

距離データからの等関数値曲面記述の生成

村木 茂

電子技術総合研究所

あらし 近年、コンピュータビジョンの分野において、レンジファインダ等によって得られる距離データに簡単なプリミティブを当てはめ、3次元構造の記号的記述を得ようとする試みが数多くなされている。本稿では、距離データに *Blobby Model* と呼ばれる3次元モデルを当てはめる方法を提案する。このモデルは、空間にスカラー場を生成するプリミティブを複数配置することによって、それらの作る等関数値曲面で物体表面を記述するもので、各プリミティブの相互融合によって、比較的少ない数のプリミティブで複雑な物体形状を記述できる。我々は、距離データに整合するプリミティブの配置を決定する問題を、*Blobby Model* と距離データの形状の違いを評価するエネルギー関数の最小化問題と定義する。この問題は非線形連立問題になり、解析的に解くことができない。本稿では、最初に一つのプリミティブを距離データに整合させ、それをエネルギー関数が減少するように次々に分裂させることによって、複雑な *Blobby Model* を生成して行く。これにより、本手法は距離データのセグメンテーションを必要としない。本手法を人間の顔の距離画像に適用し、良好な結果を得たので報告する。

Volumetric Shape Description of Range Data using Isosurfaces of a Scalar Field

Shigeru MURAKI

ELECTROTECHNICAL LABORATORY

1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Abstract Recently in the field of computer vision, there have been many attempts to obtain a symbolic shape description of an object by fitting simple primitives to the range data of the object. In this paper, we introduce the "*Blobby Model*" for automatically generating a shape description from range data. This model can express a 3D surface as an isosurface of a scalar field which is produced by a number of field generating primitives. The fields from many primitives are blended with each other and can form a very complicated shape. To determine the number and distribution of primitives required to adequately represent a complex 3D surface, we minimize an energy function which measures the shape difference between the range data and the "*Blobby Model*". We start with a single primitive and introduce more primitives by splitting each primitive into two further primitives so as to reduce the energy value. In this manner, the shape of the 3D object is slowly recovered as the isosurface produced by many primitives. We have successfully applied this method to human face range data and we show typical results. Our method does not require any prior range segmentation.

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野では、画像から外界の3次元情報を獲得する手段として、ステレオマッチングやオプティカルフロー等の方法が用いられている。これらの方法で得られる情報は、特定方向から計測した対象物体までの距離データなどの不完全な3次元情報で、 $2\frac{1}{2}$ 次元の情報と呼ばれている¹⁾。このような情報から物体の構造等のより高度な情報を抽出するために、距離データに超2次曲面²⁾などの3次元モデルを整合させる試みが多くなされている^{3)~8)}。しかし、それらのモデルは形が単純で、複雑な物体を表現するためには複数のモデルを組み合わせる必要がある。その場合、一つの距離データをどのように複数の部分に分割するかといった、セグメンテーションの問題が起こり、また、各モデル間の接続が不連続であるために、形が微妙に変化する滑らかな物体を表現することが困難になる。したがって、滑らかな物体を少ない情報量での確に記述できる形状モデルが求められている。

コンピュータグラフィックス (以下CG) の分野でも形状モデルの作成は、レンダリング同様に重要な問題となっている。特に、機械部品のような規則的な形状と異なり、人体のように滑らかで軟らかい物体の形状を正確に表現するには非常に多くの数値情報が必要になり、それらの入力にはCGデザイナーの複雑な手作業で行なわれているのが現状である。近年、CGの分野で *Blobby* モデル⁹⁾ と呼ばれる種類のモデリング法が、軟らかい物体を表現するのに用いられている。これは物体表面をプリミティブとなる基本関数を加え合わせて生成されるスカラー場の等ポテンシャル面で記述する方法で、各プリミティブが相互に融合することによって、比較的少ない数のプリミティブで複雑な形状を表現することができる。等関数値曲面によるモデリング法には、Blinnの *Blobby* モデル以外にも、プリミティブの関数型の違いによって、メタボール¹⁰⁾、ソフトオブジェクト¹¹⁾ などが提案されているが、いずれもプリミティブが相互に融合するため、人手によるモデリングが極めて難しく、モデリングの自動化が望まれている。

本研究の目的は、距離データに最も良く整合する *Blobby* モデルを求めることである。これによってステレオマッチングやオプティカルフロー等の方法で得られた $2\frac{1}{2}$ 次元モデルを、複数の3次元プリミティブの融合形として正確に表現できる。また、物体が少数のプリミティブで表現できる場合には、非常に効率のよい3

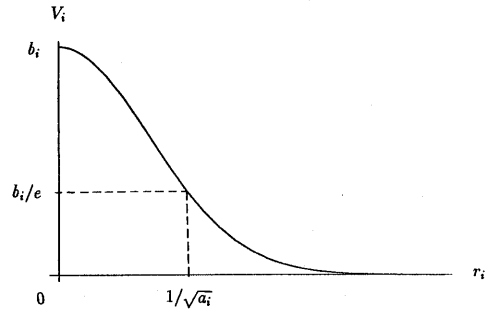


図1: プリミティブからの距離 r_i による球形の場 $V_i(x, y, z)$ の減衰

次元データの圧縮法になる。本手法では、*Blobby* モデルが、単純な形状からより複雑な形状へと生成されるため、距離データのセグメンテーションが必要なく、また生成されたモデルは階層構造を持つため、物体の構造解析等のより高度な情報処理への応用も考えられる。また、扱えるプリミティブに超2次曲面などを加えればCGのためのモデリングツールとしての利用も期待できる。以下では、まず2章で *Blobby* モデルの概要を述べ、3章で距離データに *Blobby* モデルを当てはめる方法を説明し、4章で本手法を実際の距離画像に適用した例を示し、*Blobby* モデルの距離データ解析への有効性を示す。

2. Blobby モデル

Blinn(1982) はスカラー場を生成するプリミティブを複数配置することによって、それらの作る等ポテンシャル面で物体を記述する *Blobby* モデルを提案している⁹⁾。各プリミティブが点 (x, y, z) に作る場の値は、

$$V_i(x, y, z) = b_i \exp\{-a_i f_i(x, y, z)\} \quad (1)$$

のように記述される。ここで、 $f_i(x, y, z)$ は場の形状を決定する関数で、球形の場では、

$$f_i(x, y, z) = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (2)$$

超2次曲面形の場では、

$$f_i(x, y, z) = \{(x - x_i)^{2/\nu_i} + (y - y_i)^{2/\nu_i}\}^{\nu_i/\mu_i} + (z - z_i)^{2/\mu_i} \quad (3)$$

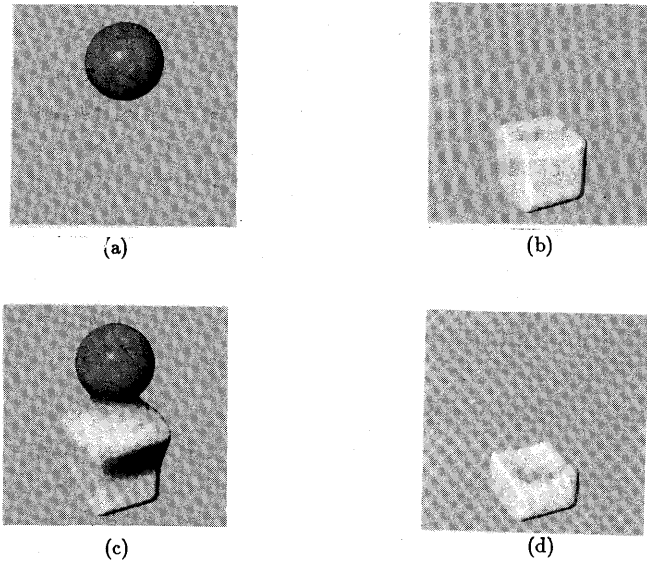


図2: *Blobby*モデルの性質

などで表される。ここで μ_i 、 ν_i は超2次曲面の形状に関係するパラメータである。球形の場合、場の値 V_i はプリミティブからの距離 r_i に従って、図1に示すように急激に減衰する。 $a_i (> 0)$ は減衰の度合に関するパラメータで、 b_i は場の強さに関するパラメータである。 a_i, b_i を変化させることによって、場の性質を様々に変化させることができる。 N 個のプリミティブが作る場は、

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^N b_i \exp(-a_i f_i(x, y, z)) \quad (4)$$

のように各プリミティブが作る場の加えあわせで表現され、物体表面を記述するための値 $T (> 0)$ の等ポテンシャル面は、

$$V(x, y, z) = T \quad (5)$$

のように陰関数表現される。この *Blobby* モデルでは各プリミティブに色などの属性値 C_i を定義することで、以下のように等ポテンシャル面上での属性値が計算できる。

$$C(x, y, z) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N C_i V_i(x, y, z) \quad (6)$$

プリミティブが一つだけの場合、等ポテンシャル面は $f_i(x, y, z)$ 一定の曲面になる。図2 (a) は一つの球形プリミティブの等ポテンシャル面、図2 (b) は超2次曲面形プリミティブの等ポテンシャル面をレイトレーシ

ング¹²⁾で表示した例である。プリミティブが複数存在する場合は、その等ポテンシャル面の形は単独の時とは異なり、互いに融合し合う。図2 (c) は図2 (a), (b) の二つのプリミティブが作る場の等ポテンシャル面を示している。等ポテンシャル面上の色は (6) 式に従って計算されている。 b_i が負の値を持つプリミティブは、さらに興味深い性質がある。 $T > 0$ を仮定しているので、このようなプリミティブは単独では見ることができないが、他の正のプリミティブに作用してくぼみを作る。図2 (d) は図2 (c) の球形のプリミティブの b_i の値の符号を負に変えた時の等ポテンシャル面である。

この種のモデルには、Blinn の *Blobby* モデル以外に、メタボール¹⁰⁾ やソフトオブジェクト¹¹⁾ といったものが提案されているが、どちらもポテンシャルの影響が無遠慮方まで届かないように、距離に応じて場の関数型を変える方式をとっている。本稿では数値計算における単純さから Blinn の *Blobby* モデルだけを扱い、(1) 式の f_i は (2) 式の球形の場合だけを用いることにする。

3. 距離データへの *Blobby* モデルの当てはめ

3.1. 最適化問題の定式化

レンジファインダ等によって、物体表面上の M 個の

点の座標が計測されたとする。これらの点が値 T の等ポテンシャル面で近似されるとすると、最適なプリミティブの配置では、(4)式より

$$E_{\text{potential}} = \sum_{j=1}^M \{V(x_j, y_j, z_j) - T\}^2 \quad (7)$$

が最小にならなければならない。したがって、求めるプリミティブの配置は(7)式の最小化問題を解くことによって得られると考えられる。しかし、*Blobby*モデルにはポテンシャル値の高い側が内側、低い側が外側という裏表の区別があるため、面の方向に関する情報も考慮する必要がある。我々の用いる距離データは、2次元のアレイに奥行き値を格納した距離画像なので、近傍の画素の奥行き値から各点の単位法線ベクトル \mathbf{n}_j が容易に計算できる。一方、*Blobby*モデルの法線方向は、

$$\mathbf{N}(x, y, z) = -\nabla V(x, y, z) \quad (8)$$

に一致する。ここで ∇ は、

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \quad (9)$$

なる演算子である。したがって、最適なプリミティブの配置においては(7)式他に、距離データから計算された \mathbf{n}_j と(8)式のベクトルの方向の差の自乗和

$$E_{\text{normal}} = \sum_{j=1}^M |\mathbf{n}_j - \frac{\mathbf{N}(x_j, y_j, z_j)}{|\mathbf{N}(x_j, y_j, z_j)|}|^2 \quad (10)$$

も最小になる。しかし、距離データが平面の場合には $a_i = 0$ かつ $b_i = T$ の無限に大きなプリミティブを面の無限遠方に置くことで、(7)、(10)式が共にゼロになるという問題が生じる。さらに、(7)、(10)式の拘束は距離データの与えられた点にしか働かないので、距離データに整合したプリミティブが距離データの存在しない点に不必要な面を生成する可能性もある。これらの問題を避けるために、各プリミティブが作る場が空間に与える影響を最小にする拘束を付け加えることにする。(1)、(2)式より、一つのプリミティブが作る場を全空間で積分すると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V_i(x, y, z) dx dy dz = \left(\frac{\pi}{a_i}\right)^{\frac{3}{2}} b_i \quad (11)$$

となることから、 b_i が負になる場合も考慮して、新たな拘束を

$$E_{\text{shrink}} = \left(\sum_{i=1}^N a_i^{-\frac{3}{2}} |b_i|\right)^2 \quad (12)$$

と定める。この拘束はプリミティブを収縮させるように働く。したがって、最適なプリミティブの配置は、(7)、(10)、(12)式を加え合わせたエネルギー関数

$$E = \frac{1}{M} (E_{\text{potential}} + \alpha E_{\text{normal}}) + \beta E_{\text{shrink}} \quad (13)$$

の最小化問題を解くことによって求められる。ここで α は、法線の拘束の強さを調整するパラメータ、 β は収縮の拘束の強さを調整するパラメータである。

3.2. Blobbyモデル当てはめのスケジュール

(13)式の最小化問題は非線形連立問題になり、解析的に解くことができない。ニュートン法などの反復法による数値計算を用いても、多数のプリミティブのパラメータを一度に決定するのは困難である。ここでは、まず最初に一つのプリミティブを距離データに整合させ、それをエネルギーが減少するように次々に分裂させることによって、*Blobby*モデルを生成して行くことにする。いま一つのプリミティブ P_i を5次元ベクトル

$$P_i = (x_i, y_i, z_i, a_i, b_i) \quad (14)$$

で表すことにすると、最初に整合されるプリミティブ P_0 の座標 (x_0, y_0, z_0) を距離データの座標値の平均値、 a_0 を距離データの座標値の分散の逆数、 b_0 を T_e と定める。この初期値から P_0 の5つのパラメータを未知数として、(13)式の最小化問題を数値的に解き、距離データに最もよく整合する P_0 のパラメータを決定し、プリミティブリストに登録する。これ以後は、プリミティブリストからプリミティブを一つ選び、二つに分裂させる処理を繰り返す。プリミティブを選ぶ方法はいろいろ考えられるが、ここではエネルギーの減少に最も貢献の大きいプリミティブを選ぶことにする。貢献の大きさは、そのプリミティブを取り除いた時のエネルギーの上昇の大きさで知ることができる。

まずエネルギーの減少に最も貢献の大きいプリミティブ P_i を選び、二つのプリミティブ P_i' と P_i'' に分裂させる。この時、 P_i' と P_i'' のパラメータの初期値を

$$P_i' = P_i'' = (x_i, y_i, z_i, a_i, b_i/2) \quad (15)$$

と定めると、エネルギーの値は分裂の前後で変化しない。他のプリミティブを固定した状態で P_i' と P_i'' の合計10個のパラメータを未知数として、 E の最小化問題を数値的に解く。計算が収束して最小化問題が解けた場合は、 P_i をプリミティブリストから削除し、かわりに P_i' と P_i'' を登録する。計算が収束しなかった場合は、 P_i をそのまま残し、プリミティブリストから次に貢献の大きいプリミティブを選び、同様の処理を行なう。以上の分裂操作を繰り返すことによって、細胞分裂のようにプリミティブの数を増やしながらか *Blobby*モデルが形成されて行く。全体のフローは図3のようになる。

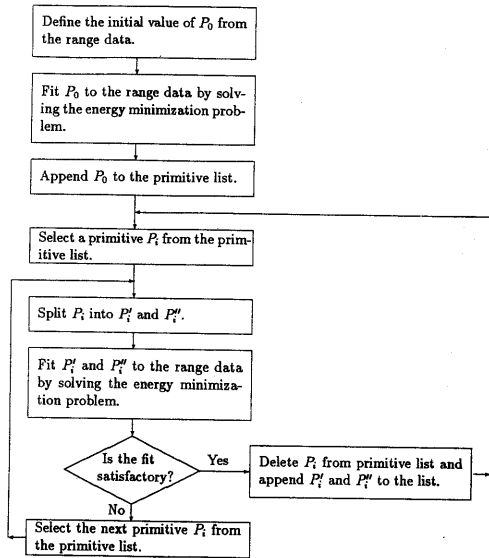


図3: Blobbyモデル当てはめのフロー

4. 実験

4.1. 単一方向距離画像への適用例

前章で述べた手法を、実際の距離データに適用した。図4はカナダ国立研究会議(NRCC)が提供している人間の顔の距離画像(Face 5)で¹³⁾、奥行き値を輝度で表している。この距離画像は、物体までの距離を単一方向から計測しただけの典型的な $2\frac{1}{2}$ Dモデルで、 256×256 の画素数を持っている。各画素の法線ベクトルは、その画素と4近傍とで作られる4つの三角形の法線を平均して求めた。計算量を減らすために、これらのデータから図4の顔の部分縦横3画素間隔に良品取り、6579点での座標値と法線を得た。座標値の平均と分散から最初のプリミティブ P_0 の初期値を定め、図3のフローにしたがって分裂を開始した。最適化問題の解法には、まず最初にシンプレックス法^{14),15)}でおおよそその解を求め、それを初期値にして準ニュートン法^{14),15)}で解を求めるという二段階の処理を行なった。これは、準ニュートン法が収束する初期値の範囲が狭いことと、シンプレックス法の収束が遅いことによる。使用したパラメータは、 $\alpha = 0.25$ 、 $\beta = 0.1$ 、 $T = 1$ である。図5に分裂によるプリミティブ数の増加にと

もなう等ポテンシャル面の変化の様子を示す。プリミティブ数が増えるにしたがって、顔の細部が形成されていくのが分かる。

4.2. 全方向距離画像への適用

図4の距離画像は、単一方向から計測したものであり裏側の情報を持っていない。そのため(12)式の収縮の拘束の結果、図5のように顔面だけが生成される。したがって3次元物体のBlobbyモデルを生成するためには複数方向から計測された距離データを用いる必要がある。図6は特殊なレンジファインダー(Cyberware 4020/PS 3-D Digitizer)で計測された、映画俳優の360度全方向から見た円筒状の距離画像で、 512×256 の画素数を持っている。計算量を減らすために、このデータを縦横4画素間隔に良品取り、5376点での座標値と法線を得た。図7がこの距離画像から生成されたBlobbyモデルである。図5に比べて頭全体の形が正しく生成されていることが分かる。使用したパラメータは、 $\alpha = 0.1$ 、 $\beta = 0.1$ 、 $T = 1$ である。

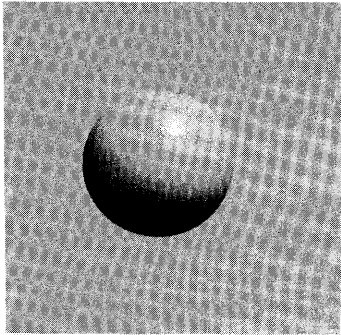
5. おわりに

距離データからBlobbyモデルによる記述を得る方法を提案し、実際の距離画像に適用した。プリミティブの分裂が進むにつれて、Blobbyモデルは一個のボールから数百個のプリミティブで微妙な顔の表情を表現するまでになった。生成されたアトムの履歴は二分木構造を作るので、これを調べることによって物体の構造を解析することができるかもしれない。

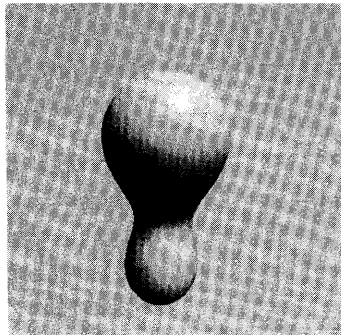
例として、二分木の一つの枝に属するプリミティブに色を付けることによって、その枝がBlobbyモデルの中でどのように働いているかを調べることができる。図8(a)は4.1章の実験で得た41個のプリミティブからなるBlobbyモデルで、その鼻の部分形成している一つのプリミティブに赤色をつけてみた例である。図8(b)は624個にまで分裂したモデルで、図8(a)の赤色のプリミティブの分裂によって生成された全てのプリミティブに赤色を付けている。プリミティブがリスト構造で管理されているので、このような処理は極めて容易である。図8(c)は、これらの赤色のプリミティブだけで生成される等ポテンシャル面で、図8(d)は、図8(b)のモデルから赤色のプリミティブを取り除いた時の等ポテンシャル面である。これらの図は、Blobbyモデルのプリミティブの木構造を用いて、物体をパーツに分解して取り扱うことができる可能性を示している。今後は、本手法を物体認識の問題に適用していく



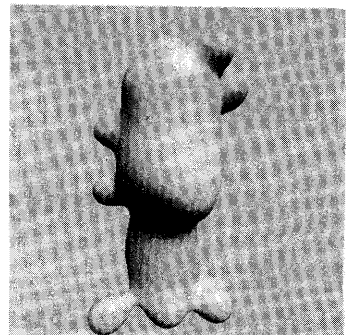
図4: 距離画像



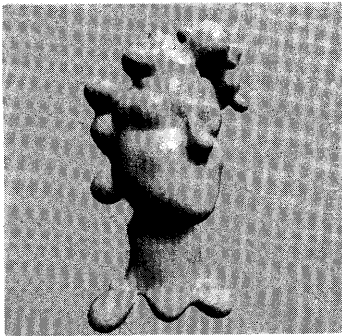
(a) $N = 1$



(b) $N = 2$



(c) $N = 20$



(d) $N = 100$



(e) $N = 300$

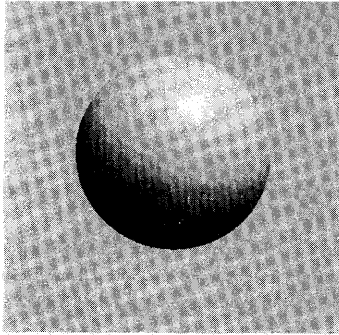


(f) $N = 665$

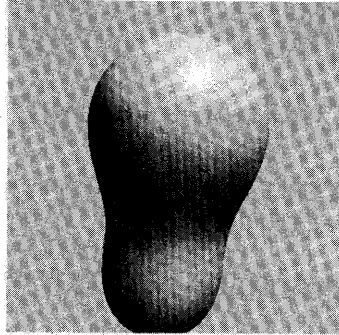
図5: 分裂による形状の変化 (N はプリミティブ数)



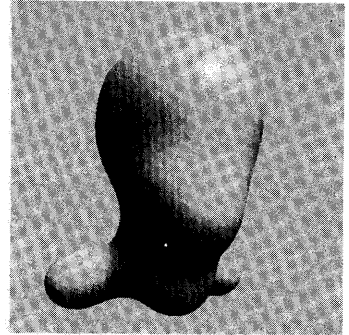
図6: 全方位距離画像



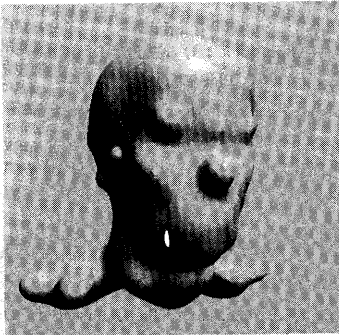
(a) $N = 1$



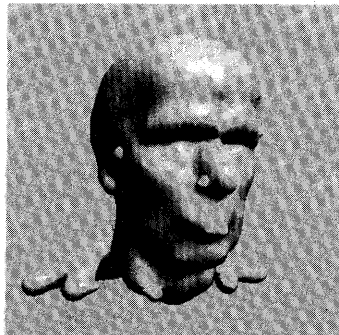
(b) $N = 2$



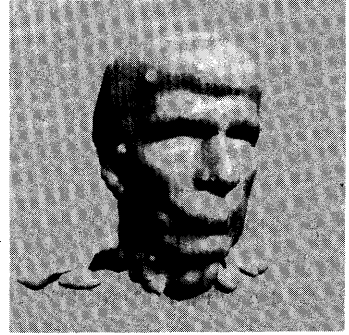
(c) $N = 20$



(d) $N = 100$



(e) $N = 300$



(f) $N = 619$

図7: 分裂による形状の変化 (N はプリミティブ数)

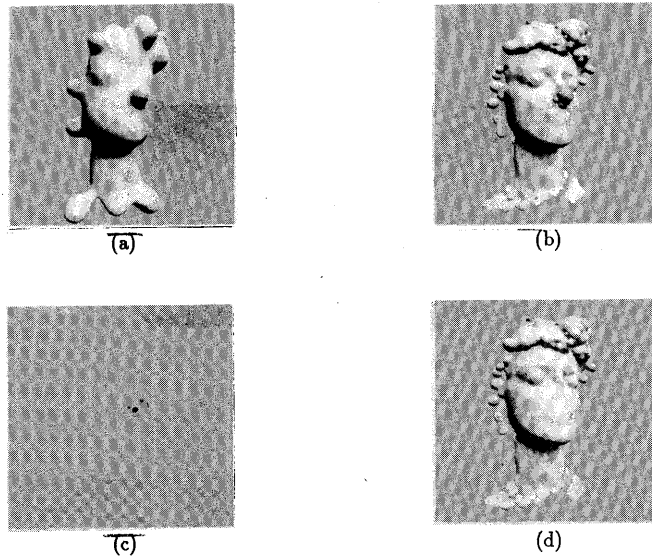


図8: Blobbyモデルの構造解析

予定である。また、プリミティブに超2次曲面などを加えて、CGのためのモデリングツールとして利用することも計画している。

本手法は数値計算を多用するため、計算に非常に時間がかかる。図7(f)の619個のプリミティブにまで分裂するのに、スーパーワークステーション(日本電算機製 Super³ 2000)で数日を要している。さらに多くの距離データに適用するためには、アルゴリズムの改良が必須である。本稿で用いた距離データは特殊な装置で得られたものなので、今後は本手法をコンピュータビジョンの問題に適用するために、ステレオマッチングやオプティカルフローなどで得られた距離画像を用いて実験を行なう予定である。

謝辞 距離画像を提供して頂いた、ハーバード大の Gaile Gordon 女史、Cyberware の Frank Charrico 氏に感謝致します。また、有益な御討論を頂いた横矢直和氏をはじめ電総研 画像研究室の皆様にも感謝致します。

参考文献

- (1) Marr, D.: "Vision", Freeman, San Francisco, 1982.
- (2) Barr, A.H.: "Superquadrics and Angle-Preserving Transformations", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.1, No.1, pp.11-23, 1982.
- (3) 金田, 横矢, 山本: "アニーリング法を用いた距離画像からの超2次曲面記述の抽出", 情報処理学会研究会資料, CV 65-5, 1990.
- (4) Pentland, A.P.: "Recognition by Parts", *SRI International Technical Note*, No.406, 1986.
- (5) Solina, F. and Bajcsy, R.: "Recovery of Parametric Models from Range Images: The Case for Superquadrics with Global Deformation", *IEEE Trans. PAMI*, Vol.12, No.2, pp.131-147, 1990.
- (6) Boulton, T.E. and Gross, A.D.: "Recovery of Superquadrics from Depth Information", *Proc. Workshop on Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion*, pp.128-137, 1987.
- (7) 丸山, 阿部: "距離画像からの物体の基本要素への分割", 昭63 信学春季全大, 1988.
- (8) 堀越, 笠原: "画像データベースにおける三次元インデクシング", 信学技報, IE88-111, pp.33-40, 1989.
- (9) Blinn, J.F.: "A Generalization of Algebraic Surface Drawing", *ACM Trans. on Graphics*, Vol.1, No.3, pp.235-256, 1982.
- (10) 西村, 平井, 河合, 河田, 白川, 大村: "分布関数による物体モデリングと画像生成の一手法", 信学論(D), Vol.J68-D, No.4, pp.718-725, 1985.
- (11) Wyvill, G., McPheeters, C. and Wyvill, B.: "Data Structure for Soft Objects", *The Visual Computer*, Vol.2, pp.227-234, 1986.
- (12) Kalra, D. and Barr, A.H.: "Guaranteed Ray Intersections with Implicit Surfaces", *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp. 297-306, 1989.
- (13) Rioux, M. and Cournoyer, L.: "The NRCC Three-dimensional Image Data Files", *Thec. Report, CNRC 29077*, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1988.
- (14) 今野, 山下: "非線形計画法", 日科技連, 1978.
- (15) 渡部, 名取, 小国: "Fortran77による数値計算ソフトウェア", 丸善, 1989.