

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01491

研究課題名（和文）筋電位から随意運動を推定するリハビリ支援ロボットのための促進的訓練システムの開発

研究課題名（英文）Development of training system for facilitating surface myoelectric signals used for rehabilitation supporting robots

研究代表者

林 良太（Hayashi, Ryota）

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：40288949

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）：手関節の伸展筋屈曲筋からの表面筋電位信号を用いて、1リンクロボットアームを回転させる操縦訓練システムを構築した。訓練時に手関節を固定すると、表面筋電位を随意的に発生させる技能の獲得に効果がある可能性を、実験により確認することができた。さらに、表面筋電位センサの出力信号の一部の情報だけを用いて、自動制御により操縦課題の達成を補助すると、訓練時の負担を軽減し、継続的な促進訓練が可能になることを、実験により確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面筋電位信号で操縦するロボットを用いて、片麻痺患者のリハビリ訓練を支援するシステムの有用性が認められつつあるが、患者の意図したとおりにロボットが動作するようになるためには、患者の多大な努力と訓練が必要となっている。本研究では、表面筋電位を発生させる技能の獲得を促す一つの条件を明らかにすることができ、さらに訓練時の負担を軽減し継続的な訓練を可能にする手法を示すことができた。本研究成果は、新しいリハビリ訓練システムの発展と適用範囲の拡大に繋げることができると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a simple 1-link robot arm which is controlled by estimating the wrist motion from the surface myoelectric signals on the forearm. We made several training experiments for skill acquisition of robot arm manipulation with and without physical constraint of the wrist. From the results of these training experiments, it was confirmed that the training with physical constraint of the wrist can facilitate the skill acquisition of the robot manipulations using surface myoelectric signals. We additionally made several training experiments for skill acquisition of robot arm manipulation with and without the assist of the automatic control. Then, we investigated the differences in facilitation effects of skill acquisition comparing with the results from these training experiments. Finally, it was confirmed that even beginners who are unaccustomed to the training can manipulate the robot arm and continue the training with the assist of the automatic control.

研究分野：ロボット工学

キーワード：表面筋電位 知能ロボティクス リハビリテーション 医療・福祉 訓練支援 技能獲得 メカトロニクス

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来は回復が困難とされてきた脳卒中片麻痺の症状は、脳科学の進歩に伴う新しいリハビリ手法の発展により、飛躍的な回復が望めることが明らかになりつつある(川平、2006)。近年、患者の意図を筋電位から読み取ったロボットの介助を適用することによって片麻痺上肢や下肢のリハビリ訓練を支援するシステムの有用性が認められ、研究開発が盛んに進められている(Kubota、2013)。しかし、筋電位の特性は個々によって異なるため、システムの調整に時間を要するだけでなく、患者の意図したとおりロボットが動作するようになるためには、患者の多大な努力と訓練が必要となっているのが現状である。よって、訓練者の負担を軽減して効果的なりハビリ訓練を実現するために、適切な筋電位の発生を促すシステムの開発が急務となっている。

### 2. 研究の目的

本研究は、表面筋電位から人間(訓練者)の意図を読み取ったロボットの介助により手首のリハビリ訓練を支援するシステムにおいて、訓練者が適切な表面筋電位を発生できるようになるための新しい訓練システムの開発を目的として、以下の項目の達成を目標とする。

- (1) 手首をモデル化したロボットアームを表面筋電位で操ることのできる訓練装置を開発する。
- (2) 促通刺激を適用して、適切な表面筋電位の発生を促すシステムを開発する。
- (3) 訓練者の負担の軽減と適用範囲の拡大を図り、新しいリハビリ訓練支援システムの発展に繋げる。

### 3. 研究の方法

(1) 表面筋電位でロボットアームを操縦する訓練システムを以下の順番で構築する。まず、図1に示すように、楽な姿勢で訓練者の上腕部を固定する台を作成する。その際、手関節は自由に運動できるように設計する。また、上腕部や手を傷めることがないようにゴム製クッションや面ファスナーを利用して固定方法を工夫する。つぎに、手関節の屈曲(掌屈)と伸展(背屈)に関する表面筋電位を測定するシステムを構築する。表面筋電位の信号を表面筋電位センサとAD変換機を用いてパーソナルコンピュータに取り込み、表面筋電位の時系列データを収集するソフトウェアを開発する。そして、手首を1自由度でモデル化したロボットアームを作成し、測定した表面筋電位の値に応じてロボットアームの関節をサーボモータで回転させる制御システムを構築する。ロボットアームは、訓練者から見やすい位置に配置して、手関節と同様な動きが再現できるように構成する。ただし、訓練者にロボットアームが接触しないように十分に安全距離を確保する。そして、表面筋電位でロボットアームを操縦する訓練が可能なハードウェアを構築する。

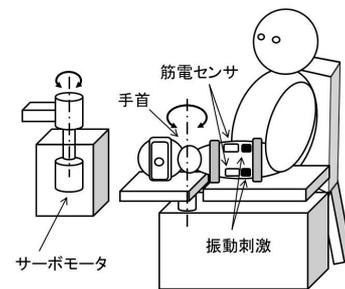


図1 訓練システム

(2) 訓練の負担と上達過程の調査・分析を以下の順番で行う。まず、構築した表面筋電位でロボットアームを操縦する訓練システムにおいて、訓練の差異が生じる簡単な課題を考案する。そして、複数の被験者を対象に訓練を実施してデータを収集し、課題の達成度の変化を分析する。ここで、課題の達成度の評価では、ロボットアームの操縦精度や経過時間などが指標となる。訓練終了時に被験者にアンケートを実施して訓練に対する負担を確認する。関節の運動に対して、外部から負荷抵抗をかけると筋活動を顕著にすることができる。そこで、手首を固定した場合の表面筋電位の発生と課題に対する上達課程の変化についてデータを収集する。その際、必要に応じて訓練システムの機構変更と改良を行う。

(3) 促通刺激による表面筋電位の発生を促すシステムの開発と訓練の評価を以下の順に沿って行う。まず、狙った筋の活動を促すために、振動モータによる振動刺激などの促通刺激を与える機能を訓練システムに追加する。促通刺激を適用することによって、訓練に対する負担の軽減と訓練効果の向上を図る。訓練システムを初めて使用する初心者は、課題の達成度は低いと予想される。そこで、初心者が訓練を開始する際には、サーボモータへの制御入力を補助として加えることにより課題の達成を容易にする方法を考える。そして複数の被験者を対象に訓練を実施して、訓練前後の課題達成度を比較することで、提案する訓練方法を評価する。最後に、研究成果の発表を行い、本研究の意義と有用性を広く公開して、表面筋電位から随意運動を推定するリハビリ支援ロボットの発展と適用範囲の拡大に繋げる。

### 4. 研究成果

(1) 表面筋電位でロボットアームを操縦する訓練システムを構築した。まず、訓練者が楽な姿勢で上腕を固定することができる台を作成した。その際、手関節は自由に運動できるようにして、固定台にウレタンゴムを敷き、面ファスナーを用いて上腕を傷めずに固定できる構造にした。また、操縦時の腕の条件を揃えるため、手は球状の把握部を握った状態で面ファスナーを使って固

定することにした。ただし、把握部は手関節の回転中心と同軸で水平面内を回転できるように可動機構を設けている。その可動範囲は、手関節の屈曲(掌屈)方向に60度、伸展(背屈)方向に60度となるように設計している。把握部の回転軸にはエンコーダが取り付けられており、操縦時の手関節の角度を測定できるようになっている。表面筋電センサ( I D 2 P A D : 追坂電子機器製)を2個取り付けられた前腕を固定台に拘束している様子を図2に示す。ここで、被験者1名を対象に手関節を屈曲(掌屈)させて意識して強く力んだときの表面筋電位の変化を調べた。その結果、繰り返し測定を実施すると表面筋電位の大きさが少しずつ大きくなる場合があることを確認した。これにより、訓練をすることで少しでも大きな表面筋電位を発生できるようになる可能性があることが分かった。つぎに、手関節の屈曲(掌屈)と伸展(背屈)の運動をモデル化した1リンク回転ロボットアームを試作した(図3)。そして、手関節の伸展屈筋曲筋に対応した部位から測定される表面筋電位の大きさが、設定した閾値を超えると、超えた値に比例する速度の大きさを目標角度を増減させることで、ロボットアームの回転角度を制御するシステムを構築した。試作したロボットアームを一定時間内で2つの目標角度の間を往復運動させる操縦課題と往復回数による評価を設定して、複数の被験者に繰り返し試行した結果、訓練の効果が見いだせることを確認した。その際、被験者の手関節を拘束して動かなくした状態で訓練した場合と、拘束しないで自由に動かせる状態で訓練した場合とで条件を変えて比較すると、前者の方が訓練の効果が高い傾向にあることが分かった。以上の研究成果について、2017年12月に開催された計測自動制御学会第18回システムインテグレーション部門講演会で発表した。

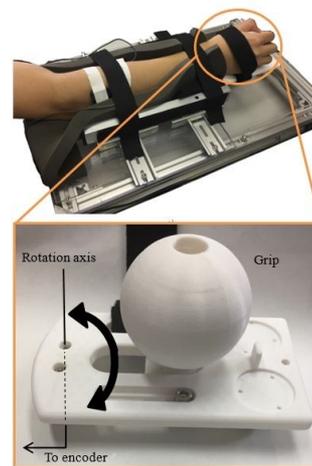


図2 前腕の固定

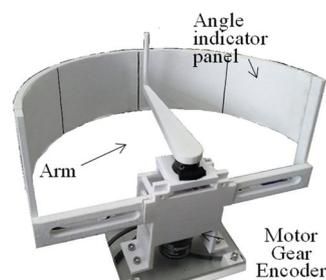


図3 ロボットアーム

(2) 試作した訓練システムを用いて、訓練の負担と上達課程の調査・分析を行った。ロボットアームを40秒以内で90度の関節角度(2つの目標角度の間)を往復運動させる操縦課題を設定して、2名の健康な成人の被験者が感じる訓練の負担と上達課程のデータ収集を行った。訓練は10回実施して、1回の訓練毎の平均した筋電強度の推移を調査した。なお、被験者の手関節を拘束して動かなくした状態で訓練した場合と、拘束しないで自由に動かせる状態で訓練した場合とで、条件を変えて訓練を行ってみた。その際それぞれの場合の訓練の前後で、手関節を拘束しない状態での操縦課題を実施して、往復回数の増加量をもとに訓練効果の比較を行った。訓練の結果は、いずれの被験者も手関節を拘束して動かなくした状態で訓練を行った後の方が、往復回数は多くなり、訓練効果が高いことを確認した。また、手関節を拘束した状態での訓練の前後では筋電強度の向上が見られた。一方で、訓練中はほとんどの例で筋電強度が減少する傾向が見られた。訓練後の被験者の感想と合わせると、訓練を継続していく中で被験者の疲労が蓄積していった可能性が考えられる。以上の研究成果について、国際計測連合主催の国際会議 I M E K O 2018(英国ベルファスト)で発表した。その際、研究成果が高く評価され、ベストプレゼンテーション賞を受賞することができた。

(3) 促通刺激による表面筋電位の発生を促すシステムの開発と訓練の実験を試みた。狙った筋の活動を促すために、振動モータによる振動刺激などの促通刺激を与える機能を訓練システムに追加した。促通刺激を与える手段として、図4に示す振動モータを試作して手関節の屈曲(掌屈)側と伸展(背屈)側に装着した。振動モータを用いて行う力覚提示に2つの機能を設定した。1つめの機能は、ロボットアームの操縦において操縦者の表面筋電位が正しく発生されていなければ、振動モータが振動して操縦者に表面筋電位の発生を促し、正しく発生されていれば振動を停止させるものである。2つめの機能はロボットアームの往復運動において、屈曲(掌屈)側に操縦する必要があるとき屈曲(掌屈)側の振動モータを振動させ、伸展(背屈)側に操縦する必要があるとき伸展(背屈)側の振動モータを振動させるものである。2名の健康な成人の被験者に対して、促通刺激の有無で比較を行った。操縦訓練はそれぞれ30回行い、1回の操縦訓練の時間は40秒とした。また、操縦訓練の後に被験者からアンケートを採り、操縦の難易度と疲労度を5段階で評価してもらった。結果では、促通刺激がある方が訓練の前後で往復回数の向上が見られた。被験者から、力を入れる方向が分かりやすかったという感想があり、操縦時にロボットアームの往復運動を切り返すタイミングにおいて、視覚だけでなく振動による力覚の効果があったものと考えられる。



図4 振動刺激

(4) 手関節の伸展屈曲運動に合わせて1リンクロボットアームを回転させる訓練において、被験者が受ける負担に関するデータが得られたので、負担を軽減しつつ上達を促すシステムの構築を試みた。まず、はじめて操縦を経験する被験者は、手関節の筋から表面筋電位を随意的に発生させて、ロボットアームを水平面内で往復回転させるという操縦課題を、容易には達成できないことを確認した。このとき、ロボットアームの回転を妨げてしまう方向に、被験者の意思とは異なって、手関節の筋から表面筋電位が発生してしまうことがあった。これは、経験の浅い被験者は、狙った筋だけを緊張させたり、弛緩させたりすることに不慣れであり、ロボットアームの操縦に適切な表面筋電位を随意的に発生させることができていないことが要因であると考えられる。このときの訓練データを図5に示す。図5では、はじめの屈曲(掌屈)の際に、目標角度に対して適切な筋だけでなく不適切な筋も大きな表面筋電位が同時に発生してしまい、ロボットアームが目標角度に到達するまで時間がかかっている様子が確認できる。また折り返しの伸展(背屈)の際には、しばらくの間、適切な筋からの表面筋電位が閾値を超えることができず、ロボットアームが止まっている様子が分かる。そしてしばらくして、適切な筋だけでなく不適切な筋も大きな表面筋電位が同時に発生して、少しずつ目標角度にロボットアームが回転している様子が分かる。以上から、操縦に不慣れな初心者、適切な筋から随意的に表面筋電位を発生させることが難しく、継続的な訓練が容易ではないことを確認した。つぎに、経験の浅い被験者が操縦する際には、表面筋電位センサの出力信号の一部の情報だけを用いて、自動制御により操縦課題の達成を補助することを考えた。具体的には、ロボットアームが運動するべき方向に対して適切な筋からの表面筋電位の大きさが設定した閾値を一瞬でも超えれば、その後はロボットアームを自動的に目標角度に到達するまで制御することを考えた。なおその際、不適切な筋からの表面筋電位の発生にはかかわらないこととした。この補助によって、訓練課題の達成は容易になると考えたが、ロボットアームを自動的に目標角度に到達するまで制御することから、途中でロボットアームの動きを変更することができないので、被験者の随意的な操縦は制限されることになる。ただし、この条件でロボットアームの運動に合わせて表面筋電位を発生させる意識の訓練の効果が期待できる。そこで、操縦に不慣れな被験者2名に対して、補助のある場合と補助のない場合とそれぞれ20回の比較訓練を行った。その結果、いずれの被験者も、補助のない場合は訓練中を通して最大で1往復することができたという程度であったが、補助がある場合は訓練中を通して5往復以上することができた。補助のある場合の1回目の訓練データを図6に示す。屈曲(掌屈)側および伸展(背屈)側の表面筋電位が、適切でないときにも持続的に小さく発生しているが、目標角度に応じて瞬間的ではあるが、適切な筋からの大きな表面筋電位の発生を確認することができる。この条件で繰り返し操縦することで、ロボットアームの運動に合わせて、随意的に適切な筋から表面筋電位を発生させる訓練になると考えられる。

以上で得られた研究成果から、操縦課題の達成度に応じて、このような補助の効果を段階的に減らしていくことで上達を促し、継続的な訓練を可能にすることができれば、新しいリハビリ訓練システムの発展と適用範囲の拡大に繋がると期待できる。

#### <引用文献>

- 川平和美：片麻痺回復のための運動療法 - 川平法と神経路強化的促通運動療法の理論、医学書院、2006
- S. Kubota, et.al.: Feasibility of Rehabilitation Training with a Newly Developed Wearable Robot for Patients with Limited Mobility, Physical Medicine and Rehabilitation, 94-6, pp.1080-1087, 2013.

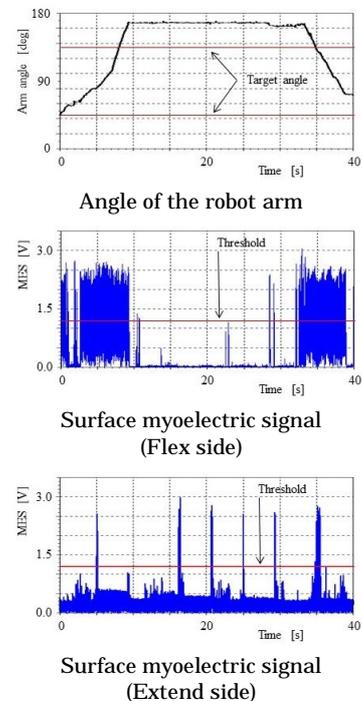


図5 自動制御による補助なし

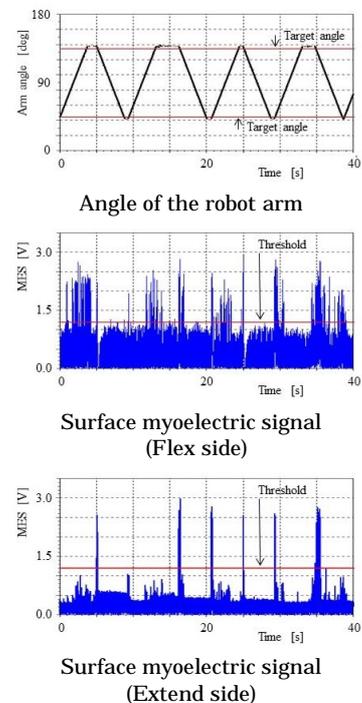


図6 自動制御による補助あり

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Hayashi, T. Sawada, T. Kinugasa, and K. Yoshida	4. 巻 1065
2. 論文標題 On facilitating method for skill acquisition of robot arm manipulation using surface myoelectric signals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1065/17/172004	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 下田 直樹, 林 良太, 衣笠 哲也, 吉田 浩治
2. 発表標題 表面筋電位を用いて操縦するロボットアームの操縦訓練支援システム - 訓練の難易度を段階的に変更する操縦訓練手法の提案 -
3. 学会等名 計測自動制御学会第20回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Hayashi, T. Sawada, T. Kinugasa, and K. Yoshida
2. 発表標題 On facilitating method for skill acquisition of robot arm manipulation using surface myoelectric signals
3. 学会等名 XXII World Congress of the International Measurement Confederation（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田拓弥, 林良太, 酒井孔士, 山川権一郎, 衣笠哲也, 吉田浩治
2. 発表標題 表面筋電位で操縦するロボットアームの操縦訓練を支援するシステムの試作
3. 学会等名 計測自動制御学会第19回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田拓弥、林良太、幸田稜平、佐渡功樹、衣笠哲也、吉田浩治
2. 発表標題 表面筋電位で操縦するロボットアームの操縦技能獲得を支援する方法についての一考察
3. 学会等名 計測自動制御学会第18回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐渡功樹、林良太、澤田拓弥、幸田稜平、衣笠哲也、吉田浩治
2. 発表標題 筋電センサを用いたロボットアームの操縦技能獲得を促進する条件について
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第56期総会講演会
4. 発表年 2018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
研究分担者	吉田 浩治  (Yoshida Koji)  (00254433)	岡山理科大学・工学部・教授   (35302)	
研究分担者	衣笠 哲也  (Kinugasa Tetsuya)  (20321474)	岡山理科大学・工学部・教授   (35302)	