

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

◆ 記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字		SUZUKI NAOKI					
①研究代表者氏名		鈴木 直樹		②所属研究機関・部局・職		東京慈恵会医科大学医学部・教授	
③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					
	英文	Development of an endoscopic surgical robot system with haptic sensations and navigation function					
④研究経費		平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総合計
18年度以降は内約額 金額単位：千円		27,600	16,200	16,200	8,500	7,200	75,700
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
鈴木 直樹	東京慈恵会医科大学・医学部・教授	医用生体工学		研究統括・システム全体の設計			
服部 麻木	東京慈恵会医科大学・医学部・講師	医用生体工学		画像誘導機能のためのソフトウェアの開発			
林部 充宏	東京慈恵会医科大学・医学部・助手	医用生体工学		内視鏡手術ロボットの設計・開発			
鈴木 薫之	東京慈恵会医科大学・医学部・助手	医用生体工学		触覚提示機能のためのインターフェイス開発			
大竹 義人	東京慈恵会医科大学・医学部・助手	医用生体工学		画像誘導機能のためのインターフェイス開発			
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>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。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。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（カメラモジュール）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完了し、動物実験を経て患者への臨床応用研究までを達成することを本申請の目標としている。</p>							

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）
研究経過をアームを含む内視鏡ロボット本体の開発状況、画像誘導機能、そして最終的にロボットに持たせる予定の触覚提示機能の開発状況に分類して経過を報告する。

1. 内視鏡ロボット本体とアーム部分の試作

平成16年度では今までのロボット用アーム部分を試作した結果から得られた改良事項により、本プロジェクトに適した各 부품の構造、サイズ、アームの取り付け位置・方向、強度などを考慮したロボットアームをCADシステムにより設計し、製作に先立ってシミュレーションにより動作検証を行ってから実際の部品作製を行った。この試作したロボットアームを利用し、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内視鏡スコープの外側部を加工して、ロボット本体部分の製作を行った。



図1 パーツの改良によるロボットの小型化

平成17年度では前年度までに開発した内視鏡ロボット本体の改良を行うとともに、コンピュータの可動性の向上を図った。特にマニピュレータを駆動させるためのワイヤについて、マニピュレータ先端部が屈曲した場合でもワイヤの構造が適正な位置を保持できるように、ワイヤガイドのためのダイヤフラム型のパーツを設計し、これをテフロンで作製してマニピュレータに実装し、動物実験においても、良好な結果を得ることができた。さらにこの構造を用いることによりマニピュレータのより小型化ができることが判明した（図1）。



図2 開発した小型ステレオ CCD カメラモジュール

今まで内視鏡との結合体としてロボットの眼が装備されていたが、長径5mm、短径2.5mmのステレオ CCD カメラモジュール（図2）も開発することができ、これを用いることによりロボット本体の形状をより小さくすることができるという結論を得た。これにより患者への大幅な負担の軽減、ロボット侵入領域の拡大を期待できることが確信できた。

2. 内視鏡ロボット用画像誘導システムの開発

平成16年度では内視鏡ロボットに Data Fusion システム部の試作を行った。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）機能を決定した。特にこの過程で、表示だけでなく、体内で柔軟に形状を変化させる内視鏡先端部の精度良い位置と方向を決定する手法を用い、体外に位置するロボット基部の絶対位置を三次元運動計測システムによって計測することにより画像誘導精度の向上を図った。

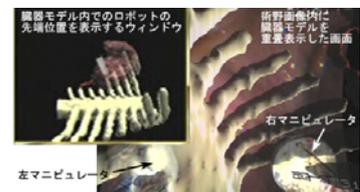


図3 内視鏡用画像誘導システムを動物実験に適用した様子

平成17年度では内視鏡ロボット手術支援のための Data Fusion 用ナビゲーション方法を確立することに努力を傾けた。平成16年度に製作した Data Fusion システムを内視鏡ロボットに搭載し、腹腔内でのロボットのオリエンテーションを把握しやすくするための腹腔内の内部構造を内視鏡画像上に重畳表示させる機能を付加した。本機能の評価はファントム実験の後、ブタを用いた動物実験において実施した（図3）。実験の結果、姿勢変化が大きい手術手技においても、腹腔内でのロボットの位置と姿勢を把握することができた。

3. 内視鏡ロボット手術のための触覚提示機能の開発

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、先端部に圧センサを配置する事なく術野内の周辺組織の質量、粘性、弾性係数をマスタ側で提示するための基礎実験を行った。マニピュレータ先端部が周辺組織に接触した時にマニピュレータを駆動するワイヤの張力が変化することに着目し、その変化とマニピュレータ先端部にかかる力との相関について検討を行った（図4）。これまでの基礎実験の結果から、ワイヤの張力変化からマニピュレータ先端部にかかる力を推定し、触覚提示の情報源とすることが可能であることが分かった。

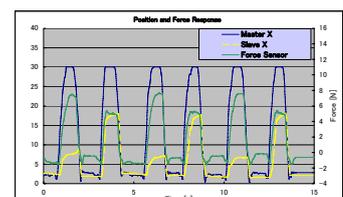


図4 基礎実験におけるマニピュレータ先端の位置変化とワイヤの張力の関係

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

平成 17 年度に完成した長径 5mm,短径 3mm のステレオ画像システムが完成したことと、新しい構造による小型鉗子の製作が軌道に乗ったことは、本プロジェクトの内視鏡ロボットの機能と、利用範囲を大きく向上させたといえる。つまり、ロボット本体がより小型化することができることにより、患者への大幅な負担の軽減となるとともに、ロボットが侵入できる領域の拡大を望めるからである。胃内から先に進んで十二指腸だけでなく、小腸領域での手術作業も可能となり、さらに胃壁を切開して腹腔内へ進出して手術作業を行う場合にもロボット本体の小型化は大きな利点になるといえる。

また、本プロジェクトの間接経費にて高次元医用画像工学研究所内に設置したロボット手術に適したデザインを持つ動物実験室により、日々改良されるロボット本体およびマニピュレータなどの動作性、ならびに画像誘導機能を、麻酔下のブタを用いて安定した環境下で検証することが可能となった。これにより通常の動物実験室に全てを運び込んでその度ごとに周辺システムをセットするのではなく、動物実験室にあらかじめ内視鏡ロボット制御用のマスターシステム、手術台脇の重畳画像用モニタを含む画像誘導用モニタリングシステムが装備されていることにより、常に安定した実験を行えるだけでなく、効率の良い実験作業をおこなうことができ、結果的に年間での実験成果を高く保持することができた。

また実用化について特筆すべきことは、本プロジェクトの成果の学会論文発表、ならびに国外での講演による情報発信をキャッチし、欧米の医学系企業などから本研究プロジェクト成果品の実用化を目指した共同開発に関する熱心な申し込みがあった。本プロジェクトが当初掲げた、「日本における日本独自のロボット開発」の主旨を変えざるをえないことがないような形で進めることができるかどうかを検討中である。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

論文

Suzuki S, Suzuki N, Hattori A, Hattori A, Uchiyama A, Kobayashi S, Sphere-filled organ model for virtual surgery system, IEEE Trans. Med. Imaging, 23(6), 2004, 714-22

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

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

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

○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

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

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

Hayashibe M, Suzuki N, Hashizume M, Kakeji 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

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

○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

Hayashibe M, Suzuki N, Hattori A, Suzuki S, Konishi K, Kakeji Y, Hashizume M, Surgical robot setup simulation with consistent kinematics and haptics for abdominal surgery, Stud. Health Technol. Inform., 111, 2005, 164-6

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

Suzuki S, Suzuki N, Hayashibe M, Hattori A, Konishi Y, Kakeji Y, Hashizume M, Tele-surgical simulation system for training in the use of da Vinci surgery, Stud. Health Technol. Inform., 111, 2005, 543-8

Suzuki S, Suzuki N, Hayashibe M, Hattori A, Konishi Y, Kakeji 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

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

⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

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

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

○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に掲載確定

学会発表

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

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

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ィ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

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

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

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ZEU S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

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, ニノ宮邦稔, 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

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

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

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

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

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

林部充宏, 鈴木直樹, 服部麻木, 鈴木薫之, 小西晃造, 橋爪誠, 患部構造のボリュー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

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

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