

令和元年5月16日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00358

研究課題名(和文)脳波と眼電位で操作する次世代ロボット腹腔鏡システムの構築

研究課題名(英文)Construction of a next-generation robotic laparoscope system operated with EEG and EOG

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、先端部を屈曲させることができる腹腔鏡ロボットを開発した。また、ズームインとズームアウトをフットペダルではなく、Kinectにより顔の前後移動で操作できるように改良した。眼電位に関しては、眼電図波形から右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の5つの動作識別を行い、操作の際に問題となる不随意性瞬目、随意性瞬目をサポートベクターマシンを用いて識別可能にした。脳波に関しては、識別の際に特徴を明瞭に抽出するために独立成分分析(ICA)を用いているが、ICAには正負の不定性と順序の不定性が存在する。そこで、これらの不定性の問題を解消する方法を提案し、脳波による動作識別率の向上を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したロボット腹腔鏡は、執刀医が自分の意思で見たい視野を得られるように直観的かつ少ない動作で操作可能であり、今後の遠隔手術の発展を促進する次世代のロボット腹腔鏡としての社会的意義を有する。また、同時に行った機械学習に基づく眼電位による随意瞬目と不随意瞬目の識別、および脳波の識別において実施した独立成分分析における正負の不定性と順序の不定性を解消するアルゴリズムの提案は、生体信号解析の一手法としての学術的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：In this study, a tip bendable robotic laparoscope for laparoscopic surgery was developed. In order to operate the robotic laparoscope intuitively, operation of zoom-in and zoom-out of a screen was improved so as to be operated not by use of a foot pedal but by forward and backward movements of operator's head. As for the electrooculogram (EOG), based on the measured EOG waveform, five kinds of eye movements were identified through threshold criteria. In addition, an involuntary blink and voluntary blink were distinguished based on the Support Vector Machine. As for the electroencephalogram (EEG), identification of grasp or non-grasp, and right grasp or left grasp were performed through Neural Network based on the EEG. At this time, an independent component analysis (ICA) was carried out to obtain original EEG signals. However, there exists positive and negative indefiniteness and sequential indefiniteness in the ICA. Therefore, solutions to these indefinitenesses of ICA were proposed.

研究分野：ロボティクス

キーワード：腹腔鏡下手術 ロボット腹腔鏡 脳波 眼電位 ハンズフリー操作

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、開腹手術に替わり腹腔鏡下手術が急速に普及している。腹腔鏡下手術は、患者の身体的負担が軽減されるなどの利点がある。しかしながら、腹腔内という限られた作業空間での手術であるため、外科医にとっては困難な手術となる。このため、腹腔鏡下手術支援ロボットが開発され、実用化されている。ロボット支援による腹腔鏡下手術においては、執刀医は両手で鉗子操作を行うため、鉗子と腹腔鏡を同時に操作することができない。両手以外の個所で腹腔鏡を操作できれば、執刀医は自分の意思で見たい視野を得ることができ、執刀医一人で円滑に腹腔鏡下手術を行うことが可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、執刀医の脳波と眼電位を用いて、執刀医が自分の意思で見たい視野を得られるように直観的かつより少ない動作で操作できるロボット腹腔鏡を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 先端部が屈曲可能な腹腔鏡ロボットの開発と制御

これまでに開発した先端部が屈曲できない腹腔鏡ロボットでは、十分な視野を得ることができず、鉗子を映せる範囲が制限されてしまう。そこで、腹腔鏡先端に屈曲機構を追加して、腹腔鏡ロボットの先端部が全方向に屈曲可能となるように改良した。また、従来はモーションセンサーである Kinect for Windows による顔の上下・左右の動きの検出と、フットペダルによる前後移動により腹腔鏡ロボットを操作していたが、より直観的に操作できるようにするために、ズームインとズームアウトをフットペダルではなく、顔の前後移動で操作できるように改良した。さらに、改良前後の腹腔鏡ロボットの操作性を実験により比較した。

(2) 眼電位による不随意性・随意性瞬目および右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の識別

操作の際に問題となる不随意性瞬目、随意性瞬目をサポートベクターマシンを用いて識別可能にし、眼電位波形から閾値条件に基づいて、右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の5つの動作識別を行った。

(3) 脳波による把握動作の識別と独立成分分析における不定性の問題の解消

脳波を用いて動作識別を行う際に、脳波の特徴を明瞭に抽出するために独立成分分析(ICA)を用いるが、ICAには正負の不定性と順序の不定性が存在する。そこで、ICAが有する不定性の問題を解消する方法を提案し、脳波により左手把握または右手把握を識別し、動作識別率の向上を試みた。

4. 研究成果

(1) 先端部が屈曲可能な腹腔鏡ロボットの開発と制御

腹腔鏡先端の屈曲部の部品には、市販のSPS用鉗子(COVIDIEN社製SILTTMダイセクト)の部品を用いた。図1に示すように、この部品の内部を通るワイヤーを引くことにより、内側と外側のワイヤー長の差によって各節(○で囲まれた箇所)で屈曲する。駆動部は、ネジ駆動によりモータの回転を直動運動に変換し、ワイヤーを引張る機構とした。

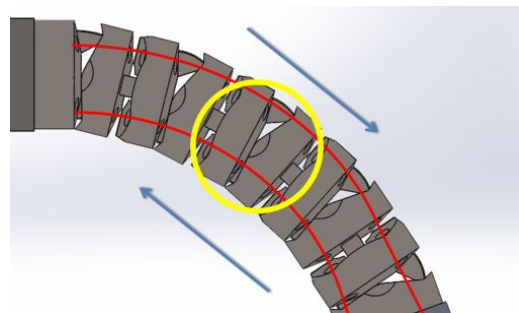


図1 先端屈曲部

腹腔鏡ロボットの操作方法に関して、図2に従来の操作方法と改善した操作方法の概略図を示す。従来は、腹腔鏡映像の上下左右方向の移動はKinect for Windowsにより顔の向きで操作し、前後方向の移動はフットペダルを用いて操作していたが、改善後は上下左右方向の移動と同様に、Kinectにより顔の位置を検出し、顔の前後移動により腹腔鏡映像の前後方向の移動(ズームインとズームアウト)操作をできるようにした。

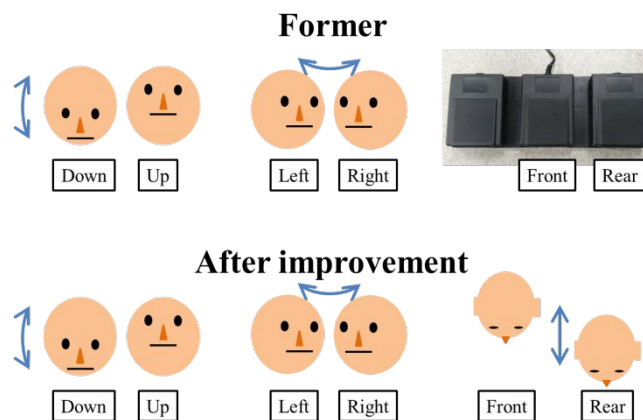


図2 腹腔鏡ロボットの操作方法

製作した屈曲機構を搭載した腹腔鏡ロボットを用いて、屈曲を行う場合と行わない場合において接頂 20 面体の観察比較を行ったところ、屈曲を行わない場合では、正面上部の 3 面のみ映すことができたのに対し、屈曲を行った場合では、上から見下ろす視野や左右から見る視野が増えたことで、合計 14 面を映すことができた。

腹腔鏡映像の前後方向の移動（ズームインとズームアウト）を行う操作方法として、従来のフットペダルによる操作と、提案した顔の前後移動による操作のどちらが適切であるかを検証するために操作法比較実験を実施したところ、顔の前後移動による操作において、全体の操作時間が短くなる傾向が見られた。また、具体的な意見として、Kinect を用いた顔の前後移動による操作は、フットペダルによる操作に比べてより直観的であり、足元を気にせずに操作できるため、操作が容易になったという意見が得られた。

(2) 眼電位による不随意性・随意性瞬目および右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の識別

本研究では図 3 に示すように、目の周りに貼り付けた 4 つの電極および耳たぶの基準電極により、電位差の変化から眼電位(EOG)を測定し、眼球運動を識別した。眼電位の測定には、株式会社ミユキ技研製の生体信号測定装置(Polymate II)を用いた。

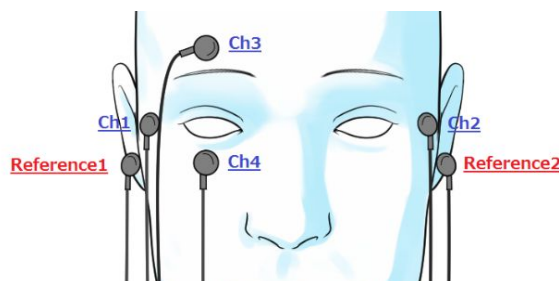


図3 眼電位測定方法

右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の 5 動作において眼電位波形を測定したところ、眼電位波形には 1 つの動作に対して 2 つのピークが存在し、この形は右方視と左方視、上方視と下方視でそれぞれおおよそ逆位相をとるような形となることがわかった。また、測定値には $\pm 100 \mu V$ ほどの個人差が存在することもわかった。

これより、眼電位波形の個人差をできるだけ少なくするために、測定信号を正規化し、正規化された眼電位波形において、1 回目のピーク値と 2 回目のピーク値にそれぞれ閾値を設け、その値を超えた時の 4 極の波形パターンに基づき、右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の 5 動作を識別した。さらに、個人差を考慮して、個人の眼電位波形の特徴に応じて試行錯誤的に識別条件を修正し、個人別の識別方法を用意した。

健康な成人 5 名の被験者（21 歳から 22 歳）に対して、右方視・左方視・上方視・下方視・瞬目の 5 つの動作を識別する実験を行った。なお、識別結果は眼球運動と同じ動作を検出した際でも、他の動作が同時に検出された場合は誤識別とみなし、完全にその動作のみが検出された場合のみ識別成功とみなした。結果として、平均 87.5%の識別率が得られた。

眼電位を用いて腹腔鏡ロボットの操作を行う場合、随意的な瞬目を行った後に眼球運動を行い、操作指令を与えると効果的である。この際、より快適な操作性能を得るためには不随意性瞬目と随意性瞬目の識別が必要不可欠である。

随意性瞬目の大きさは個人により大きな違いがあり、生波形の値では不随意性瞬目と随意性瞬目に大きな差が現れなかったため、瞬目波形を短時間フーリエ変換して得られる 0, 4.2, 8.3,

12.5, 16.7Hz の各周波数でのスペクトル値のうち、それぞれの電極における最大スペクトル値を特徴量に設定し、サポートベクターマシン(SVM)を用いて両者を識別することにした。

7 日間に分けて、随意性瞬目と不随意性瞬目瞬目の眼電位データを収集した。前半 4 日間で収集したデータの中からランダムに教師データを抽出し、識別器を作成した。前半 4 日間における検証データ、および後半 3 日間における検証データに対する随意性瞬目の識別率はそれぞれ、99.2%、98.6%となり、随意性瞬目を 100%に近い識別率で識別することができた。

(3) 脳波による把握動作の識別と独立成分分析における不定性の問題の解消

脳波(EEG)は、生体信号の一種であり、脳細胞の活動によって生じる電気信号を電極で記録した波形である。運動時や運動想起時には事象関連連同期と呼ばれる、特定周波数帯域における電位の低下が脳の対応部位で生じることが知られている。

一般的に、運動や運動想起と脳の一次運動野、体性感覚野には強い関係があると言われている。そこで本研究では、図 4 に示される、一次運動野、体性感覚野を有する頭頂部付近の F3、F4 の 2 つの電極を脳波の測定位置とした。なお、脳波の測定には、株式会社ニユキ技研製の生体信号測定装置(Polymate Mini AP108)を用いた。

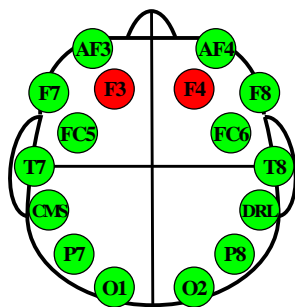


図 4 脳波の測定位置

Polymate Mini は、電極を頭皮に装着する非侵襲式の脳波測定装置であるため、発生源である脳内部から頭皮に至るまでに複数の脳波が混合してしまう。そこで本研究では、脳波の特徴をより明瞭に抽出するために、独立成分分析(ICA)を用いて測定した脳波から混合前の脳波を復元する。

ICA は観測した複数の信号から原信号を推定する暗号信号源分離の一つであり、混合前の各成分が独立であるという性質を利用し、復元行列の最適化を行う手法である。図 5 に示すように、信号が 2 信号である場合、理想的な原信号をプロットすると正方形の分布をとり、理想的な混合信号をプロットすると平行四辺形状の分布をとる。2 信号に限れば、ICA は混合信号の平行四辺形状の分布を、正方形の分布に座標変換することを意味しており、そのための復元行列を求める問題であると言える。本研究では、測定信号を 2 信号としているため、ICA においても 2 信号の推定を前提とする。

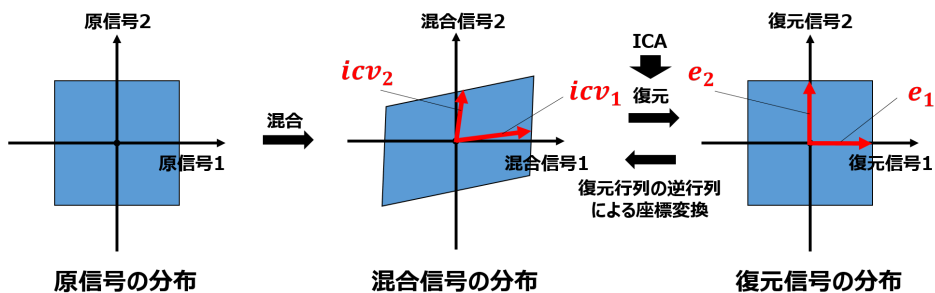


図 5 ICA の概念

図 5 に示すように、復元信号の分布上に単位ベクトル e_1 、 e_2 を置く。復元行列の逆行列にこれらの単位ベクトルをかけると、それぞれ icv_1 、 icv_2 に変換される。これらのベクトルを独立成分ベクトル(ICV)と定義する。このとき、ICA には不定性が存在するため、復元行列の逆行列は、必ずしも原信号を観測された混合信号に変換する混合行列と等しくなるとは限らない。

混合信号から復元信号を得る操作を復元と呼ぶ。図 5 に示すように、復元は集合全体を平行四辺形状の分布から正方形の分布に座標変換するものである。見方を変えると、復元は ICV を単位ベクトルに座標変換するものと考えることができる。ここで、ICV の同一直線状で、ベクトルの方向を正にとる軸を独立成分軸と定義し、独立成分軸と正の水平軸のなす角度を独立成分軸角度($0^\circ \sim 360^\circ$)と定義する。

ICA は、以下に述べる不定性により、復元行列が一意的に定まらないという問題がある。

(a) 正負の不定性

独立成分軸における ICV の正負の向きにより、図 6(a)のように 4 種類の ICV の組み合わせが考えられる。すなわち、4 種類の復元行列が存在することになる。

(b) 順序の不定性

図 6(b)のように、赤の ICV が水平軸かつ緑の ICV が鉛直軸に写像される場合と、赤の ICV が鉛直軸かつ緑の ICV が水平軸に写像される場合が考えられる。すなわち、2 種類の復元行列が存在することになる。

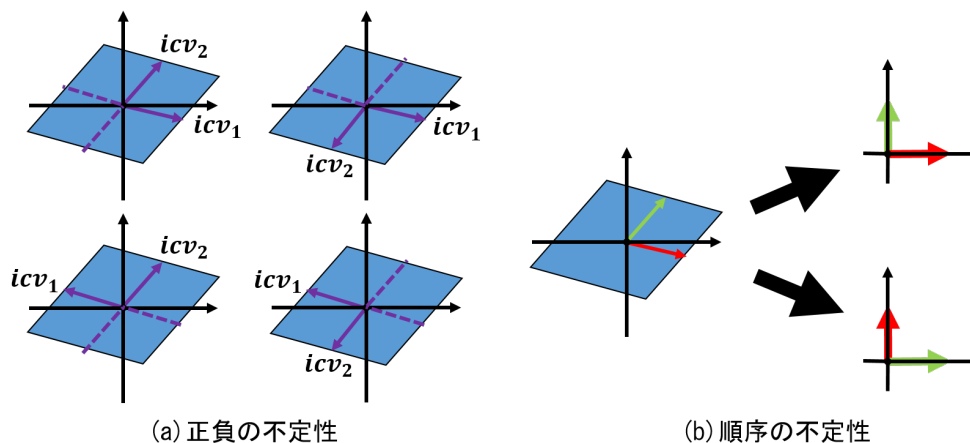


図 6 正負の不定性と順序の不定性

正負の不定性の解消方法として、まず独立成分軸角度の範囲を $0^\circ \sim 360^\circ$ から $-90^\circ \sim 270^\circ$ に置き換える。そして、さらに $-90^\circ \sim +90^\circ$ の値になるように再定義する。この処理によって、独立成分軸角度が同一になり、図 6 の 4 種類の ICV の組み合わせに対する復元行列は全て同じものになる。

順序の不定性の解消方法として、 icv_1 の独立成分軸角度が icv_2 の独立成分軸角度よりも大きい場合に、復元行列の 1 行目と 2 行目を入れ替える。この処理によって、2 つの ICV のうち、独立成分角度が小さい方が単位ベクトル e_i に復元されることになり、図 6 の 2 種類の写像に対する復元行列及び独立成分軸角度は同じものになる。

提案した不定性を解消した ICA を実施することにより、脳波の識別率の向上に効果があるか検証実験を行った。対象となる動作は、右手と左手の把握動作とし、ニューラルネットワーク (NN) を用いて左右の識別を行った。

はじめに、測定した脳波に対して ICA を実施した。次に、復元した信号のそれぞれの成分に対して高速フーリエ変換 (FFT) を行った。外れ値を取り除いた後、パワースペクトルを正規化し、1~50Hz のパワースペクトルに対して t 検定を行い、有意差がある順に 2~7 個の周波数を選択して、2 電極分で合計 4~14 個の周波数に対するパワースペクトルを並べたものを、NN への入力とする特徴量ベクトルとした。このとき、特徴量の数を変えることによる識別率の変化も同時に調べた。

健常な 20 代の男性 2 名の被験者 A、B の右手と左手の把握動作時の脳波を測定し、90 回分のデータをランダムに選択して NN の学習用データに用い、被験者毎に NN を学習させた。また、10 回分のデータを検証用データとした。NN は、一層あたりの細胞数を 10、中間層の数は 2、活性化関数は対数シグモイド関数とし、収束アルゴリズムには弾力性誤差逆伝播法を採用した。

識別実験においては、(1) ICA を行わない場合、(2) 通常の ICA を行った場合、(3) 正負の不定性と順序の不定性を解消した ICA を行った場合、の 3 通りの処理を行い、識別率を比較した。表 1 に各被験者において条件毎に最も高かった識別率を示す。

表 1 最高識別率

Subject	A	B
(1) No ICA	49%	55%
(2) Conventional ICA	57%	55%
(3) Solution of uncertainty of ICA	65%	60%

被験者 A、B 共に最も識別率が高かったのは、(3) の正負の不定性と順序の不定性という ICA の不定性を解消した場合であった。そこで、実施した ICA の差異によって識別率に有意差があるのかを t 検定を用いて検証した。

被験者 A の識別率のみを用いて(1)の ICA を行わなかった場合の識別率と、(2)と(3)の各種 ICA を実施した場合の識別率を比較した結果、ICA を行わなかった場合と比較して、どちらの ICA を行った場合も 5%の有意水準で有意差が確認できた。

被験者 A と被験者 B の識別率を用いて、(2)の ICA の不定性を解消していない従来の ICA を利用した場合の識別率と、(3)の正負の不定性と順序の不定性を解消した ICA を実施した場合の識別率を比較した結果、5%の有意水準で有意差が確認できた。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

C. Ishii and H. Kawamura, Verification of Validity of Assessment Items in Training System for Laparoscopic Surgery, Proceedings of the 2019 6th International Conference on Chemical and Biological Sciences, 査読有, 2019, M2016(1-8).

C. Ishii and T. Oyama, Impedance Control of Robotic Forceps for Safe Robotic Surgery, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Diagnosis 2018, 査読有, 2018, Paper42(1-6).

C. Ishii, S. Murooka and M. Tajima, Navigation of an Electric Wheelchair Using EMG, EOG and EEG, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 査読有, Vol.7, No.2, 2018, pp.143-149. DOI: 10.18178/ijmerr.7.2.143-149

I. Murasawa, S. Murofushi, C. Ishii and H. Kawamura, Development of a Robotic Laparoscope for Laparoscopic Surgery and Its Control, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.29, No.3, 2017, pp.580-590. DOI: 10.20965/jrm.2017.p0580

〔学会発表〕(計 39 件)

C. Ishii, Challenge for Development of the Surgical Robot for Single-Port Surgery (Keynote speech), 2018 2nd International Conference on Robotics and Automation Sciences, June 23-25, 2018, Wuhan, China.

竹富研太, 石井千春, 先端屈曲可能な腹腔鏡マニピュレータの開発と制御方法の確立, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2018 年 6 月 4 日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

田嶋海南人, 石井千春, 脳波を用いた運動識別に関する研究—独立成分分析及びニューラルネットワークを用いた識別—, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017 年 5 月 12 日, ビックパレットふくしま(福島県郡山市)

小山哲也, 石井千春, 腹腔鏡下手術用ロボットの安全性向上を目的とした制御系の構築, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017 年 5 月 11 日, ビックパレットふくしま(福島県郡山市)

村澤伊織, 石井千春, 川村秀樹, Kinect による頭部動作の認識を用いた単孔式腹腔鏡下手術用腹腔鏡ロボットの操作, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年 11 月 10 日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

C. Ishii, Applications of Robot Technology to Medical and Assistive Devices in Aging Society (Keynote speech), 2016 1st IEEE Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, July 20-24, 2016, Tokyo, Japan.

〔図書〕(計 1 件)

C. Ishii, et al. (Edited by: Ramana Vinjamuri), Biomimetic Prosthetics, Chapter 3, Sensory Feedback Device for Myoelectric Prosthetic Hand, INTECH, 2018, pp.99(31-47).

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。