

# 立体形状の多面体近似システム<sup>†</sup>

三宅 哲夫<sup>††\*</sup> 土井 淳多<sup>††</sup>

物体の立体形状を機械内部に表現することは、多くの分野で重要な課題である。工業分野で扱われる部品の多くは、基本的な立体图形をもとにした集合演算により再現できるが、自由曲面を有する部品や自然界に存在する多くの物体の形状モデルを形成するためには、物体表面の位置を実際に測定する必要がある。本論文では、物体の立体形状を近似したソリッドモデルの多面体を形成する一手法と、それを全自动的に行うシステム構成について述べる。本システムでの形状モデリングは以下のように行う。物体のある方向への2次元投影像とその投影中心から、物体の存在領域として無限の錐体域を仮定する。多くの投影像に関して同様の錐体域を仮定し、これらすべての錐体の相貫により得られる立体图形を物体の近似多面体とする。投影像はTVカメラを用いて短時間に非接触で得られるので、静止剛体のほか生物体、流動体等の経時変化あるいは変位、変形を伴う物体に対しても適用可能である。物体像の投影方向は任意に設定できるので、かなり複雑な立体形状でも再現が可能である。また、この近似多面体は絶対座標系で記述されているので、物体の形状把握ならびに姿勢や運動の認識が可能となる。物体像の輪郭線に現われない形状特性は多面体に表現できない点が本手法における原理的な限界であるが、目的によっては十分適用可能なシステムであることを具体的な適用例により示す。

## 1. 序論

物体のもつ立体的特徴には、トポロジ的なものと幾何学的なものがある。2次元画像情報をもとに物体を認識するとき、物体の概念を問題とする認識には前者が関係し、物体の形状や大きさ、空間での位置や姿勢を問題とする認識には後者が関係する。トポロジの解析を行うには、画像からの線画の抽出が基本であり、幾何学解析を行うには、物体全表面の位置情報を得るために測定が必要である。

物体の立体形状を機械内部に表現することは、物体認識と密接に関係するばかりでなく、それ自体、設計製造分野において重要な課題である。多くの工業部品の立体形状は、柱体や球等の基本的な图形をもとにした集合演算により再現できるが、自由曲面を有する部品や自然界に存在する多くの物体の形状を再現するためには、物体表面の位置を測定し、それを適当なデータ構造で表現する必要がある。

物体形状の測定方法は、接触法と非接触法に大別できるが、3次元座標測定機等を用いる接触法は高精度である反面、測定には多くの時間を要するので、経時変化を伴う物体は測定できない。また、接触子を用いるため変位、変形しやすい物体は対象として不向きである。

ある。接触法は、視覚の代わりに触覚を用いて外部から情報を得ることになるが、この方法による形状認識の研究も行われている<sup>1), 2)</sup>。一方、光学的手段を用いた非接触法には、光切断法<sup>3), 4)</sup>、格子投影法<sup>5)</sup>、濃淡画像解析法<sup>6), 7)</sup>、光触針法<sup>8)</sup>、モアレ法、CTスキャナ法等があるが、静止剛体を対象としているとか、特殊な照明条件を必要としているものが多い。

本研究では、TVカメラ画像をもとに対象物体の立体形状を近似した多面体をソリッドモデルで自動的に形成するシステムを構成した。本研究における形状モデリングの原理を以下に要約する。

(1) 物体のある方向への2次元投影像から、その物体が存在しうる3次元領域として、投影中心を頂点とし、投影像の形状を断面形状とする無限の錐体域あるいは投影中心が無限遠方にある無限の柱体域が仮定できる。

(2) 多くの投影像を得たとき、物体は、これらの投影像から仮定されるすべての領域の内部に存在していなければならない。

(3) 各投影像の形状を閉多角形で近似すれば、個別の仮定存在領域は無限の角錐あるいは角柱となるので、すべての仮定存在領域の相貫により得られる立体は多面体となる。この多面体を物体の近似多面体とする。

本原理による立体の形成過程は、基本的には三面図や透視図等で表現された立体形状を、逆にその図面から再現する過程と同様で、三面図から立体を形成する研究も行われている<sup>9)</sup>。この再現過程では、立体形成

<sup>†</sup> Three-Dimensional Shape Approximation System with a Polyhedron by TETSUO MIYAKE and JUNTA DOI (Center of Environment Regulation System, Faculty of Agriculture, University of Tokyo).

<sup>††</sup> 東京大学農学部生物環境制御システムセンター

\* 現在 旭硝子(株)電子機材部

に必要なデータが本来は見えない部分も含めてあらかじめ与えられているのに対し、本原理による形成過程では、任意方向から見た物体の輪郭形状のみが与えられる。

Baumgart は、この原理を “silhouette cone intersection” と表現し、プラスティック製の馬と人形を対象として計算を試みている。しかし、画像入力方向は垂直軸まわりで 2 ないし 4 方向と少なく、対象物体の立体形状を近似したといえる多面体は得られていない<sup>10)~12)</sup>。Baumgart の報告は、多面体の論理積を計算できるソフトウェアシステムが、本原理の実行に供しうることを述べたのとどまり、統合されたシステムとしての立体形成の具体的な手法を確立するまでには至っていない。

また、Martin と Aggarwal は、最近本原理の実用化を目指して、対象物体を “volume segment” で表現する試みを行った<sup>13)</sup>。これは、無限柱体の論理積として形成される領域を互いに平行な階層構造の線分で記述する方法である。この手法では、投影像の細部にわたる輪郭情報が失われる上、投影は平行投影としているので近似精度に難点がある。この報告は、柱体の論理積の簡易的な計算法を示したにとどまっている。

多くの視点から得た画像情報をもとに物体の形状を認識する他の手法として、水平断面群の積層体として立体形状を再現する研究や<sup>14)</sup>、観測される頂点軌跡から頂点の座標を決定し凸多面体を認識する研究<sup>15)</sup>が行われているが、上述の研究と同様に、垂直軸まわりのみで多眼視を実現しているので、対象物体の水平断面形状が凸でない場合は、測定できない部分が生ずる。

本手法では、視点位置を任意に設定できるので、TV カメラと対象物体との相対位置を変えて投影像を得ることにより、より複雑な形状の物体にも対応できる。また本システムでは、あらかじめ空間内に複数の TV カメラを配置し、短時間に非接触で必要な画像データが得られる入力システムを構成しており、静止剛体のほか生物体等多くの物体の形状モデリングが可能である。さらに、形成される多面体は絶対座標系で記述されているので、運動解析に対しても有効である。

## 2. 物体と多面体との関係

以下に、物体とその近似多面体との集合関係、ならびに投影像と無限錐体との幾何学関係を説明する。

### 2.1 写像関係

対象物体を  $\mathbf{B}$  で表す。 $\mathbf{B}$  は 3 次元空間  $\mathbf{R}^3$  の部分

集合で、 $\mathbf{B}$  の元を  $B(x, y, z)$  とすると、

$$\mathbf{B} = \{B(x, y, z) \in \mathbf{R}^3\}$$

である。次に、物体の 2 次元投影像（以下、物体像と略す）の一つを  $\mathbf{I}_i$ 、 $\mathbf{I}_i$  の元を  $I_i(u, v)$  とすると、 $\mathbf{I}_i$  は  $\mathbf{R}^2$  の部分集合で、次のように表される。

$$\mathbf{I}_i = \{I_i(u, v) \in \mathbf{R}^2\}$$

$\mathbf{B}$  から  $\mathbf{I}_i$  への写像  $\Phi: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{I}_i$  により、 $\mathbf{B}$  のすべての元が  $\mathbf{I}_i$  の元に写像されると考える。すなわち、ある投影中心  $F_i$  と  $\mathbf{B}$  のある元を結ぶ直線上に存在するすべての点が  $\mathbf{I}_i$  の一つの元に写像される。

物体像  $\mathbf{I}_i$  が与えられたとき、物体  $\mathbf{B}$  の存在領域として、投影中心  $F_i$  と  $\mathbf{I}_i$  のすべての元を結ぶ直線の集合  $\mathbf{C}_i$  が仮定できる。 $\mathbf{I}_i$  から  $\mathbf{C}_i$  への写像を  $\Psi: \mathbf{I}_i \rightarrow \mathbf{C}_i$  で表す。 $\mathbf{C}_i$  の形状は、 $F_i$  を頂点とし、 $\mathbf{I}_i$  の形状を断面形状にもつ無限の錐体である。

合成写像  $\Psi \circ \Phi: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{C}_i$  を考えると、空間に存在する 1 点  $P$  について、

$$\forall P [P \in \mathbf{B} \Rightarrow P \in \mathbf{C}_i]$$

である。 $N$  個の錐体の相貫により得られる立体图形を  $\mathbf{P}$  とすると、定義から

$$\mathbf{P} \equiv \bigcap_{i=1}^N \mathbf{C}_i$$

すなわち、

$$\forall P [P \in \mathbf{P} \Rightarrow P \in \mathbf{C}_i | i=1, \dots, N]$$

である。 $\mathbf{P}$  と  $\mathbf{B}$  との関係は、

(1)  $\mathbf{P} = \mathbf{B}$

(2)  $N \rightarrow \infty \Rightarrow \mathbf{P} = \mathbf{B}$

(3)  $\mathbf{P} \subset \mathbf{B}$

の三つの場合が考えられる。

ここで、物体  $\mathbf{B}$  の表面上に 1 点  $Q$  を定め、 $Q$  の近傍に  $P \notin \mathbf{B}$  である点  $P$  を考える。点  $Q$  を通り  $\mathbf{B}$  に接する平面を考えると、 $\mathbf{B}$  が  $Q$  において微分可能であれば、接平面が一つ存在する。この接平面上に投影中心  $F_i$  が存在しない場合には、直線  $F_i Q$  は  $\mathbf{B}$  と交わるので、 $P$  は物体像  $\mathbf{I}_i$  に写像される。したがって  $F_i$  を頂点とする錐体  $\mathbf{C}_i$  において  $P \in \mathbf{C}_i$  となる。与えられた  $N$  個の投影中心がすべてこの接平面上に存在しなければ、結局多面体  $\mathbf{P}$  は  $P$  を元として含むことになり、 $\mathbf{P} = \mathbf{B} + \{P\}$  すなわち  $\mathbf{P} \subset \mathbf{B}$  となる。

また、接平面上に投影中心  $F_i$  が存在する場合は、点  $Q$  が物体像  $\mathbf{I}_i$  の輪郭線上に写像されるなら  $P \notin \mathbf{C}_i$  となるので  $P \notin \mathbf{P}$  である。つまり、 $\mathbf{B}$  の表面上のすべての点が物体像の輪郭線上に写像されるように投影

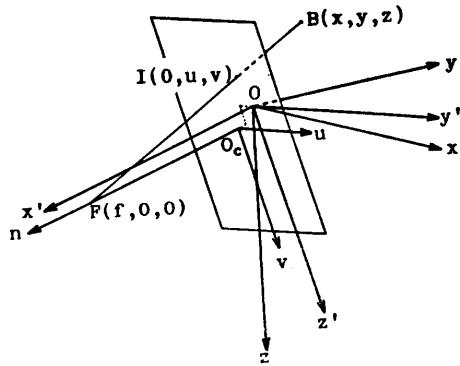


図 1 物体座標系とスクリーン座標系  
Fig. 1 Object co-ordinate system and screen co-ordinate system.

中心が見いだせれば(1)または(2)が成り立つ。このとき、 $\mathbf{B}$  が構成面数  $M$  の多面体であれば、たかだか  $M$  個の錐体で  $\mathbf{P}$  を  $\mathbf{B}$  に一致させうる。 $\mathbf{B}$  が曲面を含むときは、 $N$  が大きくなるにつれ、 $\mathbf{P}$  は限りなく  $\mathbf{B}$  に近づく。ただし、円錐台等は曲面を含むが、有限の  $N$  で  $\mathbf{P}$  を  $\mathbf{B}$  に一致させうる場合がある。局所的なくぼみが存在する場合、この部分では接平面はかならず  $\mathbf{B}$  に交わるので(3)が成り立つ。点  $Q$ において  $\mathbf{B}$  が微分可能でない場合は無数の接触平面が考えられるが、同様の考察が可能である。

## 2.2 幾何学関係

空間内に左手系の直交座標系  $O\text{-}xyz$  を考え、物体座標系と呼ぶことにする。物体座標系を回転、平行移動、スケーリング変換した座標系を  $O_c\text{-}uvw$  で表し、スクリーン座標系と呼ぶことにする。図 1 に両座標系を示す。2 次元平面  $O_c\text{-}uvw$  は、物体像を投影する平面で、仮想的なスクリーンである。空間の 1 点の物体座標を  $(x, y, z)$ 、スクリーン座標を  $(n_B, u_B, v_B)$  とすると、両座標間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} n_B \\ u_B \\ v_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_x & 0 & 0 \\ 0 & \beta_y & 0 \\ 0 & 0 & \beta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \mathbf{T}_s \mathbf{T}_R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{T}_R$  は回転マトリックス、 $\mathbf{T}_s$  はスケーリング変換マトリックスを表し、 $\Delta n$ 、 $\Delta u$ 、 $\Delta v$  は平行移動量である。

写像  $\Phi: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{I}_i$  により、スクリーン座標が  $(n_B, u_B, v_B)$  である物体点  $B$  は、図 1 に示されるように  $O_c\text{-}uvw$  平面上の点  $I(u, v)$  に投影される。この位置座

標は、透視投影の投影中心をスクリーン座標で  $F(f, 0, 0)$  とする。

$$\left. \begin{aligned} n &= 0 \\ u &= u_B/(1 - n_B/f) \\ v &= v_B/(1 - n_B/f) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。このとき、スクリーン座標系での物体像の大きさは、仮想スクリーンが  $n$  軸上のどの位置にあると考えても不变であるが、この位置によってスケーリング変換値が異なる。したがって、以後は  $\Delta n = 0$  として、そのときの変換値を  $\mathbf{T}_s$  の各成分値とする。

写像  $\Psi: \mathbf{I}_i \rightarrow \mathbf{C}_i$  は、基本的には  $\Phi$  の逆写像である。スクリーン座標系での物体像点  $I(0, u_i, v_i)$  および投影中心  $F_i(f_i, 0, 0)$  は、物体座標系ではそれぞれ、

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \mathbf{T}_R^{-1} \mathbf{T}_s^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ u_i + \Delta u \\ v_i + \Delta v \end{bmatrix} \quad (3.a)$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_R^{-1} \mathbf{T}_s^{-1} \begin{bmatrix} f_i \\ 0 + \Delta u \\ 0 + \Delta v \end{bmatrix} \quad (3.b)$$

となる。像点  $I$  は、写像  $\Psi$  により投影中心  $F_i$  と点  $I$  を結ぶ直線に変換される。 $\mathbf{I}_i$  に含まれるすべての点と  $F_i$  を結ぶことにより、物体の仮定存在領域として開いた錐体が形成される。投影中心  $F_i(f_i, 0, 0)$  が無限遠方に存在するときは、投影は  $n$  軸方向への平行投影となるので、形成される領域は開いた柱体となる。

## 3. 多面体の形成

透視投影に関する未知数の決定法を述べ、次に画像入力から多面体出力に至る手順を述べる。

### 3.1 透視投影に関する未知数の決定

多方向から物体像を得るには、カメラを物体に対し相対的に移動する方法、複数の固定カメラを同時に用いる方法、さらには両者を組み合わせる方法がある。

まず、TV カメラを図 2 に示すように回転させることを考える。初期位置においては、カメラ光軸である  $n$  軸と  $x$  軸が平行で、カメラの仮想スクリーンの  $u$  軸が  $y$  軸に、 $v$  軸が  $z$  軸に平行とする。なお、同図では便宜上  $\Delta n \neq 0$  としている。同図に示すようにカメラを  $\phi, \theta, \psi$  回転したとき、 $O\text{-}xyz$  と  $O\text{-}x''y''z''$  との間には次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix}$$

ただし、

$$\mathbf{T}_R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cdot \cos\phi & \sin\theta \cdot \cos\phi + \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & \sin\theta \cdot \sin\phi - \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi \\ -\sin\theta \cdot \cos\phi & \cos\theta \cdot \cos\phi - \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\psi & \cos\theta \cdot \sin\phi + \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi \\ \sin\phi & -\cos\phi \cdot \sin\psi & \cos\phi \cdot \cos\psi \end{bmatrix}$$

平行移動量は、原点  $O$  の像  $I_o$  の画像中心からのずれにより求まる。倍率は、寸法が既知の物体を原点近傍に置き、その像の寸法から算出する。この物体とカメラとの距離を少し変えて同様の計算を行うことにより、原点を含む仮想スクリーンと投影中心との距離が求められる。

固定カメラを用いる場合は、いくつかの基準点を物体座標系に配置し、それらの像から計算によって変換に必要な諸量を求めることができる。物体座標系の点  $B(x, y, z)$  とスクリーン座標系の点  $B$  の像  $I(0, u, v)$  との関係は、(1), (2)式で表されるが、 $\alpha_u = 1/\beta_y, \alpha_v = 1/\beta_z$  とし、 $\Delta u = 0, \alpha_u = 1/\beta_x = 1$  として次のように表される。

$$\begin{aligned} u &= u_B / (1 - n_B/f) \\ v &= v_B / (1 - n_B/f) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} n_B &= l_1x + m_1y + n_1z \\ u_B &= (l_2x + m_2y + n_2z)/\alpha_u - \Delta u \\ v_B &= (l_3x + m_3y + n_3z)/\alpha_v - \Delta v \end{aligned}$$

である。座標  $I(0, u, v)$  は画像から求められるので、基準点の座標  $B(x, y, z)$  が既知であれば(4)式の2方程式が成り立つ。(4)式は、回転に関する独立な6成分、倍率の2成分、平行移動量の2成分、そして投影中心距離の1成分の合計11個の未知数を含んでいる。ここで基準点の一つを物体座標系の原点  $O$  に選ぶと、その像を  $I_o(0, u_0, v_0)$  としたとき、上式からただちに、 $\Delta u = -u_0, \Delta v = -v_0$  を得る。結局、すべての未知数は、原点を含めて一平面上にない6個の基準点

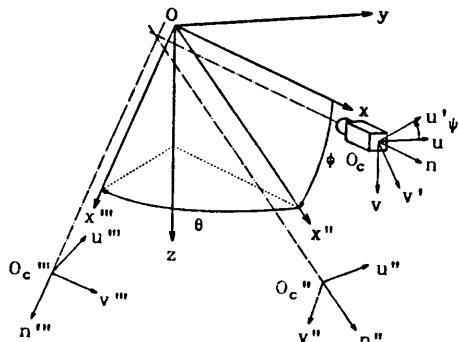


図 2 カメラの回転運動  
Fig. 2 Rotational position of a camera.

とその像の座標から、数値解法により求めることができる。この結果、透視投影の幾何学関係が確定する。

### 3.2 物体像の抽出

物体像は、以下の3条件を満足するよう、モニタで確認した後入力した。

- (1) 対象物体は画像内に一つ存在する。
- (2) 背景と物体像とのコントラストを十分にとる。
- (3) 欠損のない物体像を鮮明に入力する。

これらの条件を満足させる理由は、物体像の抽出を容易にかつ正確に行うためであり、多面体の近似精度を画像入力の段階で落とさないためである。カラー画像も入力できるが、背面照明を施して上記(2)の条件を満足させる場合は、カラー情報は失われる。

このようにして得た画像から以下の手順で物体像の輪郭線を抽出した。

- (1) 物体像領域の画素値を1、背景の画素値を0として画像を2値化する。
- (2) 高さ  $H(0 < H < 1)$  の等高線を図3に示すように求める。得られた等高線は閉多角形となるが、これを物体像の輪郭線とし、閉多角形の頂点となる点を輪郭線から順次抽出して輪郭構成点列  $L_p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  とする。
- (3) 輪郭構成点列  $L_p$  から輪郭特徴点列  $L_P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$  を次のように抽出する。図4に示すように、

- ①  $P_1 = p_1$  とする。
- ②  $P_k = p_i$  のとき、整数パラメータ  $m$  に対して、線分  $p_i p_{i+m}$  と部分輪郭構成点列  $L'_p = \{p_{i+1}, \dots, p_{i+m-1}\}$  との最大距離は設定値  $L$  を越えない。しかし  $L'_p = \{p_{i+1}, \dots, p_{i+m}\}$  の元  $p_{j*}$  が線分  $p_i p_{i+m+1}$  からの最遠点で、かつその距離  $l_{j*}$  が  $l_{j*} \geq L$  のとき、

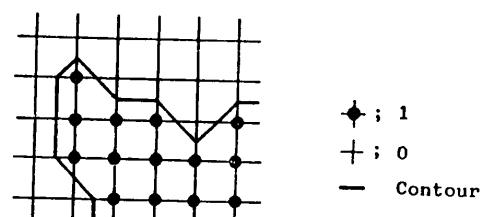


図 3 輪郭線 ( $H=0.5$ )  
Fig. 3 Contour line ( $H=0.5$ ).

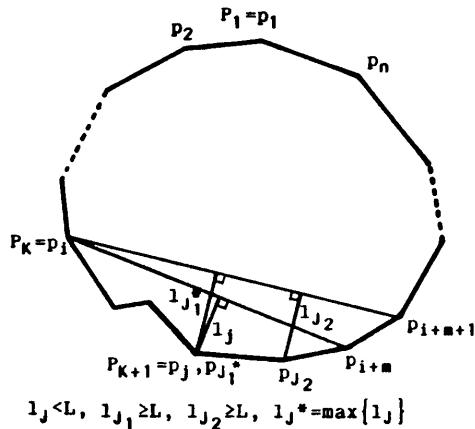


図 4 輪郭特徴点の抽出  
Fig. 4 Extraction of characteristic points.

$P_{k+1}=p_{j*}$  とする。

等高線の値  $H$  により物体像の面積はわずかに変化し、また設定値  $L$  により輪郭線の近似は粗くも細かくなる。

上記のように最大距離を評価基準として任意の曲線を線分で近似していく方法には、曲線に対し適当に 2 点を与える、この 2 点を結ぶ線分と曲線との最大距離が設定値を越えるとき最遠点を端点として新たに線分を内挿していく方法も報告されているが<sup>16)</sup>、近似度は同程度であると考えられる。この方法では、曲線を近似した線分の両側で最大距離が設定値に達することがあるのに対し、本抽出法では、線分の両側で同時に設定値に達することがないという特徴がある。

### 3.3 多面体の計算

多面体の計算過程を図 5 の流れ図に示す。まず、与えられた入力画像情報をもとに、物体の仮定存在領域である錐体を形成する。次に、すべての錐体の相貫により得られる立体図形を、ワイヤフレームモデル、

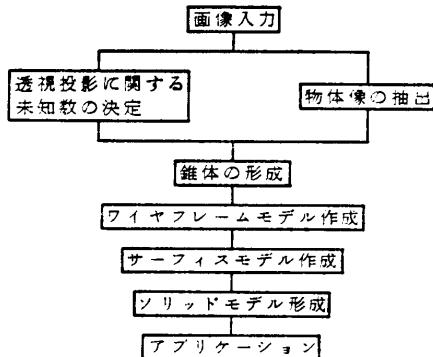


図 5 多面体計算の流れ図  
Fig. 5 Flow chart for calculating the polyhedron.

サーフィスモデルの順に、以下の考え方で従って作成する。

はじめに、錐体  $C_i$  と多面体  $P$  の表面  $S_{C_i}, S_P$  を次式で定義する。

$$S_{C_i} = (\bigcup_j F_j^i) \cup (\bigcup_j E_j^i) \cup V_{C_i} \quad (5)$$

$$S_P = (\bigcup_j f_j) \cup (\bigcup_j e_j) \cup (\bigcup_j v_j) \quad (6)$$

ただし、 $F$  と  $f$  は面を、 $E$  と  $e$  は稜線を、 $V$  と  $v$  は頂点を表す。このとき、 $P$  のある稜線  $e_m$  に関して、

$$e_m = \{E_i \cap (\bigcap_{n=1}^N C_n)\} \cup \{(F_i \cap F_j^i) \cap (\bigcap_{n=1}^N C_n)\} \quad (7)$$

が成り立つ  $E_i$  または  $F_i$  と  $F_j^i$  の組が存在する。また、 $P$  のある面  $f_k$  に関し、

$$f_k = F_i \cap \{\bigcap_{n=1}^N C_n\} \quad (8)$$

が成り立つ  $F_i$  を見いだせる。そして  $e_k$  に関して、

$$e_k = f_i \cap f_j \quad (9)$$

を満たす  $f_i$  と  $f_j$  の組がかならず存在する。結局、(7)式の  $i, j, k, l$  のすべての組合せに関し計算を行うことによりワイヤフレームモデルが完成する。次に、 $F_j^i$  に含まれるすべての稜線の接続関係を調べ、サーフィスモデルを作成する。(9)式は、計算の検証に用いる。

多面体を完成させるためサーフィスモデルをソリッドモデルに変換する際、同時に出力多面体の個数を求める。その理由は、対象物体を近似した多面体のほかにいくつかの微小多面体が分離して形成される可能性があるからで、この数が不明であるとオイラー数を確認することができない。

本システムは、表面積、体積、慣性モーメントの計算プログラム、簡易隠れ線消去法による多面体表示プログラムを備えている。表示は平行投影で、視点位置はキーボードから入力する。

### 3.4 システム構成

図 6 に、画像入力部のハードウェア構成を示す。画像入力装置は、3 管式ビジコンカメラ、単板式 MOS カラーカメラ、CCD モノクロームカメラ等である。本システムの入力画像の画素数は  $256 \times 256$  あるいは  $512 \times 512$  が基本である。カラー画像の場合、各画素は赤、緑、青の各三原色に対し、3 台の 8 ビット A/D 変換器を用いて量子化を行っている。また、カメラのビデオ信号を切り換えることにより 18 台までのモノクロームカメラからの画像入力が可能である。画像入

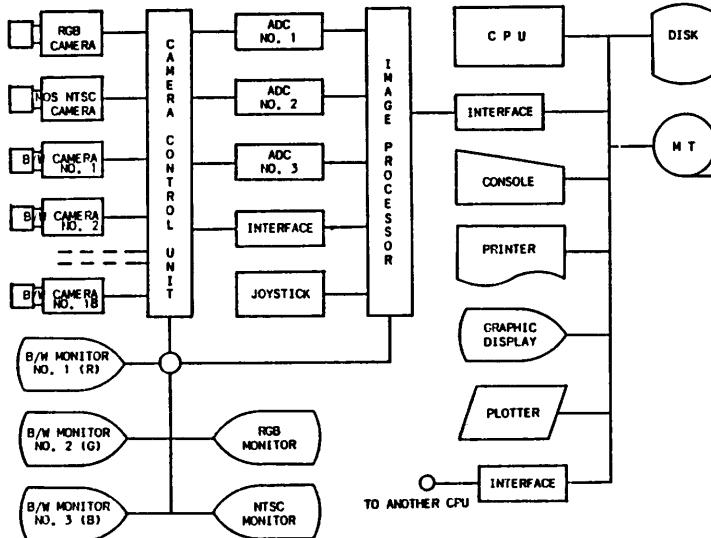


図 6 システム構成  
Fig. 6 System configuration

力の位置精度は 1 画素程度である。

多面体の形成は、主記憶 64 kB ないし 1 MB の計算機で行う。計算機内部では、多面体の各頂点は絶対座標で表され、各面は構成頂点数と、順序づけられた頂点番号の並びで記述されており、これらの全データは磁気テープ等の記憶媒体に記憶される。多面体データは、グラフィックディスプレイ装置を介して图形として表示され、表示された図はハードコピー装置でコピーする。

#### 4. 適用例

図 7 は、図 8 以下の図中に示すパラメータの説明図である。回転角  $\phi$ ,  $\theta$  は出力視線方向を、 $\psi$  は視線まわりの回転を表すパラメータである。また、 $\lambda, \mu, \nu$  の値は、断面形状図を得るときの切断面の方向余弦を表す。同図に示す  $y'z'$  平面上に图形を平行投影する。

##### 4.1 レモン（模型）

表 1 に、入力画像パラメータと近似多面体の構成要素を示す。図 8 は、レモンの近似多面体で、この多面体の体積の計算値は  $142.0 \text{ cm}^3$ 、実測値は  $141.2 \text{ cm}^3$  で、0.57% の誤差であった。また図中の AB 間は最長区間で距離は  $92.2 \text{ mm}$ 、ノギスを用いた実測値は  $92.4 \text{ mm}$  で、0.22% の誤差であった。この寸法誤差は、表 1 に示す 1 画素の大きさ  $0.561 \times 0.476 \text{ mm}$  以下であった。図 9 は 1 mm 間隔の断面形状図である。断面形状は閉多角形であるが、これをスムージングして再構成することにより曲面体が得られる。また、こ

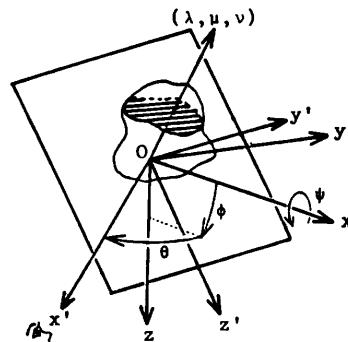


図 7 投影方向と断面の方向余弦  
Fig. 7 Viewing direction and direction cosine of a cross section.

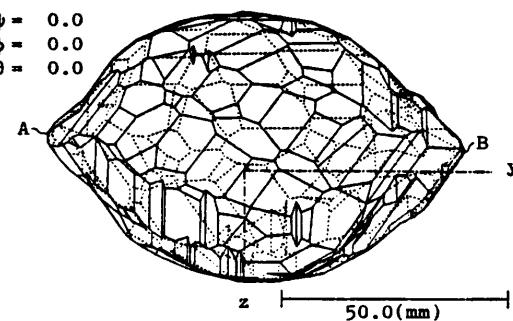


図 8 レモンの近似多面体  
Fig. 8 3-D solid model of a lemon.

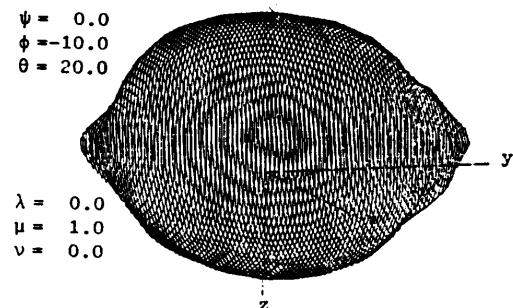


図 9 レモンの断面形状図  
Fig. 9 Cross section of a lemon.

の多面体をもとに有限要素法や境界要素法による解析が可能となる。模型を用いた理由は、比較のための測定と、再実験を可能にするためである。

##### 4.2 魚（模型）

表 1 に、入力画像パラメータと近似多面体の構成要素を示す。図 10 は、魚の近似多面体の三面図で、尾

表 1 画像入力パラメータと多面体の構成要素  
Table 1 Input parameters of TV pictures and component of a polyhedron.

	Lemon	Fish	Doll
Number of pictures	18	20	18
$\psi$ (deg)	0	0	0
$\phi$ (deg)	0 -25 -50	0 -30 -60 -80	0 -30 -60
	0 0 0 30 60 60 60 120 120 90 180 180 120 240 240 150 300 300	0 0 0 352 30 60 60 183 60 120 120 — 90 180 180 — 120 240 240 — 150 300 300 —	0 0 0 30 60 25 60 120 90 90 180 150 120 240 215 150 300 335
$\Delta u$ (pixel)	-3.50	2.25	4.50
$\Delta v$ (pixel)	2.75	0.25	-15.90
$\alpha_u$ (mm/pix)	0.561	0.788	0.618
$\alpha_v$ (mm/pix)	0.476	0.668	0.524
$f$ (mm)	1,842.4	3,588.6	2,661.7
Vertex	827	830	2,020
Edge	1,241	1,245	3,030
Face	416	417	1,012

ひれ、腹びれ、背びれ等の薄い部分を精度よく再現するためには、ひれの接線方向への物体像が必要である。この多面体の体積は  $22.0 \text{ cm}^3$ 、実測値は  $22.1 \text{ cm}^3$  で 0.45% の誤差であった。図 11 は 1 mm 間隔の断面形状図で、同図(a)は等高線表示である。このシステムにより、魚の瞬時の形態と運動が認識できる。

#### 4.3 人形

表 1 に、入力画像パラメータと近似多面体の構成要素を示す。図 12 は人形の近似多面体のワイヤフレーム表示である。同図(a)での右足かかとと左手指先に相当する AB 間の距離は 106.0 mm、実測値は 106.6 mm で 0.56% の誤差で、1 画素の大きさと同程度の寸法誤差であった。図 13 は図 12(b)とほぼ同位置から撮影した人形の写真であるが、両図を比較すると人形の全体的形状がよく再現されており、生体の形状モデルの形成や運動解析に有効であることがわかる。

#### 4.4 流れの可視化

図 14(a)は、流れ場に存在する直径約 3 mm のポリスチレン製の微小球が移動する様子を 5 秒間隔で表示した図である。球の近似多面体は、互いにほぼ直交する 3 台の固定カメラで得た画像をもとに形成した。

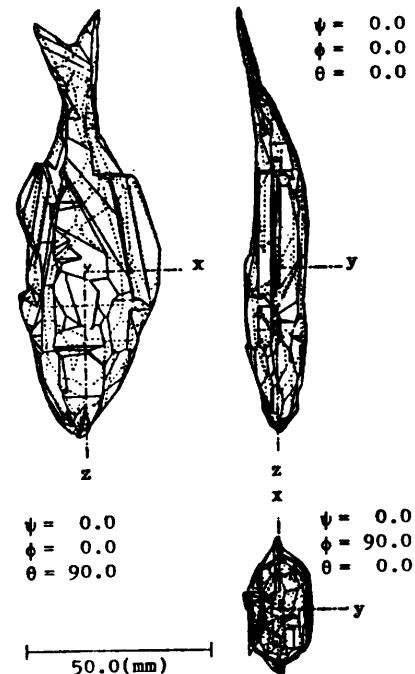


図 10 魚の近似多面体の三面図  
Fig. 10 3-D solid model of a fish.

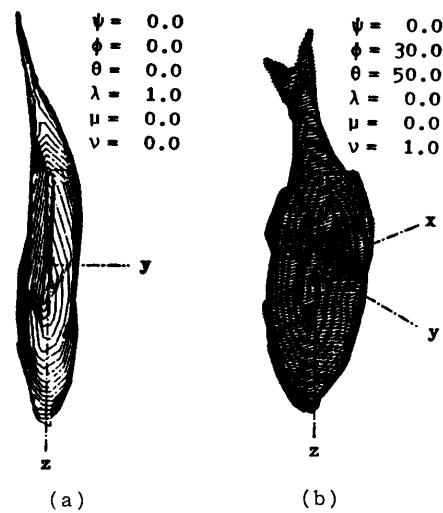


図 11 魚の断面形状図  
Fig. 11 Cross section of a fish.

表 2 にカメラ 1 に関する校正データと、それから求めた透視投影パラメータを示す。各時刻における球の位置を近似多面体の重心位置で代表した図が図 14(b)で、 $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$  は速度を、各重心を端点とする線分は倍率を 3 にした加速度を表す。この手法で得られる近似多面体は絶対座標系で記述されているので、この例のよ

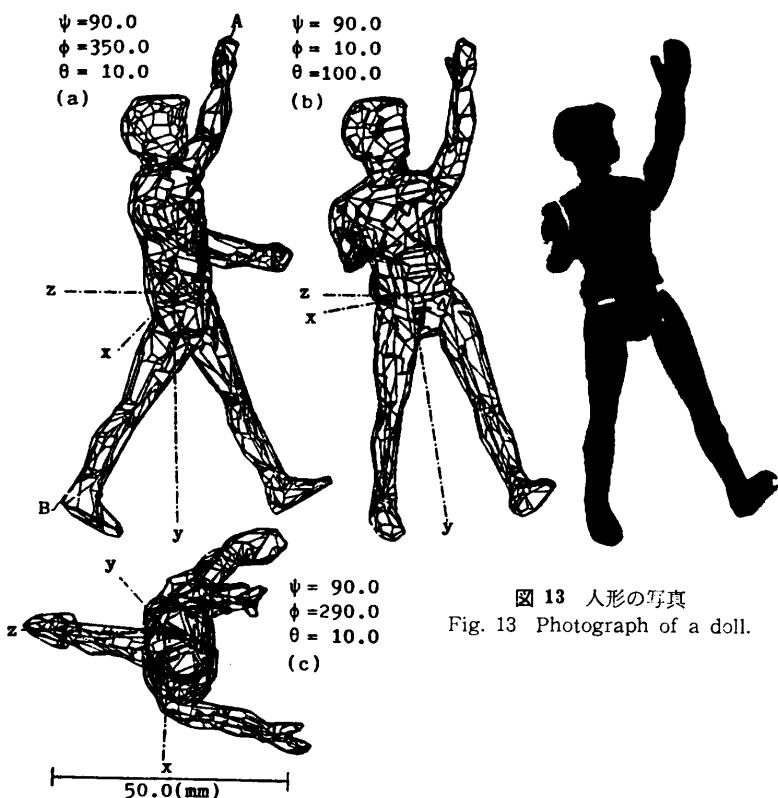


図 12 人形の近似多面体  
Fig. 12 3-D solid model of a doll.

図 13 人形の写真  
Fig. 13 Photograph of a doll.

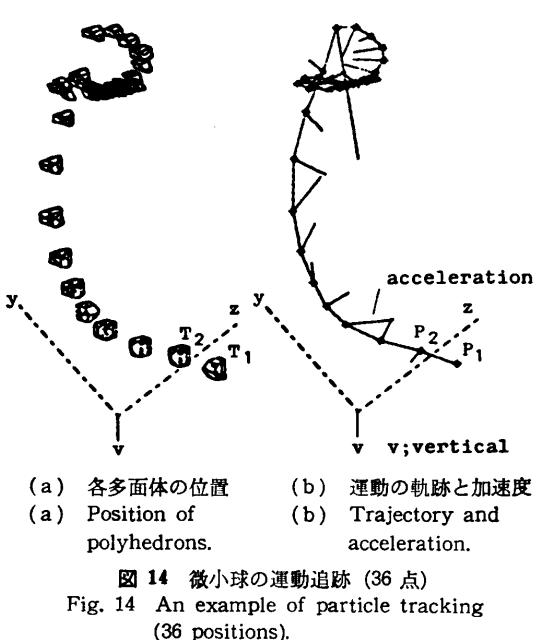


図 14 微小球の運動追跡 (36 点)  
Fig. 14 An example of particle tracking (36 positions).

うに粒子の運動を通して流体の動きを把握できる。逆に、船体模型等の流れ場における運動解析にも応用できる。

### 5. 誤差の評価

本原理により形成される多面体に關し、立体形状の近似度を評価する一基準として、体積誤差を用いた評価を試みる。対象物体は仮想的な球とし、視点位置が無限遠の平行投影を考える。投影方向は、空間内ではほぼ均一となるように、正多面体の頂点と重心を結ぶ方向を基本として設定する。たとえば、正 20 面体を用いると 6 方向、正 12 面体では 10 方向が定まる。投影像はすべて円形となるが、この円を、内接する正多角形で近似して、各投影方向に無限柱体を形成し、これらの論理積から球の近似多面体を求めた。この多面体ともとの球の体積比を表 3 に示す。

この比較結果から次の傾向が見いだせる。

(1) 投影方向数が一定なら、円を近似した正多角形の頂点数が多いほど比の値は大きい。

表 2 カメラ 1 に関する校正データと透視投影パラメータ  
Table 2 Calibration data and parameters of perspective projection for Camera No. 1.

Camera No. 1 calibration data

	$u$ (pixel)	$v$ (pixel)	$x$ (mm)	$y$ (mm)	$z$ (mm)
1	-8.7	96.0	0.0	0.0	0.0
2	67.0	59.3	64.4	0.0	0.0
3	106.8	-14.0	64.4	0.0	64.4
4	45.0	-110.0	64.4	64.4	64.4
5	-26.5	-70.0	0.0	64.4	64.4
6	-72.0	1.8	0.0	64.4	0.0

Parameters of perspective projection

0.6515	0.6911	-0.3054	$\Delta u$ (pixel)	8.7
$T_R^{-1}$	0.2631	-0.5927	$\Delta v$ (pixel)	-96.0
		-0.7676	$a_u$ (mm/pix)	0.6057
			$a_v$ (mm/pix)	0.5075
	-0.7115	0.4136	$f$ (mm)	1,033.8
		-0.5634		

(2) 正多角形の頂点数が一定なら、投影方向数が多いほど比の値は小さい。

2.1 節で述べたように、物体像をそのまま用いて立体图形  $P$  を形成する場合は、一般的には  $P \approx B$  であるが、この物体像の面積が多角形近似により減少していくれば、当然多面体の体積も減少していく、体積比は 1.0 より小さくなる。また、投影方向数が多いほど  $P$  は  $B$  に近づくから、これらの傾向は理論的に矛盾がない。

4 章の適用例において、体積比はレモンが 1.0057、魚が 0.9955 であったが、これらの値は物体像の近似状態によって変動するので、体積比のみで立体形状の近似誤差を評価することは適当ではない。誤差の評価基準の選択をはじめとして、立体形状の近似度に関する研究は今後の課題である。

## 6. 結論

本システムにより得られる近似多面体の全体的形状は、対象物体のもつ形状特性をよく再現しており、マスプロパティは対象物体のそれに近い。しかし、本手法は物体像の輪郭情報をもとにした形状モデルングであるので、輪郭線に現われない形状特性は多面体に表現できない点が原理的な限界である。

システム構成としては、対象が静止している場合は少数台のカメラと物体との相対移動により多眼視を実現してもよいが、多数台の固定カメラを備えることにより、運動する物体にも適用できる。物体像の投影方向に関しては、方向数が多ければ各方向を機械的に定めてもよいが、形状に応じて理想的な方向を選べば、より少ない方向数で形状特性を把握できる。

ディジタル画像による測定が基本であるため画素分割に伴う誤差は不可避であるが、かなり複雑な立体形状を有する対象物体に対しても、短時間に非接触で画像データを得て、自動的に近似多面体を形成できるの

表 3 球の近似多面体とともに球の体積比  
Table 3 Volumetric ratio of a polyhedron to the original sphere.

内接正多角形の頂点数	10	20	40	60	
投影方向数	6	7	10	13	16
6	0.92219	1.01940	1.03859	1.04217	
7	0.91683	0.99628	1.01546	1.01902	
10	0.89954	0.99057	1.01039	1.01396	
13	0.89780	0.98003	1.00003	1.00361	
16	0.88402	0.98029	1.00043	1.00402	

で、多くの物体の形状モデルングのほか物体の姿勢や運動の認識を行うシステムとしても有効である。

謝辞 本論文をまとめるにあたり、有益なご助言をいただいた東京大学生産技術研究所高木幹雄教授に感謝いたします。

## 参考文献

- 岡田徳次、土屋誠治：人工の手による形状認識、電子技術総合研究所彙報、Vol. 35, No. 3, pp. 334-345 (1971).
- 梅谷陽二、菱川 明：網目状能動体による曲面のパターン識別、計測自動制御学会論文集、Vol. 14, No. 4, pp. 413-419 (1978).
- 土井康弘、河辺 峻：レーザ光切断法による 3D 物体の認識、計測自動制御学会論文集、Vol. 9, No. 1, pp. 16-21 (1973).
- 浮田宏生、服部憲一：輪郭曲線群による 3 次元データの整合と表示、電子通信学会論文誌(D), Vol. J 62-D, No. 10, pp. 665-672 (1979).
- Will, P. M. : Grid Coding: A Novel Technique for Image Processing, Proc. IEEE, Vol. 60, No. 6, pp. 669-680 (1972).
- Horn, B. K. P. : Obtaining Shape from Shading Information, in Winston, P. H. (ed.), *The Psychology of Computer Vision*, McGraw-Hill, New York (1975).
- 渡辺弥寿夫、新田克己、榎本 肇：三次元物体の形状認識における一考察、信学技報、PRL 79-19, pp. 65-74 (1979).
- 杉山聰：3 次元形状の光学的自動測定、計測と制御、Vol. 19, No. 5, pp. 470-475 (1980).
- 出沢正徳：図形処理に関する研究、東京大学生産技術研究所報告、Vol. 23, No. 4, pp. 133-176 (1974).
- Baumgart, B. G.: GEOMED—A Geometric Editor, Stanford Artif. Intell. Lab. Memo, AIM-232 (1974).
- Baumgart, B. G.: Geometric Modeling for Computer Vision, Stanford Artif. Intell. Lab. Memo, AIM-249 (1974).
- Baumgart, B. G.: A Polyhedral Representation for Computer Vision, Proc. NCC, pp. 589-596 (1975).
- Martin, W. N. and Aggarwal, J. K.: Volumetric Descriptions of Objects from Multiple Views, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 150-158 (1983).
- 佐藤幸男、藤田広一：曲面物体の形状測定と記述、電子通信学会論文誌(D), Vol. J 62-D, No. 1, pp. 1-7 (1979).
- 津吉敏明、佐藤幸男、藤田広一：運動軌跡からの多面体頂点の座標測定、電子通信学会論文誌(D), Vol. J 62-D, No. 11, pp. 726-733 (1979).

- 16) Ramer, U.: An Iterative Procedure for the  
 Polygonal Approximation of Plane Curves,  
*Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 1, No. 3,  
 pp. 244-256 (1972).  
 (昭和 58 年 12 月 9 日受付)  
 (昭和 59 年 2 月 14 日採録)