

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：32651

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500556

研究課題名(和文) 開腹下手術の臓器変形に対応したイメージガイド手術システムの開発

研究課題名(英文) Development of image-guided surgery system with organ deformation model for laparotomy

研究代表者

服部 麻木(Hattori, Asaki)

東京慈恵会医科大学・医学部・准教授

研究者番号：90312024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：腹部領域の外科手術で、術野画像上に術前のX線CTデータから三次元再構築した腫瘍や血管などの内部構造モデルを重畳するAR型手術ナビゲーションシステムの開発を行なう際、術中に変化する臓器形状に応じて内部構造モデルを変形させて重畳表示することが必要となってくる。本研究では、臓器表面形状の計測手法、および臓器モデル内に仮想の関節リンクモデルを設置して関節リンクの変形に伴って臓器モデルを変形させる手法の開発を行い、腹部領域の手術ナビゲーションシステムへの適用を検討した。

研究成果の概要(英文)：We have developed an image-guided surgery system for endoscopic sinus surgery, blood vessel surgery and laparoscopic surgery. The system is augmented reality (AR) type navigation system that overlays 3D organ models reconstructed from preoperative X-ray CT data onto surgery field image. The system for laparotomy needs to transform inner structure models according to the organ deformation during surgery. To overcome this problem, we have developed organ surface measurement method without marker and organ deformation model that has a "tree-like structure model" called virtual link model inside the organ model. We examined accuracy and processing speed of these methods using extracted liver.

研究分野：医用画像工学

キーワード：手術ナビゲーション 臓器変形 表面形状計測

1. 研究開始当初の背景

X線CTやMRIなどの医用画像技術の急速な進歩により、患者の詳細な内部構造の画像を術前に得て診断を行い、術中に参照しながら手術を進めて行くことはルーチン化している。しかし術前に得た画像は手術室においてフィルム、もしくはモニタ上で二次元の断層像として用いるのが現状であり、あくまで二次元の画像を参考にしながら、対象臓器が本来持っている三次元的な位置と構造の同定は術者の理解力や経験に依存しているのが現状である。

われわれの研究グループでは、この画像データをもっと積極的に術中に活用した手術支援システムの開発を行なってきた。特に術中ナビゲーションシステムについては、手術ロボットシステムである da Vinci やわれわれが開発を行っている内視鏡型手術ロボットのためのナビゲーションシステムの開発や、現在の臨床に適用が可能なシステムとして、内視鏡下鼻内手術や肝胆膵領域を対象とした開腹下手術のためのナビゲーションシステムの開発を行なってきた。これらのナビゲーションシステムは、術前の患者の X 線 CT や MRI 等のデータセットから構築した内部構造モデルを da Vinci や内視鏡型手術ロボット、もしくは硬性鏡の術野画像上に重ね合わせて表示することで、ロボットの視野が対象部位内のどの位置でどの方向を向いているのかを術者が把握しやすくするシステムである。これらのシステム開発を通して一番の課題だと考えるのは、今回の研究課題でも対象としている開腹下手術において、手術が進行するにつれて対象となる臓器が変形し、術前に得られた画像データから得られる臓器形状とは異なったものになり、臓器の解剖学的特徴点や臓器形状をベースとしたレジストレーションでは腫瘍や血管などのナビゲーションに用いる内部構造モデルの位置推定に誤差が生じることであった。

2. 研究の目的

本研究で計画しているナビゲーションシステムは、これまで開発を行ってきたナビゲーションシステムの機器構成に加えて、臓器表面形状を計測する三次元表面形状計測装置、臓器の局所的な変形を計測する小型磁気式位置計測装置によって構成する。そしてわれわれがこれまでに開発を行ってきた手術シミュレーションシステムで用いている臓器変形モデルを応用し、術中の対象となる臓器の表面形状の変化から内部の変形を推定することで、臓器内の腫瘍や血管の位置推定を行なうナビゲーションシステムの開発を行う。

そして課題となっている臓器変形の問題点を克服し、ファントムおよび動物実験を経て患者への臨床応用研究が行えることを本申請の目標とする。

3. 研究の方法

・臓器表面形状計測システムの開発

臓器の変形に対応するために、術中に臓器の表面形状を計測し、その形状変化に応じて臓器モデルと内部構造モデルを変形させる必要がある。しかし開腹下手術において術者の手技を妨げることなく表面形状を常時計測することは困難なため、三次元形状計測装置による計測は必要に応じて間欠的に行なうこととし、対象臓器の数点に磁気式位置センサを設置して局所的な変形を常時計測することで、臓器形状の変化の推定を行なう。形状計測には、これまでに開発を行ってきた赤色レーザーによる硬性鏡手術時の術野表面形状計測や幾何学パターン投影による開腹手術時の術野表面形状計測手法を応用し、本研究に適した術野表面形状計測システムの開発を行う。開発にあたっては、手術の進行を妨げずに計測を行うことができるよう、システム構成、計測手法の検討を行う。

・術野表面形状に応じた臓器モデルと内部構造モデル変形手法の開発

上記で計測した術野の表面形状に応じて、臓器モデルおよび内部構造モデルを変形させる手法には、われわれが手術シミュレーションシステムの開発で用いてきた Sphere filled model を適用し、リアルタイムな変形処理によるナビゲーションが行なえるようにする。ただし物理的に可能と考えられるどんな変形にも対応できるようにする必要はないため、既に共同研究を開始している本学外科の肝胆膵領域の医師の協力を得て、ナビゲーションが必要とされる手術中の過程までに発生する臓器変形に限定した手法の開発を行なう。

・ナビゲーションシステムの構築

開発した各システムおよび手法を統合し、ナビゲーションシステムとしての構築を行う。構築にあたっては、既に設備されている動物実験室（臨床の手術室と同様の手術台や无影灯、麻酔器、電気メス等を備えた実験室）を使用し、術場での利用を考慮して機器のセットアップからキャリブレーション、レジストレーション等が容易に、短時間に行えるシステムの構築を目指す。

・ファントムおよび摘出臓器を用いた検証実験

構築したナビゲーションシステムを用い、ファントムおよび摘出臓器による検証実験を行う。実験では対象となる術野を模したファントムを作成し、表面形状計測から臓器モデルの変形、内部構造モデルの術野への投影までシステム全体の精度の検証し、改良を行う。また表示する情報について、内部構造モデルだけでなく術中に表示すべき情報の検討を行う。

4. 研究成果

・臓器表面形状計測システムの開発

ナビゲーションで術野画像の撮影に用いる予定の短軸の立体硬性鏡の画像を用い、得られる左右一対の術野画像から術野の三次元表面形状を計測するシステムの試作を行なった。試作したシステムにより撮影した領域を、色情報を持った三次元形状として 2 frame/sec 程度で得られるようになった。しかし領域中にハイライトの部分が多く存在するとその部分の形状が欠損する場合があります、無影灯照射下の開腹手術では形状の取得が困難になるケースが考えられるため、術野へのマーカの設置や幾何学パターンへの投影など、高輝度の照明の影響を受けにくい計測手法により改良を行なっていく必要があると考える。また形状取得のフレーム数についても処理の並列化等を行なうことにより速度の向上を図っていく必要がある。また、赤外の幾何学パターンを対象物に照射して表面形状を計測する民生機を用い、摘出臓器において表面形状の計測を試みた。前述の試作したステレオ画像から表面形状を計測する手法と比べて、肝臓のような表面テクスチャに特徴の少ない臓器においても欠損が少ない表面形状を色情報とともに得ることができた。また形状取得のフレームレートについても、これまでよりも高速に取得できるようになった。使用した民生機は安価であり、同時に複数台の使用も可能であることから、多視点からの計測による、より死角の少ない臓器形状の計測が可能であると考えられる。

・術野表面形状に応じた臓器モデルと内部構造モデル変形手法の開発

われわれが手術シミュレーションシステムの開発で用いてきた Sphere filled model を適用して臓器表面形状の変化に追従する臓器モデルの試作を行なった。10 frame/sec 前後で変形を行なうことができたが、実際の手術での術野の状況と考えた場合、計測される術野表面形状と臓器モデルの間で同じ領域を常に対応づけることが難しいと思われるため、前述した術野へのマーカの設置等により、表面形状と臓器モデルでの対応付けを行なっていく必要があると考える。また、CG アニメーション等に用いられているスキニングを応用し、臓器モデル内に仮想の関節リンクモデルを設置し、関節リンクの変形に伴って臓器モデルの変形を行なう手法の開発を行なった。前述の Sphere filled model よりも少ない構成要素を基にした変形が行なえることと、変形の演算に GPU を用いることで、高速なモデルの変形を行なうことが可能になった。変形のベースとなる構成要素が少なくなったことで、物理的に生じうる全ての臓器変形に対応することは難しいが、術中のナビゲーションが必要とされる状況における変形に限定した関節リンクモデルの設置パターンを検討していきたいと考える。

る。

・ナビゲーションシステムの構築

術中ナビゲーションを行なう際にプロジェクタを用いて臓器の内部構造モデルを術野に直接投影することを目的とし、これまでに開発を行なってきた臓器表面形状計測で得られたデータを基に、投影時に臓器表面形状の凹凸により歪む投影画像を補正する手法の開発を試みた。本手法では術者の視点で見えるべき内部構造モデル画像を 2D テクスチャとしてあらかじめ描画し、プロジェクタから臓器表面へ投影した際に表面の凹凸により生じる投影画像の歪みを計測した表面形状を用いて推定し、2D テクスチャを変形させて投影するようにした。開発した手法の検証については、X 線 CT データから三次元再構築した臓器モデルを用い、3D プリンタで臓器のファントムモデルを作成して実験を行なった。実験では投影画像の歪みの補正については良好な結果を得られたが、補正の演算に時間を要するため、術者の視点移動に追従するのが難しかった。今後は演算の並列化や GPU を用いるなど高速化を図って臨床適用が可能なシステムにしていきたいと考える。

・その他の成果

臓器変形の手法をヒトの全身のモデル(体表面、骨格、主要血管、腹部臓器を含む)に応用し、モーションキャプチャデータによって全身モデルを動作させた際に、体表面や内部構造モデルも変形を伴って動作する四次元人体モデルの開発を行なった。歩行動作データ等を用いた実験では 20 fps 前後でのモデルの駆動が可能であった。現在はサーフェスモデルを用いているが、今後はサーフェスモデルの基となっている MRI データ自体を変形させて駆動できるよう開発を行なっていきたいと考える。

研究課題申請時に計画したシステムを用いた動物実験や臨床での試験を実施するところまで至らなかった。その大きな要因は、臓器形状の取得、および投影画像の歪み補正について、リアルタイムな処理速度を得られなかった点である。今後、アルゴリズムの改良や GPU の利用などにより高速化を行なっていく予定である。

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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 13 件)

1. Onda S, Okamoto T, Kanehira M, Matsumoto M, Futagawa Y, Fujioka S, Suzuki N, Hattori A, Yanaga K. Clinical application of augmented

- reality for hepatobiliary and pancreatic surgery, American College of Surgeons 98th Annual Clinical Congress, Sep. 30 2012, Chicago
2. Suzuki N, Hattori A. A concept for overlaid-type surgical navigation system with organ modification functions using non-contact type surface measurement, The 21th Medicine Meets Virtual Reality, Feb. 21 2014, Manhattan Beach
 3. Suzuki N, Hattori A, Iimura J, Otori N, Onda S, Okamoto T, Yanaga K. Development of AR surgical navigation systems for multiple surgical regions, The 21th Medicine Meets Virtual Reality, Feb. 21 2014, Manhattan Beach
 4. 服部麻木, 恩田真二, 岡本友好, 兼平卓, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹. 肝胆膵開腹下手術における術中ナビゲーションシステムの開発, 第 32 回日本医用画像工学会大会, 2013 年 8 月 3 日, 東京
 5. 服部麻木, 恩田真二, 岡本友好, 鈴木文武, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹. AR 技術を用いた肝胆膵領域開腹下外科手術のためのイメージガイド手術システムの開発, 第 22 回日本コンピュータ外科学会大会, 2013 年 9 月 14 日, 東京
 6. 鈴木直樹, 服部麻木. 臓器表面マーカを使わずに臓器変形に対応できるナビゲーション手術システムのための手法の基礎的検討, 第 22 回日本コンピュータ外科学会大会, 2013 年 9 月 15 日, 東京
 7. 恩田真二, 岡本友好, 兼平卓, 鈴木文武, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹, 服部麻木. 膵頭十二指腸切除における手術ナビゲーションを用いた下膵十二指腸動脈先行処理の臨床成績について, 2013 年 9 月 14 日, 東京
 8. Onda S, Okamoto T, Kanehira M, Suzuki F, Ito R, Fujioka S, Yanaga K, Suzuki N, Hattori A. Augmented Reality-Based Navigation Surgery for Hepatectomy and Pancreatectomy, The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Sep. 16 2013, Tokyo
 9. Onda S, Yanaga K, Okamoto T, Yasuda J, Suzuki F, Matsumoto M, Funamizu N, Ito R, Futagawa Y, Fujioka S, Suzuki N, Hattori A. Augmented-reality based navigation surgery for hepatobiliary diseases, Computer Assisted Radiology and Surgery 2014, June 26 2014, Fukuoka
 10. 服部麻木, 恩田真二, 安田淳吾, 岡本友好, 鈴木文武, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹. 開腹下手術における AR 型イメージガイド下手術システムの

開発. 第 14 回日本 VR 医学会学術大会, 2014 年 9 月 13 日, 東京

11. 服部麻木, 安田淳吾, 恩田真二, 岡本友好, 鈴木文武, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹. 腹腔鏡下手術におけるポート位置決定のためのナビゲーション, 第 23 回日本コンピュータ外科学会大会, 2014 年 11 月 9 日, 吹田
12. 服部麻木, 飯村慈朗, 鴻信義, 恩田真二, 岡本友好, 矢永勝彦, 鈴木直樹. 術中ナビゲーションシステム開発の現状と今後, 第 23 回日本コンピュータ外科学会大会, 2014 年 11 月 8 日, 吹田
13. 服部麻木, 恩田真二, 岡本友好, 鈴木文武, 伊藤隆介, 藤岡秀一, 矢永勝彦, 鈴木直樹. 肝胆膵領域の開腹下手術のためのナビゲーション手術システムの開発, 第 53 回日本生体医工学会大会, 2014 年 6 月 26 日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 麻木 (HATTORI, Asaki)

東京慈恵会医科大学・医学部・准教授

研究者番号: 90312024