

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：83903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12808

研究課題名（和文）筋の力学的特性を規範とするインナー型インフレータブルアシスト技術の開発

研究課題名（英文）Inner-type inflatable assistive technology based on biomechanical properties of muscles

研究代表者

塚原 淳（Tsukahara, Atsushi）

国立研究開発法人国立長寿医療研究センター・研究所 健康長寿支援ロボットセンター・室長

研究者番号：70601128

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、随意運動に付随して発生する表面筋電位信号（sEMG: Surface electromyography）から、インフレータブルアクチュエータ（IfA: Inflatable actuator）に吐出する圧縮空気を制御し、膝関節の屈曲・伸展動作を支援するインフレータブルアシストスーツを開発することを目的として研究を行った。開発したインフレータブルアシストスーツと、構築したsEMGに基づく随意的制御手法を用いてIfAの制御実験を実施し、膝関節運動時の大腿直筋から計測したsEMGに応じて目標圧縮空気を推定し、IfAの随意的な収縮制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動機能の低下傾向が見られる高齢者にとって、従来型アシストロボットの重量感や拘束感、ユーザビリティといったハードウェアの技術的課題は、アシスト効果にも大きな悪影響を及ぼし得る。本研究では、日常生活での常時利用に焦点を当てたインナー型インフレータブルアシストスーツの開発と、筋の電気的活動を規範としたソフトアクチュエータのIfAを制御手法の構築を行ってきた。アシストスーツ着用者のsEMGに基づいてIfAの収縮量を制御するアルゴリズムの実現は、運動に合わせて随意的制御を可能にするソフトアクチュエータ全般の知能化を提案するものであり、インナー型アシストスーツの幅広い日常生活分野への展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed soft inflatable assist clothing with a lightweight and flexible inflatable actuator (IfA) and proposed a voluntary control method to adjust the compressed air volume supplied from a DC vacuum pump with compressor function to the IfA on the basis of the displacement volume of the surface electromyography (sEMG). In the IfA control verification experiments, the soft inflatable assist clothing with the proposed sEMG-based control algorithm was used to conduct knee flexion and extension experiments on a healthy subject in a seated posture. The results of the experiments indicated that the proposed sEMG-based control method can calculate the desired air volume in accordance with the displacement volume of the sEMG measured from the subject's lower limb during knee extension movement and then control the IfA air volume to its desired value.

研究分野：ロボティクス

キーワード：アシストスロージング インフレータブルアクチュエータ 表面筋電位信号 随意的制御

1. 研究開始当初の背景

現代社会は、もはや単なる超高齢化問題のみならず、不要不急の外出を極端に避けざるを得ない状況により、年齢を問わず「日常的な運動不足による歩行能力の低下」といった問題に直面している。自立した歩行能力に支障をきたすロコモティブシンドローム（以下、ロコモ）は、加齢に伴う筋骨格系の衰弱だけが要因ではなく、昨今のコロナ禍での運動不足によって、誰しもが発症する可能性のある運動器疾患である。近年、医療・福祉分野に導入されていた装着型アシストロボットが、日常生活分野に参入しているが、運動機能の低下傾向が見られる高齢者やロコモ発症者にとって、装着時の重量感や拘束感、ユーザビリティといった技術的課題は、アシスト効果にも大きな悪影響を及ぼし得る。そのため、限りなく衣服に近い装着感で、日常生活での歩行を支援するアシストスーツの実現は急務といえる。我々はインナー感覚で気軽に着用することのできるアシストスーツを設計コンセプトとし、低空気圧領域での印加によって、長軸方向に収縮力を発生させるインフレータブルアクチュエータ (IfA: Inflatable actuator) を開発してきた。

2. 研究の目的

本研究では、随意運動に付随して発生する筋の電氣的活動の変化から、IfA に吐出する圧縮空気量を制御し、機能的に膝関節の屈曲・伸展動作を支援するインナー型インフレータブルアシストスーツを開発することを目的とする。この目的を達成するため、表面筋電位信号 (sEMG: Surface electromyography) を規範とした IfA の収縮制御手法を提案し、検証実験によって有効性を確認することで、新しい歩行アシスト技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

これまでに、下肢の筋活動と IfA の収縮量変化の関係性については明らかになっていない。つまり、筋の電氣的活動に基づいて IfA に吐出する空気量を制御するメカニズムの解明は、本研究の最重要課題である。そのため、これまでに開発した IfA を用いて、膝関節の屈曲・伸展運動を支援するためのインフレータブルアシストスーツを開発するとともに、筋の電氣的活動に基づいて、ポンプからの吐出空気量を調節するための IfA の収縮を制御するためのメカニズムを明らかにすることで、sEMG に基づいた IfA 収縮制御手法の構築を行う。

4. 研究成果

本研究では主に、以下の研究を行った。

(1) IfA を用いたインフレータブルアシストスーツの開発

図 1 に本研究で開発したインフレータブルアシストスーツのシステム構成図を示す。インフレータブルアシストスーツは主に、収縮型 IfA、EMG センサ、内圧センサ、慣性計測ユニット (IMU: Inertial measurement unit)、およびコントロールユニットから構成される。収縮型 IfA は、特殊な熱可塑性ポリウレタンエラストマーを重ねて熱溶着することで作製される。IfA は、真空ポンプからの圧縮空気が IfA の中央にある未溶着部のエアスリットを通じて、複数のインフレータブルチャンバーに流れ込み、その結果図 2 に示すように、インフレータブルチャンバーが厚さ方向に膨張し、IfA 全体が縦方向に収縮する。IfA の近位端は、スナップボタンでインナー側に取り付けられ、遠位端はナイロンワイヤーを介して、膝蓋骨下部に取り付けられたストラップに接続される。IfA への圧縮空気の供給と排気の切り替えは、電磁弁を使用して行われ、IfA が生成する収縮によって、着用者の膝関節の屈曲と伸展を制御する。IfA の内部圧力は、IfA に接続されたゲージ圧センサを使用して測定する。コントロールユニットには、シングルボードコンピュータ、2つのコンプレッサ機能付き DC 真空ポンプ、および6つの電磁弁が搭載されている。本研究では、sEMG の変化を使用して IfA の収縮を随意的に制御するための検証を行うため、センサ (IMU および EMG センサー) 以外の構成ユニットを、着用せずにオフボードで配置した。

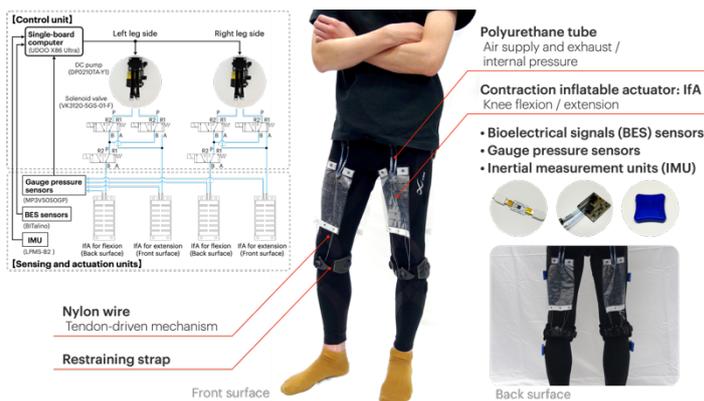


図 1 システム構成図

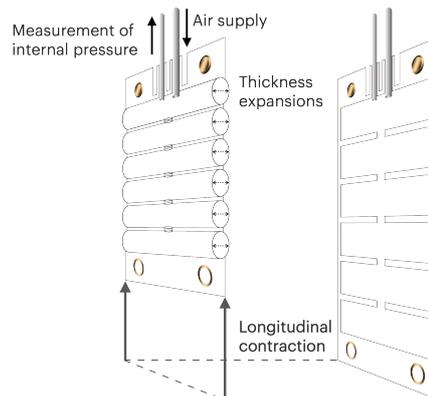


図 2 圧縮空気を供給した際の IfA 収縮のイラスト図

(2) sEMGに基づいたIfA収縮制御手法の構築

図3に本研究で提案した制御フローを示す。本制御アルゴリズムは、正規化されたsEMGからIfAの目標収縮力 \hat{F} を決定する変換器、目標収縮力 \hat{F} -目標空気量 \hat{V} プロファイル（C-Aプロファイル、図4左）、IfAの内部圧力 P -内部空気量 V プロファイル（I-Aプロファイル、図4右）、およびフィードバックコントローラで構成されている。IfAの収縮に必要な空気量を推定するために、事前にIfAの等尺性収縮に関する予備実験を行いIfAの収縮力を測定し、空気量と収縮力の関係を導き出した。この実験結果から、対応する目標収縮力 \hat{F} に対してIfAに供給されるべき目標の空気量 \hat{V} を推定するC-Aプロファイルを設計した。また、フィードバック制御を実現するためには、C-Aプロファイルから計算された目標空気量 \hat{V} を使用して、IfAの内部空気量を推測することが不可欠である。そのため、事前のIfA等尺性収縮実験により、内部空気量と内部圧力の関係も導き出した。これらの実験結果を基に、IfAの内部圧力 P に対応する内部空気量 V を得るためのI-Aプロファイルを設計した。

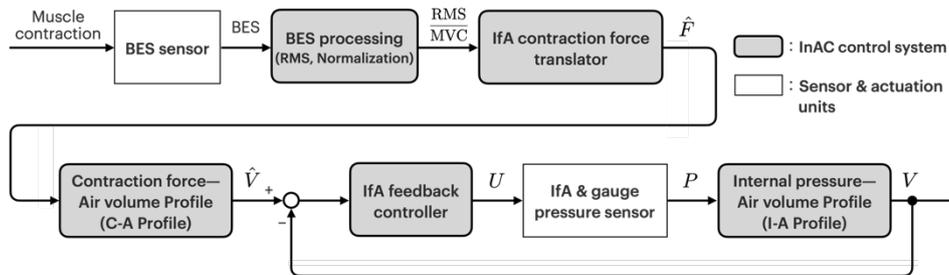


図3 EMGに基づいてIfAに供給される圧縮空気量を調整する制御アルゴリズム

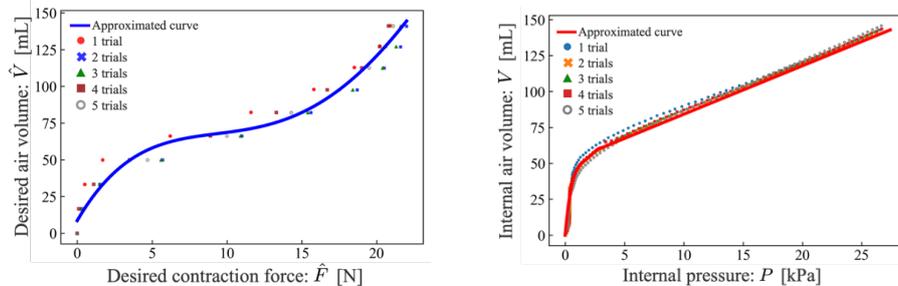


図4 左：目標収縮力-目標空気量プロファイル（C-Aプロファイル）、右：内部圧力-内部空気量プロファイル（I-Aプロファイル）

(3) IfA検証実験

本実験では、提案した制御アルゴリズムを用いて、座位姿勢の健康な被験者に対して膝関節の屈曲と伸展の実験を行った（図5）。膝関節伸展時のEMG変位量に基づいてIfAの収縮を制御するために、右大腿の大腿直筋（RFM）からEMGセンサを用いて計測した。また、IfAの収縮力を測定するために、IfAは被験者の大腿に取り付けず、代わりにIfAの近位端を固定スタンドに固定し、IfAの遠位端をフォースゲージに接続することで、圧縮空気の供給によって張力が生じた際に、IfAの縦方向の長さを保ちながら生成される等尺性収縮力を測定した。また、 V と \hat{V} の間の誤差の範囲を調査するために、平均絶対誤差（MAE: Mean absolute error）および平均絶対百分率誤差（MAPE: Mean absolute percentage error）を評価した。

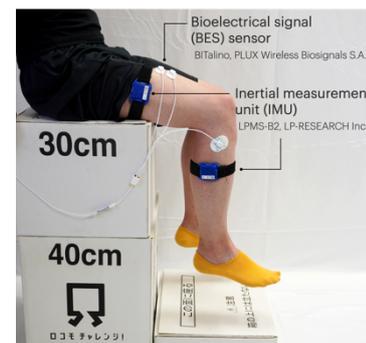


図5 IfA検証実験の様子

図7に計測したRFMのsEMG、%MVC、 V と \hat{V} 、フォースゲージから計測したIfAの収縮力を示す。提案手法が組み込まれたアシストスーツは、sEMGの変位に基づいてIfAの目標空気量（黄色点線）を推定し、同時に望ましい空気量追従することができることを確認した。フォースゲージを使用して測定されたIfAの収縮力も、圧縮空気の変化量に依存して変化することを確認できた。また、 V と \hat{V} 間のMAEとMAPEの結果はそれぞれ3.03 mLと6.85%であった。

今後は、汎用性の高いIfAの最適化モデルと、フィードバック性能およびアシスト性能をさらに向上させるための制御方法の改良を進めていく。

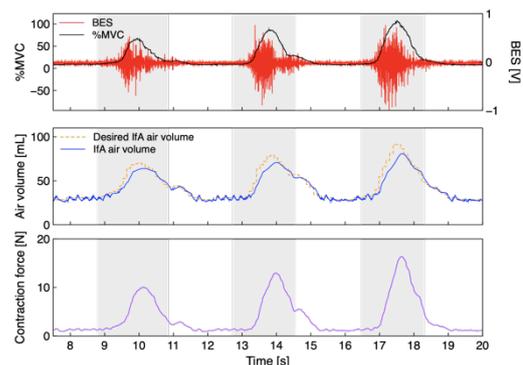


図6 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsukahara Atsushi, Yamamoto Shuta, Hirota Sho	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of Wearable-assist-clothing Control Based on Electrical Activities in Lower-limb Muscles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 3137 ~ 3149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM4502	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Airi Nunota, Atsushi Tsukahara
2. 発表標題 Validation of Muscle Activities Calculation Based on Displacement Mechanomyogram during Sit-to-Stand and Stand-to-Sit Motions
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚原淳, 近藤和泉
2. 発表標題 高齢者の日常的脚運動支援を目指したインフレータブルアシストクロージングの開発
3. 学会等名 第8回NCGGサマーリサーチセミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚原淳
2. 発表標題 脚運動アシストに向けたインフレータブルアクチュエータの設計パラメータ最適化手法
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡島悠之, 塚原淳
2. 発表標題 筋の機械的活動に基づき運動意思を推定するフレキシブル筋変位センサの開発,
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚原淳
2. 発表標題 高齢者の自立生活を目指した活力ある健康長寿社会のためのアシストスーツの開発
3. 学会等名 日中科学技術フォーラム ~ ICT技術の活用による高齢者社会対応 ~ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本修太, 塚原淳
2. 発表標題 筋の電気的活動に基づくインフレータブルアクチュエータの随意的制御手法の開発
3. 学会等名 SICE中部支部若手研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二間瀬颯, 塚原淳
2. 発表標題 下肢関節の協調歩行運動を支援するハイブリッド型インフレータブルアシストクロージングの開発-股関節部における受動型アシストに最適な運動学的パラメータの解明-
3. 学会等名 SICE中部支部若手研究発表会
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
---------	---------