

[研究助成 (S)]

運動と知覚の時空間拡張に基づく手づたえ教示システムの開発

2228001



研究代表者 (助成金受領者)	慶應義塾大学	教授	桂 誠一郎
共同研究者	東京女子医科大学	准教授	吉澤 浩志
	慶應義塾大学	准教授	板口 典弘
	慶應義塾大学	専任講師	大澤 友紀子
	広島大学	准教授	村松 久圭
	ラトガーズ大学	教授	Jingang Yi

[研究の目的]

モーションコントロール技術の発展により、人間の動作を記録し、ロボットにより自動再現させることが可能になっている。加速度制御により速度や力をロボアストに制御することが動作再現の本質であり、人工知能(AI)と統合した研究が多くなされている。我が国は少子高齢化が進んでおり、熟練技能の伝承や、リハビリ・医用応用など、人から人へ動作を伝える手づたえ教示の必要性が高まっている。この問題の解決のためには、従来の人からロボットへの動作再現に加えて、人から人への動作再現に拡張していく必要がある。

本研究は人間の運動と知覚を時空間に拡張して、革新的な手づたえ教示を実現することを目的としている。これにより、個人個人に適した動作解析、予測、適応、さらにはロボットを用いた支援へとつながる「人間と機械の融和スパイラル」が形成できる。

本研究で開発する「手づたえ教示システム」(図1)は、これまでの視覚、聴覚によるマルチメディアデータに加え、人間の動作という物理データベースとヒューマンインタフェースを

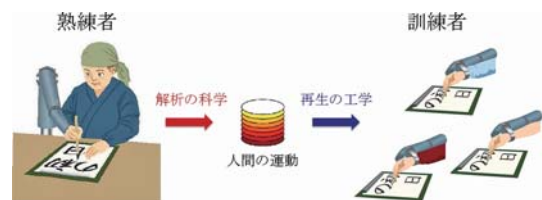


図1 「手づたえ教示システム」の概念図

融合させるもので、社会全体へ与える影響は大変大きい。人間の身体と身体をつなぐネットワーク技術は、電話やテレビと同等のインパクトを持つ可能性がある。特に、熟練技能者のスキル伝承や高度技能保存に基づいた新たなサービスの創出を目指しており、革新的な成果が期待できると予想される。

本研究で得られた成果を社会実装することにより、熟練技能者の持つスキルやノウハウを解析して抽象化し、手づたえ教示の実現性を高めることが可能になるばかりではなく、リハビリテーション、医療・介護、スポーツ、芸術分野などの様々な分野において、効率的かつ遠隔でトレーニングを行うための支援サービスを提供することが可能になる。これは機械との融和に基づく人間の身体性の拡張・進化に他ならない。

[研究の内容, 成果]

1. 「手づたえ教示システム」の開発

本研究では、従来のバイラテラル制御を基本とした「モーションコピーシステム」を拡張し、以下のような手づたえ教示を実現するための方式を確立し、学術的・技術的に体系化することに成功した。

- ・モーションコピーシステム

(バイラテラル制御方式) (図2)

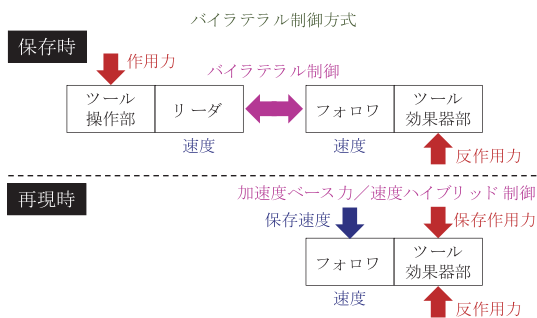


図2 モーションコピーシステム (バイラテラル制御方式)

タスクを行うツールを操作部と効果器部の2つに分割し、それぞれにモータとアームを取り付けてリーダー・フォロワ構成とする。動作を保存する際には、リーダー・フォロワ間にバイラテラル制御を構成し、動作中の作用力と速度を抽出する。動作再現時にはフォロワのみ用い、保存作用力と保存速度をロバストに再現するための加速度ベース力/速度ハイブリッド制御を構成する。

本方式により世界で初めて書道の達人の動作を忠実に再現することに成功し、そのデモンストレーションは多くの注目を集めた。学術的には、力と速度の同時再現が人間動作の再現における十分条件であることを明らかにした。

- ・モーションコピーシステム

(インツールセンシング方式) (図3)

バイラテラル制御方式によるモーションコピーシステムは、ツールに取り付けるモータやアームにより慣性の増加を招くため、動作抽出時においてタスクへ与える影響が大きいことが

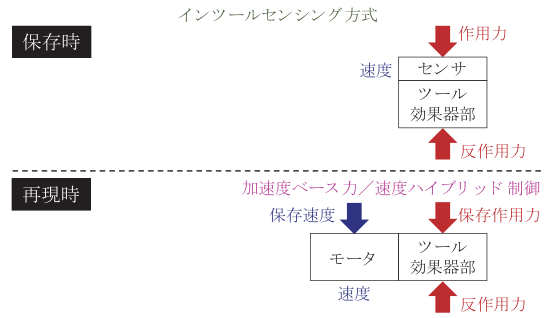


図3 モーションコピーシステム (インツールセンシング方式)

課題となっていた。

インツールセンシング方式はツール内に力や速度を抽出するセンサを埋め込むことにより、上記課題の解決に成功している。本研究では、バイオリンの駒と弓に歪ゲージを貼ることで(図4)、ボーイング動作の抽出ならびに再現に成功した。



図4 バイオリン動作抽出のためのインツールセンシング

- ・モーションコピーハンド

(指先力センシング方式) (図5)

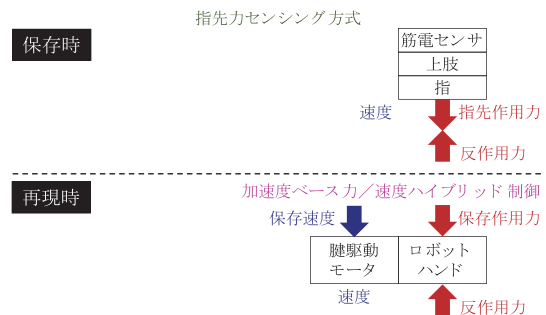


図5 モーションコピーハンド (指先力センシング方式)

上記のモーションコピーシステムはツールを使用したタスクの抽出・再現は行えるものの、

指先で直接行うタスクに適用することができない。そのため、上肢に筋電センサを貼付し、指先力との入出力関係を AI によりモデル化することで、指先力を筋電から推定する手法を開発した。

抽出された指先力と指先の速度はロボットハンドにより再現可能である。狭空間にいかにも多くの自由度を持たせるかが重要となるが、減速機の使用はバックドライバビリティの低下につながり、力制御の性能が劣化することになる。そのため、ダイレクトドライブモータと腱駆動を統合したハンド機構を新たに設計し開発を行った。

- ・ヒューマンコピーシステム
(機能的電気刺激方式) (図 6)

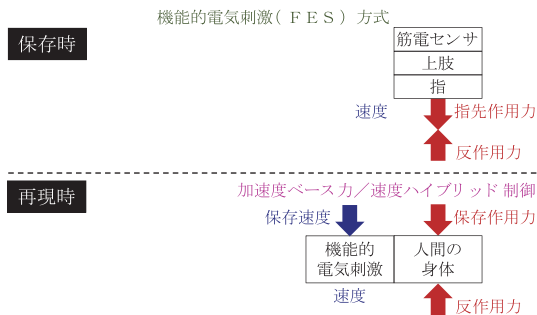


図 6 ヒューマンコピーシステム (機能的電気刺激方式)

手づたえ教示を効率よく実施するためには、運動主体感の向上が欠かせない。そのため、外骨格型システムによる身体の間接駆動ではなく、直接駆動である機能的電気刺激を用いることが望ましいとの結論に至った。

機能的電気刺激をヒューマンインタフェースに用いる研究は多く行われているものの、モータやロボットと異なり、ロバストな制御に関してはあまり研究が行われていない。研究代表者の桂はモーションコントロールへの造詣が深く、機能的電気刺激向けの新たな二自由度制御系の開発を行い、基本特許の出願につながった。二自由度制御により、位置制御 (制御剛性 ∞) から力制御 (制御剛性ゼロ) まで、ロバストに実現することが可能になる。

曲げセンサに基づく人間の手指動作のセンシングと機能的電気刺激による手指の直接駆動制御を統合した「手づたえ教示システム」の開発を行った。図 7 に示すように、背側骨間筋に電極を貼付し刺激することで、第 2~5 指を独立に制御することに成功した。さらに図 8 に示すように、第 2~5 指を使用した鍵盤楽器の手づたえ教示が行えることを検証した。

このように、身体と身体をつなぐ手づたえ教示という新たなインタラクションを実現することに成功した。「手づたえ教示システム」により、これまでの視覚、聴覚などのマルチメディア情報に加えて、遠隔地にいる他者と身体を接続し、共有化できる新たな体験が可能になる。

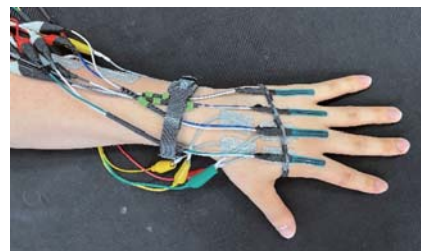


図 7 機能的電気刺激による手指の直接駆動



図 8 鍵盤楽器の手づたえ教示

2. 「手関節筋緊張評価システム」の開発

手関節の掌屈・背屈運動ならび尺屈・橈屈運動における粘弾性の物理量を計測する「手関節筋緊張評価システム」を開発し、研究協力者の所属している医療機関 (平塚共済病院, 宇治徳洲会病院) において、理学療法士の協力の下で評価を行った。開発した「手関節筋緊張評価システム」を使用する様子を図 9 に示す。また図 10 に示すように、本システムにより Modified

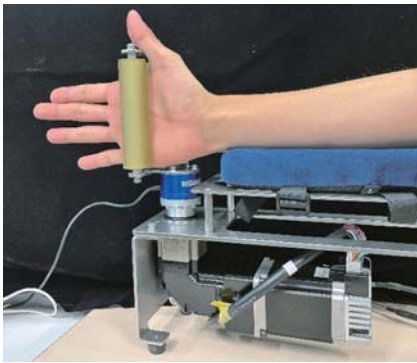


図9 「手関節筋緊張評価システム」

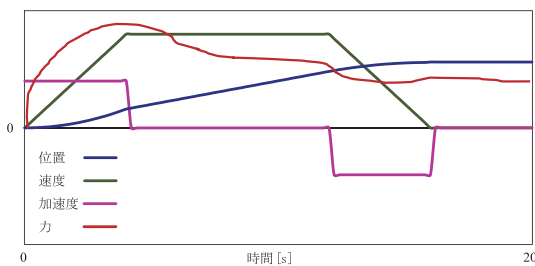


図10 手関節粘弾性の抽出による筋緊張の測定

Ashworth Scale に代わり、定量的な診断やリハビリテーション効果の記録が可能になる。

また、手関節の運動に連動したゲーム型の操作インタフェースを開発した。ゲームの各パラメータを個人ごとの症状に合わせて変更することが可能であるため、スパイラル構造に基づいたリハビリテーション支援につなげることが可能である。

3. 国際シンポジウムの実施

2024年3月6日～7日に慶應義塾大学にて国際シンポジウム (International Symposium on Applied Abstraction and Integrated Design, AAID) を主宰し、本研究で得られた成果を広く公表するとともに、国際連携や社会実装など今後の進め方を議論した。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究の出口として、遠隔やセルフでのリハビリテーションなど「手づたえ教示システム」によるスマート医療の新たなサービス創成を目

指しており、医療機関において評価を行うための準備を進め、開発技術の検証および設計へのフィードバックを行いながら社会実装を行っていく。

[主な発表論文]

- [1] Kodai Fujisaki, Seiichiro Katsura: "Motion-Copying System with In-Tool Sensing," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 12, No. 4, pp. 793-799, July, 2023.
- [2] Masaki Takeuchi, Seiichiro Katsura: "Robust Velocity Control for Electromagnetic Friction Brake Based on Disturbance Observer," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 12, No. 5, pp. 876-884, September, 2023.
- [3] Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: "Singularity-Free 3-Leg 6-DOF Spatial Parallel Robot with Actuation Redundancy," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 13, No. 2, pp. 127-134, March, 2024.
- [4] Kosuke Shikata, Seiichiro Katsura: "Wave Dynamics Intrinsic in Symmetric Four-channel Bilateral Teleoperation: Mutual Impedance-based Motion Control," *Mechatronics*, Vol. 102, No. 103209, 13 pages, June, 2024.
- [5] Daiki Socenaga, Issei Takeuchi, Daswin De Silva, Seiichiro Katsura: "Force Estimation from Surface-EMG Using Element Description Method," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 447-454, January, 2025.
- [6] Sora Yamaguchi, Yuki Tanaka, Seiichiro Katsura: "Contactless Environmental Impedance Estimation: Image-Based Approach Using Confidence Scores of Object Detection Model," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 152-160, March, 2025.
- [7] Yuki Tanaka, Seiichiro Katsura: "Sensorless Reaction Torque Regulation of Multi-DoF Industrial Manipulator Using Gated Recurrent Unit-Based Virtual Environment Quarrier," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 169-176, March, 2025.
- [8] Aina Kojima, Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: "In-Hand Manipulation Using Interaction Mode Control in Polar Coordinate System," *IEEE Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 177-187, March, 2025.
- [9] Kei Ueda, Seiichiro Katsura: "Passive Tension

- Adjustment of Tendon-Driven Mechanism for Improvement of Drivability," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 277-284, March, 2025.
- [10] Yusaku Kuroki, Seiichiro Katsura: "Three-dimensional Motion Mechanism with Tendon-Driven Gravity Compensation," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 413-422, May, 2025.
- [11] Kazuma Morikawa, Seiichiro Katsura: "Realization of Advanced Contact Motion with Low Moment of Inertia Using In-Link Actuators," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 423-430, May, 2025.
- [主な受賞]
- [1] The Best Paper Award, The 15th International Conference on Human System Interaction, HSI2022-MELBOURNE, 2022年7月30日
- [2] Outstanding Paper Award, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, and Optimization, SAMCON2023-NANJING, 2023年3月26日
- [3] 総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業 研究開発奨励賞, 2024年1月23日
- [4] IIFES2024 学生テクニカルアカデミー コンテスト 特別賞, 2024年1月28日
- [5] Istvan Nagy Award, 2024年10月2日