

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17836

研究課題名（和文）状況に応じた適切動作へと導く外骨格型ロボット制御手法の開発

研究課題名（英文）Development of exoskeleton robot control guiding user to appropriate motion according to situation

研究代表者

古川 淳一郎（Furukawa, Jun-ichiro）

国立研究開発法人理化学研究所・情報統合本部・研究員

研究者番号：50721619

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ヒトの動作を物理的に支援する外骨格型ロボットにおいて、状況に応じて適切な動作となる制御手法の開発を進めた。一般的に外骨格型ロボットは予め想定された状況での身体負荷軽減を目的に支援方法が設定されるため、装着したヒトの動作は限定的となることが多い。本研究では、動作状況の許容範囲を広げたヒトの意図推定に基づく制御手法を提案するとともに、ヒトの動作を筋活動に基づき大局的に評価する方法を検討した。これにより、装着者の意図を精度よく反映し適切な動作へと誘導するロボット駆動となることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、外骨格型ロボット制御の多くでは、予め支援対象なる動作を想定しラベル付けしたデータを用いて設計された支援方策が利用される。そのため、装着者はその想定された動作を行うことが前提となっており、部分的な身体負荷軽減が着目されている。本研究では、ラベルの無いデータを活用した機械学習手法を援用した制御アルゴリズムの提案と身体動作を筋活動から大局的に評価する方法を検討し、装着者が想定外の動作を行う状況下でも動作意図を精度よく推定し適切にロボットを駆動できるようになった。本成果により、外骨格型ロボットの活用範囲の拡張が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a control strategy for an exoskeleton robot that physically assists human motions, allowing it to perform appropriate movements according to the situation. Generally, exoskeleton robots are designed to reduce the physical burden in pre-determined situations, so the user's motions are often limited. In this study, we proposed a control method based on human intention estimation that expands the allowable range of motion conditions. We also investigated a method to evaluate human motions widely based on muscle activity. It was confirmed that this resulted in a robot that accurately reflects the wearer's intentions and guides them to appropriate movements.

研究分野：ロボティクス

キーワード：運動アシストロボット 生体信号 機械学習

1. 研究開始当初の背景

日本を含む先進諸国では超高齢社会を迎えるにあたり、外骨格型ロボットをはじめとする運動アシストロボットが、医療分野ではリハビリテーションサービスとして、産業分野では作業補助機器として注目されている。しかし、現時点におけるアシストロボット技術はヒトの多様な動作を支援するための十分な制御方法は確立されていない。そのため、多くのアシストロボットが予め想定した動作に対して設計された支援に基づいて駆動され、支援可能な動作や利用場面は限定的であり、また、動作の適切性も不明瞭となっている。ヒトの多様な動作に適切に対応できる制御の確立が課題であるが、ヒトの行動の不確実性を許容する方法は不明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトの動作状況に応じて外骨格型ロボットを適切に駆動する手法を明らかにすることである。外骨格型ロボットの大きな特徴としてヒトと物理的に接触した状態で駆動する点がある。その状態においては、ヒトの動作意図を推定し制御に活用することは有効なアプローチの一つとされている。しかし、これまでの動作意図推定に基づくロボット制御では、支援対象となる動作を想定して構築された制御器が利用されてきた。そのため、装着者は設定した動作のいずれかを行うことが前提とされ、局所的な身体負荷の軽減度合いが注目されていた。一方本研究では、動作状況の許容範囲を広げたヒトの動作意図推定に基づく制御手法を提案するとともに、身体動作の適切性を筋活動から大局的に評価する方法を検討した。

3. 研究の方法

(1)一般的に動作意図を推定するには、予め支援対象となる動作についてラベル付けしたデータに基づいて学習されたモデルが利用される。例えば、椅子からの立ち上がり動作を支援対象とする場合は、まず着座姿勢を「支援不要」状態とラベル付けし、次に体幹が傾き始めてから立位までの状態をアシストロボットによる支援が必要な状態とラベル付けし、これらのデータにより学習したモデルでセンサ情報からどちらかの状態を推定する。このような従来方法では、学習時のいずれかのラベルを推定値として出力するため、体幹を傾けて腕を伸ばして物を取る、座り直す、などのような想定していない動作を行うとアシストロボットが支援対象と見なし、作動する可能性があった。一方で、ヒトの行動の多様性を考えると、動作データ全てに正確なラベル付けをすることは困難となる。

そこで本研究では、生体信号および角度センサから得るヒトの筋活動および姿勢情報に対し、ラベルの付いていない動作を実行する状況下を想定し、支援の対象となる動作意図を精度よく推定し適切な支援を生成するアルゴリズムの開発を進めた。具体的に、取得するセンサ信号からヒトが実行しようとしている動作が支援対象か否かを推定する部分と、各動作に対し適切なロボット駆動となる制御則を導出する部分に分け、それぞれ要素技術の構築を進め最終的にそれらを統合したアルゴリズムを提案した。

取得するセンサ信号から動作意図を推定するために、PU-ラーニング(Positive and Unlabeled Learning)という機械学習の枠組みを援用し、支援の対象動作とそれに関連して可能性のある紛らわしい動作データを取得し、その一部に支援対象となるポジティブラベルを付け、他のデータに対してはラベルを付けずに学習させることで推定器を構築した。一方、支援対象動作に対する制御則の導出に関しては、最適制御技術の一つである iLQG(iterative Linear-Quadratic-Gaussian)という手法を援用し、装着者の身長や体重などの身体情報を基に物理シミュレータ上でヒトのモデルを構築し、このモデルに対し支援対象の動作軌道に従うように設定した評価関数を最適化することで支援に必要な制御則(π_{target})を算出した。一方、支援の対象ではない動作に対しては、装着者の動きを妨げないようにロボットの重さを常に打ち消す制御則(π_{other})で駆動させる。これらの要素を組み合わせ、動作推定部分でヒトが行おうとしている動作が支援対象と推定された場合は π_{target} でロボットを駆動させ、支援の対象ではないと推定された場合は π_{other} で駆動させる選択支援アルゴリズムを構築した(図1)。

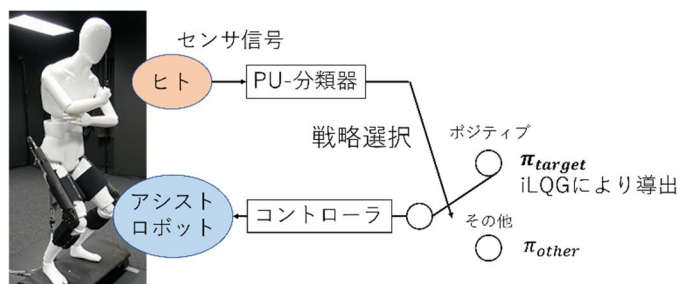


図1：提案手法の概要図

提案手法は被験者数名の協力を得て外骨格型ロボットによる動作支援実験により有効性を検証した。実験設定では、日常生活において特に負荷が大きいとされる立ち上がり動作に焦点をあて、支援対象は椅子からの「立ち上がり」動作とし、その他に「脚を組む」「少し離れた物に手を伸ばして取る」「座りなおす」の動作が起こり得る状況を想定した。

(2) また、この支援対象とした立ち上がり動作において、ロボットからの支援がヒトの身体の使い方に与える影響を評価する方法を検討した。そのために、モーションキャプチャーシステムから計測される関節軌道情報と、ヒトは筋を個別に制御するのではなく複数筋の協同発揮から構成される少数モジュールを制御しているとする筋シナジー分析に注目し、筋活動情報を用いた分析を検証した。具体的には、支援がない自然な立ち上がり動作時と支援時における関節軌道および筋活動を比較し、その差分により動作の適切性を評価した。筋活動は、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、大腿二頭筋短頭、大殿筋、脊柱起立筋の9筋から計測し、非負値行列因子分解を適用することで筋シナジーを表現した。

4. 研究成果

(1) 提案手法では、立ち上がり動作に対しては100%の確率で π_{target} が選択され、他の動作に対しては83.4%の確率で π_{other} が選択されてアシストロボット駆動することが分かった。一方、支援対象以外の動作をヒトは行わないとする従来のアプローチ(従来法1)だと、立ち上がり動作に対して100%の確率で π_{target} が選択されたが、他の動作に対しては19.8%の確率で π_{other} が選択されることが分かった。また、支援対象以外の動作に対してネガティブラベルを付けたデータで学習された別の従来アプローチ(従来法2)では、立ち上がり動作に対しては34%の確率で π_{target} が、他の動作に対しては94%の確率で π_{other} が選択されることが分かった。

さらに、支援動作に対してロボットによる支援が装着者に伝わったかを力センサにより比較したところ、提案手法と従来法1は従来法2に対して有意に支援量をヒトに伝え、従来法2は支援力を生成できていないことが分かった(図2)。一方、他の動作を行った場合にロボットが装着者の動きを妨げたかを動作軌道から調べたところ、提案手法は従来法1に対し妨げ度合いが小さいことが分かった(図3)。これらの結果から、提案手法は精度よくヒトの動作意図を推定し適切な駆動を生成できていることが分かった。

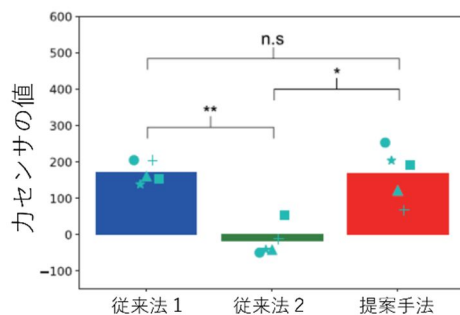


図2：伝えた支援量の違い

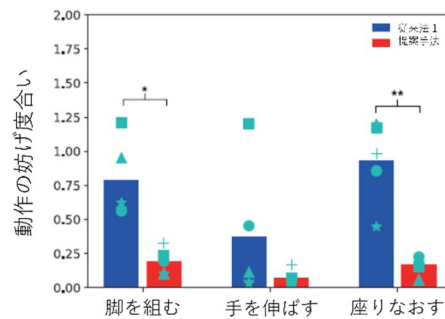


図3：ロボットによるヒトの動作への妨げ度合い

(2) 立ち上がり動作に対してロボットによる支援の影響を関節軌道と筋シナジーパターンで比較したところ、関節軌道および筋活動の振幅は変化するが、筋シナジーパターンは大きく変化しない支援が可能であることが分かった。これは、身体の負荷が軽減されている一方で、本来の身体の使い方を維持した支援となっていることが考えられた。従来、アシストロボットの効果は筋活動によって評価されることが多いが、局所的に計測した筋の振幅を比較した身体負荷の軽減度合いの評価が主に注目されていた。一方、本成果は筋活動からの筋シナジーパターンを評価することで、支援によって目標の身体の使い方へ可変であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Furukawa Jun-ichiro, Okajima Shotaro, An Qi, Nakamura Yuichi, Morimoto Jun	4. 巻 7
2. 論文標題 Selective Assist Strategy by Using Lightweight Carbon Frame Exoskeleton Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3890 ~ 3897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3148799	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chiyohara Shinya, Furukawa Jun-ichiro, Noda Tomoyuki, Morimoto Jun, Imamizu Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Proprioceptive short-term memory in passive motor learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-48101-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takahide Ito, Jun-ichiro Furukawa, Qi An, Jun Morimoto, Yuichi Nakamura
2. 発表標題 Muscle Synergy Analysis Under Fast Sit-to-stand Assist : A Preliminary Study
3. 学会等名 Augmented Humans International Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jun-ichiro Furukawa
2. 発表標題 Selective Assist Strategy by Using Lightweight Carbon Frame Exoskeleton Robot
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------