

二次元距離場を用いた三次元幾何モデルと濃淡画像の高速な位置合せ

岩下 友美^{†a)} 倉爪 亮[†] 小西 晃造^{††} 中本 将彦^{††}
橋爪 誠^{††} 長谷川 勉[†]

Fast Alignment of 3D Geometrical Models and 2D Grayscale Images
Using 2D Distance Maps

Yumi IWASHITA^{†a)}, Ryo KURAZUME[†], Kozo KONISHI^{††}, Masahiko NAKAMOTO^{††},
Makoto HASHIZUME^{††}, and Tsutomu HASEGAWA[†]

あらまし テクスチャをもつ実物体の三次元モデルを構築するには、幾何及び光学情報が同時に得られる一部のセンサを除いて、一般的にレーザスキャナ等によって測定された三次元幾何モデルと画像センサから得られる二次元画像との位置合せが必要となる。従来提案されている位置合せ手法の一つとして、三次元幾何モデルのシルエット画像と二次元画像の輪郭線を比較し、繰返し計算により両者の相対位置を推定する手法がある。しかし、二次元画像内の輪郭線上の点とシルエット画像の輪郭線上の点との点对応を用いる方法では、繰返し計算ごとに最近傍点を探索する必要があり、計算コストが高い。そこで本論文では、濃淡画像の輪郭線から Fast Marching Method により構築した二次元距離場を用いた、濃淡画像と三次元幾何モデルの高速な位置合せ手法を提案する。また、人形を用いたシミュレーション実験と、内視鏡下手術における手術ナビゲーションシステムの構築を目的とした臓器モデルの重ね合せ実験を行い、本手法の有効性を示す。

キーワード テクスチャマッピング、レジストレーション、Fast Marching Method、距離場、ロバスト M 推定

1. ま え が き

実世界に存在する物体の三次元幾何モデルにその見えを貼り付け、テクスチャをもつ三次元モデルを効率的に構築する手法は、CG や VR の分野で重要な要素技術の一つである。これまでに、レンジセンサ等から得られる距離画像と画像センサから得られる二次元画像との位置合せを自動的に行う手法が提案されている。Viola ら [17] は異なる二つの画像間の類似度を相互情報量で評価して位置合せを行う枠組みを構築し、三次元幾何モデルと濃淡画像の位置合せに応用している。また Allen ら [15] はレンジデータに平面を当てはめ、それらの交線エッジと二次元画像のエッジを比較

することで位置合せを行った。これらの手法は、小さな albedo 分散を有する表面に対しては比較的うまく機能するが、複雑なテクスチャを有する表面では局所解に陥る可能性が高い。

そこで、多くのレンジセンサにおいて距離画像の付加的な情報として得られるリフレクタンス画像を用い、三次元幾何モデルと二次元画像の位置合せを行う手法が提案されている。倉爪ら [5], [19] はリフレクタンス画像中のエッジ点とテクスチャ画像中のエッジ点間の誤差をロバスト M 推定法を用いて最小化することにより、位置合せを行っている。また Elstrom ら [3] はリフレクタンス画像と二次元画像からコーナディテクタにより特徴点を抽出し、それらの対応を決定している。更に梅田ら [16] は、リフレクタンス画像と二次元画像のこう配拘束を利用した、レンジセンサと画像センサの相対位置の推定法を提案している。

一方、シルエット画像や輪郭線を用いた位置合せ手法も提案されている。Lensch ら [7]~[9] が提案したシルエット画像を用いた位置合せ手法では、まず二次元画像と三次元幾何モデルのそれぞれのシルエット画像

[†] 九州大学大学院システム情報科学府，福岡市
Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, 812-8581 Japan

^{††} 九州大学大学院医学研究院，福岡市
Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, 812-8582 Japan

a) E-mail: yumi@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

の排他的論理和をとることで類似度を評価する。次に Downhill Simplex 法を利用し、二次元画像と三次元幾何モデルの位置合せ誤差を収束させている。また、三次元幾何モデルの三次元距離場をあらかじめ octree 形式で構築し、二次元画像のシルエット輪郭線の視線方向への延長線と三次元幾何モデル間の三次元距離を最小化する手法が提案されている [1], [6]。Zuffi ら [18] は、人工関節の位置姿勢を 1 枚の X 線画像から推定する問題に適用し、三次元距離誤差を Levenberg-Marquardt 法により最小化する手法を提案した。医療用画像における種々の位置合せ手法については [10] に詳しい。一方、二次元輪郭線を用いた位置合せ手法では、二次元画像内の輪郭線上の点と投影された三次元幾何モデルのシルエット画像輪郭線の点との距離の和として位置合せ誤差を求め、繰返し計算により誤差を最小化する手法が一般に用いられる [2], [11], [12]。しかしこれらの手法に共通して、位置合せ誤差の計算には、二つの輪郭線上の点で多くの点对応計算が必要であり、計算コストが高いという問題がある。

本論文では、濃淡画像の輪郭線から求めた二次元距離場と二次元画像に投影した三次元幾何モデルのシルエット画像輪郭線を用いた、三次元幾何モデルと濃淡画像の高速な位置合せ手法を提案する。本論文の構成は以下のとおりである。2. では、ある与えられた境界からある地点までの距離を高速に計算する Fast Marching Method と、それを用いた二次元画像平面上での高速な距離場の構築法について述べる。次に 3. では、対象物体の三次元幾何モデルを画像平面に投影したシルエット画像の輪郭線と、求められた距離場を用い、ロバスト M 推定法により両者の相対位置を推定する手法について述べる。更に 4. では計算機シミュレーション実験及び実画像を用いた実験により、位置合せ精度を評価する。また内視鏡下手術における手術ナビゲーションシステムの構築を目的とした、臓器モデルと内視鏡画像の重ね合せ実験を行った結果を示す。5. はまとめである。

2. Fast Marching Method

本章では、Sethian によって提案された Fast Marching Method [13], [14] について述べる。この Fast Marching Method は、移動体追跡や三次元幾何モデリングなどの様々な分野で用いられる Level Set Method の高速化手法として提案された手法であり、本論文ではこの手法を用いて高速に輪郭線からの二次

元距離場を構築する。

Fast Marching Method は [13], Eikonal 方程式 ($|\nabla T(p)| = F$) の高速な数値解法として提案された。ただし $T(p)$ は境界が点 p に到達した時刻である。この方程式は通常、収束計算により解かれるため、膨大な計算時間が必要である。しかし、Fast Marching Method では、成長速度 F の符号が固定という条件を加え、到達時刻の小さい点から大きい点へ一方方向に到達時刻を確定していくことで、収束計算を行うことなく高速に Eikonal 方程式の解を導くことができる。

Fast Marching Method では、まず Eikonal 方程式を次の差分方程式に置き換える。

$$(\max(D_{ij}^{-x}T, -D_{ij}^{+x}T, 0)^2 + \max(D_{ij}^{-y}T, -D_{ij}^{+y}T, 0)^2)^{\frac{1}{2}} = 1/F_{ij} \quad (1)$$

次に、境界は到達時間が小さい場所から大きい場所へと一方方向に伝搬することから、到達時間の小さい場所から順に式 (1) を解き、各点の到達時間を確定する。

具体的には以下ようになる。

[Step. 1] (初期化) まず、次の処理によってすべてのグリッドを三つのリスト (*known*, *trial*, *far*) のいずれかに追加する。

(1) 境界に属するグリッドを *known* のリストに追加し、到達時間を 0 にセットする ($T = 0$)。

(2) *known* の 4 近傍のグリッドのうち、*known* でないグリッドを *trial* に追加し、そのグリッドの到達時間を $T_{ij} = 1/F_{ij}$ により計算して仮登録する。また、これらのグリッドを到達時間に関する昇順の Heap 形式で保存する。

(3) 上記以外のピクセルを *far* に追加し、到達時間を無限大とする ($T = \infty$)。

[Step. 2] Heap の先頭に置かれた、*trial* のリスト中で到達時間 T が最も小さいグリッド (i_{min}, j_{min}) を選択し、そのグリッドを *trial* のリストと Heap から除外し、*known* のリストに追加する。Heap から除外する際、同時に Heap を再構築 (downheap) する。
[Step. 3] 現在選択されたグリッド (i_{min}, j_{min}) の 4 近傍 ($(i_{min}-1, j_{min}), (i_{min}+1, j_{min}), (i_{min}, j_{min}-1), (i_{min}, j_{min}+1)$) のうち、*far* のリストに属しているグリッドを *trial* のリストに追加する。

[Step. 4] 現在選択されたグリッド (i_{min}, j_{min}) の 4 近傍のうち、*trial* に属している近傍点の到達時間を式 (1) を用いて計算して仮登録し、Heap を再構築 (upheap) する。

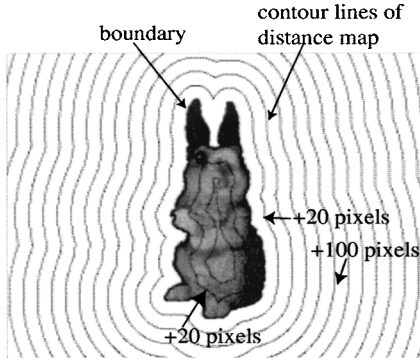


図 1 Fast Marching Method を用いて構築した距離場の例

Fig. 1 An example of the distance map calculation using the Fast Marching Method.

[Step. 5] *trial* に属しているグリッドが存在すれば Step. 2 へ戻る。それ以外の場合は処理を終了する。

この Fast Marching Method を用いると、ある与えられた境界からある地点までの距離を高速に計算することができ、これにより高速に境界からの距離場を構築できる。これは、まず式 (1) において成長速度 F_{ij} を全空間で 1 とし、上記の手順によって全領域での境界の到達時刻 T を求める。ここで、成長速度 F が 1 であることから、求められた T は境界からの距離に等しくなる。図 1 に計算された距離場の例を示す。

3. 三次元幾何モデルと二次元濃淡画像の高速な位置合せ

本章では、二次元距離場を利用した三次元幾何モデルと濃淡画像の高速な位置合せ手法を提案する。本手法の流れを以下に示す。ただし本論文で取り扱う三次元幾何モデルの前提条件として、その全周モデルがあらかじめ正確に作成され、均等で十分に多数の三角パッチにより記述されているとする。

(1) まず動的輪郭モデル (Snakes や Level Set Method [4]) を用い、濃淡画像から輪郭線を抽出する。

(2) Fast Marching Method を用い、得られた濃淡画像の輪郭線からの距離場を構築する。

(3) 対象物体の三次元幾何モデルを適当な初期位置に配置し、二次元画像上に投影する。

(4) 二次元画像上に投影された三次元幾何モデルに対し、そのシルエット画像の輪郭線を求め、輪郭線に対応する三角パッチを求める。これらは、後述するように OpenGL の機能を利用することで、高速に計

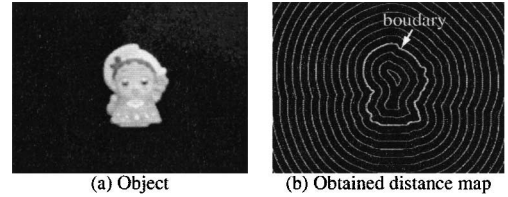


図 2 構築した輪郭線とその距離場
Fig. 2 Detected boundary and distance map.

算することができる。

(5) 得られた三次元幾何モデルの輪郭線上の三角パッチに対し、距離場に応じて計算される力を加える。

(6) ロバスト推定法の一手法である M 推定法を用いて、すべての輪郭線上の三角パッチに対して加えられた力の和と、三次元幾何モデル重心周りのモーメントを求める。

(7) 得られた力とモーメントに応じて、三次元幾何モデルの位置姿勢を更新する。

(8) 4 から 7 を収束するまで繰り返す。

以下、例を用いて詳細に説明する。

3.1 距離場の構築

図 2 に人形の画像に対して距離場を求めた例を示す。まず Level Set Method [4], [14] を用いて、濃淡画像から物体の輪郭線を抽出する。次に前章で説明した Fast Marching Method により、輪郭線の距離場を構築する。

3.2 三次元幾何モデルの輪郭線の高速な検出

図 3 に人形の三次元幾何モデルを二次元画像に投影し、そのシルエット画像の輪郭線と輪郭線に対応する三角パッチを求めた例を示す。輪郭線の抽出と輪郭線に対応する三角パッチの検出には、一般に多くの計算量を必要とするが、本システムでは OpenGL の機能を利用することで、高速に上記の計算を行うことができる。

輪郭線に対応する三角パッチの検出法を以下に示す。まず、図 4 に示すように三次元幾何モデルを構成するすべての三角パッチにすべて異なる色を定義し、OpenGL のレンダリング機能を用いて二次元画像に投影した二次元投影像を作成する。次に、その二次元投影像をラスターキャンし、輪郭線を求める。更にその輪郭線上の画素の色を求め、対応する三次元幾何モデル内の三角パッチを特定する。

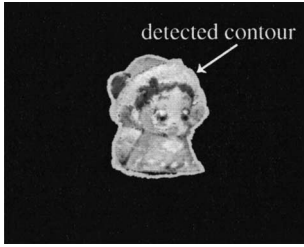


図 3 三次元幾何モデルの輪郭線の抽出
Fig. 3 Contour detection of 3D geometric model.

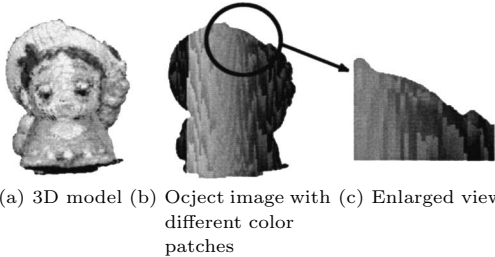


図 4 輪郭線上の三角パッチの検出
Fig. 4 Detection of triangular patches of the contour points.

3.3 ロバスト M 推定法による濃淡画像と三次元幾何モデルの相対位置の推定

まず、三次元幾何モデルの輪郭線に対応する三角パッチ i の重心に対し、濃淡画像の距離場を用いて計算した力 f_i を加える (図 5)。この力 f_i は視線方向ベクトル v に垂直であり、また画像平面への投影は次式で得られるベクトル f_{Di} と一致する (図 6)。

$$f_{Di} = D_{s,t} \frac{\nabla D_{s,t}}{|\nabla D_{s,t}|} \quad (2)$$

ここで、 $D_{s,t}$ は濃淡画像上の座標 (s, t) での距離場の値である。

次に、この力 f_i の総和と三次元モデルの重心周りのモーメントを次式により求める。

$$F = \sum_i \psi(f_i) \quad (3)$$

$$M = \sum_i \psi(r_i \times f_i) \quad (4)$$

ただし r_i は重心から輪郭線上の三角パッチ i へのベクトルであり、また $\psi(z)$ は適当な影響力関数である。ここで実際の濃淡画像において、ノイズや対象物体の一部が他の物体に隠れオクルージョンの発生などで、抽出した濃淡画像の境界と三次元幾何モデルの輪郭線が一致しない場合がある。そこで濃淡画像上に対応す

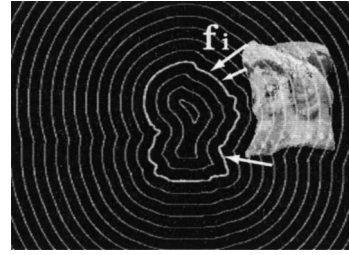


図 5 輪郭線上のすべての三角パッチへ力 f を適用
Fig. 5 Applying the force f to all the triangular patches of the contour points.

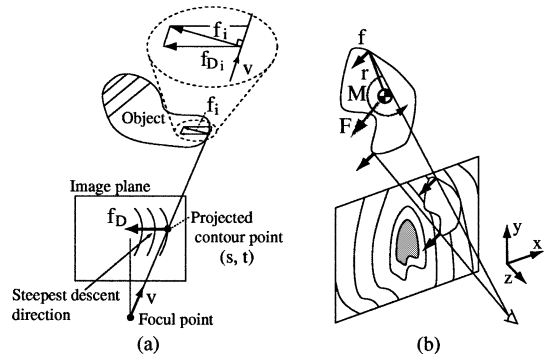


図 6 重心周りの力とモーメント
Fig. 6 Force and moment around COG.

る輪郭線が存在しない三次元幾何モデル上の三角パッチの影響を低減するために、本手法ではロバスト M 推定法を採用した。ロバスト M 推定法とは、あるデータから推定値までの残差が非常に大きな場合、重み付き関数を用いることで、これら推定値から大きく異なるデータの影響を軽減する手法である。この手法を用いることで、濃淡画像上の境界の一部にオクルージョン領域が発生し、投影された三次元モデルの輪郭線に対応する濃淡画像の輪郭線が存在しない場合でも、位置合せ計算を安定して行うことができる。

まず、各パッチに加わる力 f_i とモーメント $r_i \times f_i$ を誤差 z_i と考え、その総和を

$$E(P) = \sum_i \rho(z_i) \quad (5)$$

とおく。ただし $\rho(z)$ は適当な推定関数であり、

$$\frac{\partial \rho(z)}{\partial z} = \psi(z) \quad (6)$$

とする。また P は三次元モデルの位置、姿勢である。この $E(P)$ を最小にする位置 P は次式で得られる。

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_i \frac{\partial \rho(z_i)}{\partial z_i} \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0 \quad (7)$$

ここで誤差項評価のための重み関数 $w(z)$ を次式で定義する.

$$w(z) = \frac{1}{z} \psi(z) = \frac{1}{z} \frac{\partial \rho(z)}{\partial z} \quad (8)$$

これにより以下の重み付き最小二乗法を得る.

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_i w(z_i) z_i \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0 \quad (9)$$

後述の実験では、影響力関数 $\psi(z)$ 、推定関数 $\rho(z)$ 、重み関数 $w(z)$ に次式で表されるローレンツ関数とその微分関数を用い、 $\frac{\partial z_i}{\partial P} = \text{const.}$ と仮定して式 (5) で与えられる誤差 E を最急降下法を用いて漸近的に最小化する.

$$\psi(z) = \frac{z}{1 + (z/\sigma)^2} \quad (10)$$

$$\rho(z) = \frac{\sigma^2}{2} \log(1 + (z/\sigma)^2) \quad (11)$$

$$w(z) = \frac{1}{1 + (z/\sigma)^2} \quad (12)$$

この最小値を与える P が濃淡画像と三次元幾何モデルの相対位置である.

なお、三角パッチの大きさが表面の複雑度など部位によって著しく異なる場合、各パッチで計算される力 f_i やモーメント $r_i \times f_i$ が、三次元モデル重心に加えられる全体の力 F やモーメント M に与える影響が不均一になる可能性がある. この場合には、式 (3)、式 (4) で全体の力やモーメントを計算する際、三角パッチの面積などで各パッチの力やモーメントを正規化する必要があるが、本論文では三次元モデルを構成する三角パッチは均等で十分小さいと仮定し、このような処理は行っていない.

3.4 Coarse-to-fine 法と“distance band”

二次元距離場は Fast Marching Method を用いることで高速に構築できるが、実際に最終的な位置合せ計算を行う際に用いる距離場の領域はその一部であるため、濃淡画像上のすべての領域で詳細な距離場の計算を行う必要はない. そこで本手法では coarse-to-fine 法を適用し、また境界に近い領域のみ詳細な距離場の構築を行うことで全体の処理を高速化する. 以降、本論文ではこの境界に近い距離場の領域を distance band を呼ぶ.

表 1 Fast Marching Method を用いた距離場の構築時間の比較

Table 1 Computation time of the distance band by the Fast Marching Method.

Image size	Whole region [ms]	Distance band (10 pixels) [ms]
160 × 120	6.9	0.48
320 × 240	32.8	1.1
640 × 480	189.1	2.7

coarse-to-fine 法及び distance band を用いた位置合せ処理を以下に示す. まず低解像度で画像全体の距離場を構築し、次に distance band の領域のみをより高解像度に変更し、より詳細な距離場を構築する. 後述する実験では 10 pixels の幅をもつ distance band を用い、また画像解像度は 160 × 120, 320 × 240, 640 × 480 の 3 種類を用いた. 表 1 にそれぞれの画像解像度において計算時間の比較を行った結果を示す.

3.5 本手法の特徴

本手法の特徴として、次の三つが挙げられる. まず、Fast Marching Method を用いることで、濃淡画像の輪郭線からの距離場を高速に構築できる. 次に、従来提案されている輪郭線を用いた位置合せ手法では、繰返し計算ごとに濃淡画像の輪郭線上の点と三次元幾何モデルのシルエット輪郭線上の点との最近傍点を探索する必要があるため計算コストが非常に高い. しかし、提案手法では距離場が一度構築されれば、両画像の輪郭線上の点で点対応計算を行う必要がないため、従来手法と比較して高速に位置合せすることが可能である. 更に、輪郭線上の点数を変えて位置合せを行う場合、従来手法では輪郭線上の点数の増加に伴いより多くの計算時間を必要とするが、提案手法では点数が増加しても計算時間はほとんど変化しない. 一方、本手法は二次元情報である輪郭線形状から三次元物体の位置、姿勢を推定するものであるから、本手法の適用範囲は、輪郭線形状と姿勢が 1 対 1 に対応づけ可能な物体に限定される. すなわち、球や軸対称物体では、輪郭線形状から姿勢が一意に決定できないため、原理的に姿勢の推定は不可能である.

4. 実験

提案した位置合せ手法が適用可能な物体形状について調べるため、単純な形状物体を用いて実験を行い、提案手法の有効性とその問題点について考察を行った. また図 3 に示す人形と肝臓及び胆嚢の内視鏡画像に対して、提案した手法を適用し、実験を行った. 使用し

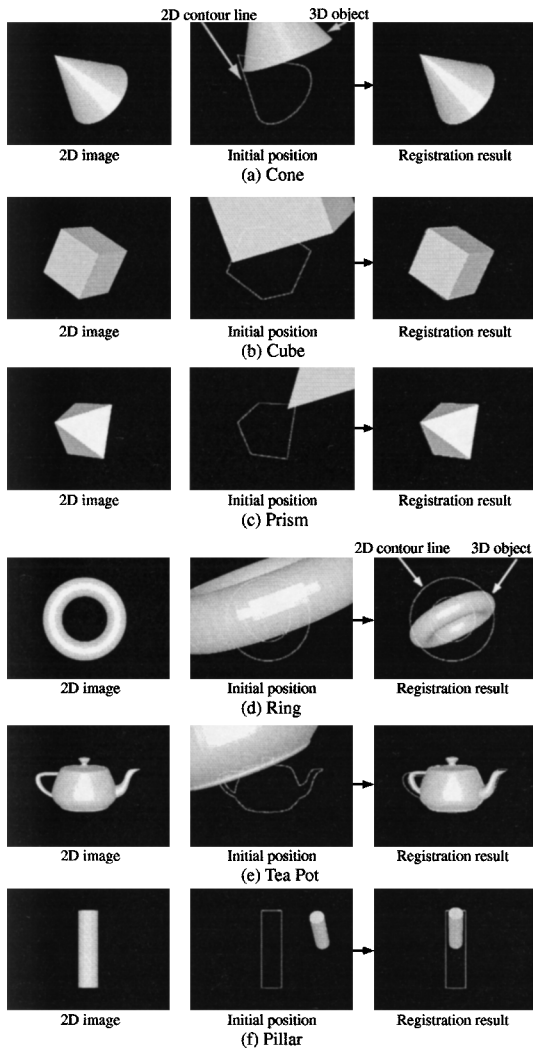


図 7 単純な形状物体を用いたシミュレーション実験結果
Fig. 7 Examples of 2D-3D registration using 3D models with various shapes.

た計算機は Pentium IV, 3.06 GHz である。

4.1 単純な形状物体を用いたシミュレーション実験

図 7 に示す 6 種類の物体について実験を行い、その収束性能を調べた。この結果、図 7 (a)~(c) に示す円錐、立方体、四角錐はほぼ確実に真値へ収束するが、図 7 (d), (e) のリングやティーポットのように穴をもつ物体に対しては、局所解に陥りやすい傾向が見られた。また図 7 (f) に示す細長く軸対称な物体も、正確な位置合せが困難であることが分かった。この原因として、図 8 に示すように濃淡画像内の距離場がある軸に対して対称かつ平行に存在する場合、距離場から

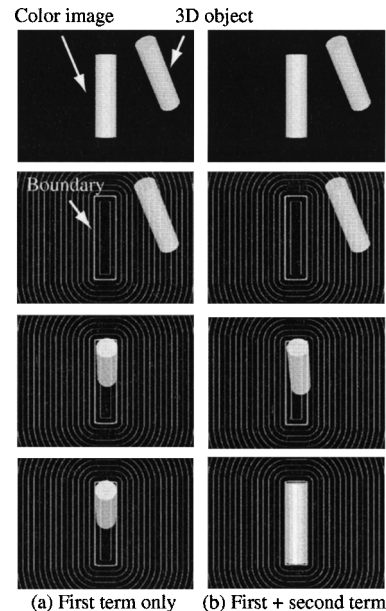


図 8 式 (13) の第 2 項の効果
Fig. 8 Effect of the second term of Eq. (13).

計算される軸に垂直な力（図の横向き）が打ち消し合い、また軸方向の力（図の下向き）も発生しないためであると考えられる。そこでこのような細長く軸対称な物体の収束性能を向上させるため、投影された輪郭線の法線方向と距離場の最急勾配方向との一致度を第 2 項として式 (2) に加え、次式のように f_{D_i} を変更した。

$$f_{D_i} = D_{s,t} \frac{|\nabla D_{s,t}|}{|\nabla D_{s,t}|} + k \cdot \text{sign} \left(n \cdot \frac{\nabla D_{s,t}}{|\nabla D_{s,t}|} \right) \left(1 - \left| n \cdot \frac{\nabla D_{s,t}}{|\nabla D_{s,t}|} \right| \right) n \quad (13)$$

ここで、 n は投影された三次元モデル輪郭線の法線ベクトル、 k は任意の定数、そして $\text{sign}(\cdot)$ は数値の符号を表す符号関数である。図 8 (b) に示すように、式 (13) を用いることで、細長く軸対称な物体に対する位置合せ性能が向上することが分かる。

4.2 人形を用いたシミュレーション実験

4.2.1 収束性能、位置合せ精度の評価

図 4 に示した人形（高さ 46 mm）に対し、人形をカメラの正面に置いたと仮定して人工的にシルエット画像を生成し、様々な初期位置から位置合せ計算を行って収束性能と位置合せ精度を評価した。実験条件は、

カメラ焦点距離 200 mm, 画素数 640×480 pixel, カメラ焦点から人形までの距離は 500 mm であり, 人形のシルエット画像の大きさは約 200×250 pixel である. また人形の三次元幾何モデルは 219,576 の頂点からなる 73,192 の三角パッチから構成されている.

また実験では, 人形の三次元モデルを, カメラ正面から左右上下前後方向 (x, y, z 方向と定義) にそれぞれ -40 mm から 40 mm まで 20 mm 刻みで動かした計 53 点において, 姿勢をロール, ピッチ, ヨー軸 (x, y, z 軸に対応) 方向に -20 度から 20 度まで 10 度刻みで 125 通りに変化させた合計 6625 個の初期位置に配置し, 提案手法により位置合せを行った. シルエット画像と初期位置の一例を図 9 に, 収束後の位置

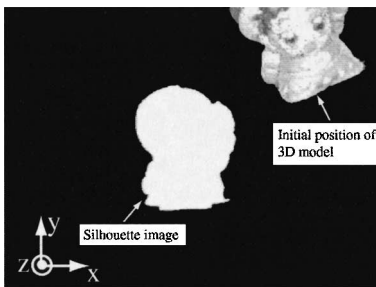


図 9 初期位置の一例
Fig. 9 An example of initial position.

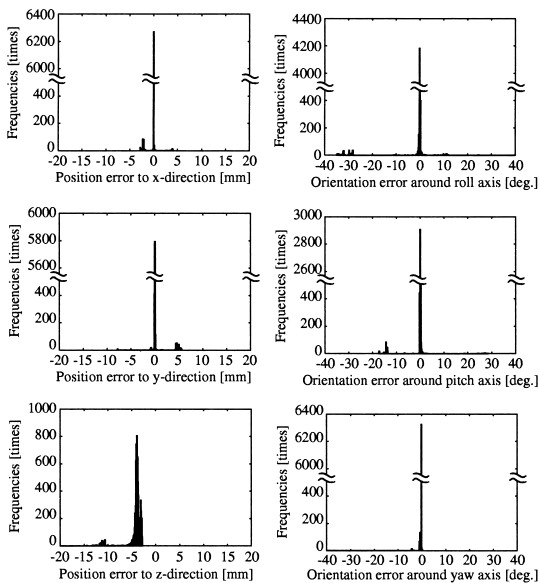


図 10 収束後の位置姿勢誤差の頻度分布
Fig. 10 Distribution of the frequencies of pose error after convergence.

姿勢誤差の頻度分布を図 10 に示す. これから, x, y 方向に比べて z 方向の位置推定誤差が大きいことが分かる. これは提案手法ではモデル表面の三角パッチが十分に小さいと仮定し, 3.2 の方法で求められた輪郭線に対応する三角パッチの重心に力を加えているため, 力の作用点が真の輪郭線よりも若干内側に存在し, 奥行位置が真値より手前に推定されているものと考えられる. この影響を低減するには, 例えば三角パッチの 3 頂点のうち, 輪郭線との距離が最も近い点を力の作用点とするなどの方法が考えられるが, 実験では位置合せ計算の高速化という観点から, このような処理は行っていない. 次に, 縦軸にロール軸周り, 横軸にピッチ軸周りの姿勢誤差をプロットしたものを図 11 に示す. これより, 姿勢については図 12 に示す A, B, C の三つの局所解が存在することが分かる. このうち姿勢 A が正しい姿勢推定値であり, この姿勢 A

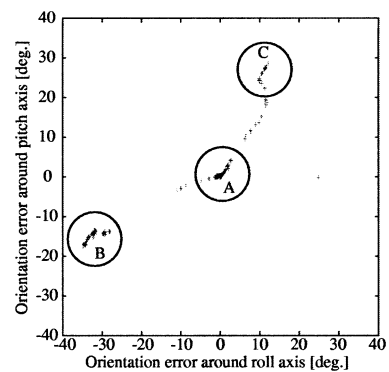


図 11 姿勢誤差の分布
Fig. 11 Distribution of orientation error.

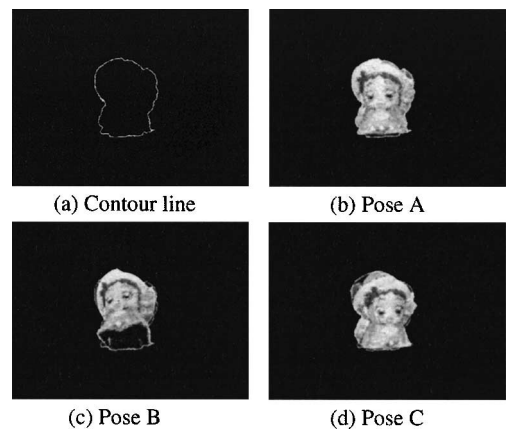


図 12 局所解の姿勢
Fig. 12 Pose at three local minimum solutions.

表 2 収束後の位置姿勢精度

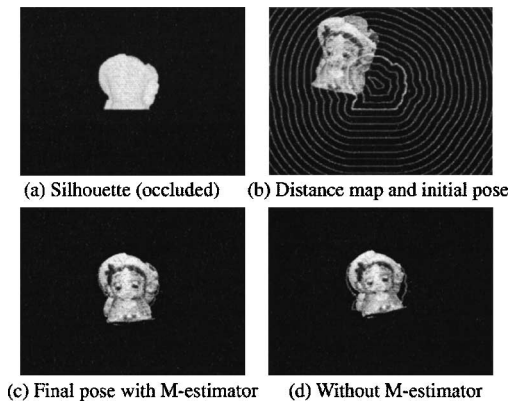
Table 2 Accuracy of 2D-3D alignment after convergence.

Position	x	y	z	Orientation	roll	pitch	yaw
Average [mm]	0.033	0.030	-3.763	Average [deg.]	0.063	0.1550	-0.042
SD. [mm]	0.017	0.022	0.484	SD. [deg.]	0.146	0.131	0.016

表 3 ロバスト M 推定による位置姿勢精度の比較

Table 3 Comparison of accuracy of 2D-3D alignment with and without M-estimator.

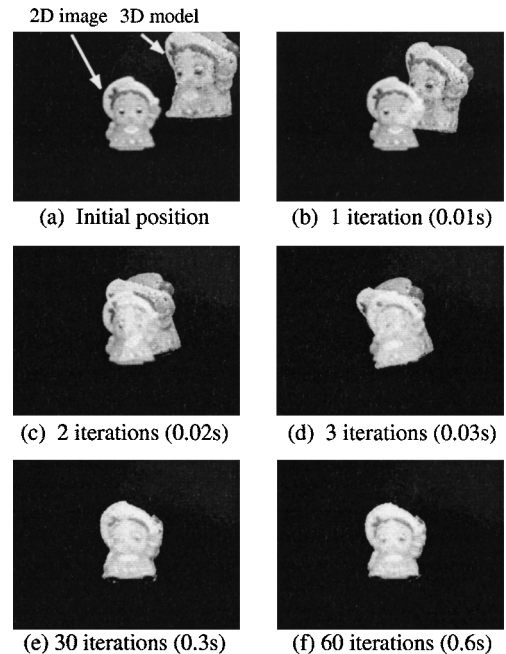
Position	x	y	z	Orientation	roll	pitch	yaw
M-estimator [mm]	0.88	3.29	14.55	M-estimator [deg.]	-3.45	6.47	2.69
Without M-est. [mm]	1.90	6.79	-26.21	Without M-est. [deg.]	-2.24	15.14	9.60

図 13 ロバスト M 推定の効果
Fig. 13 Effect of robust M-estimator.

への収束率（位置 0.1 mm 以内，姿勢 1 度以内，ただし z 方向の位置を除く）は 95.0% であった．また姿勢 A へ収束したものの位置姿勢精度の平均値，標準偏差を表 2 に示す．このように， z 軸方向の位置精度，及びピッチ軸（画面上で y 軸）周りの姿勢精度が他に比べて低いことが分かるが，これは上述した問題に加え， z 軸方向の平行移動やピッチ軸周りの回転では，見掛けにそれほど大きな変化が生じないためであると考えられる．

4.2.2 隠れに対する頑強性の評価

次にオクルージョンに対するロバスト M 推定の効果を検証するために，図 13 (a) に示すようにシルエット画像の一部（全体の下 1/4）を切り取って，前項と同様の位置合せ実験を行った．構築された距離場と初期位置の一例を図 13 (b) に，ロバスト M 推定を用いた場合と用いなかった場合の収束結果の一例を図 13 (c)，(d) に，及びそれぞれの位置姿勢精度の平均値を表 3 に示す．これより，輪郭線が正確に与えられる場合に比べて位置姿勢精度は低下しているものの，ロバスト

図 14 人形の三次元幾何モデルと実画像の位置合せ
Fig. 14 2D-3D registration of simulation images.

M 推定を用いることで対応点のない輪郭線の影響を低減できるため，ロバスト M 推定を用いない場合に比べて位置合せ精度が向上することが確認できた．

4.2.3 実画像を用いた位置合せ実験

次に実際に人形をカメラで撮影し，その濃淡画像と三次元幾何モデルの位置合せを行った．結果を図 14 に示す．ただし，濃淡画像の輪郭線上の点数は 652 である．

三次元モデルを構成する三角パッチ一つ当たりの力 f_i の計算時間は 0.30[us] であり，三次元幾何モデルの輪郭抽出，力とモーメントの計算，また最急降下法のそれぞれの 1 回の更新に要する計算時間は合計

で 9.6[ms] であった。また、位置合せ処理を 60 回行う場合の両輪郭線間の平均誤差は 1.19[pixel]、分散は 0.90[pixel²] であった。一方、点对应計算を行う従来手法 [5] を用いた場合、力 f_i の計算時間は 1.15[us] であった。ただし、点对应計算には k-D tree を用いた。

表 4 パッチ一つ当たりにおける力 f の処理時間の比較
Table 4 Comparison of processing time for one patch.

Number of points on boundary	Proposed method [μ s]	Point-based method [5] [μ s]
628	0.30	1.15
1265	0.30	1.50
1868	0.30	1.70
2490	0.30	2.22

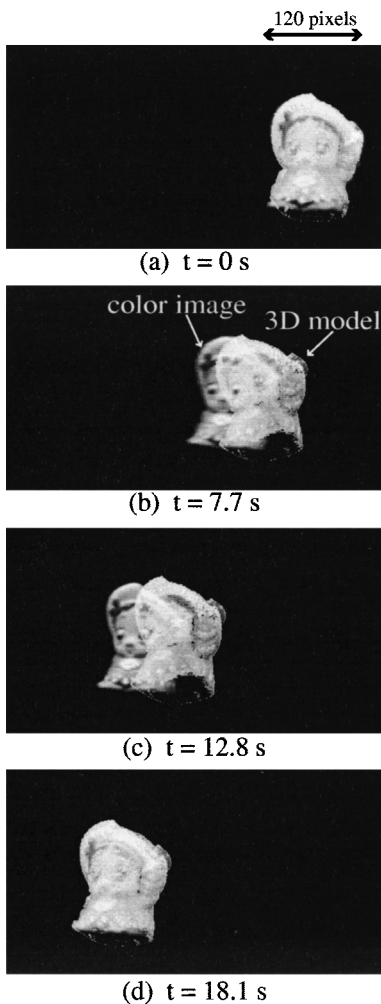


図 15 移動物体の位置合せ

Fig. 15 An example of moving object tracking.

また、表 4 に輪郭線上の点数を変えて同様の実験を行った結果を示す。提案した手法を用いた場合、輪郭線上の点数が増加しても力 f の計算時間はほとんど変化しないが、従来手法では点数の増加に伴いより 3 倍から 7 倍の計算時間を必要としている。この実験結果より、特に輪郭線上の点数が多い場合、提案した位置合せ手法は従来手法と比較して高速に処理を行えることが分かる。

更に、画面上を移動する人形に対して同様の実験を行った。追跡実験結果を図 15 に示す。これより、人形が画面上を 20.5 [pixel/秒] で移動する場合でも、高速に濃淡画像の距離場を再構築し、頑強に位置合せできていることが分かる。

4.3 肝臓、胆嚢の内視鏡画像を用いた実験

内視鏡下手術における手術ナビゲーションシステムの構築を目的とした、臓器三次元モデルの内視鏡画像への重ね合せ実験を行った。実験では、肝臓及び胆嚢の内視鏡画像に対して提案した位置合せ手法を適用した。ただし臓器の三次元幾何モデルは、実際の患者本人の CT や MRI 画像からあらかじめ作成した。

肝硬変患者の内視鏡画像 (図 16 (a)) と、硬化した肝臓の三次元幾何モデル (図 16 (b)) に対して実験を行った結果を図 16 に、また視野内を移動する胆嚢の

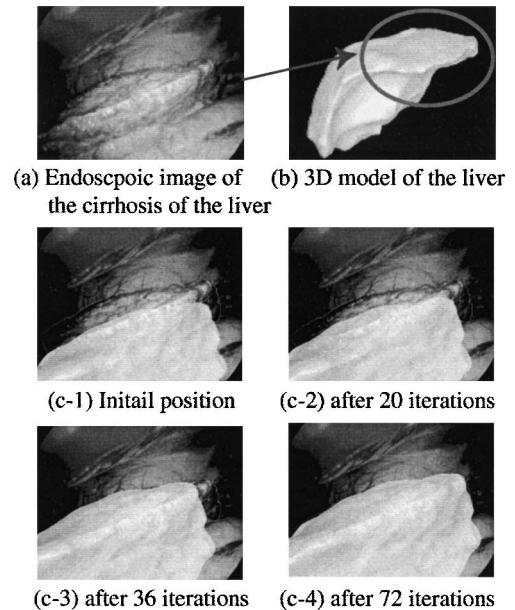


図 16 実際の硬化した肝臓の画像を用いた位置合せ

Fig. 16 2D-3D registration using actual images of the cirrhosis of the liver.

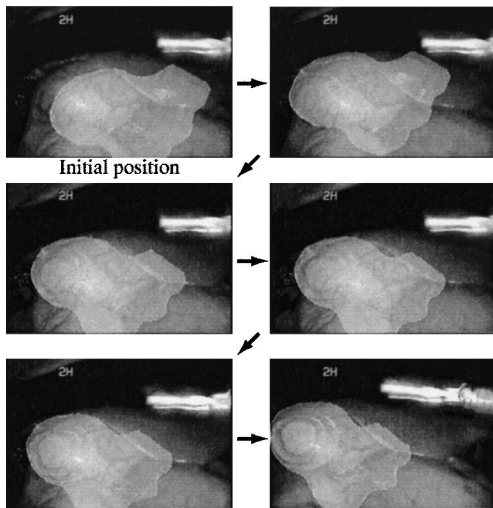


図 17 実際の胆嚢画像を用いた位置合せ

Fig. 17 2D-3D registration using actual images of the gallbladder.

内視鏡画像と胆嚢の三次元幾何モデルに対して同様の実験を行った結果を図 17 に示す。ただし実験では、二次元画像上の対象臓器に対し、まず三次元幾何モデルの初期位置、姿勢を手動で設定し、次に提案した位置合せ手法を適用して内視鏡画像に三次元モデルを重ね合わせて提示した。なお実際の手術ナビゲーションシステムは、他の器官による運動自由度の拘束や臓器自体の変形、また視野や照明条件の制約などの問題も考慮する必要があるため、提案した位置合せ手法のみで臓器の正確な三次元位置を推定するのは困難であると考えられる。今後はこれらの制約も考慮して提案手法を改良し、ナビゲーションシステムへの提案手法の適用可能性についてより詳細に検討する予定である。

5. む す び

本論文では、三次元幾何モデルと濃淡画像の高速な位置合せ手法を提案した。提案した手法では、まず Fast Marching Method を用いて濃淡画像の対象物体の輪郭線から二次元距離場を構築した。次に、二次元画像上に投影した三次元幾何モデルのシルエット輪郭線と、構築した二次元距離場を用い、ロバスト M 推定法により三次元幾何モデルと濃淡画像の詳細な相対位置関係を求めた。

この手法は対応点探索が不要なため位置合せを高速に実行でき、その前提となる二次元距離場も Fast Marching Method を用いることにより高速に構築で

きる。人形を用いたシミュレーション実験を行い、従来手法と比較して高速な位置合せが可能であることを確認した。また実際の内視鏡画像を用いた実験を行い、ナビゲーションシステムへの適用例を示した。

文 献

- [1] L. Brunie, S. Lavalée, and R. Szeliski, "Using force fields derived from 3D distance maps for inferring the attitude of a 3D rigid object," Proc. Second European Conference on Computer Vision, pp.670-675, 1992.
- [2] Q. Delamarre and O. Faugeras, "3D articulated models and multi-view tracking with silhouettes," Proc. International Conference on Computer Vision, vol.2, pp.716-721, 1999.
- [3] M.D. Elstrom and P.W. Smith, "Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments," Proc. 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1948-1953, 1999.
- [4] Y. Iwashita, R. Kurazume, T. Tsuji, K. Hara, and T. Hasegawa, "Fast implementation of level set method and its realtime applications," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.6302-6307, 2004.
- [5] R. Kurazume, K. Noshino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, "Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute," Proc. Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), pp.99-106, 2002.
- [6] S. Lavalée and R. Szeliski, "Recovering the position and orientation of free-form objects from image contours using 3D distance maps," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.17, no.4, pp.378-390, 1995.
- [7] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, "Automated texture registration and stitching for real world models," Pacific Graphics '00, pp.317-326, 2000.
- [8] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, "Hardware-accelerated silhouette matching," SIGGRAPH Sketches, p.211, 2000.
- [9] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, "A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching," Graphical Models, vol.63, pp.245-262, 2001.
- [10] J. Maintz and M. Viergever, "A survey of medical image registration," Medical Image Analysis, vol.2, no.1, pp.1-36, 1998.
- [11] K. Matsushita and T. Kaneko, "Efficient and handy texture mapping on 3D surfaces," Comput. Graph. Forum, vol.18, pp.349-358, 1999.
- [12] P.J. Neugebauer and K. Klein, "Texturing 3d models of real world objects from multiple unregistered photographic views," Comput. Graph. Forum, vol.18, pp.245-256, 1999.

- [13] J. Sethian, "A fast marching level set method for monotonically advancing fronts," Proc. National Academy of Science, vol.93, pp.1591–1595, 1996.
- [14] J. Sethian, Level Set Methods and Fast Marching Methods, second edition, Cambridge University Press, UK, 1999.
- [15] I. Stamos and P.K. Allen, "Integration of range and image sensing for photorealistic 3D modeling," Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1435–1440, 2000.
- [16] K. Umeda, G. Godin, and M. Rioux, "Registration of range and color images using gradient constraints and range intensity images," Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition, pp.12–15, 2004.
- [17] P. Viola and W.M. Wells III, "Alignment by maximization of mutual information," Int. J. Comput. Vis., vol.24, no.2, pp.137–154, 1997.
- [18] S. Zuffi, A. Leardini, F. Catani, S. Fantozzi, and A. Cappello, "A model-based method for the reconstruction of total knee replacement kinematics," IEEE Trans. Med. Imaging, vol.18, no.10, pp.981–991, 1999.
- [19] 倉爪 亮, 西野 恒, M.D. Wheeler, 池内克史, "リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアライメント," 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.6, pp.1038–1046, June 2002.
(平成 16 年 11 月 16 日受付, 17 年 3 月 15 日再受付)



岩下 友美 (学生員)

2004 九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻修士課程了。現在、同博士後期課程在学中。コンピュータビジョンの研究に従事。日本ロボット学会学生会員。



倉爪 亮

1991 東京工業大学大学院機械物理工学専攻修士課程了。同年(株)富士通研究所入社, 1995 東工大機械宇宙学科助手, 2000 スタンフォード大客員研究員, 同年東京大学生産技術研究所博士研究員, 2002 九州大学大学院システム情報科学研究院助教授, 現在に至る。群ロボット, 歩行機械, レーザ計測の研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会, 日本機械学会各会員。



小西 晃造

1998 九大・医・卒。2004 同大大学院次世代低侵襲治療学助手。専門：脾門脈外科・内視鏡外科・コンピュータ外科。日本外科学会認定医, 日本コンピュータ外科学会, 日本エム・イー学会各会員。



中本 将彦

1997 阪大・基礎工・情報工学卒。2002 同大大学院基礎工学研究科博士課程了。工博。2005 大阪大学大学院医学系研究科画像解析分野助手。医用ナビゲーションシステムの研究に従事。



橋爪 誠

1979 九大・医・卒。1984 同大大学院医学系研究科了。1998 九州大学医学部第二外科助教授。1999 九州大学大学院災害・救急医学教授。2003 九州大学病院先端医工学診療部長併任。専門：脾門脈外科・内視鏡外科・コンピュータ外科。手術ロボティクスシステム開発研究に従事。日本外科学会指導医, 日本コンピュータ外科学会理事。



長谷川 勉 (正員)

1973 東工大・電子物理工学科卒。同年電子技術総合研究所勤務。1992 より九州大学工学部情報工学科教授。現在同大学大学院システム情報科学研究院教授。知能ロボットの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会等各会員。