手術ロボティックシステム開発プロジェクト

Surgical Robotic System Project

佐久間一郎^a, 小林英津子^a, 辻 隆之^a, 陳 献^a, 久田俊明^a, 増谷佳孝^d, 木村文彦^c, 佐々木 健^a, 板生 清^a, 岡田昌史^b, 中村仁彦^b, 波多伸彦^b, 土肥健純^b

^a 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

^b 東京大学大学院 情報理工学系研究科

^c 東京大学大学院 工学系研究科

^d 東京大学医学部 放射線科

Ichiro Sakuma^a, Etsuko Kobayashi^a, Takayuki Tsuji^a, Xian Chen^a, Toshiaki Hisada^a, Yoshitaka Masutani^d, Fumihiko Kimura^c, Ken Sasaki^a, Kiyoshi Itao^a, Masashi Okada^b, Yoshihiko Nakamura^b, Nobuhiko Hata^b, Takeyoshi Dohi^b

^a Graduate School of Frontier Science, the University of Tokyo

^b Graduate School of Information Science, the University of Tokyo

^c Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

^d Department of Radiology, Faculty of Medicine, the University of Tokyo

Abstract

In this paper, we described the overview of JSPS research for the future program, Development of Robotic System for surgery and introduced some researches in this project. The aims of this project are 1) development of the master-slave manipulator system for minimally invasive liver surgery including deformable biomechanical liver model development and 2) development of the laser guidance system, the needle insertion robot and related technologies for orthopedic surgery. We made this study collaborating with Kyushu University and Osaka University. We also aim for practical use of surgical robot through promotion of business-academia collaboration.

Key words Medical robot, Minimally invasive surgery, Deformable model of the liver.

1. はじめに

本プロジェクトにおいては、骨格系を対象とする手術支援と、軟性臓器を対象とする手術支援のためのロボットシステムを研究対象として、以下の研究を進めている。

- 1) 手術ロボティックスの制御・ナビゲーションにおいて重要となる、主に肝臓を対象とした軟性臓

器の変形解析の研究

- 2) 低侵襲腹部外科手術ロボット開発

- 3) 低侵襲整形外科手術用ロボティックス

の研究を進めている。1), 2) においては、九州大学大学院橋爪班, 3) に関しては大阪大学大学院菅野班との密接な連携により研究を実施している。

肝臓を対象とした軟性臓器の変形解析の研究においては、①力学的に厳密な有限要素法を用いた変形解析, ②近似的解法による肝臓変形の実時間変形シミュレーション, ③モデルと術中画像を組み合わせるためのレジストレーション法の検討を行なっている。

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

Tel. 03-5841-7481 / Fax. 03-841-6481

Fig.1 Prototype of the finite element model of liver.

Fig. 2 Finite element mesh made from liver model.

低侵襲腹部外科手術ロボットシステムにおいては、高機能内視鏡下手術用マスタースレーブシステムの開発を進めている。腹壁上に3本の能動鉗子を配置できる程度の小型のスレーブマニピュレータシステムの開発を進めている。また腹腔内を観察する内視鏡マニピュレータに関しては、安全性を考慮した5節リンク方式の腹腔鏡マニピュレータを本プロジェクトで実用化した。鉗子機能に関しても把持・切除といった基本的な機能に加え、レーザ凝固・切開機能、電気メス機能を付加した能動鉗子の開発を進めている。マスタースレーブマニピュレータを中心と

する各種医用画像システム・ナビゲーションシステムなどの総合的なシステム統合の手段としてCORBAを用いてシステムを統合し、既存のハードウェアやソフトウェアの変更を最小限にとどめ、任されたタスクに適した環境での開発を可能とすることを目標としている。

整形外科手術支援ロボットシステムに関しては大阪大学菅野班と連携し、椎体骨穿刺ロボットの開発を実施するとともに、低侵襲での骨切りを実現するための骨切ロボットの開発を行なうとともに、精密な骨切り手法に関し検討している。

Fig. 3 Stress-strain Curves of compression and elongation test ($n=15$). Error bar indicates standard deviation.

Fig. 4 Deformable silicon phantom. Left: model before deformation, right: model after deformation, up: CT image, down: 3D reconstructed model.

Fig. 5 System configuration of the laparo-navigator system.

Fig. 7 Mechanism of compact forceps manipulator using a friction wheel.

以下にこれらの研究の概要を紹介する。

2. 軟性臓器のモデリング

(1) 臓器変形の非線形有限要素解析

肝臓の術中の力学的応答には血圧を有する血管の剛性が影響を及ぼすと考えられること、また主要な血管は患部特定の目安となり手術計画の基礎を与えることから、本研究では肝実質部に加えて主要な血管もモデル化することを研究の方針としている。そこで試験解析用に、断層画像・参考文献などから凡そのモデリングを行ない、次にこれをベースに九州大学橋爪班の協力を得て血管の走行ならびに肝臓形状が適切なものになるよう修正を施し、最終的な有限要素モデルのプロトタイプを Fig. 1 に示すように完成した¹⁾。

解析は total lagrange 法を応用しての幾何学非線形 (geometrical non-linear) 解析による。また材料非線形性 (material non-linearity) としては、歪みとともに硬化が進むいわゆる J 字型の非線形弾性構成則を仮定した解析例を Fig. 2 に示す。切除ラインを指定し断面が進展する場合のシミュレーションも行なうことが可能である。

(2) 肝臓力学物性の計測

以上の有限要素解析するためには肝臓の機械的特性の計測が必要となる。本研究ではブタ肝臓から取り出した円柱状切片を外科用接着剤でプレートに固定することで、同一試験片に対して引張・圧縮試験を行なうことを可能とし、機械的な特性試験を行なっている。試験により得られた公称応力-ひずみ関係の一例を Fig. 3 に示す。今後実験結果をもとに、解析に適用可能な構成則を求めることを進めている。

(3) 実時間シミュレーションシステム

前述の非線形有限要素解析は現在のところ実時間で手術ナビゲーションに応用するためには計算コストが大きいため困難である。本研究では、力学的な厳密性は有していないが、ある程度臓器変形を再現し、手術ナビゲーション等に应用可能な高速な臓器変形のシミュレーション手法を開発している。変形をいくつかの基本パターンにより合成する手法を用いることとし、本年度は変形の基本パターンは形状個々の力学解析に拠らず、経験的に知られている低周波のモードを使用することにした。そして、形状の変形の際には、自由形状変形 (Free Form Deformation) としてよく知られている、制御点を用いる手法を用いた。すなわち、制御点群の操作をモードに従って行なうことにより、形状を変形させ

Fig. 6 Frame format of the slave manipulator.

るものである²⁾。本手法をモード駆動型自由形状変形 (Modally-driven Free Form Deformation) と呼んでいる。Fig. 4 に変形シミュレーションの一例を示す。鉛球をマーカーとして埋め込んだシリコンゴムファントムに、各種の変形を与えて、CT 撮影を行ない、その結果を使用して、可変形レジストレーションの実験を行なった。ファントムの表面形状の情報のみによるレジストレーションでは、ファントム内部の鉛球マーカーの位置ずれも含めた平均残留誤差が 10 mm 程度となったが、表面形状の情報に加えて、内部の基準点を使用した場合は、レジストレーション誤差が 7 mm 程度に抑えられることが示された。

3. 低侵襲腹部外科手術ロボット開発

(1) 内視鏡マニピュレータの実用化

腹腔鏡下手術の問題点としては、腹腔鏡を保持しているカメラ助手と術者との意思疎通がうまくいかず、術者の望む画面を素早く提示できないこと、また手ぶれが生じ、画面が安定しないという点があり、円滑な手術の妨げとなっている。そこで、われわれはこれを工学的に解決すべく、腹腔鏡を保持し、術者の望む方向へ駆動するマニピュレータシステム (腹腔鏡ナビゲータ) を開発し、臨床応用に適用するとともに実用化を行なった³⁾。

本マニピュレータのシステム構成を Fig. 5 に示す。システムは腹腔鏡マニピュレータ、マン・マシンインタフェースから構成される。腹腔鏡マニピュレータは、5 節リンク機構と光学式ズームによる機構を採用し、腹腔鏡の挿入孔付近で球面ジョイントを用いて腹腔鏡を固定し、離れた点で二次元平面上の位置決めを行なう。この二次元平面上の位置決めには、5 節リンク機構を採用した。また、画面の拡大縮小には、機械的な並進を行わず、光学式ズームを用いた。本機構により、下記の手術室での使用において

重要な使用を満たす。

機構的安全性：5節リンク機構と光学式ズームを用いることにより，駆動範囲を機械的に拘束した．よって，誤操作時にも予想外の動きを行わず，前後動による臓器との干渉の可能性を低減した．また，モータやエンコーダ等の電子部品をすべて下部に設置し，上部はシンプルなリンク部のみで構成されるため，取りはずして滅菌可能とした．さらに5節リンク上部にパッシブアームを取付けることで，マニピュレータを術野から離れた位置に設置可能とし，マニピュレータが術者の作業の妨げとならないように設計した．

マニピュレータの駆動範囲は，左右方向 50° 上下方向 30° ，ズーム比は最小から最大の比が6倍である．また，マン・マシンインタフェースとして，鉗子取付型の手元スイッチを用いた．

5節リンク式腹腔鏡マニピュレータシステムを用い，脾臓摘出術2例に適用し，①手術作業の妨げにならないこと，②駆動範囲は充分かつ安全に手術が遂行可能であることを確認し，これらの成果を基礎に製品化を行なった．

(2) 低侵襲腹腔鏡手術支援マニピュレータシステムの開発

京大プロジェクトで開発されているマスターアームと統合し，マスタースレーブマニピュレータを構成し，肝臓低侵襲手術に代表される腹腔鏡下手術を支援するシステムの開発を進めている．Fig. 6にその機能を示す模式図を示す．マニピュレータは挿入口を中心とする回転並進3自由度と鉗子軸周りの2自由度，鉗子先端部における屈曲2自由度ならびに把持1自由度の合計7自由度を必要とする．さらに鉗子先端部にはレーザメス，電気メスなどの機能モジュールを取付けた鉗子システムも開発しており，把持・切除といった機能のみならず，手術機器として必要となる機能の実現を図っている．

低侵襲腹部外科手術におけるマスタ・スレーブ型の手術支援ロボットが種々提案されており，臨床応用されているロボットは大型であるため，手術室への導入困難であり，術者との干渉の危険の存在，腹部上方の手術空間の占有などの問題点が指摘されている．このため小型の鉗子操作ロボットが期待されている．本プロジェクトでは鉗子の挿入口付近を回転中心とする2自由度と，鉗子の腹腔内への出し入れ，鉗子軸周りの回転の合計4自由度を持つ，手術空間を占有しない小型スレーブロボットの鉗子駆動部として種々の方式を検討している．ここではそのなか

らジンバル機構と摩擦駆動による小型鉗子駆動マニピュレータの開発を紹介する⁹⁾．鉗子軸に対して傾きを持って，3個のコロ (Roller) を接触させた機構を摩擦車と名づける．軸に対して摩擦車が回転するとき，コロは傾きの方向に回転し，摩擦車はらせんを描く運動を行なう．らせん運動に含まれる回転成分，および並進成分を利用して，鉗子軸の駆動を行なう．

摩擦車の駆動には，小型・高トルクなどの点から，超音波モータを用いる．Fig. 7-aに赤色で示す方向のモータを回転させたとき，鉗子軸には F_1 , F_2 の合力 F が働くことにより鉗子は並進する．同様に Fig. 7-bに示すように力が働いた場合，鉗子軸は回転する．

挿入口周りの回転2自由度はジンバル機構を用いて実現した．駆動にはDCモータを用いる．ピッチの回転駆動はリンク機構により伝達した．これにより滅菌・非滅菌部の分離が可能になり，洗浄も容易とした．

ジンバル機構の取付位置は腹壁上方30 mmとする．駆動範囲は，要求仕様より腹腔内に250 mmの鉗子が挿入されているとき，ピッチ・ロールそれぞれ 40 deg とする．

回転中心が鉗子挿入孔から腹壁上方にシフトし，鉗子が腹壁を引張ることで，モータの負荷の増加や挿入孔の拡大が考えられた．しかし，プタを用いた実験の結果，傷の拡大は確認されず，また，トルクの増加は気腹法において $2.6 \times 10^{-1} \text{ Nm}$ ，吊上げ法において $1.6 \times 10^{-1} \text{ Nm}$ となった．製作したマニピュレータを示す (Fig. 8)．円筒状の回転・並進機構部は直径42 mm × 高さ89 mm，重量250 gf，ジンバル機構部は39 mm × 54 mm × 70 mm，重量330 gfである．

(3) 屈曲鉗子機構の開発

前述の鉗子駆動マニピュレータに装着し，腹腔内に挿入し手術操作を行なう屈曲2自由度，把持1自由度の合計3自由度の屈曲鉗子を実現する方式として，リンク駆動方式，ワイヤ駆動方式2種類の方式を検討している．リンク駆動方式は剛性が高く確実な駆動ができるといった利点を有する．ワイヤ駆動方式は稼動範囲の大きさ，小型化が容易といった利点を有するが，ワイヤ切断の危険性を有しており，本研究では用途により2種類の駆動方式を選択して使用することを検討している．Fig. 9にワイヤ駆動型の屈曲監視機構の例を示す⁵⁾⁶⁾⁸⁾．

鉗子の高機能化については Fig. 10に示すような小型の高出力半導体レーザを搭載したレーザマニピュ

Fig. 8 Compact forceps manipulator using a friction wheel and gimbal mechanism.

Fig. 10 Laser manipulator with high power semiconductor laser module.

レータの開発や、バイポーラ電気メス機能の付加を中心に研究を進めている⁷⁾。

(4) システム統合

本研究ではマスタースレーブマニピュレータシステムを阪大プロジェクト等で開発されている種々のナビゲーションシステムや、臓器変形解析システム

Fig. 9 Bending forceps manipulator using wire mechanism.

Fig. 11 Prototype of the percutaneous vertebroplasty robot.

と統合して使用することを想定している。すなわちナビゲーション技術、シミュレーション技術、ロボット技術などを統合したトータルシステムの完成が望まれている。これらの個々のシステムを統合する際、異なるハードウェアやオペレーティングシステム、プログラミング言語が混在しているのが現状で

Fig. 12 System configuration of pneumatic controlled bone cutting device.

ある。本件球では分散オブジェクト技術 CORBA によつてのシステムの統合に関する研究を進めている (Fig. 11)⁹⁾。

4. 整形外科手術支援ロボットの開発

阪大菅野プロジェクトと共同で、レーザガイドシステム、椎体骨穿刺ロボットの開発を進めている。また骨切りを正確に行なうための骨きり機構に関する検討も実施している。

(1) 骨穿刺マニピュレータの開発

経皮的椎体形成術において椎体骨穿刺を画像誘導型ロボットで行なうことには、三次元位置関係の把握や X 線被曝といった負担を術者に課すことなく高精度な位置決めを実現できるという利点がある。このようなロボットの開発にあたり、穿刺機構を用いて、ホルマリン固定したヒト椎体骨穿刺時の反力（力およびトルク）を測定し、椎体骨穿刺ロボットに要求される穿刺力を推定した。

典型的な構造の部位を適切な経路に沿って穿刺した場合、針送り量が約 5 ～ 6 mm のとき軸力は最大値を示したが、全体的として変化傾向は穿刺ごとに大きく異なった。穿刺部位の構造および機械的強度のバラつきが主原因と考えられる。X 線 CT 画像の輝度と軸力に相関が見られるため、術前骨密度測定により適切な穿刺条件設定が可能であると考えられ

る。

送り速度、回転速度の上昇はそれぞれ軸力最大値の増加、軸力トルクの低下につながる事が確認された¹⁰⁾。

また、ホルマリン保存ヒト大体骨頭標本を用いて、外科医の手技による穿刺と上記ロボット機構による穿刺時の比較を行なったさらなる検討が必要である。

(2) 精密骨切機構の開発

外科手術においては骨延長手術を始めとするいくつかの場面で、大腿骨などの骨切りが行なわれている。術後の骨の成長という点から考えると骨膜と骨髄の保護が重要である¹¹⁾が、最もオーソドックスな骨ノミとハンマーによる骨切りにおいて必要な部分だけの正確な切断は術者の熟練度に大きく依存している。骨切りの方法としては骨ノミとハンマーを用いる方法以外に、レーザ、超音波、骨鋸を使う方法が存在する。切断特性はそれぞれ一長一短があるが、術後の骨再生に重点をおくと、熟練は要するが切断時の熱発生が少ない骨ノミとハンマーによる切断が優れている。課題は術者の熟練度に依らずに正確な骨切りのできる方法を開発することである。骨ノミを用いた骨切りにおいて、術者がハンマーによってノミに与えていた衝撃力を空気圧制御のピストンに置き換えて再現性と精度の向上を図り、同時に操作性の向上も目指したメカニズムを開発している。

Fig. 13 Overview of the cylinder and bone chisel.

Fig. 14 Movement of the piston to initial position by negative pressure.

Fig. 12 に試作した骨切り装置の構成を示し、Fig. 13 にシリンダと骨ノミの外観を示す。前方ポートはピストン加速時の排気とピストンを戻す時の給気に必要であるが、シリンダ前部への給気ホースは操作性を妨害していた。そこで真空ポンプで減圧したタンクを追加し、シリンダの後部にのみホースを接続する構造とした。動作は Fig. 14 に示すように、ピストンの衝突後に後部の圧縮空気をいったん大気中に排気した後、減圧したタンクに接続してピストンを吸い上げて初期位置へ戻す。ピストン駆動の最大繰り返し速さは 70 回/分であり、対象を豚の大腿骨とした 1 回の切断量は 1～2 mm であった。刃先が柔らかい組織に当たった場合でも 1 回の切断量は 3 mm に抑えられており、切り過ぎの防止に役立つことが予想される¹¹⁾。

4. まとめ

本稿では、日本学術振興会未来開拓学術推進事業「外科手術支援ロボティクスシステム開発プロジェクト」の概要を解説し、そのなかからいくつかの研究を紹介した。平成 13 年度終了時点での成果に基づくものである。平成 14 年度、15 年度の研究開発により産業界と協力し、これら成果を基礎に実用化可能な手術支援ロボットシステムへの展開を図ることを予定している。京都大学、大阪大学、九州大学と共同で、肝臓低侵襲外科手術支援マスタースレーブマ

ニピュレータシステムの開発をめざし、大阪大学と共同で整形外科手術支援用レーザガイドシステム、椎体骨穿刺支援ロボット開発を目指すこととなっている。産学連携を推進し、臨床現場に提供可能な手術支援ロボットの開発を目標としている。

*

謝辞：本研究は日本学術振興会未来開拓学術推進事業 JSPS-RFTF99I00904 による。

文 献

- 1) 陳献, 久田俊明, 佐久間一郎ほか. 非線形有限要素法による肝臓変形シミュレーション. JJSCAS 2002; 4: 279-280.
- 2) Masutani Y. Non-Rigid Registration in Image-Guided Liver Surgery based on Non-Physically based model and Physically based Model. Proc of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2002; 754.
- 3) Kobayashi E, Masamune K, Sakuma I et al. A New Safe Laparoscopic Manipulator System with a Five-Bar Linkage Mechanism and an Optical Zoom. Computer Aided Surgery 1999; 4: 182-192.
- 4) Suzuki T, Kobayashi E, Kim D, et al. A new compact robot for manipulating forceps using friction wheel and gimbals mechanism, Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2002). 2002; 314-319.
- 5) 渡部耕一, 岡田昌史, 中村仁彦. リンク駆動型高剛性多自由度能動鉗子の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2001. 2001; 2P1-D10.
- 6) Nakamura R, Oura T, Kobayashi E, et al. Multi-DOF Manipulator System for Laparoscopic Surgery-Mechanism Miniaturized & Evaluation of New Interface. Lecture Notes in Computer Science 2001; 2208: 606-613.
- 7) 秦修, 小林史和, 小林英津子, 佐久間一郎, 矢作直樹, 辻隆之, 稲田紘, 土肥健純. 高出力半導体レーザ搭載型手術用マニピュレータの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2002. 2002; 40.
- 8) Kim Y, Oura T, Kim D, et al. Study on bending forceps manipulator with electric-cautery function for aparoscopic surgery, Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2002). 2002; 1089.
- 9) 大杉伸也, 土肥健純, 波多伸彦. CORBA を用いたネットワーク統合システムのパフォーマンス測定および評価. JJSCAS 2001; 3: 227-228.
- 10) 松宮潔, 桃井康行, 小林英津子, 菅野伸彦, 米延策雄, 稲田紘, 辻隆之, 佐久間一郎. 経皮的椎体形成術における椎体骨穿刺時反力の測定. JJSCAS 2002; 4: 265-266.
- 11) 鈴木信, 佐々木健, 板生清. 骨延長術手術支援メカニズムの開発; 衝撃力を利用した骨切りメカニズムの提案, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. 2002; 647.