

モデル予測制御による自動車の運転支援

2006MI002 安藤康太 2006MI034 市川直樹

指導教員：大石泰章

1 はじめに

近年、交通状況はめまぐるしく変化してきた。環境の悪化や、事故の増加が懸念される中でドライバーは多くのことを考えて運転しなければならない。このような問題を解決するため、最近では自動車への運転支援システムも徐々に発達してきた。すでにABS (Anti-lock Brake System) やACC (Adaptive Cruise Control) のように、ドライバーへの負担を軽減する支援システムが普及している。このように、ドライバーが公道を運転する際、車線変更時や高速道路走行時など、負担が大きくかかる場面での支援は不可欠となってきた。少しでもドライバーの負担を軽減できるシステムの研究をすることで、世の中の様々な問題の解決につながれば良いと考える (文献 [1], [2] 参照)。こういった運転支援を行うため、本研究では、自動車の加速度を適切に決定する制御システムを考えることにする。そのためには、

1. 不要な加減速をしない、
2. 自分が望む速度に近い、
3. 他車と適切な距離を保つ

という3つのことを考える必要がある。不要な加減速をしないということは、無駄な二酸化炭素排出量を抑え環境保全につながる。他車と適切な距離を保ち、自分が望む速度に近い速度で走るということは事故の軽減につながる。このようにすることで、安全かつ環境にやさしい走行ができると考える。

2 問題設定

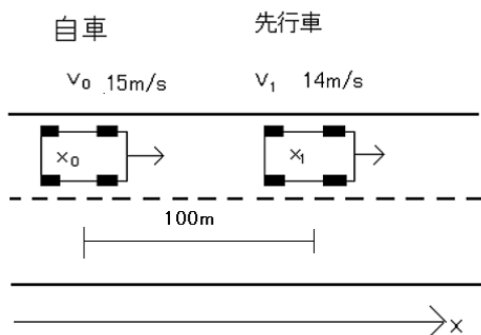


図1 高速道路走行時の例

本研究では、車線変更時の運転支援を扱った文献 [2], [3] を参考に、モデル予測制御を適用することで制御量である加速度を適切に決定することを目的とする。適切さの評価は第1章で述べた3つの項目に

注目して行う。

図1は自車が高速道路を走行している場面である。そして、前方に遅い速度で走行する先行車があると仮定する。第1章で述べたように、燃費や安全性等を考慮すると急な加減速や先行車との距離が近づきすぎるのは好ましくない。また、こうした問題が生じない限り、自車が望む速度に近い速度で走行できると良い。本研究では先行車の速度は14m/sで一定であると設定し、自車の目標速度は様々に変えて考察する。初期時刻における自車と先行車との車間距離は100m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。自車と先行車の位置をそれぞれ x_0, x_1 、自車と先行車の速度をそれぞれ v_0, v_1 とする。センサーによって各車の位置 x_i および速度 v_i が測定できるという仮定のもとに、予測モデルと評価関数を構成する。

予測モデルは次のように構成できる：

$$\dot{x}_0 = v_0, \quad (1)$$

$$\dot{v}_0 = u, \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = v_1, \quad (3)$$

$$\dot{v}_1 = 0. \quad (4)$$

ただし u は自車に加える加速度である。状態変数 $z = (x_0 \ v_0 \ x_1 \ v_1)^T$ を使って状態空間表現は下式で表せる：

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

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

(5) 式の状態空間表現の時間応答は以下の通りである：

$$z(t) = e^{At}z(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau. \quad (7)$$

また、評価関数は3.2節で構成する。

3 定式化

第2章をもとに定式化を行う。

3.1 モデル予測制御

・モデル予測制御とは，制御対象の将来挙動を予測した上で，与えられた評価関数の評価が最も良くなる所定時間先までの操作量の時系列を算出し，現在時刻に対応する操作量を入力として加え，制御時刻ごとに操作量時系列を更新する制御方式である（文献 [2] 参照）．

第 2 章で提案したような走行を実現する方法論としては，このモデル予測制御が有望である．その理由は以下のように列挙することができる：

- モデル予測制御の説明によく自動車の運転が引用されており，自動車の運転とモデル予測制御の考え方は親和性があると考えられる；
- 自車の操作が他車の挙動に及ぼす影響を考慮するといった高度な予測に基づく最適走行を算出できる．

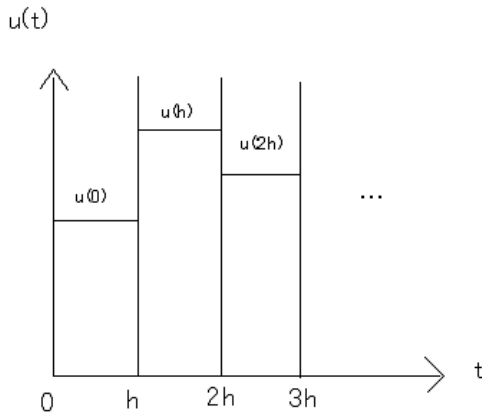


図 2 入力の離散化

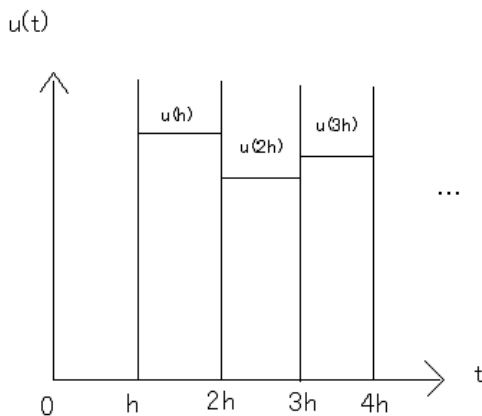


図 3 $t = 5$ で考える入力

モデル予測制御では，入力の離散化を行う．図 2 の

ように時間をステップ幅 h で区切り，ステップごとの入力は一定であるとする．本研究では $h = 5$ としステップ幅を 5 秒単位で区切り，現在時刻から 15 秒未来までの最適な入力を算出する．

例えば，時刻 $t = 0$ においては， $u(0)$ ， $u(h)$ ， $u(2h)$ の 3 つの入力を算出し， $0 \leq t \leq 5$ の間，入力 $u(t) = u(0)$ を加える．次に時刻 $t = 5$ においては $u(h)$ ， $u(2h)$ ， $u(3h)$ の 3 つの入力を算出し（図 3 参照）， $5 \leq t \leq 10$ の間，入力 $u(t) = u(h)$ を加える．以下，同じ作業を繰り返していく．

3.2 評価関数

運転の適切さを評価するために，評価関数を構成する．その際，数学的表現が容易な以下の基準を設定する（文献 [2]，[3] 参照）：

1. 不要な加減速をしない，
2. 自分が望む速度に近い，
3. 他車と適切な距離を保つ．

不要な加減速をしないという基準は，加速度 u の二乗を評価する次式で表現できる：

$$L_1(t) = \frac{1}{2}u^2. \quad (8)$$

自分が望む速度に近いという基準は，自車の目標走行速度 v_0^* と実際の速度 v_0 との差の二乗を評価する次式で表現できる：

$$L_2(t) = \frac{1}{2}(v_0 - v_0^*)^2. \quad (9)$$

先行車との適切な距離を保つという基準は，車間時間と衝突時間を考える．車間時間は，先行車の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．また，衝突時間は先行車に追いつくまでの時間で $\frac{x_1 - x_0}{v_0 - v_1}$ という評価項が構成できる．以上の式の逆数に重み係数を付け加え足し合わせることで，次式が構成できる：

$$L_3(t) = \frac{v_0}{x_1 - x_0} + \frac{1}{1 + e^{-\lambda(v_0 - v_1)}} \frac{v_0 - v_1}{x_1 - x_0}. \quad (10)$$

以上の三式を合計した

$$L(t) = L_1(t) + L_2(t) + L_3(t) \quad (11)$$

を現時刻 t から $t + 3h$ 未来まで積分したものを次式のような評価関数とする：

$$J(t) = \int_t^{t+3h} (L_1(\tau) + L_2(\tau) + L_3(\tau))d\tau .(12)$$

ここで、(8) 式の $u(t)$ には前述の離散的な入力を使う。例えば $t = 0$ ならば $J(t)$ は $u(0)$, $u(h)$, $u(2h)$ の関数となり、これらを適切に選んで $J(t)$ を最小化することになる。

3.3 非線形最適化

ここでは、前節で述べた (12) 式を最小化するために、非線形最適化を行う。具体的には最急降下法を用いることとする。最急降下法とは、適当な出発点 $x^{(0)}$ から始め、各反復において、現在の点 $x^{(k)}$ から直線探索を行って次の点 $x^{(k+1)}$ を定める反復法である (文献 [4] 参照)。最急降下法を用いた理由として各ステップごとの計算が少ないので単純な計算で済むというメリットがあげられる。

以上の点を考慮した上で最急降下法を行い $u(0)$, $u(h)$, $u(2h)$ を小さくするために下式を構成する。ここで α はステップ幅であり、ここでは $\alpha = 10^{-4}$ と定める：

$$u(0)^{(k+1)} = u(0)^{(k)} - \alpha \times \frac{\partial J}{\partial u(0)} , \quad (13)$$

$$u(h)^{(k+1)} = u(h)^{(k)} - \alpha \times \frac{\partial J}{\partial u(h)} , \quad (14)$$

$$u(2h)^{(k+1)} = u(2h)^{(k)} - \alpha \times \frac{\partial J}{\partial u(2h)} . \quad (15)$$

上記の各式を用いて $u(0)^{(k)}$, $u(h)^{(k)}$, $u(2h)^{(k)}$ の更新を繰り返し、勾配ベクトルのノルムが 10^{-4} を下回る時の値を最適な制御の値とする。

4 シミュレーション結果

図 1 の状況において、以上で説明した予測モデルと評価関数を用いて、自転車の目標速度 v_0^* を 10m/s , 20m/s , 30m/s に設定し、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それぞれ図 4 , 5 , 6 に示す。グラフは横軸に時間 t , 縦軸に自転車速度 $v_0(t)$ と先行車速度 $v_1(t)$ を示している。

目標速度が 10m/s の場合、初期速度 15m/s の自転車は先行車の速度、距離に関わらず速やかに目標速度に向かい減速している。また、目標速度が 20m/s , 30m/s の場合、自転車は初め目標速度に向かい加速をするが、先行車との距離を考慮し衝突することを避けるので減速している。以上のことから、初めは目標速度に向かって加減速を行い、衝突しないと判断した場合は目標速度に到達、衝突する可能性があるとは判断された場合は減速し先行車と同速で走行するということがわかった。

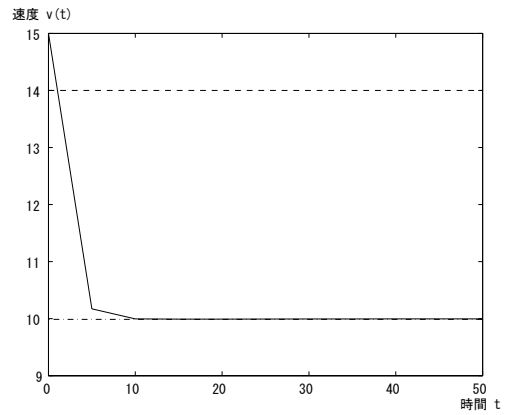


図 4 $v_0^* = 10\text{m/s}$ の場合の自転車速度 $v_0(t)$ の変化 : 実線は $v_0(t)$, 破線は $v_1(t)$, 一点鎖線は v_0^* を表す

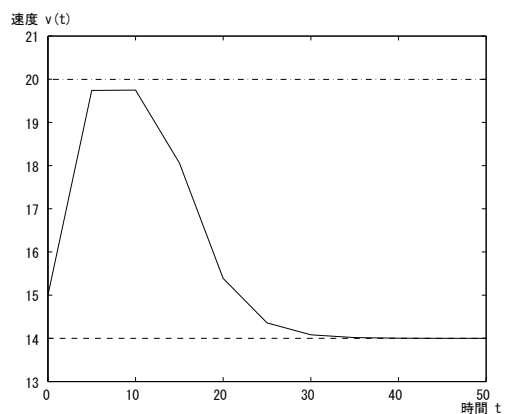


図 5 $v_0^* = 20\text{m/s}$ の場合の自転車速度 $v_0(t)$ の変化

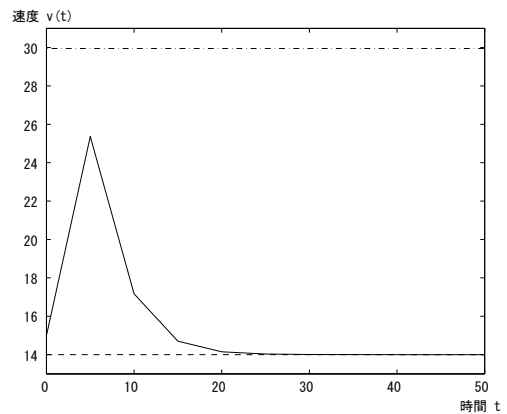


図 6 $v_0^* = 30\text{m/s}$ の場合の自転車速度 $v_0(t)$ の変化

次に図 4 , 5 , 6 と同じ目標速度における自転車の位置 x_0 と先行車の位置 x_1 の変化をそれぞれ図 7 , 8 , 9 に示す。グラフは横軸に時間 t , 縦軸に自転車の位置 $x_0(t)$ と先行車の位置 $x_1(t)$ を示している。

目標速度が 10m/s の場合、自転車は目標速度に向かい減速していくので、先行車との距離は徐々に離れていく。それに比べ目標速度が 20m/s , 30m/s の場

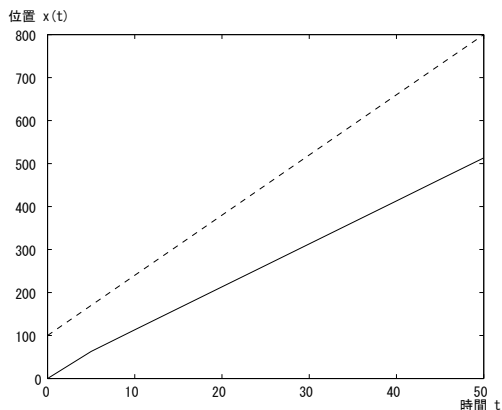


図 7 $v_0^* = 10\text{m/s}$ の場合の自転車位置 $x_0(t)$ の変化：実線は $x_0(t)$ ，破線は $x_1(t)$ を表す

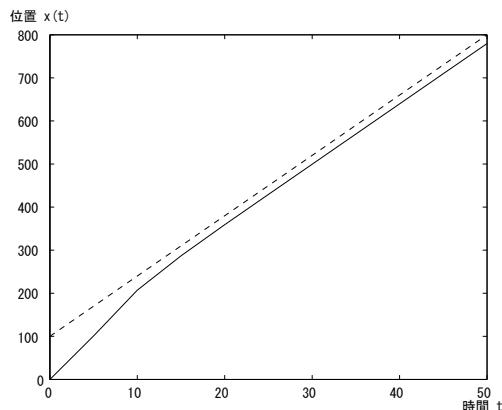


図 9 $v_0^* = 30\text{m/s}$ の場合の自転車位置 $x_0(t)$ の変化

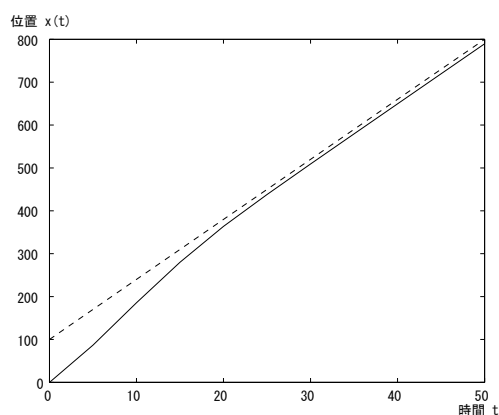


図 8 $v_0^* = 20\text{m/s}$ の場合の自転車位置 $x_0(t)$ の変化

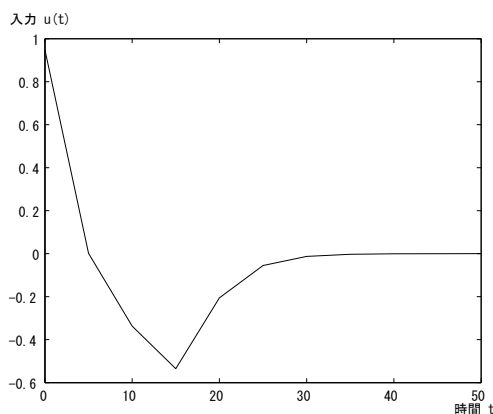


図 10 $v_0^* = 20\text{m/s}$ の場合の入力 $u(t)$ の変化

合、自転車は初め加速をしているので距離が縮まってくが、先行車との距離を考慮し、減速して先行車の後方で走行するので距離が一定となっている。以上のことから、加減速をした際、衝突しないと判断された場合徐々に距離が開いていくが、衝突すると判断された場合、最終的に距離が一定になるということがわかった。

最後に目標速度 20m/s の時のみにおける自転車と先行車の入力 $u(t)$ の変化を図 10 に示す。

この図より、一定の速度で走行している先行車に対し自転車は当初加速を行うが、やがて車間距離を考慮して減速を始め、最終的に先行車と同速になるため、加速度は零になることがわかる。

以上のシミュレーション結果から、モデル予測制御によって、目標速度と先行車との距離を考慮した上で適切な加速度の決定ができるということがわかった。

5 おわりに

今回の研究では、自動車の運転支援というものをテーマにモデル予測制御と非線形最適化を用いて、自動車の速度制御を行った。システムの離散化や、最急降下法を用いることにより、複雑な計算過程をよ

り簡略化し、適切な加速度を決定することができた。

今回の研究は、自動車の運転支援という分野での速度支援ということで自転車と先行車の場合を考えた。しかし日常生活においては、より複雑な状況が存在している。後続車を考慮した場合や車線変更を促す等、今回のシステムを改良していくことが今後の課題である。

参考文献

- [1] M . A . S . Kamal , M . Mukai , J . Murata and T . Kawabe: Driving assist system for ecological driving using model predictive control . 第 9 回制御部門大会 , 東広島 , 2009 .
- [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 .
- [3] 川邊武俊 , 西羅光 , 大塚敏之 : 「 Receding Horizon 制御による自動車の最適経路生成 」 . 第 3 回制御部門大会予稿集 , 神戸 , 2003 , pp. 405–409 .
- [4] 福島雅夫 : 『 数理計画入門 』 . 朝倉書店 , 東京 , 1996 .