

〈一般研究課題〉 移動ロボットの物理モデルを用いた予測と最適化に
基づく走行・連携行動の性能向上に関する研究
助成研究者 愛知県立大学 伊藤 正英



移動ロボットの物理モデルを用いた予測と最適化に 基づく走行・連携行動の性能向上に関する研究

伊藤 正英
(愛知県立大学)

Study on Performance Improvement of Motion and Cooperative Actions based
on Prediction and Optimization using a Physical Model of a Mobile Robot

Masahide Ito
(Aichi Prefectural University)

Abstract :

This study addresses the performance improvement of motion of omni-directional mobile robots. The first approach focuses on friction around small wheels on Omni-wheels. To reduce it, a new type of small wheels are developed. The second approach is to design a trajectory tracking controller in the framework of model predictive control (MPC). In particular, an MPC controller that the authors proposed before is extended by taking dynamics of robot orientation into account. The effectiveness of both approaches was validated by experimental results. The achievement of this study can contribute to the advancement of cooperative actions and team strategies by multiple robots.

1. はじめに

本研究の目的は、移動ロボットの物理モデルを用いた予測と最適化によって、ロボット単体の走行や複数台での連携行動の性能を向上させることである。現在、日本の科学技術基本方針(ソサエティ-5.0)は、ロボット技術を中核に据えている。また、掃除ロボットやドローンなどのロボットは、一般の生活環境へ着実に普及しており、我々の身近な存在になりつつある。本研究で得られる成果はこうしたロボット技術へ、ひいては生活環境の高度化へ還元できる点で意義がある。

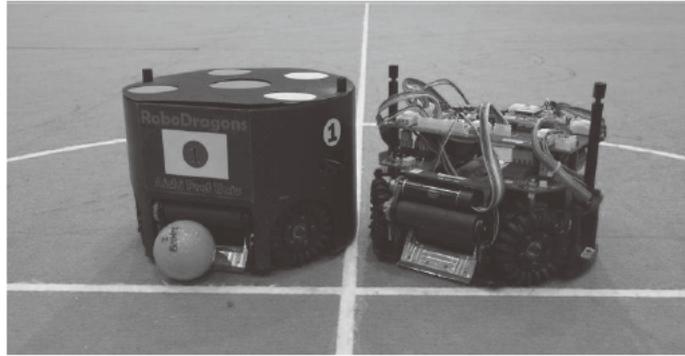


図 1 オムニホイール型移動ロボット (RoboDragons第7世代ロボット)

本研究の具体的な対象は、ロボカップサッカー小型リーグ(SSL)で用いられるオムニホイール型移動ロボット(図 1)である。SSLの試合展開は早いため、ロボットの性能と試合中の情報を最大限に生かした運動制御、行動決定が重要課題である。この課題に対し、本研究は数式モデルを用いた予測とオンライン最適化からアプローチした。特に、モデル予測制御(MPC)[1]という枠組みで、ロボット単体の運動制御性能を向上させるコントローラ設計を検討した。本研究で設計したコントローラは、並進速度ベクトルの大きさに対する制約を、適切な変換によって各要素の大きさの制約にオンラインで帰着させるアルゴリズムがポイントとなっている。類似研究[2]に下位の物理制約に着目したものはあるが、本研究は上位の運動制約を扱う点で異なる。

本研究では主に以下2点について取り組んだ：

- 1) ハードウェアレベルでの走行性改善のため高潤滑性小車輪の開発・導入、
 - 2) ソフトウェアレベルでの走行性改善のためMPCコントローラの予備結果[3][4]拡張。
- 以降ではこれらに関して得られた成果の概要を報告する。

2. 高潤滑性小車輪の開発・導入

図 1のロボットは4輪のオムニホイールの駆動によって全方向へ並進移動する。各オムニホイールは、図 2 (a)に示すように、外周に沿って多数の小車輪を有しており、主車輪の駆動と小車輪の受動的回転によって全方向移動を可能としている。著者の所属するチームRoboDragonsのロボット(第7世代)は、図 2 (b)のように、アルミ合金を材料とするハブ(図 3 (a))の周囲にアクリロニトリル・ブタジエンゴム(NBR)を焼き付けたものを、小車輪として採用していた。この小車輪は、クロム合金の平行ピンを軸として回転するが、ハブと軸との間に発生する摩擦を低減するため、適宜、ほこり(主にフィールドカーペットの繊維)を除去し、ミシン油によって潤滑する必要がある。

このような課題に対して、豊田工業高等専門学校チームKIKSは、ポリアセタール樹脂(POM)のベアリングとゴムリングからなる小車輪をはじめてSSLロボットに導入した[5]。POMは耐疲労性、自己潤滑性に優れ、機械機器の軸受けなどに用いられている。KIKSロボットの小車輪を参考にし、RoboDragonsはスマッツ株式会社と共同で、アルミ合金(外側)とPOM(内側)の2層からなるハブ(図 3 (b))の周囲にNBRを焼き付けた小車輪を開発した。KIKSの小車輪に対して、耐久性と安定性の向上を期待して、アルミ合金の層があることが特徴である。

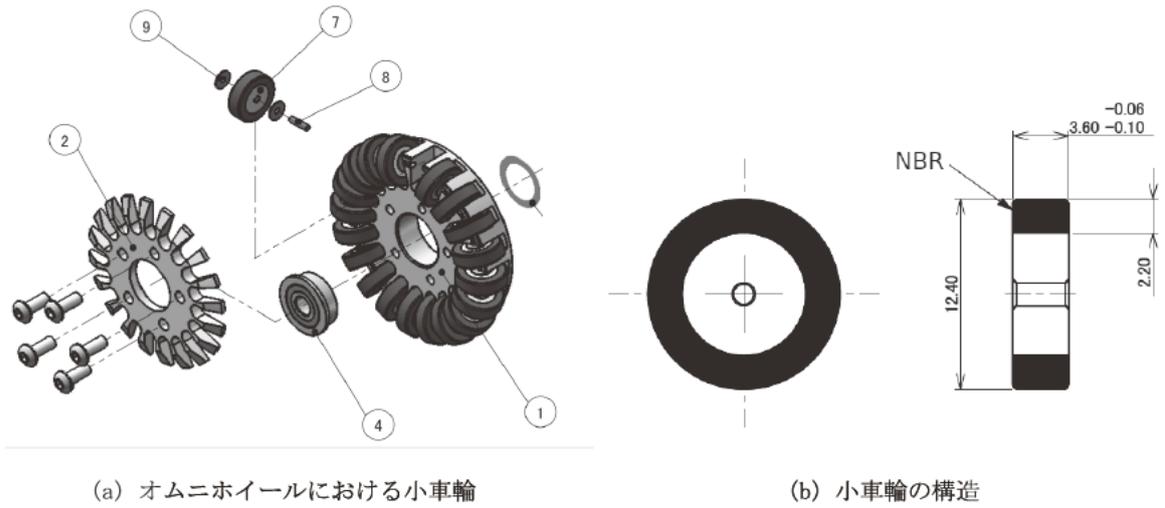


図2 オムニホイールと小車輪

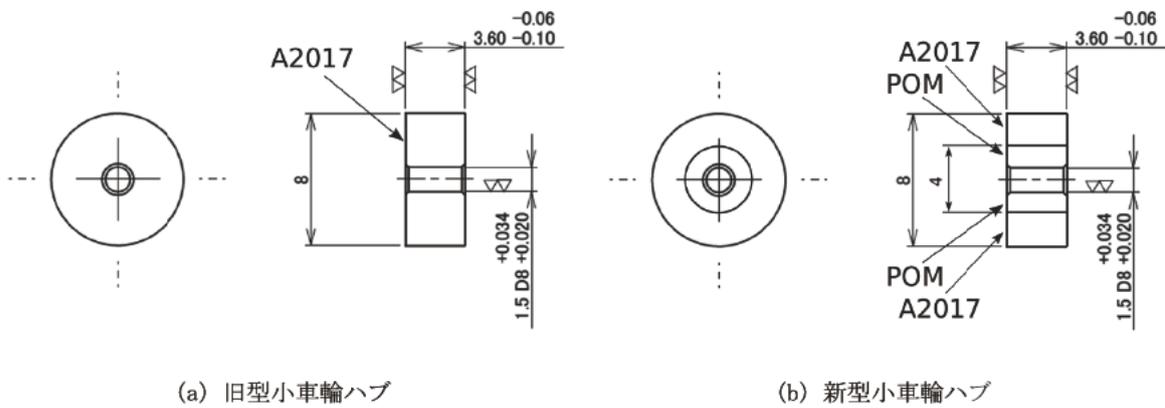


図3 新旧小車輪ハブの違い

新型小車輪の効果を確かめるため、簡易実験を行った[6]. 図4に示すように、フィールド中央に設定した絶対的な座標系において、初期時刻でロボット中心を $(x,y)=(-4,-2)$ に配置し、ロボット正面を y 軸正の方向 (x 軸に関して 90° の方向) を向かせた. 初期位置に配置後、ロボットを x 軸に平行に運動させた. このとき、 (x,y) の並進運動は理想軌道に対してフィードバック制御しているが、 θ の回転運動は速度指令したのみである. つまり、新旧小車輪の潤滑性が与える影響を姿勢角の変化で評価した. なお、新旧小車輪とも同程度使用した状態で実験を行った¹.

実験結果を図5に示す. 理想軌道に対する (x,y) および θ の誤差に着目する. 新旧小車輪の違いは、 (x,y) の時間変化には現れていないが、 θ の時間変化には明確に現れている ($t=2$ sの時点で旧型小車輪の場合はおおよそ $0.78 \text{ rad} (=44.7^\circ)$ の誤差である一方、新型小車輪の場合はおおよそ $0.23 \text{ rad} (=13.2^\circ)$). したがって、新型小車輪の導入によって、ハブと軸との間の摩擦低減を達成したと考えられる. 本節の成果は文献[6]にて公表した.

¹ 旧小車輪の場合は、直近の潤滑メンテナンスを基準としてある程度使用した状態を意味する.

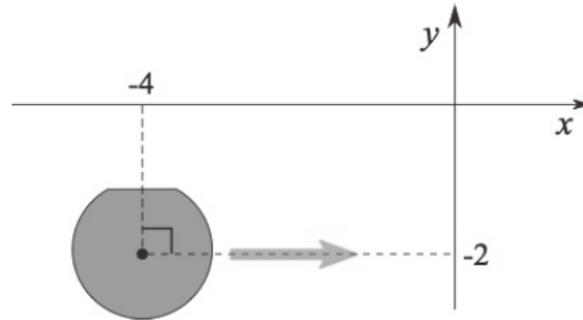


図4 実験設定

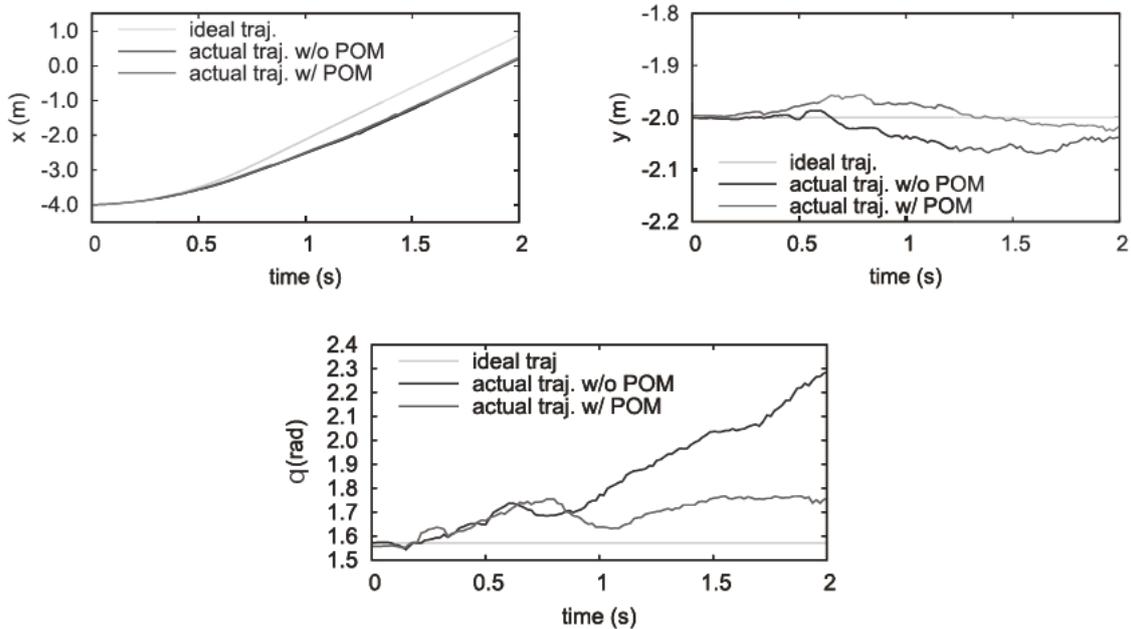


図5 ロボットの中心座標 (x,y) および姿勢角 θ の時間変化(ideal traj.: 理想軌道, actual traj. w/o POM: 旧型小車輪を備えたロボットの軌道, actual traj. w/ POM: 新型小車輪を備えたロボットの軌道)

3. モデル予測コントローラの拡張

著者らはRoboDragonsロボットの運動制御性能を向上させるため、MPCの枠組み[1]でコントローラ設計を検討し、予備的な結果[3][4]を得ていた。しかしながら、設計を単純化するため、ロボットの並進運動のみに着目していたため、大きな姿勢変化を伴う運動では制御性能が劣化していた。そこで本研究では、姿勢変化を含めた運動モデルを導入することで文献[3][4]で提案したMPCコントローラを拡張した。特に、1) コントローラ内で運動予測に用いるモデルへの姿勢変化分の追加(システムは2次元から3次元へ)、2) 軌道追従性を表現した評価関数にモデル拡張の反映、3) 姿勢の角速度に関わる制約条件追加という3段階によって、拡張したコントローラを得た。詳細は文献[7]を参照されたい。

拡張によって得られたMPCコントローラの性能を実機実験により評価した。ロボットの運動モデルは、図6のとおり、ロボットの位置・姿勢といった状態を表す (x,y,θ) およびそれらを変化させる制御入力 (v_x, v_y, ω) (v_x, v_y : 各軸方向の推進速度、 ω : θ への制御入力となる角速度)によって表現される。実験では、実際の試合において起こりうる状況を模擬して以下の問題を設定した(図6参照)：

- i) ロボットを $\theta=0$ の姿勢で $P_0: (-4, -2)$ に初期配置する.
- ii) ロボットが目標位置 $P_1: (4, -2)$ に向かうよう制御する.
- iii) ロボットが目標位置 P_1 の半径 2 m 以内に達したら, 目標位置を P_1 から $P_2: (1, 2)$ に切り替える.
- iv) 切り替え後は新たな目標位置 P_2 に向かうようロボットを制御する.

図 7 に実験結果を示す. 図 7 (a) より, Step iii で目標位置が急に变化したことによって計画軌道からの誤差が生じ, その誤差を解消すべくコントローラが機能していることがわかる. 並進運動では, 両コントローラの性能差はほぼ見られず, 実験終盤, 最終目標位置 P_2 付近においてやや拡張した MPC コントローラが優位といえる. 一方, 姿勢 θ の時間変化 (図 7 (b)) をみると, 従来の MPC コントローラで生じた計画軌道からの誤差を, 拡張した MPC コントローラでは速やかに抑制できていることがわかる. よって, 本研究によって拡張された MPC コントローラによって, ロボットの運動性能が向上したといえる.

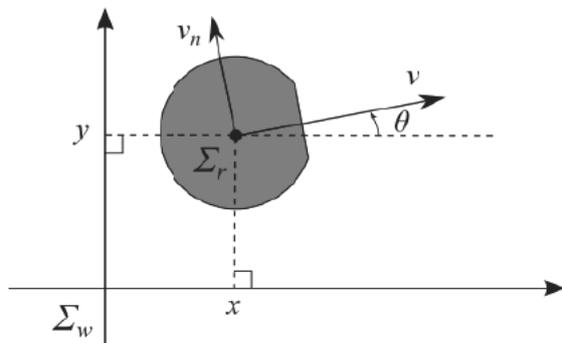


図 6 ロボットモデル

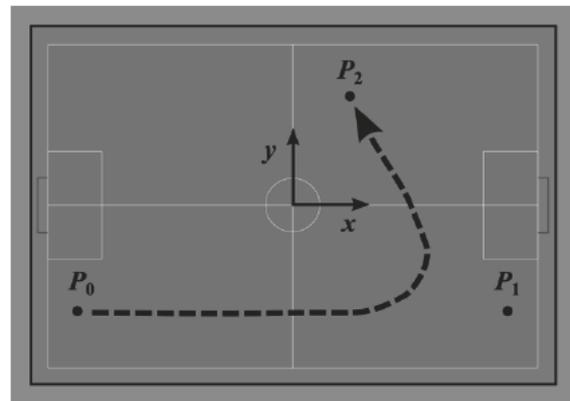
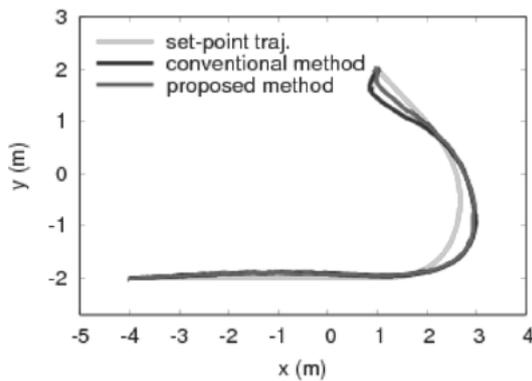
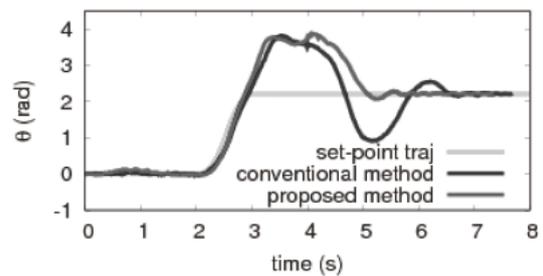


図 7 実験における目標位置と想定される経路



(a) x - y 平面の軌跡



(b) θ の時間変化

図 8 実験結果 (set-point traj.: 計画された理想的な軌道, conventional method: 従来の MPC コントローラ [3][4] の場合, proposed method: 拡張した MPC コントローラの場合)

3. おわりに

本研究では, 移動ロボットの物理モデルを用いた予測と最適化により, ロボット単体の走行や複数台での連携行動の性能を向上させることを検討した. 特に, SSL で用いられるオムニホイール型移動ロボットを対象とし, ハードウェア, ソフトウェアの両面から走行性能向上という課題にア

アプローチした。ハードウェアからのアプローチでは、オムニホイールの小車輪に生じる摩擦の抑制に着目し、POMを用いた2層ハブを導入した。簡易実験では、新型小車輪がロボットの姿勢変化に対する外乱を低減することを確認した。ソフトウェアからのアプローチでは、ロボットの並進運動に関する従来のMPCコントローラ[3][4]を、姿勢変化まで対応させる拡張を行った。実戦を模擬した実験から、本研究の拡張によって姿勢変化に生じる誤差が従来よりも抑制されることがわかった。

走行性能の向上は、SSLロボットの基本能力向上を意味し、複数ロボットでの連携プレーや試合戦略の高度化に貢献すると考えられる。本研究の応用展開として、著者らはボール配置タスクの高度化で予備的な成果[8]を得ている。また、試合戦略の分析手法[9][10]をリアルタイム化についても、並行して検討している。

参考文献

- [1] J. M. Maciejowski : モデル予測制御 – 制約のもとでの最適制御 –, 足立・菅野 訳, 東京電機大学出版局 (2005)
- [2] J.C.L. Barreto S., A.G.S. Conceição, C.E.T. Dórea, L. Martinez, and E.R. de Pieri: Design and implementation of model-predictive control with friction compensation on an omnidirectional mobile robot; IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 2, pp.467–476 (2014)
- [3] 日下部・伊藤・成瀬 : 速度制約のあるオムニホイール型移動ロボットに対するモデル予測制御コントローラ的设计と実験的評価 ; 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 講演番号 : PS-3, 東京都市大学世田谷キャンパス, 東京 (2018)
- [4] M. Ito, H. Kusakabe, Y. Adachi, R. Suzuki, J. Du, Y. Ando, Y. Izawa, S. Isokawa, T. Kato, and T. Naruse: RoboDragons 2018 extended team description; RoboCup Soccer Small Size League (2018)
- [5] S. Ohno, Y. Naito, T. Mimura, K. Ohno, Y. Tsuruta, R. Mitsuoka, R. Sako, M. Watanabe, and T. Sugiura: KIKS extended team description for RoboCup 2019; RoboCup Soccer Small Size League (2019)
- [6] M. Ito, R. Suzuki, S. Isokawa, J. Du, R. Suzuki, M. Nakayama, Y. Ando, Y. Umeda, Y. Ono, F. Kashiwamori, F. Kishi, K. Ban, T. Yamada, Y. Adachi, and T. Naruse: RoboDragons 2019 extended team description; RoboCup Soccer Small Size League (2019)
- [7] R. Suzuki and M. Ito: Trajectory tracking controller based on linear model predictive control for omni-wheeled mobile robots with velocity command limits; Proceedings of the fifth IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON'19), Paper No.V1-7, Chiba, Japan (2019)
- [8] 伊藤・五十川・安達 : 小型サッカーロボットのボール配置タスクにおけるななめ壁打ちの実現 ; 第63回システム制御情報学会研究発表講演会, 講演番号 : GSf05-6, 講演論文集pp.400–401, 中央電気倶楽部, 大阪 (2019)
- [9] 安井・伊藤・成瀬 : RoboCup小型リーグにおけるリアルタイム学習のための相手行動の分類 ;

電子情報通信学会論文誌D, Vol.J97-D, No.8, pp.1297–1306 (2014)

- [10] Y. Adachi, M. Ito, and T. Naruse: Classifying the strategies of an opponent team based on a sequence of actions in the RoboCup SSL; RoboCup 2016: Robot World Cup XX (S. Behnke, R. Sheh, S. Sarel, D. Lee, Eds.), Lecture Notes in Computer Science, Vol.9776, pp.109–120, Springer (2017)

