

自動運転手動運転車両混在時の丁字路交通流の改善手法

鈴木暁仁^{†1} 鈴木孝幸^{†1} 清原良三^{†1}

概要：自動運転に関する研究開発が盛んに行われ、2020年には法律の改正もあり、公道を自動運転車両が走ることが間近になってきた。自動運転車両による安全性を守った上での交通流の円滑化が期待されている。最も期待されるのが、信号のない交差点で安全にしかも円滑な交通の流れを実現することである。本論文では、信号機を使うより、人のアイコンタクトの方がスムーズになる代表的な丁字路を利用し、自動運転車両が普及するとどのようになるかをシミュレーションにより確認し、さらなる改善手法を検討した。自動運転の導入で円滑にはなるものの、歩行者の存在などを入れた場合を想定し、効率的な信号制御方式の導入を提案する

キーワード：交通流、自動運転、混在環境、丁字路

Improved Method of Traffic Flow at T-Junction in the Transient Stage of Autonomous Vehicles

AKIHITO SUZUKI^{†1} TAKAYUKI SUZUKI^{†1}
RYOZO KIYOHARA^{†1}

1. はじめに

自動運転車両は安全性と交通流の改善、輸送効率性の向上などを目的とし、近年盛んに研究・開発が行われている。自動運転は、米国 Society of Automotive Engineers(SAE)や日本政府などにより表1に示すように5段階のレベル分けがされている[1]。

現在自動車メーカ各社は自動運転レベル2即ち、運転支援機能を搭載した自動車の販売・実用化をしている。2020年に日本では法改正により、レベル3の自動運転車が公道で走行することが可能となった[2]。

従って、各社はレベル3を搭載した自動車の販売を検討している。しかし、自動運転車両の普及には長い年月がかかるとされており、相当期間の自動運転普及過渡期が存在すると考えられ、道路上に人間が運転する手動運転車両とシステムが運転制御を行う自動運転車両が混在する環境が生じる。そこでシステムと人間の運転挙動の違いを考慮しなければ、自動運転車による恩恵を十分に受けられないことが明らかになっている[3]。

自動運転と手動運転の混在環境には、自動車の合流問題など数多くの研究がある[3][4]ものの、仮定が不十分である場合や、一定の形状に関して局所的に有効であるなど多くの課題がある。本論文では、文献[3]で扱う丁字路の中でも自動運転車両の導入が適していると思われる優先路が丁字に曲がる場合を対象とした。文献[3]の手法ではうまくいか

ない場合に当たる。

具体的には、図1に示す神奈川県鎌倉市にある小袋谷の交差点は、自動運転車に適していると考えられる。図1の交差点では人が譲り合いによって自動運転車のように最適化が行われているためである。実際には、信号機は設置されており、過去にも信号機の運用を実施したが、交通渋滞が激しくなるだけであり、現在は点滅信号にしており、人が

表1 SAEによる自動運転レベル分けの定義
(出典) 官民 ITS 構想・ロードマップ 2017[1]

レベル	概要	安全運転に係る監視、 対応主体
運転者が全てあるいは一部の運転タスクを実施		
SAE レベル0 運転自動化なし	・ 運転者が全ての運転タスクを実施	運転者
SAE レベル1 運転支援	・ システムの前後・左右の両方の車両制御に係る 運転タスクのサブタスク実施	運転者
SAE レベル2 部分運転自動化	・ システムが前後・左右の両方の車両制御に係る 運転タスクのサブタスクを実施	運転者
自動運転システムが全ての運転タスクを実施		
SAE レベル3 条件付運転自動化	・ システムのすべての運転タスクを実施 (限定領域内) ・ 作動継続が困難な場合の運転者は、システムの 介入要求等に対して、適切に 대응することが 期待される	システム (作動継続が困難な 場合は運転者)
SAE レベル4 高度運転自動化	・ システムが全ての運転タスクを実施 (限定領域内) ・ 作動継続が困難な場合、利用者が応答すること は期待されない	システム
SAE レベル5 完全運転自動化	・ システムが全ての運転タスクを実施 (限定領域内ではない) ・ 作動継続が困難な場合、利用者が応答すること は期待されない	システム

^{†1} 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

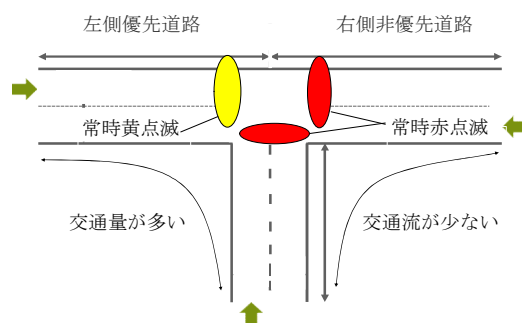


図1 神奈川県鎌倉市小袋谷交差点

注意して譲り合いを実施している。そのため事故も多く、歩行者もいるため危険な状態である。

そこで、自動運転車が混在時に次のような影響があるため着目した。自動運転車が交差点に進入する時、自動運転車は効率性を重視するため、最低限の車間距離で進入すると考えられる。その時優先道路を走行する車両が手動運転車だった場合、車間距離が短いことに危険を感じてブレーキを踏むことが予想される。それが連鎖的に発生し渋滞の恐れがあるなど、影響をしっかりと把握する必要がある。本論文では改めてシミュレーションにより課題を認識し、問題があればその解決手法を検討することとした。

2. 関連研究

信号機や交通標識などの現在の交通制御方式は人間のドライバーが使用することを前提に設計されており、自動運転システムが利用することは考慮されていない。和久井らは見通しの悪い交差点での車車間通信・路車間通信を利用した交差点通行方式が提案されており、シミュレータ上での実験によってその有効性を示している[5]。しかし、この実験では全ての車両が通信可能な車両、すべての車両が通信不可能な車両の場合を比較したものであり、普及過渡期を想定していない。

Dresner らは既存の交通制御方式では自動運転が普及した後の交通流の改善効果が十分に発揮されないとして、新たな交差点制御方式を提案し、シミュレータを用いてその有効性を示している[6]。この手法では、車両が交差点を通過する際に事前に交差点管理システムに対して交差点を通過するための要求を送信し、交差点の通過が可能である場合には交差点管理システムは $n \times n$ のブロックに分割した交差点の予約を行うとともに予約が受理されたことを示すメッセージを車両に送信し、完了する。車両は通過するブロックの予約をすることで、予約ブロックが重複しない限り安全な交差点での交通流が可能であるとしている。

Quinlan らは実際の自動運転車両を用いて Dresner らの手法の評価を行う新たなプラットフォームの開発を行い、

評価実験を行っている[7]。実験の結果、予約時に推定される交差点への到着時間と到着速度の推定精度が悪い場合には予約がキャンセルされることとなり、時間の損失が発生することが明らかになっている。

本節で述べた研究はどれも自動運転レベルが4以上の人間が介入することのない自動運転車両であると考えられる。そのため、本研究で問題としている自動運転車両の普及期で自動運転レベル1から5までが道路上に混在している状況においては有効であるとはいえない。緊急時に人間の介入が必要な自動運転レベル3までの車両では、いくらシステムが効率の良い提案をしたとしても人間が不信感や違和感を覚え、許容できずに提案を拒否や不安からブレーキを踏んでしまうことなどが考えられる。それにより提案手法による効果が十分に発揮されない可能性がある。

例えば、Dresner らの交差点予約システムのような予約ベースの手法[6]では、一台でも予約を拒否する車両が存在すれば、予約に関わった車両やその周辺の車両に影響を与えかねない。このような人間ドライバーの介入が必要な車両と自動運転車両の混在環境でのそれぞれが与える影響を考慮した手法の提案が必要である。

そこで、我々は、自動運転車両普及期における人間の運転と自動運転システムの違いによる交通流の影響を想定した交差点進入プロトコルを提案している[3]。このプロトコルでは安全性を第一としながら、交差点への進入機会を増やすための通信プロトコルと進入機会を得るための車間距離の調整方法を提案している。先行研究で使用された道路モデルを図2に示す。図2では左右に非優先道路が交差点から外側に1000m伸びている。道路の優先度から、非優先道路から交差点に接近してきた車両は交差点の直前で一時停止をする。一時停止したドライバーは左右の確認をする想定として3秒間停止する。制限速度は優先道路も非優先道路も40[km/h]となっている。ただし、非優先道路から優先道路へ進入する際は徐行運転を想定し、20[km/h]で進入することを想定している。各車両は矢印方向から交差点に向かい走行する。使用された交差点には信号機は設置されていない。よって、中央非優先道路を走る車両は交差点に

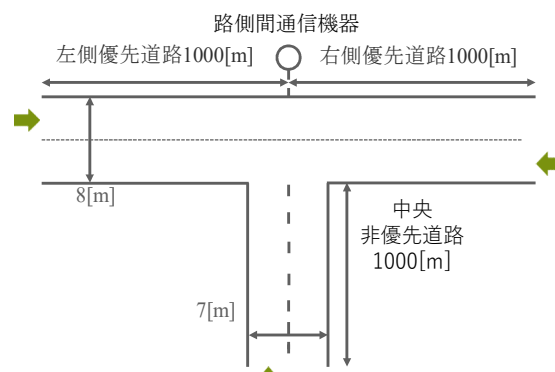


図2 道路モデル

進入する際に優先道路を走る車両に進入交渉をする必要がある先行研究で使用された進入交渉の際の通信プロトコルを図 3 に示す。交差点への進入依頼は交差点の障害物を考慮して、交差点に設置される路側器を介して路車間通信で行われる。

通信規格は ARIB STD T109 が使用され、T109 の規格ではユニキャスト通信が不可能であるため、すべてブロードキャスト通信を行うことが想定されている。提案手法では、交差点で一時停止をしないように速度を調整し、進入依頼を受信した優先道路の車両は、非優先道路の車両のために減速によって進入距離を確保する。

先行研究は自動運転車両の混在環境において優先道路を走行する自動運転車両の割合が 50%以上の時に交差点待機時間を大きく削減させたことが確認されている。先行研究ではとくに自動車の動作を示す車両モデルも可能な限り現実に近いモデルを選択することにより、現実に近いシミュレーションを実施し、評価指標としては渋滞長、すなわち、渋滞中の最大車両数および旅行時間の両方を測定し、非優先道路の渋滞長を減らしながらも、優先道路を走る車の旅行時間への影響がでないことを示している。優先道路の旅行時間に関しては、提案手法の適用の有無にかかわらず自動運転車両の走行性能から、旅行時間が削減されていることが確認された。先行研究では非優先道路の旅行時間に影響を与えないことが確認されたが、図 1 のような交差点を考慮していない。

3. 提案手法

図 1 に示すような丁字路交差点を想定し、自動運転車の通信機能を利用し、信号機と通信を行わせ信号制御を行う。即ち、自動運転車両は、路車間通信を行うことにより、信号の情報および周辺車両が自己車両を認識しているかどうかを知ることができる。一方、手動運転車両は信号でのみ周辺車両がどう動作するかを知ることができる。

従来はすべての車両が注意しながら譲り合いで通行していたが、これを適切に公平性を保って通行を指示する信

号機に変更する。従来は固定の信号機であると、通行量に関わらず一定の周期となるなどがあり、信号機を運用した方が渋滞が多かったが、これを動的に適切に変更する提案である。

信号機の色が変わるといった情報を通信によって送ることで自動運転車は準備できるが、手動運転車は目視で相手の車両が飛び込んでくるかの確認する必要がある時間差が生じる。そのため、信号機の色が変わる時間の変更はそれほど頻繁にできず、最低時間は確保が必要となる。最も従来と異なるのは、優先道路方向はかなりの確率で青信号になることになると推定できる。

本研究では制限速度はすべての道路で 40[km/h]とした。ただし、交差点進入時には徐行運転を想定し 20[km/h]とした。各車両は矢印の方向から各交差点に接近する。車両は IDM モデルを利用し、次の式 (1) と式 (2) から安心安全を考慮した計算式である [8]。

$$iTTC = 1/TTC = RV/RD \quad (1/s) \quad (1)$$

$$F = a \times iTTC \times VI + b \times (1/RD^2) \quad (2)$$

安心安全を考慮した式ではリスク認知と関係する衝突余裕時間(Time-To-Collision, TTC) の逆数である $iTTC$ となり、 RV は相対速度、 RD は相対距離、 VI は後続車両速度、 a 、 b は定数となっている。車両モデル定義を表 1 に示す。

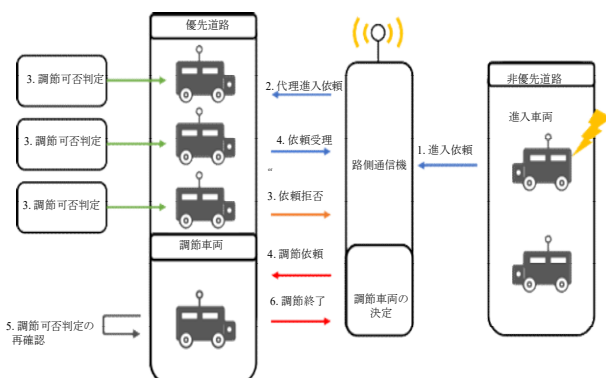
自動運転普及期の混在環境と自動運転車両・手動運転車両のみの環境を想定して実験を行うため、自動運転車が混在時の両車両比率を表 2 に示す。また、信号機の色が変わる時間を 10 秒から 2 秒ごとに増加させることとする。

表 1 各車両モデル

	交差点進入時 車間距離	追従走行時 速度	信号機通信
自動運転車	式 (2)	IDM モデル	可
手動運転車	式 (2)	IDM モデル	不可

表 2 実験における自動運転手動運転車両比率

パターン	自動運転車両[%]	手動運転車両[%]
A	50	50
B	60	40
C	70	30
D	80	20
E	90	10



4. 実験・評価

シミュレーションではネットワークシミュレータ Scenargie[9][10] のMulti-AgentExtensionModule および路車間通信には、ITS機能を使用して同時にシミュレーションを実施した。実験のプロパティを表3に示す。

実験結果を図4、図5に示す。図4、図5の縦軸は、旅行時間の秒数を示す。横軸は信号の色の変わる時間を2秒ごとに示している。

図4と図5から自動運転車の割合が増えると旅行時間が減っているのが分かり、交通流が円滑になっていることが確認することができた。

図4では、信号機の色が変わる時間が12秒の時では、A,B,Dのパターンの旅行時間が減少し、少し円滑になったといえる。信号の色が変わる時間が18秒の時では、A,B,D,Eのパターンが減少し、D,Eのパターンの旅行時間は、ほかの時間に比べて一番下がったことを確認することができた。

図5では、全体的に上昇していくことがわかる。また、図4と違い信号の色が変わる時間が12秒の時に特にB,C,D,Eのパターンの旅行時間が増えている。信号の色が変わる時間が18秒の時にB,D,Eのパターンが多少下がるのが分かった。

この結果から信号の色が変わる時間として12秒と18秒が適切だと考えられるが、人の通行のことも考慮すると、連続して手動運転車両が来る場合や、非優先道路の手前にも信号を配置すると、非優先道路からの車両もランダムではないはずであり、これらのことも今後考慮する必要がある。

5. おわりに

丁字路での自動運転車両通行時の課題に関して、既存の手法では、神奈川県内の最も問題となっている丁字路の解決にならないことに着目し、その改善手法を検討した。その自動運転手動運転車両混在時の丁字路交通流の改善の提案手法の前段階を行った。実験結果よりどの信号の色の変化時間が適切かを確認した。今後は、信号の色の変化が12秒と18秒の時を基本として信号機の制御を行っていき、交通流の最適化を行う予定である。

参考文献

- [1] 日本政府官邸, “官民 ITS 構想・ロードマップ 2017,” <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/roadmap.pdf>
- [2] 警察庁, “改正道路交通法の概要,” <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/selfdriving/trafficact.pdf> (2020/10/27 参照)
- [3] 古川義人, 清原良三: 自動運転車両の普及過渡期における非優先道路から優先道路への進入待機時間の削減手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, 1809-1817, 2017.
- [4] Yusuke Nishimura; Atsushi Fujita; Akihito Hiromor, etc. “Yusuke Nishimura; Atsushi Fujita;

表3 実験における各パラメータ

プロパティ名	シナリオ	
シミュレーション時間	3600[s]	
制限速度	40[km]	
歩行者	考慮しない	
車両台数	300[台]	
車両の発生間隔	指数分布	
車両の各道路出現台数	右側非優先道路から出現 左折 25 台, 直進 25 台	左側優先道路から出現 右折 70 台, 直進 30 台
	中央道路から出現各 100 台	ランダム 50 台

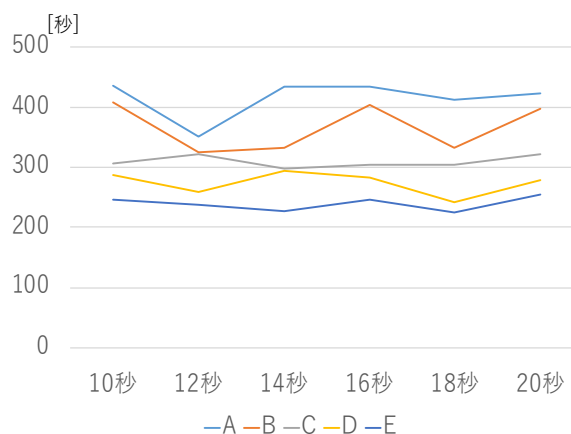


図4 左優先道路の平均旅行時間

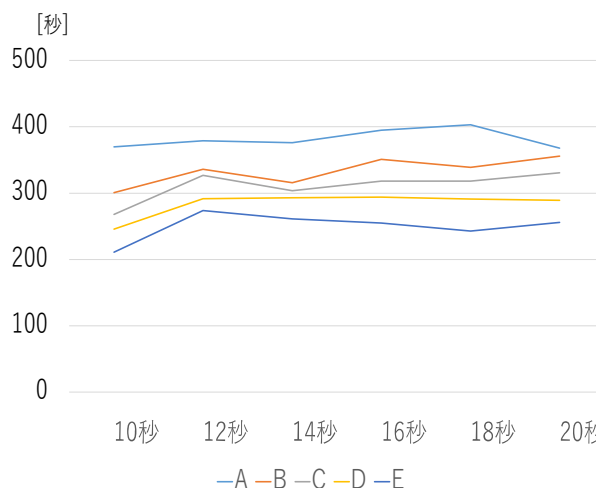


図5 中央道路の平均旅行時間

- Akihito Hiromori,” IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom) pp. 212-219, 2019.
- [5]和久井祐太, 大野光平, 伊丹誠: 車車間・路車間通信を用いた交差点における渋滞軽減に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.111, pp.43-48, 2011.
- [6]Dresner Kurt, Stone Peter: A multiagent approach to autonomous intersection management, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.31, pp.591 -656, 2008.
- [7] Michael Quinlan, Tsz-Chiu Au, Jesse Zhu, Nicolae Stiurca, Peter Stone: Bringing simulation to life: A mixed reality autonomous intersection, Intelligent Robots and Systems, 2010 International Conference on IEEE, 2010.
- [8] 森田 和元, 田中 信壽, 安本 まこと, 青木 義郎: ドライバのブレーキ踏力アルゴリズムの提案, 自動車技術会論文集, Vo. 42, No. 5, 2011.
- [9] Mineo Takai, Jay Martin, Shigeru Kaneda, Taka Maeno: Scenargie as a Networking Simulator and Beyond, Journal of Information Processing, Vol.27, pp.2-9, 2019.
- [10]大和田泰伯: ネットワークシミュレータの車車間通信システムモデルの機能と実行性能の比較, 情報処理, Vol. 51, No. 1, 2001.