

# 自動運転普及期の交差点通行方式ガイド

大場大輔<sup>†1</sup> 清原良三<sup>†1</sup>

**概要:** 都市地域の人口増加による都市機能の肥大と集中化で、慢性的な交通渋滞を起こしている。このような状況によって、円滑かつ安全な交通を目指す自動運転技術は将来に必要なシステムになると期待されている。しかし、現段階では、運転アシスト機能搭載の車両しか日本では販売されておらず、普及率も高くない。今後の普及には、自動運転と手動運転の混在環境下で如何に効率の良い交通流を実現するかが課題となる。本論文では、交通信号の最適なサイクル長とスプリットを求めると同時に、手動運転車両と自動運転車両それぞれに適した方向転換の条件を適応することで、混在環境下での4方向交差点でのキャパシティ向上と既存手法よりも手動運転車両の割合が高くてもプロトコルが機能することの優位性を示すことを目的として実験を行った。結果として、既存手法よりもキャパシティを向上させることができ、手動運転車両の割合が高くてもプロトコルが機能することの優位性を示すことができた。

**キーワード:** 自動運転, 混在環境, 交差点, 信号制御

## Traffic Flow at Intersections in the Mixed Environment of Autonomous and Human-Operated Vehicles

DAISUKE OBA<sup>†1</sup> RYOZO KIYOHARA<sup>†1</sup>

### 1. はじめに

都市では人口増加や交通が集中することにより、交通渋滞や交通事故が頻繁に発生している。交通渋滞は旅行時間や燃料消費の増加、排気ガスによる大気汚染、騒音などの社会的マイナス要因を発生させている。交通事故では平成30年度の警視庁による東京都内の交通人身事故発生状況によると、交通人身事故は1年で29608件も発生している[1]。また、その内負傷者数、死者数は34219人となっている。交通事故は高齢者の事故と道路形状では交差点が多い、違反別では、歩行者の信号無視、車両側の前方不注意が多いことが特徴としてあげられる。

これらを解決するため、近年、自動運転の技術開発が盛んにおこなわれている。完全自動運転車両が実現すれば人間による運転が必要なく、目的地、経由地をシステムに登録することで目的地に移動することが可能である。完全自動運転車両が実現し、広く普及した場合にもたらす効果はこれだけではなく、交通事故の減少や渋滞解消などがあり、渋滞が解消することにより、排気ガスの排出量が減り環境負荷軽減にもつながる。

自動運転にはレベルがありレベル1が運転支援として自動車の操作のうち1つを車両制御に関わる監視操作を行う、レベル2が複数の操作を自動運転システムが行う部分運転自動化、レベル3が車を運転する操作のすべてを自動運転システムが行うが緊急時はドライバーが対応する条件付き自動化。レベル4が限定領域において車の操作をすべて自

動運転システムが行い、ドライバーが関与しない高度運転自動化。レベル5は限定領域がなく、あらゆる場面で操作を自動運転システムが行う完全自動化と別れている。現在、日本ではレベル2までが発売している。レベル3以降が実用可能となるには事故が起こった場合の法律上の問題や技術的な安全性の問題など、完全自動化には時間がかかる。

自動運転車両はほとんど普及していないため、自動運転車両と手動運転車両が混在している環境下でのシステムが必要である。この問題を解決するため Guni Sharo らは、Hybrid Autonomous Intersection Management というプロトコルを提案している[2]。これは自動運転車両の普及率が90%以上の環境下で交通事故や渋滞が多く発生している交差点でスムーズに交通が行えるシステムである。しかし、普及率が90%になるには時間がかかるため、さらに普及率が低い環境でも適応可能となるシステムにすることが課題の一つである。また、自動運転車両は交通信号に従わずとも交差点に進入することは可能であるが、手動運転車両は交通信号に従わなければならない。交差点での赤信号と黄信号は、車の通過に要する時間を長引かせる。さらに、青信号になるといったん停車した車は一定のスピードまで加速することにある程度時間がかかる。交差点での待ち時間、あるいは交差点での停車時間が長いと渋滞が発生している要因を解決することも課題の一つといえる。

本論文では、交差点管理プロトコルである Hybrid Autonomous Intersection Management(HAIM)を用いて、交差点での待ち時間、交差点での停車時間を最小にするため信号システムのサイクルと切り替え時間に着目した最適化を行うことで、キャパシティ向上をすることが目標となる。

<sup>†1</sup> 神奈川工科大学  
Kanagawa Institute of Technology

また、最適化された信号制御をすることでキャパシティが向上することによりプロトコルの性能向上につながり、自動運転車両の普及率が低い環境下でも機能することを示す。

## 2. 従来手法と課題

### 2.1 Autonomous Intersection Management

Autonomous Intersection Management (AIM) [3]はすべての車両が自動運転車両という状態が前提として作られた交差点管理プロトコルである。AIM は、自動運転車両が交差点を通過するとき信号などの交差点管理機器 Intersection Manager (IM) に予約メッセージを送信し、事前に承認された予約と競合しない場合、予約要求を承認する。承認された車両は指定された軌道を通過することが可能なプロトコルである。シミュレーションの実行画面を図1に示す。シミュレーションは4方向交差点で行っており、交通信号から200m地点に線を記している。シミュレータ内では、自動運転車両が黄色、手動運転車両が紫色で表している。

車両が交差点を通過完了するまでの詳細な手順を以下に記す：

- 1) 接近中の自動運転車両は、予約を要求するメッセージをIMに送信する。メッセージの内容を表1に示す。
- 2) IM は、交差点を通過する軌道をシミュレーションすることによって要求メッセージを処理する。(シミュレーションされた軌道は経路)
- 3) IM はシミュレーションされた軌道が事前に承認された予約と競合しない場合、新しく受信したメッセージ内容に基づいて新しい予約を発行し、予約を含む承認メッセージを自動運転車両に送り返す。

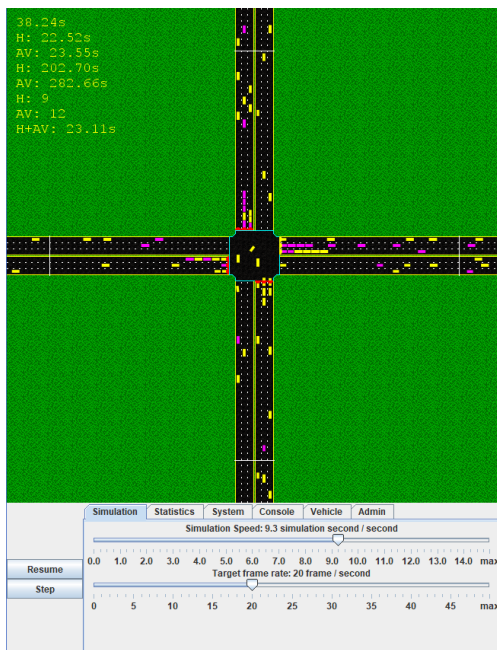


図1 シミュレータの実行画面

表1 メッセージ内容

項目名	説明
車両のID	予約をしている車両のID
車両データ	車両の大きさ、種類
予測到着時間	交差点に到着する時間
速度	走行している速度
加速度	車両の最大加速度
到着レーン	進入するレーン番号
脱着レーン	交差点を通行完了後のレーン番号

- 4) シミュレーションされた軌道が以前に承認された予約と競合してしまった場合、IM は送信してきた車両に対し予約失敗メッセージを送信し、所定の期間の後に新しい予約を要求することが可能である。
- 5) 承認されたメッセージを受信した場合は、メッセージで指定している通りに交差点に到着して通過する。
- 6) 自動運転車両は予約を取得しない限り交差点に進入することはできない。
- 7) 交差点を通過し終わると、自動運転車両は交差点を通過できたことをIMに通知する。

### 2.2 First Come First Served + Signals

First Come First Served + Signals(FCFS + Signals)とは、AIM と従来の交通信号を組み合わせたプロトコルである。ある車線の交通信号が青であるときは、その車線に到着すべての車両に通過権がある。しかし、交通信号が赤を表示している場合は、予約を受けた自動運転車両のみが通過することが可能となる。

このプロトコルは、信号から200mにセンサを設置し車両の数を検出することを前提としているが、手動運転車両の位置は検出していない。そのため手動運転車両の存在が確認された場合赤信号での自動運転車両の進入を禁止とする。これによって手動運転が存在した場合でもプロトコルが機能する。またAIMでは自動運転車両は、予約を取得できていない限り交差点に進入することはできない条件だが、FCFS + Signalsでは、失敗し所定の期間に予約できなかった車両は、手動運転車両として交差点を通過させる。

このシステムは接近する車両が自動運転車両か手動運転車両かを識別する必要がある。手動運転のその手順を下記に記す。

- 1)  $v$  : レーン上で検出された車両の数。
- 2)  $r$  : レーンから交差点に進入しようとする車両からの予約の数。
- 3) もし  $v > r$  ならば、差の数をレーンの手動運転車両の数とする。

手動運転車両の判断方法の例を図2に示す。交差点に向かってきている車両は4台いる。そこから予約数が3件あるため、手動運転車両の台数は1台である。

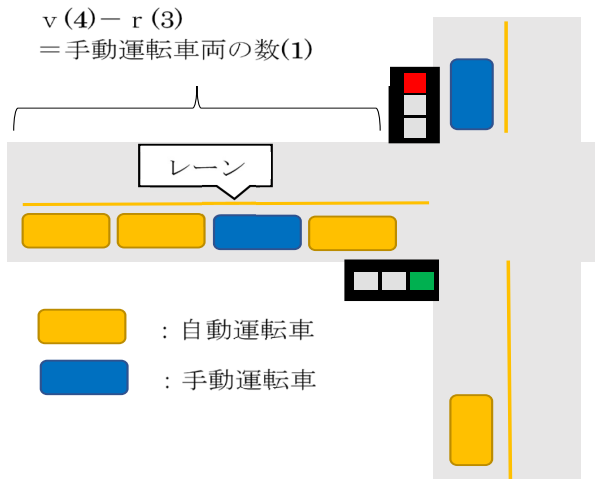


図2 手動運転車両の判断方法

### 2.3 Hybrid Autonomous Intersection Management

Hybrid Autonomous Intersection Management (H-AIM) は、FCFS + Signals よりも自動運転車両の普及率が低い場合であっても機能することを目的に提案されたプロトコルである。H-AIM は FCFS + Signals と同様に交差点での予約を必要とする。ただし、手動運転車両が接近してきた場合、FCFS + Signals では自動運転車両を赤信での通行を禁止するが、H-AIM は1車線ごとに手動運転車両を検知し、実線のみと競合する予約を拒否する。そのため自動運転車両は赤信号であっても競合しなければ予約することが可能となる。軌道の例を図3に示す。しかし、この手法を用いてシミュレーションを行っても手動運転車両の普及率が90%の条件下でのみ機能する。

## 3. 提案手法

### 3.1 提案手法

本論文は、既存手法の欠点を解決するために、交通信号

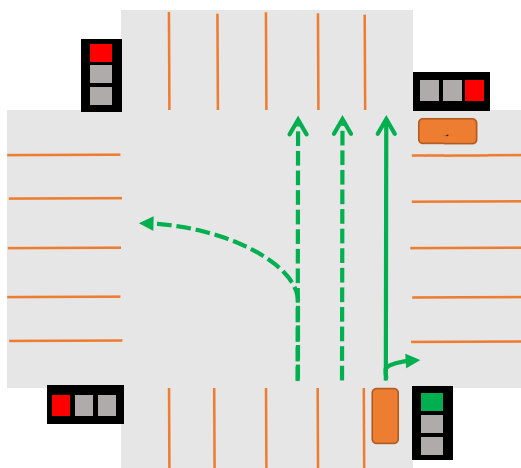


図3 軌道の例

自信を変更する手法を提案する。また、方向転換の条件変更によるキャパシティ向上も行う。方向転換の自由度が低い場合、手動運転車両は交差点をスムーズに進入することができる。一方、自動運転車両は方向転換の自由度が高い場合交差点をスムーズに進入することができる。方向転換の条件を手動運転車両と自動運転車両それぞれに適した条件を与えることが必要である。運信号のサイクルを長くすることは、単一方向の効率は良くなり、交差点全体の効率はあがるが、車両の最大待ち時間は長くなる。逆に、短くすると全体の効率は下がり、単一方向の効率も下がるが、最大待ち時間は短くなる。交通信号から200mまでの車両数と交差点を通過した車両数データを用いて1サイクル間における車の流入台数と流出台数を求める。この値を用いて交通信号のサイクル長とスプリットを最適な時間に変更することにより、交差点でのキャパシティ向上と自動運転車両の普及率が90%未満でも機能することを目的とする。

### 3.2 最適サイクル長と最適スプリットの求め方

最適サイクル長と最適スプリットを求める方法として李らの非線形計画問題と最適解の式7)を用いて最適化をする。

論文での各パラメータを以下のように設定している：

1.  $T$  : サイクル長
2.  $a'_0$  : 全赤信号時間
3.  $a'_1$  : 東西方向の赤信号時間
4.  $a'_2$  : 南北方向の赤信号時間
5.  $b'_1$  : 東西方向の青信号時間
6.  $b'_2$  : 南北方向の青信号時間
7.  $C$  : 黄色信号時間 黄色信号は通過できる時間 $kc$ と通過できない時間 $(1-k)c$ に分けられる。
8.  $\lambda_1 \sim \lambda_4$  : 東西南北それぞれの方向からの車の平均流入率
9.  $\mu_1 \sim \mu_4$  : 東西南北それぞれの青信号中の平均サービス率 (青信号中に交差点を通過完了した台数)

また、本論文の式の簡素化のため  $a_1 = a'_1 - (1-k)c$ ,  $b_1 = b'_1 + kc$ ,  $a_2 = a'_2 - (1-k)c$ ,  $b_2 = b'_2 + kc$ ,  $a_0 = a'_0 + (1-k)c$  とする。

一サイクルにおける東方向からの車の総待ち時間  $W_1$  を求める式は以下の通りとなる。

$$W_1 = \frac{\lambda_1 \mu_1 (a_1 + 2a_0)^2}{2(\mu_1 - \lambda_1)} \quad (1)$$

また、1サイクルにおける総待ち時間と平均待ち時間をそれぞれ  $W$ ,  $W_q$  とすると

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (2)$$

$$W_q = \frac{W}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)T} \quad (3)$$

となる。式(3)の平均待ち時間は、1サイクルにおける車の総待ち時間に関する式(2)から、そのサイクルのうちに到着した4方向の車の総台数を割ったものとして表して

いる。

対象としている交差点での、1 サイクルにおける車の平均待ち時間を最小にする式は、非線形計画モデルの解析、 $W_q$ が凸関数であることの証明を行い大域的最適解が求められるため最適サイクル長と最適切り替え時間は、以下のようによまとめられる：

$$\begin{cases} b'_{1 \text{最適}} = T_{\text{最適}} \rho \\ T_{\text{最適}} = \frac{2[a'_0 + (1-k)c]}{1-2\rho} \end{cases} \quad (4)$$

これらの数式を H-AIM に組み込みシミュレータ上で実験を行う。













### 3.3 方向転換の条件変更

手動運転車両は交差点を走行する際、表2のAのように方向転換の条件がより制限されたものが交差点をスムーズに走行することができる。図3を例にすると、東から向かってくる車両と南から向かってくる車両は手動運転車両であるとする。交差点の方向転換の条件がBの条件で、東から向かってくる車両が西に直進すると仮定する。その場合自動運転車両であるため赤信号では予約が必要である。しかし、南から向かっている車両が先に予約していて軌道と競合してしまうため、予約は拒否されてしまう。

この交差点の方向転換の条件がAやCだった場合、南から向かってくる車両は右折のみになることで、直線的な軌道が存在しなくなるため東から向かっている車両は予約を得ることができる。このように手動運転車両は軌道の数を最小限に減らすことで交差点に進入することが容易になる。一方、自動運転車両は信号が赤信号であったとしても交差点に進入することが可能である。したがって自動運転車両は軌道の数が増加することで交差点に進入することが容易になる。

方向転換の条件は4種類あげられる。方向転換の条件の種類を表2に示す。Aは最も旋回制限があり軌道のメッセージの送受信回数が少ない。Dは最も旋回制限が自由な例である。AとBの条件は、軌道が他の軌道と交差しないことが多いため安全性がある。しかし、CとDは軌道が競合してしまう確率が高いため安全であるとはいえない。また図3を例にすると、方向転換の条件としてCまたはDが割

表 2 方向転換の条件

A			B		
					
C			D		
					

り当てられるとする。南から進入する車両が手動運転車両として、すでに南側の中央の車線に手動運転車両が交差点に右折して進入しているとした場合、右側にいる手動運転車両は青信号にもかかわらず進入することが不可能となり、後ろの車両を詰まらせることになる。

さらに手動運転車両同士でぶつかり事故を起こしてしまう可能性がある。そのため手動運転車両の方向転換の条件としてCとDは危険な条件である。実験ではCとDは手動運転の候補としてあげることができない。ただ、手動運転車両がAで自動運転車両がDの場合の組み合わせのみ競合する確率が低いため、この条件は候補としてあげることができる。そこで、どの組み合わせが適しているか実験を行い比較する。

## 4. 実験

### 4.1 提案手法による実験

実験環境は元のプロトコルと比較ができるように同じH-AIMシミュレータ[2]で行った。具体的なシミュレーションの条件を表3に示す。また、自動運転車両と手動運転車両の方向転換の条件を表4と表5に示す。前節の式に必要な値の取り方として、流入率を求めるための値として自動運転車両が予約を開始できる地点の交通信号から200mから進入する流入台数を測る。サービス率の値は、青信号中の車の流出量から検出する。信号の切り替え時間を変更前と変更後、混雑レベルを300, 450, 600, 750と変更を行い、流入台数、流出台数、最大旅行時間の測定を行う。方向転換の条件も元の条件と比較が容易である同じ条件で行う。

表 3 シミュレーションの条件

シミュレーション時間	600[s]
車両の位置更新間隔	0.1[s]
車両のルート	ランダム
サイクル長 (変更前)	33[s]
青信号 (変更前)	30[s]
黄信号 (変更前)	3[s]
自動運転車両普及率	90[%]

表 4 自動運転車両の方向転換の条件




		
---	---	---

表 5 手動運転車両の方向転換の条件

		
---	---	---



## 4.2 自動運転車両の普及率変更による実験

従来の手法では自動運転車両の普及率が90%まで普及していない限り機能しない。提案手法で自動運転車両の普及率が90%未満である条件下でも機能することが可能であるか実験を通して確認する。実験の条件は普及率を10%ずつ減らし測定ができなくなるまで行う。測定ができなくなる条件として交通信号から200m以上渋滞してしまった場合、流入台数の値が測定できなくなるためこの条件に達した場合実験終了とする。

## 4.3 方向転換の条件変更実験

実験では安全性のある組み合わせAA, AB, BB, ADの割り当て、流出台数と旅行時間の変化を比較し適した組み合わせを見つける。また、自動運転車両の普及率による変化も比較する。

## 5. シミュレーション結果と評価

### 5.1 提案手法による実験の結果と評価

提案手法の実験結果を表5に示す。流出台数、旅行時間ともに従来手法よりも提案手法は性能が良くなることを確認できた。特に混雑レベルが上がるにつれて流出台数、旅行時間ともに改善効果が大きいことがわかる。混雑レベルが低い状態で変化があまり見えない理由として、流出台数が少ないため赤信号中に停車していた車両が青信号中にすべて流出することが可能であることで変化が少ないと考えられる。

### 5.2 自動運転車両の普及率変更による実験の結果と評価

普及率80%の実験結果を表6に示す。従来手法で述べられていた通り普及率が90%未満であると交通信号から200m以上渋滞することにより、流入台数を測定できない状態となった。測定不能になった状態を図4に示す。ただ、提案手法は自動運転車両の普及率80%でもプロトコルが機能した。また普及率80%の状態の提案手法の結果は普及率90%の従来手法とのデータを比較してみると差はなく同等のレベルの性能を発揮できたといえる。普及率80%の結果を表6.2に示す。そこからさらに70%まで普及率を下げた実験を行ったが、混雑レベルが750になると、測定が不能になるため普及率80%未満であると使用できないことが確認できた。

表 5 提案手法の実験結果

	混雑レベル	300	450	600	750
従来手法	流入台数	560	852	1143	1399
	流出台数	526	798	1062	1181
	旅行時間	28.54	29.58	40.93	65.41
提案手法	流入台数	563	852	1139	1408
	流出台数	537	818	1083	1259
	旅行時間	24.31	28.21	31.75	50.11

表 6 普及率 80%の結果

	混雑レベル	300	450	600	750
従来手法	流入台数	558	848	1122	測定不能
	流出台数	528	770	994	測定不能
	旅行時間	33.12	38.14	50.5	測定不能
提案手法	流出台数	556	860	1126	1392
	流入台数	520	805	1033	1179
	旅行時間	28.57	32.76	47.66	63.73



図 5.1 測定不能状態

### 5.3 方向転換の条件変更による実験結果と評価

実験結果は、交差点での流出台数と旅行時間の比較によって評価をしていく。普及率90%の実験結果を図5,6,7,8に示す。流出台数の比較から見ていくと、混雑レベルが300と750ともに自動運転車両の旋回制限が自由になるとともに流出台数も上がっていていることがわかる。これは自動運転車両が多いことにより方向転換の自由度が高いことと比例して、流出台数が上がったと考えられる。

普及率80%の環境での方向転換の条件を変更した場合の結果を比較する。普及率を80%にした実験結果を図9,10,11,12に示す。ADが混在全体ではよい成績を出している。全体の変化を普及率90%と比較すると全体の数値は普及率の低下が原因となり90%の結果に劣ることがわかる。このことから、自動運転車両の方向転換の条件で自由度を高くすること、手動運転車両の方向転換の条件を自由度を低くすることにより従来手法のBAの組み合わせよ

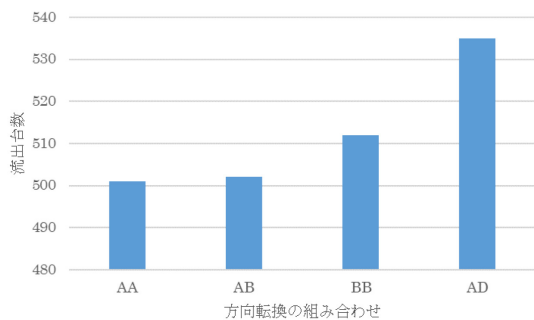


図 5 普及率 90%, 混雑レベル 300 の流出台数比較

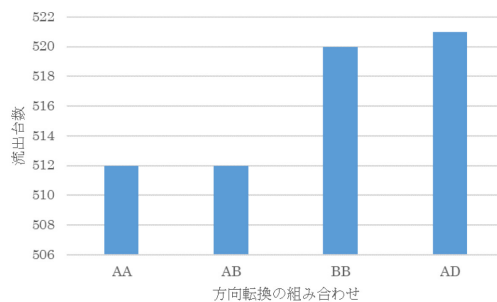


図 9 普及率 80%, 混雑レベル 300 の流出台数比較

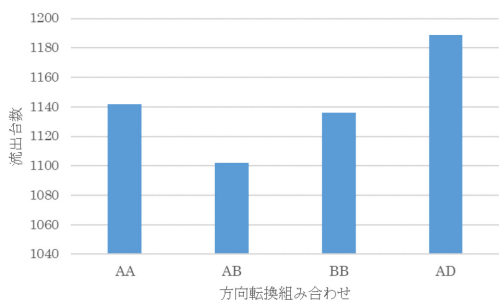


図 6 普及率 90%, 混雑レベル 750 の流出台数比較

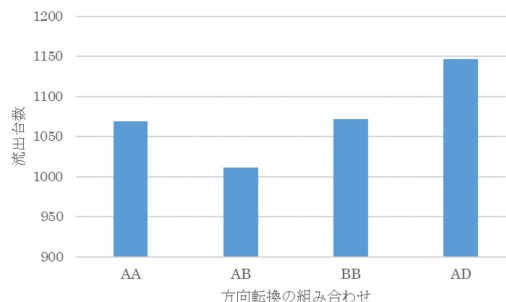


図 10 普及率 80%, 混雑レベル 750 の流出台数比較

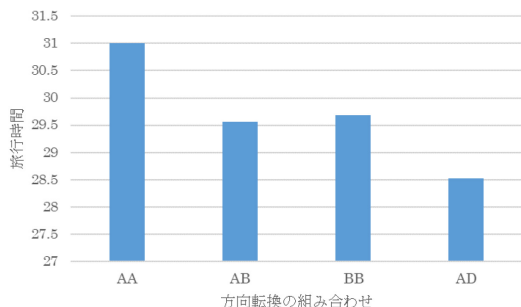


図 7 普及率 90%, 混雑レベル 300 の旅行時間比較

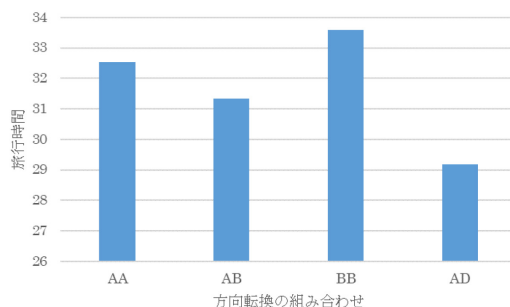


図 11 普及率 80%, 混雑レベル 300 の旅行時間比較

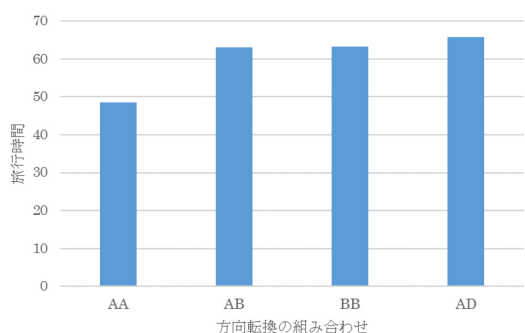


図 8 普及率 90%, 混雑レベル 750 の旅行時間比較

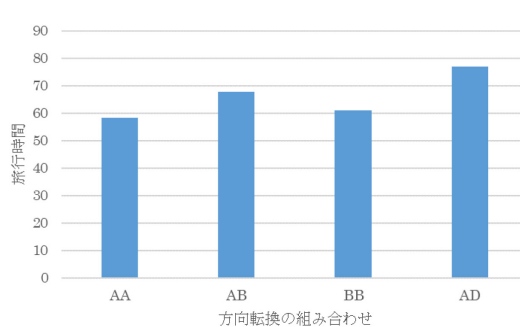


図 12 普及率 80%, 混雑レベル 750 の旅行時間比較

りも AD の組み合わせが流出台数と旅行時間の改善になったといえる。

## 6. おわりに

本論文では、最適サイクル長と最適スプリットを求め自動運転車両と手動運転車両の混在環境下での交差点プロト

コル Hybrid Autonomous Intersection Management の性能改善と自動運転車両の普及率が従来よりも低い環境でも適応できるような実験、評価をした。シミュレーションの結果、流出台数は従来手法よりも増加し、旅行時間は減少したため性能向上をすることができたといえる。このことから自動運転車両の普及率が従来手法よりも低い場合でも機能する

ことを証明することが可能であるため提案手法は有効であるといえる。また、普及率が変化することにより、方向転換の条件の重要性が確認することができた。

今後の課題としては、今回の実験では1つの交差点での実験であった。これを複数の交差点で同時に行った場合のデータをとることで提案手法の優位性を示すことができるといえる。

## 参考文献

- [1] 警視庁 [http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about\\_mpd/jokyo\\_tokei/tokei\\_jokyo/ippan.files/28tokei.pdf](http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/ippan.files/28tokei.pdf), (2018/2/14).
- [2] Gni Sharon, Peter Stone : A Protocol for Mixed Autonomous and Human-Operated Vehicles at Inter-sections, International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 151-167(2017)
- [3] Dresner, K., Stone, P.: A multiagent approach to Autonomous Intersection Management. *J. Artif. Intell. Res.* 31, 591-656 (2008)
- [4] 鈴木弘司, 藤田素弘 : 大規模交差点の交通安全対策に関する利用者意識・挙動分析, 土木計画学研究・論文集 Vol.27 No.3 (2010)
- [5] 福島淳, 青島縮次郎 : 信号制御方式と交差点構造の改良による交差点の交通渋滞緩和効果分析, 土木計画学研究・講演集 Vol: 26 (2002)
- [6] 宮西洋太郎, 宮本衛市 : ITS 技術を利用した交差点信号制御の提案, 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 83号(2001)
- [7] 李明哲 張玉超, 交差点における交通信号の最適サイクル長と切り替え時間へのアプローチ, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol. 58, p. 148-165 (2015)
- [8] 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 83号(2001)