

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究 (A)  
 研究期間：2007 ~ 2009  
 課題番号：19206047  
 研究課題名(和文) 高分子アクチュエータを用いた内視鏡手術ツールの把持機構と制御方式の研究  
 研究課題名(英文) Study of holding mechanism and control methodology of endoscopic surgery tools using artificial muscle actuators  
 研究代表者  
 西川 敦 (NISHIKAWA ATSUSHI)  
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
 研究者番号：20283731

研究成果の概要(和文): 内視鏡手術は、その低侵襲性や美容面・医療経済面での優位性などから、急速に普及している。その一方で、内視鏡手術特有の操作性の悪さや手術視野の制限など解決すべき問題点も多い。このような限界を打破すべく、本研究では、モータに変わる新しい駆動装置として近年注目されている人工筋肉を利用することによる人間ロボット協調手術の提案と、これを実現するハードウェア(把持機構)とソフトウェア(制御方式)の開発を行った。

研究成果の概要(英文): Endoscopic surgery has grown rapidly in popularity in recent years, not only because it is less invasive and produces less visible scarring, but also because of its benefits in terms of healthcare economy. However, there are many unsolved problems such as difficult hand-eye coordination and limited field of view. We developed new hardware (endoscopic tool holding mechanism) and software (endoscopic tool control methodologies) for human-robot cooperation surgery based on the use of artificial muscle actuators.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	20,300,000	6,090,000	26,390,000
2008 年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：メディカルロボティクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：内視鏡手術、医療ロボット、人工筋肉アクチュエータ、パラレルメカニズム、タッチパネルインタフェース、ビジュアルサーボ、ゆらぎ、シングルポート(単孔)

## 1. 研究開始当初の背景

内視鏡手術は、患者の腹部や胸部に開けられた数個の小さな孔からカメラ(内視鏡)と

手術器具を挿入して外科的処置を行う方法であり、開腹・開胸手術に比べ、患者に優しく美容面や経済面でも優位なため、急速に普

及している。CT や MRI をはじめとした画像診断技術の飛躍的な進歩もあり、このような低侵襲型手術への期待は年々増加しているが、その一方で、外科医には非常に高度な技術が要求されるため、近年医療事故も多発している。この問題に対処するべく、大型のマスタ・スレーブ方式の手術ロボット（たとえば、Nature Vol.413, Sep 27, 2001）が欧米を中心に開発されているが、日本国内ではほとんど普及していない。

研究代表者らは、現存の手術支援ロボットには、ハードウェア・ソフトウェアの両面で本質的な「限界」があり、この「限界」を打破しない限り、内視鏡手術のさらなる発展は望めないと考えた。ここに、ハードウェア面の限界とは、産業用ロボットと同様、「いわゆるモータを動力源としていること」に起因する小型軽量化、清潔性、安全対策に対する限界である。ソフトウェア面の限界とは、現存のシステムにおいて「人間（外科医）がロボットの全ての自由度を遠隔操作しなければならないこと」に起因する操作性（インタフェース）の限界である。また、ロボットが手術の円滑な進行にどれだけ貢献（影響）しているかを評価する客観的な手法が確立していないことも医療ロボットの普及を妨げている一因であると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、モータに変わる新しいアクチュエータ：「人工筋肉」を利用することによる人間ロボット協調手術の提案と、これを実現するハードウェア（内視鏡手術ツールの把持機構）ならびにソフトウェア（内視鏡手術ツールの制御方式）の開発である。より具体的には、以下の4個の研究開発目標を設定した。

- (1) 内視鏡および手術器具の把持機構：人工筋肉アクチュエータの導入により、従来のハードウェアにとって代わる小型軽量化で清潔性・安全性に優れた臨床応用可能な内視鏡把持ロボットを新規開発すること。
- (2) 内視鏡の制御方式：従来のように外科医が遠隔操作する方式ではなく、熟練の外科医の内視鏡操作パターンを移植することで、自律的に内視鏡を位置決め制御する手法を確立すること。
- (3) 手術器具の制御方式：従来のように外科医がマスタ・コンソールで遠隔操作する方式ではなく、内視鏡画面上で処置部を直感的になぞることで腫瘍を切除できる内視鏡ロボット手術システムの新規開発。
- (4) 人間ロボット協調手術システムの構築ならびにシステム評価手法の確立。

## 3. 研究の方法

上述した4つのサブプロジェクトについて、その位置づけや性格を慎重に考慮してそれぞれ異なるタイプの医工連携・産学連携体制、タイムスケジュールを組み、並行して、効率的に推進する方式を採った。

- (1) 内視鏡および手術器具の把持機構：大阪大学基礎工学研究科、大阪大学消化器外科、大研医器株式会社との三位一体型の医工連携かつ産学連携体制。ハードウェア開発であり、他のサブプロジェクトに共通の基盤技術となり得ることから、上半期までのロボットの完成（動物実験による実証）ならびに研究期間内の産業財産権（特許）取得を目指した。
- (2) 内視鏡の制御方式：大阪大学基礎工学研究科と大阪大学消化器外科との医工連携体制で実施。研究期間全体にわたり「工」を主体とする体制。上半期は、「工」が中心に既存のハードウェアを利用してアルゴリズム開発を進め、「医」の協力のもとで検証実験を実施。下半期より、「産（大研医器株式会社）」の協力のもとで、(1)で開発したロボットに提案手法を実装し、従来型との比較実験により評価。
- (3) 手術器具の制御方式：京都府立医科大学呼吸器外科、大阪大学基礎工学研究科との医工連携体制。上半期は、「医」「工」共同で既存のハードウェアを利用してアルゴリズム開発を進める。下半期は、「医」が主体となり、「産（スキューズ株式会社）」を加えた医工・産学連携体制で、ハード・ソフトをブラッシュアップし、動物実験によりシステムを総合評価。
- (4) 人間ロボット協調手術システムの構築と評価：システム構築に先立って、システムの評価手法の検討を初年度より大阪大学基礎工学研究科、株式会社総合医科学研究所との産学連携体制で実施。上半期までに既存のハードウェアを用いて、「医（大阪大学消化器外科）」の協力のもとで、提案手法による検証を行い、下半期の全体システム構築後、最終評価。

## 4. 研究成果

- (1) 内視鏡および手術器具の把持機構  
従来の内視鏡手術支援ロボットに使用されている電気モータなどのアクチュエータは清潔性に問題があり、また手術中に故障した場合の対応など、安全面での問題も数多く指摘されている。我々はこれらの問題を解決

するために、「医用ディスプレイブルニア人工筋肉アクチュエータ」を開発した。本アクチュエータは水圧駆動型で、清潔野内に電気系統を含まないため安全であり、全体を容易に滅菌できるため清潔で、さらに低コストで製作可能なため、他の多くの医療器具と同様にディスプレイブル化が可能である。

本アクチュエータを用いて構築した内視鏡手術ツールの把持機構（以下、「内視鏡ロボット」）を図1に示す。この内視鏡ロボットは、重量580g、直径120mm、高さ300mmの円筒型の小型軽量アームで、6本の人工筋肉アクチュエータを用いたStewart-Gough機構（パラレルメカニズム）で構成されており、各アクチュエータの長さを協調制御することで内視鏡手術ツールの位置決めを行う。

本ロボットの有効性を確認するために、消化器外科領域で最も代表的な「胆嚢摘出術」、「幽門側胃切除術」、「定位前方切除術」の計3種類の内視鏡手術（ブタを用いた動物実験）を実施した。本実験では、ロボットに内視鏡を把持させ、執刀医とは別の外科医（カメラ助手）がジョイスティックを用いてロボットを遠隔操作する構成を採った。結果、いずれの手術においてもロボットの可動範囲は十分に動作も安定しており、安全にすべての手術を完遂することができた。



図1 内視鏡手術ツールの把持機構（内視鏡ロボット）。左：実装図（内視鏡を把持・操作している例）。右：単体図（6本の人工筋肉アクチュエータに取り囲まれた中央部分に内視鏡などの手術ツールを装着して利用する）。 Nature Vol. 461, Sep 17, 2009

### (2) 内視鏡の制御方式

近年の医師不足問題から、内視鏡手術を従来の「執刀医+カメラ助手」の形態から「執刀医のみ」で行うことのできる形態へ移行することへの要求があり、執刀医の望む最適な視野になるように内視鏡を自動位置決めするロボットシステムの実現が期待されている。しかし、熟練カメラ助手の持つ内視鏡操作スキルを再現できる内視鏡自動位置決めシステムは未だ存在しない。その最大の要因はカメラ助手のモデル化を正確に行うことができないことに起因する。

本研究では、生物の環境適応能を表現した「ゆらぎ方程式（式(1)）」をベースとした内視鏡自動位置決めアルゴリズムを提案した。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \cdot \text{activity} + \eta \quad (1)$$

$x$  はシステムの状態、本システムにおいては内視鏡先端から見た右鉗子先端目標位置である。activity はシステムの評価関数で左鉗子先端速度情報を用いることにより評価値を計算し、適切な視野を提供できているとシステムが判断している際に評価値が高くなる関数である。 $\eta$  はノイズである。 $f(x)$  はシステムのダイナミクスで、activity の情報と右鉗子先端の情報を用いて、 $x$  がより効率的に activity が高くなる状態に遷移するように自律的に逐次更新される。この式(1)は、システムの状態が適当であれば activity の値が大きくなり、右辺第一項が支配的となり、適当な状態が維持され、逆に状態が不適当になると activity の値が小さくなり右辺第二項の影響が支配的となり、状態空間をランダムウォークによって最適解の探索を行うものである。

図2のようなシステムを構築し、ブタの肝臓を用いた in vitro 実験を多数回実施し従来手法（カメラ助手の内視鏡操作スキルの数値モデル化に基づく方法）と比較した結果、提案手法が非モデルベースのアプローチであるにもかかわらず、カメラ助手の内視鏡操作の特徴をよく捉えており、その有用性を示す結果となった。

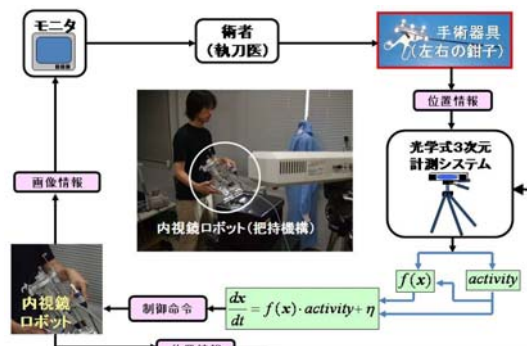


図2 内視鏡自動位置決めシステム構成図。内視鏡を把持しているロボットは、図1の内視鏡ロボットと同一である。

### (3) 手術器具の制御方式

内視鏡手術では、通常の開腹・開胸手術とは異なる Hand-eye coordination（眼と手の協調関係）が必要であり、器具の操作・位置決めが困難という問題がある。

この問題を解決するために、本研究では、外科医がモニター画面上でタッチパネルやマウスカーソルを用いて処置対象を2次元的に指定することで、ロボットがその位置へ3次元的に手術器具先端を位置決めできる「タッチ式内視鏡手術器具インタフェース」の開発を行った。

提案システムの構成を図3に示す。本システムは、手術器具を把持・操作するロボット、レーザポインタ付手術器具、内視鏡、内視鏡画像を表示し外科医が目標点入力を行うタッチパネルモニタ、ロボット制御兼画像処理用PCから構成される。提案手法では、まずビジュアルサーボを用いて、レーザポインタで照射された明るい点(レーザスポット)を画面上の目標点に位置決めし、器具の方向を目標点に向ける。次に、画像情報より器具先端と目標点間の空間上距離を推定し、適切な距離まで器具を挿入する。その後、処置(レーザメスによる焼灼など)を行う。ここで、          においては、時々刻々のイメージャコピアンを逐次最小二乗法を用いて画像情報からオンラインで推定することで、カメラの3次元位置姿勢や内部パラメータの計測を必要としない制御則を構築した。また、          においては、予め手術器具に3つの反射マークを取り付け、画像処理により得られる反射マークとレーザスポットの計4点の画像座標から「複比」を求めることで、器具先端とレーザスポット点間の空間上距離を推定する方法を採った。本システムに手術用レーザメスを持たせて、ブタを用いた動物実験を実施した結果、動脈の止血や肝臓を切除する内視鏡手術を安全かつ直感的に行うことができ、提案手法の有効性を示すことができた。

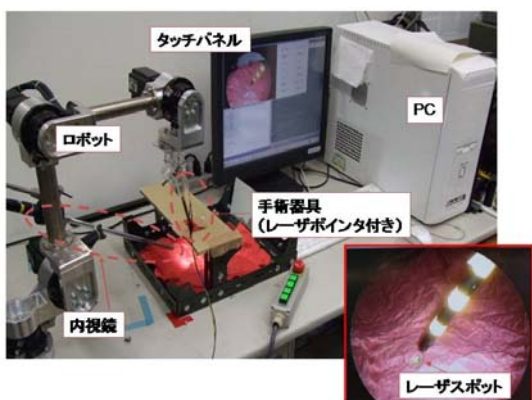


図3 タッチ式内視鏡手術器具インタフェース。右下の写真はタッチパネルモニタに表示された内視鏡画像の拡大図である。

#### (4) 人間ロボット協調手術システム

外科医(被験者)と内視鏡ロボットが協調して行う手術タスクの前後で測定した被験者の生化学的ストレス指標と加速度脈波の分析結果を用いることで、客観的に被験者の精神ストレスを評価する方法を提案した。

本手法では、生化学的ストレス指標には唾液を、加速度脈波のデータとしてはLF/HFを用いる。唾液 - アミラーゼは、ストレス刺激を受けてから10分以内で値が上昇(活性化)し、唾液コルチゾールは、ストレス刺激を受けてから20分から30分程度で値が上昇

(活性化)する。一方、LF/HFは、ストレスに対し瞬時に反応し数値が上昇する。これらの反応時間の差を逆にうまく利用することで、25分程度のタスクの前後で測定した唾液成分と加速度脈波の波形のみから、タスク前、タスク中、タスク終了時のストレスを見積もることができる。本手法を用いて、外科医と内視鏡自動位置決めシステムがインタラクションを行う場合に、外科医が受ける精神ストレスを客観的に評価することに成功した。

最終年度には、新たな人間ロボット協調手術システムとして、従来の内視鏡手術よりも外科医の精神的負担がはるかに大きくなる「単孔式内視鏡手術」を支援するためのロボットシステムの構築を行った。単孔式内視鏡手術は、内視鏡と手術器具を同一の孔から同時に挿入して行う内視鏡手術で、2007年頃から世界的に試みられている新しい手術である。提案した制御方式によって単孔式内視鏡手術を従来の内視鏡手術と同様の感覚で行うことが可能であることを簡単なタスクを用いて実験的に示すことができた。ただし、外科医のストレスの客観的評価や、ブタを用いた動物実験などより臨床に近い状況下での検証は今後の課題となった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Mitsugu Sekimoto, Atsushi Nishikawa, Kazuhiro Taniguchi, Shuji Takiguchi, Fumio Miyazaki, Yuichiro Doki, and Masaki Mori. Development of a compact laparoscope manipulator (P-arm). *Surgical Endoscopy*, Vol. 23, No. 11, pp. 2596-2604, 2009.

谷口和弘, 西川敦, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 倉下直人, 関本貢嗣, 瀧口修司, 三吉範克, 土岐祐一郎, 森正樹, 宮崎文夫. 水圧駆動型内視鏡マニピュレータのin-vivo評価. *生体医工学*, Vol. 46, No. 6, pp. 606-620, 2008.

難波俊介, 西川敦, 今岡健悟, 島田順一, 加藤大志朗, 寺内邦彦, 下村雅律, 常塚啓彰, 宮崎文夫. ビジュアルサーボを用いたタッチ式内視鏡手術器具インタフェース. *生体医工学*, Vol. 46, No. 6, pp. 595-605, 2008.

谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 倉下直人, 青柳さやか, 杉野友啓, 関本貢嗣, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫. ディスポーザブル型内視鏡把持位置決めロボット. *日本ロボット学会誌*, Vol. 26, No. 6, pp. 502-513, 2008.



[学会発表](計 50 件)

A. Nishikawa, Y. Yamada, S. Toda, M. Sekimoto, N. Miyoshi, S. Takiguchi, Y. Doki, M. Mori, and F. Miyazaki. Analysis of Decisions by Camera Assistants on the Field of View for Laparoscopic Surgery and Its Application to Automatic Positioning of a Laparoscope. 21st International Conference of the Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2009), Sinaia, Romania, October 8, 2009.

SMIT2009 2<sup>nd</sup> Poster Prize を受賞。

A. Nishikawa, Y. Yamada, K. Taniguchi, and F. Miyazaki. Automatic Endoscope Positioning Algorithm Based on Biological Fluctuation. 5th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2009), Changhua, Taiwan, July 4, 2009.

S. Namba, A. Nishikawa, K. Imaoka, J. Shimada, D. Kato, K. Terauchi, M. Shimomura, H. Tsunozuka, and F. Miyazaki. Accurate trajectory tracking using visual servoing for robotic endoscopic surgery. 23rd International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2009), Berlin, Germany, June 24, 2009.

J. Shimada, A. Nishikawa, S. Namba, K. Imaoka, D. Kato, K. Terauchi, M. Shimomura, H. Tsunozuka, and F. Miyazaki. Endoscopic robotic surgery with intuitive touch panel navigation. 23rd International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2009), Berlin, Germany, June 24, 2009.

A. Nishikawa, H. Nakagoe, K. Taniguchi, Y. Yamada, M. Sekimoto, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. How does the camera assistant decide the zooming ratio of laparoscopic images? -Analysis and implementation-. 11th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI2008), New York, USA, September 9, 2008.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, N. Kurashita, M. Sekimoto, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. Development of a disposable laparoscope manipulator using hydraulic actuators (second

prototype). 20th International Conference of the Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2008), Vienna, Austria, August 28, 2008.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, N. Kurashita, M. Sekimoto, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. A disposable laparoscope manipulator using hydraulic actuators with air spring. 22nd International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2008), Barcelona, Spain, June 27, 2008.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, N. Kurashita, M. Sekimoto, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. A disposable laparoscope manipulator using hydraulic actuators. 2008 Emerging Technology Session of the Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (SAGES2008), Philadelphia, Pennsylvania, USA, April 12, 2008.

H. Blasinski, A. Nishikawa, and F. Miyazaki. The application of adaptive filters for motion prediction in visually tracked laparoscopic surgery. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2007), Sanya, China, December 16, 2007.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, F. Miyazaki, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, M. Sekimoto, S. Takiguchi, and M. Monden. Development of a safe disposable laparoscope manipulator using hydraulic actuators. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2007), Sanya, China, December 16, 2007.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, H. Nakagoe, K. Kazuhara, T. Kobayashi, T. Ichihara, M. Sekimoto, K. Okada, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. Development of a novel disposable laparoscope manipulator. 19th International Conference of the Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2007), Sendai, Japan, November 21, 2007.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, H. Nakagoe, T. Sugino, M. Sekimoto, K. Okada, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. Evaluating the surgeon's stress when using surgical assistant robots. 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication

(RO-MAN 2007), Jeju, Korea, August 29, 2007.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, H. Nakagoe, T. Sugino, M. Sekimoto, K. Okada, S. Takiguchi, M. Monden, and F. Miyazaki. Study of evaluation of surgical assistant systems: Surgeon's stress evaluation using saliva and acceleration plethysmogram. 21th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2007), Berlin, Germany, June 28, 2007.

〔図書〕(計3件)

A. Nishikawa, M. Sekimoto, K. Taniguchi, Y. Yamada, N. Miyoshi, S. Takiguchi, Y. Doki, M. Mori, and F. Miyazaki. Design and Control of a Compact Laparoscope Manipulator: A Biologically Inspired Approach. In Robot Manipulators, Sciyo Publishing, 2010 (in press).

K. Taniguchi, A. Nishikawa, M. Sekimoto, T. Kobayashi, K. Kazuhara, T. Ichihara, N. Kurashita, S. Takiguchi, Y. Doki, M. Mori, and F. Miyazaki. Classification, design and evaluation of endoscope robots. In Seung Hyuk Baik, editor, Robot Surgery, Chapter 1, pp. 1-24, IN-TECH Education and Publishing, January 2010.

K. Taniguchi, A. Nishikawa, T. Sugino, S. Aoyagi, M. Sekimoto, S. Takiguchi, K. Okada, M. Monden, and F. Miyazaki. Method for objectively evaluating psychological stress resulting when humans interact with robots. In Vladimir A. Kulyukin, editor, Advances in Human-Robot Interaction, Chapter 9, pp. 141-164, IN-TECH Education and Publishing, December 2009.

〔産業財産権〕

取得状況(計1件)

名称: 医療用マニピュレータ装置  
発明者: 西川 敦、宮崎文夫、谷口和弘、門田守人、関本貢嗣  
権利者: 国立大学法人大阪大学、  
財団法人大阪産業振興機構  
種類: 特許  
番号: 特許第 4446055 号  
取得年月日: 平成 22 年 1 月 29 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕報道関係情報(新聞・TVなど)  
2010.01.26. 「国産の医療機器を作る!」, 関西テレビ「スーパーニュースアンカー」  
2009.11.16. 「内視鏡手術支援システム 腫瘍、画面なぞり切除 肺・肝臓向け レーザー位置、正確に把握」日本経済新聞 朝刊科学面  
2009.10.04. 「内視鏡ロボット P-arm」, BS ジャパン「世の中進歩堂」  
2009.09.17. 「How to better join forces. The endoscope robot developed by Osaka University and Daiken Medical」, Nature, Vol.461, No. 7262  
2009.08.28. 「産学医連携 動きはじめた 医療機器ビジネス」, テレビ大阪「ニュース BIZ」  
2009.08.19. 「次世代医療は関西が推進 産学タッグ機器開発」, 産経新聞夕刊 1 面  
2008.12.01. 「腹腔鏡手術 安全性高く 阪大, 操作自動の内視鏡」, 日本経済新聞 朝刊科学面  
2007.11.22. 「関西創造得区 医療技術 産学連携に成果:ロボット手術助手」, 読売新聞 朝刊 11 面  
2007.5.8-5.14. 「内視鏡手術に使い捨てロボ」(共同通信 記事ならびに 47NEWS 動画配信), 秋田魁新報, 東京新聞, 山梨日日新聞, 岐阜新聞, 北國新聞, 神戸新聞, 四国新聞, 高知新聞, 山口新聞, 南日本新聞, 大阪日日新聞などに掲載。  
2007.4.10. 「最新機器ずらり 医療のいま、未来。大阪で企画展示: 実用化へ研究が続く小型の内視鏡手術支援ロボット」京都新聞 朝刊 18 面

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 敦 (NISHIKAWA ATSUSHI)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 20283731

(2) 研究分担者

宮崎 文夫 (MIYAZAKI FUMIO)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 20133142  
平井 宏明 (HIRAI HIROAKI)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 60388147  
島田 順一 (SHIMADA JUNICHI)  
京都府立医科大学・医学系研究科・講師  
研究者番号: 60315942

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: