ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI SLASKIEJ 1992
Seria: AUTOMATYKA z. 110 Nr kol. 1176

Karol Płasznik
Politechnika Śląska

STEROWANIE DYNAMICZNE WIELOKROKOWE ZROBOTYZOWANĄ LINIĄ MONTAŻOWĄ

A DYNAMICAL MULTISTEPS CONTROL OF THE ROBOTIZED ASSEMBLY LINE

МНОГОШАГОВОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МОНТАЖНОЙ ЛИНИЕЙ

Streszczenie: W referacie przedstawiono sterowanie dynamiczne wielokrokowe dla zrobotyzowanej linii montażowej. Sterowanie to polega na wyznaczeniu balansu linii dla poszczególnych obiektów w poszczególnych taktach.

Summary: In the paper a problem of dynamic multisteps control of a robotized assembly line has been presented. The control is based on a solusion of assembly line balancing problem for each asseembly object for each cycle.

Резюме: В работе представлена проблема многошагового, динамического управления работизированной монтажной линией. Это управление сводится к определению балансировки линии для отдельных объектов в отдельных тактах

1. Wstęp

Obecnie linie montażowe coraz częściej są przystosowane do pracy elastycznej. Oznacza to, że potrafią one dostosować swoje sterowanie do zaistniałych wymuszeń .Wymuszenia zmiany sterowania mogą wynikać ze zmiany wersji montowanego obiektu lub zmiany konfiguracji linii. Zmiana konfiguracji może nastąpić między innymi w przypadku awarii robotów lub okresowych remontów .

W sytuacjach tych roboty w kolejnych taktach pracy mogą wykonywać różne sekwencje operacji. Przyjmujemy, że operacje montażowe są typu punktowego. Punkty wykonywania operacji są rozmieszczone w różnych miejscach montowanego obiektu. Oznacza to, że kolejność wykonywania operacji wpływa na czas montażu obiektu. Sposób rozdzielenia operacji pomiędzy poszczególne roboty oraz określenie kolejności ich wykonywania wynika z przyjętego algorytmu wyznaczania sterowania.

Celem sterowania montażem jest maksymalizacja wydajności linii - przy warunku kompletności montażu. Przy tym każdy robot może wykonać na obiekcie tylko te operacje, które nie zostały na nim wykonane wcześniej. Dla sterowania montażem można wyprowadzić model matematyczny procesu w postaci równań stanu. Na podstawie tego modelu można w szczególnych przypadkach wyznaczyć sterowania: statyczne [8], pseudustyczne, przejściowe lub quasistatyczne [3].

W ogólnym przypadku sterowanie montażem jest dynamiczne. Przy czym sterowanie to może być wyznaczane dla bieżącego taktu lub perspektywicznie dla wielu taktów. W pierwszym przypadku mówimy o sterowaniu dynamicznym jednokrokowym, natomiast w drugim przypadku o sterowaniu dynamicznym wielokrokowym.

W referacie przedstawiono sterowanie dynamiczne wielokrokowe zrobotyzowaną linią montażową .

2. Założenia

Linia montażowa składa się z transportera oraz stacji roboczych z zainstalowanymi robotami przemysłowymi. Na linii znajduje się M robotów oraz L staji. Zakładamy, że $M \le L$. Linia pracuje w określonych taktach k o długości c^k. Takt montażu składa się z dwóch faz. W pierwszej fazie roboty wykonują określone operacje na obiektach, natomiast w drugiej fazie transporter przesuwa każdy obiekt na następną stację.

Rozmieszczenie robotów na stacjach opisuje wektor:

$$A = [\, a_m \,]_{m=1,\dots,M} \tag{1}$$

gdzie : a_m - numer stacji , na której znajduje się m-ty robot

Gotowość robotów do pracy, w poszczególnych taktach k opisuje wektor:

$$G^k = [\, g^k_m \,]_{m=1,\dots,M} \tag{2}$$

gdzie :

$$g^k_m = \begin{cases} 1. \text{ jeśli m-ty robot jest gotowy do pracy,} \\ 0, \text{ w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \tag{2a}$$

Zakładamy, że dla zmontowania obiektu trzeba wykonać operacje ze zbioru:

$$\Omega = \{\omega_n\}_{n=1,\dots,N} \tag{3}$$

gdzie : ω_n - n-ta operacja

N - liczba operacji.

Dodatkowo przyjmujemy, że na linii montowanych może być W wersji obiektów, a sterowanie linią analizowane jest w K taktach .

Czasy wykonania operacji dane są w wektorze:

$$\Theta = [\, v_n \,]_{n=1,\dots,N} \tag{4}$$

gdzie : v_n - czas wykonania operacji ω_n .

Dalej założymy, że dane są czasy transportu chwytaka robota pomiędzy punktami lokalizacji operacji technologicznych. Wyróżnimy punkty lokalizacji operacji technologicznych oraz punkt spoczynkowy robota. Chwytak robota znajduje się w położeniu spoczynkowym po wykonaniu wszystkich operacji w takcie (podczas przesuwu transportera). Czasy operacji transportu dane są w postaci macierzy:

$$T = \left[\, \tau_{i,j} \,\right]_{\substack{i=0,\dots,N \\ j=0,\dots,N}} \tag{5}$$

gdzie: $\tau_{i,j}$ - czas transportu chwytaka z i-tego do j-tego punktu

0 - położenie spoczynkowe chwytaka.

Przynależność operacji do wersji określa macierz:

$$B = \left[\, b_{n,w} \,\right]_{\substack{n=1,\dots,N \\ w=1,\dots,W.}} \tag{6}$$

Elementy tej macierzy są określone natępująco:

$$b_{n,w} = \begin{cases} 1. \text{ jeśli operacja } \omega_n \text{ należy do w-tej wersji} \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \tag{6a}$$

2.1. Stan procesu montażu

Stan procesu montażu opisujemy macierzą:

$$X^k = [x^k_{l,n}] \quad \begin{matrix} l=1,\dots,L \\ n=1,\dots,N. \end{matrix} \tag{7}$$

Elementy tej macierzy określamy następująco:

$x^k_{l,o}$ - numer wersji obiektu, który po k-tym takcie znajduje się na l-tej stacji (5a)

oraz dla $1 \le n \le N$

$$x^k_l = \begin{cases} 1, \text{ jeśli w obiekcie znajdującym się po k-tym takcie na l-tej stacji została wykonana n-ta operacja} \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \tag{7b}$$

Przyjmiemy, że jeżeli:

$$x^k_{l,o} = 0 \tag{8}$$

to na l-tej stacji po k-tym takcie nie ma obiektu lub gdy:

$$x^k_{l,o} = -1 \tag{8a}$$

obiekt taki nie powinien być montowany (np. odrzucony przez międzyoperacyjną kontrolę jakości).

Zakładamy, że:

1 - obiekty wchodzące na linię nie były dotychczas montowane, tzn.:

$$\forall_{1\le k\le K} \ \forall_{1\le n\le N} \ x^k_{o,n} = 0 \tag{9}$$

2 - montaż jest kompletny

$$\forall_{1\le k\le K} \ \forall_{1\le n\le N} \ (b_{n,x^k_{L+1,o}} = 1) \Rightarrow (x^k_{L+1,n} = 1) \tag{10}$$

2.2. Sterowanie procesem montażu

Sterowanie procesem montażu polega na wyznaczaniu sekwencji operacji, które powinny być wykonane przez odpowiedni robot w rozpatrywanym takcie. Sterowanie linią montażową w k-tym takcie jest macierzą

$$U^k = [u^k_{l,n}] \quad \begin{matrix} l=1,\dots,L \\ n=1,\dots,N \end{matrix} \tag{11}$$

Elementy tej macierzy określamy następująco:

$u^k_{l,o}$ - numer wersji obiektu, który ma być montowany na l-tej stacji w k-tym takcie (11a)

oraz dla $1 \le n \le N$

$$u^k_{l,n} = \begin{cases} i, \text{ jeśli w k-tym takcie w obiekcie znajdującym się na l-tej stacji ma być wykonana n-ta operacja jako i-ta w kolejności,} \\ 0, \text{ w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \tag{11b}$$

Przyjmujemy, że jeżeli nie należy montować obiektu znajdującego się na l-tej stacji w k-tym takcie, to :

$$u^k_{l,o} = 0 \tag{12}$$

W przypadku, gdy można montować obiekt, zakładamy:

$$u^k_{l,o} = x^{k-1}_{l,o} \qquad (13)$$

Analizując proces montażu obiektu znajdującego się na l-tej stacji po k-1-szym takcie, przy sterowaniu U^k_l oraz znanym stanie początkowym, można wyprowadzić równanie stanu [3] w postaci:

$$X^k = f(X^{k-1}_l, U^k_l)_{l=1,\ldots,L} \qquad (14)$$

W oparciu o to równanie można zrealizować symulator linii montażowej.

3. Klasyfikacja procesów

Na podstawie (7) przyjmujemy następującą klasyfikację procesu montażu:

- proces statyczny, jeżeli spełniony jest warunek:

$$\forall_{0\le k\le K} \; X^k = X^{k+1} \qquad (15)$$

- proces dynamiczny, jeżeli spełniony jest warunek:

$$\exists_{1\le k\le K} \; X^k \ne X^{k-1} \qquad (16)$$

Zatem w procesie statycznym stan linii po każdym takcie musibyć taki sam jak stan początkowy X^o. Natomiast w procesie dynamicznym stan linii przynajmniej po jednym takcie jest inny niż stany w pozostałych taktach.

Wśród procesów dynamicznych wyróżniamy dwa procesy charakterystyczne, są to:

- proces przejsciowy, jeżeli spełniony jest warunek

$$\exists_{1\le\lambda\le L} \; \forall_{L<k\le K} \; (X^\lambda \ne X^{\lambda-1}) \wedge (X^k = X^{k-1}) \qquad (17)$$

- proces quasi-statyczny, jeżeli spełniony jest warunek

$$\forall_{1\le l\le L} \; \exists_{1\le k\le K} \; \exists_{\lambda\ne k} \; (x^k_{l,o} = x^\lambda_{l,o}) \Rightarrow (X^k_l = X^\lambda_l). \qquad (18)$$

W procesie przejściowym stan jest dynamiczny w początkowych taktach k≤L, a statyczny w pozostałych. Natomiast w procesie quasi-statycznym stan na poszczególnych stacjach jest identyczny przy montażu obiektów tej samej wersji, pod warunkiem, że konfiguracja linii oraz gotowość robotów są stałe.

4. Klasyfikacja sterowań

Na podstawie wzoru (11) przyjmujemy następującą klasyfikację sterowania linią montażową:

- sterowanie statyczne występuje, jeśli spełniony jest warunek:

$$\forall_{1<k\le K} \; U^k = U^{k-1} \qquad (19)$$

- sterowanie dynamiczne występuje, jeśli spełniony jest warunek:

$$\exists_{1<k\le K} \; U^k \ne U^{k-1} \qquad (20)$$

Czyli w sterowaniu statycznym roboty w każdym takcie wykonują takie same operacje. Natomiast w sterowaniu dynamicznym roboty wykonują operacje wynikające z aktualnego stanu linii. Mogą być one różne w poszczególnych taktach.

Wśród sterowań dynamicznych wyróżniamy pewne sterowania charakterystyczne:

- sterowanie przejściowe, jeśli spełniony jest warunek:

$$\underset{1<\lambda\le L}{\exists}\ \underset{L<k\le K}{\forall}\ (U^{\lambda} \ne U^{\lambda-1}) \wedge (U^{k} = U^{k-1}) \qquad (21)$$

- sterowanie quasi-statyczne, jeśli spełniony jest warunek:

$$\underset{1\le l\le L}{\forall}\ \underset{1\le k\le K}{\exists}\ \underset{\lambda\ne k}{\exists}\ (x^{k}_{l,o} = x^{\lambda}_{l,o}) \Rightarrow (U^{k}_{l} = U^{\lambda}_{l}) \qquad (22)$$

Sterowanie przejściowe jest dynamiczne w początkowych taktach $k\le L$, a statyczne w pozostałych. Natomiast sterowanie quasi-statyczne jest identyczne dla poszczególnych robotów przy montażu obiektów tej samej wersji, pod warunkiem, że konfiguracja linii oraz gotowość robotów są stałe.

5. Algorytm sterowania

W sterowaniu dynamicznym wielokrokowym po k-1-szym takcie wyznaczamy sterowanie linią dla wielu taktów. Dla każdego obiektu znajdującego się na l-tej stacji określamy zbiór operacji do wykonania Ω_l:

$$\underset{1\le l\le L}{\forall}\ \underset{1\le n\le N}{\forall}\ \Omega_l = \{\omega_n : x^{k-1}_{l,n} = 0\} \qquad (23)$$

Obiekty mogą być montowane na stacjach, na których się znajdują oraz na następnych, czyli:

- obiekt ze stacji 1 może być montowany na L stacjach,
- obiekt ze stacji 2 może być montowany na L-1 stacjach,
- obiekt ze stacji l może być montowany na L-l+1 stacjach,
- obiekt ze stacji L-1 może być montowany na 2 stacjach,
- obiekt ze stacji L może być montowany tylko na tej stacji.

Dlatego w celu wyznaczenia sterowania linią należy rozwiązać L problemów rozmieszczenia operacji Ω_l na L-l+1 stacjach. Jest to równoważne z rozwiązaniem L problemów balansowania linii montażowych (BLM), dla linii o liczbie stacji od 1 do L. W wyniku rozwiązania L problemów BLM otrzymujemy sterowania dla:

stacji L od taktu k do taktu k+L-1,

stacji L-1 od taktu k do taktu k+L-2,

. . .

stacji l od taktu k do taktu k+l-1 ....

stacji 2 w taktach k i k+1,

stacji 1 tylko dla taktu k.

Czasy wykonania operacji na stacjach są różne. Czas wykonania operacji na l-tej stacji w k-tym takcie oznaczamy jako c^k_l. Za czas k-tego taktu linii c^k przyjmujemy maksymalny czas c^k_l:

$$c^k = \max_{1\le l\le L} c^k_l \qquad (24)$$

Można zauważyć, że w kolejnych taktach nie potrzeba rozwiązywać wszystkich L problemów BLM.

5.1 Warunki wyznaczania sterowań

Jeżeli w takcie k-1 rozwiązanych zostało L problemów BLM oraz gotowość robotów do pracy jest stała , czyli :

$$\underset{1\le l\le L}{\forall}\ \underset{1\le k\le K}{\forall}\ (G^{k-1} = G^{k+l-1}) \wedge (u_{l,o}^{k-1+l-1} > 0) \qquad (25)$$

to w takcie k-tym wystarczy rozwiązać jeden problem BLM dla Ω_1 i linii o L stacjach, żeby uzyskać sterowania dla wszystkich stacji, jakie są niezbędne do zmontowania obiektu znajdującego się w takcie k-tym na stacji 1.

Również w przypadku, gdy w takcie k-tym na linię wchodzi obiekt tej samej wersji co w takcie k-1, sterowanie w takcie k-tym może być identyczne jak w takcie k-1, czyli:

$$\underset{1\le l\le L}{\forall}\ \underset{1\le k\le K}{\exists}\ (G^{k-1} = G^{k+l-1}) \wedge (x_{1,o}^{k} = x_{1,o}^{k-1}) \Rightarrow (U_l^{k+l-1} = U_l^{k-1+l-1}) \qquad (26)$$

W przypadku niespełnienia warunku (23) konieczne jest ponowne wyznaczenie wszystkich balansów .

6. Zakończenie

Połączenie w zaprezentowanym sterowaniu mechanizmów sterowania dynamicznego z problemem BLM, charakterystycznym dla sterowania statycznego, pozwoliło na zastosowanie go w zdefiniowanych procesach.

Przedstawione sterowanie dynamiczne wielokrokowe jest ogólnym przypadkiem sterowania procesem montażu. Podstawowe znaczenie ma tutaj wybór algorytmu BLM . Od tego algorytmu zależy czy sterowanie to jest optymalne, a także szybkość balansowania linii. Szybkość ta ogranicza możliwość praktycznego zastosowania tego sterowania. Powinna ona pozwolić na wyznaczenie sterowania w czasie nie dłuższym niż minimalny czas taktu pracy linii.

Dodatkowo system sterowania linią montażową powinien mieć możliwość pamiętania wyznaczonych sterowań dla L następnych taktów .

LITERATURA

[1] Kowalowski H. i inni: Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych. WNT, Warszawa 1984.

[2] Marecki F.: Modele matematyczne i algorytmy alokacji operacji i zasobów na linii montażowej. ZN Pol. Śl., s. Automatyka z 82, Gliwice 1989.

[3] Marecki F., Płasznik K.: Model matematyczny jednowersyjnego procesu montażu na liniach z robotami przemysłowymi. ZN. Pol. Śl., s. Automatyka z 103, Gliwice 1990 .

[4] Niederliński A. : Roboty przemysłowe . WSzP . Warszawa 1981 .

[5] Kowalowski H. i inni: Modele matematyczne i algorytmy sterowania procesami dyskretnymi. Raport z pracy n-b., Gliwice 1989. (niepublikowane).

[6] Kowalowski H. i inni : Metodyka i optymalizacja sterowania procesami montażu na liniach z uwzględnieniem diagnostyki i kontroli między-

operacyjnej. Raport z pracy n-b., Gliwice 1989, (niepublikowane).

[7] Marecki F., Płasznik K.: Symulator sterowania linią montażową, ZN. Pol. Śl., s.Automatyka z 101, Gliwice 1990.

[8] Płasznik K.: Sterowanie statyczne montażem na liniach z robotami przemysłowymi. I Ogólnopolska Konferencja "Sztuczna Inteligencja" CIR'90, Warszawa - Siedlce 1990 .

Wpłynęło do redakcji do 30.04.1992.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Matuszek

Abstract: In the paper a problem of control of multiversion assembly process is discussed. Assembly operations are parformed by industrial robots in different points of an object. A program of robot work is a solution of a travelling salesman problem. At the asemmbly process program of robot work can be different for different cycles. A problem of assembly line control depends on determination of a robot work program for each cycle.