

# 論文内容の要旨

博士論文題目

Hierarchical Model Predictive Control for Real-time Whole-body Control of a Humanoid Robot

(ヒューマノイドロボットの実時間全身制御のための階層モデル予測制御)

氏名 石原 弘二

(論文内容の要旨)

ヒューマノイドロボットは、ヒトの代替として極限環境での作業を行うことが期待されている。この技術を開発するため、近年、複数のタスクに対する多様な運動を生成する試みが盛んに検討されている。しかし、その中で生成される運動は、特に動作速度に関してヒトに大きく劣っており、この敏捷性の欠如が、ヒューマノイドロボットが社会で活躍できていない原因の一つと考えられる。

このように敏捷性が低くなる要因の一つとして、各タスクに対して設計された複数の制御器を静的に使い分けることに起因する制御戦略の問題と、高い出力重量比を実現できないことに起因する駆動システムの問題がある。

そこで本研究では、制御器の使い分けを必要としないよう、単一の制御器を用いて複数のタスクを実現できる制御フレームワークの開発を目指している。この制御器は、実時間最適制御（モデル予測制御）により全身の運動軌道を生成する。さらに、複数のアクチュエータを組み合わせることで高い出力重量比を達成するハイブリッドアクチュエータシステムを介して運動を実現する。

しかし、ヒューマノイドロボットは多自由度システムであるため、モデル予測制御を用いた全身最適制御に対する計算量は大きくなる。さらに、複数のアクチュエータに対して、実時間で最適なトルク配分を決定する問題は未だ解決されていない。これらに鑑みて、本論文ではモデル予測制御を用いた全身最適制御における計算負荷の問題、およびハイブリッドアクチュエータシステムの最適トルク配分の問題を解決する。具体的には、

1. モデル予測制御の計算量を、時間的と空間的に分解した二つの小問題を階層的に解く階層モデル予測制御を提案した。提案法を、シミュレーションおよび実機ヒューマノイドロボットに適用し、有効性の検証を行った。
2. また、実機ハイブリッドアクチュエータシステムに対する、階層モデル予測

制御を用いた二段階の制御方式を提案し、実時間での最適なトルク配分を実現できることを示した。

さらに、提案する制御フレームワークでは、階層モデル予測制御に与える最適化の目的関数を試行錯誤的に決定しなければならず、労力が大きい。この問題を解決するために、逆最適制御を用いて、階層モデル予測制御の目的関数をヒトの運動データから推定する方法を提案した。提案法を用いることにより、計測されたヒトの運動データから目的関数を推定することが可能であることが示され、その有効性が検証できた。

氏名	石原 弘二
----	-------

### (論文審査結果の要旨)

平成 30 年 1 月 17 日に開催した公聴会の結果を参考に、平成 30 年 2 月 15 日に本博士論文の審査を行った。

本論文では、ヒューマノイドロボットの実時間全身制御のための階層モデル予測制御に関する研究を行っている。モデル予測制御はモデルを元に実時間で最適化問題を解いて制御入力を決定する手法で、近年各方面で注目されているものの、ヒューマノイドロボットのような機械系への応用はあまり進んでいなかった。その一因は計算負荷が大きくて高速な動作に間に合わないことにあったが、本研究ではモデル予測制御の階層化によってこの問題を解決し、ロボットの全身運動軌道を生成している。特異摂動法と呼ばれるアプローチが一般的な非線形系の解析や制御に有効であることが古くから知られていたが、本研究ではこの発想をモデル予測制御に導入し、問題を空間的および時間的に分割することで計算量の軽減化に成功した。また、ヒューマノイドロボットの敏捷性を向上させるために最適なトルク配分を階層モデル予測制御によって達成できることを示した。さらに、モデル予測制御における目的関数はこれまで仕様に応じて試行錯誤的に設定されていたが、これを逆最適制御の観点から検討し、計測された人の運動データから目的関数を推定することにも成功した。

モデル予測制御は様々な分野において有用な技術であるが、本研究ではこれを階層型に拡張することで高速化し、ヒューマノイドロボットへの適用を可能にした点に大きな特徴がある。また、最適制御の逆問題も興味深いテーマであり、これを人の運動に結び付けて検討した点は意義深く、制御工学としても有用な知見を与えるものである。このように本論文の結果は理論研究として優れた着眼点に基づくものであるだけでなく、様々な面での発展や応用が期待され、十分な学術的意義があるものと評価できる。さらに、理論やシミュレーションに留まらず実用化を念頭においたヒューマノイドロボットによる実験検証まで行ったことも高く評価できる。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。