

軌跡追従による自動運転の制御

2018SC067 西山輝

指導教員：中島明

1 はじめに

近年、自動車業界では自動運転の実用化への期待が高まっている。これは現在の自動車の事故の原因の90%以上とされているのが操作ミスや不注意といったヒューマンエラーを減らすことへの期待が含まれているからである。

本研究では、まずシミュレータにて初期位置と目標軌跡を指定し、車体が自動制御で目標軌跡の追従が実装できたうえで、最終的に実機で実現できるところまでを目指している。

2 運動学モデル

議論を簡単にするため、前輪転舵・後輪駆動の車両システムを前提としている。本項では図1に示すように車両の後輪軸中心に指定した軌跡に誤差を少なく追従するようなモデルを考える。この時の車体の長さを L [m]、車速を V [m/s]、前輪転舵角を δ [rad]、 X_G 軸方向からの反時計回りを正とした車両の向きを θ [rad] としている。

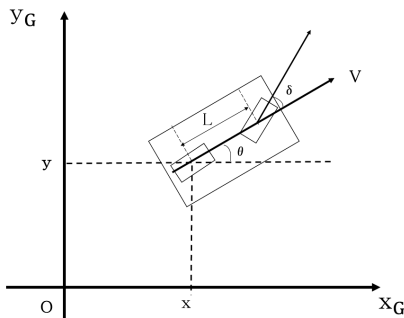


図1 運動学モデル

上記の座標系では運動学モデルは次のような式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \frac{\tan \delta}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 モデル予測制御

3.1 モデル予測制御とは [3]

モデル予測制御 (以降 MPC と呼ぶ) とは有限時間先の動きをプラントのモデルを用いて予測する制御方法である。図2に考え方を示す。手順としてはつぎの操作を繰り返し行う。

1. 時刻 H_p (予測ホライゾンと呼ぶ) 先の予測値 $\hat{y}(k+H_p)$ に対し、時刻 H_u (制御ホライゾンと呼ぶ) までの最適化問題を計算し、残りの出力は一定値を出すとする。
2. このときの入力初期値を今回の制御入力とする。

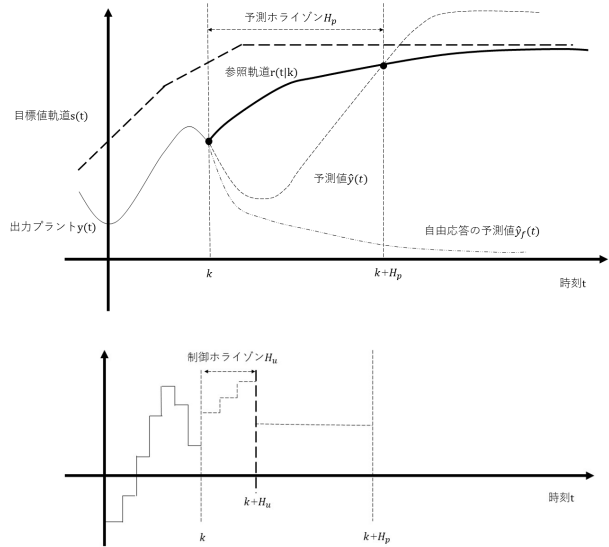


図2 モデル予測制御に用いる考え方 [3]

3.2 評価関数

ここで制御対象として、 n 次元 m 入力離散時間線形システム

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{u}(k) + \boldsymbol{\omega}(k) \quad (2)$$

を考える。ただし、離散的な時刻を $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ (0以上の整数) とし、時刻 k における、それぞれシステムの状態変数ベクトルを $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ (n 次元実ベクトル)、システムへの入力ベクトルを $\mathbf{u}(k) \in \mathbb{R}^m$ 、システムへの外乱ベクトルを $\boldsymbol{\omega}(k) \in \mathbb{R}^m$ とする。また、 $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ($n \times n$ の実行列)、 $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ である。最適化問題に用いる評価関数は次のように表される。

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^\top(H_p) \mathbf{Q}_f \mathbf{x}(H_p) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{H_p-1} (\mathbf{x}^\top(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^\top(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k)) \quad (3)$$

時刻 $k = H_p$ の終端コストに関わる状態変数ベクトルの重みを準正定行列 $\mathbf{Q}_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、時刻 $k=0, \dots, N-1$ のステージコストにかかわる状態変数ベクトルの重みを準正定行列 $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、入力ベクトルの重みを正定行列 $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ とする。

3.3 モデルの線形化

まず、図3に示すようなモデルを考える。図における x_c 、 y_c は目標軌道の最近傍点における車両の進行方向 (速度 V 方向) とその垂直方向を基準とした座標系 (以降、軌跡座標とおく) である。このときの制御の目的は

$$x \rightarrow x_{ref}, \quad y \rightarrow y_{ref}, \quad \theta \rightarrow \theta_{ref} \quad (4)$$

である。

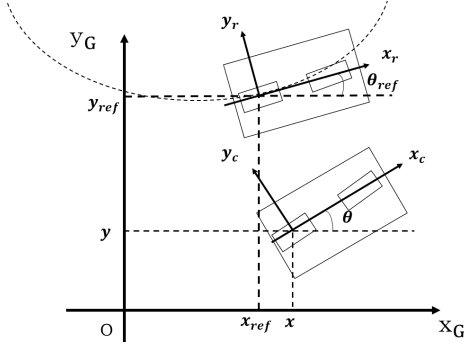


図3 MPCにおける運動学モデル

このとき、基準座標における追従偏差と軌跡座標における追従偏差 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta}$ は回転行列 $\mathbf{R}(\theta)$ を用いて、次式が成り立つ。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^\top(\theta_{ref}) \begin{bmatrix} x - x_{ref} \\ y - y_{ref} \\ \theta - \theta_{ref} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

ここで θ_{ref} は最近傍点における座標であることから時間に依存しないことを考慮すると、軌跡座標系のモデルでは次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V \cos(\theta - \theta_{ref}) \\ V \sin(\theta - \theta_{ref}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} V \cos \bar{\theta} \\ V \sin \bar{\theta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{\theta} = \frac{V \tan \delta}{L} - \frac{V}{R_{ref}} \quad (7)$$

式(6)における R_{ref} とは最近傍点を通る目標旋回半径を示す。

ここで、軌跡追従の目的から、 $\bar{\theta}, \delta$ が微小であることを仮定すると

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} V \\ V\bar{\theta} \\ \frac{V\delta}{L} - \frac{V}{R_{ref}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

と近似でき、線形化ができる。さらに、 \bar{x} について速度一定であることから省略し、 $\bar{y}, \bar{\theta}$ について状態方程式で表すと

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{u} + \mathbf{w}_c \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ V \\ L \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V}{R_{ref}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

これを離散ステップ時間を Δt として、次の式(11)に示すようにオイラー法を用いて離散化すれば、式(2)適用が可

能となる。

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{A}\Delta t = \begin{bmatrix} 1 & V\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g} = \mathbf{b}\Delta t = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V\Delta t}{L} \end{bmatrix} \\ \mathbf{w}_d = \mathbf{w}_c\Delta t = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V}{R_{ref}}\Delta t \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

4 シミュレーション

4.1 モデルのシミュレーション条件

このシミュレーションは、車体の位置座標の初期値は $[x, y, \theta]^\top = [2, 2, \frac{\pi}{2}]^\top$ とし、中心が $(1, 1)$ の半径1の円の軌跡を追従するように制御をするモデルである。このときの車速 V は目標どおり制御できているものとする。

4.2 シミュレーション結果

MPCでのシミュレーション結果を図4に示す。PID制御と比較してより早く軌跡上の運動を行うことができおり、追従精度を上げることができた。

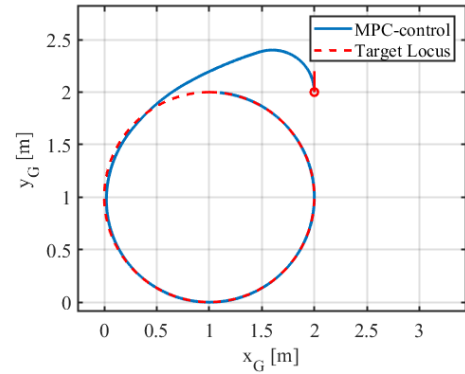


図4 MPCを用いた軌跡追従

5 おわりに

本研究では、シミュレーション上の結果のみとなった。今後は実験機での実装を行い、リアルタイムで生じる問題点の抽出していく。また軌跡追従を行う上で、認識による軌道の生成が必要となるため、軌道生成のプログラムの実装等を行っていきたい。

参考文献

- [1] 特別寄稿『自動運転の課題』 津川 定之 J-STAGE 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review 2016年10巻2号 p. 93-99
- [2] [日本ロボット学会編著] 自動運転技術入門 AIx ロボティクスによる自動車の進化
- [3] Jan M. Maciejowski (原著)/足立 修一・管野 政明 (訳) モデル予測制御—制約のもとでの最適制御