

加工過程モデルを用いた板金図面からの立体復元

枡 誠一 Seiichi Hegi *† 渡辺 俊典 Toshinori Watanabe ‡§

要旨

2次元CAD図面から立体を復元する研究は数多く行なわれているが、これらは図法幾何的に完全な正投影図を前提としていることが多い。工業図面は図法幾何に準拠した人間系の情報交換のための手段であるから、自明な部分の省略など図法幾何的には不完全なことが多く、これらの手法を適用することがむずかしい。本稿では加工物の形状特徴と加工過程に着目したモデルを利用することにより不完全な投影図から立体を復元する手法を提案する。実装例として板金加工物の工業図面からの復元を示す。

1 はじめに

機械系CAEにおける3次元モデリングの有効性は議論を待たないところである。さまざまな加工シミュレーションや力学的解析シミュレーションの分野では3次元ソリッドモデリングは不可欠である。また技術文書作成や製造管理の分野ではソリッドモデルは要求されないが加工物の3次元情報は有益である。優れた商用3次元CADソフトウェアが登場している一方で、2次元図面は人間系の効率的な情報交換の手段としてその価値を失うことはないだろう。2次元CAD図面から立体情報を復元する技術には次のような工学的意義がある。

- 3次元ソリッドモデルへの入力データの自動作成
- 立体図作成や製造管理のための3次元情報の自動抽出

2次元CAD図面から立体を復元する技術は1970年代から多くの研究があるが、いずれも工業図面への適用に十分な成果があるとはいえない状況である。その主な原因はこれらの研究が図法幾何的に完全な正投影図を前提としていることにある。工業図面は本来、

設計者や製造者の間での情報交換のための手段であるから、人間系の情報交換に支障をきたさないかぎり、図法幾何的な誤りや省略を含むものである。

工業図面は図法幾何的に不完全であることが多いにもかかわらず、人間は図面から立体の情報を認識することができる。人間は加工物の形状特徴や加工過程をあらかじめモデルとして持つことにより不完全な図面から立体を認識しているのではないだろうか。本稿では板金加工物という、形状と加工過程に著しい特徴をもつ対象物に対して、2次元CAD図面の投影線から加工操作の履歴を求めることにより立体形状を復元する手法を提案する。そしてこの手法が図法幾何的な誤りや省略を含む工業図面からの立体復元に有効であることを示す。

以下、2章では従来技術の問題点を整理し、3章では板金加工物に対する加工過程モデルの概要、4章では加工過程モデルを用いた立体復元手法、5章ではprologによる立体復元実験の結果を述べる。

2 立体復元の技術

立体復元技術の手法はボトムアップ手法とトップダウン手法の二つに分類できる。本稿で提案する手法はトップダウン手法に分類される。

*電気通信大学大学院 情報システム学研究所

†hegi@sd.is.uec.ac.jp

‡電気通信大学大学院 情報システム学研究所

§watanabe@sd.is.uec.ac.jp

2.1 ボトムアップ手法

ボトムアップ手法とは2次元CAD図面から幾何計算により3次元空間の頂点を生成し、頂点からエッジ、面、ブロック、ソリッドを順に形成してゆく方法である。1970年代の初めから研究が始まり、図法幾何的に完全な2次元CAD図面からの立体復元の基本的手法は概ね確立していると考えられる [1] [2] [3] [4]。境界表現的なアプローチに対して、部分ブロックに分割して集合演算を用いるCGS(constructive solid geometry)的なアプローチも報告されている [6]。また処理過程で生じる虚物体除去と面の探索効率の向上に関して多くの研究があり [7] [8] [9] [10] [11] [12]、多くの改善案も提案されている [14] [15] [16]。これらの成果を応用した商用実験的な設計支援システムも開発されている。

工業図面を意識した図法幾何的に不完全な2次元CAD図面の処理に関して、機械部品図面の矛盾線分の検出 [17]、板金図面の省略線分の生成 [18]の研究が報告されている。ボトムアップ手法は本来、純粋な幾何計算に基づく方法であるから、原理的には対象物の種類に依存しないが、幾何的不正確さや省略に対して演算が途中で破綻する。これらを補償するためには対象物の形状特徴を利用する方法との融合が必要となってくる。

2.2 トップダウン手法

トップダウン手法とは対象物の形状特徴を仮定し、2次元CAD図面からその証拠を検証することにより立体を復元する方法である。ボトムアップ手法の補助手段として機械部品の工業図面への適用が提案されているが研究は継続されていない [5]。

トップダウン手法は対象物の形状特徴をモデルとして持つ方法であるから、多様な図面へ適用するためには無数のモデルが必要であり、ボトムアップ手法に比べて汎用性に乏しい。しかしモデルに基づいて復元するわけであるから幾何的不正確さや省略に対して強靱であり、復元演算の速度も速い。またモデルを工夫することにより投影法からかなり乖離した図面も扱うことができる可能性がある。

表 1: ボトムアップ手法とトップダウン手法の比較

解決すべき課題	ボトムアップ手法	トップダウン手法
幾何的不正確さへの対応	演算が途中で破綻する。	モデルを持つので強靱。
省略図面への対応	演算が途中で破綻する。補償処理の研究もあるが未確立。	モデルを持つので強靱。
図面の多義性への対応	虚物体除去のための対策が必要。多くの研究あり。	虚物体は生じない。多数解の可能性あり。
演算の高速度性	多くの研究あり。	生成検査法の速度向上の工夫が必要。
多様な図面への適用性	投影法に忠実であれば原理的には適用可能。	汎用性を高めるには無数のモデルが必要。ただし投影法から乖離した図面にも適用可能。

工業図面への適用という観点から、2つの手法の評価を表 1 にまとめる。

3 板金加工物の加工過程モデル

3.1 加工過程モデル

2次元図面に現れる投影線は立体の3次元形状の写像であるが、ある種の2次元図面に現れる投影線の集合は加工操作の集合の写像とみなすことができる。多くの板金加工物は厚さが一定の平板に対して、穴あけ加工、切断加工、曲げ加工を施すことで製作される。板金図面の投影線からこれらの加工操作への逆写像を求めることができれば、板金加工物の立体情報を復元することができると考えられる。加工操作の集合から投影線の集合への写像は単射ではなく、ひとつの加工操作は多様な投影線となって図面に現れる。工業図面では誤りや省略があるため、ある加工操作を表すすべての正確な投影線の組を見つけることが一般的には難しい。そこで加工操作を一種のモデルを考え、加工の作用を証明する点、線、面が図面に現れているかどうかを検証することにより、実際に適用された加工操作を求めるトップダウン的な復元方法が考えられる。

この立場から板金加工物をとらえなおし、以下の加工過程モデルを考える。

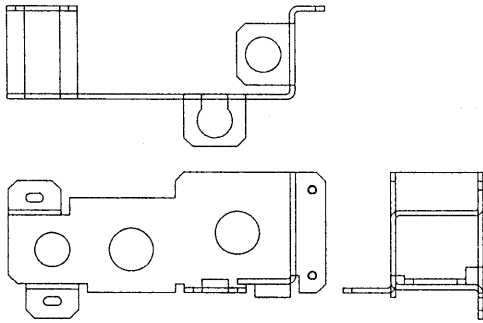


図 1: 板金加工物の 2 次元図面

- 板厚一定の平板に加工操作が作用する。
- 穴あけ, 切断, 曲げの 3 種類の加工操作が板面に対して逐次的に作用する。
- 上記の加工操作が各板面に再帰的に現れる。

本稿では以下の条件の板金加工物を考える。これらは多くの小型板金加工物によくあてはまる。

- 穴あけ加工と切断加工は板面を垂直に貫通する。
- 曲げ加工は直線分の折り曲げのみである。

この種の板金加工物の 2 次元図面の例を図 1 に示す。上記の条件を満たす板金加工物に対する加工過程モデルは以下の性質を持つ。

- 板厚は一定で板厚部分に加工操作は作用しない。
- 板金加工物は曲げ加工で分けられる複数の平板で構成される。

加工過程モデルに基づいて図 1 の図面を解釈すると図 2 のようになる。板厚部を縮退することにより板金加工物を加工平面の再帰的構造物とみなすことができるので、復元手法を単純化することができる。図 2 の細かい実線は加工線, 太い実線は板厚の縮退線, 破線の丸印は板厚部に現れる曲げ加工を表す。

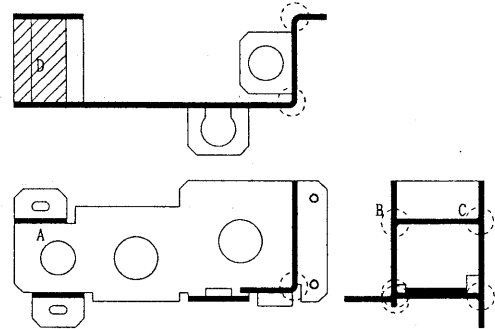


図 2: 加工過程モデルに基づく 2 次元図面の解釈

3.2 加工過程モデルに基づく加工操作の認識

3.2.1 穴あけ加工

図面の板面方向¹に現れる真円, 楕円は貫通穴, 多重円は貫通ネジ穴を表すと判断する。板面の内部を複数の線分から成るループで切断し一部に曲げ加工を施すことがある。この場合は切断加工と曲げ加工の組合せと考える。

ある投影方向に複数の板面が重なっている場合, 図面の板厚方向²に現れる情報を用いて穴あけ加工がどの板面に属するかを判断する。工業図面の板厚方向からの投影線には省略や誤りが含まれることが多い。この場合は多数解となる。

3.2.2 曲げ加工

図面の板面方向に現れる真円, 楕円以外の投影線は切断加工または曲げ加工を表す。曲げ加工に対応する投影線は直線分となる。ある投影図に現れる直線分に対応する曲げ加工の証拠を他の投影図から見つけることができるならば, 板金加工物はその直線分で曲げ加工されていると判断する。

たとえば投影方向が互いに直交する三面図の場合, 正面図の水平線(図 2 の A 部)に対しては側面図に曲げ加工の証拠(同 B, C 部)が現れ, 平面図に曲げ加工された平面(同 D 部)が現れる。また正面図の垂直線

¹板面方向とは板面の法線ベクトルに平行な方向のことをいう。

²板厚方向とは板面の法線ベクトルに垂直な方向のことをいう。

表 2: 加工操作の認識方法

加工操作	投影線	加工操作の認識方法
穴あけ	真円および精円	平面に重なりがなければ穴あけ加工と判断。平面に重なりがあれば板厚方向から加工平面を判断。
曲げ	直線	板厚方向の曲げの証拠と加工後の平面が存在すれば曲げ加工と判断。どの図面の座標軸にも平行でない場合は複数の平面の存在から判断。
切断	直線および曲線	穴あけ加工でも曲げ加工でもなければ切断加工と判断。

に対しては側面図に曲げ加工された平面が現れ、平面図に曲げ加工の証拠が現れる。正面図の斜め線に対しては曲げ加工の証拠は現れないが、側面図および平面図に曲げ加工された平面が現れる。

3.2.3 切断加工

穴あけ加工とも曲げ加工とも判断できない投影線は切断加工を表す。直線分に対応する曲げ加工の証拠を他の投影図から見つけることができなければ、板金加工物はその直線分で切断加工されていると判断する。曲線分も含め、3.2.1 節および 3.2.2 節で述べた以外の投影線は切断加工と判断する。

加工操作と投影線との関係を表 2 にまとめる。

3.3 図法幾何的不正確さに対する強靱性

工業図面に現れる図法幾何的不正確さには孤立端点線分や多重線などの作図上の誤りと論理的な不足や矛盾の 2 種類のものがある。前者は図面の段階で比較的容易に検出し修正することが可能である。しかし後者は復元操作の段階で初めて検出され、モデルを持たない復元手法では判断を自動化することは困難である。

図 1 には板金図面にしばしば見られる論理的な不足と矛盾が含まれている。

- 板厚部に現れるべき穴あけと切断の加工線の省略や誤り。(図 3 の A 部など)
- 板面に現れるべき曲げ加工線の省略や誤り。(同 B 部など)

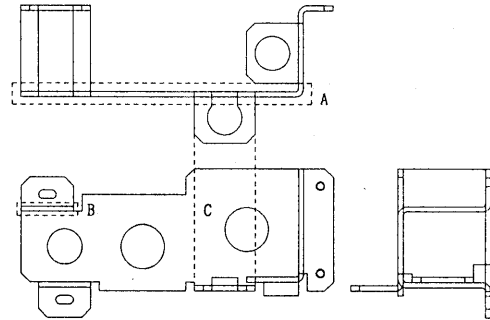


図 3: 図法幾何的な省略や誤り

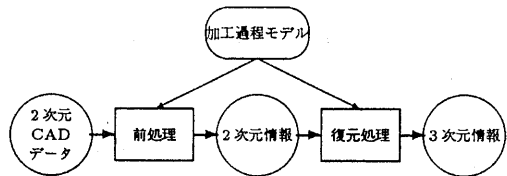


図 4: 処理の概要

- 加工線の図面間での位置ずれ。(同 C 部など)

加工過程モデルを利用する復元では、多数解の生成機能、加工操作の判定における座標誤差の許容機能、部分的証拠からの仮説探知機能などを付加することにより、これらの図法幾何的不正確さへの対処が容易である。

4 立体復元手法

4.1 処理と入力データの概要

図 4 に処理の概要を示す。処理は 2 次元 CAD 図面データを加工過程モデルに基づいて解釈し 2 次元情報を抽出するための前処理と抽出した 2 次元情報から加工過程モデルに基づいて 3 次元情報を復元するための復元処理との 2 段階に分かれる。

前処理では各図面に対して加工過程モデルに基づいて 2 次元 CAD 図面データから以下の 2 次元情報を抽出する。

- 板厚を表す 1 対の平行線を板厚を表す縮退線として抽出する。
- 板厚を表す縮退線の交点に現れる曲げ加工の証拠を抽出する。
- 初等的なグラフアルゴリズムを用いて平面を構成する加工線のループを抽出する。

前処理で抽出した 2 次元情報が復元処理への入力となる。3.1 節で述べたように板金加工物は曲げ加工で分けられる複数の平面板で構成され、それぞれの平面板に穴あけ、切断、曲げの 3 つの加工が再帰的に現れる。復元された板金加工物は図 5 の再帰木構造で表現できる。

4.2 復元アルゴリズムの概要

復元アルゴリズムは再帰的に記述できる。

- (1) ある平面 **Base** の未処理加工線がなくなったら処理を終了する。
- (2) 加工線 **Edge** が 2 次元情報 **Drawings** より穴あけ加工と判断できたら穴あけの情報を再帰木 **Object** のノードに記録したのち、未処理加工線 **Edges** に対して再帰処理を行なう。
- (3) 加工線が 2 次元情報より曲げ加工と判断できたらその曲げ加工線で隣接する平面 **NewBase** を作成し曲げ加工の情報を再帰木のノードに記録したのち、未処理加工線および隣接する平面上の加工線 **NewEdges** に対して再帰処理を行なう。
- (4) 2 次元情報より穴あけ加工とも曲げ加工とも判断できない加工線は切断加工とみなし切断情報を再帰木のノードに記録したのち、未処理加工線に対して再帰処理を行なう。

対応する prolog 文を以下に示す。

% 1. 処理の終了

```
recover(Object,Drawings,Base,[]):-
    Object = [ [],[],[],[],[] ].
```

% 2. 穴あけ加工

```
recover(Object,Drawings,Base,[Edge|Edges]):-
```

```
    recover_hole(Object,Drawings,Base,Edge,
        Object1),
    recover( Object1,Drawings,Base,Edges ).
```

% 3. 曲げ加工

```
recover(Object,Drawings,Base,[Edge|Edges]):-
    recover_bend(Object,Drawings,Base,Edge,
        Object1,Object2,NewBase,NewEdges),
    recover(Object2,Drawings,NewBase,NewEdges),
    recover(Object1,Drawings,Base,Edges).
```

% 4. 切断加工

```
recover(Object,Drawings,Base,[Edge|Edges]):-
    recover_cut(Object,Drawings,Base,Edge,
        Object1),
    recover(Object1,Drawings,Base,Edges).
```

5 実験

5.1 前処理

2 次元 CAD 図面データに含まれる寸法線、中心線、注釈などの投影線以外の情報と孤立端点線分や多重線などの作図上の誤りはあらかじめ除去されているものとした。またそれぞれの図面の投影方向は既知とした。図 1 の正面図を前処理して得た 2 次元情報の一部を図 6 に示す。情報の表現形式には述語を用いた。

5.2 復元処理

図 6 の 2 次元情報から復元した 3 次元情報の一部を図 7 に示す。本実験の復元結果はソリッドモデルではない。ソリッドモデルを作成するためには、3 次元ソリッドモデルのプログラムインターフェースを用いて各平面の情報を板厚の高さで平行掃引し集合演算を行なうことになる。図 7 の 3 次元情報のワイヤフレーム表示を図 8 に示す。

6 まとめ

- これまで困難であった工業図面からの立体復元を目的として、新たに加工過程モデルを利用するトップダウン的な立体復元の考え方を提案した。

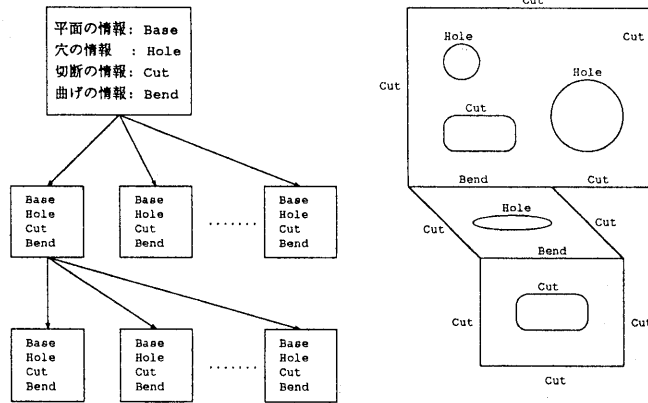


図 5: 板金加工物の立体復元結果を表す再帰木構造

% 正面図には 4 つの平面が存在する.

```
number_of_plates( front, 4 ).
plate( front,1, rectangle([[ 0.0,12.5,_ ],[ 160.0,85.0,_ ]]) ).
plate( front,2, rectangle([[ 0.0,60.0,_ ],[ 30.0,80.0,_ ]]) ).
plate( front,3, rectangle([[ 10.0,0.0,_ ],[ 40.0,20.0,_ ]]) ).
plate( front,4, rectangle([[ 160.0,15.0,_ ],[ 180.0,85.0,_ ]]) ).
```

% 正面図の平面 1 は 32 本のエッジで構成される.

```
number_of_edges( front, 1, 32 ).
edge( front,1,1, line([[0,0,1],[0,1,0],[1,0,0],[0,0,25.0,_],[0,0,60.0,_]]) ).
edge( front,1,2, line([[0,0,1],[1,0,0],[0,-1,0],[0,0,60.0,_],[30.0,60.0,_]]) ).
edge( front,1,3, line([[0,0,1],[1,0,0],[0,-1,0],[30.0,60.0,_],[35.0,60.0,_]]) ).
edge( front,1,4, line([[0,0,1],[0,1,0],[1,0,0],[35.0,60.0,_],[35.0,70.0,_]]) ).
edge( front,1,5, line([[0,0,1],[1,0,0],[0,-1,0],[35.0,70.0,_],[95.0,70.0,_]]) ).
edge( front,1,6, line([[0,0,1],[0,1,0],[1,0,0],[95.0,70.0,_],[95.0,80.0,_]]) ).
(途中省略)
edge( front,1,29,circle([[0,0,1],_,-,[25.0,40.0,_],10,0]) ).
edge( front,1,30,circle([[0,0,1],_,-,[70.0,40.0,_],12.5]) ).
edge( front,1,31,circle([[0,0,1],_,-,[130.0,65.0,_],12.5]) ).
edge( front,1,32,line([[0,0,1],[-1,0,0],[0,1,0],[135.0,15.0,_],[100.0,15.0,_]]) ).
```

% 正面図には 1 つの曲げの証拠が存在する.

```
number_of_bends( front, 1 ).
bend( front,1, bend_point([[160.0,17.5,_ ],[ 0,1,0 ],[ -1,0,0 ],[-0.5 ]]) ).
```

% 正面図には 5 つの板厚を表す縮退線が存在する.

```
number_of_degeneracies( front, 5 ).
degeneracy( front,1, line([[0.0,60.0,_],[30.0,60.0,_]]) ).
degeneracy( front,2, line([[10.0,20.0,_],[40.0,20.0,_]]) ).
degeneracy( front,3, line([[160.0,17.5,_],[160.0,85.0,_]]) ).
degeneracy( front,4, line([[130.0,17.5,_],[160.0,17.5,_]]) ).
degeneracy( front,5, line([[100.0,15.0,_],[135.0,15.0,_]]) ).
```

図 6: 2次元 CAD データを前処理した 2次元情報

```

% 平面の情報
Base = [origin(0,0,50),160,72.5,normal(0,0,1)]
% 穴あけ加工の情報
Hole = [[circle([[0,0,1],--, [25,40,50],10]]),
        [circle([[0,0,1],--, [70,40,50],12.5]]),
        [circle([[0,0,1],--, [130,65,50],12.5]])]
% 切断加工の情報
Cut = [[line([[0,0,1], [0,1,0], [1,0,0], [0,25,50], [0,60,50]])),
        [line([[0,0,1], [1,0,0], [0,-1,0], [30,60,50], [35,60,50]])),
        [line([[0,0,1], [0,1,0], [1,0,0], [35,60,50], [35,70,50]])),
        [line([[0,0,1], [1,0,0], [0,-1,0], [35,70,50], [95,70,50]])),
        [line([[0,0,1], [0,1,0], [1,0,0], [95,70,50], [95,80,50]])),
(以下省略)
% 曲げ加工の情報
Bend = [[line([[0,0,1], [1,0,0], [0,-1,0], [0,60,50], [30,60,50]])),
        [line([[0,0,1], [0,-1,0], [-1,0,0], [160,85,50], [160,20,50]])),
        [line([[0,0,1], [-1,0,0], [0,1,0], [40,20,50], [10,20,50]])),
        [line([[0,0,1], [-1,0,0], [0,1,0], [135,15,50], [100,15,50]]))]

```

図 7: 2次元情報から復元した3次元情報

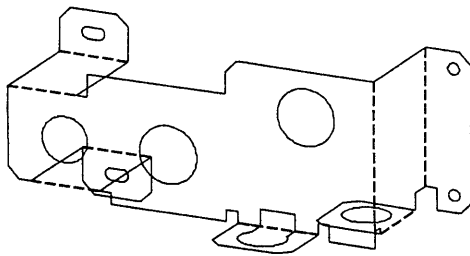


図 8: 復元結果のワイヤフレーム表示

- このモデルに基づき板金加工物の工業図面から3次元情報を復元する手法を示し、実験により有効性を確認した。

参考文献

- [1] 出澤: 三面図から立体形成のためのシステム, 日本機械学会論文集, Vol.38, No.310, pp1267-1276 (1970).
- [2] G.Markowsky and M.A.Wesley: Fleshing Out Wire Frames, IBM J. Res. Develop., Vol.24, No.5, pp582-597 (1980).
- [3] G.Markowsky and M.A.Wesley: Fleshing Out Projections, IBM J. Res. Develop., Vol.25, No.6, pp935-954 (1981).
- [4] H.Sakurai and D.C.Gossard: Solid Model Input through Orthographic Views, ACM Computer Graphics, Vol.17, No.3, pp243-252 (1983).
- [5] H.Yoshiura, K.Fujimura and T.Kunii: Top-Down Construction of 3-D Mechanical Object Shapes from Engineering Drawings, IEEE Computer, Vol.17, No.12, pp32-40 (1984).
- [6] Z.Chen and D.Perng: Automatic Reconstruction of 3D Solid Objects from 2D Orthographic Views, Pattern Recognition, Vol.21, No.5, pp439-449 (1988).
- [7] 佐々木, 伊藤, 鈴木: 三面図からの物体自動合成のための線形擬似プールの代数解法, 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.12, pp1288-1297 (1987).
- [8] 佐々木, 伊藤, 鈴木: 非線形擬似プールの代数解法による三面図からの物体自動合成, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.6, pp699-708 (1989).
- [9] 西原, 渡辺, 池田: 面間の局所的拘束関係を用いた三面図解釈, 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.5, pp534-537 (1987).
- [10] 西田, 張, 西原: 面の組合せ探索による三面図の解釈, 人工知能学会誌, Vol.6, No.1, pp96-104 (1991).
- [11] U.G.Gujar and I.V.Nagendra: Construction of 3D Solid Objects from Orthographic Views, Comp. & Graphics, Vol.13, No.4, pp505-521 (1989).
- [12] 田中: 立体要素連立式による三面図からの自動立体作成, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.9, pp1956-1965 (1993).
- [13] Q.Yan, C.L.P.Chen and Z.Tang: Efficient algorithm for the reconstruction of 3D objects from orthographic projections, Computer-Aided Design, Vol.26, No.9, pp699-717 (1994).
- [14] 横山, 河上: 三面図から曲面を含む立体の自動生成, 日本機械学会論文誌(C編), Vol.56, No.526, pp174-179 (1990).
- [15] 千田: 三面図からもとの立体の自動復元, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.9, pp1312-1320 (1990).
- [16] 千田: 三面図からもとの立体の自動復元, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.9, pp1122-1128 (1991).
- [17] 渡辺, 田代, 藤井: 矛盾を含んだ三面図情報からの物体の推定, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.11, pp2320-2330 (1994).
- [18] 田村, 梅澤, 狩野, 西原: 省略の含まれる三面図からの3次元モデルの復元, 情報処理学会 グラフィックスとCAD研究会資料, 75-3, pp17-24 (1995).