

自動運転普及期における渋滞軽減のための 車両制御方式

古川 義人¹ 徳永雄一² 齋藤正史³ 清原良三¹

概要: 近年、活発な研究開発が行なわれている自動運転には、渋滞軽減効果が期待されている。しかし、全ての車両が自動運転車両になるには長い年月が必要となり、それまでは手動運転車両と自動運転車両の混在環境が生じる。この混在環境では、自動運転車両による渋滞軽減効果が発揮されない可能性がある。本研究では、まず混在環境において生じる問題点を明らかにするための交通流シミュレーションを行なった。その結果、混在環境では自動運転車両は人間の運転者の感覚に沿った運転操作を行なう必要があるため、自動運転車両の効率的な運転操作による渋滞軽減効果が発揮されないことが明らかとなった。そこで、本研究では人間の感覚に沿った運転操作を行ないつつ、渋滞を軽減する手法の提案と評価を行った。

A Method for Vehicle Control for Reducing the Traffic Jams in the Diffusion Period of Autonomous Vehicles

HIROTO FURUKAWA¹ YUICHI TOKUNAGA² MASASHI SAITO³
RYOZO KIYOHARA¹

1. はじめに

近年、活発な研究活動が行われている自動運転には、交通流における様々な問題解決が期待されている。渋滞軽減効果もそのうちの一つである[1]。しかし、全ての車両が自動運転車両になるには長い年月が必要となり、それまでは手動運転車両と自動運転車両の混在環境が生じる。この混在環境では、自動運転車両による渋滞軽減効果が発揮されない可能性がある。そのため、自動運転技術の普及には自動運転車両が完全に普及したときに得られる有用性はもちろんのこと、普及期においても有用性がなければならない。つまり、自動運転車両の普及期に当たる現在から約 10 年後の未来では、自動運転車両と手動運転車両が混在する環境における課題解決への取り組みが必要になる。

渋滞問題は、自動車が普及期からの問題であり、普通道路から高速道路まで、渋滞問題解決のために多くの研究が行われている[2]。自動運転車両においても渋滞問題は重要な課題である。

例えば、自動運転車両が周辺情報を考慮した運転をしたとしても、人間の操作感覚に順応した行動ができることは期待できないかもしれない。もしこのような行動が混在環境において生じてしまった場合、人間は自動運転車両の予想外の行動に対して違和感を得て危険と感じたときに、ブレーキや車間距離を空けてしまうなどの、交通を妨げるよ

うな行動を取ることが容易に想像される。その場合、自動運転車両によって得られた無駄のない動作や行動が、総合的に無駄になる。つまり、自動運転車両を導入しただけでは、渋滞問題の解決は難しく、結果として自動運転が普及しないことが考えられる。

また、自動運転車両の開発研究に伴い、自動運転技術を支える技術として、車車間通信や路車間通信などの研究がされてきている。現在も通信の規格や、プロトコルスタック、送信するメッセージに関するガイドラインが出されるなど、様々な規格が定められてきている。2013年には車車間・路車間通信の重要な規格として、ARIB T-109 という通信規格が定められた。米国・欧州と基本的な通信方法は共通化しているものの、プロトコルスタックが異なるなど、日本独自の規格として設定されているが、国際調和という観点から、可能な限りは海外と調和を取る動向が見られている[3][4]。

本論文では、こうした自動運転車両と手動運転車両が混在する環境の中で、路車間通信を用いた渋滞軽減方式を提案し、これを交通シミュレーション上で再現することで評価する。

また、渋滞軽減の評価には、各車両のある地点間の平均旅行時間であったり、最大旅行時間や、渋滞とされる時間のみの平均旅行時間で評価するなど様々な視点が考えられるが、本論文における理想的な渋滞軽減とは、まず、シミュレーション時間内で生じる最大渋滞台数を減少させることを渋滞軽減効果と定義し、この渋滞軽減効果を交差点につながるすべての道路に対して得られることとする。最大渋滞台数は、最大旅行時間と同値と考える。そのため評価方法にはシミュレーション時間内に生じた最大渋滞台数を

1 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology
2 三菱電機
Mitsubishi Electric Co
3 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

利用する。

実験ではまず、2 節で紹介する関連研究で行われていた方式を参考にし、その課題を解決する方式を提案する。予備実験として提案した方式を交通シミュレータ上で評価し、さらに改善を検討する。次に、再度交通シミュレーションで改良方式を評価する。最後に提案した方式によって得られた渋滞軽減効果を示す。

2. 関連研究

2.1 自動運転車両を用いた車両制御方式

車車間通信・路車間通信を利用した交通渋滞に関する軽減方式はいくつかの研究がされている。寺内らの研究では、渋滞緩和を目的とした車々間通信による渋滞情報の共有に関する有用性を示している[5]。和久井らの研究では、自動運転車両が渋滞軽減に効果的であることが示されている[6]。しかし、自動運転車両と手動運転車両が混在している環境を想定したものではない。

宮崎らの研究では、自動運転車両の混在環境における渋滞軽減方式の提案がされている[7]。シミュレーションでは混在環境におけるドライバーのブレーキの感覚の違いを再現しており、安全性まで考慮されている。しかし、実際には通信の遅延や、パケットロスなどを考慮せずに評価が行われていないなど、現実性という観点で不十分である。

2.2 渋滞間隔に関する研究

松井らの研究では、高速道路における渋滞情報が、実際に人間が運転する中で知覚する定義とは異なることについて示唆している[8]。松井らの研究によると高速道路における渋滞の知覚には、交通流の情報によって様々な定義がある。しかし、まずは本論文では人間個人個人の知覚による渋滞の定義までは考慮せず、交通流のなかで状態として得られるパラメータとして、最大渋滞台数を評価パラメータとする。

3. 予備実験

3.1 実験方法

関連研究[7]に挙げた渋滞軽減方式では、車車間・路車間

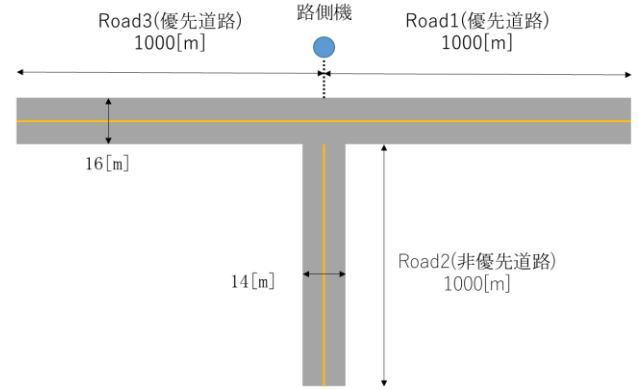


図 1 インフラモデル

通信の成功率を 100[%]と仮定していた。そこで、まずは先行研究の提案方式を元に、通信を考慮した提案方式に改良を行った。次に、改良した提案方式を、通信を想定した交通シミュレータ上で評価した。実験には Scenargie[9]の Multi-Agent Extension Module と ITS Extension Module を用いた交通シミュレーションを行った。本論文では日本国内での環境を想定しているため、車車間・路車間通信の規格には ARIB T109 を用いた。Scenargie のデフォルトで設定されている T109 に対して、アプリケーション層を改変することで実装を行った。実験で使用するシミュレーション環境を表 1 に示す。

3.2 道路モデル

本論文で使用するインフラモデルを図 1 に示す。本論文では信号機のない丁字路の交差点を想定し、それぞれ優先道路と非優先道路を設定する。優先道路の幅を 16[m]、非優先道路は 14[m]とし、路側帯は考慮しない。優先道路は全長 2000[m]、非優先道路は 1000[m]とする。また、それぞれ片側 1 車線とし、進行方向は左側通行とする。道路は車両専用とし、歩行者は考慮しない。丁字路の中心付近には各車両からの通信を受けるための路側機を設定する。

3.3 車両モデル

自動運転車両普及期の想定環境として、車両にはすべての運転操作を機械が行う「自動運転車両」、人間がすべての運転操作を行うが車車間・路車間通信により外部から得た情報をもとに運転支援を受けることができる「ITS 機器搭載車両」、従来通りすべての運転操作を人間が行う「ITS 機器非搭載車両」の 3 種類を定義する。各車両の特徴を表 2 に示す。ここで注意として、ITS 機器搭載車両は本提案で使用される路側機に対する侵入依頼を送信・受信することが出来るが、受信内容による行動の変化はできないものとする。これは送受信による情報の恩恵は受けられるが、車間調節機能はシステムによる操作に依存

表 1 シミュレーションモデル

	予備実験	負荷テスト
シミュレーション時間	3600[s]	
出発地点・目的地点	ランダム	
車両台数	300[台]	
発生車両間隔	EXPDIST(600)	EXPDIST(300)
渋滞長の定義	交差点手前500[m]以内を 10[km/h]以下で走行、停止、徐行している	

表 3 各車両の特性

車両の種類	通信処理	通信結果による操作変化	操作主体
自動運転車両	可能	可能	システム
ITS機器搭載車両	可能	不可能	人間
ITS機器非搭載車両	不可能	不可能	人間

表 2 車両の占有率

	占有率[%]		
	自動運転車両	ITS機器搭載車両	ITS機器非搭載車両
A	100	0	0
B	80	20	0
C	50	20	30

するものと考えているためである。そのため人間が操作主体の車両は車間調節を自動的にはすることができない。実験では、各車両の占有率を変更することで、普及率による渋滞軽減効果の変化を評価する。各車両の占有率を表 3 に示す。

実験では、先行研究でなされていた車両占有率を参考とし、そのうちの 3 つのパターンを評価対象とした。

3.4 通信方法

本論文では自動運転車両と ITS 機器搭載車両が丁字路に置かれた路側機と通信を行うことによって車車間の調節及び渋滞の軽減をする。通信のプロトコル概要を図 2 に示す。ここでは、優先道路を走行し、車間調節をする対象となりうる車両を優先車両、侵入依頼を送信する車両を合流車両とし、実際に車間調節をする車両を車間調節車両と定義する。

合流車両は自身が交差点に侵入した時点で、時間を優先度として加算する。交差点前で 20 秒以上の待機時間を経た合流車両は、交差点を通過すべく路側機に対して侵入依頼メッセージを送信する。侵入依頼メッセージを受け取った優先車両は自身が車間調節を行う対象にふさわしいかを計算によって判断し、可能であれば車間距離調節依頼メッセージを路側機に送信する。この時、車両から路側機を介して再度車両側に通信を行う際には遅延が生じることが想定される。そのため、予めパケット送信の遅延時間を計算しておく。この遅延時間の内最大遅延時間を計算に加え、遅延時間を考慮する。

車間距離調節依頼メッセージは、優先車両群において、先頭車両がある場合に、前方車両が交差点を通過する時間に対して、自車が特定の地点までに理想の速度まで落とせ

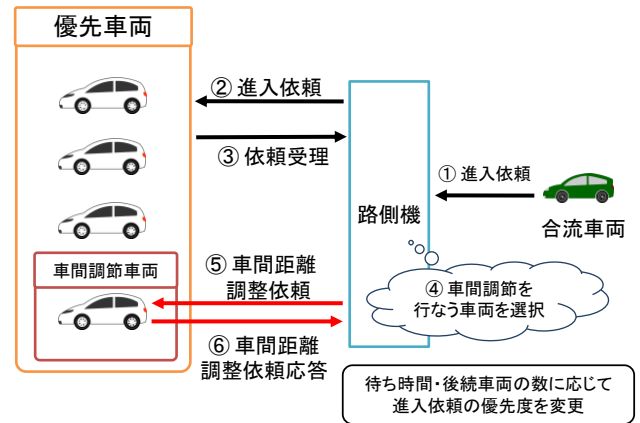


図 2 通信プロトコル

たときの時間到達時間が大きければ、車間調節車両候補として設定する。

車間距離調節依頼メッセージを受け取った路側機は、送信してきた優先車両のうち最も交差点に近い車両を車間調節車両として決定し、車間距離調節依頼を送信する。車間距離調節車両となった車両は受け取った証拠に路側機に車間距離調節応答を返し、通信を終了する。

通信可能な車両は、基本的に自車の ID、現在走行している道路の ID、自車両の座標、交差点での右左折方向をペイロードとして、ブロードキャストで通信する。路側機は車両と同じプロパティに対してダミーデータを設定し、同様に通信している。また、車車間調節時には路側機側のペイロードを車車間調節対象車両の ID と座標を送信する。受け取った調節依頼メッセージと同時に送信された車両 ID が一致した車両が車車間調節をするためである。

また、通信するタイミングは 100[ms]毎に送られるものとし、送られるパケットのサイズは 546[byte]とする。

3.5 実験結果

実験結果を図 3、図 4 に示す。図 3 は通信を想定した環境内での交差点の渋滞台数を表したものである。提案方式は適応していない。図 4 はシミュレーション環境に実際に提案方式を適応した場合の結果である。

提案方式では最も渋滞が生じる非優先道路である Road2 を対象に渋滞軽減を図っていた。結果から、提案方式がいずれのパターンにおいても Road2 に対して渋滞軽減効果が得られていることがわかる。しかし、すべてのパターンにおいて Road2 以外の道路は最大渋滞台数が増えていることもわかる。

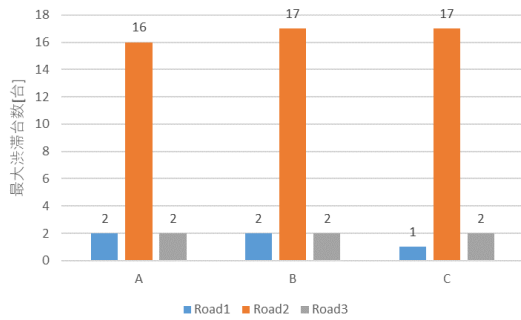


図 3 渋滞軽減方式を適応していない場合

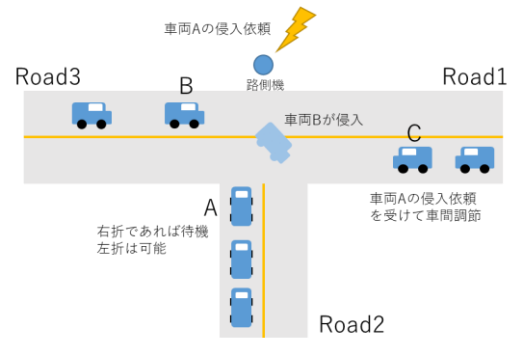


図 6 侵入依頼による副作用

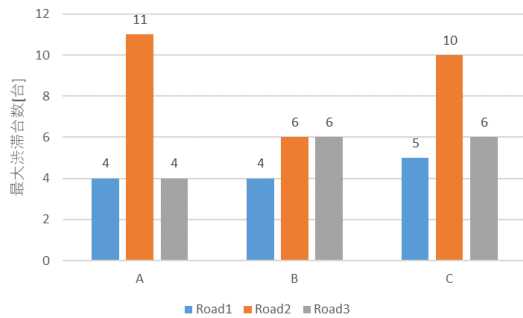


図 4 渋滞軽減方式を適応した場合

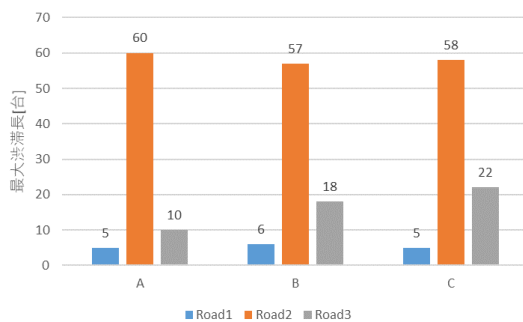


図 5 負荷テストによる渋滞軽減結果

4. 交差点進入時の優先度の改良

4.1 提案方式の効果範囲

3 節の予備実験により提案方式は、通常想定される交通流に対して渋滞軽減効果が得られることがわかった。ここで、提案方式がどれほど交通流に対して効果が得られるかを測定するべく、表 1 の乱数の値を変更することで自動車発生間隔を狭くすることにより、意図的に渋滞が生じるシミュレーション環境を作成した。

その結果、図 5 に示すように渋滞軽減効果が全く得られ

ていないことがわかった。そこで、提案方式を用いた上で生じた渋滞がどのようなものであったかを検討した。

4.2 優先度による問題点

4.1 節で行った測定で、実際にシミュレーションの状況を観察したところ、Road2 の車両による侵入依頼が合流車両に対して正確に効果を与えられていない場面が見られた。図 6 にその状況を示す。

この状況では、交差点に侵入可能スペースが空いたときに、道路の静的な優先度から、優先道路を走行している車両が先に交差点に侵入する。そのため、本来非優先道で待機中の車両 A からの侵入依頼によって空けられた侵入スペースが、優先道路の車両 B によって侵入され、Road2 で待機中の車両は侵入スペースを空けることによる渋滞軽減効果が得られない場面が見られた。そこで、こうした場面においても提案方式の渋滞軽減効果が得られるようにするため、交差点侵入タイミングに対して、道路状況を用いた優先度の判定をする方式を提案する。

4.3 優先度の改良による渋滞軽減効果

本論文のシミュレーション環境では、優先道路と非優先道路に静的な優先度を設けている。そのため車両は、交差点に侵入する際に、自身の走行していた道路から侵入先の道路に対して、優先度を考慮して侵入している。

そこでこの静的な優先度をシミュレーション時間毎に道路状況から判定した優先度に更新するように改良する。優先度には各道路における混雑状況を、各道路で渋滞により待機している車両台数とし、その台数が 15 台以上存在している道路が最も優先されるものとした。ただし、ITS 非搭載車両はこれを認識できない。そのため ITS 非搭載車両が交差点で渋滞を待機していた場合、改良による効果は得られない。

シミュレーションの結果を観察したところ、図 6 のような、合流車両にとって期待していた効果が得られないような状況下で、提案方式通りの動作を確認できた。また、

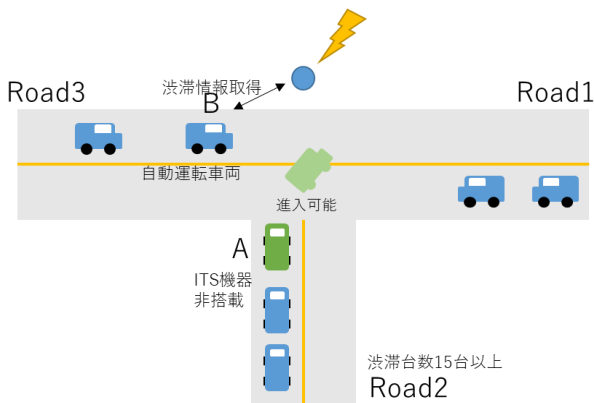


図 7 ITS 機器非搭載車両の救済

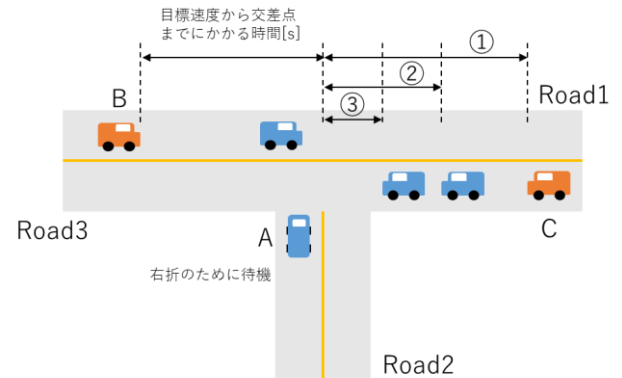


図 8 車間距離調節車両の選択

Road2 における最大渋滞長を減少させることが確認できた。ただし、今回のシミュレーションのような優先道路の車両が一定間隔で走行している場合、今回の方式で侵入できる台数はわずか 1 台程度であったため、大幅な渋滞軽減効果の向上は期待できない。

またシミュレーションを観察する中で、図 7 のように合流車両の先頭に ITS 機器非搭載車両が待機しており、通信による侵入依頼が行えない場合において、渋滞軽減効果が得られることが想定された。優先道路の車両 B が路側機から Road2 における渋滞長を確認できることとする。このとき、Road2 の先頭車両 A が ITS 機器非搭載車両で合った場合、車両 A は、侵入依頼を出せないため、渋滞の元となるが、車両 B のように渋滞長を把握することができていれば、車両 A が通信できなかった場合でも、交差点への侵入を促すことができる。このように、ITS 機器非搭載車両が通信できない場合には、その周りのインフラによって補うことが効果的だと考えられる。

5. 車間調節車両の決定方式の改良

5.1 予備実験における車間調節車両選択方式と問題点

予備実験では、提案方式が渋滞軽減に効果があることが判明したが、4 節で行ったシミュレーションの観察の結果、図 8 のような車間調節車両のタイミングが合わない場合に、車間調節車両が車間調節しているにもかかわらず、合流車両が侵入できない場面が見られた。提案方式では侵入依頼メッセージを受けた車両が自車両の位置から交差点侵入時間を計算し、更には前方車両との位置の差から、侵入依頼に答えられる状況を判定することで車間調節車両の選択を行っている。

ここで、合流車両が左折する時には車間調節車両 1 台と合流車両だけの間隔を考えれば良いため、計算通りに合流車両を優先道路に侵入させることが出来る。しかし、右折を考慮する場合、左折と同様の効果は得られない。原因を、

図 8 を例に説明する。③は提案方式の式により車間調節は難しいと判断されるため、車間調節車両には選ばれない。

しかし②は選択される可能性がある。現在の提案方式の計算式だけで車間距離調節車両を決定すると、合流車両が右折待機時に、車間距離調節車両として決定した Road1 と Road3 からの車間調節車両が、車間距離を調節したにも関わらず、交差点進入時のタイミングが合わずに、合流車両が侵入できない場合がある。節の頭で示した事象もこれが理由と考える。

5.2 車間調節車両選択方式の改良

本節では 5.1 節で示したような、車間調節をしたにもかかわらず、合流車両が侵入できない車間調節ミスを減らすために提案法歩を改良する。

まず、現在の提案方式は、Road3 における車間調節車両が決定されたときに、決定された車両が交差点に侵入するまでの時間を、調節時の速度によって計算する。その後 Road1 で車間調節車両の対象となっている車両も同様に、車間調節時の速度によって、交差点までの時間を計算する。現在の提案方式ではここで求めた交差点までの時間の中から最も交差点に近い車両を車間調節車両として選択するが、改良後は求めた交差点までの時間の中から、Road3 の車間調節車両が交差点までにかかる時間との差が最も小さい車両を選択する。

図 8 を例に説明すると、現在の提案方式では③の距離はすでに提案している計算式から、車間調節を行っても交差点までに調節が間に合わないため、車間距離調節車両にふさわしい距離として決定できない。②の距離は、提案方式の計算式では車間距離調節車両として決定できる距離ではあるが、対向車線の車間距離調節車両とのタイミングが合わない可能性がある。

そこで、先に挙げた方式を導入すると、Road3 の車両 B が車間距離調節車両に決定された場合に、目標速度から交差点までにかかる時間を計算する。路側機から侵入依頼を

受けている Road1 の優先車両は、自身の車両と交差点までにかかる時間を目標速度から計算する。Road1 側の優先車両は、計算した時間の中から、車両 B が交差点までにかかる時間に最も近い車両が車間距離調節車両として選択される。図 8 の例では Road1 側から車両 C が選択される。

提案した改良の結果、意図的に渋滞を発生させるシミュレーション環境では直接的な渋滞軽減効果は見られなかったが、改良の目的は Road2 に侵入ミスによる渋滞のリスクを減らすことにあると考える。そのため、次節でこれまで行った改良を予備実験で行ったシミュレーション環境に適応させて、評価を行った。

6. 改良後の提案方式・評価

予備実験及び 4 節での負荷テストの結果から、提案方式の性能向上のために幾つかの改良すべき点が判明した。本節では、これまでの優先度に関する改良と選択車両に関する改良を行い、改良後の提案方式として、再び予備実験と同じ環境でシミュレーションする。ただし、優先度の改良に関して、本説での実験は予備実験と同じ環境で行うため、事前の結果から優先度考慮する。ここでは Road2 に車両が 5 台以上存在している道路が優先されるものとして改良を行った。図 9 に結果を示す。

実験の結果、3 節で行った予備実験と比較して、Road2 の渋滞長が改良前の提案方式よりも減少しており、Road3 に関しても渋滞長の減少が確認できた。ただし、Road1 だけは、最大渋滞台数の軽減が見られず、パターン A やパターン B に関しては、改良前の提案方式よりも最大渋滞台数が増加してしまった。これは、Road2 の渋滞長軽減を行うために調節した車両が交差点で速度を落としたことにより、後列車両が渋滞と判断したことが原因と考える。Road3 に関しては Road2 の最大渋滞台数の減少に比例した渋滞軽減が見られた。以上のことから、丁字路における渋滞長の軽減には、各道路の最大渋滞台数というパラメータに対してトレードオフの関係性があると考えられる。

7. まとめ

本実験では、自動運転車両と手動運転車両が混在する環境における渋滞軽減の車両行動の検証として、無信号の丁字路交差点をターゲットに渋滞軽減方式について提案、評価を行った。まず路車間通信を用いた渋滞軽減方式を提案し、実際の通信環境シミュレーション上に再現することで、その性能を評価した。次に提案方式の改善点を発見するために、意図的に渋滞を発生される環境でシミュレーションすることで、渋滞軽減効果の改善に効果的と考えられる要素を洗い出した。その結果から、渋滞状況に応じて交差点進入優先度を変更する方式と、車間調節したにも関わらず侵入できない車間調節ミスの軽減方式を提案し、これを実装、改良した。最後に、改良後の提案方式を予備実験環境

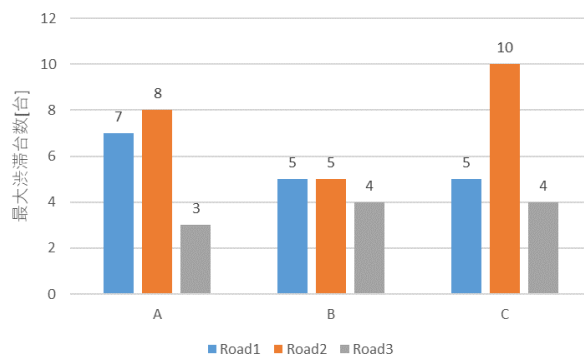


図 9 改良後の渋滞軽減結果

で再度シミュレーションすることで、改良後の提案方式の有用性を評価した。

実験の結果から、本論文で設定した丁字路の交差点では、最大渋滞長に関してトレードオフの関係があると想定された。本実験では実際に最大渋滞台数を減少させることに成功し、提案手法の有用性を証明したが、松井らの研究にあるように、実際の渋滞感覚に関する評価には最大長だけでは信頼性は得られない。これはドライバーの感覚からのアプローチが有効的であると考えられる。つまり交差点侵入前の徐行時間や、シミュレーション時間中における道路の平均的な渋滞数などからの評価が必要となる。

また、今回の渋滞軽減にあたっては、渋滞の遅延時間は考慮したが、パケットロス率に関しては考慮していない。これでは実現性を考慮したときに、提案方式の現実的な精度を考察することができない。加えて、本論文では路車間通信のみを使用しているため、車車間通信を用いたアプローチも当然考えられる。

今後本研究では、以上のような改善点から、より現実的な渋滞軽減方式を研究していく予定である。

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] 辻野照久, 坪谷剛: 自動運転自動車の研究開発動向と実現への課題, 科学技術動向, Vol.133, pp.9-16(2013).
- [2] 大口敬: 高速道路における交通渋滞緩和策の最新動向, 自動車技術, Vol67, pp.11-16(2013).
- [3] 総務省: 第 2 章 ITS 安全運転支援無線システムの在り方, 総務省(オンライン), 入手先<http://www.soumu.go.jp/main_content/000019515.pdf> (参照 2017-04-23).
- [4] 一般社団法人, 電波産業界: 700MHz 帯高度交通システムの標準規格の概要について, 電波産業界(オンライン), 入手先<<http://www.arib.or.jp/osirase/seminar/no94konwakai.pdf>>(2017-04-

- 23).
- [5] 寺内隆志, 柴田直樹, 安本慶一ほか: 渋滞緩和を目的とした車々間通信による混雑状況の伝搬方式, 情報処理通信学会報告書, Vol105, No260, pp.37-42, (2005).
 - [6] 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, 電気学会研究会 Vol25, pp.57-62(2011).
 - [7] Chihiro Miyazaki, Seiji Matsuyama, Masashi Saito, Yuichi Tokunaga, Ryoza Kiyohara : A Study of Driver's Behavior with Autonomous and Non-Autonomous Vehicle, IWIN(2016)
 - [8] 松井寛, 藤田素弘, 安江章: 人間の知覚に基づく高速道路渋滞の情報提供とその評価に関する研究, 土木学会論文集, No IV, pp.127-135(1994).
 - [9] Space-Time Engineering, LLC, <https://www.spacetime-eng.com/>