

[研究助成 (A)]

筋電図, 機能的電気刺激, 触覚提示が仮想/拡張現実内で
インタラクティブに調和したバイオフィードバックシステムの開発Development of a biofeedback system in which EMG, FES, and tactile presentation are
interactively harmonized in virtual / augmented reality

2211024



研究代表者

大阪大学
大学院基礎工学部研究科

助教 松居和寛

[研究の目的]

脳卒中理学療法における「バイオフィードバック療法」は、国内ガイドラインでは臨床で行うことが強く勧められているが、直感性に乏しく未だ発展途上である。本研究の目的は、筋電図 (EMG)、機能的電気刺激 (FES)、触覚提示を利用し、以下の機能を持つ、まさに人間と機械がインタラクティブに調和したバイオフィードバックデバイスを開発することである。

- ・患者の発する EMG を用いて、「自身とは異なる身体」、「健康だったころの身体」を、仮想現実 (VR)・拡張現実 (AR) 空間内で制御するという体験を触覚と共に提供する。
- ・VR/AR 空間で指定した運動を、FES を用いて患者自身の身体に教示する。

[研究の内容, 成果]

我々が考案した FES による運動モデリングを活用する。これは、相反する作用を持つ複数の筋への協調的な FES を用いて刺激に対するヒトの身体の応答を神経筋骨格系モデル (NMSS モデル) として同定し、そのパラメータを定量的な指標として取得、ヘルスデータとして活用するものである。この指標を得ることはすなわち、末梢における神経伝達と筋のしなやかさを複合的に評価できる新しい検査手法と

言える。さらに、FES を EMG に置き換えることで、直接的な身体不自由の治療にも指標を活用する。これは、VR/AR 内に、健康時の指標、あるいは自身とは異なる指標が反映された身体オブジェクトを用意し、EMG で操作することで、「健康だったころの身体あるいは自身とは異なる身体を動かす」、いわば代替現実 (SR)-EMG-BFB として、小脳に存在すると言われる「内部モデル」の再学習を促す、というものである (特願 2021-36935)。また、この NMSS モデルは、そのまま FES のコントローラとしても活用でき、SR-EMG-BFB による視覚フィードバックだけでなく、FES を用いて実際に四肢を制御することで体性感覚のフィードバックも可能となる。

加えて、体性感覚へのフィードバックをより強化するために、ウェアラブルの触覚刺激装置も開発した。これらはローラ状の刺激部を回転させ指腹部に剪断刺激を与えるものと、ギア・ラック構造を用いて指尖部に圧覚刺激を与えるものである。

■ NMSS モデルを用いた EMG による運動予測

NMSS モデルを用いて、EMG から運動予測を行いそれを VR/AR 空間の仮想四肢に反映することで、EMG で操作する任意の特性を持つ仮想四肢が実現できるかを検証した。2名の被験者の上腕二頭筋・上腕三頭筋に電極を貼り付

け、それぞれ別の肘関節水平面内1自由度運動を行ってもらった。タスクは、被験者A：肘関節角度 $\theta=90^\circ$ から目標地点のマーカまで(60°程度伸展)1秒かけて肘を伸展させる運動を20回、被験者B：2点マーカ間(50°程度屈伸)を2秒と3秒周期で屈伸する運動を40秒間もしくは60秒間とした。EMGと関節角度を取得し、被験者Aは1回ごと、被験者Bは3周期ごとに切り出し平均化し、演算アルゴリズムに入力した。演算に用いるパラメータは任意とした。結果を図1に示す。

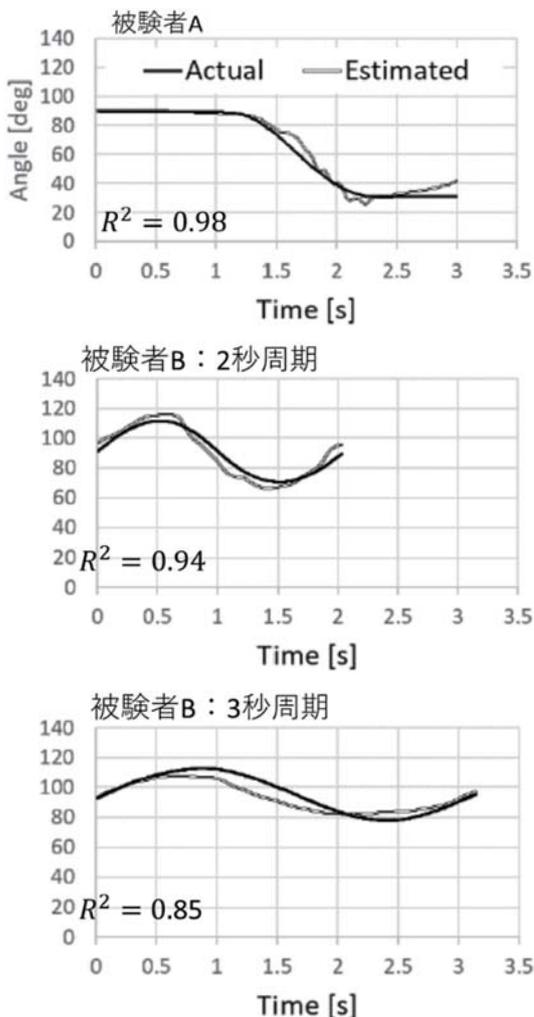


図1 予測角度と実測角度は3つの例で $R^2 \geq 0.8$ で良く一致している。ここからパラメータ決定式係数群は任意だが、少なくとも角度予測ができ得る組み合わせがあることがわかる。また、被験者Bにおいて、パラメータの決定(≒学習)は2秒周期の結果で行ったが、異なる2タスクを1パターンのパラメータ決定式係数群で予測できている点も注目すべき点である。

■ FES を用いた手指 MP 関節運動モデルの取得および駆動

指定した運動を FES で教示することを目的にヒト手指 MP (metacarpophalangeal) 関節に対し電気刺激を行った時の挙動の再現性および、挙動が NMSS モデルを用いて説明できるかを検証した。FES を連続的に入力し、6周期の平均と標準偏差を評価した。運動範囲の1.07~6.23% で再現性があった。これまでの研究から NMSS モデルは2次+むだ時間+2次という伝達関数で記述されることが示唆されたが、図2に示すように、より低次の2次+むだ時間の系でもボード線図に近似的にフィッティング可能であることを示すことができた。ただし、FES を入力した際の挙動は得られたモデルで説明するには姿勢等による非線形要素等の考慮が不足していることが示唆された。

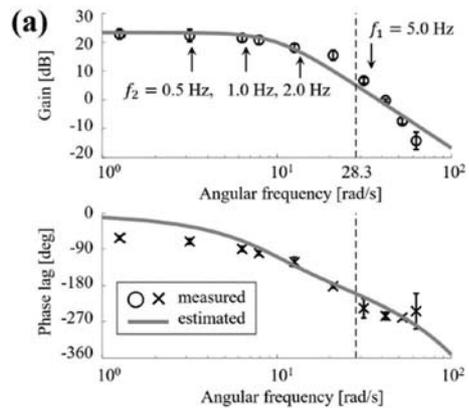


図2 2次遅れ+むだ時間でフィッティングしたボード線図の例

■ 触覚提示を行うデバイスの開発と触覚フィードバックの意義

触覚提示を実現するために、将来的にはウェアラブル化することを前提に、まずは据え置き型の剪断刺激デバイスを開発し、任意の知覚を与えられることを目的に刺激と知覚の関係性を定量化した(図3)。回転数と指を押し当てる押し込み力を入力パラメータとして、摩擦感、反発感、痛みという項目を7段階アンケートによって定量化し、3名の被験者のデータを用い

て任意の感覚を得るための数理モデルを求めた。当該モデルで別の被験者1名に任意の感覚を生じさせる実験を行ったところ、7段階評価に対して1未満の誤差で感覚を提示できた。



図3 剪断刺激提示装置。将来的には指先に装着するウェアラブル化を目指しており、小型なものを製作した。右図は実験時の示指の触れ方を表す。

また、ウェアラブルに示指指尖部に圧覚刺激を与えるデバイスを開発し、3名の被験者に対し2次元モニタ内に表示される奥行を持った仮想壁面を正しくなぞる補助ができるかを確認した(図4)。今後、デバイスによる介入効果がデバイス離脱後も持続することを示すことができれば、内部モデルが働くローカル座標ともいえる、身体図式への介入手法として提案することができると考えている。

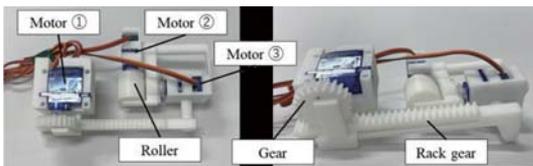


図4 圧覚刺激提示装置。ウェアラブル型であり、将来的に剪断刺激装置と結合することを考えている。

[今後の研究の方向, 課題]

今後以下の点を明らかにするために健常者での評価を進め、それと並行して協業先のメディカル分野のパートナーを探し臨床評価を進めていく。

- ・SR-EMG-BFBの介入効果
本助成によりSR-EMG-BFBの開発を進め、

EMGでVR空間内にある四肢オブジェクトを操作でき、そのオブジェクトに任意のシンプルな特性を持たせることができる図5のプロトタイプが完成した。今後SR-EMG-BFBによって内部モデルの再学習が可能かを検証していく。さらに触覚提示との結合によってその効果がどのように変化するかも検証する。

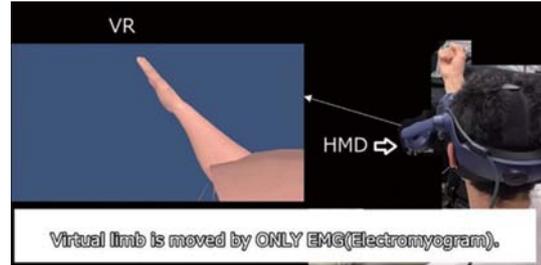


図5 開発したSR-EMG-BFBプロトタイプ

- ・モデル化手法の簡便化

モデル化手法の簡便化を進める。現時点で本指標を取得する検査システムは既存のものを利用している。現状の既開発システムは図6のように非常に大型で、手順も煩雑で検査に時間がかかり、かつ各ユニットが独立しているので構成が複雑である。まず肘関節1自由度に限定した上で、既開発システムを「小型化」「簡便化」し、システム全体を病院等で使用できるサイズ感まで洗練し、指標の再現性、身体的特徴と指標の関連性を検証していく。本助成により試作が完了したので検証を進めていく。

- ・EMGによる運動予測精度の向上

現状は、運動予測アルゴリズムに用いているパラメータは任意としているが、検査によって得られた値を設定することで、検査時に得られた随意運動をEMGから再現できるかを検証していく。

- ・FESによる制御の精度向上

姿勢等による非線形性の考慮が不足していることが示唆されており、簡便化されたモデル化手法を用いて様々な姿勢や条件におけるモデルを取得しその変化傾向を検証することで、現在のモデルを修飾していく。

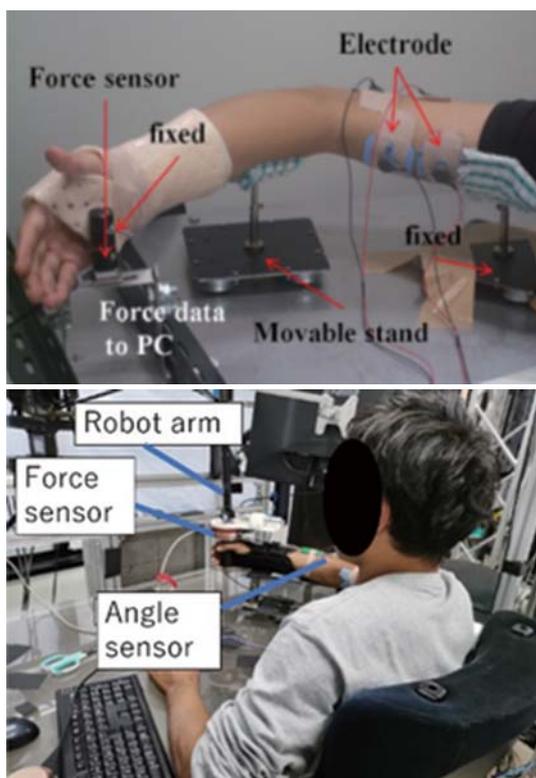


図6 これまでのシステム（肘関節水平面内1自由度用）。上：神経筋系同定システム（センサをアングルを用いて卓上に固定する必要があり大がかり）。下：筋骨格系同定システム（外力印加装置接続箇所の変換性がなく神経筋系同定システムとは異なるセンサを使わざるを得ず、また可動部の重力補償にキャスター付き手置台を用いており摩擦による抵抗がノイズ源になる）

[成果の発表、論文等]

[学会発表]

- 岡本湧人, 安藤哲也, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “内部モデルの再学習を目的とした仮想現実空間における視覚的筋電図バイオフィードバックシステムの開発 —— ヒト肘関節運動における平衡点の挙動に与える影響の検討 ——.” 第61回日本生体医工学会大会, 2022年6月28-30日; 新潟, O1-4-4-2.

- 安藤哲也, 岡本湧人, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “内部モデルの再学習を目的とした仮想現実空間における視覚的筋電図バイオフィードバックシステムの開発 —— ヒト肘関節剛性に与える影響の検討 ——.” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2022年6月1-4日; 北海道, 2A1-A12.
- 松居和寛, 安藤哲也, Gong Shuogang, 永井美和, 平井宏明, 西川敦. “内部モデルの再学習を目的としたモデルベースの筋電図バイオフィードバックシステムに関する提案.” 第19回日本神経理学療法学会学術大会, 2021年12月18-19日; オンライン開催: O8-1.
- 松居和寛, 安藤哲也, Gong Shuogang, 永井美和, 平井宏明, 西川敦. “筋協調を考慮した筋電図バイオフィードバックシステムの連続的な入力における角度計算精度検証.” 第10回日本支援工理学療法学会学術大会, 2021年12月4-5日; オンライン開催: a132-1.
- 奥野真輝, 松居和寛, 下城拓真, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “二次元視覚情報下でのヒトの奥行き知覚能力の分析と触覚フィードバックの意義.” 第39回日本ロボット学会学術講演会, 2021年9月8-11日; オンライン開催: 1K2-04.
- 松居和寛, 平井宏明, 西川敦. “機能的電気刺激により取得したヒト肘関節運動モデルを用いた筋電図による運動予測手法の検討.” 第60回日本生体医工学会大会, 2021年6月15-17日; オンライン開催: O3-6-3-5.

[その他]

- 特許出願: PCT/JP2022/4796. 出願日 2022年2月8日.
- 松居和寛. “表面筋電図および機能的電気刺激を用いた新しいバイオフィードバックシステムの研究.” 第6回 大阪大学豊中地区研究交流会, 2021年12月21日; オンライン開催.