

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12606

研究課題名（和文）人間の筋骨格系の多面的解釈に基づくフレキシブルロボットウェアの開発

研究課題名（英文）Development of flexible robot wear based on multilateral interpretation of human musculoskeletal system

研究代表者

藤江 正克（Fujie, Masakatsu）

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：20339716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間の筋骨格の構造、材質を模したハード開発を実施することで人間との親和性が高い柔軟な装着型ロボットを開発するための方法論を確立することを目指し、筋骨格系のネットワーク構造の解析及びそれを模したアクチュエータの開発とロボット構造の最適化に取り組んだ。ミクロな構造に関しては、装着型の筋電計や筋硬度計を利用した筋の収縮・弛緩時の活動形態と材質変化の定量化手法を提案した。マクロな構造に関しては、肘関節・膝関節の動作支援を目的として柔軟材料を利用したロボットスーツのプロトタイプを製作し、人間の能動的な動作を阻害せずに身体動作の改善が可能なアクチュエータ配置と制御手法について検証した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to establish a methodology for developing robots with high affinity with humans using flexible actuators mimicked human musculoskeletal system. We carried out the analysis of the musculoskeletal network structure and the development of actuators imitating it, and the optimization of the robot structure. With regard to the microstructure, we proposed a method of quantifying the muscle activity and its material change at muscle contraction / relaxation using a wearing type EMG sensor or a muscle hardness meter. Regarding the macroscopic structure, we developed a prototype of a robotic suit using flexible material for the purpose of supporting motion of the elbow joint and knee joint, and verified the actuator arrangement and control method capable of improving the body motion without hindering the active action of humans.

研究分野：福祉ロボット

キーワード：福祉ロボット 装着型ロボット フレキシブルロボット

## 1. 研究開始当初の背景

近年、身体機能の低下した方のパワーアシストやリハビリテーションなどの用途において研究開発されている装着型ロボットは、人体に装着し使用するため人と最も近い距離で物理的にインタラクトすることを要求されるロボットであり、人の筋骨格系の構造や動きに対して親和性の高いシステムを構築する必要がある。これまで装着型ロボットでは、金属部材をあたかも“力を発生可能な骨と関節”のように体外に形成することで、人間へと力を伝達しアシストを行ってきた。しかし、装着に要する時間の長さや装着感の硬さ、高価であるなどの問題から日常的に使用されるには至っておらず、限られた用途のみで使用されているのが現状である。

一方で、硬い金属部材ではなく布地やゴムやワイヤなどの柔らかい要素を用いることで、装着型ロボットを服のような形態に構成する研究開発が注目されている。装着型ロボットを柔軟な服型とすることで、硬い金属部材では実現できなかった装着の容易さ、装着感の柔らかさが実現可能となり、人体との親和性の高い装着型ロボットの実現が期待されている。Harvard 大学で開発されている Soft Exosuit という柔軟な下肢装着型ロボットが米国防総省 DARPA から約 3 億円の助成を獲得したことから柔軟な装着型ロボットへの期待が伺える。しかし、将来の装着型ロボットの方向性として人間との親和性を重視した Soft なロボットが志向される一方、柔軟な装着型ロボットの研究開発は歴史が浅く、Soft Exosuit を始めとする現在の主要な研究においても、“ただ単に柔軟な装着型ロボットを作った”という点にオリジナリティが置かれている状態であり、その設計・制御手法は十分に検討されていない。そのため、柔軟な装着型ロボットにおいて、人間との親和性が高いハード・ソフト開発の方法論に関する研究は極めて重要、かつ、挑戦的な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、人間の筋骨格の構造、材質を模したハードの開発を実施することで、人間との親和性が高い柔軟な装着型ロボットを開発するための方法論を確立する。“ただ単に柔軟な装着型ロボットを作った”という点にオリジナリティが置かれていたこれまでの研究に対し、本研究では、人体との親和性を高めるために生体材料の材料特性を表現しているとされる「テンセグリティ構造」と呼ばれるネットワーク構造に着目し、この構造をロボットのハードに組み込むことでロボットのハードに人体のような柔軟性を付与する。

具体的には、「ミクロな筋骨格系の構造の解析およびそれを模したアクチュエータの開発」と「マクロな筋骨格系の構造を模したロボットの構造の最適化」という、柔軟な装

着型ロボットの人体への親和性を高める上で重要な研究課題に取り組む。

## 3. 研究の方法

ミクロな筋骨格系の構造に関する研究としては、ロボットスーツに組み込み可能な体表に貼り付けるタイプのセンサを用いて、随意および不随意的筋の収縮弛緩の材料特性を解析しモデル化する。具体的には表面筋電図および体表からの押し込み反力を利用した筋硬度の計測を実施し、上肢・下肢の関節屈曲伸展運動における各筋の挙動と関節全体の姿勢、発揮筋力の関係をモデル化する。また、結果として得られた筋の特性を模したアクチュエータユニットとして、服型装具に取り付け可能な柔軟なワイヤをベースとしたハードウェアを開発する。

マクロな筋骨格系の構造に関する研究としては、アクチュエータ同士を弾性要素によって接続しユニット化したプロトタイプを製作する。これをスパッツ素材などを用いたスーツに搭載し、プロトタイプスーツを製作する。プロトタイプスーツ上で、アクチュエータの配置や動作条件を変更した際の入出力関係を実験的に導出し、その後、最適化した構造において、人体との親和性を定量的に評価する。日常生活の中でも主要な動作である食事動作、歩行動作に着目し、プロトタイプスーツは肘関節、膝関節の 1 自由度運動を対象として検討を進める。

## 4. 研究成果

まず、ロボットスーツに組み込み可能な体表に貼り付けるタイプのセンサを用いて、筋の特性を明らかにする手法を構築した。随意収縮による筋力発揮の特性として、(a) 膝関節の屈曲伸展運動における負荷抵抗を漸増させたときの速筋繊維と遅筋繊維の活動を推定する方法、(b) 押し込み式筋硬度計から得られる粘弾性指標を基にした不随意的筋の弛緩を評価する手法、(c) 上肢の表面筋電図に基づき、不随意的震えによる筋の収縮による力発揮と随意的な筋の収縮による力発揮を判別する方法を提案した。(a) では筋肉のフラクタル構造に基づき、筋繊維の活動を対数特性のあるモデルで表現することで速筋線維の活動閾値を導出する手法を構築した(図 1, 2)。(b) では表面筋電図と共に押し込み式の硬度計を装着することによって、他動的なストレッチによる不随意的筋弛緩の挙動においても、筋の材料特性を対数特性のあるモデルで表現可能であることが確認された。(c) では、本態性振戦を対象として患者の表面筋電位の特徴解析を実施した。患者の筋電位に混入している振戦の原因となる信号の周期性や振幅値について解析した。振戦のノイズの特性が随意動作の影響を受け変化している様子を確認し、結果をもとにリアルタイムに随意動作推定アルゴリズムを提案した(図 3)。

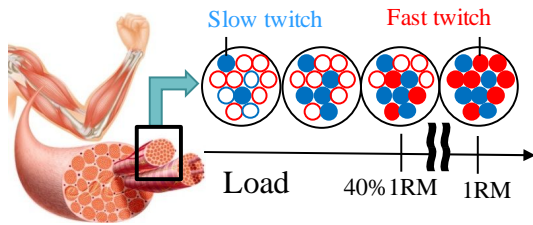


図1 筋構造のフラクタル性と速筋・遅筋線維の活動

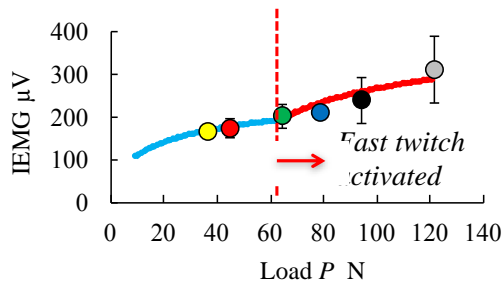


図2 膝関節伸展運動における負荷と筋電積分値の関係

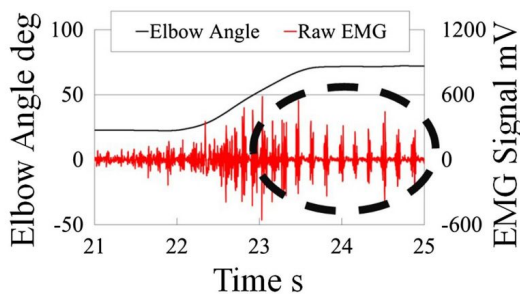


図3 本態性振戦患者の肘関節屈曲運動における筋電図の特徴

次に、得られた筋構造の特性を踏まえて肘関節および膝関節の動作にアプローチするプロトタイプスーツを製作した。肘関節動作支援ロボットとして、筋の配置を模したワイヤ駆動ユニットを多数組み合わせた可変剛性スーツを製作し、食事動作において従来の金属フレームロボットと同等の振戦抑制効果が得られることを確認した。また、歩行中の膝関節動作にアプローチするロボットとして、下肢に装着するワイヤ駆動型のロボットシステムを製作した(図4)。個々の筋の特性を統合した下肢筋群の協調性に基づき、歩行周期中の特定の位相のみにおいてワイヤ牽引によるトルク印可を実施し、つまずきリスクが低減される歩容変化を促すトルク印可条件を実験的に導出した。

今後は人間との親和性の高い柔軟なロボットスーツにおいて、複数自由度の動作における筋骨格系のネットワーク構造を応用した制御システムへの拡張に取り組み、より人間の自然な動作に適したロボットの開発方法論の確立を目指す。

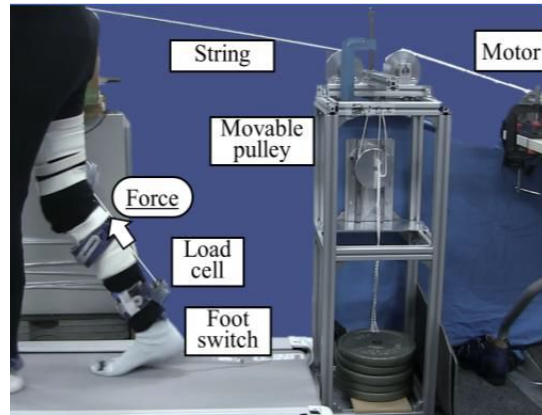


図4 ワイヤ駆動型歩行動作支援ロボット

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Yuya Matsumoto, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Hiroshi Iijima, Masanori Nagaoka, Masakatsu G. Fujie, "Algorithm to Demodulate an Electromyogram Signal Modulated by Essential Tremor", *Robomech Journal*, vol.4, No.15, pp., 2017. (査読あり)

[学会発表](計 4 件)

伊藤寛将, 岡村尚美, 川崎基資, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, "筋線維の活動に応じた筋電図変化に基づく最小リハビリ負荷導出手法の構築", LIFE2016, 東北大学青葉山キャンパス, 仙台, Sep. 4-6, 2016. (査読なし)  
三宅太文, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, "歩行訓練ロボット制御のための下肢関節間の協調性に着目した歩容の定量化手法の検討", LIFE2016, 東北大学青葉山キャンパス, 仙台, Sep. 4-6, 2016. (査読なし)

Tamon Miyake, Mariko Tsukune, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, Shigeki Sugano, "Relationship between Magnitude of Applied Torque in Pre-Swing Phase and Gait Change for Prevention of Trip in Elderly People", The 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2016), Orlando, Florida, USA, Aug. 16-20, 2016. (査読あり)

岡村尚美, 築根まり子, 小林洋, 菅野重樹, 藤江正克, "腓腹筋の静的ストレッチングにおける姿勢変化が筋粘弾性変化に及ぼす影響", ロボティ

クス・メカトロニクス講演会 2016  
(ROBOMECH2016) , パシフィコ横浜, 横  
浜, Jun. 6-11, 2016. (査読なし)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

藤江 正克 (FUJIE, Masakatsu)  
早稲田大学・理工学術院・名誉教授  
研究者番号 : 20339716

(2)研究分担者

小林 洋 (KOBAYASHI, Yo)  
早稲田大学・理工学術院総合研究所 (理工  
学研究所)・主任研究員 (研究院准教授)  
研究者番号 : 50424817  
削除 : 平成 27 年 7 月 28 日