

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20日現在

機関番号：32675

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650100

研究課題名（和文）表面筋電位と脳波による特異動作の検知とその医療ミス防止対策への適用

研究課題名（英文）Detection of abnormal operations during surgery via SEMG / EEG and its applications to prevention of malpractice

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、内視鏡手術の手技の中でも難易度が高い手術糸の結紮操作を7つの手技に分類し、鉗子の操作量から手術手技を自動識別し、識別された糸結び手技に対して、術者の表面筋電位(SEMG)に基づき、自己組織化マップを用いて通常とは異なる特異操作の判別を行い、特異操作時に術者に警告するシステムを構築した。また、術者の脳波(EEG)を測定することにより、医療ミスや患者の容態急変時の感情の変化や医師の心情状態の特異性を検出することを目的に、基礎実験として、脳波による(1)驚き感情の検出、(2)精神的疲労の観測を試みた。

研究成果の概要（英文）：In this research, an automatic identification of a surgical operation in endoscopic surgery and distinction of the abnormality of the identified surgical operation were executed. Surgical operation of ligation was divided into seven operations, and on the basis of the threshold criteria for the amount of operations of forceps, a surgical operation was identified as one of them. Next, when the surgical operation was identified as a thread knotting, the operation of thread knotting was classified as either normal or abnormal using a self-organizing map based on operator's surface electromyogram:SEMG. Finally, a warning system to prevent malpractice by presenting detection of the abnormal operation to surgeon was constructed. In addition, detection of (1)surprise feeling and (2)mental fatigue via electroencephalogram:EEG was tried as a basic experiment for the purpose of detecting change of feeling of a doctor at the time of sudden condition change of a patient and detecting abnormality of a doctor's feelings during the long time surgical operation.

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	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：制御工学、ロボット工学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：感覚行動システム、医療ミス防止システム、表面筋電位、脳波

1. 研究開始当初の背景

近年、外科手術において内視鏡手術が普及し、そのための手術支援ロボットも実用化されつつある。しかし、内視鏡手術は通常の開腹手術に比べて難易度が高く、医療事故の発生率が高い。そこで、ヒューマン・エラーやテクノロジー・エラーを低減させるための複数

の対策による多面的な安全性を確保することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、医師の表面筋電位と脳波を測定することにより、治療動作中における医師の通常とは異なる特異な動作を検知し、内視鏡

手術における医療ミス防止する多重安全支援システムを構築し、内視鏡手術に対する安全性を向上させることが目的である。なお、表面筋電位と脳波は解析するサンプリング周波数が大きく異なるため、同じ特徴ベクトルに含めて特異動作判別を行うのではなく、個別に解析を行った。

3. 研究の方法

(1) 表面筋電位に関して

内視鏡手術の手技の中でも難易度が高い手術糸の結紮操作を7つの手技に分類し、鉗子の操作量から手術手技を自動識別し、識別された糸結び手技に対して、術者の表面筋電位に基づき、自己組織化マップを用いて通常とは異なる特異操作の判別を行い、特異操作時に術者に警告するシステムを構築した。

(2) 脳波に関して

① 脳波の周波数解析：脳波を高速フーリエ変換し、スペクトルの変化から被験者の興奮度やストレスの原因などを特定することを試みた。本研究では、特に変化が現れやすい α 波と β 波に注目した。

② 事象関連電位(ERP)：事象関連電位(ERP)は、人間が内的・外的刺激を受けた際の認知や思考の結果として、刺激後数百ミリ秒程度後に脳が反応する電気的生理反応のことである。本研究では特に人間が失敗(エラー)を起こした際に観測されるエラー関連陰性電位(ERN)に着目し、手術における医療ミスという重要性の高いエラーに対して、脳波の計測により医療ミス発生時のERNの検出を試みた。

4. 研究成果

(1) 表面筋電位に関して

① 本研究では、図1に示すシミュレーターを製作し、右手用の持針器と左手用の補助鉗子(剥離鉗子)の2本の鉗子を用いて手術手技を行った。持針器及び補助鉗子にはひずみゲージが貼りつけられ、4軸の力センシングを行える。また、各鉗子はそれぞれ6次元の位置のセンシングと3次元の力覚制御が行える力覚装置 Phantom omni と接続されており、これにより鉗子の操作量を計測できる。手術の対象物は臓器に見立てた厚さ1mmの飴ゴムとし、ナイロン製縫合糸を用いて対象物に糸を通し、縫合糸を結紮する操作を行った。また、内視鏡映像を提示するために、シミュレーター中央にデジタルビデオカメラを設置し、コンピュータに取り込むことで、モニターに提示した。

動作識別及び特異操作判別を行うため、左右の鉗子のハンドル部に1カ所ずつと右手持針器のシャフト付け根の上部と右側部の計4カ所に貼り付けたひずみゲージのひずみ量と、

鉗子に接続した Phantom omni の先端部の位置座標の変化から算出した速度、及び先端部の回転角度を測定した。

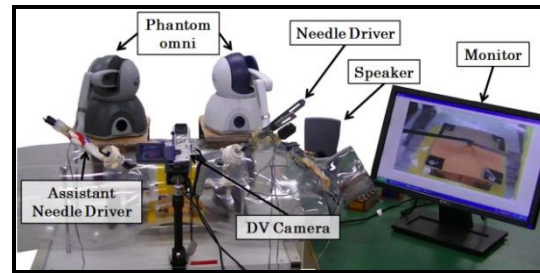


図1 内視鏡下手術用シミュレーター

動作時に最も特徴を示す筋肉を試行錯誤的に探し、その結果、操作者の前腕部の橈側手根屈筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋の3つの筋肉を選定し、各腕に3ch ずつの電極を貼り付けて SEMG を測定した。

SEMG を信号処理して特徴量を算出した。特徴量は、通常操作及び特異操作で特徴が出る絶対平均値、波形の重心値、及びパワースペクトルを用いて定義した。

② 結紮操作における手術手技を左右の腕の動作を組み合わせ、以下の7種類の動作に分類した。

- a. 把持(左)：左鉗子で糸を持つ動作
- b. 巻付け(左)+移動：左鉗子で持った糸を右鉗子の軸部分に巻付け、右鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- c. 両手把持：巻付け後、両方の鉗子が糸をつかむ動作
- d. 糸結び：糸を引っ張り結ぶ動作
- e. 把持(右)：右鉗子で糸を持つ動作
- f. 巻付け(右)+移動：右鉗子で持った糸を左鉗子の軸部分に巻付け、左鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- g. 中立：動作を行っていない状態

一般的に結紮操作を行う時には、左右の動作を交互に行い2度糸を結ぶ。よって、結紮操作は a→b→c→d あるいは e→f→c→d の順番で動作が行われる。

手術手技の識別方法は、ひずみ量と鉗子速度の特徴量から新たな状態量を定義し、それぞれに対して設けた閾値とを比較して手技の自動識別を行った。

③ 手術手技の識別で糸結び手技と識別された時に特異操作判別を行った。本研究では、結紮動作時に起こると考えられる特異操作を非熟練者に現われがちな傾向とし、次のように定義した。

- a) 通常操作(Normal)：操作しやすい姿勢で行う自然な操作
- b) 特異操作：以下に示す特異状態で行う異常操作

- ・姿勢 (Posture) : 肘を張り、鉗子を傾けた状態での操作
- ・握り (Grasp) : 鉗子を強く握りすぎた状態での操作
- ・引張 (Pull) : 糸を強く引っ張る操作
- ・突発 (Sudden) : 急な鉗子運びや荒い操作
- ・力み (Straining) : 腕に力が入りすぎた状態での操作

特に特異操作の引張および突発は縫合部に強い負担をかける可能性があるため、他の特異操作に比べて危険度の高い操作として定義した。

特異操作判別を行うための特徴量として、SEMG 特徴量及び鉗子操作量の特徴量を用いた。鉗子操作量と SEMG では特徴がやすい特異操作が異なるため、判別する特異操作によって 2 種類の SOM を作成した。SOM1 では鉗子の操作量に基づいて通常操作及び特異操作の姿勢、握り、引張、突発の 5 種類の判別を行い、SOM2 では SEMG に基づいて通常操作及び特異操作の力みの 2 種類の判別を行った。これにより、鉗子操作量と操作者の生体信号の両面から階層処理で二重に特異操作を判別し、精度の高い特異操作判別ができる。SOM は左右の特徴量を用いて別々に作成するため、計 4 種類の SOM を作成した。

④ 手術手技の識別実験では、中立を除く 6 つの動作をそれぞれ 60 回ずつ行い、正しく動作識別されているかを評価した。また、一連の結紮動作を 15 回通して行い、その中でそれぞれの動作を正確に識別できているか検証した。この時、動作の順番は「a→b→c→d」のみとし、「e→f→c→d」の順の動作は今回は省略した。個別に行った動作に対して、(各動作が正しく識別できている回数) / (試行回数) で識別率を算出した。また、一連の動作に対しては、正しい順序で識別された各動作の個別の識別率と動作全体が正しい順序で識別された識別率を算出した。各識別率をまとめたものを表 1 に示す。

表 1 結紮操作における手術手技の識別結果

Motion	Individual		Sequence	
	Count	Rate[%]	Count	Rate[%]
1 Grasping(Left)	60/60	100.0	15/15	100.0
2 Overlapping(Left) +Transration	58/60	96.7	12/15	80.0
3 Grasping(Left & Right)	60/60	100.0	15/15	100.0
4 Knoting	55/60	91.7	15/15	100.0
5 Grasping(Right)	60/60	100.0		
6 Overlapping(Right) +Transration	57/60	95.0		
1→2→3→4 ALL			12/15	80.0

表 1 より、個別の動作識別では全体的に高い識別率が得られているが、糸結び動作の識別率が他の動作に比べて低い。これは左手補助鉗子の軸にはひずみゲージが取り付けられておらず、右手持針器の対応する測定値を代

用しているためである。

特異操作判別実験では、図 1 の実験装置を用いて、各操作状態で糸結び動作を行い、特徴ベクトルをデータとして取得し、SOM のバッチ学習を行った。学習した SOM に、オフラインで取得した各操作状態での糸結び手技における特徴ベクトルを各 60 回分入力し、入力された特徴ベクトルがマップのどの領域に分布するかを視認して特異操作判別の評価を行った。右手鉗子操作量に基づく SOM1 についての実験結果を図 2 に示す。糸結び手技が行われた際、特徴ベクトルの写像は SOM 上に六角形のプロットとして出力され、プロットされた領域を操作の状態と判別した。判別率は、(正しい領域に分布された回数) / (試行回数) で算出した。このときの各操作状態に対する判別率を表 2 に示す。Singular の項目は特異操作における操作状態を区別せずに、特異操作をひとつの操作とみなして判別率を算出したものである。

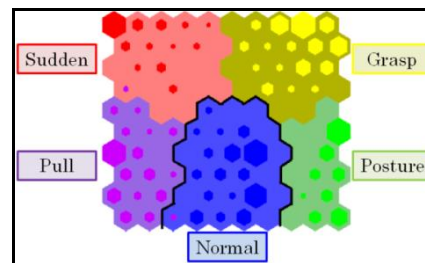


図 2 実験結果 (SOM1 への分布)

表 2 SOM1 における特異操作判別結果

SOM AREA	Operation (Device Right)					
	Normal	Posture	Grasp	Pull	Sudden	Singular
Normal	60	0	0	1	0	1
Posture	0	60	0	0	0	60
Grasp	0	0	60	0	0	60
Pull	0	0	0	58	0	58
Sudden	0	0	0	1	60	61
RATE [%]	100.0	100.0	100.0	96.7	100.0	99.6

他の SOM に対しても算出した判別率を表 3 に示す。

表 3 糸結び手技に対する特異操作判別結果

HAND	SOM	Operation distinction rate [%]						
		Normal	Posture	Grasp	Pull	Sudden	Straining	Singular
R	Device	100.0	100.0	100.0	96.7	100.0		99.6
	SEMG	96.7					91.7	91.7
L	Device	100.0	100.0	100.0	83.3	100.0		97.1
	SEMG	91.7					98.3	98.3

ほとんどの操作の判別率が 90% を超えており、高い精度で判別できているとよい。

⑤ 糸結び動作に対して特異操作を判別し、特異操作時に術者に提示する特異操作提示システムを構築した。特異操作を比較的危険性の低い操作として姿勢、握り、力みの 3 種類に、緊急停止を要する危険性の高い操作として引張、突発の 2 種類に分類した。前者に

対してはモニター下部に設置したボックスの色変更、およびチャイム音で視覚・聴覚的に術者に警告し、後者に対しては視覚・聴覚的警告に加え、Phantom omni の力覚機能により直接操作を停止させる。図3に本システムの概要を示す。本システムでは、糸結び手技と識別された際に、まず危険度の高い特異操作の判別を含む SOM1 による判別を行う。さらに通常操作と判別された時のみ SOM2 により判別を行う。

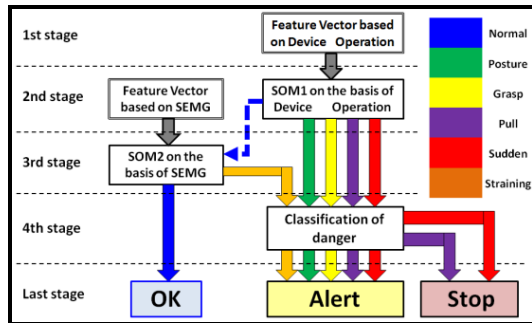


図3 特異操作提示システムの概要

提案した特異操作提示システムを用いて、オンラインで結紮操作を行い、その動作を検証できた。オンラインでの特異操作判別において、特徴量処理の際に発生する0.2秒程度の時間遅れがあるものの、手技を行う際はほとんど気にならない程度のものであった。

(2) 脳波に関して

① 脳波の測定には株式会社デジテックス研究所製の生体信号記録装置 Polymate II を用いた。アクティブ電極に脳波測定用ペーストを塗り、頭皮上に貼り付けた。貼り付け位置は国際10-20法に準拠し、測定の基準電極をA1, A2とし、刺激に対する反応を観測しやすく、首の運動や瞬き等によるノイズの影響を受けにくい個所として、Cz, Fz, 及び興奮度の変化が現れやすい個所としてO1, O2の4点の脳波を測定した。

解析を行う脳波特徴量として、以下の3つを対象とした。

a) 周波数解析

脳波には周波数帯による名称があり、それぞれの周波数帯に特徴があることが知られている。各周波数帯のスペクトルの変化から被験者の興奮度やストレスの原因などを特定することを試みる。本研究では、特に起きている時に変化が現れやすい α , β 波に注目し、解析を行った。

b) α 波ピーク周波数

人が物事に集中している際には、 α 波が顕著に現れる。認知症患者の多くはこのピーク周波数が極端に低くなり、眠い状態に近くなることで認知力が低下していると考えられている。また、疲れにも関連があることが知られており、被験者の精神的疲労を脳波の α 波

ピーク周波数の下がり方により判断する。この現象による認知力の低下により、医療ミスが発生する可能性が高まると考えられるため、本研究では特徴量としてその変化の様子を観測した。

c) 事象関連電位 (Event Related Potential: ERP)

ERPとは、人間が内的・外的刺激を受けた際の認知や思考の結果として、刺激後数百ミリ秒程度後に、脳が反応する電気的生理反応のことである。脳波から計測することが可能であるが、脳波には多くの脳活動状況が同時に現れるため、一般的には刺激時刻に合わせて少なくとも100回以上の加算平均をとる必要がある。本研究では、特に人間が失敗(エラー)を起こした際に観測されるエラー関連陰性電位 (Error-Related Negativity: ERN) に着目した。ERNはエラーを犯した時間で加算平均することで検出できるが、エラーに対する重要度を上げた場合、ERNの特徴が大きくなることが実証されている。そこで、本研究では、特にミスの許されない環境である手術でのエラーに対して、脳波の一度の計測での医療ミス発生時のERNの検出を目指し、脳波を観察した。

本研究では、医療ミスあるいはその予兆の検出を行うため、基礎実験として以下の2種類の実験を行った。実験被験者は22~26歳の4名の健常男性である。

② 驚き感情の検出

手術中にミスをした際の医師の感情として、驚きに近い感情が現れることを仮定して、急激な外的刺激を与えた際の脳波を測定し、反応を観察した。被験者に脳波計を装着し、安静時の脳波を測定している最中に、予告なしに突然被験者の前におもりを落下させ、脳波により刺激に対する反応を検出することを試みた。測定時間は120sとし、90s後に刺激を与えた。大きな音による強い刺激であるため、重要度と同様の効果があれば、特徴の大きなERNが現れると考えられる。また、音は人間のストレスに密接な関係があるため、周波数解析も行い、驚き感情の脳波への影響を観測した。

③ 精神的疲労の観測

精神的に疲労し認知力が落ちた状態を観測するため、被験者に30分程度の知能試験を行ってもらい、その間の脳波を測定した。さらに、テスト終了後に5分間休憩してもらい、試験開始直後及び試験終盤と休憩中の α 波ピーク周波数の比較を行い、全体を通しての脳波の変化による精神的疲労を観測した。

④ 驚き感情の検出実験では、被験者を驚かせるという性質上、驚きによる身体反射が起

きてしまう可能性が大きいいため、筋電位の周波数解析も行うことにより、その影響力を検証した。図4に刺激を与えた瞬間の Cz 電極の周波数スペクトルを示す。被験者 D に関しては、刺激に対してかなり驚いてしまったためか、他の2名に比べて大きなスペクトルの変化が見られる。刺激時には、見た目ではほとんど変化のなかった被験者 B 及び C においても、特に高周波数帯 α 波及び β 波のスペクトル変化が顕著に現れている。

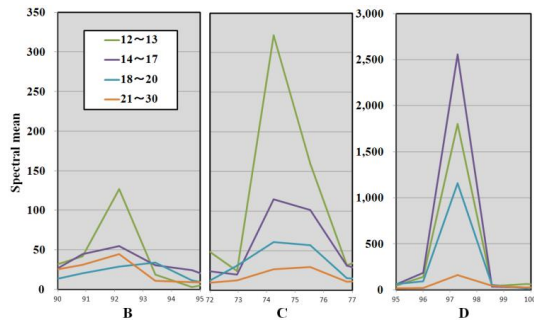


図4 Cz 電極における周波数解析

また、刺激後の脳波形の変化を見ることにより、ERP を検出できているかを観察したが、特徴的な波形が見られたのは被験者 D のみであった。図5に被験者 D の Cz 電極の脳波形を示す。刺激を与えた時刻の約 300ms 後に陽性電位が現れている。したがって、陰性電位である ERN ではなく、陽性電位である P300 に近いものと思われる。P300 は低周波刺激に対する反応を示す ERP の一種であり、意識レベルや集中度を測定するための指標や、BMI への応用にも用いられている。本実験においては、刺激としたおもりの落下音を低周波刺激として捉え、反応したものと考えられる。

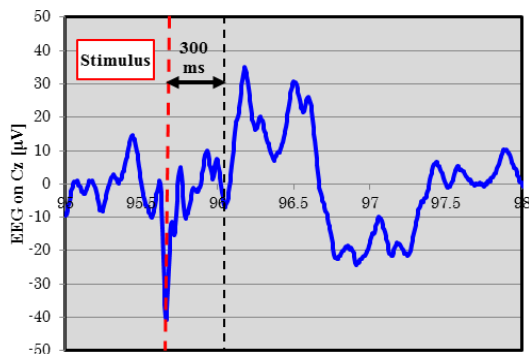


図5 被験者 D の Cz 電極における脳波形

刺激に対する反応には個人差があり、驚かせるとい性質上、同じ被験者に対して一度しか実験できず、正確な検証が困難であった。しかし、脳波の中でも β 波に近い高周波帯に特徴が得られたことから、脳波による驚き感情の検出は可能であると考えられる。しかし、見た目には現れない程度の感情の変化では、一度だけ脳波の計測での ERP の検出は困難であ

ると思われる。また、他の被験者についても被験者 D ほど驚いた場合に ERP が検出可能であるか検証する必要がある。

⑤ 精神的疲労の観測実験では、 α 波ピーク周波数の変化が大きく上下するため、3つの時間帯における 500s の平均周波数を比較し、変化を観察した。図6に被験者 A, B, C の Cz 電極における各時間帯における α 波ピーク周波数の変化の様子を示す。

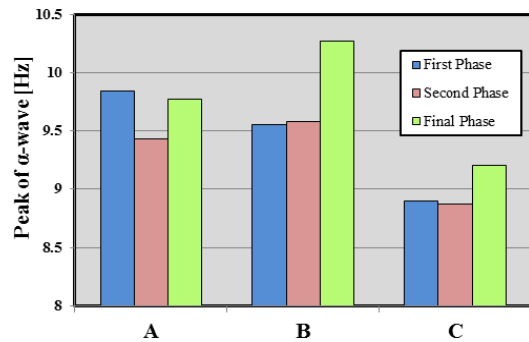


図6 Cz 電極における α 波ピーク周波数の推移

被験者 A のみ試験開始時から終盤において α 波ピーク周波数の低下が見られる。しかし、試験開始直後と試験終盤で大きな変化が見られたのは被験者 A のみであり、今回の試験において脳の疲れが観測できたとはいえない。また、全員に共通して試験後の休憩中にはピーク周波数の増加が見られる。休憩時に α 波ピーク周波数の増加は見られたが、疲労によるピーク周波数の変化を検出することは出来なかった。これは日常的に学習をしている被験者に対して、緊張感の低い簡単な試験では、脳が疲労しにくいためであると考えられる。また、被験者 A, B, C の各電極における α 波ピーク周波数を比較したところ、全体を通して大きく個人差が見られた。今後、脳の疲れを観測する際にその変化の様子と α 波ピーク周波数の平均値にどのような関係があるか観測する必要がある。

⑥ 脳波については、医師の脳波 (EEG) を測定し、医療ミスや患者の容態急変時の医師の感情の変化や精神的疲労を検出し、周囲に提示することで、緊張及び疲労による医療ミスを防ぎ、患者にとって安全な手術を行えるシステムを構築することを目的とし、そのための脳波測定の基礎実験を行った。今後は脳波によるヒヤリハットの検出を行うことを目標とし、さらに実験を重ね、適切な脳波の測定法や解析方法を模索し、手術支援に対する脳波の新しい可能性を示すことを目指す。また、表面筋電位による特異操作判別と脳波によるヒヤリハットの検出を統合して、医療ミスを防止する多重安全支援システムを構築し

ていく。さらに、得られた成果を国際学会で発表し、内視鏡手術に対する安全性対策の新しい手法として本システムを世界に発信していく。

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 7 件)

- ① C. Ishii, H. Mikami and Y. Nishitani, Passivity Based Bilateral Teleoperation for Surgical Robotic Forceps System with Time Varying Delay, International Journal of Mechatronics and Automation, 査読有, Vol.2, No.2, 2012, pp.132-146.
- ② H. Kawamura and C. Ishii, Mechanical Analysis of the Formation of Forceps and Scope for Single-port Laparoscopic Surgery, Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques, 査読有, Vol.22, No.4, 2012, pp. e168-e175.
- ③ 中屋友佑, 石井千春, 中荃隆, 西谷要介, 疋田光孝, 表面筋電位を用いた手術手技に対する特異操作の判別手法, 電気学会論文誌 D 産業応用部門誌, 査読有, Vol.132, No.2, 2012, pp.241-249.

[学会発表] (計 16 件)

- ① C. Ishii, T. Futatsugi, Design and Control of a Robotic Forceps Manipulator with Screw-Drive Bending Mechanism and Extension of Its Motion Space, First CIRP Conference on Biomanufacturing, March 4-6, 2013, The University of Tokyo, Japan.
- ② C. Ishii, A Novel Distinction Method of Abnormality for Surgical Operation Based on Surface EMG Signals, 1st International Conference on Computer Science, Electronics and Instrumentation, November 12, 2012, Yogyakarta, Indonesia.
- ③ 佐藤孝則, 大場慎太郎, 石井千春, 中荃隆, 結紮手技に対する自己組織化マップを用いた特異操作判別と内視鏡手術用特異操作提示システムの構築, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012年5月27日~29日, アクトシティ浜松 (静岡県)
- ④ C. Ishii, H. Mikami, T. Nakakuki and H. Hashimoto, Bilateral Control for Remote Controlled Robotic Forceps System with Time Varying Delay, 4th International Conference on Human

System Interactions, May 19-21, 2011, Keio University, Yokohama, Japan.

[図書] (計 3 件)

- ① C. Ishii (Edited by: G. R. Naik), "Computational Intelligence in Electromyography Analysis: A Perspective on Current Applications and Future Challenges", Chapter 10, "Distinction of Abnormality of Surgical Operation on the Basis of Surface EMG", INTECH, 2012, pp.247-260.
- ② C. Ishii (Edited by: G. Lee), "Lecture Notes in Electrical Engineering, Advances in Automation and Robotics", Vol.2, "Analysis of Motion Space for Modified Screwdrive Bending Mechanism", Springer, 2011, pp.37-45.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 駆動機構

発明者: 石井千春、小林宏輔

権利者: 石井千春

種類: 特許

番号: 特許第 4984280 号

取得年月日: 平成 24 年 5 月 11 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 CHI HARU)

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