

dr inż. Marek Płaczek¹, mgr inż. Łukasz Piszczek²

¹Institut Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Polska
E-mail: marek.placzek@polsl.pl

²ProPoint SP. Z O.O. SP. K., Bojkowska 37 R, 44-100 Gliwice, Poland
E-mail: lukasz.piszczek@propoint.pl

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego w środowiskach off i online

Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment

Słowa kluczowe: *robot przemysłowy, programowanie offline, programowanie online,
dokładność pozycjonowania, powtarzalność pozycjonowania*

Keywords: *industrial robot, offline programming, online programming, positioning accuracy,
repeatability of positioning*

Abstrakt: W pracy omówiono zagadnienia dotyczące badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Kuka KR 16-2. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych robota przemysłowego, a także dokonano porównania ścieżek ruchu robota symulowanego w środowisku Robcad ze ścieżkami ruchu robota rzeczywistego. W celu rejestracji ścieżek ruchu w warunkach laboratoryjnych zastosowano laserowy tracker Faro Vantage. Często konieczność poprawy programów robotów przemysłowych utworzonych w środowisku offline wiąże się z wydłużeniem czasu uruchomienia i dużymi kosztami. W artykule opisano metodę pomiarów oraz podjęto próbę określenia wpływu rodzaju ścieżki dojazdu do punktów pomiarowych i parametrów ruchu na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robota. Zweryfikowano także dokładność odwzorowania ruchu robota symulowanego w środowisku wirtualnym.

Abstract: The paper discusses issues concerning the accuracy and repeatability tests of the positioning of the Kuka KR 16-2 industrial robot. The results of laboratory tests of an industrial robot, as well as a comparison of robot motion paths in the Robcad environment with the real robot motion paths are presented. In order to register movement paths in the laboratory conditions, the laser tracker Faro Vantage was used. Frequent necessity to correct programs of industrial robots created in the offline environment, is a results, among others, from the insufficient experience of people who carry out programming, the environment in which robots work and the parameters of the robots themselves, and therefore their accuracy and repeatability. It is connected with the extension of the start-up time and high costs. The work describes the measurement method and attempts to determine the influence of the type of route and motion parameters on the accuracy and repeatability of robot . The accuracy of mapping of simulated robot motion in a virtual environment was also verified.

1. Dokładność, powtarzalność i programowanie ruchu robotów przemysłowych

We współczesnych zakładach przemysłowych niezwykle istotnym elementem są zrobotyzowane cele produkcyjne i stosowane w nich roboty przemysłowe. W celu osiągnięcia maksymalnej wydajności i niezawodności zautomatyzowanych i zrobotyzowanych linii produkcyjnych prowadzone są liczne badania naukowe mające na celu zarówno rozwój samych środków technicznych, jak i metod ich programowania i eksploatacji [1,2,4,5,8,10,11,13,18]. W przypadku robotów przemysłowych dokładność i powtarzalność pozycjonowania są niezwykle istotnymi cechami, wpływającymi na ich eksploatację [3,6,7,12,19,21,22,26]. Prowadzone są więc badania w celu poprawy istniejącego stanu działania tego typu środków technicznych, a także udoskonalenia metod pomiarowych ich parametrów [7,9,14-17,20,23,24].

Dokładnością manipulatora nazywa się jego zdolność do osiągnięcia zadanego punktu w przestrzeni roboczej. Podstawową metodą określenia błędów dokładności pozycjonowania robota przemysłowego jest pomiar zmian kątowych lub liniowych w poszczególnych członach jego manipulatora [19-21,27,28]. Ze względu na duży koszt oraz wrażliwość stosowanych czujników na zakłócenia dużo rzadziej stosowane są metody bezpośredniego pomiaru końca efektora. Na charakterystyki dokładności pozycjonowania wpływ mają czynniki opisywane szerzej między innymi w pracy [21], takie jak błędy pozycjonowania oraz odtwarzania trajektorii (np. wynikające z deformacji temperaturowych, niedokładności sygnałów systemu sterowania, czy działania sił bezwładności). Według normy PN-ISO 9283 dokładność pozycjonowania jednokierunkowego (AP) podaje odchyłkę między położeniem zadanym a wartością średnią położenia rzeczywistych przy dochodzeniu do położenia zadanego z tego samego kierunku [26]. Powtarzalność manipulatora to zdolność do kolejnych przemieszczeń końcówki efektora do tego samego, zadanego punktu w przestrzeni. Na powtarzalność manipulatora w pierwszej kolejności wpływ ma rozdzielczość układu sterowania.

Manipulatory robotów przemysłowych, współcześnie stosowanych w przemyśle, charakteryzują się bardzo dobrą powtarzalnością (RP), lecz niezbyt dobrą dokładnością (AP). Pomiar położenia manipulatora w podstawowej konfiguracji jest najczęściej realizowany poprzez odczyt danych z enkodera lub rezolwera, umieszczonych na wale napędu każdej z osi. Roboty mogą być wyposażone w dodatkowe układy pomiarowe, lecz najczęściej jest to opcja dodatkowo płatna. Dlatego najczęściej pozycja narzędzia obliczana jest na podstawie pomiaru kątów lub przesunięć przegubów z dodatkowym uwzględnieniem geometrii manipulatora i sztywności względem masy, jaką przenosi (tool load). Wpływ na dokładność pozycjonowania mają luzy (zużycie) w połączeniach przegubów, tarcie, błędy przełożeń w przekładniach, dokładność wykonania elementów manipulatora, skończona sztywność mechaniczna, błędy obliczeniowe, środowisko pracy, efekty elastyczne członów i sposób zamontowania, a także wiele innych czynników statycznych i dynamicznych.

Niestety, większość powyższych czynników podlega ciągłym zmianom, których nie można przewidzieć, co prowadzi do tworzenia się różnic pomiędzy modelami matematycznymi i charakterystykami rzeczywistymi. Można podjąć próby zmniejszenia tych różnic poprzez rekaliibrację modeli matematycznych. Inną metodą poprawiania dokładności może być zastosowanie bezpośrednich czujników na końcówce interfejsu mechanicznego robota, np. czujników laserowych, indukcyjnych i wizyjnych.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest programowanie robotów przez nauczanie. Metoda ta składa się z programowania dyskretnego i programowania ciągłego, które bardzo różnią się od siebie charakterem nauczania. Programowanie dyskretne stosowane jest głównie do manipulacji przedmiotami, do klejenia oraz zgrzewania, a programowanie ciągłe jest stosowane tam, gdzie ruchy robota muszą być płynne i ciągłe. Ten rodzaj programowania

bardzo dobrze sprawdza się w zastosowaniu do procesów takich jak np. malowanie natryskowe.

Obecnie intensywnie rozwijana jest metoda programowania robotów offline. Jej stosowanie daje możliwość znacznego zmniejszenia kosztów, np. wprowadzenia nowego modelu samochodu do produkcji na linii produkcyjnej. W metodzie tej robot, czy też jego otoczenie są w bardzo małym stopniu potrzebne do samego procesu programowania. Przebiega on bowiem w symulowanym środowisku 3D z zastosowaniem oprogramowania typu Robcad, Delmia, Roboguide, Robot Studio, czy też Process Simulate. W utworzonym środowisku wirtualnym zawarte są modele 3D urządzeń z istniejącej linii technologicznej, których rozmieszczenie jest wiernie odwzorowane za pomocą laserowej metrologii 3D, co pozwala na bardzo dokładne programowanie robotów, bez konieczności ich fizycznego udziału. Takie działanie umożliwia skrócenie czasu uruchomienia, zmniejsza koszty oraz pozwala na lepsze dopracowanie czasu cyklu linii produkcyjnej. Możliwa jest także szybka reakcja, wówczas, gdy któryś z modeli jest niekompatybilny, np. kiedy chwytak jest niekompatybilny z obiektem manipulacji na danym etapie produkcji. Dodatkową zaletą tej metody jest zmniejszenie ryzyka wypadków na hali montażowej i wzrost bezpieczeństwa operatorów robotów. W programowaniu offline bardzo istotna jest precyzja odwzorowania obiektów rzeczywistych, jak i samego robota przemysłowego, z uwzględnieniem parametrów jego pracy, w tym dokładności i powtarzalności pozycjonowania. Wszelkie błędy w tym zakresie wiążą się z koniecznością weryfikacji i poprawy opracowanego programu w środowisku rzeczywistym. W istotny sposób ogranicza to zalety, wynikające z zastosowania metody programowania robotów offline.

2. Badania oraz metody weryfikacji i poprawy charakterystyki ruchu robotów przemysłowych

W niniejszej pracy podjęto się próby zbadania i weryfikacji porównawczej dokładności oraz powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego, symulowanego w środowisku komputerowym, z robotem rzeczywistym. W celu przeprowadzenia badań posłużono się laserowym urządzeniem pomiarowym. W pracy [24] autorzy również przedstawili koncepcję metody pomiaru dokładności i powtarzalności z użyciem laserowej techniki pomiarowej. Zastosowanie detekcji opartej na interferometrii laserowej, w proponowanej technice szacowania błędów pozycjonowania, mającej na celu poprawę dokładności robota przemysłowego, przedstawiono także w pracy [9]. Sposób ten prezentowany jest również w pracach innych autorów, w których precyzyjne, laserowe urządzenia pomiarowe proponowane są jako narzędzia pozycjonowania manipulatorów robotów przemysłowych i maszyn [12,14,20].

Powtarzalność robota jest ograniczona głównie rozdzielczością układu odczytu położenia, czyli najmniejszą wartością, jaką ten układ może rozpoznać. Osie liniowe, czyli przeguby pryzmatyczne, mają przeważnie lepszą rozdzielczość niż osie obrotowe (w porównywalnej klasie cenowej), ponieważ linia prosta poprowadzona pomiędzy dwoma punktami jest krótsza niż odpowiadający jej łuk. Spong i Vidyasagar [22] udowodnili, że w osiach obrotowych kumulujące się błędy są większe niż w osiach liniowych i wynikają z silniejszych sprzężeń kinematycznych i dynamicznych w tych napędach. Prowadzi to do coraz większych problemów ze sterowaniem tymi osiami. Inna hierarchia błędów opisana w pracy [25] wygląda następująco: położenie punktu TCP (Tool Center Point), położenie przedmiotu obrabianego, kalibracja położenia przegubów, długości ramion i błędy kątowe, podatność ramion, rozdzielczość enkoderów położenia, luzy, elastyczność i nieosiowość, odkształcenia termiczne. W pracy [25] szczegółowo omówiono także podział i procentowy udział wpływu poszczególnych źródeł błędów na dokładność i powtarzalność

pozycjonowania. Z przedstawionych danych wynika, że najistotniejszy wpływ na dokładność robota ma jego nieprawidłowa kalibracja. Dlatego prawidłowe skalibrowanie to warunek, którego trzeba dotrzymać na początku każdej pracy z robotem przemysłowym. Możliwość szybkiej i dokładnej kalibracji to również intensywnie rozwijane zagadnienie w aspekcie budowy robotów i ich osprzętu [25].

W artykule [26] autorzy podkreślają, że główną wadą programowania robotów w trybie offline jest ich mała dokładność. Wskazują, że roboty przemysłowe są programowane głównie za pomocą metod, które wymagają jedynie dobrej powtarzalności. W rezultacie niewiele robi się, aby poprawić parametry dotyczące dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych. Autorzy omawianego opracowania przeprowadzili badania eksperymentalne na trzech nowoczesnych robotach w celu oceny i porównania ich dokładności pozycjonowania. Korzystając z pomiarów za pomocą systemu interferometrii laserowej, błędy dokładności każdego robota zostały zmierzone, a otrzymane wyniki porównane. Jak wykazali autorzy, analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że w porównaniu do starszych modeli robotów dokładność pozycjonowania badanych nowoczesnych robotów przemysłowych może być bardzo dobra, jednak uzyskanie takiej dokładności zależy od prawidłowego procesu kalibracji.

W pracy [21] przedstawiono rezultaty eksperymentu mającego na celu ocenę dokładności i powtarzalność przegubowego robota przemysłowego. Analizowano sześć czynników, które najczęściej wskazywane są jako mające wpływ na parametry jego pracy. Badanym obiektem był robot przemysłowy Fanuc M16iL. Szczegółowo opisano planowanie, przeprowadzenie i analizę otrzymanych wyników. Przedstawiono również weryfikację dokładności i powtarzalności robota podawanych przez producenta.

W pracy [16] wykazano eksperymentalnie skuteczność urządzenia pomiarowego przeznaczonego do absolutnej kalibracji małych robotów przemysłowych. Proponowana metoda kalibracji jest ręczna i pracochłonna, jednak jej wykonanie zajmuje mniej niż godzinę, zaś koszt stosowanego urządzenia pomiarowego wynosi mniej niż 13 000 USD. Jak wskazują autorzy pracy [16], wartości średnie i odchylenie standardowe absolutnej pozycji i błędów odległości byłyby wówczas około trzy razy mniejsze. Udowodnili, że wówczas, gdy czas kalibracji nie stanowi problemu, możliwe są różne ulepszenia proponowanego rozwiązania. Kalibrację można przykładowo powtórzyć przy różnych pozycjach podstawowego urządzenia. Różne modele kalibracji można również stosować w różnych strefach roboczych. Możliwa jest ponadto rozbudowa proponowanego systemu pomiarowego, a tym samym aż czterokrotne rozszerzenie zakresu mierzalnych konfiguracji robota. Autorzy sugerują więc, że proponowana procedura kalibracji, ma ogromny potencjał, gdyż jest tańsza w stosunku do absolutnej kalibracji małych robotów przemysłowych. Może być także dodatkowo stosowana do potwierdzania dokładności pozycjonowania robota. W innym opracowaniu [17], autorzy zaproponowali 29-parametrowy model kalibracji oraz procedurę identyfikacji parametrów tego modelu i pomiarów robota przemysłowego ABB IRB 1600-6/1.45. Zastosowanie to umożliwi poprawę dokładności robota pod względem średnich i maksymalnych błędów pozycji w całym obszarze roboczym. Autorzy przyznają, że nie można wykazać większej skuteczności proponowanej metody od innych metod kalibracji, w tym metody proponowanej przez producenta robota, jednak otrzymane wyniki mogą być stosowane jako punkt odniesienia do celów analizy porównawczej.

Również w pracy [15] autorzy zwracają uwagę, że jednym z problemów spowalniających rozwój programowania offline jest mała statyczna i dynamiczna dokładność pozycjonowania robotów przemysłowych. Wskazują, że prawidłowa kalibracja robota poprawia dokładność jego pozycjonowania i może być również stosowana jako narzędzie diagnostyczne w produkcji i konserwacji robotów. Przedstawiają techniki modelowania i przeprowadzania procesów kalibracji robotów w trybie programowania offline za pomocą

trójwymiarowego systemu pomiarowego. Autorzy wskazują, że proponowany system pomiarowy jest przenośny, dokładny i nie jest kosztowny. Omawiane rozwiązanie składa się z pojedynczej kamery CCD, zamontowanej na kołnierzu narzędzia robota, która ma na celu mierzyć pozycję końcowego efektora względem globalnego układu współrzędnych. W omawianym modelu fotogrametrycznym uwzględniono dystorsję promienistą. Współczynniki skalowania i centra obrazu są uzyskiwane z użyciem innowacyjnej techniki z podejściem opartym na wielu widokach. Osiągana, średnia dokładność wynosi od 0,2 do 0,4 mm w odległościach od 600 do 1000 mm od celu, odpowiednio przy różnych orientacjach kamery. Autorzy prezentują wyniki wykonywanych eksperymentów dwóch robotów przemysłowych ABB IRB-2400 i PUMA-500 w celu wykazania poprawy ich dokładności za pomocą zaproponowanego systemu kalibracji. Roboty po kalibracji osiągały lepszą dokładność (od trzech do sześciu razy niż przed kalibracją), zaś proponowane przez autorów rozwiązanie jest szybkie, dokładne i łatwe w konfiguracji.

W artykule [7] przedstawiono prostą i mniej kosztowną metodę kalibracji robotów przemysłowych z zastosowaniem systemu wizyjnego. W systemie tym kamera jest sztywno przymocowana do kiści robota, rejestrując w trakcie jego pracy obrazy płyty kalibracyjnej w postaci szachownicy. Stosowany jest algorytm automatycznego rozpoznawania obrazu oraz samokalibracji kamery bez znajomości położenia płyty kalibracyjnej. Autorzy wykazali, że proponowana metoda jest prostsza i tańsza od standardowych. Może być ponadto zastosowana podczas pracy robota w nieznanym środowisku oraz w warunkach, które mogą istotnie wpływać na parametry pracy (wysoka temperatura czy ciśnienie). Może być także stosowana w robotach mobilnych.

Zagadnienia poprawy dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych omawiane są w pracy [23], w której autorzy badają możliwość zastosowania do tego celu urządzenia Leap Motion Controller, służącego standardowo do ręcznego kontrolowania gestów użytkownika z zadeklarowaną dokładnością poniżej milimetra. W artykule przedstawiono badanie kontrolera ruchu, główny nacisk kładąc na ocenę jego dokładności i powtarzalności. Opracowano stanowisko badawcze z zastosowaniem robota przemysłowego, wyposażonego w pióro referencyjne, umożliwiające pomiar dokładności pozycji do 0,2 mm. W przeprowadzonych eksperymentach uzyskano odchylenie między pożądanym położeniem robota, a jego średnią zmierzoną pozycją, mniejsze od 0,2 mm w przypadku układów statycznych i 1,2 mm w przypadku konfiguracji dynamicznych.

Przytoczone publikacje naukowe są tylko wybranymi pozycjami z obszernej, dostępnej literatury tematu. Potwierdzają one, że prowadzone są liczne badania dotyczące zarówno metod pomiarowych jak i rozwiązań umożliwiających poprawę dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. W większości opracowań wskazuje się prawidłową kalibrację robota przemysłowego jako czynnik znacząco wpływający na te parametry. Proponowane są również różne metody pomiarów i poprawy precyzji odwzorowania zaprogramowanych ścieżek ruchu robotów przemysłowych. W niniejszym opracowaniu autorzy również podjęli próbę weryfikacji dokładności i powtarzalności pozycjonowania wybranego robota przemysłowego, stosując laserowy system pomiarowy. Przedstawiono ponadto porównanie otrzymanych wartości z rezultatami otrzymanymi w wirtualnym środowisku symulacyjnym, co ma istotne znaczenie przy programowaniu robotów offline.

Celem przeprowadzonych i omówionych w artykule prac było zaproponowanie metody badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego zgodnie z normą PN-EN 9283, stosując w tym celu standardowe narzędzie, z którego korzystały dotychczas osoby programujące roboty do pomiaru zrobotyzowanej celi i jej zamodelowania w środowisku wirtualnym. Tematyka ta jest niezwykle istotna dla osób zajmujących się programowaniem robotów przemysłowych ze względu na częste

rozbieżności pomiędzy ścieżką ruchu robota symulowaną w środowisku wirtualnym a ścieżką ruchu robota rzeczywistego, wykonywaną na podstawie programu napisanego w środowisku offline. Rozbieżności te powodują konieczność dokonywania korekt programów przed uruchomieniem pracy robotów i wiążą się z dużą czasochłonnością tych prac, a także z dużymi kosztami.

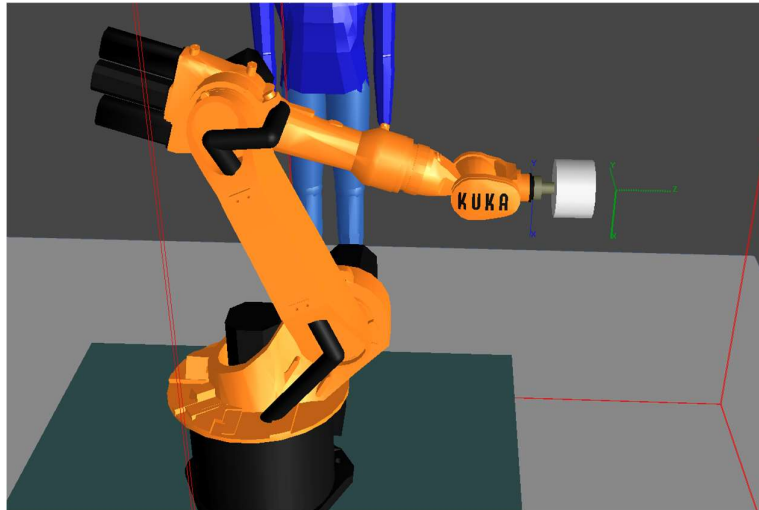
3. Badania symulacyjne i eksperymentalne robota przemysłowego

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i pomiarów laboratoryjnych obiektu rzeczywistego - robota Kuka KR 16-2. Rozpatrywany typ robota przemysłowego stosowany jest głównie do zadań związanych ze spawaniem i grzewaniem (ma udźwig 16 kg i masę własną 235 kg).

W celu porównania wyników programowania offline i online użyto danych wygenerowanych zarówno w programie Robcad, jak i przez laserowy tracker Faro Vantage, stosowany w pomiarach na obiekcie rzeczywistym. W programie Robcad napisano, przetestowano i wczytano program na rozpatrywany typ robota. W przeprowadzonej symulacji zastosowano narzędzia z grup:

- Motion, które umożliwiają manipulowanie symulowanym robotem;
- Kuka KR C1 Spot, odpowiadające za obsługę systemu Robot Controller Software (RCS) i wpisywanie do niego informacji dotyczących poszczególnych punktów;
- Path Editor, w którym przechowywane są informacje o zapisanych ścieżkach robota;
- Placement Editor, odpowiadające za możliwość przenoszenia obiektów w zrobotyzowanej celi.

W celu umożliwienia zastosowania trackera Faro do pomiarów w trakcie prowadzonych badań, konieczne było poprawne wyznaczenie bazy (work object) oraz punktu Tool Center Point (TCP) robota, gdyż punkty tworzone przez robota są określone odległością i obrotem układu TCP względem określonego układu bazy. Bazę robota zdefiniowano poprzez pomiary dwóch płaszczyzn: pierwszej, w celu wyznaczenia wysokości, na jakiej znajduje się zero i kierunek osi Z oraz drugiej, w celu wyznaczenia kierunku osi X. W celu ułatwienia prac i uzyskania maksymalnej dokładności tracker bazowano w tak zwanym punkcie zero robota. Jest to fabrycznie definiowany, nieruchomy układ współrzędnych, umieszczony w centralnej części osi J1, na poziomie podłoża. Układ TCP zdefiniowano poprzez zamocowanie do obciążenia robota adaptera z silnym magnesem z sondą pomiarową, a następnie wykonano dojazd robota do dowolnych ośmiu punktów. Następnie, wskazujące przez robot współrzędne każdego z punktów, wpisano do programu Kuka Funke za pomocą którego wyznaczono wartości TCP. Wartości te wpisano w pamięci robotów fizycznego i symulowanego. Wartości, które definiują układ TCP, są jego odległościami i obrotami względem układu tool 0. Jest to fabrycznie definiowany układ współrzędnych, znajdujący się w centralnej części osi J6, na poziomie kiści robota, stale poruszający się wraz z nią. Po zmierzeniu wartości TCP (w tym przypadku jest to centralna część luster sondy pomiarowej, zaczeponiej na adapterze), wartości są zapisane w pamięci robota jako tool 5 i od tej pory zarówno adapter, jak i urządzenie pomiarowe Faro muszą pozostać unieruchomione na swoich pozycjach (adapter unieruchomiono na obciążeniu robota za pomocą kleju). Sonda pomiarowa może być odczepiana od adaptera na czas przejazdu robota z maksymalną prędkością pomiędzy punktami, gdyż wykonanie adaptera jest bardzo dokładne i nie wprowadza znaczących błędów pomiarowych. Na rys. 1 pokazano rozpatrywany robot przemysłowy symulowany w programie Robcad wraz z układami współrzędnych TCP oraz Toolframe.



Rys. 1. Położenie układów współrzędnych robota przemysłowego symulowanego w programie Robcad: TCP (zaznaczony kolorem zielonym) oraz definiowanego fabrycznie układu Toolframe (zaznaczony kolorem niebieskim)

Pomiary prowadzono w laboratorium firmy ProPoint SP. Z O.O. SP. K. Zapewniono wymagane warunki pomiarowe, a więc sztywne, żelbetonowe podłoże, do którego zamocowano badany manipulator robota przemysłowego. Sztywne podłoże nie wprowadza znaczących błędów pomiarowych poprzez np. uginanie się w trakcie pracy robota. Tracker Faro Vantage umieszczono w odległości dwóch metrów od badanego robota, znajdującego się w pozycji Home. Zgodnie ze specyfikacją producenta dokładność pomiarów wykonywanych w tej konfiguracji, przy pomiarze odległości liniowej, wynosi 0,009 mm [28]. Na końcówce roboczej manipulatora zamontowano obciążenie, przymocowane do kiści robota oraz sondę SMR (Spherically Mounted Retroreflector) z adapterem. Temperatura w pomieszczeniu w trakcie badań wynosiła 22 stopnie Celsjusza (zgodnie z normą PN-EN 9283 wymagana jest temperatura 20 stopni Celsjusza +/- 2 stopnie [27]). Robot przed pomiarami poddano czterdziestominutowemu cyklowi pracy na wszystkich osiach, co zapewniło rozgrzanie napędów i przekładni. Tracker Faro unieruchomiono we właściwej pozycji, stosując klej. Dodatkowo użyto czterech adapterów, identycznych do zamocowanego na obciążeniu badanego robota i przyczepiono je w nieruchomych, metalowych punktach laboratorium, jak np. ościeżnica drzwi. Korzystając z utworzonych w ten sposób punktów bazowych, umożliwiono ponowne bazowanie trackera pomiarowego w razie jego ewentualnego poruszenia w trakcie prowadzonych badań. Działanie takie umożliwia ponadto przeniesienie trackera w inne miejsce, gdyż po prawidłowym jego umiejscowieniu nie ma konieczności ponownego wyznaczenia bazy robota, względem której dokonywane są pomiary.

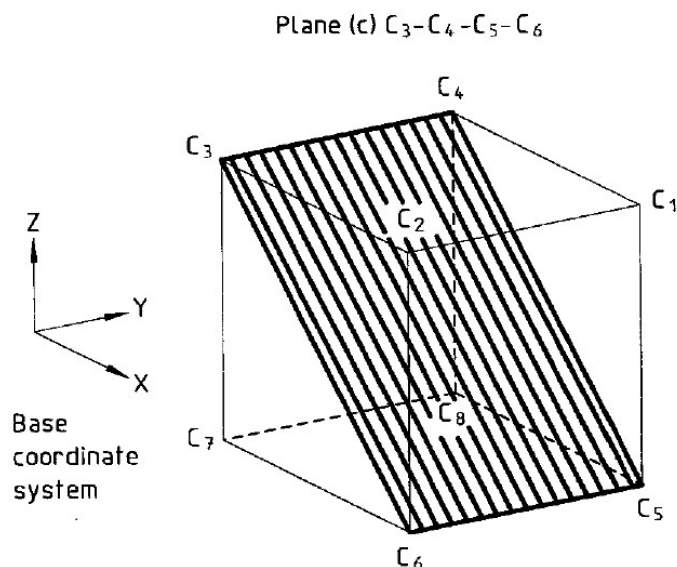
Zgodnie z wymogami, w celu zapewnienia wiarygodności pomiarów należy je przeprowadzać z pełnym, nominalnym obciążeniem badanego robota. Korzystając z danych uzyskanych z programu Kuka Load, wyznaczono masę zamocowaną na osi J6 oraz generowane przez nią momenty bezwładności i siły. Wykonano obciążenie w postaci wyciętych laserowo i połączonych ze sobą pięciu krążków stalowych o średnicy 155 mm, które zamocowano na kiści robota za pomocą opracowanego adaptera.

Dokonano badań:

- dokładności robota, określonej jako różnica pomiędzy zadanymi programowo a rzeczywistymi współrzędnymi punktu TCP,
- powtarzalności robota, czyli obliczenia promienia sfery, w której zawierają się punkty pomiarowe podczas kolejnych przejazdów robota,

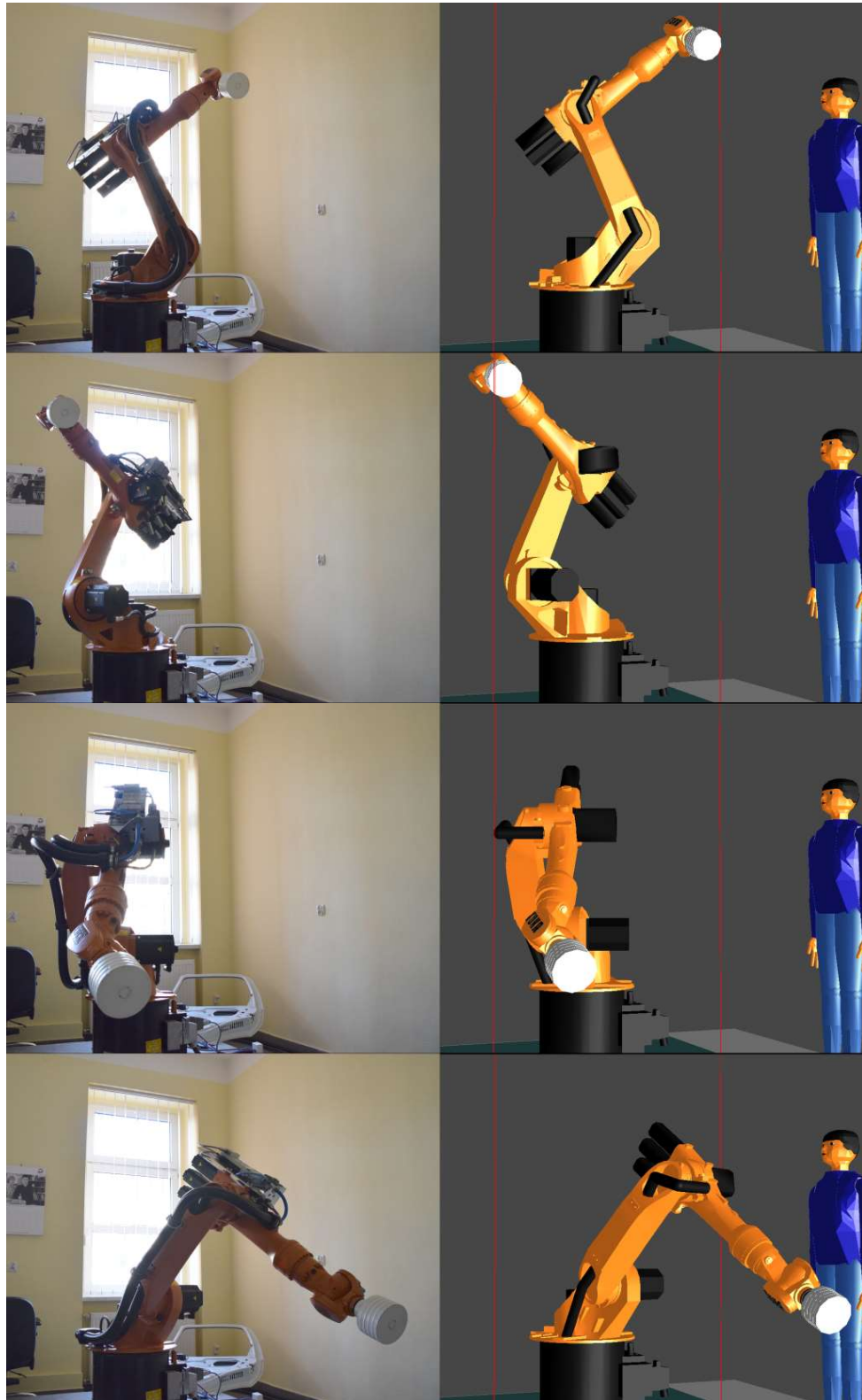
- odwzorowania ścieżki, porównując symulowaną w oprogramowaniu trajektorię przejazdu robota wirtualnego i trajektorię przejazdu robota rzeczywistego,
- zatrzymania awaryjnego (E-STOP).

Kierując się zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 9283, wyznaczono sześciany pomiarowe o różnych długościach boku, zaś punkty pomiarowe umieszczono w czterech wierzchołkach tych sześciątów, po przekątnej. Utworzoną w ten sposób płaszczyznę pomiarową przedstawiono na rys. 2 [27].

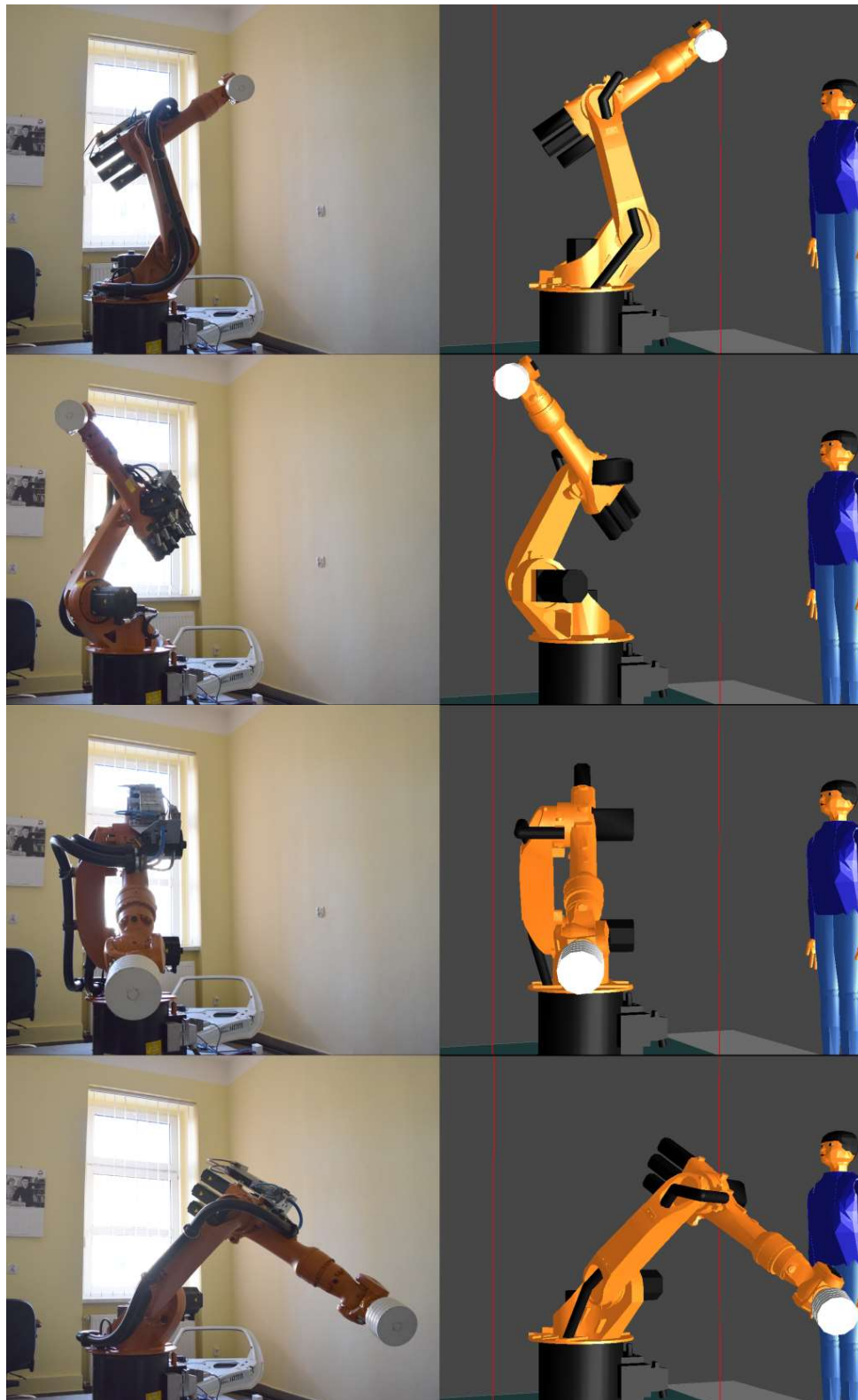


Rys. 2. Płaszczyzna pomiarowa określona punktami znajdującymi się w wierzchołkach sześciangu zgodnie z normą PN-EN 9283 [27]

Na rys. 3 i 4 przedstawiono robota w środowiskach symulowanym i rzeczywistym, w punktach pomiarowych wybranych spośród C4-C3-C6-C5 (rys. 2). Porównanie to umożliwia określenie konfiguracji robota i stwierdzenie, czy jest ona taka sama w obu środowiskach. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że robot w symulacji osiąga te same konfiguracje osi, co robot w rzeczywistości. Konfiguracje te występują w symulacji w kilku różnych wariantach zapisu, dlatego należało rozpoznać, jaki wariant zastosować w przypadku robota rzeczywistego. Nie stanowi to problemu przy programowaniu z użyciem systemu RCS (Robot Controller Software), gdyż wtedy dobierany jest on automatycznie lub dokonywana jest konwersja na właściwy wariant. Stwierdzono prawidłowe odwzorowania robota rzeczywistego w środowisku wirtualnym. W obu przedstawionych przypadkach przeprowadzonych pomiarów robot jest prawidłowo odwzorowany we wszystkich punktach pomiarowych. Przedstawiono wybrane, dwie, konfiguracje robota podczas pomiarów prowadzonych w sześciacie o boku 1000 mm. W pierwszej z nich zastosowano rotację narzędzia o kąt $+20^\circ$ w osi Y (rys. 3), zaś w drugiej rotację narzędzia o kąt $+20^\circ$ w osiach X i Y. Pomimo identycznych współrzędnych punktu C5 wprowadzona rotacja narzędzia w osiach X i Y spowodowała zmianę konfiguracji robota i obrót osi J4 o 180° względem konfiguracji robota z rotacją narzędzia jedynie w osi Y. Oba przypadki zostały jednak wiernie odwzorowane przez robot symulowany w środowisku wirtualnym.



Rys. 3. Robot wirtualny i rzeczywisty w punktach pomiarowych C4-C3-C6-C5 sześcianu o boku 1000 mm z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osi Y



Rys. 4. Robot wirtualny i rzeczywisty w punktach pomiarowych C4-C3-C6-C5 sześcianu o boku 1000 mm z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osi X oraz Y

4. Badania dokładności pozycjonowania

Badania dokładności pozycjonowania w poszczególnych punktach pomiarowych, oznaczonych AP , przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 9283 [27]. Współrzędne pozycji zadanej określono w programie robota, natomiast współrzędne pozycji osiągniętej odczytano ze wskazań trackera Faro. Do obliczeń użyto zależności [27]:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}, \quad (1)$$

gdzie:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (2)$$

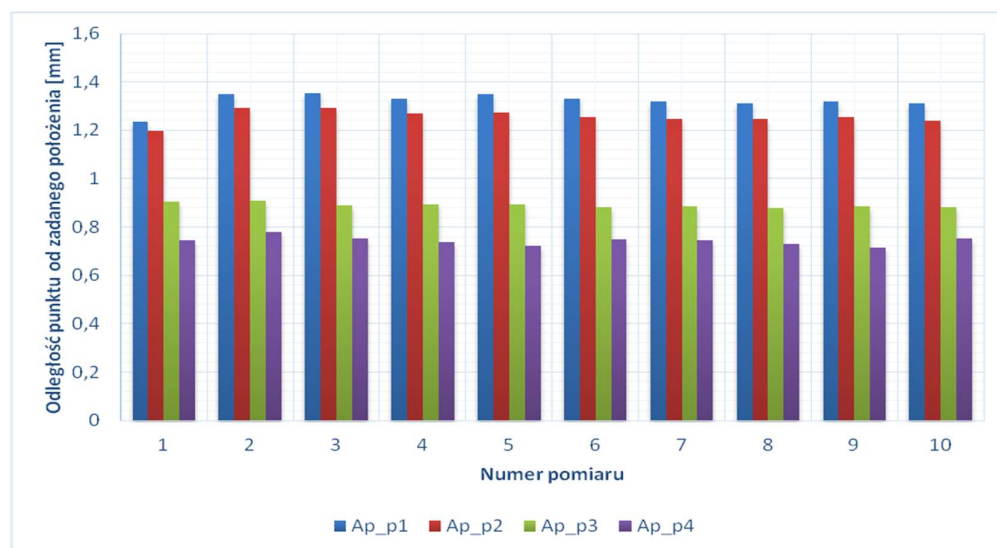
$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \quad (3)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j. \quad (4)$$

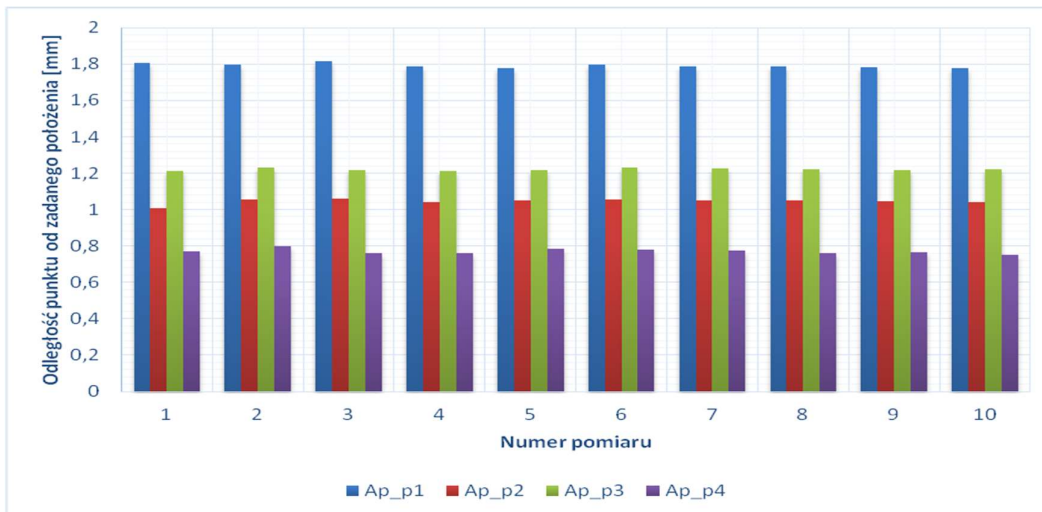
Symbolami \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} oznaczono współrzędne centrum zbioru punktów pomiarowych, x_c , y_c , z_c współrzędne pozycji zadanej, x_j , y_j , z_j współrzędne j -tej pozycji zmierzonej.

Przykładowe wyniki badania dokładności pozycjonowania robota w przypadku sześciątów o boku 200, 600 i 1000 mm, bez rotacji narzędzia, przedstawiono na rys. 5-7. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 9283 przeprowadzono 30 pomiarów. Ze względu na powtarzalną naturę otrzymywanych wyników oraz chęć zapewnienia czytelności ich prezentacji przedstawiono otrzymane rezultaty dziesięciu losowo wybranych pomiarów. Na rys. 8 zestawiono średnie wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania przy czterech punktach pomiarowych sześciątów o boku 200, 600 i 1000 mm. W poszczególnych pomiarach punkty osiągnięte były po różnych ścieżkach ruchu robota:

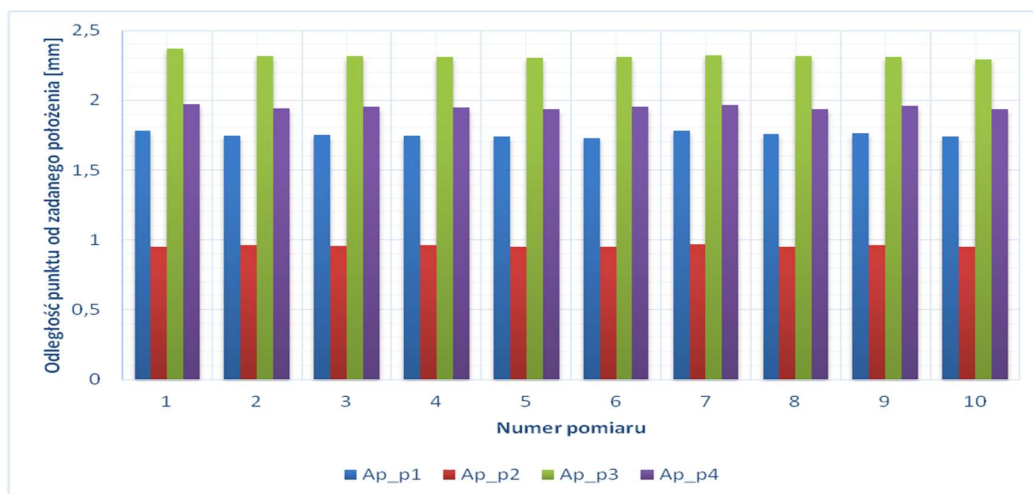
- bez rotacji narzędzia,
- z rotacją narzędzia o kąt $+20^\circ$ względem osi Y,
- z rotacją narzędzia o kąt $+20^\circ$ względem osi X oraz Y,
- w przypadku sześcianu o boku 1000 mm, dodatkowo bez rotacji narzędzia, z prędkościami równymi 10% oraz 50% wartości prędkości maksymalnej.



Rys. 5. Dokładność pozycjonowania punktów sześcianu o boku 200 mm, bez rotacji narzędzia



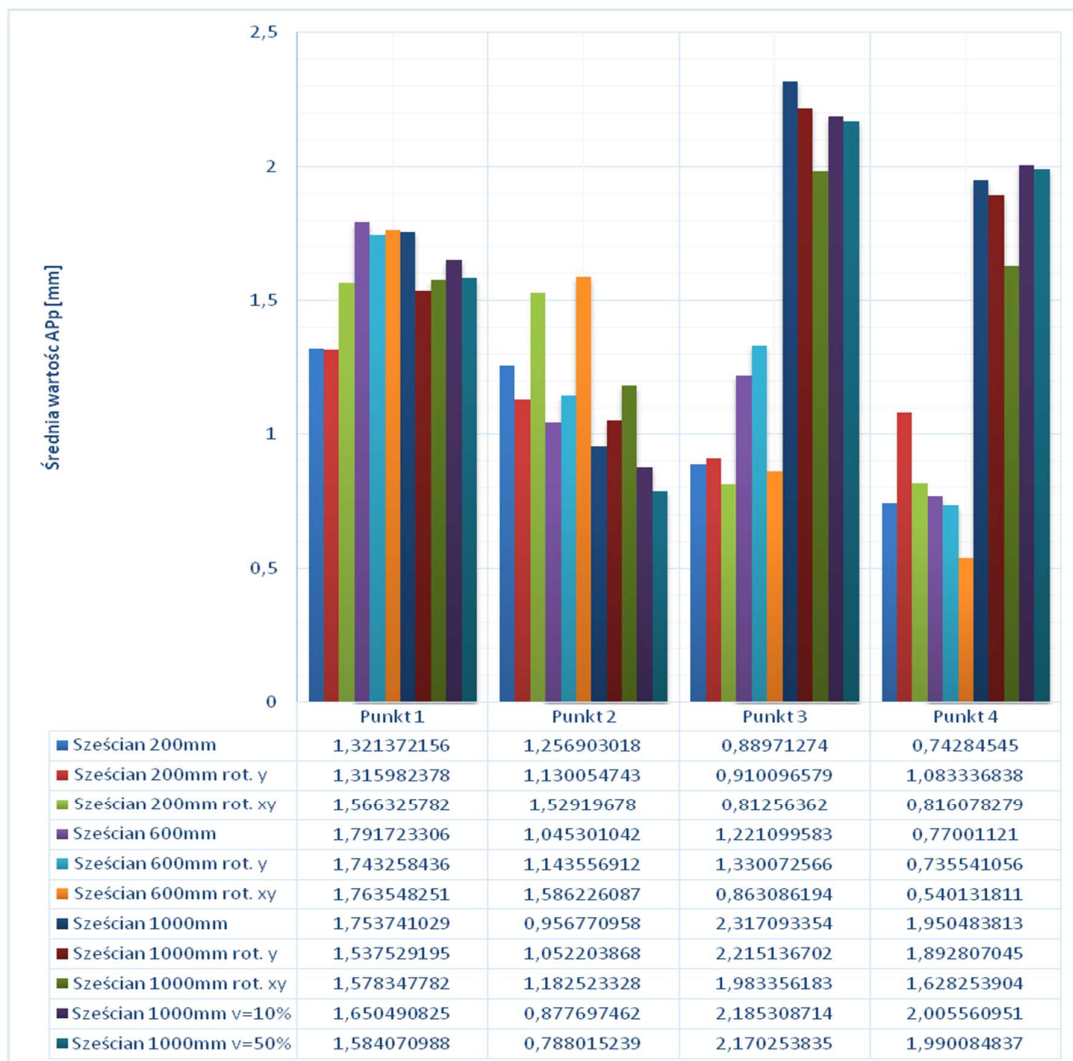
Rys. 6. Dokładność pozycjonowania punktów sześciangu o boku 600 mm, bez rotacji narzędzia



Rys. 7. Dokładność pozycjonowania punktów sześciangu o boku 1000 mm, bez rotacji narzędzia

W przypadku sześciangu o boku 200 mm błędy pozycjonowania wynosiły w poszczególnych punktach: C4 (APp1) 1,23 - 1,59 mm, C3 (APp2) 1,11 - 1,53 mm, C5 (APp3) 0,8 - 0,91 mm i C6 (APp4) 0,74 - 1,1 mm. Stwierdzono znaczące wahania dokładności pozycjonowania w przypadku punktu C4, co może być spowodowane tym, że robot do tej pozycji wykonywał dojazd z punktu Home, umieszczonego w centrum sześciangu pomiarowego. Wyniki badania dokładności pozycjonowania w przypadku sześciangu o boku 600 mm wykazały w poszczególnych punktach następujące błędy pozycjonowania: C4 (APp1) 1,74 - 1,81 mm, C3 (APp2) 1,13 - 1,6 mm, C5 (APp3) 0,87 - 1,22 mm i C6 (APp4) 0,54 - 0,77 mm. W punkcie C6 robot charakteryzuje się zatem bardzo dużą dokładnością pozycjonowania, która nie wymaga zastosowania dodatkowych środków korygujących położenie w razie zastosowania opracowanego programu w przemyśle. Przy pomiarach dokładności pozycjonowania robota w sześciangu o boku 1000 mm stwierdzono w poszczególnych punktach następujące błędy pozycjonowania: C4 (APp1) 1,5 - 1,77 mm, C3 (APp2) 0,95 - 1,04 mm, C5 (APp3) 1,96 - 2,36 mm i C6 (APp4) 1,59 - 1,97 mm. W przypadku punktów C5 oraz C6 wykazano bardzo duże odchylenie od zadanego położenia

i tutaj konieczna będzie korekcja współrzędnych punktów. W przypadku sześcianu pomiarowego o boku 1000 mm dokonano dodatkowych pomiarów przy prędkości ruchu robota ograniczonej odpowiednio do 10% i 50% wartości maksymalnej, jednakże stałej w trakcie poszczególnych prób. Celem takiego działania była chęć sprawdzenia, czy ograniczenie prędkości przejazdu robota ma wpływ na zmniejszenie wartości odchylenia od położenia zadanego. Wyniki badania wskazują następujące błędy pozycjonowania w poszczególnych punktach: C4 1,53 - 1,64 mm, C3 0,78 - 0,87 mm, C5 2,16 - 2,18 mm i C6 2 - 2,01 mm. Na tej podstawie można stwierdzić, że zmiana prędkości przejazdu robota nie ma znaczącego wpływu na różnicę wartości odchylenia od położenia zadanego w poszczególnych próbach. Nie zauważono bowiem, aby wartości odchylenia były wyraźnie bliższe zeru wraz ze zmniejszaniem wartości prędkości robota w poszczególnych przejazdach. Spodziewane zmniejszenie dokładności pozycjonowania można zaobserwować wraz ze wzrostem wielkości sześcianu i stopnia skomplikowania ścieżki tylko wobec sześcianów o boku 200 i 600 mm. Przy większych wymiarach sześcianu pomiarowego dokładność pozycjonowania robota jest zróżnicowana w stosunku do punktów poszczególnych ścieżek i nieprzewidywalna. Należy więc liczyć się z występowaniem tych błędów, gdyż nie można ich uniknąć, np. poprzez programową kompensację.



Rys. 8. Średnie wartości dokładności pozycjonowania robota, w przypadku każdej ze ścieżek, w poszczególnych punktach pomiarowych

5. Badania powtarzalności pozycjonowania

Badania powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego, oznaczonej symbolem RP_i , przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 9283 [27]. Wyniki opracowano, korzystając z danych dotyczących dokładności pozycjonowania. Powtarzalność jest definiowana jako sfera o promieniu równym wartości powtarzalności RP_i i centrum o współrzędnych obliczonych ze średnich współrzędnych poszczególnych punktów pomiarowych zgodnie z zależnościami:

$$RP_i = \bar{l} + 3S_l, \quad (5)$$

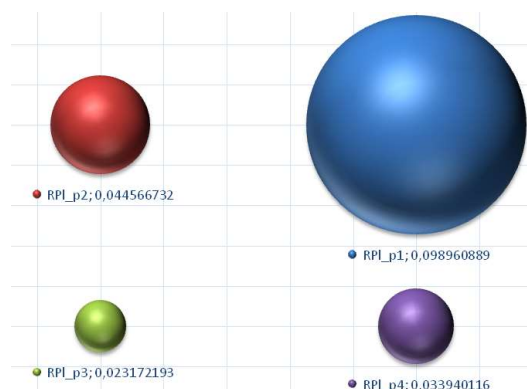
gdzie:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j, \quad (6)$$

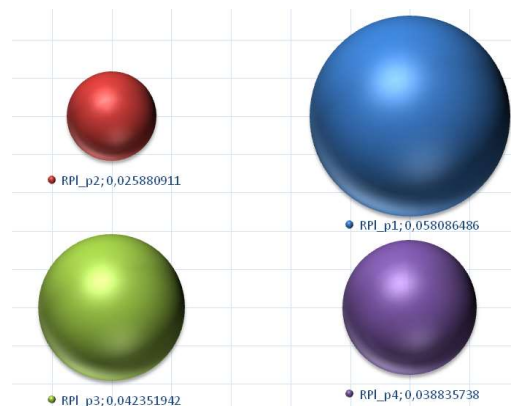
$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}, \quad (7)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}. \quad (8)$$

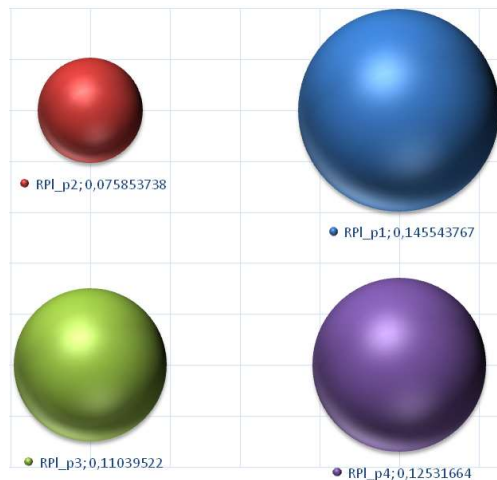
Na rys. 9 - 11 przedstawiono wybrane wyniki wyliczenia powtarzalności pozycjonowania rozpatrywanego robota, podczas osiągnięcia poszczególnych punktów pomiarowych. Utworzone sfery, na poszczególnych rysunkach, wyskalowano względem siebie.



Rys. 9. Powtarzalność pozycjonowania punktów sześcianu o boku 200 mm, z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y



Rys. 10. Powtarzalność pozycjonowania punktów sześcianu o boku 600 mm, z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y

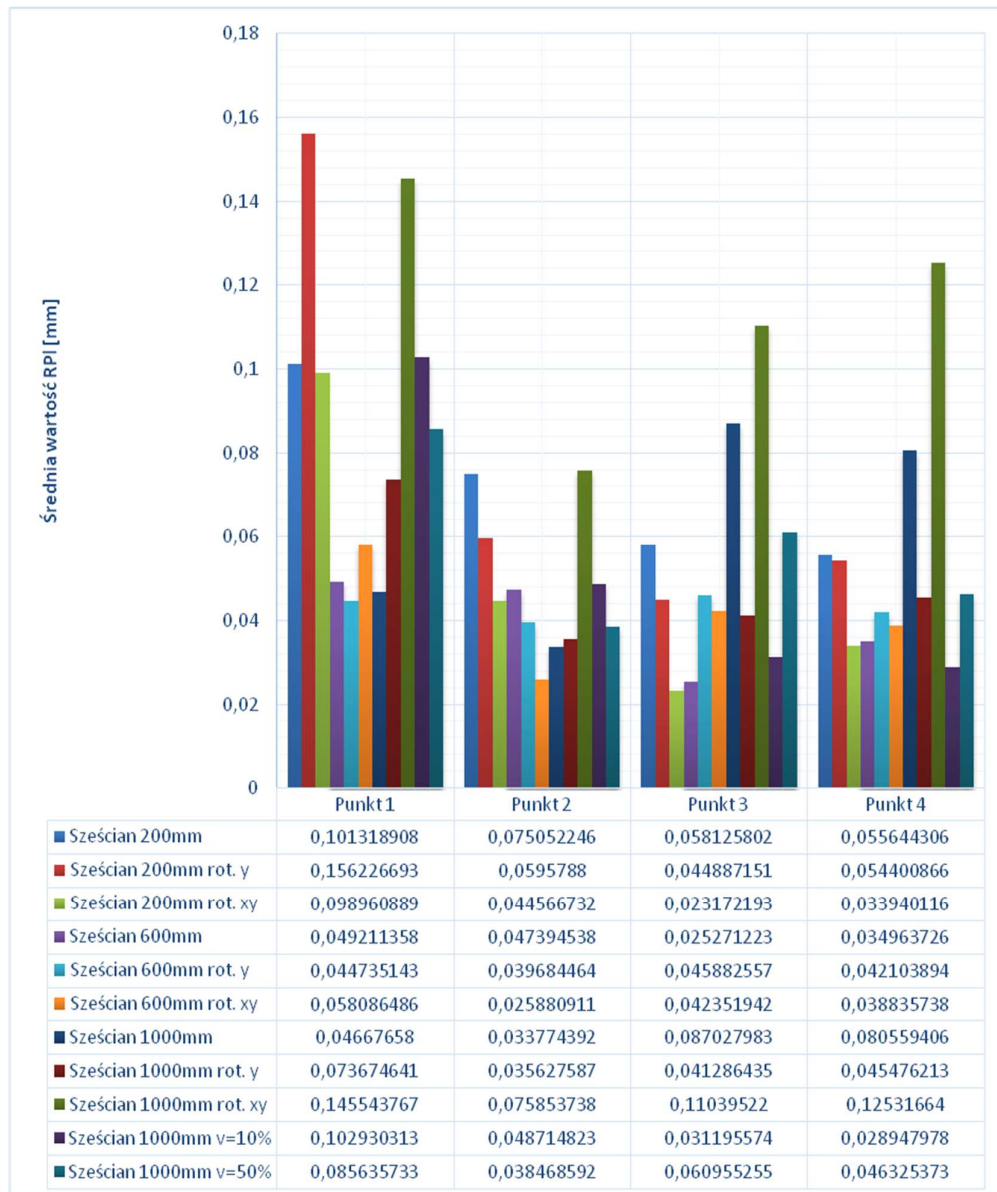


Rys. 11. Powtarzalność pozycjonowania punktów sześcianu o boku 1000 mm, z rotacją narzędzia $+20^{\circ}$ w osiach X oraz Y

Na rys. 12 zestawiono średnie wyniki badania powtarzalności pozycjonowania w czterech punktach pomiarowych sześcianów o bokach 200, 600 i 1000 mm. W poszczególnych pomiarach punkty osiągnięte były:

- bez rotacji narzędzia,
- z rotacją narzędzia o kąt $+20^{\circ}$ względem osi Y,
- z rotacją narzędzia o kąt $+20^{\circ}$ względem osi X oraz Y,
- w przypadku sześcianu o boku 1000 mm dodatkowo bez rotacji narzędzia z prędkościami równymi 10% oraz 50 % prędkości maksymalnej.

Wyniki badania powtarzalności pozycjonowania w przypadku sześcianu o boku 200 mm wykazują błędy powtarzalności w poszczególnych punktach: C4 $0,12 \pm 0,03$ mm, C3 $0,055 \pm 0,015$ mm, C5 $0,035 \pm 0,015$ mm i C6 $0,04 \pm 0,01$ mm. Należy zauważyć, że sfera w punkcie C4 ma wyraźnie większy promień w stosunku do pozostałych sfer. Największą wartość powtarzalności pozycjonowania, w przypadku każdego z punktów pomiarowych, uzyskano natomiast w badaniu z rotacją narzędzia w osiach X oraz Y. W przypadku sześcianu o boku 600 mm wykazano błędy powtarzalności pozycjonowania w poszczególnych punktach: C4 $0,045 \pm 0,005$ mm, C3 $0,03 \pm 0,01$ mm, C5 $0,03 \pm 0,01$ mm i C6 $0,035 \pm 0,005$ mm. Wyznaczone sfery błędów powtarzalności pozycjonowania sześcianu pomiarowego o boku 600 mm są bardziej równomierne, niż sześcianu pomiarowego o boku 200 mm. Oprócz równomierności pomiarów należy również zauważyć, że ich małe wartości świadczą o bardzo dobrej powtarzalności robota. W przypadku sześcianów o boku 1000 mm wykazano błędy powtarzalności w poszczególnych punktach: C4 $0,055 \pm 0,015$ mm, C3 $0,055 \pm 0,015$ mm, C5 $0,075 \pm 0,035$ mm i C6 $0,08 \pm 0,04$ mm. Sfery mają dużą rozbieżność wartości powtarzalności w każdym z punktów pomiarowych. Nie można zatem ustalić, który z punktów był osiągnięty z najlepszą powtarzalnością. W wyniku badania powtarzalności pozycjonowania ze zmienną prędkością przejazdu wykazano następujące błędy powtarzalności pozycjonowania w poszczególnych punktach: C4 $0,09 \pm 0,01$ mm, C3 $0,035 \pm 0,005$ mm, C5 $0,045 \pm 0,015$ mm i C6 $0,03 \pm 0,01$ mm. Wyniki uzyskane podczas badań ze zmniejszoną prędkością przejazdu sugerują, że mała prędkość nie zmienia wartości powtarzalności pozycjonowania i nie jest uzasadnione jej zmniejszanie w celu uzyskania lepszej powtarzalności.



Rys. 12. Średnie wartości powtarzalności pozycjonowania RP_i każdej ze ścieżek w poszczególnych punktach pomiarowych

Jak zaobserwowano, powtarzalność pozycjonowania robota jest zróżnicowana w punktach pomiarowych poszczególnych ścieżek. Na podstawie wszystkich prób nie można wykazać żadnego ukształtowanego trendu zależności powtarzalności pozycjonowania robota. W przypadku badanego robota przemysłowego uzyskane wartości powtarzalności pozycjonowania nie stanowią jednak istotnego problemu podczas tworzenia programów w trybie offline, gdyż wartości odchyłek są pomijalnie małe względem zadań, do jakich dany robot może być zastosowany (głównie spawanie).

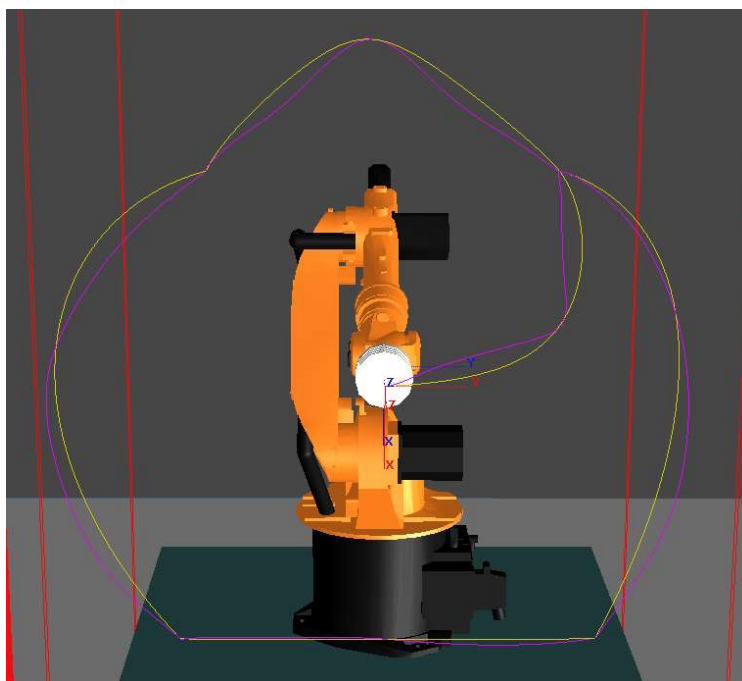
6. Badanie odwzorowania ścieżki ruchu robota w środowiskach rzeczywistym i wirtualnym

Badanie odwzorowania ścieżki miało na celu określenie, w jaki sposób ruchy robota przemysłowego, zaprogramowane w środowisku wirtualnym programowania offline, są

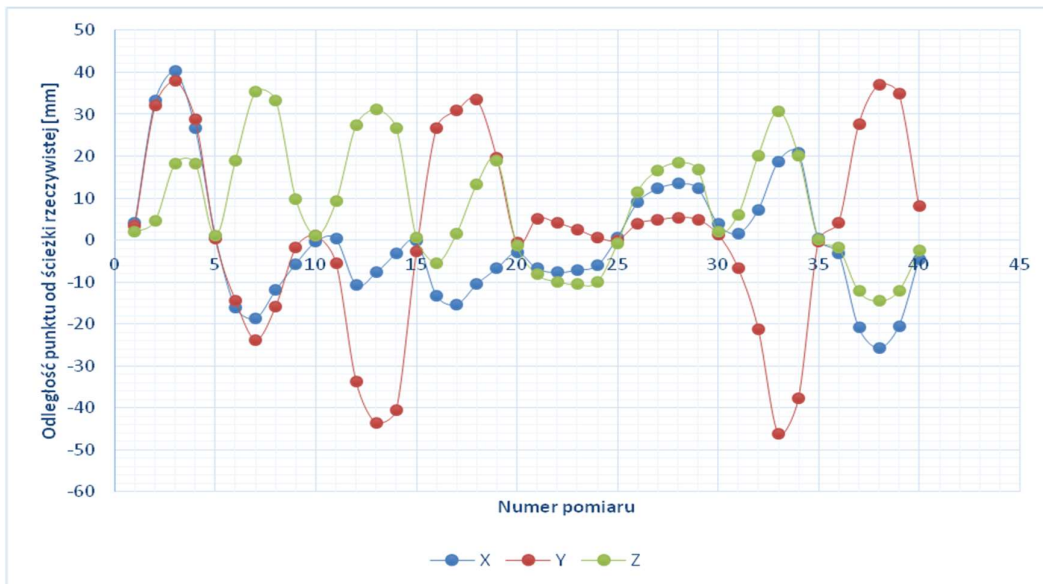
odzworowywane w rzeczywistości. Do tego celu w programie Robcad użyta została opcja „TCP track”, za pomocą której możliwe jest utworzenie punktów w miejscu TCP, na torze ruchu robota. Aby zarejestrować tor ruchu robota rzeczywistego, zastosowano tracker Faro. Ze względu na fakt, że ruch robota nie odbywał się po ścieżce przeprowadzanej prostopadle do trackera, sonda musiała być okresowo przestawiana w stronę trackera (kąt widzenia SMR to 30°). Prędkość przejazdu robota zmniejszono do 150mm/min. Po przeprowadzeniu pomiarów skopiowano współrzędne punktów, zmierzone przez tracker Faro, do programu Robcad. W tym celu zastosowano makropolecenie programu Microsoft Excel, które rejestrowało referencyjne punkty pomiarowe oddalone od siebie o 10 mm.

Zarejestrowaną w ten sposób ścieżkę robota rzeczywistego porównano w utworzonych punktach referencyjnych ze ścieżkami wygenerowanymi w programie Robcad. W pierwszym przypadku zarejestrowany przebieg ścieżki robota rzeczywistego porównano ze ścieżką symulowaną w trybie „default” (standardowo dostarczony wraz z programem Robcad), w drugim w trakcie symulacji użyto narzędzia Robot Controller Software (RCS) „Kuka_KRC1_Spot”.

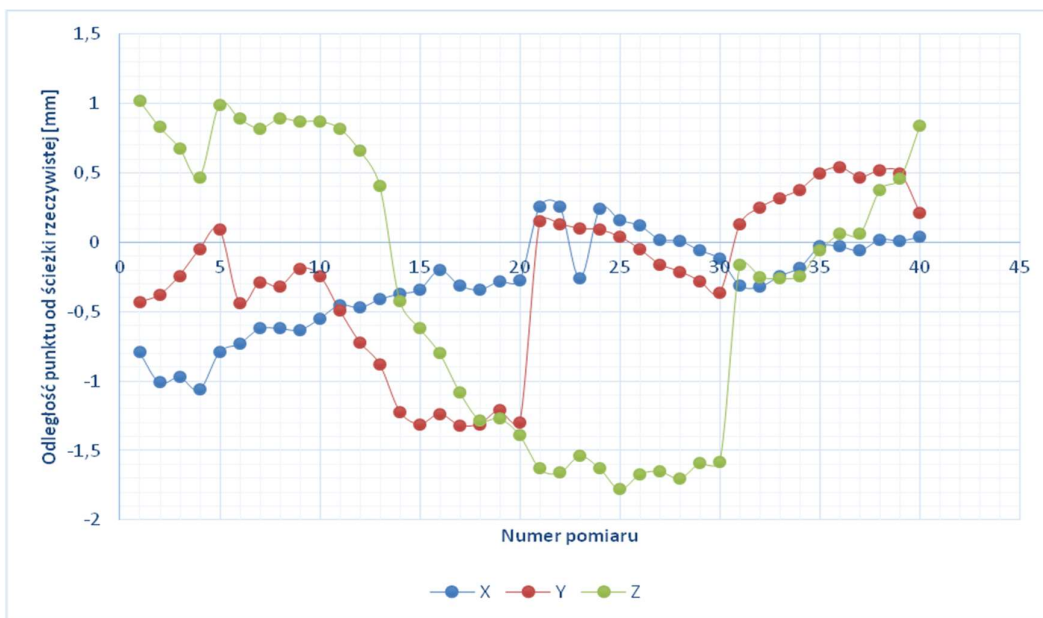
Na rys. 13 przedstawiono graficznie różnice pomiędzy przebiegiem otrzymanych ścieżek w jednej z płaszczyzn w środowisku wirtualnym w trybie „default” (kolor fioletowy) oraz z narzędziem RCS (kolor żółty). Na rys. 14 i 15 pokazano szczegółowo odchylenia w poszczególnych osiach ścieżki symulowanej w środowisku wirtualnym względem ścieżki zmierzonej na robocie rzeczywistym, odpowiednio w przypadku symulacji w trybie „default” (rys 14) oraz z użyciem narzędzia RCS Kuka_KRC1_Spot (rys. 15). Na rys. 16 przedstawiono natomiast graficzne porównanie ścieżek utworzonych przez program Robcad oraz ścieżki rzeczywistej ruchu robota z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y. Wyraźnie widoczne jest, że ścieżka rzeczywista (kolor niebieski) pokrywa się ze ścieżką utworzoną z użyciem narzędzia RCS (kolor żółty), natomiast znacząco różni się ze ścieżką utworzoną w trybie „default” (kolor fioletowy).



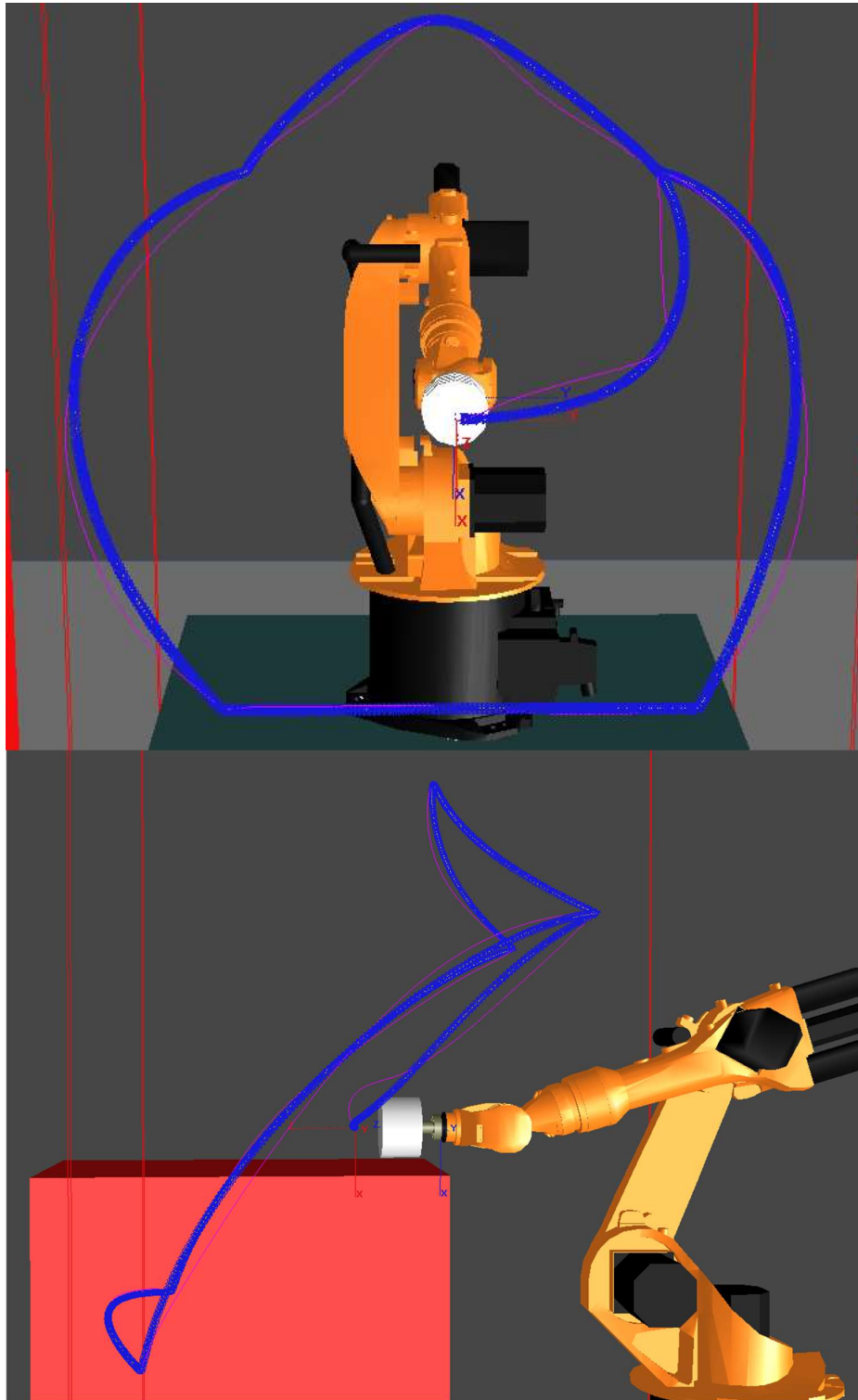
Rys. 13. Ścieżki utworzone przez program Robcad podczas przejazdu z pozycji Home z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y: Kolor fioletowy - ścieżka utworzona w trybie symulacji „default”, żółty - w trybie symulacji z narzędziem RCS



Rys. 14. Odchylenia ścieżki z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y w programie Robcad w trybie „default” względem ścieżki zmierzonej przez tracker Faro



Rys. 15. Odchylenia ścieżki z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osiach X oraz Y w programie Robcad z narzędziem RCS Kuka_KRC1_Spot względem ścieżki zmierzonej przez tracker Faro



Rys. 16. Porównanie ścieżek utworzonych przez program Robcad oraz ścieżki rzeczywistej z rotacją narzędzia $+20^\circ$ w osi X oraz Y. Ścieżki: rzeczywista – kolor niebieski, symulowana w trybie „default” – kolor fioletowy, symulowana z narzędziem RCS – kolor żółty

6. Podsumowanie

Programowanie robotów w środowisku offline jest w dużym stopniu uzależnione od dokładnego odwzorowania elementów ich rzeczywistego otoczenia, jak również ich rozmieszczenia. Dlatego istotne jest to, aby pomiary obiektów w środowisku pracy robota rzeczywistego były przeprowadzone starannie i dokładnie. Bardzo istotne jest również wyznaczenie bazy robota (work object) oraz jego punktu TCP. Zadanie to wymaga dużej precyzji. Doświadczenie i umiejętności osoby odpowiedzialnej za pomiary odgrywają kluczową rolę w programowaniu offline, a także uruchomieniu robota rzeczywistego.

Przy tworzeniu programów w środowisku offline trzeba uwzględnić także pewne niedoskonałości robota przemysłowego, a więc jego dokładność i powtarzalność pozycjonowania. Jak wykazano w trakcie badań, są to wielkości, których nie można precyzyjnie przewidzieć. Dokładność nowoczesnych robotów przemysłowych obecnie użytkowanych w większości zakładów produkcyjnych, może stanowić istotny problem dla programistów. Jak bowiem wykazano, podczas pomiarów dokładności osiągnięcia zadanych punktów pomiarowych, w przypadku sześcianu o boku 1000 mm, jeden z punktów osiągnięty był z błędem 2,21 mm w stosunku do pozycji zadanej. Wartość ta jest nie do przyjęcia i musi zostać poddana korekcie w trakcie programowania online. Należy zauważyć, że błąd ten pojawi się niezależnie od tego, jak dobrze wykonano program w środowisku offline, czy też jak precyzyjnie dokonano pomiarów otoczenia robota rzeczywistego i jego odwzorowania w środowisku wirtualnym. Nawet najlepiej napisany program offline może okazać się bowiem nieadekwatny do środowiska rzeczywistego. Niezmiernie istotne jest więc, aby osoba, która odpowiedzialna jest za zaprogramowanie robota rzeczywistego w środowisku jego pracy, zweryfikowała punkty toru jego ruchu, zwracając szczególną uwagę na te z nich, które znajdują się w pobliżu elementów otoczenia lub też są punktami procesowymi w operacjach takich, jak klejenie czy spawanie. Wprowadzona poprawka programu opracowanego offline zostanie utrzymana podczas pracy robota dzięki dużej powtarzalności, której wartość w najgorszym wypadku w trakcie badań wynosiła 0,15 mm. Zapewnia to uzyskanie zadanego położenia robota z wymaganą precyzją.

Ważnym elementem jest również użytkowanie odpowiedniego oprogramowania w środowisku offline, gdyż ścieżki ruchu robota rzeczywistego mogą mieć poważne odchylenia od programów tworzonych w tym środowisku. Wprowadza to zagrożenie dla sprzętu zrobotyzowanej celi i może doprowadzić do kolizji. Odpowiednie oprogramowanie pozwala na pracę offline, bez obawy, że rzeczywisty robot będzie poruszał się po ścieżkach znacząco innych niż robot w symulacji. Przeprowadzając porównanie ścieżki ruchu robota przemysłowego symulowanego w środowisku 3D z warunkami rzeczywistymi, wykazano istotne rozbieżności w razie stosowania standardowego oprogramowania (trybu „default”). Mogą być one istotnie zredukowane dzięki zastosowaniu dodatkowego narzędzia Robot Controller Software, oferowanego do systemu Robcad.

W trakcie przeprowadzonych badań dokonano weryfikacji dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego oraz precyzji odwzorowania ścieżek ruchu, opracowanych w trakcie programowania offline, przez robot rzeczywisty. Przedstawiona metoda pomiarowa umożliwiła ponadto ocenę wpływu na te parametry ruchu robota takich czynników, jak jego obciążenie, czy też temperatura otoczenia. W niniejszej pracy omówiono najbardziej istotne aspekty programowania robotów offline i online. W celu pełnej oceny precyzji działania robota przemysłowego należy uwzględnić również dodatkowe parametry jego pracy, jak odwzorowanie zachowania rotacji w punktach procesowych, pomiary dynamiki robota itd. Zagadnienia te są przedmiotem dalszych badań, a ich wyniki zostaną przedstawione w kolejnych opracowaniach autorów.

Literatura

- [1] Banaś W, Herbuś K, Kost G, Nierychlok A, Ociepka P, Reclik D. Simulation of the Stewart platform carried out using the Siemens NX and NI LabVIEW programs. *Advanced Materials Research* 2014; 837(1): 537-542.
- [2] Bocian M., Jamroziak K., Kulisiewicz M. An identification of nonlinear dissipative properties of constructional materials at dynamical impact loads conditions. *Meccanica* 2014; 49(8): 1955-1965.
- [3] Brink J., Hinds B., Haney A. Robotics repeatability and accuracy: another approach. *Texas Journal of Science* 2004; 56 (2): 149–156.
- [4] Buchacz A., Płaczek M., Wróbel A. Modelling of passive vibration damping using piezoelectric transducers – the mathematical model. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (2): 301–306.
- [5] Cholewa A, Świder J, Zbilski A. Verification of forward kinematics of the numerical and analytical model of Fanuc AM100iB robot. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016; 145(1): 052001.
- [6] Conrad K.L., Shiakolas P.S., Yih T. C. Robotic calibration issues: accuracy, repeatability and calibration. *Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED 2000)*, Rio, Patras, GREECE, 17-19 July 2000.
- [7] Du G., Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2013; 29 (1): 484–492.
- [8] Dymarek A, Dzitkowski T, Herbuś K, Kost G, Ociepka P. Geometric analysis of motions exercised by the Stewart platform. *Advanced Materials Research* 2014; 837(1): 351-356.
- [9] Gürsel A., Bijan S. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory* 2005; 40 (8): 879–906.
- [10] Herbuś K, Kost G, Reclik D, Świder J. Integration of a virtual 3D model of a robot manipulator with its tangible model (phantom). *Advanced Materials Research* 2104; 837(1): 582-587.
- [11] Jamroziak K., Bocian M., Kulisiewicz M. Energy consumption in mechanical systems using a certain nonlinear degenerate model. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2013; 51 (4): 827-835.
- [12] Kluz, R. i Trzepieciński, T. The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm. *Assembly* 2014; 34 (3): 285–295.
- [13] Płaczek M. Conception of the system for traffic measurements based on piezoelectric foils. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2016; 145 (1): 042025.
- [14] 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; 10 (4): 504–516.
- [15] Motta J.M., Carvalho G. C., McMaster R.S. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 2001; 17 (1): 487–497.
- [16] Nubiola A., Bonev I.A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar. *Precision Engineering* 2014; 38 (1): 472–480.
- [17] Nubiola A., Bonev I. A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2013; 29 (1): 236–245.
- [18] Płaczek M, Buchacz A, Wróbel A. Use of piezoelectric foils as tools for structural health monitoring of freight cars during exploitation. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (3): 443–449.

- [19] Shiakolas P. S., Conrad K. L., Yih T. C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *International Journal of Modelling and Simulation* 2002; 22 (3): 1–10.
- [20] 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; 26 (1): 74–82.
- [21] Şirinterlikçi A., Tiryakioğlu M., Bird A., Harris A., Kweder K. Repeatability and accuracy of an industrial robot: laboratory experience for a design of experiments course. *The Technology Interface Journal* 2009; 9 (2): 1-10.
- [22] Spong M. W., Vidyasagar M. *Robot Dynamics and Control*, Wiley, 1989.
- [23] Weichert F., Bachmann D., Rudak B., Fisseler D. Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller. *Sensors* 2013; 13(5): 6380-6393.
- [24] Wiśniewski M. Proposed method for measuring the accuracy and repeatability of positioning of industrial robots in industrial conditions. *Technologia i Automatyzacja Montazu* 2014; 3 (1): 39–43 (In Polish).
- [25] Wiśniewski M. *Research of precision and repeatability of industrial robots*. Poznań University of Technology Publishing house, 2015, Poznań.
- [26] Young K., Pickin C.G. Accuracy assessment of the modern industrial robot. *Industrial Robot: An International Journal* 2000; 27 (6): 427-436.
- [27] PN-EN 9283:2003.
- [28] www.factory-metrology.faro.com/pl/kalibracja-robotow (Access: 06.08.2017).