

## 研究報告書

### 「人の動作技量を再現する外骨格ロボット制御」

研究期間：2018年10月～2020年3月

研究者番号：50186

研究者：古川 淳一郎

#### 1. 研究のねらい

近年、情報技術の発展に伴いヒトと協働作業可能なロボットが注目されている。その代表例として、外骨格ロボットをはじめとする運動アシストロボットが盛んに研究開発されている。特に、日本を含む先進諸国では超少子高齢社会を迎えるにあたり、医療分野では効率的なリハビリテーションサービスとして、産業分野では労働力補助ツールとして期待が高まっている。しかし、ハードウェア開発が外骨格ロボットの中心的な課題であり、現時点においてヒトの運動補助を効果的に行える制御方法は確立されていない。適切な運動補助を行うためには、スポーツインストラクターや療法士などの熟練者が行っているような、ヒトの運動を予測するとともに状態を評価し、最適なアシスト方策を求める手法の確立が課題である。

これまでの外骨格ロボット制御では装着者にかかる動作負荷の軽減を目的とし、On/Offのようなスイッチによりロボットを駆動させる方法がしばしば採用されてきた。そのため、重荷を保持するような静的な動作を対象としたものがほとんどである。一方、多様な動作に対しアシストを行うために、実際の運動が観測される前に運動情報を捉えることのできる筋電信号からヒトの運動を予測し、制御に活用するアプローチが提案されている。従来の代表的な手法としては、例えば筋電信号からロボットへの駆動トルク変換を回帰モデルで行い制御するなどである。しかし、このアプローチでも、装着者が筋活動の出力パターンを調整し続けることで自身の負荷を減らすようロボットを操作する要素が強いため、運動負荷の軽減度合いが主な評価軸とされてきた。そのため、本来の動作とは異なる身体の使い方をしている可能性もあり、状態や運動精度に関して最適な方策であるかは不明である。そこで、本研究では、筋電信号を含む運動情報から、ヒトの“動作目的”を予測し、その動作目的に応じた適切な制御方策を状態に応じて導出することで、運動負荷を軽減するだけでなく、運動精度も向上させることのできる外骨格ロボット制御方法を開発する。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

ヒトの運動予測に基づきロボットを制御するために、回帰モデルとは別にパターン判別がある。一般的な手法では、事前に決められた動作パターンに対して判別的に動作を推定し、その目的に対応付けて予め決められた制御則でロボットを駆動する。この場合、筋電信号は事前に設計された動きの開始にのみ使用されるため、ヒトの運動は動作目的として推定でき、また、装着者も筋活動の出力パターンを調整し続ける必要がないため、認知的負荷の観点からもアシスト制御に適したアプローチに思われる。しかし、この手法そのままでは、ターゲット動

作やそれに対応した制御則も予め準備する必要があり、限られた数の離散的な動作でしか使用できない。

本研究では、装着者の連続的に変化する動作目的を推定し、それを終端コスト関数として使用する最適なアシスト制御戦略を提案した。提案手法では、まず、装着者の僅かな初期動作に得られる運動情報から動作目的を推定する(研究テーマ A)。次に、異なるターゲットタスクに関連付けられた離散的な数の最適制御則が事前に計算されていると仮定し、その事前に計算された制御則をブレンドすることにより最適なアシスト方策を導出する(研究テーマ B)。この制御則をどのようにブレンドするかを決定する係数は、装着者の動作目的を表す特徴量に基づき算出される。提案手法はバスケットボール投げをタスクとし、実際の外骨格ロボットを使用してアシストの有効性を検証した(研究テーマ C)。この実験において被験者は、バスケットボールをゴールフープめがけてシュートすることをタスクとし、投球位置からゴールフープまでの距離を様々に変化させて行った。ここで、装着者の動作目的は投球距離として推定され、その目的に応じて導出された制御則により、外骨格ロボットは装着者をアシストする。実験の結果、提案方法により装着者のバスケットボール投げに対する動作負荷を軽減できただけでなく、バスケットボールシュートのパフォーマンスも向上された。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 「ヒトの動作目的推定」

筋電信号は電極の貼られた周辺一帯の複数の筋活動の信号が混ざり合い、さらには外部環境からのノイズの影響を受けた状態で観測される。そのため、違う動作でも一見似た信号が計測される難しさがある。そこで、本研究では装着者の動作目的をセンサ情報から頑健に推定するために、Partial Least Squares (PLS) を援用することで動作ラベルに関連する低次元の特徴空間を見つけた。この PLS により、そのままのセンサ値と比べて、動作情報をより明確に区別可能な特徴量を抽出できることが確認できた。さらに、この特徴量を用いて回帰モデルを適用することで、装着者の動作目的を既存ラベルの割合として表現可能であることが確認できた。

### 研究テーマ B 「動作目的に基づく最適制御」

事前に計算された制御則をテーマ A で推定された割合に基づきブレンドすることで、装着者の動作目的に応じたアシスト方策の導出を提案した。制御則を導出するシンプルな方法として、動作に対応する目的関数を一つ一つ設定し最適化することが考えられる。しかし、目標を達成する制御器を作成するためには、経験に依存した時間のかかるパラメータの手動調整が必要になる、もしくは、最適化の計算負荷が高くなるといった問題があるため、ターゲットが連続的に変化する場合、各ターゲットに対応する制御器を作成することは困難となる。そこで、本研究では既知の動作目的に対し事前に最適制御技術で導出された離散的な数の制御則を再利用し、ブレンドすることで連続的に変化する新たな動作目的に対応する。ここで、最適制御技術は設定した目的関数(例えば、トルク変化最小など)を最適化しつつ目標動作を達成する制御則を導出する手法であり、装着者のダイナミクスや状態に応じた制御則が求められる。ブレンドする割合はテーマ A で推定された装着者の動作目的および最適制御技術によ

り算出される価値関数により求める。この提案方法で求めた制御則をシミュレータで検証した結果、既知の動作目的を達成するロボット動作が生成可能であること、また、新たな動作目的に対しても、一から最適化問題を解くことなく適切なロボット動作が生成できることを確認できた。

#### 研究テーマ C 「提案手法の実機実装による有効性検証」

提案方法の有効性を実機実装することで検証した。提案手法は上肢外骨格ロボットシステムに実装した。また、数名の被験者に協力して頂き、ゴールフープをめがけたバスケットボールシュートをタスクとし、ゴールまでの距離は1～3mで連続的に変化させた(図1)。従来の外骨格ロボット制御では、静的な動作に対する検証がほとんどであり、スピードと精度が求められる動作でのアシストは挑戦的である。

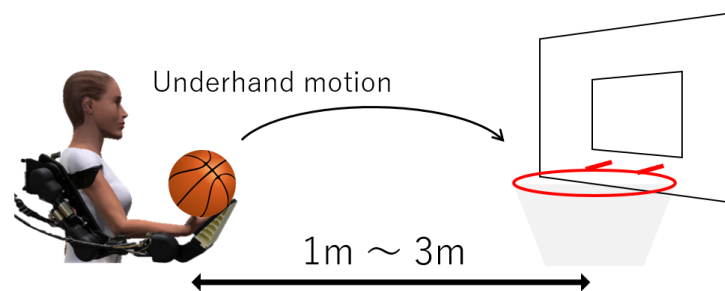


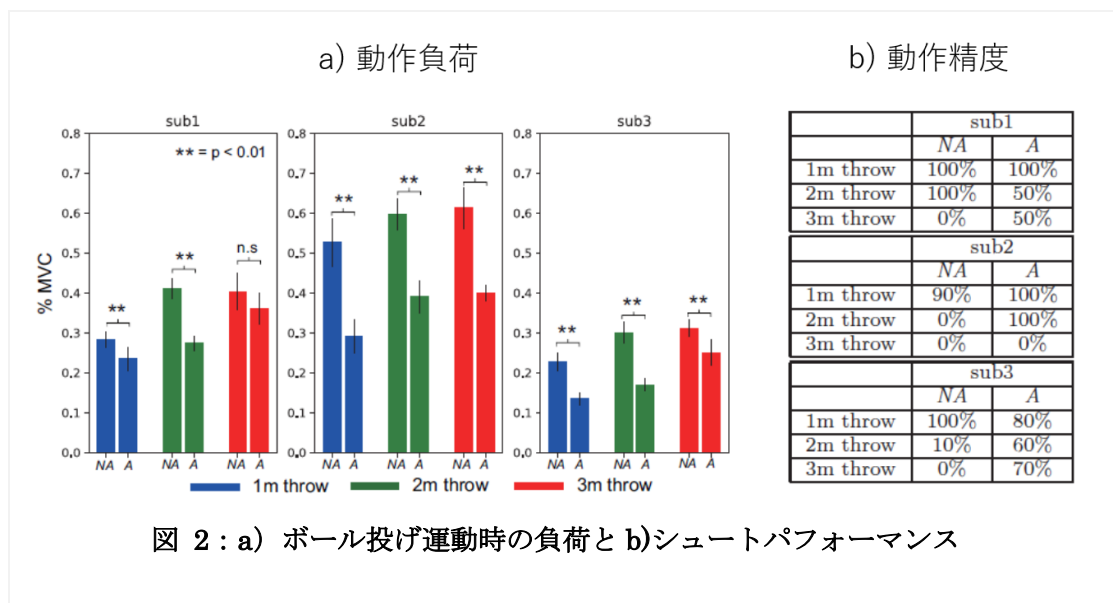
図 1：外骨格ロボットを用いた提案手法の検証

まず、提案手法によるアシストで実際のボール投げ動作を検証した結果、外骨格ロボットでアシスト可能であることが確認できた(図2)。



図 2：外骨格ロボットによるボール投げアシストの様子

そこで、提案手法によるアシスト条件下(A)とアシストが無い条件下(NA)においてボール投げ動作を行い、投球動作における身体的負荷を筋電信号から算出した筋活動量で比較し(図2 a))、動作精度としてゴールシュートのパフォーマンスで比較した(図2 b))。その結果、提案方法はアシスト無し条件に比べて動作負荷が減少していることが確認でき、さらに、ボール投げ精度に関しては提案手法によりシュート率が向上できることが確認できた。



### 3. 今後の展開

本研究で提案した手法により、これまで対象とされなかった機敏な運動に対し、外骨格ロボットによるアシストを可能とした。さらに、動作負荷軽減のみならず、動作精度という評価軸でも提案方法の有効性を確認することができた。本研究のアイデアを基にさらに多自由度システムへ適用可能とできるように拡張することで、リハビリテーションや労働補助ツール以外に、スポーツへの介入も期待できると考える。例えば、プロの動作から推定した目的関数を使用することで、装着者のパフォーマンスをプロに近づけるよう外骨格ロボットでアシストしたりすることが考えられる。

### 4. 自己評価

#### ● 研究目的の達成状況

本研究では、ヒトの動作目的を予測し、状態を評価し外骨格ロボットを制御する手法の開発を目的に進めてきた。この点において、新たな手法を提案し実機で検証するまでに至ったことについては十分な成果を達成できたと言える。今後は、より多くのユーザで有効性を検証するとともに、本研究の技術を基に他の多様な動作への適応などへの拡張が望まれる。

#### ● 研究の進め方(研究実施体制および研究費執行状況)

基本的に全ての作業を担当したが、サイトビジットや ACT-i 領域会議でアドバイザー等から頂いた助言やコメントを活かし、適宜修正を加えながら研究を進めることができた。研究費の執行状況に関しては概ね計画通り進捗した。

#### ● 研究成果の波及効果について

従来では動作負荷軽減のみを評価軸として考えられていたロボットアシストであるが、動作精度という評価軸でもアシストを可能とした本技術は、外骨格ロボット活用を広げるための新たな研究に繋がると考える。難関会議に投稿した際のレビューアーのコメントでも技術的新規性やインパクトについては高い評価を得ている。

#### ● 研究課題の独創性・挑戦性

本研究で提案するアプローチは、外骨格ロボット制御において我々が知る限り例を見ない手法である。従来では装着者の動作負担を軽減させるアシスト方策が中心であり、対象動作も静的なものが多い。一方、本研究ではスピードや精度が要求される動作を対象としている。もし、少しでも装着者の意図する運動と実際のロボット動作との間に齟齬が生じれば、ロボットは装着者の外乱となる(速い動作のため修正することも困難)ため動作精度は低下する。このような従来では対象とされなかった速い動作に対しアシストを可能とする点に独創性・挑戦性があると考ええる。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

1. Jun-ichiro Furukawa and Jun Morimoto. "An Optimal Assistive Control Strategy based on User's Motor Goal Estimation". arXiv:1909.02288, 2019.

### (2)特許出願

研究期間累積件数:1 件

1.

発 明 者: 古川 淳一郎、森本 淳

発明の名称 : 動作支援装置および動作支援方法

出 願 人: 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

出 願 番 号: 特願 2019-161737

### (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)

無し