

身体直接駆動のための運動制御インタフェースの開発

研究代表者：慶應義塾大学 桂 誠一郎

【基本構想】

超高齢社会におけるさらなる人間支援の充実化のためには、人間の身体を直接的にサポートするための技術開発が不可欠である。アクチュエータが搭載された外骨格型のデバイスを身体に装着することで、身体運動のアシストが可能になる。しかしながら、運動の自由度を増やすためには駆動源となるアクチュエータの数も増えるため、大掛かりな装置が必要である。

そこで本研究では、医療分野で用いられている機能的電気刺激に基づいた身体運動の生成・補助を行うための技術開発を行う。皮膚の表面に電極を貼付して電流を流すことで、直接的な身体駆動が可能である。電流を生成するインタフェースの時空間分解能を向上することで、身体駆動の多自由度化やきめ細やかな運動制御の実現を目指す。

1. 研究目的

本研究では、機能的電気刺激を用いて人間の身体の直接駆動を行うための運動制御インタフェースの開発を目的としている。機能的電気刺激は皮膚の表面に貼付した電極に電流を印加することで筋収縮を発現させる技術であり、リハビリテーション等に利用されている。現状の装置では電流生成の時空間分解能が低く、運動性能に制限があった。本研究では、電流生成を高機能に行うための運動制御インタフェース技術を開発することで、運動の多自由度化や多機能化を目指す。

上記目的を達成するため、本研究では、図1に示すような機能的電気刺激インタフェースを開発する。FPGA (Field-Programmable Gate Array) を用いた電流生成装置のための電流制御回路を設計し、電流生成の時空間分解能を向上させる。その結果、フレキシブルな電流生成が可能になり、痛みや疲労の軽減のみならず、運動の多自由度化や多機能化が実現される。最終的には、開発した電流制御回路を組み込んだ運動制御インタフェースを運動学習やリハビリテーションに適用するための実用化へ向けた研究開発を進める。特に、これまでに実現が困難であった手指の独立駆動の実現を目指す。

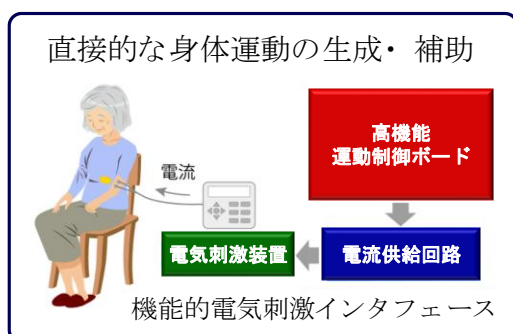


図1 本研究で開発する機能的電気刺激インタフェース

2. 研究成果

2.1. 電流制御回路の開発

従来の電気刺激装置では、電極間に一定の電圧を印加する定電圧回路が採用されてきた。皮膚の角質層、皮下脂肪、筋組織、および電極-電解質界面の影響により、電極間インピーダンスは周波数依存性を有し、かつ個人差や貼付状態、発汗などによりさまざまな時間スケールで変動する。定電圧回路は電極間の電圧を制御するため、生体を含む電極間インピーダンスの変化に伴い、最終的に流れる電流は変化することになる。その結果、特定部位に対して再現性のある刺激効果を得るためには、電極間を流れる電流を直接制御する定電流回路を構成することが必要となる。図2に定電圧制御と定電流制御の特性の違いを示す。

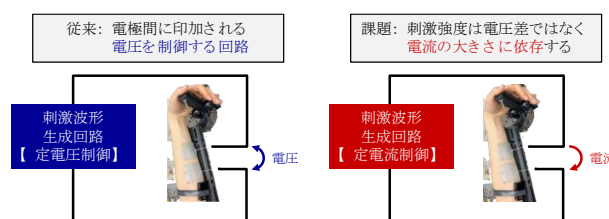


図2 定電圧制御と定電流制御の違い

電極間電流を直接制御するためには、電流検出抵抗によって電流を電圧に変換し、負帰還を行う構成が有効である。本研究で新たに開発した定電流制御回路は図3に示すような電流制御ボードに組み込まれ、上位の運動制御装置と統合される。また、図4に実験機のセットアップを示す。

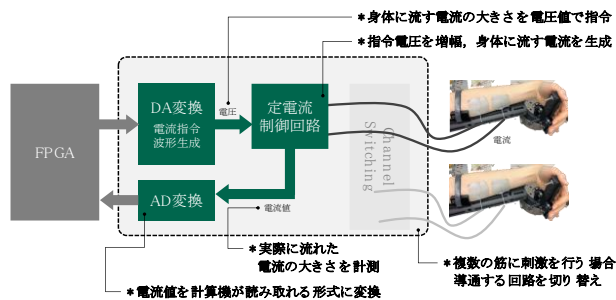


図3 電流制御ボードの構成図

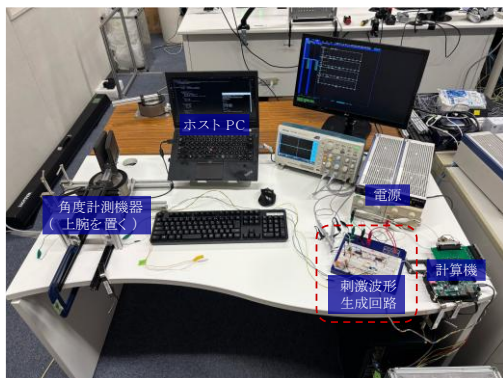


図4 実験機のセットアップ

本研究で開発した定電流制御回路と従来の定電圧制御回路とを同一条件下で比較し、評価を行った。両回路に対して同一の参照波形および同一の電極配置を用い、出力電流、電極間電圧、および手関節屈曲方向の角度変化の挙動を評価した。生体負荷条件の変化を模擬するため、生体に対して直列に $470\ \Omega$ の抵抗を追加しない条件（低インピーダンス）と追加する条件（高インピーダンス）の2通りで比較を行った。

図5に定電圧制御回路による実験結果、図6に定電流制御回路による実験結果を示す。図5より、従来の定電圧制御回路では電流参照値に対して実際の電流応答が一致せず、生体インピーダンスの変化に伴って電流振幅が大きく変動することが確認できる。特に、容量性成分を含む負荷に対しては突入電流が生じ、駆動可能な最大電流に達することで出力電圧が制限され、結果として電流波形および電圧波形の立ち上がりが歪む挙動が確認できる。

図6より、本研究で新たに開発した定電流制御回路では、矩形波状の電流参照値に対して電流応答が良好に一致し、インピーダンス変動の有無にかかわらず所望の電流を安定して供給できていることが確認できる。

また、図7に定電圧制御回路と定電流制御回路によって駆動される関節角度の比較実験結果を示す。関節角度変化量の比較より、定電圧制御回路ではインピーダンス増加時に関節運動が顕著に減少し、刺激強度の再現性が損なわれることが示された。これに対し定電流制御回路では、インピーダンス変動条件下においても関節角度の変化量は概ね一定に保たれ、出力変動が抑制されていることが確認できる。

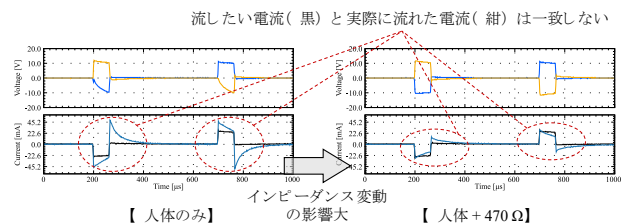


図5 定電圧制御回路による実験結果

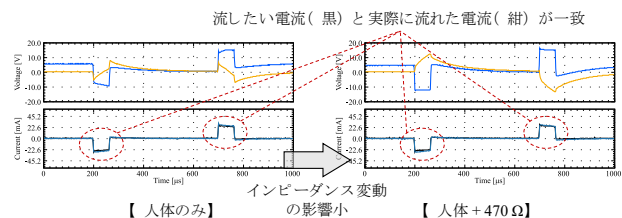


図6 定電流制御回路による実験結果

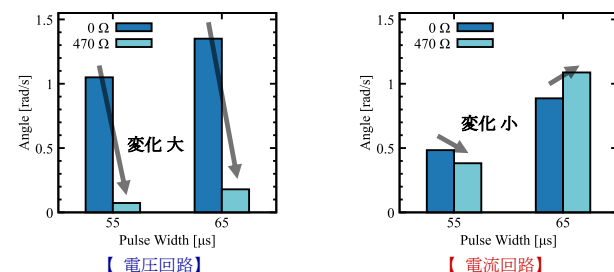


図7 定電圧制御回路と定電流制御回路によって駆動される関節角度の比較実験結果

以上のように、本研究では新たに定電流制御回路を開発し、従来の定電圧回路と同一条件下で比較評価を行った。実験結果より、生体インピーダンス変動下においても所望の電流を安定して供給できることを確認した。このように、機能的電気刺激インタフェースのためのフレキシブルな電流刺激の生成が可能なハードウェア基盤構築に成功した。

2.2. 運動制御インタフェースの開発

身体運動を機能的電気刺激により制御するためには、運動の出力となる関節角度・位置とトルク・力の計測が必要になる。そこで、関節角度・位置の取得のため、曲げセンサ情報に基づくセンシング手法の開発を行った。図8に曲げセンサを用いた指関節の動作計測の様子を示す。

曲げセンサによる指関節角度の計測にあたっては、伸縮を繰り返すことにより、初期角度のずれが生じることが確認できたため、モーションキャプチャを用いた非接触式での計測に関しても並行して実施した。モーションキャプチャによる指関節の計測結果の例を図9に示す。図9に示すように、指先 (finger tip)、遠位指節間関節 (Distal Inter Phalangeal: DIP 関節)、近位指節間関節 (Proximal Inter Phalangeal: PIP 関節) の角度情報をリアルタイムに計測できることを確認した。



図 8 曲げセンサによる指関節の動作計測

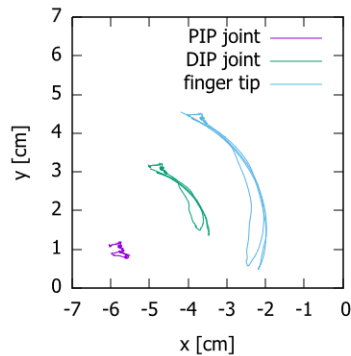


図 9 モーションキャプチャによる関節の動作計測結果

また、トルク・力の計測手法の開発を行った。外骨格型のインタフェースでは力センサを埋め込むことが可能であるが、本研究で開発する運動制御インタフェースは機能的電気刺激による直接的な身体駆動を実現するため、非拘束でセンシングする手法を新たに開発する必要がある。特に指先に関しては、直接力覚センサを装着することができないため、上肢筋電のセンシングに基づいて推定アルゴリズムを構築する。

従来、筋電を検出する際には2つの電極の電位差を増幅する手法が用いられてきた。特に、インストルメントアンプを用いて2つの電位差を増幅し、後処理としてフィルタを導入することによりノイズ低減を実現している。しかし、リアルタイム性を重要とするヒューマンインタフェースにおいては、後処理は遅延の要因となる。また、ウェアラブルデバイスにおいては、消費電力が小さいことが望ましいが、後処理に伴う消費電力の増大も課題となっている。そのため、後処理を行うことなく筋電センシングを行う回路を新たに開発した。

本研究では、汎用演算増幅器を用い、かつ基準電位の設定方法を工夫することで、低ノイズで後処理を必要としない検出回路の設計を行った。具体的には、基準電位を電気活動の少ない骨に取ることで、より安定した基準電位を取得でき、それぞれの電極が受けるノイズを低減することが可能になる。

従来の作動増幅回路と本研究で開発した作動増幅回路による筋電のセンシング結果の比較を行った。実験の計測時には、被験者は筋肉を弛緩させ筋活動が活発に起こらない状態での筋電を計測した。従来の作動増幅回路による筋電のセンシング結果を図 10 に、本研究で開発した作動増幅回路による筋電のセンシング結果を図 11 にそれぞれ示す。基準電位を骨にとった提案回路の方が波形の振幅が小さく、残留ノイズの振幅が低いことが確認できる。各波形の全期間の最大値と最小値の差を算出すると、従来の作動増幅回路においては 0.178 V 、本研究で開発した作動増幅回路では 0.128 V であった。このことから、基準電位を骨に取ることで残留ノイズが約 28%低減されたことが確認できた。

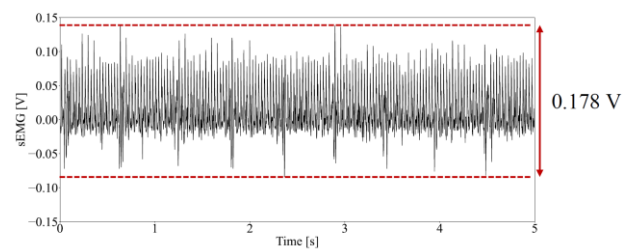


図 10 従来の作動増幅回路による筋電のセンシング結果

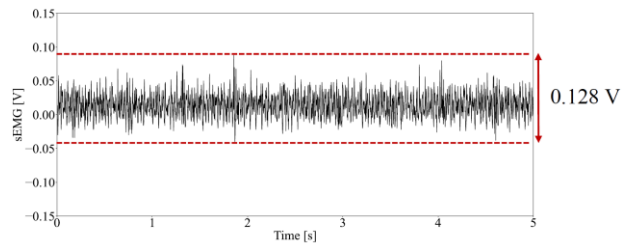


図 11 本研究で開発した作動増幅回路による筋電のセンシング結果

本研究では、力覚センサを直接指で押した際の上肢筋電データを取得し、加えた力と合わせて人工知能 (AI) で学習を行った。図 12 に親指の指先力と母指球筋の筋電位の計測の様子を示す。指先に3軸力覚センサを配置し、指先力の計測を可能にしている。また、計測した母指球筋の筋電位と親指の指先力 (Z 軸) の応答を図 13 に示す。

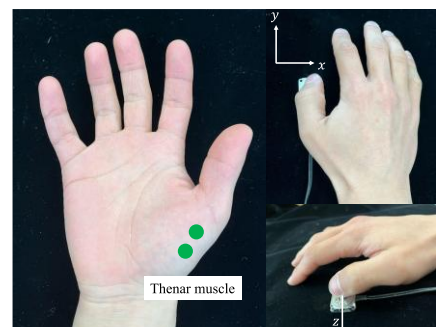
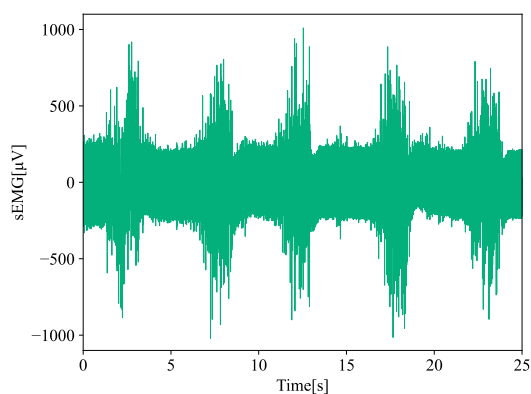
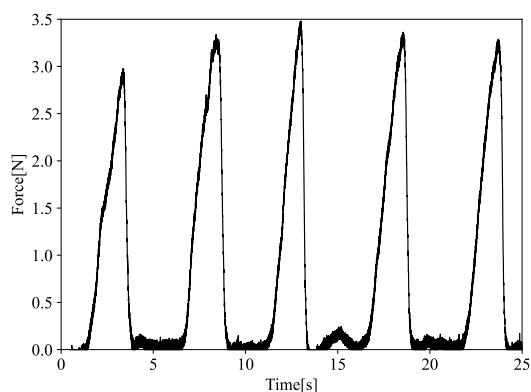


図 12 親指の指先力と母指球筋の筋電位の計測



(a) 母指球筋の筋電位



(b) 親指の指先力 (Z 軸)

図 13 計測した母指球筋の筋電位と親指の指先力 (Z 軸) の応答

図 13 の結果を基に、独自開発の AI 技術である「パイラテラル AI」を使用することで、得られたモデルがブラックボックス化されることなく、数式で表現して理解することが可能になる (図 14)。

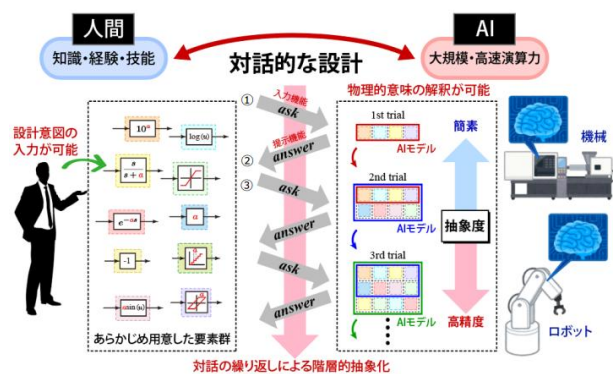
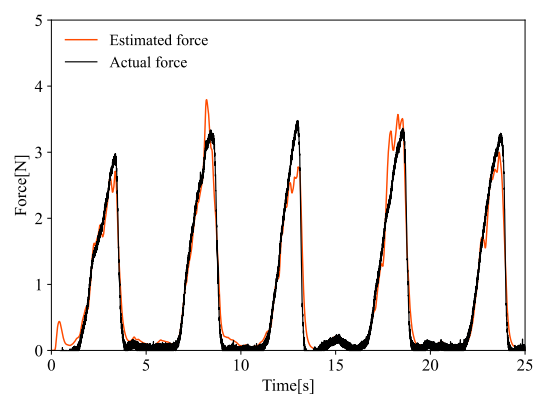
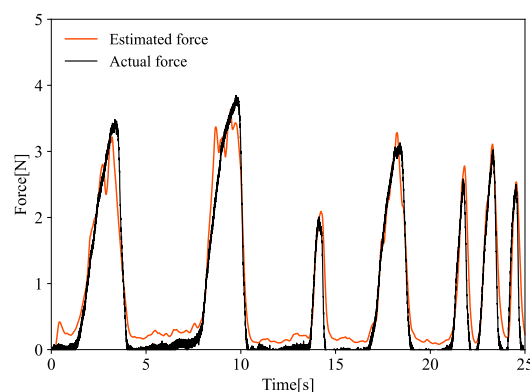


図 14 対話的设计が可能な人工知能技術「パイラテラル AI」

「パイラテラル AI」により得られた母指球筋の筋電位から指先力を推定するモデルを作成し、実験を行った。学習波形と評価波形を図 15 に示す。



(a) 学習波形



(b) 評価波形

図 15 母指球筋の筋電位に基づく親指の指先力 (Z 軸) の推定結果

実験結果より、 $\pm 0.1 \text{ N}$ (10 g) にて指先力の推定が可能であることを確認した。「パイラテラル AI」はあらかじめ用意した要素の候補を基に最適化演算が行われるため、計算過程が全て物理式で明快に記述されるばかりでなく、その都度演算結果を見ながら対話型での設計が可能であるため、過学習などへの対応も可能になっている。

以上のように、本年度の研究内容の到達目標を全て達成することができた。また、次年度の研究項目に関しても一部前倒しをして開発を進めており、早期の社会実装を目指していく。

3. 今後の展望

本研究では、機能的電気刺激に基づく革新的な運動制御インタフェースの開発を目標としており、「身体駆動学」という新たな学理の構築を進めていく。この「身体駆動学」は、筋収縮を人工的に起こすことにより、人間の運動を直接的に制御する新たな学問となる。すなわち、本研究では単なるアプリケーション提案に留まることなく、機能的電気刺激の性能を決定づける電流制御系の構築を基本として、アウトーループのロバスト制御系に基づく速度制御・力制御の同時実現、さらにヒューマンインタフェースとなる遠隔操作、通信制御へと続く技術の体系化を行うための研究を推進していく。

業績

【原著論文】

- [1] Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: “Position/Force Hybrid Control of Redundantly Actuated Cable-Driven Parallel Robot Based on Modal System Design,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 30, No. 6, pp. 7537-7546, December, 2025.
DOI: 10.1109/TMECH.2025.3577727
インパクトファクター (I F) 6. 3
- [2] Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: “Analysis and Development of a 6-DOF Manipulator Combining a Articulated Manipulator with a Cable-Driven Parallel Platform,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 37, No. 6, pp. 1508-1518, December, 2025.
DOI: 10.20965/jrm.2025.p1508 I F 0. 8
- [3] Daiki Sodenaga, Hisayoshi Muramatsu, Seiichiro Katsura: “Harmonic Reduction Using Periodic/Aperiodic Separation Filter for Surface-EMG-Based Force Estimation With Power Line Interference,” *IEEE Access*, Vol. 14, pp. 30726-30732, February, 2026.
DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3666182 I F 4. 2
- [4] Masaki Takeuchi, Seiichiro Katsura: “Modeling of Electromagnetic Friction Clutches Considering Air Gap and Deflection,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 203-211, March, 2026.
DOI: 10.1541/ieejia.20250125 I F 2. 4
- [5] Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: “Modal System Design for Robot Manipulators with Combined Kinematic Redundancy and Actuation Redundancy,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 212-220, March, 2026.
DOI: 10.1541/ieejia.20250127 I F 2. 4

【口頭発表】

1. 招待講演

- [1] Seiichiro Katsura: “Motion-Copying System for Reproduction of Human Motions,” 2025 *International Conference on Mechanical Automation and Engineering Applications, ICMAEA2025-CHONGQING*, Keynote Speech, September 19-21, 2025.
- [2] Seiichiro Katsura: “Motion-Copying System for Reproduction of Human Motions,” *The 17th Conference on Control in Power Electronics and Electric Drives, SENE2025-LODZ*, Plenary Speech, November 26-28, 2025.

2. 国際会議発表

- [1] Sora Yamaguchi, Seiichiro Katsura: “ReLU-Enhanced Neural Networks with Output Activation for Environmental Impedance Estimation,” 2025 *International Conference on Mechanical Automation and Engineering Applications, ICMAEA2025-CHONGQING*, 4 page, September 19-21, 2025.
- [2] Miharuru Watanabe, Seiichiro Katsura: “Fingertip Position Control Using Finger Kinematics by Functional Electrical Stimulation,” *The 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'25-MADRID*, 6 pages, October 14-17, 2025.
DOI: 10.1109/IECON58223.2025.11221008
- [3] Daiki Sodenaga, Daswin De Silva, Seiichiro Katsura: “Hysteresis Modeling of Thumb Tip Force Estimation from sEMG Using Element Description Method,” *The 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'25-MADRID*, 6 pages, October 14-17, 2025.
DOI: 10.1109/IECON58223.2025.11221085
- [4] Kosuke Shikata, Seiichiro Katsura: “Quasi-Real-Time Motion Control via Measured Sampling Periods,” *The 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'25-MADRID*, 6 pages, October 14-17, 2025.
DOI: 10.1109/IECON58223.2025.11221715
- [5] Mio Kanzawa, Seiichiro Katsura: “Optimization of Wave Control Design for Damping of Resonant System,” *The 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'25-MADRID*, 6 pages, October 14-17, 2025.
DOI: 10.1109/IECON58223.2025.11221778
- [6] Kazuma Morikawa, Seiichiro Katsura: “In-Link Actuators for Low-Inertia Robots,” 2025 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS2025-HANGZHOU*, Journal Transferred Paper, October 19-25, 2025.
- [7] Fasih Munir Malik, Daiki Sodenaga, Victor Zhidchenko, Heikki Handroos, Seiichiro Katsura: “Joint Torque Estimation for Index Finger using sEMG and Joint Deflection: Ensuring End-to-End Transparency,” 2025 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO2025-CHENGDU*, pp. 190-195, December 3-7, 2025.
DOI: 10.1109/ROBIO66223.2025.11378296

- [8] Kaito Yamamoto, Seiichiro Katsura: “Parts Assembly Configuration of Bendable Tubular Linear Motor Using Deformable Magnetic Material,” The 12th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, and Optimization, SAMCON2026-DAEGU, pp. 172-177, March 6-8, 2026.
- [9] Reo Matsumoto, Seiichiro Katsura: “Vibration Control for a Flexible Structure Using Wave-based Sliding Mode Control,” 2026 IEEE 19th International Conference on Advanced Motion Control, AMC26-DAEGU, 6 pages, March 9-11, 2026.
DOI: 10.1109/AMC67705.2026.11435811
- ### 3. 国内会議発表
- [1] 志方 鴻介, 桂 誠一郎: “波動モデルに基づく共振系のパラメータ同定と振動抑制”, 第 37 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No. 22B1-2, 6 pages, 5 月 21-23 日, 2025. (さいたま)
- [2] 柴田 叡知, 桂 誠一郎: “コアレスアクチュエータのためのハルバッハ配列に基づくコイル配置”, 第 37 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No. 23B3-1, 6 pages, 5 月 21-23 日, 2025. (さいたま)
- [3] 黒木 優作, 桂 誠一郎: “コンプライアンス制御を用いた物体衝突時の衝撃緩和”, 令和 7 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. II, pp. 147-152, 8 月 19-21 日, 2025. (徳島)
- [4] 神沢 美桜, 桂 誠一郎: “二慣性系に対する振動抑制のための時間遅れ設計”, 令和 7 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, p. Y37, 8 月 19-21 日, 2025. (徳島)
- [5] 櫻井 駿一, 桂 誠一郎: “(6+1) 自由度非対称パラレルメカニズムの作業領域拡大のためのリンク長最適化”, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, No. RSJ2025AC1D4-01, pp. 1-4, 9 月 2-5 日, 2025. (東京)
- [6] 黒木 優作, 桂 誠一郎: “ロボットによるサッカーのトラップ動作の学習手法の比較検討”, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, No. RSJ2025AC1D5-02, pp. 1-4, 9 月 2-5 日, 2025. (東京)
- [7] 鹿川 湧生, 桂 誠一郎: “スマートホームにおける自律移動家具ロボットのヒューマンインタラクション評価”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 11I-6, pp. 240-245, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [8] 錦 健志, 桂 誠一郎: “高速画像処理に基づく力センサシステムの開発”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 12G-3, pp. 500-503, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [9] 瀬戸口 佳司, 志方 鴻介, 桂 誠一郎: “機能的電気刺激下の拮抗筋共収縮制御における動作周波数特性の検証”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 13A-4, pp. 646-650, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [10] 袖長 大基, 梅野 和也, 四方 花香, 村松 久圭, 長津裕己, 山之内 亘, 山田 千晴, 板口 典弘, 竹内 一生, 吉澤 浩志, 桂 誠一郎: “表面筋電位に基づく箸先把持力のセンサレス推定”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 13I-1, pp. 861-864, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [11] 巨知 達明, 桂 誠一郎: “歩行動作のモーションコピーのためのインソールセンシングシステム”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 13K-6, pp. 945-951, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [12] 志方 鴻介, 瀬戸口 佳司, 桂 誠一郎: “機能的電気刺激下の拮抗筋共収縮制御を用いた外乱抑圧特性の向上”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 22A-2, pp. 1336-1342, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [13] 岡田 直之, 桂 誠一郎: “機能的電気刺激による手指対立運動の制御”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 22A-3, pp. 1343-1348, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [14] 松本 麗央, 桂 誠一郎: “波動モデルとスライディングモード制御に基づく振動制御”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 22C-1, pp. 1397-1404, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [15] 竹内 政樹, 桂 誠一郎: “非対称ブレイモデルと外乱オブザーバを用いたパウダーブレーキのロバスト速度制御”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 22F-4, pp. 1502-1507, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [16] 櫻井 駿一, 桂 誠一郎: “確率的モデリングに基づく反力推定オブザーバの構築”, 第 68 回自動制御連合講演会, No. 22F-5, pp. 1508-1511, 11 月 1-2 日, 2025. (名古屋)
- [17] 山口 宙, 石川 朝香, 黒木 優作, 櫻井 駿一, 志方 鴻介, 松田 英子, 桂 誠一郎: “身体性 Human Dynamic Clamp: ロボット実装による実在感評価”, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2025, No. B-2-5, 6 pages, 12 月 10-12 日, 2025. (北九州)
- [18] 志方 鴻介, 桂 誠一郎: “実ネットワーク環境下のバイラテラル遠隔操作における通信品質の解析と補償”, 2026 年電子情報通信学会総合大会, Vol. 通信講演論文集 2, No. B-11-20, p. 317, 3 月 9-13 日, 2026. (福岡)
- [19] 松本 麗央, 桂 誠一郎: “波動空間外乱オブザーバの帯域設計による振動制御”, 令和 8 年電気学会全国大会, Vol. 4, No. 4-157, pp. 272-273, 3 月 12-14 日, 2026. (仙台)