

## 安定姿勢における形状対称性を用いた能動的 3 次元形状推定 ——機能から形状を推定するアプローチ

田中 士郎<sup>†</sup>, 西村 憲吾<sup>†</sup>, 田中 弘美<sup>†</sup>

3次元物体モデルの自動獲得は、従来よりコンピュータビジョン研究の重要な目標とされてきた。本論文では、物体の安定姿勢における3次元形状の対称性に基づいて、観測視点を自動的にかつ再帰的に選択し、能動視覚システムにより獲得された多視点カラー画像を用いて対象の3次元物体モデルを生成する能動的3次元形状推定法を提案する。本手法は、「機能からの形状を推定するアプローチ」に基づいており、実世界の重力下に置かれた物体が機能するために最も重要な「作用される荷重（外力）に対する姿勢の安定度」を、形状の面对称性に基づいて複数視点から観測・評価することにより物体の3次元形状を推定する。まず、外力である重力に対する安定度を評価するために鉛直上方より対象物体を観測し、鉛直方向からのシルエット像の対称軸を抽出する。次に、抽出された対称軸と観測方向を用いて対称面を推定し、対称面への投影像を得るための次観測点を導き出す。さらに得られた多視点画像の視線とシルエット像を、それぞれ中心軸と切断面とする直方一般化円筒の集合積から対象物体の3次元形状を復元する。模型自動車と鳥の置物を用いた実験結果から、曲面を含む有穴物体の3次元形状復元における提案手法の有効性を確認した。

## Active Shape Inferring Based on the Symmetry in Stable Poses ——Shape from Function Approach

SHIRO TANAKA,<sup>†</sup> KENGO NISHIMURA,<sup>†</sup> and HIROMI T. TANAKA<sup>†</sup>

We develop a new algorithm for reconstructing the 3D shapes of objects from multiview images which are automatically acquired based on the symmetry in stable poses. Our approach is based on “Shape from function” approach. That is, shape is inferred by observing and estimating “the stability in stable poses”, which is the most fundamental condition for objects to be functioning in the real world. Based on that assumption, we first observe the object from the vertical top and estimate a plane of symmetry using the center of gravity and the symmetrical axis of the silhouette in the top view image. We then estimate the next viewpoints, from which the estimated symmetry are examined with silhouettes obtained as projections on the estimated plane of symmetry. By executing this symmetry estimation-examination processes recursively, we reconstruct the 3D shape of the object as a product of Straight Homogeneous Generalized Cylinders (SHGCs) whose cross section and the axis direction are constrained from the silhouette at each viewpoint and the viewing direction respectively, by using octree representation or a CAD system. Experimental results show that the effectiveness of the approach in reconstructing the 3D shape of object.

### 1. はじめに

シーンは多くの人工物から構成されており、人工物は有用なモノとして人に使われるために作られている。この有用なモノとは機器、建造物や、自動車、船、飛行機等の動く乗り物など、どのような3次元構造物で

あっても、目的に応じた種々の形（形態）を持ち、それらの形はその有用性からくる働き（機能）と強く関係している。また、有用なモノであるためには「強さ」が備えられなくてはならない。つまり、多くのモノは、作用される荷重（外力）に対して、所定の「強さ」を保持することを主機能としている<sup>1)</sup>。したがって、実世界の重力場において「強さ」を主機能として持つ物体、つまり人工物をはじめ人間や動物等を含む自然物体、の「形」を力学的な観点から観測することは、物体の形状復元や形状モデリングに有効である。

従来より、人工物の設計・生産過程において、その立体形状は製図法に基づいてCADシステムにより描

<sup>†</sup> 立命館大学理工学部情報学科

Department of Computer Science, Ritsumeikan University

現在、株式会社コナミ

Presently with Conami Inc.

現在、株式会社松下電器産業

Presently with Matsushita Electric Inc.

かれた三面図の形式で表現されてきた．三面図は 2次元平面状で立体を表現するために有効な手法であり，物体形状が水平面に投影された平面図，直立面に投影された正面図，水平面と直立面に投影された側面図から構成される．これらは実世界の重力場で有用な働き（機能）をするための，荷重条件や支持条件などの力学的条件に応じた，人工物の 3次元形状と姿勢を最も効率的に，かつ，完全に表現したものである．

三面図から立体形状（3次元モデル/ソリッドモデル）を自動的に復元する方法がこれまで多く研究されている<sup>2)~6)</sup>．しかし，三面図を得るために必要な視点は人手を介して与えられている<sup>7),8)</sup>．

本論文では，物体の安定姿勢における 3次元形状の面对称性に基づいて，観測点を自動的かつ再帰的に選択し，能動視覚システムにより獲得された多視点カラー画像から物体の 3次元物体モデルを再構成する方法を提案する．本手法は「機能から形状を推定するアプローチ」に基づいており，実世界の重力場において物体が機能するために重要な「外力に対する姿勢の安定性」を，形状の面对称性に基づいて複数視点から観測・評価する．得られた多視点画像の視線とシルエット像をそれぞれ中心軸と切断面とする直方一般化円筒の集合積から対象物体の 3次元形状を復元する．さらに，各観測画像のシルエット領域の画像データを，テクスチャとして投影することによりリアリティーの高い 3次元モデルを自動獲得する．

したがって，本アルゴリズムにより物体が水平面上に上下正しく安定な姿勢に置かれ，少なくとも 1つの鉛直な対称面が存在すれば，不可視な穴と凹部分を除く物体全表面を最も効率的に観測した，最小の直交する多視画像を自動的に獲得することが可能である．これらは，三面図の平面図，正・背面図，左・右側面図に相当する．さらに任意の傾きの斜面が対称面である場合も，これに平行な実形を表す投影画像を獲得することが可能である．

模型自動車と鳥の置物を用いた実験結果から，曲面を含む有穴物体の 3次元形状復元における提案手法の有効性を確認した．

## 2. 機能するための安定姿勢と 3次元形状の対称性

物体が機能するためには，外力の作用に対して所定の強さを保持し，安定な「形」と姿勢を保つことが重要である．つまり物体が，外力が働く方向を含む面に対して対称性を持つ可能性が高い．したがって，物体には外力である重力が作用しているため，安定姿勢に

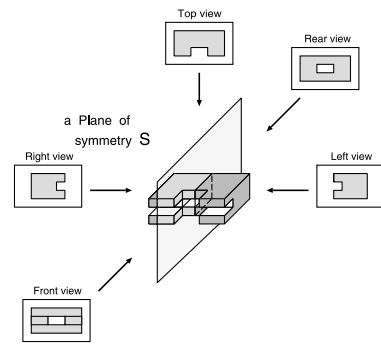


図 1 鉛直上方からの対象物体の観測  
Fig. 1 Observation of an object from vertical top.

置かれている場合は，重力方向を含む面に対して対称性を持つと考えられる<sup>9)</sup>．また，物体が複数の対称面を持つ場合は，それぞれの対称面が重力方向を含むように置き換えられれば，それぞれの安定姿勢を得ることが予想される．

以上より，本研究では，室内シーンに存在する人工物（以下，物体）を対象とし，以下を前提条件とする．

- 水平面上に，上下正しく安定な姿勢で置かれている．
- 少なくとも 1つの鉛直な対称面が存在する．

本研究では，これらの前提条件から，3次元形状復元に有効な観測視点を推定し，物体を観測する．

## 3. 物体の観測

本研究では，安定姿勢における物体の形状対称性に基づいて，観測点を自動的かつ再帰的に選択する．図 1 に示すように，物体は重力方向に 1つ以上の対称面を持つものとして，はじめに鉛直上方より観測し，対称面を推定する．推定された対称面を効果的に検証し，同時に，形状復元に有効な投影画像を獲得するために，次観測点を再帰的に選択し，観測を行う．同時に選択された観測点の履歴が記録され，観測の重複を避ける．以上の処理を物体に存在する対称面がすべて抽出され，観測点が尽きるまで繰り返し行う．図 2 にそのプロセスを示す．

### 3.1 対称軸の推定

鉛直上方からの観測点  $P_{top}$  より獲得された画像  $I_{top}$  において，2 値化により抽出された物体のシルエット領域（以下シルエット像と記す） $R_{top}(x, y)$  の重心  $G_{top} = (mx, my)$  は式 (1)，式 (2) により表される．

$$mx = \frac{\sum \sum x R_{top}(x, y)}{\sum \sum R_{top}(x, y)} \quad (1)$$

$$my = \frac{\sum \sum y R_{top}(x, y)}{\sum \sum R_{top}(x, y)} \quad (2)$$

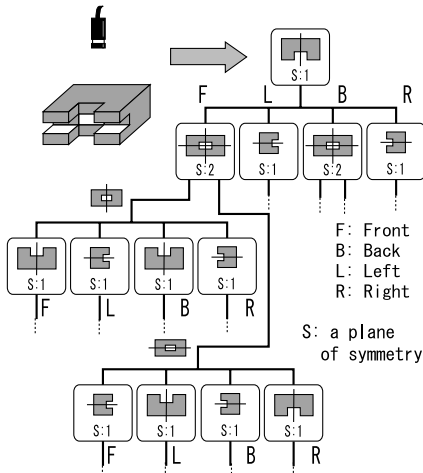


図 2 再帰的多視点画像獲得

Fig.2 Recursive algorithm for multi-view acquisition.

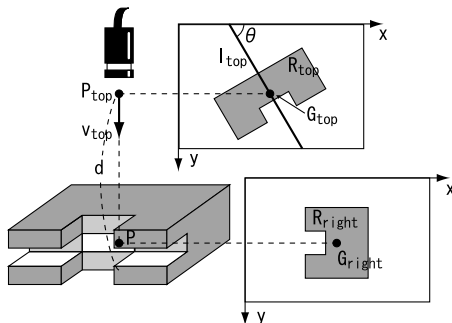


図 3 領域重心を用いる注視点の決定  
Fig.3 A focal point fixation.

ただし、 $R_{top}$  内の画素値を  $R_{top}(x, y) = 1$  とする。つまり、 $G_{top}$  は  $R_{top}$  に含まれる各点の  $x, y$  座標の総和を  $R_{top}$  内の総点数で割った値となる。

ここで、図 3 に示すように、鉛直上方からの観測点  $P_{top}$  を  $G_{top}$  が画像中心となるように設定する。

次に、 $I_{top}$  において  $G_{top}$  を通過する対称軸  $l_{top}$  を慣性モーメントを用いて、 $R_{top}$  の等積楕円の長軸（および短軸）方向として推定する。 $l_{top}$  と  $x$  軸の成す角度  $\theta$  は式 (3) で表される（図 3）。

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 4}}{2} \right\} \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{m_{xx} - m_{yy}}{m_{xy}}$$

$$m_{xx} = \sum \sum (x - m_x)^2 R_{top}(x, y)$$

$$m_{xy} = \sum \sum (x - m_x)(y - m_y) R_{top}(x, y)$$

$$m_{yy} = \sum \sum (y - m_y)^2 R_{top}(x, y)$$

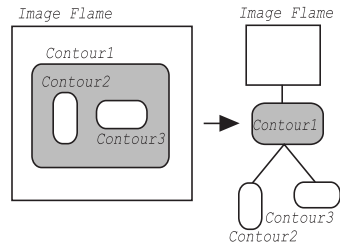


図 4 符号付き動的輪郭モデルにより検出された穴領域の位相関係  
Fig.4 Topological relation of holes in object's silhouette estimated by using active contour models.

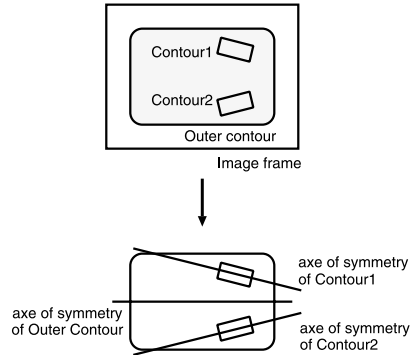


図 5 穴領域を含む対象物体領域の対称軸推定

Fig.5 Estimating an axis of symmetry from object's silhouette with holes.

### 3.2 シルエット輪郭と対称軸の抽出

次に、形状復元のための  $R_{top}$  のシルエット像を抽出するために、我々が提案した分裂・増殖型の符号付き動的輪郭モデル (Signed Snakes)<sup>13)</sup> を用いる。図 4 に示すように、Signed Snakes は入力画像の穴領域を含んだすべての複数領域の輪郭を外輪郭から順次、内部輪郭へ階層的に抽出し、さらに輪郭間の位相構造を抽出することが可能である。また、図 5 に示すように、抽出された穴どうしの階層的な位相関係から、それぞれの穴輪郭形状とともに穴領域間の対称性と外輪郭の対称性を統合し、安定に対称軸を抽出することができる。

3.1 節で推定された対称軸候補は、1)  $R_{top}$  のシルエット形状に基づいておらず、また、2) すべての対称軸候補が抽出されない。そこで、3.1 節で推定された対称軸を、シルエット像の輪郭形状解析により検証する。さらに、これらのシルエット像と穴領域の輪郭形状に基づき、安定な特徴点を用いてすべての対称軸の抽出を行う。対称軸は以下の 3 つのステップから抽出される。

Step 1) 特徴点抽出：Signed Snakes の各制御点において曲率を算出する。輪郭線全体の曲率のヒ

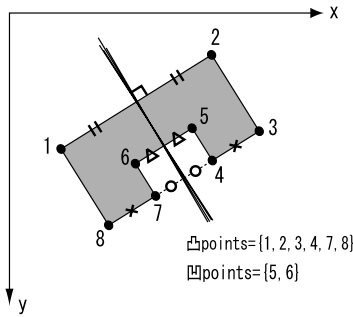


図 6 対称軸の抽出

Fig. 6 Extraction of an axis of symmetry.

ストグラムを生成し，物体の形状に応じて自動的に閾値を選択する．閾値より高い曲率の制御点を特徴点として抽出する．

Step 2) 特徴点の対応：曲率の符号と大きさを用いて特徴点を対応付ける（図 6）．

Step 3) 対称軸集合の抽出：Hough 変換を用いて対応する特徴点間の垂直二等分線から対称軸集合  $L_{top} = \{l_{topj} | 1 \leq j \leq n\}$  を抽出する．

各対称軸  $l_{topj} \in L_{top}$  (以下,  $l_{top}$  と記す) は  $G_{top}$  を通り, 傾きを  $l_{\theta topj}$  (以下,  $l_{\theta top}$ ) とする水平面に平行な直線である．

### 3.3 対称面の推定

図 7 に示すように, 鉛直上方  $v_{top}$  から観測されたシルエット像  $R_{top}$  の各対称軸  $l_{top}$  の傾き  $l_{\theta top}$  と重力方向の観測方向ベクトル  $v_{top}$  を用いることにより, 各対称面  $S_{top}$  を,  $l_{top}$  を含む, 法線  $n_{top}(= l_{\theta top} \times v_{top})$  の直立な平面として推定する．

### 3.4 次観測点の選択

$v_{top}$  から観測したシルエット像  $R_{top}$  の 2 次元形状対称性に基づいて, 1) 3 次元形状の面对称性を効果的に観測し, 同時に, 2) 3 次元形状復元に有効な直交するシルエット像を獲得するように, 次観測点を選択する．

まず, 注視点  $P$  を求める．図 3 と図 7 に示すように,  $G_{top}$  を通り  $S_{top}$  と直交する直立面上で半径  $d$  ( $=P_{top}$  の高さ) の円弧上にカメラを下方に移動し物体を観測する．得られた画像  $l_{right}$  のシルエット像  $R_{right}$  の重心  $G_{right}$  を抽出し, さらに,  $G_{right}$  が画像中心になるように  $P_{right}$  を設定する． $G_{top}$  を通る鉛直線と  $G_{right}$  を通る水平線との交点を注視点  $P$  とする．

次に, 図 7 に示すように,  $P$  を通り  $S_{top}$  に直交する直線上に注視点  $P$  に関して  $R_{right}$  と距離  $d$  で相対する  $P_{left}$  と,  $S_{top}$  に沿って, 水平面に平行な

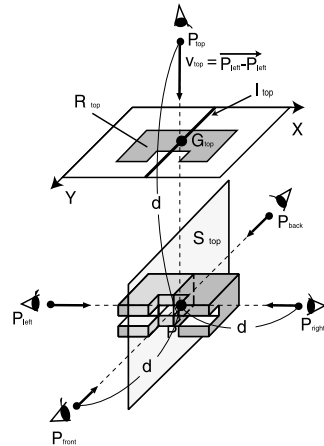


図 7 対称面の推定

Fig. 7 Estimating a plane of symmetry.

直線上で,  $P$  に関して, 距離  $d$  で相対する前後 2 点  $P_{front}$ ,  $P_{back}$  の計 4 点を次観測点として選択する．

これは, 1)  $P_{left}$ ,  $P_{right}$  から観測されるシルエット像から形状復元のための左・右側面の断面輪郭と表面テクスチャを獲得するためである．また, 2)  $P_{front}$ ,  $P_{back}$  から観測されるシルエット像から,  $P_{left}$  と  $P_{right}$  から観測不可能な 3 次元形状の面对称性の検証し, 同時に形状復元のための正面と背面の断面輪郭と表面テクスチャを獲得するためである．

次観測点  $P_{front}$ ,  $P_{back}$ ,  $P_{right}$ ,  $P_{left}$  における観測方向ベクトル  $v_{front}$ ,  $v_{back}$ ,  $v_{right}$ ,  $v_{left}$  は式 (4), 式 (5) で表される．

$$v_{front} = -v_{back} = -l_{\theta top} \tag{4}$$

$$v_{right} = -v_{left} = -n_{top} \tag{5}$$

また, 観測方向ベクトル  $v_{front}$ ,  $v_{back}$ ,  $v_{right}$ ,  $v_{left}$  と注視点  $P$ , および観測点の注視点との距離  $d$  より次観測点  $P_{front}$ ,  $P_{back}$ ,  $P_{right}$ ,  $P_{left}$  は式 (6) で表される．

$$P_{front, rear, right, left} = P - d v_{front, right, rear, left} \tag{6}$$

### 3.5 3 次元形状の対称性と安定性の検証

$P_{front}$  (あるいは  $P_{back}$ ) から観測されたシルエット像  $R_{front}$  (あるいは  $R_{back}$ ) から  $v_{top}$  方向の鉛直な対称軸が抽出されれば, 以下が検証される．

- 1) 3 次元形状が  $S_{top}$  に対して面对称性を持つことが検証される．したがって, 物体の全表面を, 最少の直交する 5 視点  $P_{front}$ ,  $P_{back}$ ,  $P_{right}$ ,  $P_{left}$  のみから観測することが可能である．これらの観測視点は三面図の平面図, 正面図 (& 背面図), 右側面図 (& 左側面図) を得る視点

と一致する．

- 2) 物体が対称面  $S_{top}$  に沿った鉛直上方からの外力に対して，所定の「強さ」を保持し，水平な支持面上で安定な形状と姿勢を保つ可能性が高い，また，
- 3) 物体が動く構造物であれば， $S_{top}$  に沿った前後方向からの外力に対して， $S_{top}$  に沿って安定に移動，つまり直進する可能性が高い．

1) により，獲得された直交 5 視点画像により不可視な穴や凹部分を除く物体の 3 次元形状が復元されることが保証される．また 2) と 3) は，物体の力学的構造や特性を抽出するためのロボットによる接触操作の制御に有効に用いることができる<sup>14)~16)</sup>．

#### 4. 3 次元形状の再構成

各視点の観測方向と獲得された画像のシルエット領域の輪郭形状を用いて物体の 3 次元形状を復元する．CAD システムに，観測方向ベクトルとシルエット領域の輪郭形状データを入力し，それぞれを中心軸と切断面とする直方一般化円筒状のソリッドモデルを生成する．ただし，本手法では，カメラと物体間の距離が十分にあるとし，入力画像を正射影画像として扱っている．各視点画像の 2 次元輪郭線データは観測視点情報を用いて 3 次元座標データに変換し，さらに，CAD データフォーマットの dxf 形式に変換したうえで CAD システムに入力する．

まず観測点  $P_i$ ，観測方向  $v_i$  から得られた画像平面の  $x$  軸， $y$  軸のベクトルを  $v_x$ ， $v_y$  とし，画像中心を  $g = (g_x, g_y)$  とする．このとき，輪郭線上の点  $p = (p_x, p_y)$  は，CAD の 3 次元空間において， $P_c$  として表される．

$$P_c = v_x(p_x - g_x) + v_y(p_y - g_y) + P_i \quad (7)$$

図 8 に示すように，さらに多視点それぞれのシルエット輪郭線と観測方向から直方一般化円筒集合を生成し，CAD システムのソリッドモデルの集合積演算により，対象物体の 3 次元形状を復元する．

#### 5. アルゴリズム

以下に，本手法のアルゴリズムを示す．まず，最初の観測点  $P_i$  と観測方向  $v_i$  を鉛直上方からとし，物体の 3 次元形状  $V_{i-1}$  を空間全体と初期設定  $\{P_i = P_{top}, v_i = v_{top}, V_{i-1} = V_{all}, i = 0\}$  する．ただし， $P_i$ ， $v_i$  は  $i$  番目の観測視点と観測方向を表す．また， $V_i$  は， $i$  番目の観測終了後の物体の推定 3 次元形状を表すグローバル変数である． $V_{all}$  は空間全体を表す．

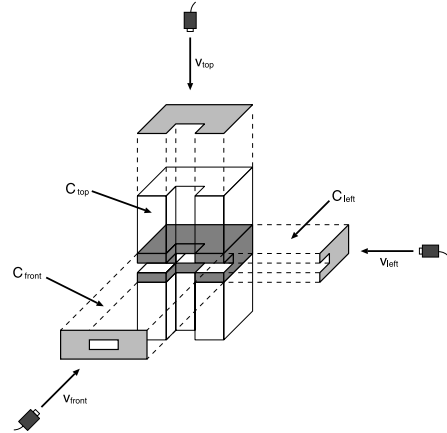


図 8 3 次元形状の復元

Fig. 8 Estimating the object shape.

以下の Step1 ~ Step8 を再帰的に呼び出す．

- Step 1) カメラを与えられた観測点  $P_i$  観測方向  $v_i$  へ移動させる．
- Step 2) 物体の画像  $I_i$  を獲得する．
- Step 3) 2 値化された画像  $BI_i$  より物体のシルエット像  $R_i$  を抽出する．
- Step 4)  $P_i$  を通り  $v_i$  方向の視線と  $R_i$  を，それぞれ中心軸と切断面とする直方一般化円筒  $V_i$  を推定する．
- Step 5) 物体の 3 次元形状  $V_i$  を，前回までの推定 3 次元形状  $V_{i-1}$  との集合積  $V_i = V_{i-1} \cap V_i$  として算出する．ただし， $V_{i-1} = V_{-1} \cap V_0 \cap V_1 \cap \dots \cap V_{i-1}$ ．
- Step 6)  $R_i$  のすべての対称軸  $L_i = \{l_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$  を抽出する(ただし， $l_{ij}$  の傾きを  $l_{\theta ij}$  とする)．さらに  $L_i$  を含む対称面集合  $S_i$  を初期化する( $S_i = \phi$ )．もし対称軸が抽出されなければ， $L_i = \phi$ ， $S_i = \phi$  を戻り値として処理を終了する．
- Step 7) すべての  $l_{ij} \in L_i$  について Step 7.1 ~ Step 7.3 を繰り返す．
  - Step 7.1)  $l_{ij}$  を含み，法線  $n_{ij} = v_i \times l_{\theta ij}$  となる対称面  $S_{ij}$  を推定し， $S_{ij}$  より 4 つの次観測点  $\{P_{ijk} \mid k = front, right, back, left\}$  と各次観測点における観測方向ベクトル  $\{v_{ijk} \mid k = front, right, back, left\}$  を導出し，単位球上に，観測済視線方向として写像する．
  - Step 7.2)  $\{(P_{ijk}, v_{ijk}) \mid k = front, right, back, left\}$  のそれぞれに対して，過去に選択済みでなければ，Step 1 ~ Step 8 の再帰処理を呼び

出す．過去に選択済みであれば， $L_i$  から  $l_{ij}$  を削除する．ただし，観測方向の同一性の判断基準は  $30^\circ$  以内とした．

Step 7.3)  $P_{ijfront}$  (あるいは  $P_{ijback}$ ) からのシルエット像  $R_{ijfront}$  (あるいは  $R_{ijback}$ ) から  $v_i$  方向の対称軸が抽出されれば， $S_{ij}$  を対称面として抽出する ( $S_i = S_i \cup S_{ij}$ ).

Step 8) 抽出された対称軸  $L_i$  集合と対称面  $S_i$  集合を戻り値として処理を終了する．

5.1 アルゴリズムの有効性と完全性

本アルゴリズムは，安定姿勢における 3 次元形状の対称性に基づき，次観測視点を導出している．これは製図法において，設計する立体に左右対称性があり左・右側面図，正面・背面図が同型になる場合の三面図を獲得する視点を自動的に選択することに等しい．

さらに，再帰的に選択された観測視点方向から抽出された対称軸が，水平・直立両投影面に実形が現れない斜面を表す場合も，これに平行な実形を表す副投影面を得るための視点を自動的に選択することを示す．

したがって，本アルゴリズムにより，

- 物体が水平面に上下正しく安定な姿勢に置かれ，少なくとも 1 つの直立な対称面が存在すれば，不可視な穴と凹部分を除く物体全表面を最も効率的に観測した直交する 5 視点画像を自動的に獲得することが可能である．
- さらに任意の傾きの斜面が対称面である場合も，これに平行な実形を表す投影画像を獲得することが可能である．しかし，
- いずれかの観測視点からの形状対称性に関係しない視点は選択されない．

また，本アルゴリズムの形状復元法は，

- 対象物体を多視点からのシルエット輪郭形状に基づいて凸物体を復元している．そのため，
- 観測視点からシルエット輪郭線に沿って抽出された凹形状を除いては，各視点から観測されない凹や穴部分は復元されない．

以上より，本アルゴリズムは多くの人工物のように，安定姿勢において面对称性を持つ凸物体に対しては有効であるが，凹部分や穴が観測されない限り，その形状は完全に復元されない．

6. 実験結果

三菱電機製ロボットマニピュレータ (RV-E2) に東芝製の CCD カメラ (IK-C40) を搭載し，安定姿勢における対象物体の観測を行った．ロボットの制御には DELL 社の PC を使用した．CAD による 3 次元形状

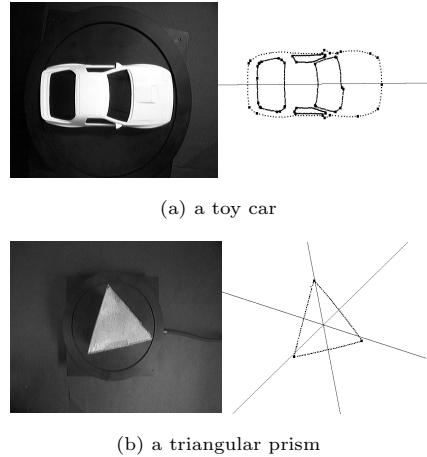


図 9 対称軸抽出結果  
Fig.9 Experimental results (axes of symmetry).

モデリングのために AUTODESK 社の AUTOCAD R14 を使用した．

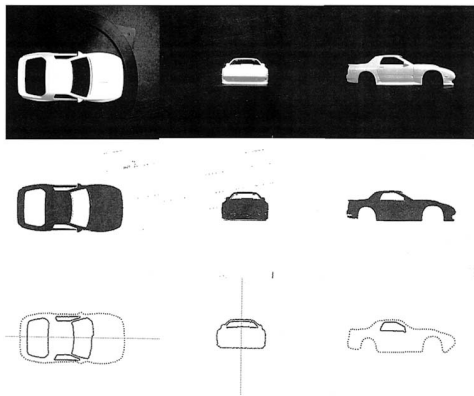
図 9 に対称軸の抽出結果を示す．抽出精度は  $\pm 10^\circ$  以内とした．対象物体として，対称軸が複数存在する三角柱の箱と穴のある模型自動車，また鳥の置物を用いた．模型自動車と三角柱の箱のシルエット輪郭線から，それぞれ 1 本と 3 本の対称軸が抽出された．

図 10(a) に，能動的に自動獲得された模型自動車の平面，背面，左側面図の直交多視点画像と，その 2 値画像および符号付動的輪郭モデルにより抽出されたシルエット輪郭および穴輪郭を示す．図 10(b) に分裂・増殖型の符号付き動的輪郭モデルにより抽出された領域間の位相階層木を示す．ルートノード，第 1 階層ノード，第 2 階層ノードは，それぞれ各視点の画像枠，シルエット領域の閉輪郭 (外形輪郭)，および穴輪郭を示す．Top view からは前後・左右の窓の 4 つの穴輪郭が抽出され，また，Back view から後ろの窓の穴輪郭が抽出され，対称軸の抽出に有効に用いられた．図 10(c) に CAD システムにより生成した 3 次元モデリングの結果を，図 10(d) に OpenGL を用いてテクスチャを貼り付けた 3 次元形状モデルの出力結果を示す．同様に，図 11 に穴のある複雑な形状の鳥の置物を用いた実験結果を示す．

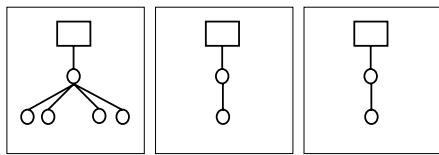
いずれの実験結果からも，3 次元形状復元に有効な三面図に相当する直交多視点画像が  $\pm 10^\circ$  以内の傾き誤差の精度で自動獲得されたことが確認できた．

7. 結論

物体の安定姿勢における 3 次元形状の面对称性に基づいて，観測視点を自動的にかつ再帰的に選択し，獲得

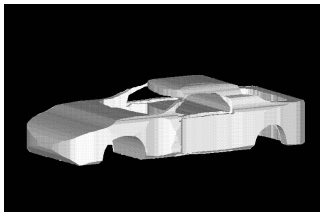


(a) Multi-View image and Region contours

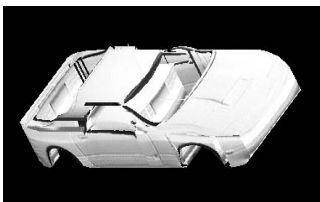


Top view      Back view      Left view

(b) Topological relation of all regions contours



(c) CAD model

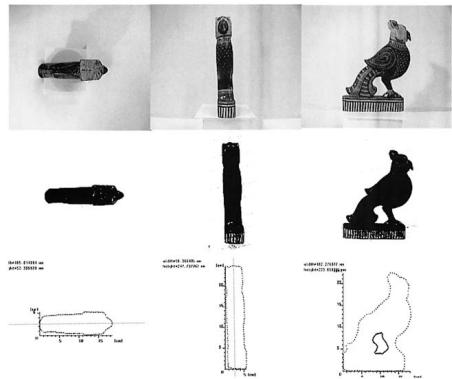


(d) Texture-mapped CAD model

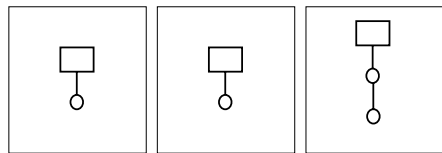
図 10 実験結果 (模型自動車)

Fig.10 Experimental result (a toy car).

された多視点カラー画像を用いて、対象の3次元物体モデルを生成する、能動的3次元形状推定法を提案した。本手法は、「機能からの形状を推定するアプローチ」に基づいており、実世界の重力下に置かれた物体が機能するために最も重要な「外力に対する姿勢の安定度」を、形状の面对称性に基づいて複数視点から観測・評価することにより物体の3次元形状復元に有効な、三面図に相当する直交多視点画像を自動獲得した。模型自動車と鳥の置物を用いた実験結果から、曲面を含む有穴物体の3次元形状復元における提案手法の有

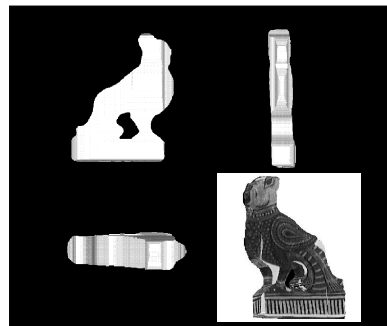


(a) Multi-View image and Region contours



Top view      Back view      Left view

(b) Topological relation of all regions contours



(c) CAD model



(d) Texture-mapped CAD model

図 11 実験結果 (鳥の置物)

Fig.11 Experimental result (a bird).

効性を確認した。

謝辞 実験に多大なご協力をいただいたコンピュータビジョン研究室の田中悟氏に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 尾田十八：形と強さのひみつ，オーム社 (1997).
- 2) Chien, C.H. and Aggarwal, J.K.: Volume/surface octrees for the representation of 3d objects, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 36, pp.100-113 (1986).
- 3) Gujar, U.G. and Nagendra, I.V.: Construction of 3d solid objects from orthographic views, *Computer & Graphics*, Vol.13, No.4, pp.505-521 (1989).
- 4) 千田豊満：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, pp.1312-1320 (1990).
- 5) Lee, E-T., Choi, Y-K. and Park, K.H.: A method of 3d object reconstruction from a series of cross-sectional images, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E77D, No.9, pp.996-1004 (1994).
- 6) Reed, M., Allen, P.K. and Abrams, S.: Cad model acquisition using binary space partitioning trees, *Proc. 2nd CAD-Based Vision Workshop*, Vol.2, pp.1167-1173 (1994).
- 7) 安居院猛，奥山健一，長尾智晴，中島正之：4 方向からのスケッチ画を用いた立体の形状モデリング，信学論 ( D-II )，Vol.J75-D-II, No.3, pp.565-572 (1992).
- 8) Michael, J. and Nandhakumar, N.: Unified 3d models for multisensor image synthesis, *Graphical Models and Image Processing*, Vol.57, No.4, pp.283-302 (1995).
- 9) Kriegman, D.J.: Computing stable poses of piecewise smooth objects, *CVGIP: Image Understanding*, Vol.55, No.2, pp.109-118 (1992).
- 10) Freeman, P. and Newell, A.: A model for functional reasoning in design, *Proc. IJCAI-71*, pp.621-640 (1971).
- 11) Winston, P., et al.: Learning physical description from functional descriptions, examples, and precedents, *Proc. AAAI-83*, pp.433-439 (1983).
- 12) Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: active contour models, *IJCV*, pp.321-331 (1988).
- 13) 上田恭敬，田中弘美：領域のトポロジカルな構造抽出のための符号付動的輪郭モデル，信学論 ( D-II )，Vol.J84-D-II, No.6, pp.1398-1405 (1997).
- 14) 山岡 勝，山崎佳代子，田中弘美：仮想空間シミュレータ自動構築のためのハプティックビジョンに基づく物体間の水平支持接触拘束抽出，信学論 ( D-II )，Vol.J84-D-II, No.7, pp.1439-1447 (2001).
- 15) 安部慶喜，田中士郎，田中弘美：能動触覚に基づく物体の重量推定，情報処理学会研究報告，CVIM119-6, pp.41-48 (1999).
- 16) Tanaka, H.T. and Kushihama, K.: Haptic Vision—Vision-Based Haptic Exploration, *Proc. IEEE 16th ICPR*, Vol.2, pp.852-855 (2002).

(平成 14 年 9 月 9 日受付)

(平成 15 年 3 月 28 日採録)

(担当編集委員 佐藤 淳)



田中 士郎

平成 11 年立命館大学理工学部情報工学科卒業。平成 13 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在 (株)コナミコンピュータエンタテインメント大阪勤務。



西村 憲吾

平成 7 年立命館大学理工学部情報工学科卒業。平成 9 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在 (株)松下電器産業勤務。



田中 弘美 (正会員)

昭和 50 年お茶の水女子大学理学部物理学科卒業。昭和 50 年～53 年 (株)富士通勤務。昭和 56 年米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了。昭和 63 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。昭和 63 年～平成 6 年 ATR 通信システム研究所客員研究員。平成 6 年立命館大学理工学部情報工学科教授。コンピュータビジョン，コンピュータグラフィックス，仮想現実，3 次元画像通信の研究に従事。IEEE，電子情報通信学会各会員。