

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K17593

研究課題名（和文）機械学習による表面筋電図解析プログラムを用いた運動方向判定精度の検証

研究課題名（英文）Verification of accuracy in determining direction of motion using program of surface electromyography analysis by a machine learning

研究代表者

桑原 渉（Wataru, Kuwahara）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・特任助教

研究者番号：70932226

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、手指運動アシストデバイスを装着した状態での表面筋電図制御プログラムの運動方向判定精度を検証し、その精度を向上させるアルゴリズムを構築することであった。「脳卒中後運動麻痺者に対する手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張の実現可能性研究」、「脳卒中運動麻痺者の重症度を自動で判別するためのアルゴリズム構築」を実施した。2つの研究結果から、患者の重症度を自動判別するアルゴリズムが構築でき、そのアルゴリズムを使用することで、脳卒中後運動麻痺者に対して、高い運動方向判定精度の表面筋電図制御プログラムが搭載された手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張が実現可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、難治性である脳卒中後の上肢運動麻痺に対して、日常生活における麻痺手の使用頻度向上や運動機能拡張を図ることが可能な手指運動アシストデバイスの実用化に資することができる。慢性期脳卒中後重度運動麻痺者に対して、手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張が実現可能であることが示唆されたため、これまで麻痺手を不使用中で生活に困難を感じていた患者に対して適用可能性がある。さらに、本研究で構築した脳卒中運動麻痺者の重症度を自動で判別するためのアルゴリズムは、患者に適用する治療を選択するうえでも有用であり、運動機能検査と筋電図検査を実施すれば、その患者に有効な治療選択肢を提供できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to verify the accuracy of the surface electromyography control program in determining the direction of movement when a hand motor assist device, and to construct an algorithm to improve the accuracy. 'Feasibility study of motor function extension with hand motor assist devices for post-stroke motor paraplysis' and 'Algorithm construction for automatic determination of severity of stroke motor paralysis' were carried out. The results of two studies show that an algorithm for automatic identification of patient severity can be constructed and that, using this algorithm, motor function augmentation with a hand motor assist device equipped with a surface electromyography control program with high motor direction determination accuracy can be achieved for post-stroke patients with motor paralysis.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：リハビリテーション ロボティクス 機械学習 決定木分析

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の学術的背景

1) 重度手指麻痺回復の困難性とそれに対するアプローチ

これまで、脳卒中者の手指運動麻痺の治療は、その困難さから諦められていたといっても過言ではない。脳卒中者の手指運動麻痺に関して、発症後6ヵ月時点で、55%の患者は手指の巧緻性があると定義される状態まで回復しないことが報告されている (Winters C et al, PLoS ONE, 2016)。重度手指運動麻痺を呈した脳卒中者は、日常生活で麻痺側手指を使用しないため、学習性不使用により、回復期病院退院後さらに日常生活の使用頻度の低下や運動機能の低下が起こる。そこで申請者の研究チームは、治療としてではなく、代替機能として日常生活での手指運動をアシストするデバイスの開発に取り組み、関連特許3本を出願済みである (運動解析装置, システム及びプログラム, 並びにリハビリテーションシステム, 特願 2020-092916; 指動作補助装置, 特願 2020-076985; 指動作補助装置, 特願 2018-127113)。このことにより、日常生活で麻痺側手指を使用する頻度が劇的に増加し、学習性不使用が改善される。さらに、使用頻度の向上に伴い、神経系機能が変化することが見込まれ、アシストのみではなく、在宅エクササイズによる神経機能の回復にまで寄与する可能性がある。

2) 意図に基づいてシステムを使用することの困難性

開発に取り組んできたデバイスには、随意を示す生体信号として表面筋電図を利用する。麻痺者から得られる信号の判定は通常は非常に困難である。手指を伸展あるいは屈曲させる筋は複数の筋が混在する前腕に位置しており、手関節を介して手指の動きを制御する。その活動パターンは手関節の角度や前腕の位置によっても変化し、非常に複雑である。さらに運動麻痺を呈した患者は、筋活動が起こりやすい筋(手指を屈曲させる筋)と起こりにくい筋(手指を伸展させる筋)があり、患者が手指を伸展しようとしても手指を屈曲するための筋の筋活動の方が大きく起こってしまうことが多い。このような理由から、患者が意図した運動方向を検出することは非常に難しく、患者個別の筋活動に応じた判定機能が必要となる。

3) 本研究課題で使用するデバイス

本研究課題で取り扱うデバイスは、対象の運動意図を生体信号として取得する筋電計 (図1①) と、その信号を入力信号として計算処理、つまり機械学習プログラムを実行するマイコンコンピュータ (図1②) とで構成される。それにより、被験者個別の筋活動パターンから、この被験者の意図を読み取り、それを判定する。その結果はマイコンコンピュータから手指運動をアシストするデバイスに伝送され、デバイスの駆動 (手指を曲げるもしくは伸ばす方向への駆動) に反映される (図1③)。

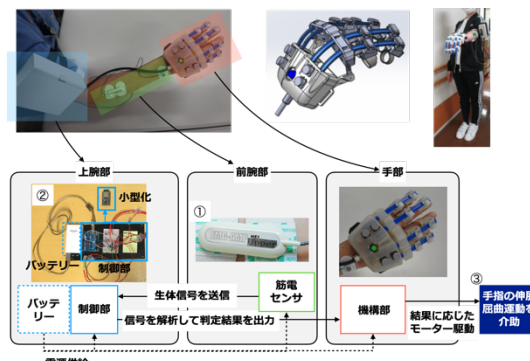


図1. 手指運動アシストデバイスの概要図

4) 研究課題における Clinical Question

過去の研究結果から、現在の機械学習プログラムが、健常者のデバイス非装着下において、高い精度で運動判定を行うことができることが示されている。健常者では表1に示す通り、伸展および屈曲ともに高精度で手指運動を判定することが可能であった。しかしながら、脳卒中後運動麻痺者においては、デバイス非装着下においても、患者により精度の個人差が大きかった (表1)。この原因に患者個々で麻痺の重症度が異なることや、患者によって課題を実施しやすい肢位の違いがあることが考えられる。本研究課題の Clinical Question は、麻痺の重症度に応じて、筋電センサを貼付する対象筋や運動課題を変えて表面筋電図信号を取得するアルゴリズムを構築することで、運動方向判定精度が向上するかどうかである。さらにこれまで行ってきた精度検証は、デバイス非装着下においてのみの計測であった。本研究においては、デバイス装着下で表面筋電図信号を取得し、そのときの精度を検証する。デバイス装着下では、バッテリーや電子基板などからのノイズ混入により、信号ノイズ比の低値が予想され、判定精度が低下する可能性がある。上記の麻痺の重症度に応じたアルゴリズムの構築またはフィルタ値の設定などの対応により、その精度が維持されるかどうか検証する。

表1. デバイス非装着下での機械学習プログラムによる運動方向判定精度

	対象者数	手指伸展の判定精度		手指屈曲の判定精度	
		感度	陽性適中率	感度	陽性適中率
健常者	12	0.97 ± 0.67	0.96 ± 0.10	0.98 ± 0.08	0.96 ± 0.11
脳卒中後運動麻痺者	62	0.57 ± 0.40	0.71 ± 0.32	0.55 ± 0.42	0.77 ± 0.35

2. 研究の目的

本研究の目的は、**健常者および脳卒中後運動麻痺者において、手指運動アシストデバイスを装着した状態での表面筋電図制御プログラムの運動方向判定精度を検証すること**である。これまで後ろ向きにデータ解析を行い、運動方向判定アルゴリズムの精度検証を行ってきた。その結果、脳卒中後運動麻痺者においては、患者による個人差が大きかった。さらにこれまでの検証は、実際にデバイスを装着しない状態での表面筋電図信号の取得であった。本研究は、①信号ノイズ比が低くなった状態における判定精度の検証、②対象者個々の麻痺の重症度ごとに、筋電センサを貼付する対象筋や運動課題を変えて表面筋電図信号を取得するアルゴリズムの構築を実現する。機械学習に基づく表面筋電図制御プログラムによる運動方向判定アルゴリズムを確立させ、麻痺が重度な方を含めたすべての運動麻痺者の意図を代替可能とすることが本研究の大局的な目標である。

3. 研究の方法

本研究は2つの内容で構成された。

1) 脳卒中後運動麻痺者に対する手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張の実現可能性研究

予備実験的に、5名の健常者を対象に、手指運動アシストデバイスを装着した状態で運動方向判定精度を検証したところ、非常に高精度で判定が可能であった。より臨床で早く使用できるようにすることを目的に、本研究では、慢性期脳卒中後運動麻痺者を対象とした研究をデザインした。8名の慢性期脳卒中後運動麻痺者が本研究に参加した。本研究のプロトコルは以下の通りであった。

- (1) ベースラインの身体機能を評価するため、Action Research Arm Test (ARAT) を実施
- (2) 手指運動アシストデバイス非装着下において、運動機能検査である Box & Block test (BBT) を実施
- (3) 開発中の手指運動アシストデバイス (図1) を対象者の麻痺手に装着
- (4) 上腕、前腕、手の内在筋の合計7筋に表面筋電図計測器 Trigno™ (Delsys, Inc., US) を貼付し、各対象者に応じて、動作を判定しやすい2筋の組み合わせを決定するための筋電検査を実施
- (5) (4) で決定した2筋を用いて学習課題を実施。学習課題は、BBTの課題に類似した Grip や Release の課題を中心として、対象者の状態に応じて決定。この学習課題は、手指伸展・手指屈曲・安静という教師ラベルと課題中の表面筋電図信号を紐づけるために実施
- (6) 学習課題で取得したデータをマイクロコンピュータに伝送
- (7) 手指運動アシストデバイス装着下で再度 BBT を実施
- (5) で取得したデータを用いて、交差検証により、手指伸展・手指屈曲それぞれにおいて、感度、陽性的中率を算出した。さらに、(2) と (7) の BBT の結果を、Wilcoxon の符号付き順位検定を用いて比較した。

2) 脳卒中運動麻痺者の重症度を自動で判別するためのアルゴリズム構築

さらなる精度改善を図ることを目的に、脳卒中運動麻痺者の重症度を自動判定するアルゴリズムを考案し、精度検証を行った。重度～中等度の上肢運動麻痺を呈した脳卒中後運動麻痺者95名を対象とした。1人の経験のあるリハビリテーション専門医が、対象者を最重度、重度、中等度という3つのグレードに分類した。この分類は、臨床所見と表面筋電計から取得した手指伸筋の筋活動に基づき総合的に判断した。全対象者は、Fugl-Meyer Assessment 上肢運動機能項目 (FMA-UE) と表面筋電計を用いた検査 (筋電検査) を実施した。筋電検査は、総指伸筋 (EDC) と深指屈筋にセンサを貼付し、課題は手指の伸展・屈曲運動を3秒ごとに13回繰り返す動作とした。FMA-UE は合計点と下位項目の A~D 項目のスコアも変数として扱い、筋電検査は量的な値と質的な値の合計10変数を変数として扱った。従属変数を熟練者が選択した治療法とし、独立変数を1) FMA-UE のみ、2) FMA-UE と筋電検査で取得した代表値両方、の2パターンで決定木分析を実施した。95名中59名は選択された治療法を実際に実施し、治療前後の FMA-UE スコアを比較した。

4. 研究成果

1) 脳卒中後運動麻痺者に対する手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張の実現可能性研究

本研究における各対象者の結果および平均値を表2に示す。ベースラインの運動機能について、ARAT 合計の平均は 6.50 ± 6.44 点であり、参加した対象は重度の運動麻痺を呈した患者であった (ARAT 合計が10点未満は巧緻性なしと分類: Kwakkel G et al, Stroke, 2003)。BBT は非装着 2.25 個 vs. 装着 3.25 個であり、有意に向上した ($p = 0.039$, 効果量 0.73)。手指伸展の判定精度について、感度は 0.89 ± 0.08 、陽性的中率は 0.73 ± 0.15 、手指屈曲の判定精度について、感度は 0.84 ± 0.08 、陽性的中率 0.67 ± 0.17 であり、研究開始前のデバイス非装着下の精度よりも高い結果であった。

これらの結果は、慢性期脳卒中後重度運動麻痺者に対して、手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張が実現可能であることが示唆された。さらに、運動方向判定精度の向上は、各対象者に応じて動作を判定しやすい2筋を選択して学習を行ったことに由来すると考えられる。

表2. 各対象者における結果および平均値

No.	性別	損傷側	ARAT	Box & Block Test			手指伸展の判定精度		手指屈曲の判定精度		対象筋	
				なし	あり	変化量	感度	陽性的中率	感度	陽性的中率	伸筋	屈筋
1	男	右	14	2	5	3	0.93	0.61	0.93	0.76	Triceps	FDP
2	男	右	2	0	1	1	0.75	0.57	0.87	0.68	Triceps	FCR
3	男	左	4	1	2	1	0.93	0.78	0.90	0.49	Triceps	FDP
4	男	左	4	0	2	2	1.00	0.80	0.71	0.60	ECR	FDP
5	女	右	1	0	0	0	0.81	0.57	0.75	1.00	Triceps	Biceps
6	男	右	5	1	1	0	0.83	0.65	0.89	0.51	ECR	FDI
7	男	左	3	0	0	0	0.90	0.95	0.90	0.75	ECR	FDI
8	男	左	19	14	15	1	0.93	0.90	0.80	0.60	Triceps	FDP
平均			6.50	2.25	3.25	1.00	0.89	0.73	0.84	0.67		
標準偏差			6.44	4.80	5.01	1.07	0.08	0.15	0.08	0.17		

なし：デバイス非装着，あり：デバイス装着，変化量：（デバイス装着）－（デバイス非装着），
Triceps：上腕三頭筋，ECR：総指伸筋，FDP：深指屈筋，FCR：橈側手根屈筋，Biceps：上腕二頭筋，FDI：第一背側骨間筋

2) 脳卒中運動麻痺者の重症度を自動で判別するためのアルゴリズム構築

決定木分析の結果、独立変数を 1) FMA-UE のみとした場合、得られたモデルの正判別率は 75.8%であった（図2）。独立変数を、2) FMA-UE と筋電検査で取得した代表値両方とした場合、得られたモデルの正判別率は 82.1%であった（図3）。2) の場合に選択された独立変数は、FMA-UE 合計点、手指伸展運動中における EDC の root mean square（RMS）値の平均値、EDC の RMS 値における屈曲運動中に対する伸展運動中の比、であった。

経験のあるリハビリテーション専門医が選択した治療法は、一般的な運動機能スコアのみよりも筋電検査結果も組み合わせた方が高い正判別率で分類できることが明らかとなった。筋電検査により、運動機能スコアのみでは判別できない熟練者の治療選択アルゴリズムを定量化できる可能性がある。

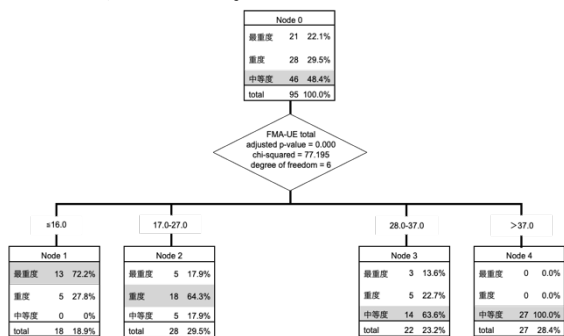


図2. 運動機能スコアのみを独立変数として投入した決定木モデル

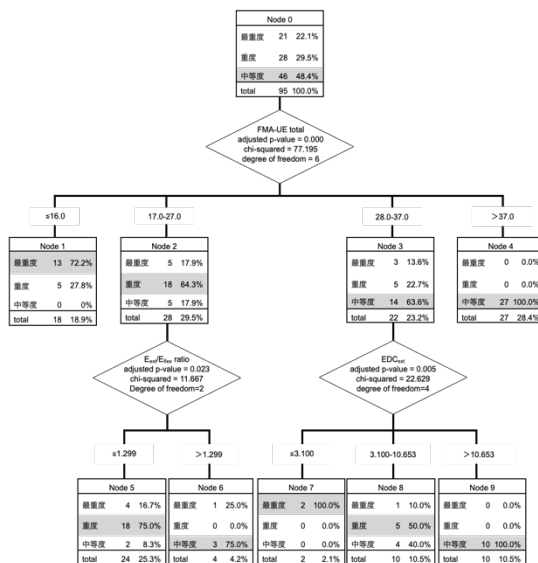


図3. 運動機能スコアと筋電検査で取得した代表値両方を独立変数として投入した決定木モデル

これら2つの研究結果から、運動機能スコアと筋電検査を実施し、患者の重症度を自動判別することで、手指運動アシストデバイスで対象とする筋を決定するアルゴリズム構築の一助となる。さらに、そのアルゴリズムにより決定された対象筋を手指運動アシストデバイスの生体信号として使用することで、慢性期脳卒中後重度運動麻痺者に対して、手指運動アシストデバイスによる運動機能拡張が実現可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Wataru Kuwahara, Tatsuya Mizuguchi, Kenya Tanamachi, Megumi Okawada, Yu Miyawaki, Takayuki Kamimoto, Yuka Yamada, Michiyuki Kawakami, Fuminari Kaneko
2. 発表標題 Hand-assist robot with a deep learning model for the automatic determination of finger movement direction using surface electromyography: Proof of concept study for clinical applications in patients with stroke
3. 学会等名 XXIV International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK) Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原渉, 川上途行, 上原雅広, 伊藤大将, 岡和田愛実, 棚町兼也, 奥山航平, 井上那築, 金子文成
2. 発表標題 リハビリテーション医療デジタルトランスフォーメーションを実現するためのシステムの開発および概念実証試験
3. 学会等名 リハビリテーション医療DX研究会第1回学術集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桑原渉, 岡和田愛実, 川上途行, 棚町兼也, 佐々木駿, 紙本貴之, 山田祐歌, 金子文成
2. 発表標題 脳卒中後重度上肢運動麻痺に対して運動機能レベルに適した治療を段階的に適用する治療戦略の有効性
3. 学会等名 第53回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桑原渉, 岡和田愛実, 川上途行, 棚町兼也, 佐々木駿, 紙本貴之, 山田祐歌, 金子文成
2. 発表標題 脳卒中後上肢運動麻痺に対する治療選択アルゴリズムの定量化
3. 学会等名 第28回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2023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
研究協力者	金子 文成 (Kaneko Fuminari)		
研究協力者	水口 達矢 (Mizuguchi Tatsuya)		
研究協力者	岡和田 愛実 (Okawada Megumi)		
研究協力者	棚町 兼也 (Tanamachi Kenya)		

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