

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11199

研究課題名（和文）訓練の難易度を段階的に変えて随意的な筋電位の発生を促すリハビリ訓練システムの開発

研究課題名（英文）Development of rehabilitation support system for facilitating surface myoelectric signals by use of training scheme with changing difficulty level

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：手関節の伸展・屈曲筋からの表面筋電位信号により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用いて、訓練の難易度を段階的に変えることで訓練者の負担を軽減し、継続的な訓練を可能とする訓練手法を提案した。健常者数名の協力をもとに訓練実験を行った結果、以下の研究成果が得られた。提案する訓練手法で、訓練の間の休憩時間の調整と1日の訓練回数の上限の設定を施すことで訓練者の疲労を低減することができた。また、無理のない訓練の達成条件を設定することで、難易度の低い段階から高い段階まで、途中で断念することなく訓練を継続することができた。そして継続的な訓練を実施した結果、訓練効果を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

開発した訓練システムを用いて健常者を対象とした訓練実験を行った結果、訓練課題の達成を容易にしてから段階的に難易度を変える手法で継続的な訓練が可能となり、訓練効果が得られることを確認した。リハビリ訓練を開始する初期の片麻痺患者にとって、訓練課題を容易に達成できることは、精神的にも肉体的にも訓練の負担が軽減されるので重要な意味を持つ。訓練を継続することができれば、神経路の強化と再構築が促されるので、提案する訓練システムを片麻痺患者に適用することができれば、回復効果が得られるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a training scheme that can reduce training burdens and conduct continuous training by changing difficulty level for the developed rehabilitation support system. The developed rehabilitation support system is composed of a simple 1-link robot arm which is controlled by estimating the wrist motion from the surface myoelectric signals on the forearm. We conducted training experiments through the voluntary cooperation of several subjects who were healthy young males. Then we got the following results. The proposed scheme could reduce fatigue of the subjects by adjusting rest period and setting maximum number of training times. The subjects could train through all difficulty levels by setting each training goals appropriately. As the results of the training experiments, we confirmed the efficiency of the proposed training scheme.

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

脳卒中などの後遺症では、傷ついた脳細胞は再生しないため、麻痺した四肢の運動機能の回復は困難とされていた。しかし、脳科学の進歩と新しいリハビリ手法の発展により、脳の可塑性が明らかになり、促通運動療法による飛躍的な運動機能の回復が望めるようになってきた(川平、2006)。ただし、医師や作業療法士による徒手的な運動療法では、人的および時間的な制約が問題となっている。その一方で、近年、筋電位信号を用いたアシストロボットによる片麻痺上肢や下肢のリハビリ支援システムが開発され、その有用性が認められてきている。ただし、これら既存のシステムは訓練時の運動を他動的にアシストするものであり、従来法は随意的な運動機能を回復するための神経路の強化に効果的であるとはいえない。また、筋電位の特性は個々によって異なるため、これら既存のシステムを患者が使用できるようになるために多大な努力と訓練が必要となっているのが現状である。以上の背景から、患者の負担を軽減し、より簡易で効果的な訓練を可能とする筋電位信号を用いた促通運動療法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、手関節の掌屈・背屈運動のリハビリ訓練において、脳から適切な筋までの神経路の強化と再構築を促し、訓練者が随意的に適切な筋の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。

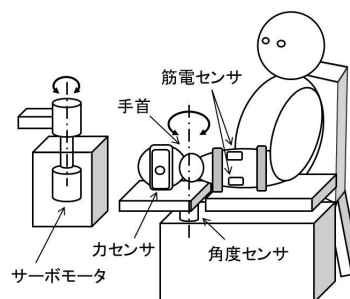
- (1) わずかな強さの表面筋電位に対応できるロボットアーム操縦訓練システムを構築する。
- (2) 訓練の難易度を段階的に変えて訓練の負荷を軽減することで、持続的な促通訓練を可能にする訓練手法を考案する。
- (3) モニタに訓練課題を提示するノートPCを用いた可搬型訓練システムを併せて開発する。

3. 研究の方法

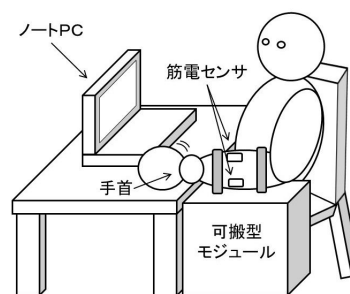
(1) わずかな強さの表面筋電位に対応できるロボットアーム操縦訓練システムを構築する。まず、図1-(i)に示すように、手関節の掌屈と背屈に関する筋の表面筋電位を筋電位センサで測定し、測定した表面筋電位が設定した閾値を超えたとき、超えた値に比例した速さでロボットアームが回転するようにコンピュータ制御された操縦訓練装置を作成する。そして、ロボットアームを指定した角度に繰り返し回転させることで、脳から適切な筋までの神経路を強化する訓練課題を設定する。つぎに、操縦訓練装置に不慣れな者や適切な筋から表面筋電位を発生させることが難しい者に対して、閾値レベルの表面筋電位をわずかでも感知した際に、自動制御により容易に訓練課題を達成できるようにする。

(2) 訓練の難易度を段階的に変えて訓練の負荷を軽減することで、持続的な促通訓練を可能とする訓練支援システムを開発する。まず、前述の訓練課題の達成が容易な条件のままでは上達しないので、難易度を段階的に変えて、最終的に随意的な表面筋電位の発生が必要となる条件での操縦訓練に至る手法を構築する。つぎに、訓練時にコンピュータに取り込んだデータをもとに、難易度に合わせた課題達成度と訓練者の状況を分析する方法を確立する。そして、その結果を用いて訓練の難易度を段階的に変更する手法を考案する。また、訓練前後で実施する条件の等しい評価試験を設定し、それらの課題達成度を比較することで訓練の効果を評価して、提案する訓練システムの有用性を確認する。

(3) モニタに訓練課題を提示するノートPCを用いた可搬型訓練システムを併せて開発する。まず、筋電位信号を用いたロボット操縦システムは、リハビリ運動のアシストに利用できるだけでなく訓練意欲の向上にも役立つ。しかし、ロボットの設置に時間とコストの問題があり、訓練する場所を選ばなければならない問題もある。そこで図1-(ii)に示すように、ノートPCのモニタに、筋電位信号に応じて運動する仮想的なアームを訓練者に提示することで、在宅でも簡易的な訓練を可能にする可搬型訓練システムを開発する。ノートPCのモニタに提示するアームの運動は、訓練者の発生する筋電位に連動させることで、視覚刺激によるバイオフィードバックの効果を高めるように工夫する。そして、複数の被験者(健康者)を対象に可搬型訓練システムを用いた訓練を実施して、訓練前後の評価試験の課題達成度の変化をみることで可搬型訓練システムの有用性を確認する。



(i) ロボットアーム (設置型)

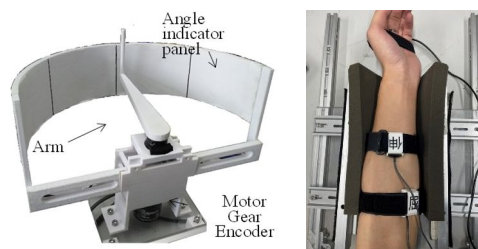


(ii) モニタ上仮想アーム (可搬型)

図1 操縦訓練システム

4. 研究成果

(1) わずかな強さの表面筋電位に対応できるロボットアーム操縦訓練システムを構築した。図2-(i)にロボットアームを、図2-(ii)に入力部を示している。入力部において手関節の屈曲筋および伸展筋に張り付けた表面筋電センサ (ID2PAD: 追坂電子機器製) で測定した表面筋電位により、ロボットアームが回転する。ロボットアームにはアームの角度が視覚的に確認できるように角度盤を設けた。角度盤には訓練時にアームを動かす範囲を示す線が45度と135度の部分に示されている。ロボットアームを回転させ、45度と135度(以下、目的角度と呼ぶ)の間を往復させることで訓練を行う。訓練課題は、制限時間40秒以内にできるだけ往復回数を多くすることとする。制限時間内にカウントされる往復回数を訓練の課題達成度の評価対象とする。手関節の屈曲筋または伸展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さで目標角度を増減させて、ロボットアームの回転角度を目標角度に追従するように制御する。操縦時は、屈曲筋と伸展筋から交互に適切な表面筋電位が発生していることが望ましいが、操縦に不慣れた初心者は適切な表面筋電位を発生させることが容易ではない場合がある。特に、操縦者が脳卒中片麻痺患者である場合は脳からの命令が筋に正しく伝わらないため、随意的に表面筋電位を発生させることが困難な状況にある。そこで、訓練の難易度を大幅に下げ課題の達成を容易にすることを考えた。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(屈曲筋または伸展筋)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的角度に到達するまで制御する。なおその際、不適切な筋(伸展筋または屈曲筋)からの表面筋電位の発生には、かかわらないこととする。操縦に不慣れた右利きの健常者1名の協力で、左手の訓練実験を行った。1回目に難易度を下げない条件で操縦訓練を行ったときのロボットアームの制限時間40秒以内の往復回数がわずか2回であったのに対して、訓練の難易度を大幅に下げた条件では5回の往復回数を達成することができた。



(i) ロボットアーム (ii) 入力部

図2 操縦訓練システム

(2) 訓練の難易度を段階的に変えて訓練の負荷を軽減することで、持続的な促通訓練を可能とする訓練手法を考案した。訓練の難易度を下げたままでは上達しないので、難易度を段階的に変えて、最終的に随意的な表面筋電位の発生が必要となる条件での操縦訓練に至る仕組みを構築した。訓練の難易度は上述の大幅に下げた条件を最も低い段階と定めLv1とする。そして、もとの難易度を下げない条件を最も難易度が高い段階と定めLv7として、以下の7段階の条件を設定した。

(Lv1): 目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が一瞬でも閾値を超えた後、不適切な筋の表面筋電位の値に関わらずロボットアームが一定速度で目的角度に回転するように制御する。この条件では持続的に筋を緊張させておく必要がなく、不適切な筋の緊張を意識する必要がないので訓練の負荷は低い。

(Lv2): 目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が一瞬でも閾値を超えた後、ロボットアームが一定速度で目的角度に回転するように制御する。ただし、不適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えている間はロボットアームの速度を遅くして目的角度に回転するように制御する。この条件では、持続的に筋を緊張させておく必要がないが、不適切な筋の緊張を緩めることを意識する効果が期待できる。

(Lv3): 目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が一定時間以上閾値を超えた後、ロボットアームが一定速度で目的角度に回転するように制御する。ただし、不適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えている間は、ロボ

表1 各難易度の難易度移行条件

Level	難易度移行条件	
	必要往復回数(*)	必要な(*)の連続成功回数
Lv1	5 往復	3 回連続
Lv2		
Lv3	4 往復	4 回連続
Lv4	訓練前試験(Lv7)の 往復回数+1 回 または 5 往復	3 回連続
Lv5	訓練前試験(Lv7)の 往復回数+1 回 または 4 往復	
Lv6	訓練前試験(Lv7)の 往復回数+1 回	

ットアームの速度を遅くして目的角度に回転するように制御する。この条件では一定時間以上適切な筋を緊張させる必要があるため、表面筋電位を随機的に発生させることの訓練効果が期待できる。さらに不適切な筋の緊張を緩めることを意識する効果も期待できる。

(Lv4)：目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えているとき、不適切な筋の表面筋電位の値に関わらずロボットアームが一定速度で目的角度に回転するように制御する。この条件では適切な筋の表面筋電位の値が閾値より小さくなるとロボットアームの回転は止まってしまうため、持続的に適切な筋から表面筋電位を発生させることの訓練効果が期待できる。

(Lv5)：目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えているとき、ロボットアームが一定速度で目的角度に回転するように制御する。ただし不適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えている間はロボットアームの速度を遅くして目的角度に回転するように制御する。この条件では適切な筋の表面筋電位の値が閾値より小さくなるとロボットアームの回転は止まってしまうため、持続的に適切な筋から表面筋電位を発生させることの訓練効果が期待できる。さらに、不適切な筋の緊張を緩めることを意識する効果も期待できる。

(Lv6)：目的角度に対して、適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えているとき、表面筋電位の値に比例した速度でロボットアームが目的角度に回転する。ただし不適切な筋の表面筋電位の値が閾値を超えているときはロボットアームの回転は止まる。この条件では適切な筋の表面筋電位の値に応じてロボットアームの回転速度が変化するので、訓練の課題達成度を向上させることを意識することにより随機的に適切な筋の表面筋電位を発生させる訓練効果が期待できる。さらに不適切な筋の緊張を緩めることを意識する効果も期待できる。

(Lv7)：屈曲筋または伸張筋の表面筋電位の値が閾値を超えているとき、表面筋電位の値に比例した速度でロボットアームが、屈曲筋または伸張筋に対応した方向に回転する。ただし屈曲筋と伸張筋の両方の表面筋電位の値が閾値を超えているときはロボットアームの回転は止まる。これは元の訓練の難易度を下げる条件である。

以上の条件での訓練の効果は、各難易度での訓練の前後で Lv7 の評価試験を行い、それらと比較したときの課題達成度（制限時間 40 秒内の往復回数）の増減で評価することにした。

複数の健常者を対象に各難易度の訓練を実施して、訓練の難易度を移行する条件を検討した。各難易度での制限時間内で必要な往復回数を設定し、さらにその課題を連続で達成する必要回数を設定することで、これらをつぎの難易度での訓練に移行するための条件（難易度移行条件）とした。ただし、制限時間内での必要な往復回数を過度に大きく設定すると、難易度移行条件を満たすことができずに訓練の途中で断念する事例が生じた。そこで難易度移行条件を見直すとともに、訓練の間の休憩時間を十分に設定し、さらに 1 日の訓練回数に上限を設けることにした。その結果、健常者を対象とする訓練実験では、途中で訓練を断念する事例は生じなくなった。見直して設定した訓練移行条件を表 1 に示す。

提案手法の試みの研究成果を第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会にて発表した。その際、研究の取組みが高く評価され、SI2020 優秀講演賞を受賞する

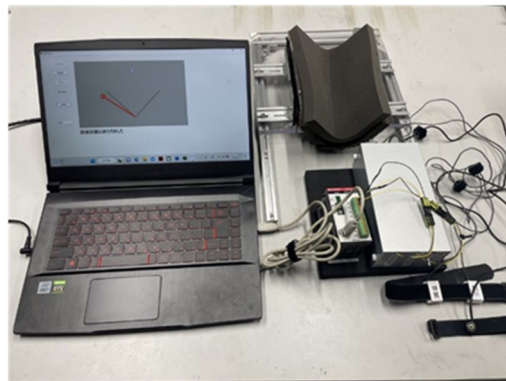


図3 可搬型訓練システム

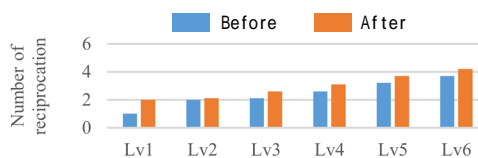
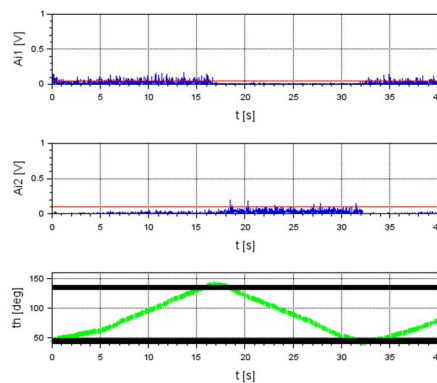
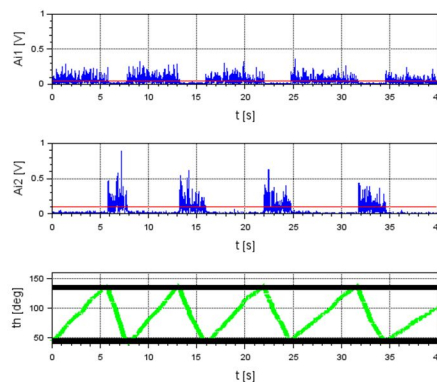


図4 訓練前後の Lv7 の課題達成度の推移



(i) 訓練前の評価試験



(ii) 訓練後の評価試験

図5 訓練前後の Lv7 の評価試験の比較

ことができた (下田、2020)。

(3) モニタに訓練課題を提示するノートPCを用いた可搬型訓練システムを開発した。図3に装置全体図を示す。設置型のロボットアームではなく、ノートPCのモニタ上に筋電位信号に応じて運動する仮想的なアームを提示することで、在宅でも簡易的な訓練を可能にする可搬型訓練システムとなっている。複数の健常者の協力を得て訓練実験を実施したところ、設置型の訓練システムと同様に、訓練課題の達成が容易な条件から最終的に随意的な表面筋電位の発生が必要となる条件での操縦訓練を実施することができた。各難易度での訓練前後に行った評価試験での課題達成度の推移の一例を図4に示す。訓練を重ねるごとに評価試験の課題達成度が上昇している様子が分かる。このときの訓練開始前の評価試験での時系列データとすべての難易度の訓練を終えた後の評価試験での時系列データを図5に示す。各図の上段が屈曲筋の筋電位、中絶が伸展筋の筋電位、下段がアームの回転角度を示している。提案手法による訓練の前後において、筋電位の上昇とアームの往復回数の増加を確認することができた。

この可搬型訓練システムを吉備高原医療リハビリテーションセンター (リビングラボ:厚生労働省「介護ロボットの開発・実証・普及のプラットフォーム」) に持参したところ、リハビリ現場の医師と療法士から良好な評価を受けることができた。

以上で得られた研究成果は、提案する訓練システムの改良と整備を進めて臨床現場での使用可能性を高めることができれば、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ものと期待できる。

<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

下田直樹、林良太、衣笠哲也、吉田浩治：随意的な表面筋電位の発生を促すためのロボットアーム操縦訓練支援システム - 難易度を段階的に上げる操縦訓練手法の適用例 -、第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、pp.248-252、2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Ryota Hayashi, Naoki Shimoda, Tetsuya Kinugasa, Koji Yoshida	4. 巻 33
2. 論文標題 Facilitative Exercise for Surface Myoelectric Activity Using Robot Arm Control System - Training Scheme with Gradually Increasing Difficulty Level -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 851 ~ 857
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0851	査読の有無 有
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 若宮大河, 林良太, 吉田浩治, 衣笠哲也
2. 発表標題 随意的な表面筋電位の発生を促す手関節リハビリ訓練支援システム - 臨床現場での使用可能性の検討 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 若宮大河, 林良太, 國富裕樹, 衣笠哲也, 吉田浩治
2. 発表標題 随意的な表面筋電位の発生を促す手関節リハビリ訓練支援システム
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 立花竜登, 林良太, 永野燎, 下田直樹, 衣笠哲也, 吉田浩治
2. 発表標題 随意的な表面筋電位の発生を促すためのロボットアーム操縦訓練支援システム - 継続的な訓練による筋電強度の変化について -
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

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 随意的な表面筋電位の発生を促すためのロボットアーム操縦訓練支援システム
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020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)	

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
---------	---------