

肝臓手術サポートシステムにおける GPGPU による DICOM からの深度画像生成と評価

矢野 大貴[†] 小枝 正直[†] 大西 克彦[†] 登尾 啓史[†]

大阪電気通信大学 総合情報学研究科[†]

1. はじめに

肝臓手術は、血管構造が複雑であり大小多くの血管が張り巡らされており難しい。また体の複雑な機能を担っている為に全摘出が困難である。術前の MRI や CT を用いた術前診断によって血管位置を把握することができるが、術中の異なる位置姿勢の臓器内部構造を詳細に把握することは不可能である。本研究では、リスクの高い肝臓手術を IT メカトロ技術でサポートすることを目的とし、肝臓の開腹手術を対象とした手術サポートシステムを関西医科大学と共同して開発中である。

本稿では、開発中の肝臓手術サポートシステムにおいて STL モデルを経由せずに直接、DICOM から深度画像を取得する手法を提案、実装し仮想空間における位置姿勢推定の評価を行った。

2. 開発中の手術サポートシステム

我々が、現在開発中の肝臓手術サポートシステムのシステム全体図を Fig. 1 に示す。本システム¹⁾では、術前に MRI や CT を用いて患者の肝臓を撮影し、その断層画像（以下、DICOM と略す）から肝臓の 3 次元モデル化を行う。3 次元モデル化は血管や臓器を DICOM からセグメンテーションを行い、肝臓全体、動脈群、静脈群、門脈群毎に三角形で分割した多面体（以下、STL と略す）へ変換する。手術中には手術台の上部から 2 つの距離カメラで患者の肝臓とメスの位置を計測する。

距離カメラから得られた肝臓の表面形状（以下、実肝臓と略す）から生成した深度画像と STL モデル化した肝臓の 3 次元形状（以下、STL 仮想肝臓と略す）から生成した Z バッファが最も一致するように STL 仮想肝臓を平行移動、回転移動させ焼きなまし法でレジストレーション²⁾を行うことで、メス先端位置と肝臓の位置姿勢、肝臓内血管や腫瘍との距離を計測する。

また、術前にメス上部からメス先端位置へのベクトルを事前に求めることでメス先端位置を推定する。これによりメスが大血管など、切除してはいけない部位に近づいた場合に警告を行うシステムを考案している。現在、距離カメラにはメスの位置姿勢を計測するための MicronTracker3 と、肝臓の形状を計測する Kinect for Windows v2 を用いている。

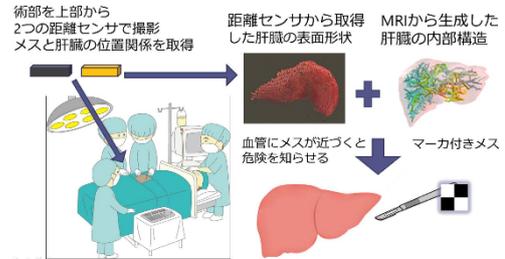


Fig. 1 System overview

3. DICOM からの深度画像生成

共同研究における従来手法では、STL 仮想肝臓を用いて肝臓の位置姿勢を推定していた。しかし、DICOM 画像から術前にセグメンテーションを行う際の閾値や STL モデルのポリゴンメッシュが荒い場合に重要な血管等の欠損が発生する。

提案手法では、DICOM からの深度画像生成³⁾と透視投影変換を GPGPU で行い DICOM 仮想肝臓を生成することで、これらの問題の解決を試みる。DICOM ファイルから BMP ファイルに変換した画像を OpenCV を用いて 2 値化、ラベリング処理を行い肝臓領域として抽出したボクセル（以下、肝臓ボクセルと略す）の座標を GPU に転送し、回転移動、平行移動、透視投影変換、レンダリング処理を行う。

回転移動後の座標 \mathbf{p}_r は、肝臓ボクセルの各座標を \mathbf{p} とし、重心を \mathbf{p}_g とした時 Eq. (1) である。

$$\mathbf{p}_r = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x (\mathbf{p} - \mathbf{p}_g) + \mathbf{p}_g \quad (1)$$

右手座標系から左手座標系へ変換した平行移動後の座標を \mathbf{p}_t は、平行移動ベクトルを \mathbf{p}_v とした時 Eq. (2) である。

$$\mathbf{p}_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \mathbf{p}_r + \mathbf{p}_v \quad (2)$$

透視投影変換後の座標 \mathbf{p}_p は、前方面の位置を near とし、後方面の位置を far とした時 Eq. (3) である。

$$\mathbf{p}_p = \begin{pmatrix} -\frac{\text{near}}{p_z^t} p_x^t & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\text{near}}{p_z^t} p_y^t & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\text{far} + \text{near}}{2} - \frac{\text{far} \cdot \text{near}}{p_z^t} \end{pmatrix} \quad (3)$$

レンダリング前の正規化を行った肝臓ボクセルの位置 \mathbf{p}_z は、左手座標系から右手座標系へ変換した時 Eq. (4) である。

$$\mathbf{p}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\text{far}} \end{pmatrix} \mathbf{p}_p \quad (4)$$

\mathbf{p}_z の xy 座標が描画面にある時、z 座標が最大値取るようにレンダリングすることで深度画像ができる。

Depth image generation and evaluation from DICOM by
GPGPU in liver surgery support system

[†] Daiki YANO, Masanao KOEDA, Katsuhiko ONISHI and
Hiroshi NOBORIO

[†] Osaka Electro-Communication University

4. 実験

提案手法における位置姿勢推定を評価するために、既知の位置姿勢で生成したDICOM仮想肝臓（以下、マスタ肝臓）に対して、焼きなまし法で探索を行い位置姿勢の推定を行った。

4.1 実験手法

マスタ肝臓を既知の位置姿勢に配置し、推定した位置姿勢で生成したDICOM仮想肝臓（以下、スレーブ肝臓）のスコアと位置姿勢を計測した。また、マスタ肝臓とスレーブ肝臓の初期位置姿勢は Table 1 に示す設定とし、探索時間を 500 [ms] とした。初期位置姿勢状態のDICOM仮想肝臓を Fig. 2 に示す。

実験利用した GPU は、NVIDIA GeForce GTX TAITAN Black であり、計算する肝臓のボクセル数は、2904039 点である。

Table 1 Initial position and posture of the liver

-	x [mm]	y [mm]	z [mm]	roll [deg]	pitch [deg]	yaw [deg]
Master liver	0	0	-280	30	357	125
Slave liver	40	40	-240	50	17	145



(a) Master liver



(b) Slave liver

Fig. 2 Initial position and posture of the liver

4.2 評価関数

評価関数のスコアは、各ピクセルにおけるマスタ肝臓の深度画像を D_m とし、スレーブ肝臓の深度画像を D_s とした時

$$Score = \sum_{OR(D_s, D_m)} |D_s - D_m| \quad (4)$$

と定義した。

4.3 実験結果

マスタ肝臓に対して位置姿勢推定を行ったスコアの時間変化を Fig. 3 に、真値との位置姿勢誤差を Fig. 4 に示す。また、実験結果の誤差を Table 2, 3 に示す。

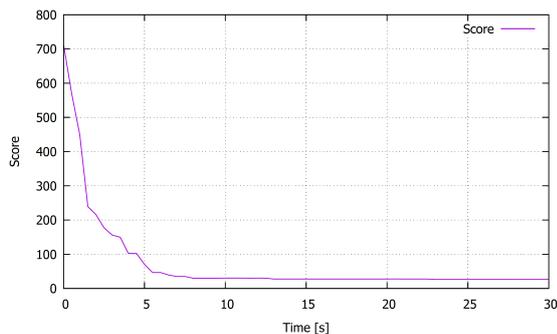


Fig. 3 Time change of score

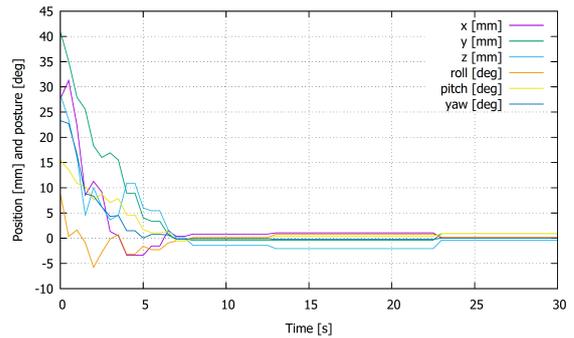


Fig. 4 Position and posture error

Table 2 Error of experimental position results

-	Avg. [mm]	SD [mm]
x	1.318	4.926
y	2.632	7.088
z	0.610	4.719
Total	1.520	5.679

Table 3 Error of experimental posture results

-	Avg. [deg]	SD [deg]
roll	0.168	1.305
pitch	1.531	2.760
yaw	0.948	3.846
Total	0.882	2.835

5. おわりに

本研究では、STLモデルを経由せずに直接、DICOMから深度画像を取得する手法を提案、実装し仮想空間における位置姿勢推定の評価を行った。また、GPGPUによる並列処理を用いた並行回転移動処理、透視投影変換の高速化を行い開発中の肝臓手術サポートシステムの位置姿勢推定処理との統合を行った。実験結果より、マスタ肝臓に対して位置姿勢推定を行うことで、平行移動では平均誤差 1.520 [mm]、回転移動では平均誤差 0.882 [mm] で位置姿勢推定を行うことが可能であった。

今後、逆変換行列を用いることで Z 軸回転時に発生するデータ欠損の解決や深度カメラを用いた評価実験を目指す。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 No.26289069 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 矢野 大貴, 吉田 将悟, 土井 万由子ほか: 肝臓位置姿勢推定, メス先端位置推定, 肝臓手術シミュレータを統合した手術サポートシステム, 第 25 回日本コンピュータ外科学会大会, pp.331-332 (2016).
- 2) Watanabe, K. Yoshida, S. YANO, D. et al.: A New Organ Following Algorithm Based on Depth-Depth Matching and Simulated Annealing and its Experimental Evaluation, HCI2017, pp.594-607 (2017).
- 3) 矢野 大貴, 土井 万由子, 小枝 正直ほか: 肝臓手術サポートシステムにおける DICOM からの直接深度画像生成, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.2850-2853 (2017).