

Badanie dokładności pozycjonowania robota przemysłowego UR20

Iwona Pająk

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. Z. Szafrana 4, 65-516 Zielona Góra

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wyznaczania dokładności pozycjonowania robota UR20 firmy Universal Robots. Badania prowadzono zgodnie wytycznymi normy ISO 9283, a do rejestracji położenia robota zastosowano system wizyjny OptiTrack. Głównym celem badań było wyznaczenie dokładności pozycji, dokładność orientacji stanowi wynik pomocniczy. Eksperyment przeprowadzono dla czterech alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki, umożliwiających osiągnięcie tych samych położeń interfejsu mechanicznego robota w sześcianie pomiarowym zdefiniowanym zgodnie z wytycznymi normy ISO 9283. Średnie dokładności pozycji dla testowanych konfiguracji różniły się o około 1,5 mm, a stosunek wartości maksymalnej do minimalnej wyniósł około 2,6. Średnie błędy orientacji były zbliżone, a stosunek wartości maksymalnej do minimalnej wyniósł około 1,2. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że konfiguracja początkowa robota ma istotny statystycznie wpływ na dokładność pozycjonowania. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę uwzględniania alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki jako parametru decyzyjnego przy planowaniu trajektorii robota.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, ISO 9283, model kinematyki, dokładność pozycjonowania, OptiTrack

1. Wprowadzenie

Zadania stawiane przed robotami przemysłowymi wymagają wysokiej powtarzalności ruchów i dużej dokładności pozycjonowania. Definicje wskaźników oceny takich jak powtarzalność i dokładność oraz metody ich wyznaczania wprowadza norma ISO 9283 z 1998 r. [A1] (norma została sprawdzona w 2021 r. i uznana za aktualną). Współczesne roboty przemysłowe charakteryzują się wysoką powtarzalnością co oznacza, że zmienność pozycji i orientacji efektora podczas ruchu do tego samego położenia jest niewielka. Dokładność pozycjonowania, czyli zdolność do osiągnięcia określonej pozycji i orientacji jest na ogół gorsza. Badania wykazują, że na dokładność pozycjonowania robota wpływa wiele czynników, począwszy od odchyłeń rzeczywistych parametrów kinematycznych od wartości nominalnych [22], przez zmiany temperatury otoczenia i luzu w przekładniach [9], aż do pozycji, które robot powinien osiągnąć [18]. Znajomość parametrów eksploatacyjnych, takich jak dokładność czy powtarzalność jest istotna zarówno na etapie projektowania i doboru robotów przemysłowych, jak

i podczas planowania ruchów [17] czy eksploatacji. Producenci nie zawsze udostępniają wartości wszystkich parametrów eksploatacyjnych.

W literaturze można wyróżnić kilka podejść do badania dokładności czy powtarzalności robotów przemysłowych. W wielu badaniach wykorzystywane są laserowe systemy śledzące (ang. *laser tracker*), które zapewniają bardzo wysoką dokładność pomiaru współrzędnych 3D (rzędu kilkunastu mikrometrów), a także duży zasięg i mobilność systemu. Do ograniczeń tego typu rozwiązań należy zaliczyć wymóg nieprzerwanej linii widzenia, wrażliwość na warunki środowiskowe, wysokie koszty oraz konieczność zastosowania dodatkowego oprzyrządowania w przypadku potrzeby pomiaru orientacji obiektu [11]. Zastosowanie laser trackerów do oceny dokładności pozycjonowania zostało przedstawione w wielu pracach [4, 7, 9, 15, 21], gdzie analizowano odpowiednio roboty: ABB IRB 4600, ABB IRB 1600, KUKA KR5, KUKA KR210 R2700 Prime oraz Universal Robots UR5, natomiast w pracy [23] zaprezentowano użycie systemu laserowego do poprawy dokładności robota Stäubli TX60.

Kalibracja i weryfikacja dokładności pozycjonowania robotów realizowana jest także za pomocą maszyn współrzędnościowych (CMM), które, podobnie jak laser trackery, umożliwiają bardzo precyzyjny pomiar (rzędu od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów), jednak cechują się ograniczonym zasięgiem oraz wysokimi kosztami i wymaganiami środowiskowymi. W pracach [10, 16] przeprowadzono skuteczną kalibrację manipulatora Mitsubishi PA10-6CE przy użyciu kontaktowej maszyny CMM (Brown & Sharpe MicroVal PFX 454) oraz robota ABB IRB 120 z wykorzystaniem optycznej maszyny współrzędnościowej (Creaform C-Track).

Autor korespondujący:

Iwona Pająk, i.pajak@iim.uz.zgora.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 12.05.2025 r., przyjęty do druku 16.01.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

Analiza dokładności działania robotów jest również realizowana za pomocą specjalizowanych, dedykowanych rozwiązań, polegających m.in. na zastosowaniu enkoderów liniowych do kontaktowego pomiaru przemieszczeń z dokładnością rzędu kilku mikrometrów [18], triangulacyjnych czujników pomiarowych [3] czy systemów wizyjnych [6] wyposażonych w kamery przemysłowe i zestawy markerów, przy czym systemy te wymagają indywidualnej integracji z robotem i są mniej elastyczne w stosunku do innych metod pomiarowych.

Kolejną kategorię urządzeń, które mogą być stosowane do oceny dokładności pozycjonowania czy kalibracji robotów stanowią systemy optycznego śledzenia ruchu (ang. *motion capture*), które umożliwiają bezkontaktowy pomiar pozycji i orientacji wielu markerów w czasie rzeczywistym, elastyczną konfigurację, niższy koszt i możliwość pracy w warunkach przemysłowych, jednak ich dokładność jest niższa niż w przypadku systemów CMM czy laser tracker. Jak pokazuje analiza literatury systemy tego typu wykorzystywane są do oceny i poprawy dokładności robotów. W pracy [13] autorzy wykorzystali optyczny system śledzenia 3D Camsense S do kalibracji robota Universal Robots UR10. System OptiTrack firmy NaturalPoint był wykorzystywany do korekty ruchów robota Yaskawa dla trajektorii zaplanowanej off-line [8], kalibracji kinematycznej robota Franka Emika Panda zamontowanego na mobilnej platformie PAL Tiago-base [24], oceny niepewności lokalizacji odometrycznej robota mobilnego QBot 2e [2] oraz oceny możliwości badania położenia obiektów w ruchu [5].

Analiza literatury wskazuje, że istnieje zainteresowanie ustaleniem bezwzględnej dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych, w tym również robotów firmy Universal Robots. Potrzeba prowadzenia takich badań wynika z faktu, że dokumentacja techniczna robotów tej firmy ogranicza się do informacji o powtarzalności, pomijając dokładność pozycjonowania oraz inne wskaźniki opisujące dynamikę pracy manipulatora. Tymczasem w wielu zastosowaniach (np. montaż precyzyjny, obróbka, aplikacje metrologiczne) dokładność absolutna ma kluczowe znaczenie. Dodatkowo w literaturze nie znaleziono opublikowanych wyników badań dokładności modelu UR20, a wyniki badań dotyczących modeli UR5 i UR10 wykazują istotne rozbieżności w raportowanych wartościach. W pracy [7] autorzy przeprowadzają eksperyment i wyznaczają błędy pozycjonowania robota UR5 rzędu 1,773 mm (błąd średni) i 3,993 mm (błąd maksymalny), w pracy [18] pokazano, że błędy pozycjonowania tego samego modelu nie przekraczają 0,03 mm, co oznacza, że są niższe od deklarowanej przez producenta powtarzalności robota. W pracy [13] autorzy zajmują się kalibracją robota UR10, a z podanych parametrów wynika, że dokładność tego modelu przed procesem kalibracji wynosiła 5,082 mm oraz 15,249 mm dla dwóch różnych zbiorów punktów. Tak znaczne różnice wskazują, że dokładność bezwzględna robotów tej klasy jest silnie zależna od warunków pomiaru, przyjętej metodyki oraz potencjalnie od konfiguracji kinematycznej manipulatora. Jednocześnie zagadnienie wpływu konfiguracji na parametry dokładnościowe było dotychczas analizowane głównie w kontekście powtarzalności [19], brakuje natomiast jednoznacznych badań eksperymentalnych oceniających wpływ alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki na dokładność bezwzględną robota współpracującego nowej generacji takiego jak model UR20.

Celem pracy jest ocena dokładności pozycjonowania robota UR20 zgodnie z definicją przedstawioną w normie ISO 9283. Praca koncentruje się na wyznaczeniu dokładności pozycji, natomiast wyniki dotyczące orientacji przedstawiono jako parametry uzupełniające w celu pełniejszej charakterystyki zachowania manipulatora. Zaproponowana metodyka badań pozwoliła ponadto na ocenę wpływu wyboru konfiguracji początkowej (jednego z alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki) na dokładność pozycjonowania robota. Wkład prezentowanej pracy polega na:

- przedstawieniu pierwszych, według wiedzy autora, eksperymentalnych wyników badania dokładności bezwzględnej robota UR20,
- przeprowadzeniu porównawczej analizy dokładności dla alternatywnych konfiguracji kinematycznych prowadzących do tej samej pozycji i orientacji efektora,
- ilościowej ocenie istotności statystycznej wpływu konfiguracji na dokładność bezwzględną.

Przeprowadzenie zaprezentowanych badań umożliwiły środki z konkursu Regionalna Inicjatywa Doskonałości, które zostały przyznane w ramach projektu Centra Doskonałości Naukowej i Technologicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Inwestycja wzbogaciła posiadaną bazę sprzętową o robota współpracującego UR20 firmy Universal Robots, skaner 3D CMM serii VL-700 firmy Keyence oraz OptiTrack Motion Capture System firmy NaturalPoint.

2. Metodyka badań

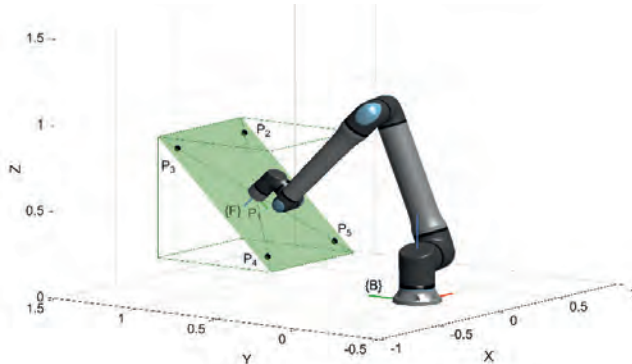
2.1. Procedura badania dokładności pozycjonowania wg ISO 9283

Definicje parametrów, takich jak dokładność pozycjonowania czy powtarzalność robotów przemysłowych, a także zestaw testów umożliwiających ich wyznaczanie, zapewniając jednocześnie porównywalność otrzymanych wyników wprowadzając dwie główne normy: ANSI/RIA R15.05 oraz ISO 9283. W prezentowanej pracy realizację badania dokładności pozycjonowania przeprowadzono bazując na wytycznych normy ISO 9283. Norma ta wprowadza szereg warunków, które należy spełnić w celu prawidłowego przeprowadzenia badania:

- robot musi być zamontowany i uruchomiony zgodnie z zaleceniami producenta,
- testy powinny być poprzedzone cyklem pracy pozwalającym na rozgrzanie napędów,
- jeżeli temperatura otoczenia może być kontrolowana, należy ją utrzymywać na poziomie (20 ± 2) °C,
- mierzone pozycje i orientacje należy wyrazić w układzie bazowym robota lub w układzie zdefiniowanym przez system pomiarowy,
- punkt pomiarowy powinien znajdować się w pewnej odległości od interfejsu mechanicznego,
- całkowita niepewność pomiaru nie powinna przekraczać 25 % wielkości badanej cechy,
- pomiary należy wykonać po ustabilizowaniu się robota w osiągniętym położeniu,
- testy należy przeprowadzać przy obciążeniu wynoszącym 100 % obciążenia znamionowego, dodatkowe testy mogą być prowadzone przy obciążeniu zredukowanym do 10 % obciążenia znamionowego,
- prędkości podczas ruchu pomiędzy pozycjami wykorzystywanymi w testach powinny być ustawione na 100 % prędkości możliwej do osiągnięcia, dodatkowe testy można prowadzić dla prędkości zredukowanych do 50 % i 10 %.

Norma wprowadza również sposób definiowania zestawu poleceń układu związanego z interfejsem mechanicznym, dla których należy przeprowadzić badanie dokładności. Interfejs mechaniczny w trakcie testu powinien kolejno znaleźć się w pięciu punktach od P_1 do P_5 , znajdujących się na płaszczyźnie zdefiniowanej w oparciu o sześcian pomiarowy umieszczony w części przestrzeni roboczej najczęściej wykorzystywanej podczas pracy robota. Punkt P_1 znajduje się w centrum sześcianu pomiarowego, a punkty od P_2 do P_5 leżą na przekątnych płaszczyzny w odległości (10 ± 2) % długości przekątnych od narożników sześcianu pomiarowego. W przeprowadzonym badaniu punkty te zostały wyznaczone dla sześcianu o boku o długości 0,7 i w środku, któ-

rego współrzędne opisane w układzie podstawy robota $\{B\}$ wynoszą ${}^B P_1 = [0 \ 1 \ 0,5]$ (w pracy przyjęto, że, o ile nie zostaną podane inne jednostki, to wymiary liniowe są podawane w metrach [m], a wymiary kątowe w radianach [rad]). Dodatkowo przyjęto, że podczas wykonywania badania orientacja układu $\{F\}$ związanego z interfejsem mechanicznym będzie utrzymywana w taki sposób, że płaszczyzna interfejsu będzie równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez punkty od P_1 do P_5 . Sześcian pomiarowy, punkty od P_1 do P_5 oraz robot w przykładowej konfiguracji początkowej wraz z układami $\{B\}$ oraz $\{F\}$ zostały pokazane na rys. 1 (osie X, Y i Z układów, zgodnie z przyjętą powszechnie konwencją, oznaczone zostały odpowiednio kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim).



Rys. 1. Robot UR20 i definicje punktów od P1 do P5 stosowane w badaniu dokładności pozycjonowania

Fig. 1. UR20 robot and points definitions from P1 to P5 used in the positioning accuracy test

Ostatecznie właściwy test, zgodnie z zaleceniami normy, polega na 30-krotnym powtórzeniu zadania polegającego na przemieszczeniu interfejsu mechanicznego robota między punktami od P_1 do P_5 . W badaniu dokładności pozycjonowania ruch między kolejnymi dwoma punktami może być realizowany w trybie od punktu do punktu, a pomiary powinny być wykonywane tylko w punktach docelowych.

Zebrane wyniki testów pozwalają na ustalenie dokładności pozycji AP_p oraz dokładności orientacji AP_a , AP_b , AP_c za pomocą zależności:

$$\begin{aligned} AP_p &= \sqrt{(\bar{x} - x^c)^2 + (\bar{y} - y^c)^2 + (\bar{z} - z^c)^2}, \\ AP_a &= (\bar{a} - a^c), \\ AP_b &= (\bar{b} - b^c), \\ AP_c &= (\bar{c} - c^c), \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: x^c , y^c , z^c – współrzędne zadanej pozycji; a^c , b^c , c^c – rotacje wokół osi X, Y, Z opisujące zadaną orientację; $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum y_i$, $\bar{z} = \frac{1}{m} \sum z_i$, $\bar{a} = \frac{1}{m} \sum a_i$, $\bar{b} = \frac{1}{m} \sum b_i$, $\bar{c} = \frac{1}{m} \sum c_i$; m – liczba cykli pomiarowych ($m = 30$); x_i , y_i , z_i , a_i , b_i , c_i – współrzędne oraz rotacje otrzymane z systemu pomiarowego (zgodnie z wytycznymi normy powinny być wyrażane w układzie bazowym robota albo w układzie systemu pomiarowego).

2.2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono w laboratorium Instytutu Inżynierii Mechanicznej (IIM) Uniwersytetu Zielonogórskiego. Laboratorium jest klimatyzowane co pozwoliło na spełnienie warunków dotyczących temperatury narzucanych przez normę ISO 9283. Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 2. Robot UR20 jest zamontowany na wysokości 1 m na kolumnie firmy Item, zaprojektowanej dla przenośnych robotów współpracujących. System przechwytywania ruchu OptiTrack składa się z sześciu kamer Prime^x 13, zamontowanych na statywach rozmieszczonych wokół robota w średniej odległości około 4 m.



Rys. 2. Robot UR20 i OptiTrack Motion Capture System w laboratorium IIM

Fig. 2. UR20 robot and OptiTrack Motion Capture System in IIM laboratory

2.2.1. Robot przemysłowy UR20

Robot UR20 to pierwszy z nowej generacji robotów współpracujących Universal Robots. Prezentacja robota odbyła się na targach Automatica w 2022 r. i zgodnie z informacjami producenta charakteryzuje się on nową konstrukcją przegubów, pozwalającą na realizację krótszych cykli roboczych. W tabeli 1 zebrano podstawowe parametry robota z jego specyfikacji technicznej.

Tabela 1. Podstawowe parametry robota UR20

Table 1. Basic parameters of the UR20 robot

Parametr	Wartość
Udźwig	20 kg, 25 kg (przy spełnieniu warunków)
Zasięg	1750 mm
Stopnie swobody	sześć przegubów obrotowych
Zakresy pracy	$\pm 360^\circ$ dla wszystkich przegubów
Powtarzalność (ISO 9283)	$\pm 0,1$ mm

Planowanie ruchów robota realizowane jest przez sterownik, który wykorzystuje model matematyczny oparty na parametrach kinematycznych wyznaczonych zgodnie z konwencją Denavit-Hartenberga (DH). Producent podaje nominalne wartości parametrów DH dla różnych modeli swoich robotów [A2], dodatkowo każdy egzemplarz robota przechodzi kalibrację fabryczną, a wyznaczone poprawki kalibracyjne zapisywane są w wewnętrznym systemie plików. W tabeli 2 zebrano nominalne wartości parametrów robota UR20 oraz poprawki kalibracyjne egzemplarza zastosowanego w badaniach.

Duże zainteresowanie robotami współpracującymi produkowanymi przez Universal Robots (firma publikuje informacje o ponad 50 % udziale w rynku robotów współpracujących) przyczynia się również do wielu publikacji poświęconych kinematyce czy analizie osobliwości kinematycznych robotów tego typu. Ze względu na charakterystykę konstrukcji robotów UR mechanizmy tego typu mają specyficzne cechy. Jak pokazano w pracy [14] ogólny manipulator o sześciu przegubach obrotowych może mieć do 16 zestawów kątów prowadzących do osiągnięcia określonej pozycji i orientacji efektora w przestrzeni, jednak geometria robotów UR ogranicza tę liczbę do $2^3 = 8$ wariantów. Zostało to pokazane w pracy [12], w której autorzy podają kompletne analityczne rozwiązania prostego i odwrotnego zadania kinematycznego.

Tabela 2. Parametry DH robota UR20 wraz z poprawkami kalibracyjnymi
Table 2. DH parameters of the UR20 robot with calibration corrections

Parametry DH					Poprawki kalibracyjne			
i	a_i	α_i	d_i	θ_i	Δa_i	$\Delta \alpha_i$	Δd_i	$\Delta \theta_i$
1	0	$\pi/2$	0,2363	θ_1	-6,36e-5	-1,41e-4	4,90e-5	-4,22e-7
2	-0,8620	0	0	θ_2	0,2255	-9,38e-4	-618,79	0,7393
3	-0,7287	0	0	θ_3	0,1031	1,55e-3	859,37	-0,2020
4	0	$\pi/2$	0,2010	θ_4	-2,85e-5	1,18e-3	-240,58	-0,5373
5	0	$-\pi/2$	0,15935	θ_5	-9,98e-5	6,58e-4	-7,89e-5	-1,56e-7
6	0	0	0,1543	θ_6	0	0	-2,44e-4	1,16e-8

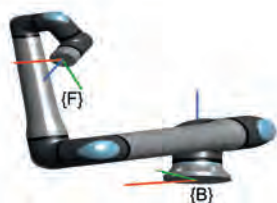
tyki robotów o takiej geometrii konstrukcji. W konfiguracjach, które stanowią rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki ramię robota może znajdować się po stronie lewej lub prawej, łokieć może być skierowany ku górze lub ku dołowi, a nadgarstek może być ułożony do wewnątrz lub na zewnątrz konstrukcji.

Pierwotnie planowano przeprowadzenie badania dla wszystkich możliwych konfiguracji robota umożliwiających osiągnięcie położeń w wybranym sześcianie pomiarowym, jednak ze względu na kolizje z kolumną, na której zamontowano robota, możliwe było wykorzystanie tylko czterech z nich. Na rys. 3 pokazano cztery osiągalne konfiguracje, wyznaczone dla nominalnych parametrów DH robota, umożliwiające osiągnięcie przez układ $\{F\}$ (związany z interfejsem mechanicznym) pozycji i orientacji

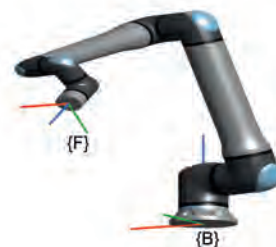
wyrażonej w układzie $\{B\}$ (związanym z podstawą robota) za pomocą operatora przekształcenia jednorodnego

$${}^B_F T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(-\frac{3}{4}\pi\right) & -\sin\left(-\frac{3}{4}\pi\right) & 1 \\ 0 & \sin\left(-\frac{3}{4}\pi\right) & \cos\left(-\frac{3}{4}\pi\right) & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

a) $q=[-1,798 \ 0,269 \ -1,631 \ 2,161 \ 1,411 \ 2,979]$



b) $q=[-1,798 \ -1,185 \ 1,631 \ 0,352 \ 1,411 \ 2,979]$



c) $q=[1,798 \ -1,902 \ -2,103 \ 0,064 \ 1,411 \ 0,162]$



d) $q=[1,798 \ -3,410 \ 1,631 \ 0,981 \ -1,411 \ -2,979]$

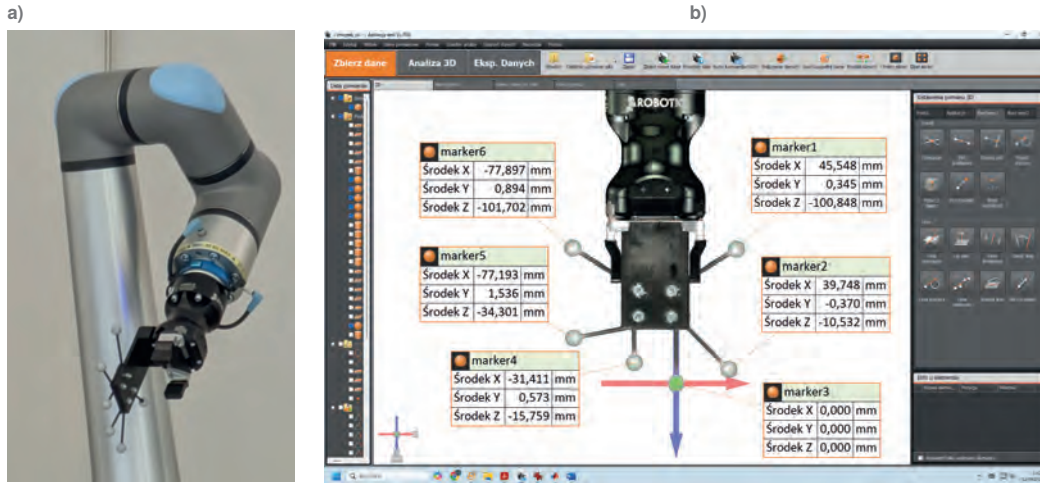


Rys. 3. Cztery warianty rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki: a) ramię po lewej, łokieć na dole, nadgarstek do wewnątrz, b) ramię po lewej, łokieć na górze, nadgarstek do wewnątrz, c) ramię po prawej, łokieć na górze, nadgarstek na zewnątrz, d) ramię po prawej, łokieć na dole, nadgarstek do wewnątrz

Fig. 3. Four variants of the inverse kinematics solution: a) arm on the left, elbow down, wrist flip; b) arm on the left, elbow up, wrist flip; c) arm on the right, elbow up, wrist no flip; d) arm on the right, elbow down, wrist flip

Operator (2) reprezentuje pozycję odpowiadającą punktowi ${}^B P_1$ i zapewnia, że płaszczyzna interfejsu mechanicznego, zgodnie z założeniami przedstawionymi w punkcie 2.1, jest równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez punkty od P_2 do P_5 sześcianu pomiarowego przedstawionego na rys. 1. Konfiguracje przedstawione na rys. 3 zostały wykorzystane jako konfiguracje początkowe w przeprowadzonych badaniach

pomocą skanera 3D CMM firmy Keyence, którego deklarowana dokładność wynosi $\pm 10 \mu\text{m}$ (w odniesieniu do ISO 10360-8). Sposób montażu znaczników oraz ich położenie w układzie odniesienia $\{M\}$ umieszczonym w środku znacznika o nazwie „marker3”, który stanowi właściwy punkt pomiarowy według procedury wprowadzanej przez ISO 9283, zostały pokazane na rys. 4.



Rys. 4. Chwytnik ze znacznikami systemu OptiTrack: a) montaż na robocie b) pomiary na skanerze 3D CMM Keyence

Fig. 4. Gripper with OptiTrack markers: a) robot mounting b) measurements using the Keyence 3D CMM scanner

eksperymentalnych, a odpowiadające im wartości kątów konfiguracyjnych zostały podane w opisie rysunku.

2.2.2. System pomiarowy

W celu rejestracji ruchów robota został wykorzystany system przechwytywania ruchu OptiTrack złożony z sześciu kamer Prime 13 i oprogramowania Motive, który zgodnie ze specyfikacją producenta pozwala na uzyskanie dokładności $\pm 0,2 \text{ mm}$ dla znaczników umieszczonych w obszarze o wymiarach $9 \text{ m} \times 9 \text{ m}$. Kalibracja systemu przeprowadzona przed wykonaniem właściwego badania dała wynik bardzo dobry (ang. *Exceptional*) wskazując błąd na poziomie $0,283 \text{ mm}$ (ang. *Mean and Error*). Przyjmując błąd kalibracji jako niepewność pomiaru, system OptiTrack, zgodnie z wytycznymi normy ISO 9283, może być wykorzystany do oceny dokładności pozycji rzędu $1,2 \text{ mm}$. Zgodnie z najlepszą wiedzą autora w literaturze brakuje badań dotyczących dokładności robota UR20, jednak wyniki większości badań [7, 13] modeli UR5 i UR10 wskazują na błędy pozycjonowania rzędu kilku milimetrów. Pozwala to na przyjęcie założenia, że dokładność systemu OptiTrack jest wystarczająca do realizacji przeprowadzonych badań, przy czym należy zauważyć, że koszt takiego rozwiązania jest wielokrotnie niższy [8] od kosztu systemów typu CMM lub laser tracker gwarantujących znacząco wyższą dokładność, która w tym przypadku nie jest konieczna do uzyskania wiarygodnych wyników.

Pomiary przeprowadzono wykorzystując zestaw sześciu znaczników pasywnych o średnicy $12,7 \text{ mm}$. Do zamocowania znaczników na interfejsie mechanicznym robota wykorzystano chwytak Hand-E firmy Robotiq, rozbudowany o specjalnie zaprojektowany adapter umożliwiający połączenie z podstawą markerów OptiTrack (ang. *Rigid Body Marker Base*). Całkowita masa chwytaka ze wszystkimi adapterami umożliwiającymi jego zamocowanie na interfejsie robota wyniosła $2,2 \text{ kg}$ (norma ISO 9283 specyfikuje obciążenie dla badania dokładności na poziomie 100% i dodatkowo na poziomie 10% obciążenia znamionowego, które w przypadku robota UR20 wynosi 20 kg lub 25 kg – tabela 1). W celu dokładnego wyznaczenia układu odniesienia pomiaru położenia znaczników zostały wykonane za

2.3. Akwizycja danych

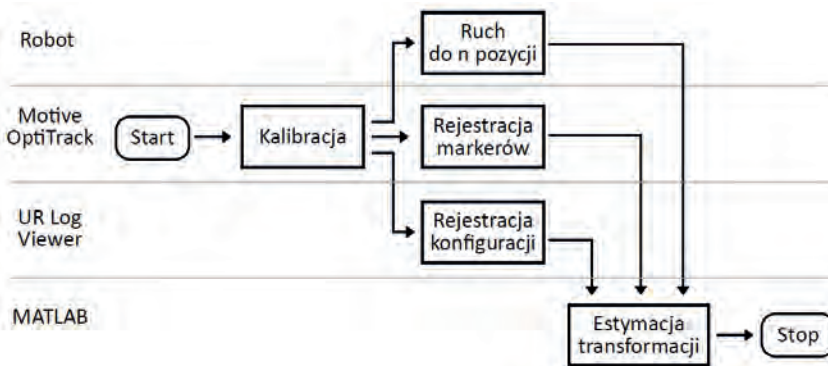
Akwizycja danych w przeprowadzonym badaniu została zrealizowana zgodnie z procedurą obejmującą fazę przygotowawczą (rys. 5) oraz właściwą fazę pomiarową (rys. 6). W fazie pierwszej (przygotowawczej) wykonano kalibrację systemu OptiTrack oraz przeprowadzono wstępny eksperyment, którego celem było wyznaczenie transformacji układów odniesienia niezbędnych do ustalenia pozycji i orientacji układu $\{M\}$ w układzie podstawy robota $\{B\}$ w oparciu o dane ze sterownika robota oraz dane z systemu pomiarowego.

W ogólnym przypadku zależność między układami współrzędnych wykorzystywanymi w eksperymencie można zapisać jako

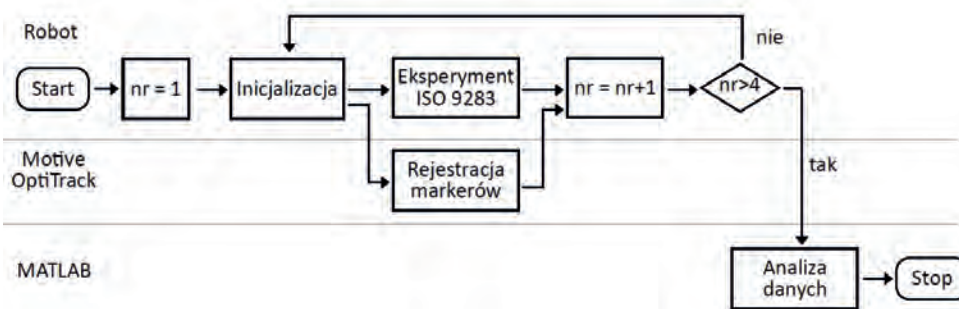
$${}^B T \cdot {}^F T = {}^B T \cdot {}^S T, \quad (3)$$

gdzie ${}^B T$, ${}^F T$, ${}^S T$, ${}^M T$ są operatorami przekształceń jednorodnych opisującymi położenia kolejno: układu interfejsu mechanicznego $\{F\}$ względem układu bazowego robota $\{B\}$, układu markerów $\{M\}$ w układzie interfejsu $\{F\}$, układu systemu pomiarowego $\{S\}$ w układzie bazowym robota $\{B\}$ oraz układu markerów $\{M\}$ w układzie systemu pomiarowego $\{S\}$.

W celu przeprowadzenia wstępnego eksperymentu na panelu operatorskim robota (Teach Pendant) napisany został program sterujący realizujący przemieszczenie kolejno do $i = 1:n$ położenia, różnych od wykorzystywanych we właściwym eksperymencie. Po uruchomieniu programu pozycje i orientacje układu interfejsu mechanicznego robota rejestrowano za pomocą aplikacji UR Log Viewer firmy Universal Robots, a pozycje zestawu markerów z wykorzystaniem aplikacji Motive. Następnie zebrane dane zaimportowano do programu MATLAB, w którym przeprowadzono ich synchronizację, wybierając pomiary odpowiadające końcom 5-sekundowych pauz wprowadzonych w programie robota po każdym przemieszczeniu. Dodatkowo, w celu zwiększenia dokładności wyznaczania pozycji i orientacji układu markerów $\{M\}$ nie korzystano bezpośrednio z wartości estymowanych przez oprogramowanie Motive. Położenie i orientacja tego układu zostały wyznaczone na podstawie skanu geometrii znaczników (rys. 4b), a operator przekształcenia ${}^S T$ był estymowany



Rys. 5. Faza I procesu akwizycji danych
Fig. 5. Phase I of the data acquisition process



Rys. 6. Faza II procesu akwizycji danych
Fig. 6. Phase II of the data acquisition process

w wyniku mapowania pozycji znaczników raportowanych przez system Motive na pozycje znaczników wyznaczonych na skanerze. Przedstawione podejście pozwoliło na ustalenie $n = 15$ operatorów opisujących pozycję i orientację układu interfejsu w układzie bazowym $A_i = \begin{pmatrix} B \\ F \end{pmatrix} T_i$ oraz pozycję i orientację układu markerów w układzie systemu pomiarowego $B_i = \begin{pmatrix} S \\ M \end{pmatrix} T_i$. Ostatecznie, nieznane operatory przekształceń $X = \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} T$ i $Y = \begin{pmatrix} B \\ S \end{pmatrix} T$, opisujące układ markerów $\{M\}$ w układzie interfejsu robota $\{F\}$ oraz układ systemu pomiarowego $\{S\}$ w układzie bazowym robota $\{B\}$, zostały wyznaczone z zależności $A_i \cdot X = Y \cdot B_i$ za pomocą metody zaproponowanej w pracy [20].

W celu przeprowadzenia właściwego eksperymentu na panelu operatorskim robota (Teach Pendant) przygotowany został kolejny program, realizujący procedurę badania dokładności pozycjonowania opisaną w punkcie 2.1. Wyznaczanie pozycji i orientacji układu interfejsu mechanicznego wewnątrz sześcianu pomiarowego oraz obliczanie wszystkich rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki zrealizowano za pomocą funkcji napisanych w udostępnianym przez producenta języku URSript. W programie, podobnie jak w fazie I, zastosowano 5-sekundowe pauzy po każdym przemieszczeniu robota do kolejnego położenia docelowego – w tym przypadku zatrzymania były podyktowane wytycznymi normy ISO 9283, która wymaga ustabilizowania się robota w osiągniętym położeniu. W ramach badania wykonane zostały cztery eksperymenty, w których jako konfiguracje początkowe robota przyjmowano konfiguracje od a do d przedstawione na rys. 3. W trakcie badania aplikacja Motive rejestrowała pozycje markerów, które później zostały zaimportowane do oprogramowania MATLAB. W środowisku MATLAB, podobnie jak w fazie I, dla ostatnich odczytów pomiarowych z faz zatrzymania robota przeprowadzona została estymacja operatora $\begin{pmatrix} S \\ M \end{pmatrix} T$, co pozwoliło na wyznaczenie operatora $\begin{pmatrix} B \\ M \end{pmatrix} T = \begin{pmatrix} B \\ S \end{pmatrix} T \cdot \begin{pmatrix} S \\ M \end{pmatrix} T = Y \cdot \begin{pmatrix} S \\ M \end{pmatrix} T$. Ostatecznie otrzymano $4 \cdot 30 \cdot 5 = 600$ operatorów przekształcenia (cztery konfiguracje początkowe, 30 pomiarów w każdym punkcie, pięć punktów od P_1 do P_5), za pomocą których, dla punktu pomiarowego znajdującego się w początku układu $\{M\}$, korzystając z zależności (1), oceniono dokładność pozycji AP_p oraz dokładności orientacji AP_a, AP_b, AP_c (orientację definiowano przy użyciu kątów Eulera XYZ).

3. Wyniki badań

Dokładności pozycji i orientacji wyznaczone zgodnie z normą ISO 9283 z zależności (1) zostały zestawione w tabeli 3. Ponieważ norma nie wprowadza jednego wskaźnika określającego dokładność orientacji w pracy wykorzystano miarę δ_ϕ odpowiadającą wielkości kąta z reprezentacji „kąt-oś” macierzy rotacji względnej dla orientacji w położeniach zadanych i odczytanych z systemu pomiarowego [1]. W ostatniej kolumnie tabeli zestawiono średnie wartości analizowanych wielkości (\cdot). Dodatkowo wyznaczone dokładności pozycji i błędy orientacji zostały pokazane na rys. 7. W pierwszym wierszu przedstawiono dokładności pozycji dla czterech badanych konfiguracji początkowych robota, liniami poziomymi zostały oznaczone średnie dokładności pozycji a słupki błędów przedstawiają odchylenie standardowe błędów określania pozycji dla punktów od P_1 do P_5 . Wykresy słupkowe w dolnym wierszu prezentują analogiczne wielkości dla błędów orientacji.

Średnia dokładność pozycjonowania wyznaczona na podstawie wyników uzyskanych w konfiguracji od a do d wyniosła $AP_p = 1,39$ mm, a największe odchylenie punktu pomiarowego (3,86 mm) otrzymano w punkcie P_2 dla konfiguracji d . Otrzymane wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania są więc zbliżone do tych zaprezentowanych w pracy [7] dla robota UR5. Analizując wpływ konfiguracji robota na dokładność pozycjonowania można stwierdzić, że najlepszą konfiguracją do realizacji rozważanego zadania okazała się konfiguracja c ($AP_p = 0,93$ mm), a największy błąd otrzymano dla konfiguracji d ($AP_p = 2,4$ mm). Różnica dokładności uzyskana dla tych dwóch konfiguracji wyniosła prawie 1,5 mm, przy czym błąd dla konfiguracji d był około 2,6 razy większy od błęd dla konfiguracji c . Błędy orientacji były zbliżone, błąd średni wyniósł $\delta_\phi = 3,3 \cdot 10^{-3}$ rad, a różnica między największym błędem (dla konfiguracji c) i najmniejszym (dla konfiguracji b) wyniosła $0,63 \cdot 10^{-3}$ rad, przy czym najgorszy wynik był jedynie 1,2 razy większy od najlepszego. Należy jednak podkreślić, że dokładność wyznaczania orientacji była ograniczona geometrią podstawy markerów dostarczonej z systemem OptiTrack (ang. *Rigid Body Marker Base*), więc uzyskane wyniki należy trakto-

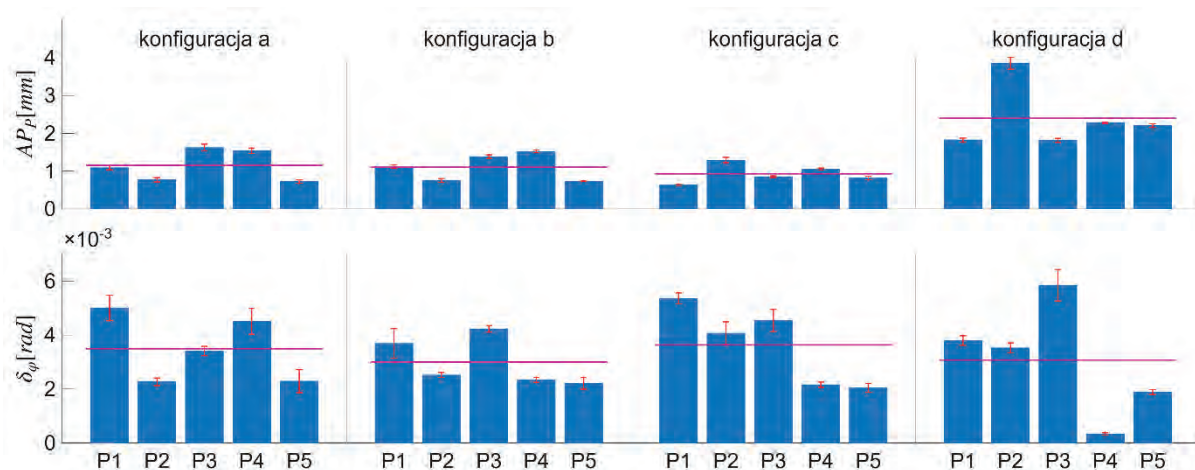
Tabela 3. Podsumowanie wyników eksperymentu (APP [mm], APa, APb, APc, σ_ϕ [10^{-3} rad])
 Table 3. Summary of the experiment results (APP [mm], APa, APb, APc, σ_ϕ [10^{-3} rad])

Konfiguracja a						
AP	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	$\bar{(\cdot)}$
APP	1,09	0,77	1,62	1,54	0,72	1,15
APa	-3,29	-0,44	-4,02	-5,11	-2,97	-3,17
APb	0,09	0,77	0,05	-1,52	-0,61	-0,25
APc	2,09	1,79	-0,99	-5,81	-2,60	-1,10
δ_ϕ	5,00	2,27	3,41	4,51	2,29	3,50

Konfiguracja b						
AP	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	$\bar{(\cdot)}$
APP	1,11	0,75	1,39	1,52	0,73	1,10
APa	-1,69	-0,54	-4,16	-3,17	-2,82	-2,48
APb	0,13	0,71	0,36	-0,65	-0,89	-0,07
APc	2,26	1,99	0,07	-2,14	-2,22	-0,01
δ_ϕ	3,69	2,52	4,23	2,34	2,21	3,00

Konfiguracja c						
AP	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	$\bar{(\cdot)}$
APP	0,63	1,29	0,85	1,05	0,82	0,93
APa	-1,41	1,57	-2,38	2,45	-0,59	-0,07
APb	-0,25	-0,59	-0,31	-0,91	-0,67	-0,55
APc	4,25	4,97	2,51	2,64	1,46	3,17
δ_ϕ	5,36	4,07	4,54	2,16	2,04	3,63

Konfiguracja d						
AP	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	$\bar{(\cdot)}$
APP	1,82	3,86	1,81	2,28	2,20	2,39
APa	-1,41	3,49	-0,47	-0,29	-0,42	0,18
APb	0,33	0,78	0,20	0,09	-1,85	-0,09
APc	2,64	4,84	5,47	-0,12	-0,37	2,49
δ_ϕ	3,79	3,52	5,84	0,33	1,88	3,08



Rys. 7. Podsumowanie wyników eksperymentu
 Fig. 7. Summary of the experiment results

wać jedynie jako wynik pomocniczy względem podstawowego badania dokładności pozycji.

Jako uzupełnienie badań przeprowadzono ocenę wpływu konfiguracji początkowej na dokładność pozycjonowania w trakcie realizacji zadania robota. Wyniki takiej analizy mają istotne znaczenie w przypadku wykorzystania robotów w rzeczywistych procesach przemysłowych, w których dokładność realizacji zadania ma szczególnie istotne znaczenie, jak np. w precyzyjnym montażu, obróbce lub aplikacjach metrologicznych. Wykazanie istotnej zależności statystycznej pomiędzy konfiguracją początkową, a precyzją realizacji zadania może być podstawą do dalszych prac nad metodami planowania zadań, które pozwolą na

zwiększenie dokładności robotów bez konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów. W literaturze można znaleźć wyniki podobnych badań, w których autorzy wykazali na przykład statystyczną istotność lokalizacji punktów docelowych na powtarzalność robota [19], jednak brakuje jednoznacznych badań eksperymentalnych oceniających wpływ alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki na dokładność robotów, a w szczególności robotów współpracujących nowej generacji takich jak UR20.

W prezentowanej pracy ograniczono się do analizy wpływu konfiguracji początkowej (od a do d) na dokładność pozycji manipulatora. Ze względu na sposób sformułowania problemu,

jego ocenę statystyczną wykonano przeprowadzając analizę wariancji. Konfiguracja robota jest w tym przypadku zmienną niezależną, dokładność pozycji zmienną zależną, a położenie w sześcianie pomiarowym ($P_1 - P_5$), wprowadzające dodatkową zmienność systematyczną, jest zmienną blokową. Dokładność pozycji można w takim przypadku opisać zależnością:

$$e_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

gdzie μ jest średnią ogólną, α_i reprezentuje wpływ konfiguracji robota, $i = 1, \dots, 4$, β_j reprezentuje wpływ położenia ($P_1 - P_5$), $j = 1, \dots, 5$, a ε_{ijk} opisuje błąd losowy związany z k -tym powtórzeniem pomiarów dla i -tej konfiguracji oraz j -tego położenia, $k = 1, \dots, 30$.

Wykorzystując model (4) problem oceny istotności wpływu konfiguracji można sformułować w postaci testu statystycznego, w którym hipoteza zerowa oznacza brak wpływu konfiguracji na dokładność pozycji

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0,$$

a hipoteza alternatywna przyjmuje, że co najmniej jeden z efektów jest różny od zera

$$H_1 : \alpha_i \neq 0 \text{ (co najmniej dla jednego).}$$

Do rozstrzygnięcia wyników tego testu, ze względu na niespełnienie założeń dotyczących rozkładu reszt, nie można zastosować klasycznej analizy wariancji. Dlatego problem rozwiązano z wykorzystaniem nieparametrycznej, dwukierunkowej analizy wariancji Friedmana. Wynik analizy przeprowadzonej w środowisku MATLAB został przedstawiony na rys. 8.

Otrzymana w teście Friedmana p -wartość ≈ 0 (Prob>Chi-sq) wskazuje, że konfiguracja robota ma wpływ na dokładność pozycji, a zaobserwowane różnice są statystycznie istotne. Testy

post-hoc Wilcoxona, skorygowane metodą Bonferroniego dla $\alpha = 0,05$, wykazały brak wpływu konfiguracji robota na dokładność pozycji jedynie w trzech przypadkach, dla położen P_2, P_4, P_5 dla konfiguracji początkowych $a - b$.

4. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań dokładności pozycjonowania robota UR20. Eksperyment przeprowadzono na bazie wytycznych normy ISO 9283, wykorzystując optyczny system pomiarowy OptiTrack. Badania dokładności zostały przeprowadzone dla czterech alternatywnych rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki. Analiza uzyskanych danych pomiarowych dała średnią dokładność pozycji $AP_P = 1,39$ mm, przy średnie dokładności dla testowanych konfiguracji różniły się o około 1,5 mm, a stosunek wartości maksymalnej do minimalnej wyniósł około 2,6. Błędy orientacji były zbliżone dla wszystkich konfiguracji, błąd średni wyniósł $\delta_\varphi = 3,3 \cdot 10^{-3}$ rad, a stosunek wartości maksymalnej do minimalnej wyniósł około 1,2. Uzyskane wyniki dokładności pozycji są ponad dziesięciokrotnie większe od deklarowanej przez producenta powtarzalności i mogą mieć istotne znaczenie w zastosowaniach wymagających wysokiej dokładności absolutnej. Dodatkowo test istotności Friedmana wykazał, że konfiguracja początkowa robota istotnie wpływa na jego dokładność podczas realizacji zadania, a zaobserwowane różnice dla badanych konfiguracji są statystycznie istotne. Wskazuje to na potrzebę uwzględniania konfiguracji jako parametru decyzyjnego przy planowaniu trajektorii robota.

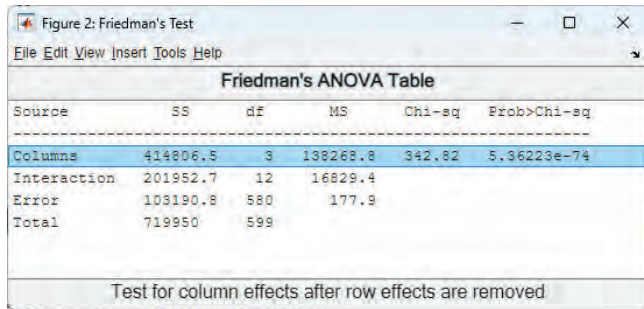
Uzyskane wyniki badań pokazują, że systemy śledzenia ruchu takie jak OptiTrack mogą być zastosowane do pomiaru dokładności pozycjonowania manipulatora, co czyni z nich interesującą alternatywę dla znacznie droższych systemów laser tracker lub CMM. Dodatkowo, ze względu na mniej restrykcyjne wymagania środowiskowe, systemy tego typu mogą być wykorzystane bezpośrednio w warunkach przemysłowych. Należy jednak uwzględnić ograniczenia wynikające z geometrii podstawy znaczników dostarczanej przez producenta w kontekście wyznaczania dokładności orientacji. W dalszych badaniach planowane jest opracowanie adaptera markerów o bardziej korzystnej geometrii. W kolejnym kroku uzyskane wyniki zostaną wykorzystane do opracowania metody wyboru konfiguracji robota minimalizującej błąd wykonania bez konieczności przeprowadzania pełnej kalibracji geometrycznej oraz algorytmów korygujących realizację zadania robota w czasie rzeczywistym.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki w ramach programu „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”, projekt nr RID/SP/0050/2024/1.

Bibliografia

- Di Gregorio R., *Metrics proposed for measuring the distance between two rigid-body poses: review, comparison, and combination*, „Robotica”, Vol. 42, No. 1, 2024, 302–318, DOI: 10.1017/S0263574723001388.
- Dudzik S., Szelağ P., *Analiza niepewności lokalizacji odometrycznej z wykorzystaniem systemu przechwytywania ruchu i symulacji Monte Carlo*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 29, Nr 1, 2025, DOI: 10.14313/PAR_255/31.
- Dutka P., *Czynniki wpływające na dokładność i powtarzalność pozycjonowania robota przemysłowego*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 29, Nr 4, 2016, 59–65, DOI: 10.14313/PAR_222/59.
- Ferrarini S., Bilancia P., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M., *A method for the assessment and compensation*



Konfiguracja	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
$a-b$	0,04	0,18	0,00	0,95	1,00
$a-c$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$a-d$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$b-c$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$b-d$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$c-d$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rys. 8. Wyniki analizy statystycznej: a) test Friedmana, b) p-wartości z testów Wilcoxona

Fig. 8. Results of statistical analysis a) Friedman test b) p-values from the Wilcoxon tests

- of positioning errors in industrial robots, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”, Vol. 85, 2024, DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102622.
5. Furtado J. S., Liu H. H., Lai G., Lacheray H., Desouza-Coelho J., *Comparative analysis of optitrack motion capture systems*, [In:] Janabi-Sharifi, F., Melek, W. (eds) *Advances in Motion Sensing and Control for Robotic Applications*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-17369-2_2.
 6. Izagirre U., Andonegui I., Eciolaza L., Zurutuza U., *Towards manufacturing robotics accuracy degradation assessment: A vision-based data-driven implementation*, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”, Vol. 67, 2021, DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102029.
 7. Jiang Y., Yu L., Jia H., Zhao H., Xia H. *Absolute positioning accuracy improvement in an industrial robot*, “Sensors”, Vol. 20, No. 16, 2020, DOI: 10.3390/s20164354.
 8. Kirkpatrick M., Sander D., El Kalach F., Harik R., *Motion capture based calibration for industrial robots*, “Manufacturing Letters”, Vol. 35, 2023, 926–932, DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.08.012.
 9. Le Reun A., Subrin K., Dubois A., Garnier S., *Thermal drift and backlash issues for industrial robots positioning performance*, “Robotica”, Vol. 40, No. 9, 2022, 2933–2952, DOI: 10.1017/S0263574721002022.
 10. Lightcap C., Hamner S., Schmitz T., Banks S., *Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration*, “IEEE Transactions on Robotics”, Vol. 24, No. 2, 2008, 452–456, DOI: 10.1109/TRO.2007.914003.
 11. Lin J., Xin R., Shi S., Huang Z., Zhu J., *An accurate 6-DOF dynamic measurement system with laser tracker for large-scale metrology*, “Measurement”, Vol. 204, 2022, DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112052.
 12. Liu Q., Yang D., Hao W., Wei Y., *Research on kinematic modeling and analysis methods of UR robot*, [In:] 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2018, 159–164, DOI: 10.1109/ITOEC.2018.8740681.
 13. Liu Y., Li Y., Zhuang Z., Song T., *Improvement of robot accuracy with an optical tracking system*, “Sensors”, Vol. 20, No. 21, 2020, DOI: 10.3390/s20216341.
 14. Manocha D., Canny J.F., *Efficient inverse kinematics for general 6R manipulators*, “IEEE Transactions on Robotics and Automation”, Vol. 10, No. 5, 1994, 648–657, DOI: 10.1109/70.326569.
 15. Morozov M., Riise J., Summan R., Pierce S.G., Mineo C., MacLeod C.N., Brown R.H., *Assessing the accuracy of industrial robots through metrology for the enhancement of automated non-destructive testing*, [In:] 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 335–340, DOI: 10.1109/MFI.2016.7849510.
 16. Nubiola A., Slamani M., Joubair A., Bonev I. A., *Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker*, “Robotica”, Vol. 32, No. 3, 2014, 447–466, DOI: 10.1017/S0263574713000714.
 17. Pająk G., *New Approach to Planning the Complex Movements of 6-DOF Industrial Robot Subjected to Acceleration Constraints*, “Advances in Science and Technology Research Journal”, Vol. 18, No. 3, 2024, DOI: 10.12913/22998624/186361.
 18. Pollák M., Kočíško M., Paulišin D., Baron P., *Measurement of unidirectional pose accuracy and repeatability of the collaborative robot UR5*, “Advances in Mechanical Engineering”, Vol. 12, No. 12, 2020, DOI: 10.1177/1687814020972893.
 19. Riemer R., Edan Y., *Evaluation of influence of target location on robot repeatability*, “Robotica”, Vol. 18, No. 4, 2000, 443–449, DOI: 10.1017/S0263574799002337.
 20. Shah M., *Solving the robot-world/hand-eye calibration problem using the Kronecker product*, “Journal of Mechanisms and Robotics”, Vol. 5, No. 3, 2013, DOI: 10.1115/1.4024473.
 21. Slamani M., Nubiola A., Bonev I., *Assessment of the positioning performance of an industrial robot*, “Industrial Robot”, Vol. 39, No. 1, 2012, 57–68, DOI: 10.1108/01439911211192501.
 22. Wan F., Song C., *Flange-based hand-eye calibration using a 3d camera with high resolution, accuracy, and frame rate*, “Frontiers in Robotics and AI”, Vol. 7, 2020, DOI: 10.3389/frobt.2020.00065.
 23. Xiang T., Jiang X., Qiao G., Gao C., Zuo H., *Kinematics parameter calibration of serial industrial robots based on partial pose measurement*, “Mathematics”, Vol. 11, No. 23, 2023, DOI: 10.3390/math11234802.
 24. Žlajpah L., Petrič T., *Kinematic calibration for collaborative robots on a mobile platform using motion capture system*, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”, Vol. 79, 2023, DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102446.

Inne źródła

- A1. ISO 9283:1998, Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods.
- A2. UniversalRobots, *Denavit-Hartenberg parameters*, [www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics].

Evaluation of Pose Accuracy of the UR20 Industrial Robot

Abstract: This paper presents the results of experimental studies conducted to determine the pose accuracy of the UR20 robot from Universal Robots. The experiments followed the guidelines of the ISO 9283 standard, and the OptiTrack vision system was used to record the robot positions. The primary objective of the study was to determine position accuracy, while orientation accuracy was treated as an auxiliary result. Four alternative solutions to the inverse kinematics problem were tested, each enabling the robot mechanical interface to reach the same poses within the measurement cube defined according to ISO 9283. The mean position accuracies obtained for the tested configurations differed by approximately 1.5 mm, and the ratio of the maximum to the minimum value was about 2.6. The mean orientation errors were similar, with the ratio of the maximum to the minimum value being approximately 1.2. Statistical analysis confirmed that the robot initial configuration had a statistically significant effect on positioning accuracy. The obtained results indicate the need to consider alternative solutions of the inverse kinematics problem as a decision parameter in robot trajectory planning.

Keywords: industrial robot, ISO 9283, kinematic model, pose accuracy, OptiTrack

dr inż. Iwona Pająk

i.pajak@iim.uz.zgora.pl
ORCID: 0009-0007-1384-2011



Pracownik Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Główne zainteresowania naukowe obejmują projektowanie, analizę i integrację systemów sterowania w zautomatyzowanych układach produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem robotów przemysłowych i systemów współpracujących. Dodatkowo zajmuje się planowaniem ruchu robotów oraz zastosowaniami metod sztucznej inteligencji w przetwarzaniu sygnałów i obrazów, w tym klasyfikacją i detekcją obiektów.