

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420200

研究課題名(和文) パワーアシストスーツにおける生体信号を用いない運動意図の推定と制御への応用

研究課題名(英文) Estimation of the human motion without using biologically measured signals and its application to the control of the wearable power assist suit

研究代表者

藤井 文武 (FUJII, Fumitake)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：30274179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外骨格型パワーアシストスーツの制御のため、装着者の生体信号を利用せず適切な目標値を推定する方法と、その推定値を有効に活用する制御系の設計方法について検討した。身体動作への追従制御に関しては、アシスト対象関節の関節角加速度を推定する機構を考案し、アシストスーツにとっての外乱である負荷を補償する適応スライディングモード制御系を構成した。一方、力・トルクの明示的な補償について、持ち上げる負荷の大きさにより作業者の体の動かし方が異なることに着目した負荷推定器を構成、それを制御系の目標値に反映させることで負荷量に応じたアシストが装着者に加えられる制御システムを構築し、その効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：The current study focuses on the control system designs for the powered exoskeleton which does not use the biologically measured signal. We have synthesized two different control systems. One concentrates on the in-phase tracking to human body motion and the other tries to provide sufficient force/torque to the user of the exoskeleton. The former uses the adaptive Kalman filter to estimate angular acceleration of the joints supported by the exoskeleton under the existence of the model uncertainty and the sensor offset, and the adaptive sliding mode controller has been implemented for the control of the actuator to achieve in-phase tracking to human motion. The second one includes the development of load estimator which utilizes the quantitative difference of the body usage which depends on the amount of load. The MCS adaptive controller will follow to provide the sufficient force/torque support to the user. Experimental results show the validity of the proposed control system.

研究分野：人間機械システム

キーワード：外骨格型パワーアシストスーツ 負荷推定器 ロジスティック識別器 適応スライディングモード制御  
MCSモデル規範適応制御 カルマンフィルタ

## 1 . 研究開始当初の背景

近年 , 身体に装着し人間の運動意図もしくは力・トルク支援の必要性を検出して , そのサポートを行う身体装着型アシストスーツが活発に研究されている . これらの研究は , スーツの用途 , 利用するアクチュエータ , 制御方策等の技術要素により分類され , それぞれについて複数の提案がなされている . アシストスーツに支援動作を行わせるにあたり , 装着者の明示的なスイッチ操作を求めることなく支援を開始するには , 装着者の運動意図もしくは力・トルク供給の必要性を遅滞なく確実に検出する必要がある . この「運動意図」が表れている信号として着目されているのが筋電位である . 筋電位は , 電位そのものが微弱で個人差も大きく扱いが難しい信号であるため , 確実かつ正確な運動意図検出のために学習アルゴリズム等と組み合わせる手法が提案され , 実用化されてもいる .

運動意図に対して身体が適切に反応しない状況のリハビリや , 随意運動困難者の支援のような問題では , 「スーツ装着者から観測される筋電位をトリガとして物理的な補助を身体に与える」という方策は極めて合理的であり , 他の手段を検討する必要性を感じないが , 製造現場等での利用においては「装置を複数の作業者が共用する可能性がある」( 装着者が変わること装置が学習したゲインが不適合となり , 過度なアシストが与えられたり , アシスト不足が発生したりする可能性がある ) 「筋電位を測定するための電極の脱着が , 毎日のこととなると煩わしい」などの状況が発生すると予想される .

そこで本研究では , アシストスーツを駆動するためのトリガ信号を筋電位などの生体信号を用いることなく構築することを最重要課題とし , どのようにトリガ信号を計測・生成し , それを如何に活用して装着者に違和感がなく , かつ十分なアシスト量を提供するアシストスーツシステムを構築するかを , 制御シ

ステム設計を主眼として検討することとした .  
2 . 研究の目的

我々が研究を開始した時点で , 生体信号によることなくアシストスーツを駆動する方法としては , 装着者身体のアシスト対象関節の関節角度を計測し , それを目標値として追従制御系を構築する方法 , 力作業をする際に装着者の筋肉に発生する隆起量を計測し , それに比例するアシスト力を発生させる方法 , 靴底などに設置したセンサにより重量物を持ち上げている状態にあることを把握し , 持ち上げ時点の姿勢角に応じた必要関節トルクを算出 , 対応するアクチュエータを制御する方法 , などが既に提案されていた .

しかしながら , は「力の供給制御」に主眼を置いたものと考えられるが , いったん作業者の身体に負荷がかかってからでないと検出値が変化しないと推測される . 力を明示的な制御量としない ではそのような問題はないが , 身体と外骨格型スーツの間に関節角度偏差が発生してからでないと操作量が発生せず , ～ のいずれも装着者が求めるよりも位相が遅れた形でアシストが加えられると推測される . これは装着者の違和感や , 作業性の低下の要因となり得るものである .

そこで我々の研究では , ( ) 装着者の動作意図に遅滞なく , できるだけ小さい位相遅れでアシストを供給する制御システムを構築すること , ( ) 重量物の持ち運び作業において , 負荷の大きさに応じた適切なアシスト力を発生させる制御システムを構築すること , の2つの目標のそれぞれについて制御系設計法を検討することとした . ( ) については , 前段落の の方法では負荷発生からアシスト力提供までに遅れが発生することを踏まえ , 実際に作業者に負荷が乗る前の段階で負荷の大きさを見積もる方法の確立を目標として検討することとした .

### 3. 研究の方法

#### ( ) 装着者の運動意図に遅滞ないアシストスーツ動作制御の実現

本研究のために試作した外骨格型パワーアシストスーツを図1に示す。動力源にはマッキベン型人工筋肉を利用、人工筋肉が発生する収縮力がワイヤを介して腰・肘・肩（屈曲方向）の外骨格関節に設置されたトルク円盤に伝達されて各関節の回転トルクへと変換され、外骨格を介して作業者に伝達される構造となっている。



図1：試作した外骨格型

( ) の課題については、静的に加えるべきアシスト力を明示的な制御量とせず、装着者の関節角度が外骨格の対応する関節の目標値を与えるという設定で、できるだけ遅れが少ない追従制御系を構成することとした。その際、装着者が持ち運びすべき負荷は、装着者の意図する運動を支援するアクチュエータ動作を妨げる外乱として捉えられるため、それを補償する機構を制御システムに取り入れるべく制御系設計を行った。

外骨格型のアシストスーツにより装着者の身体にアシストを加える場合、コントローラが人工筋肉に加える空気圧を指令してから対象関節の速度・角度変化として観測されるまでは、物理的因果律に従った遅れを伴う。一方、装着者の運動を自然にアシストするためには、アシストスーツは装着者が装置をつけていることを意識しないで済むよう、外骨格が装着者と同調した運動を行うことが必要である。そこで我々は、装着者の身体運動に伴って発生している関節角加速度を推定し、これをアシストスーツアクチュエータの制御に用いることとした。

右の図2は、アシストスーツの装着者身体に取り付けたセンサユニットの配置を示している。

一つのセンサユニットは3軸周りの回転角速度を測定するジャイロセンサからなっている。図中の は支援対象となる関節を表すが、対象関節を挟み込む形で設置位置を決定し、各部位の回転角速度の相対値で関節角速度が測定できるようにした。このユニットによる測定系を用い、運動

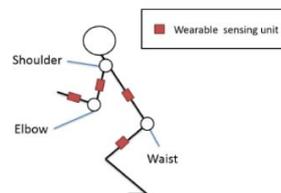


図2：関節角速度を測定するためのセンサの配置

学方程式をシステムの状態方程式としてカルマンフィルタを構成し、関節の回転角加速度を推定した。状態方程式、観測方程式の双方に、モデル化誤差、観測雑音、センサ出力のオフセットなどが想定されるため、それらが推定値に与える影響を低減化する目的で適応カルマンフィルタを設計して実装した。

定められた加速度推定値は、研究代表者が提案した「マッキベン型人工筋肉が外部負荷を牽引する時の挙動を表現するモデル」を利用して構成した適応スライディングモード制御則において、操作量の生成に利用した。

#### ( ) 負荷の大きさに応じた適切な過渡アシスト力を発生させる制御システムの構築

( ) で設計した制御系では、すでに説明したとおり外骨格装着者に加えられる力を制御量として取り扱っていない。装着者が重量物を持ち上げ、その状態を保持している状況では、動作を始める前と比較して肘は屈曲、肩と腰は伸展した状態となる。外骨格は、人工筋肉の収縮が重量物保持の際に身体関節に掛かる負荷を緩和するよう設計されている。ゆえに、装着者が重量物を持ち上げれば、外骨格をその動作に追従させるように人工筋肉が収縮し、重量物の負荷に抗する関節トルクが外骨格に作用するので、装着者の姿勢保持や負荷に抗する運動を支援する力は外骨格により装着者に与えられてはいるが、負荷の大きさを踏まえて計算されたトルクとはなっていない状況であった。

そこで、本研究の第2段階では、床面におかれた重量物を持ち上げる動作における腰部の支援にアシストスーツの利用目的を限定し、対象物の重量を踏まえたアシストトルクを発生させる制御システムの構築を行った。ここでも、生体信号を利用しないで制御システムを構築することを目標として検討を行った。

負荷の推定は、負荷量が作業者にとって既知であるという状況の下で観測される、重量物持ち上げに至る体姿勢の違いに着目して行った。具体的には、作業者の身体部位の角度変化を説明変数として「持ち上げる負荷が軽い」「持ち上げる負荷が重い」の2クラスを判別する判別器を構成し、その判別器が出力する「持ち上げる負荷が重い」に属する確率に判別器学習のための実験で被験者に課した最大負荷である25kgを掛けたものを、作業者の姿勢変化から推定される負荷の期待値とし、これを制御に用いることとした。

マッキベン型人工筋肉の制御には、モデル規範型適応制御系設計法の一つである、Stotenによって提案されたMCS(Minimal Controller Synthesis)法を用い、人工筋肉のモデルにまつわる不確定性を吸収しつつ過渡的な変化も含め負荷に応じた適切なトルクが装着者に与えられるよう、制御系を構成した。

#### 4. 研究成果

( ) 装着者の運動意図に遅滞ないアシストスーツ動作制御の実現

右図3に、アシストスーツを装着した被験者が10kg程度の荷物を抱え持ち上げ動作を行った際の、腰の角度(緑)と、カルマンフィルタにより推定された腰の角加速度(紫)を示す。腰の角度変化に先行する角加速度変化が確認できる。

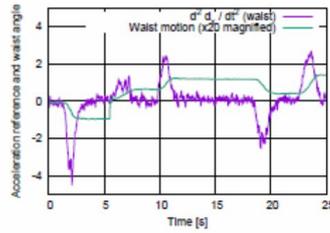


図3

前節で説明した適応スライディングモード制御則を実装し、アシストスーツを装着した被験者が荷物の抱え上げ動作を行

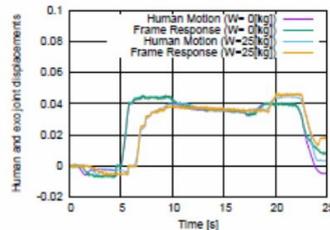


図4

った場合、身体に装着されたセンサにより計測された肘関節角度の時間変化と、アシストスーツフレームに固定されたセンサで計測されたアシストスーツ肘関節角度の時間変化をプロットすると、上図4のようになる。荷物を抱え上げ、再び台の上を下ろすまでの間、身体肘関節の角度と外骨格肘関節の角度はほぼ完全に一致しており、人間の動作に遅滞ない制御が達成できたことを確認した。

( ) 負荷の大きさに応じた適切な過渡アシスト力を発生させる制御システムの構築

前節で説明した、負荷推定器とMCSによるアクチュエータ制御系を連動させ、床面におかれたおもり入りコンテナを腰のあたりまで持ち上げる動作を行わせた際の、推定された負荷の大きさと、人工筋肉が腰関節に加えたトルクおよび腰関節角度の時間変化を測定した一例を、図5に示す。

コンテナの中に入れたおもりWは、0kg(重りなし)、10kg、25kgの3とおりである。実験の被験者はコンテナの中にどれだけのおもりが入っているかを持ち上げる前に目視で確認することができるので、それに応じて持ち上げ動作における体の使い方を変更している。この点については被験者に何らの指示を与えておらず、被験者は経験的に身につけている動作によって実験を行っているが、設計したクラス判別器は適切に機能し、10kgのおもりを用いた場合についても妥当な負

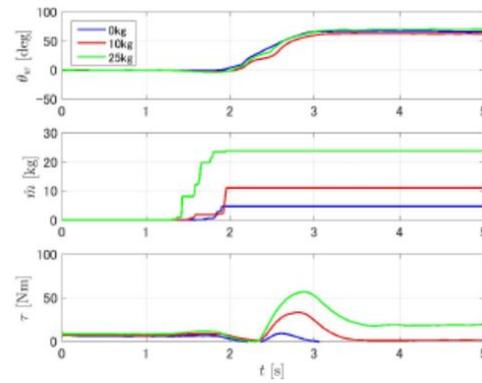


図5

荷推定値を与えている点が注目になる。また、その推定値を踏まえて構成されたMCSによるアクチュエータ制御系の動作結果である、人工筋肉が腰に与えた補助トルク(図の一番下のグラフ)の実測値についても、最大値の大小関係、時間変化の様子ともに望ましい値を示していることが確認できた。

#### 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 5 件)

H. Jitoshō and F. Fujii, “A reference augmentation design for the adaptive control of a wearable assist robot powered by the McKibben actuator,” Proc. IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics, 査読有, pp.1099-1104, 2017

F. Fujii, C. Liu and D. P. Stoten, “A minimal controller synthesis for the control of McKibben pneumatic actuator used in the powered exoskeleton,” Proc. 2016 Int. Conf. Innov. Appl. Research and Education, 査読有, pp.1-6, 2016

岡田拓也, 藤井文武, 「関節運動角加速度と皮膚表面筋電位の関係のモデル化に関する検討」, 第21回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 査読有, pp. 31 - 37, 2016

村田, 岡田, 山平, 原田, 藤井, 「外乱オブザーバーを用いた空気圧駆動関節アシストシステムの制御系の構成」, 日

本機械学会論文集，査読有，Vol. 81，  
No.824，2015

DOI: 10.1299/transjsme.14-00579

F. Fujii, Y. Hirose, H. Murata and T. Okada, “Use of Angular Acceleration and Velocity Estimates for Control of Pneumatic-Powered Wearable Motion Assist Device,” Proc. 23<sup>rd</sup> IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication, 査読有，  
pp. 1140 – 1146, 2014

〔学会発表〕(計 2 件)

原田亮平，藤井文武，地頭所久雄，  
「ウェアラブルリフタのための関節機構の開発」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017  
村田宏嘉，藤井文武，岡田拓也，「マッペン型アクチュエータを用いた関節アシストシステムの制御系の構成」，日本機械学会 2014 年次大会講演論文集，G1010305，2014

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：動作支援装置  
発明者：藤井 文武  
権利者：国立大学法人 山口大学  
種類：特許  
番号：特願 2013-222640  
出願年月日：2013 年 10 月 25 日  
国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等  
<http://ctrl.mech.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 文武 (FUJII, Fumitake)  
山口大学・大学院創成科学研究科・准教授  
研究者番号：3 0 2 7 4 1 7 9