

研究終了報告書

「運動誘導システムモデルに基づいた人間機械ダイナミクス」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：松原 晟都

1. 研究のねらい

情報技術や人工知能の発達により、機械も外界の情報を取得・処理し、情報を伝達することができるようになった。機械による人間への情報の伝達にはディスプレイによる視覚、音声による聴覚などがあるが、本研究では特に身体動作を伝達することに注目する。

特に筋電気刺激は、人間の筋肉を直接駆動するという点で身体動作を伝達するのに適しているとともに、外骨格と比べて軽量・ウェアラブルである。しかしこれまで、随意運動中に筋電気刺激を組み込むことは2つの要因から困難であった。1つ目は、随意運動中の筋電気刺激による不随意運動は意図に反する場合があります、自分が動作を行っているという感覚（運動主体感）の喪失や痛み・不快感の原因となってしまうことである。2つ目は、運動中に筋肉と皮膚の位置関係がずれることにより、筋電気刺激を与えると収縮する筋肉上の点（運動点）を正確に刺激し続けることができないことである。

そこで本研究では、機械と人間を一体化させて身体能力を向上させているのにも関わらず運動介入を感じにくいシステム、いわば、運動介入を透明化するシステムの実現を行う。本システムの実現のため、身体動作を妨害しない運動介入の設計を行う。具体的には、モデルに基づいた人間機械ダイナミクスの理解と、動作に合わせて適応的に電極を移動させる装置の開発を行う。さらに、それらを組み合わせて、人間がダイナミックに運動している最中（投擲運動中など）にEMSを行い、運動に介入しつても痛み・不快感がなく、運動主体感を保持できるシステム（以下、運動誘導システム）を実現する。

最終的には、機械と人間を一体化させて身体能力を向上させているのにも関わらず運動介入を感じにくいシステムの実現を行う。本研究は、随意運動と運動介入のインタラクションの間で起こる数理構造を明らかにすることと、運動中にも運動介入が可能な筋電気刺激装置を開発することを通して、人間の身体という物理的過程と身体性という情報処理過程の解明における基礎的な知見を提供することが期待される。

ダイナミックな系においても筋電気刺激を行い、使用者の意図に沿った刺激を行うことができれば、スポーツ中の動作補助や演奏補助、パワーアシスト装置などに応用することができる。将来的には、機械と人間を一体化させて身体能力を向上させているのにも関わらず運動介入を感じにくいシステムの実現が期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

上記の運動誘導システムの実現のため、ACT-X 研究実施期間中は3つの項目に分けて研究を行った。具体的には、A. 心理物理学・運動実験による系の理解、B. 適応的電極選択システムの開発、C. ユーザスタディおよび知識の体系化である。本研究計画の遂行により、研究論文1件の実績を得た。また、今後の研究に生かすことのできる知見を得た。

A. 心理物理学・運動実験による系の理解については、A1 運動誘導系の人間知覚のモデル化、A2 運動制御パフォーマンス検証の 2 つに分けて研究を行った。A1 では、随意運動中に筋電気刺激を行い、その時の人間の知覚について評価を行う予備実験を行った。しかし、当初想定していた結果とは異なる結果が得られた。今後、この知見を活かし、実験計画を修正して実験を行う予定である。A2 の運動学実験は、B1 で開発したシステムを用いて実際の力発揮量を計測する実験を行った。

B. 適応的電極選択システムの開発については、B1 電極選択回路の開発、B2 運動点の適応的キャリブレーションの 2 項目に分けて研究を行った。B1 については、運動中に筋肉と皮膚の位置関係がずれることにより、運動点を正確に刺激し続けることができないという問題に対し、電極を多数配置して電極の位置を選択することのできるデバイスを開発した。そして、A2 で行った実験の結果から、2 mm という小さな電極移動によっても運動に差異があることを示し、電極移動の有効性を明らかにした。B2 については、B1 のシステムを改良し、計測と介入を組み合わせたシステムの開発を行っている。

C. ユーザスタディおよび知識の体系化は、C1 運動誘導システムのユーザスタディ、C2 運動誘導における人間機械ダイナミクスモデル化の 2 項目に分けて研究を行った。C1 では、筋電気刺激を利用したインタラクションシステムの一例を開発し、実験を行ってシステムの評価を行った。今後詳細な議論を行い、論文化する予定である。C2 では、「運動予測」「運動結果」「文脈」の 3 つの要素を制御することで、運動介入の感じやすさ(透明性)を制御する運動誘導の設計論をまとめた。

(2) 詳細

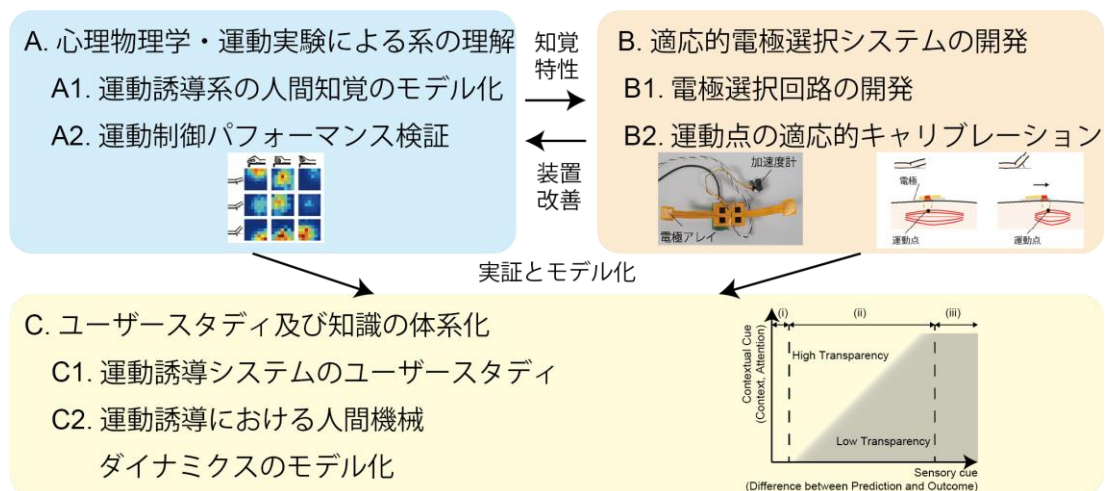


図 1：研究計画の概要。

A. 心理物理学・運動実験による系の理解

A1. 運動誘導系の人間知覚のモデル化

本項目では、随意運動中に筋電気刺激をかける状況の一例として、随意運動と不随意運動を同時に行う運動誘導を行うことに関する予備実験を行った。当初想定とは異なる結果が得られたことから実験計画を修正して再実験を行う予定である。

A2. 運動制御パフォーマンス検証

本項目では、Bで作成した装置を用いて、パフォーマンスの検証を行った。結果の詳細は B1 に示す。

B. 適応的電極選択システムの開発

B1. 電極選択回路の開発

(A2. 運動制御パフォーマンス検証)

項目 B1 では、筋電気刺激に最適な位置(運動点)の電極を選択するデバイス(図 1c)を開発し、A2 の項目で行った運動制御パフォーマンス検証の結果(図 1b)をもとに、論文発表を行った[成果論文1]。

筋電気刺激は、効率的に筋収縮を誘発するために、運動点と呼ばれる最適な位置を刺激することが重要である。しかし、皮膚表面と筋の位置関係は筋収縮や姿勢によって変化するため、常に正確な刺激を与えることは難しい。

例えば上腕二頭筋の収縮運動では、筋肉の位置が皮膚に対して肩側にずれ、電極位置がずれてしまう。また、運動点が筋肉の端にあった場合には、ひねり動作によって隣の筋肉部に電極が移動し、目的外の運動を誘導してしまう可能性がある。

そこで本研究では、直径 2 mm の電極を 2.5 mm 間隔で二次元アレイ状に配置し、運動点を探索するシステムを開発した。

そして、開発したシステムを用いて A2 に記載した運動実験を行った結果、2 mm といった非常に小さい電極の移動においても、運動の大きさが変化することを明らかにした。また、肘関節の角度変化やひねり運動に応じて、皮膚と筋肉の位置関係と整合性がある形で運動点が移動していることを確認し、姿勢によって電極位置を変化させることの有効性を実証した。

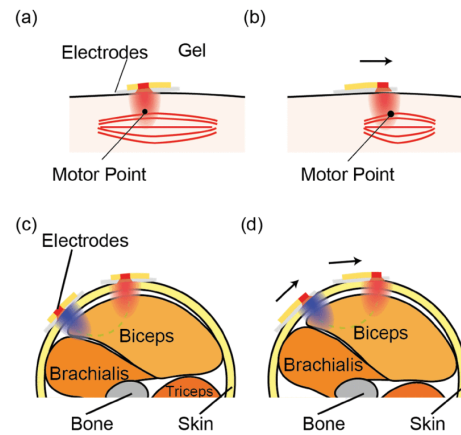


図 3：運動点の移動と電極選択装置のイメージ。(a-b) 筋収縮に伴い運動点が移動する。同時に適切な電極を選択し、常に運動点を刺激する。(c-d) 皮膚表面と筋肉の位置関係は、ひねり運動中にも変化する。電極の位置も合わせて移動させないと、目的の筋肉以外を刺激してしまう可能性がある。

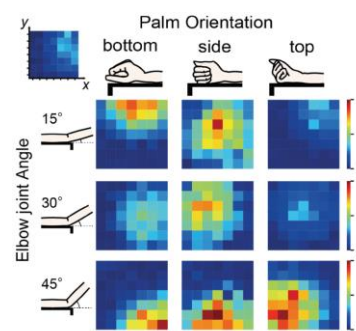
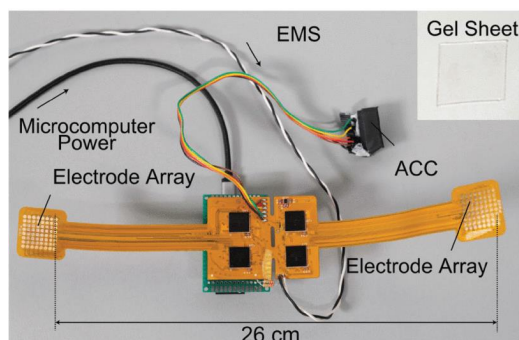


図 2：左) 筋電気刺激装置の概要。直径 2 mm の電極を 2.5 mm ピッチで配置した。右) 実験結果。姿勢によって運動点(赤い部分、筋収縮の大きい点)が移動している。

B2. 運動点の適応的キャリブレーション

B1 のデバイスの計測部分を改良し、計測—介入デバイスを作成することで、運動点を刺激し続けるデバイスを開発中である。今後、本成果の論文化が期待される。

C. ユーザースタディおよび知識の体系化

C1. 運動誘導システムのユーザースタディ

インタラクションシステムの一例を構築し、実験を行った。本項目の内容については現在論文化準備中である。

C2. 運動誘導における人間機械ダイナミクスのモデル化

「運動予測」「運動結果」「文脈」の 3 つの要素を制御することで、運動介入の感じやすさ(透明性)を制御する運動誘導の設計論をまとめた。

具体的には、運動の予測と実際の運動結果を一致すると運動主体感が生起するという比較器モデルを参考にして、予測と結果の誤差と文脈を制御することで人間と機械を統合したシステムを設計する指針の一例を示した。

3. 今後の展開

今後、数年以内の短期的な展望としては、A1 の研究を進めることで、随意運動中に筋電気刺激をかけたときの人間の知覚についての数理モデルを使用した議論ができると考えている。また、B2 の研究を進めることで、運動点の適応的キャリブレーションを行うことができるシステムを実現する。さらに、C1 の研究を進めることで、インタラクションの一例を示すことで、本システムの設計指針の有効性に関する示唆が得られると期待される。

今後数十年後の長期展望としては、本運動誘導システムが実現することで、機械と人間を一体化させて身体能力を向上させているのにも関わらず運動介入を感じにくいシステムの実現が期待される。さらに将来、コンピュータの計算能力の向上や機械のコストの低下に伴い、より精度の高い人間の動作予測・介入を安価に行うことが可能になり、一般に普及していくことが予想され、本研究において明らかにした随意運動と運動介入のインタラクションの間で起こる数理構造が筋電気刺激以外にも応用されることが期待される。また、スポーツ中の動作補助や演奏補助、パワーアシスト装置などにおいて運動介入の透明化を行うことで、自分自身の能力が向上したと実感できることが期待される。

4. 自己評価

研究目標は、A2、B1、C2 に関してある程度達成することができたが、A1、B2、C1 に関しては十分に達成することができなかった。特に A1 については、実験を行ったところ、当初の想定とは異なる結果が得られたことから、実験の条件をさらに吟味する必要があることが分かった。実験の条件の吟味については方向性を考えることができたものの、特に数理・情報の領域で議論したかった合成運動のモデルの構築が期間中には達成できなかった。B2 に関しては、現在研究開発を進め、C1 に関しては論文執筆のための議論を行っており、今後の論文投稿が見込まれる。また、ACT-X 期間中の研究を遂行することによって、A、B、C それぞれの期間後の研究の方向性も確立することができた点は評価できていると考えている。

研究の進め方のうち、研究実施体制については、2021-22 年度は東京大学にて実施し、2023 年度は産業技術総合研究所にて実施した。研究費執行状況については、博士課程在学中から支援を受けたことにより、代表者主導で研究を集中して遂行することができた。また、イタリア留学、博士号取得、就職といったイベントを経る上で研究環境の構築・物品・旅費等、効果的に利用することができたと考えている。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果については、研究テーマ B について国際誌において発表することができた。今後は、研究テーマ A や C に関する論文化や、得られた成果のさらなる発展や改良を経て実用化することができるところまで進めていきたい。

研究者ネットワークの構築という点に関しては、特に、対面開催となった領域会議やサイトビジットにおける交流を通して、様々な研究者との交流が生まれた。共同研究の実施等には至らなかったものの、本領域がなかったら関わりが生まれなかった可能性が高い、数理・情報に関する異なる分野の方々と交流ができたという点で得難い経験になった。今後も関係を保持しつつ、研究を遂行していきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. Seito Matsubara, Takafumi Watanabe, Taiga Suzuki, Sohei Wakisaka, Kazuma Aoyama and Masahiko Inami. "Optimal Motor Point Search Using Mm-Order Electrode Arrays". IEEE ACCESS vol. 11, pp. 58970 – 58981, Jun. 2023.

筋電気刺激は、効率的に筋収縮を誘発するために、運動点と呼ばれる最適な位置を刺激することが重要である。しかし、皮膚表面と筋の位置関係は筋収縮や姿勢によって変化するため、常に正確な刺激を与えることは難しい。そこで本研究では、直径 2mm の電極を 2 次元アレイ状に配置し、運動点を探索するシステムを開発した。結果、肘関節の角度変化やひねり運動に応じて運動点が移動することを明らかにし、姿勢によって電極位置を変化させることの有効性を実証した。

(2) 特許出願

研究機関全出願件数: 0件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

該当なし