

モデル予測制御を用いた自動駐車制御

M2021SC003 金子輝哉

指導教員：中島明

1 はじめに

近年、AIや5Gなどの技術革新が進む中で自動車産業界は百年に一度の大変革期を迎えている。自動駐車化もその一例として挙げられ、現在ではボタン一つで駐車目的位置付近からの自動駐車を完了できる自動車も販売されている。また、自動バレーパーキング (Auto Valet Parking) システムは大型商業施設の一般駐車場で実証実験が行われ実用化が目前である [1] が、場所的課題など様々な問題点が残されている。AVPシステムとは、一部の空港や百貨店などで既に導入されている「人手によるパーキングサービス (Valet Parking)」を無人で実現するものであり、管理センタと連携し指定された経路で目的駐車枠まで無人走行・駐車をを行うものである。

日野氏の研究 [2] では四輪移動ロボットの自動駐車経路をオフラインで解析的に生成し、モーションキャプチャで誤差補正制御を行った。この研究では移動ロボットからのセンサを使用していないため、誤差補正精度が悪くなる問題点があった。そこで本研究では、既定の駐車場において前輪操舵後輪駆動の四輪移動ロボットである RoboCar の距離センサを使用し、初期位置から任意の駐車位置までの自動走行制御の実装と誤差補正精度の向上を目標とする。今回軌道追従シミュレーションで使用する ZMP 製 RoboCar1/10X の概要を図 1 に示す。また、経路追従アルゴリズムとしてのモデル予測制御の有用性を確認して課題を解決する。

本稿ではまず、既定の駐車場の設定と RoboCar の運動学モデルを作成し、その運動学モデルに経路生成アルゴリズム Hybrid-A* を適応し駐車経路を設定する。設定した駐車場において PID 制御、Pure-Pursuit、モデル予測制御を用いて経路追従シミュレーションを行い、実機実験に向けた課題の発見と評価関数の設定に対する考察を行う。

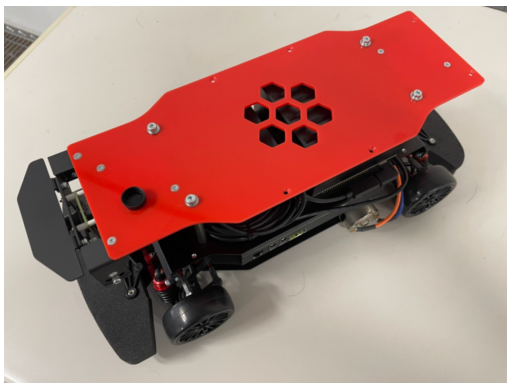


図 1 RoboCar

2 問題設定

本研究では既定の一般駐車場等で前輪操舵・後輪駆動の四輪自動車の駐車制御を想定する。与えられた初期位置から目標地点の駐車位置に対して経路計画、軌跡追従制御を行うことにより、自動駐車をを行う。

図 2 に本研究のシミュレーション設定駐車場を示す。RoboCar の大きさは普通乗用車 1/10 スケールとなっており、縦 0.4[m]、横 0.18[m] であるため、駐車場の大きさは十分に取って 3.0[m] 四方、駐車位置は縦 0.5[m]、横 0.4[m] で設定している。車両の初期位置は $[x, y, \theta] = [0.2, 0.2, \frac{\pi}{2}]$ とし、駐車目標位置と姿勢角を任意に指定して滑らかな経路で自動駐車を完了することを本研究の課題とする。

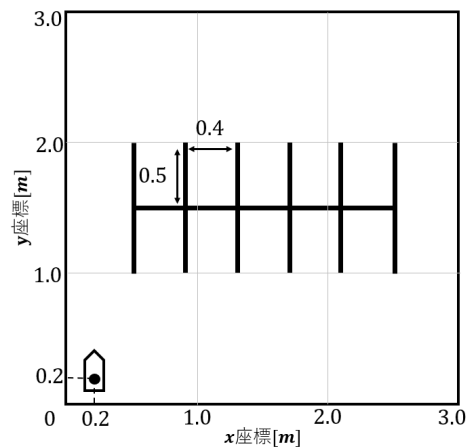


図 2 設定駐車場

3 運動学モデル

3.1 前輪操舵・後輪駆動の車両システム

この章では文献 [3] を参考に前輪操舵・後輪駆動 RoboCar の運動学モデルを導出する。RoboCar の位置を定義するため座標系を図 3 のように設定する。

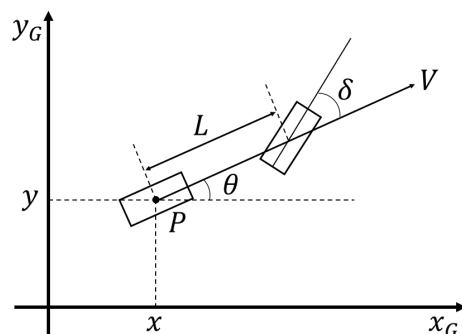


図 3 移動ロボットの座標系

基準座標系において x_G 軸方向から反時計回りを正と

した車両の姿勢角を θ , 車両位置 P を後輪中に取り $P = [x \ y]^T$ とする. また, 前輪の操舵角を δ , 前輪と後輪間距離を L とする. 後輪の平均回転角速度を ω , 車輪半径を r とすると車両の後輪軸まわりのヨーレート γ は次式で表される.

$$\gamma = \frac{r\omega \tan \delta}{L} \quad (1)$$

また, 車両の直進移動速度を $V = r\omega$ と置くことで車両速度 V と前輪操舵角 δ を入力とした順運動学は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \tan \delta / L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2 物理変数とパラメータ

本研究で使用する変数, パラメータを表 1 に示す.

表 1 変数と物理パラメータ

記号	名称	値	単位
x	車体位置		m
y	車体位置		m
V	車体直進速度	$ V \leq 10$	m/s
θ	車体姿勢角		rad
δ	前輪操舵角	$ \delta \leq \pi/6$	rad
$\dot{\delta}$	操舵角速度		rad/s
ω	車輪回転角速度	$ \omega \leq 334$	rad/s
d_D	車体縦幅	0.4	m
d_W	車体横幅	0.18	m
L	ホイール間距離	0.18	m
r	車輪半径	0.03	m
ρ	車体回転半径	$ \rho \geq 0.31$	m

3.3 RoboCar の機構的制約

四輪車 (本研究では RoboCar) は, 低速運動において横滑り角の変化はほとんどないものとして扱うことができる.

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (3)$$

また, 入力に関して直進速度 V , 前輪操舵角 δ は限界値を持つ.

$$|V| \leq V_{max} \quad (4)$$

$$|\delta| \leq \delta_{max} \quad (5)$$

以上 3 つの機構的制約を満たしながら経路生成を行う必要がある.

4 経路生成

経路生成とは, 障害物に衝突することなく, 乗り心地の良い滑らかな軌跡を生成することである. ただし, 本稿では無人駐車場において低速条件下で走行するため, 軌跡

に求められる機能を既存の障害物を回避する機能, 車両の拘束条件を満たす機能に限定して議論する. 経路生成アルゴリズムにはサンプルベースの PRM[4] や RRT[5], グリッドベースのダイクストラ法 [6] や A*[7] があるが, 車両の拘束条件を満たす機能を持つ Hybrid-A*[8] を使用し, 経路計画を行う. 図 2 の既定駐車場において, 車両の初期位置を $[x, y, \theta] = [2, 2, \frac{\pi}{2}]$ として Hybrid-A* で経路計画シミュレーションを行った. なお, 駐車場外周, 駐車枠は 1[m] の安全率を持った障害物として扱っている. 駐車位置を $[x, y, \theta] = [12.5, 17.5, \frac{\pi}{2}]$ とした場合のシミュレーション結果は図 4 に示す.

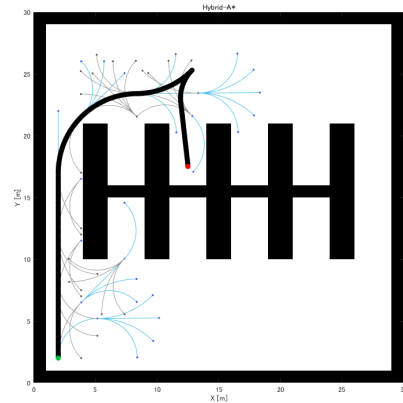


図 4 切返し有り Hybrid-A*

5 PID 制御を用いた軌跡追従シミュレーション

PID 制御とはフィードバック制御の 1 つであり, 目標値と出力値との偏差を 0 にするように制御入力を計算する制御方法である. 図 5 のように, 後輪軸中心と目標軌跡上の最近傍点までの距離を横偏差 e_{lat} , 最近傍点での接線と車両の姿勢角とのなす角を姿勢角偏差 e_{θ} として誤差系に定式化した. 2 節図 4 で作成した軌跡を参照軌道として設定し, PID 制御による追従シミュレーションを行った. ただし, ゲインチューニングをした結果 K_D ゲインの値があまりにも小さかったため PI 制御でシミュレーションを行っている.

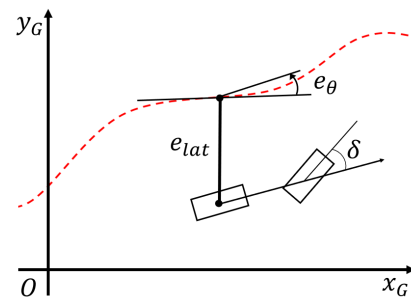


図 5 PID 制御に用いる 横偏差 e_{θ} と姿勢偏差 e_{lat}

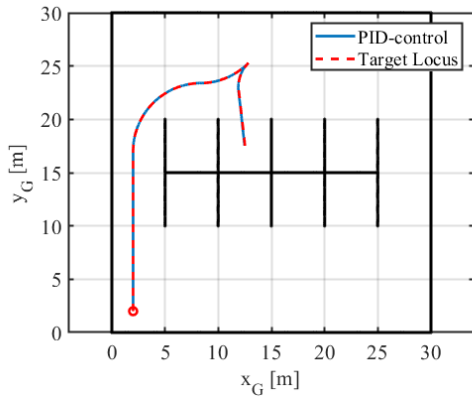


図 6 PI 制御を用いた軌跡追従

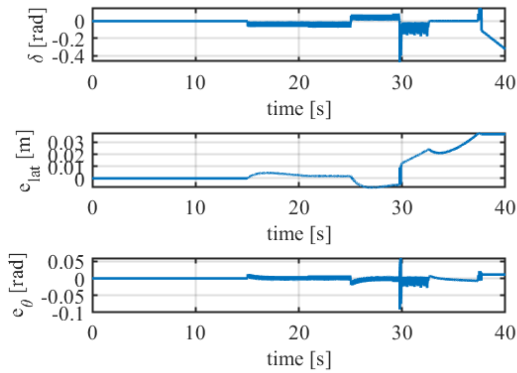


図 7 PI 制御の制御入力と偏差

図 7 より、横偏差の最大値は $0.02[m]$ で追従誤差は非常に小さいが車両の前輪操舵角入力に振動が見られる。

6 Pure-Pursuit を用いた軌跡追従シミュレーション

Pure-Pursuit[9] は一定距離離れた車両前方に注視点を設定し、目標軌跡上の点を通る円軌道求めて操舵角を決定する制御手法である。2 節図 4 の軌跡を参照軌道として設定し、注視点距離を $0.5[m]$ として Pure-Pursuit による追従シミュレーションを行った。

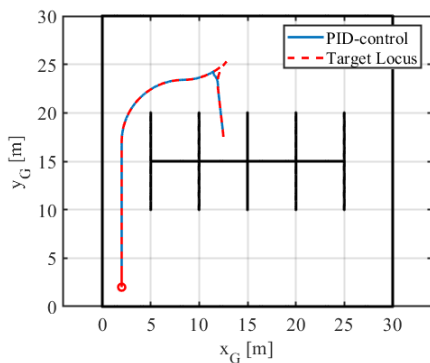


図 8 Pure-Pursuit を用いた軌跡追従

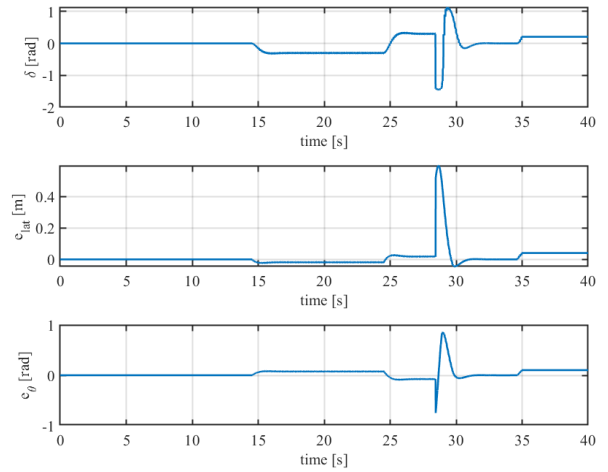


図 9 Pure-Pursuit の制御入力と偏差

図 9 より、横偏差は切返し区間外は小さくなっているが、切返し区間では最大値は $0.59[m]$ と大きくなっている。これは、注視点までの距離を元に制御入力決定しているため、旋回半径の小さい曲線や、切返し部分において追従制御が悪くなっているためであると考えられる。

7 モデル予測制御を用いた軌跡追従シミュレーション

モデル予測制御 (MPC) は制御対象のモデルを使って有限時間先までの挙動を予測し、実時間で最適問題を解いて、現在の制御入力を計算するという制御方法である。実時間で MPC が適用できるように図 10 の偏差モデルを用いて線形化した。そして、2 節図 4 の軌跡を参照軌道として設定し、予測ホライズン $N = 8$ として MPC による追従シミュレーションを行った。

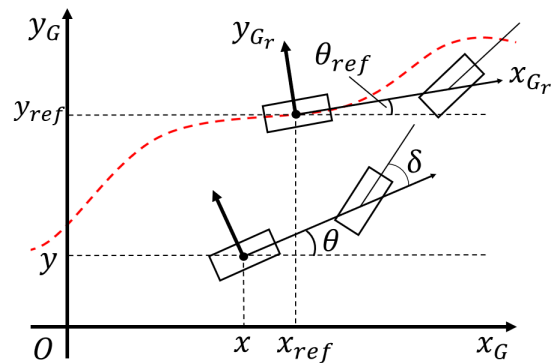


図 10 軌跡追従の偏差モデル

図 12 より、横偏差の最大値は $0.08[m]$ であり横偏差は小さいといえる。また、前輪操舵角入力に振動は見られず、機構的制約を満たしている。

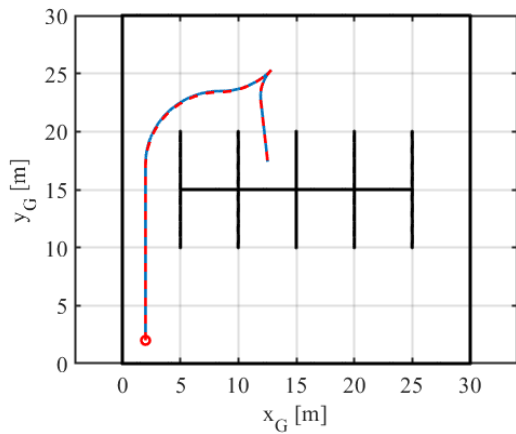


図 11 MPC を用いた軌跡追従 $N = 8$

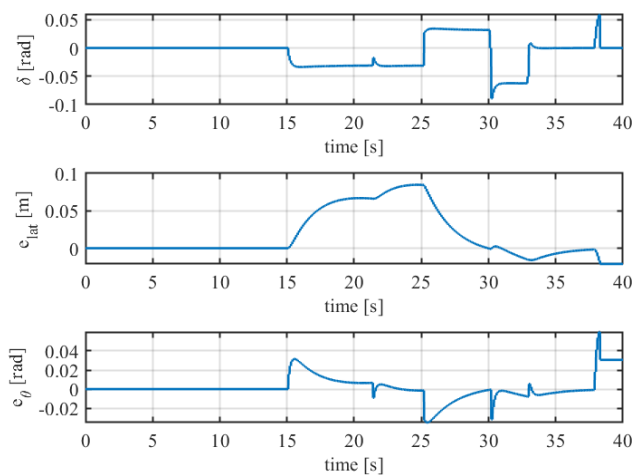


図 12 MPC の制御入力と偏差 $N = 8$

8 おわりに

本研究ではここまで、既定の駐車場の設定と RoboCar の運動学モデルを作成し、その運動学モデルに経路生成アルゴリズム Hybrid-A* を適応し駐車経路を設定。設定した駐車場において PID 制御、Pure-Pursuit、モデル予測制御を用いて経路追従シミュレーションを行い追従性能について比較した。また、それぞれのアルゴリズムの特徴について示し、実機実験を見据えた検討をした。今後の展望として、実験機とシミュレーション環境とのリアルタイム性を考慮したシミュレーションや、障害物回避をしながら目標軌道に追従するロバスト性の向上が望まれる。そのために、ROS を使用した RoboCar の運動制御を実験することでシミュレーション環境との差異について考察したい。

参考文献

- [1] 野村徹也・谷川浩：「自動バレーパーキングの開発と実証実験について」。JARI Research Journal, 2019.
- [2] 日野 卓磨, 岡 宏一, 原田 明德：「自動駐車システム

の開発と RoboCar による実験的検討」日本機械学会 2019.57 巻 (2019)

- [3] 日本ロボット学会：『ロボット工学ハンドブック』。コロナ社出版，東京，2005.p388-399
- [4] M. Baumann, S. Leonard, E. A. Croft, and J. J. Little, 「Path Planning for Improved Visibility Using a Probabilistic Road Map」 IEEE Trans. on Robotics, Vol.26, No.1, pp. 195-200, (2010)
- [5] M. Kothari and I. Postlethwaite, 「A Probabilistically Robust Path Planning Algorithm for UAVs Using Rapidly-Exploring Random Trees」 J. of Intelligent Robotic Systems, Vol.71, Issue 2, pp. 231-253, (2013)
- [6] E.W. Dijkstra 「A note on two problems in connexion with graphs」 ATiL7nerische Mathematrk, 269-271, (1959)
- [7] Hart, P Nilsson, N Raphael, B. 「A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,」 IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4(2), pp. 100-107, (1968)
- [8] K. Kurzer, 「Path Planning in Unstructured Environments: A Realtime Hybrid A* Implementation for Fast and Deterministic Path Generation for the KTH Research Concept Vehicle」 Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, (2016)
- [9] Richard Wallace, Anthony Stentz Charles Thorpe, Hans Moravec William Whittaker, Takeo Kanade 「First Results in Robot Road-Following 」 IJ-CAI(1985)
- [10] Jan M. Maciejowski (原著)/足立修一・菅野政明 (訳) モデル予測制御—制約のもとでの最適制御