

四輪独立駆動型全方向移動ロボットを用いた MPPI制御による歩行者回避

○小野 郁哉（創価大学院） 崔 龍雲（創価大学院）

本研究では、レストランやホテルで接客ロボットを導入するための、歩行者を回避することを目的とした経路計画とそれを追従する走行制御手法について述べる。特に、四輪独立駆動型全方向移動ロボットの高次元の自由度を活かす一手法として提唱された MPPI の制御モデルに、移動する障害物となる歩行者を回避することを優先とする項目を付加し、これまでの MPPI 制御手法と比較する。そして四輪独立駆動型全方向移動ロボットが移動障害物の回避に適していることを示す。

1. はじめに

レストランやホテルでは、従業員に代わるロボットの導入が求められている。その環境では、ロボットにとって障害物となる客が歩行を各所で頻繁にする。そのためロボットが移動をする際に、客が歩行をしても衝突しない自律的な走行制御をする必要がある。

先行研究では、ロボットが 2D LiDAR を用いて周辺に存在する障害物を 2 次元の点群として取得し、移動障害物を検出した [1]。検出した移動障害物を元に、ダイクストラ法や A* アルゴリズムといった手法を用いて経路生成を行う。その経路をもとに、移動障害物の回避をする主なアルゴリズムとして、独自の評価関数を加えた走行制御が用いられた。これにより、歩行の流れに乗る自律移動が可能となり、移動障害物との衝突を回避することができた。しかし走行制御をする前に生成された経路が、移動障害物の回避について考慮していない。そのため、生成された経路を追従しようとする評価値と移動障害物を回避しようとする評価値が競合し、回避に時間がかかってしまう。

また移動機構部に着目すると、自由度の高い移動機構部を適切に制御することは、自律移動において様々な状況に応じた走行制御ができることがわかっている。特に、四輪独立駆動型 (4WIDS) 全方向移動ロボットは、4 つの車輪それぞれの方向と速度を指定する 8 次元の自由度を持つ高次元の移動が可能である。4WIDS 全方向移動ロボットでは Model Predictive Path-Integral Controller (MPPI) [2] の制御モデルについて、算出速度の速い最適化効率重視の走行制御と、障害物回避や回転制御に特化した安全面重視の走行制御を切り替えるハイブリッド MPPI 制御が提案された [3]。

そこで本研究では、移動障害物を予め回避する経路を生成し、走行制御を効率的に行うことを目的とする。また、その経路を追従するためのロボットに 4WIDS 全方向移動ロボットを用いる。これにより、各車輪の角度と速度を高次元の自由度として活かす走行制御を実現し、移動障害物の回避を行う。具体的には、走行制御には MPPI を用いて切り替え項目へ入る。その項目の 1 つとして本手法では、移動障害物への回避に特化した制御モデルを追加する。これにより、不必要な停止時間や旋回時間を費やすことなく移動障害物を回避する。本稿では、移動障害物の検出手法と軌道予測手法、及びその予測位置の算出方法について述べる。さらに、MPPI を用いた走行制御における制御モデル切り替え手法、およびその制御モデルについて述べる。実験で

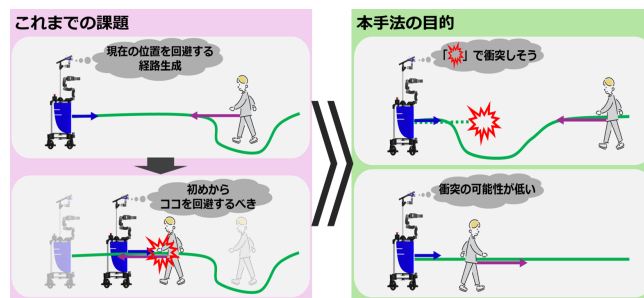


図1 本手法が目指す改善点

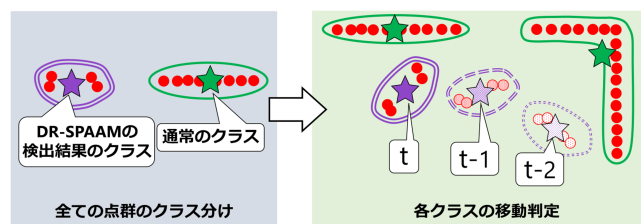


図2 障害物のクラス分けと移動判定

は、ロボットの前から近づく歩行者に対して、ロボットが通った経路、並進速度について、MPPI における制御モデル切り替えの違いで比較し検証する。

2. 移動障害物を回避する自律移動

本手法の改善点を図1に示す。従来の移動障害物を回避する手法では、走行制御に着目している。本手法では、経路を生成する段階で移動障害物を回避する。その経路を追従することで停止や不必要な旋回を減らし、移動障害物が回避できると考えられる。

2.1 移動障害物の移動先を予測した経路生成

ロボット移動機構部に搭載される 2D LiDAR で取得した点群から障害物となる物体のクラス分けを行う。障害物の各クラスの位置の検出方法を図2に示す。このとき図2の二重線で囲っている点群は、1人分の両足で1つのクラスとなる。そのような点群へのクラス分けに関しては、人の足の点群を学習した Distance Robust SPatial Attention and Autoregressive Model (DR-SPAAM) [4] を用いる。そして各クラスの位置をステップごとに比較することにより、障害物の移動を検出することができる。例えば、図2の人の足と判断された障害物は $t-2$, $t-1$, t ステップでクラスの位置が移動している。このような移動をしているクラスは移動障害物と判定する。

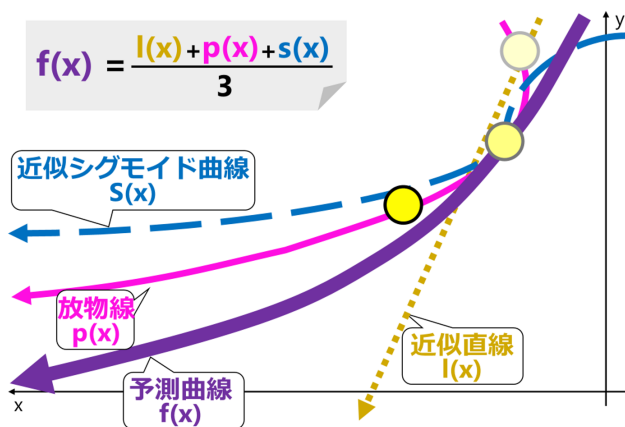


図3 軌道予測の手法

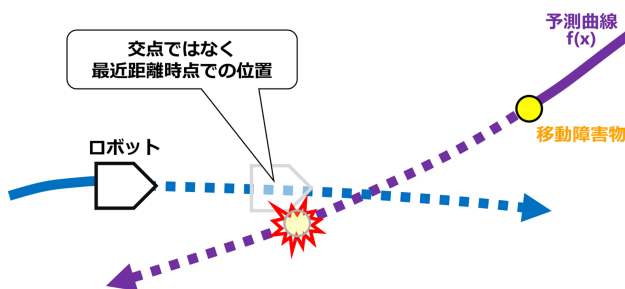


図4 衝突位置の算出

検出した移動障害物における $t-2$, $t-1$, t での位置から軌道を予測する。本手法で用いる予測関数算出のための3つの曲線(近似直線, 放物線, 近似シグモイド曲線)を図3に示す。近似直線では移動障害物の大まかな方向を, 放物線では全ての位置を通過する軌道を得ることができる。また, 近似シグモイド曲線を用いることで, 障害物の移動方向がロボットにとって左右なのか前後なのかを判断することができる。これらの3つの曲線の平均を予測関数 $f(x)$ とする。

この予測関数を元に, ロボットと各移動障害物の速度を用いて障害物の移動先における位置を予測する。各障害物における移動先の位置 (x_c, y_c) は, t での位置を (Px_o, Py_o) , 速度を (Vx_o, Vy_o) , またロボットの位置と速度を (Px_r, Py_r) , (Vx_r, Vy_r) としたとき, 以下の式(1)から算出する。

$$(x_c, y_c) = [(Px_o + Pv_o \Delta t, f(Px_o + Pv_o \Delta t)) | \min(\sqrt{((Px_o + Vx_o \Delta t) - (Px_r + Vx_r \Delta t))^2 + (f(Px_o + Vx_o \Delta t) - Py_r)^2})]$$

これにより, 移動障害物の予測した位置が, 近似した予測関数の軌道から, 回避する座標として取得することができる。この位置を回避することで, 事前に回避する経路の生成が可能となる。そこで生成された経路を追従することで, 移動障害物を回避することができる。しかし式(1)では, ロボットの現在の速度から算出しているため, ロボットが急旋回や急停止がないものとして扱われている。

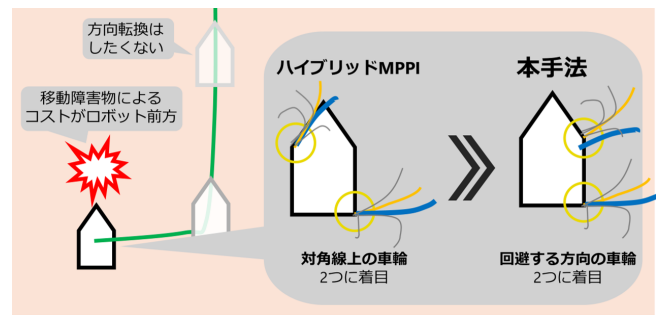


図5 横方向の MPPI 制御に特化した走行制御

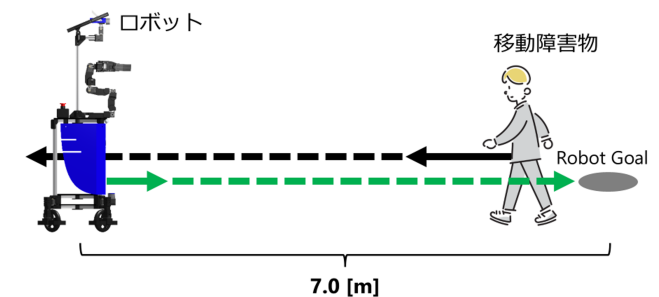


図6 移動障害物を回避する実験環境

2.2 移動障害物回避に重視した MPPI による走行制御切り替え

2.1 にて生成した経路を元に走行制御をする。生成された経路は, 急な速度変化に弱い。そのため, 効率的に速度をサンプリングし, 滑らかな走行制御を行えるハイブリッド MPPI[3] 制御を導入する。ハイブリッド MPPI 制御では, U ターンのような速度変化へ柔軟に対応した。そこで本手法では, 横方向に特化した MPPI 制御を導入する。

ハイブリッド MPPI 制御の切り替えと同様に, 経路から判定する。本手法の制御となる条件に合致するときのロボットと経路を図5に示す。条件として, 1. 移動障害物による予測位置がロボットの正面にある場合, 2. 経路がロボットの横方向に出ている場合, 3. 一定距離先の経路の方向が今のロボットの方向と同程度の場合のこれら3つの条件が一致したとき, 制御モデルは移動障害物の回避を重視する本手法に切り替わる。ハイブリッド MPPI 制御では対角上の車輪に着目した速度制御を行っていたのに対して, 本手法では回避する側の車輪2つに着目する。これにより, 横方向の速度が優先的に選ばれる MPPI 制御が実現する。この手法により, MPPI の滑らかな制御や不必要な旋回と停止時間を削減できると考える。

3. 移動障害物回避における経路修正の比較

3.1 実験概要

本実験は, 移動障害物の回避において本手法が車輪の自由度を活かした移動障害物の回避を行えているかについて検証する。実験環境は廊下を想定した環境として図6に示す。図6の矢印で示すように, 移動障害物はロボットとすれ違うように逆向きへ進む。実験ではハイブリッド MPPI 制御と本手法を比較する。ど

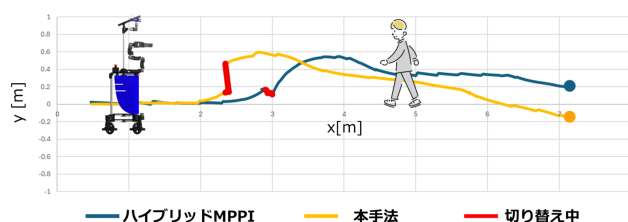


図7 移動障害物回避におけるロボットの軌跡

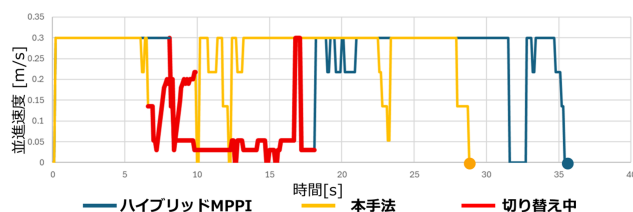


図8 移動障害物回避におけるロボットの速度変化

らも移動障害物の軌道予測を用いて、4WIDS 全方向移動ロボットの自由度をより活かしきれているのか評価する。

3.2 結果と考察

実験におけるロボットの軌跡の比較結果を図7に示す。ハイブリッド MPPI や本手法が経路によって制御を切り替えた間については図7の赤線として示す。どちらの手法とも、移動障害物の位置予測によって、大きな停止時間がなく回避することができた。各手法について、ハイブリッド MPPI 制御では、安全面を重視する制御モードに切り替わった際（青線から赤線）、大きく旋回している。これは4WIDSの冗長性を用いられていることがわかる。しかし、旋回に特化したハイブリッド MPPI 制御では、その場での回転時間が長く丁寧な回避を行う。そのため、前方から歩行者が迫る本実験において適していないことがわかる。一方本手法では、回避する制御モードに切り替った際（橙線から赤線）、回転ではなくロボットに対して横方向の速度を選択している。これにより、ロボットが方向転換をせずに移動している。本手法の切り替え条件の1つである「一定距離先の経路の方向が今のロボットの方向と同程度」という項目が作用したことが考えられる。したがって、本実験のような一定距離先では回転しないことが望ましいとわかっている場合、本手法の制御切り替えは有用であると考えられる。

また同実験における時間ごとの並進速度変化についての比較結果を図8に示す。同様に制御を切り替えた間については図8の赤線として示す。制御切り替え中のハイブリッド MPPI 制御では回転移動に特化していたため、並進速度が比較的低くなる傾向にあった。それに対して本手法では、切り替え動作中の並進速度は低下しにくかった。これは、ロボットが回転せずに横方向への並進移動に特化したことが挙げられる。これら2つの手法における切り替え時間に着目すると、本手法が短くなった。そして、目的地への到着時間もまた本手法が早かった。このことから、両手法とも切り替え中の動作は4WIDSの冗長性を用いた一時的な制御

であり、如何に通常の制御に戻れるかが重要であることがわかった。したがって、4WIDS 全方向移動ロボットにおける車輪の冗長性は、経路の状況に応じて切り替えることが有用であり、移動障害物の回避においても同様のことが確認された。

4. おわりに

本稿では移動障害物の回避において、移動先の予測をしてから経路生成をする手法について述べた。また本手法に適用される4WIDSは、高次元の制御を用いることができるため、回避の状況に応じた制御モードに切り替えることを目的とした。そこで生成した経路をもとに、急旋回や急停止することなく追従するための手法として、独自のMPPI制御モードをする走行制御手法について示した。これまでのハイブリッド MPPI では、経路がUターンの状況において有用であることが示されていた。それに対して横方向の回避に特化した制御モードに切り替える本手法では、ロボットが歩行者とすれ違う状況に有用であることが示された。

今後の展望として、切り替える瞬間に着目する。本手法では切り替える瞬間、制御系列を初期化する。その際、初期化する値によって挙動が変わることが考えられる。今回の手法では、各車輪の初期姿勢をもとに切り替えた。そこで、各車輪を回避する方向や速度に基づいて初期化をすることで、さらに滑らかな回避ができると考えられる。特に本手法における移動先の予測は、ロボットの速度の柔軟性に影響を受ける。したがって、あらゆる経路の状況における4WIDSの自由度を活かす速度制御を考案する。

参考文献

- [1] K.Kudo, *et al.*, “LiDAR-Based Pedestrian Traffic Estimation and Obstacle Avoidance with Model Predictive Control”, Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference, 2023, Volume 66, Session ID 1E3-5.
- [2] G.Williams, *et al.*, “Information-theoretic model predictive control: Theory and applications to autonomous driving”, IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 6, pp. 1603–1622, 2018.
- [3] M.Aoki, *et al.*, “Switching Sampling Space of Model Predictive Path-Integral Controller to Balance Efficiency and Safety in 4WIDS Vehicle Navigation.”, 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2024.
- [4] D.Jia, *et al.*, “DR-SPAAM: A Spatial Attention and Autoregressive Model for Person Detection in 2D Range Data”, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.10270-10277, 2020.