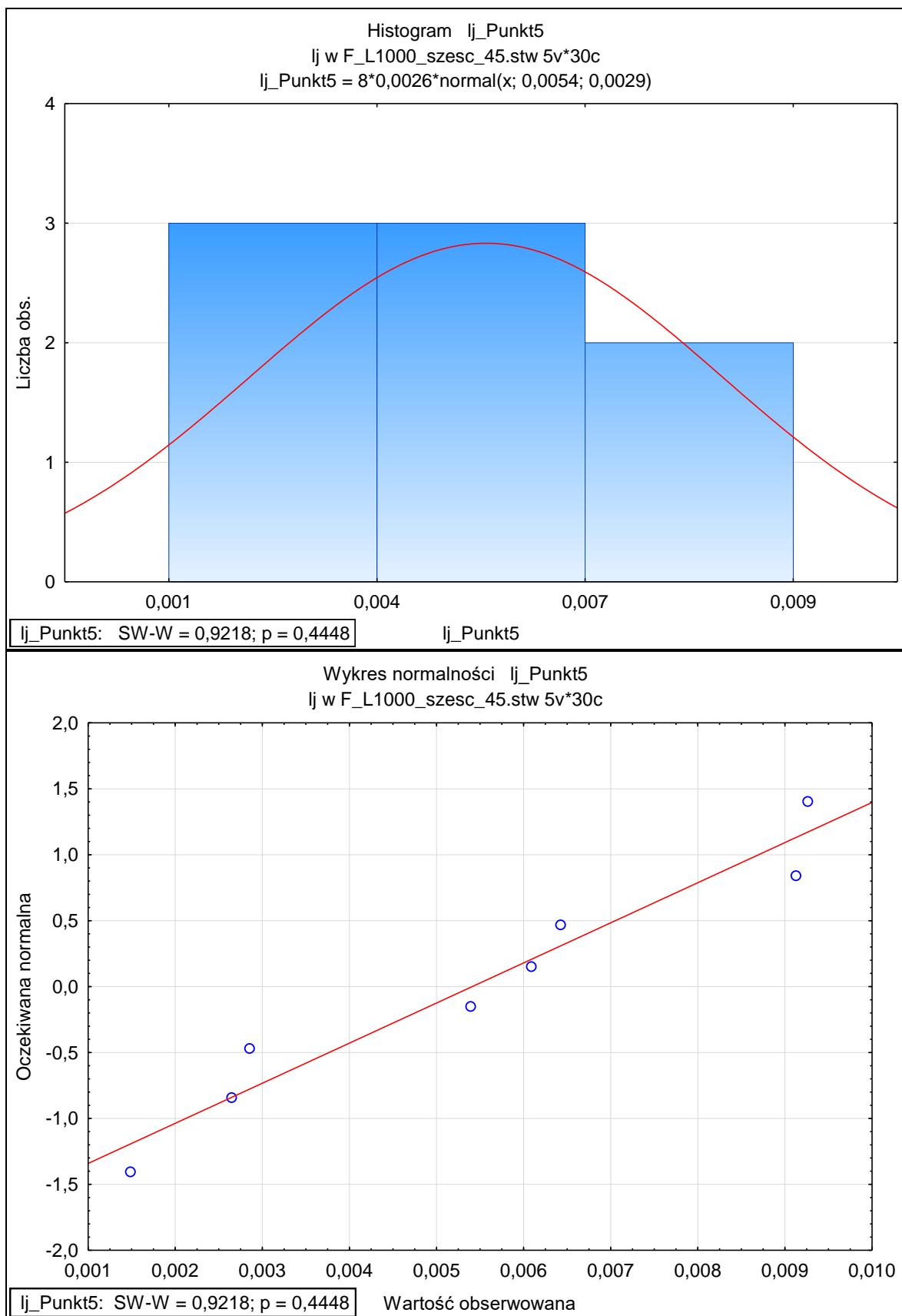
Rys. 3.76. Analiza statystyczna dla wartości Ij punktu 2 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm



Rys. 3.77. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 3 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L
w odległości 1,75 m dla sześcianu o boku 900 mm

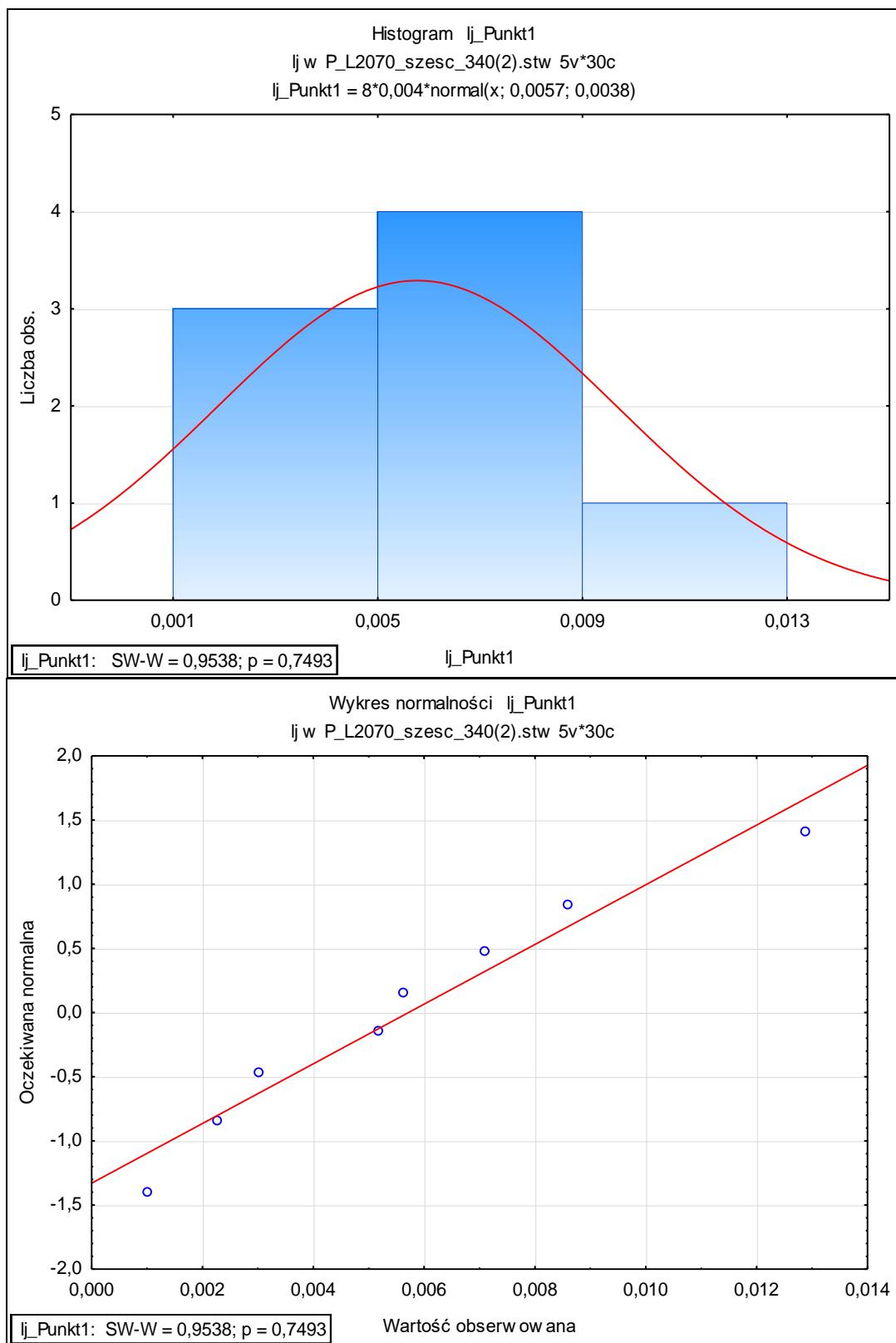


Rys. 3.78. Analiza statystyczna dla wartości Ij punktu 4 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L
w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm

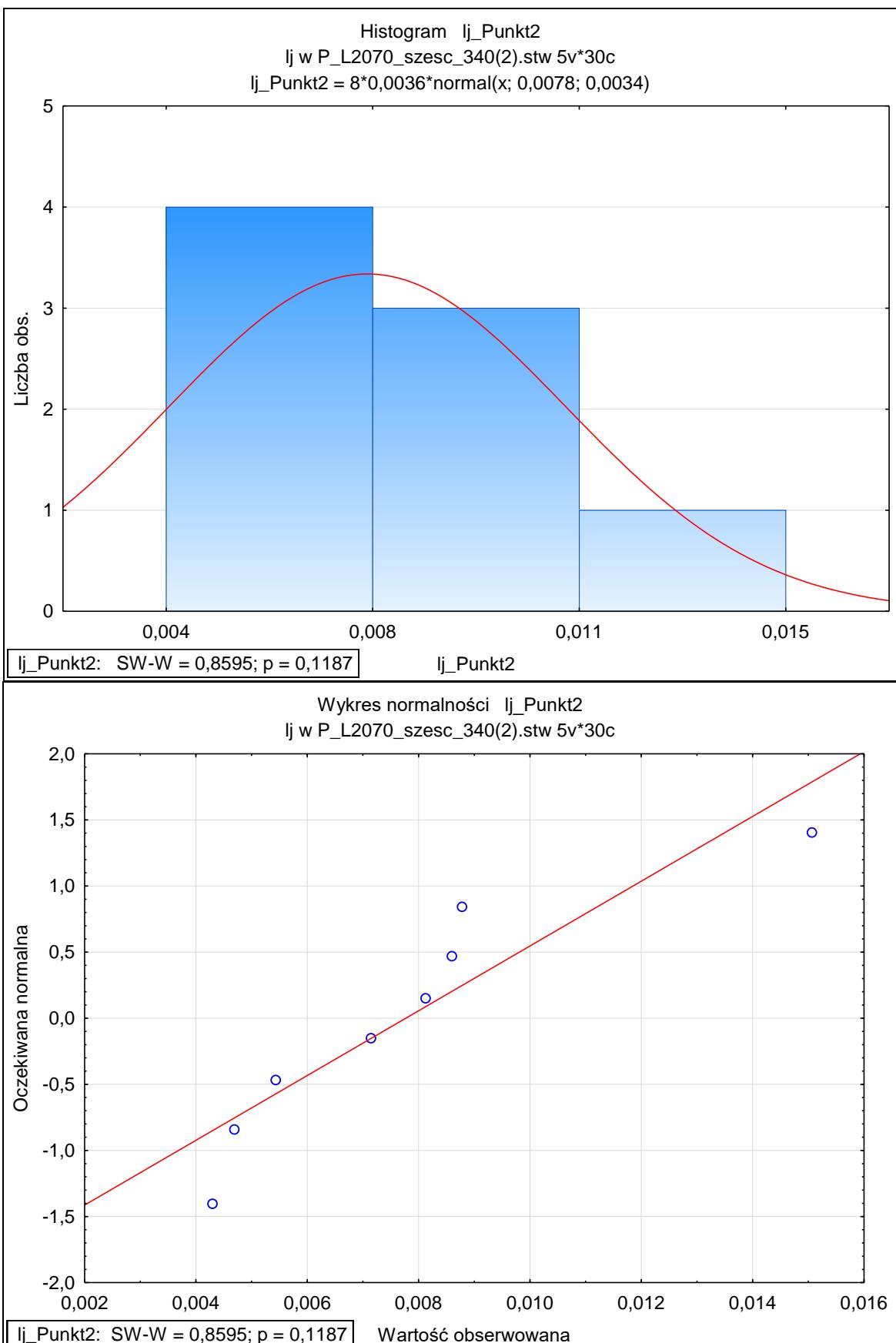


Rys. 3.79. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 5 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm

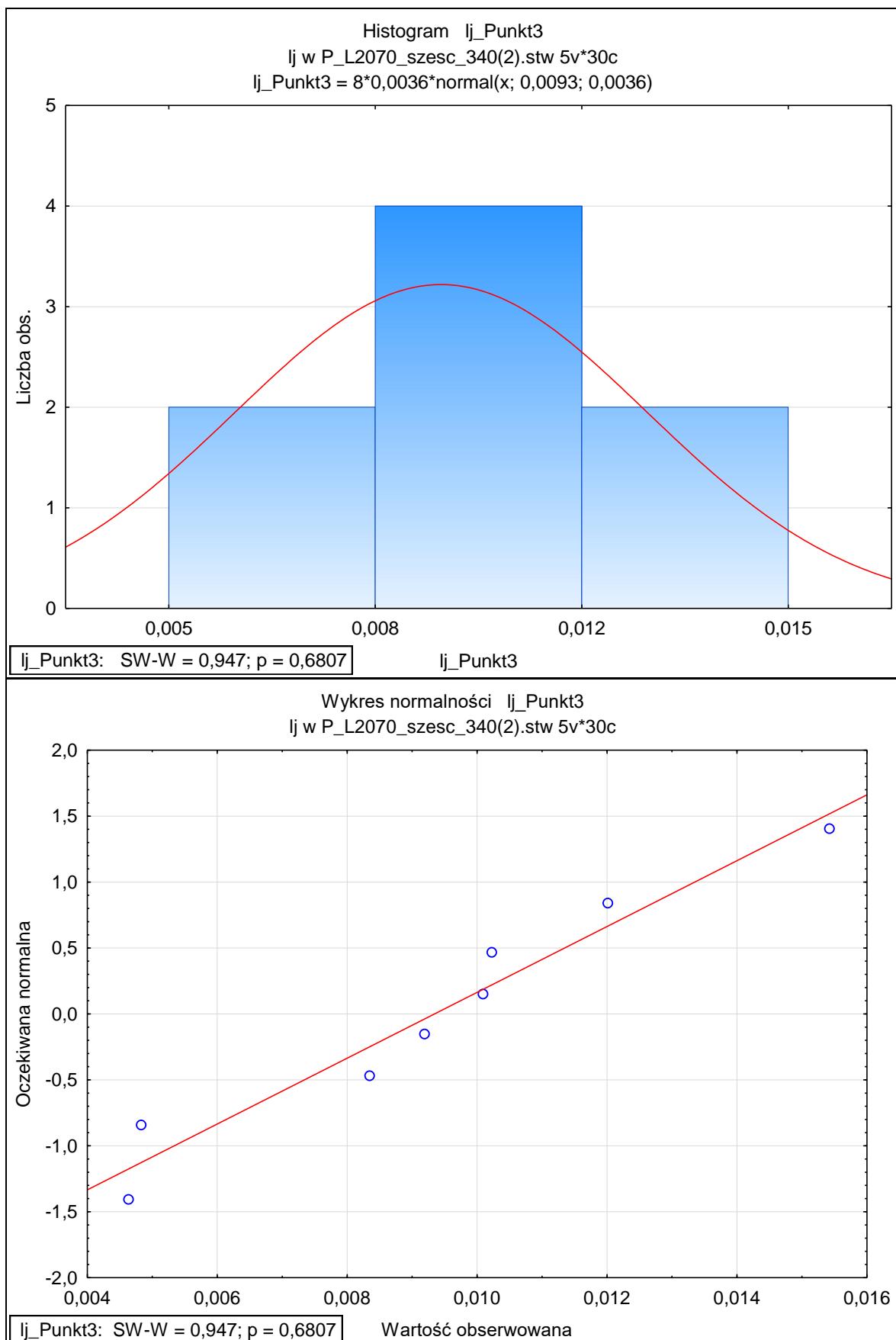
Robot przemysłowy Panasonic TA 1400 pomiar P_L2070_szesc_340



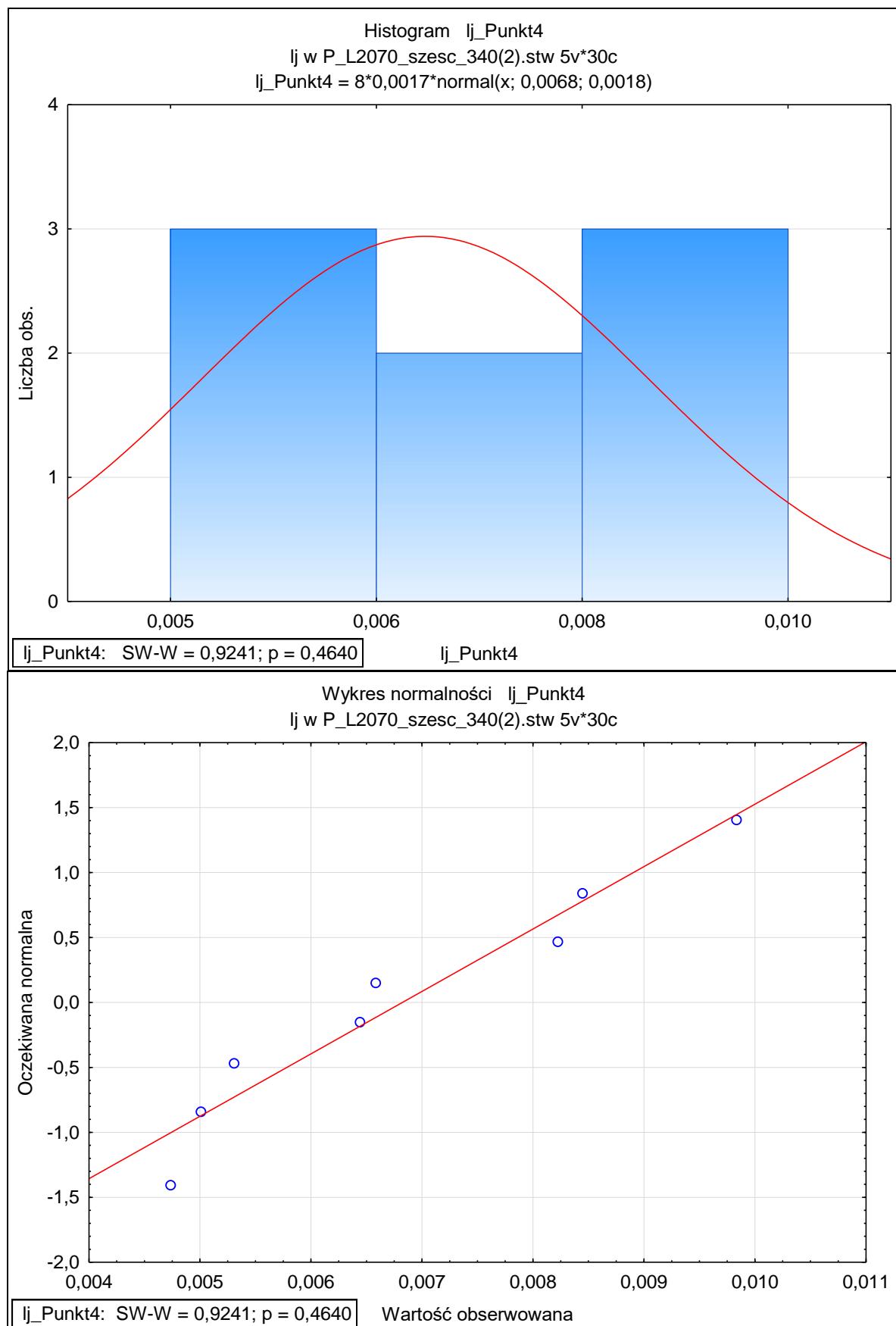
Rys. 3.80. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 1 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm



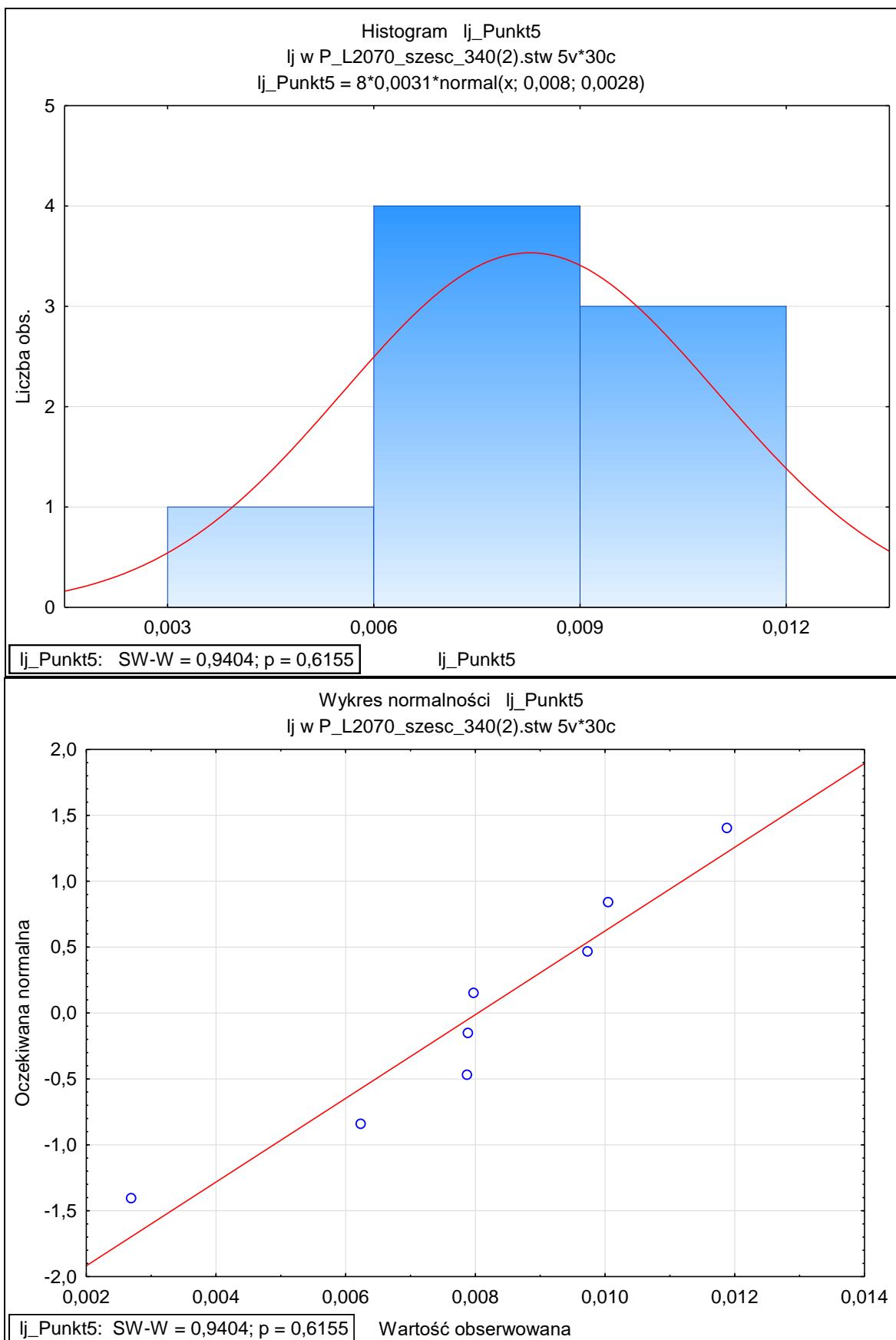
Rys. 3.81. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 2 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm



Rys. 3.82. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 3 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześcianu o boku 340 mm

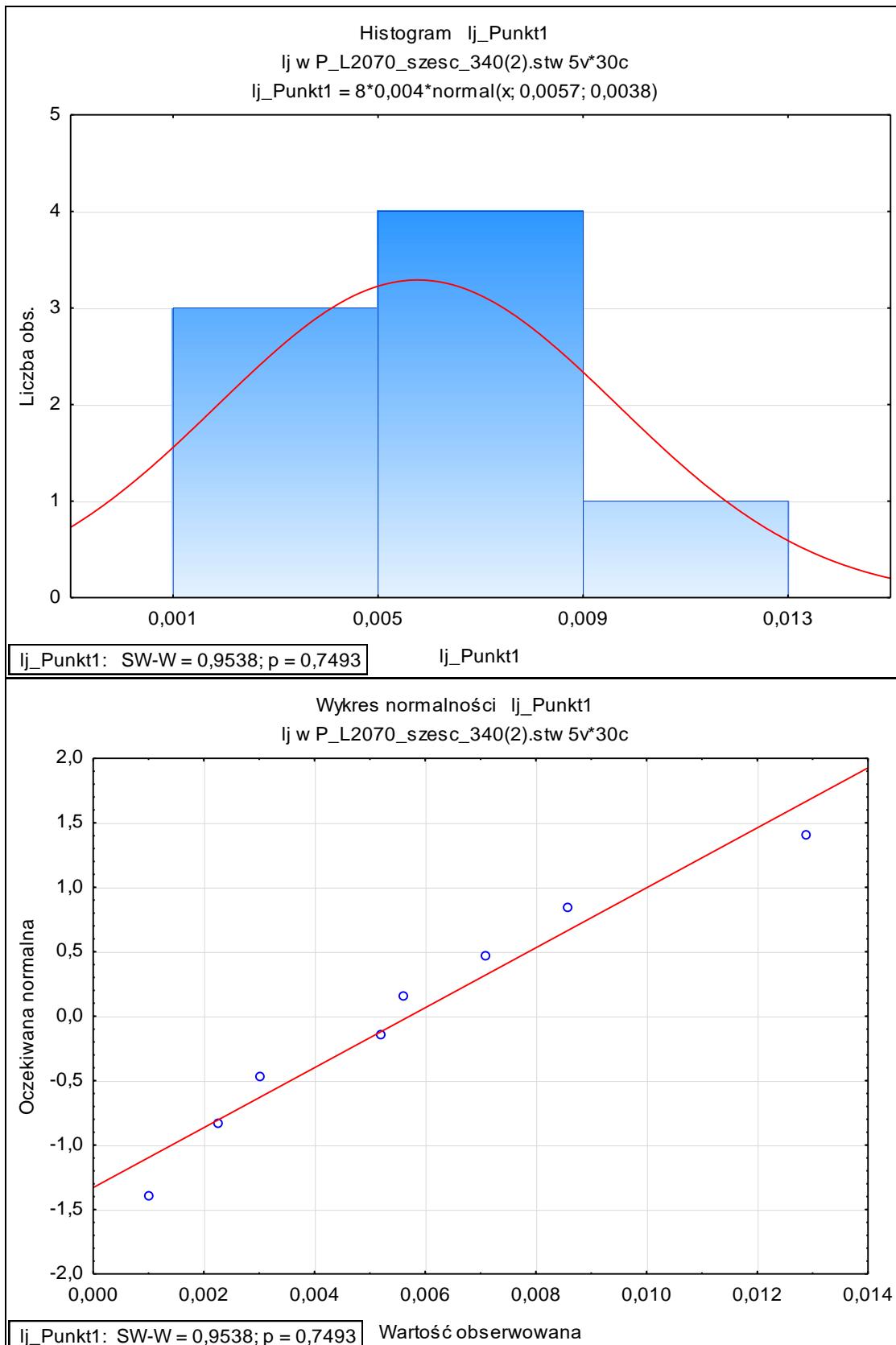


Rys. 3.83. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 4 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześcianu o boku 340 mm

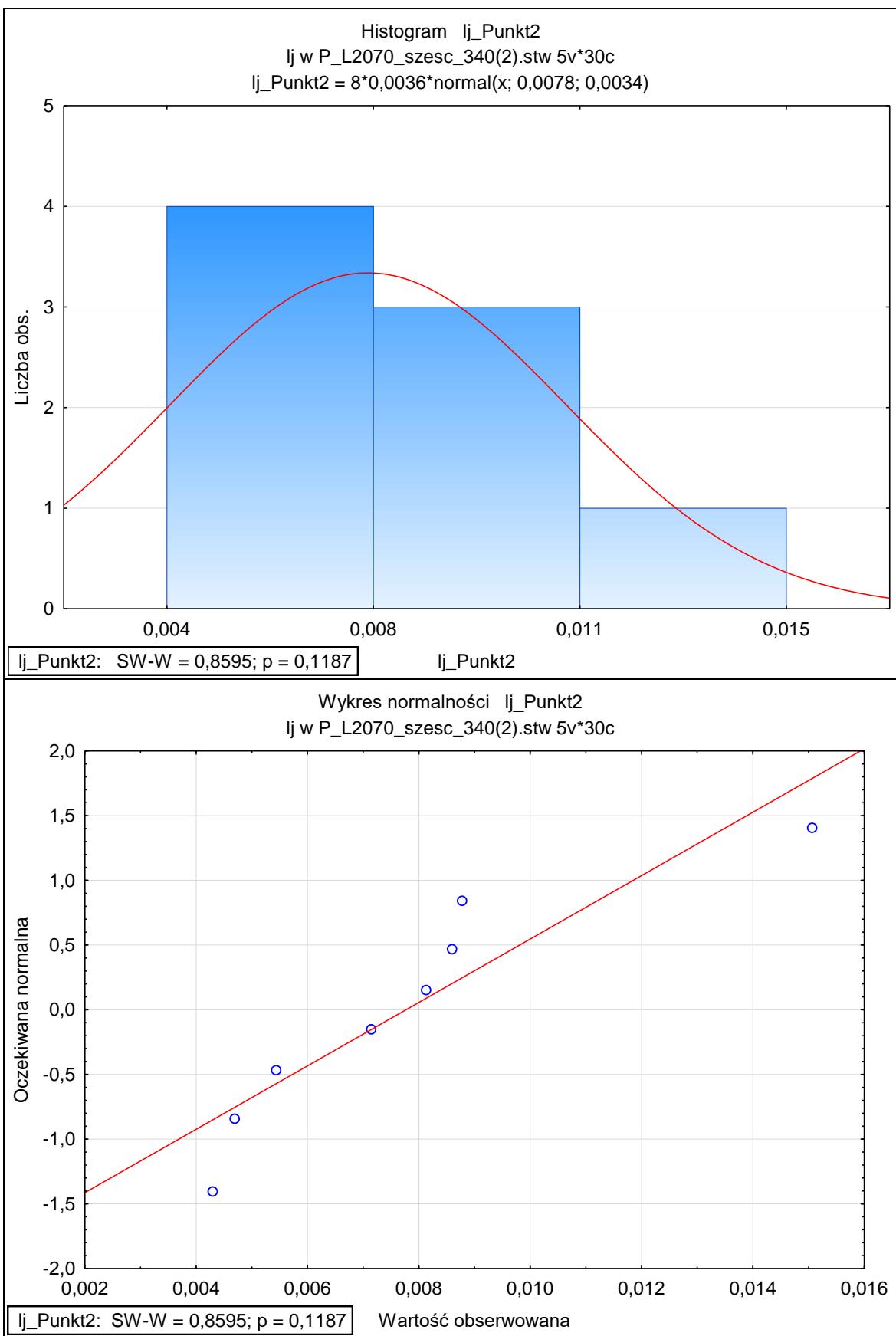


Rys. 3.84. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 5 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm

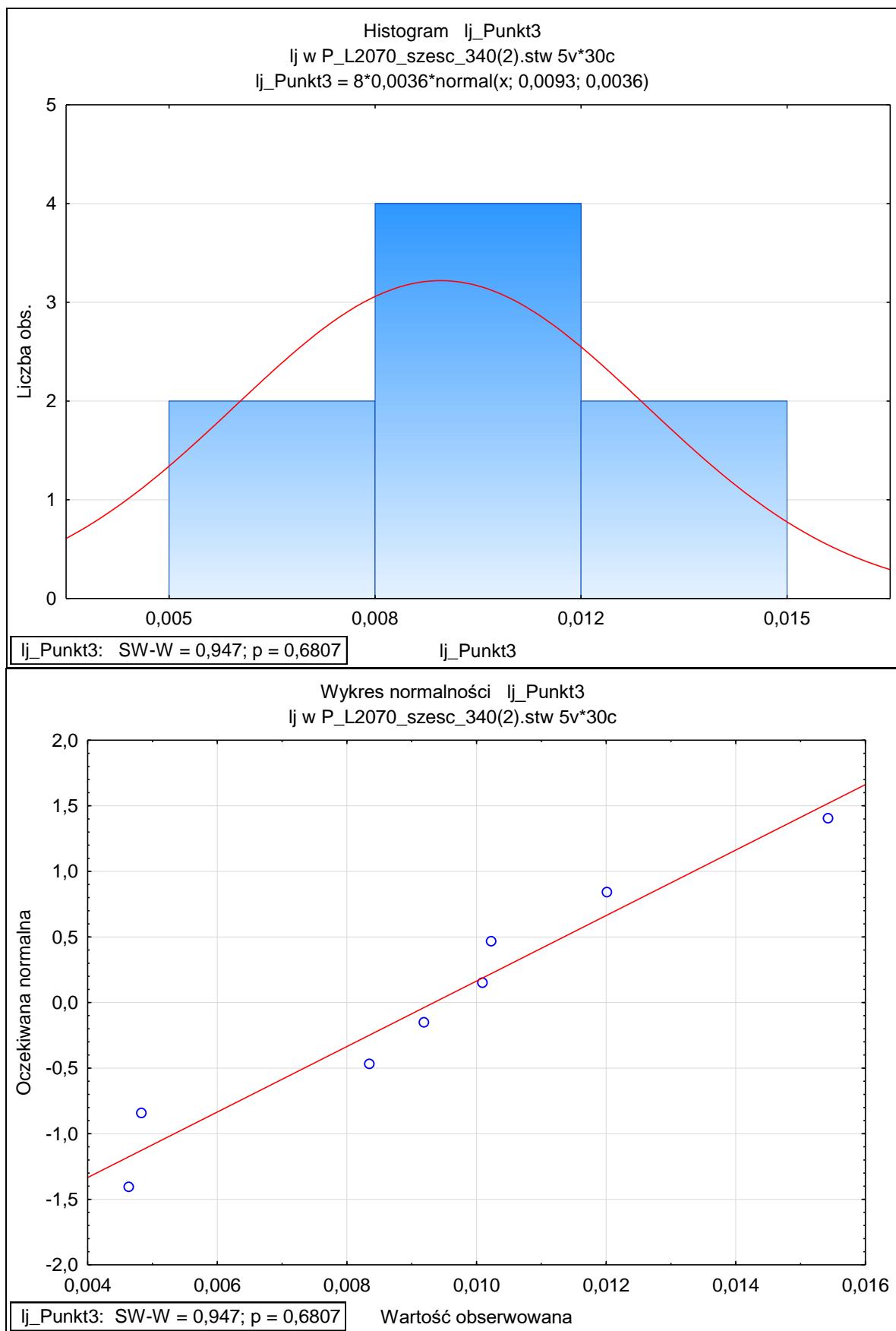
Robot przemysłowy Kuka KR 16 pomiar K_L1500_szesc_440



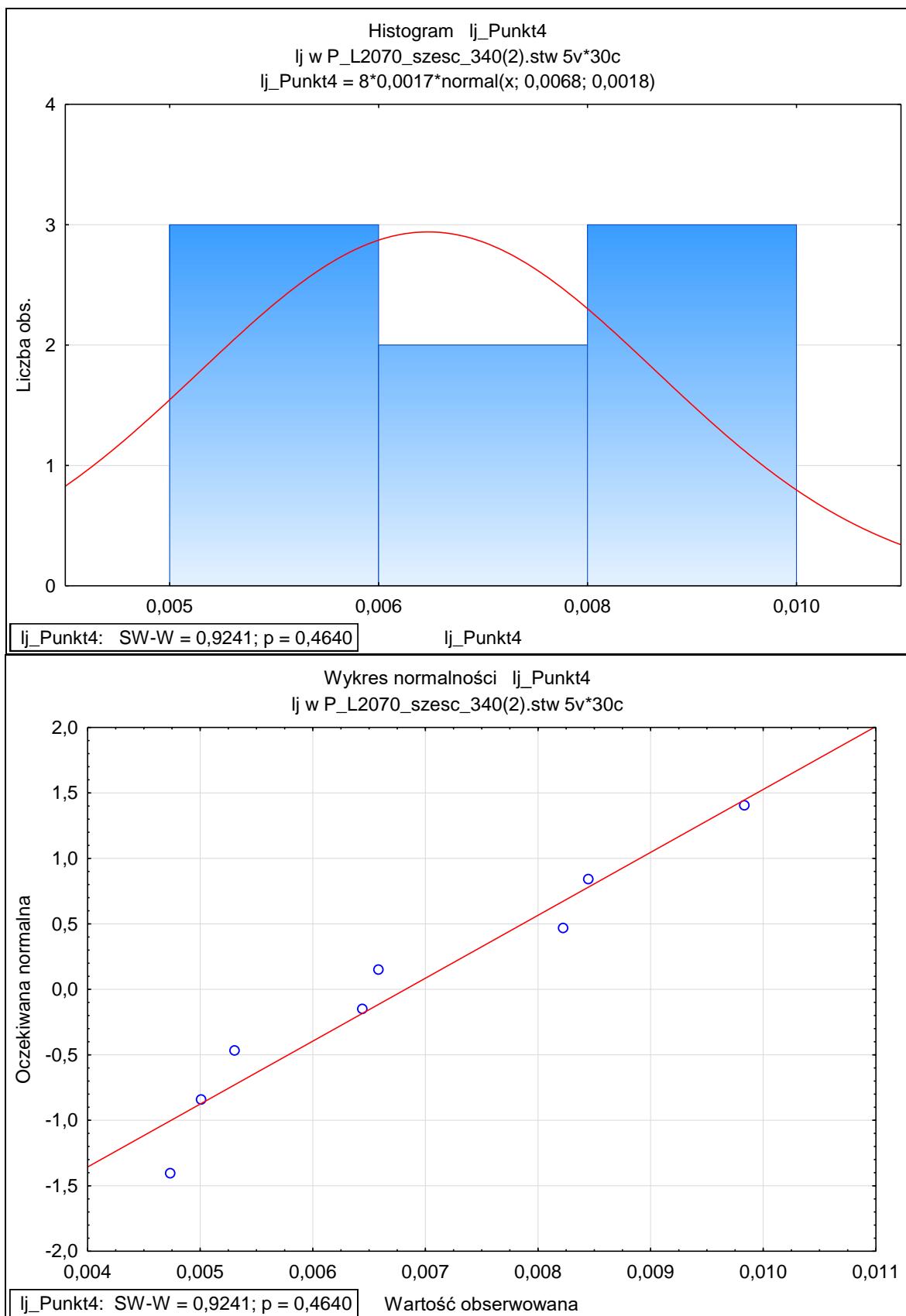
Rys. 3.85. Analiza statystyczna dla wartości I_j punktu 1 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



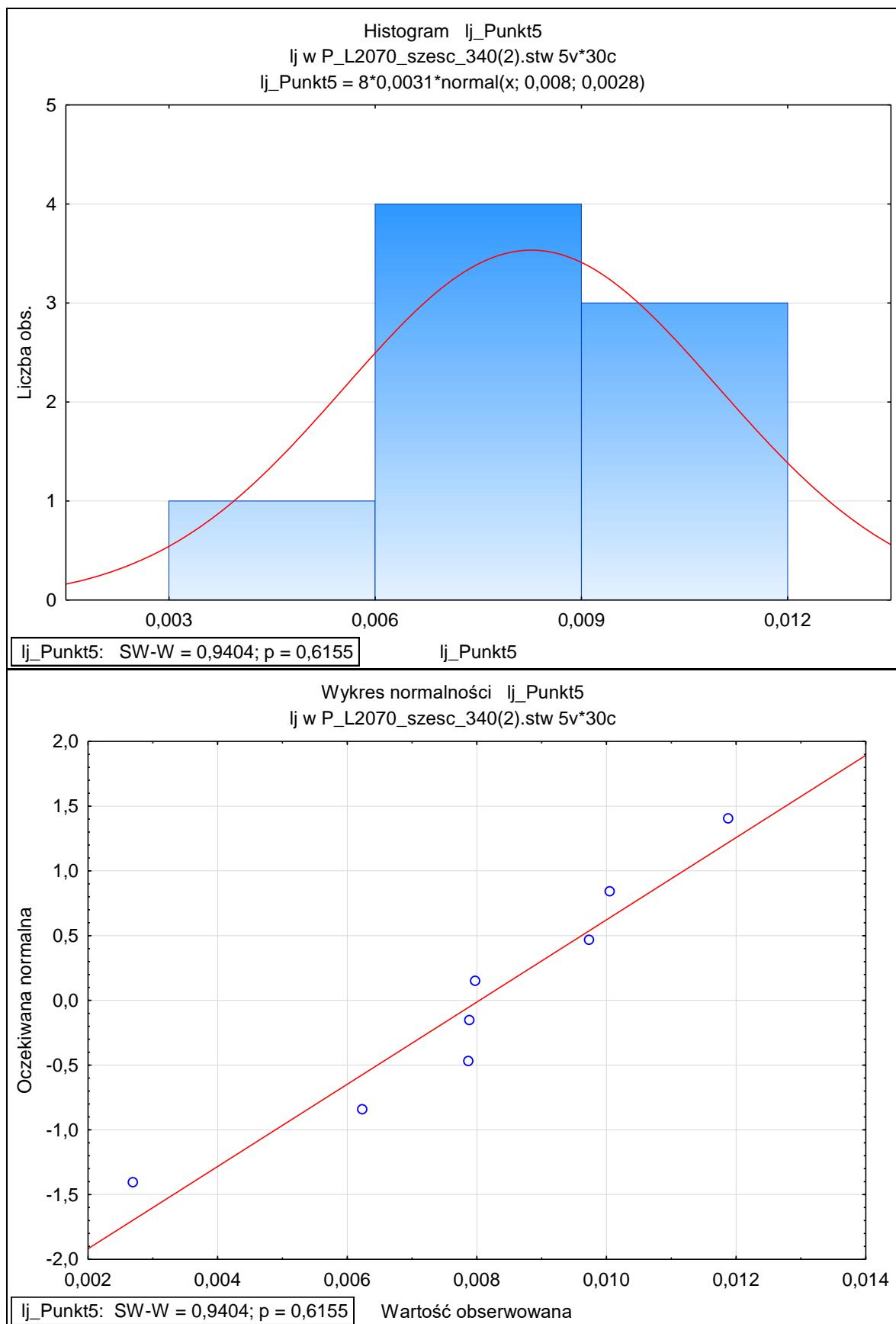
Rys. 3.86. Analiza statystyczna dla wartości l_j punktu 2 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



Rys. 3.87. Analiza statystyczna dla wartości l_j punktu 3 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześcianu o boku 440 mm



Rys. 3.88. Analiza statystyczna dla wartości l_j punktu 4 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm

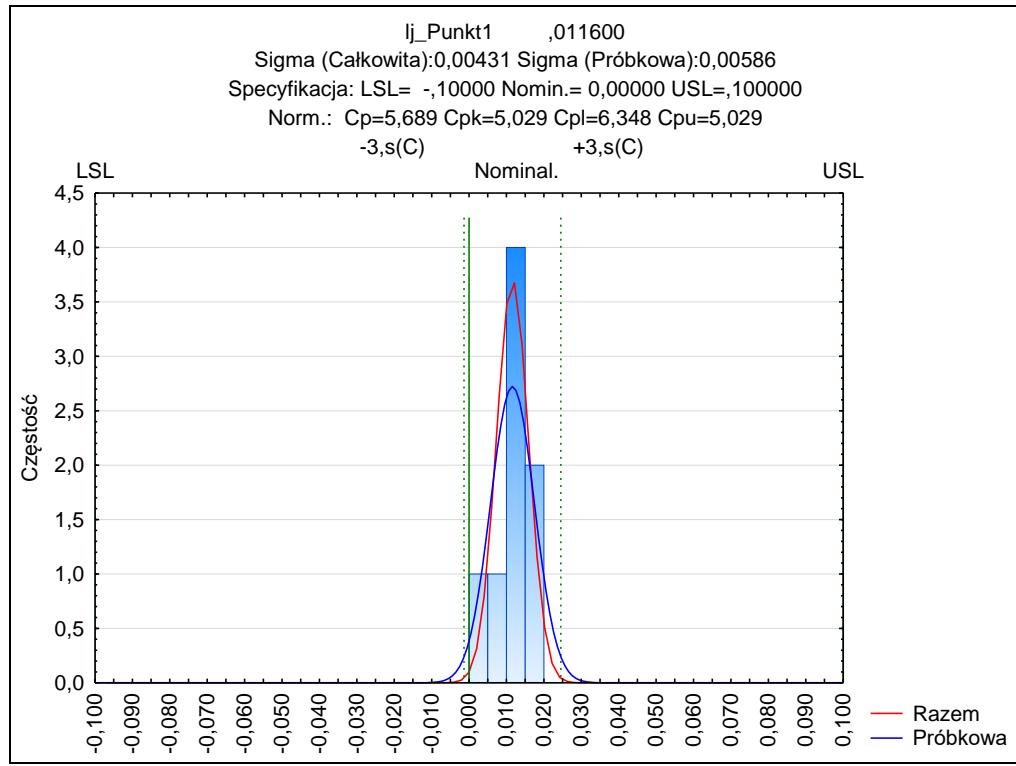


Rys. 3.89. Analiza statystyczna dla wartości l_j punktu 5 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm

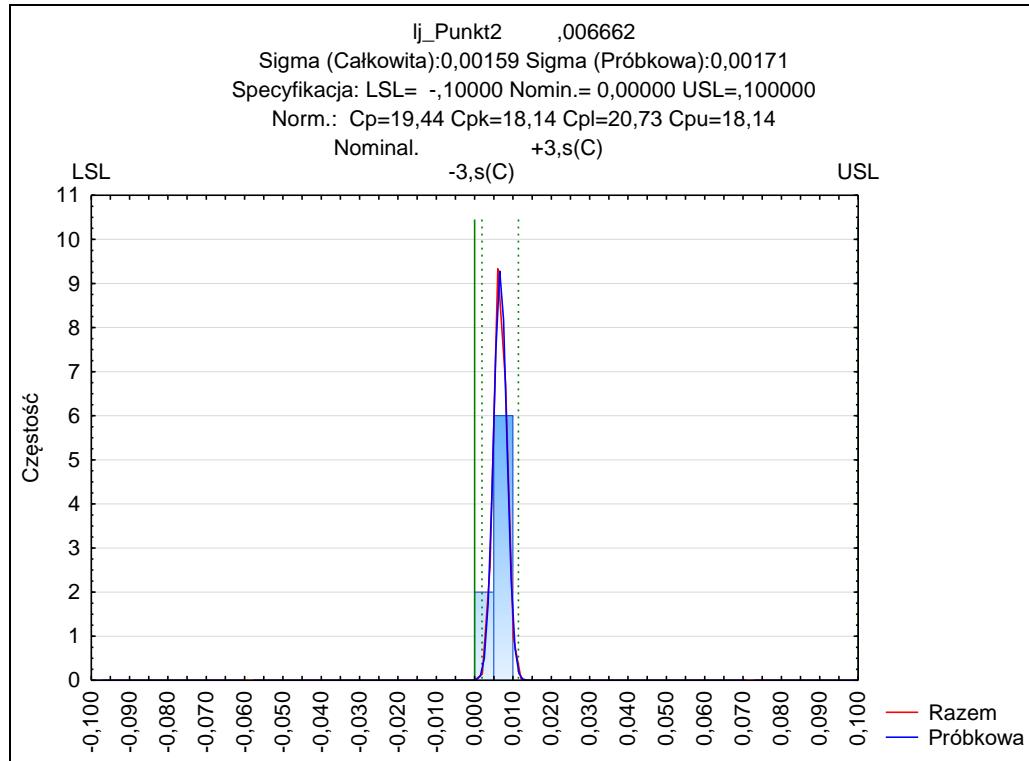
3.7. Sprawdzenie zdolności procesu pomiaru

W celu określenia, czy opracowany proces pomiaru spełnia wymogi jakościowe przeprowadzono test zdolności procesu za pomocą wskaźników zdolności C_p i C_{pk} . Przyjęto wartość powtarzalności pozycjonowania podawaną przez producentów robotów (np. $\pm 0,1$ mm) jako tolerancję badanej powtarzalności pozycjonowania dla ośmiu cykli pomiarowych. Dzięki temu możliwe będzie określenie nie tylko potencjalnych i rzeczywistych zdolności procesu do spełnienia wymagań jakościowych, ale także ustalenie liczby pomiarów mieszczących się w założonych granicach tolerancji. Aby za pomocą wskaźników C_p i C_{pk} określić zdolność procesu, badana charakterystyka powinna mieć rozkład normalny, co w przypadku próbki 8 – elementowej zostało potwierdzone w rozdz. 3.6. Do sprawdzenia zdolności procesu posłużono się programem STATISTICA 10. Ustalono granice ± 3 sigma wokół wartości nominalnej, które wyznaczają zmienność procesu. Przyjęcie takich założeń pozwala uznać, że z prawdopodobieństwem 99% wszystkie pomiary będą mieściły się w zadeklarowanych przedziałach. Następnie określono granice specyfikacji LSL, USL, których wartości wynikają z wartości powtarzalności pozycjonowania podanych przez producentów robotów, np. $RP = \pm 0,1$ mm. Dolna granica przedziału tolerancji (LSL) dla tego procesu wynosi: $-0,1$ mm, natomiast górna (USL) $0,1$ mm. Te dwie wartości wyznaczają przedział tolerancji, a różnica USL i LSL jest długością tego przedziału [96]. W kolejnym kroku wyznaczono wskaźniki: 1) procesu C_p informujący, jaka część zakresu krzywej normalnej mieści się w zadanych granicach specyfikacji oraz 2) wycentrowania procesu C_{pk} . Wykresy zdolności procesu przedstawiono na rys. 3.90–3.104.

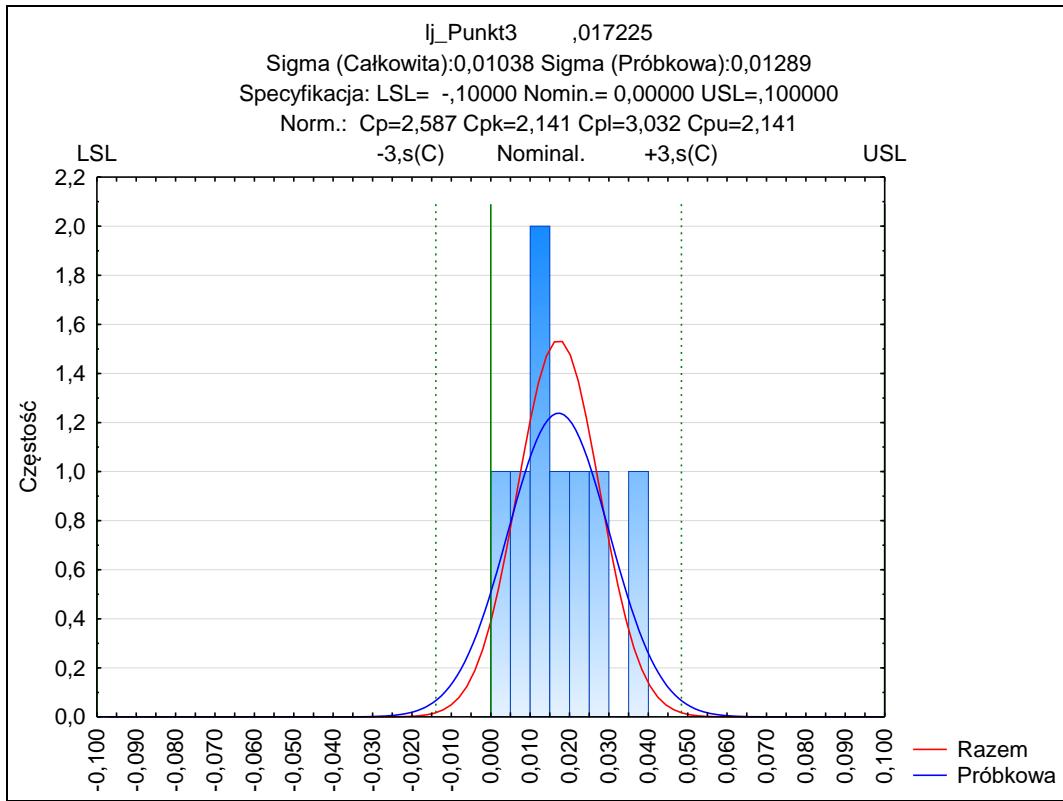
Robot przemysłowy Fanuc M-16iB/10L pomiar F_L1750_szesc_900



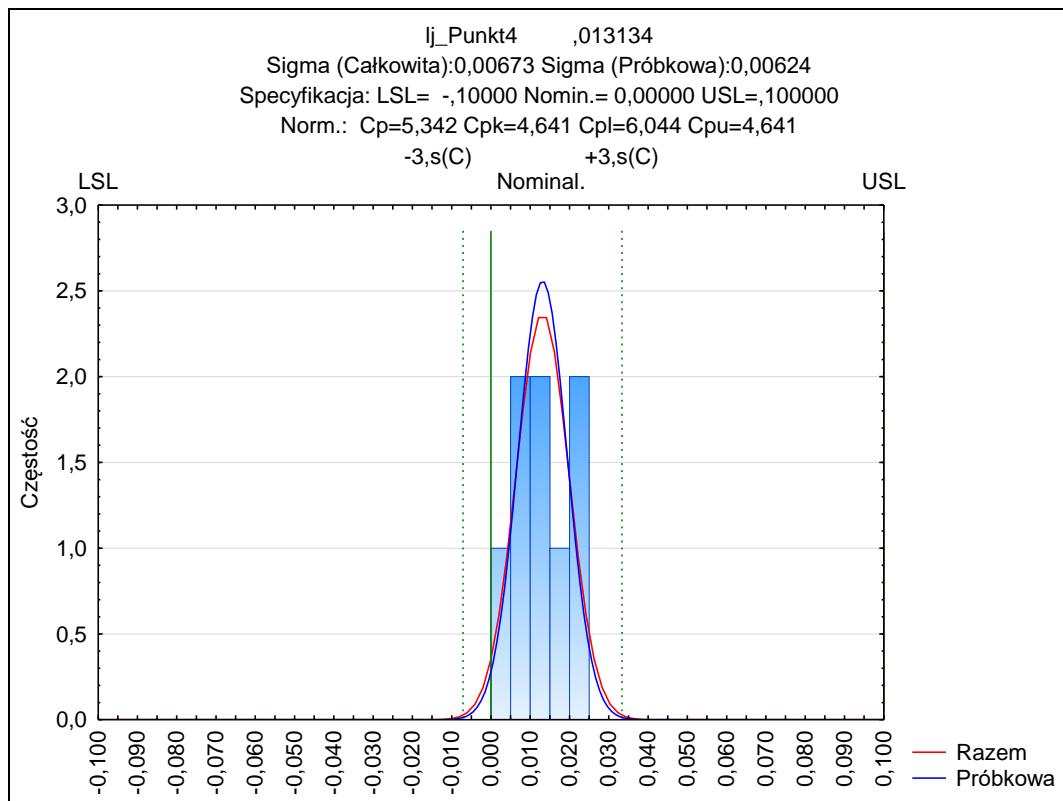
Rys. 3.90. Zdolności procesu dla punktu 1 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm



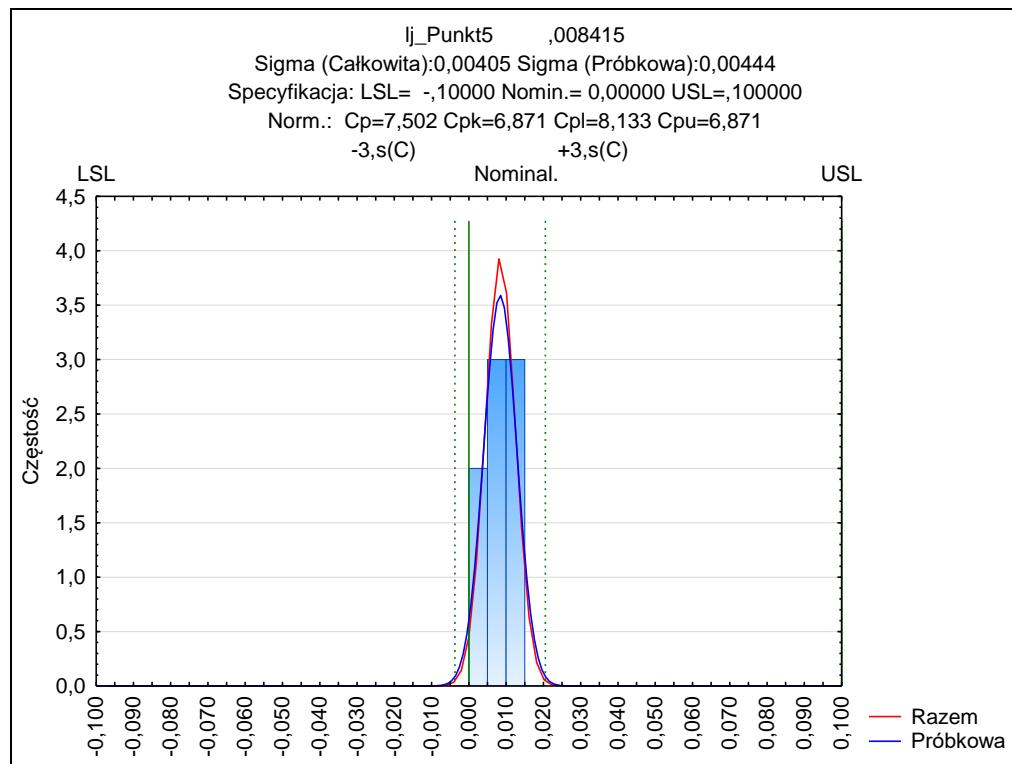
Rys. 3.91. Zdolności procesu dla punktu 2 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześcianu o boku 900 mm



Rys. 3.92. Zdolności procesu dla punktu 3 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześciangu o boku 900 mm

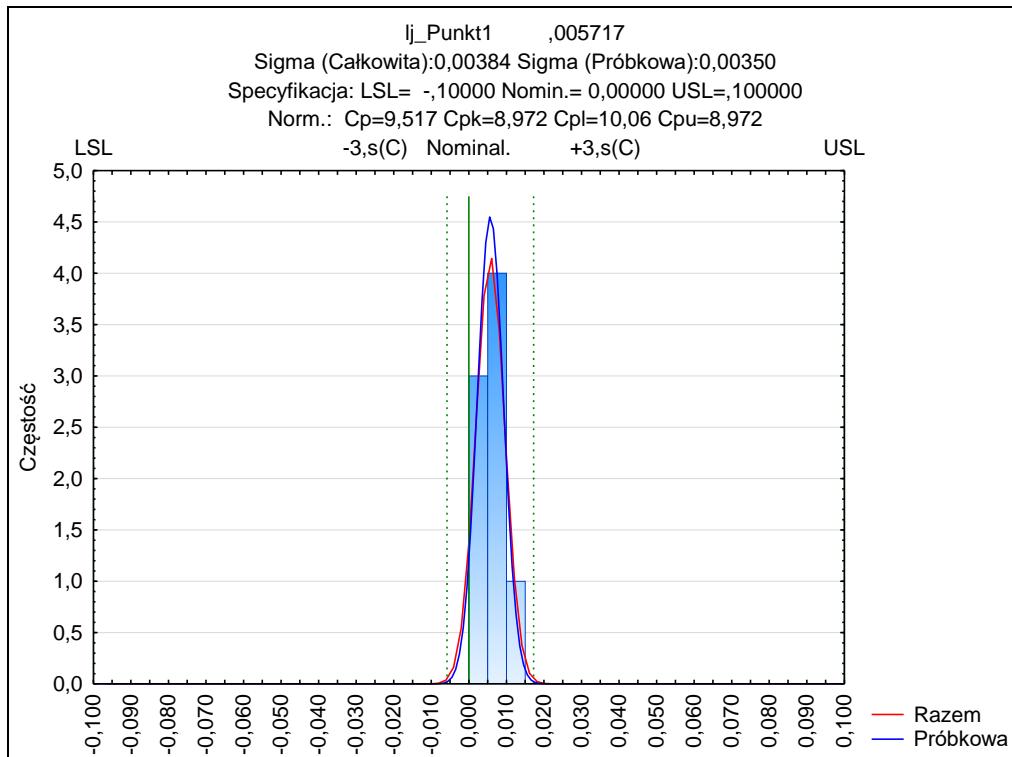


Rys. 3.93. Zdolności procesu dla punktu 4 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześcianu o boku 900 mm

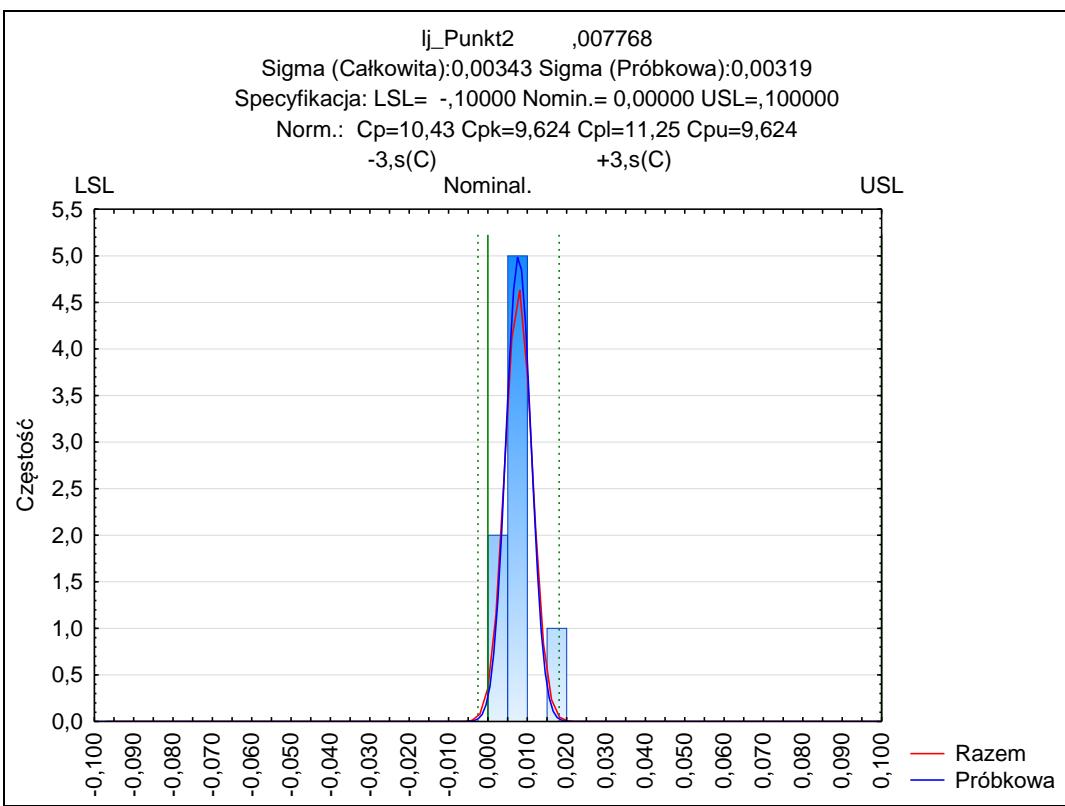


Rys. 3.94. Zdolności procesu dla punktu 5 robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,75 m dla sześcianu o boku 900 mm

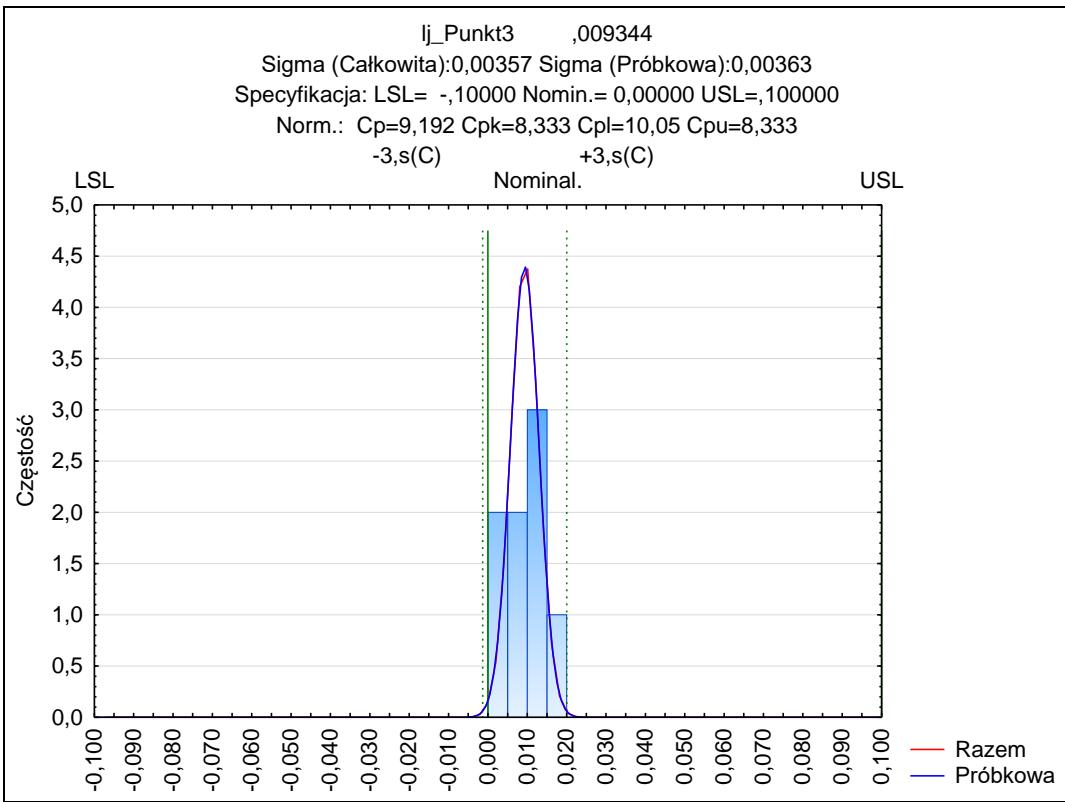
Robot przemysłowy Panasonic TA 1400 pomiar P_L2070_szesc_340



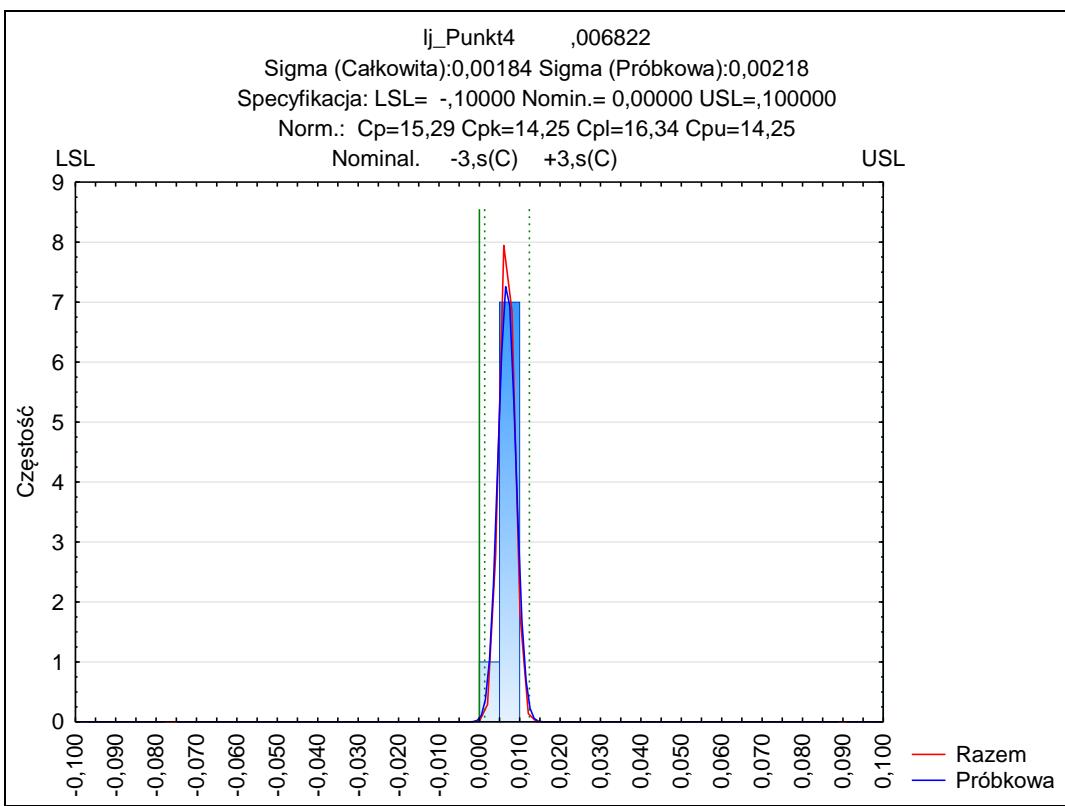
Rys. 3.95. Zdolności procesu dla punktu 1 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześcianu o boku 340 mm



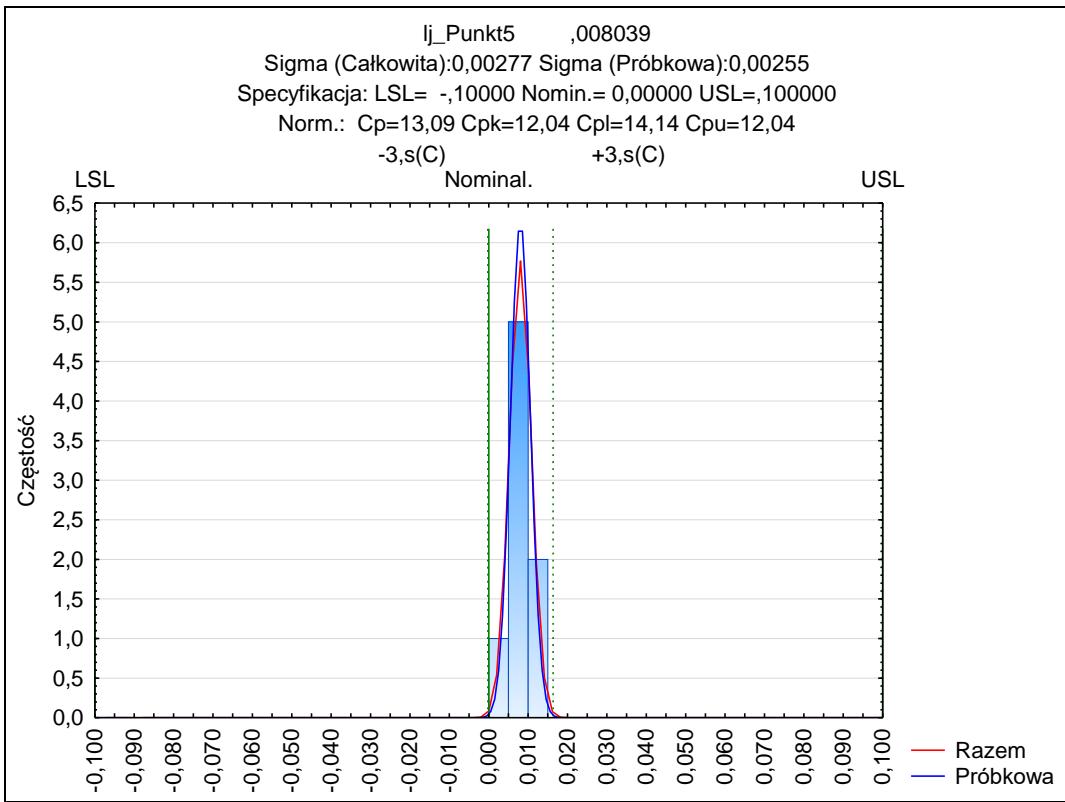
Rys. 3.96. Zdolności procesu dla punktu 2 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm



Rys. 3.97. Zdolności procesu dla punktu 3 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm

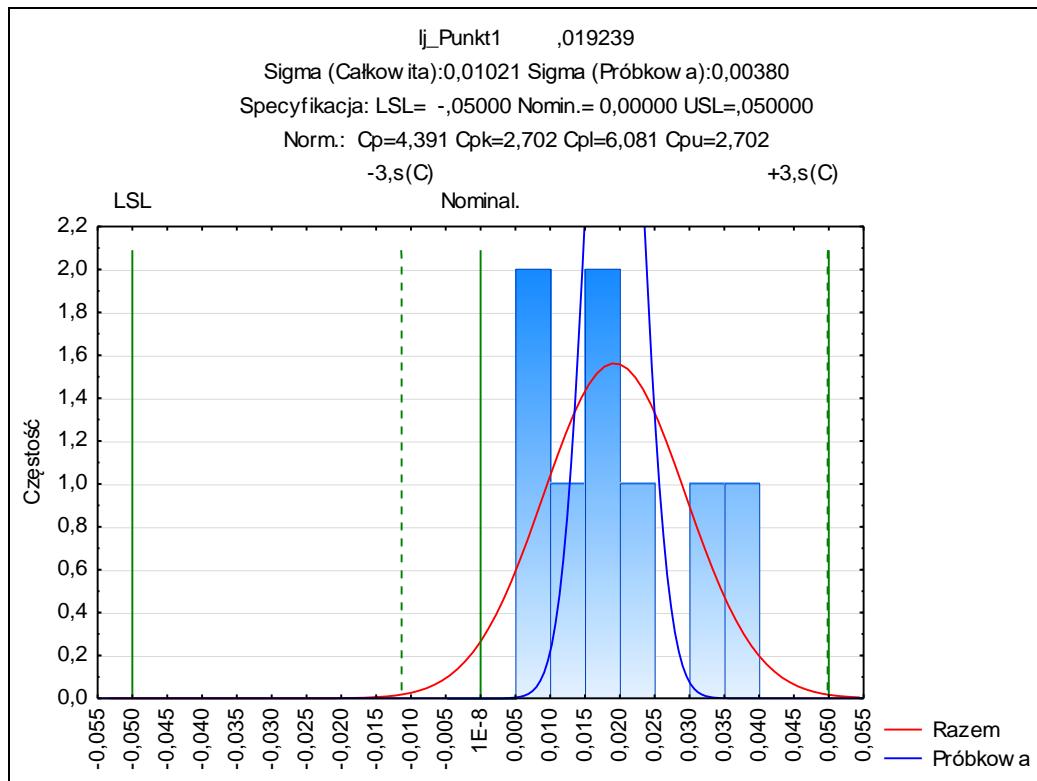


Rys. 3.98. Zdolności procesu dla punktu 4 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm

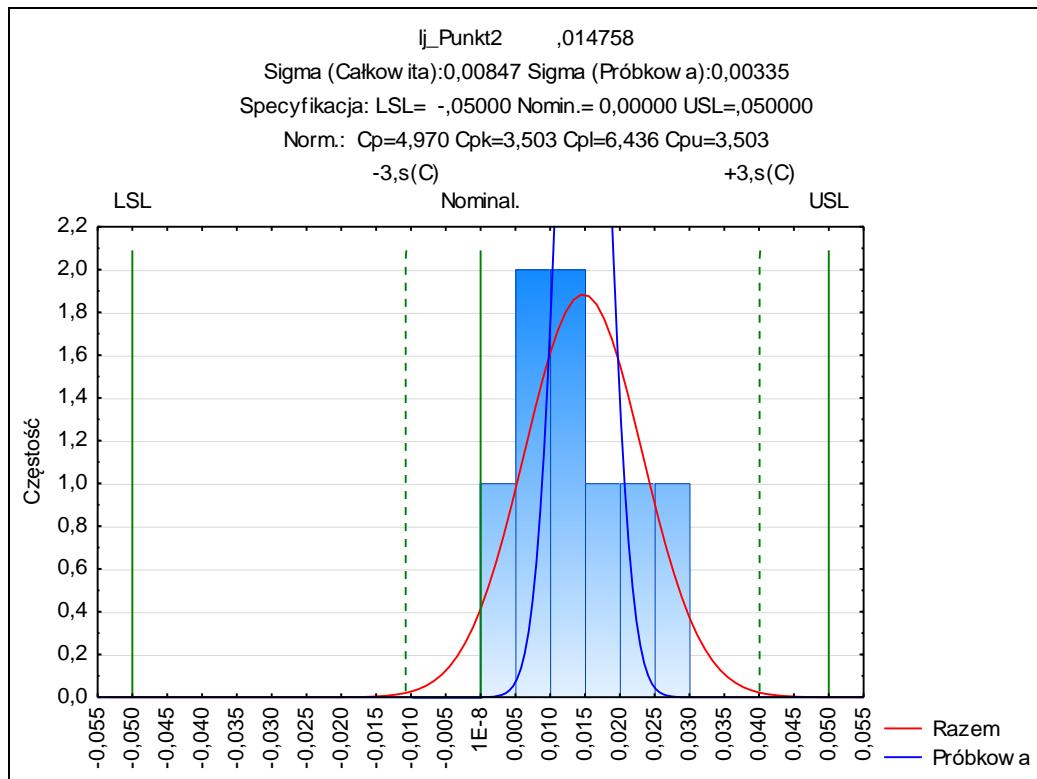


Rys. 3.99. Zdolności procesu dla punktu 5 robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 2,07 m dla sześciangu o boku 340 mm

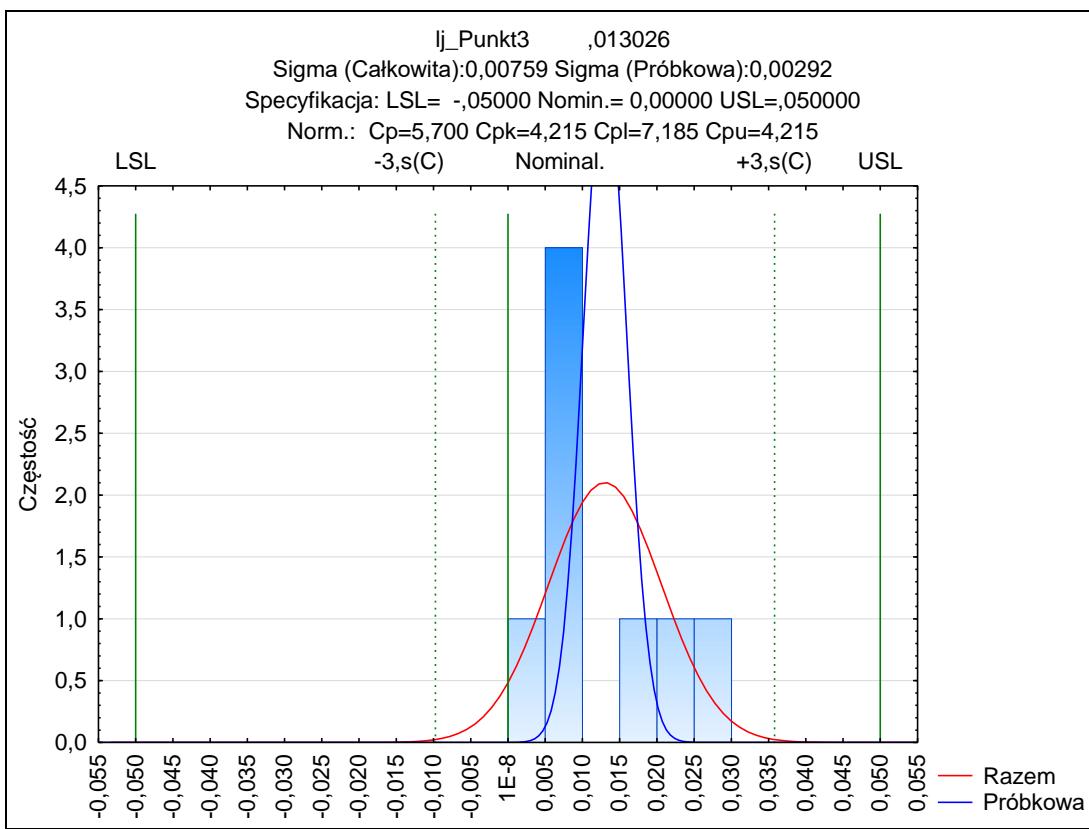
Robot przemysłowy Kuka KR 16 pomiar K_L1500_szesc_440



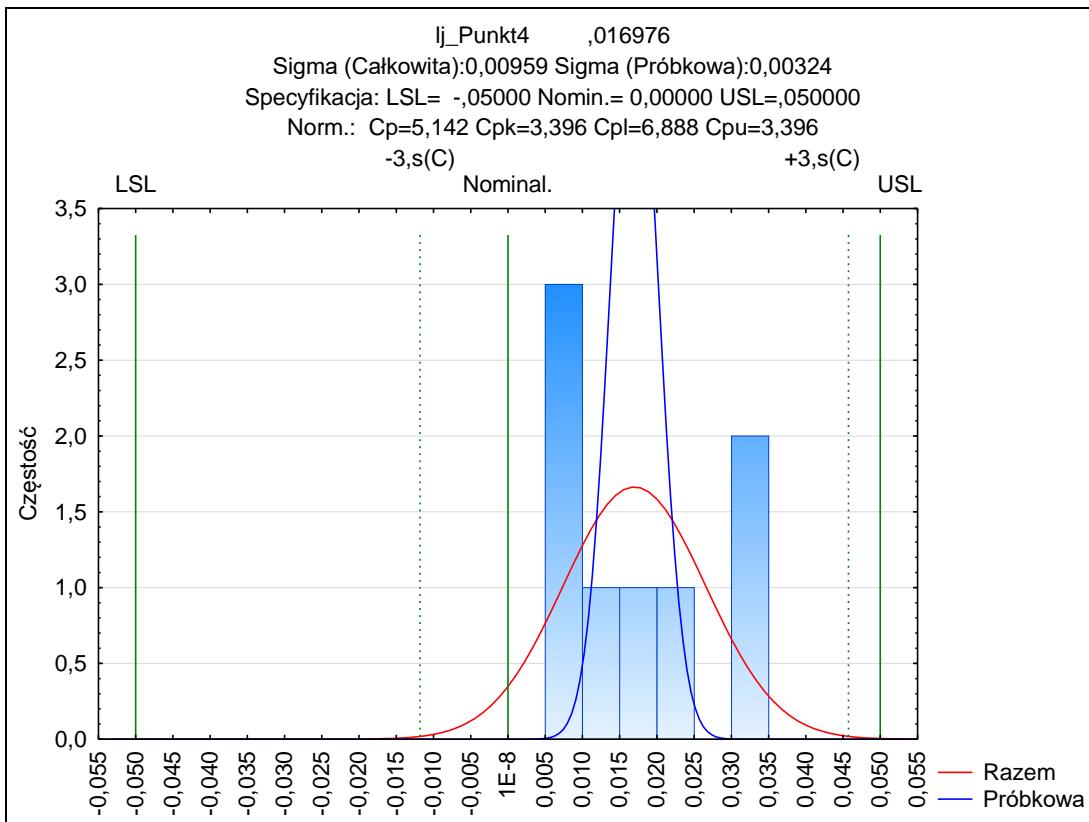
Rys. 3.100. Zdolności procesu dla punktu 1 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



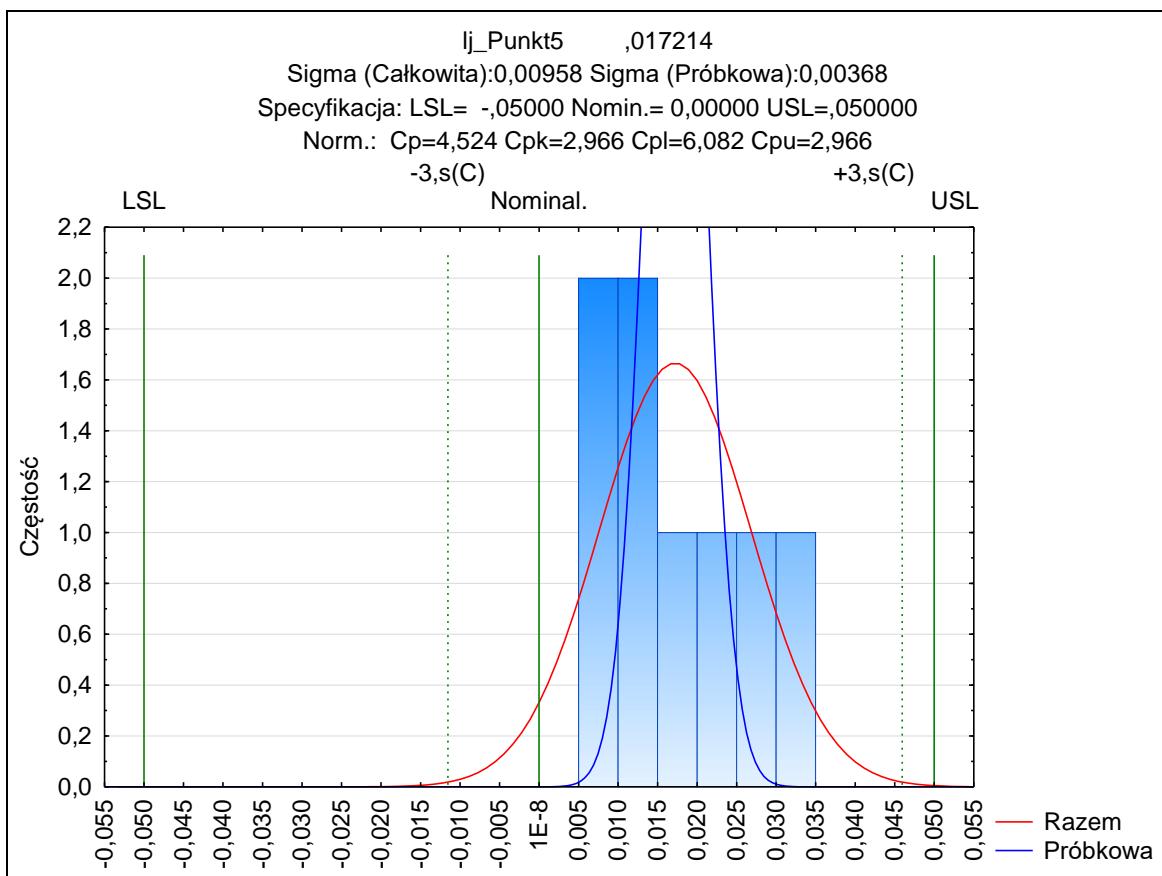
Rys. 3.101. Zdolności procesu dla punktu 2 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



Rys. 3.102. Zdolności procesu dla punktu 3 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



Rys. 3.103. Zdolności procesu dla punktu 4 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm



Rys. 3.104. Zdolności procesu dla punktu 5 robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m dla sześciangu o boku 440 mm

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartość wskaźnika procesu C_p jest większa od jeden, co oznacza dużą zdolność procesu, czyli występowanie punktów poza granicą specyfikacji jest praktycznie niemożliwe.

4. Szybka metoda pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

4.1. Istota szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Szybka metoda pomiaru polega na zmniejszeniu liczby cykli pomiarowych z 30 do 8, co w efekcie skutkuje skróceniem czasu jego trwania. Pełny pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania przeprowadzony zgodnie z normą ISO 9283 zawiera 150 odczytów położeń zadanych (30 razy po 5 punktów pomiarowych umieszczonych w wierzchołkach i środku sześciangu o jak największej objętości). W każdym punkcie pomiarowym następuje zatrzymanie robota na 3 s, aby odczyt obywał się po jego ustabilizowaniu (czas ten dobrano doświadczalnie i jest wartością minimalną, przy której możliwe jest prawidłowe dokonanie pomiaru), czyli zgodnie z wytycznymi normy. Zapis programu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.1.

```

/PROG JOB1000
/ATTR
OWNER      = MNEDITOR;
COMMENT     = "pomiary_MW";
PROG_SIZE   = 1252;
CREATE      = DATE 13-02-16 TIME 16:51:08;
MODIFIED    = DATE 15-07-06 TIME 12:27:30;
FILE_NAME   = MW30PD;
VERSION     = 0;
LINE_COUNT  = 29;
MEMORY_SIZE = 1612;
PROTECT     = READ_WRITE;
TCD: STACK_SIZE = 0,
      TASK_PRIORITY = 50,
      TIME_SLICE   = 0,
      BUSY_LAMP_OFF = 0,
      ABORT_REQUEST = 0,
      PAUSE_REQUEST = 0;
DEFAULT_GROUP= 1,*,*,*,*,*;
CONTROL_CODE = 00000000 00000000;
/APPL
/MN
1: UTOOL_NUM=7;
2: UFRAME_NUM=0;          wywołanie układu narzędzi i użytkownika
3:J P[6] 2% FINE ;
4: WAIT 3.00(sec);
5:L P[5] 50mm/sec FINE ;
6: WAIT 3.00(sec);
7:L P[8] 50mm/sec FINE ;
8: WAIT 3.00(sec);
9:L P[10] 250mm/sec FINE ;
10: WAIT 3.00(sec);
11: ;
12: R[1]=0 ;
13: LBL[1];
14: ;
15:J P[7] 100% FINE ;
16: WAIT 3.00(sec);
17:J P[1] 100% FINE ;
18: WAIT 3.00(sec);
19:J P[2] 100% FINE ;
20: WAIT 3.00(sec);
21:J P[3] 100% FINE ;
22: WAIT 3.00(sec);
23:J P[4] 100% FINE ;
24: WAIT 3.00(sec);
25: ;
26: R[1]=R[1]+1 ;
27: IF R[1]<=29,JMP LBL[1];
28: WAIT 15.00(sec);
29:L P[9] 100mm/sec FINE ;          dane programu

```

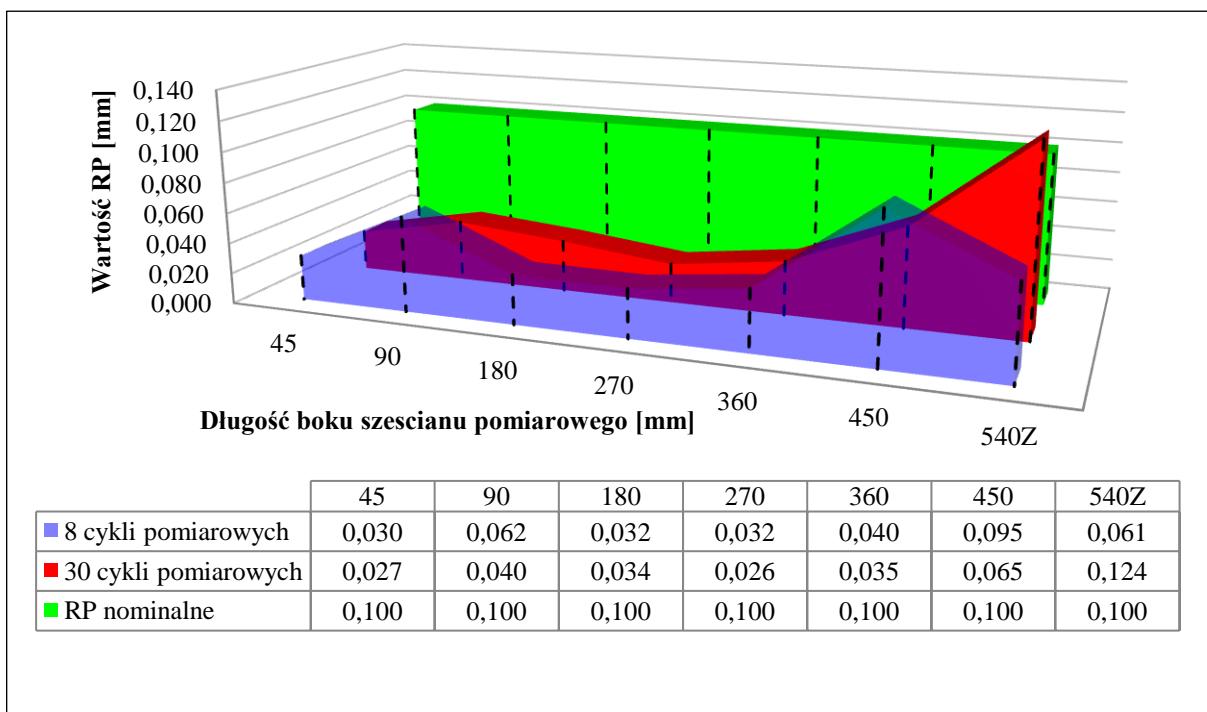
Rys. 4.1. Zapis programu pomiarowego dla robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L

Łączny czas pomiaru dla robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – sześcielanu pomiarowego o długości boku 900 mm wynosi ok. 10,3 min. Uwzględniając wcześniejszą analizę otrzymanych wyników (zmienność wartości powtarzalności pozycjonowania) stwierdzono, że możliwe jest zmniejszenie liczby cykli pomiarowych do ośmiu. Pozwoli to na skrócenie czasu pomiarów do ok. 3 min., co w warunkach przemysłowych umożliwia zaplanowanie kontroli pracy robota w przerwach zmianowych lub na przebadanie/przetestowanie większej liczby robotów oraz istotnych punktów realizowanego procesu technologicznego podczas procesu produkcyjnego.

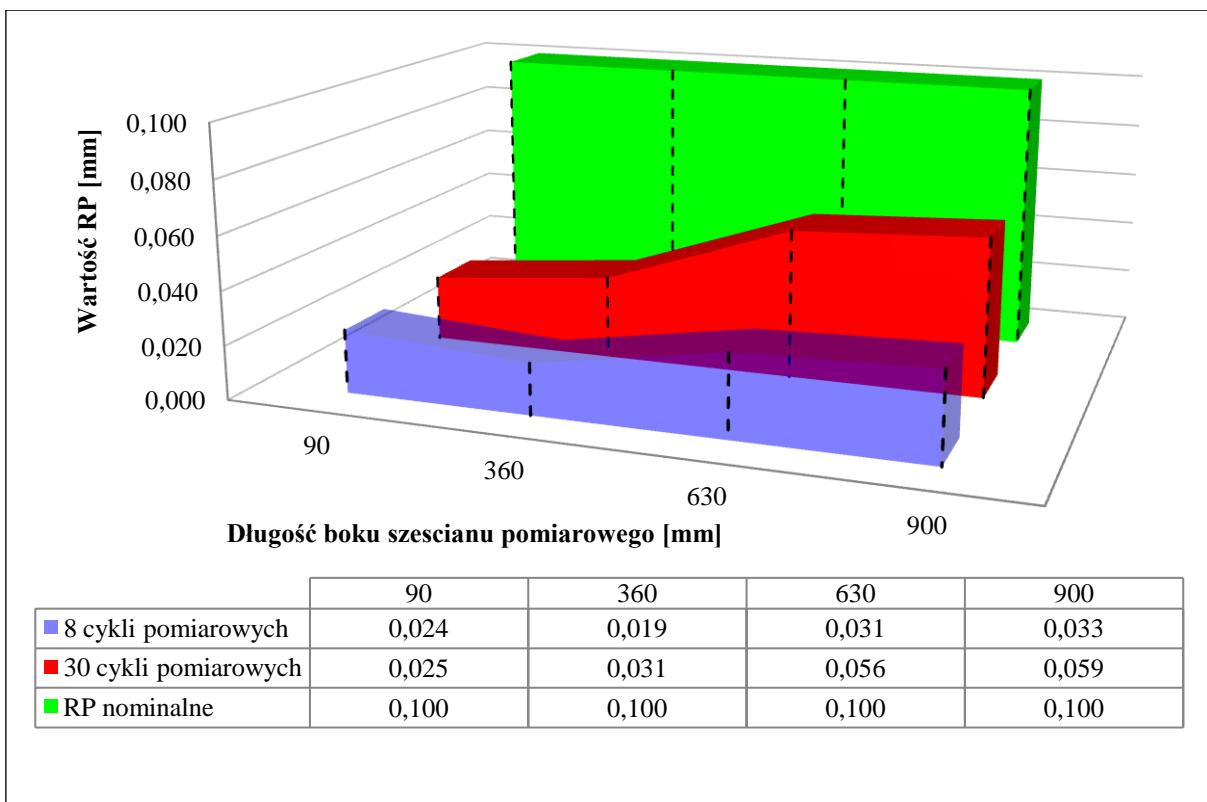
W opracowanej metodzie założono, że zmiany wartości powtarzalności względem pełnego cyklu pomiarowego nie będą się zmieniać o więcej niż 30% wartości nominalnej powtarzalności pozycjonowania (podawanej przez producenta robotów) względem wartości powtarzalności pozycjonowania uzyskanych w pełnym cyklu pomiarowym. Dla badanych robotów przemysłowych wartości te wynoszą:

- Fanuc M-16iB/10L: 0,03 mm (RP nom. 0,10 mm),
- Panasonic TA 1400: 0,03 mm (RP nom. 0,10 mm),
- Kuka KR 16: 0,015 mm (RP nom. 0,05 mm).

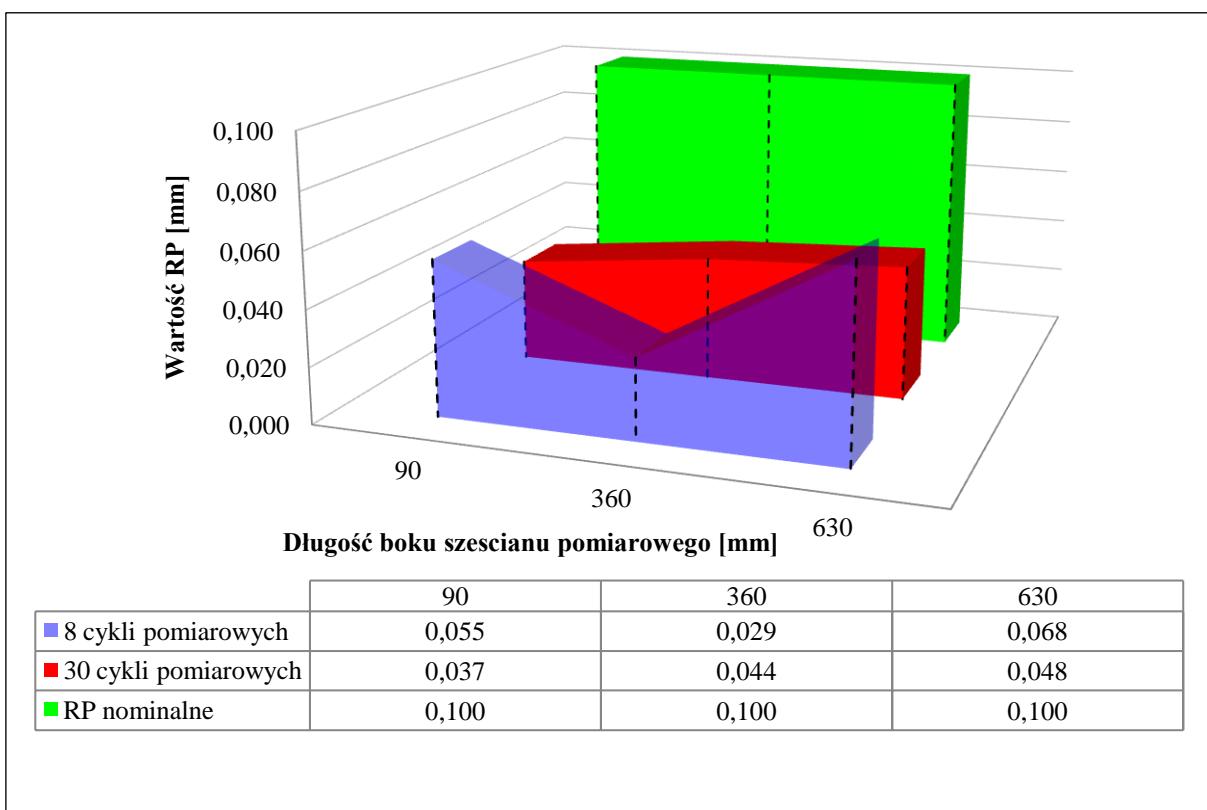
Przedstawione na rys. 4.2–4.9 przykładowe wyniki badań wypracowanej metody dotyczą maksymalnych wartości powtarzalności pozycjonowania wymienionych wyżej robotów przemysłowych.



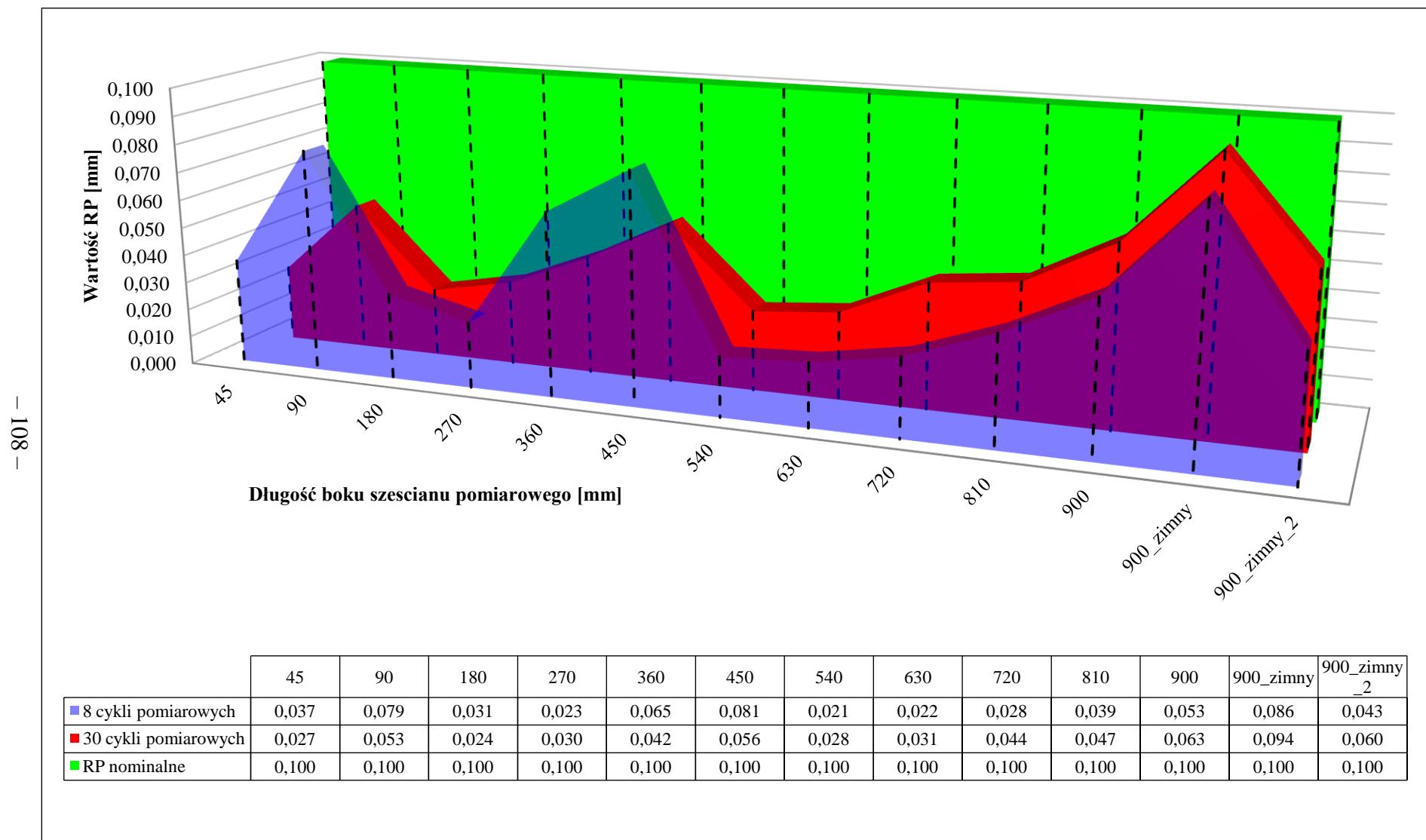
Rys. 4.2. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m bez rotacji układu narzędzi



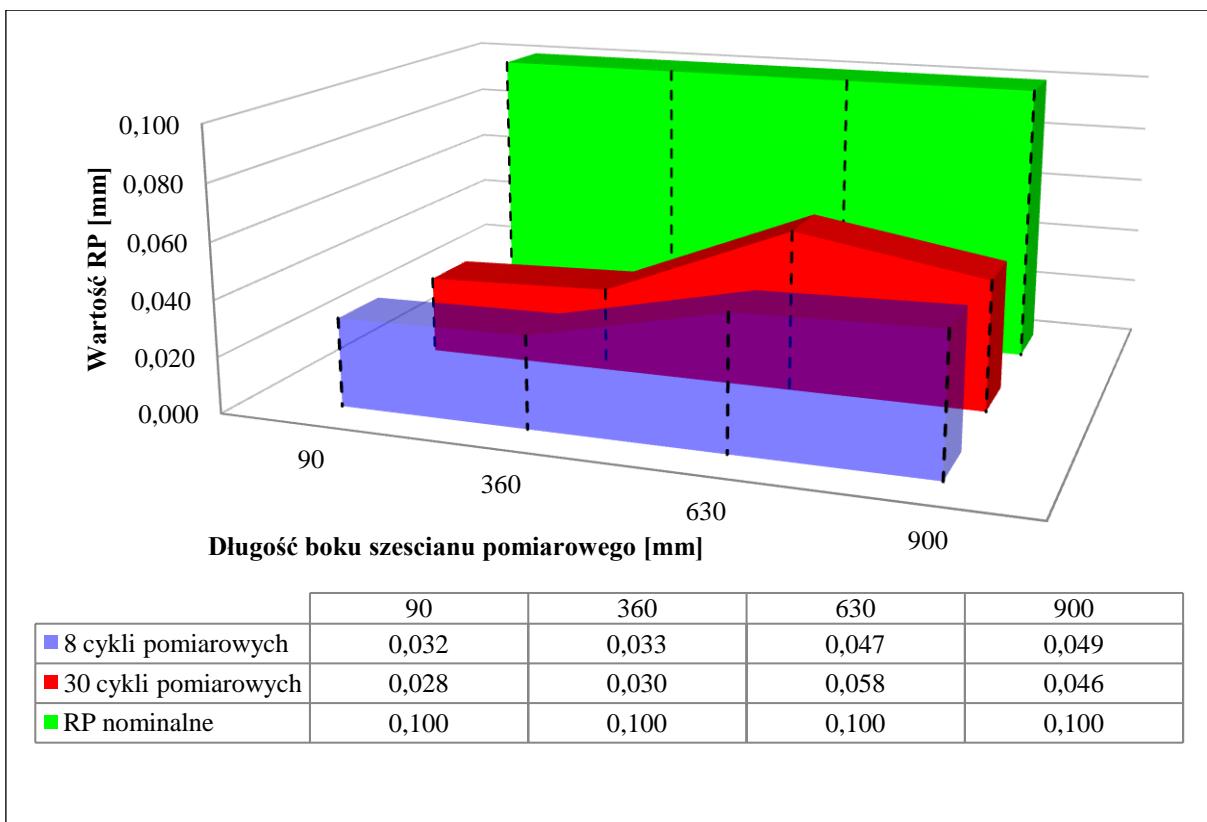
Rys. 4.3. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z



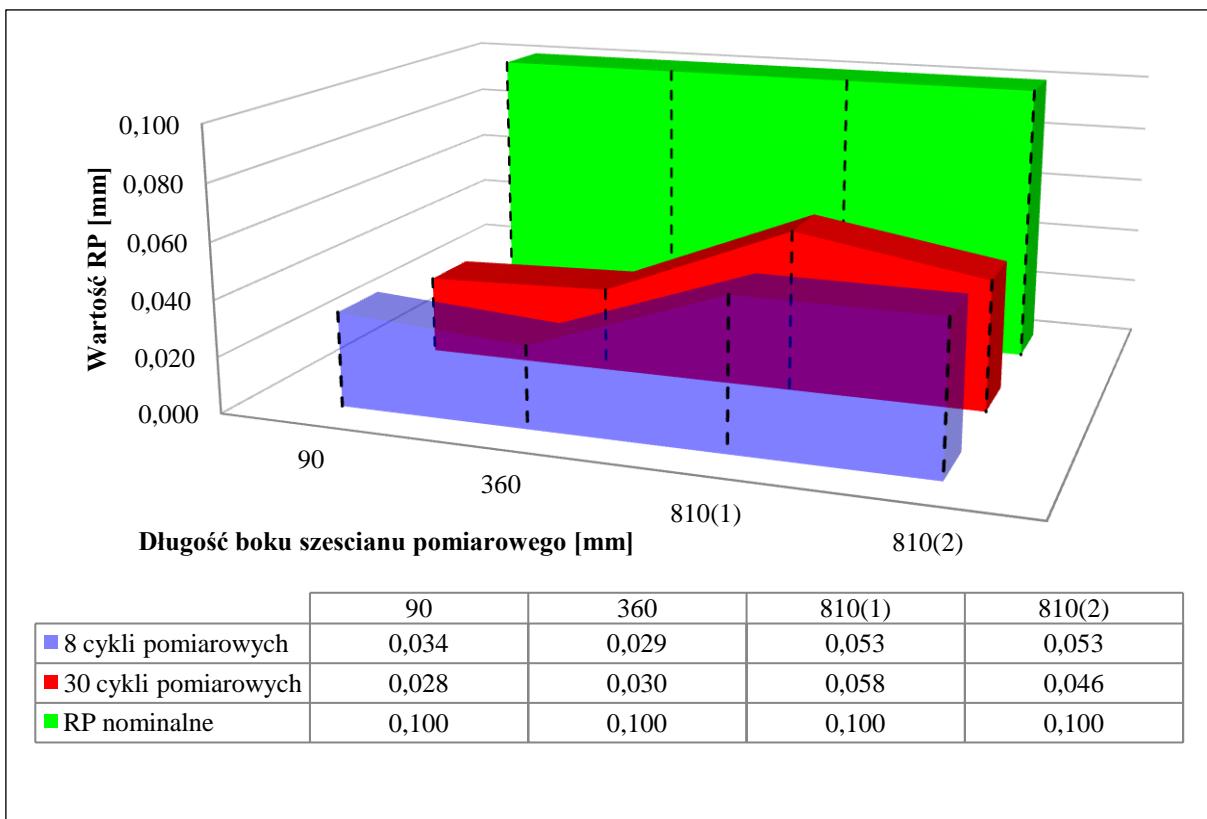
Rys. 4.4. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 1,0 m z rotacją układu narzędzia względem osi Z i X



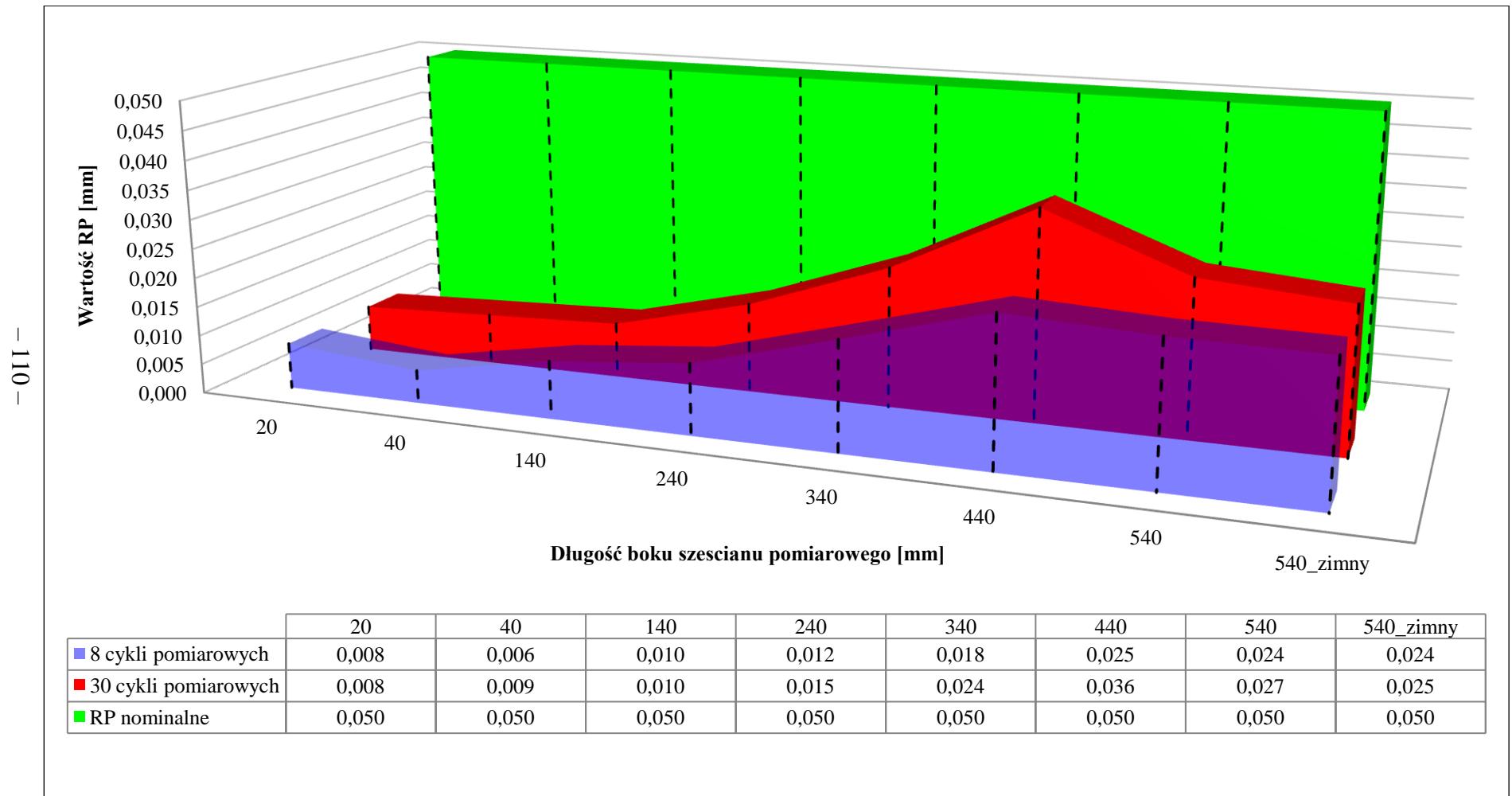
Rys. 4.5. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m bez rotacji układu narzędziwa



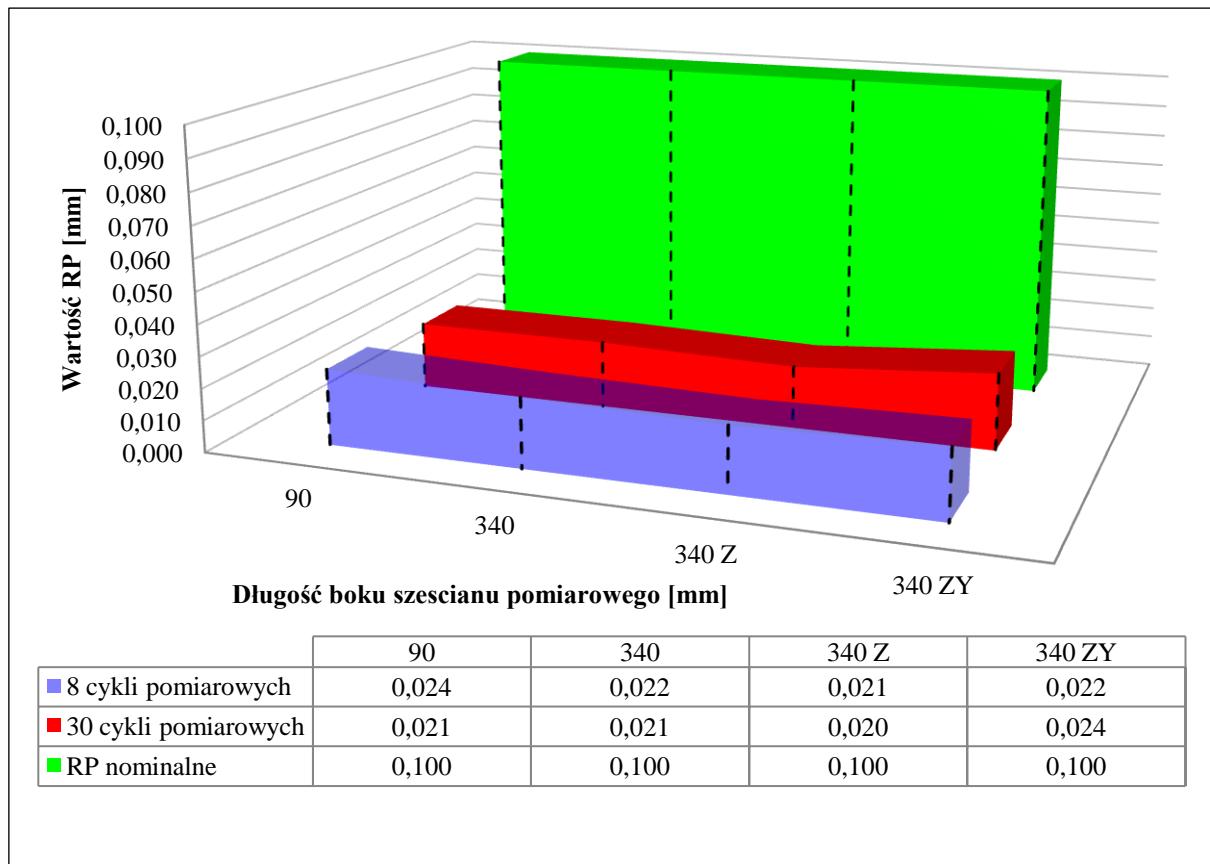
Rys. 4.6. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędziwa względem osi Z



Rys. 4.7. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L w odległości 2,24 m z rotacją układu narzędziwa względem osi Z i X



Rys. 4.8. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16 w odległości 1,5 m bez rotacji układu narzędzi



Rys. 4.9. Maksymalne wartości powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Panasonic TA 1400 w odległości 1,91 m bez rotacji/z rotacją układu narzędziwa

Z przeprowadzonych badań wynika, że przyjęte przez autora założenie jest słuszne, bowiem w większości dokonanych pomiarów punktów różnice pomiędzy 8 a 30 cyklami wynoszą od jednego do kilku mikrometrów.

Tylko w pojedynczych przypadkach nastąpiło przekroczenie wartości powtarzalności pozycjonowania (dla cyklu pełnego). Wynikało to m.in. z dokonania niewłaściwego odczytu pomiaru, przez co otrzymano błędную wartość powtarzalności pozycjonowania. Przekroczenie dopuszczalnej wartości (lub zbliżenie się do wartości maksymalnych) miało miejsce w przypadku pomiaru robota nieustabilizowanego cieplnie. Ze względu na wytyczne zawarte w normie ISO 9283 nie powinno być uwzględniane, jednak zostało przeprowadzone i przedstawione na wykresach w celu pełniejszej prezentacji uzyskanych wyników badań.

4.2. Adaptacja szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych do warunków przemysłowych

Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie autorskiej metody w warunkach przemysłowych należy rozpatrywać w dwóch wariantach: **1) pełnego dostępu do badanego robota, 2) ograniczonego dostępu.**

W pierwszym przypadku (rys. 4.10) możliwe będzie: 1) zdjęcie głowicy technologicznej i zamocowanie obciążenia nominalnego wraz z sondą pomiarową, 2) określenie prawidłowego, zgodnego z normą [58] sześciyanu pomiarowego, 3) ustalenie wspólnego układu współrzędnych w celu określenia położenia zadanych punktów pomiarowych oraz 4) ustawienie urządzenia pomiarowego w osi sześciyanu. Dzięki temu precyzyjne określenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego będzie spełniało wytyczne zawarte w normie [58].



Rys. 4.10. Przykładowe stanowisko z zastosowaniem wariantu 1 badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych [97]

Warunki przemysłowe w większości przypadków eliminują jednak możliwości pełnego dostępu do badanego robota przemysłowego, a jego demontaż ze stanowiska pracy w celu wykonania pomiaru wyklucza podstawowe założenie, czyli przeprowadzenie badania w warunkach przemysłowych podczas rzeczywistego cyklu pracy (rzeczywistych położen punktów). Ponadto przestrzeń, w której on pracuje jest często ograniczona przez konstrukcję stanowiska, urządzenia współpracujące i elementy, nad którymi wykonywane są operacje procesu technologicznego. Niemożliwy jest zatem demontaż głowicy technologicznej w celu zamontowania obciążenia nominalnego [91].



Rys. 4.11. Przykładowe stanowisko z zastosowaniem wariantu 2 badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych [98]

W takim przypadku (wariant nr 2, rys. 4.11) przewiduje się zamocowanie adaptera mocującego sondę pomiarową do głowicy technologicznej w sposób gwarantujący odbicie wiązki lasera we wszystkich punktach pomiarowych. Urządzenie pomiarowe należy ustawić poza stanowiskiem pracy robota w jednakowych odległościach od punktów pomiarowych. Warunkiem koniecznym ich wykonania jest określenie wspólnego układu współrzędnych, względem którego będą zdefiniowane punkty pomiarowe. Wiąże się to z koniecznością opracowania dodatkowego programu (w celu określenia/przekonwertowania współrzędnych punktów pomiarowych) lub wcześniejszego zaplanowania położenia wspólnego układu współrzędnych robota przemysłowego (względem którego określane są punkty pomiarowe – zadane) i urządzenia pomiarowego (rejestrowane jest rzeczywiste położenie punktów pomiarowych). Spełniając powyższe warunki można przeprowadzić pomiar dokładności stosując program pomiarowy (utworzony w programie CamMeasure 10) oraz arkusz kalkulacyjny (do wykonania obliczeń), modyfikując jedynie liczbę punktów pomiarowych [91].

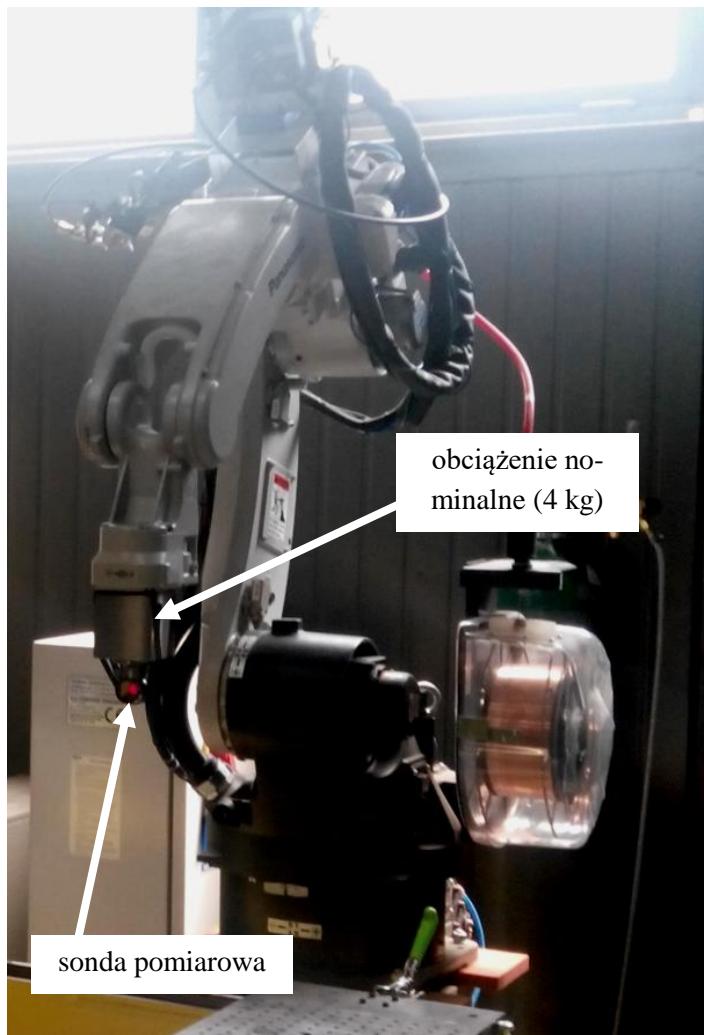
Zalecenia zawarte w normie [58] wymagają, by pomiar wykonywany był na jednej z płaszczyzn sześciangu pomiarowego, a punkty znajdowały się na jego przekątnych. W warunkach przemysłowych niemożliwe jest zastosowanie tych wytycznych, możliwe staje się natomiast zachowanie zgodnej z normą procedury obliczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego. Pozwoli ona na pomiar podczas procesu technologicznego, dzięki czemu po wykonaniu obliczeń można skorygować położenie głowicy technologicznej i nadzorować prawidłowość pracy robota przemysłowego.

4.3. Weryfikacja szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych

Weryfikację opracowanej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych przeprowadzono w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu na stanowisku spawalniczym wyposażonym w robota spawalniczego TB 1400 firmy Panasonic, którego wartość powtarzalności pozycjonowania podana w dokumentacji technicznej przez producenta wynosi 0,1 mm.

Ze względu na budowę stanowiska możliwe było przeprowadzenie badań powtarzalności pozycjonowania w dwóch wariantach tj. pełnego i ograniczonego dostępu do badanego robota.

W pierwszym przypadku zdemontowano głowicę technologiczną i zamocowano obciążenie nominalne (4 kg) wraz z sondą pomiarową (rys. 4.12), następnie określono sześciyan pomiarowy zgodny z normą [58]: dla takiego obciążenia nominalnego i pionowego położenia sondy pomiarowej długość boku sześciianu pomiarowego wynosiła 530 mm. Ustalono wspólny układ współrzędnych w celu określenia położenia zadanych punktów pomiarowych oraz ustwiono urządzenie pomiarowe w osi sześciianu (rys. 4.13).

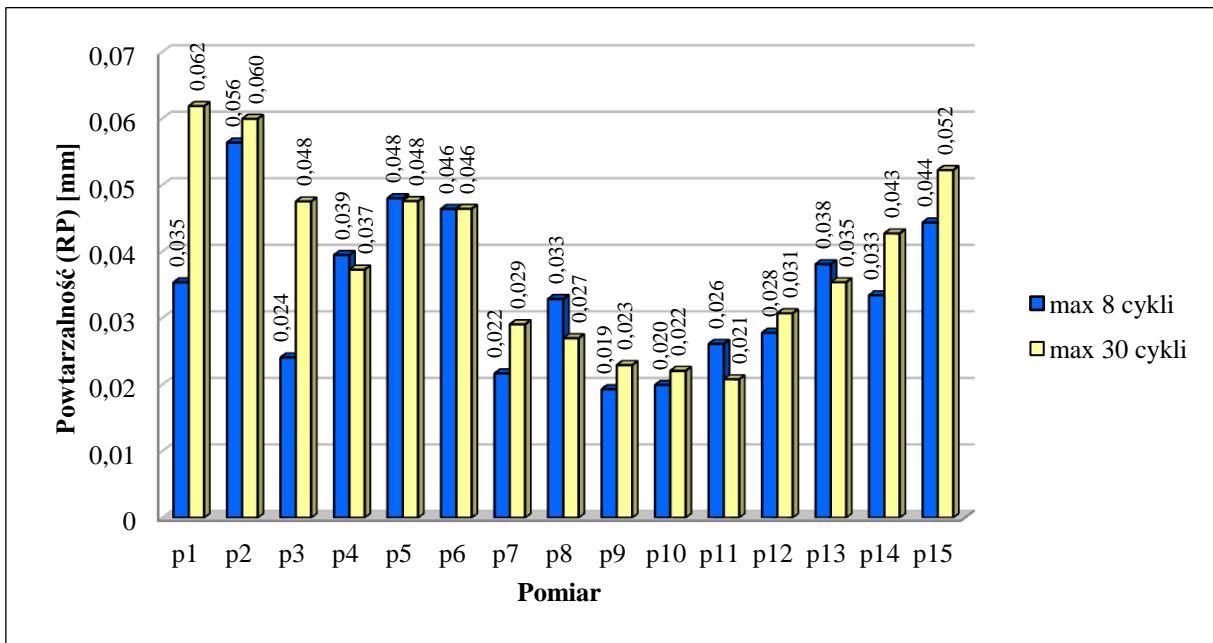


Rys. 4.12. Obciążenie nominalne (4 kg) oraz sonda pomiarowa zamocowana na robocie spawalniczym TB 1400 [59]



Rys. 4.13. Położenie sześciadan i urządzenia pomiarowego [59]

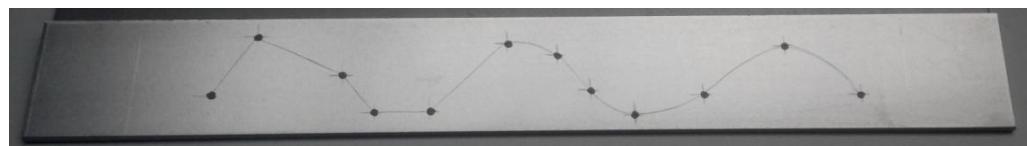
Następnie przeprowadzono pomiary powtarzalności pozycjonowania robota spawalniczego. Wykonano obliczenia dla 8 i 30 cykli pomiarowych. Pomiary powtórzone 15 razy, a wyniki wartości maksymalnych przedstawiono na rys. 4.14.



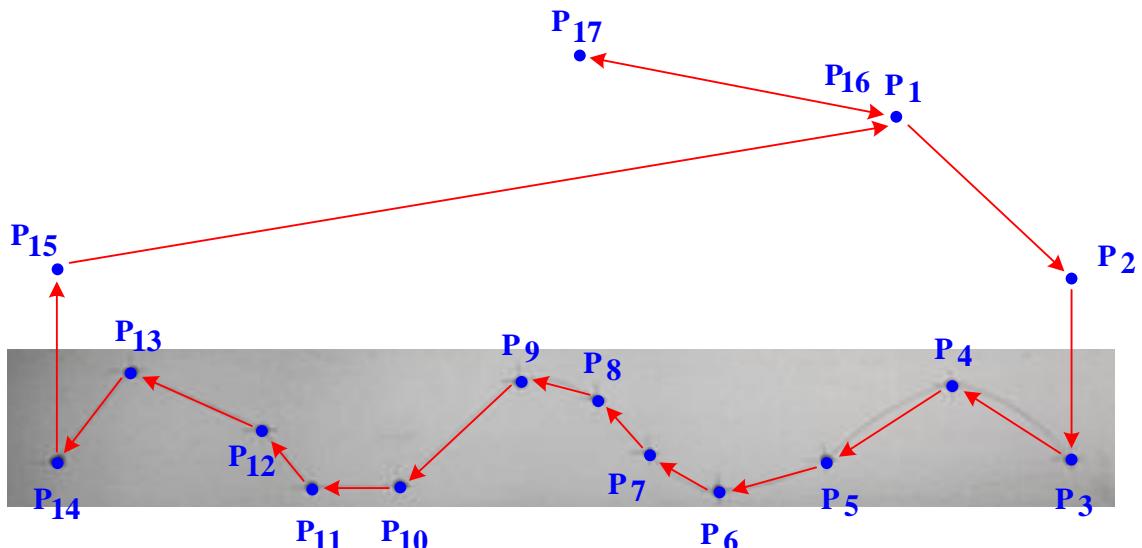
Rys. 4.14. Wartości powtarzalności pozycjonowania dla 8 i 30 cykli pomiarowych robota spawalniczego Panasonic TB 1400 [59]

W przypadku wariantu pierwszego pozytywnie zweryfikowano autorską metodę pomiaru powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.

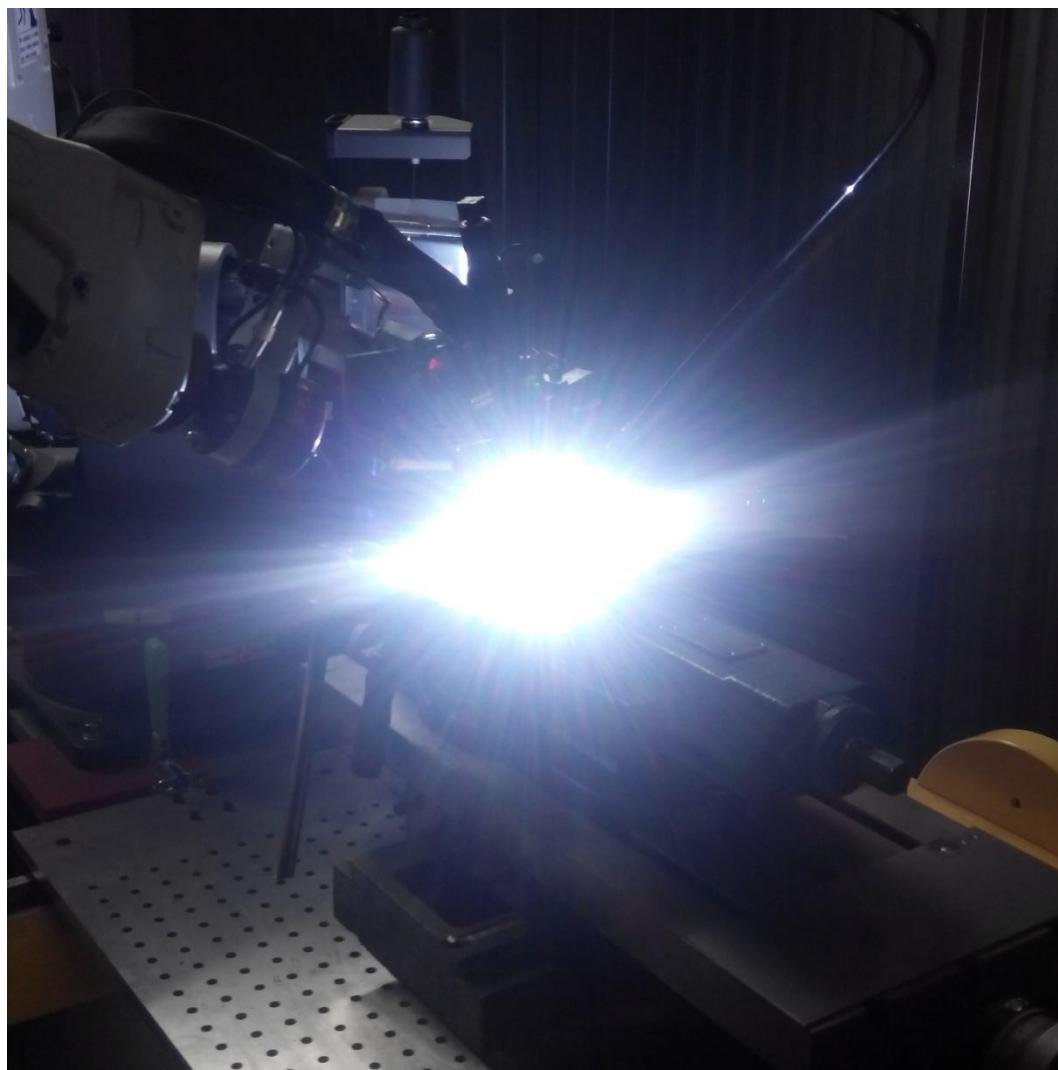
W drugim wariantie dokonano weryfikacji opracowanej metody podczas trwającego procesu technologicznego. Pomiary powtarzalności pozycjonowania odbywały się dla 17 punktów podczas wykonywania operacji napawania metodą TIG. Na podstawie dokumentacji 2D na płaskowniku naniesiono 12 punktów napawania (P_3 – P_{14}) i na ich podstawie zaprogramowano pozycje robota. Pozostałe 5 punktów to pozycje: P_1 – startowa, P_2 – pośrednia ustalająca, P_{15} – odjazdowa, P_{16} – pośrednia, P_{17} – odjazdowa. Przykładowy płaskownik wzorcowy, ścieżkę narzędziową, trwającą oraz ukończoną operację napawania przedstawiono na rys. 4.15–4.18.



Rys. 4.15. Płaskownik wzorcowy [59]



Rys. 4.16. Ścieżka głowicy spawalniczej [59]

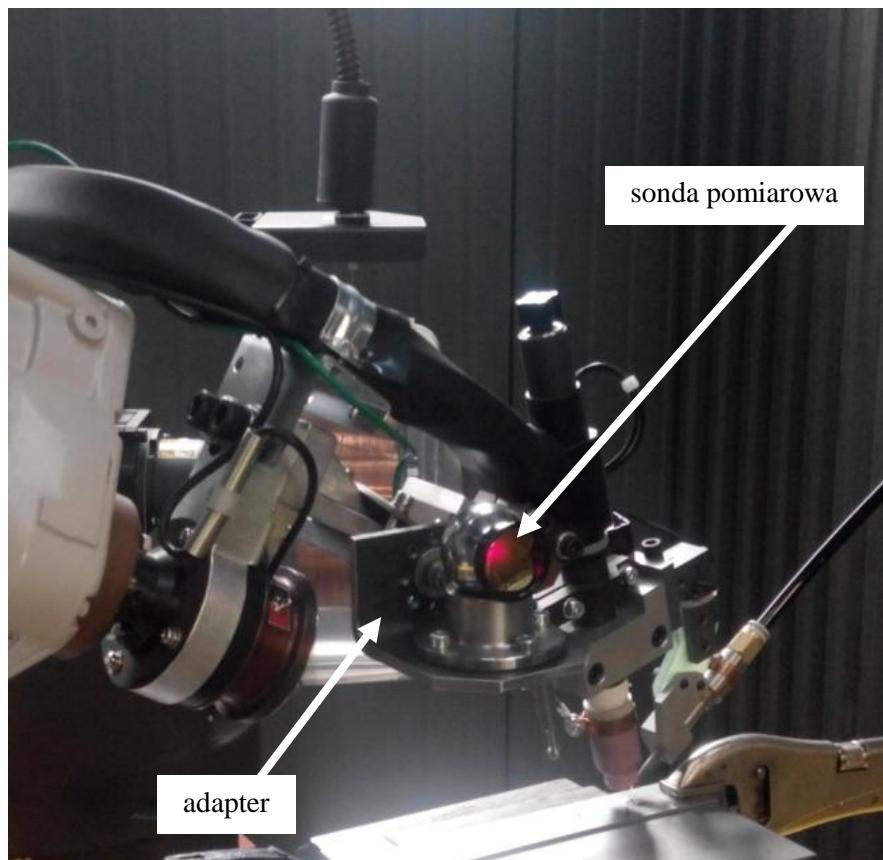


Rys. 4.17. Plaskownik podczas wykonywania operacji napawania [59]



Rys. 4.18. Plaskownik po wykonaniu operacji napawania [59]

Sondę pomiarową zamocowano do głowicy technologicznej za pomocą adaptera w sposób gwarantujący odbicie wiązki lasera we wszystkich punktach pomiarowych (rys. 4.19).

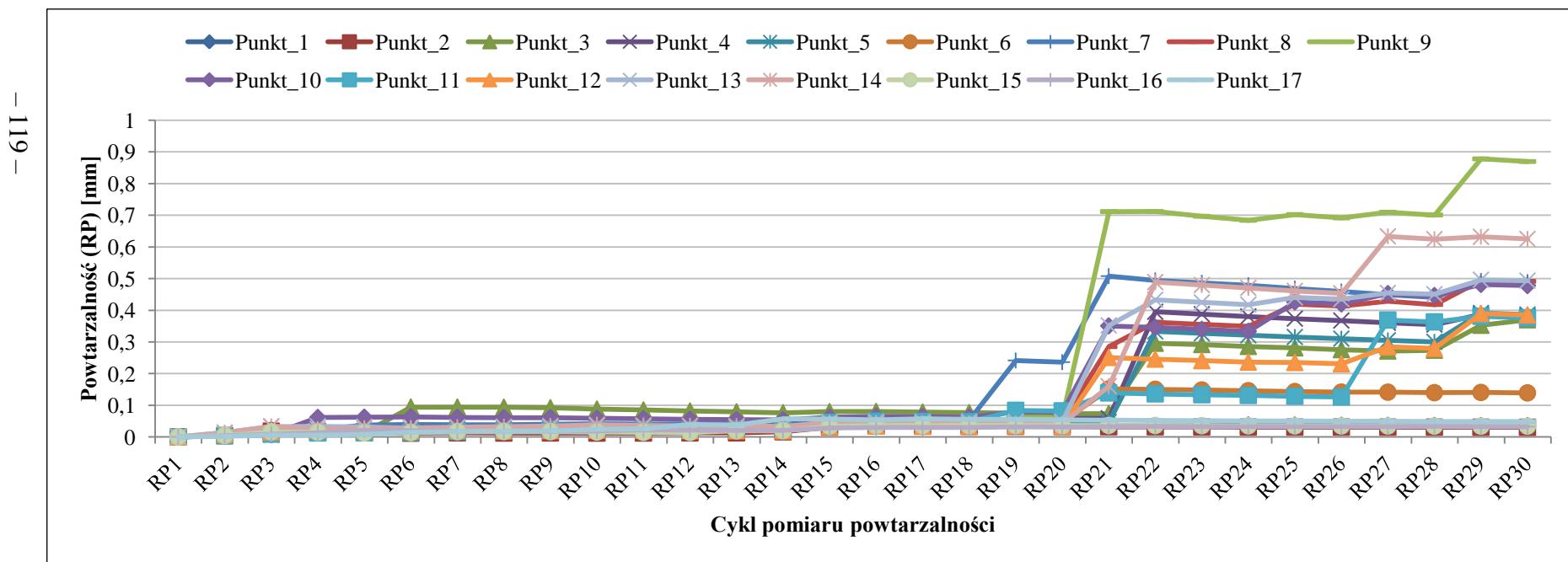


Rys. 4.19. Sonda pomiarowa zamontowana do głowicy spawalniczej [59]

Następnie przeprowadzono pomiary powtarzalności pozycjonowania. Wykonano obliczenia dla 8 i 30 cykli pomiarowych, a wartości powtarzalności przedstawiono w tab. 4.1 i na rys. 4.20. Na podstawie otrzymanych wyników parametru RP zauważać można, że dla punktów P_1 , P_2 , P_{15} , P_{16} i P_{17} (punkty jałowe – bez napawania) wartości powtarzalności dla 8 i 30 cykli pomiarowych są do siebie zbliżone, a różnice nie przekraczają 30% wartości powtarzalności określonej przez producenta robota (0,1 mm), mieściąc się tym samym w dopuszczalnym zakresie. Dla pozostałych punktów w okolicach 20. cyklu pomiarowego nastąpiło znaczące przekroczenie dopuszczalnej wartości powtarzalności pozycjonowania (miejscami dziewięciokrotnie). Zauważona tendencja wzrostu zmienności wartości powtarzalności pozycjonowania może wynikać ze zmieniającej się długości drutu spawalniczego wysuwanego podczas operacji napawania (360 razy) powodującej styk z płaskownikiem i w konsekwencji przemieszczenia głowicy. Aby ostatecznie potwierdzić możliwość zastosowania autorskiej metody pomiaru w warunkach przemysłowych przeprowadzono pomiary wszystkich punktów przy wyłączonym źródle prądu (spawarce). Uzyskane wyniki przedstawione w tab. 4.2 i na rys. 4.21 potwierdziły możliwość stosowania autorskiej metody do pomiaru powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych.

Tabela 4.1. Wartości powtarzalności pozycjonowania robota spawalniczego TB 1400 podczas operacji napawania dla 8 i 30 cykli pomiarowych

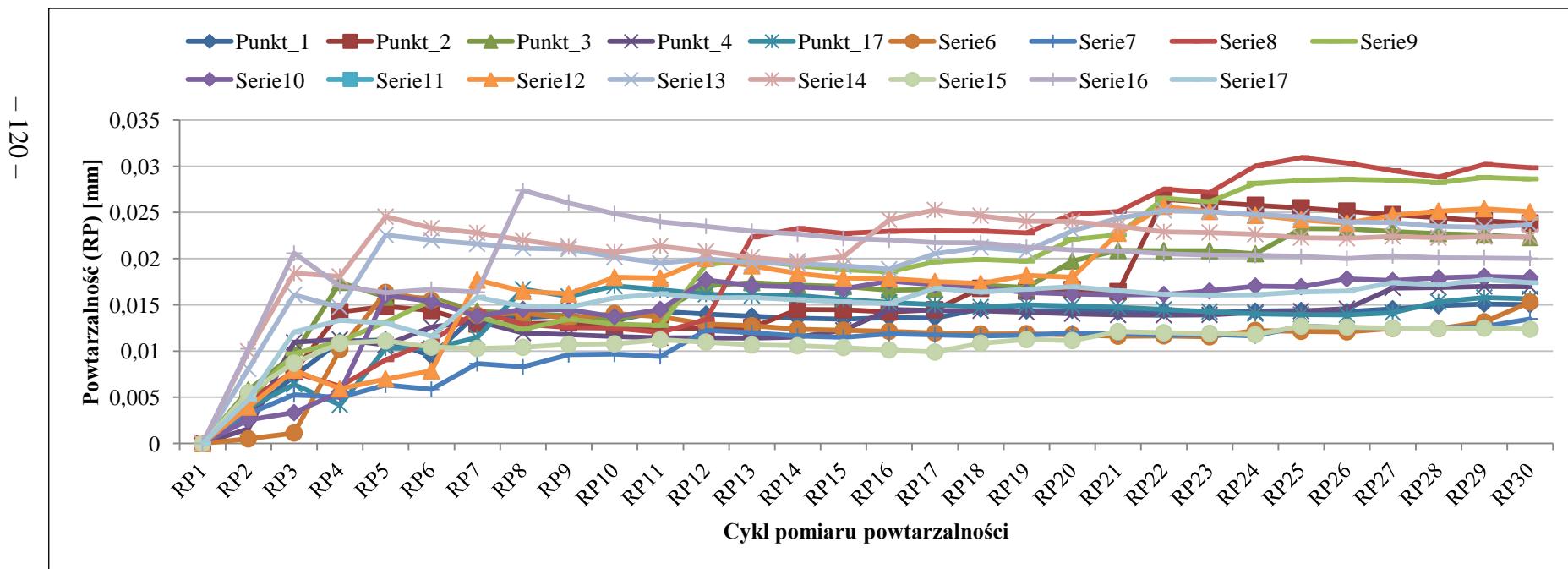
P ₁ (8)	P ₂ (8)	P ₃ (8)	P ₄ (8)	P ₅ (8)	P ₆ (8)	P ₇ (8)	P ₈ (8)	P ₉ (8)	P ₁₀ (8)	P ₁₁ (8)	P ₁₂ (8)	P ₁₃ (8)	P ₁₄ (8)	P ₁₅ (8)	P ₁₆ (8)	P ₁₇ (8)
0,022	0,012	0,094	0,030	0,024	0,022	0,039	0,023	0,019	0,061	0,019	0,020	0,030	0,032	0,017	0,018	0,018
P ₁ (30)	P ₂ (30)	P ₃ (30)	P ₄ (30)	P ₅ (30)	P ₆ (30)	P ₇ (30)	P ₈ (30)	P ₉ (30)	P ₁₀ (30)	P ₁₁ (30)	P ₁₂ (30)	P ₁₃ (30)	P ₁₄ (30)	P ₁₅ (30)	P ₁₆ (30)	P ₁₇ (30)
0,036	0,031	0,370	0,382	0,386	0,139	0,489	0,491	0,869	0,478	0,376	0,385	0,493	0,625	0,034	0,033	0,049
RP (Iso-8) – RP (Iso-30)																
-0,014	-0,018	-0,276	-0,351	-0,363	-0,117	-0,450	-0,469	-0,850	-0,417	-0,357	-0,365	-0,463	-0,593	-0,017	-0,015	-0,030



Rys. 4.20. Zmienności wartości powtarzalności pozycjonowania robota spawalniczego TB 1400 podczas operacji napawania

Tabela 4.2. Wartości powtarzalności pozycjonowania robota spawalniczego TB 1400 dla operacji napawania przy wyłączonej spawarce – 8 i 30 cykli pomiarowych

P ₁ (8)	P ₂ (8)	P ₃ (8)	P ₄ (8)	P ₅ (8)	P ₆ (8)	P ₇ (8)	P ₈ (8)	P ₉ (8)	P ₁₀ (8)	P ₁₁ (8)	P ₁₂ (8)	P ₁₃ (8)	P ₁₄ (8)	P ₁₅ (8)	P ₁₆ (8)	P ₁₇ (8)
0,014	0,013	0,014	0,012	0,017	0,014	0,008	0,013	0,012	0,015	0,013	0,016	0,021	0,022	0,010	0,027	0,015
P ₁ (30)	P ₂ (30)	P ₃ (30)	P ₄ (30)	P ₅ (30)	P ₆ (30)	P ₇ (30)	P ₈ (30)	P ₉ (30)	P ₁₀ (30)	P ₁₁ (30)	P ₁₂ (30)	P ₁₃ (30)	P ₁₄ (30)	P ₁₅ (30)	P ₁₆ (30)	P ₁₇ (30)
0,015	0,024	0,022	0,017	0,016	0,015	0,013	0,030	0,029	0,018	0,021	0,025	0,024	0,022	0,012	0,020	0,017
RP (Iso-8) – RP (Iso-30)																
-0,001	-0,011	-0,008	-0,005	0,001	-0,001	-0,005	-0,017	-0,016	-0,003	-0,008	-0,009	-0,003	0,000	-0,002	0,007	-0,003

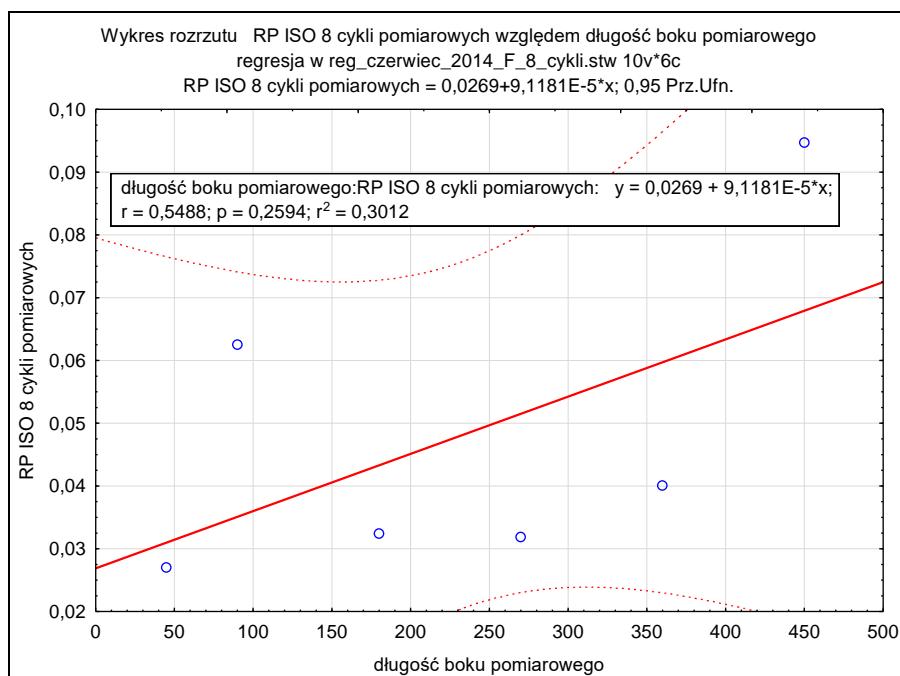


Rys. 4.21. Zmienności wartości powtarzalności robota spawalniczego TB 1400 pozycjonowania dla operacji napawania przy wyłączonej spawarce

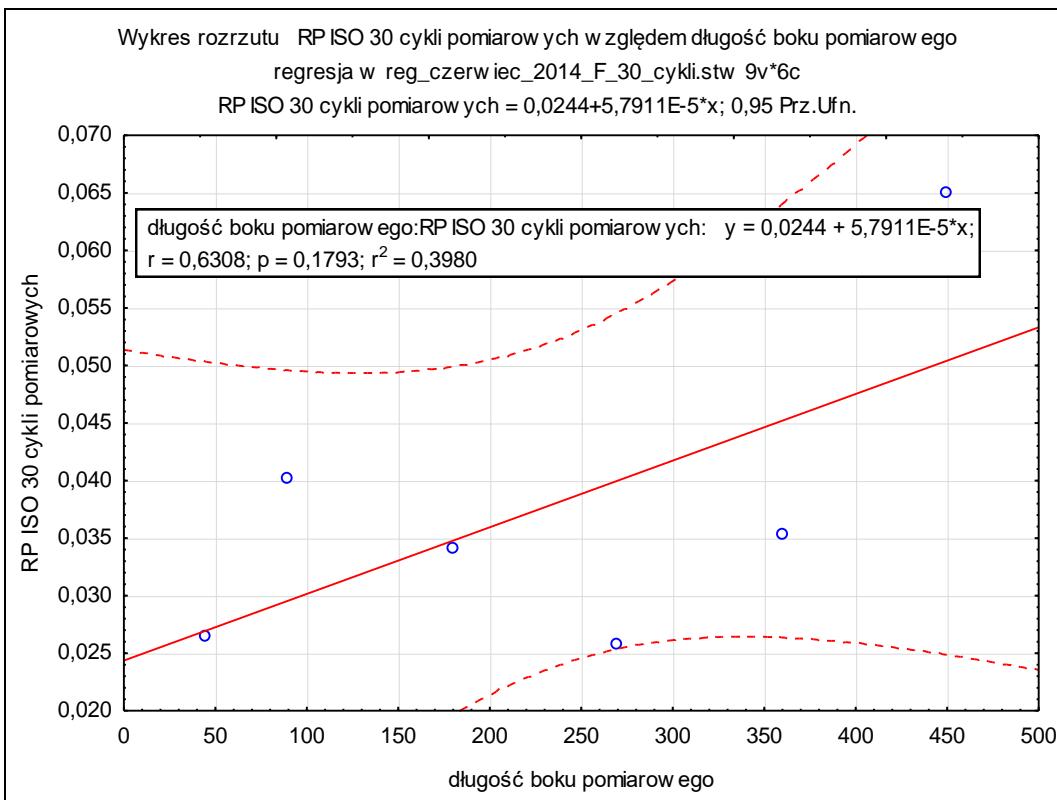
4.4. Zastosowanie metody prognozowania do określania powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych

Wraz ze zmieniającą się charakterystyką pracy robota przemysłowego (zmniejszająca/zwiększająca przestrzeń pracy) pojawia się problem: jak określić wartość powtarzalności pozycjonowania w nowej, wynikającej m.in. ze zmiany procesu technologicznego, przestrzeni roboczej? Jak, mając wcześniejsze wyniki pomiaru, określić wartość powtarzalności pozycjonowania dla nowej przestrzeni pracy? Do rozwiązywania tego problemu zaproponowano zastosowanie metody prognozowania, a jako narzędzie – model regresji. Pozwoli to oszacować wartość liczbową zmiennej zależnej y (powtarzalności pozycjonowania) na podstawie wartości zmiennych niezależnych x (długości boku sześcianu pomiarowego). Zastosowanie metody prognozowania dotyczyć będzie badania robota przemysłowego Fanuc M-16iB na podstawie opracowanej autorskiej (szybkiej) metody pomiaru, uwzględniającej wytyczne zawarte w normie ISO 9283 (rozdz. 3.3 i 4.2, wariant 1.).

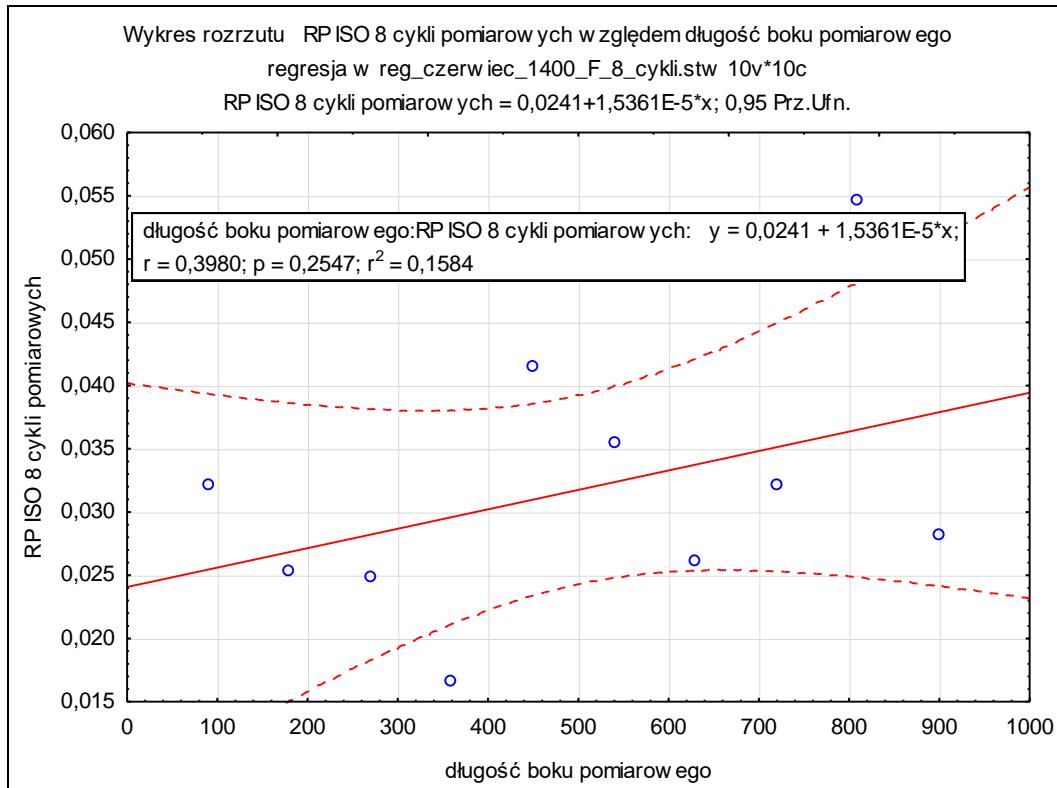
Na podstawie wyników pomiaru utworzono w programie STATISTICA 10 wykresy zawierające linie regresji będące graficznym odpowiednikiem modelu regresji. Wyliczono wartości funkcji regresji oraz współczynnik R^2 pozwalający określić, w jakim stopniu model wyjaśnia kształtowanie się zmiennej (powtarzalności). Następnie dla trzech różnych odległości urządzenia pomiarowego od punktu P_5 dokonano analizy zależności pomiędzy długością boku sześcianu pomiarowego (wielkością przestrzeni pracy) a wartością powtarzalności pozycjonowania. Analiza ta dotyczyła pomiarów wykonanych zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie (30 cykli pomiarowych), wypracowanej autorskiej metody. Wykres tej zależności przedstawiono na rys. 4.22–4.27, a zestawienie wzorów funkcji i współczynników R^2 w tab. 4.3.



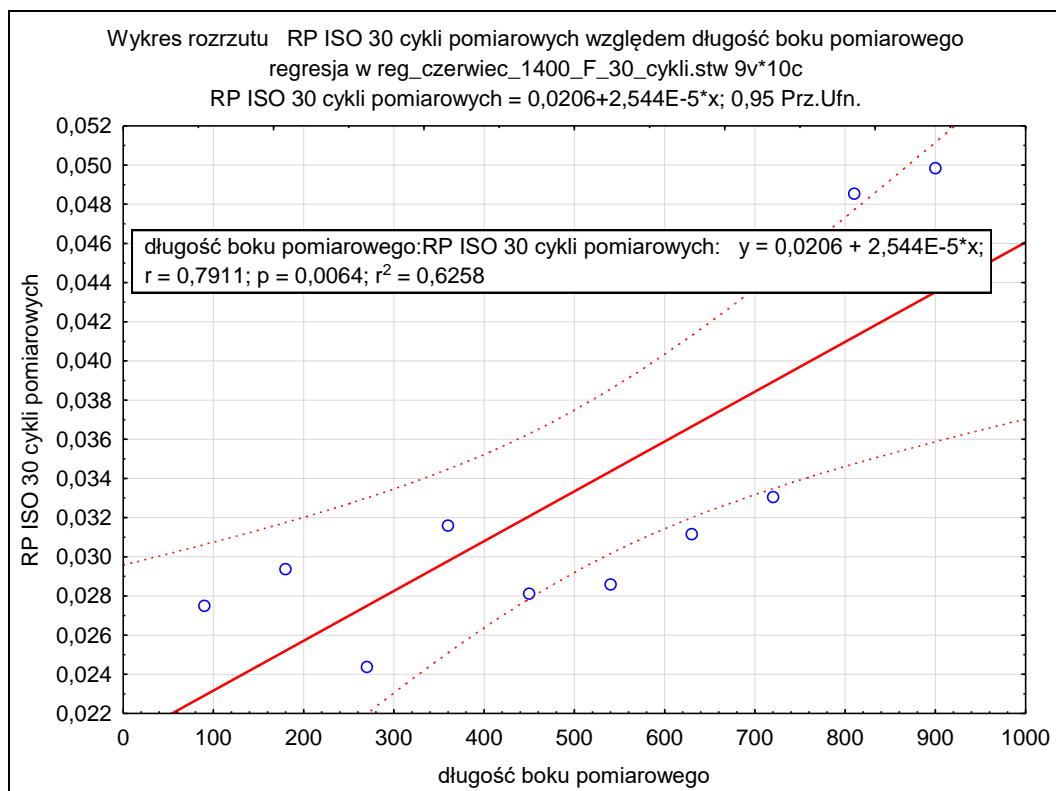
Rys. 4.22. Zależności pomiędzy długością boku sześcianu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P_5 – 8 cykli pomiarowych



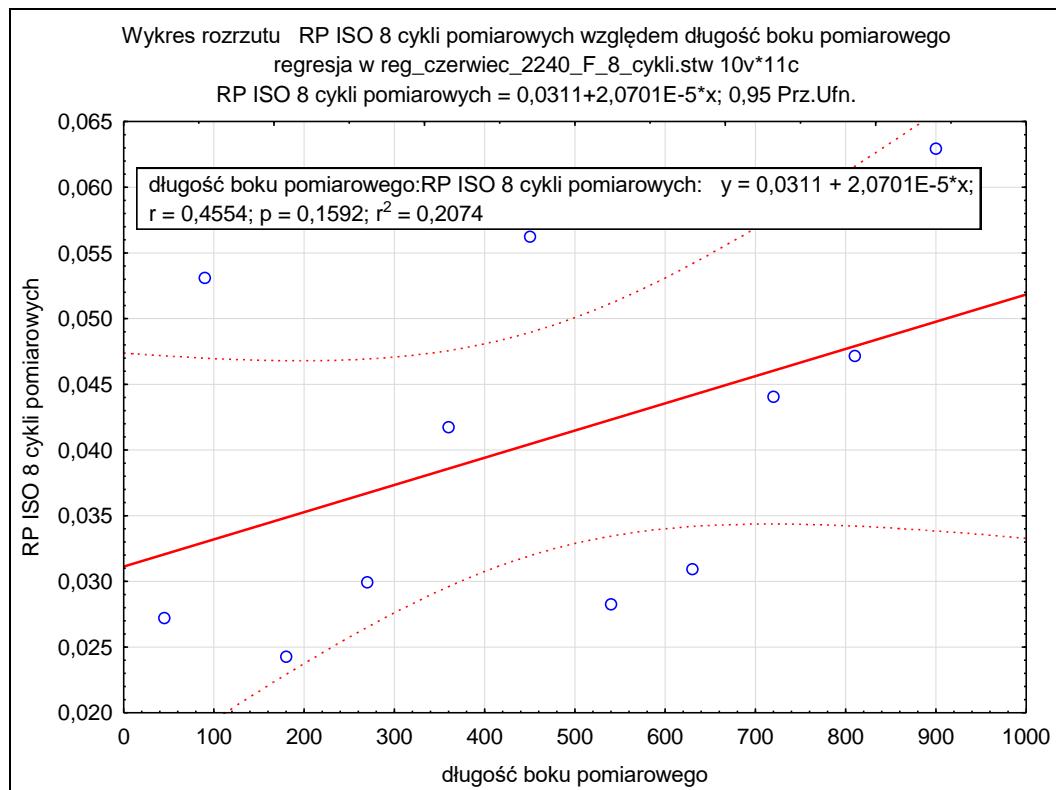
Rys. 4.23. Zależności pomiędzy dłużością boku sześciadanu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P₅ – 30 cykli pomiarowych



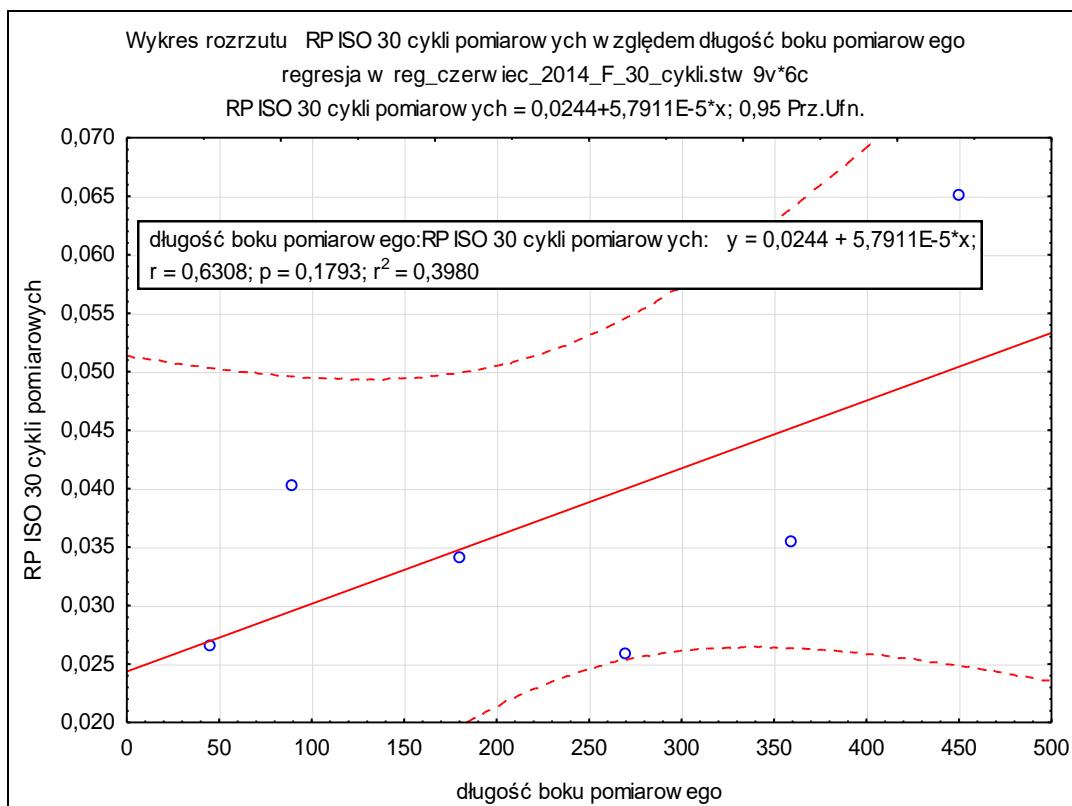
Rys. 4.24. Zależności pomiędzy dłużością boku sześciadanu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P₅ – 8 cykli pomiarowych



Rys. 4.25. Zależności pomiędzy długością boku sześcianu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P₅ – 30 cykli pomiarowych



Rys. 4.26. Zależności pomiędzy długością boku sześcianu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P₅ – 8 cykli pomiarowych



Rys. 4.27. Zależności pomiędzy długością boku sześciadanu pomiarowego a wartością powtarzalności pozycjonowania (RP) robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L – położenie urządzenia pomiarowego w odległości 2,24 m od punktu P₅ – 30 cykli pomiarowych

Tabela 4.3. Zestawienie wzorów funkcji liniowej i współczynnika R²

odległość/liczba cykli pomiarowych	wzór funkcji	współczynnik R ²
1 m / 8	$y = 0,0269 + 9,1181E-5x$	0,3012
1 m / 30	$y = 0,0244 + 5,7911E-5x$	0,3980
1,4 m / 8	$y = 0,0241 + 1,5361E-5x$	0,1584
1,4 m / 30	$y = 0,0206 + 2,544E-5x$	0,6258
2,24 m / 8	$y = 0,0311 + 2,0701E-5x$	0,2074
2,24 m / 30	$y = 0,0244 + 5,7911E-5x$	0,3980

Wszystkie powyższe wykresy przedstawiają niekorzystne dopasowanie linii regresji (linia ciągła) do rzeczywistych danych, a zaznaczone na wykresach przedziały ufności o wartości 95% (oznaczone linią przerywaną) są dość szerokie. Wyniki analizy wskazują, że model regresji uwzględniający zmienną niezależną *długość boku sześciadanu pomiarowego [mm]* pozwala wyjaśnić maksymalnie 62,5% wariancji zmiennej *powtarzalności pozycjonowania [mm]* dla 30 cykli pomiarowych. Dla 8 cykli pomiarowych wartości te są jeszcze mniejsze, stąd wniosek, że zmienne nie mają zależności liniowej i należy zastosować inne narzędzia statystyczne do określania ich zależności.

Prognozowanie wartości powtarzalności pozycjonowania robota Fanuc M-16iB/10L za pomocą modelu regresji liniowej nie jest zatem możliwe. Chcąc jednak stosować omówioną metodę do innych robotów przemysłowych, należałoby każdorazowo przeprowadzić serię badań wstępnych, a następnie, na podstawie przebadanej większej liczby robotów przemysłowych, stwierdzić możliwość stosowania metod prognozowania do określania wartości powtarzalności pozycjonowania dla różnych przestrzeni ich pracy.

5. Podsumowanie i wnioski

Robotyzacja produkcji we współczesnym świecie staje się już normą, bowiem zastosowanie robotów przemysłowych między innymi zwiększa wydajność pracy i dokładność wykonywania określonych operacji lub wyrobów. Dokładność ta jest nierozerwalnie związana z powtarzalnością pozycjonowania robota przemysłowego. W literaturze krajowej i zagranicznej podane są metody i urządzenia do badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych, jednak w większości przypadków opisy te ograniczają się do ogólnych informacji obejmujących podanie rodzaju urządzenia i jego możliwości zastosowania, bez określenia dokładnej procedury pomiaru.

Według autora dalsze prace powinny zatem dotyczyć opracowania szczegółowych opisów przeprowadzania badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania z możliwościami skrócenia czasu pomiarów włącznie. W tym obszarze badań i poszukiwań mieści się problematyka niniejszej pracy.

Wykazano, że zapewnienie wartości powtarzalności pozycjonowania w określonych przedziałach ma istotny wpływ na jakość procesu, zatem jej okresowa kontrola powinna być normą, a nie reakcją na pojawiający się wadliwy proces lub wyrób – w myśl zasady, że lepiej zapobiegać niż leczyć. Odpowiednio zaplanowany proces kontroli, a w konsekwencji jego wyniki, pozwolą przewidzieć moment przekroczenia dopuszczalnych wartości powtarzalności pozycjonowania i uniknąć zatrzymania procesu technologicznego. Wydaje się, że wyniki niniejszej pracy potwierdziły, iż możliwe jest zastosowanie autorskiej – zmodyfikowanej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania w warunkach przemysłowych. Na podstawie przedstawionych w rozprawie rozważań teoretycznych oraz analizy przykładów zaczerpniętych z praktyki przemysłowej można stwierdzić, że:

- możliwe jest skrócenie czasu pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych ,
- wykonanie ww. pomiarów wymaga ustalenia wspólnych układów współrzędnych robota i urządzenia pomiarowego,
- w parametrach robota przemysłowego powinno podawać się największą wyliczoną wartość powtarzalności dla punktów P₁–P₅,
- powtarzalność pozycjonowania robotów przemysłowych wynikająca z obliczeń przeprowadzonych na podstawie normy ISO 9283 [58] nie odzwierciedla powtarzalności podawanej przez ich producentów,
- zastosowanie wytycznych pomiaru zawartych w normie ISO 9283 [58] w warunkach przemysłowych wymaga modyfikacji.

Opracowane podstawy teoretyczne i wykonane badania w warunkach przemysłowych pozwalają udowodnić wysuniętą na podstawie analizy literatury i badań wstępnych tezę pracy, czyli stwierdzić, że: 1) możliwe jest opracowanie szybkiej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów w warunkach przemysłowych uwzględniającej nie tylko wytyczne zawarte w normie ISO 9283 [58], ale także pozwalającej na zmniejszenie liczby cykli pomiarowych oraz 2) zastosowanie narzędzia regresji liniowej jako metody prognozowania nie będzie pozwalało na określenie wartości powtarzalności pozycjonowania dla innych przestrzeni pracy robota przemysłowego.

Materiał analityczno-badawczy zebrany w pracy pozwolił ponadto sformułować wnioski poznawcze i utylitarne oraz wytyczyć kierunki dalszych prac.

Wnioski poznawcze:

1. Opracowane podstawy teoretyczne oraz przeprowadzone badania potwierdziły, że opracowana autorska metoda pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych pozwala skrócić czas ich pomiarów o ok. 73%.
2. Uzyskane wyniki badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych dla 8 cykli pomiarowych nie różnią się od wyników dla 30 cykli pomiarowych (zgodnych z wymaganiami zawartymi w normie [58]) o więcej niż 30% wartości nominalnej powtarzalności pozycjonowania.
3. Wykonanie pomiaru dokładności pozycjonowania wymaga ustalenia wspólnych układów współrzędnych robota przemysłowego i urządzenia pomiarowego.
4. Nominalna wartość powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych podawaną przez ich producentów jest zawyżana.
5. Opracowana przez autora metoda pomiaru uzyskała wskaźnik procesu C_p znacznie większy niż jeden, co oznacza dużą zdolność procesu.
6. Zastosowanie urządzenia pomiarowego Laser Tracker pozwala na bardzo dokładny jednoczesny pomiar trzech współrzędnych punktu pomiarowego.
7. Zastosowanie narzędzia regresji liniowej jako metody prognozowania nie pozwala na wyznaczenie powtarzalności pozycjonowania dla innych przestrzeni pracy robota przemysłowego.

Wnioski utylitarne:

1. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że pomiar dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych może odbywać się w dwóch wariantach, tj. pełnego i ograniczonego dostępu do robota.
2. Opracowany arkusz kalkulacyjny pozwala na szybkie obliczenie wartości dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych ze wskazaniem wartości maksymalnych.
3. Zastosowanie w praktyce przemysłowej opracowanej metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych pozwoli skrócić czas pomiaru oraz zastosować ją nie tylko do pomiaru robotów przemysłowych.

Kierunki dalszych prac

Przedstawiona w pracy problematyka nie wyczerpuje, co oczywiste, podjętej tematyki. Dalsze badania w zakresie dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych powinny dotyczyć przede wszystkim:

- zastosowania innych urządzeń pomiarowych,
- użycia innych narzędzi w metodzie prognozowania, które pozwoląby na określenie powtarzalności pozycjonowania dla różnych przestrzeni pracy,
- opracowania kompleksowego programu komputerowego wspomagającego pomiary dokładności i powtarzalności pozycjonowania oraz współpracującego z programami obsługującymi urządzenia,
- analizy dokładności i powtarzalności pozycjonowania dla różnych sposobów osiągania zadanej pozycji i przy różnych jego konfiguracjach,
- opracowania metody i procedury eliminacji charakterystycznych wzrostów (pik) wartości powtarzalności pozycjonowania powstających m. in. z powodu kumulacji błędów kształtu,
- zastosowania autorskiej metody do pomiaru nie tylko dla robotów przemysłowych.

6. Bibliografia

- [1] **PN-ISO 8373.** Roboty przemysłowe – Terminologia.
- [2] **Behrens A., Beyer L.** Kalibrierung von Parallelrobotern zur Erhöhung der Absolutgenauigkeit bei offline programmierten Applikationen. Forschungsantrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 2001.
- [3] **Johnson K. G., Hanify D. W.** The Current Status and Impact of Industrial Robot Technology in the United States. Proc. 1st C.I.R.T. 1973, strony 13–44.
- [4] <http://automatykab2b.pl/gospodarka/4130-rynek-robotyki-przemyslowej-podsumowanie-2010-i-prognozy-na-przyszlosc#.Vdw4GfbtknI>. [Online] 25.08.2015.
- [5] <http://automatykaonline.pl/roboty-przemyslowe-rynek-robotow-w-polsce-i-na-swiecie>. [Online] 9.12.2013.
- [6] **Jezierski E.** Dynamika robotów. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2006.
- [7] Podręczniki i instrukcje programowania robota Fanuc M16iB.
- [8] **Zdanowicz R.** Podstawy robotyki. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [9] **Morecki A., Knapczyk J.** Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.
- [10] **Honczarenko, J.** Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2004.
- [11] **Kasiński A., Dembski W.** Eksperyment w zakresie aktywnego rozpoznawania otoczenia robota z użyciem czujników taktylnych. Wrocław: Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Nr 94, 1993.
- [12] **Zurek J.** Robotyzacja procesów technologicznych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
- [13] **Maus R., Allsup R.** Robotics: A Manager's Guide,. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [14] **PN-93/M-55251.** Maszyny sterowane numerycznie- Osie współrzędnych, zwrot rachunków – Nazwy i oznaczenia.
- [15] **Olszewski M.** Manipulatory i roboty przemysłowe. Warszawa: Wydawnistwo Naukowo-Techniczne, 1992.
- [16] Norma VDI 2861.
- [17] **Spong M. W., Vidyasagar M.** Dynamika i sterowanie robotów. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1997.
- [18] **Szkodny T.** Dynamika robotów przemysłowych. Gliwice: Wydawnostwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [19] **Bennet D. J., Hollerbach J. M.** Autonomous Calibration of Single Loop Closed Kinematic Chains Formed by Manipulators with Passive Endpoint Constrains. IEEE Trans. Robotics Automat. 1991, Tom 7, 5, strony 597–606.
- [20] **Borm J. H., Menq C. H.** Determination of Optimal Measurement Configuration for Robot Calibration Based on Observability Measure. Int. J. Robotics Res., 1991, Tom 10, 1, strony 51–63.
- [21] **Hollerbach, J. M.** A Review of Kinematic Calibration, The Robotics Review 1. KHATIB O., Lozano – Perez T., Eds. MIT Press, Cambridge, MA, 1989, pp. 207–242.

- [22] **Khalil W., Dombre E.** Modelling Identification & Control of Robots. Hermes Penton Science, London 2002.
- [23] **Roth Z. S., Mooring B. W., Ravani B.** An overiew of robot calibration. IEEE J. Robotics Automat., vol. RA – 3, no. 5, 1987, pp. 377–384.
- [24] **Shamma J. S., Whitney D. E.** A Method for Inverse Robot Calibration. ASME, J. Dyn. Syst. Maes. Contr. 1987, Tom 109, 1, strony 36–43.
- [25] **Tchoń K.** Calibration of Manipulator Kinematics. A Singularity Theory Approach. IEEE Trans. Robotics Automat. 1992, Tomy RA – 8, 5, strony 671–678.
- [26] **Veitschegger W.K., Wu C. H.** Robot Calibration and Compensation. IEEE J. Robotics Automat. 1988, Tom 4, 6, strony 643–565.
- [27] **Whitnet D. E., Łoziński C. A., Rourke J. N.** Industrial robot calibration method and results. ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr. 1986, Tom 108, 1, strony 1–8.
- [28] **Jigien C., Lih-Ming C.** Positioning error analysis for robot manipulators with all rotary joints. Robotics and Automation, IEEE Journal of. 1987, Tom 3, 6, strony 539–545.
- [29] **Renders J. M., at al.** Kinematic Calibration and Geometrical Parameter Identification for Robots. IEEE Trans. Robotics Automat., vol. RA – 7, no. 6, 1991, pp. 721–731.
- [30] **Żurek J., Wisniewski M.** Metodyka i warunki badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego FANUC M-16iB. Technologia i Automatyzacja Montażu. 2013, Tom 1, strony 31–34.
- [31] **Elatta A. Y., Li Pei, Gen Zhi Fan, Liang, Daoyuan Yu, Fei Luo.** An Overview of Robot Calibration. 2004, 3, strony 74–78.
- [32] **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, Tom 22, 3, strony 1–10.
- [33] **Grethlein, M.** Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität Berlin. 1997.
- [34] **Kreidler V.** Development and Software Methods for Parallel Kinematic Machine Accuracy. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Arbeitsgenauigkeit von Parallelkinematiken. Tagungsband des 2. Chemnitzer Parallelkinematik Seminars, Verlag Wissenschaftliche Scripten. 2000, strony 241–256.
- [35] **Schröer K.** Identifikation von Kalibrationsparametern kinematischer Ketten. Dissertation, Technische Universität Berlin. 1993.
- [36] **Wang J., Masory O.** On the accuracy of a Stewart platform. Part I: The effect of manufacturing tolerances. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,. 1993, strony 114–120.
- [37] **Dias J de Oliveira.** Beitrag zu einem anwendungsorientierten Meß- und berechnungsverfahren zur Bestimmung der Kalibrierparameter von Referenzen 163 kinematischen Ketten. Diplomarbeit, Universität Hamburg / Universität der Bundeswehr Hamburg. 1998.
- [38] **Owens J.** Robot Calibration – Questions and Answers. Robot Simulations Limited. 1998.
- [39] **Abdul Wahid Khan, Chen W.** Systematic Geometric Error Modeling for Workspace Volumetric Calibration of a 5-axis Turbine Blade Grinding Machine. Chinese Journal of Aeronautics. 2010, Tom 23, 5, strony 604–615.

- [40] **Nirosh J., Phil W.** Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2007, Tom 23, 2, strony 180–194.
- [41] **Gürsel A., Bijan S.** A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory*. 2005, Tom 40, 8, strony 879–906.
- [42] **Aoyagi S., Kohama A., Nakata Y., Hayano Y.** Improvement of robot accuracy by calibrating kinematic model using a laser tracking system-compensation of non-geometric errors using neural networks and selection of optimal measuring points using genetic algorithm-. 18–22 Oct. 2010, strony 5660–5665.
- [43] **Ken Y., Craig G. P.** Accuracy assessment of the modern industrial robot. *Industrial Robot: An International Journal*. 2000. Tom 27 , 6, strony 427–436.
- [44] **Kevin L., Conrad, Panayiotis S. Shiakolas, Yih, T. C.** Robotic Calibration Issue: Accuracy, Repeatability and Calibration Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED 2000), Rio, Patras, GREECE, 17–19 July.
- [45] **Greenway B.** On the Money: The Importance of Robot Accuracy Is Increasing as Applications Become More Sophisticated. *Robotics World*. September/October 1998.
- [46] **Heping C., Windsor CT., Fuhlbrigge T., Sang C., Jianjun W.** Practical industrial robot zero offset calibration. *utomation Science and Engineering*, 2008. CASE 2008. IEEE International Conference on. 2008, strony 516–521.
- [47] **Quinet J. F.** Calibration for Offline Programming Purpose and Its Expectations. *Industrial Robot: An International Journal*. 1995, Tom 22, 3.
- [48] **Beyer L.** Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern Insbesondere mit Parallelkinematik der Helmut-Schmidt-Universität–Universität der Bundeswehr Hamburg - zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte. 2004.
- [49] **Diewald B. W.** Über-alles-Kalibrierung von Industrierobotern zur lokalen Minimierung der Posefehler. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken. 1995.
- [50] **Kim M. S.** Entwicklung eines Parameteridentifikationsverfahrens zur Erhöhung der absoluten Positioniergenauigkeit von Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität Berlin. 1987.
- [51] **Berg J.** Ein Meß- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung und Verbesserung spezieller Kenngrößen beliebiger Industrieroboter. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg. 1990.
- [52] **Thater G.** Verfahren zur Bestimmung der Posegenauigkeit und zur Fehlerkompensation off-line programmierten Industrieroboter, Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg. 1993.
- [53] **Roos E.** Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierten Roboterapplikationen. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, VDI Verlag, Düsseldorf. 1998.
- [54] **Wollnack J.** Videometrische Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Habilitation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Shaker Verlag, Aachen. 2001.
- [55] **Wiest U.** Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern. Dissertation, Universität Karlsruhe. 2001.

- [56] **Trevelyan J. P.** Robot Calibration with a Kalman Filter. Vortrag bei International Conference on Advanced Robotics and Computer Vision (ICARCV96). 1996.
- [57] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa linii modułowej.
- [58] **ISO 9283.** Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods.
- [59] **Wisniewski M.** Opracowanie własne.
- [60] **Ahmad R. A., Azmi H., Syamimi S., Mohd Z. N., Shahrum A.** The Repeatability Analysis of Industrial Robot under Loaded Conditions and Various Distances. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2008, Tom 2, 2.
- [61] **Shirinzadeh B., Teoh PL., Tian Y., Dalvand MM., Zhong Y., Liaw HC.** Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2010, Tom 26, 1, strony 74–82.
- [62] **Stojanowski P.** Pomiary dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych. Praca inżynierska – promotor prof. dr hab inż Jan Żurek. 2012.
- [63] **Kluz, R. i Trzepieciński, T.** The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm. Assembly. 2014, Tom 34, 3, strony 285–295.
- [64] **Schiehlen W., Schramm D.** Komprimierte Bewegungsgleichungen zur Simulation der nichtlinearen Roboterdynamik. In: Steuerung und Regelung von Robotern, VDI Bericht Nr. 598, VDI Verlag. Düsseldorf: 1986.
- [65] **Gossel, O.** Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse. Dissertation, Technische Universität. Hamburg-Harburg : 1996.
- [66] **Brodbeck B., Breitinger R.** Entwurf eines Prüfprogrammes und Prüffstandes für Industrieroboter. Industrieausziger. 1976, 1, strony 165–169.
- [67] <http://www.up.poznan.pl/koipkm/metrologia/Czujniki.htm>. [Online] 19.03.2014.
- [68] <http://www.faro.com/products/metrology/faroarm-measuring-arm/overview>. [Online] 25.03.2014.
- [69] <http://www.siamanswer.com/%E0%B8%94%E0%B8%B9%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%9B/Robot-calibration-with-FaroArm/wZ8kQxbv2B0>. [Online] 6.11.2015.
- [70] **Kupiec M.** Optyczno-stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych. 2007.
- [71] **Ratajczyk E.** Współrzędnościowa technika pomiarowa. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1994.
- [72] **Ślądek J.** Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. 2001, 87.
- [73] <http://www.robot3000.com/video/show.php?itemid=69>. [Online] 6.11.2015.
- [74] Renishaw, Laser_measurement_and_ballbar_diagnosis.pdf.
- [75] FARO Laser Tracker Brochure.
- [76] **Berg O. J.** Robot Accuracy: A matter of Programming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 7 1992, strony 1993–197.
- [77] **Kuang L.** Einsatz von Theodoliten zum Vermessen von Gelenkarmrobotern. Dissertation, Universität Bremen. 1993.

- [78] **ISO 13309:1995.** Manipulating Industrial Robots – Informative Guide On Test Equipment and Metrology Methods of Operation for Robot Performance Evaluation in Accordance With is 14533:1998.
- [79] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Teodolit>. [Online] 27.03.2014.
- [80] <http://www.e-prototypy.pl/oferta/skanowanie3d>. [Online] 27.03.2014.
- [81] <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/optical-cmms-future-cmms.html>. [Online] 27.03.2014.
- [82] <http://www.robotyka.com/teoria.php/teoria.20>. [Online] 04.09.2015.
- [83] <http://www.sunduino.pl/wordpress/sharp-gp2d12-czujnik-odleglosci/>. [Online] 04.09.2015.
- [84] **Alban Th.** Dynamische Roboterkalibrierung zur Erhöhung der Bahngenaugigkeit. Dissertation, Universität Saarbrücken, Shaker Verlag. 2001.
- [85] **Taslakova D.** Positioning accuracy and repeatability of a class of technological robots. 1997, Tom 46, 1, strony 99–105.
- [86] **Brink J., Hinds B., Haney A.** Robotics repeatability and accuracy: another approach. Texas Journal of Science, 2004. Tom 56, 2, strony 149–156.
- [87] **Wang D., Bai Y.** Improving position accuracy of robot manipulators using neural networks, in Proceedings of the IEEE: Instrumentation and Measurement Technology Conference,. Ottawa: 2005. strony 1524–1526.
- [88] **Vemuri A. T., Polycarpou M. M.** A methodology for fault diagnosis in robotic systems using neural networks. Robotica, 2004. Tom 22, 4, strony 419–438.
- [89] **Zhang J. Y., Zhao C., Zhang D. W.** Pose accuracy analysis of a robot manipulator based on kinematics. Advanced Materials Research. 2011, Tom 201/203, strony 1867–1872.
- [90] **Riemmer R., Edan Y.** Evaluation of influence of target location on robot repeatability. Robotica. 2000, Tom 18, 4, strony 443–449.
- [91] **Wiśniewski M.** Propozycja metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w warunkach przemysłowych. Technologia i Automatyzacja Montażu. 2014, Tom 3, strony 39–43.
- [92] **Wiśniewsk M., Żurek J., Ciszak O.** Metodyka badań dokładności i powtarzalności odwzorowania trajektorii robota przemysłowego Fanuc M-16iB. Technologia i Automatyzacja Montażu. 2014, Tom 4, strony 20–24.
- [93] **Mayer J. R., Rene, Parker, Graham A.** A Portable Instrument for 3-D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking. IEEE Transactions on Robotics and Automation. AUGUST 1994, Tom 10, 4, strony 504–516.
- [94] **ISO 230-2.** Przepisy badania obrabiarek – wyznaczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania obrabiarek.
- [95] **Stanisz A.** Przystępny kurs statystyki w oparciu o program Statistica PL na przykładach z medycyny. Kraków: StatSoft Polska Sp. z.o.o, 1998.
- [96] Internetowy Podręcznik Statystyki. [Online] czerwiec 2015. <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.
- [97] <http://forgingmagazine.com/diesdie-materials/personnel-safe-robot-control>. [Online] 6.11.2015.
- [98] <http://www.moto.pieniadz.pl/BMW,oficjalnie,rozpoczelo,produkce,nowej,serii,3,jakosc,ponad,wszystko,1-7231-5-jpg.html>. [Online] 6 11 2015.

Załączniki

Załącznik nr 1. Sprawdzenie rozkładu normalnego parametru l_j dla 8 cykli pomiarowych

Tabela Z.1. Sprawdzenie rozkładu normalnego parametru l_j dla pomiaru robota przemysłowego Fanuc M-16iB/10L

Robot przemysłowy Fanuc M-16iB/10L					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciangu pomiarowego	rotacja ukł. wspoł. na-rzędzia	rotacja w osi Z	rotacja w osi X	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
1000	45				1	1	1	1	1
	90				0	1	1	1	1
	180				1	1	1	1	1
	270				1	1	1	1	1
	360				1	0	0	1	1
	450				0	0	0	1	1
	540Z				0	0	1	0	0
	90	•	•		1	1	0	1	1
	360	•	•		1	1	0	1	1
	630	•	•		1	1	1	1	1
	900	•	•		1	1	1	1	1
	90	•	•	•	0	1	1	1	1
	360	•	•	•	1	0	1	1	1
	630	•	•	•	0	1	1	1	1
2060	900 V10%				0	1	1	1	0
	900 V50%				1	0	1	1	1
	900 V100%				1	1	1	1	0
2240	45				1	1	1	1	1
	90				0	1	1	1	0
	180				1	1	1	1	1
	270				1	1	1	1	1
	360				0	0	0	1	1
	450				0	0	0	1	0
	540				1	1	0	1	1
	630				1	1	1	0	1
	720				1	1	1	1	1
	810				0	1	1	1	1
	900				1	1	1	1	0
	900Z (1)				1	1	1	1	1
	900Z (2)				0	1	1	1	1
	90	•	•		1	1	1	0	1
	360	•	•		1	1	0	1	1
	630	•	•		1	1	1	1	1

Tabela Z.1. cd.

Robot przemysłowy Fanuc M-16iB/10L					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciangu po-miarowego	rotacja ukł. wspól. na-rzędzia	rotacja w osi Z	rotacja w osi X					
					P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
900	•	•			1	1	1	1	1
	•	•	•		1	1	1	1	1
	•	•	•		1	0	0	1	1
	•	•	•		0	1	1	1	1
	•	•	•		0	1	1	1	1
1750	900 (1)				0	1	1	1	0
	900 (2)				1	1	1	1	0
	900 (3)				1	1	0	0	0
	900 (4)				1	1	1	1	1
	900 (5)				1	1	1	1	0
	900 (6)				0	1	0	0	1
	900 (7)				1	1	0	1	1
	900 (8)				1	1	0	1	1
	900 (9)				1	1	1	1	1
	900 (10)				1	1	0	1	1
	900 (11)				0	1	0	1	1
	900 (12)				1	1	1	1	1
	900 (13)				0	1	1	1	1
	900 (14)				1	1	1	0	1
	900 (15)				1	1	1	1	1
1830	900 (1)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (2)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (3)	•	•		0	1	1	0	1
	900 (4)	•	•		0	1	1	0	1
	900 (5)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (6)	•	•		0	1	1	0	1
	900 (7)	•	•		0	0	1	1	1
	900 (8)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (9)	•	•		1	0	1	1	1
	900 (10)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (11)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (12)	•	•		1	0	1	1	1
	900 (13)	•	•		0	0	1	1	1
	900 (14)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (15)	•	•		1	1	1	1	1
	900 (16)	•	•		1	1	1	1	1

Tabela Z.1. cd.

Robot przemysłowy Fanuc M-16iB/10L					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciangu pomiarowego	rotacja ukł. wspól. na-rzędzia	rotacja w osi Z	rotacja w osi X	Hipoteza zerowa				
					P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
1750	810 (1)	•	•	•	1	1	1	1	1
	810 (2)	•	•	•	1	1	1	0	1
	810 (3)	•	•	•	0	1	1	1	1
	810 (4)	•	•	•	1	1	1	1	1
	810 (5)	•	•	•	1	0	1	1	1
	810 (6)	•	•	•	1	1	1	1	1
	810 (7)	•	•	•	1	1	1	1	1
	810 (8)	•	•	•	0	1	1	0	1
	810 (9)	•	•	•	0	1	1	0	1
	810 (10)	•	•	•	1	1	1	1	1
	810 (11)	•	•	•	1	1	1	1	0
	810 (12)	•	•	•	1	1	1	0	1
	810 (13)	•	•	•	1	1	1	1	0
	810 (14)	•	•	•	1	1	1	1	1
	900	•	•	•	1	1	1	1	1

Tabela Z.2. Sprawdzenie rozkładu normalnego parametru l_j dla pomiaru robota przemysłowego Panasonic TA 1400

Robot przemysłowy Panasonic TA 1400					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciangu pomiarowego	rotacja ukł. wspól. na-rzędzia	rotacja w osi Z	rotacja w osi Y	Hipoteza zerowa				
					P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
1900	72				1	1	1	1	1
	340				1	1	1	1	0
	340	•	•		1	1	1	1	0
	340	•	•	•	1	1	1	1	1
2070	340 (1)				0	0	1	1	1
	340 (2)				1	1	1	1	1
	340 (3)				0	1	1	1	1
	340 (4)				0	1	1	1	1
	340 (5)				0	1	1	1	1
	340 (6)				1	1	1	1	1
	340 (7)				1	1	1	1	1
	340 (8)				1	1	1	1	0
	340 (9)				1	1	1	1	0

Robot przemysłowy Panasonic TA 1400					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciianu pomiarowego	rotacja ukł. współl. narzędzi	rotacja w osi Z	rotacja w osi Y	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
340	340 (10)				1	1	0	0	1
	340 (11)				1	1	1	1	1
	340 (12)				1	1	0	0	1
	340 (13)				1	1	0	0	1
	340 (14)				1	1	1	1	1
	340 (15)				1	1	1	1	1

Tabela Z.3. Sprawdzenie rozkładu normalnego parametru l_j dla pomiaru robota przemysłowego Kuka KR 16

Robot przemysłowy Kuka KR 16					Hipoteza zerowa				
odległość urządzenia [mm]	długość boku sześciianu pomiarowego	rotacja ukł. współl. narzędzi	rotacja w osi Z	rotacja w osi X	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
1500	20				1	1	1	1	1
	40				1	1	1	1	1
	140				1	0	1	1	0
	240				1	0	1	1	1
	340				1	1	1	1	0
	440				1	1	1	1	1
	540				1	1	1	1	1