

# 分解順番先送りアルゴリズムによる組立アニメーションと 3D作業指示図の高速自動生成技術

Development and Practical Use of System for Automatically Generating Assembly Animation and 3D Work Instruction Sheets  
Using Dynamic Exchange Disassembly Order Algorithm

榎本 敦子 堤 大輔 巴雅斯 其其格  
Enomoto Atsuko Tsutsumi Daisuke Bayasi Qiqige

飯田 喜一郎 柴田 敏彰  
Iida Kiichiro Shibata Toshiaki

製造拠点のグローバル化に伴い、国・地域に依存しない作業品質の確保の要求に対し、組立アニメーションによる作業指示が有効である。しかし、組立順序の生成および組立アニメーションの編集工数が膨大であることが課題であった。この問題に対し、製造現場の組立規則に従った初期案を生成し、部品間の干渉を幾何拘束関係から求め、干渉が起こる場合に部品の順番を入れ替えて組立順序を適正化する高速な組立順序生成方式を開発した。電力、鉄鋼や交通などの制御システムの作業指示生成にも適用しており、作業指示作成工数を従来の $\frac{1}{10}$ に削減している。

## 1. はじめに

製造拠点のグローバル化に伴い、国・地域に依存しない作業品質の確保が重要な課題になっている。さらに、個別受注生産の増加と短納期化に対応するための的確な作業指示手段として、組立アニメーションの必要性が高まっている<sup>1)</sup>。しかし、組立アニメーションの作成は、編集ツールを用いて組立順序と組立動作ベクトルを人手で設定する必要がある。この工数が膨大であることが課題であり、高速自動生成技術が強く望まれていた。

一般に、組立順序案は部品数の階乗の数と考えられ、最適な順序を選定するのは困難な作業である。部品の隣接関係から与えた制約条件に基づき、生成する順序数を低減する方式が提案されている<sup>2)~5)</sup>。しかし、数千点規模の組立品に対しては、多くの制約条件を付加しても生成される順序案の数は膨大となる。したがって、何らかの評価関数によって生成された順序案を絞り込む方法を採用した場合でも、その後の検証作業に費やす時間は多大である。

これに対し、組立モデルを複数のグループに分けて、グループ単位で組立順序案を生成することにより、順序案の数を低減する方式がある<sup>6), 7)</sup>。しかし、グループ分けの案の数は、部品の組み合わせの数だけ考えられ、部品数の増

加とともに膨大な数となる問題がある。

そのほかに、3D-CAD (3-dimensional Computer-aided Design) の干渉チェック機能を利用して組立順序案を絞り込む方式が開発されている<sup>8), 9)</sup>が、演算時間が長い場合、部品の数が数十点以下の組立モデルへの適用にとどまっている。

一方、製造現場では、作業効率や作業の安全の実体験に基づく組立手順の規則（以下、組立順序規則と記す。）が存在する。部品の組み合わせの総当たりで生成する順序案の多くは、組立順序規則に則さずに無効となる場合が多い。

そこで、組立順序規則を満たす組立順序案を1案生成し、この初期案について干渉しない組立動作が導出可能となるように、動的に順序を入れ替える組立順序生成アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは部品数の2乗の計算オーダーであり、1,000点規模の組立品での組立順序の自動生成を実現した。

なお、この研究では、組立と分解が可逆な機械部品の組立を対象とし、3D-CADの組立モデルを入力として、組立順序規則に対応する分解順序規則に従って分解順序と部品の分解動作を生成する技術を開発した。分解運動の導出では、部品の近接関係に基づいて周辺の部品と干渉を回避する方式を開発した。これにより、分解順序における干渉判定の高速化が可能となった。

ここでは、分解順序生成方式「分解順番先送りアルゴリズム」の概要とこの方式の理論、検証結果、適用状況、および効果について述べる。

## 2. 分解順序の生成方式の概要

組立順序案の総数は、制約条件がない場合に部品数の階乗となる。しかし現実の組立では多くの制約条件が付加されるので順序案の数はかなり限定される。Fazio<sup>2)</sup>らは18

点の部品で構成される組立品に対し、あらかじめ工程上の順序制約を入れて順序を生成した結果、16案を得た。この16案を検証した結果、非現実的な順序を削除し、残った有効案は2案のみであった。これら2つの順序案の違いは、順番が前後する2つの部品についてそれらの部品の順番を入れ替えただけであった。

このように実際の製造工程を考慮した場合、順序案の総数から有効案を絞り込む方式（以下、全順序方式と記す。）は、処理の手間の割に得られる有効案の数が少なく、効率が悪い。

これに対し日立は、以下に述べる分解順番先送り方式を開発した。まず、分解順序規則を満たす分解順序案を1案生成して初期案とする。この初期案に従って、部品を順番に分解していく場合の分解動作を、部品間の幾何拘束関係から導出する。ほかの部品と干渉して分解動作が導出できない場合、その対象部品の分解順番を1つ先送りして、後続の部品の順番と入れ替えることにより、分解順序を動的に入れ替える方式である。

## 2.1 4点の部品から成る分解順序生成の事例

この研究で開発した分解順序生成を、4つの部品から成る組立品を例にして図1で説明する。丸枠を部品とし、青線丸枠を分解運動導出と分解可能性評価の対象部品、斜線丸枠を分解できないと評価された部品、青色丸枠を順番が確定した部品とする。破線四角枠を順序の並べ替え対象とする。実線四角枠を先送りリストとする。ここで先送りリストとは、分解できない部品の分解順番を先に送るために一時保管するリストを意味する。

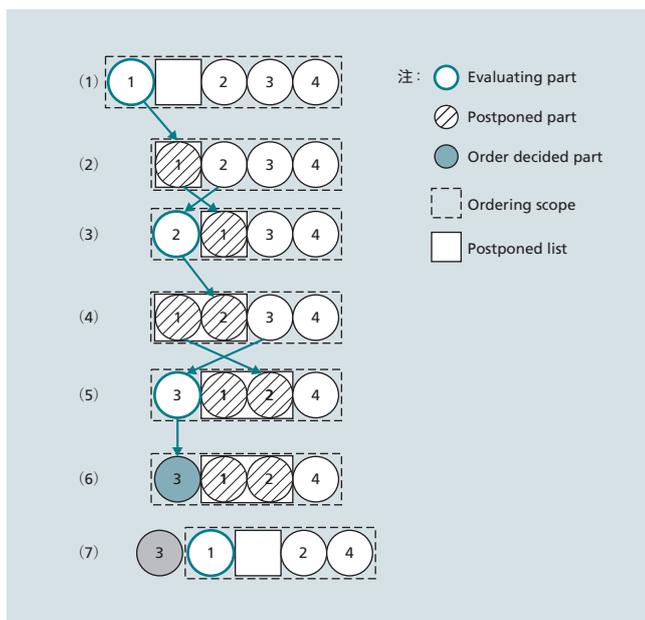


図1 | 分解順番先送りアルゴリズム  
分解できない部品の分解順番を1つ先の部品と交換して干渉を回避する。

- (1) 分解順序規則を満たす初期案の先頭の部品1から分解可能性の評価を開始する。先送りリストの中身は、最初は空である。
- (2) 部品1が分解できないと評価された場合、先送りリストへその部品を一時保管する。
- (3) 直前に評価した部品が先送りリストに一時保管となった場合（この場合は部品1）、1つ後の部品2と先送りリストの順番を入れ替える。
- (4) 部品2の分解可能性を評価する。部品2が分解できないと評価された場合、部品2は先送りリストの最後尾に追加される。
- (5) 部品2は先送りリストに入れられたので、1つ後の部品3と先送りリストの順番を入れ替える。
- (6) 部品3の分解可能性を評価する。部品3が分解できると評価された場合、部品3の順番がそこに確定する。この場合、部品3の分解順番は1番である。
- (7) 先送りリストの1つ前の部品3の順番が確定したので、先送りリスト以降の部品を分解順序の並べ替え対象として、先送りリストを空にする。
- (8) (1) から (7) の操作を繰り返す。最後の順番の部品が評価された時点で終了となる。以下、このアルゴリズムを分解順番先送りアルゴリズムと呼ぶことにする。

## 2.2 計算オーダー

$n$ 個の部品から構成される組立品について考える。分解順序をすべての部品の組み合わせの順列で生成する全順序方式の場合、順序案の数は部品数の階乗となる。そのうち任意の1順序案に対し、おのおのの部品の分解可能性の評価を行う回数は、最後の部品を除いて $n-1$ 回となる。したがって分解可能性の評価回数は、 $(n-1)n!$ となり、部品数の階乗数以上となる。

他方、分解順序規則に基づき生成した初期案に対して、順番先送りによって分解していくこの方式での分解可能性の評価の回数は、 $m$  ( $< n$ ) 番目の部品の場合、最多で $n-m$ 回の順番の評価と先送りが必要となる。これを1から $n-1$ の部品について行うので、分解可能性の評価回数は、部品数の2乗  $n(n-1)/2$  に比例する。

したがって、この方式の計算オーダーは、全順列を生成する場合に比べて大幅に削減される。このアルゴリズムで並べ替え回数が最多となる場合と、全順序方式の順番並べ替え回数との比較を表1に示す。全順序方式では部品数が100以上の場合、実用上困難な並べ替え回数となる。これに対し、このアルゴリズムでは部品数3,000点の組立品の分解順序生成でも十分実用可能な計算オーダーであることが分かる。

表1 | 計算オーダー

このアルゴリズムは、部品数の2乗オーダーの演算時間であり、部品数3,000の組立品に対しても実用時間で演算可能である。

Number of parts	Disassembly order algorithm	
	Dynamic Exchange	Full
10	45	$3.6 \times 10^5$
100	4,950	$9.3 \times 10^{159}$
1,000	$5 \times 10^5$	$> 1.8 \times 10^{208} (*)$
3,000	$4.5 \times 10^6$	$> 1.8 \times 10^{208} (*)$

注：略語説明ほか (\*) ANSI 64bit Infinity number  
ANSI (American National Standards Institute)

### 3. 分解順番先送りアルゴリズムの理論

#### 3.1 分解順序の初期案

前述したように、製造現場においては組立性と効率を満たすような組立順序の規則が存在する。この研究では組立順序と分解順序を可逆と仮定しているため、組立順序規則を逆順にした分解順序規則について考える。分解順序規則には以下の2種類がある。

##### (1) 部品の配置関係に従った分解順序規則

例えば図2に示すように、配置が上の部品は下の部品よりも先に分解する。さらに、配置が同じ高さの部品どうしについては、別の方向から見た配置の順番を用いて分解順番を定める。例えば、手前から奥へ分解する、といった分解順序規則である。

##### (2) 部品の属性に従った分解順序規則

例えば、ベース部品は分解順序の最後尾に順番が付けられる。また、締結部品は非締結部品よりも先に分解するといった明白な規則である。

このような部品の分解順番は、部品間の干渉を少なくし、次の分解対象となる部品への移動距離が短くなるため、理にかなったものである。以下では、このような分解順序規則に従って分解順序の初期案を生成する方法について説明する<sup>10)</sup>。

組立モデルの個々の部品の配置関係から、部品の分解順序を自動的に決定するために、3D-CADから取得した部品の最小外包直方体 (bounding box) の6つの構成平面を用いる。以下具体的な例として図3に示す4つの部品から

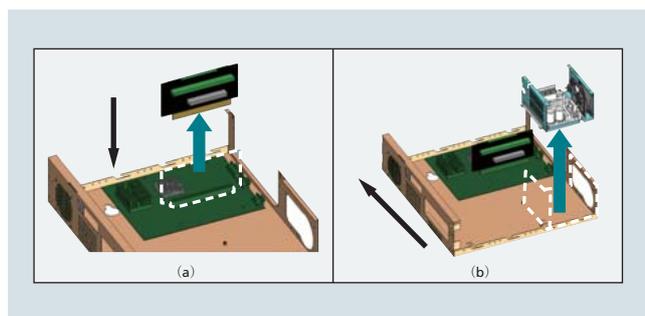


図2 | 部品配置に基づく分解順番規則

上から下 (a)、手前から奥 (b) の2つの分解規則を適用した例を示す。

成る歯車の組立品について考える。この歯車の組立品の4つの部品  $p_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ) の最小外包直方体は図4に示すようにそれぞれ6つの構成平面で構成される。これらを  $f_{i1}, \dots, f_{i6}$  と表すことにする。構成平面  $f_{ij}$  は、部品の外部に向かう法線  $h_{ij} \in R^3$  と構成平面上の任意の1頂点  $r_{ij} \in R^3$  を用いて、以下のように表せる。

$$f_{ij} = (h_{ij}, r_{ij}) \quad (i=1 \dots, 4, j=1, \dots, 6) \quad (1)$$

組立品に属するすべての部品  $i=1, \dots, N$  (図3の例では  $N=4$ ) の構成平面を対象として、配置による順番を以下の方法で決定する。例えば、分解順序規則として上から下に順番に部品を分解する場合、その上下方向のベクトルは座標軸の  $z$  方向と一致する。この方向ベクトルを以下、並び順の方向ベクトルと呼ぶことにする。図3に示すように、各部品の構成平面の中で、外向き法線  $h_{ij}$  ( $p_1$  では  $h_{16}$ ) が  $z$  方向となる構成平面 ( $p_1$  では  $f_{16}$ ) が、 $z$  に沿った順番付けの対象となる。 $z$  に沿った順番付けの対象となる構成平面の集合を  $S_z$  と定義すれば、図4に示す4つの部品の例では以下の順番となる。

$$S_z = \{f_{16}, f_{26}, f_{36}, f_{46}\} \quad (2)$$

最小外包直方体の構成平面と並び順の方向ベクトルが直交する例を図4に示したが、構成平面と並び順の方向ベ

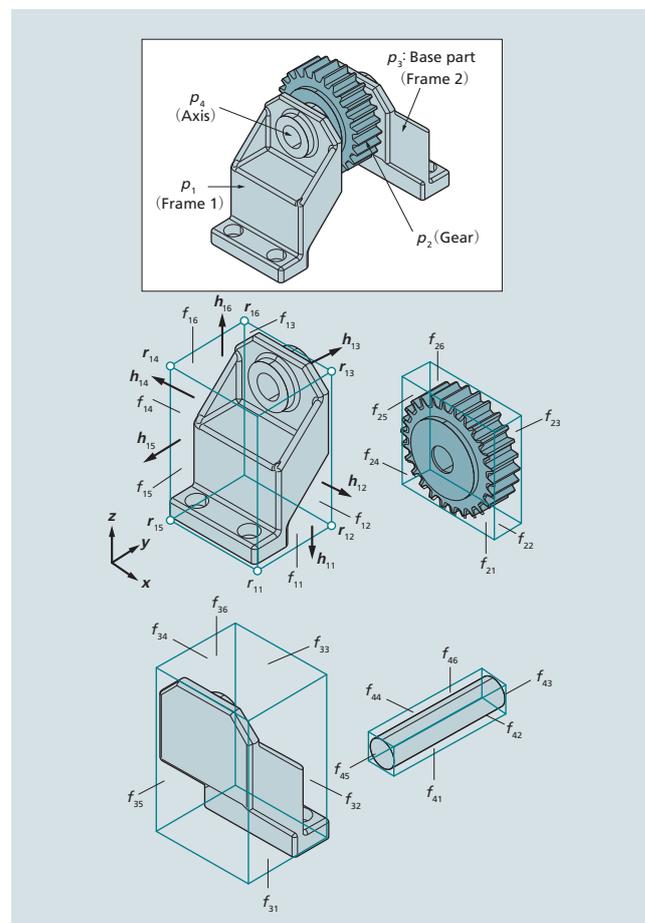


図3 | 歯車の組立品

組立品の構成部品の最小外包直方体とその構成平面を示す。

トルが常に直交する保証はない。一般的な並び順の単位化した方向ベクトルを $\lambda$ とする。 $\lambda$ と部品 $P_i$ の構成平面の外向き法線ベクトル $h_{ik}$ との角度が $45^\circ$ 未満の構成面は、6つの構成面の中でただ1つ存在する。 $h_{ik}$ ,  $\lambda$ を単位ベクトルとして、集合 $S_\lambda$ に属する構成平面 $f_{ij}$ は、以下の方法で検出可能である。

$$\begin{aligned} \text{for } \forall f_{ij} = (h_{ij}, r_{ij}), \\ h_{ij} \cdot z > \cos(\pi/4) \Rightarrow f_{ij} \in S_\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

次に、構成平面の集合 $S_\lambda$ の各構成平面に分解の順番を付ける。2つの任意な構成平面 $f_{ij}, f_{kl} \in S_\lambda$ を選び、構成平面上の任意の頂点の位置ベクトルを $r_{ij}$ と $r_{kl}$ とする。それらの位置ベクトルと、分解順序規則に定める並び順を示す方向ベクトル $\lambda$ の内積値を比較すれば、2つの構成平面の順番が定まる。

以下順番の表記として、 $a > b$ は $a$ が $b$ より順番が先であることを表すものとする。また、 $a \equiv b$ は $a$ と $b$ の順番が同じことを表すものとする。

$$\begin{aligned} \lambda \cdot r_{ij} > \lambda \cdot r_{kl} \Rightarrow f_{ij} > f_{kl} (i \neq k) \\ \lambda \cdot r_{ij} = \lambda \cdot r_{kl} \Rightarrow f_{ij} \equiv f_{kl} (i \neq k) \end{aligned} \quad (4)$$

歯車の組立品を例に具体的に述べる(図4参照)。部品を上から下に順番に分解する場合、並び順の方向ベクトル $\lambda$ は $z$ 軸と同じ方向である。上の式(4)に従って $\lambda = z$ 軸方向に順番を付けると、以下のように構成平面の順番が定められる。

$$\begin{aligned} z \cdot r_{26} > z \cdot r_{16} = z \cdot r_{36} > z \cdot r_{46} \\ \Rightarrow f_{26} > f_{16} \equiv f_{36} > f_{46} \end{aligned} \quad (5)$$

以上のように、任意の2つの構成平面について順番が付けば、その構成平面が属する部品の分解順番を付けることができる。 $P$ を組立品のすべての部品を要素とする集合とし、構成平面が属する部品を指す写像を $q$ とする。

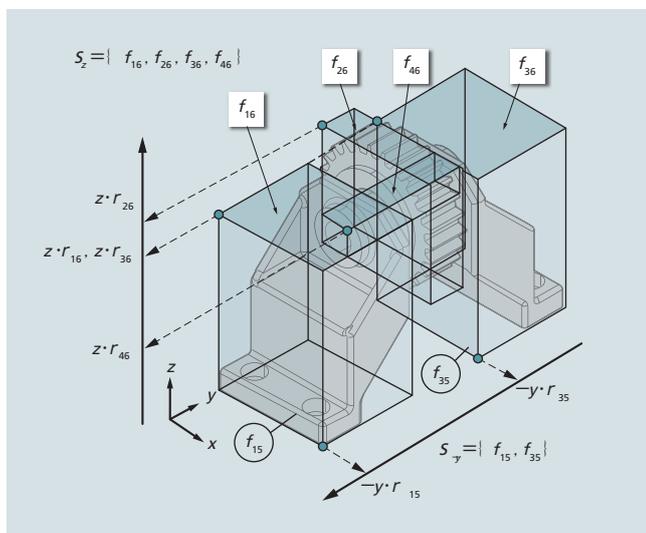


図4 最小外包直方体の構成面の順序  
所定方向に沿った構成平面の配置により、部品の順序を定める。

$$\begin{aligned} q: S_\lambda \rightarrow P \\ q(f_{ij}) = p_i \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)の構成平面の順番に従えば、式(2)の構成平面の属する部品 $p_1, p_2, p_3, p_4$ は、式(10)を用いて、以下のように順番を付けることができる。

$$p_2 > p_1 \equiv p_3 > p_4 \quad (7)$$

ここで、式(7)では、部品 $p_1$ と部品 $p_3$ の順番は等しい。これらの部品については、 $-y$ 方向に沿った順番を付けると、2つの部品の順番を以下のように定めることができる。

$$f_{15} > f_{35} \Leftrightarrow p_1 > p_3 \quad (8)$$

したがって、4つの部品の順番は以下のように定まる。

$$p_2 > p_1 > p_3 > p_4 \quad (9)$$

ここで、式(9)の分解順序では、 $p_4$ の軸が分解順序の最後の部品となって空中に浮いた状態となり、現実的でない分解順序となる。このような結果を避けるために、最後に分解したい部品を組立のベース部品として、あらかじめ設定する。

図3の歯車の組立品で部品 $p_3$ をベース部品と指定し、部品 $p_3$ を除いた部品 $p_1, p_2, p_4$ について、 $z$ 方向に沿って配置の順番を付けると、以下のように分解順序の初期案が得られる。

$$p_2 > p_1 > p_3 > p_4 \quad (10)$$

ここで実際の組立作業では、全工程を通して同じ分解順序規則であることはまれである。作業単位である工程ごとに順序規則が異なる。したがって分解順序規則は、工程単位に設定する。総組工程においてもサブアセンブリを1つの部品と見なせば、同様に分解順序規則の適用が可能である。

### 3.2 分解運動ベクトルの導出と分解順番の先送り

筆者らは、初期順序案に従って順番に部品を分解するときに近傍の部品と干渉しない運動方向を導出する方式を開発した。この方式により、分解運動ベクトルが得られない部品については、分解順番を先送りして分解順序を適正化することができる。

まず、部品間の近接面から分解運動ベクトルの候補と干渉領域を導く。次に、分解運動ベクトルの候補から干渉領域の成分を差し引いて、干渉を回避する分解運動ベクトルを導く。

#### 3.2.1 分解運動ベクトルの候補

ここではまず、組立品状態の部品間の幾何学的な関係から部品の相対運動を導く。ここで、導かれた相対運動はあくまで着目する2つの近接面の相対的な分解運動であり、部品を分解したときに他の近接面と干渉する可能性があ

る。したがって、ここで導いた運動は「分解運動ベクトルの候補」と呼ぶことにする。これらの「候補」を、後述する方法で干渉を回避するようにベクトル方向を修正することで、「分解運動ベクトル」が導出できる。

部品間の幾何拘束の状態により、主に2種類の分解運動ベクトルの候補が考えられる<sup>11)</sup>。以下、これらについて述べる。

(1) 平面拘束，球と平面の拘束 [図5 (a)]

平面拘束の分解運動ベクトルの候補  $V_p$  としては部品の外向きの法線方向と，平面上の直交2軸の両方向に可能である。2つの部品が球と平面で接触している場合も同様の運動が可能である。

$$V_p = \{e_1, -e_1, e_2, -e_2, e_3\} \quad (11)$$

(2) 円筒拘束，線拘束，円すい拘束 [図5 (b)]

円筒拘束の分解運動ベクトルの候補  $V_c$  は円筒中心軸  $e_3$  に沿った両方向に可能である。

$$V_c = \{e_3, -e_3\} \quad (12)$$

線拘束も同様である。ここで，円すい拘束は，円筒拘束の2つの分解運動ベクトルの候補のうち，1方向のベクトル  $e_3$  のみで表される。

なお，組立の動作は並進運動が多いため，この方式では回転運動は割愛した。また，上記以外の幾何拘束として，例えば，3点拘束はその3点で張られる平面拘束として扱う。半円筒は円筒拘束の分解運動と円筒軸断面の法線内向きの分解運動とする。これらの頻度は多くないので詳細は割愛する。

さて，組立の部品は通常，他の複数の部品との間に複数の幾何拘束関係を持つ。例えば，図6の歯車  $p_2$  は，フレーム1  $p_1$ ，フレーム2  $p_3$  とそれぞれ平面拘束 Plane1, Plane2 で拘束され，かつ，軸  $p_4$  と円筒拘束 Cylinder1 で拘束される。歯車  $p_2$  の分解を考えるとき，円筒拘束 Cylinder1 の2つの分解運動ベクトル候補  $\{-y, y\}$  のうち，フレーム1  $p_1$  がすでに分解されていれば， $-y$  が非干渉で有効な分解運動となる。一方，フレーム2  $p_3$  がすでに分解されていれば， $y$  が有効な分解運動となる。

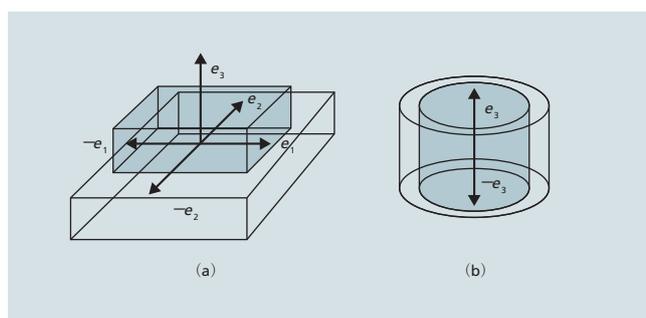


図5 | 幾何拘束における分解ベクトル候補  
平面拘束 (a) は5方向，円筒拘束 (b) は2方向の分解運動が期待できる。

すなわち，分解運動は分解順番に依存して変化する。そこでこの方式ではまず，幾何拘束から考え得るすべての分解運動を候補として導く。次に，分解順番に依存して生じる干渉成分を候補の分解運動ベクトルから除外する。

さて，部品  $a$  についての分解運動ベクトルの候補の集合を  $E_a$  とし，部品  $a$  に付く拘束のインデックスを  $i, j$  とし，

$$E_a = \begin{cases} \bigcup_i V_p(i) & (V_c = \phi) \\ \bigcap_j V_c(j) = V_c & (V_c \neq \phi) \end{cases} \quad (13)$$

とする。ここで，円筒拘束は，該当する2部品の相対運動を円筒軸方向の並進運動に拘束する。したがって，その部品に平面拘束が付いていたとしても，円筒拘束の分解運動が支配的になる。円筒拘束の分解運動が，平面拘束により干渉する可能性があるが，これについては次節で述べる。また，円筒軸の方向が互いに異なる複数の円筒拘束があった場合，その部品は並進運動の自由度がない。

図6の組立品の分解運動ベクトル候補を表2に示す。部品  $p_1$  は部品  $p_2$  と平面拘束 Plane1 で拘束されている。図5に従えば，平面拘束 Plane1 の分解運動ベクトル候補となる方向ベクトルは  $e_1 = x, e_2 = z, e_3 = -y$  となる。したがって，平面拘束 Plane1 から導かれる分解運動ベクトルの候補は  $V_p(1) = \{\pm x, \pm z, -y\}$  である。

また，部品  $p_1$  は部品  $p_4$  と円筒拘束 Cylinder1 で拘束されている。円筒拘束 Cylinder1 の分解運動ベクトル候補となる方向ベクトルは  $e_3 = y$  となる。したがって，円筒拘束 Cylinder1 から導かれる分解運動ベクトルの候補は  $V_c(1) = \{\pm y\}$  である。

$V_p(1), V_c(1)$  を式 (13) に代入して，部品  $p_1$  の分解運動ベクトルの候補は  $E_{p_1} = \{\pm y\}$  となる。

部品  $p_2, p_3, p_4$  についても同様の処理により，分解運動ベクトル候補の集合  $E_{p_i} (i=1, \dots, 4)$  は表2のように導かれる。ここで，同表はすべての部品が組み立った状態での分解運動を示している。分解中の状態では，分解された部品との幾何拘束は除外して式 (13) を用いる必要がある。

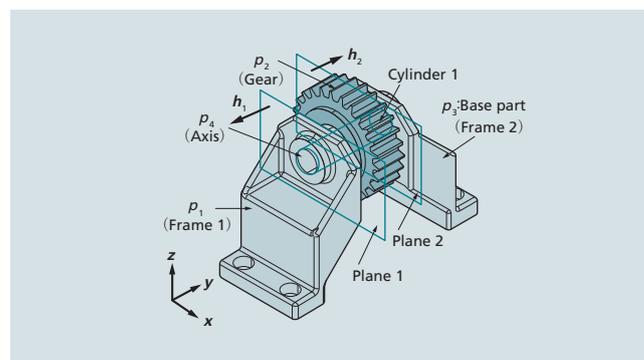


図6 | 組立品の幾何拘束  
平面拘束と円筒拘束から構成された歯車の組立品を示す。

### 3.2.2 干渉領域

分解運動ベクトルの候補の中には、近接する部品と干渉を起こす運動が含まれる。そこで、近接する部品との幾何拘束から部品の干渉領域を導く。さらに、干渉領域を用いて、分解運動ベクトルの候補が干渉を回避するようにベクトル方向を補正する方法について述べる。

ある2つの部品間に平面拘束がある場合に、相手の部品の内向き方向に運動した場合に干渉が起こる。このような干渉を起こす平面拘束を以後、干渉平面と呼ぶことにする。今、部品aについてn個の干渉平面があるとすると、これらの法線ベクトル $h_i$  ( $i=1, \dots, n$ )を用いて、部品aの干渉領域を以下の $D_a$ と表すことにする。

$$D_a = \{h_i | i=1, \dots, n\} \quad (14)$$

例えば、図6で $p_2$ の干渉領域は、 $p_2$ と $p_1$ との平面拘束の法線ベクトル $h_1$ と、 $p_2$ と $p_3$ との平面拘束Plane2の法線ベクトル $h_2$ によって以下のように表される。

$$D_{p_2} = \{h_1, h_2\} \quad (15)$$

### 3.2.3 干渉を回避する分解運動ベクトルの導出

ここではまず、式(14)の干渉領域を用いて、式(13)で求めた部品の分解運動ベクトルの候補を、近接する部品と干渉しないように補正する。部品aの分解運動ベクトルの候補をまとめて、以下の集合 $E_a$ と呼ぶことにする。

$$E_a = \{m_i \in R^3 | i=1, \dots, m\} \quad (16)$$

部品aの干渉領域は式(14)で表されているとする。ここで、分解運動ベクトルの候補 $m_i$ が、式(14)の干渉領域を表すいずれかの法線ベクトル $h_j$ の成分を含む場合に、干渉が起こる。この成分を干渉成分と呼ぶことにする。干渉成分は分解運動ベクトルの候補 $m_i$ の $h_j$ への射影成分となる。以下の式(17)の $F(m_i, h_j)$ で干渉成分は導かれる。 $\hat{m}_{i+1}^j$ は、干渉成分を差し引いて単位ベクトル化したものである。すべての干渉平面( $j=2, \dots, n$ )について、干渉成分を差し引いては単位ベクトル化する漸化処理を行う。以下にその漸化式を示す。

$$\begin{cases} m_i^j = m_i, \hat{m}_i^j = \hat{m}_i^{j-1} - F(m_i, h_j) (j=2, \dots, n) \\ F(m_i, h_j) = \begin{cases} (\hat{m}_i^{j-1} \cdot h_j) h_j & (\hat{m}_i^{j-1} \cdot h_j > 0) \\ 0 & (\hat{m}_i^{j-1} \cdot h_j < 0) \end{cases} \\ \hat{m}_i^j = m_i^j / |m_i^j| \end{cases} \quad (17)$$

以上の処理を行うことにより、干渉成分を持つ分解運動ベクトルの候補は、干渉平面に平行となるようにベクトルの方向を転換することができる。しかし、隣り合う干渉平面どうしのなす角が $\pi/2$ 未満の鋭角をなす場合、方向転換された分解運動ベクトルは隣の干渉平面に干渉する。その例を図7の2つの部品から成る組立品で説明する。部品aと部品bの3つの平面拘束 $f_1, f_2, f_3$ から15個の分解運動ベクトルの候補が得られるが、互いに異なる分解運動ベク

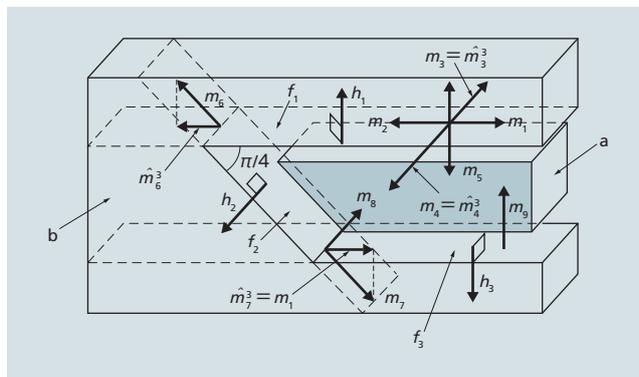


図7 | 分解ベクトル候補の干渉回避

実際の組立てでは2つの部品間には複数の幾何拘束が付き、分解ベクトル候補は干渉領域に含まれてしまう。その場合、分解方向を補正する。

トルは $m_1, \dots, m_9$ である。ここで、 $f_2$ と $f_3$ は干渉平面のなす角度が $\pi/4$ であり鋭角である。分解運動ベクトルの候補の1つである $m_6$ は、干渉平面 $f_1$ に対して補正を行うと、分解運動ベクトル $\hat{m}_6^3$ となるが、干渉平面 $f_2$ と干渉してしまう。このような場合、分解運動ベクトル $\hat{m}_6^3$ と干渉平面 $f_2$ の法線ベクトル $h_2$ との内積は正となる。

一方、分解運動ベクトルの候補の1つである $m_7$ を補正した分解運動ベクトル $\hat{m}_7^3$ は、いずれの干渉平面とも干渉を起こさない。この場合の分解運動ベクトル $\hat{m}_7^3$ と干渉平面の法線ベクトル $h_1, h_2, h_3$ との内積は負または0である。

したがって、式(17)により補正した分解運動ベクトル $\hat{m}_i^j$ と、すべての干渉平面の法線 $h_1, \dots, h_k$ との内積をとれば、補正した分解運動ベクトルと干渉平面との干渉の有無が分かる。

$$\begin{cases} G_k(\hat{m}_i^j) = \begin{cases} 1 & (\hat{m}_i^j \cdot h_k \leq 0) \\ 0 & (\hat{m}_i^j \cdot h_k > 0) \end{cases} \\ \alpha_i = \prod_{k=1}^n G_k(\hat{m}_i^j) \end{cases} \quad (18)$$

上の式(18)で $G_k(\hat{m}_i^j)$ が1のときに $\hat{m}_i^j$ は干渉平面 $h_k$ と干渉を起こさない。一方、 $G_k(\hat{m}_i^j)$ が0のときに干渉を起こす。したがって、 $\alpha_i=1$ のとき $\hat{m}_i^j$ はすべての干渉平面と干渉を回避する分解運動ベクトルとなる。 $\alpha_i=0$ のとき、 $\hat{m}_i^j$ はいずれかの干渉平面と干渉し、分解運動ベクトルとなり得ないと判定される。

図7の部品aの場合は、 $\hat{m}_3^3, \hat{m}_4^3, \hat{m}_7^3 (= \hat{m}_1^3)$ の3つの分解運動ベクトルが干渉を回避する分解運動ベクトルとして導かれる。

分解しようとする部品に対し、干渉を回避する分解運動ベクトルが導けないと判定された場合は、その部品の順番を先送りアルゴリズムによって先送りし、次の部品の分解運動ベクトルの導出に移る。このようにして、分解順序の初期案は、個々の部品が干渉しない順番に並べ替えられる。

なお、この方式で回避できるのは、平面拘束のある部品との干渉である。近接する平面拘束がなく離れた部品に対

し、組立途中に起こる干渉は回避できない。

### 3.2.4 分解運動ベクトルに基づく分解順番の先送り

図6の歯車の組立品を例として、分解運動の導出とその結果に基づく分解順番の先送りについて述べる。

以下を分解順序規則とする。

- (1) ベース部品を最後に分解する。
- (2) 配置が上の部品から分解する。

このとき分解順序の初期案は、3.1.2節で求めたように、以下のとおりである。

$$p_2 > p_1 > p_4 > p_3 \quad (19)$$

各部品の分解運動ベクトルの候補は3.2.1節で導いたとおり、表2である。分解順序の初期案、式(19)に従って分解しながら、同表に示す分解運動ベクトルの候補から、式(17)と式(18)を用いて導いた干渉を回避する分解運動ベクトルを、表3に示す。

分解順番1番の部品である $p_2$ の分解運動ベクトルの候補は $E_{p_2} = \{m_1 = y, m_2 = -y\}$ である。ここで、 $p_1$ との平面拘束Plane1は $h_1 = -y$ の干渉平面となる。さらに $p_3$ との平面拘束Plane2は $h_2 = y$ の干渉平面となる。したがって、式(17)により、分解ベクトルは $\hat{m}_1^2 = 0, \hat{m}_2^2 = 0$ となり消滅し、分解順番1番で $p_2$ を分解することはできない。

そこで、 $p_2$ の分解を先送りして次の $p_1$ の分解を試みる。 $p_1$ の分解運動ベクトルの候補は $E_{p_1} = \{m_1 = y, m_2 = -y\}$ である。ここで、 $p_2$ との平面拘束Plane1が $h_1 = -y$ の干渉平面

表2 | 分解運動ベクトルの候補

まず、分解可能性のある方向ベクトルを導く。

Object part ( $p_i$ )	Adjacent parts ( $p_j$ )	Candidate of disassy. Vectors derived from geometry constraint $k(V_{p(k)}, V_{c(k)})$		Candidate of disassy. Vectors of part for $p_i (E_{p_i})$
$p_1$	$p_2$	Plane1	$V_{p(1)} = \{\pm x, \pm z, -y\}$	$E_{p_1} = \{\pm y\}$
	$p_4$	Cylinder1	$V_{c(1)} = \{\pm y\}$	
$p_2$	$p_1$	Plane1	$V_{p(1)} = \{\pm x, \pm z, y\}$	$E_{p_2} = \{\pm y\}$
	$p_3$	Plane2	$V_{p(2)} = \{\pm x, \pm z, -y\}$	
$p_3$	$p_4$	Cylinder1	$V_{c(1)} = \{\pm y\}$	$E_{p_3} = \{\pm y\}$
	$p_2$	Plane2	$V_{p(2)} = \{\pm x, \pm z, y\}$	
$p_4$	$p_1$	Cylinder1	$V_{c(1)} = \{\pm y\}$	$E_{p_4} = \{\pm y\}$
	$p_2$	Cylinder1	$V_{c(1)} = \{\pm y\}$	
	$p_3$	Cylinder1	$V_{c(1)} = \{\pm y\}$	

表3 | 干渉回避した分解運動ベクトル

表2で導かれた分解運動候補ベクトルから干渉成分を差し引いて、干渉を回避する分解運動ベクトルを導く。

Initial disassy. order	Part	Candidate vectors of disassy. $m_i$	Collision domain $h_j$	Disassy vectors $\hat{m}_i^j$	Revised disassy. order
1	$p_2$	$\{y, -y\}$	$\{y, -y\}$	$\phi$	Void
2	$p_1$	$\{y, -y\}$	$\{y\}$	$\{-y\}$	1
1	$p_2$	$\{y, -y\}$	$\{y\}$	$\{-y\}$	2
3	$p_4$	$\{y, -y\}$	—	$\{y, -y\}$	3
4	$p_3$	$\{y, -y\}$	—	$\{y, -y\}$	4

となる。したがって、式(17)により、分解運動ベクトルとして $\hat{m}_2^1 = -y$ が残り、分解順番1番で $p_1$ を分解することができる。

次の分解順番の部品は、前に先送りした $p_2$ となる。 $p_2$ の分解運動ベクトルの候補は表2の対象部品 $p_2$ の隣接部品 $p_1$ の平面拘束Plane1の分解運動ベクトルを除外して式(18)を用い、結果的に $E_{p_2} = \{m_1 = y, m_2 = -y\}$ を得る。ここで、 $p_1$ はすでに分解されておりPlane1の干渉領域は存在しない。残るのは $p_3$ との平面拘束であるPlane2の $h_1 = y$ の干渉平面である。したがって、式(17)により、分解ベクトルとして $\hat{m}_2^1 = -y$ が残り、分解順番2番で $p_2$ を分解することができる。

以後、同様に分解運動ベクトルの候補を干渉領域で補正を行って分解ベクトルを導出する。分解ベクトルが導出できない場合はその部品の順番を先送りする。以上の処理の結果は表3に示すとおりとなり、最終的な分解順序は以下のように並べ替えられる。

$$p_1 > p_2 > p_4 > p_3 \quad (20)$$

式(20)のように、すべての部品について分解順番が導出されたら、その分解順序を逆にして組立順序が以下の式(21)のように得られる。また、個々の部品の分解運動ベクトルの符号を反転させて組立運動ベクトルとする。

$$p_3 > p_4 > p_2 > p_1 \quad (21)$$

## 4. 演算時間と適用効果の検証

### 4.1 演算時間

このアルゴリズムにより、制御盤、発電機器、半導体検査装置などの部分的な組立モデルに対し、分解順序を生成した。

部品数に対する分解順番の先送り回数を、図8に示す。2,712部品のモデルに対し、20,578回の分解順番の先送り

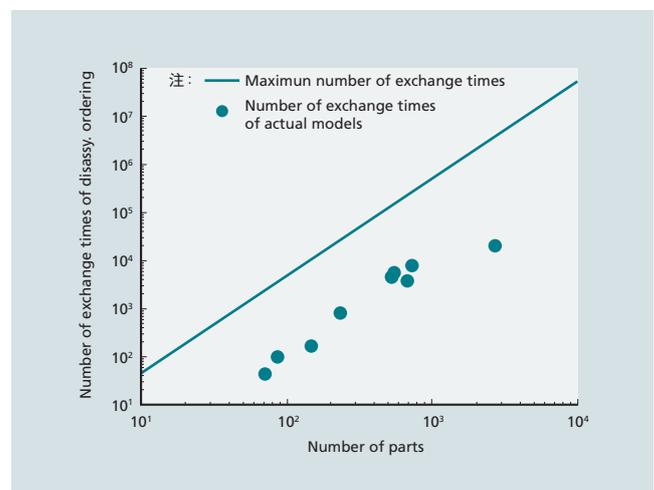


図8 | 先送りされた順番の個数

構成部品数の増加に対し、先送り回数が増加する。直線は理論値である。

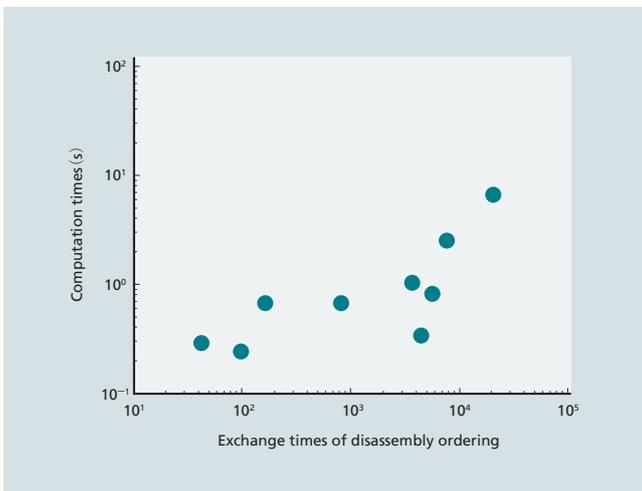


図9 | 計算時間

先送り回数の増加に伴い、計算時間も増加する。

が起きている。実線は表1に示した最多の分解順番の先送り回数を示す。実際のモデルに適用した場合の先送り回数は、最多の先送り回数の $\frac{1}{2}$ 以下であることが分かる。これは、実際のモデルでは、すべての部品の順番が先送りされるわけではないためである。

実際のモデルでの分解順番の先送り回数に対する演算時間を図9に示す。20,578回の分解順番の先送りが起きた2,712部品のモデルの演算時間は、6.61秒である。なお、今回の演算に使用したCPU (Central Processing Unit) はIntel<sup>®</sup>Xeon<sup>®</sup>X5680 (3.33 GHz)である。以上の結果から、このアルゴリズムによる演算時間は十分に実用域にあると考察する。

## 4.2 作業指示作成業務への適用と効果

日立製作所は、このアルゴリズムで分解順序を導出し、組立アニメーションを自動的に生成し、さらに3D作業指示図へと自動展開する組立ナビゲーション<sup>12)</sup>を開発した

※) Intel, Xeonは、米国およびその他の国におけるIntel Corporationの商標である。

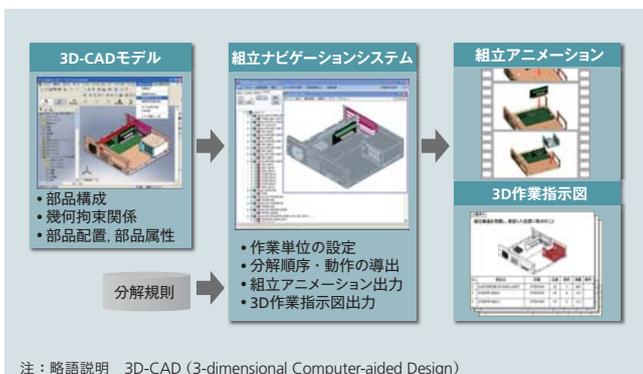


図10 | 組立ナビゲーションシステム

組立ナビゲーションは、3D-CADモデルから組立順序の生成とアニメーションの編集、および3D作業指示図の生成などの機能を提供する。

表4 | 計算時間

自動生成された組立アニメーションの編集時間を示す。編集により順序の修正やハンドリング動作の追加が行われる。

No.	Number of parts	Editing time (min)
1	316	35
2	221	44
3	498	51

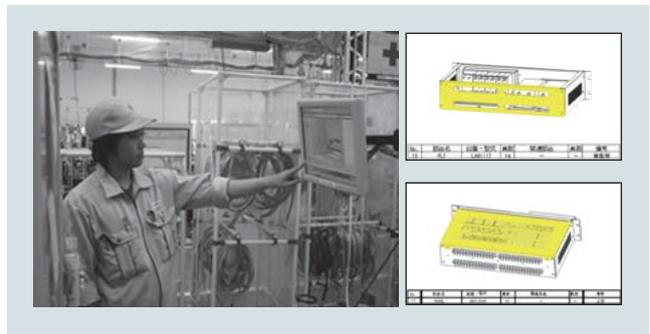


図11 | 作業指示ビューによる組立作業

組立ナビゲーションで出力した3D作業指示図を、製造現場のビューワで確認しながら作業を進めることにより、品質を作り込む。

(図10参照)。

組立ナビゲーションでは、組立順序を生成する前に以下の設定を行う。これにより、現場の作業ノウハウを反映した組立順序を生成することができる。

- (1) 組立作業の単位の設定
- (2) 組立順序生成の範囲の設定
- (3) 組立動作の単位

組立作業の単位(1)とは、組立ラインやセル、人員配置により決まる工程を意味する。設定された組立順序生成の範囲(2)に従って分解順序規則を適用することにより、部位により異なる分解順序規則を適用する。また、複数部品で構成された購入品を1つの部品として扱うための設定も行われる。組立動作の単位(3)とは、ねじなどの同一部品を組立アニメーションで同時に動かしたいときに用いる。

次に、生成した組立順序に従って自動的に展開された組立アニメーションを検証し、順序や動作の修正や、ハンドリング動作を追加する編集が行われ、作業指示用の組立アニメーションが完成する。

実際の製品についてこれらの一連の編集時間を表4に示す。表4の例では部品数1,000点の組立品に対して、数百点のサブアセンブリに工程を分けた。表4からわかるように、編集時間は部品数に依存するだけでなく、部品配置の複雑さの影響を受ける。今後、人手作成の組立順序との差異を定量的に評価し、組立性も考慮した順序生成方式に改良する計画である。表4の規模の製品では従来、人手による組立アニメーションの作成に約1カ月を要していたが、組立ナビゲーションにより、一連の編集時間を含めて約

2.2時間と従来比 $\frac{1}{10}$ に大幅に期間短縮した。

組立ナビゲーションは、約130機種の電力、鉄鋼や交通などの制御システムの作業指示生成にも適用しており、作業指示作成工数を従来の $\frac{7}{10}$ ～ $\frac{1}{10}$ に削減している。図11は組立ナビで作成した3D作業指示図を現場に設置したビューワで確認し、制御盤の組立作業を行っている様子を示している。3D作業指示図は作業の漏れを防止し、多品種変量生産の品質を確保する有効な手段である。

## 5. おわりに

ここでは、分解順序生成方式「分解順番先送りアルゴリズム」の概要とこの方式の理論、検証結果、適用状況、および効果について述べた。

作業品質の確保、受注生産の増加や生産の短納期化に対応するため、3D-CADから組立順序と組立動作を高速生成する「分解順番先送りアルゴリズム」を開発した。

(1) 製造現場の経験に基づく分解順序の初期案を生成する。  
(2) 次に初期案について部品の分解運動を導出する。分解できない部品は順番を先に送り、再び分解運動の導出を試みる。この操作を繰り返すことにより分解可能な順序に並べ替える。

(3) 分解運動の導出にあたっては、部品間の幾何学的な拘束関係から、分解する部品の相対運動を導く。幾何学的な拘束関係により干渉領域が存在する場合には、この相対運動を補正して干渉を回避する分解運動を導く。

このアルゴリズムによる分解順序と分解動作の演算時間は、2,712部品の組立モデルに対し6.61秒であり、実用可能な速度であることを確認した。

このアルゴリズムで分解順序を導出し、組立アニメーションを自動的に生成し、作業指示図へと自動展開する組立ナビゲーションシステムを開発し、約130機種の制御システムの組立作業指示生成に適用している。これにより従来に比べて、組立アニメーションの作成工数が $\frac{1}{10}$ に、作業指示図の作成工数が $\frac{1}{7}$ ～ $\frac{1}{10}$ に大幅に削減した。

## 参考文献

- 1) 水野, 外: 日立グループの「モノづくり改革」への取り組み, 日立評論, 88, 11, 890~893 (2006.11)
- 2) T. De Fazio, et al.: Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences, IEEE J. of Robotics and Automation, RA-3, 6, 640-658 (1987.12)

- 3) L.S. Homem de Mello, et al.: Representations of Mechanical Assembly Sequences, IEEE Trans. of Robotics and Automation, 7, 2, 211-227 (1991.4)
- 4) L.S. Homem de Mello, et al.: A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences, IEEE Trans. of Robotics and Automation, 7, 2, 228-240 (1991.4)
- 5) V.N. Rajan, et al.: Minimal Precedence Constraints for Integrated Assembly and Execution Planning, IEEE Trans. of Robotics and Automation, 12, 2, 175-186 (1996.4)
- 6) 田中, 外: 連立分解式による組立図からの最適部分組立の自動生成法, 日本機械学会論文集 (C編), 65, 635, 2965-2972 (1999)
- 7) Xinwen Niu, et al.: A hierarchical approach to generating precedence graphs for assembly planning, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 43, 14, 1473-1486 (2003.11)
- 8) 篠田, 外: 組立品の接触関係分析とすべての組立順序の導出方法, IE Review, 45, 3, 80~85 (2004.8)
- 9) 丹羽, 外: 全組立順序導出前に全中間製品と全組付けの検討を可能にする方法の基礎研究, 日本設備管理学会誌, 20, 3, 57~64 (2008.11)
- 10) 榎本, 外: CADアセンブリ拘束関係を利用した組立順序と組立動画の高速自動生成技術の開発, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2010, ROMBUNNO. B14 (2010.3)
- 11) 榎本, 外: 作業単位に着目した組立作業のモジュール化と組立シーケンスの自動生成方法, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2007, J61 (2007.3)
- 12) 組立作業指示用アニメーション生成技術: 日立評論, 93, 1, 139 (2011.1)

## 執筆者紹介



### 榎本 敦子

1985年日立製作所入社, 横浜研究所 生産技術研究センター 生産システム第二研究部 所属  
現在, デジタルエンジニアリングの研究開発に従事  
博士 (工学)  
日本機械学会会員, 精密工学会会員, 計測自動制御学会会員



### 堤 大輔

2008年日立製作所入社, 横浜研究所 生産技術研究センター 生産システム第二研究部 所属  
現在, デジタルエンジニアリングの研究開発に従事  
日本機械学会会員



### 巴雅斯 其其格

2006年日立製作所入社, 横浜研究所 生産技術研究センター 生産システム第二研究部 所属  
現在, デジタルエンジニアリングの研究開発に従事  
精密工学会会員



### 飯田 喜一郎

1991年日立製作所入社, 電力システム社 業革IT推進本部 プロジェクトマネジメント推進部 所属  
現在, 電力システム関連のエンジニアリングプロセス改革活動に従事  
情報処理学会会員



### 柴田 敏彰

2008年日立製作所入社, インフラシステム社 情報制御製造本部 生産エンジニアリング部 所属  
現在, 制御盤の生産設計システム開発に従事