

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	片山 想太郎
論文題目	Fast Model Predictive Control of Robotic Systems with Rigid Contacts (接触を伴うロボットの高速なモデル予測制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>Robotic systems such as legged robots are expected to work in various environments. Model predictive control (MPC) can be a unified approach for versatile, efficient, and dynamic planning and control of such systems. However, robotic systems involving rigid contacts have fast, large-scale, and nonlinear dynamics and involve switches of dynamics and state jumps, which make online optimization of MPC difficult. This thesis consistently tackles these computational challenges.</p> <p>Chapter 1 gives a comprehensive overview of planning and control of robotics systems with contacts, which motivates MPC for robotic systems. It then describes challenges in realizing the MPC of robotic systems.</p> <p>Chapter 2 is composed of two preliminaries. The first part overviews rigid body systems with rigid contacts, including their kinematics and dynamics computational algorithms. The second part presents the basics of numerical optimization algorithms for MPC.</p> <p>Chapter 3 proposes an inverse dynamics-based solution method for the MPC optimization problems of rigid body systems. It can reduce the computational time of each Newton-type iteration by leveraging efficient algorithms of rigid body inverse dynamics. Numerical experiments show the efficiency of the proposed method over existing methods.</p> <p>Chapter 4 proposes a lifted Newton-type method for MPC problems of rigid body systems with rigid contacts. This method can reduce the required number of iterations by relaxing high nonlinearity without additional computational costs and, therefore, reduce the total computational time. Numerical experiments on the whole-body optimal control of various quadrupedal gaits show its efficiency over existing methods.</p> <p>Chapter 5 proposes an efficient algorithm for MPC problems with pure-state equality constraints, which appear in MPC problems of robotic systems with rigid contacts. The proposed algorithm introduces a constraint transformation method to efficiently treat the pure-state equality constraints with the Riccati recursion algorithm, which enables the Newton-type iterations in linear-time complexity with respect to the length of the horizon. Theoretical verifications and numerical comparisons on practical whole-body optimal control of quadrupedal gaits are presented.</p> <p>Chapter 6 proposes an efficient Newton-type method for MPC problems of switched systems, which formally model the robotic systems with rigid contacts under a given contact sequence. Specifically, it realizes efficient and robust optimization of the switching times (i.e., contact timings in robotic problems) as well as the state and control input. Numerical comparisons with the off-the-shelf optimization solvers and a practical and complicated robotic example are provided.</p> <p>Chapter 7 presents the implementation of MPC for robotic systems built on top of the algorithm developments in Chapters 3 to 6. This chapter proposes a whole-body MPC that can</p>			

optimize the switching times, state, and control input in the milliseconds range. A simulation comparison between the proposed MPC and the conventional MPC with fixed switching times demonstrates that the proposed approach expands the ability of MPC for robotic systems. Furthermore, hardware experiments on a real quadrupedal robot show that the proposed method achieves dynamic motions on the real robot.

Chapter 8 summarizes this thesis and discusses the directions of future work.

Appendix A introduces an open-source software for MPC of robotic systems with rigid contacts, in which the algorithms developed in this thesis are implemented. Whole-body MPC examples using the software are provided.

(論文審査の結果の要旨)

近年、ロボットの活躍の場のさらなる拡大が期待されている。運動の計画・制御はロボットに自律的な意思決定能力を与える基盤技術である。本論文では、統一的な意思決定技術を目標とし、ロボットシステムに適したモデル予測制御 (Model Predictive Control; MPC) の実時間アルゴリズムを提案している。オンラインで最適化を行う MPC は、効率的かつダイナミックで多様な動作の計画・制御を定式化できる。一方で、ロボットシステムは、1) 短いサンプリング周期、2) 高次元・非線形なダイナミクス、3) ダイナミクスの切り替え・状態ジャンプ、といった特徴を持つことから、実時間で最適化を行う MPC の実現は容易ではない。既存の MPC を用いた制御では、計算を簡略化するためにロボットのモデルや最適化問題にヒューリスティックな近似を導入しており、ダイナミックな運動への適用には依然適していない。本論文では、上述の計算時間に関する課題を解決しロボットシステムのより高性能な MPC を実現するアルゴリズムを提案している。具体的には、以下に示す研究成果を得ている。

- (1) 関節で結合された剛体からなるロボットの最適制御問題に対して、従来広く使われてきた順動力学ではなく逆動力学を用いた数値解法を提案している。提案手法は、剛体逆動力学の効率的な再帰計算アルゴリズムを活用でき、ニュートン型反復解法における反復 1 回あたりの計算時間を削減できる。従来手法に比べて実際に提案手法が高速であることを数値実験によって示している。
- (2) 最適制御問題をより高次元の最適化問題に変換 (リフト) することで、収束性能を向上させるニュートン型数値解法を提案している。提案手法では、ロボットのダイナミクスの構造を活用したリフトによりニュートン型数値解法の反復 1 回あたりの計算時間を増加させずに収束率を向上させ、トータルの計算時間削減が可能である。提案手法が実際に従来手法より高速であることを、四脚ロボットの歩容最適化問題において示している。
- (3) 接触を伴うロボットの最適制御問題に現れる状態量制約を制御入力も含む制約へ変換することで、効率的な数値解法を提案している。変換後の問題に対して Riccati recursion アルゴリズムを導出し、評価区間長さに関して計算量が線形にしか増えないことを示している。四脚ロボットの歩容最適化問題において、提案手法の有効性を示している。
- (4) スイッチ時刻 (接触のタイミング) を含めた最適制御問題に対するニュートン型数値解法を提案している。最適化計算の効率と精度、安定性を両立させるために、スイッチ条件を考慮して Riccati recursion を拡張し、最適化計算の過程で変化する時間刻みの扱いや、ヘッセ行列の修正方法を工夫している。提案手法は、汎用的なソルバーと比較して、スイッチ時刻も含めて効率的かつロバストに最適化計算を行えることを数値実験で示している。
- (5) 以上の手法を統合してロボットの全身動力学 MPC を実装し、提案手法の有効性を検証している。提案手法では、全身ダイナミクスを簡略化せず扱いつつ、状態、入力、接触のタイミングすべてをミリ秒単位の計算時間で最適化可能である。物理シミュレータを用いた数値実験から、接触タイミングを固定した従来の MPC と比べ、提案手法は様々なダイナミックな制御が可能であることを示している。さらに四脚ロボットでの実機実験を行い、モデル化誤差やセンサノイズを伴う実ロボットでも、連続跳躍といったダイナミックな制御が可能である

ことを示している。

以上を要するに、本論文は、接触を伴う複雑なロボットシステムを簡略化せず扱って最適制御を高速に解く新しい手法を開発し、ロボットシステムのより高性能な計画・制御の可能性を切り拓いている。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降