

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5 月 28 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650101

研究課題名（和文）

ブレインマシンインターフェイスを利用した単孔式手術支援ロボットの開発

研究課題名（英文）

Development of Single Port Surgery Robot using Brain-Machine Interface

研究代表者

藤江 正克 (MASAKATSU G. FUJIE)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：20339716

研究成果の概要（和文）：

単孔式内視鏡下手術は一つの切開口から術具を挿入して手術するため、切開口が少なく済むことから患者の早期回復が可能であるという利点がある。しかし、単孔式内視鏡下手術は内視鏡画像の操作の不確実性、術具の可動範囲・自由度不足が原因で医師の操作は困難である。本研究は人間工学と認知科学に基づいて術具マニピュレータを設計し、ブレイン・マシン・インターフェースを利用して操作するシステムの要素技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Single Port Surgery has the great potential to realize the minimal invasive surgery. Surgeon inserts the microscopic manipulator into patient's body from only single port. Opening wound site is only single so that patient could recover early. But, single port surgery has the critical problems that endoscope is difficult to control and manipulator is lack of movement of range and degree of freedom. This study presents a novel system using brain-machine interface to control surgical manipulator designed on the basis of human engineering and cognitive science.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボット

キーワード：単孔式手術支援ロボット，ブレイン・マシン・インターフェース，手術支援ロボット，マスタ・スレーブ，SPS，メディカル・ロボティクス

## 1. 研究開始当初の背景

近年、内視鏡外科手術よりもさらに低侵襲で、限りなく無侵襲に近い治療法である SILS(Single Incision Laparoscopic Surgery：体表に開けた単一の穴からの治療を行う術式)，NOTES(Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery：人体の開口部から術具を挿入する術式)などの臨床応用が進められている。低侵襲かつ正確な医療を誰もが享受するためには、強力な医工連携体制のもとに開発された、手術支援ロボッ

トやナビゲーションをからなる低侵襲治療システムが不可欠である。例えば、内視鏡下手術支援システム「da Vinci®: Intuitive Surgical 社」は欧米を中心に約 1200 台が稼働し、内視鏡外科の操作性を向上させ安全性を高めた実績が有する。申請者らも、脳外科手術分野で世界初の臨床試用に成功した手術ロボット（2000 年日経 B P 技術賞），MRI 対応小型手術支援ロボット（「今年のロボット大賞 2007」審査委員特別賞優秀賞）等の革新的なロボット開発を行い、分野発展へ多大

な貢献をしてきた。一方、SILS や NOTES においては、Simaan らの研究(IROS'10)を例として、全世界的に研究が進められているが、未だ萌芽の段階にある。しかも現在発表されているほとんどのロボットは、既存の軟性内視鏡に単に術具を付加しただけ構成のものが多い。そのため、複雑な手技を行う上で、内視鏡画像の操作の不確実性、術具の可動範囲・自由度不足が原因となり、da Vinciを用いた内視鏡外科手術などとは比較にならないほど低い操作性しか原理的に期待できない。この問題点を根本的に解決すべく、

- (1) 医師が操作しやすい多自由度な術具
- (2) 直感的に操作可能なシステム
- (3) 臨床の場に適合した要求仕様

を備えたロボットシステムが必要であるとの着想に至った。

## 2. 研究の目的

本提案では、上記のコンセプトを実現する、操作性の飛躍的な向上を目指した、SILS・NOTES 支援ロボットシステムを開発する。これまでの手術支援ロボットで最も自由度が多いスレイブロボットの開発と、その直感的操作を可能にするマスタロボットの開発を実施すると共に、次の三つの技術課題を実施し、新たな知見を明らかにする。

- (1) 人間工学と認知科学に基づいた術具マニピュレータを設計
- (2) Brain-Machine Interface (BMI)とマスタロボットが混在する操作システムを開発
- (3) 医師が直感的に操作可能な手術支援ロボットの要求仕様を導出

## 3. 研究の方法

- (1) 人間工学と認知科学に基づいた術具マニピュレータの設計

### ①術具マニピュレータの多自由度化

申請者らは本研究開始の前に SILS 支援用術具マニピュレータの製作した(図1)。開発したロボットは、ユニバーサルジョイントを用いたパラレルリンク機構を採用しており、フレキシブルシャフトによる駆動伝達を用いて直動動作、屈曲動作(2自由度)ならびに先端の回転動作が可能である。本提案では、さらに「本機構の小型化」と「本機構を多段に配置することによる多自由度化」を実施する。また、人間工学のデータを参考にし、各リンク部の長さの比率を人間の手の各部分(上腕、前腕、手)に合わせた。さらに、各動作の可動範囲が(内視鏡から見て)人間の手の可動範囲と同等以上になるように設計した。

### ②認知科学を用いたスレイブロボットの評価・改良

H23年度に完成させた術具マニピュレータ

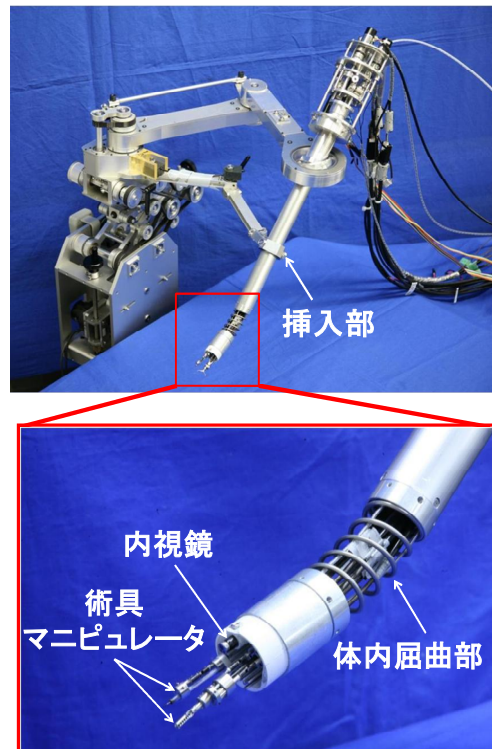


図1 試作プロトタイプ

を視点操作マニピュレータに統合し、スレイブロボットを完成させた。統合時には、仮想空間上に構築したスレイブシミュレータを用いた試験を実施しながら、内視鏡と術具マニピュレータの位置関係を決定した(図2)。すなわち、スレイブシミュレータの内視鏡画像での術具位置・角度を変化させながら、医師による直感性の評価を行い、その評価値が高く、機構上実現可能なものを最適設計として採用した。この際、スレイブロボットを定量的に評価するため、脳計測装置(NIRS等)を用いた脳内活動計測を行った。ヒトの“慣れ”や“直感性”との相関性が高いことが示唆されている、脳の頭頂間溝(IPS)の活動を計測することで、スレイブロボットの操作性を評価した。

### (2) Brain-Machine Interface (BMI)とマスタロボットが混在する操作システムを開発

#### ① マスタロボットの開発

双腕術具マニピュレータおよび視点変更の双方を、直観的かつ持ち替えることなく操作することが可能な、一体型のマスタロボットを開発した。本操作系の特徴として、(a)2本のハプティックインターフェイスで構成される、(b)両操作レバーはモータにより剛柔を制御でき、操作レバーにかかる力を測定可能、(c)フットスイッチや手元についたスイッチにより視点操作と術具操作を切り替えられる、という構成である。

術具マニピュレータの操作は、両操作レバーとも剛性を柔らかく設定し、医師が抵抗を

感じることなくレバーを操作できるモードである。両方のレバーの先端位置とロボットアームの先端位置をコンピュータ制御により一致させた。

視点変更マニピュレータの操作は、両操作レバーとも剛性を硬く設定し、医師が力を加えても操作レバーの位置が変わらない構成である。両方のレバーに加わった力の値の組合せにより、視点の動き方およびその変位を操作した。

## ② BMIを有する操作システムの開発

現在車いすの制御等で研究が進んでおり、脳活動計測を規範とした情報処理技術を利用して、考えるだけで視点を操作するBMIを有する操作系が開発されている。術具マニピュレータの操作には、申請者らが先行研究において開発済みのマスタロボットを利用する。本研究においては、BMIにおける意図推定アルゴリズムを用いることで、直感的なSILSロボットの操作を目指す。

直感的な操作が可能なBMIにおける意図推定アルゴリズムを開発するためには、操作者の直感的な操作性を定量的に評価する必要がある。人間の感覚が脳内における神経細胞間のネットワークによって生成されることから、本研究では操作者の脳活動を計測することで直感的な操作性を定量的に示す手法を構築した。

## (3) 医師が直感的に操作可能な手術支援ロボットの要求仕様の導出

早大・九州大学病院の倫理規定をクリアし、九州大学病院にて動物臨床を実施し、SILS支援ロボットシステムの有効性を確認した。実験と機器改良を繰り返すことにより、操作性の向上に必要な要求仕様を明確にした。これらの要求仕様をもとに、さらに複雑な患部へのアプローチが必要なNOTES支援ロボットシステムの開発に取り組んだ。具体的には、「開発したSILS支援ロボットの各要素の細径化」、「外套管部分の多自由度化」を実施した。

## 4. 研究成果

本研究成果として、(1) 人間工学と認知科学に基づいた術具マニピュレータを設計、(2) Brain-Machine Interface (BMI)とマスタロボットが混在する操作システムを開発、(3) 医師が直感的に操作可能な手術支援ロボットの要求仕様の導出の三つの技術課題を解決した。

### (1) 人間工学と認知科学に基づいた術具マニピュレータを設計

SILS支援用ロボットのプロトタイプに関して医師から要求仕様の洗い出しを基に改良した。プロトタイプの手術支援ロボットは

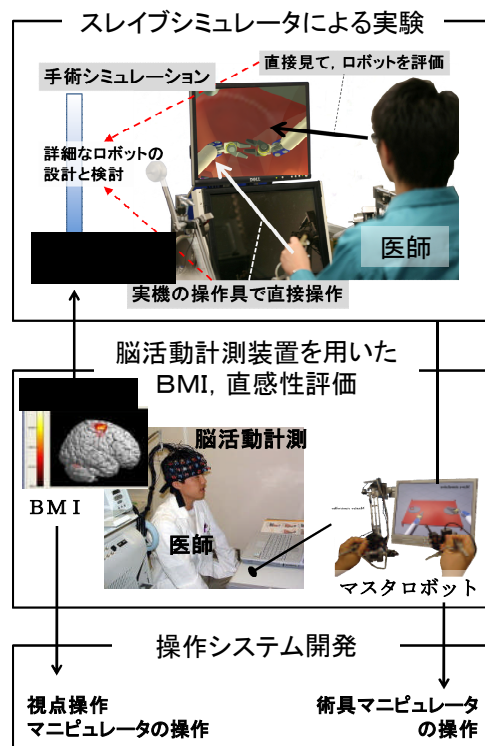


図2 BMI・認知科学との融合

内視鏡とスレイブの位置関係を意味するhand-eye coordinationが不良であるため、操作が困難であることがわかった。新たなスレイブロボットでは、良好なhand-eye coordinationが得られるような設計に改良した。プロトタイプと比べ、内視鏡の位置を立体的に変化できる機構を用いて設計したため、医師はより直感的な操作が可能となる。

### (2) Brain-Machine Interface (BMI)とマスタロボットが混在する操作システムを開発

手術支援ロボット操作者の脳活動を計測し、直感的な操作性を定量化することで、脳内における脳内におけるhand-eye coordinationと直感的な操作性との関係性をモデル化し、最適なhand-eye coordinationの導出を行った。実験では、仮想空間にてロボット手術を実施している操作者の脳内血中酸化ヘモグロビン濃度を、脳活動計測装置光トポグラフィを用いて計測し、直感的な操作性を定量化した。実験の結果、操作者にとって最も直感的に操作可能であるhand-eye coordinationにおいて、脳内血中酸化ヘモグロビン濃度は有意に上昇した。

### (3) 医師が直感的に操作可能な手術支援ロボットの要求仕様の導出

改良した単孔式手術支援ロボットを用いて、九州大学病院にて豚試験片を用いたin vivo実験を行い、医師から高い評価を受けた。

上記 (1), (2), (3) から, 直感的な操作が可能な単孔式手術支援ロボットの開発, 脳活動計測による直感的な操作性の定量化, 医師による臨床評価試験を行った. 今後は脳活動計測を用いて意図推定システムの構築を行い, ブレイン・マシン・インターフェースを用いた単孔式手術支援ロボットの操作手法の確立を目指す.

#### 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 2 件)

- (1) Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo, Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Clarify Immersive Reality”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25, No. 1, 162-171, 2013, 査読有
- (2) Yuta Sekiguchi, Yo Kobayashi, Yu Tomono, Hiroki Watanabe, Kazutaka Toyoda, Kozo Konishi, Morimasa Tomikawa, Satoshi Ieiri, Kazuo Tanoue, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie, “Development of a Tool Manipulator Driven by a Flexible Shaft for Single Port Endoscopic Surgery”, Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), Vol.23, 1115-1124, 2011, 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ① Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Brain Activity Measurement to Evaluate Hand-Eye Coordination for Slave and Endoscope in a Surgical Robot”, in Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’13), 4341-4347, Kongresszentrum, Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013, 査読有
- ② Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Configuration of Slave and Endoscope in Surgical Robot based on Brain Activity Measurement”, in Proceeding of The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS 2012), 1195-1200, Kobe, Nov.20-24, 2012, 査読有.

- ③ Takehiko Noguchi, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Hiroki Watanabe, Yu Tomono, Yuta Sekiguchi, Hiroki Seno, Masakatsu G. Fujie, “Application of Control Modes of a Master Manipulator for a Robotic System to Assist with Single Port Endoscopic Surgery”, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, Oct. 7-12, 2012, 査読有
- ④ Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Determine Immersive Reality”, in Proceeding of the 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC’12), 337-343, San Diego, USA, Aug.28-Sep.1 2012, 査読有
- ⑤ Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Masatoshi Seki, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Identify Hand-Eye Coordination”, in Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’12), 4546-4552, St. Paul, MN, USA, May 14-18, 2012, 査読有
- ⑥ 三浦智, 小林洋, 川村和也, 中島康貴, 関雅俊, 野口建彦, 粕谷昌宏, 横尾勇樹, 藤江正克, “脳活動計測に基づいた手術支援ロボットの直感的な操作性評価”, 日本機械学会 2012年度年次大会, J165033, 金沢大学 角間キャンパス, 金沢, Sep. 9-12, 2012年, 査読無
- ⑦ 小林洋, 関口雄太, 野口建彦, 高橋悠, 豊田和孝, 植村宗則, 家入里志, 富川盛雅, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克, “単孔式手術の支援を目的とした術具マニピュレータの開発”, 第21回日本コンピュータ外科学会, 徳島, Nov. 2-3, 2012, 査読無
- ⑧ Yuta Sekiguchi, Yo Kobayashi, Hiroki Watanabe, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie, “In Vivo Experiments of a Surgical Robot with Vision Field Control for Single Port Endoscopic Surgery”, Proceeding of the 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC’11), Boston, USA, Sep. 3, 2011, 査読無

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤江正克 (Masakatsu G. Fujie)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号：20339716

### (2) 研究分担者

小林洋 (Yo Kobayashi)  
早稲田大学・理工学術院・准教授  
研究者番号：50424817

渡辺広樹 (Hiroki Watanabe)  
早稲田大学・理工学術院・助手  
研究者番号：00609266

橋爪誠 (Makoto Hashizume)  
九州大学・医学系研究科・教授  
研究者番号：90198664