

コネクテッドカーの交差点協調制御に関する研究

田代 むつみ¹・施展華²・三輪 富生³・森川 高行⁴

¹正会員 名古屋大学特任講師 未来社会創造機構 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:mutsumi@civil.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻

³正会員 名古屋大学准教授 未来材料・システム研究所

E-mail:miwa@nagoya-u.jp

⁴正会員 名古屋大学教授 未来社会創造機構

E-mail:morikawa@nagoya-u.jp

都市内の信号の無い十字路交差点へ流入する車両の協調制御方法を提案し、ミクロシミュレーションによりその効果を検討した。道路上の全ての車両が位置や速度、予定経路をリアルタイムに共有できるコネクテッドカーであるとし、速度の不確実性により手動運転車と自動運転車の混在状態を表現した。交差点内の予定経路が重ならない車両は交差点に同時流入可能として、交差点から一定距離に設けられた制御ゾーンに到達した車両から、同時流入する車両群（世代）を決定した。また、より効率的な協調制御を行うため、制御ゾーン内での世代の追い越しを導入した。優先・非優先制御や信号制御と比較した結果、自動運転車がある程度普及した状況下においては、提案した協調制御は交通の整流化に効果を発揮することが明らかになった。

Key Words: cooperative control, intersection, conflict, connected vehicle, microsimulation

1. はじめに

コネクテッドカーや自動運転車の普及に伴い、個々の車両の位置や速度、予定経路などの情報がリアルタイムに共有されるようになると、既存の信号制御や優先・非優先制御よりも、もう少し複雑で効率的な制御が可能になるであろう。本研究では、十字路交差点において車両同士が協調し安全かつスムーズに合流するための「協調制御」方法について検討した。

協調制御に関する既往研究では、交差点内のコンフリクトを回避し、かつ旅行時間や衝突リスクなどの指標を最適化させるように、各車両の最適な速度や加速度を解くことが多い（例えば 1)~4)）。このような最適化問題では、数理モデルが複雑になり、車両台数が増えてきた場合に短時間での処理が非常に難しくなるだけでなく、必ずしも最適解が得られないこともある。刻一刻と変化する交通流を制御するためには、計算負荷が少なく汎用性が高いアルゴリズムが求められる。

また、協調制御に関する既往研究では、完全に制御が可能な、自動運転車のみから成る交通流を想定したものが多く、自動運転車と手動運転車の混在状態における研

究も一部見られるが（例えば 5)~8)）、あくまで制御対象は自動運転車のみである。全ての車両が自動運転車に置き換わるまでには、まだ長い時間を要することが予想されるが、コネクテッド技術が搭載された手動運転車はすでに普及が拡大しつつあり、近い将来には両者が混在した交通流の形成が期待され、また手動運転車にも指示やある程度の制御が可能となることが期待される。

そこで本研究では、自動運転・手動運転のコネクテッドカーが混在した交通流を仮定し、全車両を制御対象とした協調制御方法を提案した。問題を単純化するため、本研究では、交差点に同時流入可能な車両群を「世代」として定義し、属すべき世代と世代毎の流入順のみを、各車両に指示するものとした。手動運転車は、指示には必ず従うが、必ずしもシステムが意図した通りの運転操作が実行できないものとして、速度の不確実性により自動運転車との差別化を行った。そして、安全性も考慮して周辺車両の行動を決定した。また本研究では、より効率的な協調制御の実現のため、制御ゾーン内での「世代の追い越し」も導入した。

提案手法の有用性を検討するため、セル・オートマトンによるミクロシミュレーションを構築し、片側一車線

の十字路交差点において、信号制御および優先・非優先制御との比較を行った。交通量や自動運転車普及率による影響も検討し、提案手法の効率性について考察した。

2. セル・オートマトンによるシミュレーション

本研究では、個々の車両の挙動を表現するミクロシミュレーションとして、セル・オートマトンの NaSch モデル⁹⁾を参考に、交通シミュレーションを作成した。以下に概要を示す。

(1) 道路ネットワーク

図-1に、本研究で用いた道路ネットワークを示す。片側1車線の十字路交差点を想定し、リンク長は全て250mとした。道路は長さ2.5mのセルで区切られ、1台の車両が2セルを占有する。シミュレーション上のタイムステップは1秒で、最高速度 (v_{max}) は、45km/h (5セル/ステップ) とした。車両は、リンク 1,2,3,4 を通って交差点に流入した後、リンク 5,6,7,8 より流出する。

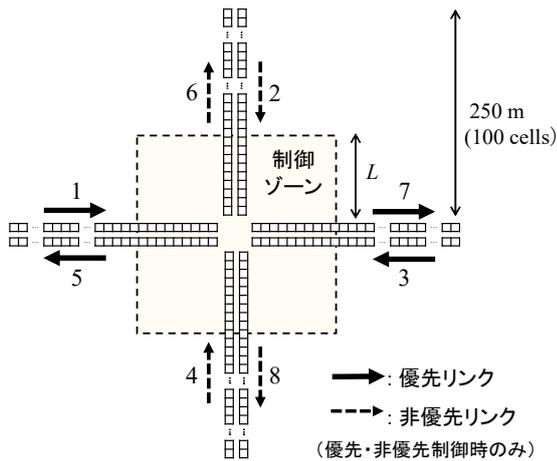


図-1 シミュレーションに用いた道路ネットワーク

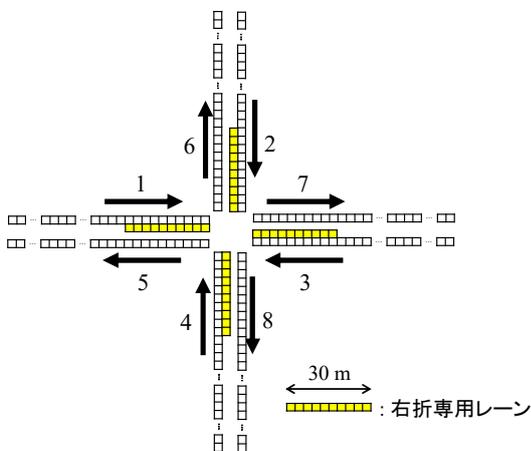


図-2 信号制御 (右折レーン有) の道路ネットワーク

協調制御では、交差点から一定距離の範囲を制御ゾーンとして定義した。本研究では、ゾーンの長さを L として 50, 100, 200m の 3 種類を比較検討した (詳細は後述)。

優先・非優先制御では、横方向のリンク (1,3,5,7) を優先道路、縦方向のリンク (2,4,6,8) を非優先道路リンクとした (信号制御や協調制御では、この優先・非優先関係は用いない)。

信号制御では、図-1のネットワークに加え、図-2のように右折専用レーンを設けたネットワークについても比較対象とした。

(2) ローカル・ルール

車両の移動を表現するために、以下の3種類のローカル・ルールを与えた。

a) 車両発生ルール

本研究では、吉祥寺・三鷹ベンチマークデータセット¹⁰⁾における、成蹊通り交差点の交通量を参考に、交通量を設定した。全流入リンクの合計交通量について、観測されたピーク時交通量1800台時を基準に、600,900,1200,1500,1800台時の5つを設定し比較した。横方向リンク (リンク 1,3) と縦方向リンク (リンク 2,4) の発生交通量の割合を3:2、右左折率はそれぞれ10%,15%とした。

表-1に、各リンクにおける車両の発生台数を示す。

車両発生はランダムに行い、各シナリオで試行回数は60回とした。また、車両は600秒(10分)間発生させるが、始めの400秒をウォーミングアップ時間として評価の対象外とした。

表-1 各リンクへの車両の発生台数

交通量 (台/時)	リンク 1,3			リンク 2,4		
	左折車	直進車	右折車	左折車	直進車	右折車
600	18	144	18	18	84	18
900	27	216	27	27	126	27
1200	36	288	36	36	168	36
1500	45	360	45	45	210	45
1800	54	432	54	54	252	54

b) 速度ルール

車両 i のタイムステップ t における速度 $v_{i,t}$ の変化は、最大速度 v_{max} と、同一リンク上の前方車両との距離 $gap_{i,t}$ より、以下のアルゴリズムによって行う。

- If $v_{i,t} \geq gap_{i,t}, v_{i,t+1} = gap_{i,t} - p_{noise}$;
- Else if $v_{i,t} < v_{max}, v_{i,t+1} = v_{i,t} + a - p_{noise}$;
- Else if $v_{i,t} > v_{max}, v_{i,t+1} = v_{i,t} - a - p_{noise}$;
- Else, $v_{i,t+1} = v_{i,t} - p_{noise}$.

ここに、 a は加速度、 p_{noise} は-1,0,1のいずれかをとる変数で、運転速度操作における不確実性を表現している (詳細は表-2で後述)。次のタイムステップにおける速

度 $v_{i,t+1}$ は $0 < v_{i,t+1} < v_{max}$ の範囲で、前方車両との衝突が生じないように調整される。

c) リンク移行ルール

ここでは、優先・非優先制御と信号制御における、リンク移行ルールを示す（協調制御でのリンク移行ルールは、次の章で説明）。

優先・非優先制御では、移行先リンクの入口セルに他車両が存在せず、かつ自車両よりも優先度の高い行動をとる車両がクリティカルギャップ内に存在しない場合に、リンク移行を可能とする。優先側リンクの車両は、直進時は現在の速度を維持、右左折の場合は最低速度（1セル/タイムステップ=9 km/h）まで減速する。一方、非優先側リンクの車両は、必ず交差点手前で一時停止をした後、リンク移行の可否を判断する。

信号制御で、現示が青の場合は、優先・非優先制御の優先側リンクの車両と同じルールに従う。現示が赤の場合は停止し、黄色の場合には交差点までの距離と速度から通過/停止を判断する。信号現示は、成蹊通り交差点を参考に黄信号長3秒、全赤信号長2秒とし、Websterの実験式¹¹⁾よりサイクル長を決定した。

(3) 自動運転車と手動運転車の差別化

本研究では全ての車両はコネクテッドカーであるが、手動運転車の運転操作のばらつきを考慮して、更新される速度に不確実性を考慮する。また、手動運転車の周辺車両は、自動運転車より高い安全性を確保するために、追従時やリンク移行時のギャップを調整するとした。

a) 速度の不確実性

前述の速度ルールにおける、速度の不確実性を表現する変数 p_{noise} は、自動運転車の場合は常に $p_{noise} = 0$ とした。手動運転車については、速度が大きいほど速度のばらつきが大きいとして、Kockelman and Ma (2007)¹²⁾による以下の式を参考にして速度 $v_{i,t}$ の標準偏差 $\sigma_{i,t}$ を求め、表-2の通り速度に応じた p_{noise} の決定確率を与えた。

$$\sigma_{i,t} = 0.095v_{i,t} \tag{1}$$

表-2 速度に応じた p_{noise} の決定確率

速度 (km/h)	決定確率		
	-1	0	1
9	0.00	100	0.00
18	0.42	99.16	0.42
27	3.97	92.06	3.97
36	9.41	81.18	9.41
45	14.63	70.74	14.63

b) 車間距離

鰐部ら(2019)¹³⁾を参考に、自動運転車と手動運転車の

混在状況における追従車と先行車の組み合わせを、図-3の4つのパターンに分類した。すなわち、先行車と追従車の2台がともに自動運転車の場合にのみ、車間距離を小さくすることができるとした。

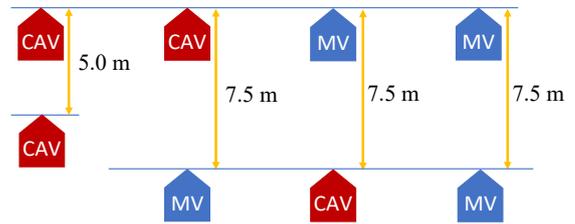


図-3 自動運転車 (CAV) と手動運転車 (MV) の関係

c) クリティカルギャップ

リンク移行時のクリティカルギャップについても同様に4つのパターンに分類し、自動運転車同士では2秒、手動運転車が含まれる場合は3秒として設定した。

3. 協調制御アルゴリズム

本研究では、Xu et al. (2018)¹⁴⁾の研究を参考に、交差点への車両の流入順序を制御する協調制御方法を提案する。各車両は交差点から一定距離に設けられた制御ゾーンに到達した時点で、制御システムより指示を受けるものとする。通信の遅延は無く、全車両が必ず指示に従うような、理想的な状態を仮定する。

(1) コンフリクト関係に基づく世代の構築

車両の予定経路が交差点内で同一時刻に重なることをコンフリクトと定義した場合、コンフリクト関係は図-4に示す3種類に分類される。いずれのコンフリクト関係にもあてはまらない場合は、車両は交差点に同時流入可能となる。

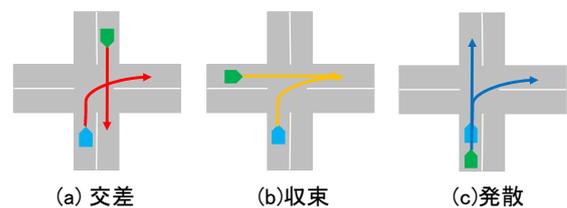


図-4 コンフリクト関係

本研究では、交差点に同時流入可能な車両群を「世代」と定義し、車両 i が属すべき g_i 世代を次のルールで決定した。まず、車両 i は交差点から一定距離に設けられた制御ゾーンに到達した時点で、制御ゾーン内を走行中の「最終世代」の車両を探索する。ここに最終世代とは、最も新しく作られた世代、すなわち最大の世代番号（こ

の世代番号を G とする)を持つ世代と定義する。

続いて、車両 i は、最終世代 (G 世代) に属する全ての車両と予定経路を比較し、コンフリクト関係を調べる。コンフリクト関係に無い場合は、車両 i は G 世代に属し、 $g_i = G$ となる。一方、いずれかの車両とコンフリクト関係にある場合は、新しい世代を作り $g_i = G + 1$ となる。片側 1 車線の十字路交差点を対象とする場合、1つの世代に属する車両数は、1~4 台となる。なお、この世代の構築方法は、Xu et al. (2018)¹⁴⁾におけるスパニングツリーの構築方法と同じである。

(2) 協調制御下の挙動

世代番号が決まった車両は、制御ゾーン内では以下の3種類の制約条件に従う。

a) 最大速度

協調制御においては、交差点手前で一時停止する必要は無いが、安全性を確保するために、交差点に近づくほど減速する。本研究では、表-3に示すように、協調制御下での最大速度 \bar{v}_{max} を与えた。

表-3 制御ゾーン内の最大速度 \bar{v}_{max}

交差点からの距離 (m)	最大速度 (km/h)
50-200	45
25-50	36
5-25	27
0-5 (直進時)	27
0-5 (右左折時)	9

b) 世代間の距離

制御ゾーン内では、常に1つ前の世代の車両を抜かさないように走行する。具体的には、車両 i は、1つ前の $g_i - 1$ 世代の最後尾車両(最も交差点からの距離が遠い車両)と、距離 D を保つように速度調整を行う。

距離 D は、安全確保のため、ゾーン内の最大速度と手動運転の不確実性を考慮して、表-4の通り設定した。最大速度が大きい(すなわち交差点から遠い)ほど、また自車両 i と $g_i - 1$ 世代の車両に手動運転車が含まれる場合ほど、世代間の距離を大きくする。

表-4 世代間の距離 D

交差点からの距離 (m)	距離 D (m)	
	自動運転車のみ	手動運転車混在
50-200	12.5	25.0
25-50	10.0	20.0
0-25	7.5	15.0

$g_i - 1$ 世代の最後尾車両は、車両 i と同じリンク上に存在するとは限らないため、制御システムにより位置情報が共有されるものとする。

c) 交差点への流入

先頭世代(制御ゾーン内で世代番号が最小の世代)の車両は、交差点に流入が可能であり、世代内の複数の車両が同時に流入しても良い。

各車両は基本的には世代順に交差点に到着するが、車両の位置関係によっては、大きい世代番号の車両が先に交差点に到着することもある。このため、車両 i は1つ前の $g_i - 1$ 世代の車両が全て交差点に流入するまでは、交差点手前で停止して待つ。

(3) 世代の追い越し

上述のルールでは、新しく制御ゾーンに到達した車両は、最終世代 (G 世代) か、1つ後の $G + 1$ 世代のどちらかに属することになる。しかし、より前の世代(古い世代)へ流入することができれば、各世代の車両数、すなわち交差点に同時流入する車両数を増やすことができ、より効率的な協調制御が可能になる。そこで本研究では、制御ゾーン内を走行中に、交通状況に応じて世代の「追い越し」を可能とする方法を導入した。

追い越しを導入した場合の、車両 i の g_i 世代の決定方法を図-5に示す。新しく制御ゾーンに到達した車両 i は、同一リンク前方に他車両 j が存在する場合はその次の $g_j + 1$ 世代を、存在しない場合は制御ゾーン内の先頭世代を、検証すべき最初の目標世代 (G_{target} 世代) として設定する。

車両 i は、目標世代 (G_{target} 世代) の全ての車両とコンフリクト関係に無い場合は、別途設けた「追い越し判定モデル」により、 G_{target} 世代への流入可能性を判断する。流入可能と判断された場合は車両 i は目標世代に属し、 $g_i = G_{target}$ となる。一方、 G_{target} 世代のいずれかの車両とコンフリクト関係にある場合、またはモデルにより G_{target} 世代への流入が不可と判断された場合は、1つ新しい $G_{target} + 1$ 世代を目標世代に再設定する。上記の流れを、目標世代が最終世代 (G 世代) に達するまで繰り返し、車両 i の世代を決定する。

追い越しの成否は、制御ゾーン内の複雑な交通状況に依存する。そこで本研究では、2項ロジットモデルにより成功確率を計算することで、それを判定することにした。用いた説明変数を表-5に示す。シミュレーションでは、新しく制御ゾーンに到達した車両 i と目標世代 (G_{target} 世代) の最後尾の車両について、交差点到着時刻をそれぞれ T_{new} , T_{target} とし、以下の通り追い越しの成否を判定した。

- $T_{new} \leq T_{target}$: 追い越し成功 (overtaking = 1)
- $T_{new} > T_{target}$: 追い越し失敗 (overtaking = 0)

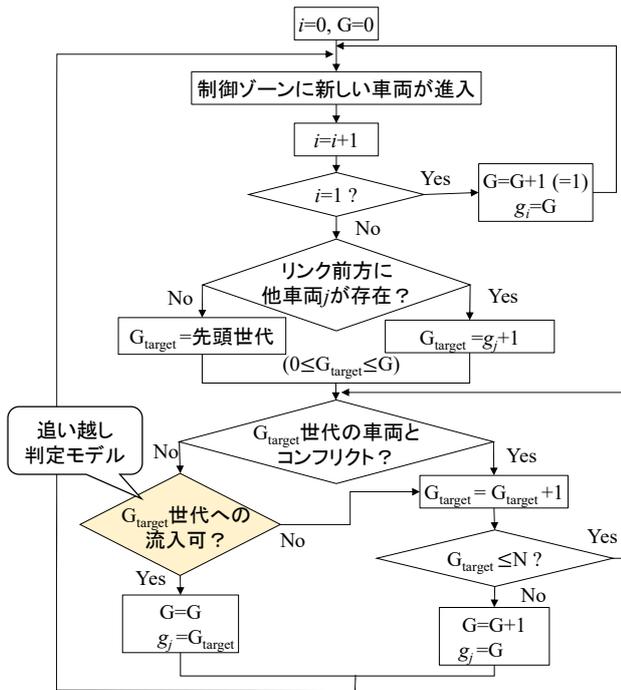


図-5 追い越しを考慮した世代の決定方法

表-5 追い越し判定モデルの説明変数

変数	説明
<i>driver</i>	車両 <i>i</i> の車両タイプ 1: 自動運転車; 0: 手動運転車
<i>parent_generation</i>	目標世代よりも前の世代 (交差点に近い世代) の数
<i>turn</i>	車両は交差点で右左折予定か? 1: Yes; 0: No
<i>D_new-D_target</i>	目標世代の最後尾車両と車両 <i>i</i> の距離 (km)
<i>MV_before</i>	目標世代よりも前の世代の、手動運転車の割合 (%)
<i>MV_target</i>	目標世代の手動運転車の割合 (%)

4. シミュレーション結果

本研究で提案した、追い越しを考慮した協調制御方法について、セル・オートマトンによるシミュレーションにより検討した。

(1) 追い越し判定モデルの推定

始めに、追い越しを判定する 2 項ロジットモデルについて、パラメータの推定を行った。

様々な交通状況を再現するため、表-1 に示す 5 種類の交通量について、自動運転車の混在率を 0~100% まで 10% 刻みに 11 パターン与え、各シナリオ 30 回ずつ、計 1650 回のシミュレーションを実施した。車両の発生は 600 秒とし、ウォーミングアップ後の 400 秒から 600 秒の間に追い越しを検証すべき車両を検知し、追い越しの成否とその時の交通状況をデータとして抽出した。

なお、追い越しでは、制御ゾーンの長さ L の影響が大きいと考えられるため、 $L=50, 100, 200\text{m}$ の 3 種類について、それぞれデータ作成とパラメータ推定を行った。

推定結果を表-6 に示す。制御ゾーンが長いほどサンプル数が多く、追い越しの機会が増える。また、自動運転車ほど追い越しが成功しやすい。一方、目標世代やそれより前の世代に手動運転車が混在するほど追い越しが成功しやすいことから、追い越しの効果は、自動運転車の普及率が低い時点でより顕著に表れると考えられる。

表-6 追い越し判定モデルの推定結果

説明変数	$L=50\text{m}$		$L=100\text{m}$		$L=200\text{m}$	
	推定値	t-stat	推定値	t-stat	推定値	t-stat
<i>constant</i>	-0.7	-7.1	-0.4	-4.4	-0.5	-7.1
<i>driver</i>	1.5	31.6	1.2	30.2	1.0	27.3
<i>parent_generation</i>	0.3	27.0	0.2	34.5	0.2	50.0
<i>turn</i>	-1.2	-26.5	-1.0	-27.4	-0.9	-26.9
<i>D_new-D_target</i>	-36.3	-18.0	-15.5	-16.0	-5.8	-15.3
<i>MV_before</i>	3.0	44.1	1.7	32.1	1.1	21.8
<i>MV_target</i>	0.5	11.7	0.5	12.6	0.5	15.1
サンプル数	24006		29737		34477	
$LL(0)$	-16639.691		-20612.118		-23897.635	
$LL(\beta)$	-8670		-12342		-14580	
Adjusted R^2	0.479		0.401		0.390	
AIC	17354		24698		29174	

推定したモデルにより、車両 i が追い越しに成功する確率 P_i は以下の式で求められる。

$$Y_i = \theta X_i \tag{2}$$

$$P_i = \frac{1}{1+e^{-Y_i}} \tag{3}$$

ここに、 θ は推定した係数ベクトル、 X_i は車両 i が制御ゾーンに到達した時点の説明変数ベクトルである。

構築したロジットモデルを用いて計算される追い越し成功確率 P_i が 0.5 以上かどうかによって、追い越しの可否を評価することが自然であるが、0.5 以下でも追い越しを実施することで旅行時間を短縮できる場合が見られたため、本研究では、閾値 p を新たに設定することで、 $P_i > p$ を「追い越し可能」の判定基準とした。推定したモデルを導入したシミュレーションを複数回実施し、交通量毎に平均旅行時間が最も短くなる場合の閾値 p と制御ゾーンの長さ L を調べた。

この結果、いずれの交通量においても、制御ゾーンが長い場合は、追い越しの機会は増えるが成功確率が低くなり、特に混雑した交通状況ほど非効率になることがわかった。このため本研究では、最適な制御ゾーンの長さ

として、 $L=50m$ を採用した。

閾値 p については、交通量が600,900,1200,1500,1800台/時の時、それぞれ0.6, 0.7, 0.3, 0.4, 0.4となった。交通量が少ない場合は、元々あまり追い越しが起きていない、または追い越しをする必要がないので、 p を大きくしてより精度の高い追い越しを行う方が効率的である。一方、交通量が多い時は、 p を小さくして追い越しの回数を増やした方が良いと考える。

(2) 協調制御の効果分析

提案した協調制御の効果を分析するため、優先・非優先制御および信号制御との比較を行った。なお、右折レーンを設置した信号制御は、交通容量が大きいため、当然のことながら右折レーンがない他の交制御方法と比べて混雑が生じにくい、提案する協調制御の効率性を評価するために比較対象に加えている。

はじめに、制御による効率性を調べるため、交差点に流入するリンクにおける全車両の平均旅行時間を比較した。図-6に結果を示す。

交通量が少ない場合は、信号制御よりも、協調制御や優先・非優先制御の方が平均旅行時間が短い。しかし、交通量が増加してくると、優先・非優先制御では、非優先リンクからの合流が難しくなるため、他の制御よりも平均旅行時間が大きくなる。信号制御（右折レーン有）は、他の制御よりも道路容量が大きい分、より混雑した状況では優位になる。今回提案した協調制御は、右折レーンの無い条件下であれば、信号制御よりも常に効率的であることが分かった。

また、信号制御（右折レーン有）以外の3つの制御では、自動運転車普及率が高いほど平均旅行時間が小さく、特に交通量が多い時ほど、その傾向は顕著になった。自動運転車の割合が増えることで、車両は間隔をつめて走行することが可能となり、合流もスムーズに行われることから、混雑が緩和されると考えられる。右折レーンが有る場合は、自動運転車の普及率に関係なく平均旅行時間はほぼ一定であることから、今回検討した交通量の範囲では混雑が発生していないことが分かる。

図-6の各交通量、自動運転車普及率において、平均旅行時間が最も小さい制御を、効率性に関する最適制御として図-7にまとめた。上段/下段の図はそれぞれ、優先・非優先制御と右折レーン無/有の信号制御、協調制御を比較した結果である。

黄緑破線で囲んだように、交通量が少ない場合には、協調制御と優先・非優先制御は効率性がほぼ等しい（平均旅行時間の差は1秒未満）。しかし、図-8に示す通り、標準偏差で比較すると協調制御の方が値が小さく、信号停止がないため、速度のばらつきが小さい制御が可能となることが分かる。提案した協調制御は、交通量がある

程度多く、自動運転車が普及した状況下で、効果を発揮する。今回の条件では、自動運転車の普及率が75%以上の時に、右折レーン有の信号制御よりも協調制御の方が効率的となり、道路容量の節約にもつながることが分かった。

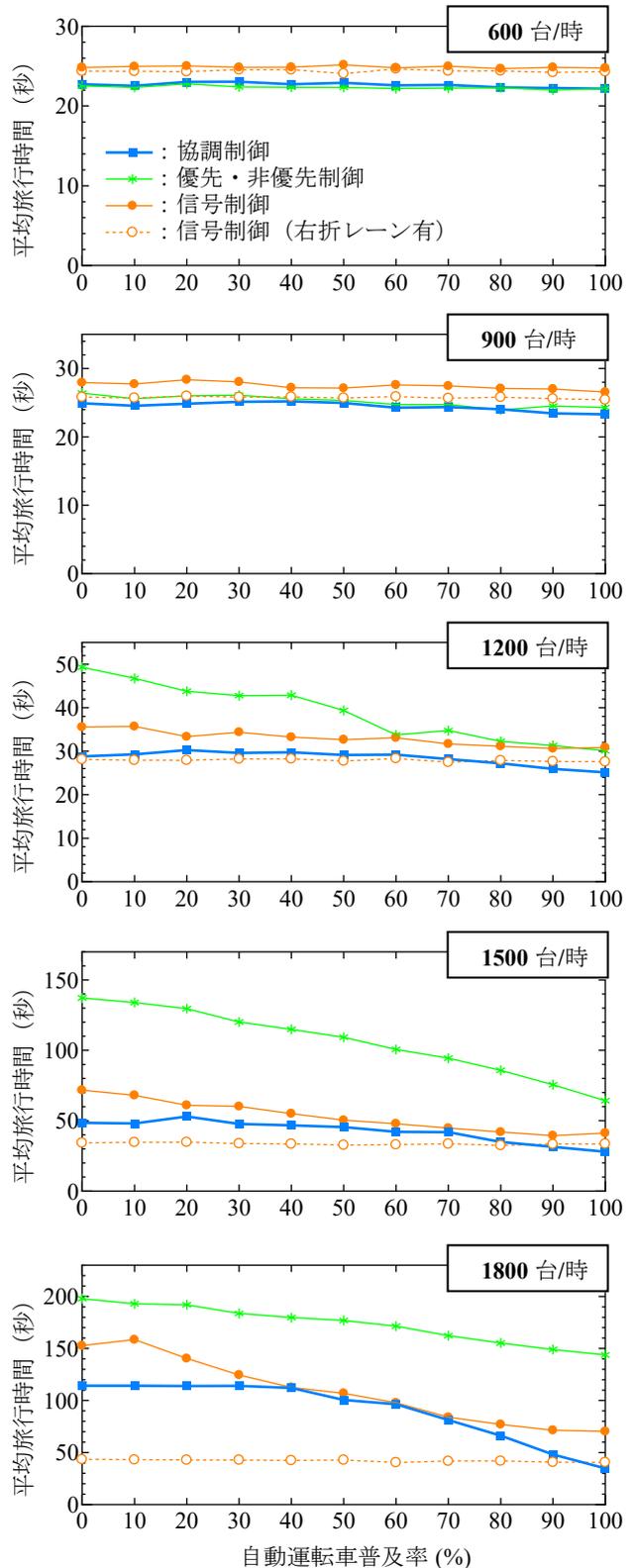
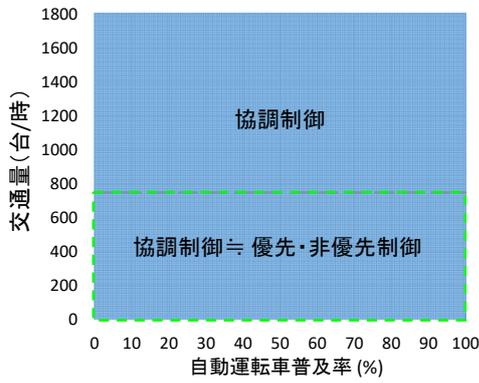
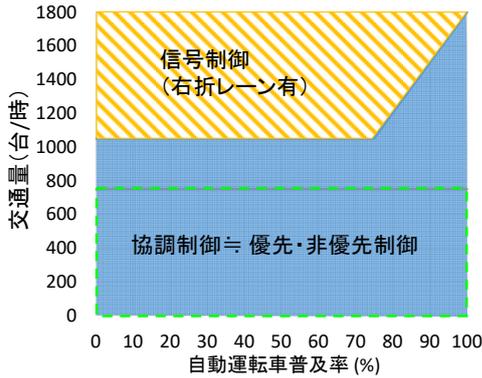


図-6 平均旅行時間の比較



(a) 優先・非優先制御，信号制御（右折レーン無），協調制御の比較



(b) 優先・非優先制御，信号制御（右折レーン有），協調制御の比較

図-7 交通量，自動運転車普及率別の最適制御

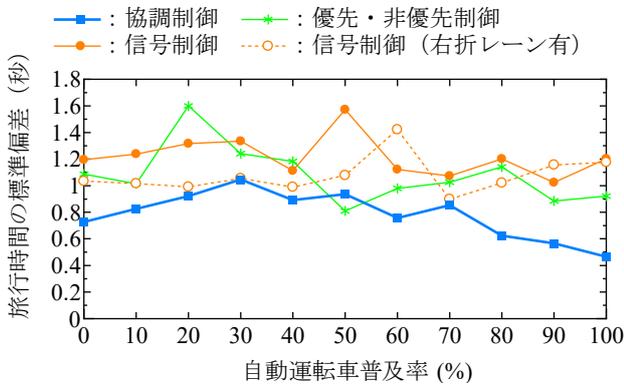


図-8 平均旅行時間の標準偏差（600台時の場合）

続いて、快適性の指標として、平均停止時間の比較を行った。本研究では、表-1に示す通り、リンク 1,3 とリンク 2,4 で発生車両台数が異なるのに加え、優先・非優先制御ではリンク 2,4 は非優先のため、必ず交差点手前で一時停止をさせている。このため、平均停止時間の算出では、リンク 1,3 とリンク 2,4 に分けて、それぞれの平均値を求めた。

図-9 に、交通量が 1800 台時の平均停止時間を示す。優先・非優先制御では、非優先のリンク 2,4 の方が、優先のリンク 1,3 よりも停止時間が長く、その差が顕著である。信号制御や協調制御では、リンク 1,3 の方が交通量が多いため停止時間は長いが、自動運転車の普及に伴

い、短いギャップタイプで流入する車両が増えると、リンク毎の差が小さくなることが分かる。

信号制御では赤信号での停止が不可避であるが、協調制御では各車両は交差点手前で一時停止することなく、スムーズな合流が連続的に行われる。今回の条件では、自動運転車の割合が 90% 以上の場合、提案した協調制御は、右折レーン有の信号制御よりも平均停止時間が短く、快適性についても確保されることが明らかになった。

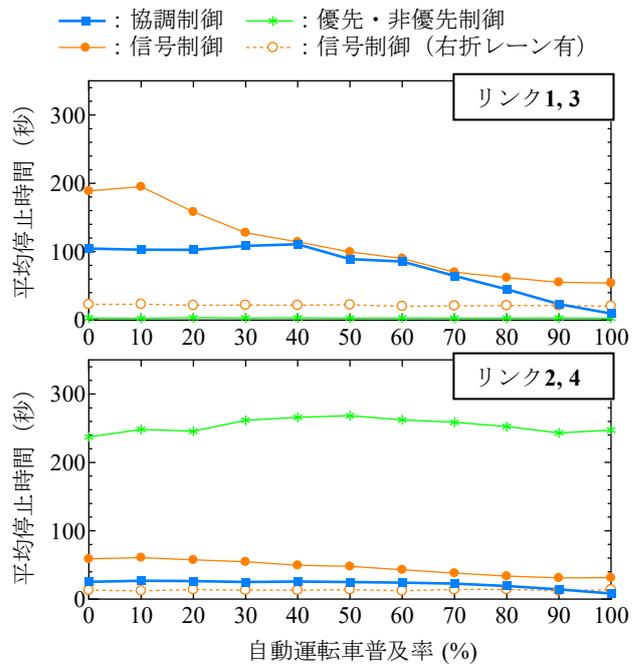


図-9 平均停止時間の比較（1800台時の場合）

5. おわりに

本研究では、信号の無い十字路交差点において、車両同士が協調してスムーズに合流するための、協調制御方法を提案し、マイクロシミュレーションにより効果を検討した。全ての車両はコネクテッドカーであり指示に従うが、完全制御可能な自動運転車と、速度の不確実性を持つ手動運転車が混在した状況を想定し、自動運転車の普及率や交通量の影響を検討した。

提案した協調制御では、交差点に同時合流可能な車両同士で「世代」を形成し、世代順に合流させる。より効率的な世代を形成するため、本研究では、制御ゾーン内での世代の追い越しを導入し、交通状況に応じて追い越しの可否を確率的に判定した。また、追い越しを効果的に行うための、適切な制御ゾーンの長さや、追い越し可否の判定基準についても検討した。

既存の優先・非優先制御や信号制御と比較した結果、提案した協調制御は、自動運転車がある程度普及した状況下において、混雑しない程度の交通量の時に効果を発揮することが確認された。今回の条件では、自動運転車

が75%以上普及した時に、右折レーンが有る信号制御よりも平均旅行時間が短く効率的になることが確認された。自動運転車の普及には時間がかかることから、普及の程度と交通状況に応じて、制御の種類を組み合わせることで、交通をより整流化できると考える。

今後は、多車線や複数交差点から成るより大きなネットワークに、提案手法を適用していきたい。特に、多車線道路では車線変更により、より効率的な世代の構築が可能になると考える。隣り合う交差点で制御の種類が異なる場合の影響についても検討が必要である。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 19H02260, および JST の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム」の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) K. Dresner and P. Stone.: Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism, Proc. AAMAS, New York, NY, USA, pp. 530-537, 2004.
- 2) L. Li and F. Wang.: Cooperative driving at blind crossings using intervehicle communication, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 6, pp. 1712-1724, 2006.
- 3) J. Lee and B. Park.: Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 13, no. 1, pp. 81-90, 2012.
- 4) M. A. S. Kamal, J. Imura, T. Hayakawa, A. Ohata, and K. Aihara.: A vehicle-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, no. 3, pp. 1136-1147, 2015.
- 5) Y. J. Zhang, A. A. Andreas, and C. G. Cassandras.: Optimal control and coordination of connected and automated vehicles at urban traffic intersections, 2016 American Control Conference (ACC), IEEE, pp. 6227-6232, 2016.
- 6) F. Ashtiani, S. A. Fayazi, and A. Vahidi.: Multi-intersection traffic management for autonomous vehicles via distributed mixed integer linear programming, 2018 Annual American Control Conference (ACC), IEEE, pp. 6341-6346, 2018.
- 7) X. Chen, B. Xu, X. Qin, Y. Bian, M. Hu, and N. Sun.: Non-signalized intersection network management with connected and automated vehicles, IEEE Access, vol. 8, pp. 122065-122077, 2020.
- 8) P. Hang, C. Lv, C. Huang, Y. Xing, and Z. Hu.: Cooperative decision making of connected automated vehicles at multi-lane merging zone: A coalitional game approach, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-13, 2021.
- 9) K. Nagel and M. Schreckenberg.: A Cellular automaton model for freeway traffic, Journal de Physique I, France, vol. 2, no. 12, pp. 2221-2229, 1992.
- 10) R. Horiguchi, T. Yoshii, H. Akahane, M. Kuwahara, M. Katakura, H. Ozaki, and T. Oguchi.: A Benchmark data set for validity evaluation of road network simulation models, Proceedings of 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, pp. 1-8, 1998.
- 11) F. V. Webster.: Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper no. 39, Road Research Laboratory, 1958.
- 12) K. M. Kockelman and J. Ma.: Freeway speeds and speed variations preceding crashes, within and across lanes, Journal of Transportation Research Forum, vol. 46, pp. 43-61, 2007.
- 13) 鱈部万磨, 柿元祐史, 中村英樹, 井料美帆.: 自動運転車両の混在が信号交差点交通容量に与える影響に関する分析, 交通工学論文集, vol. 5, no. 2, pp. A_167-A175, 2019.
- 14) B. Xu, E.S. Li, Y. Bian, S. Lib, X. J. Ban, J. Wang, and K. Li.: Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 93, pp. 322-334, 2018.

(2021. 10. 1 受付)