

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00291

研究課題名(和文) 医師とセンサの協調によるGPU高速化腎臓腹腔鏡手術ナビゲータの構築

研究課題名(英文) Development of kidney laparoscopic surgery navigator with GPU acceleration by cooperation of physician and sensor

研究代表者

大西 克彦 (ONISHI, Katsuhiko)

大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授

研究者番号：20359855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、安全かつ正確に腎臓癌を摘出できる助手の介在を前提とした腹腔鏡手術ナビゲーションシステムを開発することを目的としている。そのため、ロボット支援腎部分切除術における支援システムの提案実装と、外部センサによるマーカ計測を用いた腹腔鏡カメラの位置姿勢推定手法を提案し実装評価するまでに至った。医師の助手による試作システムの運用と、提案する腹腔鏡カメラの位置姿勢推定手法を検証した結果、一定の有用性があることを確認できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of our research is to develop a laparoscopic surgical navigation system on the premise of an assistant who can safely and accurately extract kidney cancer. To realize this purpose, we have developed a support system for robot-assisted renal partial resection. And we have proposed a method to estimate the position and orientation of a laparoscopic camera using marker measurement with an external sensor. As a result of verifying the operation of the prototype system by the assistant of the doctor and the method of estimating the position and orientation of the proposed laparoscopic camera, it was confirmed that there is certain usefulness.

研究分野：医用工学

キーワード：腹腔鏡手術 カメラ位置姿勢推定 マーカトラッキング

1. 研究開始当初の背景

腹腔鏡手術は、低侵襲であることから患者の負担が少なく、術後の治りも早いことが知られている。また、腸などの他臓器が外気に触れないため合併症も少なく、結果として退院までに費やす日数が格段に短くなる。しかしその一方で、腹腔鏡下手術は視野が狭く、脂肪や周辺組織が入り組んでいる領域では、医師が癌組織の全体像を正確に認識できず、それに切り込んで癌組織を取り残す、あるいは逆に大きく切り過ぎると術後の腎機能の低下を引き起こすなど、技術的な難度の高さが問題となる。そのため、医師のための術中や事前の訓練を支援するナビゲーションシステムが求められている。

しかし、これまで手術ナビゲータは精力的に研究されてきたが、実用に供されたものは極めて少ない。この理由は、手術支援のすべてを認知能力に劣るコンピュータとセンサにさせようとしたところにある。また、個々の手術においても、本当に医師が支援して欲しいことの絞り込みがあいまいで、実際の手術室と同一の仮想世界を作り出すといった非現実的なテーマ設定が多かった。これでは、「すべての手術支援ができる＝実用レベルでは何の支援もできない」ということになる。

例えば、内臓の位置や姿勢を正確に検出できる（腹腔鏡手術に利用できる）コンパクトな深度センサはないので、センサベースで内臓の形状を認識したり、それに仮想腎臓を追従させたりすることは困難である。また、数週間前に撮像したダイコムデータから変換した仮想腎臓を、実際の手術現場で実肝臓に初期位置姿勢や形状合わせをする必要もある。さらに、実際の手術現場で患者や内臓の個人差や個体差（粘性・弾性・塑性が異なる）に対応できる高速な物理シミュレータなども、今のところ存在しない。

以上の様な考察から我々は、医師が支援して欲しい情報を正確に把握し、現在使える技術を精査し、医師の認識機能にも頼ったシステムを提案するに至った。この際、最も重要となるのが、医師が仮想の腎臓や癌組織と現実の腎臓や癌組織の位置・姿勢・形状をいつでも簡単に合わせられるヒューマンインタフェースである。さらに、手術は数時間にもおよぶことから、急いで癌を取り残すよりも、時間をかけて腎臓癌の場所を正確に認識した上で切除し、かつ残存可能な腎機能を残すことに注力した、実用化を最優先とした半自動（助手の介在を前提とした）腎臓癌摘出手術支援ナビゲーションシステムを検討した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、医師の認識能力とセンサやコンピュータの情報処理能力の長所を融合し、安全かつ正確に腎臓癌を摘出できる助手の介在を前提とした腹腔鏡手術ナビゲーションシステムを開発する。さらに、このシステムを利用することにより、医師である助

手が現実の手術画像のどこに目をつけ、どのように腎臓や癌組織をそれに重畳させるかが記録できる。これは、医師の頭の中にある認識知見を外部に提示させることを意味する。そのような知見は、現在のところ半自動でしかできない重畳機能を全自動にする手がかりになるかもしれない。これが実用的な腎臓手術ナビゲーション構築のシナリオである。

具体的には、対象となる腎臓の患部を3DCGモデルで再現した仮想腎臓モデルを、腹腔鏡カメラで撮影される実腎臓患部に重畳表示する複合現実感システムを構築する。本システムでは、医師が3D腎臓モデルの位置姿勢を直接操作し、重畳の位置姿勢の誤差を修正できる。本システムを手術支援ロボットによって行われた実際の手術画像に使用し、重畳機能の全自動にする知見を得られることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、あらかじめCTやMRI等で撮影されたダイコムデータを基に仮想腎臓モデルとして3DCGモデルを作成し、腹腔鏡カメラ映像に重畳表示させる手法について検討し、手術ロボットによる腎部分切除術において、医師の助手が実際の手術画像において重畳位置姿勢を操作できる手術支援システムを試作した。さらに、外部センサとマーカによる腹腔鏡カメラ位置姿勢の計測し計算機による位置合わせ制度の向上も図った。詳細を以下に述べる。

(1) ロボット支援腎部分切除術における支援システムの開発

本システムでは、CT画像を基に作成した臓器、腫瘍、血管、尿管などの3DCGモデルを腹腔鏡カメラ映像にリアルタイムに重畳し、術者が操作するコンソールに表示する。

3DCGモデルを実映像に重畳表示させるための手法としては、カメラ映像の対象物を基に実世界座標系と、3DCGモデル座標系を一致させる手法と、外部センサによるマーカ計測などによって算出されたカメラの実世界座標系の位置姿勢と、3DCGモデル座標系を一致させる手法がある。今回は前者のカメラ映像を基にOptical Flowを用いて、実世界座標系と3DCGモデルの座標系を一致させる。従って、3DCGモデルはカメラ映像に追従して半自動で並進・回転する。それによって、隠れた血管系や腫瘍の発見を補助することを可能とする。また、手術中の視界を妨げることがないように、3DCGモデルの注目部位の表示状態（表示/非表示の選択や透明度）を必要に応じて容易な操作でそれぞれ個別に操作可能にする。図1にシステムの概要を示す。

本システムで利用する内視鏡カメラの動きは非常に激しく、臓器の変形も大きいため、常時自動で追従させることは困難である。そこで、3DCGモデルと実空間のずれが発生した

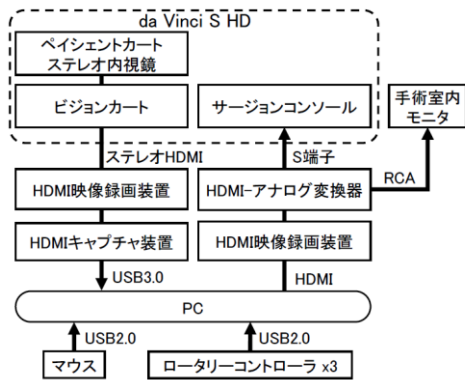


図 1：システム処理概要

場合には、操作者のマウスとロータリーコントローラーを操作することで 3DCG モデルの位置・姿勢を補正する。

(2) 外部センサによるマーカ計測を用いた腹腔鏡カメラの位置姿勢推定

実世界座標系と 3DCG モデル座標系を一致させる方法として、3. (1)で述べた方法とは別の外部センサのマーカ計測による手法についても検討する。腹腔鏡カメラツールの患部と接することのないカメラと反対側にマーカを取り付け、そのマーカの位置姿勢を外部カメラで計測する。カメラの任意の動きに対応するためにマーカをカメラツールの周囲に配置する。外部カメラで計測されたマーカの位置姿勢からカメラ位置を算出するために、マーカ座標系とカメラ位置座標系の相対ベクトルを算出し、カメラ位置を取得する。また、カメラ姿勢は、マーカの各姿勢とカメラの姿勢の相対姿勢を基に、現在認識されているマーカの姿勢を基に算出する。

4. 研究成果

(1) ロボット支援腎部分切除術における支援システム

3. (1)で述べた方法によって開発された試作システム外観を図 2 に示す。試作システムの動作を確認した上で、実際の手術で医師による運用を試みた。その様子を図 3 に示す。



図 2：試作システム外観



(a)



(b)



(c)



(d)

図 3：試作システム運用の様子

試作システムを複数回運用した結果、3DCG モデルの操作者は術者の隣に座り (図 3(a))、術者と直接会話して意思疎通しながら状況に応じた必要部位の表示切り替えや、3DCG

モデルの位置姿勢の補正を行っていた (図 3(b))。術者が見ている画面の上部にはステレオ内視鏡カメラの立体映像が表示されており、下の子画面の一部に本システムの 3DCG モデル重畳映像を表示した (図 3(c))。また、補助術者から見える画面にも 3DCG モデル重畳映像を表示することも確認した (図 3(d))。

(2) 外部センサによるマーカ計測を用いた腹腔鏡カメラの位置姿勢推定

提案手法を実装した試作システムを作成した。本試作システムでは、鉗子先端に CCD カメラを取り付けた疑似カメラを腹腔鏡カメラとして利用した。この疑似カメラの位置姿勢計測のため、6 個のマーカを貼り付ける台座を CCD カメラと反対側に取り付けた。図 4 に疑似腹腔鏡カメラの外観を示す。本試作システムを利用して、実際のカメラ映像に 3DCG モデルを重畳表示させた画面例を図 5 に示す。

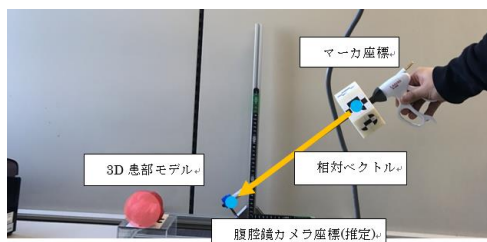


図 4 : 疑似腹腔鏡カメラ

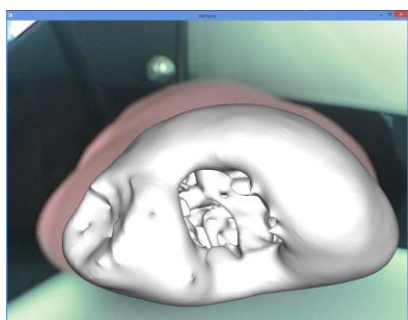


図 5 : 試作システム提示画面例

また、本手法で計測される腹腔鏡先端推定位置と実際の腹腔鏡先端位置の誤差を計測した。具体的には、疑似腹腔鏡カメラを X, Y, Z 軸方向にそれぞれ平行移動と回転させ、平行移動は 50mm, 回転は 10° 毎にカメラ位置を計測する。その結果、位置の誤差を図 6 に示し、姿勢角度の誤差を図 7 に示す。z 軸に対する平行移動と、z 軸中心の回転操作については大きな誤差が計測されたが、x 軸と y 軸方向の平行移動と、x 軸と y 軸の回転操作については誤差が少なく、有用性があることを確認できた。

外部センサによるマーカ計測を利用した腹腔鏡カメラの位置姿勢推定手法は、実験室での計測を終えただけであったが、腹腔鏡カ

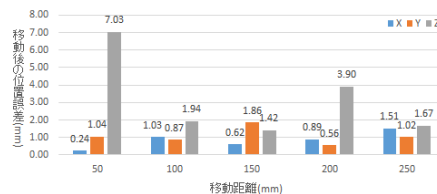


図 6 : 位置誤差の計測結果

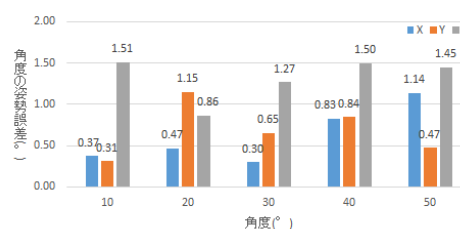


図 7 : 姿勢角度誤差のケイ素結果

メラの本研究の目的である、医師の認識能力とセンサやコンピュータの情報処理能力の長所を融合し、安全かつ正確に腎臓癌を摘出できる助手の存在を前提とした腹腔鏡手術ナビゲーションシステムについては、これまで半自動であった重畳表示機能を全自動にするために医師の頭の中にある認識知見を外部に提示させることの1つの進捗になったと考えられる。今後は、カメラ画像を基にした重畳表示機能のアルゴリズムの改良と、外部センサによるマーカ計測を用いた腹腔鏡カメラの位置姿勢推定手法とカメラ画像を基にした重畳表示機能との統合などが挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 文山 誠友, 三木 陽平, 奥田 啓嗣, 大西 克彦, 小枝 正直, 登尾 啓史: "腹腔鏡下手術ナビゲーションシステムにおけるカメラの位置姿勢制御手法の検討", 2018年電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画 学生ポスターセッション予稿集, ISS-P-034, p.91 (Mar. 2018).
- ② 奥田 啓嗣, 三木 陽平, 矢野 大貴, 大西 克彦, 小枝 正直, 登尾 啓史: 腹腔鏡下手術ナビゲーションシステムにおけるカメラ位置姿勢推定手法の精度評価; 第 17 回日本 VR 医学会学術大会 (JSMVR2017), PP1-5, pp.1-2 (Aug. 2017).
- ③ A. Sengiku, M. Koeda, A. Sawada, J. Kono, N. Terada, T. Yamasaki, K. Mizushino, T. Kunii, K. Onishi, H. Noborio and O. Ogawa,

"Augmented Reality Navigation System for Robot-Assisted Laparoscopic Partial Nephrectomy," the 19th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII2017), pp.575-584 (Jul.2017).

- ④ K. Onishi, Y. Miki, K. Okuda, M. Koeda and H. Noborio, "A study of guidance method for AR laparoscopic surgery navigation system," the 19th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII2017), pp.556-564 (Jul.2017).
- ⑤ 三木 陽平, 奥田 啓嗣, 矢野 大貴, 大西 克彦, 小枝 正直, 登尾 啓史: 腹腔鏡手術ナビゲーションシステムにおけるカメラ位置姿勢推定手法の一検討; 2017年電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画 学生ポスターセッション予稿集, ISS-P-133, p.133 (Mar. 2017).
- ⑥ 千菊 敦士, 澤田 篤郎, 寺田 直樹, 小枝 正直, 水篠 公範, 大西 克彦, 登尾 啓史, 小川 修: ロボット支援下腎部分切除術 (RALPN) における 3D ナビゲーションシステムの開発; 第 16 回日本 VR 医学会学術大会 (JSMVR2016), pp.46-47 (Sep. 2016).
- ⑦ M. Koeda, K. Mizushino, K. Onishi, H. Noborio, T. Kunii, M. Kayaki, A. Sengiku, A. Sawada, T. Yoshikawa, Y. Matsui and O. Ogawa, "Image Overlay Support with 3DCG Organ Model for Robot-Assisted Laparoscopic Partial Nephrectomy," HCI International 2016 - Posters' Extended Abstracts, CCIS 617, pp.508-513 (Jul. 2016).
- ⑧ 小枝 正直, 水篠 公範, 大西 克彦, 登尾 啓史, 國居 貴浩, 榎木 方俊, 千菊 敦士, 澤田 篤郎, 吉川 武志, 松井 喜之, 小川 修: ロボット支援腎部分切除術を CG 重畳表示により支援するシステム; 第 16 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 (SI2015), pp.1174-1177 (Dec. 2015).
- ⑨ 小枝 正直, 水篠 公範, 千菊 敦士, 澤田 篤郎, 吉川 武志, 松井 喜之, 小川 修, 國居 貴浩, 岸本 直樹, 大西 克彦, 登尾 啓史: 仮想腫瘍を埋め込んだ柔軟な臓器モデルの製作; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(ROBOMECH2015), 1A1-F07 (May. 2015).

[その他]

ホームページ等

<http://noblab.jp/research/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大西 克彦 (ONISHI, Katsuhiko)
大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授
研究者番号：20359855

(2)研究分担者

登尾 啓史 (NOBORIO, Hiroshi)
大阪電気通信大学・総合情報学部・教授
研究者番号：10198616

小枝 正直 (KOEDA, Masanao)
大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授
研究者番号：10411232

山口 哲 (YAMAGUCHI, Satoshi)
大阪大学・歯学研究科・講師
研究者番号：30397773

小川 修 (OGAWA, Osamu)
京都大学・医学研究科・教授
研究者番号：90260611