ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: AUTOMATYKA z.118 Nr kol. 1338

Piotr ŁEBKOWSKI
Akademia Górniczo-Hutnicza

WIELOAGENTOWY SYSTEM GENEROWANIA SEKWENCJI MONTAŻOWYCH DLA FAS

Streszczenie. System sterowania dynamicznym generowaniem sekwencji montażowych może być przedstawiony jako system wieloagentowy. Każda potencjalna operacja jest reprezentowana przez własny moduł - agenta operacyjnego. Każde stanowisko montażowe jest kierowane przez własny sterownik - agenta. Agent realizuje zadania zgodnie z własnymi lokalnymi kryteriami. Końcowy przydział operacji do stanowiska montażowego odbywa się na zasadach dialogu negocjacyjnego w trakcie procesu montażu.

MULTI-AGENT ASSEMBLY SEQUENCE GENERATION SYSTEM FOR FAS

Summary. The system of the dynamic generation of assembly sequences may be presented as a multi-agent system. Each potential operation is represented by its own operation agent. Each assembly station is controlled by its own agent-controller. The agent performs its own tasks in accordance with specific local criteria. The final assignment of operation to each station takes as a result of a negotiation dialogue during the assembly process.

1. Wprowadzenie

Generowanie sekwencji montażowej jest ważnym etapem procesu planowania produkcji, szczególnie jaskrawo występującym w elastycznych systemach montażowych, w systemach, w których mamy do czynienia z dużą różnorodnością typów montowanych produktów. Planowanie to jest zagadnieniem kombinatorycznym, liczba sekwencji operacji jest funkcją wykładniczą liczby części w gotowym wyrobie. Znalezienie dopuszczalnych ze względu na geometryczne i topologiczne ograniczenia sekwencji, a przede wszystkim wybór sekwencji optymalnej już przy kilkunastu częściach jest zadaniem trudnym.

W większości prac poświęconych temu zagadnieniu autorzy rozważają ogromny zbiór możliwych do realizacji sekwencji montażowych. Zbiór ten uzyskuje się m.in. poprzez analizę wszystkich cięć w grafie struktury i zapisuje jako: graf And/Or, graf skierowany lub sieć Petri. Inny sposób zapisu to podanie warunków dopuszczalności wystąpienia danego stanu procesu montażu wyrażanego np. binarnym wektorem, w którym współrzędne określają występowanie danej części w zmontowanym zespole lub wykonanie określonej operacji połączenia części. Tu

należy wymienić m.in.: metodę warstwowego diagramu przejść stanów montażowych, sieć ograniczeń czasowych, warunki zapisane za pomocą logiki boolowskiej lub za pomocą formuł temporalnych. Efektem stosowania ścisłych metod wyboru jest jedna optymalna sekwencja lub zbiór równoważnych sekwencji montażowych. Podobne wyniki daje stosowanie metod heurystycznych dostarczających tylko jedną bliską optymalną sekwencję. Wśród metod tych na szczególną uwagę zasługują m.in.: metoda oparta na rysunku rozstrzelonym [8] i metoda wykorzystująca procedurę Tabu-Search [7].

Zasygnalizowane tu metody można nazwać metodami statycznymi, wybierają one bowiem najlepszą (zgodnie z przyjętą procedurą) sekwencję przed rozpoczęciem rzeczywistego procesu montażu. Awaria stanowiska, przypadkowe zniszczenie montowanej części w ESM wykorzystującym powyższe metody zmusza system sterowania do przerwania procesu montażu, a harmonogram operacji należy wówczas budować od początku. Nie jest możliwa także zmiana kryterium przydziału operacji do maszyn w trakcie procesu montażu (np. dopuszczenie operacji demontażu). Wydaje się zatem, że idealnym rozwiązaniem będzie opracowanie takiej dynamicznej metody generowania sekwencji montażowej, która na podstawie bieżącego stanu zmontowania wyrobu, obciążenia wszystkich stanowisk ustalać będzie następny krok w sekwencji operacji. Możliwa, w przypadku awarii maszyny, stanie się wówczas kontynuacja montażu na innym stanowisku. Łatwe będzie także rozbudowywanie ESM o nowe stanowiska robocze.

W niniejszym artykule zaproponowano - analogicznie do postępowania w przypadku struktury rozproszonych elastycznych systemów produkcyjnych [9,10] - podejście agentowe do generowania sekwencji montażowej dla ESM. W rozdziale 2 przypomniano istotę autonomicznego agenta i inteligentnego zdecentralizowanego systemu wieloagentowego. Opisano krótko strukturę wieloagentowego systemu generowania sekwencji montażowych. Rozdział 3 charakteryzuje zadania poszczególnych agentów oraz podaje ogólny algorytm tworzenia sekwencji montażowej, który zilustrowano przykładem w rozdziale 4.

2. Pojęcie autonomicznego agenta i uproszczona struktura ESM

Równoczesność wielu procesów produkcyjnych zachodzących w elastycznych systemach montażowych i związane z tym trudności wyrażania i znajdowania optymalnej sekwencji montażowej, a także zachęcające wyniki wielu aplikacji wykorzystujących podejście agentowe do procesów informatycznych zachęciły autora niniejszego opracowania do zastosowania koncepcji autonomicznego agenta w generowaniu sekwencji montażowej.

Agent może być rozumiany jako fizykalny i abstrakcyjny moduł, który jest zdolny do działania sam w sobie oraz w swoim środowisku, a ma on choć częściową reprezentację tego środowiska. Za Cetnarowiczem [2] można przytoczyć ścisłą definicję autonomicznego agenta jako uporządkowaną szóstkę:

a = (M, Q, S, I, R, L),

gdzie: M - konfiguracja modeli otoczenia wchodzących w zakres wiedzy agenta,

m - model pewnego otoczenia v agenta a, $m \in M$, v = (A,e),

V - środowisko, V = (A,e),

A - konfiguracja agentów, $a \in A$,

e - konfiguracja zasobów środowiska, $e \in E$,

E - zbiór konfiguracji zasobów,

Q - konfiguracja celów agenta a,

q - wskaźnik jakości określających cele agenta a, $q \in Q$,

S - konfiguracja możliwych strategii agenta a,

s - strategia określająca działania adenta a, $s \in S$,

I - operator obserwacji otoczenia przez agenta a,

R - operacja realizacji strategii s agenta a,

L - operacja uczenia się agenta wprowadzana tylko w pewnych zastosowaniach.

Świat autonomicznych agentów zdefiniowano jako:

AW = ($\mathcal{A}$, E),

gdzie: $\mathcal{A}$ to zbiór konfiguracji agentów, $A \in \mathcal{A}$.

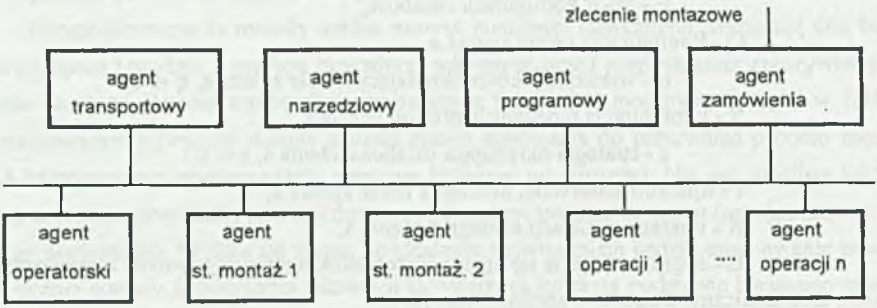
Opierając się na powyższych pojęciach w [2] zaproponowano uogólniony algorytm działania agenta należącego do środowiska autonomicznych agentów. Próby stworzenia agentowego podejścia do generowania sekwencji operacji w rozproszonym elastycznym systemie produkcyjnym podjęto już wcześniej, m.in. w [9,10]; zaproponowane wówczas algorytmy nie są sprzeczne z uogólnioną koncepcją wyrażoną w [2].

System sterowania dynamicznym generowaniem sekwencji montażowych może być przedstawiony jako system wieloagentowy przy następujących założeniach:

- każdy agent zarządza swoim stanem i steruje wykonywanymi przez siebie operacjami,
- każdy agent charakteryzuje się autonomicznym działaniem i wykonuje swe zadania równolegle z innymi agentami,
- agenci porozumiewają się między sobą poprzez lokalną sieć,
- agenci są uaktywniani za pomocą przesyłanej wiadomości lub sygnału pobudzenia.

W uproszczeniu agentowy system generowania sekwencji montażowej można przedstawić jak na rys.1. Wprowadzenie zamówienia na nowy produkt powoduje utworzenie zbioru potencjalnych operacji. Każda potencjalna operacja jest sterowana i reprezentowana przez własny moduł - agenta operacyjnego. Podobnie każde stanowisko montażowe jest kierowane przez własny sterownik - agenta. Agent transportowy jest odpowiedzialny za magazynowanie i przemieszczanie palet w systemie. Stara się tak dobrać stanowiska montażowe, by czas przemieszczania był jak najkrótszy. Palety są kierowane do stanowisk na żądanie ich agentów. Agent narzędziowy steruje rozmieszczeniem narzędzi, chwytaków w systemie i ich dostępnością w wymaganym miejscu i czasie. Agent programowy zarządza

wszystkimi numerycznymi programami i w razie konieczności transmituje je do stacji montażowych. Agent operatorski działa tylko w wyjątkowych sytuacjach, a jego zadaniem jest zaoferowanie obsłudze sposobu działania zapewniającego wybrnięcie z kryzysowej sytuacji. Każdy agent realizuje własne zadania zgodnie z własnymi lokalnymi kryteriami. Końcowy przydział operacji montażowej do stanowiska odbywa się na zasadach dialogu w trakcie procesu montażu.



Rys. 1 Uproszczony schemat FAS z 2 stanowiskami montażowymi
Fig. 1. Simplified scheme of FAS with 2 assembly station

3. Algorytm przydziału operacji do stanowisk montażowych

Stosowanie agentowego systemu generowania sekwencji montażowej pociąga za sobą konieczność cyfrowego opisu wyrobu oraz dynamicznego przedstawienia możliwych sekwencji montażowych.

W omawianym systemie wykorzystano relacyjny model wyrobu przeznaczonego do montażu. Jego istotą jest opis relacji pomiędzy wszystkimi częściami, ich powierzchniami styku i narzuconymi ograniczeniami. Formalnie model jest uporządkowaną piątką (X, Y, Z, R, F), w której:

$X = \{x_1, x_2, ..., x_N\}$ - oznacza zbiór symboli części w montowanym zespole;

$Y = \{y_1, y_2, ..., y_L\}$ - zbiór symboli powierzchni styku między częściami;

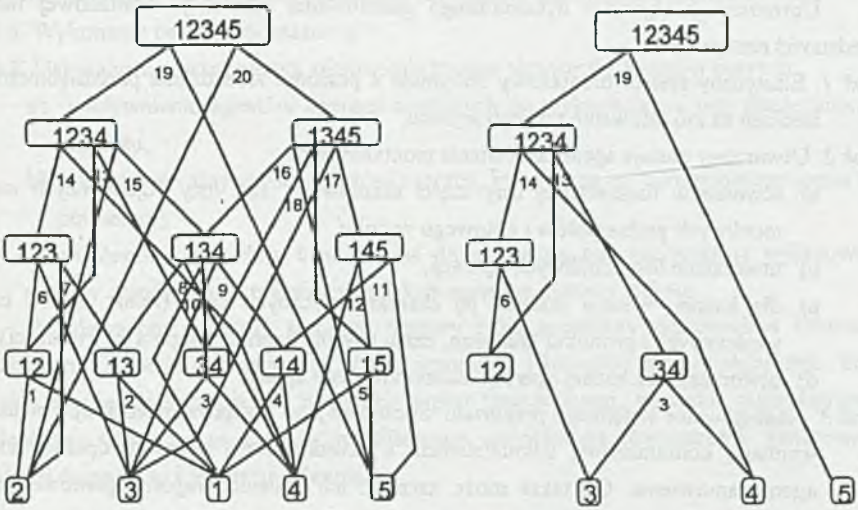
$Z = \{z_1, z_2, ..., z_S\}$ - zbiór symboli określających sposób połączeń występujących na powierzchni styku;

R - zbiór symboli odpowiadających relacjom między parami elementów z $X \cup Y \cup Z$,

F - zbiór funkcji, które przyporządkowują podzbiorom części, styków, połączeń, relacji ich charakterystyczne cechy.

Wybór najbardziej użytecznego sposobu przedstawienia możliwych sekwencji operacji jest trudny. W proponowanym podejściu testowane są dwa sposoby:

a) zaproponowany przez Homema de Mello. Potencjalne sekwencje montażowe przedstawiane sa za pomocą grafu And/Or. Mimo wady, wspomnianej już na początku niniejszej pracy, polegającej na eksplozji kombinatorycznej, sposób ten jest użyteczny. Po każdej wykonanej operacji liczba dalszych możliwych sekwencji gwałtownie spada, np. dla prostego przykładu z rys.2, jeśli przed rozpoczęciem montażu mamy do czynienia z 20 możliwymi operacjami, to po wykonaniu operacji nr 1 już tylko z pięcioma.



Rys.2. Przykład prostego grafu And/Or opisującego możliwe sekwencje montażowe
Fig.2. An example of a simple And/Or graph describing possible assembly sequences

b) zapis za pomocą logiki temporalnej ograniczeń narzuconych na sekwencje. Jest to sposób umożliwiający generowanie sekwencji w rzeczywistym procesie montażowym. Logika temporalna charakteryzuje pojęcie czasu i traktowana jest jako pewien rodzaj logiki modalnej. Posługuje się ona operatorami logiki boolowskiej oraz operatorami czasu przeszłego i przyszłego. Formuły temporalne wyrażają zarówno ograniczenia sztywne, wynikające z samej budowy montowanego wyrobu, jak i ograniczenia miękkie pozostające w gestii projektanta procesu montażowego, które mogą być zmieniane w zależności od potrzeb. Jeśli chcemy zapewnić, by jakiś stan znalazł się w generowanej sekwencji, musimy napisać kanoniczną formułę temporalną spełniającą warunek:

$$\prod_{i=1}^{n-1} \Diamond(z_i),$$

a w przeciwnym wypadku, gdy stan nie może znaleźć się w sekwencji:

$$\Box \neg \left(\sum_{i=1}^{n-1} z_i \right).$$

gdzie: z_i - to współrzędna n - wymiarowego wektora możliwych zadań,

$\Diamond$ - operator czasu przyszłego: jest możliwe, że (ewentualnie) zaistnieje...

$\Box$ - operator czasu przyszłego: jest konieczne, że (zawsze) zaistnieje...

Uproszczony algorytm dynamicznego generowania sekwencji montażowej można przedstawić następująco:

Krok 1. Elastyczny system montażowy otrzymuje z poziomu zarządzania przedsiębiorstwem zlecenie na zmontowanie nowego wyrobu,

Krok 2. Utworzony zostaje agent zamówienia montażowego:

a) utworzenie rozszerzonej listy części składowych, tzn. listy pojedynczych części, możliwych podzespołów i gotowego wyrobu,

b) utworzenie listy możliwych operacji,

c) dla każdej operacji podanie jej charakterystycznych cech (m.in.: zbioru części wejściowych i produktu finalnego, czasu trwania operacji, stopnia jej trudności),

d) utworzenie dla każdej operacji autonomicznego agenta.

Krok 3. Negocjowanie wstępnego przydziału. Sposobem jego przeprowadzenia, optymalizacją, wymianą komunikatów, uaktualnieniem i likwidowaniem agentów operacji steruje agent zamówienia. On także może narzucić lub zmienić grupom agentów operacji kryteria przydziału operacji do stanowiska. Wszyscy agenci prowadzą negocjacje równocześnie z pozostałymi.

a) agent zamówienia uaktywnia agentów stanowisk montażowych,

b) agenci stanowisk montażowych przesyłają poprzez agenta zamówienia ofertę wykonania konkretnych operacji do agentów tych operacji,

c) agent operacji sprawdza dostepność łączonych części czy podzespołów w proponowanym momencie wykonania operacji,

d) wyznaczenie przez agenta operacji wstępnego przydziału operacji do stanowiska.

Krok 4. Przydział operacji do stanowiska

a) agent stanowiska sprawdza powtórnie dostępność środków w odpowiedniej chwili i potwierdza gotowość wykonania operacji. W przypadkach kolizyjnych (np. braku narzędzia czy możliwości transportu) inicjatywę przejmuje agent zamówienia, który umożliwia wzięcie udziału w negocjacjach nie tylko pojedynczym operacjom, ale także łańcuchom już przydzielonych operacji. Może teraz nastąpić np. zmiana kryterium przydziału, mogą zostać narzucone preferencje pewnych operacji,

b) końcowy przydział operacji do stanowiska dokonywany przez agenta operacji.

Krok 5. Przygotowanie do wykonania operacji montażu

a) wysłanie żądania do agenta zasobów narzędziowych dostawy narzędzi w odpowiedniej chwili,

b) w razie awarii (braku, zniszczenia narzędzia) wysłanie żądań do agentów operatorskich,

c) brak potwierdzenia wykonania żądań operatorskich wyzwala powtórzenie kroków 3 i 4,

d) końcowe potwierdzenie obecności narzędzi na stanowiskach montażowych.

Krok 6. Wykonanie operacji montażowej

Krok 7. Uaktualnienie przez agenta zamówienia stanów aktywności agentów operacji:

a) uaktywnienie agentów operacji możliwych do wykonania na tym etapie procesu montażu,

b) zamrożenie aktywności agentów operacji, które łączą już zamontowane części lub podzespoły

Krok 8. Powtórzenie procedury krok 3-7 aż do momentu, gdy nie zostania wykreowany gotowy zespół, tzn. aktywność wszystkich agentów operacji zniknie.

Przedstawiony powyżej algorytm dotyczy tylko procedury generowania sekwencji montażowej. Operacje demontażu są w niej pominięte. Niewielkie zmiany algorytmu, które dotyczą jedynie opuszczenia, w przypadku zapisu temporalnego, warunku zapewniającego trwałość raz wykonanego zadania montażowego, umożliwiają równoczesne generowanie sekwencji demontażu i montażu. Warunek:

$$\prod_{i=1}^{n-1} \neg z_i \wedge [\neg z_i U \Box z_i]$$

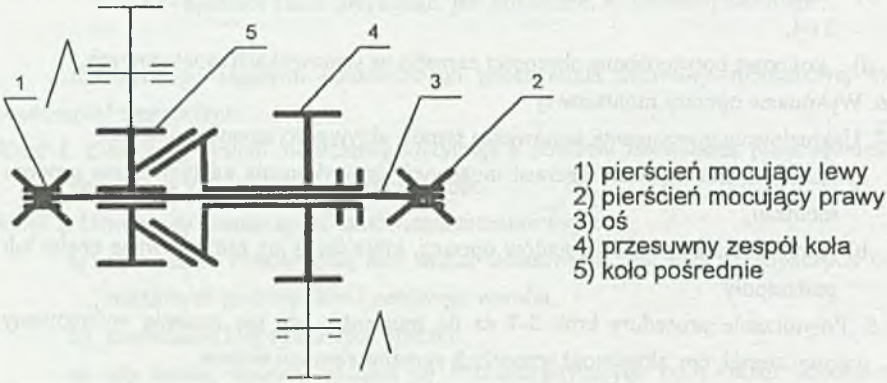
oznacza, że każde z_i jest fałszywe (nie jest wykonane), aż do chwili wykonania zadania (z_i przyjmuje wartość prawdy) i zachowuje tę wartość do końca procesu montażowego.

W przypadku korzystania z grafów And/Or w kroku 2 tworzy się zbiór możliwych operacji demontażu. Uaktywnienie agentów operacji demontażowych następuje przez agenta zamówienia, który określa cel danego procesu (np. wymiana części uprzednio już zamontowanej), przy czym ta zmiana kryterium doboru operacji: montażowych czy demontażowych może nastąpić w dowolnej chwili procesu.

4. Przykład

Prototyp agentowego systemu, w którym pominięto jeszcze operacje demontażu, zrealizowany został na przykładach posługujących się niewielkim zbiorem danych. Rozważano wyroby składające się z co najwyżej 10 części, a montowane na dwóch stanowiskach. I tak zespół kół pośrednich przedstawiony na rysunku 3 zbudowany jest z 5 elementów: osi(3), zespołu koła przesuwnego (4), koła pośredniego (5) i dwóch mocujących pierścieni (1) i (2).

Korzystając z procedury generowania wszystkich możliwych sekwencji operacji [6] lub temporalnych warunków dopuszczalności sekwencji [11], uwzględniających tylko geometryczne ograniczenia narzucone na montowany wyrób, otrzymano zbiór 20 operacji (rys.2).



Rys. 3. Fragment zespołu kół pośrednich
Fig. 3. A part of scheme of intermediate wheels unit

Czasy trwania tych operacji przyjęto umownie (tab.1), z tym że czasy te odzwierciedlają trudności wykonania operacji [1].

Tablica 1

Czasy trwania operacji montażowych

Nr op.	Czas trwania	Nr op.	Czas trwania	Nr op.	Czas trwania	Nr op.	Czas trwania
1	200	6	100	11	200	16	200
2	150	7	200	12	100	17	100
3	100	8	200	13	100	18	100
4	150	9	200	14	100	19	200
5	200	10	200	15	200	20	200

Otrzymana sekwencja montażowa: (1,6,14,19) odpowiada sekwencji uzyskanej klasycznymi metodami. Dopuszczenie naturalnej w tym przypadku równoczesności operacji na dwóch stanowiskach montażowych skraca czas do 500 jednostek, z tym że operacje 1 i 3 wykonywane są równocześnie na dwóch stanowiskach (1/3,13,19). Sekwencja zbudowana na podstawie rysunku rozstrzelonego [6] realizowana jest tylko na jednym stanowisku i trwa 600 jednostek, podobnie jak sekwencje generowane klasycznymi metodami i wykonywane na dwóch stanowiskach montażowych.

5. Uwagi końcowe

Proces przydziału operacji do stanowisk montażowych w klasycznych metodach dokonywany jest przez moduł szeregujący, który powinien znać stan całego elastycznego systemu montażowego. W artykule naszkicowano koncepcję dynamicznego agentowego generowania sekwencji montażowej. Charakterystyczną cechą tego podejścia są bieżace negocjacje między agentami w trakcie trwania samego procesu montażu. Umożliwia to ciągłą aktualizacją niezbędnych danych, wymianę informacji między agentami, a w szczególności także wymianę fragmentów kolejek operacji oczekujących na realizację między poszczególnymi stanowiskami. Istnieje także możliwość rozszerzenia zbioru operacji montażowych o operacje demontażu, co otwiera nowe możliwości zastosowań np. przy wymianie uszkodzonej części w zmontowanym już zespole. Dotychczas obowiązujący warunek nieodwracalności operacji montażowej przestaje tu więc obowiązywać.

Przeprowadzona, prosta co prawda, symulacja komputerowa potwierdza prawidłowość agentowego podejścia do generowania sekwencji operacji w FAS. Dopuszczenie równoczesności przebiegu operacji montażowych w proponowanym systemie jest tu czymś zupełnie naturalnym, a umożliwia ona znaczne skrócenie czasu wykonania zlecenia montażowego. Trzeba podkreślić, że agentowy system nie tylko umożliwia bieżące, dynamiczne wyznaczenie następnej do wykonania operacji na danym stanowisku, ale także wspomaga symulacyjne harmonogramowanie produkcji.

LITERATURA

1. Ben - Arieh D.: A methology for analysis of assembly operations' difficulty. Int. J. Prod. Res., vol. 32, no.8, 1994, pp. 1879-1895.
2. Cetnarowicz E., Cetnarowicz K., Nawarecki E.: Inteligentny Zdecentralizowany System wieloagentowy i jego zastosowanie do realizacji systemów rozproszonych. Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Elektrotechnika, t.14, Kraków 1995, s.175-184.
3. De Fazio T.L., Whitney D.E.: Simplified generation off all mechanical assembly sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, pp.640-658.
4. Delchambre A.: Computer-Aided Assembly Planning. Chapman and Hall, London, 1992.
5. Dobrowolski G., Pawlik A., Wylon M.: Agentowo zorientowane systemy alokacji zasobów. Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Elektrotechnika, t.14, Kraków 1995, s.186-191.
6. Homem de Mello L.S., Lee S.: Computer-Aided Mechanical Assembly Planning. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London 1991.
7. Korcyl A., Łebkowski P.,Sawik T.: Planowanie procesu montażu w elastycznych systemach montażowych - przegląd metad. Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Elektrotechnika, t.14, z.3, Kraków 1995, s.279-287.

8. Łebkowski P., Magiera M.: Komputerowy system generowania sekwencji montażowej dla FAS, Wyd. Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Automatyka , z.115, Gliwice 1994, s.191-200.

9. Łebkowski P.: Elastyczne systemy produkcyjne- prototyp struktury rozproszonej. Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Automatyka, t.64, Kraków 1993, s.521-540.

10. Łebkowski P.: Struktura rozproszonych układów sterowania elastycznych systemów produkcyjnych. Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Automatyka, t.59, Kraków 1991, s.219-228.

11. Łebkowski P.: Zastosowanie logiki temporalnej do opisu sekwencji montażowych Wyd. AGH, Zeszyty Naukowe, Elektrotechnika, t.14, Kraków 1995, s.302-306.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Kałuski, prof. Pol.Śl.

Wpłynęło do Redakcji do 30.06.1996 r.

Abstract

The purpose of this article is to present the conception of selecting actual route during the assembly process taking into account the production process uncertainty (including e.g. unavailability of certain tools and overfilling of the tool magazine) and current condition of the assembly position (its configuration and availability of assembly parts).

The multi-process structure of the flexible assembly system and modern equipment solutions indicate especially a class of systems defined as decentralized intelligent systems or multi-agent systems. An agent can be defined as a physical or abstract module capable of operation in itself and in its environment, as well as possessing at least a partial representation of its enviroment. It seems that this agent-like approach will allow to establish systems that perform information and decision functions that are especially distinct in production planning and control in FAS.

The control system of the dynamic generation of assembly sequences may be presented as a multi-agents system on the basis of the following assumptions:

- each agent manages its local condition and controls its operations;
- each agent is characterized by autonomous operation and performs its tasks simultaneously with other agents;
- agents communicate with each other through a local area network;
- agents are activated by messages or activation signals.

To simplify, the idea of the multi-agents system operation can be described in the following way: the introduction of a new product order to the flexible assembly system initiates creation of a potential operation set. These operations will participate in the assembly sequence generatin. Each potential operation is managed and represented by its own module, or the operation agent. Similarly, each assembly station is controlled by its own agent-controller. The agent performs its own tasks in accordance with specific local criteria. The final assignment of assembly operations to each station takes place as a result of a negotiation dialogue during the assembly process