



上肢関節の剛性感を共有する複数筋電気刺激インタフェース

Multi-Channel EMS Interface for Sharing Joint Stiffness Sensation of Upper Limb

藤井義織¹⁾, 鈴木康裕²⁾, モダル ハサン²⁾, 鈴木健嗣²⁾

Yoshiori FUJII, Yasuhiro Suzuki, Modar HASSAN, and Kenji SUZUKI

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yoshiori@ai.iit.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yasuhiko@ai.iit.tsukuba.ac.jp, modar@iit.tsukuba.ac.jp, kenji@ieee.org)

概要: 近年遠隔リハビリテーションの需要は高まっており、様々な病気や怪我に対してその効果が検証されてきた。しかしながら、特に脳神経リハビリテーションにおいては、徒手的な評価が一般的であり遠隔では理学療法士が患者に直接介入できないという課題が残る。そこで私たちは、視覚的に判断が困難である関節剛性の評価を対象とし、複数筋電気刺激によるインターフェースを開発した。性能評価により、複数筋電気刺激の強度の増大に伴い肘関節の抗力が増大する傾向が得られた ($R^2 > 0.6$)。知覚実験より、提案手法を用いた場合はビデオ会議システムを用いた場合に比べ大きく判別性能が向上することを確認した ($p = 0.0051 < 0.05$)。

キーワード: 筋電気刺激, 生体電位信号計測, 剛性感, 遠隔リハビリテーション

1. はじめに

遠隔リハビリテーション (TR) は、遠隔医療の一種であり、情報通信技術を活用して遠隔地からリハビリテーションを実施することである [1]。TR は、移動距離、時間、コストの障壁を軽減する取り組みとして注目されている [2]。

特に脳卒中、脳性麻痺においては、理学療法士が手技療法を用いての評価と治療に重点が置かれている。慢性期におけるリハビリテーション中、痙縮や拘縮などの関節の硬直が定期的かつ適切に評価されない場合、治療効果を示すことができず、患者の日常生活における重大な制限要因となる可能性がある。しかし、療法士が患者に直接介入できないことがボトルネックとなり TR への移行には課題が残る。

TR 環境において療法士が患者の状態を確認し、運動の指導を支援するために、これまで多くのコンピュータビジョンまたはロボットシステムに関する研究が報告されている。Pathirana ら [3] は、Kinect を使用したリアルタイム生体力学追跡システムを提案した。彼らのシステムは生体力学を監視できるが、視認可能な変位の生じない関節剛性の評価は極めて困難である。Lai ら [4] は、筋痙縮を評価するための手用外骨格ロボットを開発したが、各患者の自宅に特定の身体部位用のロボットシステムを設置することは費用対効果が十分ではない。また、徒手的手法に依存する療法士は、触力覚に基づいてリハビリテーションを実施するため、上記のような複雑なシステムを導入することに消極的である [5]。

BioSync[6] は、EMG 測定に基づく EMS を用いて、視

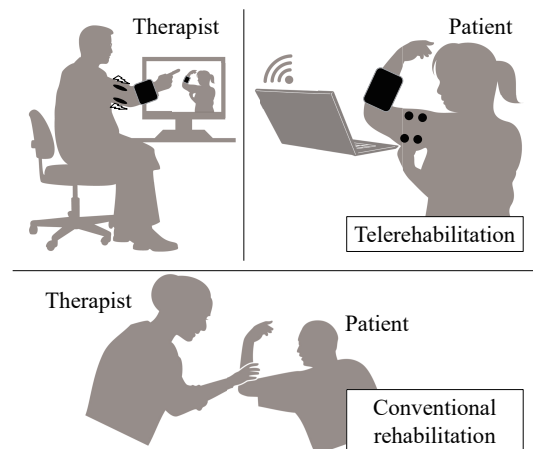


図 1: TR における剛性感共有の概念図

覚的または音響的な情報を使用せずに、デバイスユーザ間で手首筋の収縮タイミングを同期させる知覚共有デバイスである。しかし、本デバイスは単一チャンネルの筋を対象としており、関節の剛性感を共有することは非常に困難である。そこで、我々は、この技術を複数チャンネルに拡張することで、他者と人の関節の剛性感を共有できるという仮説を立案した。

本稿では、機械式アクチュエータを必要としない、複数 EMS による患者と療法士が感覚を共有する装着型インタフェースを提案する。関節の剛性評価への応用のため、複数 EMS による関節剛性変化の知覚特性を検証し、インタ

フェースを TR に適応させる可能性を探索することが本研究の目的である。

2. 提案手法

2.1 TR における剛性感共有の概念

図 1 に提案手法を用いて肘関節の剛性感を共有できるインタフェースの概念図を示す。「剛性感」とは、関節が硬い感覚および関節が運動しにくい感覚および痙縮感覚の総称として定義する。従来のリハビリテーションでは、療法士は、患者の筋状態、可動域、関節の硬さを評価するために通常触診を使用する。提案する TR では、患者は測定用デバイスを装着し、療法士は EMS 用デバイスを装着し、PC やタブレット端末上でコミュニケーションをとることを想定する。患者から測定された EMG 信号は処理され、療法士のデバイスに生体電気信号として送信される。療法士側で受信した信号に基づき、複数 EMS が療法士に適用され、関節の剛性感を共有する。

2.2 EMG に基づく EMS 強度の決定モデル

図 2 に提案手法の信号処理ブロック線図を示す。図中の A および B は異なる筋の部位を表す。提案手法は以下の手順で EMS 強度を決定する。

1. **EMG 信号の処理と正規化：**計測した EMG 信号を平滑化後、最大随意筋収縮 (MVC) 時の値で正規化し、筋活動レベル $E(t)$ を算出する。
2. **パルス幅の動的決定：**筋活動レベル $E(t)$ に比例して EMS のパルス幅 $\tau(t)$ をリアルタイムに決定する。
3. **刺激生成：**固定電圧 V_s ・周波数 f のもとで決定したパルス幅 $\tau(t)$ を持つ矩形波を生成し EMS を行う。

3. システム構成

3.1 EMG 測定ユニット

EMG 測定ユニットは患者が装着する。回路を制御するマイクロコントローラは ESP32-WROOM-32E を使用し、EMG センサから EMS 回路へ信号を送信する。EMG 測定用にはバンドパスフィルタ回路、増幅回路、絶対値処理および平滑化回路が搭載されている Myo Ware を使用する。

3.2 EMS ユニット

EMS ユニットは療法士が装置する。マイクロコントローラの ESP32-WROOM-32E を使用し、矩形波パルス信号を生成し、EMG 測定ユニットからデータを受信する。EMS の制御信号と刺激電極への入力電位を電気的に絶縁するために制御回路の損傷を防ぐためのリレー要素としてフォトカプラ (PC817) を使用する。3.7V 定格のリチウムイオンポリマーバッテリーを外部電源として使用し、筋刺激用の電圧を昇圧するために DC/DC コンバータ (LM2733) は使用する。刺激電極の直前に 10mA 定電流ダイオード (S-103T) を挿入し、人体へのリスクを回避するために電流を制限する。EMS 用の方形波パルス信号の振幅は 10-40 V、周波数は 1-200 Hz であり、最大パルス幅は 0-1000 μ s の範囲で変更可能である。本研究では、EMS による痛みや不快感を引

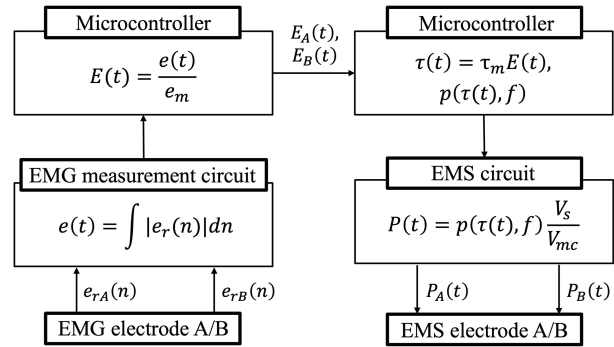


図 2: EMG に基づく EMS 強度の決定モデル

き起こす可能性が低いとされるパルス幅を 400 μ s 以下に設定した。

3.3 装着と接続

図 3 にデバイスの装着方法と接続方法を示す。デバイスの本体は腕に装着可能であり、ユーザの動作を妨げない、使いやすさを向上させている。EMG 測定ユニットまたは EMS ユニットはポケット付きのアームスリーブに収納され、電極用の接続ケーブルのみ露出し、電極を介して筋肉部位と接続する。マイクロコントローラは、有線シリアル、Bluetooth、または Wi-Fi 接続を介して他のマイクロコントローラや PC と接続可能です。本研究では、無線通信方式で安定した通信が可能な Bluetooth 接続を採用した。TR にシステムを導入する際は、Wi-Fi 接続に切り替えてインターネット経由の通信が実現可能である。

4. 実験

両実験は、筑波大学システム情報工学研究群の研究倫理委員会の承認 (2024R874) を受け、参加者の同意を得て実施された。

4.1 性能評価

本実験では、複数 EMS の強度による関節剛性の変化を確認することを目的とし、肘関節に生じる抗力を測定し、その特性を評価した。実験に参加したすべての被験者は、個々の特性を得るために同じ刺激強度でテストされた。図 4 に実験のセットアップを示す。電極はそれぞれ上腕二頭筋と上腕三頭筋に装着され、肘はテーブルの上に置いた。デジタルフォースゲージ (ZTA-50N、イマダ株式会社) を垂直位置で前腕に水平に押し当てて関節を動かし、運動開始直前の最大抗力を測定した。実験参加者は、デジタル力計が押し付けられる際に腕をリラックスさせ、抵抗しないように指示された。刺激電圧は 30 V、刺激信号の周波数は 40 Hz、パルス幅は 0, 100, 200, 300 および 400 μ s 上腕二頭筋と上腕三頭筋の両方に同じ値が適用された。抗力は各 3 回測定し、平均値を算出した。当機関の組織に所属する神経系や筋骨格系の障害歴のない男性 4 名 (年齢: 23.25 $\pm$ 0.5) が、合計 60 回の試験 (4 名 $\times$ 5 つの刺激強度 $\times$ 3 回) に参加した。

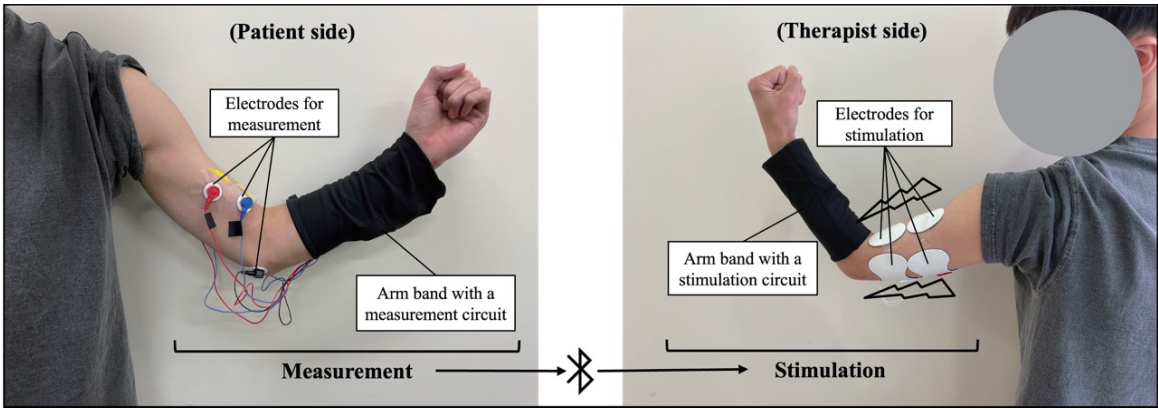


図 3: システム構成

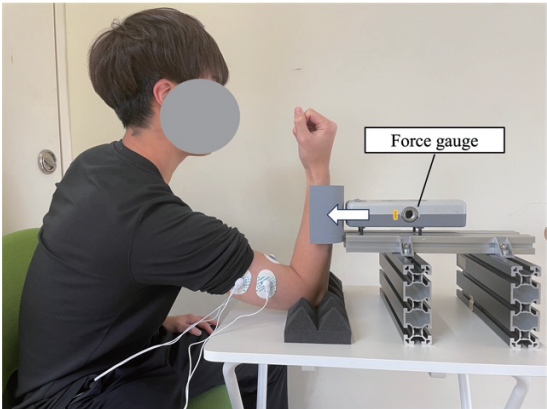


図 4: 抗力測定実験セットアップ

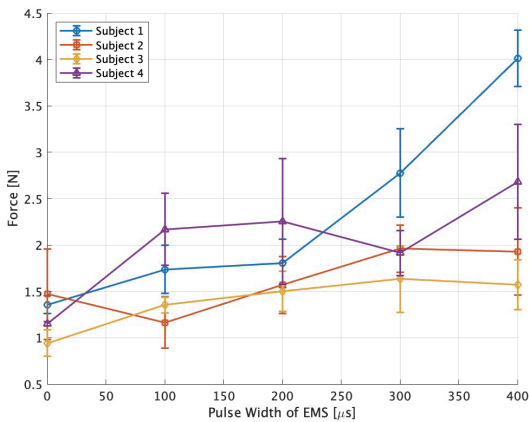


図 5: 刺激パルス幅と計測された肘関節の抗力

4.2 知覚実験

患者役と療法士役の参加者は、オンラインビデオ会議システム（Zoom）を使用して互いに視認できる状態で、音声ミュートすることで聴覚を介した情報伝達を制限した。視覚条件では、患者役は肘関節角度を 90 度に維持し、0, 2, 4, 6, 8kg の重りをそれぞれ 1 回ずつ持ち上げた。重りはカメラの視野外に保持され、療法士役は患者役の上腕筋のみを視認できる状態であった。患者役は重りをランダムな順序で各 1 回ずつ持ち上げ、療法士役は視覚的に提示された関節の相対的な硬さを 5 段階で判別する。P1-5 と P6-10 の療法士役の参加者に提示された視覚条件は、2 人の異なる患者役によって実施された。実験参加者に対し、重量の質量が 0, 2, 4, 6, 8kg であることを事前に通知した。力覚条件では、ビデオ会議システムのカメラをオフにし、療法士役は患者役の上腕の筋肉を視認できない状態とした。患者役は異なる強度で刺激を 1 回ずつランダムな順序で適用し、療法士役は各 5 段階の関節の相対的な硬さを判別して回答する。セラピスト役への EMS 刺激では、刺激電圧は 30V、刺激信号の周波数は 40Hz、パルス幅は 0, 100, 200, 300 および 400 μ s の 5 段階の関節剛性レベルで、上腕二頭筋と上腕三頭筋の両方に同じ値が適用された。両条件とも、各レベルで 1 回の教示セッションに続き、3 セットの記録セッションを行った。

表 1: 知覚実験の判別性能

参加者	視覚条件	力覚条件	差
P1	4/15	13/15	+9
P2	8/15	11/15	+3
P3	3/15	15/15	+12
P4	4/15	13/15	+9
P5	8/15	13/15	+5
P6	6/15	13/15	+7
P7	6/15	13/15	+7
P8	12/15	15/15	+3
P9	5/15	9/15	+4
P10	9/15	11/15	+2
平均 [/15]	6.5 $\pm$ 2.76	12.6 $\pm$ 1.65	+6.1
平均 [%]	43.3	84.0	+41.7

実験は当機関の組織から、セラピスト役として非専門家である男女 10 名（年齢：22.9 $\pm$ 0.74）と、患者役として男性 2 名（年齢：23.5 $\pm$ 0.71）を対象に実施した。両役割のすべての参加者は、上肢の運動障害を持たない者を対象とした。

5. 実験結果

5.1 性能評価

図5に各参加者の各刺激パルス幅ごとに得られた抗力を示す。各参加者において、測定された抗力はパルス幅の増加に伴い増加する傾向を示した ($R^2 > 0.6$)。ただし、参加者2ではパルス幅0から100 μs まで、参加者4では200から300 μs までのパルス幅において、測定された抗力はパルス幅の増加に伴い減少した。また、パルス幅の増加に伴う抗力の変化が線形ではない結果が観察された。

5.2 知覚実験

表1に静的条件下での肘関節の剛性感の知覚実験の判別結果を示す。表中の数値は、合計15回の試行(5段階、3セット)における正答率の割合を示す。すべての被験者において、力覚条件における正答率は視覚条件よりも高く、平均で6.1ポイント正答数が多い結果が得られた。視覚条件における平均正しい回答率は43.3%であったのに対し、力覚条件における平均正しい回答率は84.0%であった。ウィルコクソンの符号付順位検定により、視覚条件(中央値=6)と力覚条件(中央値=13)の間で正答数の有意な差が示された ($W = 0, p = 0.0051 < 0.01$)。

6. 考察

6.1 性能評価

EMS中の肘関節の抗力を評価することで複数EMSの刺激強度に応じて関節の剛性が変化することが確認された。実験参加者において、適用される刺激強度の増加に伴い、測定された抗力は増加する傾向を示した。しかし、回帰分析の結果、 R^2 値が0.9未満であり、測定された抗力とパルス幅の間の線形関係は、Nishidaら[7]の結果よりも低いことが示された。今回の実験では、すべての実験参加者に同じ刺激強度を適用し、EMSの出力パルス幅を0から400 μs の範囲で変化させて、個人差を確認した。Nishidaら[7]が使用した刺激強度は、個々のEMG測定に基づいて最大刺激強度を決定したため、私たちの最大刺激強度よりも大幅に高い可能性がある。私たちが適用した刺激強度の範囲は、EMSによって関節運動が開始される閾値を有すると考えられ、より個人差のある特徴が得られた。

6.2 知覚実験

専門家ではない参加者を対象に、ビデオ会議システムと提案手法の識別性能を比較した。提案手法の識別性能は、すべての参加者において視覚条件よりも優れており、正答数の平均は6.1ポイント高い結果が得られた。複数EMSを用いた提案手法がTRに有用であることを示唆している。

視覚条件における正答の個人間分散 ($SD=2.76$) は、力覚条件 ($SD=1.65$) よりも大きい結果が見られた。この結果は、視覚条件が各個人の知覚能力に依存する可能性を示唆している。一方、複数EMSを用いた提案手法は、平均84.0%の識別率を示したことから、異なる筋収縮レベルを識別する点で優れていると考えられる。しかしながら、麻痺を持つ患者から生成される生体電位信号では、十分な識

別性能を得られない場合があり、これは今後の研究で考慮すべき課題である。

7. 結論

本研究では、TRにおける関節の硬さ評価に応用するため、複数EMSを用いた療法士と患者間の遠隔インターフェースを開発した。このデバイスは着用可能で調整可能な設定を備え、無線通信に対応する。性能評価において、測定された肘関節の抗力は刺激パルス幅が増加するにつれて増加する傾向を示し、400 μs 未満の低刺激強度範囲において個人間の特性差が確認された。知覚実験では、提案手法を用いた力覚条件は視覚条件よりも高い識別性能を示し ($p=0.0051$, ウィルコクソンの符号付順位検定)、全参加者の平均識別性能は84.0%であった。今後、個人特性に応じて出力信号パラメータを調整することで性能向上が期待できる。複数EMSを用いた方法は視覚条件よりも識別性能が優れ、ロボットシステムよりも実装が容易であることから、将来のTRの支援システムとして有用であることが示唆された。

参考文献

- [1] M. Rogante, M. Grigioni, D. Cordella, and C. Giacomozz: "Ten years of telerehabilitation: A literature overview of technologies and clinical applications," *NeuroRehabilitation*, vol.27, no.4, pp.287–304, 2010.
- [2] M. McCue, A. Fairman, and M. Pramuka, "Enhancing quality of life through telerehabilitation," *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, vol. 21, no. 1, pp. 195–205, 2010.
- [3] P. N. Pathirana, S. Li, H. M. Trinh, and A. Seneviratne, "Robust real-time bio-kinematic movement tracking using multiple kinects for telerehabilitation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 3, pp. 1822–1833, 2015.
- [4] J. Lai and A. Song, "Design and characterization of a novel compact hand exoskeleton robot for telerehabilitation and muscle spasticity assessment," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023.
- [5] T. Geri, A. Viceconti, M. Minacci, M. Testa, and G. Rossetti, "Manual therapy: exploiting the role of human touch," *Musculoskeletal Science and Practice*, vol. 44, p. 102044, 2019.
- [6] J. Nishida and K. Suzuki, "Biosync: A paired wearable device for blending kinesthetic experience," in *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems*, 2017, pp. 3316–3327.
- [7] J. Nishida, K. Yagi, M. Hassan, and K. Suzuki, "Wearable kinesthetic i/o device for sharing wrist joint stiffness," in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2019, pp. 3306–3310.