

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14215

研究課題名(和文) 筋骨格モデルを規範とした力制御ベース上肢アシストシステムの研究

研究課題名(英文) Research on Motion Control Based on Musculoskeletal model for Upper Limb Assist System

研究代表者

元井 直樹 (Motoi, Naoki)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10611270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、人間のような環境への親和的な動作をシステムにおいて実現することを目指し、人間上肢の筋骨格モデルを規範とした運動制御理論の構築と、本理論の応用による上肢アシストシステムの具現化を目指す。本研究課題において得られた成果としては、主として次の三点が挙げられる。(1)筋電位情報と作業空間オブザーバの組み合わせによる人間動作を規範とした運動制御手法を開発した。(2)遊星歯車機構を用いた二関節筋動作の具現化と上肢基礎システムの試作設計を行った。(3)二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発を行った。

研究成果の概要(英文)： This project aimed at the realization of the motion control technology based on the musculoskeletal model of human upper limbs to achieve the flexible contact motion like humans. In addition, this project aimed to realize the upper limb assist system by applying this technology. The research achievements can be summarized as the following points. (1)The motion control method based on the electromyogram of each muscle and the workspace observer was developed. (2) By using the planetary gear mechanism, the 2-link manipulator with the bi-articular muscle was designed and prototyped. (3) The upper limb assist system based on the musculoskeletal model was developed.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：モーションコントロール 制御工学 生体システム アシスト制御

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国は超高齢社会を迎えており、高齢化率は拡大の一途をたどっている。また、2050年には世界人口の18%が高齢者に達し、世界的な高齢社会到来が予測されている。このような世界的な高齢化率の拡大により、今後の社会において福祉介護分野での需要の増大が生じることが想像される。特に我が国においては、高齢化と相まって少子化も生じているため、福祉介護分野への労働力の供給が需要に追いつかない等の問題が生じうる。結果、老々介護やシングル介護等が増加する危険性を秘めている。

このような社会背景のもと、福祉介護分野における肉体的負担の軽減や作業効率の高度化を目指した動作アシストシステムの研究開発が、国内外の様々な研究機関、企業、大学において盛んに行われている。これらの研究・開発の多くが産業界等で培われたロボット工学に基づいた駆動システム構成を採用している。一方で、人間の筋骨格モデルは、ロボット工学に基づいて構成された駆動システム構成と異なり、冗長性を有した駆動システム構成となっている。

このような研究背景のもと、人間の筋骨格モデルを考慮した人間動作アシストシステムの具現化を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、世界的な高齢化において生じうる福祉介護分野における労働力不足の問題に対して、動作アシストシステムの研究・開発を行い、福祉介護分野における肉体的負担の軽減や作業効率の高度化を目指す。

図1に人間上肢の筋骨格モデルを示す。図1に示すように人間上肢には単関節筋と二関節筋という2種類の筋肉が存在する。単関節筋は単一の関節のみに作用する筋肉であり、二関節筋は二つの関節にまたがり作用する筋肉である。単関節筋と二関節筋の協調により人間上肢が表現され、この二種類の筋肉の協調動作により人間上肢における手先動作が生成される。

ここで、産業界等で培われたロボット工学に基づいた駆動システムの代表であるシリアルリンク構造を考えると、各関節のみに作

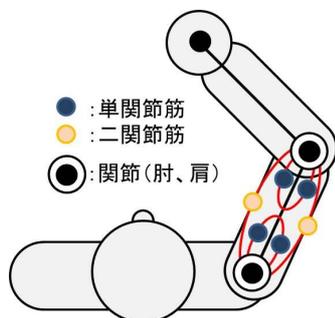


図1 人間上肢の筋骨格モデル

用するモータが各関節に設置されている。換言すると、産業界等で培われたロボット工学に基づいた駆動システムは筋骨格モデルにおける単関節筋のみを具現化したシステムであると考えられる。一方で、人間上肢においては単関節筋のみならず二関節筋が存在しており、それぞれの筋肉が協調することで環境に対する親和的な動作を実現している。

これらの観点より本研究では単関節と二関節筋の協調動作に基づく環境への柔軟な動作に着目し、人間のような環境への親和的な動作のシステムにおける実現を目指す。以上より、本研究課題では人間上肢の筋骨格モデルを規範とした運動制御理論の構築、および構築した運動制御理論を用いた上肢アシストシステムの具現化を目指す。そのために、下記に示す具体的な2つの研究目的の達成を目指す。

(1) 筋骨格モデルを規範とした運動制御技術の開発

(2) 二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発

3. 研究の方法

上述の本課題における三つの具体的な開発研究目標毎に、研究方法の概要について述べる。

(1) 筋骨格モデルを規範とした運動制御技術の開発

図1に示すように人間上肢の筋骨格モデルでは2つの単関節筋と1つの二関節筋が存在し3入力となる。一方で、出力は手先の移動方向である前後と左右の2出力である。つまり、3入力2出力となり冗長性を有するシステムとなり、この冗長性の解決方法が鍵となる。本研究では、人間の筋電位情報をもとにした手先指令から各筋出力への分配方法を用いる。また、二関節筋を有する人間上肢の具現化により、システムの複雑化が懸念される。システムの複雑化により、モデル化誤差や摩擦等が生じ、高精度な運動制御を阻害する。そこで、これらのシステムへの外乱を補償する人間動作を規範としたロボастな運動制御手法の構築を行う。

(2) 二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発

人間の筋骨格モデルを規範とした運動制御の評価を行うためには二関節筋を具現化したシステムにおける実証が必須となる。そこで、上肢基礎システムとして二関節筋を具現化した2リンクマニピュレータを試作開発し、基礎的な運動制御理論の実証および具現化した二関節筋に対する動作評価を実施する。さらに、実証評価において改良点等を明確化し、本改良内容を反映させることで最終的に人間上肢の動作アシストを可能とする二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発を行う。

4. 研究成果

上記の2点の開発研究目標に対して次の3つの研究成果が得られた。

- ・筋電位情報と作業空間オブザーバの組み合わせによる人間動作を規範とした運動制御手法の開発
- ・遊星歯車機構を用いた二関節筋動作の具現化と上肢基礎システムの試作設計
- ・二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発

それぞれの開発研究目標の観点より、得られた研究成果について詳述する。

(1) 筋骨格モデルを規範とした運動制御技術の開発

人間上肢の筋骨格モデルを規範とした運動制御技術を開発することで人間が有する環境への親和的な動作の獲得を目指した。人間上肢の筋骨格モデルでは2つの単関節筋と1つの二関節筋が存在し3入力となるが、手先動作は上下・左右であり2出力となる。つまり3入力2出力のため運動の冗長性が存在する。

本研究では人間の筋電位情報に基づいた手先の位置動作制御として Phase Different Control (PDC)【参考文献】を用いることで、人間動作を規範とした運動動作を実現する。PDCとは、全方位にわたって力を発揮させたときの各筋の筋放電を記録した筋電図を線形化した協調パターンに基づいた制御手法である。図2にPDCにおける筋電位の活性化レベルを示す。ここで縦軸は各筋の活性化レベルを百分率表示したものであり、横軸は系の先端の出力方向を表している。図3は系の先端の出力方向を図に表わしたものであり、 $a-d$ は第一関節と系の先端を結ぶ方向、 $b-e$ は第二リンクに沿った方向、 $e-f$ は第一リンクと平行な方向と定義される。PDCを用いることで手先先端の出力方向に応じた各筋への力配分が決定され、図3に示すそれぞれの筋の出力の総和によって手先で発生する力が生成される。

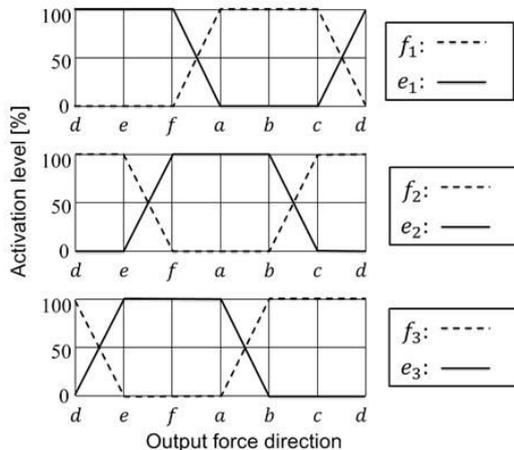


図2 PDCにおける筋電位の活性化レベル

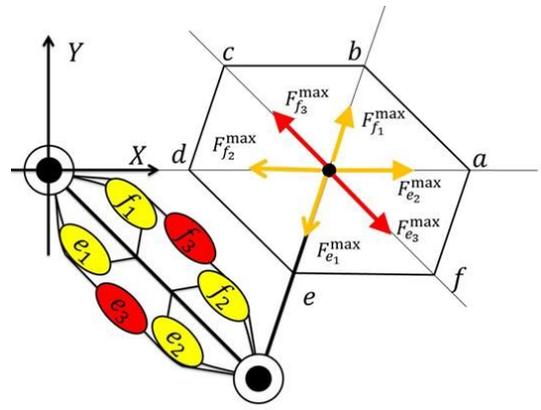


図3 手先出力方向

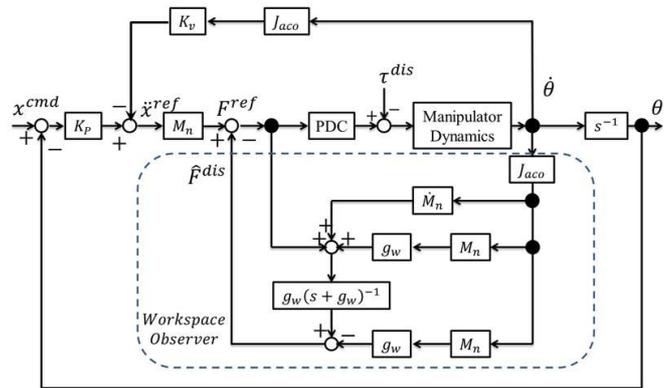
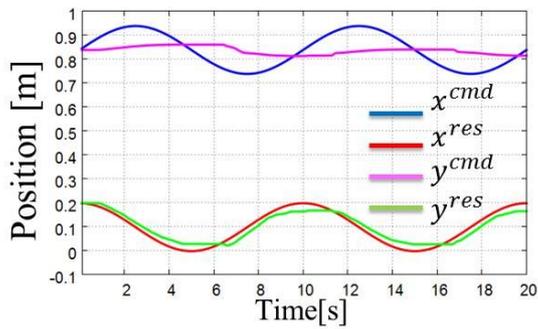


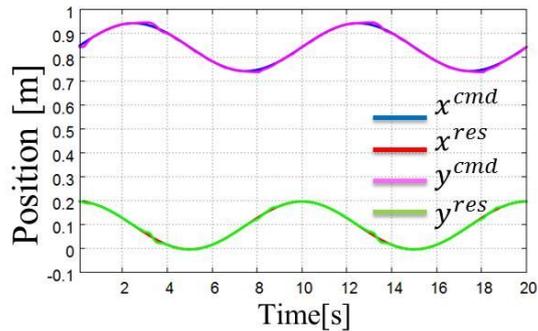
図4 運動制御のブロック線図

PDCに基づく運動制御手法では、人間に近い制御特性が期待できるが、PDCの線形化により、力の参照値と応答値の間に差異が生じる。また、システムが有する摩擦やモデル化誤差、環境からの外乱により手先における運動が影響を受けるため、PDCのみの運動制御では高精度な動作を実現できない。そこで図4に示すPDCと作業空間オブザーバ【参考文献】の組み合わせによる手先位置制御手法を示す。ここで図4における K_p , K_v は位置・速度のフィードバックゲインであり、 M_n , $Jaco$, g_w , s は等価慣性行列、ヤコビアン行列、作業空間オブザーバのカットオフ周波数、ラプラス演算子を表している。また x^{cmd} , θ は手先位置指令値と各モータの応答値を示す。作業空間オブザーバを構成することで、PDCの問題点であった力の参照値と応答値の間に存在する誤差の影響が補償されるため高精度な軌道追従などが期待できる。

図5に実験結果を示す。実験は図6に示す二関節筋を有する2リンクマニピュレータである上肢基礎システムを用いて行った。また、手先に半径0.1mの円軌道を与えた。図5(a)にPDCのみの用いた実験結果を、図5(b)にPDCと作業空間オブザーバの組み合わせによる実験結果を示す。図5(a)よりPDCのみの実験結果では、摩擦やモデル化誤差などにより手先位置指令値と応答値に誤差が生じて



(a) PDC



(b)PDC と作業空間オブザーバの組み合わせ
図 5 実験結果

いることが分かる。一方で図 5(b)においては手先位置指令と応答値の偏差がなく、高精度な位置制御が実現できていることが分かる。以上より、人間動作を規範とした運動制御手法を用いた高精度な位置追従制御が実現出来た。

(2) 二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作開発

人間の筋骨格モデルを規範とした運動制御の評価を行うためには2関節筋を具現化したシステムにおける実証が必須となる。そこで、図 1 に示す人間の上肢と同様に2つの単関節筋と1つの二関節筋を3つのモータを用いることで具現化した。本研究では遊星歯車機構を用い3入力から2出力を生成する二関節筋を有する上肢筋骨格モデルを具現化した【参考文献】。図 6 に二関節筋を有する2リンクマニピュレータである上肢基礎システムを示す。本上肢基礎システムにより、二関節筋を有する上肢筋骨格モデルの具現化に対する実証を行った。また、前述の運動制御理論に対する実証評価も本システムにおいて実施した。

図 7 に二関節筋を有する上肢アシストシステムの試作機を示す。上述の上肢基礎システムと同様に遊星歯車機構を用いて二関節筋を有する筋骨格モデルを具現化している。また、各リンク長は人間上肢のデータベースをもとに設計されており、バンドにより人間上肢への固定が可能である。本システムを用いることで、人間の筋骨格を規範とした上肢アシスト動作の具現化が可能となる。



図 6 上肢基礎システム



図 7 二関節筋を有する
上肢アシストシステム

【参考文献】

- M. Kumamoto, T. Oshima, T. Yamamoto, "Control Properties Induced by the Existence of Antagonistic Pairs of Bi-articular Muscles – Mechanical Engineering Model Analyses", Human Movement Science, Vol. 13, No. 5, pp. 611–634, 1994.
- T. Murakami, N. Oda, Y. Miyasaka, K. Ohnishi, "A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree-of-Freedom Manipulator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 2, pp. 123--130, 1995.

佐藤雄一，宮崎敏昌，
“二関節筋を再現する遊星歯車機構における等分配比の実現”，
第 31 回日本ロボット学会学術講演会，
AC1H1-01，2013.

5．主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

玉嶋久詩、元井直樹，
“回転座標系に基づく 2 リンクマニピュレータの非干渉化に関する研究”，
電気学会産業応用部門大会、2016 年.

玉嶋久詩、元井直樹，
“二関節筋を有する 2 リンクマニピュレータのための作業空間オブザーバに基づく運動制御技術に関する研究”，
電気学会産業計測制御研究会、2017 年.

H. Tamashima, N. Motoi，
“Position Tracking Control by Combination of Phase Different Control and Workspace Observer for 2-Link Manipulator with Bi-articular Muscle”，
International Workshop on Advanced Motion Control (国際会議)、2018 年.

元井直樹、玉嶋久詩，
“二関節筋を有する 2 リンクマニピュレータの運動制御技術と上肢アシストシステムへの応用”，
電気学会全国大会、2018 年.

〔その他〕

元井研究室ホームページ

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/gmsc-motlab/>

6．研究組織

(1)研究代表者

元井 直樹 (MOTOI, Naoki)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号： 10611270