

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (S)
 研究期間：2004 ～ 2008
 課題番号：16109008
 研究課題名 (和文) 触覚提示・画像誘導機能を持つ内視鏡型手術ロボットの開発
 研究課題名 (英文) Development of an endoscopic surgical robot system with haptic sensations and navigation function
 研究代表者
 鈴木 直樹 (SUZUKI NAOKI)
 東京慈恵会医科大学・医学部・教授
 研究者番号：40147327

研究成果の概要：

本研究では、内視鏡先端部を首を振ることのできる眼（レンズ）の付いた頭部とし、この頭部の左右から対象物を力強くつかみ、持ち上げる腕に相当するアーム型鉗子を装備し、開腹下手術と変わらない自由度の外科的作業を行える装置ならびに触覚提示および画像誘導機能の開発を行なった。また完成したシステムの機能評価試験として、タイにおいて Soft Cadaver を用いた試験を行なうとともに、日本・タイ間で本システムを用いた遠隔手術の実験も実施することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004 年度	27,600,000	8,280,000	35,880,000
2005 年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2006 年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2007 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
総計	75,700,000	22,710,000	98,410,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・消化器外科学

キーワード：手術ロボット・内視鏡・Data Fusion・触覚提示・NOTES・遠隔手術

1. 研究開始当初の背景

内視鏡を用いた消化管内の外科的処置法の開発は近年格段に多様化し、かなりの外科的処置での臨床応用例が報告されるようになってきた。しかしながら処置内容には限界が見られ、さらにまた適用可能な処置を完了するにも多大な時間を必要とし、かつ術者にとっても多大な労力を必要とし、かつ個人的な技量の習熟も必要とするのが事実である。このような現状の大きな原因の一つはこれらの処置を内視鏡技術を基本形としているため、かなり無理がある外科的処置となってしまう点であると考えられる。つまり、内視鏡に装備されている鉗子孔を通る道具だけ

では、多様で自由な手術手技は望めない。また通常の手術用ロボットでは、ロボットの視野が消化管内のどの位置でどの方向を向いているのかを把握するには難しく、ナビゲーション機能を有するロボットの開発が望まれる。

2. 研究の目的

われわれが計画しているのは、内視鏡先端部が首を振ることのできる眼（レンズ）の付いた頭部とし、この頭部の左右から対象物を力強くつかみ、持ち上げ、おさえる腕に相当するアーム型鉗子を装備し、マンマシンのにも Open Surgery と変わらない自由度の外科的

作業を行える装置の開発を目的としている。このような手術用ロボットにより、体表面を貫通することなく消化管を進入路とし、からだの中でありながら開腹手術と同じ自由度をもって手術作業のできる手術用ロボット、言うなれば内視鏡ロボットの開発ならびにこのロボット手術をより正確、高速にするための専用画像誘導システムの開発を目的としている。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトの研究方法は大きく5つに分類される。本開発システムの根幹となるシステムの機能である、ロボットの手術操作機能、画像誘導機能、ロボットアームの触覚提示機能の開発を行った。開始当初より、開発成果を正確に評価、把握するためにブタを用いた動物実験により、臨床に近い環境下での検証を心がけた。4つ目はヒトの体内での開発システムの検証と改良である。これについてはヒト遺体 (Soft Cadaver) を用いることにより、できるだけ臨床に近い環境下での検証実施を試みた。5つ目は本開発システムを活用した Tele-NOTES 機能の開発と内視鏡ロボットの遠距離からの Tele-control 実験であった。これは臨床試験に向かえない代わりに本開発システムの将来性をにらんだ新たな挑戦として選んだ選択肢であった。

4. 研究成果

本プロジェクトに適した各部品の構造、サイズ、アームの取り付け位置・方向、強度などを考慮して CAD システムにより設計し、ロボットアームを製作した。これを利用し、アーム稼働範囲、内視鏡自体の動作を検証し、作業内容を拘束することのないようなアーム取り付け位置を決定してからロボット本体部分の製作を行った。内視鏡ロボット用の Data Fusion システムの機能としては、特に体内でロボット先端部の位置、方向に関する情報を得やすいシステムとすることを心掛けた。ファントム実験、摘出臓器を用いた実験により、内視鏡画像上で、肉眼



図1 摘出臓器を用いた食道から胃に到達したロボット先端部の様子

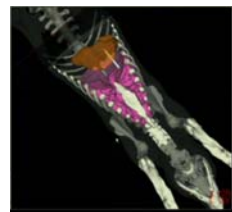


図2 動物実験における画像誘導システム表示例

では見ることのできない内部構造の情報を重畳表示する Data Fusion 画像誘導機能を決定した。

内視鏡ロボット手術において、より安全な手術手技を実施するための機能として、マニピュレータ先端部に圧センサを配置することなく先端部が軟組織に接触した際の反力をマスタ側で提示するための機能を開発した。ロボットアーム先端部は術者コントローラの指示に追従するように制御されるが、物体に接触して動作が阻害されるとスレーブとマスタの位置追従後差分だけ駆動しているワイヤの張力が増えることを利用し、反力を推定した。

内視鏡ロボット本体の開発と同時に開発を進めてきた Data Fusion 画像誘導システムと haptic feedback システムをロボットアームを装備した内視鏡本体に融合し、相互的な動作の干渉、各機能のテストをファントム実験、摘出臓器実験によって行い、Data Fusion 機能を持つ haptic feedback 付のロボットシステムとした。

本システムを臨床に用いるために人体の形態学的特徴に由来する体内作業が可能なことを確認するため、ヒトの遺体を用いた動作機能検証の可否の検討を行った。しかしながら生体の臓器と同じ柔らかさと柔軟性を持つ Soft cadaver を利用することは日本国内では困難であるため、タイ国内に内視鏡ロボットシステムを輸送しチュラロンコン大学医学部の協力を得てヒト体内での機能評価試験を実施した。

本システムを遠隔からでも操作可能な遠隔手術ロボットシステムを構築し、日本・タイ間において上記性能評価と同様にヒトの遺体 (Soft Cadaver) を用いて遠隔手術 (Tele-NOTES) の実験を行

なうことを橋爪誠教授をはじめとする九州大学外科チームの応援を得て行なった。このためのシステムは、内視鏡型手術ロボットとこれをコントロールするためにネットワークによって接続された術者用のコントローラに大きく分類される。

実験ではマニピュレータを操作する日本側の術者と内視鏡スコープ自体を操作するタ



図3 日本・タイ間遠隔手術実験におけるタイ側の実験の様子



図4 内視鏡ロボット術野画像

イ側の術者が、共同で手技を行ない、上記のネットワーク環境下で腹腔内に挿入したロボットを日本側からコントロールして消化管癌を想定したリンパ節切除を行なうことができた。

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 24 件)

1. Hattori A, Suzuki N, Ieiri S, Konishi K, Maeda T, Fujino Y, Ueda Y, Navicharen P, Tanoue K, Hashizume M, Experiment of a tele-controlled endoscopic surgical robot system between Japan and Thailand, *Computer Assisted Radiology and Surgery* 2009, 掲載予定
2. Suzuki N, Hattori A, Ieiri S, Konishi K, Maeda T, Fujino Y, Ueda Y, Navicharen P, Tanoue K, Hashizume M, Tele-control of an endoscopic surgical robot system between Japan and Thailand for Tele-NOTES, *Medicine Meets Virtual Reality* 17, 2009, 374-9
3. Hattori A, Suzuki N, Otori N, Iimura J, Moriyama H, Development of a real-time image-guided surgery system for stereo-endoscopic sinus surgery, *Medicine Meets Virtual Reality* 17, 2009, 112-6
4. 服部麻木, 鈴木直樹, 鈴木薫之, 大竹義人, NOTESへ向けた内視鏡型手術ロボットの開発, *日本コンピュータ外科学会誌*, 9(2), 2007, 79-84
5. Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Eto K, Yanaga K, Surgery simulation using patient-specific models for laparoscopic colectomy, *Medicine Meets Virtual Reality* 15, 2007, 464-6
6. Hattori A, Suzuki N, Suzuki S, Hayashibe M, Otake Y, Kobayashi S, General development plan of surgical robotic systems, *Computer Assisted Radiology and Surgery* 2006, *International Congress Series*, 2006,
7. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 患者臓器モデルを用いた手術シミュレーション, *日本コンピュータ外科学会誌*, 8(2), 2006, 77-80
8. Hayashibe M, Suzuki N, Hashizume M, Takeji Y, Konishi K, Suzuki S, Hattori A, Preoperative Planning System for Surgical Robotics Setup with Kinematics and Haptics, *Int. J. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 1(2), 2005, 76-85
9. Hayashibe M, Suzuki N, Kobayashi S, Nakata N, Hattori A, Nakamura Y,

Development of a 3D visualization system for surgical field deformation with geometric pattern projection, *Stud. Health Technol. Inform.*, 111, 2005, 172-7

10. Hattori A, Suzuki N, Hayashibe M, Suzuki S, Otake Y, Tajiri H, Kobayashi S, Development of a navigation function for an endoscopic robot surgery system, *Stud. Health Technol. Inform.*, 111, 2005, 167-71
11. Hayashibe M, Suzuki N, Hattori A, Suzuki S, Konishi K, Takeji Y, Hashizume M, Surgical robot setup simulation with consistent kinematics and haptics for abdominal surgery, *Stud. Health Technol. Inform.*, 111, 2005, 164-6
12. Suzuki N, Hattori A, Suzuki S, Otake Y, Hayashibe M, Kobayashi S, Nezu T, Sakai H, Umezawa Y, Construction of a high-tech operating room for image-guided surgery using VR, *Stud. Health Technol. Inform.*, 111, 2005, 538-42
13. Suzuki S, Suzuki N, Hayashibe M, Hattori A, Konishi Y, Takeji Y, Hashizume M, Tele-surgical simulation system for training in the use of da Vinci surgery, *Stud. Health Technol. Inform.*, 111, 2005, 543-8
14. Suzuki S, Suzuki N, Hayashibe M, Hattori A, Konishi Y, Takeji Y, Hashizume M, Tele-surgery simulation to perform surgical training of abdominal da Vinci surgery, *International Congress Series, Computer Assisted Radiology and Surgery*, 1281, 2005, 531-6
15. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 小西晃造, 掛地吉弘, 橋爪誠, VR技術の医学応用: 手術シミュレーションシステムの開発, *福岡医学雑誌*, 96(2), 2005, 44-8
16. 林部充宏, 鈴木直樹, 小林進, 中田典生, 服部麻木, 鈴木薫之, 大竹義人, 中村仁彦, 幾何学パターン投影法による術中変形を伴う生体の形状計測法の開発, *電子情報通信学会論文誌*, J88-D-2(1), 2005, 133-41
17. Hayashibe M, Suzuki N, Hattori A, Otake Y, Suzuki S, Nakata N, Data-fusion display system with volume rendering of intraoperatively scanned CT images, *Medical Image computing and computer assisted intervention* (2), 2005, 559-66
18. Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Uchiyama A, Kobayashi S, Sphere-filled organ model for virtual surgery system, *IEEE Trans. Med. Imaging*, 23(6), 2004, 714-22
19. Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Uchiyama A, Virtual Surgery Using a Deformable Organ Model Created by the Sphere-filled

Method, Systems and Computers in Japan, 35(13), 2004, 1-9

20. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 小西晃造, 掛地吉弘, 橋爪誠, 手術ロボットの最適な運動・機器配置のための術前プランニングシステムの開発, 電子情報通信学会論文誌, J87-D-2(12), 2004, 2262-70

21. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 小林進, 橋爪誠, 臓器変形モデルと力覚フィードバックデバイスを用いた手術シミュレータの開発, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 9(2), 2004, 97-102

22. Hattori A, Suzuki N, Hayashibe M, Suzuki S, Otake Y, Sumiyama K, Tajiri H, Kobayashi S, Navigation system for a developed endoscopic surgical robot system, Int. Congr. Ser., 1268, 2004, 539-44

23. Suzuki S, Suzuki N, Hashizume M, Takeji Y, Konishi A, Hattori A, Hayashibe M, Tele-training simulation for the surgical robot system "da Vinci", Int. Congr. Ser., 1268, 2004, 86-91

24. Takimoto T, Suzuki N, Hattori A, Suzuki S, Hayashibe M, Otake Y, Uchiyama A, Kobayashi S, Development of an elastic organ model containing voxel information, Int. Congr. Ser., 1268, 2004, 395-400

[学会発表] (計 33 件)

1. 服部麻木, 鈴木直樹, 田上和夫, 家入里志, 小西晃造, 藤野雄一, 上田幸宏, 平木理化, 橋爪誠, 日・タイ間におけるTele-NOTES実験, 第 17 回日本コンピュータ外科学会大会 2008, 東京, 10 月

2. Suzuki N, Hattori A, Hashizume M, Augmented reality function as a new eye for NOTES and Tele-NOTES, 11th World Congress on Endoscopic Surgery 2008, Yokohama, Sep.

3. 服部麻木, 鈴木直樹, 鈴木薫之, 大竹義人, 鴻信義, 飯村慈郎, 森山寛, 立体硬性内視鏡による鼻内手術のためのナビゲーションシステム, 第 47 回日本生体医工学会大会 2008, 神戸, 5 月

4. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 大竹義人, 遠隔コントロール機能を備えた内視鏡型手術ロボットによる遠隔手術システム, 第 16 回日本コンピュータ外科学会大会 2007, 広島, 11 月

5. 鈴木薫之, 衛藤謙, 鈴木直樹, 矢永勝彦, 患者臓器モデルを用いた腹腔鏡補助下大腸切除術シミュレーションの臨床応用, 第 16 回日本コンピュータ外科学会大会 2007, 広島, 11 月

6. 服部麻木, 鈴木直樹, 鈴木薫之, 大竹義人, 鴻信義, 飯村慈郎, 森山寛, 内視鏡下鼻内手術のためのステレオ画像によるナビゲ

ーションシステムの開発, 第 16 回日本コンピュータ外科学会大会 2007, 広島, 11 月

7. Suzuki N, Surgical simulation with haptic sensation and navigation surgery using real time imaging, Joint JSPS-SNSF Seminar on Computer-aided surgery, 2007, Osaka, Sep.

8. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 衛藤謙, 矢永勝彦, 患者臓器モデルを用いた腹腔鏡下大腸切除術シミュレーション, 第 46 回日本生体医工学会大会 2007, 仙台, 4 月

9. 服部麻木, 鈴木直樹, 鈴木薫之, 大竹義人, 小林進, 血管内手術を目的としたロボットシステムの開発, 第 46 回日本生体医工学会大会 2007, 仙台, 4 月

10. 服部麻木, 鈴木直樹, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, 田尻久雄, 小林進, 手術目的に応じた内視鏡型ロボットシステムの開発, 第 44 回日本生体医工学会大会 2005, つくば, 5 月

11. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 小西晃造, 掛地吉弘, 橋爪誠, Patient model を使用可能なロボット手術トレーニングのための遠隔手術シミュレーションシステムの開発, 第 44 回日本生体医工学会大会 2005, つくば, 5 月

12. 林部充宏, 鈴木直樹, 橋爪誠, 掛地吉弘, 小西晃造, 服部麻木, 手術ロボット動作の逆運動学計算処理による術前セットアップシミュレーション, 第 44 回日本生体医工学会大会 2005, つくば, 5 月

13. Hattori A, Suzuki N, Suzuki S, Otake Y, Hayashibe M, Kobayashi S, Nezu T, Sakai H, Umezawa Y, Design and construction of a high-tech operating room for navigation surgery, Computer Assisted Radiology and Surgery 2005, Berlin, June

14. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 小西晃造, 橋爪誠, 患部構造のポリウムデータを用いることが可能なロボット手術プランニングシステム, 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会 2005, 千葉, 11 月

15. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 衛藤謙, 服部麻木, 矢永勝彦, 変形特性に異方性を有する軟組織モデルを用いた大腸腹腔鏡下手術シミュレーションシステム, 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会 2005, 千葉, 11 月

16. Murakami EAY, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, マスタ・スレーブ内視鏡手術ロボットの駆動ワイヤ張力から推定した先端反力の検証, 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会 2005, 千葉, 11 月

17. Murakami EAY, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, 炭山和毅, 小林進, 内視鏡手術ロボットシステムにおけるマスタ・スレーブ操作性能の評価, 第 43 回日

本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

18. 大竹義人, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 林部充宏, 小林進, 複合現実感的手法を用いたData fusionシステム用画像提示デバイス, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

19. 服部麻木, 鈴木直樹, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, 炭山和毅, 田尻久雄, 小林進, 術中イメージガイド機能を備える内視鏡ロボットシステム, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

20. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 橋爪誠, 小西晃造, 掛地吉弘, da Vinci (手術ロボットシステム) の運動学計算による最適なアーム配置のための術前プランニングシステム, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

21. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 大竹義人, 中田典生, 小林進, 中村仁彦, 幾何学パターン投影法を用いた術野表面変形計測とData-Fusion, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

22. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 大竹義人, 林部充宏, 橋爪誠, 小西晃造, 掛地吉弘, da Vinci (手術ロボットシステム) のトレーニングを目的とした遠隔バーチャル手術システムの開発, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

23. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 瀧本崇博, 内山明彦, 小林進, In-vivo計測による反力データベースに基づく力覚提示を可能とする手術シミュレーション用軟組織モデルの構築, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

24. 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 大竹義人, 林部充宏, 小林進, 根津武彦, 坂井春男, 梅沢祐二, イメージガイド手術に適したハイテクナビゲーション手術室の建設, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

25. 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 大竹義人, 林部充宏, 炭山和毅, 田尻久雄, 小林進, 腹腔内臓器手術へのマスタスレーブ型内視鏡手術ロボット適用の検討, 第43回日本ME学会大会 2004, 金沢, 5月

26. Hayashibe M, Suzuki N, Hashizume M, Hattori A, Suzuki S, Kakeji Y, Konishi K, An interactive planning system for optimal trocar site placement of surgical robot da Vinci, Computer Assisted Radiology and Surgery 19th International Congress and Exhibition 2004, Chicago, June

27. Suzuki N, Hattori A, Hayashibe M, Otake Y, Suzuki S, Kobayashi S, 4D analysis of skeletal and muscular system during locomotion using dynamic spatial video camera system, Computer Assisted Radiology and Surgery 19th International

Congress and Exhibition 2004, Chicago, June

28. Murakami EAY, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, 小林進, 伊藤宏司, マスタ・スレーブ内視鏡手術ロボットにおけるカフイードバックのための制御システムの開発, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

29. 瀧本崇博, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 林部充宏, 大竹義人, 小林進, 内山明彦, Volume Dataを対象としたリアルタイム変形処理法(第3報) 対象臓器の切離・摘出機能の追加, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

30. 服部麻木, 鈴木直樹, 林部充宏, 鈴木薫之, 大竹義人, 田尻久雄, 小林進, 臨床応用を目指した内視鏡ロボットシステム, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

31. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 小西晃造, 掛地吉弘, 橋爪誠, ロボットのリンク構造を考慮したZEUS用術前プランニングシステム, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

32. 林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 大竹義人, 鈴木薫之, 小林進, 篠田明彦, 二ノ宮邦稔, モバイルC-arm CTによるボリュームデータを用いた術中ナビゲーションシステム, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

33. 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 林部充宏, 大竹義人, 小西晃造, 掛地吉弘, 橋爪誠, 腹部ロボット手術トレーニングのための患者臓器モデルを用いた手術シミュレーションシステム, 第13回日本コンピュータ外科学会 2004, 東京, 12月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 直樹 (SUZUKI NAOKI)
東京慈恵会医科大学・医学部・教授
研究者番号: 40147327

(2) 研究分担者

田尻 久雄 (TAJIRI HISAO)
東京慈恵会医科大学・医学部・教授
研究者番号: 20338916

服部 麻木 (HATTORI ASAKI)
東京慈恵会医科大学・医学部・講師
研究者番号: 90312024

鈴木 薫之 (SUZUKI SHIGEYUKI)
東京慈恵会医科大学・医学部・助教
研究者番号: 20338908

林部 充宏 (HAYASHIBE MITSUHIRO)
東京慈恵会医科大学・医学部・助手
研究者番号: 40338934

大竹 義人 (OTAKE YOSHITO)
東京慈恵会医科大学・医学部・助教
研究者番号：80349563

(3)連携研究者
服部 麻木 (HATTORI ASAKI)
東京慈恵会医科大学・医学部・講師
研究者番号：90312024