

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760198

研究課題名（和文） 筋駆動系に対する共振概念と運動制御理論の確立

研究課題名（英文） Foundation of Resonance and Motion Control Theory for Muscular System

研究代表者

植村 充典（UEMURA MITSUNORI）

大阪大学 基礎工学研究科・助教

研究者番号：00512443

研究成果の概要（和文）：本研究では、人の筋骨格系のように剛性が可変な駆動系に対して共振概念とそれに基づく運動制御理論の構築を試みた。また、このような筋駆動系を実現するため、小型・軽量な可変剛性機構を提案した。この新たな共振概念に基づき、剛性を最適化しつつ学習的に運動を制御する方法を提案し、運動パターンを学習的に最適化する方法の基礎を提案しつつある。これらの制御法では、制御対象のパラメータや膨大な数値計算を用いないため、ロボットが環境に素早く適応することが可能である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a concept of resonance and motion control theory for muscular systems, in which mechanical stiffness of actuators can be adjustable. For this purpose, we also proposed a lightweight and small-size mechanism of stiffness adjustment. Based on the concept of resonance, we proposed a control method that not only adaptively optimize joint stiffness, but also control motion. Advantages of this control method are that it does not require parameter values of the robots or elaborate numerical calculations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：共振、多関節ロボット、可変剛性、筋駆動、適応制御、最適制御、エネルギー効率

1. 研究開始当初の背景

従来の典型的なロボットの駆動方法は、電気モータと高減速比の減速機を用いる方法である。この方法は、強い駆動力が得られ精密な運動制御が可能である反面、減速機による強い摩擦により消費エネルギーが大きく

なりバックドライバビリティは低くなる。電気モータの駆動性能は年々向上しつつあるが、今後の飛躍的な性能向上は困難と考えられる。

このような問題に対し、ロボティクス分野では様々な新しい駆動方法が研究されて

いる。例えば、空気圧や高分子素材を用いたアクチュエータ、可変剛性機構、二関節筋を用いた駆動機構などが国内外で提案されている。空気圧アクチュエータと二関節筋を用いた跳躍ロボットでは、従来のロボットでは実現できないような連続的な跳躍運動を実現している。このようなアクチュエータでは駆動力と粘弾性が干渉するため、生物の筋肉の構造に近く、生体運動科学の観点からも興味深い。しかしながら、これらの駆動系は電気モータと比べて複雑な動特性を持つ。そのため、これらの駆動系を活用するための理論的枠組みは十分に確立されていないと考えられる。その一方、受動歩行ロボットの運動原理を詳しく解析する研究が盛んである。受動歩行ロボットは、受動的な機械要素による運動生成を積極的に利用する点が、従来のロボット駆動方法には不足していた視点である。しかしながら、受動要素とアクチュエータを併用する理論的枠組みは十分に進んでいないように思われる。

これらに対し、申請者は図2のように可変剛性要素を用いた多関節構造体の運動制御に対して共振概念を拡張した。多関節構造体のダイナミクスは、非線形で多自由度になるにも関わらず、「受動性」や「エネルギー保存則」と呼ばれる性質に着目することで共振を自然に拡張できる。本共振概念を用いることで、制御対象の詳細な情報を用いない適応的な省エネルギー運動制御が可能となった。つまり、申請者の研究では受動要素とアクチュエータを最適に併用する理論的枠組みを確立しつつある。

しかしながら、本概念では電気モータのようなアクチュエータで駆動することを想定していた。そのため、生物の筋肉のように駆動力が粘弾性と干渉したり、二関節筋がある場合には提案概念の有効性は限定的となる。そこで、近年開発が進んでいるアクチュエータを活用し、生体運動科学に貢献するためには、筋駆動系に対して共振概念を拡張することが重要という着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、筋構造アクチュエータを用いたシステムに対し、共振概念を確立することである。ここで言う筋構造とは、生物の筋肉のように粘弾性が可変な構造のことであり、二関節筋のように複数の関節に影響を及ぼす構造も含む。また、共振とは受動的な機械要素による運動生成効果を最大限活用することで、最小のアクチュエータトルクで周期的な運動を生成することである。本共振概念を用い、適応的な運動制御法の構築や、高い運動性能を持つロボットの実現、生体運動制御の評価を行い、共振に基づいた運動制御の体系的確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究ではまず、筋駆動系に対する共振の数理的な解析を行う。このとき、駆動系のモデルは単純なものから検討し、より詳細な筋モデルや二関節筋モデルに拡張する。機械系は、1自由度から検討し、2自由度、 n 自由度に拡張する。次に、共振概念に基づいた適応的な制御法の構築を行い、制御系の安定性を証明する。共振概念と制御法の有効性は、運動制御シミュレーションにより確認する。提案共振概念・制御法を用い、高い運動性能を持つロボットを実現する。また、提案方法を人の運動を支援するロボット装具に応用し、エネルギー効率の高いロボット装具を実現する。

4. 研究成果

本研究ではまず、共振に基づいた高エネルギー効率運動制御法を、作業座標系の制御に拡張した。つまり、これまでは各関節に周期的な目標角度を設定していたのに対し、本作業座標系制御では手先の目標位置を設定する。よって、本制御法により多くのロボット作業のエネルギー効率を最大化できる。次に、本研究で想定している筋駆動系の高いバックドライバビリティを生かした運動制御法の提案を行った。この運動制御法では、従来の低バックドライバビリティのロボットでは困難であった物理的な衝突現象を含む運動制御を可能とする。制御系の大域的な安定性は数理的に解析し、提案制御法の有効性はシミュレーションにより確認した。また、本研究で重要な役割を果たす粘性や剛性を可変にできる新たな機構を提案した。本可変剛性機構は、これまで提案されてきた構造と比べて小型・軽量の要素を実現できるだけでなく、制作が容易である利点を持つ。新たに提案した可変粘性要素では、空気圧アクチュエータの構造を利用することで小型・軽量の機構を実現している。これら新たな機構により、今後の本研究では可変粘弾性機構を用いた多自由度のロボットを容易に、しかも小型・軽量に実現できる。さらに、共振を利用することで不整地を高エネルギー効率で移動できる新たな移動機構を提案しつつある。このように、本研究で重要な役割を果たす機械的要素の新たな構造や、基礎的な運動制御法の確立の一部を実現した。

次に、二関節筋モデルの検討や可変剛性運動補助装具の提案・製作、筋の弾性を利用した運動学習による高エネルギー効率化の研究を行った。

二関節筋モデルの検討においては、二関節筋を用いた方が多様な運動を省エネルギー化し易いことを理論・シミュレーションにより明確化した。この際、二関節筋の場合は剛

性行列が非対角成分を持つため、その活用方法を明確にしたことが理論的貢献となった。

可変剛性運動補助装具の研究では、我々が提案した小型・軽量を実現する可変剛性機構を利用した省エネルギー膝関節装具を提案・制作した。本装具は、通常の電気モータではなく、筋のような弾性要素を持つ装具によって人間の運動を省エネルギーで補助できることを動力学解析や生体信号を用いて示した。この成果により、人間も筋の弾性を有効に利用することで運動を行なっていることが示唆されるため、今後は運動解析による生体運動理解への発展が考えられる。

更に、筋のような弾性を有する多関節ロボットにおいて、跳躍運動のエネルギー効率を学習によって向上する方法を提案した。本方法では、これまでに提案してきた多関節構造体の共振概念を用いることで、低計算量かつ強い収束性を持つ学習が可能となった。運動学習の結果、跳躍時に重心周りの運動量が0で垂直に跳躍する省エネルギー跳躍運動が獲得できた。また、その跳躍運動では、筋の弾性を用いない場合に比べて、弾性を用いた場合は94%程度のアクチュエータトルクを削減できることが明らかとなった。

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3件)

①植村充典、川村 貞夫、多関節ロボットの省エネルギーを目的とした適応的剛性調節による周期運動制御法、計測自動制御学会論文集、査読有、47号、2巻、(2011)、1-9

② Guangqiang Lu, Sadao Kawamura, and Mitsunori Uemura, Proposal of an Energy Saving Control Method for SCARA Robots, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有、24巻、(2012)、115-122

③ Guangqiang Lu, Sadao Kawamura and Mitsunori Uemura, Inertia Adaptive Control Based on Resonance for Energy Saving of Mechanical Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有、5巻、(2012)、109-114

[学会発表] (計12件)

①Uemura Mitsunori, Kawamura Sadao, A New Mechanical Structure for Adjustable

Stiffness Devices with Lightweight and Small Size, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010)、査読有り、2010.10.20, Taipei, Taiwan

② Uemura Mitsunori, Kawamura Sadao, Passivity-based Controllers for Periodic Motions of Multi-joint Robots with Impact Phenomena, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010)、2010.10.19, Taipei, Taiwan

③ Uemura Mitsunori, Kawamura Sadao, Resonance-based Task Space Controller for Multi-Joint Robot with Adjustable Equilibrium Angle of Elastic Element, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), 2010.5.4, Anchorage, Alaska

④ 呉屋 秀将, 植村 充典, 川村 貞夫, 西岡 靖貴 多関節ロボットにおける可変剛性省エネルギー制御法の実験的検討、第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2011)、2011年12月24日、京都

⑤ 植村 充典、松阪 憲人、川村 貞夫、平井 宏明、宮崎 文夫、共振に基づいた多関節跳躍ロボットのパラメータ・運動調節法、第29回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2011)、2011年9月9日、東京

⑥ 植村充典、川村貞夫、多関節ロボットに対する適応剛性制御法の省エネルギー効果に関するL2ノルム平均値解析、第55回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI2011)、2011年5月19日、大阪

⑦ Hidemasa Goya, Realization of High-Energy Efficient Pick- and-Place Tasks of SCARA Robots by Resonance, Proc. of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), 2012.1.7-12, Vilamoura, Algarve, Portugal

⑧ 呉屋秀将、可変剛性省エネルギー制御法のピック&プレイス作業への適用、ロボティクス・メカトロニクス講演会2012、2012.5.27-29、浜松

⑨ 松阪憲人、共振弾性値変化に基づく目標位置変更法を用いたスカラロボット運動の高

エネルギー効率化、第 30 回日本ロボット学会学術講演会、2012 年 09 月 17 日～2012 年 09 月 20 日、札幌

⑩植村充典、時間軸変換を用いた多関節ロボットの省エネルギー周期運動生成、第 30 回日本ロボット学会学術講演会、2012 年 09 月 17 日～2012 年 09 月 20 日、札幌

⑪鎌田一平、可変剛性機構を用いた膝関節の歩行アシスト装具の筋電計測による評価、第 30 回日本ロボット学会学術講演会、2012 年 09 月 17 日～2012 年 09 月 20 日、札幌

⑫鎌田一平、可変剛性機構を用いた膝関節用省エネルギーアシスト装具の階段昇降運動への適用、第 13 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 S I 2 0 1 2、2012 年 12 月 18 日～2012 年 12 月 20 日、福岡

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

特になし。

6. 研究組織

(1)研究代表者

植村 充典 (UEMURA MITSUNORI)

研究者番号：00512443

(2)研究分担者 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：