

障害物回避を考慮したモデル予測制御による自動車の運動制御

2019SC015 今泉碧 2019SC030 松原健太

2019SC035 水田佳樹

指導教員：中島明

1 はじめに

近年、自動運転技術が著しく発展しており、どの国でも自動運転に関する技術開発に力を注いでいる。なぜなら現在、毎年世界中で約 130 万人以上の交通事故による死亡者、これを越える数の負傷者が生じており、これらの数字を大幅に減らす可能性を秘めているからである。道路で交通ルールを守り、運転するためにドライバーには進行方向の周囲の状況を随時確認し、それに応じて判断を行いその判断に基づいた的確な操作を行うことが求められる。ドライバーには、走行中に認知・判断・操作の 3 つの動作が求められる。これらの要素は、フィードバック結合されている。従って、それぞれの結果がお互いに影響しあっている。そのため、どれか一つの動作に対応できない状況が発生した場合それが交通事故の原因になる。しかし、自動運転は目的地まで自動的に移動できるため、認知・判断・操作のヒューマンエラーがなくなる。自動運転技術の発展によって上記のような課題が解決され、人の運転中のミスによる事故の回避も可能となる^[1]。本研究では認知・判断・操作の中で特に操作に注目する。車両を MPC を用いて障害物回避を行う。障害物回避を行う上で、従来のような混合整数計画問題になることを避けて、シンプルな手法を用いる。

2 運動学モデル

車両の運動解析を運動学モデルを用いて表す。なお、議論を簡単にするため、四輪車両の左右のタイヤ特性や重量バランスが完全に対象であることを仮定する。この章では、図 1 に示すように車両の座標系を設定する。

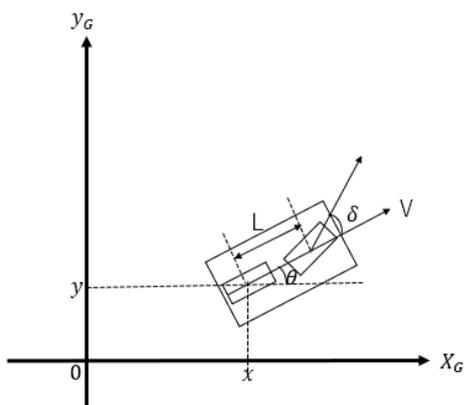


図 1 運動学モデル

ただし、前後輪軸の中心間を L [m]、円旋回するための前輪舵角を δ [rad]、車速を v [m/s]、 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] とする。

$$\dot{X} = f(X, u) \quad (1)$$

$$X = [x, y, \theta]^T$$

$$f = \begin{bmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \\ \frac{\tan \delta}{L} \end{bmatrix}$$

$$u = [V, \delta]^T$$

3 MPC の概要

MPC(モデル予測制御)とは有限時間先までの動きをモデルを使って予測し、最適化問題を解き、制御入力を計算する制御方法である。より細かな予測モデルを用いる為、PID 制御より正確に予測することができる。

各制御周期において N ステップ先までの有限区間のことを制御ホライズンと呼び、その区間内で予測モデルをもとに予測出力する。そして、予測出力と目標値の差や、入力などで構成される評価関数を最小化する最適入力を求める。得られた最適入力の初期値を今回の制御周期における制御入力とする。このように MPC によって先の時間を考え、毎周期、最適な入力を計算することで高い精度で制御ができる。一方、毎週期、最適化問題を解く為、計算負担は大きくなる。

4 MPC によるレギュレーション制御

本章では障害物回避をする為の前段階としてレギュレーション制御をおこなう。

4.1 モデル設定

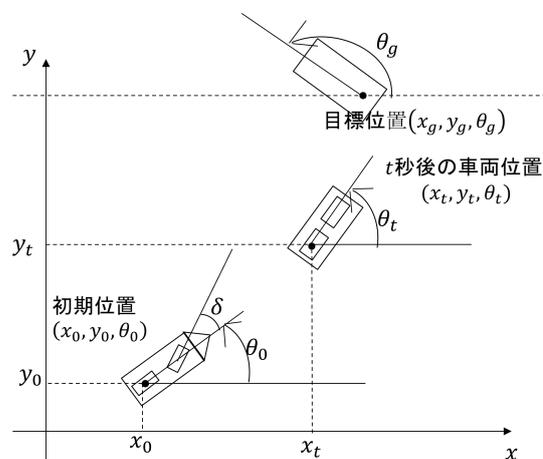


図 2 レギュレーション制御のモデル図

初期位置を x_0, y_0, θ_0 , 目標位置を x_g, y_g, θ_g , MPC 更新時の時刻 $t = 0$ の車両位置を x_t, y_t, θ_t , 速度を V_t , 転舵角を δ_t とする.

$$\begin{aligned} X_t &= [x_t, y_t, \theta_t]^T \\ u_t &= [V_t, \delta_t]^T \\ \Delta X &= X - X_t \end{aligned}$$

(1) 式を X_t, u_t まわりでテイラー展開を用いて表すと以下のようになる.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= \frac{d}{dt}(X - X_t) \\ &= \frac{df}{dX} \Big|_{X=X_t, u=u_t} (X - X_t) + \frac{df}{du} \Big|_{X=X_t, u=u_t} (u - u_t) \\ &= A\Delta X + Bu - Bu_t \end{aligned} \quad (2)$$

ここで A, B は以下のように表せる.

$$A = \frac{df}{dX} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -V_t \sin \theta_t \\ 0 & 0 & V_t \cos \theta_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \frac{df}{du} = \begin{bmatrix} \cos \theta_t & 0 \\ \sin \theta_t & 0 \\ \frac{\tan \delta_t}{L} & \frac{V_t}{L \cos^2 \delta_t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

これを離散ステップ時間を Δt として, オイラー法を用いて離散化すると以下のような式が求まる.

$$\Delta x_d[k+1] = A_d \Delta x_d[k] + B_d \delta_d[k] + \omega_d \quad (5)$$

ここで A_d, B_d, ω_d は以下のように表せる.

$$A_d = I_3 + A\Delta t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_t \sin \theta_t \Delta t \\ 0 & 1 & V_t \cos \theta_t \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B_d = B\Delta t = \begin{bmatrix} \cos \theta_t \Delta t & 0 \\ \sin \theta_t \Delta t & 0 \\ \frac{\tan \delta_t}{L} \Delta t & \frac{V_t}{L \cos^2 \delta_t} \Delta t \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\omega_d = \omega \Delta t \quad (8)$$

4.2 シミュレーション

前節に基づいてレギュレーション制御を MATLAB 上で行った.

初期値と目標値を以下の 2 パターンのようにし, シミュレーションを行った. パターン 1, 2 の結果をそれぞれ図 3 ~ 5, 図 6 ~ 8 に示す.

<パターン 1>

$$(x_0, y_0) = (0, 0) \quad \theta_0 = 0 \quad \delta_0 = 0.3 \quad V_0 = 0.3$$

$$(x_d, y_d) = (1, 1) \quad \theta_d = \frac{\pi}{3}$$

<パターン 2>

$$(x_0, y_0) = (0, 0) \quad \theta_0 = 0 \quad \delta_0 = 0.3 \quad V_0 = 0.3$$

$$(x_d, y_d) = (1, 1) \quad \theta_d = \frac{\pi}{4}$$

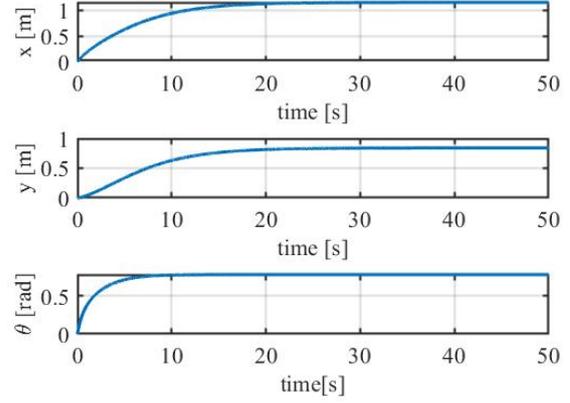


図 3 座標 x,y, 角度 θ の値

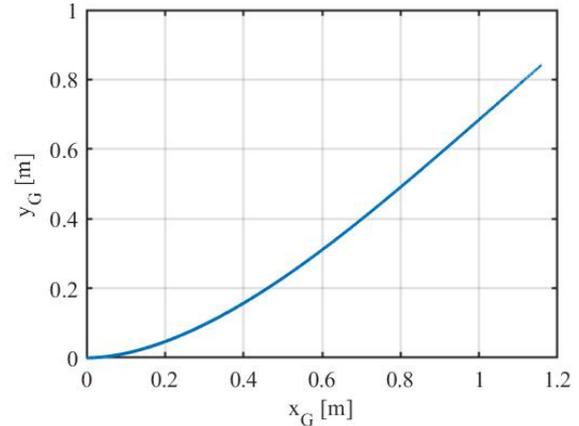


図 4 車両の軌跡

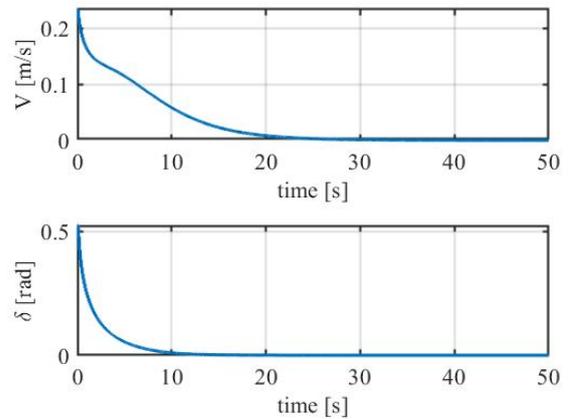


図 5 転舵角 δ と速度 V の値

図4と図7を比較すると、図4は目標値に到達していないことが分かる。この理由として、姿勢角 θ が先に収束してしまったため、その状態を維持しようとし、目標値まで曲がり切らなかったことが考えられる。

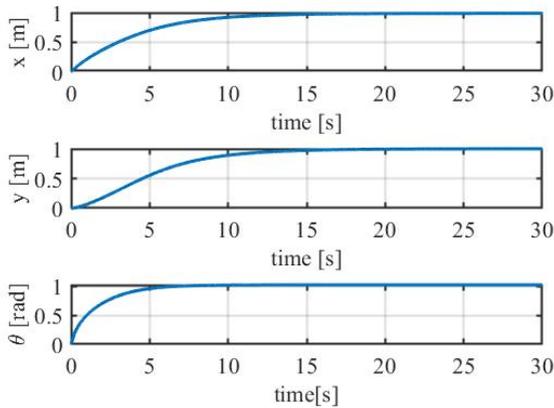


図6 座標 x,y, 角度 θ の値

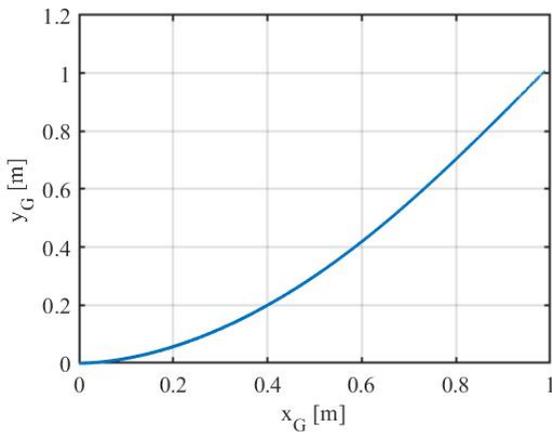


図7 車両の軌跡

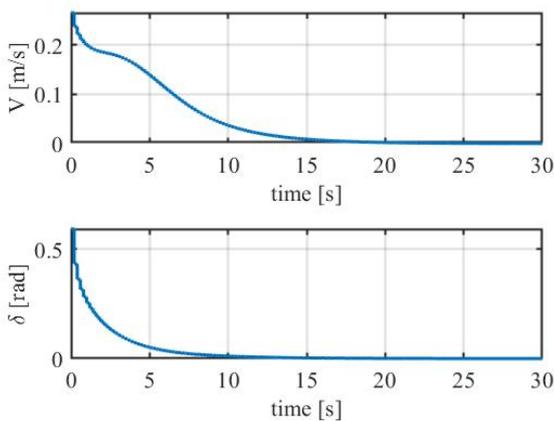


図8 転舵角 δ と速度 V の値

5 障害物回避を考慮した MPC

5.1 最適化問題における制約条件

$$J(x, u) = \frac{1}{2}x^T(N)Q_f x(N) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k))$$

$$\begin{cases} \min & J \\ \text{subject to} & Ax \leq b \end{cases} \quad (9)$$

ここで $Ax \leq b$ は線形制約不等式であり、障害物回避はこの形式で導入される。

5.2 制約条件の例

本節では障害物回避に用いる制約条件について述べていく。次に以下に示す制約条件を加えていく。

$$x - y \leq 0.2$$

$$[1 \quad -1 \quad 0][x \quad y \quad \theta]^T \leq 0.2$$

シミュレーション結果を以下に示す。

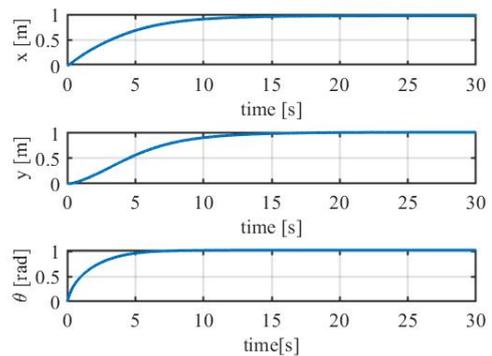


図9 座標 x,y, 角度 θ の値

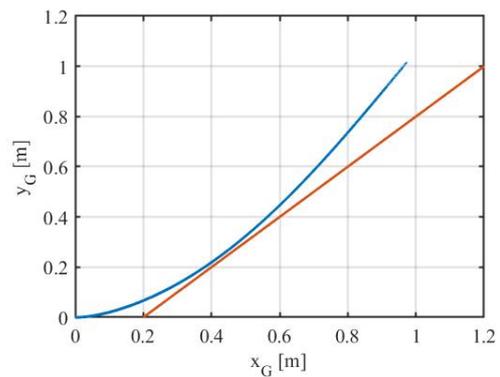


図10 車両の軌跡

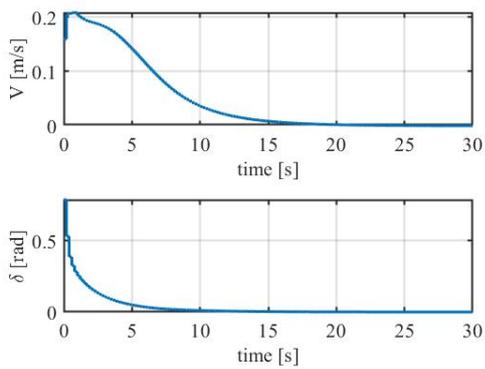


図 11 転舵角 δ と速度 V の値

図 10 より制約条件をくわえることで図 7 と比べると軌道が変わっていることが分かる。

5.3 従来の障害物回避の考え方

本節では従来の障害物回避の方法について述べていく。

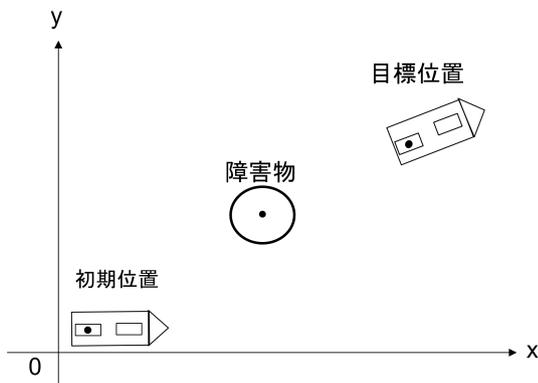


図 12 障害物回避のモデル図

図 12 のように車両と目標位置の間に円形の障害物がある場合を考える。ここで、障害物を設定するうえで考慮する点を述べる。

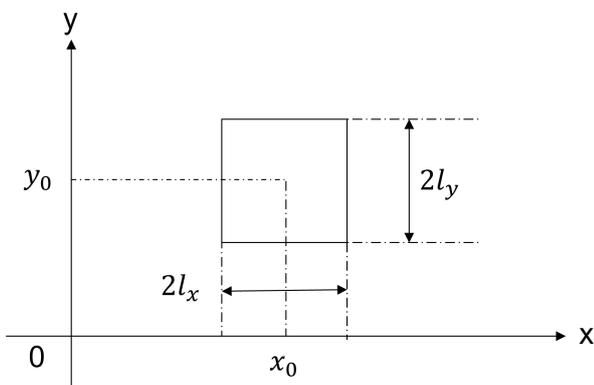


図 13 障害物回避のモデル図

図 13 の様に四角形の障害物を設定すると、制約条件が *or* 条件になる。しかし、最適化問題において、制約条件は *AND* 条件で表さなければならない。従って *or* 条件を *AND* 条件に近似する場合混合整数問題に発展する^[2]。本研究の目的は制約条件を加え、障害物を設定することなので、混合整数問題に発展しない方法を使用した。

5.4 障害物を回避する手順

本節では、円形の障害物を回避する制約条件の設定方法について述べていく。

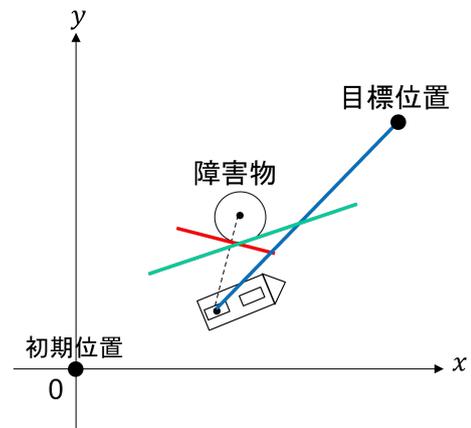


図 14 障害物回避のモデル図

図 14 において、次の順序で制約条件を決定する。

- ① 車両の位置と目標位置の傾きを求める
 - ② 車両の位置と障害物との最近傍点における傾きを求める
 - ③ 青線と赤線の傾きの平均をとり円に接するように求める
- 手順③で求めた直線が制約条件となる。MPC が更新されるごとに車両の位置が更新されるため緑線も図 15 の様に更新されていく。

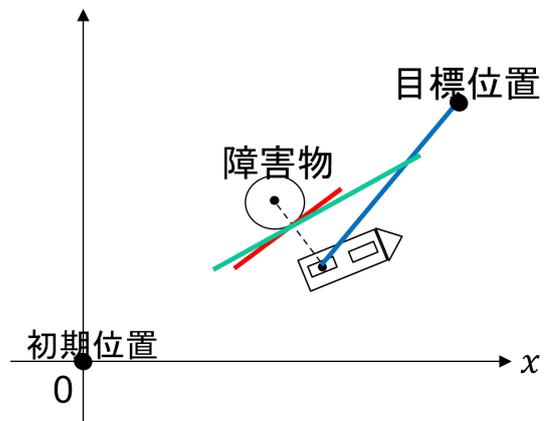


図 15 障害物回避のモデル図

5.5 障害物回避のための制約条件の定式化

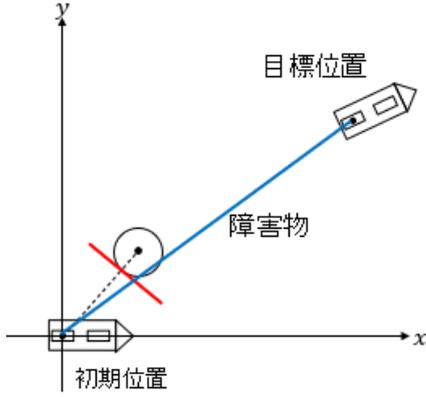


図 16 制約条件の図

ここで、初期位置は $p_{ini} = [x_{ini}; y_{ini}]$ 、目標位置を $p_g = [x_g; y_g]$ 、障害物の位置と半径を $p_c = [x_c; y_c], r$ とする。初期位置と目標位置の線分 (図の青線) は以下の式で表せる。

$$y = \frac{y_g - y_{ini}}{x_g - x_{ini}}x + y_{ini} - \frac{y_g - y_{ini}}{x_g - x_{ini}}x_{ini} \quad (10)$$

ここで x 軸正方向と、初期位置と障害物の最近傍点における線分がなす角 θ_{near} は次のようになる。

$$\theta_{near} = \text{atan2}(p_c(2), p_c(1))$$

なので障害物の最近傍点 p_{near} は次のようになる。

$$p_{near} = p_c + r * [\cos(\theta_{near}); \sin(\theta_{near})]$$

つまり、障害物の最近傍点の接線 (図の赤線) は次のようになる。

$$y = -\frac{x_c - x_{ini}}{y_c - y_{ini}}x + p_{near}(y) + \frac{x_c - x_{ini}}{y_c - y_{ini}}p_{near}(x) \quad (11)$$

2つの線分の二等分線の傾きはそれぞれの傾きの平均になるので (10) 式 (11) 式の傾きの平均を求めると、以下の式で表せる。

$$y = \frac{1}{2} \left(\frac{y_g - y_{ini}}{x_g - x_{ini}} - \frac{x_c - x_{ini}}{y_c - y_{ini}} \right) x + b \quad (12)$$

ここで以下のように置き変える。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{y_g - y_{ini}}{x_g - x_{ini}} - \frac{x_c - x_{ini}}{y_c - y_{ini}} \right) = a$$

$$y = ax + b$$

次に、二等分線が障害物に接するように移動させる。障害物の円の方程式は以下のようになる。

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2$$

障害物の円の中心と二等分線の距離が半径と一致すれば良い。

$$\frac{|x_c a - y_c + b|}{\sqrt{a^2 + 1^2}} = r$$

$$|x_c a - y_c + b| = r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$$x_c a - y_c + b = \pm\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$$b = -x_c a + y_c \pm \sqrt{a^2 + 1^2} \quad (13)$$

車両側の接線は切片が小さいほうなので b は以下のようになる。

$$b = -x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

以上より下の式より下を通るように制約条件を加えれば良い。

$$y = ax - x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$$-ax + y = -x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

つまり以下を満たせば良い。

$$[-a \ 1 \ 0][x \ y \ \theta]^T \leq -x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2} \quad (14)$$

5.6 MPC 更新時の時刻 t における制約条件

時刻 t における制約条件の式を求める。

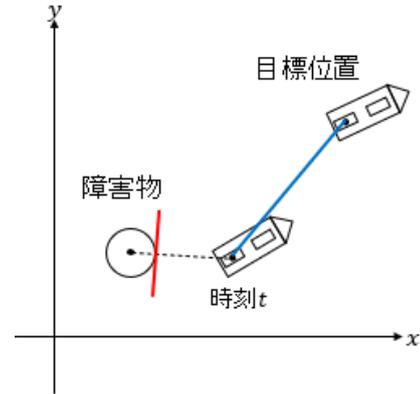


図 17 時刻 t における制約条件の図

目標位置を $p_g = [x_g; y_g]$ 、時刻 t における位置を $p_t = [x_t; y_t]$ 、障害物の位置と半径を $p_c = [x_p; y_p], r$ とする。初期位置と目標位置の線分 (図の青線) は以下の式で表せる。

$$y = \frac{y_g - y_t}{x_g - x_t}x + y_t - \frac{y_g - y_t}{x_g - x_t}x_t \quad (15)$$

θ_{near} 、 p_{near} は次のようになる。

$$\theta_{near} = \text{atan2}(p_c(2), p_c(1))$$

$$p_{near} = p_c + r * [\cos(\theta_{near}); \sin(\theta_{near})]$$

つまり、障害物の最近傍点の接線 (図の赤線) は次のようになる。

$$y = -\frac{x_c - x_t}{y_c - y_t}x + p_{naer}(y) + \frac{x_c - x_t}{y_c - y_t}p_{near}(x) \quad (16)$$

2つの線分の二等分線の傾きはそれぞれの傾きの平均になるので以下の式で表せる。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{y_g - y_{ini}}{x_g - x_{ini}} - \frac{x_c - x_{ini}}{y_c - y_{ini}} \right) = a$$

$$y = ax + b$$

傾きによって、とる切片が変化するので傾きを以下のように場合分けする。

$a \geq 0$ の場合

$$y = ax - x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$$[-a \quad 1 \quad 0][x \quad y \quad \theta]^T \leq -x_c a + y_c - r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$a < 0$ の場合

$$y = -ax - x_c a + y_c + r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

$$[a \quad -1 \quad 0][x \quad y \quad \theta]^T \leq x_c a + y_c + r\sqrt{a^2 + 1^2}$$

この緑線の傾きが正の場合直線より下の領域、負の場合は直線より上の領域になる。傾きによって切片が変わる理由として、図15の緑線は常に車両に近い方に存在しなければならないからである。車両から遠い方に接線を設定すると制約した領域の中に障害物を含むことになる。

6 障害物回避のシミュレーション

実際にシミュレーションを行った結果を図18, 19, 20に示す。ここで初期位置, 目標位置, 障害物の円の方程式は以下のようにする。

$$(x_0, y_0) = (0, 0) \quad \theta_0 = 0 \quad \delta_0 = 0.3 \quad V_0 = 0.3$$

$$(x_d, y_d) = (0.7, 1) \quad \theta_d = \frac{\pi}{4}$$

$$(x - 0.5)^2 + (y - 0.5)^2 = 0.2^2$$

図19より障害物を回避する経路を通っていることが分かる。

また、図20より2[s]あたりで速度Vが急激に小さくなっている異変が起きていることが分かる。その時の車両の位置は図19のマークされた位置である。

7 おわりに

本研究では、MPCを用いたレギュレーション制御と障害物を回避するために制約条件を加えることを行った。今後は軌跡追従と障害物回避を同時に行うMPCの作成について取り組んでいく。

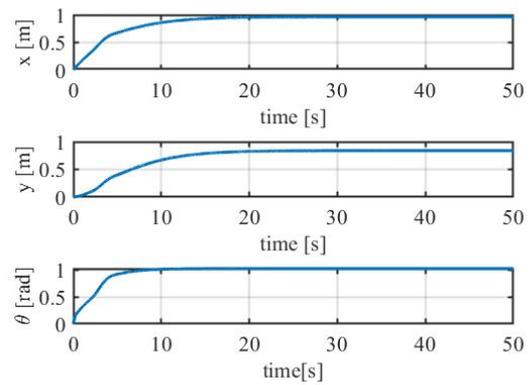


図18 座標 x,y, 角度 θ の値

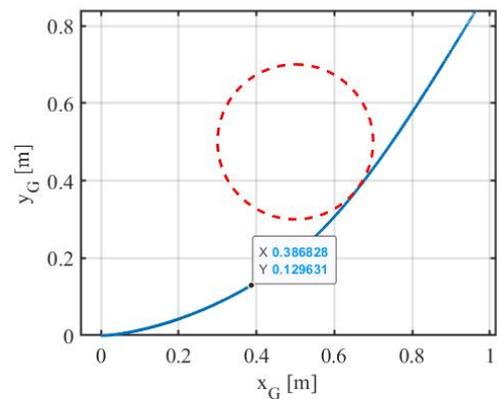


図19 車両の軌跡

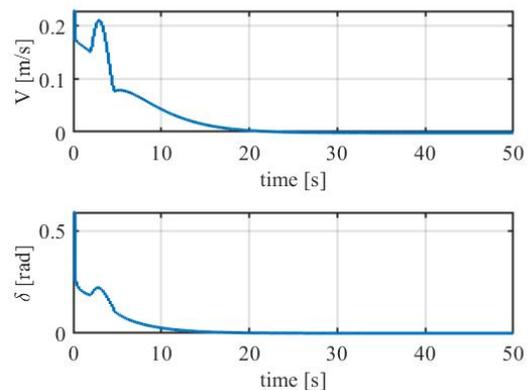


図20 転舵角 δ と速度 V の値

8 参考文献

- [1] [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
- [2] 根和幸・福島宏明・松野文俊:『予測時刻間の障害物回避を考慮したモデル予測制御に基づく軌道計画法』, 計測自動制御学会論文集, 2009年45巻8号 p. 406413