

平成 30 年 8 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18005

研究課題名(和文) 共振に基づくロボット運動学習理論による人の運動学習の理解

研究課題名(英文) Understanding of human motor learning by resonance-based robot motion learning theory

研究代表者

植村 充典 (Mitsunori, Uemura)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00512443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、共振に基づく運動学習制御法を用いた場合のロボットの運動学習と、人の運動学習を比較し、人の運動学習がどのように行われているかを調べた。共振に基づく運動学習法では、周期的な運動において運動パターンと関節剛性を同時に学習することで、最小の消費エネルギーで運動を生成できる。本方法を、人の歩行時における遊脚の運動を模擬したモデルに適用すると、人の歩行運動と非常に似た運動パターンに収束した。また、力場の特性を変更しつつ周期的な上肢運動を行うタスクでは、運動の学習過程においても人とロボットは似た運動パターンとなった。つまり、共振に基づく運動学習制御法が、人の運動学習に似ていることが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated human motion learning by comparing the robot motion learning method based on resonance. In the motion learning method based on resonance, motion can be generated with minimum energy consumption by simultaneously learning motion pattern and joint stiffness in periodic motion. We applied this method to a model that simulates the human motion of the swing leg during walking, and obtained a motion pattern very similar to the human walking motion. Moreover, in tasks that perform cyclical upper limb movement while changing the characteristics of force field, human and robot have similar motion patterns also in learning process. In other words, it was shown that the motion learning control method based on resonance resembles human exercise learning.

研究分野：ロボティクス

キーワード：運動学習 関節剛性 歩行 ロボット制御 共振

1. 研究開始当初の背景

人の運動を理解するには、ロボットの制御理論と比較することが有効である。人の到達運動は最適制御の観点から解析され、躍度やトルクを最小にする最適運動に近いことが示されている。このような最適運動は、生物が生存競争で勝ち残る意味からも重要と考えられるため、「何故人はそのように運動するのか」の理解に貢献する。

しかし、従来の最適制御はダイナミクスの非線形・多自由度性により膨大な数値計算を必要とするため、人の運動メカニズムとの関連性には疑問が残る。また、最適制御は制御対象のパラメータ値を必要とするため、環境の変化に対応することは難しい。人は、時々刻々と変化する環境に対して柔軟に対応できる。つまり、従来の最適制御理論は「どのように人は最適運動を実現するのか」の理解には不十分であった。

一方で、強化学習などを用いて最適運動を学習的に獲得する研究もある。これらの方法は、複雑な数値計算や制御対象のパラメータ値を用いない。しかし、従来の運動学習法は強化学習を用いるため、膨大な学習回数が必要である。つまり、従来の運動学習法もやはり人の運動学習の理解には不十分である。

これらに対し、申請者らは制御対象のパラメータや複雑な数値計算を用いない共振に基づいた運動学習法を提案した。本学習法は、ロボットの力学構造を巧みに利用したものであり、周期運動に対して関節剛性と運動パターンを同時に学習する。これにより、トルク最小の運動が獲得できる。運動の収束性は数理的に証明しており、20回程程度の試行で最適運動に十分収束する。学習前には2つの関節に単振動を設定したが、学習とともに初期と終端の位置・速度を一定に保ちながら速度と加速度パターンが大きく変化した。各関節の粘性は0に設定したため、最適運動はトルク0の運動である。提案制御法は、20回程程度の学習で関節トルクがほぼ0の運動を獲得した。

つまり、対象は周期運動に限定されるが、人の運動を説明する上で疑問であった問題を提案学習法は解決している。よって、本学習法は人の運動学習が「何故」「どのように」実現されるかを説明する有力な仮説となりうるという着想に至った。

2. 研究の目的

人の運動学習を、共振に基づく運動学習理論の観点から理解する。共振に基づく運動学習理論は、申請者が提案したロボットの周期運動学習法である。本学習法は、制御対象の物理パラメータや複雑な数値計算を用いずに、少ない学習回数でトルク最小の運動を獲得できる。人も、適応的かつ高速に運動を学習できると考えられる。そこで、特性が変化

する弾性力場における人の周期運動の学習過程を計測し、その計測結果を我々の運動学習法と比較する。これにより、人が「何故」「どのように」運動を学習しているのかの理解を試みる。

3. 研究の方法

まず、被験者の上肢に弾性力場を提示する装置を製作する。次に、肘関節の1自由度往復運動を対象とした実験を行う。実験では、往復運動中に弾性力場の特性を変更する。人は、弾性力場の特性に合わせて運動を徐々に最適化すると考えられる。そこで、実験中の人の運動パターンを計測する。上肢をモデル化したシミュレーションも行う。実験と同様な力場を与え、共振に基づいた運動学習法を適用する。実験とシミュレーションの結果を統計的に比較し、学習過程と学習結果の運動パターンがそれぞれ一致するかを調べる。

同様な実験とシミュレーションを、上肢の平面2自由度の往復運動を対象として行う。筋剛性を考慮する場合や到達運動、歩行運動などへの拡張も試みる。

4. 研究成果

(1) 本研究では、共振に基づく運動学習制御法を用いた場合のロボットの運動学習と、人の運動学習を比較し、人の運動学習がどのように行われているかを調べた。そのためにまず、共振に基づく運動学習法では、周期的な運動において運動パターンと関節剛性を同時に学習することで、最小の消費エネルギーで運動を生成できる。本制御法の有効性を確認するために、図1のように各関節に可変剛性機構を搭載したロボットアームを製作し、それを用いた実機実験を行った。

関節剛性・運動の学習実験



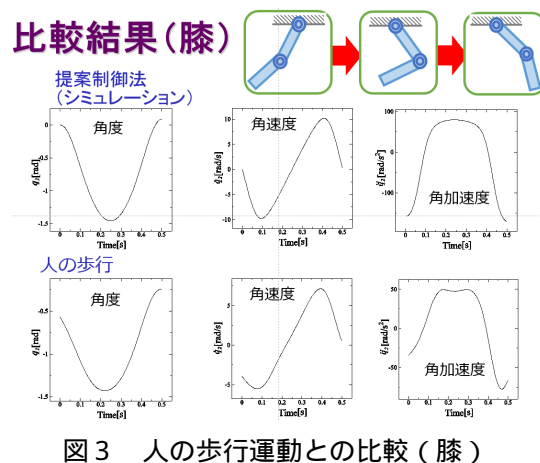
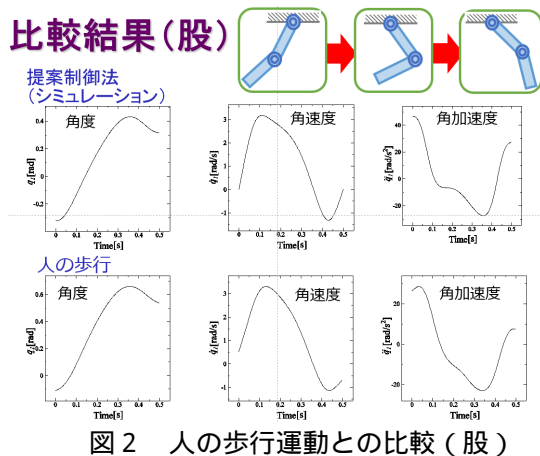
消費電力を95%削減!

図1 運動学習実験

その結果、共振に基づく運動学習法は、本方法を用いない場合に比べて約95%のエネルギーを削減できることを確認した。このとき、関節剛性のみの学習では約83%の消費エネルギーを削減でき、運動学習を併用すると更に95%の消費エネルギーを削減できることを確認した。

(2) 本方法を、人の歩行時における遊脚の

運動を模擬したモデルに適用すると、図2、図3のように人の歩行運動と非常に似た運動パターンに収束した。



(3) 共振に基づく運動学習方法は、20回程度の運動学習で効率的な運動を学習できる。これは、人の運動学習と同程度の学習能力であると考えられる。よって、共振に基づく運動学習方法は、学習の過程においても人の運動と近い結果が得られるのではないかと期待できる。そこで、図4の実験システムを製作し、人の運動学習の過程と共振に基づく運動学習の学習過程の比較を行った。

学習過程の比較実験



図4 人の運動学習過程の計測装置

本実験システムでは、人が周期的な上肢の運動を行う際に、人の上肢に加える力場の特性を変化させられる。被験者には、変化する力場の特性に合わせて最も楽に運動するように指示した。その結果、被験者は力場の特性に合わせて、図5のように運動パターンを変化させた。

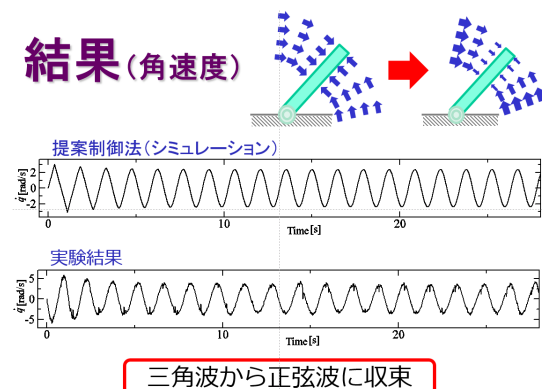


図5 運動学習過程の結果の比較

共振に基づく運動学習法(提案制御法)をシミュレーションにおいて、人の運動学習実験と同様な力場を与えた状態で運動学習を行った。その結果と、人の運動学習の結果を図5のように比較した。その結果、一定力の弾性力場では人もロボットも三角波に近い速度パターンに収束し、線形の弾性力場では人もロボットも正弦波の速度パターンに収束した。また、一定力の弾性力場から線形の弾性力場に力場が変化した際には、人もロボットも三角波の運動パターンから徐々に5周期程度で正弦波の運動パターンに収束した。これらの結果は、人とロボットの運動学習の結果が非常に似ていることを意味している。また、この結果は人の運動学習の原理が、共振に基づく運動学習法に近いことを示唆している。

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4件)

Kento Matsusaka, Mitsunori Uemura and Sadao Kawamura, Realization of Highly Energy Efficient Pick-and-Place Tasks using Resonance-based Robot Motion Control, *Advanced Robotics*, Vol.30, Issue 9, 2016, pp.608-620

Kento Matsusaka, Mitsunori Uemura and Sadao Kawamura, Highly Energy-Efficient Palletizing Tasks Using Resonance-Based Robot Motion Control, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol.6, Issue 1, 8-17, 2016

鎌田一平、植村充典、平井宏明、宮崎文

夫、膝装具歩行における制御戦略の解析、日本機械学会論文集、査読あり、vol. 82、no. 843、2016、pp. 1-14、Mitsunori Uemura, Kento Matsusaka, Yawara Takagi and Sadao Kawamura, A Stiffness Adjustment Mechanism Maximally Utilizing Elastic Energy of A Linear Spring For A Robot Joint, Advanced Robotics, Vol.29, Issue 20, 2015, pp.1331-1337

〔学会発表〕(計 8 件)

I. Kamada, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, "Efficacy of a knee orthosis that uses an elastic element," Proc. 39th Annual Int. Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Jeju, Korea), pp. 942-945, 2017.

植村充典、八木聡明、平井宏明、宮崎文夫、川村貞夫、先端化学繊維ロープを用いた軽量脚・腕口ロボット、第 35 回日本ロボット学会学術講演会、2017 年
八木聡明、植村充典、平井宏明、宮崎文夫、足首周りの角運動量に基づく脚口ロボットバランス制御の実験的検討、ロボティクス・メカトロニクス講演 2017

鈴木健司、寺田祐基、植村充典、平井宏明、宮崎文夫、可変剛性機構を用いたロボット膝装具の開発と実験的評価、ロボティクス・メカトロニクス講演 2017

植村充典、平井宏明、宮崎文夫、足首周りの角運動量を用いたバランス指標に基づく脚口ロボットの歩行制御、第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016 年

植村充典、水口大喜、河村晃宏、川村貞夫、柔軟関節と高制御性能を両立する反力利用弾性アクチュエータ、第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016 年

M. Uemura, H. Hirai and F. Miyazaki, Adaptive tracking control with partial regressor for multi-joint robot, Proc. Annual Conf. the IEEE Industrial Electronics Society, 2015, pp.4441-4446

植村充典、平井宏明、宮崎文夫、足首周りの角運動量に基づく脚口ロボットの立位可安定性、第 33 回日本ロボット学会学術講演会、2015 年

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()