

渋滞の抑制制御における制御則のロバスト性

2010SE166 大橋敏裕

指導教員：大石泰章

1 はじめに

交通流における渋滞現象は、車両の遅延を誘発し、ドライバーに不快感を与えることで交通事故の引き金となることがある。渋滞現象の理由を解明し、その発生を防止するため様々な研究が行われている。例えば、Bandoらは簡単な追従車両モデルを提案し、それに基づいて渋滞現象の説明を行った [1]。このモデルは最適速度モデルと呼ばれ、それぞれの車両の動特性は最適速度関数に基づいた常微分方程式で表されている。この関数は前車との車間距離に依存した速度関数であり、各車両の速度は最適速度に近づくように調整される。文献 [2][3] では、分散遅延時間制御を用いた渋滞抑制のための制御手法が提案され、渋滞が発生しない条件が与えられている。文献 [4][5] では、ウォッシュアウト制御を用いてドライバーの意図を阻害することなく平衡点に安定化が可能であることが示されている。ただし、最適速度関数におけるドライバーのアクセル・ブレーキ感度がすべてのドライバーに対して一様にある特定の値に固定されている。この値はドライバーによる変化が大きいと考えられ、この値の変化に対する制御則のロバスト性を検討する必要がある。

本研究では、文献 [5] の制御法を拡張し、一様でないアクセル・ブレーキ感度に対するロバスト性の高い制御則を設計する。

2 車両モデル

文献 [5] に従い、 N 台の車両が一車線の半径 r の円周上を反時計回りに走行している状況を考える (図 1)。

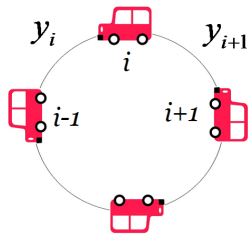


図 1 円周上を走行する車両

$y_i(t)$ は $i-1$ 番目と i 番目の車両の車頭距離である。また、 $v_i(t)$ は i 番目の車両の速度である。このとき、各車両のダイナミクスは

$$\begin{cases} \dot{v}_i(t) = a[F(y_i(t)) - v_i(t)] + u_i(t), \\ \dot{y}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

であるとする。 $a > 0$ はドライバーのアクセル・ブレーキ感度であり、自車の速度 v_i が自車にとって最適な速度 $F(y_i)$ と異なるとき、どのくらいの加速または減速をする

かの比率を表す。 $u_i(t)$ は i 番目の車両に対する制御入力である。 $F(y_i)$ は最適速度関数であり

$$F(y_i) = b \left[\tanh\left(\frac{y_i - y^*}{c}\right) + \tanh\left(\frac{y^*}{c}\right) \right] \quad (2)$$

で与えられ、車頭距離 y_i と平衡状態での車頭距離 $y^* = \frac{2\pi r}{N}$ に依存する関数である。 b と c は最適速度を決めるパラメータである。 $u(t) \equiv 0$ のときの式 (1) の平衡状態は

$$[v_i^* \ y_i^*] := [b \tanh\left(\frac{y^*}{c}\right) \ y^*] \quad (3)$$

であり、各車両の状態がこれに収束することが望まれる。

収束性の解析のため

$$\bar{v}_i(t) := v_i(t) - v_i^*, \quad \bar{y}_i(t) := y_i(t) - y_i^* \quad (4)$$

として、平衡点近傍で式 (3) の線形近似を行う。状態空間表現は

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\bar{v}}_i(t) \\ \dot{\bar{y}}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a\Lambda \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_i(t) \\ \bar{y}_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{i-1} \\ \bar{u}_i \end{bmatrix}, \\ \bar{v}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_i(t) \\ \bar{y}_i(t) \end{bmatrix}, \\ \bar{y}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_i(t) \\ \bar{y}_i(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

となる。ここで

$$\Lambda := \left. \frac{\partial F(y)}{\partial y} \right|_{y=y^*} \quad (6)$$

である。各車両を制御する制御器を全て同一とし

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \alpha \xi_i(t) + \beta y_i(t), \\ u_i(t) = \alpha \xi_i(t) + \beta y_i(t) \end{cases} \quad (7)$$

とする。ここで、 α と β は非零のパラメータであり、全車両が安定になるように適当な値を選択する。平衡状態での車頭距離 y^* は各車両には未知であるので制御器にはこの値を使用していない。ただし、平衡状態に達して $\dot{\xi}_i(t) = 0$ になると、自動的に $u_i(t) = 0$ になるという性質がある。

3 アクセル・ブレーキ感度が一様な場合のロバスト性

制御器を式 (5) に付加したときの閉ループ系の状態方程式は

$$\dot{x} = Ax \quad (8)$$

と表すことができる。 $\bar{\xi}_i(t) = \xi_i(t) - \xi_i^*$ としたとき、

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3N}, \quad x_i = \begin{bmatrix} \bar{v}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{\xi}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (9)$$

である。

ここで、最適速度関数におけるドライバーのアクセル・ブレーキ感度 a の変化が安定性に与える影響を検討する。閉ループ系 (8) が安定であるためには、 a の値の変化に関わらず A 行列の固有値が安定であればよい。ただし、システムの性質上 $\sum_{i=1}^N y_i = 2\pi r$ が常に成り立つので A 行列は必ず零固有値を持つ。この零固有値は除いて考える。 $\alpha = -4.0$, $\beta = 6.0$ としたときの零固有値を除いた A 行列の固有値の実部の最大値と a のグラフを図 2 に示す。図 2 より、 a が (0,1) の区間では閉ループ系が安定であることがわかる。また、 a の値が大きくなってアクセル・ブレーキ感度が増せば単調に安定性が増すのではなく、かえって安定性が減ることもあるのがわかる。

4 アクセル・ブレーキ感度が非一定な場合のロバスト性シミュレーション

3章の例ではドライバーのアクセル・ブレーキ感度をすべて等しくして変化させても閉ループ系の安定性はくずれなかった。本章では、ドライバーのアクセル・ブレーキ感度が車両毎に異なる場合の影響を検討する。全ての車両のドライバーのアクセル・ブレーキ感度を开区間 (0,1) の一様乱数に設定する。 A 行列の固有値のグラフを図 3 に示す。図 3 より、 a の値が車両ごとに異なる場合でも全ての固有値の実部が負なので、閉ループ系は安定であることがわかる。シミュレーションでは、ドライバーのアクセル・ブレーキ感度が車両ごとに異なる場合でも閉ループ系は安定であった。

よりロバスト性の高い制御則の設計のため、制御則の A , B , C , D 行列がそれぞれ異なる場合を考える。制御則を

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \alpha \xi_i(t) + \beta y_i(t), \\ u_i(t) = \gamma \xi_i(t) + \delta y_i(t) \end{cases} \quad (10)$$

とする。 α , β , γ , δ はアクセル・ブレーキ感度 a がどのような値でも安定となるような値を選ぶ。 $\dot{\xi}_i = 0$ のとき、 $u_i(t) = 0$ となるには δ の値が $\delta = \frac{\beta\gamma}{\alpha}$ となればよい。

安定となる α , β , γ , の範囲を図 4 に示す。最も安定となる制御パラメータの一例 $\alpha = -5$, $\beta = 9$, $\gamma = -3$, $\delta = 5.4$ のときのシミュレーション結果を図 5 に示す。 α , β のみの制御則と比べて速度、車頭距離の変化の幅が狭くなり、最悪の場合の安定性を高めることができた。また、

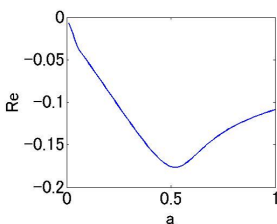


図 2 固有値の最大値

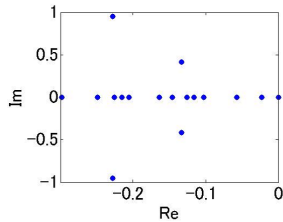


図 3 a が一様乱数のときの固有値

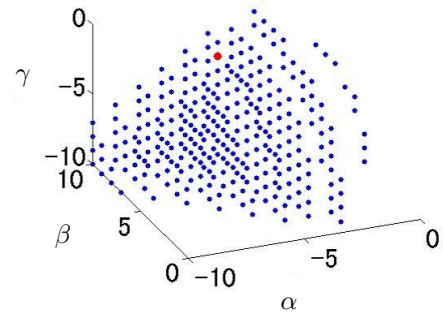


図 4 安定となる α, β, γ の範囲

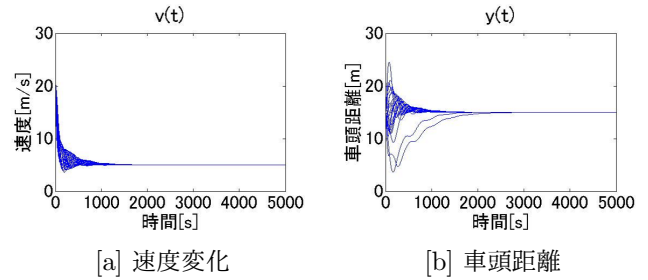


図 5 制御パラメータに $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を用いた際のシミュレーション

収束までの時間も概ね短くなっている。

5 おわりに

本研究では、最適速度モデルにおけるドライバーのアクセル・ブレーキ感度が制御性能にどのような影響をもたらすのかを検討した。検討の結果、 a の値の変化による安定性への影響がわかった。また、渋滞抑制の安定性はドライバーのアクセル・ブレーキ感度の個体差の影響があっても崩れないことがわかった。今後の課題は、現在は総当りで計算している安定となる α , β , γ の範囲をシステムチックに計算することである。

参考文献

- [1] M. Bando et al.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, vol. 51, no. 2, pp. 1035–1042 (1995).
- [2] 小西啓治・小亀英己・平田健太郎: 「最適速度関数を有する離散時間交通流モデルの解析と制御」. 電子情報通信学会技術研究報告予稿集, NLP98–130 (1999).
- [3] 小西啓治・小亀英己・平田健太郎: 「最適速度交通流モデルに生じる渋滞現象とその抑制」. 電子情報通信学会技術研究報告予稿集, NLP99–133 (2000).
- [4] 坂口英嗣・山本茂: Driver Centric Decentralized Controller Design in Traffic Flow. *ICROS-SICE International Joint Confence 2009*.
- [5] 坂口英嗣・山本茂: 「ウォッシュアウト制御によるサイクリックな交通流の渋滞抑制」. 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集 (2011).