

dr inż. Adam Słota
Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji
Politechnika Krakowska

MODEL KOORDYNACJI TRAJEKTORII EFEKTORÓW DWÓCH MANIPULATORÓW KARTEZJAŃSKICH DLA ZADAŃ TRANSPORTOWYCH

W pracy przedstawiono model korekcji trajektorii efektora manipulatora kartezjańskiego realizującego wspólnie z drugim manipulatorem zadanie transportowe. Dla założonego elastycznego zamocowania przedmiotu transportowanego wprowadzona korekcja ma na celu ograniczenie zmian odległości pomiędzy efektorami manipulatorów. Dla modeli korekcji proporcjonalnej i proporcjonalno-całkującej i wybranych wartości parametrów modelu przeprowadzono symulację i przedstawiono wyniki.

A TRAJECTORY COORDINATION MODEL OF TWO CARTESIAN MANIPULATORS FOR A TRANSPORT OPERATION

In the paper a model of trajectory correction of a Cartesian manipulator cooperating with the second manipulator to transport an object is presented. For flexible mounting of a transported object to the robots proposed trajectory correction aims at limiting the change of distance between manipulators' effectors. For the models of proportional and proportional-integral correction and selected values of model parameters simulation is performed and results are presented.

1. WPROWADZENIE

Współczesne procesy wytwarzania w przemyśle maszynowym, ze względu na wymagania rynkowe, realizowane są w dużym stopniu w sposób automatyczny. Dla obróbki pojedynczych detali, montażu zespołów i produktów finalnych budowane są zautomatyzowane systemy obróbkowe i montażowe. Zadania obróbki wykonywane są na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Do realizacji operacji montażu, transportu, manipulacji, paletyzacji itp. stosowane są roboty przemysłowe. Komputerowe układy sterowania tych urządzeń mają możliwość wymiany informacji pomiędzy sobą jak również komunikacji z układem sterowania wyższego poziomu. Umożliwia to koordynację działań tak, aby realizacja zadań przebiegała bezkolizyjnie. W większości przypadków operacje wykonywane są przez pojedyncze obiekty a koordynacja ma charakter dyskretny. Rozpoczęcie operacji warunkowane jest dostępnością w określonym stanie obiektu ją wykonującego. Zakończenie realizacji danej operacji umożliwia rozpoczęcie kolejnej operacji. Stany obiektów stanowiące kluczową rolę w sterowaniu zmieniają się w momentach rozpoczynania i kończenia operacji.

Występują jednak operacje, których wykonanie przez pojedynczy obiekt jest trudne lub wręcz niemożliwe. Przykładami mogą być: i) operacja transportu lub manipulacji przedmiotu, którego ciężar przekracza udźwig pojedynczego robota; ii) operacja transportu lub manipulacji przedmiotu, którego wymiary uniemożliwiają jego stabilne zamocowanie; iii) operacje wymagające równoczesnych skoordynowanych ruchów dwóch manipulatorów. Zadania takie wymagają ciągłej koordynacji trajektorii efektorów przynajmniej dwóch robotów. Może to

być zrealizowane przez jeden układ sterowania – sterowanie centralne. Wówczas układ sterowania musi zapewniać możliwość interpolacji ruchu większej liczby osi sterowanych numerycznie – sterowanie dwoma robotami o 6 stopniach swobody wymaga interpolacji ruchu 12 osi. Rozwiązania takie są dostarczane przez firmy Fanuc oraz MOTOMAN. W drugim przypadku każdy z robotów sterowany jest przez oddzielny układ sterowania. W takiej sytuacji układ sterowania robota musi mieć zaimplementowany algorytm, który na podstawie własnego zaprogramowanego ruchu oraz informacji o wykonywanych ruchach przez pozostałe roboty wylicza trajektorię spełniającą zadane kryteria. Algorytmy koordynacji działań robotów wzorowane są na zachowaniu grupy osób, które współpracują przy realizacji zadania. Każdy członek grupy realizuje jemu wyznaczoną część zadania. Działanie jego ograniczone jest działaniami innych członków grupy, a swoim działaniem wpływa na pozostałych współpracowników. Dla zadania transportu przedmiotu przez dwa roboty kryterium generowania trajektorii będzie zachowanie w zadanych granicach różnicy pomiędzy odległością efektorów robotów w trakcie ruchu a ich odległością początkową.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Systemom wieloobrotowym MRS (Multi Robot Systems) poświęcono wiele uwagi w przeciągu ostatnich lat o czym świadczy liczba publikacji oraz opracowania przeglądowe poświęcone tej tematyce [2, 6, 17].

Prace dotyczące systemów zawierających dużą liczbę robotów mobilnych koncentrują się wokół zadań wyszukiwania, obserwacji oraz transportu/manipulacji obiektów, których wymiary i ciężar przekraczają możliwości pojedynczego robota [1, 3, 7, 11, 15]. W pracy [12] omówiono zagadnienia dotyczące koordynacji grup robotów takie jak: formowanie wzorca ustawienia robotów, zachowanie wzorca ustawienia - koordynacja w ruchu. Większość rozwiązań bazuje na architekturze „leader-follower”, w której jeden z robotów - lider realizuje zaprogramowany ruch a pozostałe roboty dostosowują swoje ruchy od ruchów lidera. Układy sterowania robotów mogą uzyskiwać informacje o ruchach lidera poprzez bezpośrednią komunikację – w pracy [4] przedstawiono system, w którym lider planuje swoją trajektorię rozsyła informacje o swoim położeniu i prędkościach do pozostałych robotów w formie komunikatów. Gdy pomiędzy układami sterowania robotów nie ma bezpośredniej komunikacji ruchy lidera są szacowane na podstawie ruchu obiektu [10] lub na podstawie pomiaru oddziaływań siłowych pomiędzy robotem a obiektem [15]. W przedstawionym w pracy [4] rozwiązaniu układ „leader-follower” ma strukturę hierarchiczną – robot, który podąża z danym liderem może być równocześnie liderem dla innego robota. Możliwa jest również zmiana lidera w trakcie realizacji zadania. Może to nastąpić z inicjatywy lidera, który rezygnuje z przywództwa lub na żądanie robota nie będącego liderem. W pracy [13] przedstawiono analizę uchwycenia obiektu (wstępnego rozmieszczenia robotów względem obiektu) tak, aby zapewnić równomierne obciążenie robotów i stabilność podparcia obiektu podczas transportu.

Druga grupa systemów to dwa lub trzy roboty realizujące skoordynowane zadania transportu/manipulacji lub montażu [5, 9, 14, 16]. W tej grupie prace dotyczą zagadnień koordynacji trajektorii robotów podczas realizacji zadania jak również lokalizacji obiektu, wstępnej orientacji chwytaka i uchwycenia obiektu [5]. Do koordynacji ruchów robotów często wykorzystuje się pomiary sił i momentów oddziaływania pomiędzy robotem a obiektem [5, 9, 16]. W pracy [5] przedstawiono dwa rozwiązania koordynacji ruchów dwóch robotów ABB IRB140. W pierwszym przypadku roboty sterowane są przez realizujące sterowanie pozycyjne układy sterowania S4CPlus. Układy te korygują kolejne położenia robota tak, aby

minimalizować siły oddziaływania robota z obiektem w płaszczyźnie XY. W rozwiązaniu drugim jeden z robotów wykonuje przemieszczenia o 1 milimetr w każdym kroku czasowym, drugi robot wykorzystując sterowanie rozmyte szacuje swoje ruchy na podstawie pomiaru sił i momentów oddziaływania z obiektem. W pracy [8] przedstawiono koncepcję koordynacji pracy dwóch robotów sterowanych pozycyjnie transportujących obiekt uchwycony za pomocą zawierających sprężyste elementy chwytaków. Elastyczne zamocowanie obiektu ma na celu ograniczenie oddziaływania siłowego pomiędzy robotem a obiektem będącego rezultatem niedokładności pozycjonowania.

Chociaż w ostatnich latach można obserwować rozwój w obszarze przemysłowych układów sterowania realizujących sterowanie pozycyjno-siłowe to jednak zdecydowanie przeważają układy realizujące sterowanie pozycyjne. Dlatego celowym, zdaniem autora, jest opracowanie algorytmów umożliwiających koordynację pracy robotów sterowanych pozycyjnie.

3. MODEL KOORDYNACJI TRAJEKTORII

3.1. Założenia wstępne

Dla opracowania modelu przyjęto następujące założenia:

- każdy robot wyposażony jest w oddzielny układ sterowania realizujący sterowanie pozycyjne,
- dla każdego z robotów określone jest pozycja docelowa i prędkość ruchu, zaprogramowany ruch do położenia docelowego jest realizowany wzdłuż linii prostej,
- odległości pomiędzy punktami startowymi i docelowymi robotów są takie same,
- układ sterowania robota posiada informacje o aktualnym położeniu efektora drugiego robota, nie zna natomiast jego położenia docelowego ani jego prędkości,
- trajektoria każdego z robotów wyznaczana jest przez ten sam algorytm,
- połączenie robota i obiektu transportowanego zrealizowane jest przy pomocy złącza przegubowego - oddziaływanie siłowe pomiędzy robotem a obiektem jest tylko w kierunku przechodzącym przez środki przegubów łączących roboty z obiektem transportowanym,
- połączenie robota i obiektu transportowanego zawiera element sprężysty pozwalający na ograniczenie wartości sił pomiędzy robotem a obiektem transportowanym spowodowanych błędami pozycjonowania robotów w trakcie ruchu,
- parametry dynamiczne układu sterowania i układu wykonawczego na aktualnym etapie prac nie są uwzględniane,
- możliwe kolizje pomiędzy robotami oraz transportowanym obiektem na aktualnym etapie prac nie są uwzględniane.

Każdy z robotów dąży do osiągnięcia zaprogramowanej pozycji docelowej realizując ruch po najkrótszej drodze - wzdłuż linii prostej. Postępowanie takie prowadziłyby jednak do dużych (zależnych od współrzędnych pozycji początkowych i docelowych obydwu robotów) zmian w odległości pomiędzy efektorami robotów. Dlatego konieczna jest korekcja ruchu mająca na celu ograniczenie zmian odległości pomiędzy efektorami robotów.

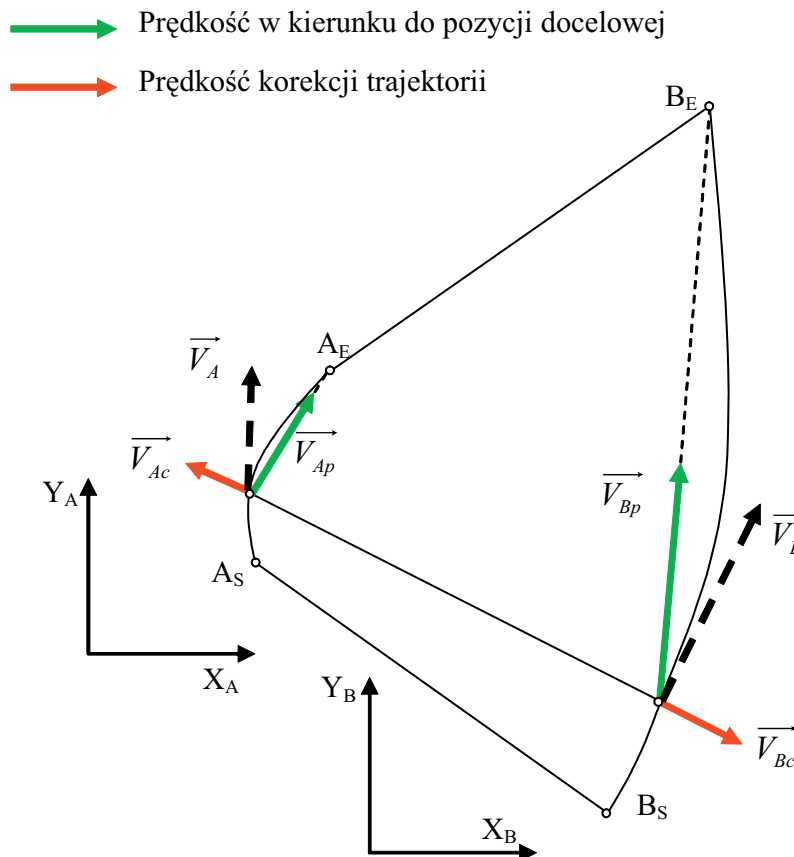
Należy odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób zaprogramowany ruch powinien być korygowany, aby przy równoczesnym ruchu obydwu robotów uzyskać możliwie małe zmiany odległości effektorów robotów (drugi robot również podejmuje działania korygujące jego trajektorię). Założono znajomość bieżącej pozycji efektora drugiego (na podstawie pomiaru zewnętrznego lub z układów pomiaru położenia serwonapędów drugiego robota).

Przyjęto, że ruch korekcyjny realizowany jest w kierunku, w którym określana jest odległość pomiędzy efektorami robotów – wzdłuż linii przechodzącej przez środki przegubów łączących roboty z obiektem transportowanym. Zakładając, że transportowanym obiektem jest belka jest to kierunek belki (określenie to będzie stosowane w dalszej części pracy). Zmiana odległości wyznaczana jest na podstawie znajomości położenia efektora robota drugiego. Zadana trajektoria efektora robota, do realizacji przez serwonapędy, generowana jest on-line w trakcie ruchu.

W dalszej części pracy przedstawiony zostanie algorytm wyznaczania trajektorii dla dwóch robotów kartezjańskich płaskich, których płaszczyzny ruchu są wzajemnie równoległe¹. Tok postępowania zostanie przedstawiony dla robota A , trajektoria dla robota B generowana jest w taki sam sposób.

3.2. Proporcjonalna korekcja trajektorii

Na rys. 1 przedstawiono zasadę korekcji trajektorii effektorów robotów.



Rys. 1. Zasada korekcji trajektorii

¹ Przykład ruchu w płaszczyźnie został wybrany ze względu na prostotę ilustracji zagadnienia a przedstawiony algorytm obowiązuje dla przypadku ruchu w przestrzeni.

Kolejne zadane wartości położenia wyznaczone są jako suma dwóch ruchów składowych:

- ruchu od pozycji bieżącej do pozycji docelowej wzdłuż linii prostej z zaprogramowaną prędkością,

$$\vec{r}_{Ap}(t) = \int V_{Ap} \vec{ia}_e(t) dt \quad (1)$$

gdzie:

$\vec{r}_{Ap}(t)$ jest wektorem określającym zadane położenie efektora robota A w układzie współrzędnych robota A wynikające z ruchu w kierunku położenia docelowego,

V_{Ap} jest zaprogramowaną prędkością robota A ,

$\vec{ia}_e(t)$ jest wersorem wektora od punktu bieżącego do zaprogramowanego punktu docelowego.

- ruchu korekcyjnego w kierunku belki, mającego na celu ograniczenie zarejestrowanej zmiany odległości efektorów robotów.

$$\vec{r}_{Ac}(t) = \int k_{Ac} \Delta l_{AB}(t) \vec{il}_{AB}(t) dt \quad (2)$$

gdzie:

$\vec{r}_{Ac}(t)$ jest wektorem określającym zadane położenie efektora robota A w układzie współrzędnych robota A wynikające z ruchu korekcyjnego w kierunku belki,

k_{Ac} jest współczynnikiem korekcyjnym określającym szybkość likwidacji wyznaczonej zmiany odległości efektorów; w przypadku korekcji proporcjonalnej szybkość zmiany trajektorii mająca na celu ograniczenie zmiany odległości efektorów jest iloczynem współczynnika korekcyjnego i wielkości zmiany odległości,

$\Delta l_{AB}(t)$ jest zarejestrowaną zmianą odległości efektorów robotów,

$$\Delta l_{AB}(t) = \left| \vec{l}_{AB}(t) \right| - \left| \vec{l}_{AB}^0(t) \right| \quad (3)$$

$\vec{il}_{AB}(t)$ jest wersorem wektora belki w układzie współrzędnych robota A .

Ponieważ zarejestrowana zmiana odległości jest taka sama dla obydwu robotów - $\Delta l_{AB}(t) = \Delta l_{BA}(t)$ wzajemne proporcje wartości współczynników k_{Ac} oraz k_{Bc} określają udział robotów w korygowaniu trajektorii. Robot, dla którego współczynnik korekcyjny jest mniejszy koryguje swoją trajektorię z mniejszym stopniem.

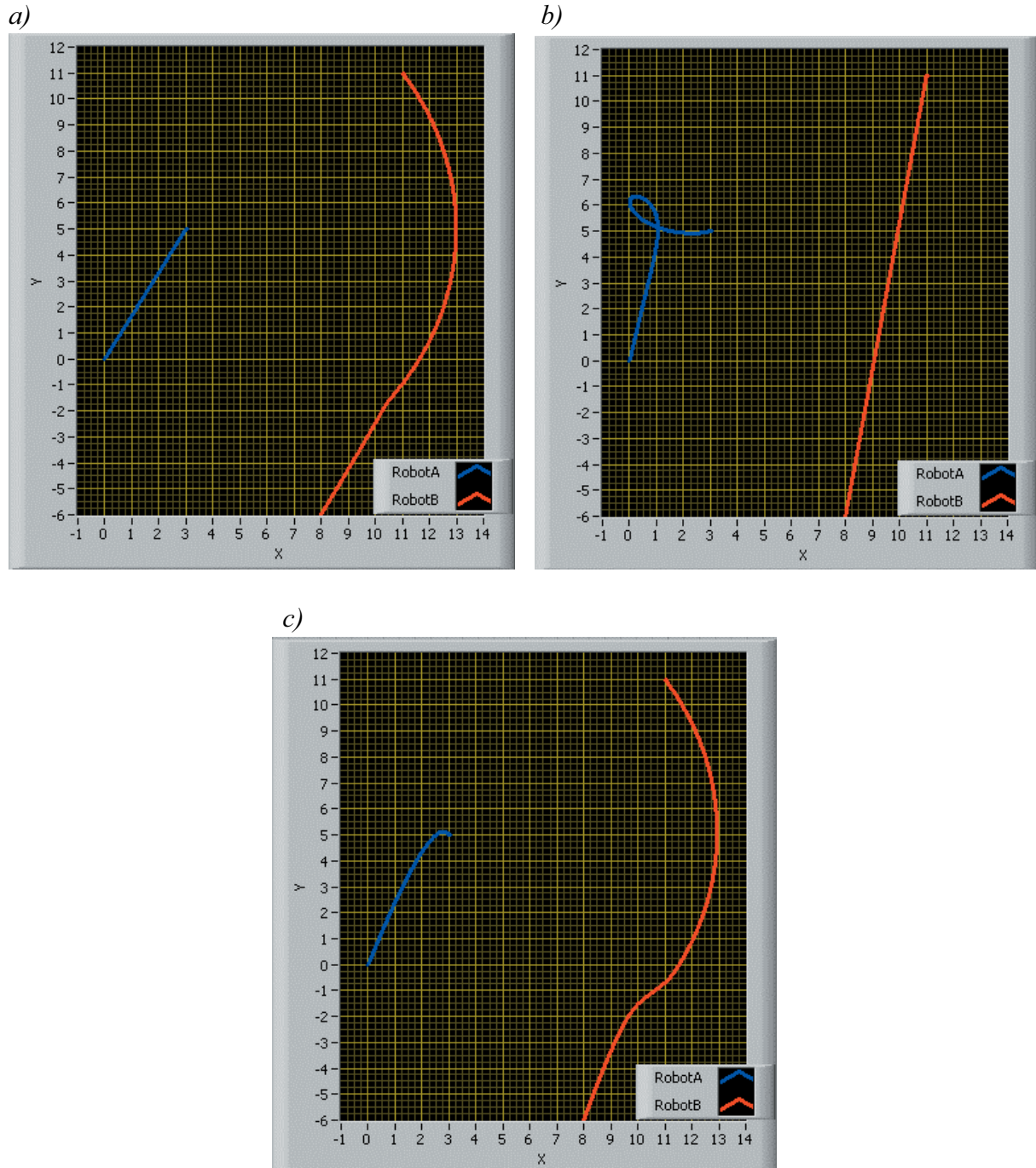
Zaproponowany model został zaimplementowany w środowisku LabView. Dane wejściowe modelu stanowią:

- pozycje początkowe efektorów robotów $A_S(X_{As}, Y_{As})$ oraz $B_S(X_{Bs}, Y_{Bs})$ wyrażone odpowiednio w układach współrzędnych robotów A oraz B ,
- pozycje docelowe efektorów robotów $A_E(X_{Ae}, Y_{Ae})$ oraz $B_E(X_{Be}, Y_{Be})$ wyrażone odpowiednio w układach współrzędnych robotów A oraz B ,
- przesunięcie układów współrzędnych robota B względem układu współrzędnych robota A $D_{BA}(X_{BA}, Y_{BA})$,
- zaprogramowane prędkości ruchów efektorów robotów V_{Ap} oraz V_{Bp} ,
- wartości współczynników korekcyjnych k_{Ac} oraz k_{Bc} .

Dla przeprowadzonej symulacji przyjęto dane: $A_S(0, 0)$, $B_S(0, 0)$, $A_E(3[m], 5[m])$, $B_E(3[m], 17[m])$, $D_{BA}(8[m], -6[m])$, $V_{Ap}=V_{Bp}=0.3[m/s]$.

Na rys. 2 przedstawiono wygenerowane trajektorie dla trzech par wartości współczynników korekcyjnych:

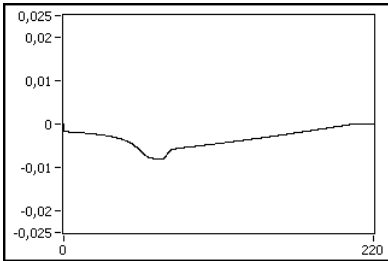
- $k_{Ac} = 0, k_{Bc} = 10 \text{ 1/s}$ – robot *A* wykonuje ruch do pozycji docelowej wzdłuż linii prostej, cała korekcja trajektorii realizowana jest przez robot *B*,
- $k_{Ac} = 10 \text{ 1/s}, k_{Bc} = 0$ – robot *A* realizuje całą korekcję trajektorii, robot *B* wykonuje ruch do pozycji docelowej wzdłuż linii prostej,
- $k_{Ac} = k_{Bc} = 3 \text{ 1/s}$ – obydwie roboty realizują ruch korekcyjny w równym stopniu.



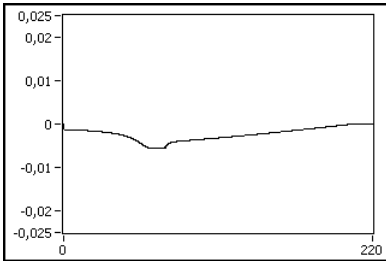
Rys. 2. Przykłady wygenerowanych trajektorii

Na rys. 3 przedstawiono wielkość zarejestrowanej zmiany odległości $\Delta l_{AB}(t)$ dla różnych wartości współczynników korekcji i zaprogramowanej prędkości ruchu.

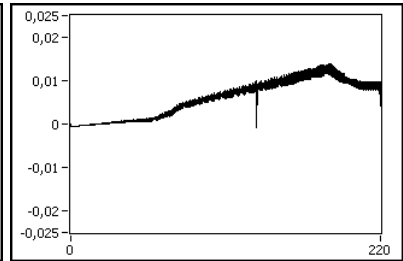
a) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,1 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=10 \text{ 1/s}$



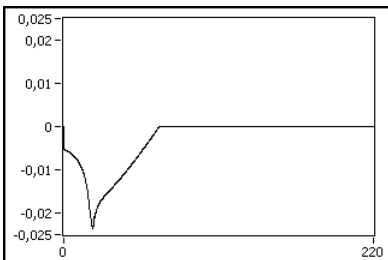
b) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,1 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=14 \text{ 1/s}$



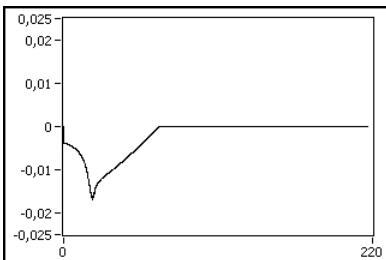
c) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,1 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=30 \text{ 1/s}$



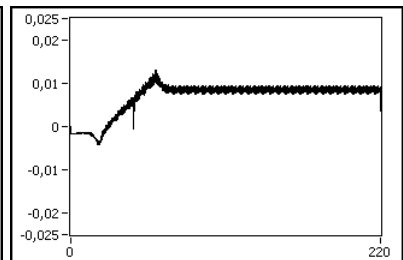
d) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,3 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=10 \text{ 1/s}$



e) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,3 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=14 \text{ 1/s}$



f) $V_{Ap}=V_{Bp}=0,3 \text{ m/s}$
 $k_{Ac}=k_{Bc}=30 \text{ 1/s}$



Rys. 3. Przebiegi zmian odległości efektorów robotów dla korekcji proporcjonalnej

Wzrostowi wartości zaprogramowanej prędkości odpowiadają większe wartości zmiany odległości pomiędzy efektorami robotów. Większe wartości współczynników korekcyjnych prowadzą do zmniejszenia zmian odległości jednak zbyt duże wartości współczynników powodują nadmierną reakcję na zmiany odległości, co w konsekwencji prowadzi do ciągłych zmian odległości wokół wartości średniej różnej od zera.

Występujące zmiany odległości powodowane są składową wartości zadanej położenia w kierunku belki wynikającej z ruchu od pozycji bieżącej do pozycji docelowej. Tak więc wartości zmian odległości będą zależę od wzajemnego usytuowania pozycji startowych i docelowych efektorów robotów.

3.3. Proporcjonalno-całkująca korekcja trajektorii

W tym przypadku szybkość ruchu korekcyjnego mającego na celu likwidację zmiany odległości dla efektora robota A jest opisana zależnością:

$$V_{Ac}(t) = k_{Ac}\Delta l_{AB}(t) + \frac{k_{Ac}}{T_{Ac}} \int \Delta l_{AB}(t) dt \quad (4)$$

gdzie:

k_{Ac} jest współczynnikiem korekcyjnym (jak w pkt. 3.2),

$\Delta l_{AB}(t)$ jest zarejestrowaną zmianą odległości (jak w pkt. 3.2),

T_{Ac} jest czasem zdwojenia.

Kolejne zadane wartości położenia wynikające z ruchu korekcyjnego efektora robota A obliczane są ze wzoru:

$$\vec{r}_{Ac}(t) = \int V_{Ac}(t) \vec{i}l_{AB}(t) dt \quad (5)$$

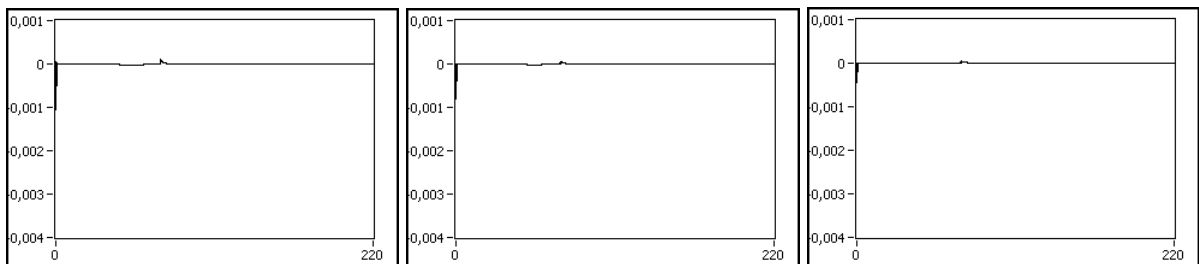
Składowa ruchu w kierunku do pozycji docelowej obliczana jest jak w przypadku korekcji proporcjonalnej według zależności (1).

Na rys. 4 przedstawiono wielkość zarejestrowanej zmiany odległości $\Delta l_{AB}(t)$ dla różnych wartości współczynników korekcji i zaprogramowanej prędkości ruchu dla korekcji proporcjonalno-całkującej.

a) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,1 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 10 \text{ 1/s}$

b) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,1 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 15 \text{ 1/s}$

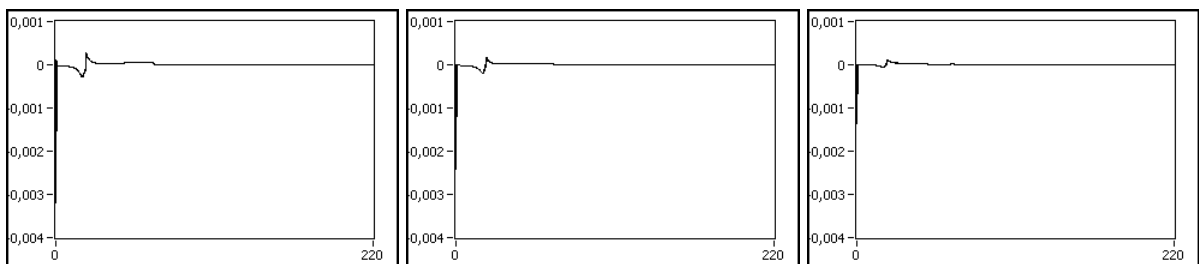
c) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,1 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 30 \text{ 1/s}$



d) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,3 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 10 \text{ 1/s}$

e) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,3 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 15 \text{ 1/s}$

f) $V_{Ap} = V_{Bp} = 0,3 \text{ m/s}$
 $T_{Ac} = T_{Bc} = 0,1 \text{ s}$
 $k_{Ac} = k_{Bc} = 30 \text{ 1/s}$



Rys. 4. Przebiegi zmian odległości efektorów robotów dla korekcji proporcjonalno-całkującej

Relacje pomiędzy zaprogramowaną wartością prędkości oraz wartościami współczynników korekcyjnych mają podobny charakter jak w przypadku korekcji proporcjonalnej. Wartości bezwzględne zmian odległości uzyskane dla tych samych prędkości i współczynników korekcyjnych w przypadku korekcji proporcjonalno-całkującej są mniejsze niż dla korekcji proporcjonalnej.

4. PODSUMOWANIE

Realizacja zadania transportowego przez dwa roboty równocześnie wymaga koordynacji ich trajektorii. Wzajemna nieznanomość parametrów takich jak zaprogramowana pozycja docelowa i prędkość ruchu oraz mogące wystąpić w trakcie ruchu zakłócenia (nierównoczesne rozpoczęcie ruchu, zmienne opory ruchu) powodują, że trajektoria ruchu nie może być wyznaczona off-line. Zaproponowana metoda pozwala na generowanie wartości zadanej położe-

nia on-line na postawie znajomości zmieniającego się w czasie położenia efektora drugiego robota. Ruch w kierunku do pozycji docelowej jest korygowany na podstawie zarejestrowanej zmiany odległości pomiędzy efektorami robotów. Ruch drugiego robota powoduje „błąd na-dążania” korekcji a tym samym różne od zera zmiany odległości pomiędzy efektorami dla ruchu wzdłuż wygenerowanych trajektorii.

Uzyskane w drodze symulacji wyniki wskazują, że kształt trajektorii oraz zmiana odległości pomiędzy efektorami robotów zależą od wartości prędkości ruchów effektorów oraz parametrów modelu korekcji. Zmiana odległości pomiędzy efektorami zależy również od wzajemnego usytuowania pozycji startowych i docelowych effektorów robotów.

5. LITERATURA

- [1] Ahmadabadi, M.N. & Nakano E. A “Constrain and Move” Approach to Distributed Object Manipulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 17, No. 2, pp. 157-172, April 2001
- [2] Arai, T.; Pagello, E. & Parker L. E. Editorial: Advances in Multi-Robot Systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp. 655-661, October 2002
- [3] Bohringer, K.; Brown, R.; Donald, B.; Jennings, J. & Rus, D. Distributed Robotic Manipulation: Experiments in Minimalism. *Experimental Robotics IV, Lecture Notes in Control and Information*, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [4] Chaimowicz, L.; Sugar, T.; Kumar, V. & Campos, M. An Architecture for Tightly Coupled Multi-Robot Cooperation. *Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 2001
- [5] Devendra, P.; Fath, A. & Martinez A. Real-time Open-Platform-Based Control of Cooperating Industrial Robotic Manipulators. *Proc. of the 2002 IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp. 428-433, October 2002
- [6] Farinelli, A.; Iocchi, L. & Nardi, D. Multirobot Systems: A Classification Focused on Coordination. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics – part B: Cybernetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2015-2028, October 2004
- [7] Gerkey B. P. & Mataric M. J. Pusher-watcher: An approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 464 - 469, May 2002
- [8] Hisashi, Osumi & Tamio, Arai Cooperative Control between Two Position-controlled Manipulators. *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1509-1514, 1994
- [9] Khatib, O.; Yokoi, K.; Chang, K.; Ruspini, D.; Holmberg, R.; Casal, A. & Baader, A., Force Strategies for Cooperative Tasks in Multiple Mobile Manipulation Systems. *Robotics Research: The Seventh International Symposium*, pp. 333-342, 1996
- [10] Kosuge, K. & Oosumi, T. Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object. *Proceedings of the 1996 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 318-323, 1996
- [11] Qin Chen & S. Luh, J. Y. Coordination and control of a group of small mobile robots. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2315-2320, 1994

- [12] Qin Chen & Luh J. Y. Distributed Motion Coordination of Multiple Robots. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2315–2320, 1994
- [13] Sasaki, J.; Ota, J.; Yoshida, E.; Kurabayashi, D. & Arai, T. Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1205-1210
- [14] Simmons, R.; Singh, S.; Hershberger, D.; Ramos, J. & Smith, T. First results in the coordination of heterogeneous robots for large-scale assembly. *Proc. Int. Symp. Experimental Robotics*, December 2000
- [15] Stilwell D. J.; & Bay J. S. Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots. *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 766-771, Atlanta 1993
- [16] 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*, No. 487, pp. 237-244, June 2006
- [17] Uny Cao, Y.; Fukunaka, A.F. & Kahang, A.B. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*, Vol. 4, No. 1, pp. 7-23