

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：56401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17795

研究課題名（和文）赤外光筋活動センサを用いた機能的電気刺激フィードバック制御システムの構築

研究課題名（英文）Development of a functional electrical stimulation feedback control system using infrared muscle activity sensor

研究代表者

吉岡 将孝（Yoshioka, Masataka）

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・准教授

研究者番号：80805804

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：機能的電気刺激法（FES）および赤外光筋活動センサ（IrMAS）による筋肉のフィードバック制御システムの構築を目的とし、IrMASから機械学習による指先動作推定、複数のFESによる拮抗筋刺激を行った。その結果、エコー動画像から得られる筋輝度とIrMASに相関性が見られ、IrMASは筋肉の動きと関連していることを証明し、RNNおよびLSTMによる機械学習によって指先動作を相関係数最大 $r=0.93$ の精度で推定した。また、FESにおいて、刺激電圧および周波数と指先発揮力の関係性が見られ、複数の刺激により、筋肉の拮抗動作を行った。今後、これらをリアルタイム化を進め、フィードバック制御の実現を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機能的電気刺激による筋肉の制御は、筋電位を入力としてパワーアシストを行う装置は存在するが、あくまで筋収縮の補助であり、直接的なフィードバック制御は実現できていなかった。この問題に対し、赤外光による安全で安価な測定手法のIrMASを導入することにより、電氣的ノイズの問題が解決され、使用者に合わせた刺激が可能となる。また、IrMASにおける指先動作推定では、非間接的に指の動きを推定する既存のカメラによる指先推定と比べ、手を画角に収める必要もなく、筋電位と比べても弱い力も検出出来るため、様々なインターフェースへの応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a muscle feedback control system using Functional Electrical Stimulation (FES) and Infrared Muscle Activity Sensors (IrMAS). It involves estimating fingertip movements through machine learning based on IrMAS and stimulating antagonistic muscles with multiple FES applications. The results show a correlation between muscle brightness obtained from echo motion images and IrMAS, proving that IrMAS is related to muscle movement. Machine learning with RNN and LSTM achieved a maximum correlation coefficient of  $r = 0.93$  for estimating fingertip movements. Additionally, a relationship between stimulation voltage and frequency and fingertip exertion force was observed in FES, and multiple stimulations achieved antagonistic muscle movements. Moving forward, these findings will be advanced towards real-time implementation to realize feedback control.

研究分野：生体医工学

キーワード：赤外光 指先動作推定 電気刺激 機械学習 LSTM

様 式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

電気刺激によって誘発的に筋収縮を起こす機能的電気刺激法 (Functional Electrical Stimulation: FES) は皮膚表面に電極を貼り、パルス電圧を印可することで電極間の筋肉の収縮を誘発させることが出来る。また、電圧や周波数を変更することで収縮率を変化させることが可能である。一方で、その刺激のパラメータ設定は使用者の主観的な部分が強く出てしまうという問題がある。この理由の一つとして、リアルタイムでの筋肉の動きの計測の難しさが挙げられる。使用者に適した電気刺激を与えるには電気ノイズの影響を受けにくいリアルタイムで計測できる手法が必要となる。

## 2. 研究の目的

FES による筋肉の変化をリアルタイムで計測するためには、電氣的ノイズの影響を受けない計測手法が必要となる。我々はこれまで赤外光を体内に照射して、その反射量から筋肉の変化量を計測する赤外光筋活動センサ (Infrared Muscle Activity Sensor: IrMAS) の開発を行ってきた。この IrMAS は赤外光を測定源としているため、FES からの電氣的なノイズを受けることなく筋肉の変化量を捉えることができる。これにより、筋肉を FES でアクチュエータとして駆動させ、IrMAS で筋肉の状態をフィードバックすることで、目標値に合わせた筋収縮を誘発できると考えられる。したがって、本研究では電気刺激時に筋肉の状態変化を計測できるセンサの開発および刺激の評価指標の作成と IrMAS と FES を用いた人の筋肉のフィードバック制御システムの構築を目指す。

## 3. 研究の方法

**IrMAS と筋肉の動きの比較検証:** 赤外光は波長がおおよそ  $0.7\text{--}2.5[\mu\text{m}]$  の光で、生体を透過しやすく、皮膚から入射された赤外光は筋肉組織表面に届きやすい性質を持っている。我々が開発している IrMAS の概要を図 1 に示す。赤外線 LED から赤外光は皮膚を通して入射すると、入射された光のうち、筋肉組織表面で反射された光と皮下組織の散乱光がフォトトランジスタで検出される。ここで、自発・誘発的に筋肉が動くことで体組織が動かされ、フォトトランジスタで検出される電圧が変化することにより、間接的に手や腕の動きを推定する。この原理を検証するため、エコー動画像から得られる筋輝度との比較を行う。体内組織の音響インピーダンスの異なる境界面から反射してくる超音波信号を利用するため、体内を観測する手法で、エコー動画像 (B モード) を解析し、グレースケール (0-255) の輝度 (筋輝度) の変化を見ることによって体内の密度の変化がどの部位で起こっているか推定することが出来る。

**IrMAS による指先動作推定:** 指先動作推定を行うため、指先を動かした際の指先の角度と IrMAS から得られる筋肉の変化量との関係性を機械学習で推定モデルを構築する。推定モデルの学習には Recurrent Neural Network (RNN) および Long-Short Term Memory (LSTM) を用いる。RNN および LSTM は、データの時系列特性に基づいて学習することができ、複数の筋肉形状の時間変化と指先の状態の関係性をモデル化することが可能である。RNN は情報をそのまま引き継ぐのに対し、LSTM は中間層を通してデータを渡し、この中間層は、入力ゲート、忘却ゲート、出力ゲートという 3 種類のゲートがあり、それぞれのゲートが情報の取捨選択を行うことで長期記憶の更新、出力を制御しており、RNN に比べ長期データの学習を行うことができる。被験者は図 2 のように指に曲げセンサ、腕に赤外線筋活動センサを装着し、モニターにランダムに表示される 11 種類の手形の形と同じ形となるように指を動作させ RNN と LSTM を用いて推定モデルを作成する。推定モデルを用いた出力とテストデータを比較することで識別精度を求める。また交差検定を行い識別制度の平均を求めることでモデルを評価する。

**FES による拮抗筋の刺激:** FES を用いたフィードバック制御を実現するために、刺激の強さに関係しているパラメータである電圧、周波数、Duty 比をそれぞれ変化させたときの指が発揮する力を調査する。調査から得られた結果を基に決定した刺激を与え、その時の指先が発揮する力を調査し、屈曲・伸展動作が行われているかを確かめる。FES の制御装置は  $\pm V_{cc}$  の電圧  $V_{in}$  を昇圧回路によって  $\pm 10V \sim \pm 15V$  の間で昇圧し、昇圧した電圧  $V_{out}$  を H ブリッジ回路に流している。その際に、PWM 発生装置によって周波数とデューティ比が与えられることで、 $\pm V_{out}$  のパルスが生成され、電極に出力される。これらの FES による筋収縮特性の調査結果から、指先での屈曲・伸展動作を実現する。これらの動作を行う刺激を与えるために、与える刺激のパラメータ (電圧、周波数、Duty 比) を任意に変化させ、目的の動作に合った刺激を与え、その時の刺激に対す

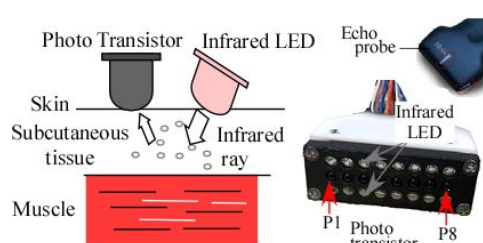


図 1 IrMAS の測定原理

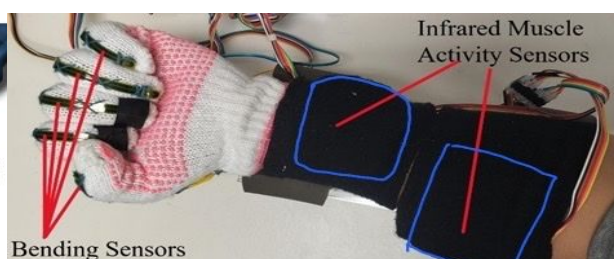


図 2 測定環境

る反応を調査する。刺激のパラメータを変化させ、その刺激を与えた時の指の屈曲・伸展動作による発揮力を時間とともに計測し、刺激の変化に対する指の動きを調査する。薬指が屈曲する反応を示す位置と、指が伸展する反応を示す位置に電極を張り付け、薬指を 6 軸力覚センサに取り付けた治具の中に指を入れた状態で測定する。

#### 4. 研究成果

**IrMAS と筋輝度の比較**：図 3 に 1 サイクル中のグー (rock) を 100 % とした時のチョキ・パーの IMAS および筋輝度の変化率を示す。IrMAS の変化率は手の形によって変化し、その変化は筋輝度が同様の変化をしていることがわかる。エコー動画像から得られる筋輝度と IrMAS は相関性が見られ、測定箇所ごとに同様の変化が見られた。筋輝度の平均の時間変化を求めたが、それだけでは体内組織の変化を十分に捉えられていない。今後、エコー画像から得られる筋肉の動きを追従することが必要であると考えられる。また、これらの結果から体内組織の変化は計測位置のズレによって大きく異なり、そして個人差が大きく、比較が難しいことがわかった。

**IrMAS による指先動作推定**：RNN および LSTM による IrMAS で指先の筋活動を測定し学習を行った。図 4 に RNN および LSTM の人差し指の動作推定結果を示す。手を自然に開いて指が伸びている状態を 0、指が曲がっている状態を 100 としている。図の赤の実線は RNN、青の実線は LSTM から出力された推定値で、黒の破線はセンサから得られた実測値である。学習したモデルに基づいて動作推定を行った結果、RNN において最大の相関係数は人差し指で 0.91 であったのに対し、LSTM において最大の相関係数は 0.93 であった。交差検定の結果から LSTM は RNN と比べ平均相関係数は LSTM の方が 0.08 高い数値となった。各指の相関係数で見れば RNN が一部高いが、五指全体で見れば LSTM が優位であった。

**FES による拮抗筋動作の実現**：図 5 は PWM 周波数ごとに電圧を 1V/s で  $\pm 10V \Rightarrow \pm 15V$  に電圧を上げた後、1V/s で  $\pm 15V \Rightarrow \pm 10V$  に下げた時の、指先の発揮力を表しており、縦軸は、指がロードセルを押す力、横軸は与えた周波数と電圧であり、各周波数で電圧を変化させたときの様子である。電圧を上げていくと、どの被験者でも出力される力は大きくなる様子が見られた。また、出力された力の大きさには個人差が見られ、15V-200Hz において、被験者 A は 5.40N、被験者 B は 1.32N、被験者 C は 0.81N であった。一方で、どの被験者においても電圧が大きくなると、指の発揮力は大きくなり、12V 以上では傾きが大きくなる様子が見られることから、電圧が大きくなると刺激を受ける筋肉が増え、出力される力が大きくなることが考えられる。また、周波数によって出力される力が変化する様子が見られた。40Hz になると出力される力は小さくなり、200Hz から 250Hz の間で力は最大となった。

次に、図 6 に屈筋に刺激を与えた状態から、屈筋と伸筋の両方に刺激を与えた時の結果とその時に与えた電圧の変化を示す。屈曲した状態から伸展する様子が見られ、被験者 A は屈筋側 25V、伸筋側 20V のとき、発揮力は 1.5N 程度を示し、屈曲した状態と比べ発揮力は 1.5N 程度低下した。屈曲した状態から伸筋に刺激を与えたことで、伸展動作により屈曲側と反対に指が引っ張られ、発揮力が小さくなったと考えられる。これらの結果から、電圧の変化に従って、指が動作しており、指の屈曲・伸展の拮抗筋動作が FES によって実現した。

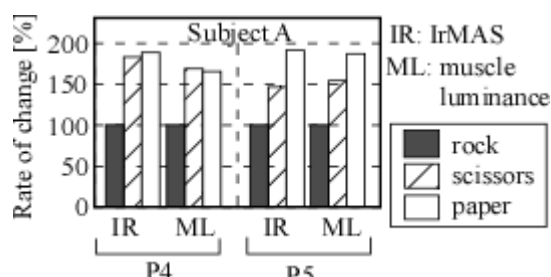


図 3 グー(rock)の形を 100%にした時の、チョキ(scissors)とパー(paper)の形の IrMAS(IR)および筋輝度(ML)の値の変化

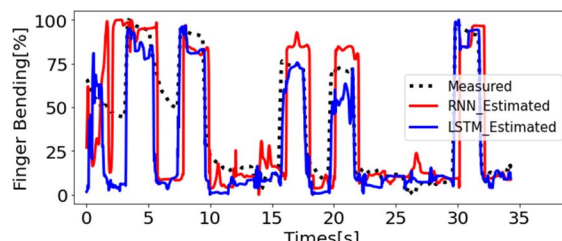


図 4 指先動作推定結果(赤:RNN, 青:LSTM)

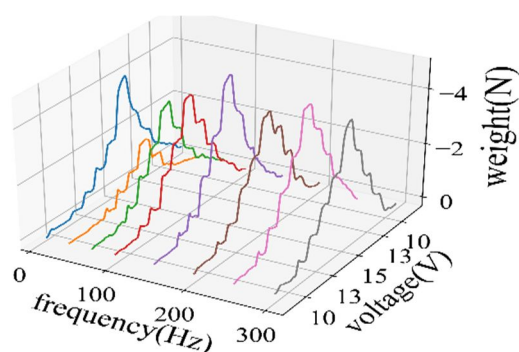


図 5 FES の電圧-周波数-発揮力の関係

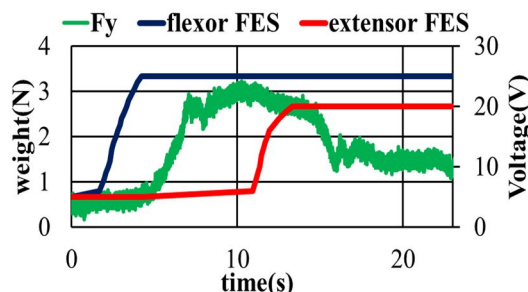


図 6 FES による拮抗筋刺激

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1 . 発表者名 門田伊弘 , 吉岡将孝
2 . 発表標題 機械学習による赤外光筋活動センサを用いた指先動作推定
3 . 学会等名 令和3年度SICE四国支部学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 門田伊弘 , 吉岡将孝
2 . 発表標題 赤外線筋活動センサを用いたニューラルネットワークによる指先動作推定
3 . 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第 60 期総会・講演会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 吉岡将孝、脇田翔平
2 . 発表標題 赤外光筋活動センサによる機能的電気刺激フィードバック制御システムの検討
3 . 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 山崎創太 , 脇田翔平 , 吉岡将孝
2 . 発表標題 機能的電気刺激による筋収縮特性の調査
3 . 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第 54 期中四国卒業研究発表
4 . 発表年 2024年

1．発表者名 稲田寿凜也，脇田翔平，吉岡将孝
2．発表標題 赤外線筋活動センサによる指先動作推定
3．学会等名 日本機械学会中国四国支部 第 54 期中四国卒業研究発表
4．発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------