

Grzegorz PUSZ
Politechnika Wrocławska

ALGORYTM WYBORU OPERACJI TRANSPORTOWEJ DLA STEROWANIA DYSKRETNYM SYSTEMEM PRODUKCYJNYM*

Streszczenie. Praca dotyczy sterowania transportem w dyskretnym systemie produkcyjnym traktowanym jako kompleks operacji, którego zadaniem jest wykonanie ciągu operacji na obiektach, przemieszczanych w systemie przez wózki automatyczne. Rozważany jest problem sterowania wyborem operacji transportowych do wykonania przez wózki tak, aby czas wykonania wszystkich operacji był jak najmniejszy. Praca zawiera opis opracowanego przybliżonego algorytmu wyboru operacji transportowej dokonywanego na bieżąco w czasie pracy systemu.

TRANSPORT CONTROL ALGORITHM FOR THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM

Summary. Flexible manufacturing system performing the given sequence of operations on the objects is considered. Objects are transported in the system by the automated guided vehicles. The aim of the control is to minimize the manufacturing time of the given batch of objects. The paper presents the heuristic algorithm for the choice of the transport operation to be done by the vehicle, which tries to minimize the time necessary to complete all operations.

1. Zadanie sterowania dyskretnym system produkcyjnym

Rozważany w pracy dyskretny system produkcyjny ma za zadanie wykonanie określonego ciągu zadań technologicznych na obiektach różnych typów. Oznaczmy liczbę typów obiektów przez N , typ obiektu przez h , a liczbę obiektów typu h przez N_h . Obiekt typu h o numerze n będziemy oznaczać $A_{h, n}$. Na wszystkich obiektach tego samego typu należy wykonać taki sam ciąg zadań technologicznych. Liczba zadań technologicznych do wykonania na obiekcie typu h oznaczmy przez J_h , a należące do tego ciągu i -te zadanie technologiczne przez $z_{h, i}$. W ten sposób dla obiektów każdego typu zdefiniowany jest ciąg zadań do wykonania

$$z_{h, 1}, z_{h, 2}, \dots, z_{h, J_h}.$$

* Praca została wykonana w ramach projektu badawczego 8 T11 022 14 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Zadania technologiczne są wykonywane przez realizatory. Każdy z realizatorów może wykonać określony zbiór zadań technologicznych, przy czym o realizatorach wykonujących ten sam zbiór zadań będziemy mówić, że należą do jednego typu. Oznaczmy liczbę typów realizatorów przez M , typ realizatora przez l , a liczbę realizatorów typu l przez M_l . Realizator typu l o numerze m będziemy oznaczać przez $R_{l,m}$.

Dla każdego zadania technologicznego $z_{h,i}$ jest jednoznacznie zdefiniowany typ realizatora, który może je wykonać, oznaczany przez $\rho_{h,i}$ (zadanie może być wykonane przez dowolny realizator tego typu), oraz czas jego wykonania $\tau_{h,i}$. Wykonywanie zadania nie może być przerywane.

Operacją technologiczną będziemy nazywać wykonanie zadania technologicznego na konkretnym obiekcie przez określony realizator odpowiedniego typu. Operację technologiczną polegającą na wykonaniu zadania $z_{h,i}$ na obiekcie $A_{h,n}$ będziemy oznaczać przez $O_{h,n,i}$. Jest ona zdefiniowana przez podanie: $m_{h,n,i}$ - numeru realizatora odpowiedniego typu (danego przez $\rho_{h,i}$), na którym będzie wykonana; oraz $b_{h,n,i}$ - momentu rozpoczęcia jej wykonywania:

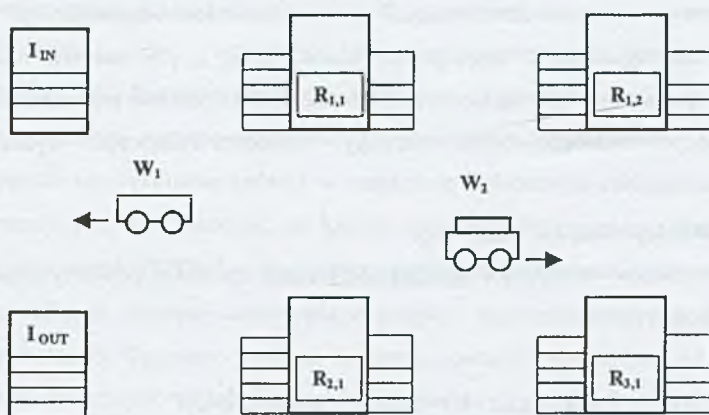
$$O_{h,n,i} = (m_{h,n,i}, b_{h,n,i}).$$

Każdy realizator posiada magazyn wejściowy, do którego dostarczane są obiekty, na których ma on wykonać zadania technologiczne; oraz magazyn wyjściowy, w którym umieszczane są obiekty po wykonaniu zadania. W chwili początkowej wszystkie obiekty znajdują się w magazynie wejściowym całego systemu I_{IN} , a po wykonaniu zadanego ciągu zadań technologicznych umieszczane są w magazynie wyjściowym systemu I_{OUT} . Zakładamy, że pojemności wszystkich magazynów są nieskończone. Przykładowa struktura rozważanego systemu jest przedstawiona na rys. 1.

Aby zrealizować zadany ciąg zadań technologicznych, obiekt musi być odpowiednio przemieszczany między realizatorami systemu, a dokładniej – między ich magazynami wejściowymi i wyjściowymi. Zatem oprócz zadań technologicznych, w czasie działania systemu są do wykonania zadania transportowe. Pierwszym zadaniem wykonywanym na dowolnym obiekcie jest zadanie transportowe polegające na przewiezieniu go z magazynu wejściowego systemu do magazynu wejściowego realizatora, który wykona pierwsze zadanie technologiczne na obiekcie. Po wykonaniu zadania technologicznego, na obiekcie wykonywane jest kolejne zadanie transportowe przewiezienia go do realizatora, który wykona następne zadanie technologiczne.

W ten sposób dla danego ciągu zadań technologicznych (o długości J_h) określony jest ciąg zadań transportowych (o długości $J_h + 1$)

$$W_{h,0}, W_{h,1}, W_{h,2}, \dots, W_{h,J_h}.$$



Rys. 1. Przykładowa struktura rozważanego systemu produkcyjnego
Fig. 1. Example structure of the considered manufacturing system

Obiekty są przemieszczane pomiędzy magazynami systemu przez wózki automatyczne (AGV – automated guided vehicle). Oznaczmy liczbę wózków w systemie przez K , a wózek o numerze g przez c . Wszystkie wózki są jednakowe, każdy z nich może pomieścić najwyżej jeden obiekt. W chwili początkowej wózki znajdują się w magazynie wejściowym systemu.

Odległości między magazynami dowolnych dwóch realizatorów R_{l_1, m_1} i R_{l_2, m_2} systemu są zdefiniowane przez funkcję

$$d(l_1, m_1, l_2, m_2).$$

Przyjmujemy, że położenia obu magazynów realizatora są identyczne jak samego realizatora. Funkcja d definiuje również odległości od magazynu wejściowego systemu I_{IN} (dla $l_1 = 0, m_1 = 1$), oraz magazynu wyjściowego systemu I_{OUT} (dla $l_1 = M + 1, m_1 = 1$). Zakładamy, że wszystkie wózki poruszają się z jednakową, jednostkową prędkością niezależnie od tego, czy są załadowane, czy nie. Przyjmujemy, że wózki nie przeszkadzają sobie wzajemnie, tj. nie rozważamy możliwości kolizji między nimi. Przy tych założeniach czas jazdy między dwoma elementami systemu jest równy ich odległości zdefiniowanej przez funkcję d .

Operacją transportową będziemy nazywać wykonanie zadania transportowego przewiezienia konkretnego obiektu, dla określonych magazynów początkowego i końcowego;

przez wybrany wózek. Operacja wykonania zadania transportowego $w_{h,j}$ dla obiektu $A_{h,n}$ będzie oznaczana przez $P_{h,n,j}$. Ponieważ zadanie transportowe $w_{h,j}$ następuje po zadaniu technologicznym $z_{h,i}$, więc obiekt znajduje się w magazynie wyjściowym realizatora typu $\rho_{h,i}$ i należy go przewieźć do magazynu wejściowego jednego z realizatorów typu $\rho_{h,j+1}$. Operacja jest zatem zdefiniowana przez podanie: $m_{1,h,n,j}$ - numeru realizatora odpowiedniego typu, w którego magazynie wyjściowym znajduje się obiekt; $m_{2,h,n,j}$ - numeru realizatora odpowiedniego typu, do którego magazynu wejściowego obiekt zostanie przewieziony; $g_{h,n,j}$ - numeru wózka przewożącego obiekt; oraz $s_{h,n,j}$ - momentu rozpoczęcia wykonywania operacji:

$$P_{h,n,j} = (m_{1,h,n,j}, m_{2,h,n,j}, g_{h,n,j}, s_{h,n,j}).$$

Będziemy rozważać następujące zadanie sterowania opisanym powyżej dyskretnym systemem produkcyjnym:

Dla danych:

- zbioru obiektów $\{A_{h,n} : h = 1, \dots, N, n = 1, \dots, N_h\}$,
- ciągów zadań technologicznych $\{z_{h,i} : h = 1, \dots, N, i = 1, \dots, J_h\}$,
- typów realizatorów wykonujących określone zadania $\{\rho_{h,i} : h = 1, \dots, N, i = 1, \dots, J_h\}$,
- czasów wykonania zadań $\{\tau_{h,i} : h = 1, \dots, N, i = 1, \dots, J_h\}$,
- zbioru realizatorów $\{R_{l,m} : l = 1, \dots, M, m = 1, \dots, M_l\}$,
- zbioru wózków $\{W_g : g = 1, \dots, K\}$,
- odległości pomiędzy elementami systemu, tj. funkcji d .

Należy wyznaczyć:

- uszeregowanie operacji technologicznych, tj. wyznaczyć $m_{h,n,i}$, $b_{h,n,i}$ dla $h = 1, \dots, N$, $n = 1, \dots, N_h$, $i = 1, \dots, J_h$,
- uszeregowanie operacji transportowych, tj. wyznaczyć $m_{1,h,n,j}$, $m_{2,h,n,j}$, $g_{h,n,j}$, $s_{h,n,j}$ dla $h = 1, \dots, N$, $n = 1, \dots, N_h$, $j = 0, \dots, J_h$,

tak aby wyznaczone uszeregowanie było dopuszczalne oraz aby minimalizowało kryterium jakości, którym jest czas T wykonania wszystkich zadań na wszystkich obiektach przez system.

2. Algorytm wyboru operacji transportowej

Sformułowane powyżej zadanie sterowania systemem jest NP-trudne. Z tego powodu opracowany został przybliżony algorytm jego rozwiązania, oparty na dekompozycji całego zadania na dwa prostsze zadania: sterowania przebiegiem operacji technologicznych i

sterowania operacjami transportowymi. Dekompozycja ta pogarsza oczywiście rezultaty sterowania, ponieważ przyjęty sposób sterowania operacjami technologicznymi wpływa na przebieg operacji transportowych i odwrotnie. Dekompozycja ułatwia jednak znalezienie przybliżonego rozwiązania. Zadania powstałe w wyniku dekompozycji są również NP-trudne. W dalszym ciągu pracy rozważany będzie przybliżony algorytm sterowania operacjami transportowymi przy ustalonym prostym algorytmie sterowania operacjami technologicznymi. Algorytm sterowania operacjami technologicznymi pozwala na wybranie obiektu, na którym zostanie wykonane następne zadanie technologiczne, spośród obiektów oczekujących na wykonanie zadania w magazynie wejściowym realizatora. Wybór obiektu dokonywany jest w momencie, w którym realizator kończy poprzednie zadanie, przy zastosowaniu reguły FIFO, tj. wybrany zostaje obiekt najdłużej oczekujący w magazynie.

Przybliżony algorytm sterowania operacjami transportowymi jest algorytmem typu dyspozytorskiego. Decyzje o wyborze następnej operacji transportowej podejmowane są w momencie, w którym wózek kończy wykonywanie poprzedniej operacji. Przegląda się wówczas zbiór możliwych w tej chwili operacji do wykonania i wybiera spośród nich jedną, po czym wózek przystępuje do jej wykonania.

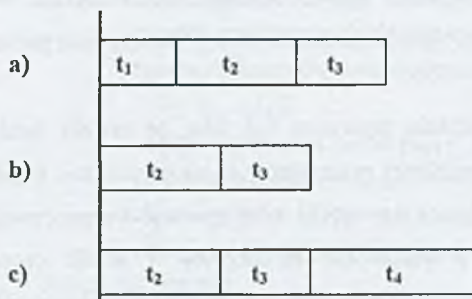
Przesłanką braną pod uwagę przy tworzeniu algorytmu był fakt, że system działa najbardziej efektywnie, jeśli obciążenia poszczególnych realizatorów są jak największe, tj. jak najmniejszy jest czas przestojów. Algorytm stara się wybrać taką operację transportową, której wykonanie spowoduje, że obciążenie wszystkich realizatorów w sensie czasu niezbędnego do wykonania operacji technologicznych na wszystkich obiektach znajdujących się w ich magazynach wejściowych będzie jak największe.

W najprostszym przypadku można byłoby wysłać obiekt do magazynu wejściowego tego realizatora, gdzie kolejka jest najkrótsza (w sensie czasu wykonania operacji na wszystkich obiektach). Innym prostym rozwiązaniem byłby wybór takiego obiektu, dla którego wykonanie następnej operacji technologicznej trwa najdłużej, ponieważ najbardziej zwiększymy kolejkę. Oba powyższe rozwiązania nie biorą jednak pod uwagę czasu niezbędnego do przewiezienia obiektu przez wózek. Załóżmy (patrz rys.2.), że w momencie podejmowania decyzji kolejka wejściowa realizatora, do którego chcemy przewieźć obiekt, ma długość l_0 (w sensie czasu wykonania operacji na wszystkich obiektach). Jeśli w danym momencie kolejka wejściowa jest pusta, to za jej długość przyjmujemy czas, jaki upłynął od zakończenia ostatniej operacji technologicznej wykonywanej na realizatorze, ze znakiem minus (długość kolejki jest w tym wypadku ujemna). Wykonanie operacji transportowej przez

się znajduje w momencie podejmowania decyzji, do magazynu, w którym znajduje się obiekt. Oznaczmy ten czas przez τ_0 . Drugi etap, przewiezienia obiektu do magazynu wejściowego realizatora, oznaczmy przez τ_1 . Zatem całkowity czas przewiezienia obiektu τ jest równy $\tau_0 + \tau_1$. Po dodaniu przewiezionego obiektu kolejka wejściowa realizatora zwiększy się o czas wykonania najbliższej operacji na obiekcie t . Ponieważ jednak w czasie, w którym przewożony był obiekt, realizator wykonywał operacje na innych obiektach ze swojej kolejki wejściowej, jej długość zmniejszyła się o czas transportu. Zatem rzeczywisty przyrost długości kolejki w momencie zakończenia transportu jest równy

$$\Delta l = t - \tau.$$

Może się zatem okazać, że jeśli przewiezienie obiektu trwa zbyt długo, przyrost długości kolejki realizatora jest niewielki lub nawet kolejka ulega zwiększeniu. Z tego punktu widzenia należy wybierać do przewiezienia obiekt znajdujący się blisko zarówno wózka, jak i docelowego realizatora, dla którego następna operacja technologiczna trwa jak najdłużej.



Rys.2. Kolejka magazynu wejściowego realizatora: (a) w momencie rozpoczęcia transportu, (b) w momencie dotarcia wózka do realizatora, (c) po dodaniu przywiezionego obiektu
Fig.2. Input queue of the machine: (a) at the transport beginning, (b) when the vehicle reaches the machine, (c) after adding the transported object

Opracowany algorytm stosuje powyższe kryterium. Dla wszystkich możliwych do wykonania operacji transportowych sprawdza on, jakie będą długości kolejek w docelowych realizatorach wszystkich operacji w momencie zakończenia wszystkich operacji. Następnie wybiera tę operację, dla której suma długości kolejek w realizatorach docelowych wszystkich operacji w momencie zakończenia transportu obiektu jest najdłuższa. Poprzez wyliczanie sumy długości kolejek we wszystkich docelowych realizatorach algorytm zwraca uwagę na stan kolejek w wielu miejscach systemu, a nie tylko jednego realizatora. Polepsza to jego działanie dla różnorodnych struktur i parametrów systemów. Zauważmy także, że ponieważ poszczególne operacje transportu kończą się w różnym czasie, porównujemy sumę długości

kolejek w różnych momentach. Jest to oczywiście uproszczenie i można byłoby rozważyć algorytm porównujący długości kolejek w jednym wybranym momencie, np. zakończenia najdłuższej z możliwych operacji.

Algorytm można sformułować następująco. Niech w momencie podejmowania decyzji będzie I operacji transportowych możliwych do wykonania. Docelowy realizator operacji o numerze i oznaczmy przez r_i . Ponieważ jest możliwe $r_{i_1} = r_{i_2}$ dla $i_1 \neq i_2$, więc liczba różnych maszyn docelowych, oznaczana przez J , jest mniejsza lub równa ilości możliwych operacji, czyli

$$J \leq I.$$

Czas operacji technologicznej wykonywanej dla przewiezionego obiektu na maszynie docelowej i -tej operacji transportowej oznaczmy przez t_i . Czas jazdy pustego wózka z jego aktualnego położenia do miejsca, gdzie znajduje się obiekt przewożony w i -tej operacji, oznaczmy przez $\tau_{0,i}$. Czas przewiezienia obiektu oznaczmy przez $\tau_{1,i}$, wówczas czas wykonania i -tej operacji transportowej jest równy

$$\tau_i = \tau_{0,i} + \tau_{1,i}.$$

Przyrost długości kolejki docelowego realizatora jest równy

$$\Delta l_i = t_i - \tau_i.$$

Niech początkowa długość kolejki w j -tym realizatorze docelowym operacji ($j = 1, \dots, J$) jest równa $l_{0,j}$. Po wybraniu i wykonaniu operacji i długość kolejki w j -tym realizatorze będzie równa

$$l_{j,i} = l_{0,j} + \Delta l_i, \text{ jeśli } j = r_i \text{ (rozważamy realizator docelowy wybranej operacji),}$$

lub

$l_{j,i} = l_{0,j} - \tau_i$, jeśli $j \neq r_i$ (rozważamy realizator docelowy innej niż wybrana operacji; kolejka zmniejszyła się, bo rozważamy moment późniejszy o czas wykonania wybranej operacji transportu).

Suma długości kolejek we wszystkich realizatorach docelowych po wybraniu operacji i -tej jest równa

$$L_i = l_{1,i} + l_{2,i} + \dots + l_{j,i}.$$

Algorytm można teraz zapisać następująco:

1. Wyliczyć sumy długości kolejek L_i kolejno dla wyboru wszystkich możliwych do wykonania operacji transportowych, tj. dla $i = 1, \dots, I$.
2. Wybrać operację i^* , dla której suma długości kolejek jest największa, tj. $i^* \rightarrow \max L_i$.

Pewną trudność stanowi operacja transportu do magazynu wyjściowego systemu - nie wykonuje się tam żadnej operacji, zatem czas t_1 jest równy zeru. Algorytm bierze tu pod uwagę tylko długość kolejki - w ten sposób transport do magazynu wyjściowego ma nieco mniejszą wagę.

Przeprowadzono wstępne badania symulacyjne własności opracowanego algorytmu dla kilku przypadków opisanego powyżej modelu systemu produkcyjnego. W badaniach tych algorytm porównywano ze znanymi prostymi algorytmami wyboru operacji transportowej: SDS (wybór obiektu, który znajduje się najbliżej wózka), LDS (wybór obiektu znajdującego się najdalej wózka), oraz z algorytmem heurystycznym opisanym w [2]. Badania wykazały, że opracowany algorytm w większości przypadków pozwala na uzyskanie krótszego czasu wykonania wszystkich operacji na obiektach niż pozostałe algorytmy. Daje on najlepsze wyniki wówczas, gdy ilości realizatorów są tak dobrane, aby dla danych czasów wykonywania operacji technologicznych zadan z realizatorów nie posiadał większych przestoju. Badania własności algorytmu miały jednak jedynie charakter wstępny i dla jego dokładnego poznania niezbędne jest wykonanie odpowiednio dużej liczby badań symulacyjnych dla różnorodnych struktur i parametrów opisanego modelu systemu produkcyjnego.

LITERATURA

1. Bubnicki Z., Pusz G.: O wyborze struktury w pewnych zrobotyzowanych procesach montażu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z.94, Gliwice 1988.
2. Pusz G.: Algorytm wyznaczania sterowania dyskretnym systemem produkcyjnym metodą kolejnych przybliżeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z.109, Gliwice 1992.
3. Pusz G.: Two-criteria analysis of the flexible manufacturing system. Systems Science, Vol. 18, No. 2, 1992.
4. Stern H.I., Vitner G.: Scheduling parts in a combined production-transportation work cell. J.Opl.Res.Soc., Vol. 41, No. 7, 1990.
5. Zhou Ch.: Scheduling in a manufacturing shop with sequence-dependent setups. Robotics and CIM, Vol. 5, No. 1, 1989.

Recenzent: Prof.dr inż Henryk Kowalowski

Abstract

The paper considers the flexible manufacturing system performing the given sequence of operations on the objects of different types. The system comprises machines performing

operation, and automated guided vehicles transporting the objects. The aim of the control is to minimize the manufacturing time of the given object batch. This problem is decomposed into two subproblems: the control of the technological and transport operations and then the latter subproblem is considered. The heuristic algorithm for the AGV control is presented. The algorithm takes into account the length of the queues for all machines and the time necessary to transport the objects to those queues. The algorithm makes a choice which transport operation will be performed by the AGV. It tries to minimize the total time necessary to complete all technological and transport operations for the given batch of objects.