

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06155

研究課題名(和文) 脚車輪型移動ロボットの協調分散モデル予測運動制御

研究課題名(英文) Cooperative and Distributed Model Model Predictive Control for Leg / Wheel Mobile Robots

研究代表者

野中 謙一郎 (Nonaka, Kenichiro)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：30298012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：脚車輪型移動ロボットは脚と車輪を併せ持つ移動体で、月面等における複雑な地形の踏破と高速移動が可能である。しかし、制御用のCPUは一般に信頼性と頑強性を重視しているために低速で、高度な制御の実装は難しい。本研究では、最適化と制約の考慮に優れたモデル予測制御を分散実装することによって、この問題の解決をはかった。その結果、平面型の実験機と立体型のシミュレーションでの十分な制御性能を実現した。

研究成果の概要(英文)：Leg/wheel mobile robots are capable of fast and adaptive locomotion on rough and complex terrain. But their controller CPU is generally slow because of reliability and robustness. In this study, we applied model predictive control (MPC) which is known as a real-time optimal control incorporating various constraints. To reduce its computational cost, we partitioned the robot model into soft-constrained legs and applied a tailored MPC. Through multibody dynamics simulator with terra mechanics for three dimensional model and several experiments for planar model, we showed that the proposed method is effective and its computation is fast enough comparing with the conventional methods.

研究分野：制御工学

キーワード：最適制御 組込みシステム 移動ロボット モデル予測制御 分散制御 テラメカニクス 脚車輪型移動ロボット ローバー

1. 研究開始当初の背景

脚車輪型移動ロボットは脚と車輪を併せ持つ移動体(図1)で、脚による複雑な地形の踏破と、車輪による平坦な地形の高速移動を実現可能である。特に月面などの低重力下での運用が期待され、NASA/JPLのATHLETEなどのローバーの実証機の研究開発も行われている。しかし、レゴリスで覆われた脆弱な地盤での沈降によるスタックを回避するためには、各車輪の荷重配分を考慮しながら、安全で効率の良い運動を実現する高度な制御が必要になる。そのための制御手法として、非線形最適制御の適用が考えられるが、この制御手法は一般に計算コストが高い。一方で月面などの極限環境で用いるCPUは、宇宙線などによる誤動作に対する耐性と信頼性を確保するために比較的低速で、エネルギー消費量削減のために、低電力なものとならざるを得ない。このように、非線形最適制御の実装には、制御則の計算負荷を低減する必要がある。



図1 脚車輪型移動ロボット(NASA/JPLのATHLETEをモデルに作成)

2. 研究の目的

本研究では、モデル予測制御(Model Predictive Control, 以下ではMPCとする)を適用することにより、脚車輪型移動ロボットの安全で効率の良い制御則を実現することを目的とする。MPCは、制約条件を考慮しながら実時間で最適制御を実現する制御則である。脚車輪型移動ロボットに適用することによって、最適化により各車輪へバランスの良い荷重配分を実現しつつ、制約条件を課すことによって、複雑な地形への適応などの要求を満たすことが期待できる。一方で問題点として、前述したような宇宙空間などの極限環境では、一般に計算コストが高いとされるMPCの実装は容易ではないことがある。近年では、非線形系も対象としたMPCの高速計算法の改良が進み、ある程度計算負荷を削減できるようになったが、制御対象のモデルについても工夫の余地がある。そこで本研究では、脚車輪型移動ロボットのモデルを脚ごとのサブシステムに分割してモデルを低次元化する。そしてMPCの計算を脚ごとに行うことにより計算量を大幅に削減できる、協調分散型のMPCのアルゴリズムの開発と、シミュレーションおよび実験機による実証を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、立体型の脚車輪型移動ロボットを最終的な制御対象として、制御用組込みCPUに実装可能な計算効率の高い協調分散型のMPCを構築する。さらにATHLETEをモデルとしたリアルタイムシミュレーションと、平面脚車輪型移動ロボットの実験で、提案手法の有効性を検証する。具体的には下記の通り。

(1) 協調分散型MPCの制御則構築

全ての脚と関節を単一のMPCの計算で集中的に最適化するのではなく、脚ごとにMPCの計算を分散して逐次実行し、最適化問題を低次元化して計算速度を向上させる。

(2) 立体型脚車輪型移動ロボットでの検証

物理系複合モデリング・シミュレーションツールを用いて、低重力下における立体型脚車輪型移動ロボット(図1)の動力学シミュレーション環境を構築し、性能を検証する。

(3) 平面脚車輪型移動ロボットでの実証

提案する協調分散型MPCの効果を実証するために、平面脚車輪型移動ロボット(図2)を対象とした制御実験を行う。特に動的な車輪位置制御の実現と多様な運動制御を実施して性能を検証する。

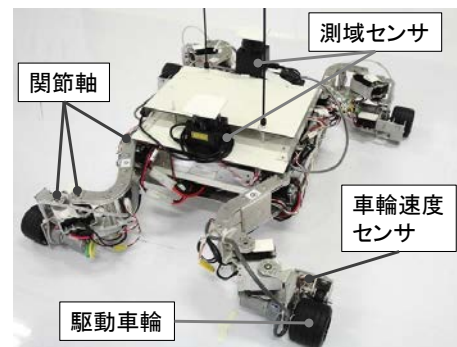


図2 平面型脚車輪型移動ロボット

4. 研究成果

(1) 協調分散型MPCの制御則構築

まず平面型の脚車輪型移動ロボットに対して、脚ごとの分割モデルに基づくMPCを導出し、その有効性を検証した。協調分散型制御則は、脚のダイナミクスと他の脚との幾何学的関係を制約としたモデルに対して、順次的にMPCによる最適化計算を行うことによって、次数を1/4に下げると共に、次数の2乗のオーダーで増加する総計算量の削減を図った(図3)。まず、シミュレーション上の検証によって、4脚全てを制御対象としたモデルと比較した計算量は半分程度の計算量で済むことを示し、実用的な準最適制御の高速計算を実現した。その結果、計算速度が約2倍に高速化した。また、分散制御による性能劣化も実用上問題ないことを確認した(雑誌論文①, 学会発表⑨⑩)。さらに、脚車輪型移動ロボットの簡略モデルである同軸操舵機構の全

方向移動ロボットにおいて、誘導制御部分の MPC と操舵機構の MPC を分散・階層化し、予測計算によって操舵角度の制約条件を満たしながら、追従性能を向上できることを実証した (雑誌論文②, 学会発表⑥)。

加えて、平面脚車輪型移動ロボットの車輪位置の可動範囲に着目した制約条件をモデル予測制御に取り込むことによって、複雑な隘路の通過も可能にする障害物回避制御則を構築・検証した (雑誌論文③, 学会発表⑩)。

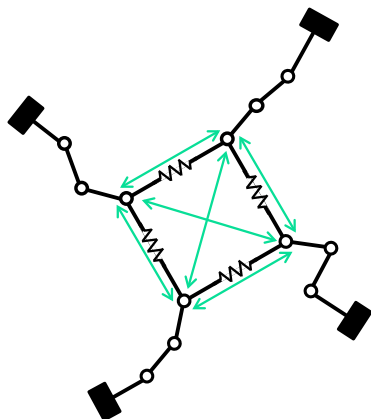


図3 平面脚車輪型の分割モデル：脚間の位置関係をソフトな制約条件として脚ごとに逐次最適化する。

(2) 立体型脚車輪型移動ロボットでの検証

立体型の脚車輪型移動ロボットである ATHLETE をモデルとして、その6脚・6関節の合計36関節の最適化計算を脚ごとの6関節の最適化計算に低次元化した場合の制御則を構築した。ボディとの拘束はソフト制約により実現している。その結果、分散化した制御則でも分散化しない制御則とおおよそ同等の制御性能が得られることを確認した (学会発表②)。

さらに、地面に凹凸がある場合の立体型の脚車輪型移動ロボットの MPC を実現した (学会発表①)。さらに上位階層の制御として、ローバーの観測範囲と地図情報を考慮した誘導制御則も構築し、下位の運動制御と協調して効率的な移動が実現できるようにした (学会発表④)。

月面では地表に堆積したレゴリス上を走行するが、スタックの発生を回避するために、車輪が大きく沈み込まないようにする必要がある。荷重配分を考慮した最適制御によってこれを緩和することが期待できるが、その制御モデルの構築と制御性能を検証するために、軟弱地盤のテラメカニクスを考慮した動力学シミュレーションを構築した (学会発表⑤⑧)。さらに、複数の車輪による踏み固めを考慮したスリップ率制御を MPC で実現し、スリップ率の目標値との誤差を10%程度改善した (学会発表③)。

(3) 平面脚車輪型移動ロボットでの実証

平面脚車輪型移動ロボットの実機を対象として、制御モデルを脚ごとに分割したモデルとして、MPC の協調分散型制御則を制御用プログラムに実装した。実機における有効性と計算速度の検証を行い、ベンチマークとしたいくつかの目標軌道に対して、従来手法の統合型の MPC や準ニュートン法による最適脚配置と比較を行い、同等の追従性能を達成できることを示した (雑誌論文①)。現在、この制御則を改良し、障害物回避まで含めた制御則に発展させた研究成果を投稿中である。

さらに、これらの実験機の位置制御のために、モーションキャプチャシステムを使用するが、マーカークのオクルージョンが生じる。この問題を解決するために、Moving Horizon Estimation により、オクルージョンに対して頑強な位置推定手法を構築した (雑誌論文④, 学会発表⑦⑫)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① 萩森 夕紀, 野中 謙一郎, 関口 和真, 分割モデルを用いた脚車輪型移動ロボットのモデル予測制御, 日本機械学会論文集, 82 巻, 842 号 p.16-00144, 2016 年, 査読有
DOI:<http://doi.org/10.1299/transjsme.16-00144>
- ② Masato Itoh, Yuki Hagimori, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, A Hierarchical Model Predictive Tracking Control for Independent Four-Wheel Driving/Steering Vehicles with Coaxial Steering Mechanism, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 744, No. 1, pp.1-12, 2016 年, 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/744/1/012222>
- ③ Naito Suzuki, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Control considering Reachable Range of Wheels for Leg / Wheel Mobile Robots, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 744, No. 1, pp.1-12, 2016 年, 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/744/1/012220>
- ④ Manami Takahashi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Moving Horizon Estimation for Vehicle Robots using Partial Marker Information of Motion Capture System, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 744, No. 1, pp.1-12, 2016 年, 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/744/1/012049>

[学会発表] (計 12 件)

- ① Yuji Morihira, Naoki Takahashi, Kenichiro Nonaka and Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Load Distribution Control for Leg/Wheel Mobile Robots on Rough Terrain, 12th IFAC Symposium on Robot Control, 2018 年, Budapest, Hungary, Accepted
- ② Naoki Shibata, Naoki Takahashi, Kenichiro Nonaka and Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Control using Partitioned Model for Leg/Wheel Mobile Robots with Three-Dimensional Motion, 6th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control, 2018 年, Madison, USA, Accepted
- ③ Takatsugu Oda, Hiroki Yoshikawa, Naoki Shibata, Kenichiro Nonaka and Kazuma Sekiguchi, Model predictive allocation control for leg-wheel mobile robot on loose soil considering wheel dynamics, Japanese Modelica Conference 2018, 2018 年, Tokyo, Japan
- ④ Masafumi Saito, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Optimal Path Planning utilizing Dissipation Function based on Terrain Elevation Map for Lunar Rovers, The 2017 Asian Control Conference, 2017 年, Gold Coast, Australia
DOI: 10.1109/ASCC.2017.8287202
- ⑤ Hiroki Yoshikawa, Takatsugu Oda, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Modeling and Simulation of Wheel Driving Systems based on Terramechanics for Planetary Exploration Rover using Modelica, 12th International Modelica Conference 2017, 2017 年, Prague, Czech
- ⑥ Masato Itoh, Kenichiro Nonaka and Kazuma Sekiguchi, Experimental Verification of Model Predictive Tracking and Steering Control for the Vehicle equipped with Coaxial Steering Mechanisms, 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2016 年, Sapporo Convention Center, Hokkaido
DOI: 10.1109/SII.2016.7844092
- ⑦ Manami Takahashi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Visual Feedback Control of a Vehicle based on MHE directly using Partial Marker Information, 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2016 年, Sapporo Convention Center, Hokkaido
DOI: 10.1109/SII.2016.7844060
- ⑧ Hiroki Yoshikawa, Takatsugu Oda, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Modeling and simulation for leg-wheel mobile robots using Modelica, The first Japanese Modelica Conference 2016, 2016 年, Embassy of Sweden, Tokyo
- ⑨ 萩森夕紀, 野中謙一郎, 関口和真, 関節角度の制限を考慮した脚車輪型移動ロボットの分割モデルによる予測制御, 第3回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 2016 年, 南山大学, 名古屋
- ⑩ Yuki Hagimori, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Sequential Model Predictive Control for Leg/Wheel Mobile Robot using Single Leg Model, 2015 CACS International Automatic Control Conference, 2015 年, Yilan, Taiwan
- ⑪ Naito Suzuki, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Obstacle Avoidance Control with Passage Width Constraints for Leg/Wheel Robots, 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2015 年, Sydney, Australia
DOI: 10.1109/CCA.2015.7320650
- ⑫ Manami Takahashi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Vehicle State Estimation by Moving Horizon Estimation Considering Occlusion and Outlier on 3D Static Cameras, 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2015 年, Sydney, Australia
DOI: 10.1109/CCA.2015.7320777

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野中 謙一郎 (NONAKA, Kenichiro)
東京都市大学・工学部・教授
研究者番号 : 30298012