

# BADANIA PARAMETRÓW ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH, ISTOTNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH MONTAŻU

## *The study of industrial robots parameters essential in assembly technological processes*

Marcin WIŚNIEWSKI, Katarzyna PETA, Arkadiusz PIETROWIAK, Olaf CISZAK, Jan ŻUREK

**Streszczenie:** W artykule wymieniono obszary zastosowań robotów przemysłowych w montażu z uwzględnieniem tych operacji, które wymagają szczególnej dokładności wykonania. Scharakteryzowano kluczowe parametry robotów, tj. dokładność i powtarzalność pozycjonowania (w tym ich wartości podawane przez producentów), mające istotny wpływ na jakość montażu. Opisano procedurę badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB oraz przeanalizowano wybrane wyniki badań.

**Słowa kluczowe:** dokładność i powtarzalność pozycjonowania, montaż

**Abstract:** In this paper lists the areas of application of industrial robots in the assembly taking into account these operations, which require special manufacturing precision. It has been characterized the important parameters of the robot such as the accuracy and repeatability of positioning (including their values given by the producers), having a significant impact on the quality of the installation. Describes the procedure for testing the accuracy and repeatability of positioning of industrial robot Fanuc M16iB and analyzed the selected results.

**Key words:** accuracy and repeatability of positioning assembly

### Wprowadzenie

Montaż [1] (z fr. montage) jest istotną częścią procesu produkcyjnego i ma ogromny wpływ na jakość wyrobu finalnego. Polega na połączeniu ze sobą gotowych elementów (części) zgodnie z wymogami. Coraz częściej realizowany jest przy pomocy zaawansowanych narzędzi technologicznych – robotów przemysłowych.

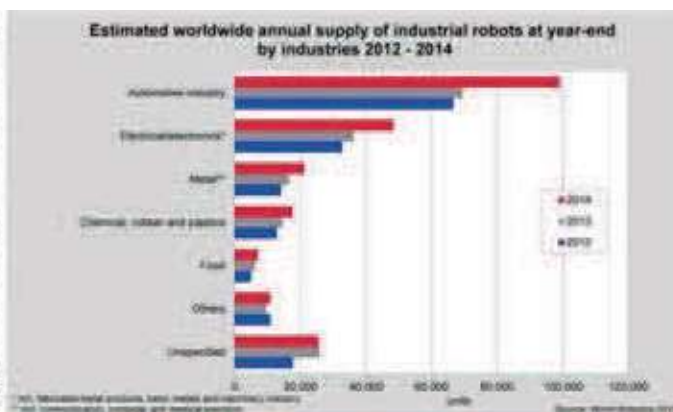
Większość sprzedawanych robotów przemysłowych jest sześciokościowych. Dzięki takiej konfiguracji oraz możliwości podłączenia do sterowania na stanowisku pracy dodatkowych osi (np. pozycjonerów), można je stosować w wielu operacjach procesu technologicznego, w tym montażu [2].

Od 2010 r. liczba sprzedawanych robotów przemysłowych co roku przekracza 100 tys. szt., a wg prognozy World Robotics 2015 Industrial Robots w 2018 r. ma wynieść 400 tys. szt.

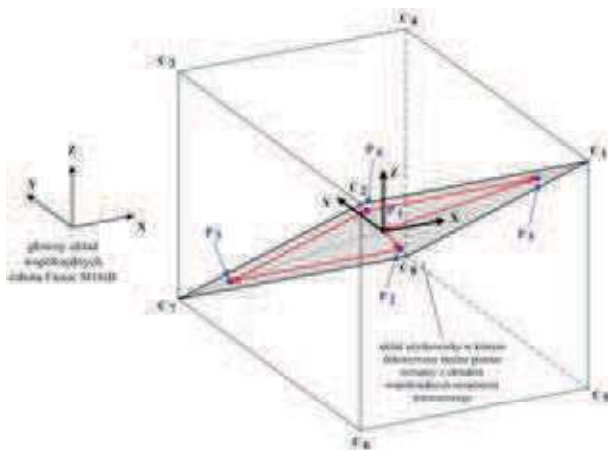
Jak już wspomniano – montaż ma ogromny wpływ na jakość produktu finalnego, przy czym konieczne jest prawidłowe wykonanie elementów składowych. Jakość ta dotyczy:

- funkcjonalności (stopień i zakres realizacji oczekiwanych funkcji),
- praktyczności (komfort użytkowania, łatwość obsługi i konserwacji, ergonomiczność),
- niezawodności (zdolność do pracy bezusterkowej),
- trwałości (okres zachowania cech użytkowych),
- bezpieczeństwa użytkowania [4].

Country	2013	2014	2015*	2016*
<b>America</b>	<b>38,317</b>	<b>52,616</b>	<b>36,200</b>	<b>48,000</b>
Brazil	1,388	13,288	7,000	7,000
North America (Canada, Mexico, USA)	36,929	39,328	29,200	41,000
Other America	999	999	999	999
<b>Asia/Australia</b>	<b>88,807</b>	<b>139,344</b>	<b>169,000</b>	<b>276,000</b>
China	8,888	37,088	75,000	150,000
India	1,817	2,138	2,000	8,000
Japan	20,110	29,287	33,000	40,000
Republic of Korea	21,287	26,721	28,000	80,000
Taiwan	8,487	8,812	8,500	13,000
Thailand	3,271	3,657	4,300	7,000
Other Asia/Australia	5,279	18,730	16,700	19,000
<b>Europe</b>	<b>43,284</b>	<b>45,559</b>	<b>49,500</b>	<b>66,000</b>
China, Rest	1,337	1,337	1,300	3,000
France	2,381	2,844	3,500	3,700
Germany	18,287	19,281	21,000	23,000
Italy	4,270	4,218	4,800	9,000
Italy	3,284	3,333	3,700	3,200
United Kingdom	2,486	2,284	2,400	2,600
Other Europe	11,528	10,410	11,700	15,100
<b>Africa</b>	<b>733</b>	<b>420</b>	<b>650</b>	<b>1,000</b>
not specified by country	4,491	11,414	8,610	10,000
<b>Total</b>	<b>178,132</b>	<b>229,261</b>	<b>284,000</b>	<b>400,000</b>



Rys. 1. Prognoza zastosowania robotów przemysłowych i ich procentowy udział w wybranych gałęziach przemysłu [3]  
Fig 1. Forecast of industrial robots application and their percentage in the industries [3]



Rys. 2. Płaszczyzna pomiarowa  $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$  z położeniami punktów  $P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$  i zaznaczonym torem pomiarowym [5]

Fig 2. The  $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$  measuring plane, with the  $P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$  point's and marked measurement trajectory [5]

Na dwie pierwsze cechy montaż nie ma istotnego wpływu, gdyż zależą one bezpośrednio od projektanta gotowego wyrobu, który podczas procesu projektowania określa jego funkcjonalność i praktyczne zastosowanie. Pozostałe trzy kryteria są natomiast powiązane z operacjami montażu. Jeżeli wykonują je roboty przemysłowe, to można założyć, że operacja montażu przebiegnie prawidłowo. Należy jednak zaznaczyć, że m.in. dwie cechy charakteryzujące pracę robota przemysłowego, tj. dokładność (AP) i powtarzalność (RP) pozycjonowania, mogą znacząco wpływać na przebieg operacji montażu. Biorąc pod uwagę powyższe, celem publikacji jest przedstawienie metodyki badania tych dwóch kluczowych w procesach technologiczności montażu parametrów robotów przemysłowych, podawanych przez ich producentów. Zakres publikacji obejmuje

prezentację wyników przeprowadzonych badań dla dwóch różnych wielkości sześcianu pomiarowego i odległości urządzenia pomiarowego oraz ich wpływu na poprawność przebiegu procesu technologicznego montażu.

### Metodyka badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

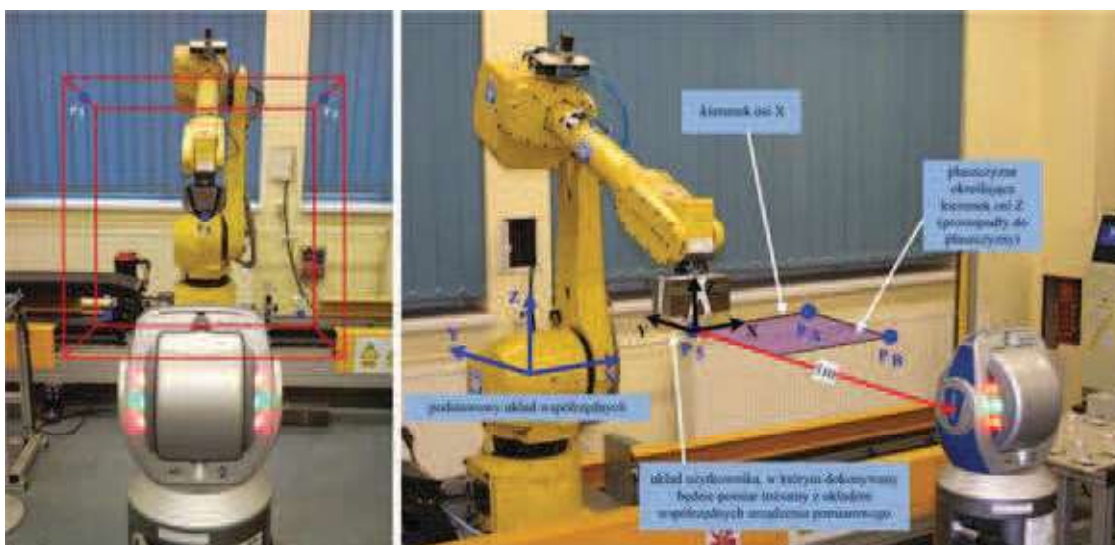
W celu określenia wpływu robota przemysłowego na przebieg operacji technologicznej montażu, należy zbadać parametry charakteryzujące jego pracę (AP, RP).

Do pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB zastosowano urządzenie pomiarowe laser tracker firmy Faro – Laser Tracker Ventage, w którym rejestracja położenia SMR-a (lustrzana sonda pomiarowa) odbywa się jednocześnie w trzech osiach: X, Y i Z (w określonym przez operatora układzie współrzędnych). Dzięki ciągłej analizie różnicy długości wiązki laserowej (wysłanej i odbitej z częstotliwością tysiąca razy na sekundę [5]), możliwe jest dynamiczne śledzenie położenia sondy pomiarowej [6].

Przed wykonaniem pomiaru ustabilizowano temperaturę wszystkich przegubów, uruchamiając program stabilizujący robota (ok. 30 min). Badanie przeprowadzono z obciążeniem nominalnym (10 kg) w pięciu punktach, położonych na wcześniej wybranej płaszczyźnie pomiarowej i powtórzono je 30 razy.

Układ współrzędnych użytkownika, w którym zdefiniowane były punkty pomiarowe, umocowano w punkcie  $P_1$ , równoległe względem głównego układu współrzędnych robota przemysłowego. Położenie układu współrzędnych użytkownika przedstawiono na rys. 2.

Podczas wykonywania programu położenie osi układu współrzędnych sondy pomiarowej (układ współrzędnych narzędzia) w kolejnych punktach pomiaru było stałe



Rys. 3. Położenie Laser Trackera w osi środka sześcianu i odległości 1 m od (punktu  $P_5$ ) [6]

Fig. 3. The Laser Tracker position along the cube's central axis, located 1 m from (the  $P_5$  point) [6]

(osie równoległe do osi układu współrzędnych użytkownika).

Urządzenie pomiarowe Laser Tracker ustawiono w osi symetrii i pewnej odległości od środka sześcianu (punktu P<sub>5</sub>), m.in. w odległości 1 m (rys. 3).

Do obsługi urządzenia Laser Tracker Venatge posłużono się programem CamMeasure 10, w którym opracowano nowy projekt (program pomiarowy) do rejestrowania 30 powtórzeń ruchów pomiędzy punktami P<sub>1</sub>-P<sub>5</sub>. Położenie środka układu współrzędnych urządzenia pomiarowego ustalono w punkcie P<sub>5</sub> – pokrywał się on z układem użytkownika, w którym wykonywany był pomiar.

Wartość dokładności (AP) i powtarzalności (RP) pozycjonowania robota przemysłowego [7, 8] obliczono na podstawie wzorów:

$$AP = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2} \quad (1)$$

gdzie:

$$AP_x = (\bar{x} - x_c), \quad AP_y = (\bar{y} - y_c), \quad AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (2)$$

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

w których:

- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej, otrzymane przez  $n$ -krotne uzyskanie położenia zadanego,
- $x_c, y_c, z_c$  – współrzędne położenia zadanego,
- $x_j, y_j, z_j$  – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy  $j$ -tym ruchu do położenia zadanego,

$$RP = \bar{l} + 3S_l \quad (4)$$

gdzie:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (5)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (6)$$

w których:

- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej, uzyskanej przez  $n$ -krotne powtórzenie położenia zadanego,
- $x_j, y_j, z_j$  – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy  $j$ -tym powtórzeniu położenia zadanego.

Tabela 1. Wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L dla długości boku sześcianu pomiarowego 270 mm

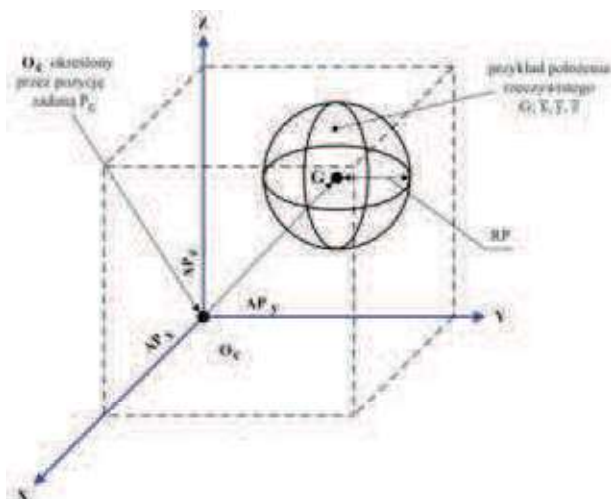
Table 1. Results of accuracy and repeatability measurement of industrial robots positioning (Fanuc M16iB-10L) for the side length of a cube measuring 270 mm

ROBOT					
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L
Prędkość:	100%	Udźwig	10 kg		
Długość boku sześcianu pomiarowego [mm]	270,00	odległość urządzenia [mm]		2240,00	
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9					
	APx	APy	APz	AP	RP
P1	-0,191	0,043	-0,064	0,206	0,024
P2	-0,357	-0,105	0,008	0,372	0,021
P3	0,082	0,180	0,058	0,206	0,017
P4	-0,377	0,105	0,110	0,407	0,016
P5	0,037	0,033	0,043	0,065	0,030
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego					
	RP =	0,030			
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta					
	RP =	0,100			
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?				TAK	

Tabela 2. Wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L dla długości boku sześcianu pomiarowego 900 mm

Table 1. Results of accuracy and repeatability measurement of industrial robots positioning (Fanuc M16iB-10L) for the side length of a cube measuring 900 mm

ROBOT					
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L
Prędkość:	100%	Udźwig	10 kg		
Długość boku sześcianu pomiarowego [mm]	900,00	odległość urządzenia [mm]		2240,00	
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9					
	APx	APy	APz	AP	RP
P1	-0,704	-0,405	-0,165	0,829	0,026
P2	-1,077	-1,052	0,246	1,526	0,017
P3	1,131	0,907	-0,564	1,555	0,052
P4	-0,672	1,045	-0,144	1,251	0,063
P5	0,023	0,016	0,033	0,044	0,033
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego					
	RP =	0,063			
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta					
	RP =	0,100			
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?				TAK	



Rys. 4. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowych ruchów liniowych

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

RP – powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego [8]

Fig. 4. The accuracy and repeatability of a one-way linear movements positioning

$AP_{x,y,z}$  – one-way positioning accuracy for the x, y, z

RP – repeatability of one-way positioning [8]

Wzory te zostały zaimplementowane do arkusza kalkulacyjnego, w którym po wstawieniu wyników pomiaru położenia punktów  $P_1$  do  $P_5$  (z programu CAMmeasure 10) wyliczono wartość dokładności i powtarzalności pozycjonowania.

#### Wyniki badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

W tab. 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania dla robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L i długości boku sześcianu pomiarowego wynoszącego 270 i 900 mm.

#### Omówienie wyników – wnioski i podsumowanie

Rozpatrując rodzaj ruchu końcówki interfejsu robota przemysłowego podczas osiągnięcia zadanej pozycji, dokładność pozycjonowania jednokierunkowego można określić jako różnicę między położeniem zadanym a punktem będącym środkiem zbioru punktów przestrzeni roboczej (dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych), co pokazano na rys. 1.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że wartości dokładności pozycjonowania (AP) są różne

dla każdego punktu pomiarowego. Dla boku sześcianu pomiarowego o długości 270 mm wynoszą od 0,206 do 0,407 mm, a dla boku 900 mm od 0,044 do 1,555 mm. W przypadku powtarzalności pozycjonowania (czyli wielokrotnego osiągnięcia zadanej pozycji) nie ma tak znaczących rozbieżności, a uzyskane wyniki mieszczą się w granicach określonych przez producenta robota (tj. do 0,1 mm). We wszystkich przypadkach wartości te były nawet znacząco mniejsze, np. dla punktu P1 aż pięciokrotnie (tab. 1). Zauważone wyżej różnice wartości RP mogą wynikać m.in. ze zmieniającej się przestrzeni pracy i różnej konfiguracji robota dla każdego punktu pomiarowego.

Wynikająca z badań duża zmienność wartości AP, bezpośrednio wpływa na dokładność wykonywanych operacji procesu technologicznego/montażu, a w szczególności: spawania, zgrzewania, malowania, klejenia i uszczelniania. Niedokładności rzędu milimetra w wymienionych operacjach mogą powodować m.in. osłabienie konstrukcji, zmniejszenie/zwiększenie grubości warstwy lakieru, braki w uszczelnieniu (w szczególności wąskich ścieżek uszczelnienia), co z kolei wpływa na jakość produktu finalnego. Jednym ze sposobów zwiększenia dokładności pozycjonowania jest przeprowadzenie kalibracji urządzenia po wcześniejszym jego zbadaniu. Biorąc pod uwagę fakt, że wpływ na wartość AP ma wiele czynników (np. charakter pracy i środowisko jej wykonywania, materiał podzespołów, dokładność obróbki i montażu poszczególnych elementów konstrukcyjnych, elastyczność członów, sztywność konstrukcji, w tym luzy przekładni, parametry statyczne i dynamiczne), badania należy przeprowadzać w warunkach przemysłowych, czyli takich, w których robot będzie realizował operacje procesu technologicznego/montażu.

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych nie są łatwe, wymagają bowiem wiedzy dotyczącej m.in. ich budowy, mechaniki, dynamiki [9], elektroniki oraz systemów pomiarowych. Pomiar z zastosowaniem Laser Tracker-a trwa ok. 40 min, a z zastosowaniem fotogrametrii nawet kilka godzin. Trzeba także uwzględnić wytyczne zawarte w normie PN-ISO 9283.

## LITERATURA

- [1] Żurek J. 1986. „Technologia i organizacja montażu”. Poznań: Stowarzyszenie Inżynierów i Mechaników Polskich.
- [2] Wojciechowski J., O. Ciszak. 2015. „Modular Flexible Production System: Construction and Application in Education,” w: *ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, Boston, Massachusetts, USA.
- [3] <https://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>, dostęp 9.05.2016 r.
- [4] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Jako%C5%9B%C4%87>, dostęp 25.03.2016 r.
- [5] FARO Laser Tracker Brochure.
- [6] Wiśniewski M. 2014. „Propozycja metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (3): 39–43.
- [7] Żurek J. 2013. „Metodyka i warunki badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 31–34.
- [8] ISO 9283.
- [9] Szkodny T. 2013. „Dynamika robotów przemysłowych”. Gliwice: Wydawnostwo Politechniki Śląskiej.

---

Mgr inż. Marcin Wiśniewski – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: marcin.wisniewski@put.poznan.pl

Mgr inż. Katarzyna Peta – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: katarzyna.p.peta@doctorate.put.poznan.pl

Mgr inż. Arkadiusz Piotrowiak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: arkadiusz.pietrowiak@put.poznan.pl

Dr hab. inż. Olaf Ciszak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: olaf.ciszak@put.poznan.pl

Prof dr hab. inż. Jan Żurek – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: jan.zurek@put.poznan.pl