

ADAM SŁOTA*

DOKŁADNOŚĆ STATYCZNA UKŁADU KOORDYNACJI
TRAJEKTORII ROBOTÓW KARTEZJAŃSKICHSTATIC ACCURACY OF THE COORDINATION
TRAJECTORIES SYSTEM FOR CARTESIAN ROBOTS

Streszczenie

Realizacja zadania manipulacji pojedynczym przedmiotem przez dwa roboty lub wykonanie operacji spawania, gdy jeden z robotów porusza obiektem, podczas gdy drugi realizuje spawanie, wymaga ciągłej koordynacji ruchów robotów. W pracy przedstawiono metodę generowania skoordynowanych trajektorii robotów kartezjańskich. Zaproponowana metoda polega na wprowadzeniu do układu sterowanego pozycyjnie podatności w postaci ruchu korekcyjnego. W dalszej kolejności przeprowadzono analizę dokładności statycznej dla dwóch przypadków: przy występowaniu oddziaływania siłowego pomiędzy robotami, jak to ma miejsce w przypadku zadania manipulacji, oraz bez oddziaływania siłowego – sytuacji odpowiadającej operacjom spawania. Dla przyjętej postaci korektorów zbudowano model symulacyjny i uzyskane wyniki potwierdzono w eksperymencie symulacyjnym.

Słowa kluczowe: koordynacja trajektorii, dokładność statyczna

Abstract

Execution of a manipulation task of a single object by two robots or welding operation realization when one robot moves an object whereas the other executes welding require continuous coordination of robots' movements. In the paper basis of generation coordinated trajectories for Cartesian robots are presented. The proposed method relies on complicity introduction, to position controlled system, in the form of a corrective movement. Then static accuracy analysis was carried out for two cases: with force interaction between robots – like in the manipulation task, and without force interaction – a situation which corresponds to welding operations. For the defined form of correctors simulation model was built and the results were confirmed in simulation experiments.

Keywords: trajectory coordination, static accuracy

* Dr inż. Adam Słota, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Ciągły rozwój w dziedzinach techniki napędowej, układów sterowania oraz oprogramowania pozwala na zwiększenie liczby realizowanych automatycznie zadań procesu produkcyjnego oraz wzrost złożoności realizowanych automatycznie operacji. Działania te zmierzają w kierunku kompleksowej automatyzacji procesu produkcyjnego. Kluczowym elementem kompleksowej automatyzacji jest koordynacja realizacji poszczególnych etapów procesu wytwarzania. Ma ona na celu bezkolizyjną i efektywną realizację całego procesu. Koordynacja taka może mieć charakter dyskretny, jak również ciągły. Koordynacja dyskretna dotyczy zdarzeń rozpoczynania lub kończenia wybranych etapów procesu i ma na celu zapewnienie wymaganej kolejności realizacji zadań. Zadania takie jak: transport dużych i ciężkich przedmiotów, operacje spawania przedmiotów o złożonych kształtach czy złożone operacje montażowe, mogą być realizowane automatycznie, często jednak wymagają wykorzystania jednocześnie dwóch lub większej liczby robotów przemysłowych. W takiej sytuacji konieczna jest ciągła koordynacja ruchów robotów.

2. Koordynacja ruchu robotów – studium literaturowe

Prezentowane w literaturze przedmiotu prace dotyczące ciągłej koordynacji ruchów układów wieloramiennych dotyczą w dużej mierze zadań transportu, manipulacji oraz montażu. Prezentowane zagadnienia obejmują: przegląd problematyki związanej z zadaniami manipulacji w systemach wielorobotowych [4], manipulację pojedynczym sztywnym przedmiotem [3, 5, 11, 12, 14, 15, 18, 20, 23, 26], manipulację przedmiotami elastycznymi [9,16], manipulację przedmiotem z równoczesnym ruchem względnym wybranych robotów względem manipulowanego przedmiotu [22] oraz sterowanie systemami wielorobotowymi dla operacji montażu [13, 21].

Planowanie trajektorii ruchu robotów dla zadań wymagających koordynacji, jak również sterowanie robotami, może być realizowane w sposób centralny lub rozproszony [10]. W podejściu centralnym system wielorobotowy traktowany jest jako całość i planowanie trajektorii oraz sterowanie obejmuje konfigurację wszystkich robotów systemu. W pracy [23] wymagane trajektorie efektorów trzech robotów manipulujących jednym przedmiotem wyznaczone są off-line na podstawie zadanego ruchu przedmiotu. Wymagane pozycje i orientacje efektorów robotów oraz wyznaczone na ich podstawie współrzędne złączowe wyliczane są dla kolejnych dyskretnych chwil czasowych. Do układów rozproszonych zaliczane są systemy o strukturze „przełożony-podwładny” (ang. *leader-follower*) [6, 7, 11, 14, 15, 21]. W układach tych trajektoria dla jednego z robotów, który pełni rolę „przełożonego”, wyznaczana jest off-line. Wymagana trajektoria „podwładnego” robota może być wyznaczana również off-line na podstawie udostępnionej przez „przełożonego”, wyznaczonej wcześniej, własnej trajektorii [6, 7], lub może być wyznaczana on-line, w trakcie realizacji zadania, na podstawie pomiaru sił i momentów oddziaływania efektora „podwładnego” robota z przenoszonym przedmiotem [11, 14, 15, 21]. Generowanie trajektorii może być również realizowane off-line, w równoległy i całkowicie rozproszony (bez wyróżniania „przełożonych” i „podwładnych”) sposób [22]. Metoda ta bazuje na wirtualnych siłach oddziaływania efektorów robotów z otoczeniem, a jego przydatność została potwierdzona zarówno dla prostych zadań manipulacji, jak również dla zadań bardziej złożonych, w których występuje względny ruch efektorów robotów.

W układach o strukturze „przełożony-podwładny”, w których do wyznaczenia trajektorii robota „podwładnego” wykorzystywany jest pomiar sił lub momentów oddziaływania, trajektorie robotów „podwładnych” wyznaczone są on-line. Dlatego w większości przypadków struktura systemu sterowania systemem wielorobotowym wymagającym koordynacji odpowiada sposobowi planowania trajektorii. Dla systemów o strukturze centralnej zarówno planowanie trajektorii, jak również sterowanie realizowane jest przez pojedynczy centralny kontroler. Strukturę taką posiadają dostarczane przez producentów robotów rozwiązania ciągłej koordynacji ruchów. Funkcjonalności MultiMove firmy ABB [27] oraz Multi arm control firmy Fanuc [28] pozwalają na sterowanie do czterech robotów za pomocą jednego kontrolera. W rozwiązaniu Synchronotion firmy Motoman [29] jeden kontroler może sterować siedmioma robotami. W rozwiązaniach tych, z punktu widzenia planowania ruchu i sterowania, zbiór robotów traktowany jest jako jeden system o odpowiednio większej liczbie osi sterowanych – do 72 osi.

W układach o strukturze rozproszonej każdy z robotów sterowany jest przez oddzielny kontroler. Planowanie trajektorii może w tym rozwiązaniu być realizowane centralnie dla wszystkich robotów [12, 18].

Występujące w systemach wieloobrotowych zamknięte łańcuchy kinematyczne powodują wzajemne oddziaływania siłowe między robotami. Ze względu na niepełną znajomość modeli kinematycznych i dynamicznych, zarówno robotów, jak i otoczenia, konieczne jest uwzględnienie w procesie sterowania tych oddziaływań. Ma ono na celu uzyskanie określonych zadanych wartości sił oddziaływań lub ich ograniczenie. Ograniczenie oddziaływania siłowego można uzyskać przez wprowadzenie pomiędzy efektor robotów sterowanych pozycyjnie a manipulowany przedmiot elementów sprężystych, których sztywność dobiera się na podstawie maksymalnych wartości uchybu geometrycznego i dopuszczalnych sił wewnętrznych [17].

Dwa najczęściej spotykane podejścia do aktywnego sterowania oddziaływaniem robotów z otoczeniem to hybrydowe sterowanie pozycyjno-siłowe i sterowanie impedancyjne [2]. W układach ze sterowaniem hybrydowym [9, 16, 25] w wybranych kierunkach realizowane jest sterowanie pozycyjne, w pozostałych realizowane jest sterowanie siłowe. Układy sterowania impedancyjnego [1, 2, 5, 14, 15, 18] nie realizują bezpośrednio sterowania pozycją bądź siłą, lecz wprowadzają do układu element podatności o określonej charakterystyce dynamicznej, mający na celu ograniczenie sił oddziaływania [4]. Modyfikacja trajektorii pozycyjnej w odpowiedzi na oddziaływanie siłowe może być wyznaczana w oparciu o ideę impedancji mechanicznej [13], obejmującą sztywność, tłumienie i bezwładność lub np. w oparciu o element PI [14].

3. Cel pracy

W przedstawionych pracach z obszaru koordynacji ruchów w systemach wieloobrotowych brak jest analizy dokładności statycznej prezentowanych rozwiązań. Celem opracowania jest charakterystyka algorytmu generowania skoordynowanych trajektorii dla robotów kartezyjskich oraz analiza dokładności w stanie ustalonym dla układu jednowymiarowego z oddziaływaniem siłowym oraz bez oddziaływania siłowego.

4. Algorytm generowania skoordynowanych trajektorii dwóch robotów w układzie kartezjańskim

Dla analizowanych robotów przyjęto, że ich trajektorie wyznaczone są przez ten sam algorytm. Trajektoriami obejmują pozycje i orientacje punktów *TCP* robotów w kartezjańskim układzie współrzędnych zadania. W przypadku robotów kartezjańskich wyznaczone współrzędne stanowią wartości zadane do układów napędowych sterowanych pozycyjnie. Dla robotów o innej strukturze wymagane jest rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki w celu wyznaczenia wartości współrzędnych złączowych. W pracy przyjęto kartezjańską strukturę robotów. Układy współrzędnych zadania obu robotów mają taką samą orientację. Dane wejściowe algorytmu¹ to:

- położenie układu współrzędnych zadania robota $B \{A\}$ względem układu zadania robota $A \{B\} - D_B^A(dx_B^A, dx_B^A, dx_B^A) \{D_A^B(dx_A^B, dy_A^B, dz_A^B)\}$,
- współrzędne pozycji $P_A^I(x_A^I, y_A^I, z_A^I) \{P_B^I(x_B^I, y_B^I, z_B^I)\}$ i orientacji (określone kątami obrotu wokół stałych osi układu współrzędnych zadania $X_Z Y_Z Z_Z$) $O_A^I(\alpha_A^I, \beta_A^I, \gamma_A^I) \{O_B^I(\alpha_B^I, \beta_B^I, \gamma_B^I)\}$, punktu *TCP* robota $A \{B\}$ w chwili początkowej, w układzie współrzędnych zadania robota $A \{B\} - A^I(P_A^I, O_A^I) \{B^I(P_B^I, O_B^I)\}$,
- współrzędne pozycji $P_A^E(x_A^E, y_A^E, z_A^E) \{P_B^E(x_B^E, y_B^E, z_B^E)\}$ i orientacji (określone kątami obrotu wokół stałych osi układu współrzędnych zadania $X_Z Y_Z Z_Z$) $O_A^E(\alpha_A^E, \beta_A^E, \gamma_A^E) \{O_B^E(\alpha_B^E, \beta_B^E, \gamma_B^E)\}$, punktu *TCP* robota $A \{B\}$ w położeniu docelowym, w układzie współrzędnych zadania robota $A \{B\} - A^E(P_A^E, O_A^E) \{B^E(P_B^E, O_B^E)\}$,
- zaprogramowane wartości prędkości ruchu liniowego $v_A^P \{v_B^P\}$ i obrotowego $\omega_A^P \{\omega_B^P\}$ punktu *TCP* robota $A \{B\} - V_A^P(v_A^P, \omega_A^P) \{V_B^P(v_B^P, \omega_B^P)\}$, kierunki wektorów prędkości liniowych i kątowych określone są bieżącą pozycją i orientacją układów współrzędnych efektorów robotów.

Względna pozycja i orientacja punktów *TCP* robotów w chwili początkowej i docelowej są takie same. Zasada wyznaczania trajektorii zostanie przedstawiona dla współrzędnych pozycji.

Odległość pomiędzy punktami *TCP* robotów w chwili początkowej (P_A^I oraz P_B^I) to odległość referencyjna. Przyjęto, że ruch zaprogramowany to ruch wzdłuż linii prostej z pozycji bieżącej do pozycji docelowej z zaprogramowaną prędkością $v_A^P \{v_B^P\}$. W ogólnym przypadku ruch taki prowadzi do zmiany odległości pomiędzy punktami *TCP* ($e_I(t) = l(t) - l(0) \neq 0$, gdzie $l(t) = |P_B^R(t) - P_A^R(t)|$). Dlatego ruch zaprogramowany uzupełniany jest o składową korekcyjną, której celem jest minimalizacja zmiany odległości $e_I(t)$. Ruch korekcyjny realizowany jest wzdłuż kierunku określonego przez bieżące pozycje punktów *TCP* obu robotów. Wartość prędkości ruchu korekcyjnego $v_A^C \{v_B^C\}$ obliczana jest na podstawie zmiany odległości $e_I(t)$. Prędkość ruchu wzdłuż trajektorii jest sumą geometryczną prędkości liniowych zaprogramowanej i korekcyjnej $v_A = v_A^P + v_A^C \{v_B = v_B^P + v_B^C\}$.

Wyznaczone w ten sposób pozycje punktów *TCP* robotów częściowo określają wymaganą orientację chwytaków. Brakującą współrzędną jest kąt obrotu wokół osi łączącej punkty *TCP* robotów. W celu określenia tego kąta wprowadzono wirtualny układ współrzędnych narzędzia ($X_T^A Y_T^A Z_T^A$) ($X_T^B Y_T^B Z_T^B$) robota $A \{B\}$. Początkowa orientacja tego układu zdefiniowana jest następująco:

¹ Dane wejściowe zdefiniowano dla algorytmu robota A, odpowiadające im dane algorytmu robota B umieszczono w nawiasach klamrowych. Zasadę taką przyjęto w dalszej części artykułu.

- oś $X_T^A(0) \{X_T^B(0)\}$ określa wektor łączący w chwili początkowej punkt TCP robota $A \{B\}$ z punktem TCP robota $B \{A\}$,
- oś $Y_T^A(0) \{Y_T^B(0)\}$ jest równoległa do płaszczyzny $X_Z Y_Z$ układu współrzędnych zadania robota $A \{B\}$, a jej zwrot jest taki, aby oś $Z_T^A(0)$ tworzyła z osią Z_Z układu zadania robota $A \{B\}$ kąt mniejszy lub równy 90 stopniom,
- układ $X_T^A(0) Y_T^A(0) Z_T^A(0) \{X_T^B(0) Y_T^B(0) Z_T^B(0)\}$ jest układem prawoskrętnym.

W trakcie ruchu pozycje P_A^R i P_B^R definiują chwilową orientację osi $X_T^A \{X_T^B\}$ wirtualnego układu współrzędnych narzędzia robota $A \{B\}$. Orientacja osi $Y_T^A \{Y_T^B\}$ oraz $Z_T^A \{Z_T^B\}$ określona będzie przez kąt obrotu wokół osi $X_T^A \{X_T^B\}$. Kąt obrotu $\delta_A^R \{\delta_B^R\}$ jest czwartą współrzędną, obok współrzędnych pozycji, którą należy wyznaczyć dla pełnego opisu punktów trajektorii chwytaków robotów. Przyjęto, że początkowa orientacja punktów TCP robotów jest zgodna ze zdefiniowanym powyżej wirtualnym układem współrzędnych narzędzia.

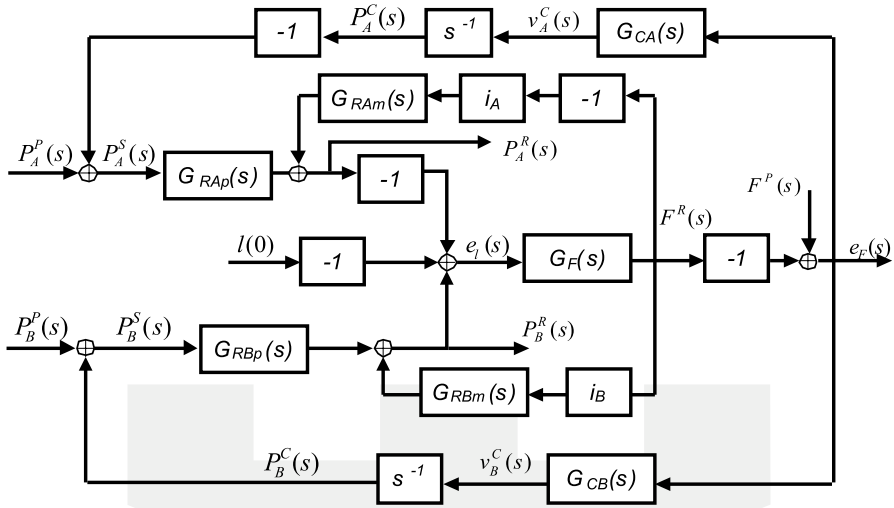
Ze względu na możliwe różnice w zaprogramowanej i rzeczywistej prędkości obrotu, wartość kąta $\delta_A^R \{\delta_B^R\}$ wyznaczana jest w sposób analogiczny jak współrzędne pozycji. Prędkość obrotu wyliczana jest jako suma dwóch składników: prędkości zaprogramowanej $\omega_A^P \{\omega_B^P\}$ i prędkości korekcyjnej $\omega_A^C \{\omega_B^C\}$. Prędkość obrotu korekcyjnego efektora robota $A \{B\}$ obliczana jest na podstawie różnicy pomiędzy rzeczywistymi kątami obrotu $e_\delta(t) = -(\delta_A^R(t) + \delta_B^R(t))$. Na podstawie kąta $\delta_A^R \{\delta_B^R\}$ wyliczane są kąty *yaw*, *pitch* i *roll*, określające orientację punktu TCP $(\alpha_A^R, \beta_A^R, \gamma_A^R) \{(\alpha_B^R, \beta_B^R, \gamma_B^R)\}$ w układzie współrzędnych zadania robota $A \{B\}$ [8].

5. Dokładność statyczna układu koordynacji trajektorii

Schemat blokowy układu do wyznaczania współrzędnych pozycji trajektorii robotów, przy uwzględnieniu oddziaływania siłowego (występującego np. w operacjach manipulacji pojedynczym przedmiotem) pomiędzy robotami, przedstawiono na rys. 1.

Przedstawione na rysunku wielkości² $P_A^P \{P_B^P\}$, $P_C^A \{P_C^B\}$, $P_S^A \{P_S^B\}$, $P_A^R \{P_B^R\}$ oznaczają transformaty Laplace'a pozycji: zaprogramowanej (wynikającej z zaprogramowanej prędkości ruchu), korekcyjnej (wynikającej z prędkości ruchu korekcyjnego), zadanej do realizacji przez roboty w kartezjańskim układzie współrzędnych oraz rzeczywistej dla punktów TCP robota $A \{B\}$. $G_{RAp} \{G_{RBp}\}$ to funkcja przejścia, określająca relację między pozycją zadaną a rzeczywistą punktu TCP robota $A \{B\}$. $G_{RAm} \{G_{RBm}\}$ to funkcja przejścia, określająca relację pomiędzy momentem obciążenia silnika napędowego a pozycją rzeczywistą punktu TCP robota $A \{B\}$. $G_{CA} \{G_{CB}\}$ to funkcja przejścia korektora trajektorii robota $A \{B\}$. G_F funkcja przejścia przedstawiająca relację pomiędzy zmianą odległości punktów TCP robotów e_i a siłą oddziaływania F^R . Przełożenie pomiędzy silnikiem napędowym a elementem wykonawczym oznaczono jako $i_A \{i_B\}$. Do wyznaczenia prędkości ruchu korekcyjnego $v_A^C \{v_B^C\}$ wykorzystano błąd oddziaływania e_F . Wszystkie przedstawione powyżej wielkości dotyczą robotów przestrzennych, zatem są to wektory, których współrzędne odpowiadają osiom robotów w układzie kartezjańskim.

² Dla uproszczenia w opisie pominięto oznaczenie zależności wielkości będących transformatami Laplace'a od zmiennej zespolonej s .



Rys. 1. Schemat blokowy układu koordynacji trajektorii z interakcją siłową pomiędzy robotami

Fig. 1. A block diagram of the trajectory coordination system with force interaction between robots

Ze względu na przyjętą kartezjańską strukturę robotów zadanie weryfikacji dokładności statycznej układu będzie przedstawione dla ruchu w jednym kierunku. Dlatego wielkości przedstawione w opisie rys. 1 dotyczyć będą pojedynczych osi napędowych robotów. W chwili początkowej $l(0) = P_B^A(0) - P_A^R(0)$, zatem odległość referencyjna $l(0)$ (początkowa odległość pomiędzy punktami *TCP* robotów) nie ma wpływu na dokładność układu. Funkcje przejścia układu dla ruchu w jednym kierunku wynoszą:

$$G_{11} = \frac{e_F}{P_A^P} = \frac{G_F G_{RAp} s}{s + G_F (G_{CA} G_{RAp} + G_{CB} G_{RBp} - s(G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B))} \quad (1)$$

$$G_{12} = \frac{e_F}{P_A^P} = \frac{-G_F G_{RBp} s}{s + G_F (G_{CA} G_{RAp} + G_{CB} G_{RBp} - s(G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B))} \quad (2)$$

$$G_{13} = \frac{e_F}{F^P} = \frac{s(1 - G_F (G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B))}{s + G_F (G_{CA} G_{RAp} + G_{CB} G_{RBp} - s(G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B))} \quad (3)$$

Transformata Laplace'a błędu oddziaływania wynosi:

$$e_F = \frac{s(G_F (G_{RAp} P_A^P - G_{RBp} P_B^P) + (1 - G_F (G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B)) F^P)}{s + G_F (G_{CA} G_{RAp} + G_{CB} G_{RBp} - s(G_{RAm} i_A + G_{RBm} i_B))} \quad (4)$$

Dla układów napędowych o klasycznej strukturze funkcje przejścia G_{RAp} , G_{RBp} , G_{RAm} , G_{RBm} mają postać:

$$G_{RAp} = \frac{L_{RAp}}{M_{RAp}}, \quad G_{RBp} = \frac{L_{RBp}}{M_{RBp}} \quad (5)$$

$$G_{RAm} = \frac{sL_{RAm}}{M_{RAm}}, \quad G_{RBm} = \frac{sL_{RBm}}{M_{RBm}} \quad (6)$$

gdzie wielomiany L_{RAp} , L_{RBp} , L_{RAm} , L_{RBm} , M_{RAp} , M_{RBp} , M_{RAm} , M_{RBm} posiadają wyrazy wolne. Niech funkcje przejścia korektorów mają postać:

$$G_{CA} = \frac{L_{CA}}{s^{h_A} M_{CA}}, \quad G_{CB} = \frac{L_{CB}}{s^{h_B} M_{CB}} \quad (7)$$

taką, że wielomiany L_{CA} , L_{CB} , M_{CA} , M_{CB} posiadają wyrazy wolne. Niech funkcja przejścia G_F zawiera składnik związany z inercją, tłumieniem i sprężystością:

$$G_F = ms^2 + bs + c \quad (8)$$

Niech zaprogramowane prędkości ruchu oraz siła oddziaływania mają stałe wartości:

$$P_A^P(t) = v_A^P t, \quad P_A^P(s) = \frac{v_A^P}{s^2} \quad (9)$$

$$P_B^P(t) = v_B^P t, \quad P_B^P(s) = \frac{v_B^P}{s^2} \quad (10)$$

$$F^P(t) = F^P, \quad F^P(s) = \frac{F^P}{s} \quad (11)$$

Dla równania (4), uwzględniając zależności (5) do (11), dla układu stabilnego, na podstawie twierdzenia o wartości granicznej wartość ustalona błędu oddziaływania wynosi:

$$e_{F_{ust}} = \lim_{s \rightarrow 0} s e_F(s) = \frac{v_A^P - v_B^P}{k_A + k_B} \quad \text{dla} \quad h_A = h_B = 0 \quad (12)$$

$$e_{F_{ust}} = \lim_{s \rightarrow 0} s e_F(s) = 0 \quad \text{dla} \quad \max(h_A, h_B) > 0 \quad (13)$$

gdzie:

$$k_A = \frac{L_{CA}(0)}{M_{CA}(0)}, \quad k_B = \frac{L_{CB}(0)}{M_{CB}(0)} \quad (14)$$

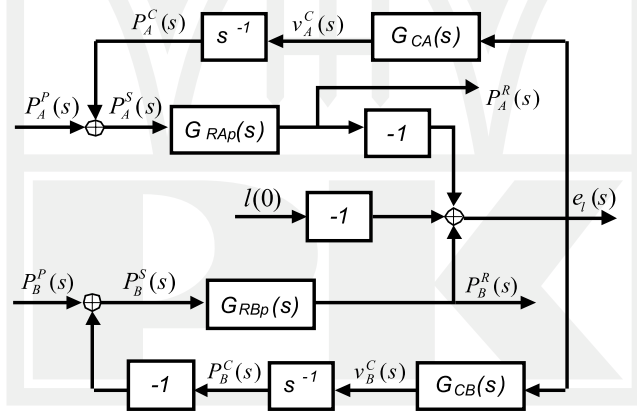
Wzory na prędkości liniowe ruchu punktów TCP robotów w stanie ustalonym przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Prędkości ruchu $v_A^R = v_B^R$ w stanie ustalonym

		h_B	
		0	1
h_A	0	$\frac{k_{CB}v_A^P - k_{CA}v_B^P}{k_{CA} + k_{CB}}$	v_A^P
	1	v_B^P	$\frac{k_{CB}v_A^P - k_{CA}v_B^P}{k_{CA} + k_{CB}}$

W przypadku braku oddziaływania siłowego, jak to się dzieje np. dla operacji spawania, układ upraszcza się do schematu przedstawionego na rys. 2, a zależności (1) do (4) przyjmują postać (15) do (17).



Rys. 2. Schemat blokowy układu koordynacji trajektorii bez oddziaływania siłowego pomiędzy robotami

Fig. 2. A block diagram of the trajectory coordination system without force interaction between robots

$$G_{11} = \frac{e_l}{P_A^P} = \frac{G_{RAp}s}{s + G_{CA}G_{RAp} + G_{CB}G_{RBp}} \tag{15}$$

$$G_{12} = \frac{e_l}{P_B^P} = \frac{-G_{RBp}s}{s + G_{CA}G_{RAp} + G_{CB}G_{RBp}} \tag{16}$$

$$e_l = \frac{s(G_{RAp}P_A^P - G_{RBp}P_B^P)}{s + G_{CA}G_{RAp} + G_{CB}G_{RBp}} \quad (17)$$

Dla układu z rys. 2 również obowiązują wyznaczone zależności (12) i (13) oraz wartości prędkości ruchu w stanie ustalonym przedstawione w tabeli 1.

Podsumowując, stopień astatyzmu całego układu zależy od stopnia astatyzmu korektorów i wynosi:

$$h = \max(h_A, h_B) + 1 \quad (18)$$

Aby dla liniowej zmiany wartości zaprogramowanych położenia (9) i (10) w stanie ustalonym błąd oddziaływania e_F miał wartość 0, przynajmniej jeden z korektorów musi posiadać jeden zerowy biegun ($h_A > 0$ lub $h_B > 0$). Warunek ten spełnia korektor zawierający element całkujący np. postaci:

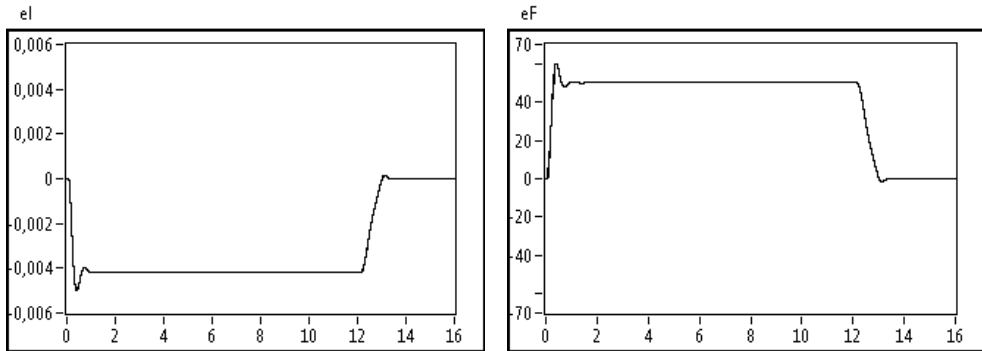
$$G_{CA(B)} = \frac{v_{A(B)}^C}{e_F} = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_0s} \quad (19)$$

Warunku tego nie spełnia funkcja przejścia korektora o postaci regulatora impedancyjnego [29]:

$$G_{CA(B)} = \frac{v_{A(B)}^C}{e_F} = \frac{s}{Ms^2 + Bs + C} \quad (20)$$

6. Wyniki symulacji dokładności statycznej układu koordynacji trajektorii

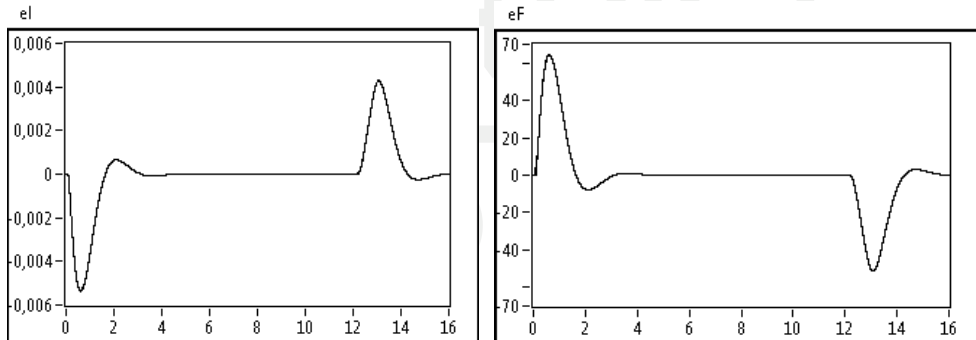
Weryfikację wyników uzyskanych w rozdziale 5 przeprowadzono z wykorzystaniem modelu symulacyjnego zbudowanego w module Simulation programu LabVIEW. Dla układu jednowymiarowego przyjęto dane: $dx_B^A = 1$ m, $x_A^I = x_B^I = 0$ m, $x_A^E = x_B^E = 1$ m, $F^P = 0$ N, trapezowy profil prędkości zaprogramowanej z wartościami prędkości $v_A^P = 0,1$ m/s, $v_B^P = 0,05$ m/s oraz przyspieszenia/opóźnienia $a_A^P = a_B^P = 1$ m/s², model oddziaływania pomiędzy robotami (8) ograniczono do elementu sprężystego o sztywności $c = 12000$ N/m. Strukturę i parametry osi napędowych robotów przyjęto jak w pracy [19]. Na rys. 3 przedstawiono wykresy zmiany odległości e_l i błędu oddziaływania e_F dla korektorów P postaci (19): $b_0 = b_2 = 0$, $b_1/a_0 = 0,0005$ m/Ns. W tym przypadku $h_A = h_B = 0$, więc zgodnie z (12) $e_{Fust} = 50$ N.



Rys. 3. Wykresy zmiany odległości e_l i błędu siły oddziaływania e_F dla korektorów typu P w układzie jednowymiarowym

Fig. 3. Charts of change of distance e_l and force interaction error e_F for P type correctors in one-dimensional system

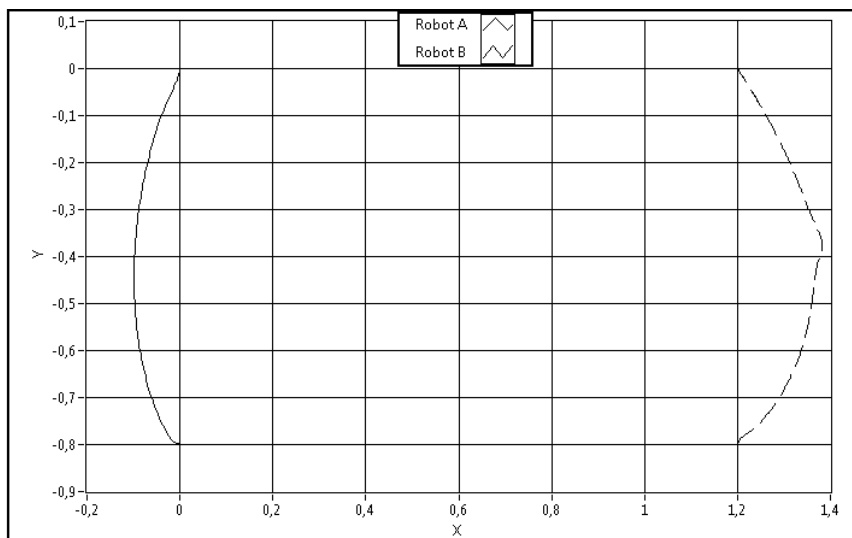
Na rysunku 4 przedstawiono wykresy zmiany odległości e_l i błędu oddziaływania e_F dla korektorów PID postaci (19): $b_0 = 0,00025$ m/Ns, $b_1 = 0,00012$ m/N, $b_2 = 0,000025$ ms/N, $a_0 = 0,5$ s. W tym przypadku $h_A = h_B = 1$, więc zgodnie z (13) $e_{F_{ust}} = 0$ N.



Rys. 4. Wykresy zmiany odległości e_l i błędu siły oddziaływania e_F dla korektorów typu PID w układzie jednowymiarowym

Fig. 4. Charts of change of distance e_l and force interaction error e_F for PID type correctors in one-dimensional system

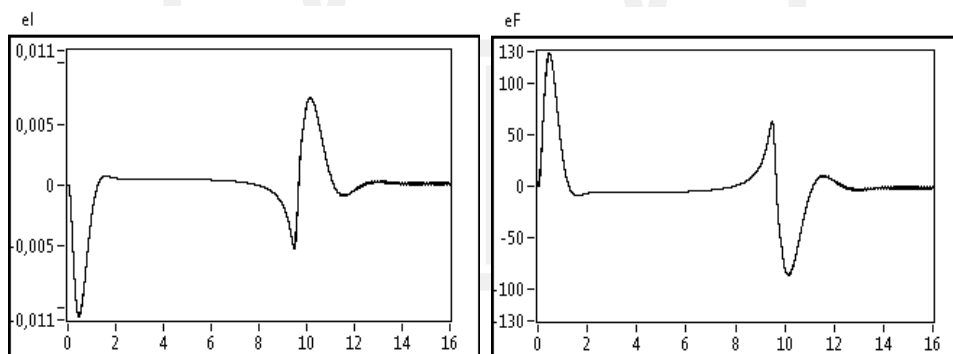
Dla przypadku ogólnego w przestrzeni 3D założenie o stałości wartości prędkości ruchu zaprogramowanego dla poszczególnych osi nie jest spełnione. Wynika to z przyjętego sposobu wyznaczania kierunku prędkości ruchu zaprogramowanego, jak również z wprowadzonej zasady korygowania ruchu. Poniżej przedstawiono wyniki symulacji dla przypadku dwuwymiarowego. Na rys. 5 zamieszczono przebiegi wygenerowanych trajektorii umieszczone w układzie współrzędnych zadania robota A . Dane wejściowe to: $D_B^A(1,2$ m, $0,8$ m), $P_A^I(0$ m, 0 m), $P_B^I(0$ m, 0 m), $P_A^E(0$ m, $0,8$ m), $P_B^E(0$ m, $0,8$ m), $v_A^P = 0,1$ m/s, $v_B^P = 0,05$ m/s, $a_A^P = a_B^P = 1$ m/s², $b_0 = 0,00025$ m/Ns, $b_1 = 0,000125$ m/N, $b_2 = 0,00000625$ ms/N, $a_0 = 0,5$ s.



Rys. 5. Trajektorie dla przykładu dwuwymiarowego oraz korektorów typu PID

Fig. 5. Trajectories for two-dimensional case and for PID type correctors

Uzyskane w symulacji zmiany odległości e_l i błędu oddziaływania e_F przy użyciu korektorów PID dla układu dwuwymiarowego zamieszczono na rys. 6.



Rys. 6. Zmiany odległości e_l i błędu siły oddziaływania e_F dla przykładu dwuwymiarowego

Fig. 6. Change of distance e_l and force interaction error e_F for two-dimensional case

7. Wnioski

W artykule przedstawiono metodę generowania skoordynowanych trajektorii dla robotów kartezjańskich w oparciu o ruch korekcyjny. Dla układu jednowymiarowego przeprowadzono analizę dokładności w stanie ustalonym. Za miarę dokładności przyjęto błąd sił oddziaływania dla układu z rys. 1 oraz zmianę odległości efektorów dla układu z rys. 2. Wy-

kazano, że o dokładności układu decyduje liczba zerowych biegunów korektorów. Występowanie oddziaływania siłowego między efektorami nie ma wpływu na dokładność statyczną układu, o ile układ pracuje w zakresie liniowym.

Literatura

- [1] Al-Jarrah O., Zheng Y., *Intelligent compliant motion control*, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 8, 1998, 116-122.
- [2] Almeida F., Lopes A., Abreu P., *Force-impedance control: a new control strategy of robotic manipulators*, Recent advances in mechatronics, Springer, Singapore 1999, 126-137.
- [3] Babazadeh A., Sadati N., *Optimal control of multiple-arm robotic systems using gradient method*, IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Vol. 1, 2004, 312-317.
- [4] Caccavale F., Uchiyama M., *Cooperative Manipulators*, in Part D: Manipulation and Interfaces of the Springer Handbook of Robotics, (Eds.) B. Siciliano, O. Khatib, Springer-Verlag, Heidelberg 2008.
- [5] Caccavale F., Chiacchio P., Marino A., Villani L., *Six-Dof Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, 2008, 576-586.
- [6] Chaimowicz L., Kumar R., Campos M., *A mechanism for dynamic coordination of multiple robots*, International Journal of Autonomous Robots, Vol. 17, 2004, 7-21.
- [7] Chaimowicz L., Sugar T., Kumar V., Campos M., *An architecture for tightly coupled multi-robot cooperation*, Proceedings of the ICRA IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, 2001, 2992-2997.
- [8] Craig J., *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Prentice Hall, 2004.
- [9] Delebarre X., Dégoulange E., Dauchez P., Bouffard-Vercelli Y., *Force control of a two-arm robot manipulating a deformable object*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, Vol. 190, 1991, 255-269.
- [10] Ettlín A., *Rigid body dynamics simulation for robot motion planning*, Vol. 3663, 2006.
- [11] Garg D., Fath A., Martinez A., *Real-time open-platform-based control of cooperating industrial robotic manipulators*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2002, 428-433.
- [12] Kawasaki H., Ito S., Ramli R., *Adaptive Decentralized Coordinated Control of Multiple Robot Arms*, Control, Vol. 48, 2003, 461-466.
- [13] Kosuge K., Hirata Y., *Coordinated Motion Control of Multiple Manipulators*, in Robotics and Automation Handbook, (Ed.) T. Kurfess, CRC Press LLC, 2004, 400-411.
- [14] Kosuge K., Oosumi T., Seki H., *Decentralized control of multiple manipulators handling an object in coordination based on impedance control of each arm*, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, 1997, 17-22.

- [15] Kosuge K., Taguchi D., Fukuda T., Sakai M., Kanitani K., *Decentralized control of robots for dynamic coordination*, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, PA, USA, Vol. 1, 1995, 76-81.
- [16] Kraus W., McCarragher B., *Hybrid position/force coordination for dual-arm manipulation of flexible materials*, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, 1997, 202-207.
- [17] Osumi H., Arai T., *Cooperative control between two position-controlled manipulators*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, 1994, 1509-1514.
- [18] Sadati N., Ghaffarkhah A., *Decentralized Impedance Control of Nonredundant Multi-manipulator Systems*, IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Sanya, China, Apr. 2008, 206-211.
- [19] Słota A., *Model koordynacji trajektorii efektorów manipulatorów kartezjańskich – weryfikacja stabilności*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2010, 628-634.
- [20] Szykiewicz W., Zieliński C., Czajewski W., Winiarski T., *Control architecture for sensor-based two-handed manipulation*, 16th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, RoManSy'06, 2006, 237-244.
- [21] Tao J., Luh J., Zheng Y., *Compliant coordination control of two moving industrial robots*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, 1990, 322-330.
- [22] Tsuji T., Jazidie A., Kaneko M., *Distributed trajectory generation for cooperative multi-arm robots via virtual force interactions*, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Vol. 27, 1997, 862-867.
- [23] Tzafestas C., Prokopiou P., Tzafestas S., *Path Planning and Control of a Cooperative Three-Robot System Manipulating Large Objects*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers, Vol. 22, 1998, 99-116.
- [24] Winiarski T., Zieliński C., *Podstawy sterowania siłowego w robotach*, Pomiary Automatyka Robotyka 6/2008, 5-10.
- [25] Yamano M., Kim J., Konno A., Uchiyama M., *Cooperative Control of a 3D Dual-Flexible-Arm Robot*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers, Vol. 39, 2004, 1-15.
- [26] Yun X., *Coordination of two-arm pushing*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, 1991, 182-187.
- [27] [http://www.05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/734fb908d1c8ee50c12576dd005b69d0/\\$file/abb%20multimove%20functionality.pdf](http://www.05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/734fb908d1c8ee50c12576dd005b69d0/$file/abb%20multimove%20functionality.pdf)
- [28] http://www.fanucrobotics.com/robot-applications/Flexible_Welding_M-20iA_and_ARC_Mate_100iC.aspx
- [29] http://www.motoman.se/uploads/media/MotoNews_2011_eng.pdf