

Joanna Józefowska
Politechnika Poznańska

SYSTEM EKSPERCKI PROJEKTOWANIA KONFIGURACJI ESP
EXPERT SYSTEM FOR DESIGN OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS
EXPERTENSYSTEM FÜR PROJEKTIERUNG VON FLEXIBLEN FERTIGUNGSSYSTEMEN

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję dynamicznego projektowania konfiguracji elastycznego systemu produkcyjnego. Zaproponowano system ekspercki realizujący tę koncepcję. Cechą charakterystyczną proponowanego systemu jest wspomaganie wnioskowania algorytmami szeregowania zadań. W ramach projektowania systemu porównano kilka algorytmów przybliżonych szeregowania zadań w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi z dowolnymi ograniczeniami kolejnościowymi i kryterium długości uszeregowania. Algorytmy wraz z wynikami eksperymentów obliczeniowych są omówione w pracy.

Summary: An idea of dynamic design of flexible manufacturing system is presented. An expert system has been developed to realise this idea. The interesting feature of the expert system is to support reasoning with scheduling algorithms. While developing the expert system, few heuristic scheduling algorithms for the problem of scheduling tasks with precedence and resource constraints in two machine flow shop have been developed and evaluated. Computational results are presented and discussed in this paper.

Zusammenfassung: In diesem Beitrag ist ein Entwurf von dynamischen Aufbaugestaltung des flexiblen Fertigungssystems vorgestellt worden. Es ist ein Expertensystem dazu vorgeschlagen worden, dass mit Algorithmen für Aufgabenverteilung unterstützt worden ist. Man kann das als Eigentümlichkeit des vorschlagenden Systems bezeichnen. Während der Projektierung des Systems sind einige approximative Algorithmen für Aufgabenverteilung in zweiteiligen Durchfluss-System mit beliebigen Reihenfolgebegrenzungen und verplanbaren Belegungszeitkriterien hergestellt worden. Diese Algorithmen und die Ergebnisse der Berechnungsexperimenten sind im Beitrag besprochen worden.

1. Wstęp

Przez projektowanie konfiguracji ESP rozumie się najczęściej ustalenie typów i liczby maszyn i urządzeń (transportowych, magazynowych itp.), tworzących elastyczny system produkcyjny. W niniejszej pracy pojęcie to odnosi się do fazy eksploatacji systemu produkcyjnego i dotyczy ustalenia liczby maszyn i urządzeń wykorzystywanych do realizacji zbioru zadań, określonego w planie produkcji oraz ich pogrupowania w podzbiory maszyn identycznych. Wynikająca stąd konfiguracja pozwala scharakteryzować system zgodnie z klasyfikacją przyjętą w teorii szeregowania zadań (system przepływowy, ogólny, otwarty itd.). Problemem rozwiązany w niniejszej pracy jest projektowanie konfiguracji ESP dla danego planu produkcji w celu optymalizacji długości uszeregowania zadań w tym systemie. Jak dotąd uwzględniono jedynie systemy produkcyjne typu elastyczna multilinia produkcyjna z ograniczeniami kolejnościowymi i

zasobowymi. Uzyskanie różnych konfiguracji jest tu możliwe przez wyłączenie jednej lub kilku linii produkcyjnych z eksploatacji oraz zmianę liczby wykorzystywanych jednostek zasobu. Wyboru optymalnej struktury przeprowadza się na podstawie porównania uszeregowanych otrzymanych dla różnych dopuszczalnych konfiguracji. Proponowany system ekspercki zawiera algorytmy szeregowania zadań jako procedury w bazie wiedzy. Algorytmy te są wykonywane w momencie odpalenia odpowiedniej reguły, a pozostałe etapy wnioskowania realizowane są z wykorzystaniem informacji, wynikających z wykonania tych algorytmów.

W celu przeprowadzenia wnioskowania należy najpierw wprowadzić dane w postaci zbioru części, ich czasów obróbki i kolejności wykonywania części. Pierwszy etap wnioskowania prowadzi do wygenerowania kilku dopuszczalnych konfiguracji systemu produkcyjnego. Dla każdej z tych konfiguracji wykonywany jest algorytm szeregowania zadań i wybierane jest najlepsze uszeregowanie. W ostatniej fazie wnioskowania następuje weryfikacja otrzymanej konfiguracji.

2. Sformułowanie problemu

Rozważany system produkcyjny jest systemem typu elastyczna multilinia produkcyjna. Obejmuje on k linii dwustanowiskowych L_1, \dots, L_k . Zatem w systemie pracuje $2 \cdot k$ maszyn: $M_{i,j}$, $i=1, \dots, k$, $j=1, 2$. Do każdej linii jest przyporządkowany magazyn detali B_i , $i=1, \dots, k$ oraz robot R_i , $i=1, \dots, k$, realizujący operacje transportowe między stanowiskami oraz między stanowiskiem a magazynem.

Czas trwania operacji transportowych jest pomijalnie mały, a pojemność bufora nie stanowi ograniczenia na poziomie szeregowania zadań.

Detale (wyroby) produkowane są w partiach, których wielkość jest ustalana na etapie planowania obróbki.

Każdy detal (wyrób) W_l , $l=1, \dots, p$ wymaga wielokrotnego przejścia przez system. W każdym przejściu na detailu (wyrobie) wykonywane są kolejno dwie operacje $O_{1,j}$ na maszynie $M_{1,j}$, a następnie $O_{2,j}$ na $M_{2,j}$. Ponadto, na etapie planowania obróbki ustalana jest kolejność realizacji poszczególnych par operacji technologicznych nie tylko dla jednego detailu, ale dla grupy detali zawierających wspólne fragmenty procesu technologicznego. Założone ograniczenia kolejnościowe można przedstawić w postaci grafu skierowanego

1) -----
 Algorytmem szeregowania listowego (algorytmem listowym) nazywamy algorytm, którego realizacja polega na uporządkowaniu zadań wg nie rosnących wartości przydzielonych wcześniej priorytetów i przydzieleniu do wolnej maszyny pierwszego zadania na liście, które w danej chwili może być wykonywane. Po uszeregowaniu zadanie usuwa się z listy.

i acyklicznego, w którym węzły oznaczają pary operacji, a krawędzie ograniczenia kolejnościowe. Wszystkie pary operacji objęte grafem (tj. należące do tej samej grupy detali) wykonywane są w tej samej linii produkcyjnej. Graf można traktować jak elastyczny proces technologiczny, gdzie tylko niektóre ograniczenia kolejnościowe między operacjami są zdeterminowane.

Grupa detali jest przyporządkowana do określonej linii na czas wykonania wszystkich operacji na detalach należących do tej grupy. Przekazanie zlecenia do innej linii może nastąpić tylko w wypadku awarii maszyny lub robota, uniemożliwiającej kontynuowanie obróbki.

Niektóre detale (wyroby) wymagają w czasie obróbki i/lub transportu zastosowania dodatkowego ograniczonego zasobu w postaci specjalnego przyrządu (np. uchwytu).

Szeregowanie zadań w systemie polega na przyporządkowaniu grup detali G_1, \dots, G_m , objętych zleceniem Z , do poszczególnych linii oraz ustaleniu kolejności wykonywania poszczególnych par operacji w każdej linii. W ogólnym modelu przyjmuje się, że operacje wykonywane na jednej grupie detali mogą być przeplatane operacjami na innej grupie detali. W zastosowanym modelu graf ograniczeń kolejnościowych dla linii otrzymuje się z połączenia grafów poszczególnych grup detali w jeden graf, nie dodając żadnych nowych krawędzi. Jest on zatem grafem niespójnym (poza wypadkiem, gdy w linii wykonywana jest tylko jedna grupa detali, dla której ograniczenia kolejnościowe są przedstawione w postaci grafu spójnego).

Kryterium optymalizacji jest długość uszeregowania.

Opisany problem należy oczywiście do klasy NP-trudnych. Poszukiwanie algorytmu przybliżonego rozpoczęto od dekompozycji problemu. Wyróżniono dwa zadania optymalizacyjne. Pierwsze polega na znalezieniu takiego uszeregowania grupy detali w linii, które minimalizuje długość uszeregowania C_{max} . Drugie polega na uszeregowaniu grup detali na k równoległych liniach. Przyjmujemy, że długość uszeregowania grupy detali, wyznaczona w rozwiązaniu pierwszego zadania, jest czasem wykonania grupy detali w tym zadaniu. Pierwsze zadanie jest problemem szeregowania zadań w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi przy dowolnych ograniczeniach kolejnościowych i kryterium długości uszeregowania lub maksymalnego opóźnienia. Drugie zadanie to problem szeregowania zadań na k maszynach równoległych z kryterium długości uszeregowania i ograniczeniami zasobowymi. Otrzymane w wyniku dekompozycji problemy są nadal NP-trudne. Dla znalezienia rozwiązania suboptymalnego zaproponowano algorytmy heurystyczne, które omówiono w punktach 3 i 4 niniejszej pracy.

3. Algorytmy przybliżone szeregowania zadań

Problem dotyczy szeregowania zadań w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi o dowolnych ograniczeniach kolejnościowych i czasach wykonywania w celu minimalizacji długości uszeregowania.

Algorytm przybliżony rozwiązujący ten problem o złożoności $O(n^2)$ przedstawiono poniżej (Algorytm 1). Jest to algorytm szeregowania listowego. Etykiety są przydzielane zadaniom zgodnie z procedurą Coffmana-Grahama. W przypadku, gdy zadania mają identyczne ciągi następników, kolejność przydzielenia etykiet tym zadaniom jest ustalana zgodnie z Regułą 1 (Algorytm Johnsona dla szeregowania zadań niezależnych o dowolnych czasach wykonywania w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi w celu minimalizacji długości uszeregowania).

REGUŁA 1

- Krok 1 Wybierz zadania, dla których $p_1 \leq p_2$. Uporządkuj je według nie malejących wartości p_1 , tworząc listę zadań.
- Krok 2 Pozostałe zadania uporządkuj według nie rosnących wartości p_2 i dopisz na końcu listy.

Złożoność obliczeniowa tej reguły podobnie, jak algorytmu Johnsona, jest $O(n \log n)$.

ALGORYTM 1

- Krok 1 Przydziel etykietę 1 dowolnemu zadaniu bez następników. $j:=2$.
- Krok 2 Przypuśćmy, że etykiety $1, \dots, j-1$ zostały już przydzielone. Niech U oznacza zbiór tych zadań, którym etykiety nie zostały jeszcze przydzielone i których wszystkie następniki posiadają już etykiety. Dla każdego zadania T ze zbioru konstruuje się ciąg $l(T)$ w następujący sposób. Niech T_1, T_2, \dots, T_k oznacza następniki zadania T (to znaczy, że krawędź (T, T_i) należy do grafu G dla $i=1, \dots, k$). Etykiety $e(T_1), e(T_2), \dots, e(T_k)$ uporządkowane malejąco tworzą $l(T)$. Wybierz wszystkie zadania T ($e(T)=j$) takie, że dla każdego zadania $T' \in U$ zachodzi $l(T) < l(T')$ i oznacz zbiór tych zadań γ . Uporządkuj zadania w zbiorze γ zgodnie z Regułą 1. Przydziel następną etykietę ostatniemu zadaniu w otrzymanym ciągu γ . Powtarzaj krok 2 tak długo, aż wszystkim zadaniom zostaną przydzielone etykiety.
- Krok 3 Szereguj zadania zgodnie z listą. Jeżeli żadne zadanie nie jest gotowe, to na M_1 szereguj zadanie puste aż do zakończenia najbliższej operacji na M_2 .

Warto zauważyć, gdy $p_{ij} = 1$ oraz zadania są niezależne, to Algorytm 1 znajduje rozwiązania dokładne.

Algorytm 1 porównano z dwoma innymi algorytmami przybliżonymi, które oznaczono następująco:

Algorytm 2 - algorytm Coffmana-Grahama szeregowania zadań o jednostkowych czasach wykonywania i dowolnych ograniczeniach kolejnościowych w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi;

Algorytm 3 - algorytm Johnsona szeregowania zadań niezależnych w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi.

Wyniki eksperymentu obliczeniowego przedstawiono w punkcie 4.

Problem szeregowania zadań niezależnych w systemie dwóch maszyn identycznych i ograniczonych zasobach odnawialnych jest NP-trudny nawet dla jednego rodzaju zasobu [2]. Algorytm 4 jest proponowanym algorytmem przybliżonym dla tego problemu. Algorytm ten szereguje najpierw zadania wymagające dodatkowego zasobu na tylu maszynach, ile jest dostępnych jednostek dodatkowego zasobu, zgodnie z regułą LPT, czyli wg nie rosnących czasów wykonywania zadań. Następnie szereguje pozostałe zadania, zgodnie z tą samą procedurą, uwzględniając obciążenie maszyn wynikające z uszeregowania zadań wymagających dodatkowego zasobu.

ALGORYTM 4

- Krok 1 Wybierz wszystkie zadania wymagające dodatkowego zasobu i uporządkuj je według nie rosnących czasów p_i .
- Krok 2 Uszereguj zadania wymagające dodatkowych zasobów na pierwszych k maszynach, przydzielając aktualnie wolną maszynę pierwszemu zadaniu na liście.
- Krok 3 Uporządkuj pozostałe zadania według nie rosnących czasów p_i .
- Krok 4 Uszereguj pozostałe zadania na wszystkich k maszynach, uwzględniając już uszeregowane zadania i przydzielając aktualnie wolną maszynę pierwszemu zadaniu na liście.

Złożoność obliczeniowa Algorytmu 4 wynosi $O(n \log n)$. Ponadto można wykazać następujące twierdzenie [3].

TWIERDZENIE

Stosunek długości uszeregowania generowanego przez Algorytm 4 do długości uszeregowania optymalnego dla problemu szeregowania zadań na k maszynach równoległych przy dostępnych u jednostkach dodatkowego zasobu odnawialnego ($u < k$) spełnia nierówność:

$$\frac{C_{\max}^{\text{Alg 2}}}{C_{\max}^*} \leq \frac{2k}{k+1} \quad (1)$$

Analiza najgorszego przypadku wykazała, że stosunek długości uszeregowania generowanego przez Algorytm 4 do długości uszeregowania optymalnego rośnie ze wzrostem liczby maszyn. W granicy ($k \rightarrow \infty$) długość uszeregowania generowanego przez Algorytm 4 jest dwukrotnie większa od optimum. Podobnie jak dla reguły LPT można się spodziewać mniejszego średniego odchylenia od optimum.

Tablica 1

Wyniki eksperymentu obliczeniowego

Lp.	$C_{max}(opt)$	$C_{max}(A1)$	$C_{max}(A2)$	$C_{max}(A3)$	w1[%]	w2[%]	w3[%]
1	129	129	129	140	0.00	0.00	8.53
2	264	264	265	264	0.38	0.38	0.00
3	56	56	56	56	0.00	0.00	0.00
4	174	176	181	181	2.30	4.02	4.02
5	27	27	27	27	0.00	0.00	0.00
6	87	87	88	88	0.00	1.15	1.15
7	90	90	92	91	0.00	2.22	1.11
8	87	87	89	104	0.00	2.30	19.54
9	146	154	155	150	5.48	6.16	2.74
10	46	46	47	47	0.00	2.17	2.17
11	78	78	78	84	0.00	0.00	7.69
12	64	64	64	68	0.00	0.00	6.25
13	90	90	90	100	0.00	0.00	11.11
14	90	91	91	106	1.11	1.11	17.78
15	52	52	52	53	0.00	0.00	1.92
16	141	141	141	143	0.00	0.00	1.42
17	251	251	258	258	0.00	2.79	2.79
18	65	65	65	71	0.00	0.00	9.23
19	181	183	184	184	1.10	1.66	1.66
20	42	43	43	43	2.38	2.38	2.38
21	81	85	84	86	4.94	3.70	6.17
22	88	94	101	95	6.82	14.77	7.95
23	76	80	80	84	5.26	5.26	10.53
24	77	80	80	82	3.90	3.90	6.94
25	153	159	163	169	3.92	6.54	10.46
26	89	92	92	89	3.37	3.37	0.00
27	95	95	99	100	0.00	4.21	5.26
28	76	76	78	83	0.00	2.63	9.21
29	77	77	82	85	0.00	6.49	10.39
30	154	167	171	174	8.44	11.04	12.99
31	85	85	85	91	0.00	0.00	7.06
32	103	103	105	114	0.00	1.94	10.68
33	84	87	87	92	3.57	3.57	9.52
34	84	90	90	95	7.14	7.14	13.10
35	182	198	198	208	8.79	8.79	14.29
36	79	80	80	84	1.27	1.27	6.33
37	87	92	89	90	5.75	2.30	3.45
38	71	72	72	72	1.41	1.41	1.41
39	77	77	80	80	0.00	3.90	3.90
40	152	162	172	165	6.85	13.16	8.55
41	79	85	83	84	7.55	5.06	6.33
42	88	90	92	90	2.27	4.55	2.27
43	71	75	74	74	5.63	4.23	4.23
44	78	81	81	80	3.85	3.85	2.56
45	152	152	163	152	0.00	7.24	0.00

4. Wyniki eksperymentów obliczeniowych

Ocenę efektywności algorytmów przybliżonych przeprowadzono na podstawie porównania generowanych przez nie rozwiązań z rozwiązaniami optymalnymi. Rozwiązania optymalne otrzymano w drodze pełnego przeglądu rozwiązań dopuszczalnych, co pozwoliło rozwiązać problemy o liczbie zadań ≤ 10 . Czasy wykonywania operacji zostały wygenerowane zgodnie z rozkładem normalnym o wartości średniej (innej dla każdego przykładu) od 1 do 20. Ograniczenia kolejnościowe generowano również w sposób przypadkowy.

W tabelicy 1 zestawiono wyniki eksperymentu obliczeniowego dla problemu szeregowania zadań o dowolnych czasach wykonywania i dowolnych ograniczeniach kolejnościowych w dwustanowiskowym przepływowym systemie obsługi z kryterium długości uszeregowania i Algorytmów 1, 2 i 3.

Jak widać, w większości przypadków (38 na 45 badanych) najlepsze uszeregowanie zostało znalezione przez Algorytm 1. W 22 przypadkach było to równocześnie uszeregowanie optymalne. Średnia odległość od optimum dla Algorytmu 1 wynosi 2.78%, przy odchyleniu standardowym 2.29%, co jest wynikiem bardzo dobrym. W porównaniu z Algorytmami 2 i 3, dla których średnie odchylenie od optimum wynosi odpowiednio 3.48% i 6.10%, przy odchyleniu standardowym 3.44% i 4.83%, Algorytm 1 daje najlepsze wyniki. Biorąc pod uwagę bardzo niewielkie czasy obliczeń, wykorzystanie tego algorytmu do wspomaganie decyzji podejmowanych przez system ekspercki jest uzasadnione.

5. Koncepcja systemu eksperckiego

Proponowany system ekspercki oprogramowano wykorzystując istniejący system szkieletowy EXPSYS [1]. System EXPSYS realizuje wyłącznie wnioskowanie w przód i w tył metodą przeszukiwania w głąb i jest oprogramowany w języku PROLOG. Wprowadzanie reguł i faktów do bazy wiedzy umożliwia edytor. System zawiera również moduł wyjaśniający.

W proponowanej aplikacji system ekspercki zawiera w bazie wiedzy reguły produkcji w postaci IF..THEN, fakty oraz procedury - między innymi algorytmy szeregowania zadań przedstawione powyżej.

Celem dalszych prac jest rozszerzenie systemu eksperckiego na inne typy elastycznych systemów produkcyjnych oraz wprowadzenie mechanizmów wnioskowania heurystycznego.

6. Podsumowanie

Przedstawiona koncepcja systemu eksperckiego polega na umieszczeniu algorytmów optymalizacyjnych jako procedur w bazie wiedzy. Wydaje się, że połączenie technik badań operacyjnych i sztucznej inteligencji jest

naturalną drogą rozwoju obu tych dyscyplin, dającą skuteczniejsze strategie rozwiązywania złożonych problemów decyzyjnych.

Prezentowane algorytmy przybliżone szeregowania zadań w dwustanowiskowym przeplywowym systemie obsługi ze względu na niewielkie czasy obliczeń mogą skutecznie wspomagać wnioski prowadzone przez system ekspercki projektowania konfiguracji elastycznego systemu produkcyjnego.

LITERATURA

- [1] Błazejewski A.: Budowa szkieletowego systemu eksperckiego. Praca dyplomowa magisterska, Instytut Informatyki PP, Poznań 1991
- [2] Błazewicz J., Cellary W., Słowiński R., Węglarz J.: Scheduling under resource constraints, Ann. of Op. Res., vol.5, Baltzer, Basel 1986
- [3] Jozefowska J.: System wspomaganie decyzji wyboru strategii sterowania elastycznym systemem produkcyjnym, Rozprawa doktorska, Poznań 1990
- [4] Luger G.F., Stubblefield W.A.: Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems, The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., Redwood City, 1989
- [5] Pigford D.V., Baur G.: Expert Systems for Business - Concepts and Applications, Boyd & Fraser Publishing Company, Boston MA 1990

Recenzent: Prof.dr h.inż. Franciszek Marecki

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

Abstract: An idea of dynamic design of flexible manufacturing system is presented. The design of a flexible manufacturing system has been understood as a decision how to arrange existing machines into a manufacturing system. Possible configurations of machines correspond to machine systems considered in scheduling theory. An expert system has been developed to realise this idea. The interesting feature of the expert system is to support reasoning with scheduling algorithms. Most practical scheduling problems are NP-hard from the computational complexity point of view. While developing the expert system, few heuristic scheduling algorithms for the problem of scheduling tasks with precedence and resource constraints in two machine flow shop have been developed and evaluated. The results of computational experiments are presented and discussed in this paper. The best heuristics have been included in the expert system.