

# 高速道路における Adaptive Cruise Control による 乗り心地を考慮した車間距離制御の検証

2016sc029 飼沼雅大 2016sc060 長瀬亮祐

指導教員：陳幹

## 1 はじめに

現代では多くの国が車社会であり、これからも車の普及率は世界的に伸びていく。しかし、その一方で車による交通事故の可能性が存在する。日本での交通事故は減少傾向にあるが、2018 年は約 43 万件もあった [1]。改善案として自動運転機能を搭載することで、運転に自信がない人たちの交通事故の可能性が減らせると考えた。車間距離を一定に維持できれば交通事故で最も多い追突事故の可能性が減少し、自動運転の機能の 1 つである ACC(Adaptive Cruise Control) を用いれば追突事故は減少できる。ACC は車間距離を一定に保ちながら走行する機能なので追突を未然に防げる。しかし、一定距離を保つために ACC 搭載車の速度の変化量を大きくしすぎると乗り心地が悪くなってしまふ [2]。本研究では ACC による車間距離の維持と速度変化によって生じる運転手の乗り心地を考慮し、モデリングと制御器の設計を行い、シミュレーション結果を評価する。

## 2 モデリング

2 つの車の追従走行を表すモデルを図 1 とする。ACC を搭載した車両と先行車の車間距離  $d_i(t)$  を維持している状態を表しているモデルである。車両モデルの制駆動系は式 (1) のように理想の加速度の入力値を  $u_i(t)$ 、ACC 搭載車の加速度  $a_i(t)$  を出力とした 1 次遅れ系の式とし [3]、式 (1) を伝達関数で表したものを式 (2) として下記とする。

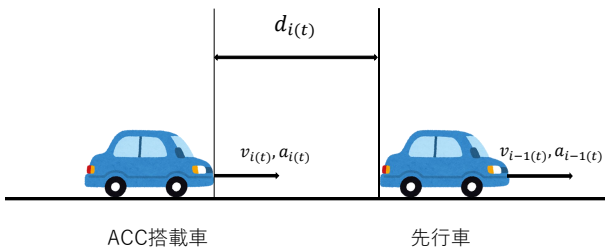


図 1 先行車と追従車のモデル

$$u_i(t) = \tau \dot{a}_i(t) + a_i(t) \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{a(s)}{u(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

### 2.1 物理パラメータ

本研究で用いる車間追従の物理パラメータを表 1 に示す。

表 1 物理パラメータ

$a_{i-1}(t)$	先行車の加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_i(t)$	追従車の加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$u_i(t)$	追従するための追従車の加速度指令値	[m/s <sup>2</sup> ]
$v_{ri}(t)$	二台の相対速度	[m/s]
$v_{i-1}(t)$	先行車の速度	[m/s]
$v_i(t)$	追従車の速度	[m/s]
$d_i(t)$	二台の車の車間距離	[m]
$d_{pi}(t)$	目標車間距離	[m]
$d_s$	安全のための一定距離	[m]
$\varepsilon_i(t)$	車間距離と目標車間距離の誤差	[m]
$\tau$	時定数	[s]
$h$	車間時間を一定に設定するパラメータ	[s]

### 2.2 状態方程式

今回、用いる状態方程式はシステム入力に対して積分器を加える。積分器があれば車両のジャークが小さくなり、乗り心地が良くなると考えられるからである。 $a_{i-1}(t)$  を外乱とし、加速度入力  $u_i(t)$  の微分値  $z_i = \dot{u}_i(t)$  を新しく制御入力として拡大系 (3) を構築する。

$$\dot{x}_{ei}(t) = A_e x_{ei}(t) + B_e z_i(t) + D_e a_{i-1}(t) \quad (3)$$

$$x_{ei}(t) = \begin{bmatrix} a_i(t) \\ v_{ri}(t) \\ \varepsilon_i(t) \\ u_i(t) \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \\ -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 & 0 \\ -h & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## 3 スtringスタビリティ

Stringスタビリティとは複数の車両が車間距離制御で走行している状況において、ある車両の車間距離の変動が後続車両に増幅伝播しない性質のことである。Stringスタビリティを満たしていない場合交通渋滞が続きやすくなってしまふ。そのためにStringスタビリティを満たすように制御器を設計する。

ここで式 (15) を満たすときStringスタビリティを満たしているといえる [4][5]。

$$\|H(s)\|_{\infty} = \left\| \frac{v_i(s)}{v_{i-1}(s)} \right\|_{\infty} \leq 1 \quad (4)$$

ここで  $v_i$  は  $i$  番目の車両の速度、 $s$  はラプラス演算子、 $\|\cdot\|_{\infty}$  は伝達関数の  $H_{\infty}$  ノルムである。

積分器を挿入した新たな制御入力  $z_i(t) = K_e x_i(t) = \dot{u}_i(t)$  を用いて以下の式 (4) に示す。

$$\begin{aligned} z_i(t) &= K_e x_i(t) \\ &= k_{e1} a_i(t) + k_{e2} V_r \dot{i}(t) + k_{e3} \varepsilon_i(t) + k_{e4} u_i(t) \quad (5) \end{aligned}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} a_i(t) \\ V_r \dot{i}(t) \\ \varepsilon_i(t) \\ u_i(t) \end{bmatrix}, K_e = [ k_{e1} \quad k_{e2} \quad k_{e3} \quad k_{e4} ]$$

ここでは  $k_{e1}, k_{e2}, k_{e3}, k_{e4}$  を積分器を挿入したときの比例ゲインとする。式 (4) を速度の伝達関数に変形し  $\left| \frac{v_i(jw)}{v_{i-1}(jw)} \right| \leq 1, \forall w$  を満たすように計算すると、以下のパラメータ条件を導出できる [5]。

$\alpha = \tau^2, \beta = (1 - \tau k_{e4})^2 - 2\tau(k_{e1} + k_{e4}), \gamma = (k_{e1} + k_{e4})^2 - 2(k_{e2} + k_{e3}h)(1 - \tau k_{e4}) + 2\tau k_{e3}, \delta = 2k_{e2}k_{e3}h + k_{e1}^2 h^2 + k_{e2}(k_{e1} + k_{e4})$  としたとき

$$\begin{cases} \beta^2 - 3\alpha\gamma \leq 0 \\ \delta \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

または

$$\begin{cases} -4\alpha\gamma^3 - 27\alpha^2\delta^2 + \beta^2\gamma^2 + 18\alpha\beta\gamma\delta - 4\beta^3\delta \leq 0 \\ \delta > 0 \end{cases} \quad (7)$$

または

$$\begin{cases} \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 3\alpha\gamma}}{3\alpha} \leq 0 \\ \delta \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

となる。以上の式 (5)~式 (7) を満たすようなゲインを求めていく。

## 4 制御器設計

先行車に対しての追従性能を加速度と車間距離偏差と相対速度によって評価し、運転手の乗り心地を考慮して制御器設計を行う。本研究では制御器を設計する際にストリングスタビリティを考慮する。導出した状態方程式は変数が多くゲインを探すことは困難である。そのためゲインを探しやすい LQ 制御を用いた。しかし、LQ 制御はストリングスタビリティが考慮されていないので検証を行う。

### 4.1 ストリングスタビリティの検証

3 節で導出したパラメータ条件の妥当性を検証した。パラメータ条件を満たす重み関数を重み関数  $Q = \text{diag}([350, 270, 1, 0]), R = 100$  とし、満たさない重み関数を重み関数  $Q = \text{diag}([350, 20, 1, 0]), R = 100$  とした検証結果のグラフが図 2,3 である。追従している状況で先行車の速度が変化した際、パラメータ条件を満たしている図 2 のときは後ろの車両になるほど振幅が小さくなる。パラメータ条件を満たしていない図 3 のときは後ろの車両になるほど振幅が大きくなることが確認できる。したがって、パラメータ条件を満たせば追従性能の安全性が保証される。

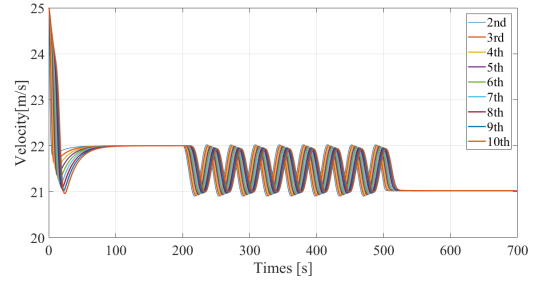


図 2 パラメータ条件を満たしているときの 0s~700s 間の速度

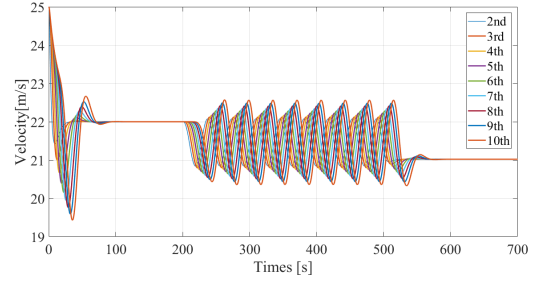


図 3 パラメータ条件を満たしていないときの 0s~700s 間の速度

### 4.2 乗り心地の評価方法

制御性能を乗り心地の指標で評価する。本研究では乗り心地の指標としてリスク認知と加速度、ジャーク (加加速度) を用いる。まず、リスク認知 (Risk Perception):  $R_p(t)$  を車間時間 (Time HeadWay):  $t_h(t)$  と衝突までの時間 (Time to Contact):  $t_c(t)$  の 2 つのパラメータによって評価する。以下のように  $R_p(t), t_h(t), t_c(t)$  をそれぞれ定義する [6]。

$$\begin{aligned} t_h(t) &= \frac{d_i(t)}{v_i(t)}, t_c(t) = \frac{d_i(t)}{v_i(t) - v_{i-1}(t)} = -\frac{d_i(t)}{v_{ri}(t)} \\ R_p(t) &= \frac{1}{t_h(t)} + \frac{4}{t_c(t)} \quad (9) \end{aligned}$$

[6] では  $R_p(t)$  はドライバーがブレーキを踏むタイミングの判断に用いられ、この式 (9) が 2 より大きくなるとドライバーは不快に感じる。

次に、[2] では乗り心地を加速度とジャークにより評価をしており、本研究においても加速度  $a_i(t)$  とジャーク  $j_i(t)$  の絶対値の最大値を表す式 (10)、式 (11) を乗り心地に関する指標として評価を行う。[2] の研究結果より、ジャークが  $2[m/s^3]$  を超えると乗り心地が悪いことが読み取ることができるので、本研究ではジャークの絶対値が  $2[m/s^3]$  以下であれば乗り心地が良いとする。

$$R_{ca} = \max|a_i(t)| \quad (10)$$

$$R_{cj} = \max|j_i(t)| \quad (11)$$

以上に述べた 3 つの評価指標により乗り心地を評価する。

## 5 シミュレーション

### 5.1 シミュレーション設定

高速道路での追従走行を想定してシミュレーション条件を設定する。本研究では10台の車両が1列で走っているととし、一番前の車両を先行車、それ以外の車両をACCを搭載した追従車とする。それぞれの車両の初期速度を1台目から [22,25,19,26,27,18,28,14,28,22][m/s] 初期加速度を全て  $0[m/s^2]$ 、それぞれの車間距離を50[m]、ストリングスタビリティを満たすような重み関数  $Q = \text{diag}([350, 270, 1, 0])$ ,  $R = 100$  とする。先行車が高速道路で走行中に渋滞に巻き込まれ、抜け出すまでの一連の場面を3種類の場面1,2,3に切り分けて考える。先行車の速度パターンを図2とする。追従車全体のジャーク、加速度、速度、車間距離、リスク認知のグラフを図5~9とする。場面1(0s~100sの部分)は高速道路で渋滞がなく、スムーズに走行しているところを追従し始める場面とする。場面1のジャーク、加速度の絶対値のグラフを図10とする。場面2((300s~400sの部分))は先行車が渋滞に巻き込まれ、追従車も減速し渋滞に巻き込まれる瞬間の場面とする。場面2のジャーク、加速度の絶対値のグラフを図11とする。場面3(500s~600sの部分)は先行車が渋滞を抜け出し、追従車も渋滞を抜け出して加速する場面とする。場面3のジャーク、加速度の絶対値のグラフを図12とする。

## 6 シミュレーション結果

### 6.1 場面1

場面1では10台の車両それぞれの初期値が異なるため、車間距離と速度の修正のために速度の変更が行われている。中でも8台目,9台目の変動が大きい。8台目のジャークと加速度の絶対値の最大値が  $7.8729[m/s^3]$ ,  $5.8821[m/s^2]$  であり,9台目のジャークと加速度の絶対値の最大値が  $7.6592[m/s^3]$ ,  $5.5740[m/s^2]$  である。乗り心地が良いとは言えない結果となっている。それに対して5台目のジャークと加速度の絶対値の最大値が  $1.0481[m/s^3]$ ,  $1.8686[m/s^2]$  となっている。どちらの値も2以下となっているので乗り心地の良さが保証される。この結果の差はそれぞれの前の車両との自車との相対速度によって大きく変化がでると考えられる。またリスク認知の観点ではどの車両においても2を超えることはなくこの観点では乗り心地は問題ないといえる。

### 6.2 場面2

場面2では全体の速度や車間距離の変化はそれぞれ約10sで収束して安全に制御される。全体的にジャークの絶対値は1以下となっていて乗り心地は保証される。図5より,2台目の車両の値から次第に小さい変化になっているところからストリングスタビリティが確認される。またリスク認知の観点ではどの車両においても2を超えることはなくこの観点では乗り心地は問題ないといえる。

### 6.3 場面3

場面3では場面2と似たような結果が得られた。全体の速度や車間距離の変化にはそれぞれ約10sで収束して安全に制御される。全体的にジャークの絶対値は1以下となっていて乗り心地は保証される。図5より,2台目の車両の値から次第に小さい変化になっているところからストリングスタビリティが確認される。またリスク認知の観点ではどの車両においても2を超えることはなくこの観点では乗り心地は問題ないといえる。

## 7 考察,課題

3種類の場面の中で場面2,3は追従性能や乗り心地の面において良好と言える。場面1は追従性能やリスク認知に問題はないが,ジャーク,加速度の点で乗り心地が良いとは言えない。原因として相対速度や車間距離の初期値に差が出てくるとそれぞれの車両の変化が大きくなる。その際に乗り心地を求めることは安全性を損ねるので厳しいと考える。

## 8 おわりに

本研究の成果は乗り心地を抑えるための制御器を設計し,追従時における乗員の乗り心地の向上させることができた。今後の課題としては追従し始める際一部の車両の乗り心地の悪さを改善することである。

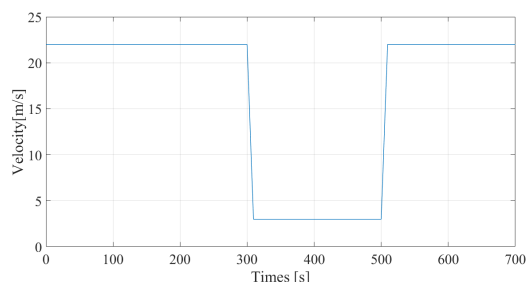


図4 先行車の速度パターン

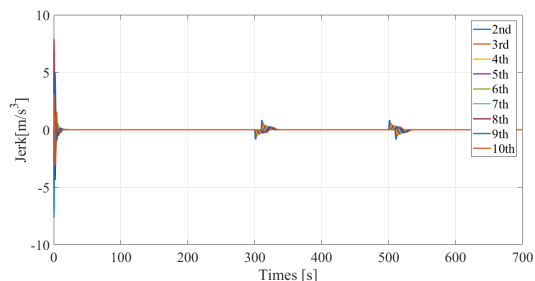


図5 追従車全体のジャーク

## 参考文献

- [1] e-Stat 政府統計の総合窓口, "道路交通に関する統計 交通事故の発生状況 年次 2018年", <https://>

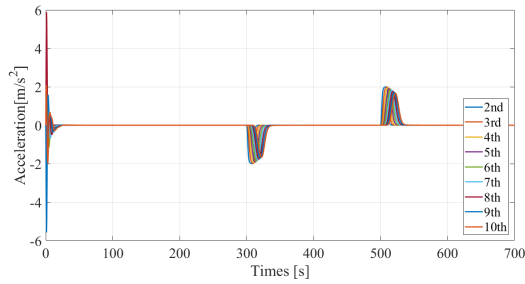


図 6 追従車全体の加速度

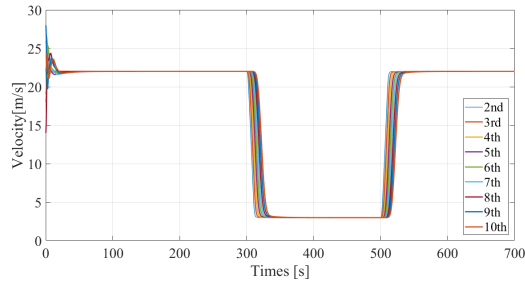


図 7 追従車全体の速度

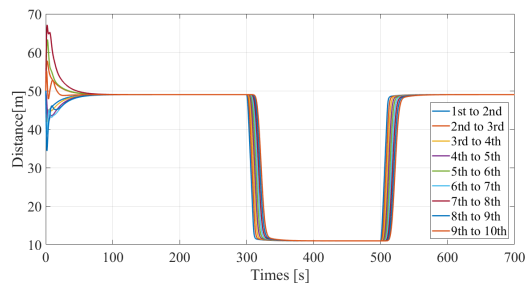


図 8 追従車全体の車間距離

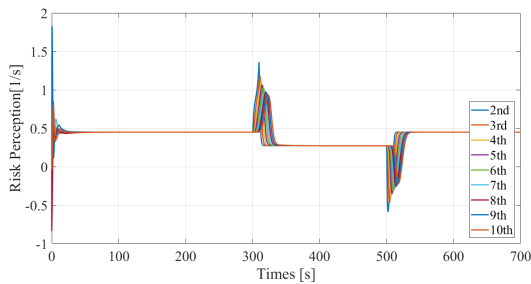


図 9 追従車全体のリスク認知

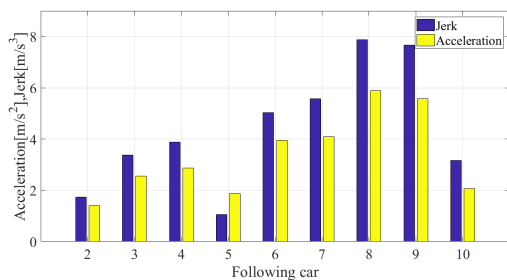


図 10 場面 1:追従車のジャーク, 加速度の絶対値

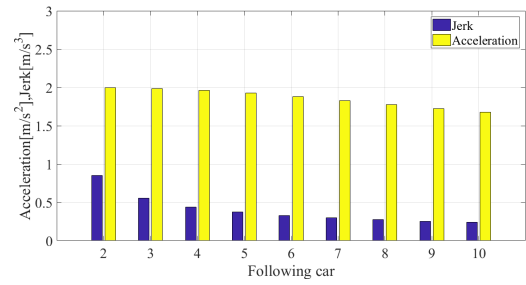


図 11 場面 2:追従車全体のジャーク, 加速度の絶対値

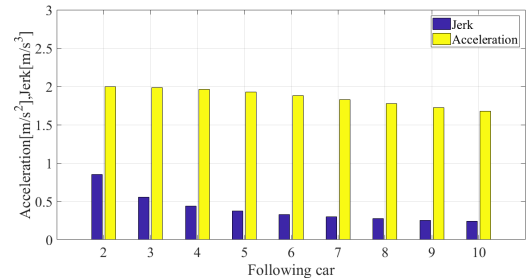


図 12 場面 3:追従車全体のジャーク, 加速度の絶対値

//www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00130002&tstat=000001027457&cycle=7&year=20180&month=0, (最終アクセス日: 2019/10/10(木))

- [2] 王 鋒, 佐川 貢一, 猪岡 光, "自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究", 人間工学 36 巻 4 号, p191-200, (2000)
- [3] Jing Zhou, Huei Peng, "Range Policy of Adaptive Cruise Control Vehicles for Improved Flow Stability and String Stability", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.6, No.2, p229-237, (2005)
- [4] 川邊 武俊, "知的交通システム (ITS) における自動操縦制御-車間距離制御と車群安定性-", 日本機械学会誌, Vol.104, No.989, p42-45, (2001)
- [5] Yao Zhai, Lingxi Li, Glenn R. Widmann, Yaobin Chen, "Design of Switching Strategy for Adaptive Cruise Control under String Stability Constraints", 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, p3344-3349, June 29-July 01, 2011.
- [6] Takuya Kondoh, Tomohiro Yamamura, Satoshi Kitazaki, Nobuyuki Kuge, Erwin Roeland Boer, "Identification of Visual Cues and Quantification of Drivers' Perception of Proximity Risk to the Lead Vehicle in Car-Following Situations", Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, vol.1, No.2, p.170-180, January, 2008.