

令和元年6月17日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06431

研究課題名(和文) 二関節筋構造を考慮した下肢の電動義肢装具の制御に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Control of Powered Lower-limb Prostheses and Orthoses with Antagonistic Bi-articular Muscles

研究代表者

村尾 俊幸 (Mura, Toshiyuki)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：00447038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二関節筋を考慮した下肢の運動モデルと、その運動モデルに対して安定性を保証する制御手法の提案をおこなった。シミュレーション検証を通して、角度と角速度がそれぞれの目標値に一致することを確認している。一方で、筋電位センサの情報をもとに制御する二関節筋構造を考慮した電動義足の試作機を製作し、検証実験をおこなった。また、二関節筋構造を考慮した電動長下肢装具の試作機も製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに研究されてきた電動義足は人間が持つ筋モデル構造ではなく、一つの関節に一つの動力源が存在する従来からの単純な機構に基づいて設計されている。例えばリハビリテーションの現場では、従来のロボット運動学に基づいたアームは人間の四肢と比較すると出力特性が異なることから、様々な問題が生じることを理学療法士が指摘している。このことは、人間の出力特性を意識した電動義肢装具の設計をおこなうことが有効となる可能性を示唆しており、人間が有する二関節筋に基づいた本研究はその一助となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we derive the dynamics of a 3 degree-of-freedom lower limb with antagonistic bi-articular muscles. Stability analysis for the closed-loop system of the lower limb dynamics and the proposed input torque is discussed through Lyapunov stability theorem. Simulation results are presented to confirm the effectiveness of the proposed approach. We design a prototype of a powered lower-limb prosthesis with antagonistic bi-articular muscles, which is controlled by myoelectric potential. We also make a prototype of a powered knee-ankle-foot orthosis with antagonistic bi-articular muscles.

研究分野：ロボット制御

キーワード：制御工学 電動大腿義足 二関節筋 電動長下肢装具 機械力学・制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2012年の国民健康・栄養調査結果によると、日本の糖尿病有病者は約950万人にも昇るとい統計が出ている。また、日本の糖尿病患者の中でも、下肢の切断を強いられた者は2005年までの35年間で約2.5倍も増えている[1]。さらに米国では、2005年から2050年までに糖尿病や閉塞性動脈硬化症などを原因とする血行障害による四肢欠損者が、現在の2倍にあたる360万人に増えることが予想されている[2]。

四肢切断者に対する義肢は古くから研究され実用化されているが、欧州先進国では標準的な義手の一つになりつつある上肢の電動義手に比べ、下肢に対する義足は、健常者と間接インピーダンスを一致させることを目指した機構的には受動的で動力源を持たないものが多い。一方、電動義肢は人の日常生活をサポートするロボットとみなすことができるが、まさに人と直に接するロボットとなるために、ロボットの性能以上に人々への安全面を考慮する必要が大いにある[3]。

このような背景のもと、安全面を語るうえでも大変重要になる安定性という概念を伴った電動義足が近年研究され始めている[4]。しかし、これまでに研究されてきた電動義足は人間が持つ筋モデル構造ではなく、一つの関節に一つの動力源が存在する従来からの単純な機構（例えば2リンクアームなど）に基づいて設計されている。例えばリハビリテーションの現場では、従来のロボット運動学に基づいたアームは人間の四肢と比較すると出力特性が異なることから、様々な問題が生じることを理学療法士が指摘している[5]。このことは、健常者と同様の動きを目指すならば、人間の出力特性を意識した電動義肢装具の設計をおこなうことが非常に有効となる可能性を示唆している。義肢装着者が生活しやすくなるためには、バリアフリーを広げ環境をこれまで以上に整えることは論を俟たないが、同時に義肢装着者の歩行を健常者の歩行により近づけることも非常に有益であり、人間のモデルをより考慮した電動義足の理論的な研究成果が期待される。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、二関節筋の構造を取り入れた大腿切断者用の電動義足に対する制御手法を、理論的なアプローチによって提案することである。二関節筋とは、人間が上肢と下肢に有している、二つの関節にまたがって動作することで両関節に同時に作用する特徴を持つ筋肉のことである[6]。人間は下肢には大腿部に拮抗二関節筋ペアを、また下腿部はふくらはぎ側に二関節筋を有している。この二関節筋構造モデルをロボットへ導入すると、より人間に近い運動特性が実現可能になる。さらに、各関節が一つのモータと両関節につながったモータの二つにより協調して制御されることから、一つ一つのモータに対する出力を抑えることが可能となり安全性が増すメリットがある。人間が有する下腿部の二関節筋は足首からつま先へ体重移動するときに、また大腿部の拮抗二関節筋ペアは足首の制御に大きな影響を及ぼす。二関節筋を陽に考慮することで、健常者の下肢により近い出力特性が得られる電動義肢装具の設計手法の提案が期待される。

従来研究では、二関節筋ロボットの制御と、電動義足の制御はそれぞれ個別の研究課題として考えられてきた。そもそも二関節筋に関しては、運動の解析に関する研究結果は多く報告されているが、運動制御に関しては研究成果がほとんど報告されておらず、また電動義足の制御理論に基づく研究も始まったばかりである。つまり、これまで制御分野において二関節筋を考慮した電動義足の制御に関する制御系設計がなされることはなかった。

本研究では、個別に扱われてきた研究課題を新たなひとつの制御問題として捉え、電動義肢装具に対する二関節筋構造を考慮した制御則を提案し、安定性の議論をおこなう。一方で、二関節筋構造を考慮した電動義肢装具の有用性を検証するために、電動義足ならびに電動長下肢装具を設計し、試作機を製作する。本研究は二関節筋ロボットの運動制御と電動義足の制御を統合した内容となるが、従来の電動義足の制御に比べ、各モータの出力を抑えられることから安全面での向上が期待される。また、提案するものは人間の下肢を模したモデルに基づいた制御手法となるために、健常者の下肢の出力特性に近い特性を持たせることが可能となると考えられ、その場合人間が自然に力を出せる方向に義肢装具を動かしやすくなることがメリットになる。

### 3. 研究の方法

本研究では、はじめに二関節筋構造を考慮した下肢の運動モデルを導出するために、数学的にモデリングすることから始める。特に本手法では、下肢モデルのダイナミクスが受動性を持つようなモデリングをおこなう。つぎに制御目的を設定し、その制御目的を満足するような制御系設計をおこなう。制御則はモデリングした下肢モデルを受動システムとさせることを利用し、リアプノフの安定定理に基づく安定性解析をおこなう。提案する制御則の有効性を検証するために、計算用のソフトウェアであるMATLAB/Simulinkを用いてシミュレーションをおこなう。一方で、二関節筋構造を考慮した電動義足ならびに電動装具を設計し、試作機を製作する。そして、特に二関節筋を模した構造に着目して、両試作機に対する有効性の検証をおこなう。

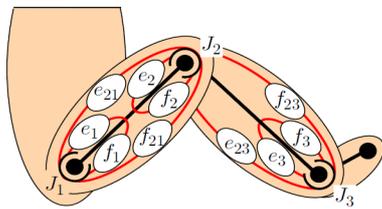


Fig. 1: 下肢運動モデル

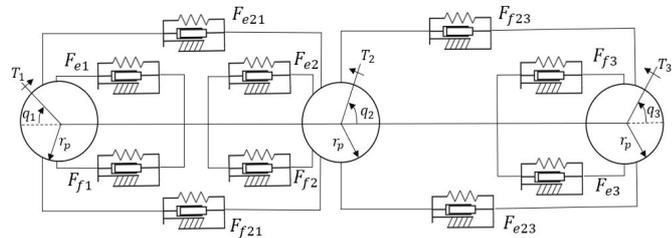


Fig. 2: 3自由度二関節筋粘弾性モデル

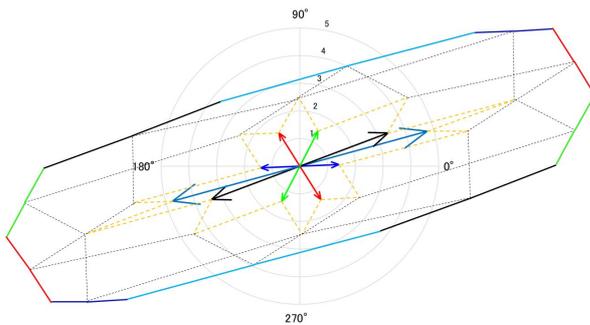


Fig. 3: 足先出力分布

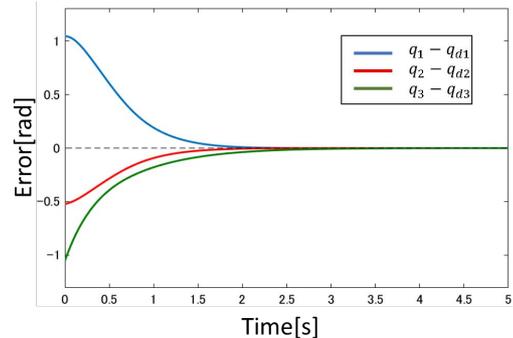


Fig. 4: 関節角度偏差

#### 4. 研究成果

##### (1) 二関節筋を考慮した下肢の運動モデルと制御手法の提案

二関節筋を考慮した下肢の歩行モデルの構築に向けて、二関節筋を考慮した下肢の運動モデルとその運動モデルに対する制御手法の提案をおこなった。

はじめに、二関節筋を有する下肢運動モデルを数学的に導出した。モデリングは、Fig. 1に示すような股関節、膝関節、足関節を考慮した二関節筋を有する3自由度のダイナミクスとし、それをオイラー・ラグランジュシステムとして捉えて導出した。より具体的には、Fig. 2に示すような二関節筋粘弾性モデルに基づき、各筋肉がバネ-ダンパを有しているとみなし、モデリングをおこなった。なお研究目的を、人間の運動の正確な解析ではなく、電動義足や電動装具の制御として捉えているために、腓腹筋の前側部分に相当する実際の人間の足には存在しない二関節筋も、簡単化のために存在すると仮定し下肢運動モデルを導出している。つぎに、MATLAB/Simulinkを用いて、つま先にあたる足先の先端出力分布を確認した。ある姿勢のもとで計算した足先出力のベクトルを合成し、求めた足先出力分布をFig. 3に示す。文献[6]では、2自由度の二関節筋運動モデルに対して同様のことをおこなった場合、出力分布が6角形となっており、これこそが二関節筋を考慮したモデルの特徴であることが述べられている。3自由度の下肢運動モデルでは2自由度の運動モデルに対して、一関節筋と二関節筋が一つずつ増えることになるが、3自由度の運動モデルに対して求めた本研究のFig. 3の結果が10角形の出力分布になっているために、2自由度のものに対する自然な拡張になっていると捉えることができる。

さらに、導出した下肢運動モデルに対して、角度と角速度がそれぞれの目標値に一致するような制御入力トルクを提案した。具体的には、入力トルクの一部と、角度偏差および角速度偏差からなるある変数との間に受動性が成立するような、入力トルクを提案した。なお、提案した入力トルクは、二関節筋に対するバネとダンパを陽に考慮したものとなっている。また、受動性に基づいた制御手法となっていることから、リアプノフの安定定理より安定性を容易に証明することが可能となっている。提案した制御則の有効性を確認するために、MATLAB/Simulinkを用いたシミュレーション検証をおこなった。Fig. 4に時不変の目標値に対する、関節角度の偏差のシミュレーション結果を示す。初期偏差を有する場合において、偏差が0に収束していることが確認できる。また、時変の目標値に対するシミュレーションに対しても、目標値に一致することを確認できている。

##### (2) 電動義足の試作機の製作

二関節筋を取り入れた電動大腿義足の試作機(Fig. 5 参照)を製作した。製作したものは内側広筋、大腿二頭筋(短頭)、前頸骨筋、ヒラメ筋の一つの関節のみを動かす四つの一関節筋と、腓腹筋の機能を模した膝と足首の両方の関節に影響を与える一つの二関節筋の計五つの動力を持った電動大腿義足となっている。一関節筋と二関節筋の両方で同じ関節を動かすために、関節部分をベルトで接続し、ベルトを巻き取ることで関節を収縮させる構造とした。関節角度を取得するためにポテンショメータを、またベルトの弛緩や破損を防ぐようモータの回転数を一定にするための光エンコーダを取り付けている。また、電動義足は筋電位センサを組み込んだシステムとし、残存している脚部から測定される表面筋電位により、電動義足を制御できるよ

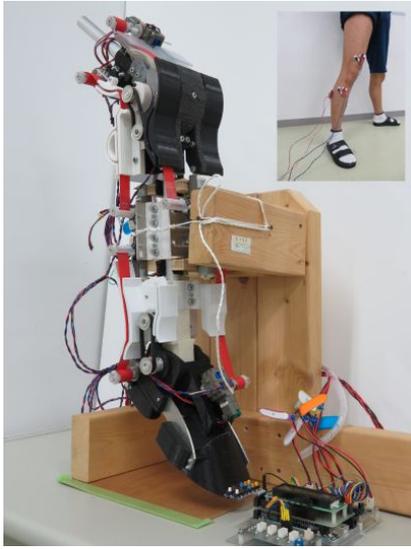


Fig. 5: 電動義足の試作機

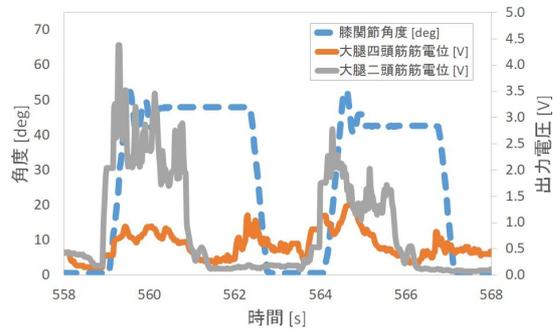


Fig. 6: 電動義足における膝関節角度

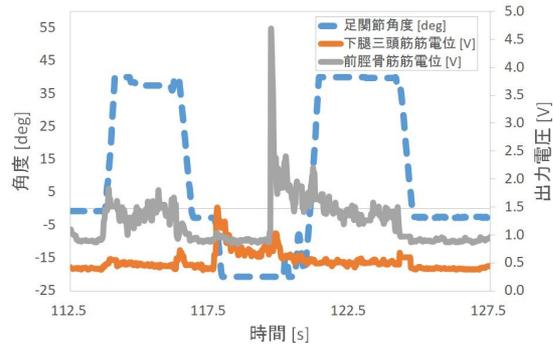


Fig. 7: 電動義足における足関節角度



Fig. 8: 電動長下肢装具の試作機

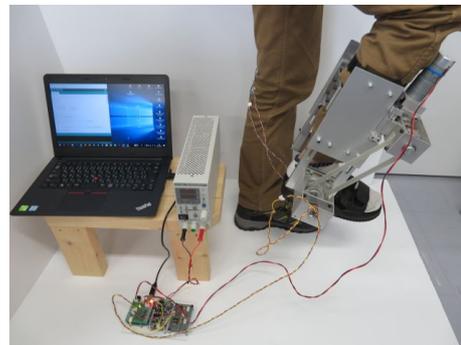


Fig. 9: 電動短下肢装具の試作機

うにした。

検証実験でははじめに、二関節筋を併用した場合において、一関節筋のみを動作させたときよりも動作時間が短くなり、トルクの合成がおこなわれていることを確認した。つぎに、表面筋電位による電動義足の制御に対する実験をおこなった。筋電位センサを大腿四頭筋と大腿二頭筋付近の皮膚表面に貼り付けることで膝関節の伸展および屈曲動作時の筋電位を、また前脛骨筋と下腿三頭筋付近の皮膚表面に貼り付けることで足関節の背屈および底屈動作時の筋電位を取得し、電動義足の膝関節と足関節の制御をそれぞれおこなった。実験結果を Figs. 6, 7 に示す。実験では、膝関節を 559 秒に曲げ 563 秒に伸ばす動作をおこなった。膝の屈曲動作では大腿二頭筋の筋電位センサが反応し、伸展動作では大腿四頭筋の筋電位センサが反応していることがわかる。同様に、足関節を 114 秒に曲げ 117 秒に伸ばす動作をおこなったところ、背屈動作では前脛骨筋の筋電位センサが反応し、底屈動作では下腿三頭筋の筋電位センサが反応していることがわかる。また、筋電位センサの反応をもとに、電動義足も膝関節と足関節がそれぞれ動いていることが Figs. 6, 7 よりわかる。

### (3) 電動装具の試作機の製作

二関節筋を考慮した電動長下肢装具の試作機を製作した(Fig. 8 参照)。機構面では内側広筋と前脛骨筋を模した一関節筋ワイヤと腓腹筋を模した二関節筋ワイヤをモータにより巻き取ることで関節を曲げることになる。装具の足裏部分に取り付けた圧力センサにより、足の地面への接地状態を測り、足の蹴り出し動作を補助できるように、接地状態に応じた装具の関節角度の制御を試みた。健常者に装具を装着させ、蹴り出し動作に関する検証実験をおこなった。

この電動長下肢装具を製作するにあたり、事前に Fig. 9 に示す電動短下肢装具の試作機を製作した。機構面ではタイミングベルト、タイミングプーリを用いることで、電動短下肢装具

の小型化と慣性モーメントの低減を計った。電動短下肢装具に対しても、足裏部分に圧力センサを取り付け、地面への接地状態を測り、それに応じた装具の関節角度の制御を試みている。健全者に装具を装着させ、蹴り出し動作に関する検証実験をおこなった。

#### <引用文献>

- [1] 澤村誠志, 田澤英二, 内田充彦(編), 義肢学(第3版), 医歯薬出版, 2015.
- [2] K. Ziegler-Graham, E. J. MacKenzie, P. L. Ephraim, T. G. Travison, and R. Brookmeyer, "Estimating the Prevalence of Limb Loss in the United States: 2005 to 2050," Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 89, No. 3, pp. 422-429, 2008.
- [3] 岸宣仁, ロボットが日本を救う, 文春新書, 2011.
- [4] R. D. Gregg, T. Lenzi, L. J. Hargrove, and J. W. Sensinger, "Virtual Constraint Control of a Powered Prosthetic Leg: From Simulation to Experiments with Transfemoral Amputees," IEEE Trans. Robotics, Vol. 30, No. 6, pp. 1455-1471, 2014.
- [5] 長谷公隆(編著), 運動学習理論に基づくリハビリテーションの実践, 医歯薬出版株式会社, 2008.
- [6] 熊本水頼(編著), ヒューマノイド工学 - 生物進化から学ぶ2関節筋ロボット機構 -, 東京電機大学出版局, 2006.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計1件)

1. 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都, 鈴木亮一, 藤田政之, "片麻痺患者のリハビリテーションに向けたFESによるペダリング運動の速度制御," 電気学会論文誌C, Vol. 138, No. 11, pp. 1391-1398, Nov., 2018. (DOI:10.1541/ieejc.138.1391)

##### [学会発表](計3件)

1. T. Murao, H. Kawai, K. Hirata and M. Fujita, "Bilateral Control of Nonlinear Teleoperation for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-articular Muscles," Proc. of the 2017 Asian Control Conference, pp. 204-209, Gold Coast, Australia, Dec. 18, 2017. (DOI:10.1109/ASCC.2017.8287167)
2. 小林和雅, 村尾俊幸, 河合宏之, 鈴木亮一, "3自由度二関節筋マニピュレータに対する安定化制御則の提案," 平成30年度電気関係学会北陸支部連合大会資料, Paper Number H-4, 石川, Sep. 8, 2018.
3. K. Kobayashi, T. Murao, H. Kawai and R. Suzuki, "A Control Method for a 3DOF Bi-articular Manipulator towards Robotic Rehabilitation," Proc. of the 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics, pp. 630-633, Nara, Japan, Oct. 12, 2018. (DOI:10.1109/GCCE.2018.8574621)

##### [図書](計0件)

##### [産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

##### [その他]

ホームページ等

<http://www2.kanazawa-it.ac.jp/mlab/>

#### 6. 研究組織

(1)研究分担者  
なし

(2)研究協力者  
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。