九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

集中制御による自動運転車両合流時の挙動円滑化

石井, 貴悠
九州大学

坂口, 聡範
九州大学

山本, 薫
九州大学

https://hdl.handle.net/2324/6791125

出版情報：Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference. 65, pp.588-591, 2022.
The Japan Joint Automatic Control Conference
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

集中制御による自動運転車両合流時の挙動円滑化

○石井貴悠　坂口聡範　山本薫　（九州大学）

Smooth merging for autonomous vehicles by centralized control

∗T. Ishii, A. Sakaguchi, and K. Yamamoto (Kyushu Univ.)

Abstract: This paper studies a merging control problem for autonomous vehicles. We revisit the centralized optimal control method proposed by Rios-Torres and Malikopoulos where an analytical solution is given for an energy-and-space efficient cooperative merging. We first observe that in some practical situations, their method results in sudden acceleration, causing a deterioration in ride comfort. Therefore, we propose several modifications to their method to smoothen the behavior in these situations. Numerical examples demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Cooperative vehicle merging, optimal control

1　はじめに

自動車の合流操作を苦手とする運転者は多く，交通事故や渋滞の要因となっている．近年では，運転支援技術の向上により，車線変更支援システムが提供されているが，走行環境によっては十分に機能を発揮できない．特に，高速車線では，車載センサによって検知困難な遠方の交通情報に基づき車両制御を行う必要がある [1]．実際に，合流部において車線別の車両位置・速度，車間距離等の情報を収集・解析・提供するシステムの実証実験も行われている [2]．

自動車の合流問題の研究としては，さまざまなアプローチが存在する．文献 [3] では，混合整数計画法を用いたモデル予測制御による合流経路生成法が提案されている．混合整数計画問題の実行可能性の解析により，合流が成功するかどうかという新しい情報を利用できる．しかし，各ステップで最適化問題を解く必要があり，計算負荷が大きい．文献 [4] では，合流区間の手前に集中制御を行う区間を設定した合流問題における制御手法が提案されている．制御入力の解析解が得られており，計算負荷が軽減できる．しかしながら，車両が大きく離れて侵入した場合や速度差により車両の順番が入れかわる場合，加速度が変動が大きいため，乗り心地が悪化する．したがって，本研究では文献 [4] の問題点に着目し，合流時の挙動を円滑にすることを目的とする．

2　問題設定

本研究では，文献 [4] の問題設定に基づき，Fig. 1 に示すような高速車線と低速車線を走行する複数台の車両の合流問題を考える．2 つの車線が交わる長さ L_m の合流ゾーン，その手前に長さ L_c の制御ゾーンを設ける．制御ゾーンに進入した順に，各車両に ID として

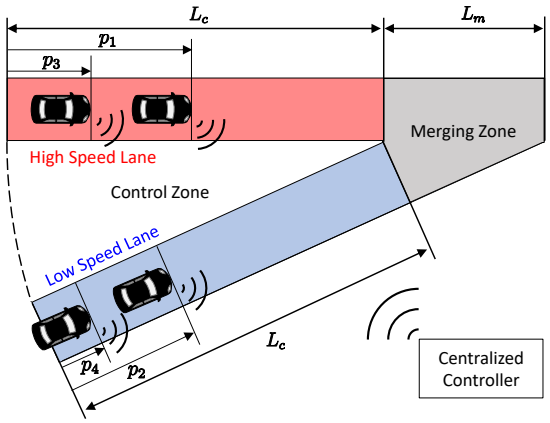

Fig. 1: Merging and control zones with connected and automated vehicles controlled by a centralized controller.

i を割り当てる．ある時間 t における車両の ID 集合を $\mathcal{N}(t) = \{1, \dots, N(t)\}$ とする．ここで，$N(t) \in \mathbb{N}$ は制御ゾーンに進入した総車両数を表す．制御ゾーン内に車両が存在しなくなれば，$\mathcal{N}(t)$ をリセットする．$N(t)$ 台の車両のうち制御ゾーン内の車両を集中制御することで，合流ゾーンでの渋滞を抑制し効率的な合流を目指す．また，衝突を避けるために，合流ゾーンに入れる車両数は 1 台のみとし，合流ゾーン内での速度は一定とする．

各車両 i のダイナミクスを次のように表す．

$$\dot{x}_i = f(t, x_i, u_i),\ x_i(t_i^0) = x_i^0 \tag{1}$$

ここで，$t \in \mathbb{R}^+$ は時間，$x_i(t), u_i(t)$ は車両 i の状態と制御入力，t_i^0 は車両 i の制御ゾーン進入時間，x_i^0 は車両 i の初期状態である．本稿では，簡単のため各車両

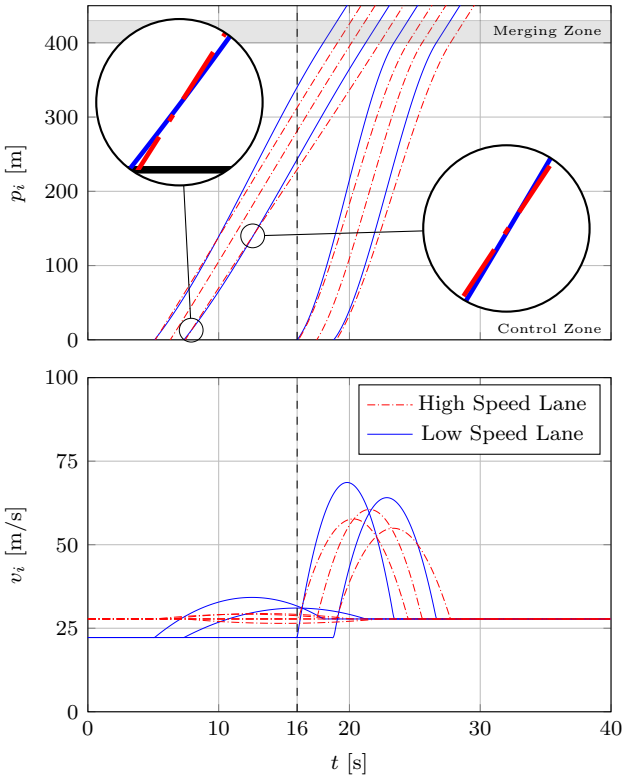

Fig. 2: Position and velocity of the vehicles using the original method with $t_1^m = 18$ [s].

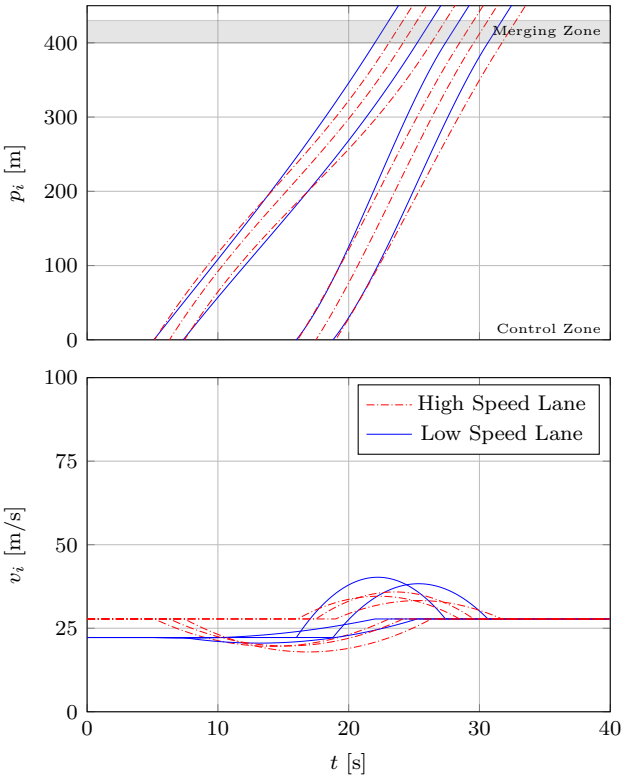

Fig. 3: Position and velocity of the vehicles using the original method with $t_1^m = 22$ [s].

は以下の 2 次のダイナミクスを満たすと仮定する．

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= v_i(t) \\ \dot{v}_i &= u_i(t) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，$p_i(t), v_i(t), u_i(t) \in \mathbb{R}$ は車両 i の位置，速度，加速度（制御入力）である．

最適制御入力

文献 [4] では，同様の問題設定で各車両が制御ゾーン進入時間 t_i^0 から合流ゾーン進入時間 t_i^m までの間に，渋滞緩和のために車間距離を縮めながら，制御入力を最小化する合流問題を考えている．そのような合流問題を次式の最適化問題として定式化している．

$$\begin{aligned} \min_{u_i} \quad & J(u_i) \\ \text{subject to } & (2),\ {}^\forall i \in \mathcal{N}(t) \end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$J(u_i)$ は次の評価関数である．

$$J(u_i) = \frac{1}{2} \int_{t_i^0}^{t_i^m} u_i^2 dt \tag{4}$$

合流ゾーン進入時間 t_i^m は次のように与えられる．

$$t_i^m = t_i^f - \frac{L_m}{v_i(t_i^f)} \tag{5}$$

ここで，t_i^f は車両 i の合流ゾーン退出時間である．車間距離を縮めるには，車両 i が車両 $i-1$ とちょうど安全距離 $\delta \geq L_m$ だけ離れて合流ゾーンに進入すればよいので，次式が得られる．

$$t_i^m = t_{i-1}^m + \frac{\delta}{v_i(t_i^f)} \tag{6}$$

ここで，δ は車両同士が衝突しないための安全距離である．上式において，$\delta = L_m$ のとき $t_i^m = t_{i-1}^f$ となり，前方の車両が合流ゾーンを退出したと同時に進入する．

(3) 式の最適化問題の解析解が次式で与えられることが示されている [4]．

$$u_i^*(t) = a_i t + b_i \tag{7}$$

ここで，a_i, b_i は車両 i に対応する定数であり，次式より求めることができる[1]．

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{6}t^3 & \frac{1}{2}t^2 & t & 1 \\ \frac{1}{2}t^2 & t & 1 & 0 \\ \frac{1}{6}(t_i^m)^3 & \frac{1}{2}(t_i^m)^2 & t_i^m & 1 \\ \frac{1}{2}(t_i^m)^2 & t_i^m & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i(t) \\ v_i(t) \\ p_i(t_i^m) \\ v_i(t_i^m) \end{bmatrix} \tag{8}$$

文献 [4] では，t_1^m は任意に与えることができるとされている．

[1] 文献 [4] では (8) 式の第 3 列および 4 列が t_i^f により与えられているが，文脈および文献 [5] より，t_i^m の誤りであることが明らかである．

考察

ここでは，シミュレーションにより，文献 [4] で求められた最適制御入力 (7) を用いたときの問題点について述べる．シミュレーションでは，制御ゾーンの長さを $L_c = 400$ [m]，合流ゾーンの長さを $L_m = 30$ [m]，車間距離を $\delta = L_m$，高速車線速度を 100 [km/h]，低速車線速度を 80 [km/h] とする．

はじめに，車両 1 の合流ゾーン進入時間を $t_1^m = 18$ [s] としたときの各車両の位置 p_i，速度 v_i を Fig. 2 に示す．$t = 16$ [s] に制御ゾーンに進入する車両に注目すると，急激な加速が生じている．これは，制御ゾーン進入時に前の車両から大きく離れている状態で，(6) 式の条件を満たそうとしたためである．また，4, 5 台目に注目すると，制御ゾーン内で 2 度順番が入れ替わっている．これは，順番が入れ替わったにもかかわらず，ID の順番で退出しようとしたためである．このような状況では，高速車線車両は加速，合流車両は減速することで，エネルギーロスが生じる．

次に，$t_1^m = 20$ の場合のシミュレーションを Fig. 3 に示す．Fig. 2 と Fig. 3 を比較すると，t_1^m を変更したことにより，Fig. 3 では速度の変動が抑えられていることがわかる．t_1^m は全体の挙動に影響を与えるパラメータであり，適切に設定することが必要である．

最後に，文献 [4] の問題点についてまとめると，次の 3 点があげられる．

1. 離れて進入した際の急加速．
2. 速度差による順番の入れ替わり．
3. 適切な車両 1 の合流ゾーン進入時間 t_1^m の設定．

3 提案手法

本節では，前節で述べた 3 つの問題点に関して改善策を提案する．

3.1 車両 i の合流ゾーン進入時間 t_i^m（提案手法 1）

車両 i の合流ゾーン進入時間 t_i^m は，(6) 式により，渋滞緩和を目的として前方の車両が合流ゾーンを出ると同時に合流ゾーンに入るよう設定していた．しかし，初期状態，すなわち，制御ゾーン進入時の前方の車両との車間距離を考慮しておらず，車間距離が大きい場合急激な加速を引き起こす．そこで，安全距離 δ と実際の車間距離の差に応じて t_i^m を変更する．

$$t_i^m = \begin{cases} t_{i-1}^m + \dfrac{\delta}{v_i(t_i^f)} & \text{if } \Delta p \le \delta \\ t_{i-1}^m + \dfrac{\delta}{v_i(t_i^f)} + k_l \dfrac{\Delta p - \delta}{v_i(t_i^f)} & \text{if } \Delta p > \delta \end{cases} \tag{9}$$

Table 1: Values of the evaluation function (4) for each method

Method	$J(u_i^*) \times 10^4$
Original method [4]	215
Proposed method 1	18
Proposed method 2	214
Proposed method 3	80
Proposed methods 1,2, and 3	7

ここで，$\Delta p = p_{i-1}(t_i^0) - p_i(t_i^0)$ は時間 t_i^0 における車両 i と車両 $i-1$ の車間距離である．また，$k_l > 0$ は定数であり，任意に決めることができる．

3.2 ID の動的割り当て（提案手法 2）

ID は制御ゾーンに入った順に割り当てられる．文献 [4] では，全車両が等速である場合，$i < k,\ i, k \in \mathcal{N}(t)$ のとき $p_i > p_k$，つまり ID が合流ゾーンまでの近さの順番を表していた．しかし，速度差がある場合，低速車線の車両のすぐ後に高速車線車両が進入すると $p_i > p_k$ が成り立たない場合がある．そのような状況では，高速車線車両は加速し，合流車両は減速することで，エネルギーロスが生じる．そこで，順番が入れ替わる場合は，ID の入れ替えを行う．したがって，車両 j と車両 k の順番が入れ替わる場合，入れ替わり後の合流ゾーン進入時間は次式となる．

$$\begin{cases} t_{j'}^m = t_j^m \\ t_{k'}^m = t_k^m \end{cases} \tag{10}$$

ここで，j', k' は順番の入れ替え後の車両 ID である．

3.3 車両 1 の合流ゾーン進入時間 t_1^m（提案手法 3）

車両 1 の合流ゾーン進入時間 t_1^m は，集合 $\mathcal{N}(t)$ がリセットされるたびに与えなければならない．t_1^m の値によっては急加速が発生するなど，車両の挙動に悪影響を与える可能性がある．したがって，適切に t_1^m を設定する必要がある．そこで，制御ゾーン進入時間 t_1^0 と高速車線速度より，合流ゾーン進入時間 t_1^m を次のように与える．

$$t_1^m = t_1^0 + \frac{L_c}{v_1(t_1^f)} \tag{11}$$

4 数値シミュレーション

本節では，シミュレーションによる従来手法と提案手法の比較を行い，本提案手法の有効性を確認する．文献 [4] の従来手法，提案手法 1，提案手法 2（$k_l = 0.5$），提案手法 3，提案手法 1,2,3 を用いたときの評価関数 (4)

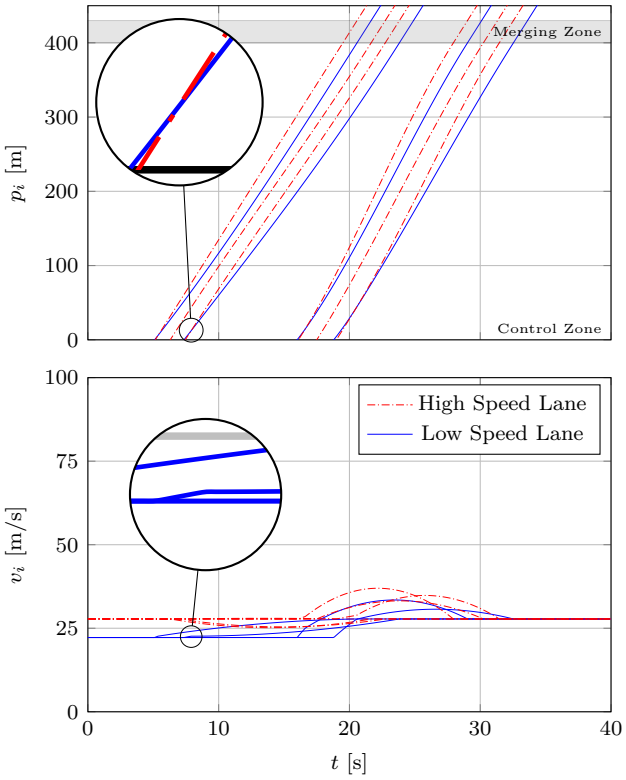

Fig. 4: Position and velocity of the vehicles using the proposed methods 1,2, and 3.

の値を Table 1 に示す．文献 [4] の従来手法，提案手法 2，提案手法 3 では，$t_1^m = 18$ [s] とした．各提案手法を用いることで，従来手法よりも評価関数の値を減少できている．さらに，すべての提案手法 1,2,3 を組み合わせることで，エネルギーロスを大幅に削減できている．このときの車両位置 p_i，速度 v_i の過渡応答を Fig. 4 に示す．Fig. 2 と Fig. 4 を比較すると，提案手法 1 により，離れて進入した 6 台目以降の車両の合流ゾーン進入時間 t_i^m を車間距離に応じて変更することで，加速が軽減されている．提案手法 2 により，順番の入れ替わりが起きた際に ID が変更されることで加速が低減されている．提案手法 3 により，1 台目が大きな加減速なく走行できている．

一方で，新たな問題も生じている．Fig. 4 の速度の時間変化の拡大図を Fig. 5 に示す．最初に進入したグループの高速車線を走行する車両に注目すると，減速が起きており渋滞の原因になると考えらえれる．これは，提案手法 1 により t_i^m が少しずつ遅れていくためだと考えられる．この現象は，多くの車両がまとまって制御ゾーンに進入した際に生じやすい．

5　おわりに

本研究では，自動運転車両合流時の挙動円滑化のための手法を提案した．数値シミュレーションによる文

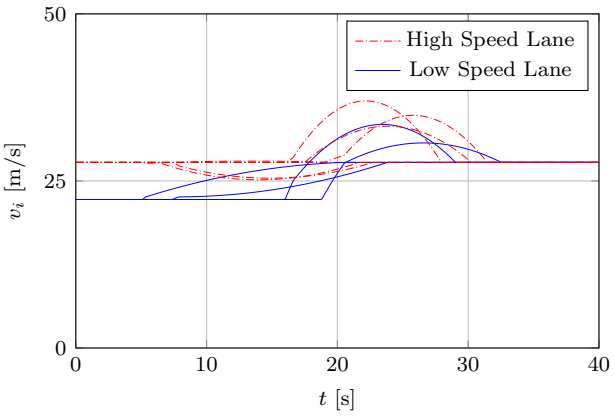

Fig. 5: Velocity of the vehicles using the proposed methods 1, 2, and 3.

献 [4] の手法との比較から，安全に合流を行いながら加速度の変動が抑制できることを示した．しかしながら，高速車線と低速車線の速度差が小さく，まとまって進入する際には後方の車両において減速が起きる場合がある．今後は，提案手法 1 の閾値や定数 k_l の調整による改善を検討し，様々な条件での有用性を検証していきたい．

参考文献

[1] 自動運転社会における道路の方向性（国土交通省）(https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001447855.pdf)

[2] 合流支援情報提供システム（DAY2　システム）の効果検証実験（国土交通省）(http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20220310_2.pdf)

[3] 向井正和，野口凌介，川邊武俊：混合整数計画法を用いたモデル予測制御による 1 車線道路への合流経路生成；計測自動制御学会論文集，Vol. 52，No. 11，pp. 625–630 (2016)

[4] J. Rios-Torres and A. A. Malikopoulos: Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps; *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 780–789 (2017)

[5] A. A. Malikopoulos, C. G. Cassandras, and Y. J. Zhang: A decentralized energy-optimal control framework for connected automated vehicles at signal-free intersections; *Automatica*, Vol. 93, pp. 244–256 (2018)