

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330312

研究課題名(和文) 単孔式腹腔鏡下手術に対する安全手術支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a safe surgical support system for single port surgery

研究代表者

石井 千春 (ISHII, Chiharu)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：80296079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、腹腔鏡下手術における手術系の結紮操作に対して、安全に操作を行える支援システムを構築した。結紮操作に対する術者の鉗子操作力をモニターに提示し、目標値と比較することにより術者が適切な力の掛け具合を認識できる。加えて、結紮操作中の急な鉗子操作(突発動作)、及び肩の力みを検出した際に、聴覚提示により術者に警告を行う。また、提案した安全手術支援システムをロボット手術に適用する際の単孔式腹腔鏡下手術支援ロボットも製作した。さらに、脳波を利用する基礎研究として、市販の生体信号収集ヘッドセットを使用して、安静状態と意識集中状態の識別を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, a safe surgical support system for laparoscopic surgery was built for ligation operation in laparoscopy. The value of operation forces added to the forceps under ligation operation is displayed on the monitoring screen. By comparing with the desired value determined beforehand, surgeons can recognize appropriate operation forces in ligation operation. In addition, when sudden forceps operation or straining of the shoulder is detected under ligation operation, surgeons are warned acoustically by a sound. Moreover, in order to apply the proposed safe surgical support system to a robotic surgery, surgical robot for single-port-surgery was also developed. Furthermore, as a fundamental study on electroencephalogram, identification of a relaxed state and a consciousness concentration state was performed using a commercially available bio-signal collection headset.

研究分野：制御工学、ロボット工学

キーワード：感覚行動システム 安全手術支援システム 単孔式腹腔鏡下手術 表面筋電位

1. 研究開始当初の背景

近年、低侵襲手術の発展に伴い単孔式腹腔鏡下手術（以降、SPS と記す）と呼ばれる、術具を腹部の1箇所切開孔から挿入して手術を行う方法が導入されている。しかしながら、単孔式腹腔鏡下手術は高度な技術と熟練した手術手技を必要とし、困難な手術方法である。そのため、SPS を安全に施行するためには、SPS における最適な手術方法の確立と、手術時に医療ミス防止する、インテリジェント手術支援システムの構築が不可欠となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、手術中の医師の表面筋電位と脳波の測定に基づき、手術手技の自動識別を行い、特に医療ミスに繋がりやすい手術手技に対して、通常の操作と異なる操作を検知し、これを医師に提示することにより、単孔式腹腔鏡下手術における医療ミス防止する、安全手術支援システムを構築することである。

3. 研究の方法

(1) 安全手術支援システムの構築

腹腔鏡下手術の手技の中でも基本的な手技である手術糸の結紮操作に対して、安全に操作を行える支援システムを構築する。具体的には、結紮操作を10種類の動作に分類し、鉗子の操作量から動作を自動識別し、最も医療ミスに繋がり易い動作である糸結び動作に対して、予め取得した熟練医による鉗子操作力を目標値として提示し、術者が自身の鉗子操作力と比較することにより適切な力の掛け具合を支援する。鉗子操作力としては、把持力と鉗子軸先端にかかる力を考慮する。

また、結紮操作中にスピーカーよりBGMを流し、急な鉗子操作（突発動作）、および肩の力みを検出した際に、BGMにそれぞれアラーム音、ノイズを挿入し、聴覚提示により術者に警告する。

(2) 単孔式腹腔鏡下手術支援ロボット

提案した安全手術支援システムをロボット手術に適用する際のSPS支援ロボットを製作する。

(3) 脳波の識別

安全手術支援システムに脳波を利用するための基礎研究として、市販の生体信号収集ヘッドセット Emotiv EPOC を使用して測定した脳波から特徴量を定め、サポートベクトルマシン（以降、SVM と記す）により安静状態と意識集中状態を識別することを試みる。

4. 研究成果

(1) 安全手術支援システムの構築

図1に示すシミュレーターを製作した。手術操作には鉗子を用い、右手で把持鉗子、左手では剥離鉗子进行操作する。各鉗子は位置のセンシングが可能なデバイス PHANTOM Omni に接続され、鉗子の操作量を測定できるようになっている。また、鉗子のハンドル部と軸に、図2に示すようにひずみゲージを貼り付けて、把持力と鉗子軸先端にかかる力を測定する。

腹腔鏡に見立てて設置したウェブカメラの映像をモニターに提示し、ボックス内に置かれた飴ゴムに対して、縫合糸を用いて結紮操作を行う。

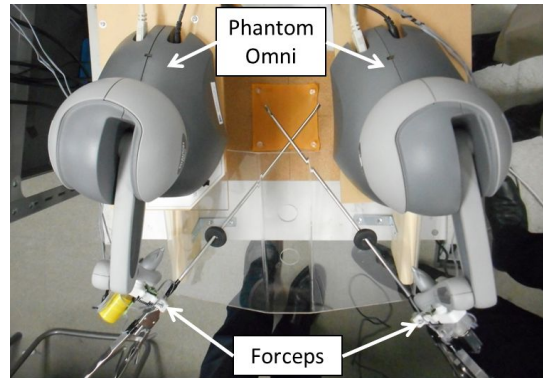


図1 安全手術支援システムシミュレーター

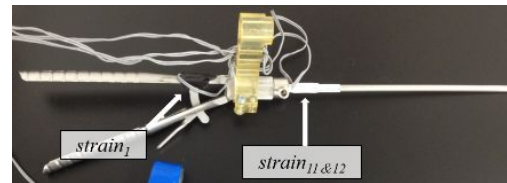


図2 ひずみゲージ貼り付け位置

本研究では、結紮操作を以下の10種類の動作に分類した。ひずみゲージと PHANTOM Omni により測定した各情報から、10種類のうちの1つの動作に自動識別する。解析には数値解析ソフトウェア MATLAB/Simulink を用いた。

- 把持(右)：右鉗子で糸を持つ動作
- 巻き付け(左軸)：右鉗子で持った糸を左鉗子軸に巻きつける動作
- 移動(左)：巻き付け後、左鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- 両手把持：両鉗子とも糸を持つ動作
- 糸結び開始：糸を持った両鉗子を左右に引っ張り始める動作
- 糸結び引張：糸を引っ張り、糸結び目をつくる動作
- 把持(左)：左鉗子で糸を持つ動作
- 巻き付け(右軸)：左鉗子で持った糸を右鉗子軸に巻きつける動作
- 移動(右)：巻き付け後、右鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- 中立：動作を行っていない状態

結紮操作は a b c d e f または g h i d e f の順番で行われる。また、e および f の状態が糸結び動作である。

ひずみゲージにより測定した鉗子操作力、PHANTOM Omni により測定した鉗子の操作速度を特徴量とし、各特徴量に対して閾値を設け、閾値の大小関係の組み合わせによって動作を識別する。

鉗子操作力として、把持力と鉗子軸先端にかかる力を提示する。左右の鉗子のハンドル部に貼り付けられたひずみゲージの測定値により、各鉗子の把持力が得られる。また、右鉗子の軸上部と右側部、左鉗子の軸上部と左側部に貼り付けたひずみゲージの測定値により、鉗子軸先端にかかる力を算出する。

事前に熟練医による結紮操作と糸結び動作の手技における鉗子操作力（把持力、鉗子軸先端力）のデータを取得し、これらのデータを下に、糸結び動作と糸結び動作以外の動作に分けて、鉗子操作力の目標値の範囲を設定した。

急な鉗子操作は、縫合糸に負荷をかけ、縫合糸を傷つける恐れや、鉗子を臓器等にぶつける可能性があり、危険な動作である。各鉗子に取り付けた PHANTOM Omni により得られる速度情報を鉗子の操作速度とし、操作速度を糸結び動作時と糸結び動作以外の動作時に分けて取得する。

糸結び動作時に対しては、熟練医によって行われた突発的な糸結び動作の操作速度データから、糸結び動作以外の動作時に対しては、非医療従事者である被験者が事前に行った突発動作の操作速度データから、それぞれ突発動作の操作速度閾値を設定した。結紮操作中、鉗子の操作速度が閾値以上になれば突発動作と識別される。

力みが生じると手術操作が固くなり、ミスを起こしやすい状態になる。また、長時間の手術で力んだ状態が続くと疲労に繋がり、集中力の低下が懸念される。本研究では、手術手技中に過剰な力が入りやすい肩に注目する。肩に力が入ったときに最も特徴を示し、且つ、手術手技中の腕の動きによる筋の活動に影響しない箇所を試行錯誤的に探し、操作者の背中の菱形筋を選定した。左右の菱形筋に電極を貼り付けて、2ch 分の表面筋電位（SEMG）を測定する。図3に表面電極の貼り付け位置を示す。

SEMG 信号を積分し、積分筋電図（IEMG）とし、筋の活動量をみる。手術手技前に最大限に肩を力むことで、菱形筋の最大随意収縮時の積分筋電図を取得し、この 30% の値を閾値とする。手術手技時の IEMG を各閾値と比較することで肩の力みを検出する。

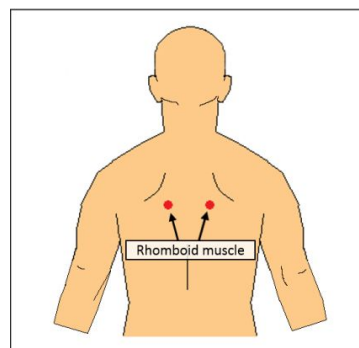


図3 表面電極貼り付け位置

提示システムとして、図4に示すように、ウェブカメラの映像を映し出すモニターに鉗子操作力をリアルタイムで提示する。操作者が結紮操作を実施する際に、自動で動作識別も行い、各動作における操作者の鉗子操作力を提示すると共に、糸結び動作と糸結び動作以外のそれぞれに対応する熟練医による目標値枠も提示し、熟練医の操作力との比較を容易にする。

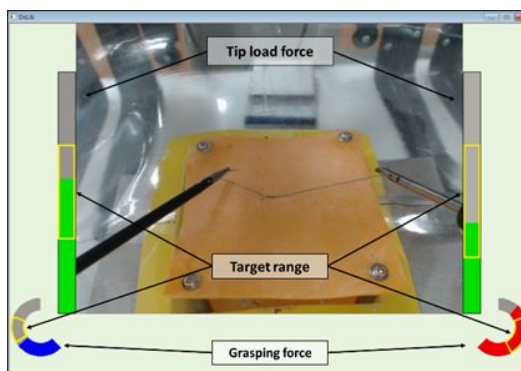


図4 提示システム

モニター上の操作映像の左右に配置した 2 つの縦長のバーには、それぞれ左右の鉗子軸先端にかかる力を表示し、下部に配置した円ゲージには、左右の鉗子の把持力を表示する。それぞれ、操作者の現在の鉗子操作力をメーターの伸びにより表現する。熟練医による目標値の範囲をバー、円ゲージ上の黄色の枠により表示し、動作識別の結果に基づき、糸結び動作と糸結び動作以外のそれぞれに対して、メインウィンドウの背景色と熟練医による目標値の範囲を切り替える。現在の操作者の鉗子操作力が目標値以下である場合には青色、目標値内ならば緑色、目標値以上の場合には赤色と、メーターに色の変化を加えて直感的に適切な鉗子操作力を把握出来るようにした。

突発動作、肩の力みの提示は、スピーカーより BGM を流し、突発動作、力みが検出されたときに、BGM にそれぞれアラーム音、ノイズを挿入し、聴覚提示する。

腹腔鏡下手術の熟練医 2 名と研修医 6 名を被験者として、鉗子操作力比較実験を行った。図 1 の実験装置を用いて、飴ゴムに対してウェブカメラのみの映像下で結紮操作を 3 回ずつ行い、そのときの鉗子操作力を取得した。系結び時の鉗子操作力が目標値内であれば成功（安全）とし、熟練医と研修医の成功率を比較し、熟練医と研修医の鉗子操作力の違いを検討した。

実験結果として、熟練医の成功率は平均 91.7% となり、研修医の成功率の平均 58.8% に比べて高い値が得られた。操作映像では、一見同じ結紮操作に見えても、熟練医と研修医では鉗子操作力に差があることが確認された。

(2) 単孔式腹腔鏡下手術支援ロボット

提案した安全手術支援システムをロボット手術に適用する際の SPS 支援ロボットを製作した。

SPS 支援ロボットは、医師が操作する鉗子の代わりとなる鉗子マニピュレータと、その保持及び移動を行うロボットアームによって構成され、腹腔鏡は手術の際に助手が手動で操作することを想定している。開発を行った SPS 支援ロボットの仕様を以下に挙げる。

a) 鉗子配置

切開孔の拡大を防ぐため、体表面に開ける挿入孔に動作固定点(RCM)をもつ。また、手術器具のローテーション配置が可能であり、互いのロボットアームが接触することなく、動作を行える。

b) ロボットアーム

ロボットアームは、鉗子マニピュレータの水平方向、上下方向、奥行き方向移動の 3 自由度の動作が行える。また、各方向の動作範囲は、SPS において手術例が多い、胆嚢摘出手術を行うために必要と考えられる動作領域を確保している。

c) 鉗子マニピュレータ

鉗子マニピュレータは、市販の SPS 用の鉗子と同様の動作が行えるように、鉗子先端の回転、把持開閉、及び上下左右方向への屈曲が行える。

設計したロボットアームと鉗子マニピュレータ 2 台を製作し、組み立てた SPS 支援ロボット全体の外観図を図 5 に示す。組み立てた状態でのロボットは幅約 600mm、奥行き約 700mm、高さ約 400mm であり、総重量は約 18kg である。

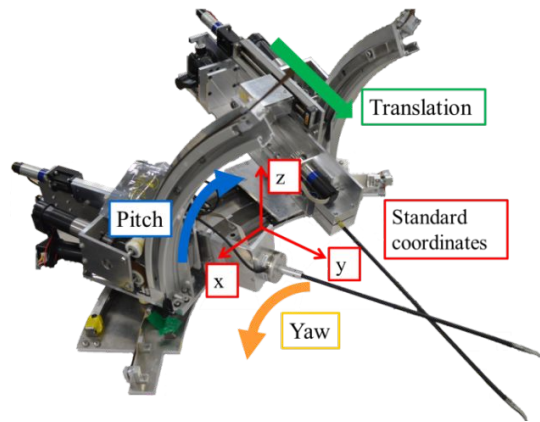


図 5 単孔式腹腔鏡下手術支援ロボット外観

SPS 支援ロボットの遠隔操作には、Force Dimension 社製の力覚付き入力装置 Omega.7 をマスタデバイスとして用いた。Omega.7 は平行 3 軸と回転 4 軸の自由度を持つ力覚付入力装置である。図 6 に Omega.7 と各自由度を示す。

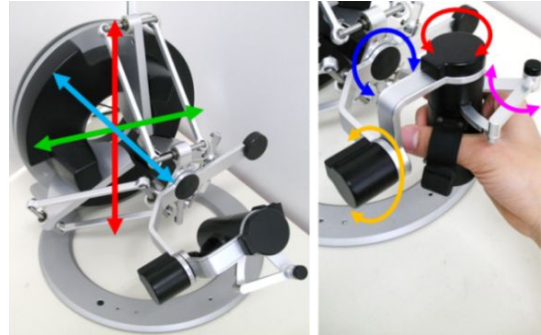


図 6 力覚付き入力装置 Omega.7

開発した SPS 支援ロボットを対象とし、逆運動学解析を用いて、Omega.7 の操作方向に鉗子先端の位置を追従させるマスタスレイブ制御を行う。SPS においては、鉗子の操作部とモニターを通して見る先端の左右が逆転する。したがって、マスタスレイブによる制御では、SPS 支援ロボットと入力装置の左右を置き換えることで逆転問題を解決する。例えば、左側に設置されたロボットアーム及び鉗子マニピュレータは、右手側に配置された Omega.7 によって操作される。鉗子先端の位置追従制御には、PI コントローラを使用した。

SPS 支援ロボット制御系の有効性を検証するため、SPS 支援ロボットの動作実験を行った。

a) 第 1 実験

直径 20mm の円軌道を水平面内に設定し、5s で鉗子マニピュレータ先端を追従させた。SPS 支援ロボットは、計測を行う平面に対し一定角を維持したまま追従動作を行わせた。先端位置の推移はカメラ撮影により記録し

た。実験結果を図7に示す。結果より、概ね目標軌道に追従していることがわかる。しかし、水平面で最大 0.9mm、垂直面で最大 1.2mm の追従誤差が生じた。

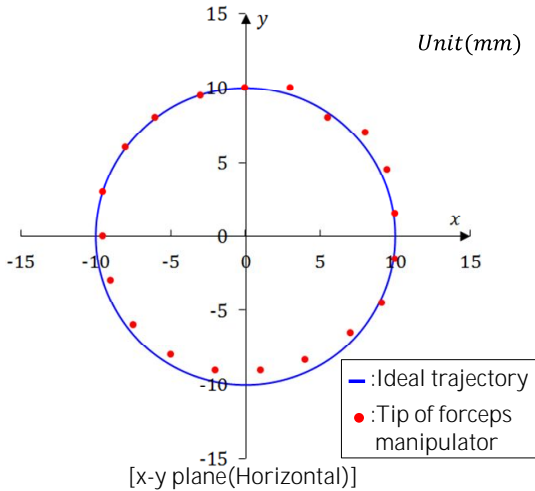


図7 第1実験の結果

b) 第2実験

Omega.7 を用いて目標位置を入力し、Omega.7 の操作に鉗子マニピュレータ先端を追従させた。実験結果として、主観的ではあるが、Omega.7 の操作方向に鉗子先端が追従することが目視により確認でき、操作者が直観的に手術支援用ロボットを操作することができた。

(3) 脳波の識別

脳波解析の基礎研究として、Emotiv 社製の生体信号収集ヘッドセット EPOC を使用して、安静状態と意識集中状態の識別を試みた。

識別には、脳の視覚機能をつかさどる部位である頭頂葉から後頭葉における図8に示す4つの電極(P7, O1, O2, P8)を使用して脳波を測定した。

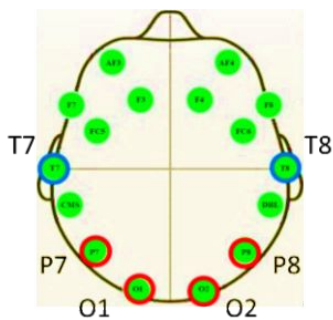


図8 脳波の測定位置

各電極で測定された脳波をそれぞれ短時間フーリエ変換によって周波数解析し、28~42 Hz の周波数スペクトルの総和を特徴量 $X_i = \{X_{P7}, X_{O1}, X_{O2}, X_{P8}\}$ とした。識別には、2ク

ラスの識別器であるサポートベクターマシン(SVM)を用いた。図9に示すように、SVMは事前に用意した2つのクラス(意識集中と安静)における教師データによって、各クラスとの距離(マージン)を最大化するように分離超平面式を導出し、未分類のデータの識別を行う手法である。

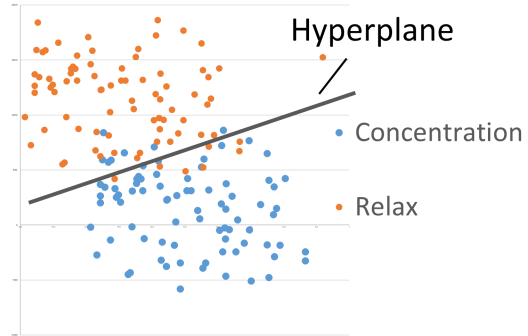


図9 SVMによる脳波の識別

健常な21から22歳の男性4人の被験者に対して、意識集中と安静を識別する実験を行った。各被験者は事前にEPOC付属のソフトウェアControl panelを用いて意識集中及び安静を実現するトレーニングを20分間行い、EPOCに慣れてから、被験者毎にSVMの学習を行った。このソフトウェアは、使用者の意識集中の強さに応じて、図10に示すように、画面上の物体を奥に動かすことができるものである。



図10 Control panelを用いたトレーニング

被験者は安静状態から実験を開始し、10 sec後に鳴る効果音の直後に、意識集中に移行する。各被験者8回ずつ計32回、静かな環境下で識別実験を行った。実験終了後、識別にかかった時間を「識別時間(Time1)」とし、「識別時間が3.0 sec以内での識別率」を検証した。識別実験の結果を表1に示す。

表1 脳波の識別実験結果

	0~1.5 sec [%]	0~2.0 sec [%]	0~3.0 sec [%]	Time1 [sec]
A	37.5	75.0	87.5	1.95
B	12.5	100	100	1.68
C	25.0	75.0	87.5	1.99
D	12.5	87.5	100	1.75
Ave.	21.9	84.4	93.8	1.84

識別時間は、4人の平均で1.84 secとなり、3.0 sec以内での識別率は、4人の平均で93.8%であった。これより、安静状態と意識集中状態を識別することができたといえる。

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16件)

S. Maeda, K. Oiwa and C. Ishii, Scaling Method for Force Feedback of Forceps Manipulator Based on Beam Theory, International Journal of Pharma Medicine and Biological Science, 査読有, Vol.5, No.1, 2016, pp.23-30.

K. Oiwa, S. Maeda and C. Ishii, Maneuverability Evaluation of a Surgical Robot for Single-Port Surgery, International Journal of Pharma Medicine and Biological Science, 査読有, Vol.5, No.1, 2016, pp.38-43.

C. Ishii and G. Komada, Improvement of an Algorithm for Estimation of Reaction Torque and Compensation for Elongation of Wire for Wire-actuated Robotic Forceps, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 査読有, Vol.3, No.2, 2015, pp.69-73.

C. Ishii, T. Sato, K. Murano, H. Kawamura, Automatic Identification for Laparoscopic Surgical Procedure for Ligation and Online Distinction of Abnormal Manipulation for Thread Knotting, International Journal of Clinical Medicine, 査読有, Vol.6, No.1, 2015, pp.887-898.

[学会発表](計39件)

小林竜也, 村野海斗, 石井千春, 川村秀樹, 鉗子操作力を提示する腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発, 日本機械学会 2015年度年次大会, 2015年9月13日~16日, 北海道大学工学部(北海道札幌市)

村野海斗, 小林竜也, 石井千春, 川村秀樹, 左右の鉗子のコーディネーションを評価する腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発, 日本機械学会 2015年度年次大会, 2015年9月13日~16日, 北海道大学工学部(北海道札幌市)

C. Ishii, Applications of Robot Technology to Medical and Assistive Devices (Keynote speech), The 1st International Conference on Computer Science and Computational Intelligence, August 24-26, 2015, BINUS UNIVERSITY,

Jakarta, Indonesia.

D. Yamaoka, K. Oiwa, S. Maeda and C. Ishii, Development of a Surgical Robot for Single-Port Surgery and Its Position Tracking Control, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 5-10, 2014, Bali, Indonesia.

Y. Tsukamoto and C. Ishii, Estimation of the Grasping Torque of Robotic Forceps Using the Robust Reaction Torque Observer, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 5-10, 2014, Bali, Indonesia.

C. Ishii, Robotic forceps manipulator for laparoscopic surgery (Keynote speech), 2014 2nd International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, February 13-14, 2014, The Cityview, Hong Kong, China.

[図書](計1件)

石井千春, 汐月哲夫, 星野貴弘, 基本からわかるシステム制御講義ノート, オーム社, 2014, pp.59-114.

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 医療用ロボット

発明者: 石井千春, 山岡大祐

権利者: 学校法人法政大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-209230 号

出願年月日: 平成 26 年 10 月 10 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://mwrlab.ws.hosei.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石井 千春 (ISHII, Chiharu)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号: 80296079

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし