

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560555

研究課題名(和文) モデル予測制御の組み込みCPUへの実装と移動ロボットの制御

研究課題名(英文) Implementation of Model Predictive Control into embedded CPU and Application to 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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：モデル予測制御(Model Predictive Control: MPC)は制約条件を満たしながら最適な運動を実現できるが、計算コストが高いことが実装上の問題点とされてきた。本研究は、移動ロボットの組み込みCPUをターゲットとして、最適化計算のコスト削減による実装を目的としている。
本研究では、入力・状態計算の非線形変換、リアルタイム処理における最適化計算への割り込み回避、評価関数への制約条件の組み込みによる次数低減化を通じて、次の成果を得た。(a)全方向移動車両の操舵角度の飽和や切り替えしを回避した軌道追従制御の実現、(b)前輪操舵型移動ロボットの障害物回避と車庫入れ制御の実現。

研究成果の概要(英文)：Model predictive control (MPC) is an optimal control method which realizes optimized motion with satisfaction of constraints, while the computational cost has been challenging issue.

In this study, we applied nonlinear transformation of input and state, prevention of interrupt on optimization and reduction of order by incorporating the constraints into the stage cost to achieve the following results: (a) tracking control for four-wheel omnidirectional robots with prevention of switching and saturation of steering, and (b) obstacle avoidance and parking control of front steering vehicles.

研究分野：制御工学

キーワード：モデル予測制御 組み込みシステム 移動ロボット 非線形制御 座標変換

1. 研究開始当初の背景

(1) モデル予測制御の機械系への適用
モデル予測制御は、有限評価区間の最適制御問題をオンライン計算で繰り返し解いてフィードバック制御入力を決定する手法である。多様な評価関数と制約条件に対する最適制御を実現する有効な制御法として知られ、サンプリング時間の長いプロセス制御などに用いられてきた。従来は最適化の計算量が多いことが、サンプリング時間の短い機械系に用いる際の障害となっていたが、近年の計算機の飛躍的な発達と計算アルゴリズムの高速化により、機械系のリアルタイム制御への適用が可能になりつつある。

(2) 組み込み CPU への実装における問題点
機械系に対するモデル予測制御の適用例の多くは、クロック周波数が 1GHz 以上の高速汎用 CPU に実装している。しかし、実際の製品に広く用いられている組み込み CPU は、安価で信頼性が高く、豊富な入出力ポートなどを有する一方で、クロック周波数は数十 MHz ~ 数百 MHz で CPU の計算処理速度が遅い上に、メモリ容量が小さく、回路実装された数学関数は限られる。さらに、頻繁に発生する外部割り込みが最適化計算を中断するなど、計算リソースに厳しい制約がある。これらの理由から、組み込み CPU へのモデル予測制御の実装は容易ではない。

(3) 組み込み CPU による移動ロボットの制御
一方で研究代表者らは、移動ロボットを対象とした最適化計算の組み込み CPU への実装技術の確立を目指して研究を行ってきた。たとえば脚車輪型移動ロボットは、クロック周波数が 80MHz の組み込み CPU を搭載し、3 軸の SCARA 型脚の変形により隘路通過と安定性確保の両立が可能である。このロボットでは、関節角度の制限と路面の速度ベクトル場に適合した操舵角をとるという制約条件の下で、最適な車輪配置を求める制約条件付き静的最適化問題を実時間で解く必要がある。研究代表者らは座標変換と部分的な陽解を用いることによって、計算量を大幅に削減し、組み込み CPU 上でリアルタイム最適化計算を実現した。一方、このような移動ロボットにおいて、経路・姿勢・車輪位置（関節角）という多くの変数をモデル予測制御により最適化し、高速走行するためには、組み込み CPU に合わせた計算方法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、非線形ダイナミクスを有する移動ロボットの障害物回避と、動力学走行制御の 2 つの非線形制御問題について、組み込み CPU に実装したモデル予測制御でリアルタイム制御するための技術を確立することを目標とする。主な課題とその解決方法は下

記のとおり。

(1) クロック周波数が低い
非線形座標変換による部分線形化で処理速度を改善する。さらに部分的な陽解を用いて最適化計算の変数を削減し、計算速度を向上させる。

(2) 数学関数の回路実装が乏しい
高い計算精度が必要な最適化計算は、非線形座標変換で線形化した変数で厳密に数値計算する。この最適化計算と、デジタル計測値や制御入力の間非線形変換・逆変換は、高い計算精度は不要なので、ルックアップテーブルと補間による近似で高速計算する。

(3) 割り込みによる FPU レジスタの退避が発生し、最適化が中断する
割り込み処理は整数演算で記述し、割り込みが発生しても最適化計算の FPU レジスタを退避せずにオーバーヘッドを最小化する。フィルタ更新や制御入力計算などの浮動小数点演算は最適化計算の前後で纏めて実行する。

これらにより高速化したモデル予測制御のプログラムを移動ロボットの組み込み CPU に実装し、下記の項目を実現することが本研究の目的である。

- ・全方向移動ロボットのモデル予測制御
脚車輪型移動ロボットや四輪独立操舵・駆動ロボットに対して、計算量を削減し高速化したモデル予測制御を制御用組み込み CPU へ実装する。
- ・障害物回避制御
測域センサで障害物を検出し、モデル予測制御によって、経路誤差と操作量を統合した評価を最適にする制御を実現する。
- ・動力学モデルによる走行制御
車輪の横滑り角を考慮した動力学モデルに基づく、モデル予測走行制御を実装する。
- ・厳密な線形化による車両のモデル予測制御
時間軸状態制御形による低次元化と厳密な線形化によって、モデル予測制御の計算コストを大幅に削減し、車両の車庫入れ制御などでその有効性を検証する。
- ・ロバストな自己位置推定と速度計測
移動ロボットの経路追従制御や障害物回避制御のために、LRF とオドメータの計測値を用いた遮蔽に対してロバストな自己位置推定と速度計測システムを実現する。

3. 研究の方法

(1) 移動ロボットの組み込み CPU 用モデル予測制御プログラムの開発
脚車輪型移動ロボットや四輪独立操舵・駆動ロボットに搭載している組み込み CPU の SH7058F (ルネサスエレクトロニクス製) に

計算量を削減したモデル予測制御則のプログラムを開発・実装する。アルゴリズムについては、これまでの静的最適化における手法をモデル予測制御に拡張する。また、プログラムの計算速度を改善するために、必要場合は、CVXGEN や C/GMRES などを利用して高速化する。

(2) モデル予測制御による障害物回避の実現

移動ロボットのモデル予測障害物回避制御則を構築し、リアルタイムプログラムへの実装と実験による性能検証を行う。LRF による障害物の検出を想定して、モデル予測制御の予測区間の範囲内の障害物への評価を目的関数に含める手法と、制約条件とする手法の2通りを検討する。そして、脚車輪型、四輪独立操舵車両、前輪操舵車両のそれぞれに最も適した方法を適用して、障害物回避を実現する。

(3) 動力学モデルによるモデル予測走行制御手法の構築

高速な運動を実現するためには、タイヤ横滑り角を考慮した動力学に基づくモデルを構築する。モデル予測制御の計算量を削減するために、厳密な線形化を用いる。また、タイヤ発生力の不確定性の影響を抑制するために、ロバスト制御と統合する。

(4) 厳密な線形化による車両のモデル予測制御システムの開発

計算速度を向上させるために、時間軸状態制御形を適用して厳密に線形化した車両モデルに対して、モデル予測制御を実現するプログラムを作成し、車両型移動ロボットに対して適用する。ダイナミクスは線形化されるので、計算速度の大幅な向上を期待できる。

(5) ロバストな自己位置推定システムの開発 高速でロバストな自己位置推定を実現するために、LRF と周囲の環境地図へのマップマッチング、およびオドメトリの融合に基づいた自己位置推定システムを開発する。

4. 研究成果

(1) 移動ロボットの組み込み CPU 用モデル予測制御プログラムの開発と誘導制御

4 輪独立操舵・駆動車両

4 輪を独立に操舵・駆動できる全方向移動車両は、狭隘な環境での運用に適するが、車輪操舵角度の制限を考慮した制御が求められる。そこで、MPC により操舵角の制限を陽に考慮した制御則を構築し、クロック周波数が 80MHz の組み込み CPU の SH7058F に実装した。その結果、目標軌道追従性を保ちながら、切返しを回避して連続な操舵角度を実現した。(雑誌論文: 2, 学会発表: 14)

同軸操舵機構に対するモデル予測制御一つの操舵軸に可動範囲・速度の異なる二つ

のモーターを備えた同軸操舵機構に対して、可動範囲と速度を考慮したモデル予測制御によって、操舵性能を向上させた。

(学会発表: 11)

脚車輪型移動ロボットのモデル予測誘導制御

縦横加速度に応じて脚と車輪位置を動的に変化させて荷重配分を考慮するモデル予測制御則を構築した。

(学会発表: 10, 15)

(2) 障害物回避制御

目的関数に反映する手法

障害物回避に広く使われている人工ポテンシャル場法をモデル予測制御の評価関数に含めることにより、障害物回避を実現した。(雑誌論文: 6, 学会発表: 12, 19, 21, 23)

制約条件を用いる手法

制約条件で表現した進入可能領域をモデル予測制御に用いることによって、経路追従性などに影響を与えずに障害物回避を実現した。

(雑誌論文: 3, 4, 学会発表: 2, 25)

(3) 動力学モデルによるモデル予測走行制御

車両型移動ロボット

自動車型の車両について、タイヤ横滑り角を考慮したモデル予測制御則を構築した。この際に、タイヤ発生力・操舵角度の制約やロバスト性を陽に考慮した制御則を構築した。

(雑誌論文: 1, 学会発表: 3, 7, 8, 16, 18, 20, 24)

車両運動制御に関する技術

車両のロバスト制御や状態推定に関するシステムを開発した。

(雑誌論文: 5, 学会発表: 5, 13)

(4) 厳密な線形化による車両のモデル予測制御

前輪操舵車両を対象として、時間軸変換を適用してサブシステムに分解して線形化し、経路追従問題に MPC を適用した。その結果、組み込み CPU の AMD Geode (クロック周波数は 500MHz) のリアルタイム制御と障害物回避を含んだ車庫入れ制御を実現し、有効性を確認した。

(雑誌論文: 1, 4, 6, 学会発表: 19, 23)

(5) ロバストな自己位置推定と速度計測

移動ロボットの位置・方向角の高精度計測を実現するために、レーザー測域センサによる周囲形状の計測結果を環境地図に対してマップマッチングすることにより適合させ、拡張カルマンフィルタにより、推定精度を向上させた。その結果、間欠的な計測時にもロバストに自己位置推定する手法を実機で実現したさらに、Moving Horizon Estimation

を用いることによって、遮蔽や外れ値に対して頑強な LRF データに基づく自己位置推定手法とキャスト型オドメーターによる速度計測システムを開発した。
(学会発表：1,4,6,9,17,22)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

1. 小田 貴嗣, 野中謙一郎, 関口和真, モデル予測制御とスライディングモード制御による四輪操舵駆動車両のロバスト経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.51, No.7, 2015 (掲載決定済)

2. 萩森 夕紀, 高橋 直樹, 野中 謙一郎, 操舵角度の可動範囲と連続性を陽に考慮した車輪型移動ロボットのモデル予測軌道追従制御, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.825, p.14-00484, 2015

DOI:

<http://doi.org/10.1299/transjsme.14-00484>

3. Kazuki KIMURA, Kenichiro NONAKA and Kazuma SEKIGUCHI, Real-time model predictive obstacle avoidance control for vehicles with reduced computational effort using constraints of prohibited region, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.2, No.3, 2014

DOI: <http://doi.org/10.1299/mej.14-00568>

4. 小山健太郎, 関口和真, 野中謙一郎, 走行距離を時間軸とする時間軸状態制御形による車両の経路追従制御 - モデル予測車庫入れ制御への適用 -, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.50, No.10, pp. 746-754, 2014

DOI:

<http://doi.org/10.9746/sicetr.50.746>

5. 細谷 知之, 野中 謙一郎, 接触式オドメータを搭載する小型模型車両の非線形タイヤモデルを用いたロバスト経路追従制御, 日本機械学会論文集, 査読有, Vo.80, No.813, pp.1-8, 2014

DOI:

<http://doi.org/10.1299/transjsme.2014dr0130>

6. 小山健太郎, 野中謙一郎, 障害物回避と切り返し点の自動調整によるモデル予測車庫入れ制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.50, No.1, pp.9-17, 2014

DOI: <http://doi.org/10.9746/sicetr.50.9>

[学会発表](計25件)

1. Yuta Yonezawa, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Velocity Estimation

using EKF for Caster Odometers - Numerical Verification -, the 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2015/3/8, Nagoya Institute of Technology (Nagoya)

2. 永田篤史, 野中謙一郎, 関口和真, 全方向移動ロボットのためのファジィポテンシャルモデル予測障害物回避制御, 第2回制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2015), 2015/3/7, 東京電機大学(東京)

3. 吉田三喜也, 野中謙一郎, 関口和真, タイヤ横滑り角制約を可変とした車両のモデル予測制御, 第2回制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2015), 2015/3/7, 東京電機大学(東京)

4. 木村一輝, 野中謙一郎, 関口和真, LRF計測値と非線形車両モデルによるMHEを用いた自己位置推定, 第2回制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2015), 2015/3/6, 東京電機大学(東京)

5. 吉田三喜也, 伊藤一樹, 野中謙一郎, 関口和真, 小型車両による加速度センサを用いた横滑り角推定および経路追従実験, 第15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(SI'14), 2014/12/17, 東京ビックサイト(東京)

6. 木村一輝, 野中謙一郎, 関口和真, 間欠的観測を考慮したMHEに基づく車両の自己位置推定の実機実験による検証, 第15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(SI'14), 2014/12/15, 東京ビックサイト(東京)

7. 小田貴嗣, 野中謙一郎, 関口和真, タイヤ力飽和を考慮したキャンバ制御機構を有する小型電気自動車のモデル予測スライディングモード制御, 2014年自動車技術会秋季学術講演会(JSAE-Autumn'14), 2014/10/23, 仙台国際センター(仙台)

8. Mikiya Yoshida, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Vehicle Control with Side Slip Angle Restriction with Suppression of Modeling Error by Sliding Mode Control, 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2014/10/10, Antibes(France)

9. Kazuki Kimura, Yutaro Hiromachi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Vehicle Localization by Sensor Fusion of LRS Measurement and Odometry Information based on Moving Horizon Estimation, 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2014/10/10, Antibes(France)

10. Yuji Yanagii, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Control for the Leg/Wheel Mobile Robots Considering Body Balance, SICE Annual Conference 2014, 2014/9/11, Hokkaido University(Sapporo)

11. Yuki Hagimori, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Steering Control for Coaxial Steering Mechanisms under Constraints, SICE Annual Conference 2014, 2014/9/10, Hokkaido University(Sapporo)

12. Atsushi Nagata, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi, Model Predictive Obstacle Avoidance Control for Omni-directional Mobile Robots based on Fuzzy Potential Method, 13th European Control Conference, 2014/6/25, Strasbourg(France)

13. 伊藤一樹, 野中謙一郎, 関口和真, サーボ型オブザーバによる小型車両の横滑り角及びヨーレートの推定実験, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'14), 2014/5/23, 京都テルサ(京都)

14. 萩森夕紀, 野中謙一郎, 関口和真, 操舵角速度に可変重みを用いたモデル予測車両制御, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'14), 2014/5/23, 京都テルサ(京都)

15. 柳井悠爾, 野中謙一郎, 関口和真, モデル予測制御を用いた脚車輪型移動ロボットの車輪位置最適化, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'14), 2014/5/22, 京都テルサ(京都)

16. 小田貴嗣, 野中謙一郎, 関口和真, タイヤ力の飽和を考慮した小型電気自動車のモデル予測スライディングモード制御, 2014 年自動車技術会春季学術講演会(JSAE-Spring'14), 2014/5/21, パシフィコ横浜(横浜)

17. Yutaro Hiromachi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi EKF Localization with Variable Covariance for LRS and Odometry: Experimental Verification, The 13th International Workshop on Advanced Motion Control, 2014/3/14, Keio University(Yokohama)

18. Kenichiro Nonaka, Takatsugu Oda, Model Predictive Sliding Mode Control for Four Wheel Steering and Driving Vehicles, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 2013/9/7, National Olympic

Memorial Youth Center(Tokyo)

19. Kentaro Oyama and Kenichiro Nonaka, Model Predictive Parking Control for Nonholonomic Vehicles using Time-State Control Form, 2013 European Control Conference, 2013/7/17, ETH Zurich(Switzerland)

20. 小田貴嗣, 野中謙一郎, 関口和真, 最大タイヤ力を考慮した小型四輪操舵駆動 EV のモデル予測誘導制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/6, 電気通信大学(東京)

21. 永田 篤史, 野中 謙一郎, 関口 和真, 組み込み CPU による全方向移動ロボットのためのモデル予測障害物回避制御実験, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/6, 電気通信大学(東京)

22. 米澤裕太, 関口和真, 野中謙一郎, キャスタ型オドメータに対する積分型拡張 Luenbeger オブザーバの実機実験による性能検証, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/6, 電気通信大学(東京)

23. 小山健太郎, 野中謙一郎, 関口和真, 走行距離を時間軸とする時間軸状態制御形による車両のモデル予測経路追従制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/6, 電気通信大学(東京)

24. 吉田三喜也, 野中謙一郎, 関口和真, タイヤ横滑り角制約を伴うモデル予測車両運動制御 - タイヤスリップ率の考慮 -, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/6, 電気通信大学(東京)

25. 木村一輝, 小山健太郎, 野中謙一郎, 関口和真, 車両の走行距離を時間軸としたモデル予測障害物回避制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014/3/5, 電気通信大学(東京)

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