

自動運転車両普及期における適切な交通流実現手法の検討

古川義人^{†1} 清原良三^{†2}

概要: 自動運転普及期には、一部の車両は車車間や路車間通信が利用できない。そのため、すべての車両が自動運転車両であると想定した場合は交通の流れが異なる可能性が高い。さらに、自動運転車両の動作を信用しきれていないドライバは自分の運転感覚と異なるだけで、車両の制御を車に任せず自分で制御することが十分考えられる。結果として想定外の問題が発生する可能性がある。そこで、本提案ではそのような車両を想定したうえで、安心して運転できる環境を実現する手法を検討し、シミュレーションにて評価する。

キーワード: ITS, 交通流改善, 車車間・路車間通信, マルチエージェント

A Study to implement the Method for Improving traffic flow in the Mixed environment of Autonomous and Non-Autonomous vehicles

HIROTO FURUKAWA^{†1} RYOZO KIYOHARA^{†2}

Abstract: A part of vehicles may not use Inter-vehicle or Inter-road communication in the mixed environment. Therefore, the traffic flow in mixed environment is not better than the environment all vehicles are autonomous. In addition, we considered that the unreliable drivers for autonomous vehicle's behavior will operate them self because of the difference about their driver sense. As the result, unexpected problems may occur. In this paper, considering with such driver, we considered a method for realizing the environment that driver can drive safely and evaluate by simulation.

Keywords: ITS, Traffic Flow, Inter-Vehicle Communication, Inter-road Communication

1. はじめに

交通流の改善, 事故の削減を目的として ITS(Intelligent Transport System)の研究が進められている。日本国内では2020年までに交通事故死者数を2500人以下にすることを目標としている[1]。その中でも特に自動運転技術に対する期待は大きい。例えば操縦の自動化や車車間通信, 路車間通信は, 人為的なミス削減や運転の効率化が期待されており, その普及に先立ち様々な研究・開発がされている[2]。

自動運転技術は, 表1に示すように機能を段階的に分割したレベルが定義されている。また, 表2に示す自家用車におけるレベルごとの市場化期待時期によると2020年以降急速に自動運転レベルの向上が期待されていることが分かる[1]。ところが平成29年度の自動車の車種別平均使用年数の推移によると, 乗用車で12.91年と長期化していることから[3], 自動車の購入タイミングによって, 機能差を持つ車両が混在する環境(以後混在環境と省す)が生じると予測できる。

混在環境下において予測される問題の例を挙げる。自動運転技術を代表する技術の一つにCACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)がある。これはもともとACC(Adaptive Cruise Control)と呼ばれる前方車両との車間

表1 自動運転技術のレベル別定義

Table 1 Definition of the autonomous technology level

レベル	概要	操作主体
レベル0 手動運転	運転者がすべてのタスクを実施	人間
レベル1 運転支援	前後・左右いずれかの車両制御のサブタスクをシステムが実施	人間
レベル2 部分運転自動	前後・左右両方の車両制御のサブタスクをシステムが実施	人間
レベル3 条件付き 自動運転	システムがすべての運転タスクを実施。緊急時は人間が介入	システム 人間
レベル4 高度自動運転	システムがすべての運転タスクを実施。緊急時の人間介入なし	システム
レベル5 完全自動運転	システムがすべての運転タスクを実施。人間の操作は一切なし	システム

表2 自家用車にみる自動運転技術市場化期待時期

Table 2 The market expected time of autonomous vehicle

レベル	見込まれる技術	市場期待時期
レベル2	準自動パイロット	2020年まで
レベル3	自動パイロット	2020年目途
レベル4	高速道路での完全自動運転	2025年目途

^{†1} 神奈川工科大学大学院
Graduate School of Kanagawa Institute of Technology

^{†2} 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

距離をセンサによって制御するシステムに車車間通信を応用して、より高精度に車間距離を制御可能にしたシステムである。そのため CACC 使用時に前方車両の追従時に設定した車間時間は、ACC 使用時に比べて 1/2 以下を示したという報告もされている[4]。つまり、CACC は車車間通信が前提の機能であるが、混在環境下でこれを使えない車両が存在していた場合、CACC の機能がそもそも使用できないことが考えられる。また、自動運転技術がいよいよ本格化されるレベル2や3では、自動運転技術の高度化の一方で、操作主体を人間とすることがある(レベル3は緊急時のみ)。この場合、システムが安全と判断した行動と、乗車するドライバーの操作感覚の違いから不用意な行動をとることで、かえって交通流に悪影響を与えることが予測される。また、上記のように、自動運転技術に期待される効果が得られない場合、これを期待して自動車を購入したユーザの評価、や世間的な自動運転技術への評価が低下してしまう可能性もある。

本論文では、今後生じることが予測される混在環境において、自動運転技術がどのようにふるまうことで、これまでの交通流に影響なく、かつ効果的な挙動をとることができるかを検討し、交通流の改善のための手法を提案した。実験では混在環境を想定して、機能による車両の定義を行い、これをマルチエージェントシミュレーションによって評価した。その後、混在環境下における問題点の発見と問題点を考慮した交通流改善手法を提案した。

2. 関連研究

和久井ら[5]は自動運転車両が完全に普及した環境における無信号丁字路において、車車間通信と路車間通信を利用した渋滞軽減手法を提案し、その有効性を示している。しかし、通信ができない車両についての考慮はされておらず、提案手法が混在環境においても効果的であるかは示されていない。

宮崎ら[6]は自動運転車両と手動運転車両の混在環境における交差点での渋滞軽減手法を提案している。しかし、各車両の交差点侵入時の挙動について、急ブレーキや車間時間のドライバ固有の特性を反映していない点や、車両の追従挙動について具体的な差別化ができていない問題点があった。また、提案手法で路車間通信を想定しているが、通信の成功率を 100%と仮定していたため、通信を考慮した評価を課題としていた。

Guni Sharon ら[7]は米国における混在環境下での交差点進入プロトコルを提案している。この提案手法は、道路の車線数と進行方向と、交差点に設置された路側機で測定できる車両情報から安全な経路を予約する。しかし、安全な経路が予約されたとき赤信号であっても進行可能とするため日本の法律的に不可能である。また、路側機が交差点付近の車両をすべて検知できることが前提であり、路側機の

負荷や費用が考慮されていない。

今枝ら[8]は自動運転技術における車間距離の調節に着目し、手動運転、ACC、CACC の3つの機能に応じた車両の追従モデルの提案を行い、CACC の渋滞軽減への有効性を示している。また、上記の機能を持つ車両の占有率に応じたシミュレーションにより、その効果を検討している。しかし、手動運転の挙動に個人特性を設定していない点や、直線かつ単一な車群の走行に限ったものであった。本論文ではこのモデルをベースに個人特性を乱数により設定し、より現実的なモデルを作成した。

原ら[9]は自動運転普及期の最悪の場合に人間が操作主体となることができると想定し、この車両が交差点で出会った場合に、どの程度の車間距離であれば、安心できる走行が可能になるか、また、驚いてブレーキを踏んでしまうかという人間の心理的な部分を実験によって定量化している。本論文ではこの実験結果から、使用するシミュレーションモデルに、操作感覚による違いから驚く挙動を実装する。

筆者らはこれまで、自動運転車両の混在環境における交差点進入手法として、交差点進入モデルを提案してきた[10]。その際、シミュレーション実験で考慮するパラメータに交差点進入モデルを提案していた。しかし、交通流の改善には交差付近に限らず、交差点通過前後の挙動や加減速の挙動が重要になる。そこで、本論文では前述した車両追従モデル[8]をシミュレーション環境に組み込むことでより交通流を現実的に再現する。また、交差点前後での車両の挙動を考慮することで、混在環境における新たな問題を発見できるものとする。

3. シミュレーション実験

本論文ではネットワーク型マルチエージェントシミュレーションの Scenargie[11]を利用して、手動運転車両と自動運転車両の混在環境を構築した。自動運転技術は表2のように、機能概要ごとにレベルが定義されているため、実際に実現が進められている一部の機能を根拠として、車両のモデルを定義した。本論文で使用する車両定義を表3に示す。各車両の走行モデルは既存のモデルを参考にし、各車両の特性に合わせて調整した[8][12]。

3.1 追従走行モデル

$$acceli + 1(t + Taction) = \frac{a1}{xi(t) - xi + 1(t)} \{vi(t) - vi + 1(t)\} \quad (1)$$

$$acceli + 1(t + Tdelay) = \frac{a2}{xi(t) - xi + 1(t)} \{vi(t) - vi + 1(t)\} \quad (2)$$

$$acceli + 1(t + Tdelay) = a3 \frac{vi(t) - vi + 1(t)}{xi(t) - xi + 1(t)} + a4 \{acceli + 1(t) - accel(t)\} \quad (3)$$

(1)~(3)はそれぞれ手動運転車両、部分的自動運転車両、完全自動運転車両に対応する追従走行モデルである。各車両はそれぞれ手動、ACC、CACCによる追従機能を備えていると想定した。

式中の i は先頭車両を、 $i+1$ は追従する車両を表す。 t は時間を表していることから、 $accel(t)$ は加速度[m/s²]、 $x(t)$ は車両の位置[m]、 $v(t)$ は速度[m/s]を表している。また a は反応強度として車両ごとに異なる数値が設定される。ここで $Taction$ は人間の加速、減速時の反応時間[s]を示しており、先行研究を参考に1.0~1.4[s]をランダムに設定する[13][14]。ただし $Tdelay$ はシステムの遅延を考慮したもので、0.1[s]を設定した。式(1)は前方車両との速度の違いをトリガに式が適応される。式(2)(3)は前方車両との車間距離をトリガに式が適応される。また、式(3)は追従車両と前方車両が完全自動運転車両の場合のみ、加速度を考慮した式として適応されるが、前方車両が式(1)や式(2)である場合追従車両も式(2)を適応される。

上記のモデルの挙動の確認として10台の車両を追従走行させた結果を図1、図2、図3に示す。ただし、ここで車両の種類を混在させることはしない。先頭車両は計測開始から40s後に最大速度である11.1[m/s]まで加速する。また、この実験では道路の加速度に制限はなく、前方車両に対して追従できるかどうかを確認した。

手動運転車両による車間距離調節では、2台目の車両が先頭車両の加速に反応し、減速していることが確認できた。また、減速時の影響が後続車に伝搬することで、2台目以降の後続車両が思うように加速できていないことが観測できた。原因として、速度をトリガとして速度調節をするこ

表4 車両の機能で見た車両の定義

Table 4 The Definition by vehicle's ability

名称	操作主体	車間距離	交差点進入	V2X
手動運転	人間	(1)	(4)	無
部分自動運転	人間	(2)	(4)	有
完全自動運転	システム	(3)	(5)	有

表3 車間時間の設定

Table 3 Setting the time head way

操作主体	車間時間[s]	割合[%]
人間	1.0	12.8
	1.5	28.1
	2.0	24.7
	2.5	14.4
	3.0	13.1
	3.5	6.9
システム	0.64	50.0
	0.78	50.0

とや、各車両で反応時間が異なること、後述する車間距離がそれぞれ異なることが挙げられる。

部分的自動運転(ACC)による車間距離調節では、車間距離をトリガとして車間距離調節をすることや、その反応が人間と比べて早いため、手動運転の結果よりも減速の伝搬が短時間で収束している。その結果、先頭車両が40sで最高速度に達していることに対して、最後尾の車両は74sで最高速度に達することが確認できた。

完全自動運転(CACC)による車間距離調節では、追従車両が前方車両と通信することで、加速度の差についても考慮することができるため、3つの追従モデルの中で最も高精度な追従ができることを確認した。また、最後尾の車両が最高速度に達するのは46sであり、部分的自動運転よりも

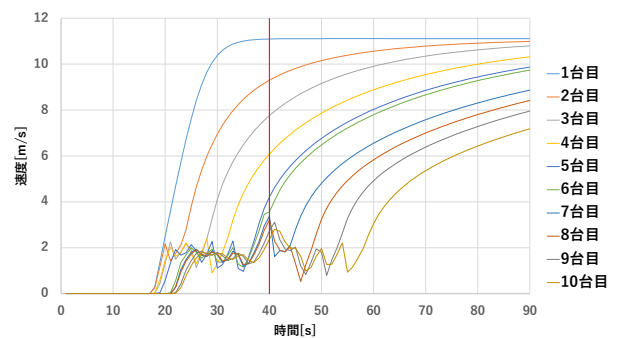


図3 手動運転による車間距離調節

Figure 3 Adjustment inter-vehicle distance by human

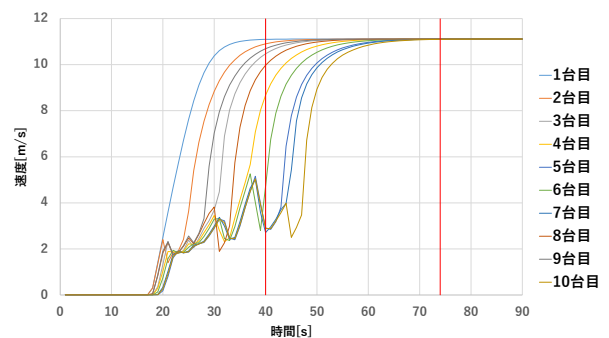


図1 ACCによる車間距離調節

Figure 1 Adjustment inter-vehicle distance by ACC

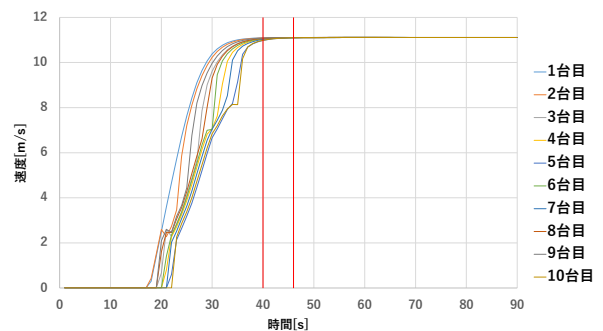


図2 CACCによる車間距離調節

Figure 2 Adjustment inter-vehicle distance by CACC

優れていることが確認できた。

3.2 交差点進入モデル

操作主体に依存する交差点への侵入に必要な車間距離の設定を行った。

$$x = v \times (t + T_{rand}) \quad (4)$$

$$x = v \times (t + T_{rand}) + d \quad (5)$$

x は進入に必要な距離[m], v は対向車両の速度[m/s], x は進入車両が交差点の通過に必要なとする時間[s]である。ここで T_{rand} は操作主体およびドライバごとに設定されるランダムな車間時間として加算される。ドライバが設定する車間時間は先行研究を参照した[15]。設定される車間時間

表 6 シミュレーションのプロパティ

Table 6 Property of simulation

シミュレーション時間	3600[s]
出発・目的地	ランダム
車両台数	200[台]
最高速度	40km/h

表 5 車両の占有率

Table 5 Occupancy of vehicles

	占有率[%]		
	手動運転	部分自動運転	完全自動運転
A	100	0	0
B	75	0	25
C	50	0	50
D	25	0	75
E	0	100	0
F	50	25	25
G	25	50	25
H	25	25	50
I	10	40	50
J	0	0	100

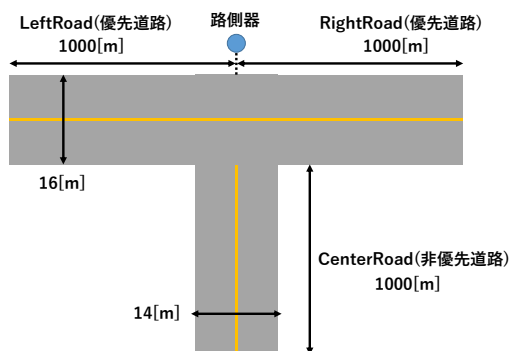


図 4 道路モデル

Figure 4 Road model

と割合を表 4, 表 5 に示す。完全自動運転車両のほうが手動運転と比べて車間時間を短くとる傾向がある。そこで式(5)は完全自動運転車両を想定して、式(4)に対向車両が最悪停止できる距離を加算した。これにより完全自動運転車両が他の車両に対して車間時間の差から違和感を与えにくい。また、交差点合流時に対向車両の車間時間から計算される車間距離に進入車両が進入してしまった場合は、急ブレーキを踏むことを想定して、速度を一時的に 0[m/s]とする挙動を実装した。

4. 予備実験

4.1 実験環境

実験では表 5 に示すように、各車両の占有率によって混在環境を再現した。道路モデルは、図 4 に示すような無信号の交差点を設定した。また、実験で設定したシミュレー

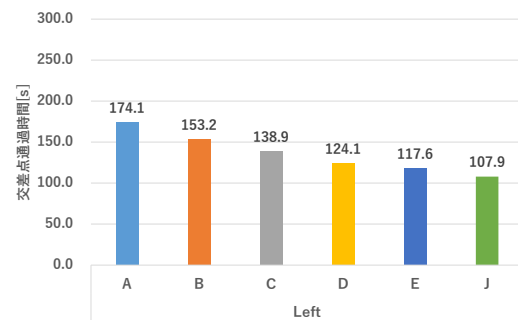


図 5 Left 道路の通過時間の比較

Figure 5 Comparison of left road

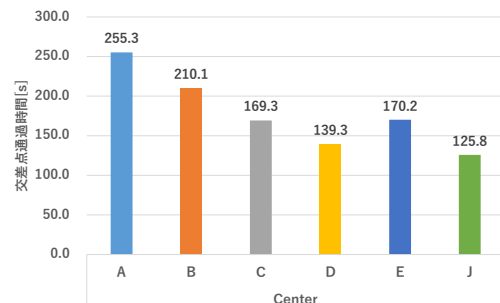


図 6 Center 道路の通過時間の比較

Figure 6 Comparison of center road

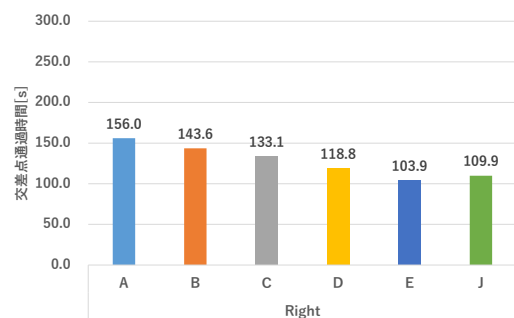


図 7 Right 道路の通過時間の比較

Figure 7 Comparison of right road

シヨンのプロパティを表 6 に示す。

4.2 実験結果

実験結果を図 5, 図 6, 図 7 に示す。グラフは、各車両が出発したタイミングから、交差点を通過するまでに経過する時間[s]を表している。完全自動運転車両の占有率の増加に伴い、交差点に対して Left, Center, Right の全ての道路の通行時間が短くなっていることが観察できる。これは完全自動運転車両の増加に伴い、個々の車両が小さな車群を構成するため、非優先道路の車両が進入するタイミングが増えたことが原因である。一方で、図 8 に示すような、隊列走行をする車両に対して非優先道路で待機する車両が進入できない場合が考えられた。そこで、本論文ではどの占有率においても各道路がそれぞれ同等の速度で通過できる道路にすることを目的に、交差点進入時のプロトコルを提案する。

5. 提案手法

予備実験から車両が車群を構築することで、非優先道路の交通流に、図 8 に示すように車群が連続することで非優先道路の車両が優先道路に進入できない問題点が生じることが分かった。そこで、一定の時間経過後に非優先道路に交差点への侵入を促すための車両制御方法を提案する。

本手法は図 4 に示すように交差点の中心付近に路側器を設置することで交差点を介して車両同士が通信できるようにする。提案手法は図 9 に示すプロトコルで進められる。

(1) 進入依頼(非優先車両)

プロトコルの開始メッセージは、非優先道路で停止後数秒間待機した後に路側器に対して送信される。この時の待機時間は先頭車両が交差点をスムーズに通過した場合にかかる時間である。この進入メッセージは、通信可能な車両(部分的自動運転車両, 完全自動運転車両)のみ行うことができる。

(2) 進入依頼(優先車両)

非優先車両から進入依頼を受けた路側器は即座に優先道路を走行する車両に対して侵入依頼メッセージを送信する。これを受信した車両は自車が車間調節を行った際に、実際に非優先道路の車両が進入可能であるかを判別する。判別は図 10 の場合に以下の式で導かれる。

$$T_i = D_i / V_i \quad (6)$$

$$T_{i+1} = D_2 / (25 / 3.6) \quad (7)$$

$$D_2 = D_{response} + D_{stop} + (V_o \times T_o) \quad (8)$$

このとき減速目標速度を 25[km/h], 減速加速度は

1.0[m/s^2]とした。D2 は速度の調整をする車両の反応距離、制動距離、非優先道路の侵入にかかる距離から計算した。また、反応時間は 3.5[s], 摩擦係数を 0.7 とした。

(3) 調節可能

(2)で計算した結果、Ti+1 が Ti よりも大きい値となる場合、車間距離調節をした場合に、非優先車両が進入可能であると判断される。調節可能だと判断した車両は調節可能メッセージを路側器に対して送信する。

(4) 車間距離調節依頼

調節可能依頼を受信した路側器は、その受信メッセージの中から交差点に最も近い車両を選択し、その車両に

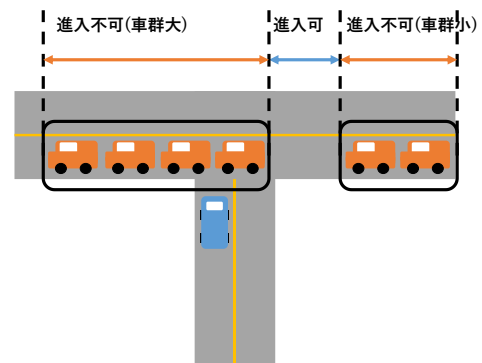


図 10 非優先道路の進入可能タイミング

Figure 10 Timing when a non-priority road can enter

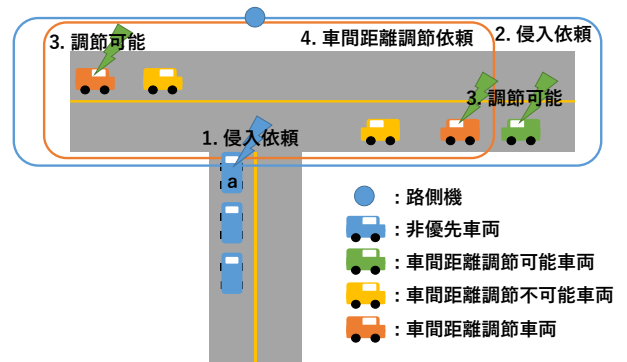


図 8 提案手法

Figure 8 Proposed method

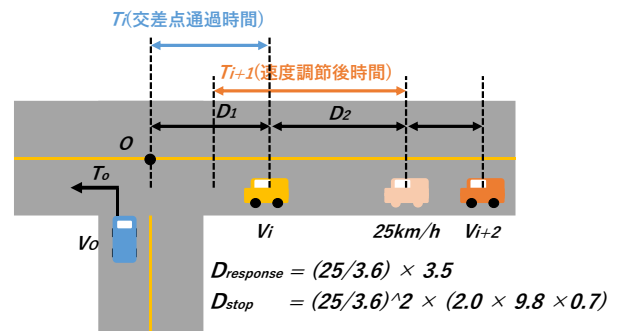


図 9 車間距離調節判定

Figure 9 Judgement of adjustment inter-vehicle distance

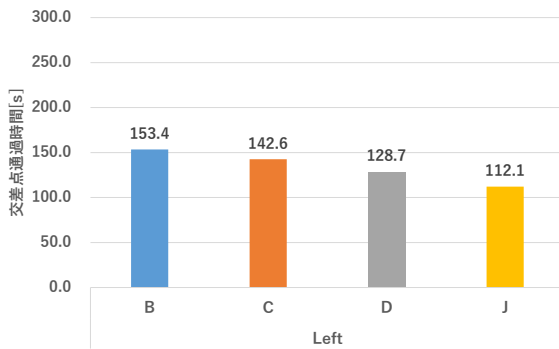


図 15 Left 道路の通過時間の比較(提案手法)
 Figure 15 Comparison of left road(attached proposal)

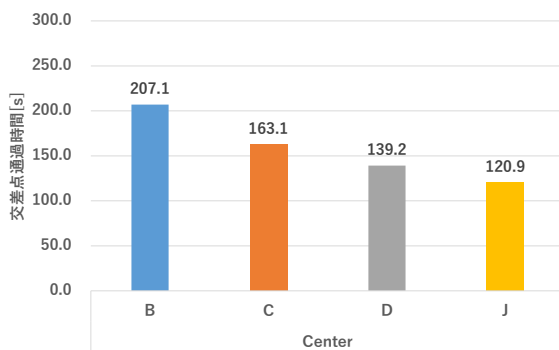


図 13 Center 道路の通過時間の比較(提案手法)
 Figure 13 Comparison of center road(attached proposal)

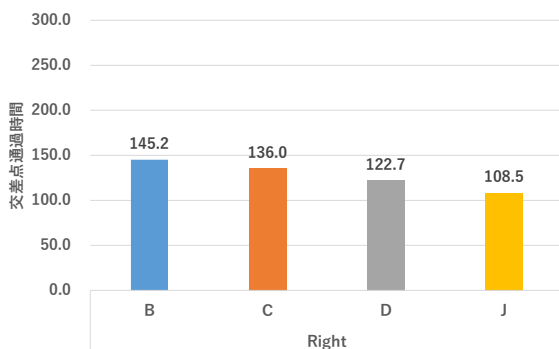


図 11 Right 道路の通過時間の比較(提案手法)
 Figure 11 Comparison of right road(attached proposal)

対して車間距離調節依頼を送信する。これを受け取った車両は実際に車間距離を調節する。ただし、操作主体を人間とする車両は、車間距離の調節において正確さを欠く可能性から、車間距離調節が可能な車両は完全自動運転車両のみとした。

提案手法が適応される範囲は原則として交差点を通過するまでであり、交差点を通過した場合は、プロトコルの途中であっても破棄する。また交差点での通信が集中することを避けるため、プロトコルは常に1対の調節車両(右左折を考慮した場合2台)の1台と路側器の間でのみ実行される。

6. 評価

提案手法を適応した状態で、予備実験と同じ条件で改め

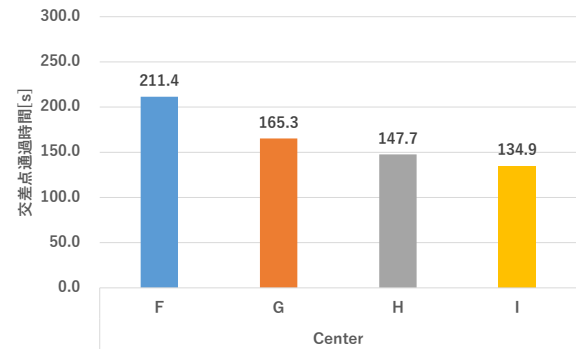


図 14 Center 道路の通過時間の比較(3種類)
 Figure 14 Comparison of center road(3 types)

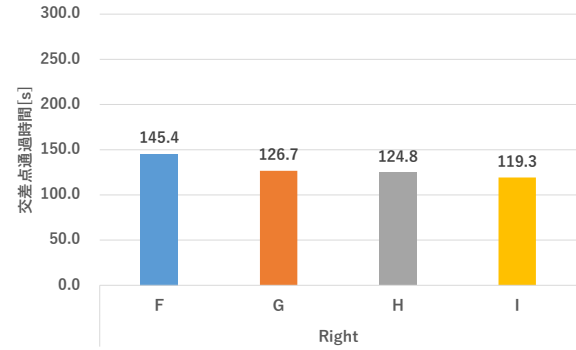


図 16 Right 道路の通過時間の比較(3種類)
 Figure 16 Comparison of right road(3 types)

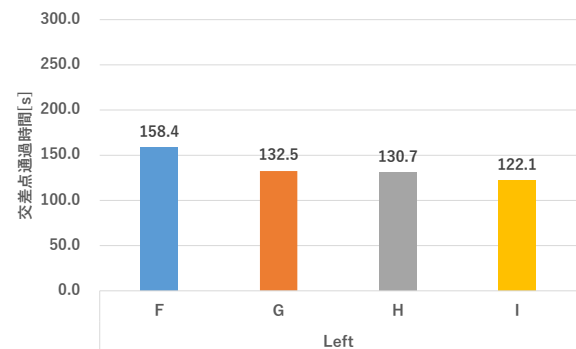


図 12 Left 道路の通過時間の比較(3種類)
 Figure 12 Comparison of left road(3 types)

て実験を行った。実験結果を図 11, 図 12, 図 13 に示す。また、車間距離の調節は不可能であるが、進入依頼が可能な部分的自動運転車両も含めた混在環境とした結果を図 14, 図 15, 図 16 に示す。

提案手法を適応した場合、全てのパターンで Center の交差点通過時間が減少していることが分かった。Right はパターン J を除いて交差点通過時間が増加していた。これは、車間距離の調節のために減速したことが原因であると考えられる。Left も同様であると考えられる。ただし、Left と Right とで調節に関する遅延に差が見られたが、これは Right の方が交差点での進行方向が有利であるためだと考えられる。

提案手法は、進入依頼及び車間調節が可能な完全自動運転車両と、侵入依頼のみが行える部分的自動運転車両の占

有率が結果に大きく影響する。

完全自動運転車両と部分的自動運転車両の占有率を25%のパターンFは部分自動運転車両を含まないパターンBと大差がないが、部分的自動運転車両をさらに25%増やしたパターンGにおいて、完全自動運転車両が50%のパターンCと大差のない結果が表れた。この傾向は完全自動運転車両を50%としたパターンHとIにおいても同じく観察することができた。

以上より、提案手法は一般的に車群が多くあられる場合に効果を発揮しやすいと考えられる。また通信可能な車両によりプロトコル開始機会が多いほど効果が得られやすいと言える。

7. 今後の課題

筆者は、これまで混在環境における渋滞削減手法について、交差点進入モデルに着目してきた[10]。しかし、今回さらに車両間の追従モデルを追加したことでさらに現実的な混在環境を構築することができた。その結果、車両間で車群を構築することで、交通流の改善が見られた。ただし、長距離にわたる車群が発生した場合、非優先道路の車両に影響を与えることが確認できた。そこで従来の渋滞軽減手法を用いることで車群の間に進入する機会を与えることができた。

ただし、車間距離の調節時の速度を25[km/h]に、減速加速度を1.0[m/s²]に固定している点や、車間距離調節車両の決定に交差点に最も近い車両を選択している点など、車両の追従モデルを考慮しない設定をしているため、改善の余地があると考えられる。

8. まとめ

本論文では、今後生じることが予想される手動運転車両、部分的自動運転車両、完全自動運転車両の3つの車両が混在する環境に着目し、問題点の発見とその解決策を述べた。また、これまでの研究に対して車両間の追従モデルを追加することでより現実的な混在環境モデルを構築することができた。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費16K00143の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部:“官民ITS構想・ロードマップ2017”。首相官邸(オンライン), 入手先 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/roadmap.pdf>, (参照 2018-02-10)。
- [2] 辻野照久, 坪谷剛. “自動運転自動車の研究開発動向と実現の課題”. 科学技術動向, Vol.133, 1・2号, pp.9-16, Jan2013.
- [3] 自動車検査登録情報協会:“平均使用年数”. 自動車検査登録情報協会(オンライン), 入手先 <http://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000g7wb-att/r5c6pv000000g7wq.pdf>, (参照 2017-02-10)。
- [4] 津川定之. “自動運転の課題”, 電子情報通信学会, 基礎・協会

- ソサエティ, Vol.10, No.2, pp.93-99, 2016.
- [5] 和久井裕太, 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”, 電気学会研究会, vol.25, pp.57-62, 2011.
 - [6] Chihiro Miyazaki, Seiji Matsuyama, Masashi Saito, Yuichi Tokunaga, Ryoza Kiyohara. “A Study of Driver’s Behavior with Autonomous and Non Autonomous Vehicle”, IWIN(2016).
 - [7] Guni Sharon, Peter Stone. “A Protocol for Mixed Autonomous and Human-Operated Vehicle at Intersection”, In ABMUS 2017, Sao Paulo, May.2017.
 - [8] 今枝勇太, 旭健作, 渡邊晃. “渋滞削減のためのCACCの有効性に関する研究”, 情報学ワークショップ2015(WoNF2015)論文集, C3-2, CD-ROM(2015).
 - [9] 原達郎, 清原良三. “自動運転普及期における適切な交差点進入モデル”, 第25回マルチメディア通信と分散ワークショップ論文集, 2017, pp.29-44, 2017-10-04.
 - [10] Hiroto Furukawa, Masashi Saito, Yuichi Tokunaga, Ryoza Kiyohara. “A Method for Vehicle Control at T-Junctions for the Diffusion Period of Autonomous Vehicles”, NBIS(2017).
 - [11] Space-Time Engineering, LLC, <https://www.spacetime-eng.com/>
 - [12] 大口敬. “高速道路単路部渋滞発生解析”, 土木学会論文集, 2000巻, 660号, pp.39-51, 2010.
 - [13] 森田和元, 関根道昭, 岡田竹雄, 益子仁一, 大野督史. “高齢者の認知・操作特性に関する実験的検討”, 交通安全環境研究発表会公園概要, 2005巻, pp.93-98, 2005年
 - [14] 牧下寛, 松永勝也. “自動運転中の突然の危険に関する制動反応の時間”, 人間工学, Vol.38, No.6, pp.324-332, 2002.
 - [15] 太田博雄. “ASV開発への交通心理学からの提言”, IATSS review, Vol.36, No.143, pp.50-56, Aug.2011.