

Grzegorz Reyman, Messaoud Djeghaba

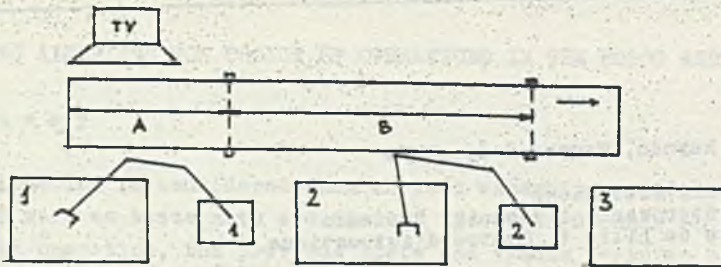
Politechnika Wrocławska
Instytut Sterowania i Techniki Systemów
Universite de Lille 1, Centre d'Automatique

SYMULACJA SYSTEMU MONTAŻOWEGO Z DWOMA WSPÓŁPRACUJĄCYMI ROBOTAMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono model systemu montażowego z dwoma współpracującymi robotami, które montują elementy napływające na taśmociąg. Montaż odbywa się równolegle na trzech stanowiskach. Zaproponowano algorytm wyboru operacji dla robotów i następnie zastosowano ten algorytm do symulacji montażu w opisanym systemie. Dla przykładowego procesu montażowego przedyskutowano rezultaty symulacji na mikrokomputerze IMP85m.

1. Wstęp

Elastyczne systemy produkcyjne, szybko reagujące na konieczność zmiany asortymentu, tj. umożliwiające produkcję średnio i krótkoseryjną oraz reagujące na możliwości występowania awarii urządzeń z reguły wyposażane są w roboty przemysłowe. Są to roboty posiadające sensory różnego typu, umożliwiające zdobywanie informacji o otoczeniu, sterowane mikrokomputerowo. Określenie sekwencji operacji do wykonania przez robot w takich systemach jest zwykle zadaniem skomplikowanym i często odbywa się w sposób eksperymentalny z wykorzystaniem różnych metod heurystycznych [1], [2], [3]. W pracy przedstawiono fragment systemu elastycznego, który opracowywany jest dla potrzeb przemysłu tekstylnego na Uniwersytecie Lille 1 we Francji. W skład rozpatrywanego systemu wchodzi dwa roboty montażowe /roboty przemysłowe przystosowane do montażu/ sterowane mikrokomputerowo, taśmociąg z umieszczonymi na przeciw robotów fotokomórkami do sygnalizacji momentu napływu kolejnego elementu i kamery telewizyjne. /Rys. 1/. Obraz z kamery telewizyjnej umieszczonej nad początkiem taśmociągu analizowany jest przez drugi mikrokomputer i wynik analizy - numer rozpoznanego elementu - przekazywany jest jako dana wejściowa do mikrokomputera sterującego robotami. System wizyjny opracowany został w Laboratorium Automatyki Uniwersytetu Lille 1. Oba roboty przemysłowe SCEMI o czterech stopniach swobody mogą manipulować na dwóch sąsiednich stanowiskach pracy. Istotą tego systemu jest możliwość pracy obu robotów na stanowisku drugim, z tym że nie wszystkie czynności montażowe mogą być wykonywane zarówno przez jeden, jak i drugi robot. Wynika to m. in. z odpowiednich charakterystyk zasięgów manipulacji tych robotów.



Rys. 1. System montażowy z dwoma robotami.
Fig. 1. Assembly system with two robots.

Można rozpatrywać możliwość wspólnego montażu elementu przez dwa roboty na stanowisku drugim, gdzie jeden z robotów spełnia funkcję pomocniczą, np. podtrzymuje pewien element. Do tej pory rozpatrywano jednak tylko taką sytuację, gdzie roboty mogą pracować na stanowisku drugim kolejno. Elementy do montażu napływają na taśmociąg, na który są podawane przez inny robot. Wcześniej elementy są wytwarzane przez zespół maszyn tnących materiał. Awarie tych maszyn występują przypadkowo, przypadkowy jest także proces powstawania wybrakowanych elementów. Z tych względów proces montażowy jest przypadkowy. Elementy są łączone w całość według odpowiednich grafów wskazujących kolejność operacji montażowych.

Proponowane podejście do określenia algorytmu wyboru operacji dla dwóch robotów jest pewnym uogólnieniem podejścia prezentowanego w [4,5] dla systemu montażowego z jednym robotem. Tutaj jednak rozpatrywany jest, w odróżnieniu od [4], przypadek bezpośredniej informacji o aktualnym stanie procesu montażowego, ze względu na rozpatrywany system wizyjny.

2. Model matematyczny procesu montażowego

Założmy, że każdy robot wykonuje dowolną operację w skończonym odcinku czasu, który jest wielokrotnością podstawowego taktu montażu Δt . Wykonanie najdłuższej operacji zajmuje m taktów Δt . Ze względu na to, że zastosowano dwa takie same roboty SCMI można założyć, że wykonanie danej operacji przez każdy z robotów zajmuje tyle samo taktów montażu.

Wprowadźmy oznaczenia:

$n = 0, 1, \dots$ - numer taktu montażu,

N - skończona liczba taktów procesu montażowego

j_n - stan procesu w takcie n -tym

$j_n \stackrel{df}{=} (j_n^1, j_n^2, j_n^3)$

gdzie:

j_n^1 - stan taśmociągu w takcie n -tym,

j_n^2 - stan trzech stanowisk pracy w takcie n-tym,

j_n^3 - stan wykonania operacji przez oba roboty.

Łatwo można obliczyć liczbę wszystkich możliwych stanów

$$M = (r + 1)^b \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot w_3 \cdot (m + 1)^2,$$

czyli

$$j_n \in \{1, \dots, M\} = S$$

gdzie:

r - liczba różnych typów elementów,

b - największa liczba elementów, które mogą pojawić się na taśmociągu w tym samym takcie,

w_1 - liczba stanów 1-tego stanowiska pracy, która wynika z danego grafu montażu.

Dalej oznaczymy:

$k_n = (k_{1,n}; k_{2,n})$ - sterowanie dla taktu n ,

$k_n \in K_n = K(j_n)$ - zbiór sterowań w takcie n-tym.

Uwzględniając czynniki przypadkowe, omówione we Wstępie, będziemy zakładali, że stany procesu zmieniają się w sposób przypadkowy, a dokładniej - że j_n jest realizacją zmiennej losowej \underline{j}_n . Zależność aktualnego stanu procesu od stanu poprzedniego i wyznaczonego sterowania /pary: operacji robota 1 i operacji robota 2/ będzie zatem opisana przez prawdopodobieństwo przejścia:

$$P(\underline{j}_{n+1} = j_{n+1} \mid \underline{j}_n = j_n, k_n) \stackrel{\text{df}}{=} p_n(j_{n+1}, j_n, k_n) \quad /1/$$

z warunkiem początkowym dla stanu j_0

$$P(\underline{j}_0 = j_0) \stackrel{\text{df}}{=} p(j_0). \quad /2/$$

Algorytm sterowania będzie podawał zależność sterowania od stanu

$$H_n: S \longrightarrow K_n$$

tj.

$$k_n = H_n(j_n). \quad /3/$$

Określmy wskaźnik jakości sterowania dla skończonej liczby taktów N :

$$Q_N = \sum_{\underline{j}_0, \dots, \underline{j}_N}^E \sum_{n=0}^{N-1} c_n(\underline{j}_n, k_n) \quad /4/$$

gdzie lokalna strata c_n zależy od aktualnego stanu j_n i wykonanego sterowania k_n . Powinna być wyznaczona taka sekwencja sterowań k_0, \dots, k_{N-1} , która minimalizuje wskaźnik /4/ przy danym modelu /1/, /2/. Bezpośrednie wyznaczanie sekwencji sterowań jest niezmiernie złożone obliczeniowo ze

względem na dużą liczbę stanów M . W związku z tym nie ma sensu rozwiązywać powyższego problemu w sposób bezpośredni. Możliwe jest stosowanie jednej z wielu metod. Na przykład w [6] dla ergodycznych łańcuchów Markowa stosowany jest algorytm dwupoziomowy. Podejścia semantyczne korzystające z różnych metod heurystycznych są prezentowane m. in. w [7], [8]. W obecnej pracy proponowana jest dekompozycja stanu prowadząca do uzyskania znacznie prostszego algorytmu wyboru operacji.

3. Dekompozycja stanu procesu

Dekompozycja stanu procesu wynika wprost z podziału taśmociągu na dwie części A i B. Operacje dla robota 1 będą wyznaczone w oparciu o stan części A taśmociągu i stan stanowiska 1 i 2, natomiast operacje dla robota 2 będą wyznaczone w oparciu o stan części B taśmociągu i stan stanowiska 2 i 3. Teraz nie interesuje nas stan wykonywania operacji przez roboty, gdyż rozpatrywane są dwa równoległe procesy montażu dla dwóch robotów i długość aktualnego taktu w każdym z tych procesów zależy od aktualnie wykonywanej operacji. W ogólności mogą mieć one różne długości. Przykładowo opiszemy proces A dla robota 1:

$n_A = 0, 1, \dots$ - numer taktu procesu A dla robota 1

$j_{A, n_A} \stackrel{\text{def}}{=} (j_{A, n_A}^1, j_{A, n_A}^2)$ - stan procesu A

gdzie:

j_{A, n_A}^1 - stan części A taśmociągu

j_{A, n_A}^2 - stan stanowiska 1 i 2.

W związku z tym

$$j_{A, n_A} \in \{1, \dots, M_A\} = S_A,$$

$$M_A = (r+1)^{b_A} \cdot w^1 \cdot w^2$$

$k_{A, n_A} \in K_{A, n_A} = K_A(j_{A, n_A})$ - operacja robota 1.

Podstawą do wyznaczenia algorytmu wyboru operacji są teraz nowe prawdopodobieństwa przejść

$$P(j_{A, n_A+1} = j_{A, n_A+1} \mid j_{A, n_A}, k_{A, n_A}) = p_A(j_{A, n_A+1}, j_{A, n_A}, k_{A, n_A}). \quad /5/$$

Należy wyznaczyć algorytm wyboru operacji

$$H_n^A : S_A \longrightarrow K_{A, n_A}$$

tj.

$$k_{A,n_A} = H_n^A(j_{A,n_A}) \quad /6/$$

minimalizujący dla $n = 0, 1, \dots, N - 1$ wskaźnik jakości wyboru operacji w procesie A

$$C_{N_A}^A = \underset{j_{A,0}, \dots, j_{A,N_A}}{E} \sum_{n_A=0}^{N_A-1} C_A(j_{A,n_A}, k_{A,n_A}) \quad /7/$$

Co więcej, można dokonać dekompozycji stanu j_{A,n_A} na stan części A taśmo-
ciągu oraz stan stanowisk 1 i 2. Wówczas mamy

$$j_{A,n_A}^1 \in \{1, \dots, M_A^1\} = S_A^1$$

$$j_{A,n_A}^2 \in \{1, \dots, M_A^2\} = S_A^2$$

gdzie

$$M_A^1 = (r + 1)^{b_A}$$

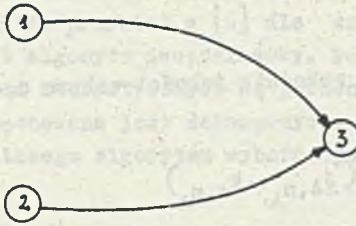
$$M_A^2 = w^1 \cdot w^2$$

Proces B dla robota 2 opisuje się analogicznie.

Szczegółowe rozważania dotyczące wpływu takiej dekompozycji na ostateczny sposób wyznaczania algorytmu wyboru operacji można znaleźć w [9]. Ze względu na wyznaczenie algorytmów odrębnie dla robota 1 i robota 2, może wystąpić możliwość kolizji na stanowisku 2 w przypadku, gdy w tym samym momencie czasu obs roboty będą wykonywać operacje na tym stanowisku. W takiej sytuacji operację na tym stanowisku wykonuje ostatecznie robot, dla którego koszt wykonania tej operacji przy aktualnym stanie jest mniejszy. Oczywiście stosowanie takiej dekompozycji powoduje stratę optymalności w sensie wskaźnika /4/, ale bardzo znacznie obniża się złożoność obliczeniowa [9].

4. Wyniki symulacji

Rozpatrzono montaż 3 różnych produktów składających się z trzech takich samych elementów. Graf montażowy dla każdego produktu jest przedstawiony na rys. 2. Nie jest tu rozstrzygnięta sytuacja możliwości montażu pewnych elementów na stanowisku 2 tylko przez robot 1 albo robot 2, gdyż sytuacja ta jakościowo sprowadza się do możliwości montażu przez robot 1 na stanowisku 1 i 2 oraz przez robot 2 na stanowisku 2 i 3.



Rys. 2. Graf montażowy produktu.
Fig. 2. The product assembly graph.

Rozpatrzono montaż dla 100 napływających elementów. Czas wykonania każdej operacji i jest równy czasowi napływu dwóch kolejnych elementów. W związku z tym jeden robot może zmontować co najwyżej 50 elementów ze 100.

Dla opisanego przykładu:

$$m = 2, r = 3, w_1 = 4, i = 1, 2, 3, b_A = b_B = 2$$

i stąd

$$M = 27648, M_A^1 = M_B^1 = 16, M_A^2 = M_B^2 = 9.$$

$M_A^2 = M_B^2 = 9$ ze względu na fakt, że po zmontowaniu gotowy produkt jest od razu zdejmowany ze stanowiska przez dodatkowy manipulator.

Symulację przeprowadzono na mikrokomputerze IMP85m w języku BASIC pod kompilatorem BASCOM dla różnych rozkładów prawdopodobieństw napływu trzech elementów. Oznaczmy przez p_i prawdopodobieństwo napływu elementu i -tego, $i = 1, 2, 3$. Proces montażowy dla każdego rozkładu symulowano 100 razy. Pojedyncza symulacja trwała 620 sec. Wyniki: liczby zmontowanych produktów typu i , $i = 1, 2, 3$ oraz liczby elementów niezmontowanych zebrano w tabeli 1. Z analizy tabeli 1 wynika, że suma elementów zmontowanych oraz niezmontowanych dla każdego rozkładu prawdopodobieństw jest mniejsza od 100. Jest tak, gdyż kilka elementów /od 1 do 8/ pozostaje po zatrzymaniu procesu na taśmociągu i 3 stanowiskach pracy.

Z tabeli 1 wynika, że dla równych prawdopodobieństw napływu $p_1 = p_3$ więcej elementów jest montowanych na stanowisku 3. Wynika to z faktu częstszego montażu elementów typu 2 przez robot 1. Z kolei najmniejsze ilości elementów niezmontowanych osiąga się dla tych przypadków, gdy prawdopodobieństwa p_1, p_2, p_3 różnią się mało od siebie, z tym że najmniejsza ilość elementów niezmontowanych, ok. 4, jest osiągane dla przypadku, gdy $p_2 = 0.4$ $p_1 = p_3 = 0.3$ czyli prawdopodobieństwo napływu elementów, które mogą być montowane przez oba roboty jest nieco większe od pozostałych.

Tabela 1

p_1	p_2	p_3	liczba produktów typu 1	liczba produktów typu 2	liczba produktów typu 3	liczba elementów niezmontowa- nych
0.1	0.1	0.8	2.81	2.92	18.61	20.81
	0.2	0.7	2.73	6.52	17.11	16.11
	0.3	0.6	2.74	9.83	15.23	11.62
	0.4	0.5	2.71	12.52	13.09	9.41
	0.5	0.4	2.79	14.71	11.15	8.30
	0.6	0.3	2.76	17.82	8.70	6.45
	0.7	0.2	2.73	20.11	6.13	6.39
	0.8	0.1	2.75	23.42	2.71	6.58
0.2	0.1	0.7	5.73	3.13	17.15	15.85
	0.2	0.6	5.76	6.11	15.83	13.62
	0.3	0.5	5.78	10.15	13.51	8.42
	0.4	0.4	5.70	12.77	11.62	6.23
	0.5	0.3	5.79	15.14	8.73	7.31
	0.6	0.2	5.73	18.21	6.11	7.59
	0.7	0.1	5.72	20.10	2.69	11.50
0.3	0.1	0.6	9.09	3.00	16.00	12.69
	0.2	0.5	9.12	6.51	14.15	8.46
	0.3	0.4	9.15	9.34	11.09	6.22
	0.4	0.3	9.17	12.82	8.97	4.21
	0.5	0.2	9.09	14.71	6.03	5.43
	0.6	0.1	9.06	17.42	2.72	6.81
0.4	0.1	0.5	11.62	2.78	14.81	9.42
	0.2	0.4	11.53	5.71	12.09	8.23
	0.3	0.3	11.65	8.93	9.03	5.33
	0.4	0.2	11.70	12.00	6.08	6.21
	0.5	0.1	11.65	14.52	2.75	6.48
0.5	0.1	0.4	12.53	2.71	12.12	12.38
	0.2	0.3	12.60	5.82	9.10	11.29
	0.3	0.2	12.61	9.11	6.01	3.58
	0.4	0.1	12.52	12.33	2.67	14.11
0.6	0.1	0.3	13.73	2.77	9.03	19.38
	0.2	0.2	13.82	6.45	5.98	14.81
	0.3	0.1	13.79	9.22	2.65	17.89
0.7	0.1	0.2	14.71	2.85	6.01	23.33
	0.2	0.1	14.80	6.09	2.61	23.72
0.8	0.1	0.1	15.93	3.01	2.65	29.82

Największe ilości elementów niezmontowanych odpowiadają sytuacji, gdy albo p_1 albo p_2 są skrajnie duże. Z tabeli można również wywnioskować, jakie powinny być prawdopodobieństwa napływu elementów aby uzyskać żądane pro- porcje produkcji na trzech stanowiskach, co wiąże się z koniecznością odpowiedniego ustawienia wcześniejszej produkcji tych elementów.

5. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono system montażowy z dwoma współpracującymi robotami SCENI. Dla tego systemu zastosowano algorytmy wyboru operacji wyznaczone w oparciu o dekompozycję stanu procesu montażowego. Dokonano symulacji przykładowego procesu montażowego na mikrokomputerze IMP85m i wyniki przedstawiono dla różnych przypadków napływu elementów na taśmociąg. Uzyskane rezultaty dają podstawę do ustalenia najlepszego rozkładu prawdopodobieństw napływu tych elementów, który spełnia wymagania dotyczące proporcji ilości produktów oraz ilości elementów niezmontowanych.

LITERATURA

- [1] M. Ejiri et al.: 'A prototype intelligent robot that assembles objects from plane drawing', IEEE Trans. Computers, vol. C-21, No 2, pp. 161-170, 1972.
- [2] S.E. Fahlman: 'A planning system for robot construction tasks', Artificial Intelligence, vol. 5, pp. 1-49, 1974.
- [3] D.J. Grossman, M.W. Blasgen: 'Orienting mechanical parts by Computer Controlled manipulator', IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol. SMC-5, No 5, pp. 561-565, 1975.
- [4] G.Reyman: 'General approach to assembly robot control', Proc. Advanced Software in Robotics Conf., Liège 1983, North Holland, Amsterdam, New York, Oxford, 1984.
- [5] G. Reyman: 'Optymalny wybór operacji w systemie montażowym z robotem sterującym', Praca doktorska, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1985.
- [6] J.P. Forestier, P. Varaiya: 'Multilayer control of large Markov chains', IEEE Trans. Autom. Control, vol. AC-23, pp. 298-304, 1978.
- [7] D.A. Bourne, M.S. Fox: 'Autonomous manufacturing: automating the job-shop', Computer, pp. 76-86, 1984.
- [8] M. Staroświecki, M. Djeghaba, M. Bayard, R. Reyman: 'Decision problems in the flexible assembly cell using robot cooperation', Proc. 4th Systems Engineering Conf., Coventry, 1985.
- [9] Z. Bubnicki, G. Reyman, M. Staroświecki, M. Djeghaba: 'The control in the assembly system with two robots', Proc. 4th Systems Engineering Conf., Coventry, 1985.

Recenzent: Prof.dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1986.04.30

СИМУЛЯЦИЯ МОНТАЖНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ РОБОТАМИ

Резюме

В статье представлена модель монтажной системы с двумя роботами. Монтаж проводится параллельно на трёх рабочих местах. Представлен алгоритм

определения операций для роботов. На примере монтажной системы представлены результаты симуляции на микро-ЭВМ IMP85м.

SIMULATION OF AN ASSEMBLY SYSTEM WITH TWO COOPERATING ROBOTS

Ignatow Krzysztof, Project of Kraków
S u m m a r y Michał Precupiewicz, Warszawa

The assembly system considered in the paper consists of two robots, belt conveyor and TV camera to recognize arriving component parts. The vision system was constructed in Centre d'Automatique, Universite de Lille 1. Both SCEMI robots manipulate at two neighbourhood workstations. Both of them can manipulate at the workstation no 2. Because of that fact the collision avoidance problem should be considered. The direct algorithm to control both robots is very complex because of a large number of the assembly process states. Because of that, decomposition of the state is proposed which decreases the computational complexity. The obtained algorithm has been applied to the simulation of the assembly process of simple products. The assembly has been considered for 100 arriving component parts for different probability distributions of appearance of different part types.

W artykule przedstawiono symulację systemu montażowego z dwoma robotami SCEMI, przenośnikiem taśmowym i kamerą telewizyjną do rozpoznawania przychodzących części. System widzenia został zbudowany w Centrum Automatyki, Uniwersytecie Lille 1. Oba roboty SCEMI manipulują na dwóch sąsiednich stanowiskach roboczych. Oba roboty mogą manipulować na stanowisku nr 2. Ze względu na ten fakt należy rozważyć problem unikania kolizji. Algorytm bezpośredni sterowania dwoma robotami jest bardzo złożony ze względu na dużą liczbę stanów procesu montażowego. Ze względu na to, proponuje się dekompozycję stanu, co zmniejsza złożoność obliczeniową. Uzyskany algorytm został zastosowany do symulacji procesu montażowego prostych produktów. Montaż został rozważony dla 100 przychodzących części dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa pojawienia się różnych typów części.

Metoda sterowania systemem ma na celu wyeliminowanie kolizji między robotami stojącymi przy przenośniku taśmowym. Algorytm sterowania umożliwia pracę dwóm robotom w sąsiednich stanowiskach roboczych lub bezpośrednio przy przenośniku.

W celu sterowania systemem wykorzystano algorytm sterowania dwoma robotami SCEMI. Algorytm sterowania jest bardzo złożony ze względu na dużą liczbę stanów procesu montażowego.

W celu sterowania systemem wykorzystano algorytm sterowania dwoma robotami SCEMI. Algorytm sterowania jest bardzo złożony ze względu na dużą liczbę stanów procesu montażowego. Ze względu na to, proponuje się dekompozycję stanu, co zmniejsza złożoność obliczeniową. Uzyskany algorytm został zastosowany do symulacji procesu montażowego prostych produktów. Montaż został rozważony dla 100 przychodzących części dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa pojawienia się różnych typów części.

W celu sterowania systemem wykorzystano algorytm sterowania dwoma robotami SCEMI. Algorytm sterowania jest bardzo złożony ze względu na dużą liczbę stanów procesu montażowego. Ze względu na to, proponuje się dekompozycję stanu, co zmniejsza złożoność obliczeniową. Uzyskany algorytm został zastosowany do symulacji procesu montażowego prostych produktów. Montaż został rozważony dla 100 przychodzących części dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa pojawienia się różnych typów części.