

## 論文

## ステレオ画像からの3次元近似モデルのフィッティング

大崎 喜彦<sup>†</sup> 山本 正信<sup>††</sup>

## Fitting Approximate 3-D Models to Objects by Stereo Images

Yoshihiko OSAKI<sup>†</sup> and Masanobu YAMAMOTO<sup>††</sup>

あらまし 物体の3次元モデルが与えられたとき、モデルを物体に一致させることにより、物体の位置・姿勢を知ることができる。モデルが近似モデルであるとき、物体の特徴とモデルの特徴は必ずしも1対1に対応していない。本論文では、物体上の点とモデル面とを対応づけることによりモデルフィッティングを行う。この対応付けは、モデル面上の位置まで厳密に指定する必要がない。モデルが物体の近傍に置かれているとすれば、投影面上でのモデルと物体の重なり合いから対応を決定することができる。物体上の点の3次元座標値の測定にはステレオカメラシステムを利用する。この場合、左右の画像間の対応点探索が問題となるが、物体のごく近傍に置かれたモデルをガイドとすれば、対応点の決定を容易に行うことができる。実験では、隠れのある場合のフィッティングや追跡にも本手法が有効であることを示している。

キーワード モデルフィッティング、ステレオ画像、3次元近似モデル、対応点探索、追跡

## 1. まえがき

物体の3次元モデルが与えられたとき、モデルを物体に一致させることにより、物体の位置・姿勢を知ることができる。特に、物体のごく近傍からのモデルフィッティングは、人間とロボットとの共同作業による物体の位置・姿勢の決定[9]、あるいは物体の3次元追跡[6]等で重要となってくる。

これまで、モデルは物体を正確に表しているものとして、さまざまな手法[2],[3],[5],[8],[11]が提案されてきた。そこでは、頂点やりょう線や面などのようなモデル上の特徴は、必ず物体上にも存在しそれぞれの特徴を3次元シーン中で直接に、あるいは投影面上で間接的に対応づけることができた。しかし、次のような場合、モデルの特徴と物体の特徴との対応付けは容易ではない。

(1) 対象によっては、モデルを正確に作成することが難しい場合がある。人体のような対象がこれに相当し(図1左)、たとえ正確なモデルを作成したとしても、時間と共に対象が変形しもとのモデルとは異なってくる。このような場合、円筒や多面体、あるい

は超だ円体でおよその人体形状を表現することが行われてきた。モデルは近似モデル(図1右)であるので、モデルと物体の特徴が必ずしも1対1に対応しているとは限らない。この図の例では、モデルのりょう線はパッチの交わりによる便宜的な特徴であるが、物体上にはない。逆に、衣服のしわはモデルには含まれていない。モデルと物体が対応づく特徴として、輪郭線[10],[13]あるいは輪郭から推定できる心線[7],[12]が挙げられる。このとき、さまざまな特徴のうち、対応相手の存在する特徴とそうでない特徴の選別が必要となってくる。

(2) 物体の表面にはさまざまな模様が観測される。この模様は、図や文字、汚れ、影などである。モデルは専ら物体の形状を表現しており、通常は模様の位置までモデルには含まれていない。例えば、図1の衣

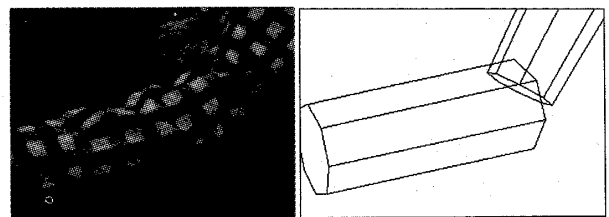


図1 腕(左)と3次元近似モデル(右)  
Fig.1 Arm image (left) and approximate 3-D model (right).

<sup>†</sup> 安藤電気株式会社, 東京都  
Ando Electric Company, Limited, Tokyo, 144-0052 Japan

<sup>††</sup> 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市  
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181  
Japan

服の柄は、モデルには含まれていない。このとき、模様を除き形状に対応する特徴のみを選び出す必要が生じる。

本論文では、多面体モデルを用い、物体上の点とモデル面とを対応づける。モデル面上の位置までを指定する必要がないので、この対応付けは容易である。実際、モデルが物体の近傍に置かれているならば、投影面上でのモデルと物体の重なり合いから対応を決定することができる。

モデルフィッティングのための、物体面上の点の3次元座標値の測定は、レンジファインダで行った例[8],[9]が報告されている。本論文ではステレオカメラシステムを利用する。これは、ステレオカメラはレンジファインダに比べて、システム構成が簡便であり、人体などに損傷を与える恐れが全くない、等の利点が挙げられるからである。一方、欠点として左右画像間の対応点探索の困難さが挙げられる。しかし、物体のごく近傍に置かれたモデルをガイドとすれば、対応点の決定を容易に行うことができる。

次章では3次元空間中の点にモデルを一致させる計算法について述べる。3.では、物体面上の座標値を測定するステレオカメラシステムについて述べる。4.では、モデルをガイドとしたステレオ画像の対応点探索法を述べる。5.では、さまざまな対象についてモデルフィッティングを行った実験結果を示す。

## 2. モデルフィッティング

モデルを物体上の3次元座標値に一致させることによって、モデルフィッティングを行う。

### 2.1 3次元幾何モデル

物体の3次元幾何モデルを、平面パッチの集合で構成する。各パッチは平面とその境界線を表す方程式で記述されている。複雑な物体の形状を正確にモデリングするためには、小さなパッチを数多く必要とする。ここでは数枚程度のパッチで構成される近似モデルを用いる。モデルは固有の座標系  $(x_m, y_m, z_m)$  をもち、シーン座標系  $(x, y, z)$  の中で任意の位置と姿勢をとり得るものとする。図2に、モデル座標系、シーン座標系を示す。

### 2.2 モデルの逐次フィッティング

物体上の点の3次元座標は与えられ、この点とモデル面が対応づけられているとする。このときモデルフィッティングは次のように行われている。3次元座標  $p$  はシーン座標で与えられているが、モデル面はモデ

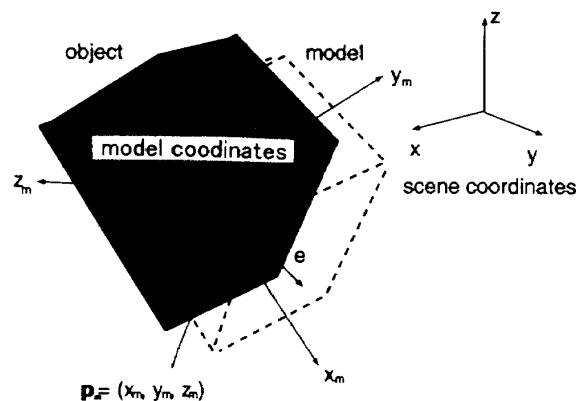


図2 モデルフィッティング  
Fig.2 Model fitting.

ル座標で記述されているので、点  $p$  をモデル座標  $p_m$  に変換する。

$$p_m = R_m(p - T_m) \quad (1)$$

ここで、 $R_m$  はシーン座標に対するモデル座標系の姿勢を表す直交行列、 $T_m$  は原点の位置ベクトルである。

一方、点  $p_m$  に対応するモデル面の方程式がモデル座標系で

$$(\lambda, \mu, \nu)x_m = d \quad (2)$$

であるとする。ここで、 $x_m = (x_m, y_m, z_m)^T$ 、 $(\lambda, \mu, \nu)$  はモデル面の単位法線ベクトル、 $d$  は原点からモデル面までの有効距離である。モデルの位置・姿勢を原点を通る軸回りの回転と並進で修正したとき、面(2)は次式で表される。

$$(\lambda', \mu', \nu')x_m = d' \quad (3)$$

但し、モデルの修正量を回転行列  $R$  と並進ベクトル  $T$  で表す。面の法線ベクトルおよび原点までの有効距離は

$$(\lambda', \mu', \nu') = (\lambda, \mu, \nu)R^{-1}$$

$$d' = (\lambda, \mu, \nu)R^{-1}T + d$$

となる。このときモデル面と物体面上の点  $p_m$  のずれは、

$$e = (\lambda', \mu', \nu')p_m - d'$$

で与えられる。複数個の点に対して方程式  $e = 0$  を導き、これらを連立させて回転量・並進量について解けば、モデルを物体に一致させるための修正量を得るこ

とができる。この連立方程式は非線形となるが、モデルは物体の近傍にあるとしているので、修正量は微小である。従って、線形化し初期値をゼロとしニュートン法を用いて逐次近似により解を得る。

### 3. ステレオカメラシステム

物体面の3次元座標値を測定するためのステレオカメラシステムについて述べる。

ステレオカメラシステムを図3に示す。 $(x, y, z)$ をシーンの座標系、 $(x_L, y_L, z_L), (x_R, y_R, z_R)$ をそれぞれ左右のカメラ座標系とする。 $z_L, z_R$ 軸を各々左右のカメラの光軸とし、物体は光軸に垂直な投影面に原点を中心に投影される。このとき、光軸方向の座標値 $z_L, z_R$ を特に奥行きと呼ぶ。 $(X_L, Y_L), (X_R, Y_R)$ は各々の投影面座標で、原点は投影面と光軸との交点、座標軸は各カメラ座標軸と平行にとる。

シーン中の点 $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ は左右それぞれのカメラの座標系に

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} = R_L \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \mathbf{T}_L \right) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} = R_R \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \mathbf{T}_R \right) \quad (5)$$

で変換される。但し $R_L, R_R$ はシーン座標系に対するそれぞれのカメラ座標系の回転行列、 $\mathbf{T}_L, \mathbf{T}_R$ は原点の位置ベクトルを表す。ここで焦点距離を1とすると左右のカメラへの投影面における投影座標値

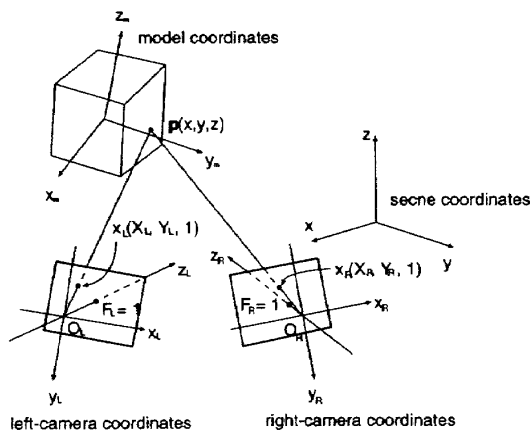


図3 使用する座標系  
Fig.3 Coordinates systems.

$(X_L, Y_L), (X_R, Y_R)$ は

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \end{pmatrix} = \frac{1}{z_L} \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \end{pmatrix} = \frac{1}{z_R} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。更に、画像面における座標 $(I_L, J_L), (I_R, J_R)$ はスケール変換 $f_{LX}, f_{LY}, f_{RX}, f_{RY}$ と画像中心 $(I_{L0}, J_{L0}), (I_{R0}, J_{R0})$ を用いて

$$\begin{pmatrix} I_L \\ J_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{LX}X_L + I_{L0} \\ f_{LY}Y_L + J_{L0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} I_R \\ J_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{RX}X_R + I_{R0} \\ f_{RY}Y_R + J_{R0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

と表せる。

カメラのパラメータは、カメラの位置や向きを表す外部パラメータとカメラの特性を表す内部パラメータに分けられる。内部パラメータのうち、スケール変換は既知の物体を撮影してあらかじめ求めておく。また、画像中心は投影面の中心と一致するものとした。外部パラメータである直交行列 $R_L, R_R$ 、位置ベクトル $\mathbf{T}_L, \mathbf{T}_R$ はLoweの方法[5]により決定した。付録にその方法を簡単に示す。

### 4. 対応付け

提案したモデルフィッティングを行うには、2種類の対応付けを必要とする。一つは物体面上の点とモデル面との対応付けである。もう一つは、ステレオ画像間の対応付けである。

#### 4.1 点とモデル面との対応付け

物体面上の点とモデル面との対応付けは、投影面上での両者の重なり合いを利用する。図4に物体とモデルの重なり合った投影像が示されている。物体は黒くハッチングされ、モデルは点線で示されている。物体面上の点があるモデル面の投影領域内にあるとき、この点をそのモデル面に対応させることにする。このとき、モデルが物体からずれていれば誤対応が生じる。例えば、●印の点は正しいモデル面に対応しているが、×印の点は誤ったモデル面に対応している。モデルと物体が大きくなりすぎず、正しい対応付けの数が誤対応の数に比べて多い。

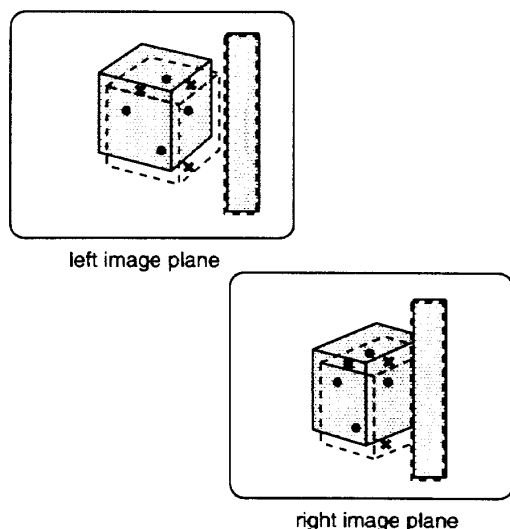


図4 3次元座標とモデル面との対応  
Fig. 4 Correspondences between 3-D points on the object and patches on the model.

## 4.2 ステレオ画像間の対応付け

ステレオ画像における対応点探索において、ノイズの多い画像やオクルージョンが起こる場合などは誤対応が多くなる。そこで、修正する3次元モデルをガイドとする対応付けを提案する。

### 4.2.1 予想対応点

左画像上の特徴点  $(I_L, J_L)$  の右画像での対応点先は3次元モデルを利用して次のように予想される。

特徴点  $(I_L, J_L)$  に対して、投影点座標  $\mathbf{x}_L = (X_L, Y_L, 1)$  は式(8)から  $((I_L - I_{L0})/f_{LX}, (J_L - J_{L0})/f_{LY}, 1)$  となる。この投影点に投影される点の3次元座標値は、 $\mathbf{x}_L$  方向の視線とモデル面との交点を計算することにより得られる。この交点座標を左カメラ座標系で  $(x_L, y_L, z_L)$  と表す。これを式(4)を使ってシーンの座標系  $(x, y, z)$  に変換する。シーン座標値  $(x, y, z)$  を式(5)で右カメラの座標系に変換し、更に式(7)で右投影面座標  $\mathbf{x}_R = (X_R, Y_R, 1)$  に変換する。最後に、式(9)を使って右画面の投影点  $(I_R, J_R)$  を求め、これを予想対応点とする。

### 4.2.2 対応点の探索範囲

図3において点  $O_L, \mathbf{x}_L, O_R, \mathbf{x}_R$  は常に同一平面上にあり、この平面はエピポーラ面と呼ばれる。エピポーラ面とカメラの投影面との交線がエピポーラ線である。予想対応点はこのエピポーラ線上にある。対応点もこのエピポーラ線上にあるのでこの線上を探索すればよい。

モデルより得られた物体面上の点の奥行きは、モデ

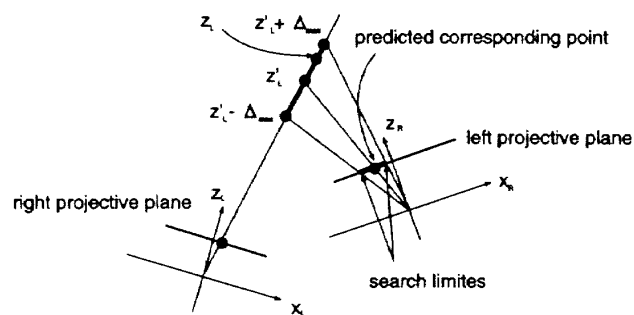


図5 対応点の探索範囲  
Fig. 5 Limits of search for corresponding points.

ルが正しい位置と姿勢から大きくずれていなければ、正しい奥行き量とは大きくは違わない。従って、エピポーラ線上すべてを探索する必要はなく、予想対応点の近傍を探索するだけでよい。また、奥行き方向のずれは、モデルの位置と姿勢を反復修正する過程でゼロに収束するので、反復修正ごとに探索範囲を狭めることができる。この探索範囲を次のように設定する。

モデルと物体とのずれを、ここでは奥行き方向の距離の差で表すことにする。すなわち、左視線上でモデルと物体の奥行き量の差をずれとする。この差をモデルと物体の重なり領域全体で測定したとき、その最大値を  $\Delta_{max}$  とする。モデルを修正する前の初期状態では、ずれの大きさはわからないが、モデルは物体のごく近傍に置かれているとしているので、 $\Delta_{max}$  を物体の大きさの1割程度としておく。

左視線上で物体の奥行きを  $z'_L$  としたとき、 $z'_L$  は図5に示すように、 $z_L - \Delta_{max}$  から  $z_L + \Delta_{max}$  の間にある。従って、この左視線上で存在範囲を右画像上へ投影したとき、その投影像が探索範囲となる。

2回目以降の修正過程では、 $\Delta_{max}$  をモデルの移動前と移動後での奥行き量の差の最大値に更新する。この奥行き量の差、すなわち前回の修正量が小さかった場合、対応先が探索範囲に含まれない危険性がある。しかし、ニュートン法は2次収束することが知られており、正しい位置・姿勢に近づくほどずれに対する修正量が大きくなる。大部分の対応先が探索範囲内に見つからない場合には、 $\Delta_{max}$  値を増加させ再度探索を試みる<sup>(注1)</sup>。

### 4.2.3 対応付けの手順

対応付けの手順を、図6に示される左右のステレオ画像を参照しながら説明する。

(注1): 本論文の実験では  $\Delta_{max}$  値を増加する必要はなかった。

- (1) 左右の画像に  $\nabla^2 G$  を畳み込み、零交差点を抽出しこれを特徴点とする。
- (2) 左画像上でモデル領域内の特徴点 (図 6 左画像の○印) に対応する右画像上の予想対応点 (×印) を求める。
- (3) 対応点の探索範囲は 4.2.2 で与え、エピポーラ線からの距離が 1 画素以内の領域を探索する。
- (4) 対応点候補が見つかったとき、その点に対応しているモデル面が、左の特徴点に対応しているモデル面と一致しているか調べる。一致していなければ、その対応点候補を除外する。もしすべての対応点候補が除外されたならば、隠れが起こっていると考えられる。
- (5) モデルのりょう線上にある点はりょう線を作る二つの平面に属するものとみなす。
- (6) 対応点候補にエピポーラ線上で隣接している画素の明るさを調べる。対応点候補の画素値と比較したときの明暗パターンを求める。左画像上の特徴点についても同様に、エピポーラ線上で隣接した画素との明暗パターンを求めておく。左右のパターンが一致しなければ、この対応点候補を除外する。
- (7) 対応候補である左右 2 点の画素値の差があるしきい値より大きいものは除外する。
- (8) 選ばれた点がなお複数個存在する場合には、

予想対応点に一番近い点を選ぶ。

- (9) 選ばれた特徴点からエピポーラ線に垂線を下ろし、その足を対応点とする (図 6 の右画像上の○印)。

## 5. 実験

モデルが物体からずれているとき、前章で述べた 2 種類の対応付けには誤対応が生じる可能性がある。ずれがわずかならば、誤対応の数は正しい対応付けの数よりはるかに少ない。このときモデルの位置と姿勢の修正量は、モデルが物体に近づくように得られると考えられる。正しい対応付けが修正の繰返しごとに増加し、モデルが物体に収束していくことを実験により確認する。

使用するモデルは、モデルベースビジョン用の幾何モデラ [15] により作成する。このモデラは、対象物の多面体モデルの作成と管理、モデルの画面上への投影と対象物との重ね合せ表示、等を行うことができる。以下の実験では、作成したモデルが、対象の像に重なるように手で移動させ初期状態とした。

### 5.1 カメラキャリブレーション

3次元形状が既知である物体を観測し、カメラキャリブレーションを行った。対象物体は市松模様の表面模様をもつ立方体 (大きさ 30 cm×30 cm×30 cm) で、図 7 にそのステレオ画像を示す。キャリブレーションで得られたカメラモデルに基づき、立方体のモデルを画像に重ねた結果が図 7 に示されている。モデルのりょう線が白黒線で描かれている。

### 5.2 立方体の箱

モデルを正確に作ることのできる例として、キャリブレーションで利用した立方体のモデルフィッティングを行った。図 7 のフィッティング状態から、図 8 に示されるようにモデルを少しずらした状態を初期状態とした。この図で明るさがやや暗くなっている部分が

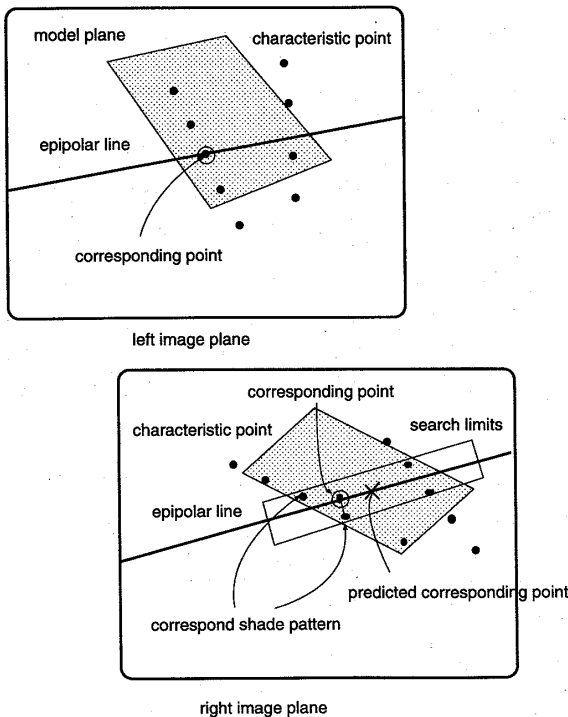


図 6 対応点探索  
Fig. 6 Search for corresponding points.

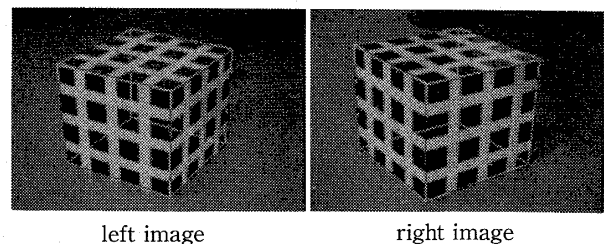
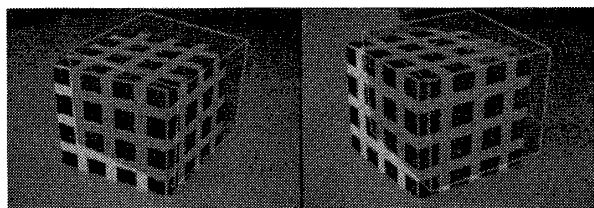
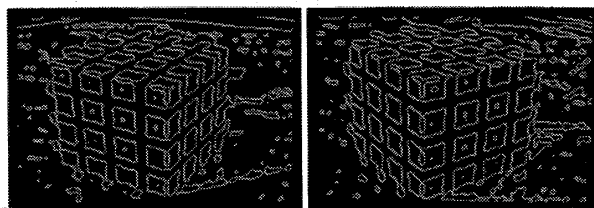


図 7 カメラキャリブレーション  
Fig. 7 Camera calibration.



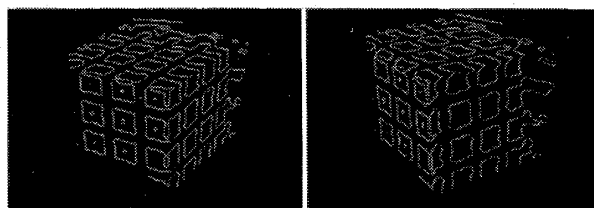
left image right image

図8 初期状態  
Fig.8 Initial state.



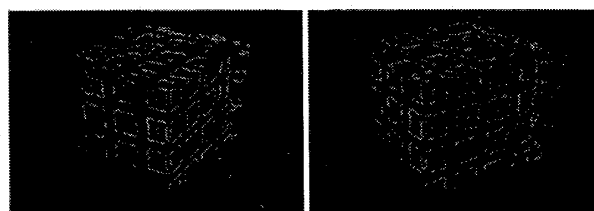
left image right image

図9 零交差点の抽出  
Fig.9 Zero-cross points.



left image right image

図10 予想対応点  
Fig.10 Predicted corresponding points.



left image right image

図11 対応点  
Fig.11 Corresponding points.

モデルの投影像である。

まず、左右の画像の零交差点を抽出した結果が図9となる。次に左の画像からモデル内の特徴点を抽出し、右画像上の予想対応点をプロットした結果が図10である。予想対応点の近傍を探索し、明暗パターンや画素値の差などを調べ、得られた対応点が図11に示されている。

モデルの位置・姿勢の修正を行った結果が図12で

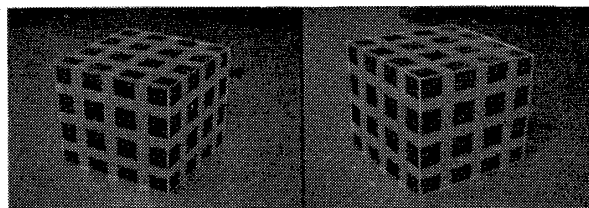


図12 修正結果 (20回)  
Fig.12 Result of model fitting.



left image right image

図13 対象物体(缶)に対するモデルの初期状態。  
Fig.13 Initial state of the model.

ある。なお括弧内の数は修正の繰返し数を表す。キャリブレーションでは物体とモデルのりょう線をフィッティングさせた。この2種類のモデルフィッティング結果を頂点位置で比較した結果、その差は0.2cm以内に収まっていた。

修正可能なずれの大きさは重要な問題である。立方体の箱の実験では、対象のサイズの10%程度の並進ずれに対しては、修正を行うことができた。しかし、一般には対象の形状や表面パターンに関するものと思われる。

### 5.3 缶

物体面が曲面を含む場合にはその多面体モデルは近似モデルとなる。対象物体として缶を取り上げモデルフィッティングを行った。図13にモデルの初期状態を示す。フィッティングの繰返しによりモデルが物体に一致していく様子を図14に示す。この例では、6回の繰返しでほぼ収束した。この繰返し結果は右画像上で示されている。

### 5.4 積木

隠れがある場合について実験を行った。撮影した画像は図15である。手前の細長い物体はモデルの位置・姿勢を正確に合わせておき、後方に置かれているホームベース型の物体に対してモデルフィッティングを行った。初期状態を図15に示す。修正を行った結果が図16となる。モデルと対象との間に多少のずれが見られる。これは、対象が薄いため、側面からの拘束力が弱かったのが原因と考えられる。

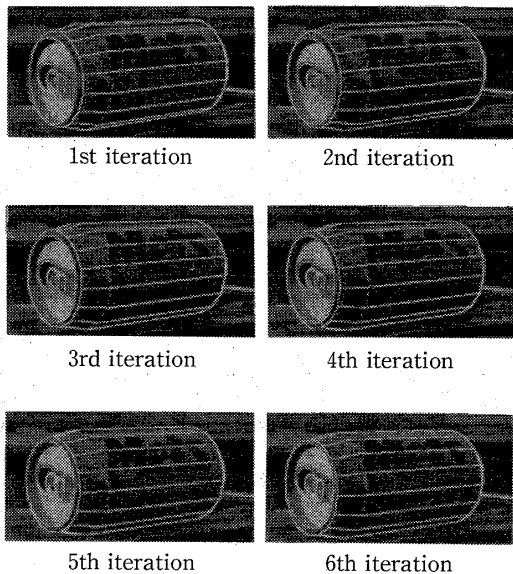


図14 フィッティング過程  
Fig.14 Fitting result at the each iteration.

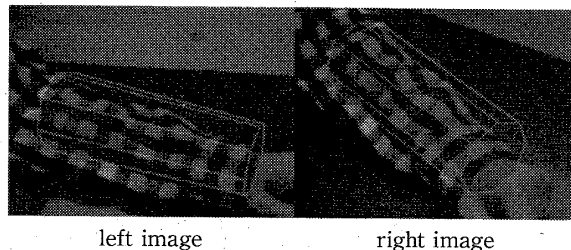


図17 初期状態  
Fig.17 Initial state of arm and model.

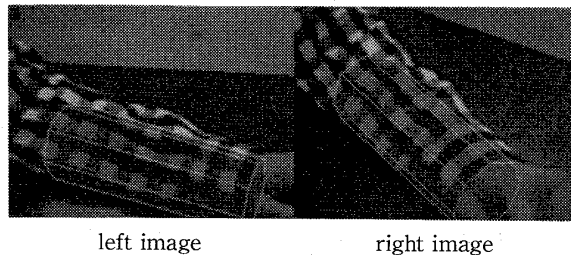


図18 修正結果(30回)  
Fig.18 Result of model fitting.

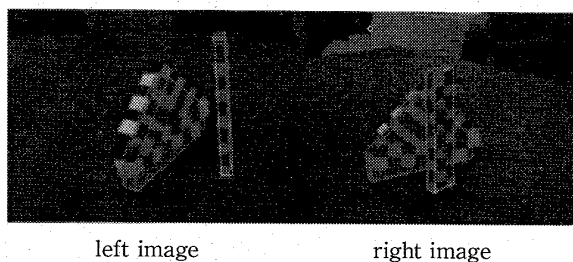


図15 初期状態  
Fig.15 Initial state of occluded object and model.

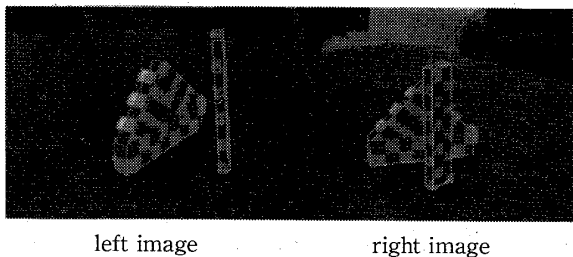


図16 修正結果(20回)  
Fig.16 Result of model fitting.

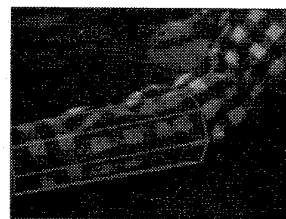


図19 別の方向から見た腕  
Fig.19 Model fitting checked from the third view.

### 5.5 腕と頭部

人体はモデルを正確に作成することが難しい対象である。人体の一部である腕についてモデルフィッティングを行った。腕の画像は図1である。その近似モデルは図1の右に示されているような多角柱である。図17が初期状態で、修正した結果が図18となる。また、第3の方向からも撮影しておき、修正結果の正しさを3次元的に確認することにした。その結果が図19である。

更に頭部についてもモデルフィッティングを行った。図20の上の行はモデルの初期状態、下の行はフィッティングしたときの状態を示している。この例では、初期状態でモデルがほぼ頭部に重なるように置かれてあるので、修正結果との違いが明確ではない。しかし、図21に示すように第3の方向からの観測では、モデルがより顔面に一致している様子が見られる。

### 5.6 ボールの追跡

応用例としてステレオ動画を使った物体追跡の例を示す。連続するフレームにおいて、前のフレームで物体に一致したモデルを次のフレームで初期位置とし、フィッティングを逐次進めることによって物体の追跡を行った。床面上を弾んでいるボールの追跡結果を図22に示す。但し、ボールの回転まで正確に測定してはいない。なお、ボールが床面に衝突したのは第8フレームと第9フレームの間であった。結果において、モデルと物体との間に多少のずれが見られる。これは、ボールの画像がぶれていることや、ステレオ動



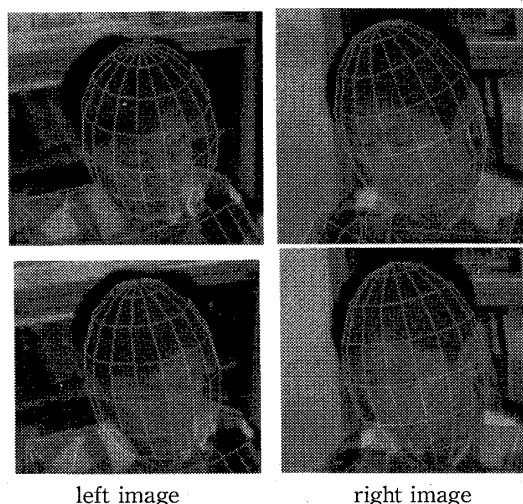


図 20 頭部とそのモデルの照合。初期状態：上行。照合結果 (20回)：下行  
 Fig.20 Fitting the head to the model. Upper and lower columns correspond to the initial and final states, respectively. The number of iterations is 20.

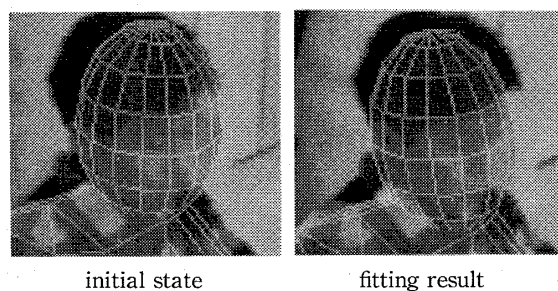


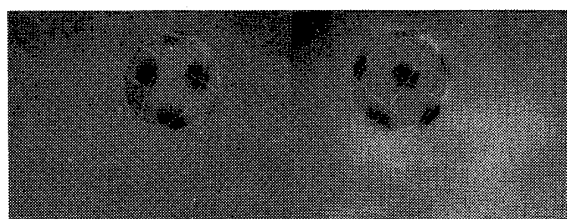
図 21 別の方向から見た頭部とそのモデルの照合結果。左：照合前，右：照合後  
 Fig. 21 Fitting result from the third view. Initial state (left), and fitting result (right).

画像の入力のため画像サイズが通常の半分 (319×240画素) になったことが原因で、3次元座標値の測定精度が悪化したためと考えられる。

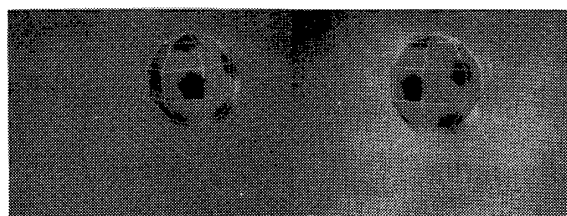
## 6. むすび

ステレオカメラシステムによる、物体と3次元近似モデルとのフィッティングの方法を提案した。モデルが物体の近傍にある場合、モデルの位置と姿勢の修正が可能であることを実画像を使って示した。従来、モデルフィッティングとステレオ画像の対応点探索は、独立した問題として扱われてきた。本手法では、両者を組み合わせることにより、それぞれ容易に解決できることを示した。

本手法の利用として、人間とコンピュータとの協調



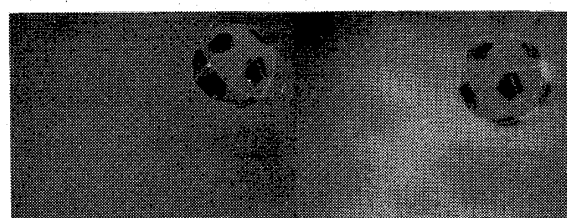
1st frame



5th frame



10th frame



15 frame

図 22 ボールの追跡  
 Fig. 22 Tracking the movement of a ball.

作業による物体の位置・姿勢の教示が挙げられる。すなわち、モデルを物体像にほぼ重なるように手で移動させ、重なった位置からのモデルフィッティングを本手法で行う。機械が不得手とする大域的な照合を人間が行い、人間が不得手な細かな作業を機械に分担させるのである。

モデルを物体の近傍に置くという仮定は、物体上の点とモデル面との対応付けを自動的に行うためのものである。もし、点と面の対応付けが教示されているならば、任意の位置からのモデルフィッティングも可能である<sup>(注2)</sup>。但し、ステレオ画像間の対応点探索に、モ

(注2)：このときのフィッティング法は、Loweの手法[5]の拡張と考えられる。従って、その収束性もLoweの手法のそれと同等と考えられる。



デルをガイドとして使うことはできない。

3次元位置の測定にレンジファインダを用いても、本手法によるモデルフィッティングは可能である。特に、近年、高速に距離情報が測定できるようになったため[1],[4],[14]、動いている対象の追跡も可能である。レンジファインダは、ステレオカメラと比較して密に距離情報が取得できるため、位置・姿勢の推定精度が向上するものと思われる。このとき、近似モデルから精密モデルの順にフィッティングを行えば、正確で効率の良いモデルフィッティングが期待できる。

また、レンジファインダで得た距離画像は対象の精密なモデルでもある。精密なモデルがあれば、近似モデルの導出や近似の度合の定量化が可能となる。どの程度の近似モデルまでフィッティング可能か、本手法の定量的な評価を行うことができる。

今後の課題として、まず処理速度の向上が挙げられる。今回は、SUN Sparc Station 5を使用し、計算時間は8分から10分程度であった。対応点探索と探索範囲の更新のための計算がほとんどである。更に探索の効率化を進めると共に、画像処理専用装置の利用を検討する必要がある。次に、より精度の良いフィッティングを実現するためには、カメラモデルの精密化が必要である。第3に、手法の限界を拡大することが挙げられる。本手法は物体の独立な面が3面以上見えている必要がある。しかし、実際の物体の姿勢によっては縮退して見える場合も多い。このような場合、輪郭線によるフィッティングと本手法によるフィッティングとを組み合わせることも考えられる。

**謝辞** 初期の段階で開発を担当した池田謙三氏(現、中日本技研(株))ならびに、人体モデルフィッティングへの拡張を担当した佐藤明知氏(現、富士通ゼネラル(株))に感謝致します。本研究は一部、科研費重点領域研究「人工現実感」(No.07244206)と(株)三協精機製作所との共同研究による支援を受けた。

## 文 献

- [1] J.A. Beraldin, M. Rioux, F. Blais, L. Cournoyer, and J. Domey, "Registered intensity and range imaging at 10 mega-samples per second," *Optical Engineering*, vol.31, no.1, pp.88-94, 1992.
- [2] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of ACM*, vol.24, no.6, pp.381-395, 1981.
- [3] D. DeMenthon and L.S. Davis, "Exact and approximate solutions of the perspective-three-point problem," *IEEE Trans. PAMI*, vol.14, no.11, pp.1100-1108, 1992.
- [4] T. Kanade, A. Gruss, and L.R. Carley, "A very fast rangefinder," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1322-1329, 1991.
- [5] D.G. Lowe, "Fitting parameterized three-dimensional models to images," *IEEE Trans. PAMI*, vol.13, no.5, pp.441-450, 1991.
- [6] D.G. Lowe, "Robust model-based motion tracking through the integration of search and estimation," *Int. J. of Computer Vision*, vol.8, no.2, pp.113-122, 1992.
- [7] D. Marr, "Vision," W.H. Freeman and Company, 1982.
- [8] O.D. Faugeras and M. Hebert, "The representation, recognition and location of 3-D objects," *Int. J. of Robotics Research*, vol.5 no.3 pp.27-52, 1986.
- [9] T. Hasegawa and S. Kameyama, "Geometric modeling of manipulation environment with interactive teaching and automated accuracy improvement," 20th ISIR, Tokyo, pp.419-426, 1989.
- [10] 倉掛正治, ラマカント・ネパティア, "関節のある動物体の記述と追跡," *信学論 (D-II)*, vol.J76-D-II, no.4, pp.854-862, April 1993.
- [11] T.Q. Phong, R. Horaud, A. Yassine, and D.T. Pham, "Object pose from 2-D to 3-D point and line correspondences," *Int. J. of Computer Vision*, vol.15, no.3, pp.225-243, 1995.
- [12] J.M. Rehg and T. Kanade, "DigitEyes: Vision-based human hand tracking," CMU-CS-93-220, 1993.
- [13] K. Rohr, "Towards model-based recognition of human movements in image sequences," *CVGIP: Image Understanding*, vol.59, no.1, pp.94-115, 1994.
- [14] 横山 敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士, "無調整型フォトVLSIセンサを用いた実時間距離画像計測—シリコンレンジファインダ," *信学論 (D-II)*, vol.J79-D-II, no.9, pp.1492-1500, Sept. 1996.
- [15] 山本正信, 川田 聡, 近藤拓也, 越川和忠, "ロボットモデルに基づく人間動作の3次元動画追跡," *信学論 (D-II)*, vol.J79-D-II, no.1, pp.71-83, Jan. 1996.

## 付 録

図 A・1 に示すように3次元形状が既知の物体を撮影し、その物体のりょう線の投影であるエッジセグメントの方程式を次式で表す。

$$X \sin \theta + Y \cos \theta = D \quad (\text{A} \cdot 1)$$

$\theta$  は  $X$  軸と直線のなす角度を、 $D$  は原点からの直線の距離を表す。一方、カメラモデルにより計算されるモデルのりょう線上の点の投影点座標を  $(X_m, Y_m)$  とする。この点からエッジセグメントまでの有効距離  $E$  は

$$E = X_m \sin \theta + Y_m \cos \theta - D \quad (\text{A} \cdot 2)$$

で与えられる。また、 $(X_m, Y_m)$  はカメラパラメータ

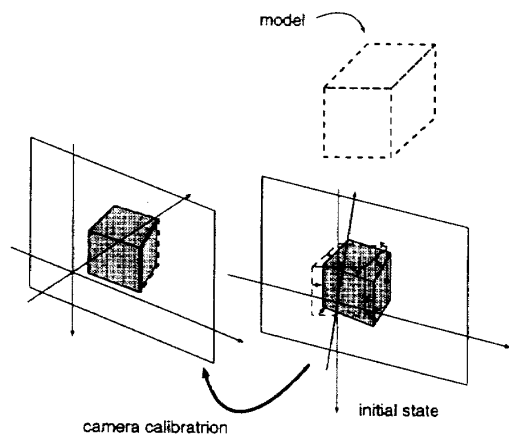


図 A.1 Lowe の方法によるカメラキャリブレーション  
Fig. A.1 Camera calibration by Lowe's method.

の関数であるので、複数のエッジセグメント上の点に対して導かれる方程式  $E = 0$  を連立させて解けば、カメラパラメータを求めることができる。この連立方程式は非線形であるので、解析的に解くことが難しい。そこで、あらかじめ手でモデルを物体の近くに置き、そこを初期位置としてニュートン法を使い、数値計算で求める。

(平成 9 年 3 月 12 日受付, 10 年 1 月 27 日再受付)



大崎 喜彦

平 6 新潟大・工・情報卒。平 8 同大大学院修士課程了。同年 (株) 安藤電気入社。



山本 正信 (正員)

昭 48 九工大・工・制御卒。昭 50 東工大大学院修士課程了。同年電総研入所。動画像処理, コンピュータビジョン等の研究に従事。平 1~2 カナダ国立研究協議会招聘研究員。昭 62 情処学会研究賞受賞。平 4 より新潟大工学部情報工学科教授。工博。情報処理学会, IEEE 各会員。