結合優先関係グラフに基づく製品の組立順序の生成*

(第1報, 結合優先関係グラフの定義とその操作方法)

王 堅^{*1}, 大倉 和博^{*2}, 上田 完次^{*2}

Generation of Mechanical Assembly Sequences Using CPR Graph (1st Report, Definition and Usage of CPR Graph)

Jian WANG, Kazuhiro OHKURA and Kanji UEDA

We present a graph of the connection precedence relationship (CPR graph) for generating all feasible assembly sequences for a set of mechanical parts. The CPR graph is defined as a special directed graph whose nodes and edges correspond to parts or subassemblies and the relationships between them, respectively, and each edge has a label indicating the connection precedence relationship between the parts or subassemblies. Joining two parts or subassemblies corresponds to the following operation sequence in the CPR graph: deleting the two corresponding nodes and the edges between them, adding a new node corresponding to the assembled subassembly, and rewriting the labels of the other edges in the graph related to the change. Above operation sequence is called shortening operator. The central idea of the proposed method is that the process of assembling a product corresponds to the process of shortening the CPR graph of the product. Therefore, a complete assembly sequence is generated by using shortening operator repeatedly to change the CPR graph from the initial state to the goal state. Where the CPR graph of initial state consists of the nodes only corresponding to the parts whereas the CPR graph of goal state consists of only one node corresponding to the whole assembly. The major advantages of the proposed method are its simplicity and less computational complexity compared to the other related methods.

Key Words: Assembly, Process Planning, Generation of Assembly Sequences, CPR Graph, Shortening Operator

1. 緒 言

組立順序の選定は, 組立作業計画の作成において最も重要な作業であり, しかも, 完成された製品にも影響を与える。例えば, 組立作業の難易度, 組立作業における道具や取付具の必要性の有無, 部品の再加工の必要性の有無, 組立コストなどはこの製品の組立順序によって決まる⁽¹⁾。一方, 従来の設計段階で生成された組立図・部品図・部品リスト・作業指示書は, 各部品間の結合優先関係や組立順序に関する情報が明示されていない。したがって, 組立順序の選定は, 生産技術者にとっては, 重要な仕事である。しかし, 実際には, 組立順序の選定には非常な困難を伴う。その理由としては, 主に次の二点が挙げられる⁽²⁾。

(1) 一般に, 同じ製品に対する実現可能な組立順序が数多くある。また, この数は, 製品の部品の数とともに, 爆発的に増加する。

(2) 製品の構造が少し変化しても, 以前生成した

組立順序を修正して, 新たな組立順序を生成しなければならないことが多い。

組立順序の選定に当たって, 生産技術者が頭の中ですべての実現可能な組立順序を考慮して評価することはほぼ不可能である。それゆえ, 組立順序を決めるために, 製品のすべての実現可能な組立順序の生成法やその記述法を確立することが必要である。これらの傾向は, 多品種小量生産に対応するFMS(Flexible Manufacturing System)において, ますます大きくなっている。

現在まで, この問題についていろいろな研究が行われてきたが, これらは, 主に次の2種類の手法にまとめることができる⁽²⁾。

(1) 製品の組立順序を製品の分解順序の逆であると仮定し, 製品の分解順序を算出し, その逆を製品の組立順序として算出する手法。

(2) 製品の部品同士の結合の優先関係についての質疑応答を繰返ししながら, この製品のすべての実現可能な組立順序を作り出す手法。

前者の手法には, Homen De MelloとSanderson⁽³⁾⁻⁽⁶⁾によって提案されたAND/OR グラ

* 原稿受付 1995年3月20日。

^{*1} 学生員, 神戸大学学生 (〒657 神戸市灘区六甲台町)。

^{*2} 正員, 神戸大学工学部。

フを使った手法が挙げられ、後者の手法には、De Fazio と Whitney⁽⁷⁾⁽⁸⁾ によって提案された優先関係 (Precedence relationships) が挙げられる。以下ではこれら二つの手法について簡単に説明した後、本研究で提案する手法について説明する。

これらの研究では次の仮定をする。

- (1) ここで扱う機械のアセンブリは、互いに結合した部品が安定なユニットを形成する構成物である。
- (2) 各部品は剛体であり、組立の間に変形しない。
- (3) 部品の上に、一つ以上の接触面が存在すれば、これらの部品は互いに結合することができ、得られたサブアセンブリは、組立の間にずっと安定している。
- (4) 二つの部品またはサブアセンブリの結合が1回だけで行われ、いったん結合されたら、部品間のすべての接触面が接続される。
- (5) 二つのサブアセンブリを結合するとき、これらのサブアセンブリに含まれる部品がどのように接続されるかを考慮しなくてもよい。

Homen De Mello らは、製品の可能なサブアセンブリを部品までに分解する方法をすべて試みることで、AND/OR グラフを導き、すべての実現可能な組立順序を AND/OR グラフの形式で表現することを試みた。AND/OR グラフにおいて、グラフの各点はサブア

センブリまたは部品に対応している。ただし、グラフのルートは製品に対応している。また、AND 枝は組立作業のオペレータに対応し、それぞれの AND 枝が指す点は分解操作によって生成されたサブアセンブリまたは部品に対応している。例えば、図1のボールペンのすべての実現可能な組立順序を AND/OR グラフで表すと、図2に示すものになる。

De Fazio らは、製品の部品同士の結合の優先関係についての質疑応答をすることにより得られるすべての実現可能な組立順序を、組立順序図で記述する方法を提案した。組立順序図において、各点は組立状態に対応し、枝は組立行動に対応している。例えば、図3に、図1のボールペンの組立順序図を示す。この図において、いちばん上の点といちばん下の点は、それぞれ製品の組立前の状態と完成後の状態に対応し、他の点は、製品の組立途中の状態に対応している。また、図3に示す数字は図4に示す数字に対応する。

組立作業計画を AND/OR グラフまたは組立順序図で表現しておく、同じ製品をいろいろな順序で組立てる可能性が示されているので、状況に応じて最適な組立順序を選択すれば、組立システムの柔軟性が増加することになる。しかし、これら手法は単なるすべて

Fig. 1 The ball-point pen

C : Cap, Bo : Body, H : Head,
P : Pen, Bu : Button.

Fig. 2 AND/OR graph of feasible assembly sequences for the ball-point pen

Fig. 3 The assembly sequence diagram of feasible assembly sequences for the ball-point pen

Fig. 4 The connections graph of the ball-point pen

の実現可能な組立順序を簡潔に記述する方法にすぎない。1個または数個の製品だけを組立てて、しかも、この製品の部品を組立システムに投入する順序を予測できない場合では、この製品は、一般に言われる最適な組立順序で完成されることよりも、システムの稼働率を高めるために、部品の投入順序に応じて生成される組立順序で完成されることが望ましいと考えられる。このとき、この製品はある組立順序で完成されるが、これを予測することができない。これらの手法を用いて、このような問題に対処すると、まず、すべての実現可能な組立順序を記述する AND/OR グラフまたは組立順序図を生成する。次に、得られたグラフを用いて、必要な組立順序を探索する。それゆえ、たとえ一個の製品を組み立てるためにも、完全な AND/OR グラフまたは組立順序図を生成しなければならないので、AND/OR グラフまたは組立順序図を生成するための情報処理や、AND/OR グラフまたは組立順序図を記述するスペースには無駄がある。そのため、生産環境の状況(例えば、部品の投入順序)に応じて簡単に組立順序を生成する方法が必要と考えられる。

本研究では、製品の部品またはサブアセンブリ間の結合優先関係情報を簡便に記述するための特殊な有向グラフを提案する。このグラフを結合優先関係グラフ(Graph of Connection Precedence Relationship)(以下 CPR グラフという)と呼ぶ。このグラフでは、各部品またはサブアセンブリ^{**1}は点として、その間の結合優先関係をラベル付きの枝で表記している。そのため、このグラフの枝をラベルに従って順次短絡除去^{**2}することにより製品の組立順序が生成することができる。本手法では、本来局所的である各部品またはサブアセンブリにおける結合優先関係を枝のラベルとして持たせているため、それらを陽に示すことができる。これによるメリットは大きく、部品の投入順序に応じて製品の組立順序を生成したり、組立の途中で発生する異常をただちに発見することが簡単にできるようになる。

本論文は次のように構成される。2章で、CPR グラフの生成を説明する。3章で、CPR グラフに基づき、製品の組立順序を生成する方法を説明する。4章で、この手法の特徴を考察し、従来の手法⁽³⁾⁽⁷⁾と比較する。5章で、本研究の結果をまとめる。

^{**1} 厳密にいうと、製品の組立開始前の状態における CPR グラフの点は部品だけに対応し、組立途中の状態における CPR グラフの点は部品またはサブアセンブリに対応し、完成状態における CPR グラフの点(一つしかない)は完成した製品に対応する。

^{**2} CPR グラフの短絡除去について、3章で述べる。

2. CPR グラフの生成

2.1 CPR グラフの記述 CPR グラフは、部品またはサブアセンブリ間の接続関係および結合優先関係を表す特殊な有向グラフである。具体的に、ある組立状態において、製品のある二つの部品またはサブアセンブリ間に接触する面が一つ以上存在すれば、この状態の CPR グラフにおいて、これらを表す二つの点是一对の反対方向の有向の枝でつながることとする。また、枝のラベルは部品間結合優先関係を表すことにする。ここで、CPR グラフを次のように定義する。

定義1 ある組立状態における製品 P の CPR グラフ G は次に示すようになる。

$$G = \langle V_G, E_G, (edg_{ac})_{a \in A} \rangle \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_G = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$E_G = \{(e_{ij}, e_{ji}) \mid \text{Connection}(p_i, p_j) \wedge (i > j)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$edg_{ac}(e_{ij}, v_i, v_j) = lab_{ac}(e_{ij}) \wedge edg_c(e_{ij}, v_i, v_j) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P_n = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$H(v_i) = p_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A = \{Vtype 1, Vtype 2, Vtype 3\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(1)、(2)、(3)において、 V_G と E_G は、その組立状態のグラフにおいてそれぞれ点の集合と有向枝の集合である。 $(edg_{ac})_{a \in A}$ は枝のラベルの集合である。 A は枝のラベルのタイプの集合である。また、

$$\text{Connection}(p_i, p_j) = \begin{cases} \text{true, if there is at least one surface in} \\ \text{contact between } p_i \text{ and } p_j; \\ (p_i \cap p_j = \phi) \\ \text{false, otherwise.} \end{cases}$$

式(4)において、 $lab_{ac}(e_{ij})$ は e_{ij} は a でラベル付けされた枝であることを示し、 $edg_c(e_{ij}, v_i, v_j)$ は e_{ij} は始点 v_i から終点 v_j へ向かう有向枝であることを示す。

式(5)において、 P_n はその組立状態における製品 P の部品またはサブアセンブリの集合である。

式(6)において、 H は集合 V_G から集合 P_n への写

Fig. 5 The CPR graph of the ball-point pen

像である。ここで、写像 H が全単射である。

式(7)において、CPRグラフの枝のラベルVtype 1, Vtype 2と Vtype 3は結合優先関係のタイプを示し、その定義を2・2節で説明する。

図5に、図1のボールペンの組立開始前の状態を記述するCPRグラフを示す。

2・2 結合優先関係の記述 まず、簡単のために、グラフの枝の名称および記号を次のように規定する。

CPRグラフ G において、点 v_i と点 $v_j (i \neq j)$ の間に、一対の反対方向の有向枝 e_{ij} と e_{ji} が存在する。枝 e_{ij} , 枝 e_{ji} を V 枝と呼ぶ。枝 e_{ij} と枝 e_{ji} からなる枝 ($e_{ij} \& e_{ji}$) を、G 枝と呼ぶ。この G 枝が無向枝である。

a, b は部品またはサブアセンブリを表す記号とする。 P_{ab} は a の b に対する結合の優先度(Priority)を示す記号である**3。 C_{ab} は a と b との結合(Connection)を示す記号である**4。 S_{ab} は CPR グラフにおいて、 a と b に対応する二つの点間の枝の短絡除去(Shorten)を示す記号である**5。

次に部品の結合優先関係の記述の方法について説明する。ある製品は部品 a, b, c からなり、部品 a はそれぞれ部品 b, c と接続する。部品 a に対して、 C_{ac} が

Fig. 6 An assembly and its CPR graph

Fig. 7 An assembly and its CPR graph

**3 P_{ab} と P_{ba} の意味は違う。例えば、 P_{ab} は a の b に対する結合優先関係を記述するが、 P_{ba} はその逆である。

**4 C_{ab} と C_{ba} の意味は同じである。

**5 S_{ab} と S_{ba} の意味は同じである。

C_{ab} より先に実行されてはいけない場合、部品 a の結合優先関係を、式 $P_{ab} > P_{ac}$ で記述することにする。記号“ $>$ ”は、“優先”の意味を示す。一方、部品 a に対して、 $P_{ab} > P_{ac}$ または $P_{ac} > P_{ab}$ のような式で記述する結合優先関係が存在しなければ、部品 a の結合優先関係を、式 $P_{ab} = P_{ac}$ で記述することにする。また、 $P_{il} > P_{ij}, P_{im} > P_{ij}, \dots$ をまとめて、 $P_{il} \wedge P_{im} \wedge \dots > P_{ij}$ と書くことにする。

定義2 ある部品 I の結合優先関係が、

$$P_{ij} = P_{ik} = P_{il} = \dots, \dots \dots \dots (8)$$

である場合、 $P_{ij}, P_{ik}, P_{il}, \dots$ は、TYPE 1 の優先度であると定める。また、CPR グラフにおいて、枝 $e_{ij}, e_{ik}, e_{il}, \dots$ は、Vtype 1 の枝という。

定義3 ある部品 I が部品 J だけに接続する場合、 P_{ij} は TYPE 1 の優先度であると定める。

CPR グラフにおいて、Vtype 1 の枝を、太い実線で表すことにする。例えば、図6にアセンブリとそのCPR グラフを示す。

定義4 ある部品 I の結合優先関係が、

$$P_{ij} > P_{ik} > P_{il} > \dots, \dots \dots \dots (9)$$

である場合、 $P_{ik}, P_{il}, \dots$ は、TYPE 2 の優先度であると定める。また、CPR グラフにおいて、枝 $e_{ik}, e_{il}, \dots$ は、Vtype 2 の枝という。ここで、 P_{ij} は TYPE 1 の優先度である。

CPR グラフにおいて、Vtype 2 の枝を、細い実線で表すことにする。例えば、図7にアセンブリとそのCPR グラフを示す。

定義5 ある部品 I の結合優先関係が、

$$C_{ab} \wedge C_{cd} \wedge \dots \rightarrow P_{ij} > P_{ik} > P_{il} > \dots, \dots \dots \dots (10)$$

である場合、前提条件を満足しないとき、式 $P_{ij} > P_{ik} > P_{il} > \dots$ を無視し、 $P_{ij}, P_{ik}, P_{il}, \dots$ は TYPE 1 の優先度である。一方、前提条件を満足するとき、式 $P_{ij} > P_{ik} >$

Fig. 8 An assembly and its CPR graph

$P_{il} > \dots$ に基づき, $P_{ij}, P_{ik}, P_{il}, \dots$, は決定される.

例えば, 図8に示す部品Aの結合優先関係は, 式 $C_{BC} \rightarrow P_{AD} > P_{AB}$ および $C_{CD} \rightarrow P_{AB} > P_{AD}$ と表されている.

図8に示す部品Bの結合優先関係は次の式

$$C_{BA} \rightarrow P_{BD} > P_{BC}$$

$$C_{BC} \rightarrow P_{BD} > P_{BA}$$

$$C_{BD} \rightarrow P_{BA} = P_{BC}$$

$$\sim(C_{BA} \vee C_{BC} \vee C_{BD}) \rightarrow P_{BA} = P_{BC} = P_{BD}$$

と表されている. 上の部品Bの結合優先関係は, 式 $P_{BD} > P_{BA \wedge BC}$ で簡潔に表現することにする.

定義6 ある部品Iの結合優先関係が,

$$P_{il} \wedge P_{im} \wedge \dots > P_{ij \wedge ik} \dots \dots \dots (11)$$

である場合, P_{ij} と P_{ik} は, TYPE 3の優先度であると定める. また, CPRグラフにおいて, 枝 e_{ij} と e_{ik} は, Vtype 3の枝という. ここで, $P_{il}, P_{im}, \dots$, は, TYPE 1の優先度である.

CPRグラフにおいて, Vtype 3の枝を破線で表すことにする. 例えば, 図8にアセンブリとそのCPRグラフを示す.

定義7 ある部品Iの結合優先関係が,

$$C_{ab} \wedge C_{cd} \wedge \dots \rightarrow$$

$$P_{il} \wedge P_{im} \wedge \dots > P_{ij \wedge ik} \dots \dots \dots (12)$$

である場合, 前提条件を満足しないとき, 式 $P_{il} \wedge P_{im} \wedge \dots > P_{ij \wedge ik}$ を無視し, $P_{ij}, P_{ik}, P_{il}, P_{im}, \dots$, はTYPE 1の優先度である. 一方, 前提条件を満足するとき, 式 $P_{il} \wedge P_{im} \wedge \dots > P_{ij \wedge ik}$ に基づき, $P_{ij}, P_{ik}, P_{il}, P_{im}, \dots$, は決定される.

例えば, 図9に示す部品Bの結合優先関係は式 $C_{CD} \wedge C_{DE} \rightarrow P_{BF} > P_{BA \wedge BC}$ および $C_{DF} \vee C_{EF} \rightarrow P_{BC} > P_{BF}$ と表されている.

2・3 CPRグラフのG枝の分類 以上のV枝の分類に基づいて, CPRグラフのG枝を, 表1に示すように分類する. すなわち, G枝(Vtype 1 & Vtype 1),

(Vtype 1 & Vtype 3), (Vtype 3 & Vtype 3)を, Gtype 1の枝とし, G枝(Vtype 1 & Vtype 2), (Vtype 2 & Vtype 2), (Vtype 2 & Vtype 3)を, Gtype 2の枝と定める.

ある組立状態における製品のCPRグラフにおいて, ある二つの点の間の枝がGtype 2の枝であれば, この状態において, 対応する二つの部品またはサブアセンブリを結合することができない. 例えば, 図5のボールペンの組立開始前状態のCPRグラフにおいて, 表1の分類により, BodyとCapとの間のG枝はGtype 2の枝であるが, 実際にこの組立状態において, BodyとCapとの結合を実行してはならない.

2・4 CPRグラフの生成 ある部品の結合優先関係が, 複数の式によって記述される場合がある. この場合, 次の規則に従って, 枝の種類が決定される.

規則 CPRグラフにおいて, あるV枝が記述式によって, それぞれ複数種の枝である可能性のある場合には, この枝の種類が, Vtype 2, Vtype 3, Vtype 1の優先順位に決定される.

ボールペンの組立開始前状態において, 各部品の結合優先関係を次の式

C:

$$B_O: P_{BoH} > P_{BoC} \dots \dots \dots (13)$$

$$P_{BoP} > P_{BoH \wedge BoBu} \dots \dots \dots (14)$$

$$H: C_{BuP} \rightarrow P_{HBo} > P_{HP} \dots \dots \dots (15)$$

$$C_{BuBo} \rightarrow P_{HP} > P_{HBo} \dots \dots \dots (16)$$

$$P: P_{PBo} > P_{PH \wedge PBu} \dots \dots \dots (17)$$

$$Bu: C_{HP} \rightarrow P_{BuBo} > P_{BuP} \dots \dots \dots (18)$$

$$C_{HBo} \rightarrow P_{BuP} > P_{BuBo} \dots \dots \dots (19)$$

で記述することができる. Bodyの結合優先関係は式(13)と(14)で記述される. 枝 e_{BoH} の種類は, 記述式(13)と(14)によって, それぞれVtype 1, Vtype 3であるが, 規則に従って, CPRグラフにおいて, この枝の種類がVtype 3に決定される.

初期状態のCPRグラフを生成するために, 各部品間の接続関係および結合優先関係に関する情報を必要とする. 具体的に, ある部品aを対象とする場合, この部品aと接続する部品の名前および部品aの結合優先関係記述式を入力とする. 例えば, ボールペンのBodyの場合では, Bodyと接続する部品の名前: Cap, Head, Pen, Buttonを入力し, また, Bodyの結合優先関係記述式(13)と(14)を入力する. このように, 図5に示したボールペンのCPRグラフができあがる.

Table 1 The classification of the Gtype edges in the CPR graph

Gtype1	Gtype2
(Vtype1&Vtype1) (Vtype1&Vtype3) (Vtype3&Vtype3)	(Vtype1&Vtype2) (Vtype2&Vtype2) (Vtype3&Vtype2)

Fig. 9 An assembly

3. CPR グラフに基づく製品の組立順序の生成方法

本研究において、CPR グラフの G 枝を順次短絡除去していくことによって、製品の組立の順序を逐次的に生成していく。この方法を説明する前に、いくつかの基礎概念について簡単に説明する。

3・1 基礎概念 ある枝 e を短絡除去するとは、 e の始点と終点とを重ねて一つの点としてその枝 e を消去してしまうことに等しい。枝の短絡除去によって得られるグラフを縮約グラフと呼ぶ⁽⁹⁾。CPR グラフの枝が短絡除去される前の状態を初期状態といい、CPR グラフの枝がすべて短絡除去された状態を目標状態という。オペレータはある状態記述を別の状態記述に変換する処理であると定義する。オペレータの入力となる状態は、一定の条件を満足しなければならない。この条件のことを前提条件と呼ぶ⁽¹⁰⁾。

3・2 CPR グラフの短絡除去による製品の組立順序の生成 短絡除去により CPR グラフを初期状態から目標状態に遷移していくプロセスは、部品を組立てて製品を完成していくプロセスに相当する。具体的には、CPR グラフの遷移プロセスと製品の組立プロセスとの対応関係は、表2のようになる。この表において、ある製品の CPR グラフを初期状態から目標状態に遷移していくことにより、得られる短絡除去の順序は、この製品の組立順序とする。ここで、CPR グラフを初期状態から目標状態に遷移していくためのオペレータに短絡除去を使う。これを使うにあたって、以下の前提条件を満足する必要がある。

Table 2 The correspondence relationships between the assembling process of a product and the shortening process of the product's CPR graph

CPR-Graph	Product
Initial state of CPR-Graph	⇔ Unassembled state
Goal state of CPR-Graph	⇔ Assembled state
Shortening of CPR-Graph	⇔ Joining of parts or subassemblies
Shortening sequence	⇔ Assembly sequence

Table 3 The changing operations of the shortening operator in the CPR graph

Connection relations representation	Precedence relations representation
Delete1(v_i, v_j, e_{ij}, e_{ji})	Delete2($P_{ij}, P_{ji}, C_{ij}, C_{ji}$)
Add(v_{ij})	_____
Rewrite($i, j \rightarrow ij$)	

前提条件：短絡除去する G 枝の種類は Gtype 1 でなければならない。

製品の組立順序の生成にあたって、まず、オペレータの処理によって製品の初期状態の CPR グラフの G type 1 の枝を一つ短絡除去し、初期状態の CPR グラフを縮約グラフに変換する。次に、同じような処理によって、この縮約グラフをその次の縮約グラフに変換する。このように繰返し、新たな縮約グラフが逐次的に生成されて、CPR グラフが初期状態から目標状態に遷移していく。得られた製品の CPR グラフの短絡除去の順序は、この製品の組立順序である。

3・3 オペレータによる CPR グラフの短絡除去手続き CPR グラフの記述は、製品の部品またはサブアセンブリ間の接続関係の記述および結合優先関係の記述からなる。ある CPR グラフを縮約グラフに変換するにあたって、表3に示すように、オペレータはこの CPR グラフに対して、削除、追加、書き換えの変換処理を行う。2章で設けた定義と規則に基づき、処理の結果から、変換後の CPR グラフが生成される。次に、具体的にオペレータの処理について説明する。

まず、オペレータが CPR グラフの持続関係記述に対する変換処理について説明する。

ある状態の CPR グラフにおいて、点 v_i と点 v_j との間の G 枝 (e_{ij} & e_{ji}) が Gtype 1 の枝であれば、この G 枝を短絡除去することにする。

オペレータは、まず、 v_i, v_j, e_{ij}, e_{ji} を削除し、組立てたサブアセンブリに対応する点 v_{ij} ^{**6} を追加する。次に、他の V 枝の記号の中の i, j を、 ij に書き換える。例えば、 e_{ia}, e_{bj} を、それぞれに $e_{(ij)a}, e_{b(ij)}$ に書き換える。また、変換前に、点 v_k と点 v_i かつ点 v_k と点 v_j の間に、それぞれ一つの G 枝が存在するとすれば、書き換えにより、点 v_k と点 v_{ij} との間に、G 枝 ($e_{(ij)k}$ & $e_{k(ij)}$) が二つ得られるが、定義1により、CPR グラフの点の間には一つの G 枝しか存在しないので、これら二つの G 枝 ($e_{(ij)k}$ & $e_{k(ij)}$) から一つを削除する。

次に、オペレータが CPR グラフの結合優先関係記述に対する変換処理について説明する。

オペレータは、まず、変換前の各点の結合優先関係記述式から、 $P_{ij}, P_{ji}, C_{ij}, C_{ji}$ を削除する。次に、式の中の i, j を、 ij に書き換える。例えば、 P_{ik}, C_{ji} を、それぞれ $P_{(ij)k}, C_{(ij)l}$ に書き換える。

以上の処理により、変換後の CPR グラフが得られる。なお、結合優先関係記述式を書き換えることにより、矛盾を含む式を生じることがある。この場合では、

^{**6} $v_{ij} = v_i \cup v_j$

矛盾の部分を削除することにする。例えば, S_{ij} により, 次の式

$$P_{ai} > P_{aj} > P_{ak} \Rightarrow P_{a(ij)} > P_{a(ij)} > P_{ak} \dots\dots\dots (20)$$

$$P_{bi} > P_{bj} \wedge b_k \Rightarrow P_{b(ij)} > P_{b(ij) \wedge b_k} \dots\dots\dots (21)$$

$$C_{ik} \rightarrow P_{cj} > P_{ck} \Rightarrow C_{(ij)k} \rightarrow P_{c(ij)} > P_{ck} \dots\dots\dots (22)$$

が得られる。式(20)と(21)の場合, 書き換えた式は, それぞれ式 $P_{a(ij)} > P_{ak}$ と $P_{b(ij)} = P_{bk}$ となる。式(22)の場合, 書き換えた式を削除する。

3・4 ケース・スタディ 本方法で, 図1のボールペンの組立順序を生成する。

図10(a)に, 初期状態でのボールペンの各部品の結合優先関係記述式と CPR グラフを示す。部品が, Cap, Body, Head, Button, Pen の順に組立システムに到着する。以下部品の到着順に短絡除去を行う。

S_{BoH} を行うと, CPR グラフの接続関係の記述に対して, 点 Bo, 点 H, 枝 e_{BoH} , 枝 e_{HBo} を削除し, 組立てたサブアセンブリに対応する点 BoH を追加し, ほかの枝の記号の中の Bo, H を BoH に書き換える。一方, CPR グラフの結合優先関係の記述に対して, 図10(a)に示す式から P_{BoH} , P_{HBo} , C_{BoH} , C_{HBo} を削除し, 式の中の Bo, H を BoH に書き換える。よって, 図10(b)に示す変換後の式および CPR グラフが得られる。 $S_{C(BoH)}$ を行うと, 同じ方法で, 図10(c)に示す変

換後の点および CPR グラフが得られる。 $S_{(CBoH)P}$ を行うと, 同じ方法で, 図10(d)に示す変換後の CPR グラフが得られる。 $S_{(CBoHP)Bu}$ を行うと, 目標状態の CPR グラフが得られる。

以上の CPR グラフの短絡除去処理の結果により, 部品の到着の順序に応じて, ボールペンの組立順序 C_{BoH} , $C_{C(BoH)}$, $C_{(CBoH)P}$, $C_{(CBoHP)Bu}$ が得られた。

4. 考 察

Homen de Mello らの AND/OR グラフの手法と De Fazio らの優先関係の手法の場合では, まず, すべての実現可能な組立順序を記述する AND/OR グラフまたは組立順序図を生成する必要がある。得られたグラフを用いて, 必要な組立順序を探索する。それゆえ, たとえ1個の製品を組立てるためにも, 完全な AND/OR グラフまたは組立順序図を生成しなければならない。一方, 本手法の場合では, 製品の初期状態の CPR グラフを用いて, 必要な組立順序を探索する。CPR グラフは AND/OR グラフまたは組立順序図と違って, ある組立状態における製品の部品またはサブアセンブリ間の結合優先関係を記述する。また, 初期状態の

Table 4 Storage requirements for 11-parts assembly from industry

	AND/OR graph	Assembly sequence diagram	CPR-Graph
Nodes	75	61	11
Edges	221	121	36

Fig. 10 A process of shortening the CPR graph of the ball-point pen from the initial state to the goal state

Fig. 11 Eleven parts assembly from industry

*** このアセンブリは De Fazio らの論文^[7]の中の一つの例である。

CPR グラフから目標状態までの各組立途中状態の CPR グラフを逐次的に生成することができる。そのため、初期状態の CPR グラフに基づき、部品の投入順序に応じて製品の組立順序を簡単に生成することができる。本手法を用いて、超多品種少量生産に対処すると、従来の手法⁽³⁾⁽⁷⁾に比べて、組立順序を生成するための情報処理やこの情報を記述するスペースは少ない。例えば、表4に、図11に示すアセンブリ**7の AND/OR グラフ、組立順序図と CPR グラフの点の数と枝の数を示す。

本手法は組立の途中で発生する異常をただちに発見することができる。例えば、なんらかのきっかけで、機械が本来接続関係のない部品を結合したり、先に結合してはいけない部品を結合したりする場合、この手法がこれらの異常を認識できる。前者の場合、結合した部品を表す点の間の G 枝が存在しなければ、異常の発生とする。後者の場合、結合した部品を表す点の間の G 枝が Gtype 2 の枝であれば、異常の発生とする。また、異常の発生の場所がわかれば、既に完成したサブアセンブリを全部分解しなくても、発生した異常を除去できる。

5. 結 論

本論文では、製品の部品またはサブアセンブリ間の結合優先関係情報を記述する CPR グラフを提案し、そのグラフの短絡除去によって製品の組立順序を生成する方法を示した。超多品種少量生産の場合では、本手法は De Fazio らの優先関係の手法または Homen de Mello らの AND/OR グラフ手法よりも簡便であることを主張した。また、組立順序の生成をボールペ

ン組立例を通して説明した。

次報においては、このアルゴリズムの適切さ (Correctness) と完全さ (Completeness) を証明する。

文 献

- (1) 長田 正, [組立作業手順計画], 日本ロボット学会誌, **11**-2 (1993), 8-14.
- (2) Homen de Mello, L. S. and Sanderson, A. C., "Representations of mechanical assembly sequences", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **7**-2 (1991), 211-227.
- (3) Homen de Mello, L. S. and Sanderson, A. C., "And/or graph representation of assembly sequences", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **6**-2 (1990), 188-199.
- (4) Homen de Mello, L. S. and Sanderson, A. C., "A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **7**-2 (1991), 228-240.
- (5) Homen de Mello, L. S. and Sanderson, A. C., "Two Criteria for the Selection of Assembly Plans: Maximizing the Flexibility of Sequencing the Assembly Tasks and Minimizing the Assembly Time Through Parallel Execution of Assembly Sequences", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **7**-5 (1991), 626-633.
- (6) Sanderson, A. C., Homen de Mello, L. S. and Zhang, H., "Assembly sequence planning", *Artificial Intelligence Magazine*, **11**-1 (1990), 62-81.
- (7) De Fazio, T. L. and Whitney, D. E., "Simplified generation of all mechanical assembly sequences", *IEEE J. Robotics Automat.*, RA-3-6 (1987), 640-658; also, *Corrections*, RA-4-6 (1988), 705-708.
- (8) Baldwin, D. F., Abell, T. E., Lui, M. C. M., De Fazio, T. L. and Whitney, D. E., "An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **7**-1 (1991), 78-94.
- (9) 高橋啓郎・藤重 悟, 離散数学, (17), (1981), 101-103, 岩波書店.
- (10) 白井良明・辻井潤一, 人工知能, (22), (1982), 9, 14, 岩波書店.