

機関番号： 12601  
 研究種目： 基盤研究 (S)  
 研究期間： 2006～2010  
 課題番号： 18106005  
 研究課題名 (和文) コンパクト型手術ロボットと最小侵襲手術とを統合する医用 CAD/CAM システム  
 研究課題名 (英文) A Medical CAD/CAM System for Minimally Invasive Surgery Using a Compact Surgical Robot  
 研究代表者  
 光石 衛 (MITSUISHI MAMORU)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号： 90183110

## 研究成果の概要 (和文)：

本研究では、医師の経験と勘をロボット動作データに反映させる方法として、(1) CT や MRI の医用画像で構成される患部モデルをもとに低侵襲手術計画から動作データを生成する医用 CAD/CAM システム、(2) 術中に手術計画の遂行を促す手術ロボット用ナビゲーションシステム、(3) 低侵襲手術を支援する手術ロボットの開発を行った。

## 研究成果の概要 (英文)：

In the study, the following themes were conducted: (1) Medical CAD/CAM system to plan the operation based on the patient model, (2) Navigation system for medical use to assist the surgeon during operation, and (3) Development of medical robotics for minimally invasive surgery.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	30,300,000	9,090,000	39,390,000
2007 年度	27,900,000	8,370,000	36,270,000
2008 年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2009 年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	87,500,000	26,250,000	113,750,000

## 研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード： ロボット・サージェリ、医用 CAD/CAM システム、低侵襲手術

## 1. 研究開始当初の背景

医療分野において、手術前の診断領域では CT や MRI などの高度な機器が使用されている。一方で、実際の臨床現場では、人間 (医師) が介在する部分が大半である。近年、患者のニーズは多様化する傾向にあり、手術成績の向上や低侵襲 (低切開) 手術による早期回復等が強く望まれている。このような状況下で患者の要望に応えられるように、標準的な医師であっても人間より精巧なロボットによる手術が普及することによって高度医療を提供し、医療レベルの地域格差の是正するこ

との期待が高まっている。

通常の人間の医師による手術では、経験と勘により遂行されるため、ロボティック・サージェリの実現にはこれらの暗黙知要素をデータ化する必要性に迫られている。また、低侵襲手術を達成するために医師の技量をデータ化し、そのデータに基づいた動作を実現することが望まれる。さらには、手術室に適用容易な小型・軽量ハードウェアの開発が重要となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記のような背景を踏まえ、医師の経験と勘をロボット動作データに反映させる方法として、(1) CT や MRI の医用画像で構成される患部モデルをもとに低侵襲手術計画から動作データを生成する医用 CAD/CAM システム、(2) 術中に手術計画の遂行を促す手術ロボット用ナビゲーションシステム、(3) 低侵襲手術を支援する手術ロボットの開発を行う。

#### (1) 医用 CAD/CAM システム

第一段階として患者の患部情報を CT や MRI などの画像データで取得し、そのデータを再構成して有益な情報として医師に画面上に提示することで手術計画を支援、遂行する。この計画をもとに、手術ロボットのエンドエフェクタの動作・姿勢を決定するが、実際の手術では患部周囲に神経や血管といった重要な組織が存在するため、それらを回避しながら患部に到達する必要がある。この部分は CT や MRI の医用画像から事前にある程度は予測可能であるが、実際の手術時の患者の姿勢等を予測するのは困難であり、術中計測に委ねられる。そこで、術中に手術様態に応じて患部画像情報、X 線レントゲンや座標測定器を利用してエンドエフェクタ進入不可領域を設定し、それを反映した動作 CAM データを生成するためのデータ構造・その手法を提案する。

#### (2) 最小侵襲ナビゲーションシステム

人間による手術では、患部全体の形状を目視・経験と勘により限られた視野から補間して手術を遂行する。ロボティック・サージェリにおいても、患部とロボットの相対位置を教示(レジストレーション)する必要がある。従来の研究では、このレジストレーション時に十分な情報を取得するために患部を大きく展開(切開)することが要求される場合が多く、低侵襲手術実現の妨げとなっている。本研究では限られた低切開による限られた情報の中で高精度レジストレーションを実現する手法を確立する。

さらに、人間同様手術ロボットにも稼動範囲という制約が存在するため、手術動作を実現するための患部との相対位置関係は重要である。一般的には、ロボットの稼動範囲を大きく計画することで対処可能であるが、これによりロボットの大型化を招くことは容易に想像できる。したがって、本研究では上記(1)にて生成された動作 CAM データをもとに手術ロボットに必要なとされる可能範囲を提示し、手術が遂行可能な位置にロボット設置位置を誘導するシステムを開発する。これにより、稼動範囲を過剰に要せず、手術ロボットの小型化設計も可能となる。

#### (3) コンパクト型低侵襲手術ロボット

低侵襲のためのエンドエフェクタの動作を実現する手術ロボットを構築する。エンドエフェクタの動作が複雑になれば、ロボット全体の構造も大型化する傾向にある。しかし、手術室という特殊な空間はそれに対応する広さを有しない場合が多く、その適用には小型化が要請されている。本研究では、手術用ロボットナビゲーションシステムを用いて可動域の最小化・最適化設計を行うことで小型化を実施するとともに、小型・軽量の要素部品の開発によりさらなる小型化を試みる。また、MRI 対応可能な機械要素部品を開発する。

本研究では、以上の開発要素を高度医療とされる人工関節置換術、脳外科、腹腔鏡手術への適用を実施する。高度医療への適用を可能とすれば、他の術式にも応用が可能である。また、本技術はロボティック・サージェリ共通であり、その幅広い利用が期待される。

### 3. 研究の方法

これらのテーマを遂行するに当たり、工学的側面に関しては東京大学大学院工学系研究科が担当する。しかしながら、医学的な知識を要求される場面が多いため、医学系の研究者にアドバイスを請う。医療現場の経験を生かし、各専門分野の手術ロボットの設計指針に対するアドバイス、および、評価実験を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 医用 CAD/CAM システム

人工関節置換術を対象として、最小侵襲化のためのロボティック・サージェリのフローを明確化するとともに、システム構成、機能を策定した。この仕様に基づき、工具と患部周囲組織の干渉回避のための手法を提案し、術中の周囲組織位置を把握することによってエンドエフェクタ進入不可領域を表現する方法について実装した。構築したシステムを図 1 に示す。

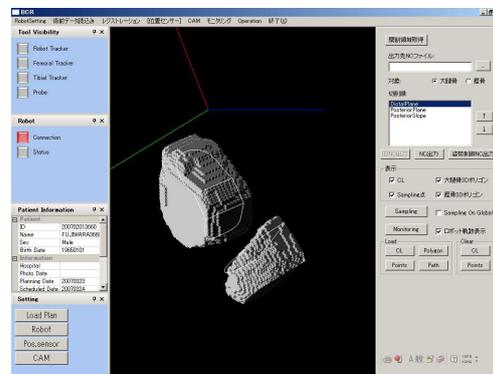


図 1 医用 CAD/CAM システム

最小侵襲手術では、低切開のため術中の限られた情報を利用してレジストレーションを遂行する必要がある。このため、座標測定器で直接計測可能なレジストレーション点を臨床学的に選定するとともに、サーフェス情報を用いる手法を確立し、その精度を評価した。手の外科手術では、特定の骨の直接計測とX線レントゲンによる簡易的な方法により補完的な情報を取得する手法（2D-3D手法）を開発した。

## (2) 最小侵襲ナビゲーションシステム

通常の手技では、術者は術野が十分に観察できるまで組織開創を行う必要がある。一方、ロボット手術では、より小さい開創で済む可能性がある。しかしながら、術者はロボットによる骨切除に適した領域を知る術はなく、皮切が必要以上あるいは不十分になる問題があった。そこで、骨切除に十分な開創領域（以下、理想開創領域）を医師に提示することにより、最小侵襲化を図った。制約条件として、皮膚表面からの情報のみ得られること、脚の屈曲角度に伴う必要皮切長の変化、解剖学的制約等が挙げられる。ここでは、骨、軟組織などの幾何関係を経皮で取得して、工具経路を考慮に入れた上で、理想開創領域を提示する。提示精度 5 mm、提示に要する時間 15 min で提示することを目標とした。

脚の屈曲角度は、切除時の骨干渉や皮切の長さに大きく影響を与える。したがって、CAM 上で脚屈曲をリアルタイムでトラッキングすることで最適化を図った。膝周辺には、膝蓋骨・靭帯・神経など重要組織が存在する。膝の解剖学を考慮する手段として、計測プローブを用いて、提示可能な開創領域を制限することで、危険領域を回避する。これにより、医師の経験を反映させることが可能である。

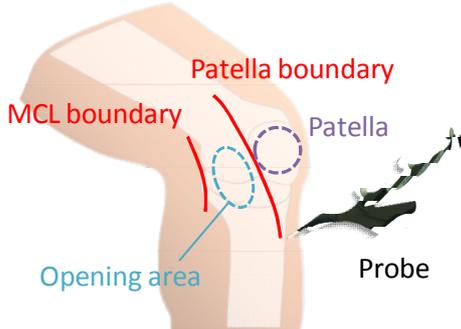


図2 計測プローブによる患部の測定

軟組織の侵襲は、皮膚表面の切開（皮切）と内部組織の展開（リトラクト）からなる。皮切を最小化するため、表皮の工具通過領域を最小化する表皮の1点を通る工具経路を皮膚表面から探索することで、必要となる候補開創領域を算出した。次に、候補開創領域と人工関節設置面からなる三次元凸包の体積をリトラクトによる侵襲として数値化して、

これを最小化する領域を理想開創領域として提示した（図3）。医師は領域を確保するように組織展開を行う。

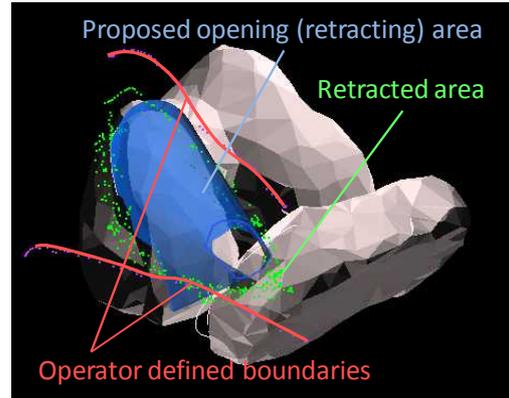


図3 理想開創領域の計算

提案手法の有効性を検証するため、人体標本を用いた実験を行った。具体的には、単顆型人工膝関節置換術（UKA）を対象として、提示領域の確保可能性、従来の手技皮切長に対する優位性、臨床的有效性を評価した。提示領域に基づき切開を加えた後、展開領域を計測した結果、提示領域の確保が可能であったため、理論的には提示領域からの骨切除が可能であると判断した。4人の整形外科医の手技皮切と比較した結果、いずれの医師よりも小さい皮切長であった（図4）。また、開創領域は医師が指定した範囲内に収まり、臨床的に有効であるとの見解が得られた。

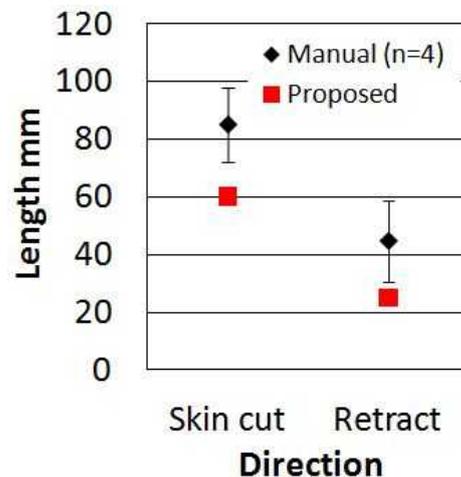


図4 提案手法の有効性評価

## (3) コンパクト型低侵襲手術ロボット

手術ロボットに関しては、まず、コンパクト型ロボット要素を組み込んだ人工関節置換術支援ロボットを開発した（図5）。このロボット、および、医用CAD/CAMシステム、ナビゲーションシステム、人工関節置換術支援システムを統合した総合的なシステムを構築し、人体標本を用いた評価実験を行い、良

好な結果（誤差2度，2mm以下）を得た。

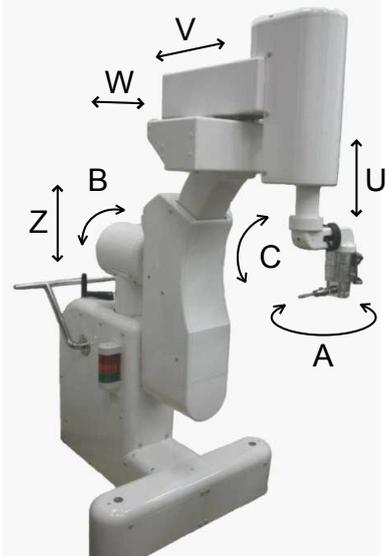


図5 人工関節置換術支援ロボット

内臓系低侵襲手術支援システムの構築においては、医師の要求する機能から仕様を決定し、ロボットの設計・製作を行った(図6)。このロボットを用いて2008年3月にバンコク(タイ)と九州を結んだ遠隔低侵襲手術実験を行い、豚の胆嚢摘出手術に成功した。

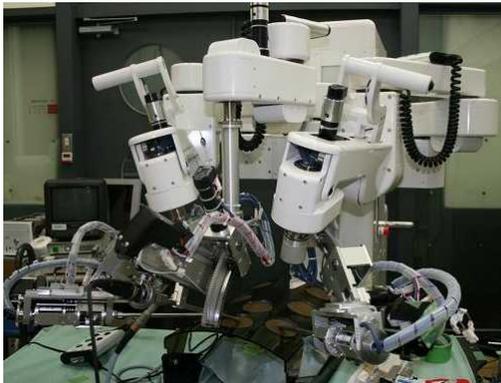


図6 腹腔鏡手術支援ロボット

深部脳神経外科手術を支援するロボットの開発については、ハイビジョンTVカメラ付顕微鏡と鉗子との干渉を避けるため、中に複数のワイヤが通過していても可能なオフセット鉗子を開発した(図7)。また、ピーク材を用いて軽量化を図ったマスタマニピュレータを開発した(図8)。このマスタマニピュレータの特徴は、スレーブマニピュレータに並進動作のみを動作させたい場合には手首を動かす必要がないといったより自然な動作入力が可能であることである。構築したシステムにより深さ60mmにある直径0.8mmの血管のバイパス手術に成功した。



図7 深部脳神経外科手術支援ロボット

また、コンパクト型手術ロボットの改良を行い、眼科、形成外科にも使用可能な汎用型微細手術ロボットの開発を行った(図9)。このロボットは、1mm以下の血管縫合や眼内における組織のハンドリングなど、超微細手術の実現を特徴としており、複数の領域(科)にまたがって使用することが可能である。



図8 医師操作マニピュレータ



図9 汎用型微細手術ロボット

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 29 件)

- ① Ida Y., Sugita N., Ueta T., Tamaki Y., Tanimoto K., Mitsuishi M., A microsurgical robot to assist vitreoretinal surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2011, in press.
- ② Sugita N., Nakano, T., Abe, N., Fujiwara, K., Ozaki, T., Suzuki, M., Mitsuishi M., Toolpath Strategy Based on Geometric Model for Multi-axis Medical Machine Tool, CIRP Annals, 2011. In press.
- ③ Ueta, T., Nakano, T., Sugita N., Mitsuishi M., Tamaki, Y., Comparison of Robot-Assisted and Manual Retinal Vessel Microcannulation in an Animal Model, British Journal of Ophthalmology, in press.
- ④ Sugita N., Nakano, T., Nakajima Y., Fujiwara, K., Abe, N., Ozaki, T., Suzuki, M., Mitsuishi M., Tool Path Generator for Bone Machining in Minimally Invasive Orthopedic Surgery, IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.15, No.3, pp.471-479, 2010.
- ⑤ Ueta, T., Yamaguchi, Y., Shirakawa, Y., Nakano, T., Ideta, R., Noda, Y., Morita, A., Mochizuki, R., Sugita N., Mitsuishi M. and Tamaki, Y., Robot-Assisted Vitreoretinal Surgery: Development of a Prototype and Feasibility Studies in Animal Model, Ophthalmology, Vol.116, pp.1538-1543, 2009.
- ⑥ Nakano, T., Sugita N., Ueta, T., Tamaki, Y., Mitsuishi M., A parallel robot to assist vitreoretinal surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.4, No.6, pp.517-526, 2009.
- ⑦ Arata, J., Takahashi, H., Yasunaka, S., Onda, K., Tanaka, K., Sugita N., Tanoue, K., Konishi, K., Ieiri, S., Fujino, Y., Ueda, Y., Fujimoto, H., Mitsuishi M. and Hashizume, M., Impact of network time-delay and force feedback on tele-surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.3, pp.371-378, 2008.
- ⑧ Mitsuishi M., Sugita N., Pitakwatchara, P., Force Feedback

Augmentation Modes in the Laparoscopic Minimally Invasive Telesurgical System, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.12, No.4, pp.447-455, 2007.

- ⑨ Mitsuishi M., Sugita N., Fujiwara, K., Abe, N., Ozaki, T., Suzuki, M., Moriya, H., Inoue, T., Kuramoto, K., Nakashima, Y. and Tanimoto, K., "Development of a Medical CAD/CAM System for Orthopedic Surgery," Annals of the International Institution for Production Engineering Research(CIRP Annals.), vol.56/1, pp.405-410, 2007.

[学会発表] (計 133 件)

- ① Mitsuishi M., Development of a Computer-Integrated Microsurgery System, 2010 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2010.11.8, Nagoya, Japan.
- ② Baek, Y. M., Kozuka, Y., Sugita N., Morita, A., Sora, S., Mochizuki, R., and Mitsuishi M., Highly Precise Master-Slave Robot System for Super Micro Surgery, Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.740-745, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 26-29, 2010.
- ③ Sugita N., Nakano, T., Nakajima Y., Fujiwara, K., Abe, N., Ozaki, T., Suzuki, M., and Mitsuishi M., Interference Free Surgical Tool-path Generation in Multi-axis Bone Milling Robot, Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.790-795, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 26-29, 2010.
- ④ Onda, K., Osa, T., Sugita N., Hashizume, M., and Mitsuishi M., Asynchronous Force and Visual Feedback in Teleoperative Laparoscopic Surgical System, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.844-849, 2010.
- ⑤ Mitsuishi M., Hashizume, M., Navicharern, P., Fujino, Y., Onda, K., Yasunaka, S., Sugita N., Arata, J., Fujimoto, H., Tanimoto, K., Tanoue, K., Ieiri, S., Konishi, K., Ueda, Y., "A

Telesurgery Experiment between Japan and Thailand,” The 6th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2009), pp.336-339, 2009.

- ⑥ Mitsuishi, M., Computer-Integrated Surgical System, International Conference on Intelligent Robotic Technology and Business, 2009.08.05, Taipei, Taiwan.
- ⑦ Mitsuishi, M., Computer-Integrated Surgical System, VR@P2009, 2009.10.9, Leiria, Portugal.
- ⑧ Mitsuishi, M., Innovations in Computer-integrated Surgical System, The 2009 International Symposium on Early Detection and Rehabilitation Technology of Dementia, 2009.12.11, Okayama.
- ⑨ Mitsuishi, M., Computer-integrated surgery system, The 2nd International Workshop on Human-Oriented Product Innovation, 2009.8.21, Seoul, Korea.

〔産業財産権〕

○出願状況（計3件）

名称：手術支援システム

発明者：杉田直彦，光石衛，中島義和，井上貴之，藏本孝一，中島義雄

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2010-131646

出願年月日：2010.06.09

国内外の別：国内

名称：小児外科手術用多自由度細径鉗子

発明者：杉田直彦，光石衛，福島清暁，藤井雅浩，岩中督，石丸哲也

権利者：同上

種類：特許

番号：61/348,991

出願年月日：2010.05.27

国内外の別：国外

名称：手術支援装置術

発明者：光石衛，中島義和，杉田直彦，齋藤季

権利者：同上

種類：特許

番号：特開 2009-291342

出願年月日：2009.12.17

国内外の別：国内

○取得状況（計4件）

名称：眼科手術支援装置及びこれを用いた眼

科手術支援システム

発明者：光石衛，玉置泰裕

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2008/072004

出願年月日：2008.12.4

国内外の別：国内

名称：手術支援システムにおいて用いられる  
マスタ・マニピュレータ

発明者：光石衛，森田明夫

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2008/060155

出願年月日：2008.6.2

国内外の別：国内

名称：REPOSITIONING APPARATUS

発明者：Mamoru Mitsuishi，Toji Nakazawa

権利者：Mamoru Mitsuishi，THK Co.Ltd.

種類：特許

番号：US 7,246,390 B2

出願年月日：2007.7.24

国内外の別：国外

名称：手術用具

発明者：光石衛，割澤伸一，中澤東治

権利者：光石衛，割澤伸一，THK（株）

種類：特許

番号：3980926

出願年月日：2007.7.8

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nml.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

光石 衛 (MITSUISHI MAMORU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：90183110

(2) 研究分担者

中島 義和 (NAKAJIMA YOSHIKAZU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：40343256

杉田 直彦 (SUGITA NAOHIKO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70372406

小泉 憲裕 (KOIZUMI NORIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：10396765