

Edward JEZERSKI
Piotr MYSZKOROWSKI
Instytut Automatyki
Politechniki Łódzkiej

KOORDYNACJA PRACY ROBOTÓW Z WYKORZYSTANIEM ZEWNĘTRZNEJ SENSORYKI -
- ALGORYTM WSPÓLPRACY ROBOTÓW

W artykule przedstawiono wstępne rezultaty prac wykonanych w projekcie badawczym KBN 8 S505 025 05. Przedstawiono algorytm współpracy dwóch potencjalnie kolidujących robotów. Omówiono również stanowisko badawcze, na którym zostanie przetestowany ten algorytm.

1. WSTĘP

Współpraca dwóch lub większej liczby robotów przemysłowych stanowi obszar badań otwierających możliwości nowych rozwiązań zagadnień związanych z elastycznymi systemami produkcyjnymi. Skoordynowana praca robotów występuje na przykład podczas przekazywania elementów, wspólnego obrabiania tych elementów lub wykonywania przez roboty ruchów bezkolizyjnych we wspólnej przestrzeni roboczej w trakcie realizacji niezależnych zadań. We wszystkich wspomnianych przypadkach strategia sterowania musi zapewniać bezkolizyjną pracę każdego z manipulatorów w jego przestrzeni roboczej.

Śledząc publikacje poruszające tematykę współpracy robotów [1,7,14,16,17,18,21,23], można wyraźnie rozróżnić opisy stosunkowo prostych zastosowań praktycznych od bardzo zaawansowanych rozważań teoretycznych. W zagadnieniach praktycznych stosuje się rozwiązania, w których wejście jednego manipulatora we wspólną przestrzeń roboczą przypisuje tej przestrzeni status zabronionej dla innych manipulatorów. Jednocześnie okazuje się, że współpracujące roboty przemysłowe tracą większość swojego czasu oczekując na zwolnienie wspólnej przestrzeni roboczej. Poza tym, ten typ koordynacji działania jest opracowywany za każdym razem dla konkretnej sekwencji czynności roboczych manipulatorów. Z kolei, w prowadzonych aktualnie badaniach teoretycznych z reguły wykorzystuje się czasochłonne algorytmy optymalizacji i przeszukiwań do planowania bezkolizyjnych torów dla współpracujących

manipulatorów.

Zrobotyzowane gniazda produkcyjne są coraz częściej wyposażane w systemy wizyjne zaliczane do układów zewnętrznej sensoryki. Najczęściej systemy te służą do ogólnego nadzoru, bądź też wykorzystywane są do rozpoznawania położenia i orientacji prostych detali [8,13,22]. Pojawiają się już jednak laboratoryjne stanowiska badawcze, które wykorzystują systemy wizyjne jako aktywne elementy toru sprzężenia zwrotnego w układzie sterowania robota [6,9,12,15,20]. Warto zwrócić uwagę na to, że jeżeli stosowany jest zewnętrzny układ sensoryczny to mogą być zmniejszone wymagania odnośnie rozdzielczości przetworników położenia umieszczanych w złączach manipulatora oraz wymagania dotyczące odpowiednio dużej sztywności ogniw.

2. ALGORYTM WSPÓLPRACY ROBOTÓW

Typowe ustawienie dwóch współpracujących robotów przedstawiono na rysunku 1. Rozpatrzone wyłącznie ruchy planarne obu manipulatorów. Przyjmując maksymalne wartości r_{1max} i r_{2max} dla obu robotów można zdefiniować na płaszczyźnie OXY maksymalny wspólny obszar roboczy dla obu ramion, będący jednocześnie maksymalną możliwą przestrzenią kolizyjną. Dokonując podziału ruchów robotów na sekwencje faz ruchów, można stwierdzić, że w pewnych fazach nie wystąpi przejście ramienia przez maksymalną przestrzeń kolizyjną lub nastąpi to tylko w pewnych wycinkach tej przestrzeni. Dla każdej fazy ruchu robota można więc zdefiniować aktualną przestrzeń kolizyjną zawartą w maksymalnej przestrzeni kolizyjnej. Powstaje w ten sposób przyporządkowanie sekwencji aktualnych przestrzeni kolizyjnych do sekwencji faz ruchu robotów.

Po ustaleniu priorytetu jednego z robotów drugi z robotów musi unikać kolizji wyłącznie w aktualnej przestrzeni kolizyjnej. Robot bez nadanego priorytetu może (zachowując bezpieczną odległość) poruszać się w tych obszarach maksymalnej przestrzeni kolizyjnej, które już nie są używane przez priorytetowy robot. Ta metoda bezkolizyjnego sterowania pozwala na uniknięcie długich przestoju robotów, a jednocześnie rozszerza dopuszczalną przestrzeń roboczą, ponieważ blokowanie maksymalnej przestrzeni kolizyjnej przestaje być koniecznością.

Aby uniknąć jakichkolwiek kolizji ramion manipulatorów bądź ich chwytaków przenoszących obrabiane detale lub narzędzia w aktualnej przestrzeni kolizyjnej, układy sterowania obu robotów muszą operować skoordynowanymi

współzrzednymi zewnętrznymi (a więc uwzględniającymi możliwość wystąpienia kolizji). Na rysunku 2 przedstawiono ogólną konfigurację zespołowego systemu sterowania. System ten zawiera na najniższym poziomie dwa manipulatory wraz z ich wewnętrznymi układami sterowania osi (ze stabilnym algorytmem sterowania o określonej dynamice). Zadane wartości dla tych układów sterowania są generowane przez algorytm planowania trajektorii danego robota. W algorytmie tym dokonuje się również transformacji współzrzednych wewnętrznych robota na współzrzedne zewnętrzne (proste zagadnienie kinematyczne) i transformacji współzrzednych zewnętrznych na wewnętrzne (odwrotne zagadnienie kinematyczne). Oba omawiane układy sterowania robotów są kontrolowane przez nadrzędną jednostkę koordynującą ruchy tych robotów tak, aby uniknąć potencjalnych kolizji i nadającą priorytet wybranemu manipulatorowi. Jednostka ta nie posiada bezpośredniego dostępu do serwomechanizmów robotów, natomiast koryguje wartości wejściowe tych serwomechanizmów. Wymiana algorytmu transformacji współzrzednych pozwala zaadaptować różne typy robotów do jednej jednostki nadrzędnej. Jak wynika z rysunku 2, system bezkolizyjnego sterowania robotów jest wielopoziomowy z określoną hierarchią wykonywanych zadań.

Na rysunku 3 pokazano strukturę algorytmu hierarchicznego, który jest realizowany przez jednostkę koordynującą. Jednostka ta otrzymuje dane wejściowe w postaci wektorów wartości zadanych w_1 i w_2 oraz informacje o aktualnych położeniach robotów w postaci wektorów y_1 i y_2 . Pierwszy etap decyzyjny jednostki koordynującej powinien rozstrzygnąć, czy istnieje niepusta przestrzeń kolizyjna dla etapu ruchu opisanego przez wektory $w_1(n+1)$, $w_2(n+1)$, $y_1(n)$, $y_2(n)$, gdzie n jest identyfikatorem rozpatrywanego etapu. Jeżeli aktualna przestrzeń kolizyjna jest zbiorem pustym, to zewnętrzne zadane wartości $w_1(n+1)$ i $w_2(n+1)$ zostają przesłane do układów sterujących osiami robotów po dokonaniu odpowiednich transformacji współzrzednych (zgodnie ze schematem na rysunku 2). W przeciwnym przypadku, skoordynowane wektory wartości zadanych współzrzednych, oznaczone przez $\hat{w}_1(n+1)$, $\hat{w}_2(n+1)$ zostają obliczone przy uwzględnieniu parametrów przestrzeni kolizyjnej, narzuconego priorytetu wybranego manipulatora oraz wartości wyjściowych wektorów robotów $y_1(n)$, $y_2(n)$.

Jedną z możliwości określenia skoordynowanych wartości zadanych stanowi zastosowanie metod globalnej optymalizacji. Wadą tej uniwersalnej metody jest długi czas obliczeń wymagany przy jej zastosowaniu. W innym podejściu, które nadaje się bardziej do pracy w czasie rzeczywistym, dokonuje się odpowiedniej

dekompozycji zadania na podproblemy, które są sekwencyjnie rozwiązywane na kolejnych poziomach decyzyjnych. Rozwiązanie na danym poziomie ustala wartości części parametrów na podrzędnym poziomie. W szczególności, parametry określające aktualną przestrzeń kolizyjną mogą być bezpośrednio wprowadzane jako dane procesów decyzyjnych. Na rysunku 3 przedstawiono zasadę działania takiego systemu. Po stwierdzeniu, czy przestrzeń kolizyjna jest niepusta, w przypadku przewidywania kolizji wybiera się strategię odpowiadającą danemu ruchowi. Wszystkie strategie $1, \dots, n$, dostępne w pamięci systemu są realizowane jako tak zwane rozwiązania bezpośrednie, czyli zbiór danych wyjściowych jest bezpośrednio związany ze zbiorem danych wejściowych. Powyższe podejście można również zastosować do rozwiązania problemu omijania przeszkód, gdyż przeszkodę można interpretować jako trywialny przypadek poruszającego się robota.

Dalsze prace teoretyczne realizowane w ramach projektu będą miały na celu zaimplementowanie algorytmu zapewniającego skoordynowaną pracę obu manipulatorów. W szczególności będą prowadzone prace nad znalezieniem szybkiego rozwiązania zagadnienia odwzorowania przeszkody znajdującej się w polu operacyjnym manipulatora, lokalizowanej przy użyciu systemu wizyjnego, na przestrzeń wewnętrzną manipulatora.

3. PLANOWANE PRACE DOŚWIADCZALNE

Od kilku lat w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej tworzone jest stanowisko laboratoryjne przewidziane docelowo do prowadzenia kompleksowych badań nad koordynacją pracy funkcjonalnie różnych urządzeń zautomatyzowanego gniazda produkcyjnego, którego centralnymi elementami są współpracujące roboty.

Zasadniczymi elementami stanowiska jest robot przemysłowy IRp-6 produkcji Zakładów Automatyki Przemysłowej w Ostrowie Wielkopolskim oraz pozycjoner obrotowy tej samej firmy oraz roboty przemysłowo-edukacyjne L1 i L2 produkcji Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Urządzeń Sterowania Napędów w Toruniu.

Robot L1 posiada 5 ogniw rotacyjnych, natomiast 3 pierwsze stopnie swobody robota L2 tworzą manipulator kartezjański o ogniwach translacyjnych, pozostałe trzy ogniwa zapewniają ruchy obrotowe [2,3]. Poszczególne ramiona obu robotów są napędzane za pomocą silników skokowych. Każdy z manipulatorów jest sterowany przez zespół dwóch sterowników firmy ISEL, obsługujących po trzy osie manipulatora, przy czym istnieje programowa możliwość synchronizacji ruchu manipulatora w dwóch spośród trzech osi kontrolowanych przez jeden sterownik. W

nawiązaniu do sytuacji przedstawionej na rysunku 1, pozwala to na przemieszczanie się manipulatorów wzdłuż praktycznie dowolnych torów w płaszczyźnie OXY. Funkcje nadrzędnej jednostki sterującej każdego z manipulatorów pełni komputer klasy IBM AT, który komunikuje się ze sterownikami osi za pośrednictwem portów transmisji szeregowej.

Pozycjoner obrotowy został wykonany w oparciu o pierwsze ogniwo robota IRp-6, tj. obrotową kolumnę. Robot IRp-6 wraz z pozycjonerem są sterowane z jednej szafy sterowniczej Proway [4], przy czym pozycjoner jest traktowany jako szósta sterowana oś robota. W celu realizacji badań współpracy wymienionych wyżej elementów dopasowano dwa funkcjonalnie różne systemy sterowania robotów. Zastosowano do tego interfejs bezpośredniego dostępu komputera IBM AT do zasobów sterownika robota IRp-6 [11], wykonany w Instytucie Automatyki Politechniki Warszawskiej. Komputer ten jest dodatkowo sprzęgnięty z komputerami podrzędnymi sterującymi robotami L1 i L2 przy użyciu sieci lokalnej.

Stanowisko wyposażone jest w system wizyjny składający się z kamery CCD i procesora wizji SuperVIST firmy WIKOM [5]. Realizowany sprzętowo proces skanowania i klasyfikacji punktów obrazu pozwoli na precyzyjną lokalizację położenia ramion współpracujących robotów oraz elementów znajdujących się na pozycjonerze obrotowym.

Prace doświadczalne realizowane na rozbudowywanym stanowisku obejmują następujące zagadnienia:

- planowanie trajektorii w przestrzeni kolizyjnej manipulatorów,
- przetwarzanie informacji wizyjnej dla potrzeb koordynacji robotów,
- dekompozycje zadań sterowania zespołem robotów z uwzględnieniem przetwarzania równoległego.

Efektom prac realizowanych w projekcie będzie stworzenie rozbudowanego stanowiska do wszechstronnych badań współpracy robotów i przetestowanie na nim opracowanego algorytmu pracy bezkolizyjnej.

4. ZAKOŃCZENIE

We wstępnej fazie realizacji projektu wykonano następujące prace:

- opracowano podstawy algorytmu koordynacji pracy robotów;
- przeanalizowano interakcje występujące w głowicach robotów L1 i L2, które modyfikują (w sposób dotychczas nie kontrolowany) przestrzeń roboczą;

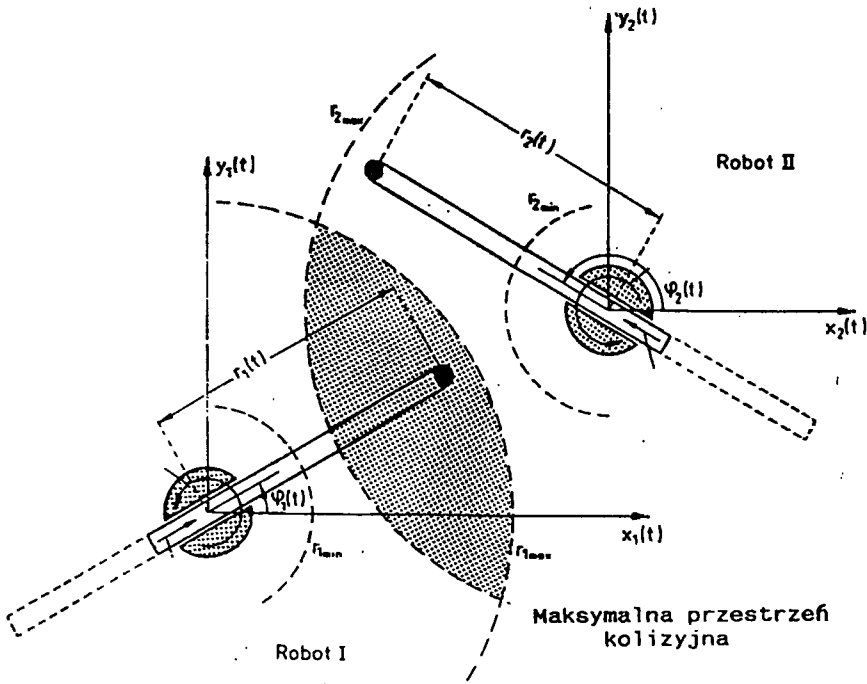
- przetestowano możliwości komunikacji między jednostkami sterującymi oba roboty (z wykorzystaniem transmisji szeregowej i poprzez sieć lokalną);
- rozpoczęto badania systemu wizyjnego z pakietem przetwornika obrazowego, w szczególności nad różnicowaniem płaskich figur geometrycznych z wykorzystaniem metody współczynników kształtu [19]. W tym celu przygotowano odpowiednie oprogramowanie w języku C i wykonano wstępne badania doświadczalne.

Wykonane dotychczas badania eksperymentalne potwierdziły, że ważnym zagadnieniem będzie szybka lokalizacja ramion robotów przy użyciu systemu wizyjnego. Obecnie realizacja rozpoznawania obiektów przy użyciu metod programowych jest zbyt wolna. Czas rozpoznawania obejmujący rejestrację obrazu, jego binaryzację, wyodrębnienie krawędzi oraz obliczenie współczynnika kształtu wynosi około 1500ms. Musi być zatem kilkakrotnie zmniejszony tak, aby sprzężenie wizyjne miało praktyczne znaczenie. Wydaje się, że będzie to można osiągnąć przy zastosowaniu procesorów przepływowo-współpracujących z kartą przetwornika obrazowego.

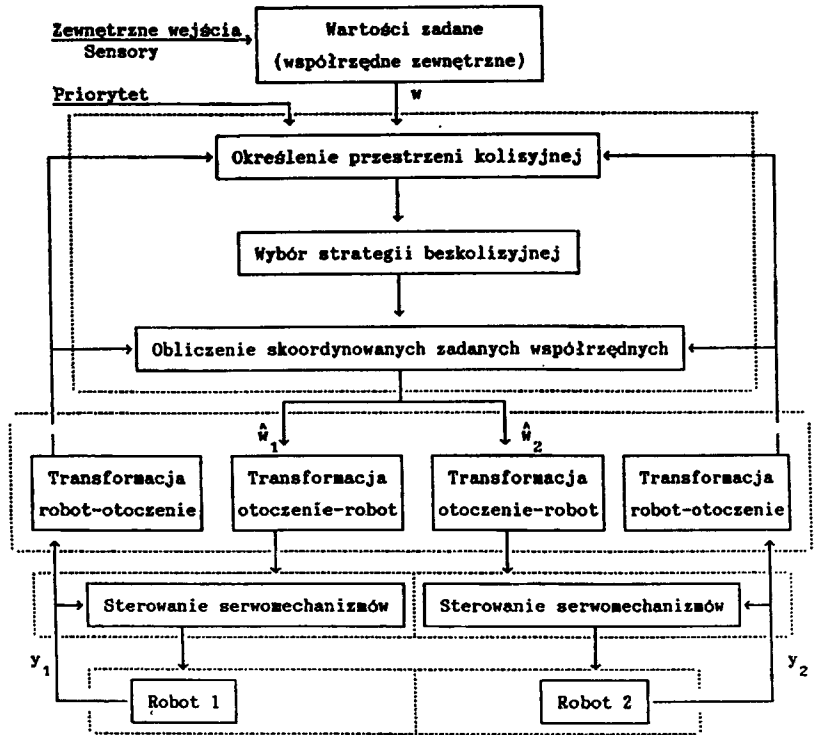
LITERATURA

- [1] Borgolte U.: Flexible, on-line collision avoidance in multi-robot systems. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control, Vienna 1991, s.759-764.
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa: Robot przemysłowo-edukacyjny L-1. Ośrodek Badawczo Rozwojowy Urządzeń Sterowania Napędów, Toruń, 1991.
- [3] Dokumentacja techniczno-ruchowa: Robot przemysłowo-edukacyjny L-2. Ośrodek Badawczo Rozwojowy Urządzeń Sterowania Napędów, Toruń, 1991.
- [4] Dokumentacja techniczno-ruchowa. - Roboty przemysłowe IRp-6/60. Zakłady Automatyki Przemysłowej, Ostrów Wlkp, 1988.
- [5] Dokumentacja techniczna - System do przetwarzania obrazów dla IBM PC SuperVIST. WIKOM, Warszawa, 1991.
- [6] Espiau B., Chaumette F., Rives P.: A new approach to visual servoing in robotics. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 8, 1992, s.313-327.
- [7] Fink B., Wend H. D.: Fast collision-free motion-planning for robot manipulators based on parallelized algorithms. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control, Vienna 1991, s.681-686.
- [8] Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G.: Robotics: control sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill, St Louis, 1987.

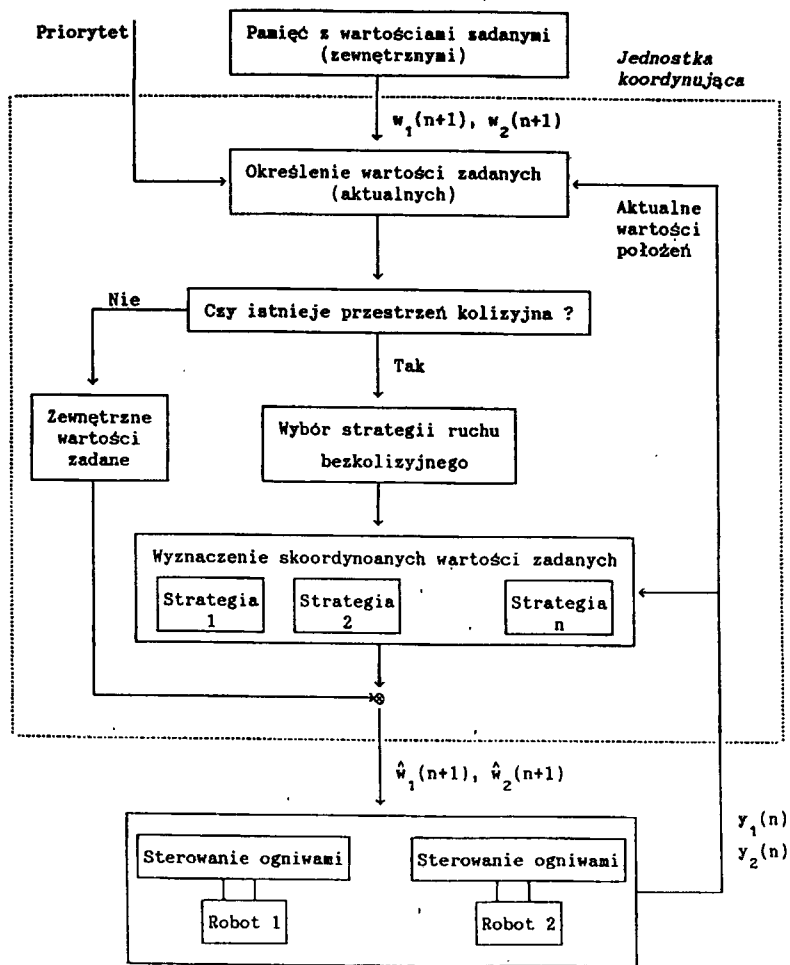
- [9] Graffunder A., Ren Z., Hartmann I.: Robot control using stereo eyes in hand technique. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control SYROCO'91, Vienna, s. 729-734.
- [10] Jezierski E., Pełczewski W. i inni: Analiza dynamiki napędów elektrycznych w robotach ze sztuczną inteligencją. CPBP 02.13, temat 8.2, etap V, Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej, 1990.
- [11] Kręglewska U.: Interfejs bezpośredniego dostępu IBM AT do zasobów sterownika robota IRp-6. Mat. III Kraj. Konf. Robotyki, Wrocław 1990, t. II, s. 90-95.
- [12] Leonard F., Abba G., Ostertag E., Mehdi D.: Closed loop robot control by real time visual sensor. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control SYROCO'91, Vienna, s. 735-740.
- [13] Mair G.M.: Industrial robotics. Prentice Hall, New York 1988.
- [14] Nagata T., Honda K., Teramoto Y.: Multi-robot plan generation in a continuous domain: planning by use of plan graph and avoiding collisions among robots. IEEE J. Robotics and Automation, vol. 4, 1988, s. 2-13.
- [15] Papanikolopoulos N.P., Khosla P.K., Kanade T.: Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, 1993, s. 14-34.
- [16] Qu D. K., Tan D. L. i inni: A control system for two robot arms coordination. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control, Vienna 1991, s. 545-550.
- [17] Shin K.G., Zheng Q.: Minimum time trajectory planning for dual robot systems. Proc. 28th Conf. on Decision and Control, Tampa 1989, s. 2506-2511.
- [18] Tao J.M., Luh J.Y.S., Zheng Y.F.: Compliant coordination control of two moving industrial robots. IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 6, 1990, s. 322-330.
- [19] Tadeusiewicz R.: Systemy wizyjne robotów przemysłowych. WNT, Warszawa, 1992.
- [20] Takeno J., Shinogi Y., Nishiyama S.: New methods for detecting moving obstacles using a passive 3-D visual sensor. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control SYROCO'91, Vienna, s. 741-746.
- [21] Wen J.T., Kreutz K.: A control perspective for multiple-arm systems. Intern. Symposium on Robotics, Albuquerque, NM, USA, 1988.
- [22] Vernon D., Tistavelli M.: Using camera motion to estimate range for robotic parts manipulation. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 6, 1990, s. 509-522.
- [23] Xu X.: Heuristic decentralized control of multi arms coordinated systems. Prepr. IFAC Symp. on Robot Control, Vienna 1991, s. 551-556.



Rys.1 Układ dwóch współpracujących robotów



Rys.2 Struktura układu sterowania robotów



Rys.3 Struktura hierarchicznego algorytmu koordynacji