

指導教員印

# 2025年度卒業論文

## 加速度推定機能を組み込んだポテンシャル 法による動的障害物回避手法の構築

Dynamic Obstacle Avoidance Using a Potential Field Method  
Incorporating Acceleration Estimation

東京都市大学 情報工学部  
情報科学科  
自動制御研究室

大屋 英稔 教授

星 義克 講師

2221103 矢口 雄大

## 概 要

近年、自動駐車技術は実用段階まで進んでいるが、狭い駐車場では自動駐車できない場合があるといった問題がある。本論文では、円弧と直線を用いた経路生成手法にクロソイド曲線とシグモイド関数を導入することにより、より滑らかな経路生成を行う手法を提案する。本論文では、提案する経路生成手法を示し、最後に数値シミュレーションによって、提案手法の有用性を検証する。

In recent years, automated can parking systems has advanced systems for practical use. However, there is a problems in automated parking systems and there are narrow parking spaces which cannot be parked by present automated parking systems. In this thesis, we propose a new path generation method for automated parking systems. In approach, we combine the path generation method with clothoid curves and sigmoid functions. In this thesis, we show the proposed path generation method. Finally, the effectiveness of the proposed method is presented by simple numerical simulations.

# 目 次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	研究目的 . . . . .	3
<b>2</b>	<b>従来研究 [10]</b>	<b>4</b>
2.1	想定する車両 . . . . .	4
2.2	経路計画の手法 . . . . .	4
2.3	シミュレーション . . . . .	5
<b>3</b>	<b>提案手法</b>	<b>8</b>
3.1	クロソイド曲線 . . . . .	8
3.2	シグモイド関数 . . . . .	9
3.3	経路計画の手法 . . . . .	10
<b>4</b>	<b>シミュレーション結果と考察</b>	<b>13</b>
4.1	シミュレーションの条件 . . . . .	13
4.2	シミュレーション結果 . . . . .	14
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>16</b>
	<b>参考文献</b>	<b>17</b>

# 1 はじめに

## 1.1 研究背景

近年，自動車の増加に伴って駐車スペースが少なくなっており，狭い土地に駐車場を作るケースが増えている．そのため，駐車難易度が上がってしまい，運転や駐車が苦手なドライバーによって毎年多くの事故が発生している．自動運転技術の開発は快適性のみではなく，こうした交通事故を防ぐための1つの技術として，盛んに行われている．自動運転技術や運転時支援機能は社会の実用段階にまで達しており，自動車会社各社の市販車にもカメラやセンサーを搭載し障害物を常に検出することで，例えばトヨタ自動車株式会社ならば，パーキングサポートブレーキ（衝突被害軽減ブレーキ）やアドバンストパーク（自動駐車システム）などの自動運転レベル2の運転時支援機能が安全装備として市販車に多く搭載されている [3]．自動駐車システムのアドバンストパーク [3] では，駐車する目標位置の真横に車を移動させて停止した状態から自動駐車システムを稼働させる．自動駐車システムが稼働すると，車両に搭載されているカメラから駐車場の白線を認識し，駐車可能な位置の候補が画面に表示される (図 1)．表示された図の画面から車両の止める位置をドライバーが選択すると自動で車両が動き，図 2 の赤い矢印のように前進してから駐車目標位置まで後退する．また，自動運転中に障害物に接触しないようにカメラやセンサで周囲を監視し，障害物を検出したら自動でブレーキ制御を行う機能もある．



図 1: アドバンストパーク [3] の画面

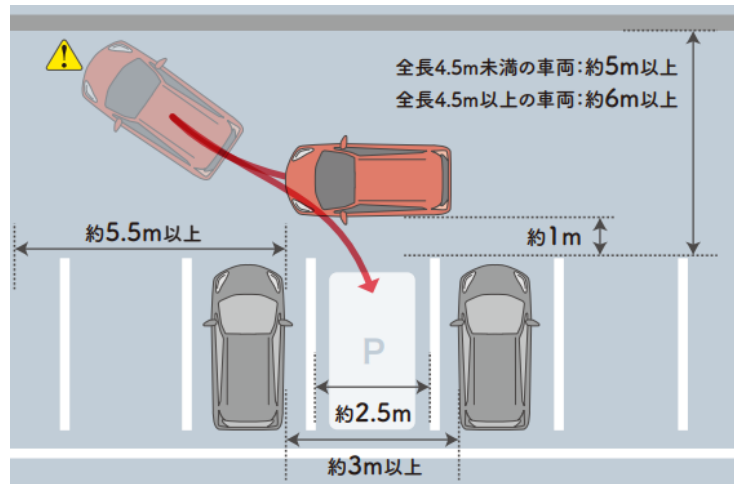


図 2: アドバンストパーク [3] の経路と使用条件

実装されている現状のアドバンストパーク [3] では図 2 のように、駐車開始位置が駐車目標位置の真横に固定されていることや駐車スペースの幅が 3[m] 以上必要であることや、駐車スペース前の道路の幅が 5[m] 以上必要であるといった使用条件がある。このように決められた広さ以上の駐車スペースが必要になるため適用できる環境が限定的になってしまう。しかし、このアドバンストパーク [3] のように現在実装されている自動駐車システムでは対応できないような狭い環境の方が自動駐車システムを利用する価値がある。特に日本は狭い駐車場が多いため、より狭い環境でも自動駐車を行えるシステムの研究が行われているが、自動駐車システムが発展し、無人で駐車可能になれば駐車スペースを最小限にすることにより、駐車場の収容台数を増やすことができると期待される。

現在実装されている自動駐車技術よりもより狭い環境やより最適な経路で自動駐車行うための研究はこれまでも行われている。例えば、RRT(rapid-exploring random tree) を用いる手法 [4][5] , クロソイド曲線を用いる手法 [6][7] や最小回転半径を用いる手法 [8][9] などが挙げられる。RRT を用いる手法とは目標地点に近づくまで空間全体の探索を行うことで経路生成を行う手法で、複雑な環境でも経路生成が可能である。RRT を用いた手法 [4][5] では、目標地点から逆向きに経路探索を行うことでより少ないステップ数の探索で経路生成を行っている。しかし、経路が複雑になることや狭い環境では経路探索時間が長くなってしまう問題がある。クロソイド曲線を用いる手法 [6] は、曲率が連続的に変化する滑らかな経路を生成することができる。また、近似クロソイド曲線を用いることで計算量を抑えた経路生成を行っている。また、クロソイド曲線を用いた別の手法 [7] では、狭い環境

で縦列駐車を行うことを可能にしている．最小回転半径を用いた手法 [8] ではシンプルな駐車経路を生成しているが，切り返しが考慮されていないことや決められた駐車開始位置からの駐車経路になってしまうといった課題がある．そこで文献 [10] では，切り返しを考慮したシンプルな駐車経路でかなり狭い環境での駐車経路の生成が可能となっている．しかし，生成した直線の経路から円弧の経路に進入する際に停止してその場でハンドルを最大まで切る必要があるため，ステアリングやタイヤに大きな負担がかかってしまうといった課題がある．

## 1.2 研究目的

本論文では，円弧と直線を用いた経路生成手法 [10] に，クロソイド曲線とシグモイド関数を導入し，滑らかな経路生成手法を提案する．クロソイド曲線を緩和曲線として導入することで，走行しながらハンドルを切ることが可能になり，ステアリングへの負担を軽減することを目的としている．ここで，緩和曲線とは，直線の経路から円弧の経路に進入するとき急な曲率の変化が起きるのを防ぐために直線と円弧の経路を繋ぐように生成する経路を意味している．また，駐車目標位置から駐車開始位置に向かって逆向きに経路を生成するため，本来の駐車開始位置と生成した経路の最終地点の位置がずれてしまうことがある．そこで，シグモイド関数を導入することにより，本来の駐車開始位置とのずれを補うように滑らかな駐車経路を生成できるようにすることを目的としている．

## 2 従来研究 [10]

### 2.1 想定する車両

4 輪自動車の低速運動時には横滑り角の変化が殆ど無いものとして捉えることができ、この自動車の運動を記述する方法としてアッカーマンステアリングジオメトリがよく知られている [11]。従来研究 [10] ではアッカーマンステアリングジオメトリにより 4 輪自動車の後輪軸を中心とした軌道を経路としている。これによって、回転中心と後輪軸の中心を結んだ直線が 4 輪自動車の中心軸と常に直交することで円弧と直線による経路生成ができる。また、トヨタ自動車 ヤリス [12] を車両モデルとして車両パラメータを設定した。

### 2.2 経路計画の手法

従来研究 [10] では切り返しが必要な狭い環境を想定している。図 3 の赤い四角の駐車開始位置から青い四角の駐車目標位置までの経路を生成する。ここでは駐車目標位置から駐車開始位置へと経路計画を行い、生成した経路を逆向きに辿ることで駐車開始位置から駐車目標位置までの経路生成を行っている。従来手法 [10] の経路計画は次のような手順で行われる。

#### STEP 1

図 3 の赤色の円  $C_1$  は最小回転半径の円、オレンジ色の円  $C_{1s}$  は障害物との安全距離を考慮して、車体右側面と障害物との距離が  $\delta_1$  以上になるように半径を設定した円である。車両目標位置の後輪軸の中心と前輪軸の中心を通る直線と円  $C_1$  が接する、かつ円  $C_{1s}$  上に障害物の角がくるように円  $C_1$  の中心を設定する。すなわち次式を満たすように円  $C_1$  の中心を設定する。

$$(obs_x - C_{1x})^2 + (obs_y - C_{1y})^2 > \{R - (C_W/2) - \delta_1\}^2 \quad (1)$$

ここで  $obs_x, obs_y$  は障害物の角の座標、 $C_{1x}, C_{1y}$  は円  $C_1$  の中心座標、 $R$  は最小回転半径、 $C_W$  は車幅である。この (1) 式の条件を満たすように  $C_{1x}, C_{1y}$  を決定することにより、障害物から安全な距離離れた経路を生成できる。

## STEP 2

図4のように車両左前と障害物の距離が $\delta_2$ になるまで車両の中心軸と円 $C_1$ が接し、円 $C_1$ 上を車両の後輪軸の中心が通るように前進させる。

## STEP 3

図5のように後輪軸に接するように最小回転半径の緑色の円 $C_2$ を設定し、車両左後と障害物の距離が $\delta_3$ になるまで後退させる。

## STEP 4 (STEP4-1 / STEP4-2)

図6のように青色の円 $C_3$ を設定し、STEP2と同様に車両を前進させる (STEP4-1) . その時、前進する際に障害物と車両左前の距離が $\delta_2$ になった場合はSTEP3に戻る。また、障害物と車両左前の距離が $\delta_2$ 以上で曲がれた場合 (STEP4-2) は、車両左前と障害物の距離が最も接近したときの座標と駐車開始位置の軸が接するような円弧を生成する。

## STEP 5

それぞれのSTEPで生成した経路を逆から辿ると駐車経路になる。

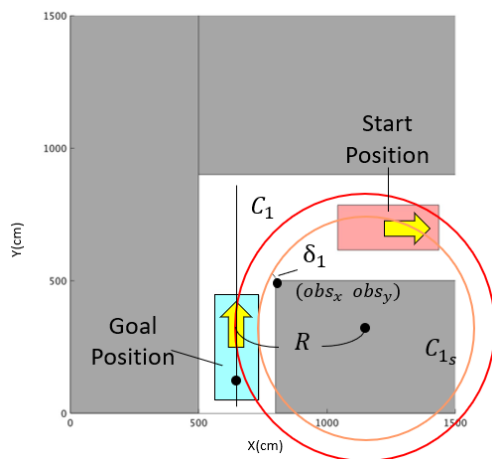


図 3: STEP1

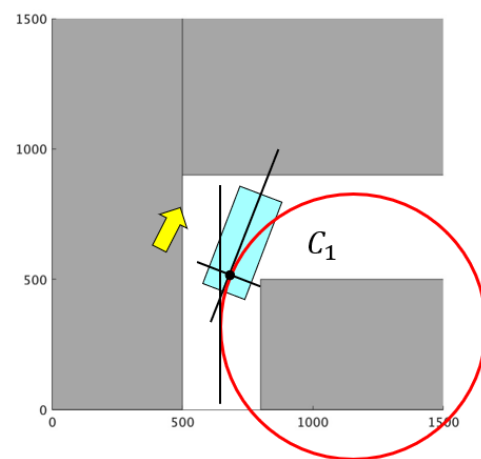


図 4: STEP2

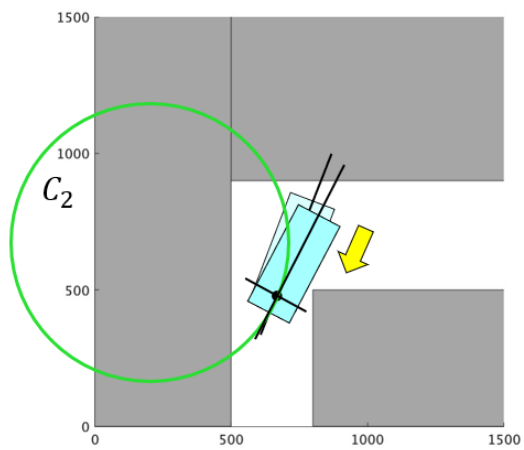


图 5: STEP3

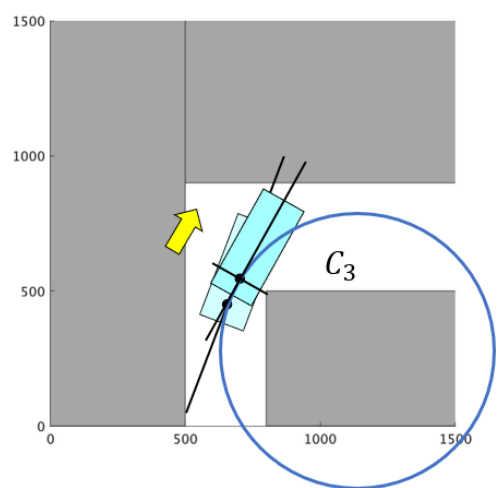


图 6: STEP4-1

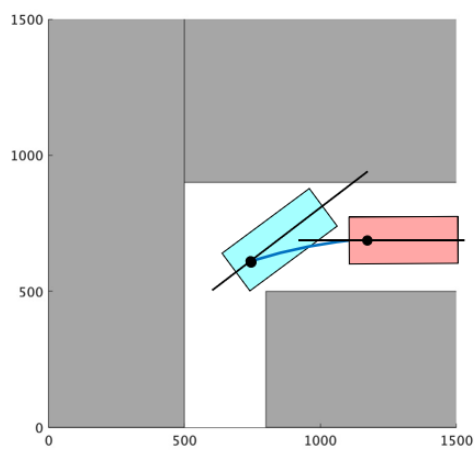


图 7: STEP4-2

## 2.3 シミュレーション

道路幅 4[m], 駐車場幅 2.5[m] として, 従来研究 [10] を用いてシミュレーションした結果を図 8 に示す. 青色の線が後輪軸中心の軌道, その他の色の線が車両の四隅の軌道を示している. 図 8 の軌道から 1 回の切り返しで駐車経路が生成できていることが分かる.

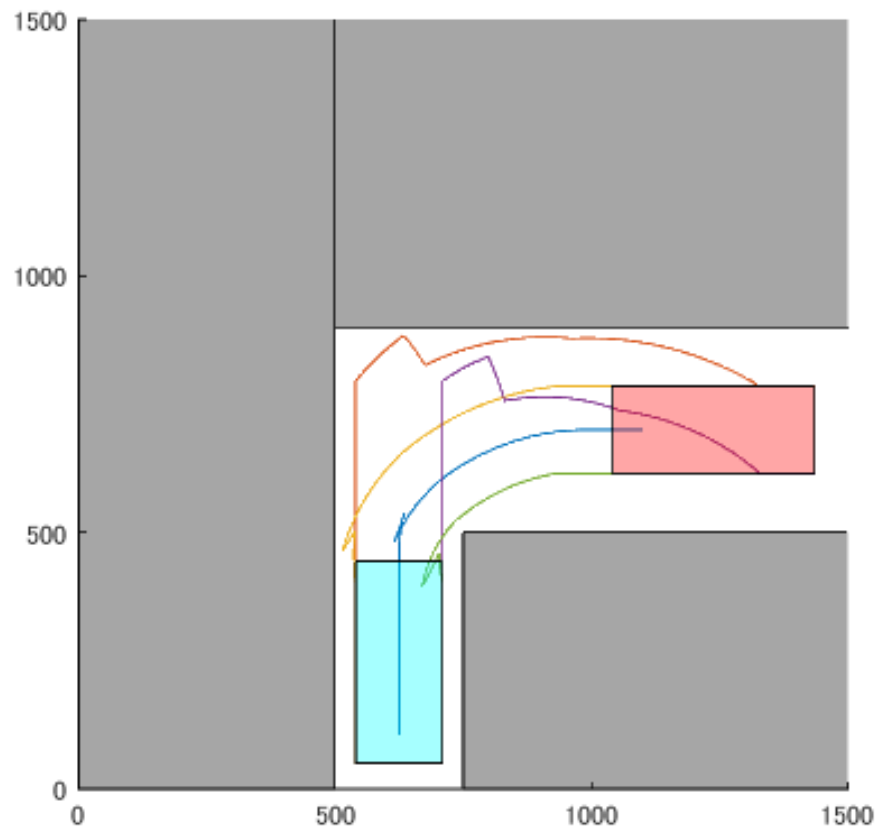


図 8: 従来研究 [10] のシミュレーション結果

### 3 提案手法

#### 3.1 クロソイド曲線

クロソイド曲線は曲率を一定に変化させて描かれた曲線である (図 9). また, クロソイド曲線には次式のような, 曲線長  $L$  と曲率半径  $R_{clo}$  の積が一定になるという性質がある. ここで  $A$  はクロソイドパラメータである.

$$LR_{clo} = A^2 \quad (2)$$

原点を  $(0, 0)$  としたとき, クロソイドの曲線上のある点の座標  $P(x, y)$  は次式のように表される.

$$x = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^\theta \frac{\cos \theta}{\sqrt{\theta}} d\theta \quad (3)$$

$$y = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^\theta \frac{\sin \theta}{\sqrt{\theta}} d\theta \quad (4)$$

ここで  $\theta$  は接線角である.

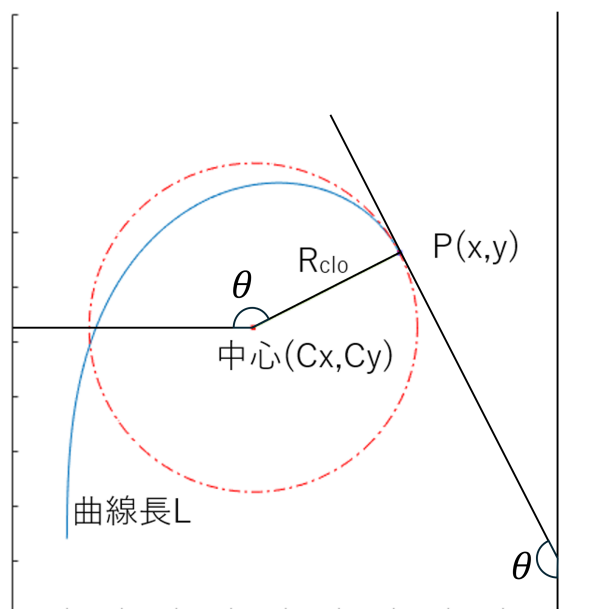


図 9: クロソイド曲線

## 3.2 シグモイド関数

シグモイド関数とは図 10 のように表される関数あり,  $y = 0$  と  $y = k$  に漸近線をもち, 次式のように表される関数である.

$$f(x) = \frac{k}{1 + e^{-ax}} \quad (5)$$

ここで  $k$  と  $a$  の値を定める必要がある.  $k$  は車両の現在位置と駐車開始位置の  $y$  軸方向のずれの値である. このように  $k$  を設定することで,  $y = 0$  と  $y = k$  に漸近線をもつようなシグモイド関数になる. 次に,  $a$  を設定する際にはシグモイド関数の曲率半径の最小値が最小回転半径よりも大きくなるような条件を満たす必要がある. すなわち, 次式に示すシグモイド関数の曲率半径  $R_{sig}$  を求める式の最小値が最小回転半径  $R$  よりも大きければよい.

$$R_{sig} = \frac{(1 + f'(x)^2)^{\frac{3}{2}}}{|f''(x)|} \quad (6)$$

$$R < R_{sig} \quad (7)$$

また,  $a$  の値が大きいほど経路が短くなるので, (6)(7) 式を満たす範囲で  $a$  を大きく設定する.

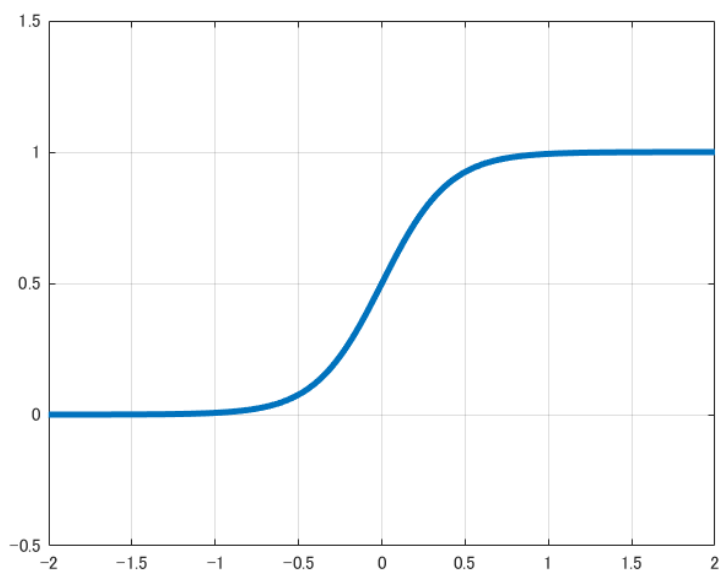


図 10: シグモイド関数 ( $a = 5, k = 1$ )

### 3.3 経路計画の手法

本論文では、クロソイド曲線とシグモイド関数を用いて、円弧と直線の間に緩和曲線を導入し、滑らかな経路を生成することを目的としている．ここで、緩和曲線とは、直線から円弧に進入するときのステアリング角の急な変化を防ぐ曲線で、連続的に曲率が変化するため滑らかな経路の生成が期待できる．本研究では、図 11 に示すマップの赤い四角の駐車開始位置から青い四角の駐車目標位置までの経路を生成することを考える．ただし、車両が障害物に接近した場合、切り返しを行う必要があるが、切り返し時には緩和曲線は必要ないため、本論文では切り返しを考慮しない．本論文で提案する経路計画手法では、駐車目標位置から駐車開始位置へ逆向き（Backward）に経路計画を行うことによって、駐車開始位置から駐車目標位置までの経路を生成する．提案する経路計画は次のような手順で行われる．図 12 ～14 に提案する経路計画の手順を示す．

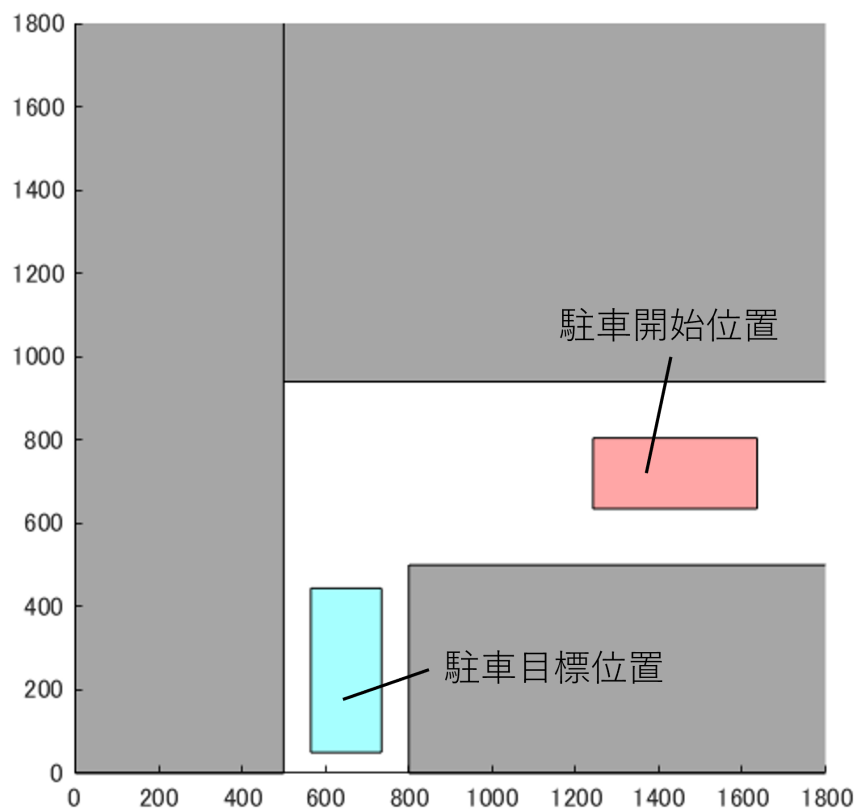


図 11: 対象とする環境

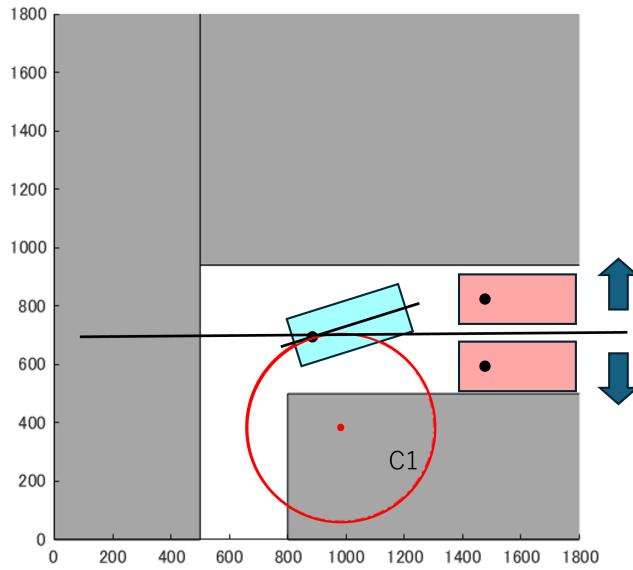


図 12: STEP1

## STEP1

まず，従来手法 [10] の STEP4-1 までと同様に，障害物と車両左前の距離が  $\delta_2$  以上で曲がれるまで経路を生成する．このとき，駐車開始位置の車両後輪軸中心の座標が道路の中心よりも上側か下側かを判別する．上側もしくは道路の中心なら STEP2-1 へ，下側なら STEP2-2 へ移行する (図 12)．

## STEP2(STEP2-1, STEP2-2)

(STEP2-1) 図 13 のように，駐車開始位置を始点として車両の現在位置に向かってクロソイド曲線を用いて経路を生成する．クロソイドパラメータ  $A$  の値を大きくしていき，現在位置の車両後輪軸の中心の座標とクロソイド曲線の終端の座標が一致したときのクロソイドパラメータ  $A$  の値を用いてクロソイド曲線に基づく経路を生成する．

(STEP2-2) 従来手法 [10] の STEP4-1 で求めた最小回転半径上を姿勢角が 0 になるまで前進した後，図 14 に示すように現在位置から駐車開始位置に向かうようなシグモイド関数で経路生成を行う．このとき，(5)，(6) 式の  $k$  と  $a$  の値を定める必要がある． $k$  は現在位置と駐車開始位置の車両後輪軸中心の  $y$  軸方向のずれの値である．ここで， $k$  が定まったので (6) 式からシグモイド関数の最小の曲率半径  $R_{sig}$  を求める． $a$  の値を小さくしていき， $R_{sig}$

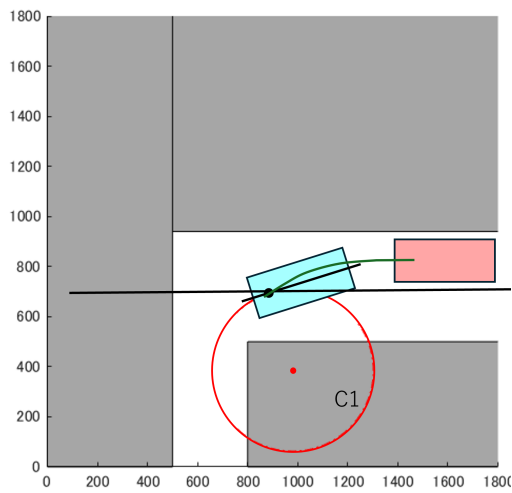


図 13: STEP2-1

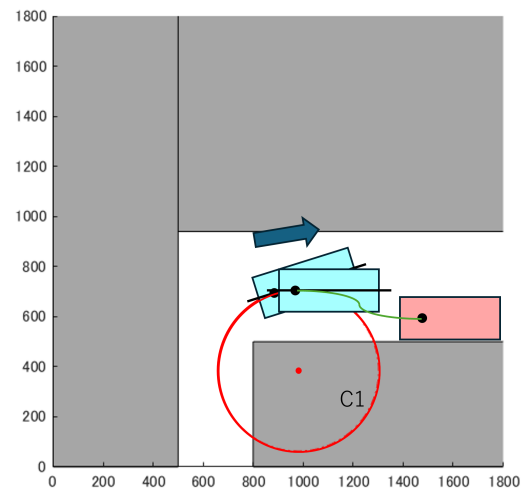


図 14: STEP2-2

の最小値が最小回転半径  $R$  より大きくなった時の  $a$  の値に決定する．定めた  $k$  と  $a$  を代入した (5) 式に従って経路を生成する．

### STEP3

それぞれの STEP で生成した経路を逆から辿ると駐車経路になる．



図 15: トヨタ自動車 ヤリス [12]

表 1: 車両のパラメータ

パラメータ	値
長さ	394[cm]
幅	169.5[cm]
ホイールベース	255[cm]
最小回転半径	322[cm]

## 4 シミュレーション結果と考察

3章で示したSTEPに従い、図11に示すマップの駐車開始位置から駐車目標位置までの経路生成を行い、シミュレーションした結果を示す。

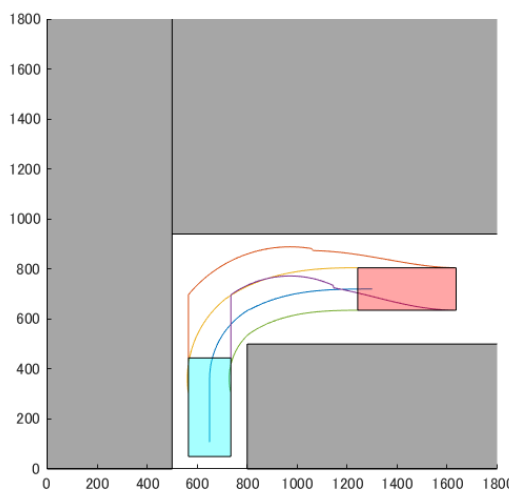
### 4.1 シミュレーションの条件

本論文のシミュレーションではトヨタ自動車 ヤリス [12] をモデルに用いた、その車両のパラメータの詳細を表1に示す。シミュレーションにはショッピングモールなどでよく使われる駐車場のサイズ  $3.0[m] \times 5.0[m]$ 、道路幅を  $4.4[m]$  に設定したマップを使用した。また、駐車開始位置座標は  $(1300, 720)$ 、 $(1300, 745)$ 、 $(1300, 660)$  の3パターンで検証した。

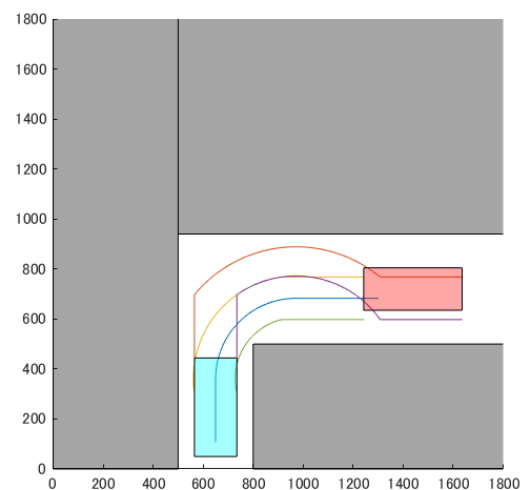
## 4.2 シミュレーション結果

図 16(a), 17(a), 18(a) に駐車開始位置がそれぞれ (1300, 720), (1300, 745), (1300, 660) とした場合のシミュレーション結果を示す. 図 16(b), 17(b), 17(b) にはそれぞれ同じ環境における従来研究 [10] によるシミュレーション結果を示す. 図中の青色の線が車両後輪軸中心の軌道, その他の色の線は車両の四隅の軌道を表している.

図 16(a) と 16(b) を比較すると, 図 16(b) は駐車開始位置と生成した経路にズレが発生しているが, 図 16(a) ではクロソイド曲線により姿勢角を必要以上に変えずに駐車開始位置まで滑らかな経路を生成出来ている. また, 図 17(a) と 17(b) を比較すると, 図 17(b) では駐車開始位置から大きくずれてしまっているが, 図 17(a) は上手くクロソイド曲線で駐車開始位置まで滑らかな経路を生成出来ている.

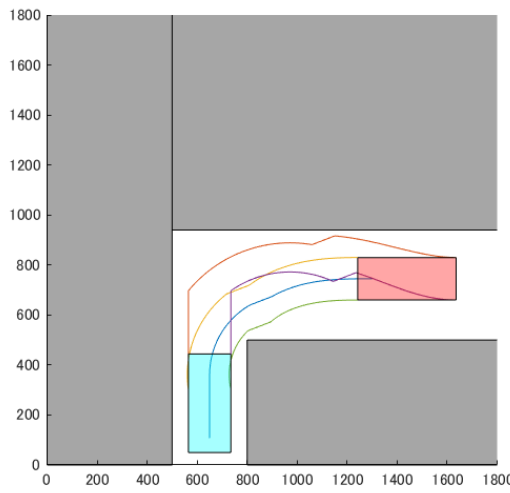


(a) 提案手法

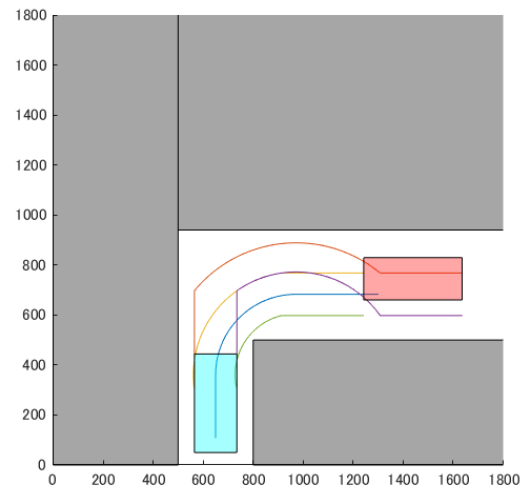


(b) 従来研究 [10]

図 16: 駐車開始位置 (1300, 720) のシミュレーション



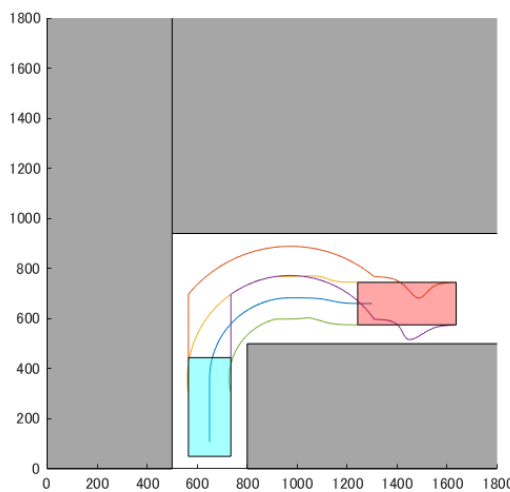
(a) 提案手法



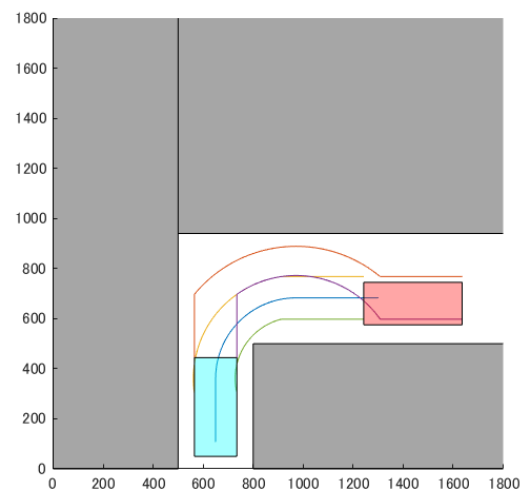
(b) 従来研究 [10]

図 17: 駐車開始位置 (1300, 745) のシミュレーション

更に、図 18(a) と 18(b) を比較すると、駐車スペースから完全に出た後にシグモイド関数を用いて駐車開始位置まで滑らかな経路を生成していることがわかる。これらの結果から、提案手法の方が従来手法 [10] よりも駐車開始位置まで滑らかな経路を生成出来ていることが確認できた。



(a) 提案手法



(b) 従来研究 [10]

図 18: 駐車開始位置 (1300, 660) のシミュレーション

## 5 結論

本論文では、従来手法 [10] の円弧と直線を用いた経路生成にクロソイド曲線とシグモイド関数を導入することで、滑らかな経路を生成する手法を提案した。従来手法 [10] では最小回転半径により姿勢角を大きく変えることが可能な非常にシンプルな経路を生成することができるが、ステアリングを大きく切る必要がある。生成した経路を走行させることを考えると経路が滑らかな方が望ましいので、本研究ではクロソイド曲線とシグモイド関数を用いることでステアリングを大きく切らずによりスムーズな駐車ができる経路を生成する手法を提案した。また、現在実装されている自動運転技術 [3] では所望の駐車位置の真横に停車する必要があるため、クロソイド曲線とシグモイド関数を導入することにより、駐車開始位置によらず適切な経路生成を行うことを可能とした。また、シミュレーションを行うことにより、クロソイド曲線とシグモイド関数を導入することにより滑らかな経路生成を行うことが確認できた。

今後の課題としては、クロソイドパラメータ  $A$  の決定方法について、より効率的な手法を検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] 経済産業省, 自動配送ロボットの将来像を取りまとめました <https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250226002/20250226002.html>
- [2] 青柳 誠司, 佐藤 伸仁, 山本 恭輝, 高橋 智一, 鈴木 昌人, ”移動ロボットの移動障害物回避に関するファジィルールの学習 ポテンシャル法, 強化学習法との比較,” システム制御情報学会論文誌, vol. 34, no. 8, pp. 209–218, 2021.
- [3] トヨタの安全技術, <https://toyota.jp/safety/> (2023)
- [4] Z. Feng, S. Chen, Y. Chen and N. Zheng; Model-Based Decision Making With Imagination for Autonomous Parking; 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 2216-2223, Changshu, China (2018)
- [5] M. Kim, J. Ahn and J. Park; TargetTree-RRT\*: Continuous-Curvature Path Planning Algorithm for Autonomous Parking in Complex Environments; IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol.21, no.1, pp. 606-617 (2024)
- [6] Dae Jung Kim, Chung Choo Chung; Automated Perpendicular Parking System With Approximated Clothoid-Based Local Path Planning; IEEE Control Systems Letters ,Vol.5,pp.1940-1945(2021)
- [7] Juncheng Wang,Shengqin Li; Parallel Parking Path Planning in Narrow Space Based on a Three-Stage Curve Interpolation Method; IEEE Access, Vol.11, pp.93841-93851 (2023)
- [8] Hongbo Gao, Juping Zhu, Xinde Li, Yu Kang, Jiehao Li, Hang Su; Automatic Parking Control of Unmanned Vehicle Based on Switching Control Algorithm and Backstepping;IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol.27, No.3, pp.1233–1243 (2022)

- [9] Jian-Min Wang, Sen-Tung Wu, Chao-Wei Ke, BoKai Tzeng; Parking Path Programming Strategy for Automatic Parking System; Vehicle Engineering(VE), Vol.1, No.3, pp.57–63 (2013)
- [10] 緒方涼, 大屋英稔, 星義克; 円弧と直線を用いた駐車経路生成手法; 第 66 回自動制御連合講演会講演論文集, 66 巻, pp. 1122-1125 (2023)
- [11] Takahiko TSUJISAWA; A Proposal of Path Planning Method for a Four-Wheeled Vehicle in Automatic Parking System; 日本機械学会論文集 (C 編), 73 巻 729 号, pp. 1273–1278 (2007)
- [12] トヨタ自動車, “ヤリス”. <https://toyota.jp/yaris/> (2023/5/9)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙にも関わらず丁寧にご指導，ご鞭撻のほどをいただきました大屋 英稔 教授，星 義克 講師に深く感謝申し上げます．また，悩んでいるところを見逃さず声をかけていただいた大学院生の先輩方，日頃から同じ研究室の仲間として相談に応じてくださった自動制御研究室の皆様にもお礼を申し上げます．この1年間での研究生生活を通じて，様々な経験を積むことができ大きく成長することができました．今後の人生でもこの経験を活かしていきたいと思います．ありがとうございました．