

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[†]

製品の組立図より各部品の組立手順を自動生成する方法は多く研究されているが、これらは一般論としての不完全さに加えて、自動生成問題全体から見てグラフ化中心や動作計画中心の研究が多い、従って実用システムの開発手法としては研究課題が残っている。本論文では組立図より2つの部品間の拘束関係を分解式として定式化し、これらの連立式を解くことで組立手順を自動生成する手法を紹介する。本手法は Wolter の分類による非線形性、非単調性、非コヒーレンス性の組立にいずれも対応可能な一般性の高い手法であり、実際の処理量においても従来の方法に比べ大幅な削減ができる。また、本手法で解けない組立手順は認識できるので、本手法は実用可能性の高い手法といえる。

A Method of Generating Assembly Plans from Assembly Drawings by Disassembly Equations

MASAJI TANAKA[†] and KENZO IWAMA[†]

Generation of assembly plans from assembly drawings has been an active research theme in these years. Researchers have proposed methods of describing assembly plans and methods of motion planning of parts. However, there exist research issues for developing practical methods of generating assembly plans. The methods need to be general enough for various cases of assemblies. This paper describes a method of generating assembly plans by extracting constraint relationships among parts in assembly drawings, describing the constraint relationships in the form of disassembly equations, and by solving the disassembly equations. The method is general enough to generate assembly plans from assemblies that include non-linear, non-monotone, and/or non-contact coherent plans. The method needs less computation time than methods previously proposed. Furthermore, the method is able to detect assemblies that the method is not able to disassemble. Therefore, we believe that the method is a practical one.

1. はじめに

製品の組立図より各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。その代表的な研究としては、De Fazio と Whitney¹⁾ の liaison 図による方法や Homen de Mello と Sanderson²⁾ の AND/OR グラフによる方法などが挙げられる。一方、Wolter³⁾ は組立作業をその性質においていくつかに分類しているが、中でも実際の組立でよく現れる性質を次に3つ示す。

- 線形性 (linearity) : 部品を1個ずつ順に組み立てられるような性質である。図1(a)は非線形性の組立を要する組立図の例である。
- 単調性 (monotonicity) : 各部品が最終位置に直接

組み立てられるような性質である。図1(b)は非単調性の組立を要する組立図の例である。

- コヒーレンス性 (coherency) : 互いに結合されていない部品を同時に組み立てることがない性質である。図1(c)は非コヒーレンス性の組立を要する組立図の例である。

先に挙げた方法^{1),2)} はこれらの性質をすべて満たす組立を対象としたものと考えられる。Wolter 自身は非線形性について解法を示しているが³⁾、部品の組立方向や部品間の拘束関係をユーザが与える点など、一般論としては問題がある。また Wolter は非単調性への適用例として Hoffman⁴⁾ の研究を挙げているが、2つの部品間の組立を例題とした解法は、多くの部品間への適用性において問題がある。

また、これまでの研究成果は組立手順の自動生成問題全体から見ると、グラフ化中心の研究^{1),2)} や動作計画中心の研究⁴⁾が多い。従って実用的なシステムの開

[†] 財団法人京都高度技術研究所
Advanced Software Technology & Mechatronics
Research Institute of KYOTO

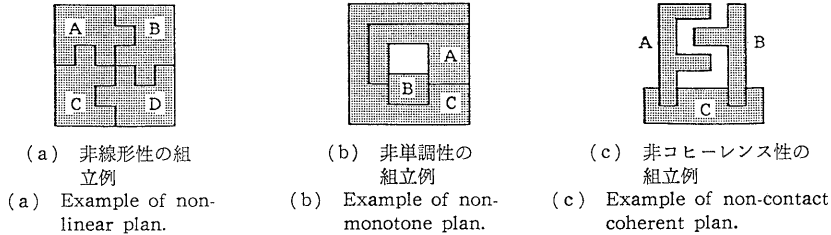


図 1 Wolter による組立の分類例
Fig. 1 Examples of Wolter's assembly classification.

発手法としてはまだ研究課題が残っている。

本論文では非線形性、非単調性、非コヒーレンス性にいずれも対応可能な組立手順を自動生成できる、一般性の高い手法を紹介する。本手法は実際の処理量においても従来の方法に比べて大幅な削減ができ、また本手法で解けない組立手順は認識できるので、本手法は実用可能性の高い手法といえる。ただし、本論文では問題を簡単にする目的で手法の適用範囲を次のように限定する。

- 組立図を構成する各部品の形状は、2次元組立図では多角形、3次元組立図では多面体とする。
- 組立における部品の変形と回転移動は除外する。

以下、2章では2次元組立図の解法、3章では3次元組立図の解法を述べる。なお、文中の例題はCADにおいて、2次元組立図では $x-y$ 座標系上に描かれ、各部品は直線分からなるワイヤフレームモデルとして認識されているものとし、3次元組立図では $O-xyz$ の直交座標系上に描かれ、各部品は B-reps 表現のソリッドモデルとして認識されているものとする。

2. 2次元組立図における連立分解式による組立手順の自動生成法

2.1 可動方向と可動範囲

本手法では組立図より分解手順を生成し、その逆手順として組立手順を生成する。部品 P_1, P_2, \dots, P_n か

らなる2次元組立図において、任意の部品 P_i が単独で組立図より分解できるかどうかは、 P_i に接する他の部品との幾何学的拘束関係より明らかにできる。

ここで、 P_i に接する任意の部品 P_j に対して、 P_i の動かせる (= 平行移動できる) 方向 (x 軸の正方向を 0° 方向とする。) を P_j に対する P_i の可動方向: V_{P_j, P_i} とする。 V_{P_j, P_i} は次のようにして求められる。

図2(a)のように P_i, P_j 間の境界となる P_i または P_j の頂点を p_1, p_2, \dots, p_m とする、図2(b)のように任意の頂点 p_k を端点とする直線分を P_i 側で e_a, e_b , P_j 側で e_c, e_d とし、 e_a, e_b は p_k を終点とする向きを持ち、 e_c, e_d は p_k を始点とする向きを持つとする。 x 軸の正方向を 0° 方向とするときの、これらの直線分の正方向を v_a, v_b, v_c, v_d とし、反時計回りに v_a より v_b に至る方向の集合を V_{ab} , v_c より v_d に至る方向の集合を V_{cd} とすると、任意の頂点 p_k より P_j に対して P_i は $V_{ab} \cap V_{cd}$ の方向 (図2(c)) において平行移動可能となる。ここで、 $V_{P_k} = V_{ab} \cap V_{cd}$ とすると V_{P_j, P_i} は式(1)で求められる。

$$V_{P_j, P_i} = \cap \{V_{P_k} | k=1, 2, \dots, m\}. \quad (1)$$

V_{P_j, P_i} 内のある方向 v において P_i を動かすとき、 P_j の一部が障害となって、その動かせる範囲が限定される場合、この動かせる範囲を P_j に対する P_i の v 方向での可動範囲: $D(v)_{P_j, P_i}$ とする。 $D(v)_{P_j, P_i}$ は v 方向における P_i, P_j 間の最短距離として求められ

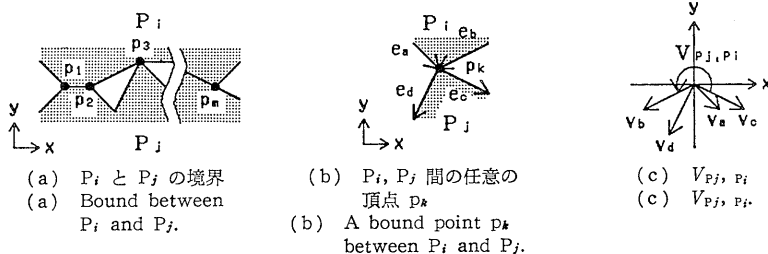


図 2 2次元の可動方向
Fig. 2 2-D movable directions.

る. また, $D(v)_{P_j, P_i}$ は P_j が障害とならなければ理論上無限大となるが, 実際の組立作業はある限られた範囲内で行われるので, 本手法では理論上無限大となる可動範囲を, 組立図に対して十分に大きな値: ω とする.

2.2 分解式

接し合う任意の2つの部品 P_i, P_j において, 式(2)を P_j に対する P_i の分解式とする. また, 分解式において P_j を基準部品, P_i を分解部品とする.

$$P_j \rightarrow P_i = V_{P_j, P_i}. \tag{2}$$

例えば, $V_{P_j, P_i} = \{\theta | \theta_a \leq \theta \leq \theta_b \vee \theta = \theta_c\}$ のときは, $P_j \rightarrow P_i = \theta_a \leq \theta \leq \theta_b, \theta_c$ と書くようにする.

全部品の集合を $X = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ とし, X より P_i を除く集合を $P_i' (= X - \{P_i\})$, P_i に接する全部品の集合を P_i'' とするとき, 組立図より P_i を単独で動かせる方向を V_{P_i', P_i} とすると, これは連立分解式(3)より式(4)で求められる.

$$P_k \rightarrow P_i = V_{P_k, P_i}. \tag{3}$$

$$\{P_k | P_k \in P_i''\}$$

$$V_{P_i', P_i} = \cap \{V_{P_k, P_i} | P_k \in P_i''\}. \tag{4}$$

また, V_{P_i', P_i} 内のある方向 v' における P_i の組立図における可動範囲を $D(v')_{P_i', P_i}$ とすると, これは式(5)で求められる. (\min は最小値を表す.)

$$D(v')_{P_i', P_i} = \min (D(v')_{P_k, P_i}). \tag{5}$$

$$\{P_k | P_k \in P_i''\}$$

もし $D(v')_{P_i', P_i} = \omega$ ならば, P_i は組立図より v' 方向に分解可能となる.

これまで述べた一般論より, 図3の例題1の分解手順を求める. 図3より求められる分解式は次の6式となる.

●例題1の分解式

$$A \rightarrow B = 0^\circ, \quad A \rightarrow C = 270^\circ, \quad B \rightarrow C = 270^\circ.$$

$$B \rightarrow A = 180^\circ, \quad C \rightarrow A = 90^\circ, \quad C \rightarrow B = 90^\circ.$$

なお, 6式中上方の3式の可動方向を 180° 反転させると下方の3式が得られる. $X = \{A, B, C\}$ とし, A 以外の部品 B, C を $A' = \{B, C\}$ とすると, 分解式より $V_{A', A} = \phi$ が成り立ち, 同様に $V_{B', B} = \phi, V_{C', C} = \{270^\circ\}$ が成り立つ. よって組立図より単独で動かせる

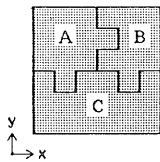


図3 例題1

Fig. 3 Example 1.

のは C のみとなり, $D(270^\circ)_{C', C} = \omega$ より C は 270° 方向に分解可能となる. C の分解後, $A' = \{B\}, B' = \{A\}$ となり, $V_{A', A} = \{180^\circ\}, V_{B', B} = \{0^\circ\}, D(180^\circ)_{A', A} = \omega, D(0^\circ)_{B', B} = \omega$ より A と B が分解できる.

2.3 分解実行式

例題1の分解式において, 例えば $B \rightarrow A = 180^\circ$ より A を 180° 方向に動かそうとすると, $C \rightarrow A = 90^\circ$ より C が障害物となる. このように任意の分解式において, 分解部品を基準部品からの可動方向に動かそうとするとき, 障害となる部品は他の分解式より明らかにできる. 一般的には, 式(2)において V_{P_j, P_i} は対応する障害物によっていくつかの部分集合に分割される(具体例は例題2で示す.). これを S_1, S_2, \dots とし, 対応する障害物の集合を N_1, N_2, \dots として, 任意の部分集合 S_a に対する障害物の集合 N_a を式(6)のように表す. 式(6)を P_j に対する P_i の S_a 方向での分解実行式とする.

$$P_j \rightarrow P_i = S_a [N_a]. \tag{6}$$

例えば, $N_a = \{P_x, P_y\}$ のときは $P_j \rightarrow P_i = S_a [P_x, P_y]$ と書くようにする. また, $N_a = \phi$ のときは $P_j \rightarrow P_i = S_a [\phi]$ と書き, このとき P_i を実際に動かすことを, 分解実行式 $P_j \rightarrow P_i = S_a [\phi]$ の実行とする. なお, 分解実行式は1つの分解式に対して可動方向の部分集合の数だけ存在する. 例題1の分解式よりできる分解実行式は次の6式となり, C の分解に関する2式が実行可能となる.

●例題1の分解実行式

$$A \rightarrow B = 0^\circ [C], \quad A \rightarrow C = 270^\circ [\phi], \quad B \rightarrow C = 270^\circ [\phi].$$

$$B \rightarrow A = 180^\circ [C], \quad C \rightarrow A = 90^\circ [B], \quad C \rightarrow B = 90^\circ [A].$$

2.4 部分としての分解と非線形への対応

例題1の分解実行式より A と B は単独では動かせないが, 障害物と部分化することで基準部品より動かせる可能性がある.(本手法では部分を接し合ういくつかの部品からなるものと定義する.) 例えば, $C \rightarrow A = 90^\circ [B]$ より A と B を部分 AB として 90° 方向に動かそうとすると, 分解式 $A \rightarrow B = 0^\circ, C \rightarrow B = 90^\circ$ より B の 90° 方向の障害物は A となるので, 従って $C \rightarrow AB = 90^\circ [\phi]$ が成り立つ. 一般論としては, 式(6)において P_i と N_a を部分 $P_i N_a$ とするとき, S_a は対応する障害物によっていくつかの部分集合に分割される. これを S_{a1}, S_{a2}, \dots とし, 対応する障害物の集合を N_{a1}, N_{a2}, \dots とすると, 任意の部分集合 S_{ab} に対する障害物の集合 N_{ab} は式(7)のように表される.

$$P_j \rightarrow P_i N_a = S_{ab} [N_{ab}]. \tag{7}$$

同様に部分化は $P_i N_a N_{ab} \dots$ が P_j を含まない限り繰り返し行える. このような部分化を行うことで本手法は非線形性の組立に対応する. 例えば, 図 1 (a) では C に対して部分 AB を上方に分解する手順などが生成できる. なお, $P_i N_a$ のように部分において障害物は分解部品の右に書くようにする. 例題 1 の分解実行式において, 可能な部分化をすべて行った後の分解実行式を次に示す.

● 例題 1 の全部分化後の分解実行式

$$\begin{aligned} A \rightarrow BC = 0^\circ [A], & \quad A \rightarrow C = 270^\circ [\phi]. \\ B \rightarrow C = 270^\circ [\phi], & \quad B \rightarrow AC = 180^\circ [B]. \\ C \rightarrow AB = 90^\circ [\phi], & \quad C \rightarrow BA = 90^\circ [\phi]. \end{aligned}$$

ここで, 障害物のない分解実行式においては, $[\phi]$ の代わりに可動範囲を “()” 内にも書いてもよいことにする. 例題 1 の実行可能な分解実行式とその可動範囲を次に示す.

● 例題 1 の実行可能な分解実行式とその可動範囲

$$\begin{aligned} A \rightarrow C = 270^\circ (\omega), & \quad B \rightarrow C = 270^\circ (\omega). \\ C \rightarrow AB = 90^\circ (\omega), & \quad C \rightarrow BA = 90^\circ (\omega). \end{aligned}$$

この 4 式の可動方向はすべて単一方向なので可動範囲は一意に定まるが, 一般的には可動方向がある範囲を持つ場合がある. このとき可動範囲は可動方向の関数となるが, これを求めるのは容易ではないので, 実用上代表的可動方向を選出して可動範囲を求めるようにする. 本手法ではある範囲の中央方向を代表的可動方向とする. (ある範囲が $\theta_a \leq \theta < \theta_b$ のときは $(\theta_a + \theta_b)/2$ 方向とする.)

実行可能な 4 式より AB と C を分解すると, 例題 1 の分解実行式は $A \rightarrow B = 0^\circ (\omega)$, $B \rightarrow A = 180^\circ (\omega)$ の 2 式となり A と B が分解できる. このように本手法では, 分解実行式の実行によって分解手順を生成する. 組立図より求められる分解式は, すべての部品間の接触関係を表すものであり, 従って分解手順は分解式より求められる分解実行式の実行手順として生成できる. 本手法における組立手順生成の基本アルゴリズムを図 4 に示す. また, 例題 1 の組立手順をグラフ化して図 5 に示す.

これまで述べた分解手順の生成方法を図 6 において具体的に示す. 図 6 (a) は例題 1 の各部品 (丸棒の部品) の他の部品との拘束関係を示す. 例えば, A は 90° 方向に障害物 B を持ち, 180° 方向に障害物 C を持つ. それ以外の方向では B, C が共に障害物となる. 従って A の分解可能性は $90^\circ, 180^\circ$ の 2 方向に存在する. 図 6 (a) より C を分解して消去すると図 6 (b) と

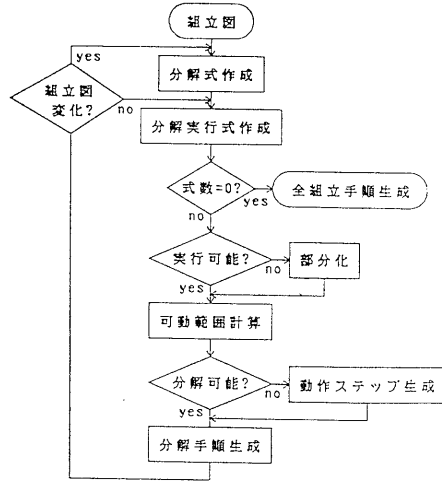


図 4 組立手順自動生成の基本アルゴリズム
Fig. 4 Basic algorithm of generating assembly plans.

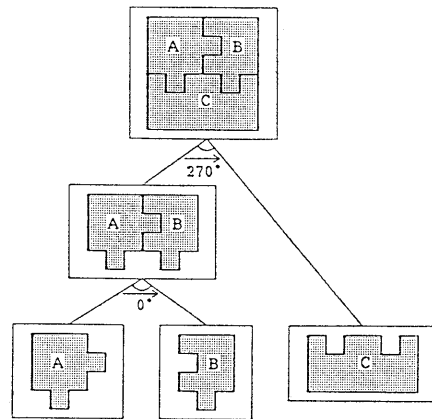


図 5 例題 1 の組立手順のグラフ
Fig. 5 Graph of assembly plans of example 1.

なる. また, 図 6 (a) より A と B を部分化すると図 6 (c) となる.

2.5 動作ステップの生成と非単調性への対応

図 7 の例題 2 は非単調性と非コヒーレンス性の両性質を持つ組立図である. 図 7 より求められる分解式と分解実行式, および全部分化後の分解実行式, 実行可能な分解実行式とその可動範囲を各々表 1, 2, 3, 4 に示す.

表 1, 2, 3 の各式の算出例として分解式 $A \rightarrow D = 270^\circ \leq \theta \leq 315^\circ$ を取り上げる. A に対する D の可動方向 $270^\circ \leq \theta \leq 315^\circ$ は $B \rightarrow D = 225^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$, $C \rightarrow D = 135^\circ, 315^\circ$ より対応する障害物によって $270^\circ [C]$,

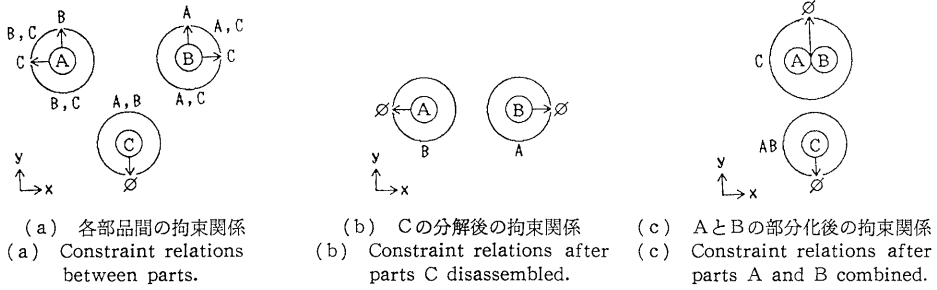


図6 例題1の分解手順生成方法
Fig. 6 Method of generating disassembly plans.

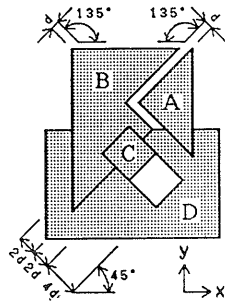


図7 例題2
Fig. 7 Example 2.

$270^\circ < \theta < 315^\circ [B, C]$, $315^\circ [B]$ の3つの部分に分割される。これらの障害物をDと部分化すると、 $A \rightarrow DC = 270^\circ [B]$, $A \rightarrow DBC = 270^\circ < \theta < 315^\circ [\phi]$, $A \rightarrow DB = 315^\circ [C]$ となり、さらに部分化すると $A \rightarrow DCB = 270^\circ [\phi]$, $A \rightarrow DBC = 270^\circ < \theta < 315^\circ [\phi]$, $A \rightarrow DBC = 315^\circ [\phi]$ の3つの実行可能な式が得られる。

実行可能な8式より一度の平行移動で実行できる分解は存在しないが、これらはいくつかの動作ステップを経て分解できる可能性がある。以下、動作ステップの生成方法について始めに一般論を述べ、次に具体例を示す。

式(8)は式(7)において $N_{ab} = \phi$ とし、 S_{ab} の代表的可動方向を v_{ab} , その可動範囲を d_{ab} としたものである。

$$P_j \rightarrow P_i N_a = v_{ab}(d_{ab}). \quad (8)$$

式(8)より $P_i N_a$ を d_{ab} 動かす動作を、 P_j より P_i を分解する第1の動作ステップとする。 d_{ab} 移動後の P_j に対する P_i の可動方向を V_{P_j, P_i} とすると、これは P_i の第2ステップでの移動方向の候補の集合となる。(V_{P_j, P_i} は $P_i N_a$ を d_{ab} 動かした後、再度分解式を求めることで得られる。) そこで V_{P_j, P_i} 内において P_i が障害物を持つ方向があればこれを部分集合に分割

表1 例題2の分解式
Table 1 Disassembly equations of example 2.

$D \rightarrow A = 90^\circ \leq \theta \leq 135^\circ.$	$D \rightarrow C = 135^\circ, 315^\circ.$
$C \rightarrow B = 135^\circ.$	$A \rightarrow D = 270^\circ \leq \theta \leq 315^\circ.$
$D \rightarrow B = 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ.$	$B \rightarrow D = 225^\circ \leq \theta \leq 270^\circ.$
$B \rightarrow C = 315^\circ.$	$C \rightarrow D = 135^\circ, 315^\circ.$

表2 例題2の分解実行式
Table 2 Disassembly execution equations of example 2.

$D \rightarrow A = 90^\circ \leq \theta \leq 135^\circ [\phi].$	$A \rightarrow D = 270^\circ [C].$
$C \rightarrow B = 135^\circ [D].$	$A \rightarrow D = 270^\circ < \theta < 315^\circ [B, C].$
$D \rightarrow B = 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ [C].$	$A \rightarrow D = 315^\circ [B].$
$B \rightarrow C = 315^\circ [\phi].$	$B \rightarrow D = 225^\circ \leq \theta < 270^\circ [A, C].$
$D \rightarrow C = 135^\circ [B].$	$B \rightarrow D = 270^\circ [C].$
$D \rightarrow C = 315^\circ [\phi].$	$C \rightarrow D = 135^\circ [A, B].$
	$C \rightarrow D = 315^\circ [B].$

表3 例題2の全部分化後の分解実行式
Table 3 Disassembly execution equations of example 2 after all obstacle parts combined.

$D \rightarrow A = 90^\circ \leq \theta \leq 135^\circ [\phi].$	$A \rightarrow DCB = 270^\circ [\phi].$
$C \rightarrow BDA = 135^\circ [\phi].$	$A \rightarrow DBC = 270^\circ < \theta < 315^\circ [\phi].$
$D \rightarrow BC = 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ [D].$	$A \rightarrow DBC = 315^\circ [\phi].$
$B \rightarrow C = 315^\circ [\phi].$	$B \rightarrow DAC = 225^\circ \leq \theta < 270^\circ [B].$
$D \rightarrow CB = 135^\circ [D].$	$B \rightarrow DC = 270^\circ [B].$
$D \rightarrow C = 315^\circ [\phi].$	$C \rightarrow DAB = 135^\circ [\phi].$
	$C \rightarrow DB = 315^\circ [C].$

表4 例題2の実行可能な分解実行式とその可動範囲
Table 4 Disassembly execution equations and the movable bounds of example 2.

$D \rightarrow A = 112.5^\circ (d^*)^{*1}$	$A \rightarrow DCB = 270^\circ (d^{**})^{*2}$
$C \rightarrow BDA = 135^\circ (4d).$	$A \rightarrow DBC = 292.5^\circ (d^*)^{*1}$
$B \rightarrow C = 315^\circ (4d).$	$A \rightarrow DBC = 315^\circ (d).$
$D \rightarrow C = 315^\circ (4d).$	$C \rightarrow DAB = 135^\circ (4d).$

1 $d^ = d / \cos 22.5^\circ.$

*2 $d^{**} = d / \cos 45^\circ.$

し、部分化を含めて P_i の第2ステップとなる分解実行式を立てる。

ここで、第2ステップにおいて P_i が N_a と部分化されない場合は、 N_a は第2ステップで P_i と分裂したことになる。このように本手法では動作ステップの生成過程において、分解部品を他の部品と部分化したり分裂化したりすることで非単調性に対応する。

$P_i N_a$ を d_{ab} 動かした第1ステップに対して、第2ステップは P_i を動かせる V'_{P_j, P_i} の部分集合の数だけ存在する。この各部分集合における第2ステップでの移動方向は、各部分集合での代表的可動方向となるが、これは第2ステップ以降、1ステップ前の移動方向に最も近い方向を選ぶようにする。これは確率上 P_j に対して P_i をより大きく離す方が分解できる可能性が大きいからである。

同様にして第3、第4、…ステップは形成されるが、一連の動作が1つのループを形成する場合は分解不可能とする。また、動作ステップの組み合わせ数は動作ステップ数に対して爆発する可能性があるので、本手法では動作ステップの生成過程において最初に分解できた手順のみを動作ステップ生成の解とする。

先述の実行可能な8つの分解実行式において、AとDの分解、CとDの分解に関する分解実行式はいずれも動作ステップを生成しても分解できないのは図7より明らかなので、BとCの分解に関する分解実行式における動作ステップの生成過程を次に述べる。

$$C \rightarrow BDA = 135^\circ \text{ (4 d) :}$$

第1ステップで BDA を 135° 方向に 4 d 動かした後、実行可能な式は $C \rightarrow B = 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ [\phi]$ のみとなる。 $C \rightarrow B = 90^\circ (d^{**})$ より第2ステップで B を 90° 方向に d^{**} 動かした後、実行可能な式は $C \rightarrow B = 270^\circ < \theta \leq 315^\circ [\phi]$ 、 $C \rightarrow BA = 90^\circ [\phi]$ の2式となり、この可動範囲は $C \rightarrow B = 315^\circ (d)$ 、 $C \rightarrow BA = 90^\circ (\omega)$ となる。よって C より B は次の動作 (= 分解実行式の実行) 手順で分解できる。

- (1) $C \rightarrow BDA = 135^\circ \text{ (4 d)}$.
- (2) $C \rightarrow B = 90^\circ \text{ (d^{**})}$.
- (3) $C \rightarrow BA = 90^\circ \text{ (\omega)}$.

$$B \rightarrow C = 315^\circ \text{ (4 d) :}$$

第1ステップで C を 315° 方向に 4 d 動かした後、実行可能な式は $B \rightarrow CDA = 225^\circ \leq \theta < 270^\circ [\phi]$ 、 $B \rightarrow CD = 270^\circ [\phi]$ の2式となる。 $B \rightarrow CDA = 225^\circ \leq \theta < 270^\circ [\phi]$ における第2ステップの移動方向は 270° 方

向に近い方向となるが、これは $B \rightarrow CD = 270^\circ [\phi]$ の 270° 方向とできる。この可動範囲は ω となるので B より C が分解できる。動作手順は次のとおりである。

- (1) $B \rightarrow C = 315^\circ \text{ (4 d)}$.
- (2) $B \rightarrow CD = 270^\circ \text{ (\omega)}$.

2.6 部品の安定性と非コヒーレンス性への対応

先述の2つの動作ステップ生成による分解手順より例題2の全分解手順を求める。

$$C \rightarrow BDA = 135^\circ \text{ (4 d) :}$$

3つの動作ステップ: (1) $C \rightarrow BDA = 135^\circ \text{ (4 d)}$ 、(2) $C \rightarrow B = 90^\circ \text{ (d^{**})}$ 、(3) $C \rightarrow BA = 90^\circ \text{ (\omega)}$ より C と BA を分解すると表2は次に示す4式となる。この4式の代表的可動方向での可動範囲はすべて ω となるので、AとB、CとDが各々分解できる。

●例題2のCとBAの分解後の分解実行式

$$B \rightarrow A = -45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ [\phi], \quad D \rightarrow C = 135^\circ [\phi], \\ A \rightarrow B = 135^\circ \leq \theta \leq 315^\circ [\phi], \quad C \rightarrow D = 315^\circ [\phi].$$

$$B \rightarrow C = 315^\circ \text{ (4 d) :}$$

2つの動作ステップ: (1) $B \rightarrow C = 315^\circ \text{ (4 d)}$ 、(2) $B \rightarrow CD = 270^\circ \text{ (\omega)}$ より B と CD を分解すると表2は $D \rightarrow C = 135^\circ [\phi]$ 、 $C \rightarrow D = 315^\circ [\phi]$ の2式となる。この2式の可動範囲は共に ω となるので C と D が分解できる。

B より CD を分解した後、残された A と B は非接触なのでこれを分解する式は存在しないが、組立においては A と B をある間隔に置いた状態に配置する動作ステップが必要となる。(一般的には、各分解ステップの実行後において、基準部品を含む残されたいくつかの部品が1つの部分とならない場合には、非接触の配置動作ステップが必要となる。)そこで、A と B を可動範囲が ω となるまで分離する動作ステップを生成する。B に対して A は任意に動かせるが、非接触の場合は 0° 、 90° 、 180° 、 270° の4方向を代表的可動方向とする。 $B \rightarrow A = 0^\circ (\omega)$ 、 $B \rightarrow A = 180^\circ (d^{**})$ より、組立手順においては B に対して A を 180° 方向に d^{**} の間隔で配置する動作ステップを生成する。

これら2つの分解手順より、例題2の組立手順をグラフ化して図8に示す。図8において、AとBを非接触の状態に CD に組み立てる手順はあるが、AとBを個々独立に CD に組み立てる手順はない。これは A と B の CD に対する組立が非コヒーレンス性の組立であることを示す。A と B の非接触状態での CD へ

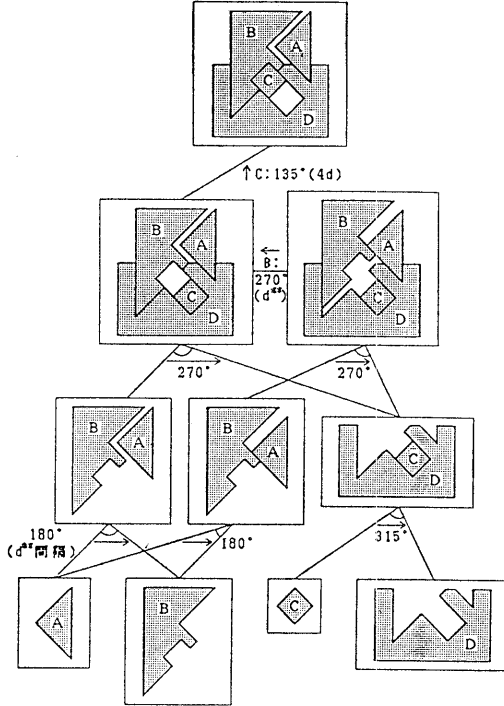


図 8 例題 2 の組立手順のグラフ
Fig. 8 Graph of assembly plans of example 2.

の組立は、実際の位置決めや作業方法を考えると不安定な組立といえる。同様に AB と CD の組立も、部分 AB は A と B が 1 つの直線分で接しているため、この直線分方向 (135° or 315° 方向) に変形しやすく、よって不安定な組立といえる。もし、A と B が個々独立に CD に組み立てられる場合には、このような不安定な組立はグラフより消去できる。

3. 3次元組立図における連立分解式による組立手順の自動生成法

3.1 立方体投影法による 3次元可動方向

2章で述べた手法の 3次元組立図への拡張を行う。2次元の場合と最も異なるのは可動方向であり、3次元の可動方向を本手法では次に述べる立方体投影法によって求める。

3次元の可動方向を表すのに図 9 のような立方体を用いる。この立方体はサーフェスモデルで表され、その重心は O - xyz 座標系の原点にあり、長さ $2a$ の各辺は x, y, z いずれかの座標軸に平行とする。可動方向は座標系の原点を始点とし、立方体の表面上の 1 点を終点とするベクトルで表す。可動方向の範囲が立方

体の全表面となると、可動方向の集合は極座標系において $\{(\theta, \phi) | 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ\}$ となる。

部品 P_1, P_2, \dots, P_n からなる 3次元組立図において、接し合う任意の 2 つの部品を P_i, P_j とし、 P_i, P_j 間の境界となる P_i または P_j の頂点を p_1, p_2, \dots, p_m とする。部品の表面において稜線を境界とする平面領域を面とし、図 10 のように任意の頂点 p_k を含む P_i の面を $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{if}$ 、 P_j の面を $s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jg}$ とする。

ここで、 p_k を含む任意の P_i の面 s_{ia} を $a_1x + a_2y + a_3z + a_4 = 0$ とするとき、図 9 の立方体は $a_1x + a_2y + a_3z = 0$ を境界にして 2 つの部分に分割できる。この中で $a_1x + a_2y + a_3z \geq 0$ の領域の部分 $V_{s_{ia}}$ とする。図 11 は $a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 1$ としたときの $V_{s_{ia}}$ を表す。また、 p_k を頂点とする任意の P_j の面 s_{jb} を $b_1x + b_2y + b_3z + b_4 = 0$ とするとき、図 9 の立方体において $b_1x + b_2y + b_3z \leq 0$ の領域の部分 $V_{s_{jb}}$ とする。このとき任意の頂点 p_k より、 P_j に対する P_i の可動方向は次の領域 V_{p_k} に限定される。

$$V_{p_k} = [\cap \{V_{s_{ik}} | k=1, 2, \dots, f\}] \cap [\cap \{V_{s_{jk}} | k=1, 2, \dots, g\}] \quad (9)$$

従って、 P_j に対する P_i の可動方向 V_{P_j, P_i} は式 (10) で表される。

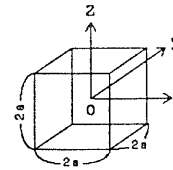


図 9 3次元の可動方向を表す立方体
Fig. 9 A cube representing 3-D movable directions.

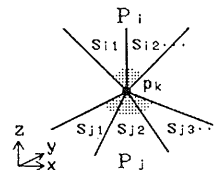


図 10 P_i, P_j 間の任意の頂点 p_k
Fig. 10 A bound point p_k between P_i and P_j .

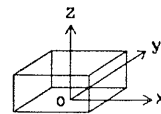


図 11 $z \geq 0$ 領域での $V_{s_{ia}}$
Fig. 11 $V_{s_{ia}}$ in $z \geq 0$ area.

$$V_{P_j, P_i} = \cap \{V_{pk} | k=1, 2, \dots, m\}. \quad (10)$$

図 13 を 3 次元の可動方向を求める例題とする。図 13(a), (b) は各々部品 A, B の三面図であり、その図面上の位置は組立図上の位置に一致する。なお、本手法での三面図の座標系を図 12 に示す。また、各三面図の右上の図は三面図より作成されたソリッドモデルの外観を示す。(著者は三面図よりソリッドモデルを自動作成するシステムを開発している⁵⁾。) A, B 間の境界となる A または B の頂点を図 13(c) のように p_1, p_2, \dots, p_8 とする。 p_1 を含む (A または B の) 3 つの面によって A に対する B の可動方向の領域は図 14(a) のように 2 つの面となり、これは p_2 を含む 3 つの面によって図 14(b) のように 1 つの直線分となる。さらにこれは p_3 を含む 3 つの面によって図 14(c)

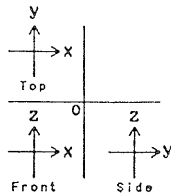


図 12 三面図の座標系
Fig. 12 Coordinate system of orthographic views.

のように 1 点 $(a, 0, a)$ となる。 p_4, p_5, p_6, p_7, p_8 からの制約はすべてこの 1 点を満たすので、従って $V_{A,B} = \{(a, 0, a)\}$ となる。なお、可動方向の領域が線や面となる場合の可動範囲を求める際の代表的可動方向は、可動方向の領域の重心をとるようにする。(実用上近似的な重心でもよい。)

3.2 例題

先述の 3 次元の可動方向を利用すると、3 次元の組立図は 2 次元の場合と同様に解くことができる。その例題として図 15 の例題 3 を解く。図 15(a), (b)(c), (d) は各々部品 A, B, C, D の三面図であり、その図面上の位置は組立図上の位置に一致する。また、各三面図の右上の図は三面図より作成されたソリッドモデルの外観を示す。組立図より求められる分解式と分解実行式、および全部分化後の分解実行式を各々表 5, 6, 7 に示す。

表 7 において実行可能な式の可動範囲はすべて ω となるので ABC と D が分解できる。この分解の後、表 6 は表 8 となり、表 8 は部分化により表 9 となる。表 9 において実行可能な式の可動範囲はすべて ω となるので、AB と C が分解できる。この分解の後、 $B \rightarrow A = (-a, a, 0)$ (ω) より A と B が分解できる。例題 3 の組立手順をグラフ化して図 16 に示す。

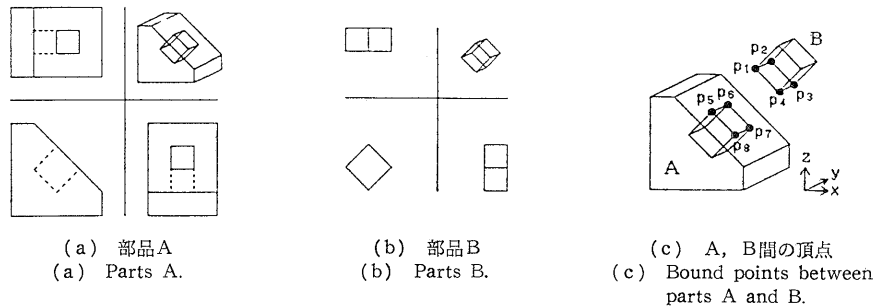


図 13 3 次元の可動方向を求める例題
Fig. 13 Example to calculate 3-D movable directions.

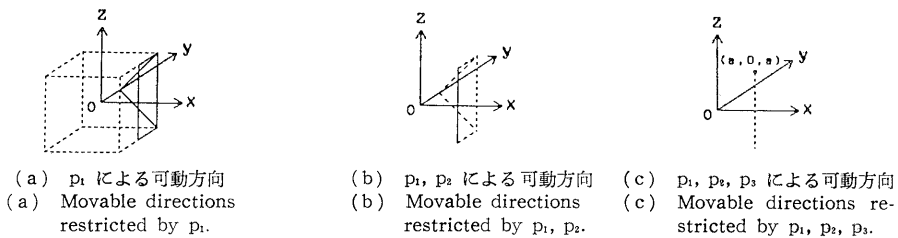


図 14 $V_{A,B}$
Fig. 14 $V_{A,B}$.

表 5 例題3の分解式
Table 5 Disassembly equations of example 3.

$B \rightarrow A = (-a, a, 0).$	$A \rightarrow C = (0, 0, -a).$
$C \rightarrow A = (0, 0, a).$	$B \rightarrow C = (0, 0, -a).$
$D \rightarrow A = (0, a, 0), (0, -a, 0).$	$D \rightarrow C = (0, a, 0).$
$A \rightarrow B = (a, -a, 0).$	$A \rightarrow D = (0, a, 0), (0, -a, 0).$
$C \rightarrow B = (0, 0, a).$	$B \rightarrow D = (0, a, 0), (0, -a, 0).$
$D \rightarrow B = (0, a, 0), (0, -a, 0).$	$C \rightarrow D = (0, -a, 0).$

表 6 例題3の分解実行式
Table 6 Disassembly execution equations of example 3.

$B \rightarrow A = (-a, a, 0)[C, D].$	$A \rightarrow C = (0, 0, -a)[D].$
$C \rightarrow A = (0, 0, a)[B, D].$	$B \rightarrow C = (0, 0, -a)[D].$
$D \rightarrow A = (0, a, 0)[B, C].$	$D \rightarrow C = (0, a, 0)[A, B].$
$D \rightarrow A = (0, -a, 0)[B, C].$	$A \rightarrow D = (0, a, 0)[C].$
$A \rightarrow B = (a, -a, 0)[C, D].$	$A \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$
$C \rightarrow B = (0, 0, a)[A, D].$	$B \rightarrow D = (0, a, 0)[C].$
$D \rightarrow B = (0, a, 0)[A, C].$	$D \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$
$D \rightarrow B = (0, -a, 0)[A, C].$	$C \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$

表 7 例題3の全部分化後の分解実行式
Table 7 Disassembly execution equations of example 3 after all obstacle parts combined.

$B \rightarrow ACD = (-a, a, 0)[B].$	$A \rightarrow CD = (0, 0, -a)[A, B].$
$C \rightarrow ABD = (0, 0, a)[C].$	$B \rightarrow CD = (0, 0, -a)[A, B].$
$D \rightarrow ABC = (0, a, 0)[\phi].$	$D \rightarrow CAB = (0, a, 0)[\phi].$
$D \rightarrow ABC = (0, -a, 0)[D].$	$A \rightarrow DC = (0, a, 0)[A, B].$
$A \rightarrow BCD = (a, -a, 0)[A].$	$A \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$
$D \rightarrow BAC = (0, a, 0)[\phi].$	$B \rightarrow DC = (0, a, 0)[A, B].$
$D \rightarrow BAC = (0, -a, 0)[D].$	$B \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$
$C \rightarrow BAD = (0, 0, a)[C].$	$C \rightarrow D = (0, -a, 0)[\phi].$

表 8 例題3のABCとDの分解後の分解実行式
Table 8 Disassembly execution equations of example 3 after parts ABC and D are disassembled.

$B \rightarrow A = (-a, a, 0)[C].$	$C \rightarrow B = (0, 0, a)[A].$
$C \rightarrow A = (0, 0, a)[B].$	$A \rightarrow C = (0, 0, -a)[\phi].$
$A \rightarrow B = (a, -a, 0)[C].$	$B \rightarrow C = (0, 0, -a)[\phi].$

表 9 表8の全部分化後の分解実行式
Table 9 Disassembly executions after all obstacle parts combined in Table 8.

$B \rightarrow AC = (-a, a, 0)[B].$	$C \rightarrow BA = (0, 0, a)[\phi].$
$C \rightarrow AB = (0, 0, a)[\phi].$	$A \rightarrow C = (0, 0, -a)[\phi].$
$A \rightarrow BC = (a, -a, 0)[A].$	$B \rightarrow C = (0, 0, -a)[\phi].$

4. 考 察

これまでの研究成果は組立手順の自動生成問題全体から見ると、グラフ化中心の研究^{1),2)}や動作計画中心

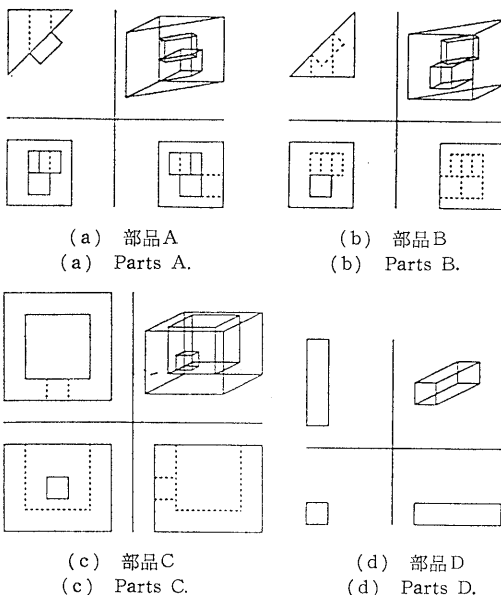


図 15 例題3
Fig. 15 Example 3.

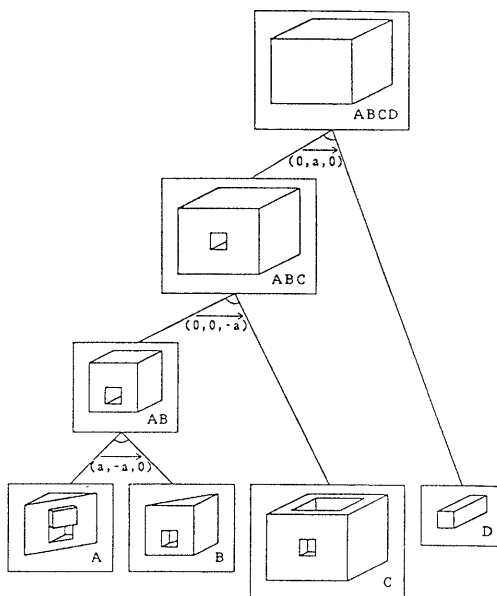


図 16 例題3の組立手順のグラフ
Fig. 16 Graph of assembly plans of example 3.

の研究⁴⁾が多いが、本手法は連立分解式によってこれらすべての問題を統一的に解く手法である。また、2つの部品間の拘束関係を基本とした連立分解式による解法は、非線形性や非単調性、非コヒーレンス性など種々の困難な組立の性質に容易に対応できる点で、本

手法は一般性の高い手法といえる。

従来の組立手順のグラフ化の研究においては、部品間の拘束関係を求める方法として、組立図よりある部品が分解可能かどうかを、予め設定されたいくつかの方向に部品を仮想的に動かし、他の部品との幾何学的交差を求めるような試行錯誤的な方法が主流であったが^{2),3)}、本手法では連立分解式の解としてすべての部品間の拘束関係を明らかにできるので、実際の処理量は従来の方法に比べると大幅な削減ができる。

動作ステップの生成については、迷路の中である部品が目的地を探索するような問題は“Piano Movers' Problem”として Schwartz や Sharir, Hopcroft⁶⁾ が研究しており、指数関数的なアルゴリズムになることが証明されている。よって実際には解が存在しても、本手法における動作ステップ生成法では一連の動作が1つのループを形成する場合は分解不可能とした。

本手法で分解不可能となる組立図は、次のような分解を要する場合と考えられる。

- 2つ以上の部品を同時に動かす必要がある分解。
(Wolter³⁾ は非シーケンス性 (non-sequentiality) の組立としている。)
- 基準部品の迷路の中で分解部品が出口を探索するような分解。
- いくつかの部品の動作ステップの組合せを要する分解。(例えばいくつかの数字の組合せで開く鍵のような場合。)

このような分解を要する組立図は実用上例外とみなせるので、分解不可能の場合はユーザが対応しても実用上の支障はないと考えられる。

5. おわりに

本研究では組立図より2つの部品間の拘束関係を分解式として定式化し、連立分解式を解くことで分解/組立手順を自動生成する手法を開発した。本手法は、非線形性や非単調性、非コヒーレンス性など種々の組立の性質に容易に対応できる一般性の高い手法なので、より複雑かつ高度な技術を要する組立へも対応可能性は大きいと考えられる。

謝辞 本研究をまとめる上でご指導いただいた京都大学・沖野教郎教授に深謝いたします。なお、本研究は財団法人 国際ロボット・エフ・エー技術センター IMS センターから委託された研究の一部である。

参 考 文 献

- 1) De Fazio, T. L. and Whitney, D. E.: Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences, *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 6, pp. 640-658 (1987).
- 2) Homen de Mello, L. S. and Sanderson, A. C.: 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) Wolter, J. D.: On the Automatic Generation of Assembly Plans, *Computer-Aided Mechanical Assembly Planning*, pp. 263-288, Kluwer Academic Publishers (1991).
- 4) Hoffman, R.: Automated Assembly in a CSG Domain, *IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 210-215 (1989).
- 5) 田中雅次: 立体要素連立式による三面図からの自動立体作成法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 34, No. 9, pp. 1956-1966 (1993).
- 6) Schwartz, J. T., Sharir, M. and Hopcroft, J.: Planning, Geometry, and Complexity of Robot Motion, *Ablex Series in Artificial Intelligence*, Ablex Publishing Corporation (1987).

(平成 5 年 8 月 20 日受付)

(平成 6 年 6 月 20 日採録)



田中 雅次 (正会員)

1963 年生。1986 年 3 月佐賀大学理工学部機械工学科卒業。同年 4 月(株)リコー入社。1990 年 4 月(財)京都高度技術研究所 (ASTEM) 入所。現在に至る。CAD/CAM を中心とした生産の自動化に関する研究に従事。日本ロボット学会会員。



岩間 憲三 (正会員)

1950 年生。1974 年東京大学理学部物理学科卒業。同年富士通(株)入社。1988 年ペンシルバニア州立大学理学部計算機学科博士課程修了。理学博士。1989 年(財)京都高度技術研究所入社。コンピュータ・ビジョン、ロボティックス、生産特に組立工程設計、組立作業設計等における技術開発に従事。IEEE、システム制御情報学会各会員。