

部品構成モデルの自動生成による三次元物体の部品分割

安村 禎 明^{†,☆} 折本 勝 則^{†,☆☆}
馬場口 登[†] 北橋 忠 宏[†]

本論文では、同一概念クラスに属する物体の部品構成を考慮し、三次元物体を部品分割する手法を提案する。分割基準となる部品構成モデルはそのクラスに属する複数の物体から自動生成する。本手法ではまず、各物体を表面曲率に基づき部分形状に分割し、それぞれの部分形状を超二次関数によって表現する。次に、すべての物体の部品構成を部品の配置に基づく三次元グラフによって記述し、得られた部品構成からクラスの典型的な部品構成を抽出する。また、典型的な部品構成を持つ物体から部品の形状に関する情報を求め、部品構成モデルを生成する。このモデルを分割基準として用いることによりすべての物体を同一の部品構成に分割する。最後に、実際の物体のレンジデータを用いた実験により、本手法の妥当性を考察する。

Segmentation of a 3D Object by Generating a Constituent Structure Model

YOSHIAKI YASUMURA,^{†,☆} KATSUNORI ORIMOTO,^{†,☆☆}
NOBORU BABAGUCHI[†] and TADAHIRO KITAHASHI[†]

In this paper, we propose a method of segmenting 3D objects into parts considering the structure of the objects in a class. The constituent structure model for segmentation of a 3D object is generated from the objects in the class. First, each object is segmented into parts, which are represented with superquadrics, based on the surface curvature. Next, the structures of all objects are expressed in the form of 3D graph based on the configuration of the parts. From these structures, the typical structure of the class is extracted. By obtaining the shape information of the parts, we generate a constituent structure model. This model enables us to segment all objects in the class into parts with a common structure. Finally, we present experimental results of our method based on a set of actual objects.

1. はじめに

近年の三次元計測技術の発達により、実際の物体形状をレンジデータとして容易にコンピュータの中に取り込むことが可能になった。しかし、レンジデータは物体表面に散在するサンプル点の三次元計測データであるため、その物体の大局的な形状情報は表現できていない。このため、三次元物体の認識などに応用するには、レンジデータから大局的な形状表現を得る技術が必要になり、特に形状を部品分割する手法は形状を機能ごとに表現するなどの目的において重要である。

従来の三次元形状の分割手法^{1),2)}では、物体の形状データのみを用いてその物体の最適な部品分割表現を求めるため、データ中のノイズや物体の装飾などの影響によって妥当な分割結果が得られない場合がある。より良好な結果を得るには、対象物体に対する拘束条件や知識を利用することが有効であると考えられる。

そこで筆者らは、適切な幾何学的分割結果と機能的な分割結果^{☆☆}が基本的に一致するという仮定が成り立つ人工物体のクラスを対象に、そのクラスに属する多数の物体の部品構成（部品構成モデルと呼ぶ）を参照することにより、三次元物体を部品に分割することを試みる。上述の仮定が成り立つ物体は、比較的単純な形状を持つと推察されるが、そのような対象でさえ、適切な部品分割手法はこれまでに明確化されていない。

[†] 大阪大学産業科学研究所
I.S.I.R., Osaka University

[☆] 現在、東京工業大学大学院

Presently with Tokyo Institute of Technology

^{☆☆} 現在、富士通株式会社

Presently with Fujitsu Limited

^{☆☆☆} 本論文において、機能に対応した分割要素を部品と呼び、幾何学的に分割した要素を部分形状と呼ぶ。

さて、一般的には同一クラスに様々な部品構成の物体が存在するものと考えられる。たとえば、“テーブル”というクラスでは、部品である“脚”の数が4, 2, あるいは1となる場合がある。このようなクラスの物体形状をモデル化するには、部品構成の違いによるサブクラスを導入し³⁾、木構造などの階層的な表現が妥当であると考えられる。本手法は、同一部品構成の物体のクラスを対象とするもので、木構造における1つのノードを表現するための手法と位置付けられる。

本論文では、クラスの部品構成モデルをそのクラスに属する複数の物体のレンジデータから自動生成し、このモデルを参照することにより、そのクラスの物体を同一の部品構成に分割する手法を述べる。本手法で分割された物体は、部品構成が同一であり、部品ごとに表現されているため、物体認識におけるモデル記述に応用することが容易になる。

図1に本手法の流れを示す。入力データは同一クラスに属する物体の全周型レンジデータである。まず、データの表面曲率を基に入力物体を部分形状に分割し、それぞれの部分形状を超二次関数⁴⁾で近似する。この近似には非線形最小二乗法を用いるが、初期値により異なる形状に収束する問題点があるため、部分形状の軸推定により適切な初期値を求める手法を用いる。次に、分割された物体の部品構成を部品の配置に基づく三次元グラフによって表現し、クラスに属する物体の部品構成からそのクラスの典型的な部品構成を求める。また、典型的な部品構成を持つ物体から部品の形状情報を求め、部品構成モデルを生成する。最後に、このモデルを参照して物体を再分割することにより、そのクラスのすべての物体を同一の部品構成で記述する。

以下、本論文では、2章で三次元形状の表現形式について述べ、3章で部品構成の記述法を定義する。4章では、部品構成モデル自動生成法について詳述し、モ

デルに基づく三次元物体の分割法を述べる。5章で、実際の物体を用いた実験結果に考察を加える。

2. 三次元物体の表現形式

本章では、三次元物体を部分形状に分割し、部分形状を超二次関数によって近似する手法について述べる。

2.1 超二次関数表現

超二次関数は比較的少数のパラメータで多様な形状が表現でき、そのパラメータ値変化により人間の感覚に合致した形状変化が得られるという利点があるため、三次元物体の形状検索⁵⁾やモデル獲得^{3), 6)}に利用されている。

中心が (x, y, z) 座標系の原点である超二次関数は次式で定義される。

$$\begin{cases} x = f_1(z) \cos^{\varepsilon_1} \eta \cos^{\varepsilon_2} \omega \\ y = f_2(z) \cos^{\varepsilon_1} \eta \sin^{\varepsilon_2} \omega \\ z = a_3 \sin^{\varepsilon_1} \eta \end{cases} \quad (1)$$

$$f_i(z) = \left(1 - k_i \frac{z}{a_3}\right) a_i, \quad i = 1, 2.$$

ここで x, y, z は超二次曲面の表面座標であり、角度 η, ω は超二次曲面のそれぞれ x 軸の正の部分の起点とする緯度、経度である。また、スケールパラメータ a_1, a_2, a_3 、形状パラメータ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 、および関数 $f_1(z), f_2(z)$ 中の先細りパラメータ k_1, k_2 の3種類のパラメータによって三次元形状を規定する。

単一の超二次関数で表現できる形状は基本的には凸形のある一軸に関する対称体に限られるため、複雑な形状は超二次関数を組み合わせた複合形状として表現する。部分形状の配置は接続した2つの部分形状の位置関係に基づき定義する。つまり、部分形状固有の座標系における接合点の位置の緯度と経度を用いて2つの部分形状の相対的な位置関係を表現する。このとき、正規化した緯度と経度⁶⁾を用いることにより、形状の違いに依存しない人間の感覚に合致した接合点の位置を表現できる。たとえば、超二次関数が直方体を表現している場合、接合点が位置する平面を緯度と経度により特定できる。具体的には、緯度が 45° 以上が上面、 -45° から 45° が側面、 -45° 以下が底面に対応し、側面は経度が $\pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ を境に4つの面に分類できる。

2.2 超二次関数による近似手法

本研究における入力データには全周型レンジデータを用いる。全周型レンジファインダによる計測点 $R(\theta, h)$ は始点からの回転角度 θ 、高さ h における回転軸からの距離として得られ、この二次元配列が全周型レンジデータである。よって、近傍の点の座標から

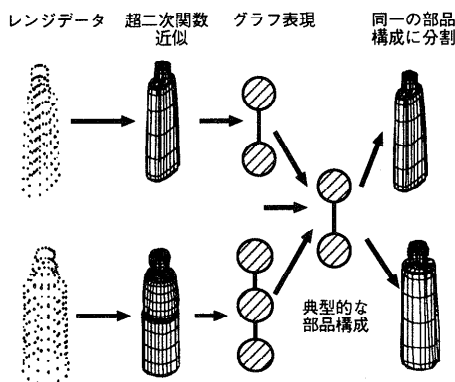


図1 提案手法の処理の流れ

Fig. 1 Procedures of the proposed method.

表1 ガウス曲率・平均曲率による分類

Table 1 Classification by Gaussian curvature and mean curvature.

ガウス曲率 K	平均曲率 H		
	H > 0	H = 0	H < 0
	K > 0	正楕円面	負楕円面
	K = 0	正円筒面	負円筒面
K < 0			
	双曲面		



正楕円面



正円筒面



双曲面

各点の表面曲率を得ることができる。

本研究では、ガウス曲率 K と平均曲率 H によって表面の形状を表1のように分類することができる⁷⁾ため、これらの曲率を用いて分割などを行う。

2.2.1 初期分割

まず、入力データを超二次関数で表現可能な部分形状に初期分割する。超二次関数で表現できるものは凸形状に限られるため、凹領域を基に部分形状に分割する。凹領域は平均曲率が負の値となる点として得られるため、これらの点の集合が閉じた帯状帯として得られた場合、すなわちこの領域が他領域を複数の領域に分割する場合、この領域を境界として部分形状に分割する。

初期分割された結果には、部分形状間の接合面上のデータが存在しないため、部分形状を超二次関数で近似する際に接合面方向に過度に膨張する場合がある。そこで、部分形状間の接合点を求め、この点をデータに加える。

2.2.2 部分形状の超二次関数近似

超二次関数は非線形関数であるため、部分形状のデータを超二次関数で近似するために非線形最小二乗法を用いる。しかし、この近似には最急降下法などの反復計算が必要であり、局所最小解に陥る可能性が高い。これを避けるには、大局的な最小解に近い初期値を与える必要がある。

超二次関数で表現できる形状はある一軸の対称体に限られ、その対称軸を z 軸にしなければならない。したがって、適切な初期値を求めるには形状データから対称軸を決定することが重要になる。この軸は次の手順で決定する。

(1) 先細り形状の判定

先細りがある形状を近似するには先細りのある方向に軸をとる必要がある。よって、先細りを判定するためにモーメントによって求まる3本の

候補軸に対してその軸からその両端付近のデータまでの距離を求める。その距離が大きく異なる場合は先細りがあると判定し、その軸を z 軸とする。

(2) 円柱形の判定

円柱形を近似するには、軸を底面と上面の中心を結ぶ方向にとらなければならない。円柱形は2平面と正円筒面から構成されているため、表1の表面形状の分類を用いて形状データの構成を解析することにより円柱形の判定をする。

(3) モーメントによる軸の決定

上記のいずれの形状とも判定されなかった場合は、モーメント主軸を z 軸とする。

以上のように軸を定めることにより、適切でない軸を z 軸と誤認した近似を回避することができる。また、この軸に基づき超二次関数のすべてのパラメータの初期値を推定する。推定した値は大局的な最小値に近い値となるため、局所解に陥ることなく非線形最小二乗法によって一意にデータに最も近似した形状に収束する。

2.2.3 過度の分割の補正

初期分割の結果はノイズなどの影響により過度に分割されている可能性があるため、分割された部分形状を適切に統合する必要がある。そこで、“AIC（赤池の情報量規準）を用いた最少部品による形状記述法”²⁾によって初期分割の部分形状を統合する。AIC は

$$AIC = -2 \times (\text{モデルの最大対数尤度})$$

$$+ 2 \times (\text{モデルの自由パラメータ数}) \quad (2)$$

で定義され、これを超二次関数による形状記述に適用する。部分形状 k の d_k 個のデータに対する超二次関数近似の二乗誤差を σ_k^2 とするとき、その最大対数尤度 l_k は、

$$l_k = -\frac{d_k}{2} \log 2\pi - \frac{d_k}{2} \log \frac{\sigma_k^2}{d_k} - \frac{d_k}{2} \quad (3)$$

となる。超二次関数のパラメータ数は13であるため、部分形状の数を N とすると、総パラメータ数は $N \times 13$ となり、総データ数を $d (= \sum_{k=1}^N d_k)$ とすると AIC はすべての部分形状の最大対数尤度の和と総パラメータ数の和で表され、

$$AIC = d \log 2\pi + \sum_{k=1}^N d_k \log \frac{\sigma_k^2}{d_k} + d + 2 \times N \times 13 \quad (4)$$

となる。データと近似形状に著しく差がある場合は第2項が大きくなり、さもないければ第4項により部分形状の数が少ない方が良いモデルと評価される。よって、

この値が最小となる部分形状の組合せを AIC での最適な形状記述として求めることにより、可能な限り少ない部分形状数で三次元物体を記述できる。

3. 部品構成の表現

本章では、部品の接続関係に基づく三次元のグラフを用いた三次元物体の部品構成の表現法を定義する。この表現法では、部品の接続関係を表すために各部品の接合点の位置を用いるが、部品構成を簡潔に表現するために接合点の位置を分類する。

3.1 接合点の位置の分類

人工の三次元物体における部品の接続方向は直交することが多いことに着目し、本手法では接合点の方向を図 2 のように x , y , z 軸それぞれの正と負の方向の 6 方向に分類する。たとえば、図 2 の形状では、斜線部の領域上の接合点は x 軸方向にあるとする。これらの領域は正規化した緯度と経度を用いて表 2 のように分割することにより得られる。

3.2 標準座標系

物体間で部品構成を比較するには、物体の見かけの姿勢に依存しない座標系によって物体を表現する必要がある。よって、標準座標系を次のように定義する。

- (1) 入力データの二次モーメントを求め、主軸を z 軸とする。
- (2) 入力データを z 軸に垂直な平面に投影し、その二次モーメントの主軸を y 軸とする。
- (3) z 軸と y 軸の外積ベクトル方向を x 軸とする。

また、接合点の方向はその部品のローカル座標系において記述されているが、各部品の座標軸の向きは部品によって異なる場合があるため、標準座標系と部品のローカル座標系の対応を求め、標準座標系において接合点の方向を記述する。

3.3 グラフによる部品構成表現

以上で定義した接合点の位置に基づき、三次元物体の部品構成を三次元グラフにより表現する。このグラフでは部品をノードで表し、部品の接続関係を x , y , z 軸の正と負の六方向を用いたリンクにより表現する。図 3 (b) の物体の場合、標準座標系が図 3 (a) となるため、部品 A における部品 B の接合点は $-y$ 軸方向、部品 B における部品 A の接合点は y 軸方向に位置する。よって、ノード A とノード B を y 軸と平行なリンクで結び、この接続関係を表す。同様に、部品 B と部品 C の接続関係を求め、この物体の部品構成を図 3 (c) のように表す。このグラフを部品構成グラフと呼び、部品構成グラフが一致すれば同一の部品構成とする。ただし、この部品構成グラフによる表現はあ

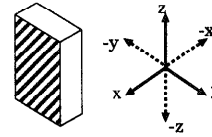


図 2 接合点の分類

Fig. 2 Classification of the connected point.

表 2 緯度・経度による分類

Table 2 Classification by the latitude and longitude angles.

領域名	緯度 (θ), 経度 (ϕ)
z 軸方向	$45^\circ < \theta \leq 90^\circ$
$-z$ 軸方向	$-90^\circ \leq \theta \leq -45^\circ$
x 軸方向	$-45^\circ < \theta \leq 45^\circ, -45^\circ < \phi \leq 45^\circ$
y 軸方向	$-45^\circ < \theta \leq 45^\circ, 45^\circ < \phi \leq 135^\circ$
$-x$ 軸方向	$-45^\circ < \theta \leq 45^\circ$
	$-180^\circ < \phi \leq -135^\circ, 135^\circ < \phi \leq 180^\circ$
$-y$ 軸方向	$-45^\circ < \theta \leq 45^\circ, -135^\circ < \phi \leq -45^\circ$

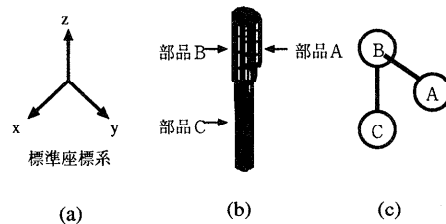


図 3 部品構成グラフ

Fig. 3 Constituent structure graph.

いまいではないが一意ではない。

4. 部品構成モデルの生成による部品分割

本章では、同一クラスに属する物体の部品構成からそのクラスの物体の部品構成モデルを生成し、このモデルを用いてクラス内の物体を同一の部品構成に分割する手法^{8),9)}について述べる。

クラスの典型的な部品構成を求めるには、それを知識として与えることも考えられるが、以下では対象クラスの物体の形状が類似していることに着目し、その部品構成の頻度分布に基づき導くことを考える。

4.1 クラスの典型的な部品構成

同一クラスの物体であっても、ノイズや形状の歪みなどにより、様々な分割結果となる場合があるが、同一の部品構成の物体からなるクラスを対象としているため、典型的な部品構成が存在するはずである。よって、入力サンプルを部品構成に従いクラスタリングし、典型的な部品構成は幾何学的な分割結果と関連が深いと考え、最大頻度の部品構成を対象クラスの典型的な

部品構成とする。

4.2 部品構成モデルの生成

典型的な部品構成を持つすべての物体からその形状情報を求め、部品構成モデルを生成する。まず、物体間での部品の対応を求める必要があるが、部品構成グラフの比較のみからは対応が求まらない場合がある。部分集合内の物体の部品の対応を求めるために、この部分集合の物体の1つを基準物体とし、部品の大きさに基づいて基準物体とその他の物体との部品の対応を求める。

超二次関数のスケールパラメータ a_1, a_2, a_3 はそれぞれ x, y, z 方向の形状の大きさを規定しているため、その積 $a_1 a_2 a_3$ は部品の大きな体積を表す。よって、部品 i に対する部品 k の大きさの比 p_{ik} を次式のように定義する。部品 i , 部品 k のスケールパラメータの積をそれぞれ v_i, v_k とするとき、

$$p_{ik} = v_i / v_k \quad (5)$$

と定める。これを用いて、基準物体に対する部品の大きさに関する非類似度 D_s を次のように定義する。対象物体と基準物体それぞれの部品 i に対する接続部品 k の大きさの比を $p_{ik}, \widetilde{p}_{ik}$, 部品数を N とすると、

$$D_s = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N g_{ik} \quad (6)$$

$$g_{ik} = \begin{cases} (p_{ik} - \widetilde{p}_{ik})^2 & (\text{部品 } i \text{ と部品 } k \text{ の接続あり}) \\ 0 & (i = k \text{ または} \\ & \text{部品 } i \text{ と部品 } k \text{ の接続なし}) \end{cases}$$

と定義する。この非類似度 D_s が最小となる部品の対応を求めることによりすべての物体の部品の対応を決定する。

次に、対応する部品間で形状を比較するが、部品固有の座標軸の向きが部品によって異なる場合があるため、超二次関数のパラメータをそのまま比較することはできない。そこで、部品固有の座標系における x, y, z 軸方向の大きさを表すスケールパラメータ a_1, a_2, a_3 を標準座標系での x, y, z 軸方向の順に b_1, b_2, b_3 と並べかえることにより物体や部品の向きに依存しないスケールパラメータの対応を求め、これらを比較する。ただし、スケールパラメータは絶対的な大きさを表しているため、相対的な大きさを表すスケールパラメータの比 $b_1/b_2, b_2/b_3, b_3/b_1$ を用いて各部品の形状を比較する。

以上で定義した形状特徴表現を用いて、部品構成モデルを次のように表現する。

● 部品構成グラフ

部品の配置を表し、典型的な部品構成として得られる。

● 接続部品間の大きさの比

物体における各部品の相対的な大きさを表す。部品の対応を求めるときに用いた接続部品間の大きさの比 p_{ik} を部分集合内のすべての物体に対して求め、その値の平均と分散によりそのパラメータ分布を表す。

● 各部品のスケールパラメータの比

各部品の形状特徴を表す。各部品のスケールパラメータの比 $b_1/b_2, b_2/b_3, b_3/b_1$ を部分集合内のすべての物体に対して求め、その値の平均と分散によって表現する。

4.3 部品構成モデルに基づく分割

部品構成モデルを参照してクラス内の物体を同一の部品構成に分割する手法について述べる。部品構成モデルと同一の部品構成の部品分割表現を得るために、初期分割結果をクラスの典型的な部品構成となるように統合する。このとき、同一の部品構成となる統合の方法が複数通り考えられる場合があるため、部品構成モデルと比較し、次に述べる評価に基づき最も類似した統合結果を求める。

部品構成モデルに対する非類似度を次のように定義する。部品構成モデルとの比較には、クラスの分布に基づく部品構成モデルとの相対的な違いが重要となるため、非類似度は分散を考慮した平均からの距離として定義する。まず、各部品のスケールパラメータの比に関する非類似度 D_h を次式のように定義する。部品構成モデルにおける部品 i のスケールパラメータの比の平均を m_k^i ($k = 1, 2, 3$), 分散を r_k^i ($k = 1, 2, 3$), 対象物体における部品 i のスケールパラメータの比を h_k^i ($k = 1, 2, 3$), 部品数を N としたとき、

$$D_h = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^3 \frac{(h_k^i - m_k^i)^2}{r_k^i} \quad (7)$$

とする。次に、接続2部品間の大きさの比に関する非類似度 D_t を次式のように定義する。接続している部品 i と部品 k に対して、部品構成モデルの接続2部品間の大きさの比の平均・分散をそれぞれ v_{ik}, q_{ik} , 対象物体の接続2部品間の大きさの比を t_{ik} , 部品数を N としたとき

$$D_t = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ik} \quad (8)$$

$$w_{ik} = \begin{cases} (t_{ik} - v_{ik})^2 / q_{ik} & (\text{部品 } i \text{ と部品 } k \text{ の接続有り}) \\ 0 & (i = k \text{ または} \\ & \text{部品 } i \text{ と部品 } k \text{ の接続なし}) \end{cases}$$

とする。

これらの2つの非類似度 D_h と D_t から、部品構成モデルに対する非類似度 D を次式のように定義する。

$$D = D_h + D_t \quad (9)$$

部品構成モデルに対する形状の非類似度が最小となる部品の組合せに統合することにより、すべての物体をクラスの典型的な部品構成に分割することができる。

5. 実験および考察

本手法を計算機上に実装し、提案手法の特性を調べる基礎実験を行った。ここでは、機能の観点から最も単純な2部品に分割される“キャップ付き容器”，および“電球”のクラスに属する物体を対象に本手法の基本特性を調べた。入力データはそれぞれ40個の実物体の全周型レンジデータを用いた。また、本手法の有効性を検証するために、本手法によって得られた結果とAICを規準として得られた分割表現を比較し、検討する。

5.1 キャップ付き容器を対象とする実験

まず、入力物体を初期分割し、超二次関数により近似した。図4は実際の容器の写真とその初期分割結果である。本手法では、データ入力の物体の向きが同一である必要はないため、物体の向きに変化をつけた。キャップと本体の接続部分は凹領域の閉じた帯状帯として得られ、この部分を境界として分割した。また、キャップ部分は装飾やノイズの影響で過度に分割されることが多いという結果になった。図4の物体をAIC

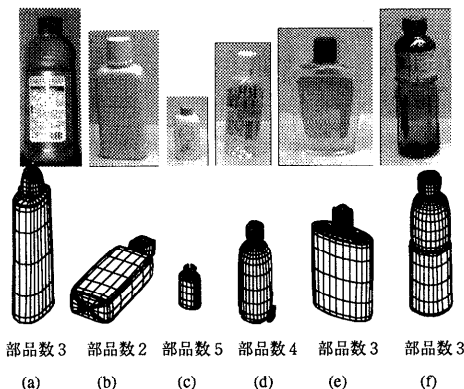


図4 容器の初期分割結果

Fig. 4 Initial results of segmenting the bottles.

を規準に部品に統合した結果とその部品構成グラフを図5に示す。この統合によって過剰に分割されたほとんどの部分形状が適切に統合された。すべての物体の部品構成を求めたところ、図6の部品構成が40個中23個と最も多かったため、この部品構成をクラスの典型的な部品構成として得た。このとき、次に多かった部品構成は図5(e)、図5(f)の部品構成であり、ともに4個であった。

“キャップ付き容器”は機能的には液体の注ぎ口のふたである“キャップ”部分と液体を貯蔵するための“本体”部分からなる物体であるため、基本的には2部品から構成される物体であると考えられる。よって、得られた図6の部品構成は、機能から見た部品構成と一致しており、妥当な結果といえる。

次に、クラスの典型的な部品構成となった物体23個に対して、各部品のスケールパラメータの比、および接続2部品間の大きさの比を求め、部品構成モデルを得た。部品構成モデルのパラメータを表3、表4に示す。なお、 v_a 、 v_b はそれぞれ部品A、部品Bの体積である。これらのパラメータを解釈することにより以下に示す形状情報が得られた。

- 部品Aは部品Bよりかなり大きい。
- 部品Aは z 軸方向に細長い形状である。
- 部品Bは x 軸方向の大きさと y 軸方向の大きさがほとんど等しい。

最後に、部品構成モデルを用いて、クラスの典型的な部品構成とならなかった物体17個を再分割した。そ

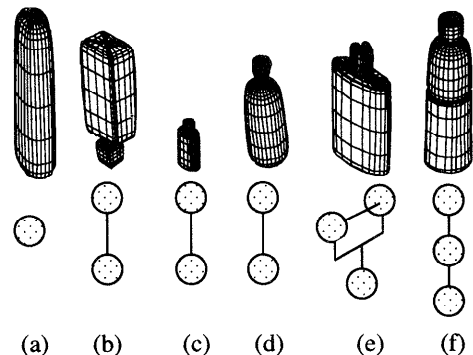


図5 容器の部品構成グラフ

Fig. 5 Constituent structure graph of the bottles.



図6 容器の典型的な部品構成

Fig. 6 The typical structure of the bottle.

表3 容器の部品構成モデルのパラメータ (1)

Table 3 Parameters of the model of the bottle (1).

	平均	分散
v_a/v_b	15.653	45.853
v_b/v_a	0.081	0.002

表4 容器の部品構成モデルのパラメータ (2)

Table 4 Parameters of the model of the bottle (2).

	部品 A		部品 B	
	平均	分散	平均	分散
b_1/b_2	0.730	0.036	1.033	0.029
b_2/b_3	0.483	0.032	0.875	0.066
b_3/b_1	3.234	0.881	1.238	0.019



図7 容器の最終分割結果

Fig. 7 Final results of segmenting the bottles.

の結果の例を図7に示す。図7において、上の形状は部品数と近似誤差を評価規準とした場合の最適な形状記述を表し、下の形状は部品構成モデルを用いて分割した結果を示す。この結果、すべての物体を“キャップ”と“本体”の2部品に分割できた。よって、本手法で得られたキャップ付き容器の部品構成モデルは分割するための基準として妥当であると推察される。

5.2 電球を対象とする実験

“電球”に対しても同様に初期分割し、超二次関数で近似した。図8は入力した電球の写真とその初期分割結果の例である。“口金”と“ガラス”の接続部分は凹領域の閉じた帯状帯として得られたため、この部分を境界として分割した。“口金”の部分は凹凸が激しいため、細かく分割された。図8の物体について AIC

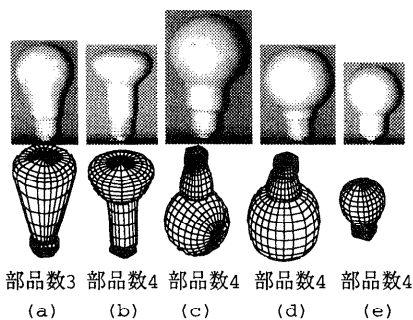


図8 電球の初期分割結果

Fig. 8 Initial results of segmenting the light bulbs.

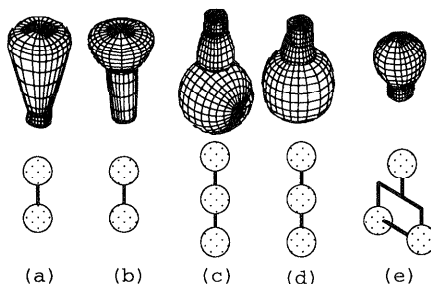


図9 電球の部品構成グラフ

Fig. 9 Constituent structure graph of the light bulbs.



図10 電球の典型的な部品構成

Fig. 10 The typical structure of the light bulb.

を基準に統合した結果とその部品構成を図9に示す。すべての物体の部品構成を求めると、最も多い部品構成は図10の部品構成が40個中18個となり、これをクラスの典型的な部品構成とした。

“電球”を機能的な観点から見ると、発光する“ガラス”部分とソケットと接続するための“口金”の部分の2部品から構成されている物体である。よって、得られた電球の典型的な部品構成は、機能に着目した場合の部品構成と一致しており、妥当な結果といえる。

また、典型的な部品構成の物体から部品構成モデルを求めた結果、そのパラメータの値は表5、表6のようになった。なお、 v_a 、 v_b はそれぞれ部品A、部品Bの体積である。これらの値は次の形状情報を表す。

- 部品Bは部品Aよりかなり大きい。
- 部品A、Bともに x 軸方向の大きさと y 軸方向の大きさがほとんど等しい。

最後に、得られた部品構成モデルを基にすべての物

表5 電球の部品構成モデルのパラメータ (1)

Table 5 Parameters of the model of the light bulb (1).

	平均	分散
v_a/v_b	0.106	0.010
v_b/v_a	18.77	172.9

表6 電球の部品構成モデルのパラメータ (2)

Table 6 Parameters of the model of the light bulb (2).

	部品 A		部品 B	
	平均	分散	平均	分散
b_1/b_2	1.008	0.003	0.998	0.001
b_2/b_3	0.898	0.132	0.798	0.101
b_3/b_1	1.305	0.285	1.445	0.261

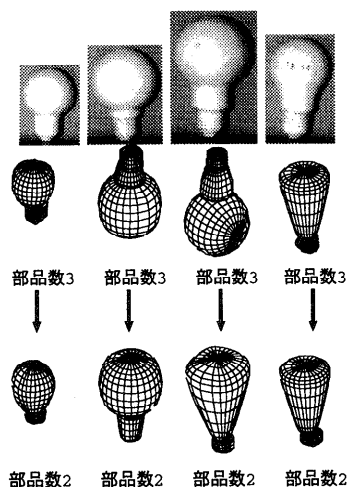


図11 電球の最終分割結果

Fig. 11 Final results of segmenting the light bulbs.

体を同一の部品構成に再分割した。この結果の例を図11に示す。この結果，“電球”のクラスに属するすべての物体を2部品に分割でき、本手法により機能から見た部品構成と同一の部品構成の部品分割表現が得られた。

5.3 考 察

提案したモデルを用いることの有効性を検証するために、AICを分割規準とした部品分割の結果と本手法により得られた分割結果を比較する。つまり、図7、図11の上部の分割結果と下部の分割結果を比較する。図7(a), (b)の物体は、本手法による分割の方が良い結果が得られた。これは、個々の物体の形状情報のみではなく、クラスという情報を導入し、そのクラスの部品構成を考慮することで過度の分割や統合を避けえたためである。一方、図7(d), (e)の物体は逆にAICを基準とした場合の方が形状的には良い結果と考えられる。これは、これらの物体が機能的には同一の部品と考えられる部分が形状的には複雑であるため、複数

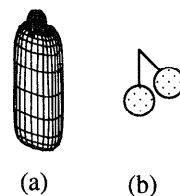


図12 部品構成の不適切な表現

Fig. 12 Improper expression of the constituent structure.

の部分形状で表す方が形状的には良い分割結果となるためであると推察される。よって、この問題を解決するには、部分形状を統合したときの近似誤差を求め、誤差が大きい場合は統合しないという操作が必要になる。また、本手法で得られた分割結果はすべて同一の部品構成であり、部品の対応関係が既知のため、超二次関数のパラメータにより物体形状を比較できる。よって、モデル獲得や物体認識に容易に適用できる。

部品構成を求める際に、部品構成グラフの表現が適切に得られなかった場合があった。この例を図12に示す。図12(a)の超二次関数表現された物体の部品構成を求めたところ、図12(b)の部品構成グラフが得られた。本体での接合点が z 方向であり、キャップでの接合点が $-y$ 軸方向となり、部品の接続関係を表すリンクが直線として得られなかった。これは、接続部品間に重なりが生じ、部品間の接合点が部品の内部に求まり、接合点の方向から適切な接続部品間の位置関係を得ることができなかったためと考えられる。本手法では、部品間の重なりを少なくするために接合点のデータを補って近似しているが、部品構成を適切に求めるためには、この方法を改善する必要がある。

本手法では、同一クラスの物体は基本的に同一の部品構成であるということを前提にしているため、同一クラス内にまったく異なる部品構成を持つ物体（たとえば、4本脚と1本脚のテーブル）が存在する場合には本手法を適用できない。ただし、異なる部品構成を持つ物体が少数の場合には、これらの物体を参照せず部品構成モデルが生成されるため、多数を占める形状の物体に共通する分割結果が得られる。また、部品構成を簡潔なグラフを用いて表したため、接続関係が複雑な物体は適切に表現できない場合があるが、多くの人工物は部品の接続方向は直交しており、このような物体に対して本手法は有効である。

6. ま と め

本論文では、同一クラスに属する複数の物体から三次元物体の部品構成モデルを生成し、このモデルを参照することによりそのクラスの物体を同一の部品構成

に分割する手法を提案した。

本論文によって得られた知見を以下にまとめる。

- 同一クラスに属する物体の部品構成を考慮することにより、部品分割表現を改善できることを実験的に確認した。
- 本手法による分割結果は同一の部品構成であるため、三次元物体を構成する個々の部品を考慮したモデル生成などに応用が容易である。
- 同一クラスに属する物体の部品構成がほぼ一定の人工物に対して本手法は有効である。

今後の課題として、同一クラスに異なる部品構成の物体が存在する場合の部品分割を考察することがあげられる。

謝辞 レンジデータの観測には奈良先端科学技術大学院大学の計測機器 (Cyberware model 3030/PS) を使用させていただいた。便宜を図って下さった横矢直和教授、岩佐英彦助手に深く感謝する。

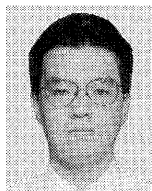
参考文献

- 1) Darrel, T. Sclaroff, S. and Pentland, A.: Segmentation by Minimal Description, *Proc. 3rd Int. Conf. on Comp. Vision*, pp.112-116 (1990).
- 2) 堀越, 鈴木, 中根: AIC (赤池の情報量規準) を用いた最小部品による形状記述法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J77-D-II, No.9, pp.1691-1700 (1994).
- 3) 安村, 折本, 馬場口, 北橋: サブクラスや例外を考慮した三次元形状のクラス記述の獲得, 第51回情報処理学会全国大会論文集 (1995).
- 4) Solina, F. and Bajcsy, R.: Recovery of Parametric Models from Range Images: The Case for Superquadrics with Global Deformations, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol.12, No.2, pp.131-147 (1990).
- 5) 堀越, 笠原: 手書きスケッチ操作による三次元モデルの入力と立体形状検索への応用, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.9, pp.1750-1757 (1994).
- 6) Yasumura, Y., Orimoto, K., Babaguchi, N. and Kitahashi, T.: Inductive Learning of 3D Shapes with Superquadrics Representation, *Proc. 2nd Asian Conf. on Comp. Vision*, Vol.3, pp.310-314 (1995).
- 7) 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭見堂 (1990).
- 8) 折本, 安村, 馬場口, 北橋: 三次元物体を対象とするクラス共通の分割法, 電子情報通信学会技術報告, PRU95-177 (1995).
- 9) 折本, 安村, 馬場口, 北橋: 全周型レンジデー

タからの物体部品構成モデルの獲得, 電子情報通信学会技術報告, PRMU96-158 (1997).

(平成 9 年 7 月 2 日受付)

(平成 10 年 3 月 6 日採録)



安村 禎明 (正会員)

1993 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1998 年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年東京工業大学助手。博士 (工学)。形状の学習・知識獲得の研究に従事。1996 年度人工知能学会全国大会優秀論文賞受賞。電子情報通信学会, 人工知能学会各会員。



折本 勝則

1995 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1997 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年, 富士通 (株) 入社。在学中, 形状の学習・知識獲得の研究に従事。1996 年度人工知能学会全国大会優秀論文賞受賞。



馬場口 登 (正会員)

1979 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1981 年同大学院前期課程修了。1982 年愛媛大学工学部助手。大阪大学工学部助手, 講師を経て, 現在大阪大学産業科学研究所助教授。1996 ~1997 年 UCSD 文部省在外研究員。1996 年度人工知能学会全国大会優秀論文賞受賞。工学博士。人工知能, メディア処理の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 人工知能学会各会員。



北橋 忠宏 (正会員)

1962 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1968 年同大学院博士課程修了。同年同大学基礎工学部助手。同助教授, 豊橋技術科学大学助教授, 教授を経て, 1986 年大阪大学産業科学研究所教授。工学博士。三次元物体認識, 自然言語処理, 学習・推論機構に関する研究に従事。IEEE, AAAI, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, 計量国語学会各会員。