

モデル予測制御による自動車の自動車線変更

2012SE292 横井杏果

指導教員：大石泰章

1 はじめに

近年、自動車の安全性について大きく注目され技術開発が進められている。今後は技術の更なる高度化により、自動走行車が増えると考えられる。現在、運転支援技術に役立つ研究が多くされているが、自動走行システムの実現にはより多くの情報を複合的に考慮したシステムが必要である。文献 [1] では自動車が自動で合流を行うシステム、文献 [2] では自動で車線変更を行うシステムがモデル予測制御を用いて提案されている。

これらの文献をもとに本研究では、より複雑な場面で自動車が車線変更を自動で行うことが出来るシステムを目指す。まず、準備として 1 次元で自動車が先行車との車間距離を保って走行することができる加速度決定システムを考える。その後、2 次元の場合を考える。具体的には、車線数が減少するなど一定の距離内で車線変更しなくてはならないという場合を考え、モデル予測制御に基づくアプローチを行う。この課題を考えることで、実際の道路環境に対応したシステムになると考える。

2 1 次元における自動走行システム

2.1 目的関数

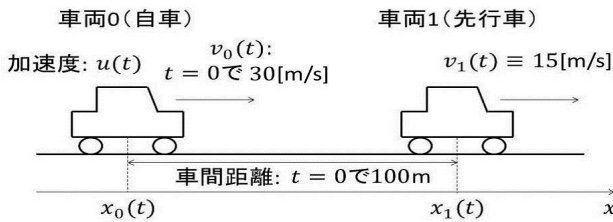


図1 1次元での想定場面

図1のような場面を想定する。図1は、片側1車線の直線道路を走行する自車（車両0）の前方に遅い速度で走行する先行車（車両1）があり、次第に追いついていくと仮定する。衝突を避けるため、緩やかに減速して先行車に近づき過ぎないようにすることが望ましい。ここでは、先行車の速度は15 [m/s] で一定であると設定し、初期時刻 $t=0$ における車両0と車両1との車間距離は100 [m] とする。また、自車の初期速度は30 [m/s] とする。図1に示すように、道路の進行方向に沿って x 軸をとる。車両0、車両1の位置をそれぞれ x_0, x_1 、それぞれの速度を v_0, v_1 とする。センサにより各車の位置 x_i および速度 v_i が測定できると仮定し、予測モデルと評価関数を構成する。状態変数 $z = (x_0 \ v_0 \ x_1 \ v_1)^T$ を用いて状態空間表現すると：

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t), \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

ただし、 u は自車に加える加速度である。次に評価関数を構成する。図1の場面における運転の適切さを評価するために数学的表現が容易な以下3つの基準を設定する [2]。

加減速を不必要に行わない。これは加速度 u の2乗を評価する次式で表現できる：

$$L_x = \frac{1}{2} u^2. \quad (2)$$

なるべく目標速度に近づける。この基準は、自車の目標速度 v_0^* と実際の自車の速度 v_0 との差の2乗を評価する次式で表現できる：

$$L_v = \frac{1}{2} (v_0 - v_0^*)^2. \quad (3)$$

他車に近づきすぎない。この基準は、先行車との車頭時間を考える。車頭時間とは、先行車位置に追いつくまでの時間で、 $\frac{x_1 - x_0}{v_0}$ という評価項が構成できる。この式の逆数をとる次式で他車に近づきすぎない基準を表現できる：

$$L_s = \frac{v_0}{x_1 - x_0}. \quad (4)$$

以上の (2), (3), (4) 式を足し合わせたものを現在時刻 t から未来の時刻 $t+T$ まで積分し、評価関数とする

2.2 モデル予測制御

モデル予測制御では、モデルの離散化を行う。離散化した入力を用いて先に記述した評価関数を評価し、これを最小化する入力を求める。さらに、最小化により求めた入力 $u(t)$ をシステムに加え、一定時間後に再び評価関数の評価と最小化を行う。以下これを繰り返す。

2.3 シミュレーション結果

図1の場面において離散化の時間幅を1[s]、予測時間を $T=5$ [s] とし、自車目標速度を $v_0^* = 15$ [m/s] と設定してモデル予測制御を30秒間行った。シミュレーションから、先行車に衝突することなく先行車と同じ速度まで減速して先行車後方で走行していることが分かった。このことから、衝突を回避する1次元自動走行システムができたと言える。

3 2次元における自動走行システム

3.1 目的関数

図2のような場面を想定する。図2は、片側2車線の直線道路の左車線を走行する自車（車両0）の前方に遅い速度で走行する先行車（車両1）があり、右車線自車後方に自車より速い速度で別の車（車両2）が走行するという状況を表している。ここでは、車両1、車両2それぞれの速度は15 [m/s]、30 [m/s] で一定とし、初期時刻 $t=0$ における車両0と車両1との車間距離は100 [m]、車両0と車両2との車間距離は40[m] とする。また、車両0の初期速度は20 [m/s] とする。図2に示すように、道路

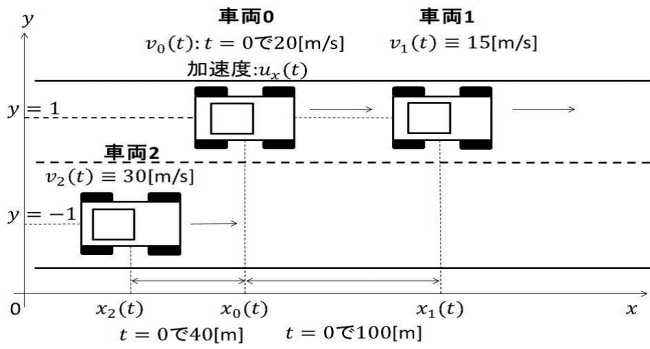


図2 2次元での想定場面

の進行方向に沿って x 軸をとる。 x 軸と垂直に y 軸をとる。変数 y は各車が右車線および左車線を走行している状態をそれぞれ $y = -1, 1$ とする。車両0, 車両1, 車両2の x 軸方向の位置をそれぞれ x_0, x_1, x_2 , それぞれの速度を v_0, v_1, v_2 とする。また, y 軸方向の位置を y_0, y_1, y_2 とする。これを踏まえて予測モデルと評価関数を構成する。 $z = (x_0 \ v_0 \ y_0 \ x_1 \ v_1 \ y_1 \ x_2 \ v_2 \ y_2)^T$ を用いて状態空間表現すると:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t), \quad (5)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \omega \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}.$$

ただし, u_x は車両0に加える加速度, u_y は車線位置指令値である。また, ω は車線変更の時定数の逆数を表すパラメータである。次に, 評価関数を構成する。第2章で定義した(2),(3)式に以下の基準を追加する。

車両1に近づきすぎないという基準は, 第2章の(4)式と同じ値に車両1と同じ左車線を走行する場合に1, 右車線を走行する場合に0となるような係数をかけて

$$L_{s1} = \frac{y_0 + 1}{2} \frac{v_0}{x_1 - x_0} \quad (6)$$

とする。

車両2に近づきすぎないという基準は, 自車と車両2のどちらが先行するかで場合分けして先と同様の評価項を考え, さらに車両2と同じ右車線を走行する場合に1, 左車線を走行する場合に0となるような係数をかけて次のように定める:

- 自車が車両2の前方を走行しているとき ($x_0 > x_2$)

$$L_{s2} = \frac{-y_0 + 1}{2} \frac{v_2}{x_0 - x_2},$$

- 自車が車両2の後方を走行しているとき ($x_0 < x_2$)

$$L_{s2} = \frac{-y_0 + 1}{2} \frac{v_0}{x_2 - x_0}. \quad (7)$$

(2), (3), (6), (7) 式を足し合わせたものを現在時刻 t から未来の時刻 $t + T$ まで積分し, 評価関数とする。

3.2 モデル予測制御

先に記述した評価関数を評価し, これを最小化する入力 u_x, u_y を求める。ただし u_y としては, ある時刻までは1

でその後に -1 になるというパターンの入力のみを考える。さらに, 最小化により求めた入力をシステムに加え, 一定時間後に再び評価関数の評価と最小化を行う。以下これを繰り返し行う。

3.3 シミュレーション結果

図2の場面において離散化の時間幅を1[s], 予測時間を $T = 5[s]$ とし, 自車目標速度を $v_0^* = 25[m/s]$ と設定してモデル予測制御を50秒間行った場合のシミュレーション結果を図3,4に示す。図3では, 実線は自車の車線位置 y_0 , 破線が車両1の車線位置 y_1 , 一点鎖線は車両2の車線位置 y_2 のそれぞれ時間変化を表す。図4では, 自車の速度 v_0 , 破線が車両1の速度 v_1 , 一点鎖線は車両2の速度 v_2 のそれぞれ時間変化を表す。自車は約6秒後に車線変更をはじめ約15秒後に完了している。車線変更完了後はもはや車両1を考慮する必要がないので目標速度まで加速している。

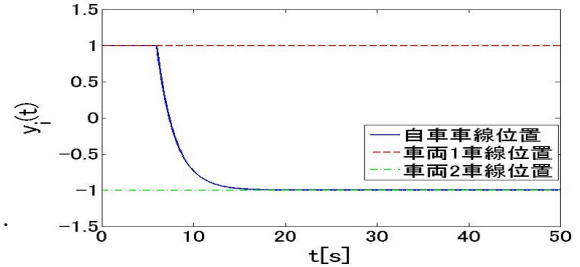


図3 自車, 車両1, 車両2の車線位置 $y_i(t)$

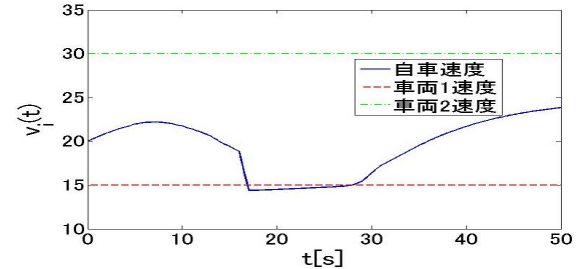


図4 自車, 車両1, 車両2の速度 $v_i(t)$

4 おわりに

本研究ではモデル予測制御を用いて, 他車に衝突しないように車線変更を行うシステムを考え妥当な加速度を決定することが出来た。しかし, 一定距離内に車線変更を行うシステムの実現には至らなかった。このシステムを実現することは今後の課題である。また, 今回考えたシステムでは車間距離が極めて小さくなることもある。他車との距離を十分保つことも今後の課題である。

参考文献

- [1] 西羅光・川邊武俊:「合流場面における自動車の最適経路生成」. 第47回自動制御連合講演会講演論文集, 2004.
- [2] 西羅光・川邊武俊:「自動車の最適経路生成」. 計測と制御, 第45巻第3号(2006), pp. 209-215.