

4 輪車の自動駐車制御

2017SC020 金子輝哉

指導教員：中島明

1 はじめに

近年, 自動車業界は 100 年に 1 度の大変革期を迎えている。自動駐車化も一例であり, 自動バレーパーキングシステムは実証実験が行われ実用化が目前である [1]。

本研究では, 規定の駐車場において前輪操舵後輪駆動の 4 輪移動ロボットを初期位置から任意の駐車位置まで自動で走らせることを目標としている。

2 運動学モデル

2.1 前輪操舵・後輪駆動の車両システム

この章では文献 [2] を参考に移動ロボットの運動学モデルを導出する。移動ロボットの位置を定義するため座標系を図 1 のように設定する。

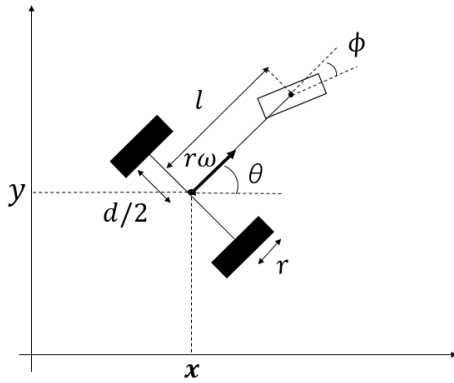


図 1 移動ロボットの座標系

表 1 変数と物理パラメータ

定義	記号		
車両位置	x	車体横幅	d
車両位置	y	車輪間距離	l
直進速度	v	車輪半径	r
姿勢角	θ	回転半径	ρ
操舵角	ϕ	曲率	κ
操舵角速度	$\dot{\phi}$	曲率変化率	σ
車輪回転角速度	ω		

上記の座標系では移動ロボットの運動学は次の式で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \frac{\tan \phi}{l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

本研究で使用する変数, パラメータを表 1 に示す。

2.2 移動ロボットの機構的制約

4 輪車 (本研究では移動ロボット) 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。

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (2)$$

また, 操舵角度・操舵角速度にも限界値がある。

$$|\kappa| \leq \kappa_{max} \quad (3)$$

$$|\dot{\kappa}| \leq \sigma_{max} \quad (4)$$

3 クロソイド曲線の導入

ここでは, 制約条件下において最小回転半径で運動する移動ロボットの後輪軸中心の描く軌道に着目する。文献 [3] を参考に実現可能で滑らかな経路を生成するため, 直線と円弧また緩和曲線としてクロソイド曲線を用いた経路の生成を行う。

3.1 直線と円弧による経路

Dubins により, 始点ベクトルと終端ベクトルが与えられ曲率に上限が与えられたときに最小回転半径の円弧とそれらの共通接線による経路 (以下 Dubins' curve) が最短となることが証明されている [4]。以下にその手順の概要を述べる。

始点ベクトルと終端ベクトルについて, 最小回転半径を持つ接円を各々 2 つ設定する。次に, 始点ベクトルの接円と終端ベクトルの接円に共通接線を引く。始点ベクトルから接円に沿って進み, 共通接線を通り終端ベクトルの接円から終端ベクトルに到達する最大 4 経路を得られる。

しかし, Dubins' curve には曲率の連続性がない。そこで, 次節のクロソイド曲線を考える。

3.2 クロソイド曲線による経路補間

曲率の連続性を保持する手法としては直線と円弧との繋ぎ目をクロソイド曲線で補間するものがある。最大曲率 κ_{max} , 最大曲率変化率 σ_{max} が与えられたときの経路補間手法の概要を述べる。

1. 直線と最小回転半径より大きな円 C_1 を設定する。 C_1 の半径 R は σ_{max} と κ_{max} のみに依存する定数である。

$$R = \left[\left(\sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{max}}} \int_0^{\sqrt{\frac{2\delta}{\pi}}} \cos \frac{\pi}{2} u^2 du - \frac{\sin \delta}{\kappa_{max}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{max}}} \int_0^{\sqrt{\frac{2\delta}{\pi}}} \sin \frac{\pi}{2} u^2 du + \frac{\cos \delta}{\kappa_{max}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

また、 δ はクロソイド曲線の中心角であり、

$$\delta = \frac{\kappa_{max}^2}{2\sigma_{max}} \quad (6)$$

で与えられる。

2. C_1 に対し同一中心で最小回転半径の円 C_2 を設定する。
3. 各接線を t だけ内側に平行移動する。なお t は制約条件より一意に定まる。

$$t = R - \left(\sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{max}}} \int_0^{\sqrt{\frac{2\delta}{\pi}}} \sin \frac{\pi}{2} u^2 du + \frac{\cos \delta}{\kappa_{max}} \right) \quad (7)$$

このとき平行移動後の直線と C_1 との交点を始点として C_2 上の終点まで、曲率 0 から κ_{max} へ曲率変化率 σ_{max} で変化するクロソイド曲線を設定することができる (図 2)。

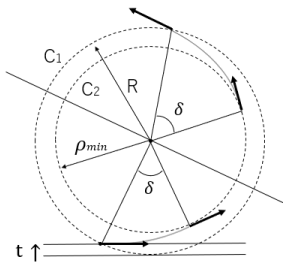


図 2 クロソイド曲線による補間 ($\tau > 2\delta$)

$\tau \leq 2\delta$ の場合、双クロソイド曲線を曲率変化率 σ_{max} を一定に、最大曲率を $\kappa < \kappa_{max}$ としてクロソイド曲線による補間を行う (図 4)。

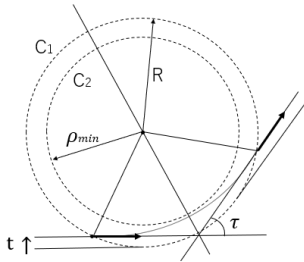


図 3 クロソイド曲線による補間 ($\tau \leq 2\delta$)

4 基本経路

始点ベクトルと終点ベクトルが与えられたとき、それらを結ぶ最短経路の定義方法を示す。基本経路生成時、始点ベクトルと終端ベクトルの位置によりそれぞれに接続されるクロソイド曲線の回転方向が変化する。左回転で描かれる経路を l , 右回転で描かれる経路を r , 直線経路を s とする。

4.1 lsr 経路

lsr 経路として始点ベクトル $q_s(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$, 終点ベクトル $q_g(x, y, \theta) = (p, q, 0)$ が与えられたときの経路を

示す。ただし、終点の座標は $p, q > 0$ であり、各クロソイド曲線の中心間距離は $|\Omega_1 \Omega_2| > 4R$ とする。

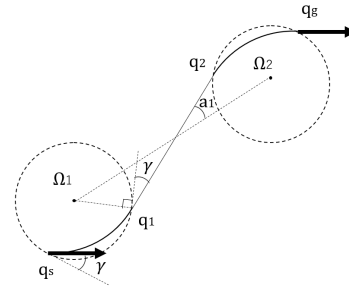


図 4 lsr 経路

5 駐車経路計画

駐車目標位置から曲線 l 経路を作成する。平面パーキングなど一般的な駐車場を考慮し、 l 経路の終了位置 q_{tg} の姿勢角は $\pi/2$ とする。

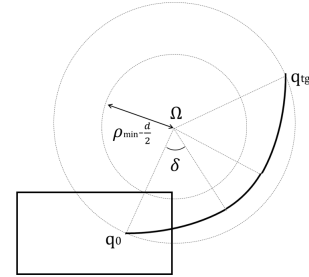


図 5 リバースパーキング

駐車目標位置付近まで車両を移動させた後、基本経路を使用し q_{tg} に接続する。そして、リバースパーキングを行い q_0 を経由、目的位置に駐車する。

6 おわりに

本研究では移動ロボットのモデルの導出、実現可能で滑らかな経路生成、作成経路例の紹介を行った。経路作成シミュレーション、軌道追従シミュレーション、実機実験を行うことが今後の課題となる。

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
- [3] 辻澤隆彦：「自動パーキングのための経路生成法の提案」。日本機械学会論文集 C 編, 73 巻 729 号, 2007.
- [4] L. E. Dubins, On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents, American Journal of Mathematics, 1957