

部品連立分解式による組立図からの組立手順の自動生成法

田中 雅次 岩間 憲三

財団法人 京都高度技術研究所

CADで描かれた製品の組立図より、部品の組立手順を自動生成する方法は、これまで多く研究されているが、これらの手法は個々の問題に対する限定的な理論に基づくため一般性に乏しく、種々の問題が絡み合うような組立への適用は困難と考えられ、従って実用的なシステムの実現には問題がある。

本論文では、非線形性や非単調性、非コヒーレンス性など組立上の種々の問題に適用可能な一般的なアルゴリズムを紹介する。その基本概念は、製品を構成する2つの部品間の拘束関係の製品全体に対する重ね合わせであり、ここでは幾何学的拘束関係の連立式をベースに各部品の組み立てる方向と組立順序を導き出す。

GENERATING OF ASSEMBLY SEQUENCES FROM ASSEMBLY DRAWINGS
BY PART DISASSEMBLY EQUATIONS

Masaji Tanaka Kenzo Iwama

A S T E M R I

Advanced Software Technology & Mechatronics Research Institute of KYOTO

Kyoto Research Park, 17 Chudoji Minami-machi, Shimogyo, Kyoto 600 JAPAN

Much research has been conducted on generating assembly sequences from assembly drawings on CAD systems. However, methods proposed previously have difficulties in generating assembly sequences when assemblies include complex cases, and have limitations of being applied to general cases.

This paper describes an algorithm that generates assembly sequences of assemblies that include nonlinear, nonmonotonic, noncoherent assemblies.

A point of the algorithm is to make conjunctions of directions of parts along which the parts could move with respect to other parts, and to establish a set of equations of the geometric relationships in order to calculate the conjunctions.

1. はじめに

CADで描かれた製品の組立図より、部品の組立手順を自動生成する方法は、これまで多く研究されて来た。その主要な方法は部品間の拘束関係のグラフ化によるものであり、代表的には、De FazioとWhitney[1]のliaison図やHomen De MelloとSanderson[2]のAND/ORグラフの適用などが挙げられる。一方、Wolter[3]は、組立作業の性質の分類を行っているが、中でも組立が困難であっても実際問題として多く存在するような例を次に3つ示す。

- ・線形性(linearity): 部品を一個ずつ組み立てられるような性質を意味し、図1のように部分としての組立を要する組立は線形性を持っていない。
- ・単調性(monotonicity): 1つの動作で各部品が最終位置に組み立てられるような性質を意味し、図2の組立図のように1つの動作で最終位置に組み立てられない部品Cがある組立は単調性を持っていない。
- ・コヒーレンス性(coherency): 2つの結合されていない部品に、ある部品を同時に組み立てることがない性質を意味し、図4の組立図のようにBとCを同時にAに組み立てなければならないような組立はコヒーレンス性を持っていない。

Wolter自身は、非線形性について幾何学的拘束関係による解法を示しており、また非単調性については、2つの部品間の動作ステップの生成としてHoffman[4]などが行っている。ところが、これらの手法は個々の問題に対する限定的な理論に基づくため一般性に乏しく、多くの性質が絡み合うような組立への適用は困難と考えられ、従って実用的なシステムの実現には問題がある。

本論文では、非線形性や非単調性、非コヒーレンス性など種々の性質を持つ組立に適用出来る、一般的なアルゴリズムを紹介する。その基本概念は、製品を構成する2つの部品間の拘束関係の製品全体に対する重ね合わせであり、ここでは幾何学的拘束関係の連立式をベースに各部品の組み立てる方向と組立順序を導き出す。

以下、§2では、本手法の基本概念を示し、§3では、その応用例を示す。なお文中の例題は、CADに描かれた2次元(x - y 座標系)の各部品のワイヤフレームモデルからなる組立図とする。

2. 本手法の基本概念

2. 1 分解式

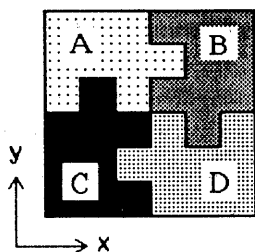


図1 例題1

図1の例題1は、部品A、B、C、Dからなる製品の組立図である。例えば、Aが分解出来るかどうかは、他の部品B、C、Dとの幾何学的な拘束関係より判断される。そこで、AよりB、C、D各々に対して分解出来るかどうかのメッセージを送り、これらの回答よりAの分解可能性を調べるようにする。

例えば、AからBへメッセージを送れば、AとBの幾何学的拘束関係より、Bに対してAは x の負方向にのみ動かすことが出来るという回答をBから得られる。この関係を次式で表す。

$$B \rightarrow A = 180^\circ.$$

この式を、Bに対するAの分解式とする。式の矢印は、BからAを分解するという意味であり、 180° はx軸方向を 0° 方向としたときの分解する方向である。この方向を分解方向とする。逆に、BからAにメッセージを送るとすれば、先述のメッセージの逆のメッセージとなるので、次式が得られる。

$$A \rightarrow B = 0^\circ.$$

全ての部品の分解可能性を調べるためには、4つの部品から2つの部品を取り出す全6通りの部品間のメッセージパッシングを行えばよい。これらを表1に示す。なお、右側の分解式は、左側の分解式に各々 180° を加えれば得られる。また、分解式中の θ は分解方向の範囲を示す。

表1 例題1の分解式

$A \rightarrow B = 0^\circ$	$+180^\circ \rightarrow$	$B \rightarrow A = 180^\circ$
$A \rightarrow C = 270^\circ$		$C \rightarrow A = 90^\circ$
$A \rightarrow D = -180^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$		$D \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$
$B \rightarrow C = 90^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$		$C \rightarrow B = -90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$
$B \rightarrow D = 270^\circ$		$D \rightarrow B = 90^\circ$
$C \rightarrow D = 0^\circ$		$D \rightarrow C = 180^\circ$

例えば、DはAに対して 90° 方向へ動かすことは出来るが、その範囲はAより限定され、分解するには新たな動作ステップを必要とする。この処理については、後の例題2, 3で詳しく述べる。

2. 2 分解式と障害物

Aの分解可能性は、表1の $B \rightarrow A = 180^\circ$ 、 $C \rightarrow A = 90^\circ$ 、 $D \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ の3つの分解式を連立させることで明らかとなる。例えば、 $B \rightarrow A = 180^\circ$ よりAを 180° 方向に分解しようとする、 $C \rightarrow A = 90^\circ$ よりCが障害物となる。Dは、 $D \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ より 180° を含むので障害物とならない。結論として、この3つの分解方向に共通する方向は無いので、Aは単独では分解出来ないことが分かる。表2は、表1の各分解式にその分解方向での障害物を書き加えたものである。

表2 分解式と障害物

障害物		障害物	
$A \rightarrow B = 0^\circ$	D	$B \rightarrow A = 180^\circ$	C
$A \rightarrow C = 270^\circ$	D	$C \rightarrow A = 90^\circ$	B
$A \rightarrow D = -180^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	*1	$D \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$	*3
$B \rightarrow C = 90^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	*2	$C \rightarrow B = -90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	*4

$B \rightarrow D = 270^\circ$	C	$D \rightarrow B = 90^\circ$	A
$C \rightarrow D = 0^\circ$	B	$D \rightarrow C = 180^\circ$	A

- *1: $B(0^\circ)$, $C(270^\circ)$, $\{B, C\}$ ($-180^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ただし, 0° と 270° を除く.)
 *2: $A(180^\circ)$, $D(270^\circ)$, $\{A, D\}$ ($90^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ただし, 180° と 270° を除く.)
 *3: $B(90^\circ)$, $C(180^\circ)$, $\{B, C\}$ ($0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ ただし, 90° と 180° を除く.)
 *4: $D(0^\circ)$, $A(90^\circ)$, $\{A, D\}$ ($-90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ただし, 0° と 90° を除く.)

表2より各部品について, 他の部品からの分解方向と障害物を次のような集合として表す. これらを各部品の分解方向集合とする.

$$\begin{aligned} A_d &= \{90^\circ(B), 180^\circ(C), 0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ (\text{except } 90^\circ, 180^\circ)(B, C)\}. \\ B_d &= \{0^\circ(D), 90^\circ(A), -90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ (\text{except } 0^\circ, 90^\circ)(D, A)\}. \\ C_d &= \{180^\circ(A), 270^\circ(D), 90^\circ \leq \theta \leq 360^\circ (\text{except } 180^\circ, 270^\circ)(A, D)\}. \\ D_d &= \{0^\circ(B), 270^\circ(C), -180^\circ \leq \theta \leq 90^\circ (\text{except } 0^\circ, 270^\circ)(B, C)\}. \end{aligned}$$

2. 3 部分としての分解

各分解方向集合より, 全部品は単独では分解出来ないことが容易に分かる. そこで次に, いくつかの部品を組み合わせた部分としての分解を考える. 部分としての分解方向は, 部品の分解方向に含まれる. 個々の部品の分解方向を集めると次のような集合となる. これを全分解方向集合とする.

$$\begin{aligned} \text{Dir} = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 0^\circ < \theta < 90^\circ, 90^\circ < \theta < 180^\circ, \\ 180^\circ < \theta < 270^\circ, 270^\circ < \theta < 360^\circ\}. \end{aligned}$$

Dirの各要素について, 部分としての分解可能性を調べる. その方法を 0° 方向を例に説明する. 各部品の分解方向集合より, 0° 方向の要素を取り出し, 部品(障害物)という形式で次のように表す. これを, 0° 方向での分解部品集合とする.

$$\text{Part}(0^\circ) = \{A(B, C), B(D), C(A, D), D(B)\}.$$

A, B, C, Dを1つの部分: ABCDとすると, 部分としての分解はこれを2つの部分に分解することである. ここで, Aを分解出来ないように固定すると, $C(A)$ よりCがAに拘束されて分解出来なくなる. Cに拘束される部品は無いので, BとDは部分として分解可能となる. ここでACを固定部分, BDを分解部分とする.

このように部分としての分解を行うときは, 始めに任意の部品(あるいは組立の基準となる部品)を固定し, 各分解方向において分解部分が出来るかどうかを調べるようにする.

同様にして, 90° 方向ではABが, 180° 方向ではACが, 270° 方向ではCDが, それぞれ分解出来ることが分かる. また, それ以外の方向では部分としての分解可能性も否定されることが同様にして分かる.

2. 4 組立手順の生成

BDの分解後(組立図においては、ACとBDを干渉しないよう十分引き離れた状態)の分解式と障害物、及び各部品の分解方向集合を表3に示す。(障害物が無い場合は“◎”と表す.)

表3 BD分解後の分解式と障害物		(分解方向集合)	
障害物		障害物	
$A \rightarrow C = 270^\circ$	◎	$C \rightarrow A = 90^\circ$	◎
$B \rightarrow D = 270^\circ$	◎	$D \rightarrow B = 90^\circ$	◎
		$Ad = \{90^\circ\}, Bd = \{90^\circ\},$ $Cd = \{270^\circ\}, Dd = \{270^\circ\}.$	

各分解方向集合より、AとBは 90° 方向へ、CとDは 270° 方向へそれぞれ分解出来る事が分かる。他の部分としての分解方向: $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ についても同様にして個々の部品に分解可能となる。よって合計4通りの分解手順が得られる。組立手順は分解手順の逆手順として求められる。次にその例を示す。式中の矢印は組立を意味する。

1. $A \leftarrow C = 90^\circ$. 2. $B \leftarrow D = 90^\circ$. 3. $AC \leftarrow BD = 180^\circ$.

3. 種々の問題への適用例

3. 1 非単調性を持つ組立

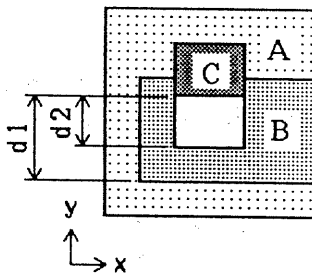


図2 例題2

図2の例題2は非単調性を持つ組立の例である。この分解式と障害物を表4に示す。

表4 例題2の分解式と障害物	
障害物	
$A \rightarrow B = 0^\circ$	C
$A \rightarrow C = 270^\circ (d1)$	◎
$B \rightarrow C = 90^\circ \text{ or } 270^\circ (d2)$	A (90°)
$B \rightarrow A = 180^\circ$	C
$C \rightarrow A = 90^\circ$	B
$C \rightarrow B = 90^\circ \text{ or } 270^\circ$	A

CはAに対して 270° 方向へ動かすことは出来るが、その範囲はAより限定される。(図中のd1)この動かせる範囲を可動範囲とする。表4ではこの可動範囲を書き加えてある。各部品の分解方向集合を次に示す。

$$Ad = \{90^\circ (B), 180^\circ (C)\}, \quad Bd = \{0^\circ (C), 90^\circ (A), 270^\circ (A)\}, \\ Cd = \{90^\circ (A), 270^\circ (d2)\}.$$

ここで、Cの 270° 方向では障害物の代わりに可動範囲:d2を記している。この可動範囲は、 $d1 > d2$ よりCはd2以上動けないのでd2となる。

各分解方向集合より、可能な動作はCのd2の移動のみなので、この移動を実行させる。移動後の組付図を図3に、分解式と障害物を表5に示す。

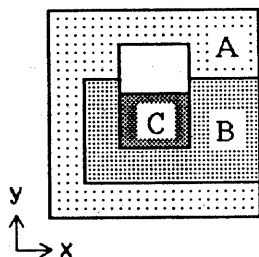


図3 Cの移動後の例題2

"<>"内の方向は、表4に戻る操作へ方向となるので、次のステップでは無効とする。このときの各部品の分解方向集合は次の通りである。

$$Ad = \{180^\circ\}, \quad Bd = \{0^\circ(C)\}.$$

Adより、Aは180°方向へ分解出来ることが分かる。Aの分解後、BとCが分解出来ることは明らかである。結果として組立手順は次のようになる。

$$1. B \leftarrow C = 270^\circ, \quad 2. B \leftarrow A = 0^\circ, \quad 3. C(d2) = 90^\circ.$$

3. 2 非コヒーレンス性を持つ組立

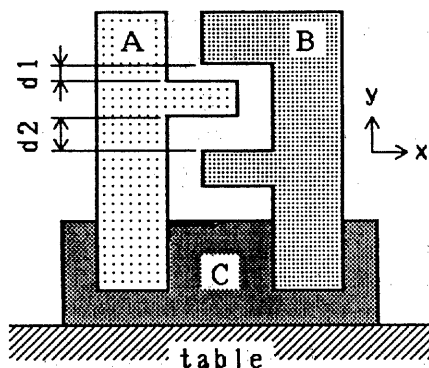


図4 例題3

図4の例題3は非コヒーレンス性を持つ組立の例である。この分解式と障害物を表6に示す。ただしCはテーブル(T)上にある。

表6 例題3の分解式と障害物

	障害物
$A \rightarrow B = 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ (d2:90^\circ)$	C (90°)
$A \rightarrow C = 270^\circ$	T
$B \rightarrow C = 270^\circ$	T
$B \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ (d1:90^\circ)$	C (90°)
$C \rightarrow A = 90^\circ$	◎
$C \rightarrow B = 90^\circ$	◎

例えば、Aに対するBの可動範囲は分解方向の関数となるが、この関数を求めるのは容易ではないので、以後の処理上必要とされる可動範囲のみを逐次求めるようにする。ここでは、BはCに対して90°方向にのみ分解出来るので、90°方向におけるAに対するBの可動範囲(d2)を求めている。Bに対するAの可動範囲(d1)も同様である。各部品の分解方向集合は次の通りである。

$$Ad = \{90^\circ(d1), 90^\circ(C)\}, \quad Bd = \{90^\circ(d2), 90^\circ(C)\}, \quad Cd = \{270^\circ(T)\}.$$

各集合より A の d1 の移動と B の d2 の移動が可能となる。A と B を 90° 方向へ順次互いに接するまで動かすことで C より分解出来るが、A と B を部分として 90° 方向へ C より分解することも出来る。テーブル上の C を固定した、 90° 方向での分解部品集合は次のようになる。

$$\text{Part}(90^\circ) = \{A(d1), B(d2)\}.$$

従って、A B が分解部分となる。製品一般について、いくつかの部品のある制限された可動範囲の実行は、動作ステップの生成など後の処理が複雑となるので、部分としての分解の試行を優先させるようにする。A B 分解後の分解式を次に示す。

$$A \rightarrow B = 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, \quad B \rightarrow A = 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ.$$

A と B は互いに接していないことが分かるが、ある間隔をおいて拘束されている可能性がある。そこで、 $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ を $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ で代表させ、各方向での可動範囲を調べる。A に対する B の $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 方向での可動範囲は制限されるが、 0° 方向での可動範囲は無制限であり、従って 0° 方向へ分解出来ることになる。結果として組立手順は次のようになる。

$$1. A \leftarrow B = 180^\circ (\text{部品間にある間隔を持つ.}), \quad 2. C \leftarrow A B = 270^\circ.$$

3. 3 物理的制約条件下の組立

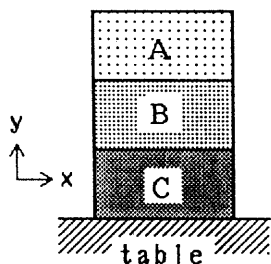


図5 例題4

図5の例題4において、例えばAをB, Cより先に組み立てようとする、Aはその最終位置に固定出来ず、重力作用により落ちてしまう状況とする。このように実際の組立では種々の制約条件が考えられ、これらを満たす最適な組立手順が要求される。ここでは制約条件として重力作用を取り上げる。

落下方向(270°)に対する分解部品集合は次のようになる。(Tはテーブルである.)

$$\text{Part}(270^\circ) = \{A(B), B(C), C(B), C(T)\}.$$

Tを固定部品とすると、A B C Tという固定部分が出来るので、全部品は重力作用に対して安定していることが分かる。もし、Cを分解したとすれば分解部品集合は次のように変化する。

$$\text{Part}(270^\circ) = \{A(B), B, C(T)\}.$$

上式よりA Bが分解部分となるので、不安定な状態であることが分かる。このように1つの分解を行った後、落下方向(270° 方向)での分解部品集合を求めることで重力作用に対する安定性を評価することが出来る。

結果として、分解の最初のステップはB, Cが分解出来ないでAの分解となり、

次にCが分解出来ないのでBを分解する。従って組立順序はC, B, Aの順序となる。

3. 4 部品の回転を伴う組立

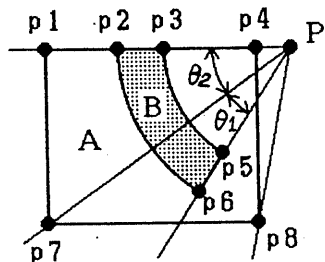


図6 例題5

図6の例題5は部品の回転を伴う組立の例である。BはAに対して点Pを中心として時計回りに分解出来るが、この分解式を時計回りを正として次のように表す。

$$A \rightarrow B = +\text{rot}(P), \quad B \rightarrow A = -\text{rot}(P).$$

回転移動の場合、1回転すると元の位置に戻ってしまうので、回転途中で平行移動に切り換える必要がある。この切り換え点を次のようにして求める。

図6において、AまたはBの頂点を $p_1, p_2, \dots, p_8$ とする。各頂点と点Pを結ぶ直線によって、Pを中心とするBの回転移動の範囲を分割する。この分割された各範囲についてBを回転させ、AとBの幾何学的拘束関係を調べるようにする。Bを図中の θ_1 回転させても平行移動は出来ず、さらに θ_2 回転させると 90° 方向等の平行移動が可能になることが分かる。

4. おわりに

本研究では、2つの部品間の幾何学的拘束関係を基に、非線形性や非単調性、非コヒーレンス性など種々の問題に適用可能な一般的なアルゴリズムを確立した。ただし、多くの部品が互いに干渉しながらある可動範囲で動かせるような場合については、動作ステップの生成上新たな問題が生じるので、これは今後の課題とする。

参考文献

- [1] T. L. De Fazio and D. E. Whitney: Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences, IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 6, pp. 640-658 (1987).
- [2] L. S. Homen de Mello and A. C. Sanderson: A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 2, pp. 228-240 (1991).
- [3] J. D. Wolter: On the automatic generation of assembly plans, Computer-Aided Mechanical Assembly Planning, Kluwer Academic Publishers, pp. 263-288 (1991).
- [4] R. Hoffman: Automated Assembly in a CSG Domain, IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp. 210-215 (1989).
- [5] 田中, 岩間: 部品連立分解式による組付図からの組立手順の自動生成法, AS TE M Technical Report, TM-P-031-93 (1993).