

手術ナビゲーションシステムのための内視鏡画像 と3次元モデルの高速な位置合わせ

岩下 友美[†] 倉爪 亮[†] 小西 晃造[‡] 中本 将彦[‡] 橋爪 誠[‡] 長谷川 勉[†]
[†]九州大学 大学院システム情報科学府 [‡]九州大学 大学院医学研究院

Fast 2D-3D Registration for Navigation System of Surgical Robot

Yumi Iwashita[†], Ryo Kurazume[†], Kozo Konishi[‡], Masahiko Nakamoto[‡], Makoto Hashizume[‡],
Tsutomu Hasegawa[†]

[†]Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

[‡]Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, Fukuoka, JAPAN

Abstract— This paper presents a new registration algorithm of 2D color images and 3D geometric models for navigation system of surgical robot. A 2D-3D registration procedure is used to superimpose a tumor model on an endoscopic image precisely, and is therefore indispensable for the surgical navigation system. One of the typical techniques developed so far is the use of external markers, but the accuracy of this method is getting worse due to the breath, the heart beat, or other unknown factors. For precise registration of 3D models and 2D images without external markers or special measurement devices, the new registration method is proposed which utilizes the 2D images and their distance maps created by the Fast Marching Method. We show some results of fundamental experiments using simulated models and actual images of the endoscopic operation of a cirrhosis of a liver and a gallbladder.

Key Words: 2D-3D registration, Fast Marching Method, Robotic surgery

1. はじめに

手術ロボット da Vinci のための手術ナビゲーションシステムを開発している。本システムでは、あらかじめCTやMRIによって得られた臓器の3次元モデルをda Vinciの内視鏡画像に重ね合わせ、術者に臓器の病巣や血管などの内部構造を提示する。しかし内視鏡画像は一般に2次元であり、臓器の3次元モデルと2次元画像の位置合わせが必要である。従来提案された2次元画像と3次元モデルの位置合わせ手法は、主にテクスチャや輝度分布を利用していた。しかし臓器の場合、表面のテクスチャに特徴が少なく、また個体差も存在するため、テクスチャを利用するのは困難である。そこで本報告では輪郭線とその距離場を用いた、2次元画像と3次元モデルの高速な位置合わせ手法を提案する。本手法ではまず、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を用いて、内視鏡画像の対象臓器の輪郭線から2次元画像上で距離場を求める。次に、臓器の3次元モデルを2次元画像に投影した際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決定する。

2. Fast Marching Method

Fast Marching Method は [1], Eikonal 方程式 ($|\nabla T(p)| F = 1$) 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, F は境界の法線方向の移動速度である。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

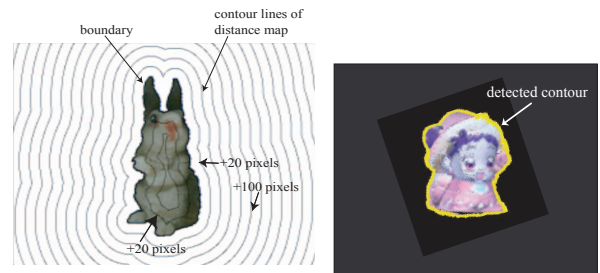


Fig.1 Distance map obtained by Fast Marching Method

Fig.2 Contour detection of 3D model

の解を導くことができる。

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描くことができる。Fig.1 に計算された距離場の例を示す。

3. 3次元モデルと内視鏡画像との高速な位置合わせ

本章では、距離場を利用した内視鏡画像と3次元モデルの高速な位置合わせ手法を提案する。まず、内視鏡画像から対象臓器の輪郭線を抽出する。次に、対象臓器の3次元モデルを適当な位置に配置し、内視鏡画像に投影してその輪郭線を求める。ただし予め、臓器の3次元モデルはCTやMRI画像から作成され、そのモデルは多数の3角パッチにより記述されているとする。Fig.2 に人形の3次元モデルを2次元画像に投影し、その輪郭線に対応する3角パッチを求めた例を示す。

次に3次元モデルの輪郭線に対応する3角パッチ i に、距離場から計算される力 f_i を加える。この力 f_i は、

Fig.3(a) に示す 2つのベクトル f_{DM_i} と f_{p_i} の和と定義する．ただし f_{DM_i} は距離場の最急降下方向のベクトルであり，その大きさは距離場の値に比例する．また， f_{p_i} は視線方向のベクトルであり，その大きさはベクトル f_{DM_i} と視線方向の単位ベクトル v との内積とする．この力 f_i の総和と重心周りのモーメントを次式により求める (Fig.3) ．

$$F = \sum_i \rho(f_i) \quad (1)$$

$$M = \sum_i \rho(r_i \times f_i) \quad (2)$$

ただし r_i は重心から輪郭線上の 3角パッチ i へのベクトルである．また $\rho(z)$ は適当な推定関数である．実際の内視鏡画像において，多くの場合臓器の一部は他の臓器に隠されており，抽出した境界と 3次元モデルの輪郭線は一致しない．そこで 2次元画像上に対応する輪郭線が存在しない 3次元モデル上の 3角パッチの影響を低減するために，推定関数 ρ を用いたロバスト M 推定法を採用した．次に，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 ϵ_i と考え，Eqs.(1),(2) を

$$E(P) = \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = \sum_i \rho(\epsilon_i) \quad (3)$$

とおく．ただし P は 3次元モデルの位置，姿勢である．誤差 E を最急降下法を用いて漸近的に最小化し，2次元画像と 3次元モデルの相対位置 P を求める．

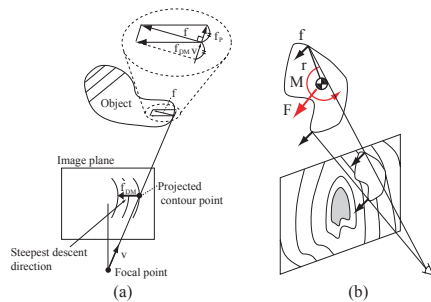


Fig.3 Force and moment applied to the 3D model

4. 実験

Fig.2 に示す人形と肝臓および胆嚢の内視鏡画像に対して，提案した位置合わせ手法を適用し，実験を行った．使用した計算機は Pentium IV, 3.06GHz である．

Fig.4 に，人形の 2次元画像とその 3次元モデルの位置合わせを行った結果を示す．ただし，3D モデルの奥行き方向の位置は da Vinci のステレオカメラから得られると仮定しており，3D モデルは 5 自由度の自由度を持つこととする．距離場の計算時間は 218.0[ms] であり，3次元モデルの輪郭抽出，力とモーメントの計算，また最急降下法の計算時間は合計で 20.4[ms/1update] である．

次に，肝臓の内視鏡画像 (Fig.5(a)) と，予め CT 画像から作成した肝臓の 3次元モデル (Fig.5(b)) に対して同様の実験を行った．Fig.5(c) は内視鏡画像と 3次元モデルの位置合わせ結果を示している．

さらに，視野内を移動する胆嚢の内視鏡画像と，予め CT 画像から作成した胆嚢の 3次元モデルに対して同様の実験を行った．Fig.6 に示すように，内視鏡カメラの移動に伴い画像内での胆嚢の位置が変動しても，3次元モデルが画像上の胆嚢を追跡できていることがわかる．

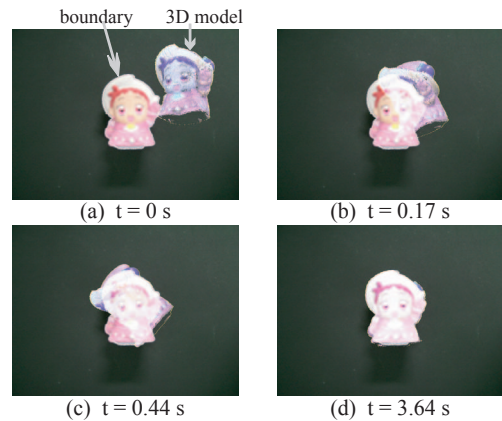


Fig.4 2D-3D registration of simulation images

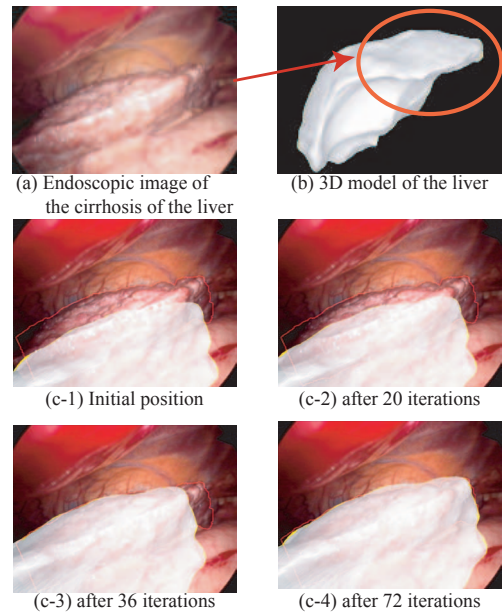


Fig.5 2D-3D registration using actual images of the cirrhosis of the liver

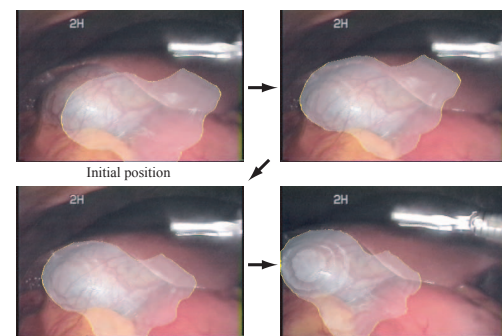


Fig.6 2D-3D registration using actual images of the gallbladder

5. まとめ

本報告では手術ナビゲーションシステムのための，輪郭線とその距離場を用いた，内視鏡画像と 3次元モデルの高速な位置合わせ手法を提案した．また実際の内視鏡画像を用いた実験を行い，有効性を確認した．

参考文献

- [1] J. Sethian, "A fast marching level set method for monotonically advancing fronts", *Proceedings of the National Academy of Science*, 93, 1591-1595, 1996