ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: AUTOMATYKA z. 130 Nr kol. 1475

Marek MAGIERA
Akademia Górniczo-Hutnicza

ALGORYTM GENEROWANIA ALTERNATYWNYCH SEKWENCJI MONTAŻOWYCH PRODUKTÓW WIELOOSIOWYCH DLA ESM*

Streszczenie. W artykule opisano heurystyczny algorytm generowania alternatywnych sekwencji montażowych. Dotyczy on produktów, których montaż może się odbywać wzdłuż kilku różnych osi - produktów wieloosiowych. Punktem wyjścia jest model produktu przeznaczonego do montażu. Generowanie sekwencji montażowych jest rozumiane jako proces odwrotny do generowania sekwencji demontażowych. Zmiany kolejności montowania podzespołów oraz zmiany związane z wyborem głównej osi montażu umożliwiają generowanie alternatywnych sekwencji montażowych.

ALGORITHM OF GENERATING ALTERNATIVE ASSEMBLY SEQUENCES OF MULTIAXIAL PRODUCTS FOR FAS

Summary. This paper describes a heuristic algorithm for the generation of alternative assembly sequences. The conception is connected with multiaxial products or products, which assembly is taking place along many axises. The starting point is a model of product. The generation of assembly sequences is comprehend as a reverse process of the disassembly sequences generation. A changes of subassembly sequence, which are connected with assembly main axis choice, enabling the generation of alternative assembly sequences.

1. Wprowadzenie

Elastycznym systemem montażowym (ESM) (ang. *FAS - Flexible Assembly System*) nazywa się zespół sterowanych numerycznie stanowisk montażowych, zintegrowany przez zautomatyzowany transport i magazynowanie oraz wspólne sterowanie komputerowe, przeznaczony do jednoczesnego montażu wielu różnych wyrobów w krótkich seriach [9].

Montaż części składowych produktu odbywa się w ESM wg wyznaczonego planu montażu. Celem planowania montażu jest wygenerowanie listy kolejno wykonywanych operacji montażowych, zwanej sekwencją montażową. W przypadku wygenerowania wielu takich list dla danego produktu otrzymane sekwencje nazywane są alternatywnymi.

* Praca częściowo finansowana z badań własnych nr 10.10.200.11.

Wyróżnia się dwie grupy metod generowania sekwencji montażowych: metody ścisłe, metody heurystyczne [5]. Stosowanie ścisłych metod generowania sekwencji montażowych umożliwia uzyskiwanie zbiorów wszystkich możliwych rozwiązań. W przypadku dużej liczby części składowych produktu stosowanie tych metod nie jest zadowalające, gdyż zachodzi tzw. eksplozja kombinatoryczna. W takich sytuacjach stosuje się metody heurystyczne, do których można zaliczyć metodę zaprezentowaną w niniejszej pracy. Proponowany algorytm umożliwia generowanie sekwencji montażowych produktów wieloosiowych, czyli takich produktów, których montaż (lub demontaż) odbywa się wzdłuż co najmniej dwóch różnych osi.

Idea prezentowanej metody została zaczerpnięta (częściowo) z pracy Gu [2], w której generowanie sekwencji montażowych jest rozumiane jako proces odwrotny do generowania sekwencji demontażowych.

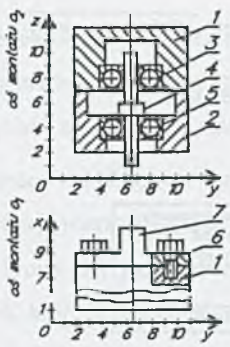
W powstałym algorytmie zachodzi dekompozycja zespołu części w podzespoły, generowane są sekwencje demontażowe oddzielnie dla każdego podzespołu, końcowa sekwencja montażowa generowana jest poprzez syntetyzowanie sekwencji demontażu podzespołów i odwrócenie głównej sekwencji demontażu.

2. Dane

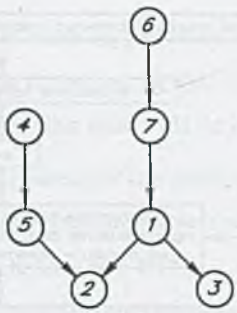
Punktem wyjściowym do algorytmu generowania sekwencji montażowych jest graf struktury produktu G. Jest on grafem skierowanym, spójnym, acyklicznym. Wierzchołki grafu odpowiadają częściom, zaś łuki określają wzajemne położenie części. Łuk (i,j) oznacza, że część i umieszczona jest nad częścią j, z którą styka się czołowo. Demontaż części i odbywa się bez kolizji z częścią j. Zbiór wierzchołków początkowych grafu struktury (wierzchołków, do których nie dochodzi żadna krawędź) oznaczony został WP.

Opis procedury generowania grafów struktury na podstawie rysunku złożeniowego produktu przedstawiony został w pracy [8]. W wymienionej pracy podany jest również sposób cyfrowego zapisu struktury produktów wieloosiowych.

Przykład produktu przestawiony jest na rys. 1a odpowiadający mu graf struktury produktu na rys.2. Produkt ten jest dwuosiowy, jego montaż odbywa się wzdłuż osi x (oś o_1) oraz z (oś o_2 - rys.1).



Rys.1. Rysunek złożeniowy produktu
Fig.1. Assembly drawing of product



Rys.2. Graf struktury produktu
Fig.2. Graph of product structure

3. Generowanie sekwencji demontażowych

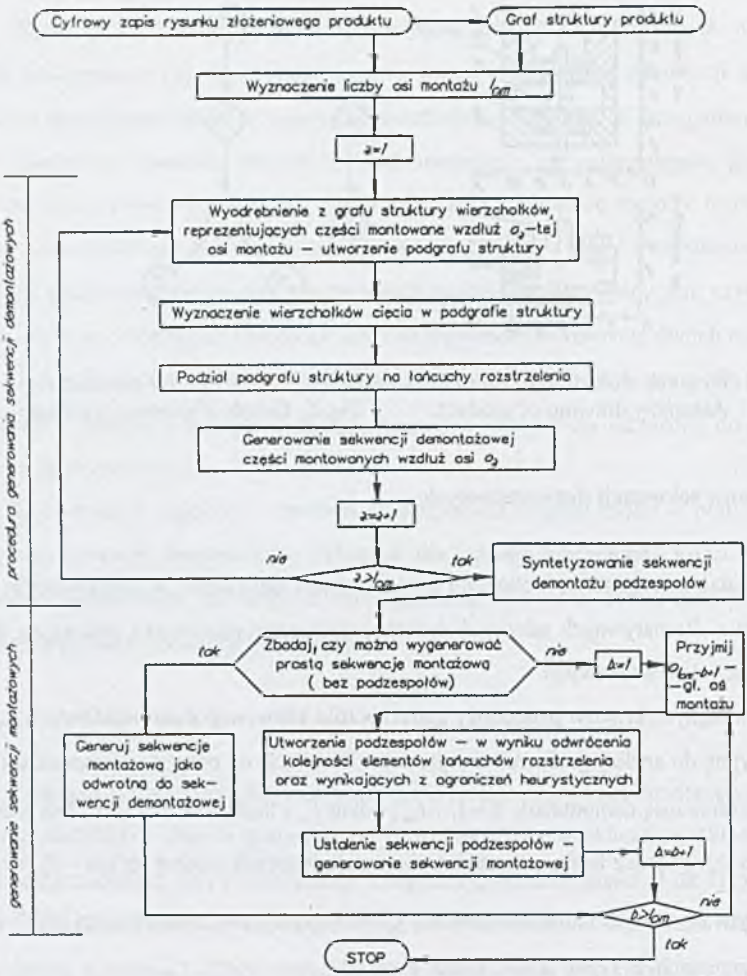
Jak widać na schemacie blokowym opracowanego algorytmu, przedstawionym na rys. 3, generowanie alternatywnych sekwencji montażowych poprzedzone jest procedurą generowania sekwencji demontażowych.

Opis kolejnych kroków **procedury generowania sekwencji demontażowych**:

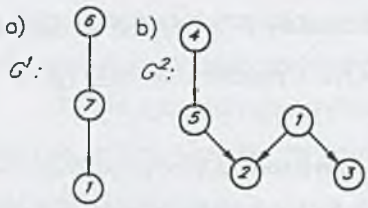
Krok 1. Przyjmij do analizy graf struktury produktu G. Niech o_a oznacza oś montażu (będącą równocześnie osią demontażu), $a = 1,\ldots l_{om}$, gdzie l_{om} - liczba osi montażu. Dla każdej osi montażu o_a wyznacz liczbę połączeń rozłącznych, leżących wzdłuż tej osi - l^a_{pr} oraz liczbę montowanych wzdłuż niej elementów - l^a_{el}. Utwórz l^a_{el}-elementowe ciągi PD^a o zerowych elementach. Przyjmij $a := 1$. Idź do kroku 2.

Krok 2. Wyodrębnij z grafu struktury G (na podstawie analizy rysunku złożeniowego produktu) wierzchołki, reprezentujące części montowane wzdłuż osi o_a oraz łuki łączące te wierzchołki. Powstanie w ten sposób podgraf grafu struktury G^a. Przykładowe podgrafy struktury (G^1, G^2), dla produktu zilustrowanego na rys. 1, przedstawione są na rys. 4. Idź do kroku 3.

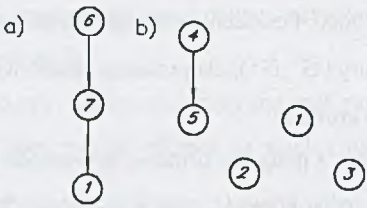
Krok 3. Usuń z podgrafu struktury *wierzchołki cięcia* - wierzchołki, z których odchodzi więcej niż jedna krawędź, oraz wierzchołki, do których dochodzi więcej niż jedna krawędź. Wygenerowane zostaną w ten sposób łańcuchy rozstrzelenia. Utwórz listę wierzchołków początkowych łańcucha rozstrzelenia - WP^a.



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu generowania sekwencji montażowych
Fig. 3. Block diagram of the algorithm for assembly sequences generation



Rys. 4. Podgrafy struktury
Fig. 4. Subgraphs of structure



Rys. 5. Łańcuchy rozstrzelenia
Fig. 5. Chains of explode

Wierzchołki 1 i 2, pokazane na rys. 4.b, stanowią przykłady wierzchołków cięcia. Przykłady łańcuchów rozstrzelenia podane są natomiast na rys. 5.a - dla demontażu wzdłuż osi o_1 oraz na rys 5.b - dla demontażu wzdłuż osi o_2. Idź do kroku 4.

Krok 4. Wybierz jeden wierzchołek z listy WP^a wg hierarchii kryteriów wyboru, opisanej poniżej. Jeżeli istnieją wierzchołki spełniające dane kryterium, wybierz pierwszy z nich z listy WP^a i idź do kroku 5. Kryteria wyboru wierzchołka z listy WP^a:

1. wierzchołek, który jest równocześnie wierzchołkiem początkowym WP grafu struktury produktu G;
2. wierzchołek reprezentujący część wykorzystywaną w połączeniach rozłącznych (np. śruba, nakrętka);
3. wierzchołek reprezentujący część która nie ma styku czołowego z częścią reprezentowaną przez następny (drugi) wierzchołek łańcucha rozstrzelenia;
4. wierzchołek reprezentujący część która ma styk cylindryczny lub wielocylindryczny z częścią reprezentowaną przez następny wierzchołek łańcucha rozstrzelenia.

W przypadku gdy żadne z kryteriów 1÷4 nie zostało spełnione, wybierz pierwszy wierzchołek z listy WP^a i idź do kroku 5.

Krok 5. Sprawdzenie bezkolizyjności demontażu

Niech część reprezentowana przez wierzchołek wyznaczony w kroku 4 nazwana zostanie *częścią - kandydatem*, natomiast łańcuch rozstrzelenia, którego pierwszym elementem jest ta część, *łańcuchem - kandydatem*.

W celu sprawdzenia bezkolizyjności demontażu zbadaj, czy w podgrafie struktury G^a istnieją łuki dochodzące do wierzchołków należących do łańcucha - kandydata, mające swój początek w wierzchołkach nienależących do tego łańcucha. Jeżeli łuki takie istnieją - idź do kroku 6, w przeciwnym przypadku (demontaż bezkolizyjny) - idź do kroku 7.

Krok 6. Rezygnacja z demontażu łańcucha - kandydata

W związku z tym że wyznaczona w kroku 4 część - kandydat nie może zostać zdemontowana, gdyż nie spełnia wymagania opisanego w kroku 5, zmodyfikuj listę WP^a: elementy będące następnikami wyznaczonej części - kandydata przesuń na liście WP^a o jedną pozycję w lewo. Na końcu listy WP^a umieść część - kandydat. Wróć do kroku 4.

Krok 7. Demontaż łańcucha - kandydata

Części reprezentowane przez łańcuch - kandydat mogą być zdemontowane. W miejsce pierwszego zerowego elementu ciągu PD^a wstaw część – kandydat, a w

miejsca następnych zerowych elementów ciągu PD^a wstaw kolejno pozostałe elementy tego łańcucha. Wszystkie następniki części - kandydata na liście WP^a przesuń o jedną pozycję w lewo. Część - kandydat zostanie usunięta z listy WP^a. Idź do kroku 8.

Krok 8. Warunek stopu dla demontażu wzdłuż osi o_a

Sprawdź, czy na liście WP^a pozostały jakieś elementy. Jeśli tak - idź do kroku 4, jeśli nie - idź do kroku 9.

Krok 9. Warunek zakończenia generowania sekwencji demontażowych dla poszczególnych osi montażu (demontażu)

Przyjmij: $a := a + 1$. Jeżeli $a \le l_{om}$ (l_{om} – liczba osi montażu), to idź do kroku 2, jeśli nie - przyjmij: $b := 1$ i idź do kroku 10.

Krok 10.

a) Wyznacz części, które mają połączenia z innymi częściami wzdłuż co najmniej dwóch różnych osi, zostaną one nazwane *częściami wieloosiowymi*. Powtarzające się wierzchołki w podgrafach struktury G^a (dla różnych a) reprezentują te części.

b) Utwórz SD' - ciąg, którego elementami są wyznaczone ciągi PD^a. Pierwszym elementem tego ciągu jest podciąg PD^a, gdzie $a := b$. Pozostałe elementy ciągu SD' uporządkowane są w następujący sposób: każdy poprzednik (element ciągu) ma większą wartość l^a_{el} (dla $a = 1, \ldots, l_{om}$) niż jego następnik. W przypadku gdy wartości l^a_{el} są równe dla dwóch różnych wartości a, porównywane są wartości parametru l^a_{pr}. Poprzednik charakteryzuje się większą wartością parametru l^a_{pr} od wartości tego parametru wyznaczonego dla następnika. Jeżeli natomiast wartość parametru l^a_{pr} jest również identyczna dla dwóch różnych wartości a, porównywana jest wtedy wartość a. W takim przypadku następnik charakteryzuje się większą wartością numeru osi a w zestawieniu z poprzednikiem. Oś, wzdłuż której demontowany jest pierwszy element ciągu SD', nazwana zostanie główną osią demontażu (montażu). Idź do kroku 11.

Krok 11. Przyjęcie notacji sekwencji demontażowej

Utwórz SD^b - ciąg o liczbie elementów równej liczbie części składowych produktu, w którym zapisywana będzie sekwencja demontażowa stanowiąca wykaz kolejno demontowanych części. Wyzeruj wszystkie elementy tego ciągu. Na początku SD^b wstaw podciąg - pierwszy wyraz ciągu SD'. Idź do kroku 12.

Krok 12. Syntetyzowanie sekwencji demontażowych wygenerowanych dla poszczególnych osi montażu (demontażu).

a. Przyjmij $a := 1$, $k := 1$, gdzie k - indeks elementu ciągu PD^a.

b. Przeszukując kolejne podciągi ciągu SD'_1 czyli ciągi PD^a, począwszy od k-tego wyrazu a-tego podciągu, znajdź pierwszy napotkany podciąg, który nie był dotychczas wstawiony do ciągu SD^b i znajdź w nim część wieloosiową (pierwszą napotkaną). Zapamiętaj numer tej części n i idź do pkt. c.

c. Przeszukując kolejne elementy ciągu SD^b znajdź element, reprezentujący część wieloosiową n i zapamiętaj jego indeks m. Jeżeli element taki istnieje - idź do pkt.d, w przeciwnym przypadku:

- jeśli $k < l_{al}^a$, to przyjmij $k := k + 1$ i wróć do pkt. b,
- jeśli $k = l_{al}^a$, to przyjmij $a := a + 1$ oraz $k := 1$ i wróć do pkt. b.

d. Wstaw a-ty podciąg ciągu SD' w miejsce m-tego wyrazu ciągu SD^b. Wstawione elementy ciągu SD^b ogranicz nawiasami. W zapisie sekwencji montażowych nawiasy te będą wyrażały początek oraz koniec podzespołu. Idź do kroku 13.

Krok 13. Warunek zakończenia procedury generowania sekwencji demontażowych

Sprawdź, czy wszystkie podciągi zawarte w ciągu SD' zostały wstawione do ciągu SD^b. Jeśli nie - idź do kroku 12, jeśli tak - sprawdź, czy $b < l_{om}$. Jeśli tak - przyjmij $b := b + 1$ i idź do kroku 10b, jeśli nie - zakończenie procedury generowania sekwencji demontażowych.

Dla rozpatrywanego przykładu listy elementów zdemontowanych po wykonaniu kolejnych iteracji mają postać:

wzdłuż osi o_1 (x) :	wzdłuż osi o_2 (z) :
6, 7, 1;	1;
	1, 3;
	1, 3, 4, 5;
	1, 3, 4, 5, 2.

Wygenerowane sekwencje demontażowe: $SD^1 = 6, 7, (1, 3, 4, 5, 2)$, $SD^2 = (6, 7, 1), 3, 4, 5, 2$.

4. Generowanie sekwencji montażowych

W algorytmie generowania sekwencji montażowych przyjęto założenia:

- operacja montażu jest możliwa tylko wtedy, gdy istnieje płaszczyzna styku czołowego między montowaną częścią a dowolną częścią uprzednio zmontowaną lub uchwytem montażowym;
- im mniej jest podzespołów w sekwencji, tym jest ona łatwiejsza w technicznej realizacji.

Ogólny algorytm budowy sekwencji montażowych przedstawia się następująco:

Krok 0. Niech $b := 1$. Idź do kroku 1.

Krok 1. Przyjmij do analizy ciąg SD^b, opisujący sekwencję demontażową. Idź do kroku 2.

Krok 2. W kroku tym odwrócona zostaje sekwencja demontażowa, zawarta w ciągu SD^b. Podzespoły, grupujące części montowane wzdłuż poszczególnych osi montażu, wyznaczone zostały w kroku 12d procedury generowania sekwencji demontażowej. Główną osią montażu jest oś $o_{l_{om}-b+1}$. Idź do kroku 3.

Krok 3. Tworzenie prostych sekwencji

Sprawdzana jest możliwość utworzenia prostych sekwencji montażowych, niezawierających podzespołów, oprócz tych, które wymienione zostały w kroku 2. Wymagane jest sprawdzenie, czy ostatni element ciągu SD^b może być traktowany jako składnik bazowy. Prosta sekwencja montażowa może zostać utworzona, gdy każdy k-ty element ciągu PD^a (dla $k = 2,\ldots l^a_{el}$, $a = 1,\ldots,l_{om}$) jest w relacji styku czołowego z jednym z r-tych elementów ciągu PD^a (dla $r = 1,\ldots,k-1$). Jeżeli prosta sekwencja może zostać utworzona, idź do kroku 6, jeżeli nie - idź do kroku 4.

Krok 4. Tworzenie złożonych sekwencji montażowych

W kroku 3 natrafiono na część e (stanowiącą element ciągu PD^a), która nie może być indywidualnie montowana, ponieważ np. jest nieodpowiednia dla bazowego składnika, nie ma styku płaskiego z częściami, które są już zmontowane, itp. Próbuje się więc zbudować podzespół $(e,..f)$ o minimalnej liczbie części - elementów ciągu PD^a, zawierający tę część i spełniający omówione ograniczenia. Procedura powtarzana jest dla wszystkich części e, które nie mogą być indywidualnie montowane. Idź do kroku 5.

Krok 5. Alternatywne sekwencje montażowe generowane są w wyniku modyfikacji sekwencji montażowej, utworzonej w kroku 4. Modyfikacje te polegają na:

- zmianie kolejności podzespołów,

– zwiększeniu liczby elementów w poszczególnych podzespołach. Jest to możliwe w przypadku, gdy części dołączane do podzespołu są w relacji styku z częściami, które weszły w skład podzespołu przed jego rozbudową o dodatkowe części.

Modyfikacje te muszą spełniać ograniczenia heurystyczne, dotyczące montażu (np. nie są akceptowane sekwencje montażowe, w których łożyska, krótkie śruby stanowią elementy bazowe). Idź do kroku 6.

Krok 6. Warunek zakończenia procedury.

$b := b + 1$. Jeżeli $b > l_{om}$ - zakończenie procedury, w przeciwnym przypadku - idź do kroku 1.

Dla rozpatrywanego przykładu wygenerowane zostały następujące sekwencje:

s1: (2, 5, 4, (3, 1)), 7, 6 ; s2: ((3, 1), 4, 5, 2), 7, 6 ; s3: (1, 7, 6), 3, (4, 5, 2).

5. Uwagi końcowe

Opisana w pracy procedura generowania sekwencji demontażowej została utworzona wprawdzie pod kątem możliwości zastosowania jej w algorytmie generowania sekwencji montażowych, może jednak zostać wykorzystana w algorytmach zbudowanych dla procesów, w których wymagane jest rozłożenie produktu na pojedyncze elementy lub podzespoły. Przykładami takich procesów są: wymiana uszkodzonego elementu, odzyskanie wartościowych części i materiałów z produktów przeznaczonych do likwidacji, wymontowanie z produktu materiałów szkodliwych dla środowiska.

Zbudowany na podstawie przedstawionego algorytmu program komputerowy umożliwia cyfrowy zapis struktury produktu, określa relacje wzajemnego położenia części i na podstawie tych relacji generuje sekwencję demontażową, a następnie wszystkie dopuszczalne sekwencje montażowe.

LITERATURA

1. Delchambre A.: Computer-Aided Assembly Planning. Champan and Hall, London-New York-Tokyo 1992.
2. Gu P., Zchang Y.: Operation Sequencing in Automated Process Planning. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 4 1993, pp.219-232.
3. Iha K.: Handbook of flexible manufacturing systems. San Diego 1991.

4. Lee S.: Computer - Aided Mechanical Assembly Planning. Kluwer Academic Publishers, 1991.
5. Łebkowski P.: Metody komputerowego wspomagania montażu mechanicznego w elastycznych systemach produkcyjnych. Wydawnictwo AGH, Kraków 2000 (w druku).
6. Łebkowski P., Magiera M.: Komputerowy system generowania sekwencji montażowych dla FAS. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka 1994, z.115, str. 191-200.
7. Magiera M., Łebkowski P.: Relacyjna baza danych do generowania sekwencji operacji dla ESM. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka 1996, z.119, str. 43-52.
8. Magiera M.: Generowanie grafów struktury produktów wieloosiowych dla ESM. Materiały konferencyjne: Zarządzanie w przemyśle, teoria i praktyka, wyzwania XXI wieku, Kraków 1999, str. 633-642.
9. Sawik T.: Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych. WNT, Warszawa 1996.

Recenzent: Dr inż. W.Sileikis

Abstract

A starting point of the algorithm is a graph of product structure (digraph, coherent, acyclic graph). The names of the product parts correspond to the nodes, and the front contact relationships between parts correspond to arcs. The graph of product structure is divided into subgraphs, where each subgraph is connected with separate assembly axis.

A each subgraph is transformed and exploded chains are created. A disassembly sequences are generated, separate for all product parts included in each subgraph. A one disassembly sequence for all product axises is next created.

The generation of assembly sequences is comprehend as a reverse process of the disassembly sequences generation. At the first stage of the assembly sequence, an attempt is made to create simple sequences, i.e. those composed only of single parts. In the case of a part which cannot be individually mounted, we try to construct subassemblies including such a part. A changes of subassembly sequence, which are connected with assembly main axis choice, enabling the generation of alternative assembly sequences. A lot of restrictions must be retained, for example restrictions connected with a base part choice (a first part in the assembly sequence list).

This paper includes an example of presented algorithm application.