

宛先到着遅延を考慮して渋滞を緩和する 自動車の経路誘導手法

松井 雄資^{1,a)} 吉廣 卓哉^{2,b)}

受付日 2021年5月10日, 採録日 2021年11月2日

概要: 近年, 都市の人口増加にともない大都市で交通渋滞が発生し, 世界的に深刻な社会問題となっている. 交通渋滞を緩和することは, 経済損失や環境汚染等の問題解消に直結し, 大きな効果を生む. 交通渋滞の緩和に向けて各車両に経路変更を促し, 渋滞解消を図る研究は数多く見られる. 本研究は, 道路脇や交差点に設置された路側機を用いて交通状況をつねに把握しておき, 渋滞発生時に動的に一部の車両に経路変更を促すことにより, 早期に渋滞を解消する問題を考える. 本問題に対しては, 渋滞発生箇所周辺の車両に対して複数の経路を用いて経路誘導を行う方法等が提案されているが, これらの手法は渋滞を早く解消することのみを目的としており, 各車両が渋滞により経験する運転時間の増加量を考慮しない. 本研究では, 各車両の運転手の利益を考慮して, 全車両の宛先到着までの平均走行時間を最小化することを目指した経路誘導法を提案する. 具体的には, 各車両は宛先までの最短路を走行していると仮定したうえで, 渋滞道路に流入する車両のうち, 宛先到着時刻の変化ができるだけ小さい迂回路がある車両を優先して経路誘導を行う. シミュレーション評価の結果, 提案手法は既存手法と比較して小さな平均到着遅延で渋滞を解消できることを示した.

キーワード: 交通渋滞緩和, ITS, 動的経路誘導システム

A Route Guidance Method to Mitigate Traffic Congestion in Consideration of Driver's Experience

YUSUKE MATSUI^{1,a)} TAKUYA YOSHIHIRO^{2,b)}

Received: May 10, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: The increase of the city population and the number of vehicles brought heavy traffic jam in many cities. To reduce traffic congestion is one of the important tasks in order to reduce economic loss as well as the environmental pollution. Once a traffic jam takes place, we hope to eliminate the jam immediately by means of changing paths of some vehicles. Several studies tackle this problem. However, they enforce vehicles located very close to the traffic jam to change their paths, which results in large delay due to inefficient detour paths. This not only fails to persuade the vehicle drivers to change their paths, but also causes another traffic jam on the detour paths. In this paper, based on the observation that some vehicles often have alternative paths to avoid congested road segments with similar taking time, we propose a new route guidance method that offers vehicles better alternative paths with which the time to reach their destinations would be minimized. Through evaluation, we demonstrated that the proposed method significantly reduces the traveling time of vehicles while clearing the traffic jam within the same time duration.

Keywords: vehicular congestion avoidance, intelligent transportation system, dynamic route guidance system

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640–8510, Japan

² 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640–8510, Japan

^{a)} matsui.yusuke@g.wakayama-u.jp

1. はじめに

近年, 都市の人口および車両の保有台数の増加にともな

^{b)} tac@wakayama-u.ac.jp

い大都市で交通渋滞が発生しており、深刻な社会問題となっている。日本の国土交通省の調べによると、全国で年間に発生する渋滞損失は約 38.1 億人時間、貨幣価値換算にすると約 12 兆円にも上り、環境問題や経済効率の低下等を引き起こしている [1]。また、世界的に見ても交通渋滞が引き起こす問題は重要視されている。たとえば、中国の北京で発生した PM2.5 大気汚染においては、車両の排気ガスが原因の PM2.5 粒子が約 20% を占め [2]、渋滞解消により、車両からの PM2.5 の排出量を大幅に低減できる。以上のことをふまえて、渋滞損失が集中する都心部や全国各地に存在する主要渋滞箇所について、効果的な渋滞対策を実施する必要性が認識されている。一方で、消費者の立場から考えても、渋滞による到着時刻の遅延は大きな問題である。渋滞緩和により車両の走行時間を低減できれば、各個人の仕事上の損失が最小化され、結果として社会全体としての経済効率が向上する。

現在、道路脇に設置した通信端末により交通状況を把握し、それらから各車両に経路変更を促すことで全体の交通を最適化する DRGS (Dynamic Route Guidance System) [3] と呼ばれる方法が注目されている。これらの研究では、交通負荷をできる限り渋滞道路周辺の経路変更で緩和するように経路誘導を行うことが提案されており、経路変更に応じた場合の各車両の宛先への到着遅延がどうしても大きくなる問題がある。各車両の運転手が経路変更を提案された場合に、それにとまなう時間増加が大きいほど経路誘導に応じる可能性は低くなり、渋滞緩和効果が上がらない可能性がある。一方で、渋滞道路から比較的遠くであれば、さほど到着時刻が変わらない代替経路が存在する可能性が高く、経路誘導に応じてくれる可能性が高い。渋滞発生時にそのような到着遅延を意識した経路誘導を優先して実施すれば、全体として各運転手の到着遅延を最小化する最適な渋滞解消計画を立てることが可能になり、運転手も応じてくれる可能性が上がるため、実行可能性が高まる。

本研究では、対象領域の主要道路や交差点に路側機が設置され、領域の交通状況がつねに把握できる状態を想定して、渋滞発生時には各車両の平均的な到着遅延の増加を最小化できる経路誘導計画を計算する。渋滞が発生すると、路側機が車両密度や速度等からこれを検出し、現在の交通流に対して最適な、渋滞解消のための迂回計画を計算する。計算された迂回計画に基づいて路側機から各車両に迂回誘導を行うことで、対象領域全体の交通流を制御し、渋滞道路への流入量を適切に絞ることで渋滞を解消する。提案手法を交通流シミュレータ SUMO に実装・評価した結果、提案手法は既存手法と比較してより小さい平均到着遅延で渋滞を解消できることが示された。

本論文は以下のように構成される。2 章では、DRGS の概要とその関連研究について説明し、その問題点について述べる。3 章では、提案手法を説明する。4 章ではシミュ

レータで提案手法を実装し、評価を行う。5 章では本研究についての考察を行う。6 章では本研究についてのまとめを行う。

2. 関連研究

交通渋滞の緩和を目的とした研究テーマの 1 つに DRGS (Dynamic Route Guidance System) がある。DRGS とは、リアルタイムに道路の交通情報を取得し車両に対して最適な経路を提供するシステムを指す。DRGS の目的としては、目的地に最も到着しやすい経路を案内することで、走行時間の短縮、渋滞の軽減、または燃料消費を軽減させることにある。以下に、DRGS の代表的な研究例を示す。

DRGS では、渋滞道路を迂回させるために車両へ経路誘導を行う。その際に多くの車両が同じ迂回路を選択すると迂回先で新たな渋滞が発生する恐れがある。Souza ら [4] は、迂回先で新たな渋滞が発生することを考慮した CHIMERA (Congestion avoidance through a traffic classification MEchanism and a Re-routing Algorithm) という DRGS を提案している。CHIMERA は、対象エリア全体の交通量を最適化するために提案されたシステムである。一定時間ごとに対象エリアの道路セグメントの重みを算出し、その重みが閾値を超えている道路を渋滞道路と見なす。各道路には、AoI (Area of Interest) と呼ばれる範囲が設けられており、この中で渋滞道路を予定経路に含む車両に対して経路誘導を行う。迂回路を算出する際には、 k -最短路アルゴリズムを用いる。次に boltzman 分布に従って、 k 本の迂回路の中からどの経路を選択するかを算出する。複数の経路に車両を確率分布に従って分散させることで、迂回先で新たな渋滞が発生する確率を低減している。これを対象エリア内で渋滞道路がなくなるまで続けることで、対象エリア全体の交通量を最適化しようとしている。

Pan ら [5] では、DSP (Dynamic Shortest Path), AR* (A* Shortest Path With Repulsion), RkSP (Random k Shortest Path), EBkSP (Entropy Balanced k -Shortest Paths), FBkSP (Flow Balanced k Shortest Path) と呼ばれる経路誘導手法を提案している。DSP は、各車両の予定経路を除く宛先までの推定走行時間が最も低くなる経路を迂回路として車両に提供する。これにより、渋滞道路に向かう車両の数を低減し渋滞を緩和する。しかし、DSP は各車両が宛先までの推定走行時間が最も低くなる経路を選択するため、迂回路が集中しやすく、迂回路における渋滞が発生しやすい欠点がある。AR* は、他車両の経路誘導の結果を考慮した経路算出法を提案している。AR* では、各車両が迂回路を選択するごとに迂回路に含まれる全道路の重みが更新される。次車両の経路算出時に他車両の経路誘導の結果を重みに反映させ最短の迂回路を計算することで、単一の迂回路でも迂回先の各道路に車両が集中しにくくなる。しかし、AR* では、迂回先の交通容量に基づいて迂回先の渋

滞を高精度に制御する最適な経路計算はできない。RkSPは、交通量の拡散による負荷分散を行い渋滞を緩和する手法である。まず、 k -最短路アルゴリズムを用いて k 本の迂回路を算出する。そして、その k 本の迂回路の中からランダムに1つ経路を選択し車両に経路を提供する。こうすることで、DSPのように車両を特定の経路に集中させることなく分散することができる。しかしRkSPでは、ランダムに経路を選択するため、迂回路における交通量を考慮しない。このため、交通量の多い迂回路を用いることがあり、2次的な渋滞が発生しやすくなる問題がある。EBkSPは、 k -最短路アルゴリズムにより k 本の迂回路を算出したうえで、エントロピーの考えに基づいて、迂回路の交通量のばらつきが最小化されるように各迂回路に車両を割り当てる。FBkSPは、同様に k -最短路アルゴリズムにより k 本の迂回路を算出したうえで、各経路 p_i 上の全道路セグメントの交通量に基づいて、各迂回路の交通量が均等になるように車両を割り当てる。その結果、経路誘導による交通量の変化で新たな渋滞が起きる可能性を下げる。

文献[4],[5]は、本論文で扱う問題を解くための代表的な既存手法であり、多くの関連論文でも比較手法として選ばれている。しかし、これらはいずれも、渋滞道路の隣道路の車両すべてを対象として迂回誘導を行うため、局所的に迂回車両が密に発生する。渋滞地点に近い車両を迂回させると迂回路の最適性は低下する傾向があり、宛先への到着遅延の増加量が大きくなりがちである。また、該当する全車両を迂回させるため、迂回路の冗長性にもばらつきが発生し、車両によっては非常に非効率な迂回路を通らざるを得なくなる。さらに、限られた狭い範囲の車両を集中的に迂回させるため、隣道路の許容追加交通量を超過しやすく、迂回路で2次的な渋滞が発生しやすい問題もある。このように、各車両の運転手の不満が高まりやすい状況が生まれる。

一方で、我々が提案する手法では、渋滞地点からの距離によらず各車両の到着遅延の増加を最小化するように経路誘導を行うアプローチであれば、渋滞による個々の車両への影響が最小限で済むため、迂回による到着遅延の増加量が小さく、各車両の運転手の不満を抑えることができる。同時に、提案手法は各道路の許容追加交通量を考慮して迂回計画を立てるため、迂回による周辺道路の2次的な渋滞も考慮した経路誘導が可能になる。つまり、道路交通全体に対して渋滞による大きな影響を及ぼすことなく、安定感のある渋滞の解消が可能になる。

異なるアプローチの既存研究も紹介しておく。Shenら[6]は、システムの実現可能性を考慮したNRR (Next Road Rerouting) というDRGSを提案している。この提案は、計算コストとシステム導入コストの低減に焦点を当てて設計されており、NRRは、27カ国で37,000以上の交差点ですでに使用されているSCATSのソフトウェアプラグイ

ンとして展開することを想定している。SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) [7]は、都市の交通流を最適化するために交通信号を管理し制御するシステムの名称である。このように、既存のシステムを拡張する形となっているため導入コストを抑えられると述べている。NRRは、渋滞道路を検知すると、その周辺の車両に対して経路誘導を行う。具体的には、広域道路網全体で各車両の迂回経路を計算するのではなく、渋滞道路の隣交差点に侵入する各車両に対して、次にどの方向に曲がると良いか(どの道路セグメントに進むと良いか)を提案し、各車両はその指示に従ったあとは、自分のVNS (Vehicular Navigation System)に基づいて最短路を通って宛先に向かう。最低限の経路誘導を行うため、計算コストが小さく済み、システム全体のコストを低減できるとしている。しかし、この手法でも、渋滞道路の近くで迂回することは先述の既存手法と同じであり、同様の問題がある。

提案手法の貢献は、迂回先での2次的な渋滞を防げる点と運転者への負荷を考慮した迂回計画を行う点にある。本提案では、路側機等により収集した道路情報を用いて、各道路がどの程度の追加交通量を許容できるかを計算する。この情報を用いると、迂回路が与えられた場合に、その迂回路にどの程度の量の車両を流入させられるかが一定の正確性をともなって計算できる。その量未満の交通量のみを迂回路に誘導することで、計画的に迂回路における2次的な渋滞を防ぎながら、迂回路を最大限に活用した交通最適化を可能にする。また、経路計算では迂回時の運転者への負荷、つまり経路誘導による宛先到着時間の増加、を低減することを優先して独自アルゴリズムにより全体の迂回計画を計算する。

次章で、提案手法について詳しく述べる。

3. 経路誘導による目的地到着時間の増加を抑える渋滞緩和手法

3.1 提案手法の概要

渋滞の影響により、各車両が目的地まで到着する時間は大幅に増加する。すべての車の時間増加量を最小化することが本研究の目的である。関連研究では、渋滞道路に隣接する道路、およびその周辺で車両に対して経路誘導を行う。しかし、渋滞道路付近のみでの経路誘導は、迂回路の許容追加交通量に限りがある。そのため、どうしても迂回先で渋滞が発生し目的地までの到着時間が遅れる可能性がある。また、迂回路を走行することで発生する時間増加を考慮しないために、すべての車両の目的地到着時間を最小化できていない。本研究で提案する手法は、渋滞道路を迂回するように車両を誘導する際に、目的地までの到着時間がどれだけ増加するかを算出し、その値が小さい車両を優先して迂回路へ誘導することで、渋滞を解消する。その結果、個々の車両の宛先への到着時刻への影響を最小化した

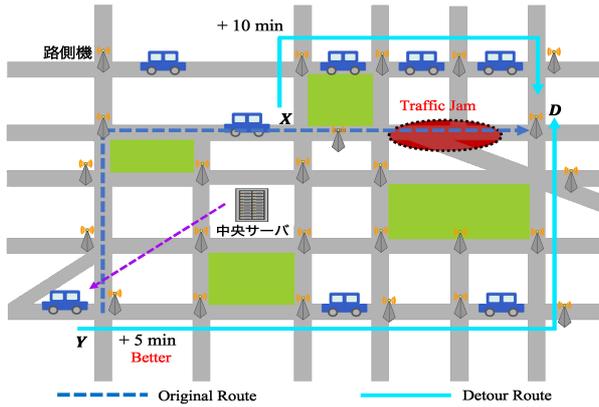


図 1 経路誘導による宛先到着遅延を考慮した迂回地点の決定
Fig. 1 Selecting intersections to detour vehicles.

渋滞の解消が可能になる。本提案では、迂回計画に必要な交通情報は、道路脇に設置した路側機により取得し、それを中央サーバに集約する。そして、集約された情報をもとに渋滞を検知すると、中央サーバが全体の経路計算を行い、各車両に経路誘導を実施する。

たとえば、図 1 のように渋滞が発生したときを考える。地点 X で経路誘導を行うと目的地までの到着時間が 10 分増加し、地点 Y で経路誘導を行うと目的地までの到着時間が 5 分増加すると仮定する。このとき、地点 X よりも地点 Y で経路誘導を行う方が、全車両の走行時間の総計を抑えることができるので、提案手法では地点 Y に侵入する車両から優先的に迂回させることで渋滞の解消を図る。

本節以降に提案手法の詳細について述べる。まず、3.2 節で提案手法で扱う変数等の諸定義を行う。3.3 節では、迂回制御表の構築方法について説明する。迂回制御表とは、どの交差点で何台の車両を迂回路に誘導するのかを、定常状態の交通量をもとに算出した一覧表である。3.4 節では迂回制御表に基づいて車両を制御するアルゴリズムを説明する。

3.2 諸定義

本節では、諸定義を述べる。経路誘導の対象領域にある道路網を $G = (I, R)$ で表す。ここで I は交差点の集合、 R は道路セグメントの集合である。 $S \subseteq I$ は出発地の集合、 $D \subseteq I$ は宛先の集合を表す。 $w(\cdot)$ は道路セグメントの重みを表す関数であり、道路セグメント $r \in R$ に対して、 $w(r)$ は正の整数をとり、その重みを表す。出発地 $s \in S$ と宛先 $d \in D$ に対して、 $P_{(s,d)}$ は、重み関数 $w(\cdot)$ の下での s から d への最短路を表す。また、 G から $P_{(s,d)}$ の道路セグメントを除いた道路網 $G' = (I, R - P_{(s,d)})$ における、重み関数 $w(\cdot)$ の下での最短路を s から d への迂回路と呼び、 $B_{(s,d)}$ で表す。ここで $P_{(s,d)}$ は便宜的に $P_{(s,d)}$ が含む道路セグメントの集合も表す。経路 P に対して、 $w(P)$ を経路の距離と呼び、 P が含む全道路セグメントの重みの和

とする。つまり、 $w(P) = \sum_{r \in P} w(r)$ である。本研究では、経路の距離を走行時間とし、出発地 $s \in S$ と宛先 $d \in D$ に対して、 s から d への最短路と迂回路の走行時間の差を $C_{(s,d)}^{diff} = w(B_{(s,d)}) - w(P_{(s,d)})$ で表す。

V は対象領域に存在する車両の集合とする。 V_{len}^{avg} を車両の長さの平均、 g_{min} は車間距離の最小値を表す。道路セグメント r に対して、 len_r をセグメントの長さ、 $lane_r$ を車線数とする。時刻 t 、および道路セグメント $r \in R$ に対して、時刻 t における r の車両密度を

$$K_r^t = \frac{n_r^t}{len_r} \quad (1)$$

と表す。ここで n_r^t は、時刻 t における道路セグメント r 上の車両数を表す。また、 r 上に存在しうる車両の最大数は、 V_{len}^{avg} を車両長の平均、 g_{min} を車間距離の最小値とみると $n_r^{max} = \frac{len_r}{V_{len}^{avg} + g_{min}} \times lane_r$ で表される。これより、 r の最大車両密度は

$$K_r^{max} = \frac{n_r^{max}}{len_r} \quad (2)$$

で表される。

時刻 t において、車両密度 K_r^t と最大車両密度 K_r^{max} の比が、予め設定されたしきい値 δ を超えるとき、つまり、 $\frac{K_r^t}{K_r^{max}} \geq \delta$ のとき、時刻 t に道路セグメント r で渋滞を検知する。

時刻 t における道路セグメント r 上に存在する車両の平均速度を v_r^t とすると、 r の交通量を、通過する単位時間あたりの車両数として次のように定義する。

$$F_r^t = v_r^t \times K_r^t. \quad (3)$$

次に、各道路が許容できる交通量を定義する。本研究では、渋滞が発生していない通常の状態を定常状態と呼び、定常状態の道路セグメント r の車両速度を v_r^{std} とおく。このとき、 r の許容交通量を

$$F_r^{cap} = v_r^{std} \times \delta K_r^{max} \quad (4)$$

で表す。また、 $F_r^{cap} - F_r^t$ を r の許容追加交通量と呼ぶ。

時刻 t において、交差点 $s \in S$ から $d \in D$ への最短路 $P_{(s,d)}$ が道路セグメント r を通るとする。 r において渋滞が検知されており、 s から d に向かう車両に対して、迂回路 $B_{(s,d)}$ に誘導することを考える。このとき、 $B_{(s,d)}$ の許容追加交通量は

$$A_{(s,d)}^t = \min_{r \in B_{(s,d)}} (F_r^{cap} - F_r^t) \quad (5)$$

で表される。つまり、交差点 s において、交差点 d に向かう車両を上限 $A_{(s,d)}^t$ まで迂回路 $B_{(s,d)}$ に誘導可能である。また、定常状態での迂回路 $B_{(s,d)}$ に誘導可能な車両数を $A_{(s,d)}^{std}$ とする。

交差点 $s \in S$ から $d \in D$ への迂回路 $B_{(s,d)}$ の許容追加交

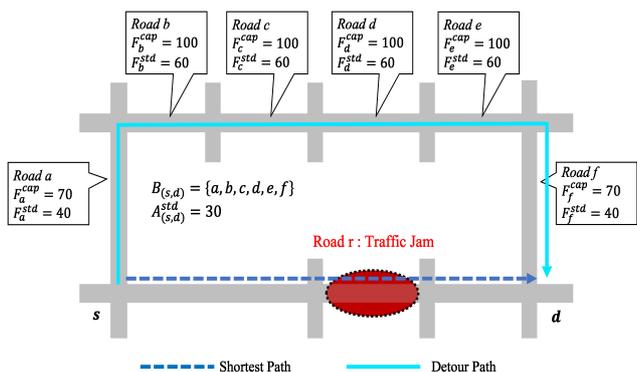


図 2 迂回路の許容追加交通量の算出例

Fig. 2 An example of calculating traffic volume to detour.

表 1 変数の諸定義

Table 1 Notation.

記号	詳細
G	道路のトポロジ
I	交差点集合
R	道路セグメント集合
S	出発地交差点集合
D	宛先交差点集合
$w(r)$	道路セグメント $r \in R$ の重み
$w(P)$	経路 P の距離
$P_{(s,d)}$	交差点 $s \in S$ から交差点 $d \in D$ への最短経路
$B_{(s,d)}$	交差点 $s \in S$ から交差点 $d \in D$ への迂回路
$C_{(s,d)}^{diff}$	交差点 $s \in S$ から交差点 $d \in D$ への最短経路と迂回路の時間差
V	道路網に存在する車両集合
V_{len}^{avg}	車両長の平均
g_{min}	最小車間距離
K_r^t	時刻 t における道路セグメント r の車両密度
n_r^t	時刻 t における道路セグメント r の車両数
ν_r^t	時刻 t における道路セグメント r の平均車両速度
K_r^{max}	道路セグメント r の最大車両密度
n_r^{max}	道路セグメント r の最大車両数
ν_r^{std}	定常状態の道路セグメント r の車両速度
len_r	道路セグメント r の道路長
$lane_r$	道路セグメント r の車線数
δ	道路セグメント $r \in R$ に対して渋滞判定を行う閾値
F_r^t	時刻 t における道路セグメント r の交通量
F_r^{cap}	道路セグメント r の許容交通量
$A_{(s,d)}^t$	迂回路 $B_{(s,d)}$ の許容追加交通量
$A_{(s,d)}^{std}$	定常状態での迂回路 $B_{(s,d)}$ の許容追加交通量

交通量の算出例を図 2 に示す。図 2 では、迂回路 $B_{(s,d)}$ 上の各道路セグメント a, b, c, d, e, f の許容追加交通量の最小値が道路セグメント a または f の $F_a^{cap} - F_a^{std} = 30$ となる。よって、迂回路 $B_{(s,d)}$ に誘導可能な交通量は $A_{(s,d)}^t = 30$ となる。

ここまでの定義を表 1 に一覧として記載する。

3.3 迂回計画

3.3.1 前提条件

対象領域の道路地図は事前に得られると仮定する。つまり、 $G = (I, R)$ だけでなく、各道路 $r \in R$ の長さ len_r と車線数 $lane_r$ も得られる。交通状況は、道路脇に設置した路側機によりつねに測定していると仮定する。つまり、路側機により、時刻 t における、各道路セグメント r の平均車両速度 ν_r^t 、車両数 n_r^t が取得できる。また、各車両は VNS を用いて予定経路を保持しており、路側機を通じて予定経路をサーバに伝えたと仮定する。各路側機は、この情報を用いて迂回誘導をする車両を選別する。

定常状態とは、渋滞が発生せずに安定して車両が走行している通常の状態を指す。ある時刻 t を定常状態と仮定すると、その時刻の各道路の車両数 n_r^{std} 、走行速度 ν_r^{std} 、交通量 F_r^{std} は、路側機により測定することができる。もちろん実際には時刻によって道路交通の状態は異なるが、本研究では定常状態を、渋滞時にその道路の交通量の削減目標になる状態として、また、迂回路として利用する各道路の許容追加交通量を推定するために用いる。このため、渋滞が発生していないという条件下で、1 日のうちで比較的混雑する時間帯の道路交通や、一定時間ごとに更新される道路交通の状態を測定して定常状態の各値を求めると良いと考えられる。

3.3.2 迂回制御表

迂回制御表とは、経路誘導を行う交差点の優先順位を示した表であり、道路セグメント r の渋滞検出時に、定常状態の交通量に基づいて計算される。迂回制御表の例を表 2 に示す。迂回制御表は、表 2 に示すように、優先順位 $L_{(s,d)}$ 、出発交差点 $s \in S$ 、宛先交差点 $d \in D$ 、(迂回路に誘導した場合) 時間増分 $C_{(s,d)}^{diff}$ 、迂回路に誘導可能な交通量 $E_{(s,d)}$ 、および $E_{(s,d)}$ の累積値 $X_{(s,d)}$ から構成され、優先順位は $C_{(s,d)}^{diff}$ の小さい順に定まる。ここで、 $s \in S$ と $d \in D$ の組に対して、交差点对を $u = (s, d)$ で表し、優先順位を $L_u (= L_{(s,d)})$ 、誘導可能交通量 $E_u (= E_{(s,d)})$ 、 E_u の累積値 $X_u (= X_{(s,d)})$ で表す。ここで L_u は交差点对 u に対応する車両をどの程度優先的に迂回させるかを表し、 X_u は優先順位が L_u 以下である全交差点对 u' に対する $E_{u'}$ の総和である。

時刻 t に道路セグメント r の渋滞が検出された場合、定常状態における流量 F_r^{std} に対して、渋滞している現在の流量が F_r^t であることから、 r への流入量を現在処理可能な流量に低減させるためには、 $F_r^{exc} = F_r^{std} - F_r^t$ の流量を r 上から低減する必要がある。この超過交通量に、渋滞の拡大係数 $\beta \geq 1$ を掛けた値 βF_r^{exc} だけ、予定経路が r を通る車両を迂回路に誘導すれば、渋滞が解消されると考える。迂回制御表から、優先度が高い順に交差点对を選択するが、渋滞を解消するためには、誘導可能な交通量の累積 X_u に係数 α を掛けた値が βF_r^{exc} を超える必要がある。こ

表 2 迂回制御表の例

Table 2 An example of rerouting table.

優先順位 $L_{(s,d)}$	出発交差点 $s \in S$	宛先交差点 $d \in D$	時間増加 $C_{(s,d)}^{diff}$ [min]	迂回路に誘導可能な交通量 $E_{(s,d)}$ [/min]	累積値 $X_{(s,d)}$ [/min]
1	s_1	d_1	3	26	26
2	s_2	d_2	3	28	54
3	s_1	d_2	6	25	79
4	s_3	d_1	8	21	100
5	s_1	d_3	8	34	134
6	s_4	d_2	9	31	165
7	s_3	d_4	11	14	179
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$k-1$	s_7	d_{12}	31	$E_{(s_7,d_{12})}$	$X_{(s_7,d_{12})}$
k	s_{14}	d_5	33	$E_{(s_{14},d_5)}$	$X_{(s_{14},d_5)}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ここで α は車両が迂回誘導に応じる割合の想定値である。このとき、 $\alpha X_u \geq \beta F_r^{exc}$ を満たす交差点对集合の中で最小の優先順位を k とすると、 k 以下の優先順位を持つ交差点对で経路誘導を実施する。

たとえば、 $F_r^{exc} = 160$ 、 $\beta = 1$ 、 $\alpha = 1$ と仮定すると（簡単のため $\alpha = \beta = 1$ とした）、表 2 の 6 行目までの交差点对に対して経路誘導を行えば（つまり $k = 6$ ）、単位時間あたり 165 台の車両を渋滞道路 r を通らないように誘導できる。この台数が $F_r^{exc} = 160$ 台を超えているため、これら 6 つの交差点对に対して経路誘導を行えば、渋滞を解消できるであろうと考えられる。

3.3.3 迂回制御表の構築

先述のとおり、迂回制御表は道路セグメント r の渋滞検知時に構築される。迂回制御表は、対象領域内のすべての交差点对の集合を U^{all} とすると、次のような手順で構築される。

- (1) U^{all} の交差点对 $u = (s, d)$ を、 C_u^{diff} の昇順に取り出し、それぞれに対して手順 (2) 以下の処理を行う。
- (2) もし $r \notin P_u$ であれば、迂回させる必要はないので、 u を読み飛ばして次の交差点对の処理に進む。
- (3) すでに迂回制御表にエントリが含まれる交差点对 $u' = (x, d)$ で、 $P_u \subset P_{u'}$ または $P_u \supset P_{u'}$ であるものが存在すれば、 u を読み飛ばして次の交差点对の処理に進む。
- (4) 交差点对 u のエントリを迂回制御表に追加する。 L_u は、初期値を 1 とし、行を加えるたびに 1 ずつ加算する。 $C_{(s,d)}^{diff}$ はすでに計算済なので、その値を用いる。誘導可能交通量 E_u としては、定常状態における迂回路の許容追加交通量 A_u^{std} を用いる（つまり $E_u = A_u^{std}$ ）。その累積値 X_u は、これまでに計算した E_u の和である。
- (5) u に対して交通量 E_u を迂回したと仮定して、すべて

の $u' \in U^{all}$ に対する $A_{u'}^{std}$ を更新する。迂回交通量 E_u が $E_u = 0$ の場合、交差点对 u のエントリを迂回制御表に加えずに次の交差点对の処理に進む。

手順 (1) では、 U^{all} に含まれるすべての交差点对を、 C_u^{diff} の小さい順に順番に処理していく。手順 (2) は、経路が渋滞道路セグメント r を通らない交差点对を排除する。手順 (3) は、1 台の車に複数回の経路誘導をしないための処理であり、この理由は後述する。手順 (4) は、各交差点对に対して、道路の許容量をもとにして経路誘導する交通量を定め、迂回制御表にエントリとして追加する。手順 (5) は、経路誘導の結果として各道路の交通量が変わるので、この変化を計算し、各交差点对の許容追加交通量を更新する。具体的な方法は後述する。

手順 (3) の制限の理由は以下のとおりである。宛先を同じくする交差点对 $u_1 = (s_1, d)$ 、 $u_2 = (s_2, d)$ であり、 P_{u_1} が P_{u_2} に含まれる、つまり $P_{u_1} \subset P_{u_2}$ 場合である場合を考える。もし $C_{u_2}^{diff} < C_{u_1}^{diff}$ であれば、 s_1 で u_1 に対する経路誘導をされる車両は、すでに s_2 で u_2 に対する経路誘導をされた後である。本研究では、1 台の車に複数回の経路誘導をするのは運転者にとってのコストが増すと考えて、これを避ける。つまり、この場合には、 s_1 で u_1 に対する経路誘導をしない。他方、もし $C_{u_2}^{diff} > C_{u_1}^{diff}$ であれば、 s_2 で u_2 に対する経路誘導をされた場合には、その後 s_1 でも u_1 に関する経路誘導がなされることになる。したがって、この場合には s_2 で u_2 に対する経路誘導をしない。結果として、このような交差点对 u_1 と u_2 が存在する場合には、少なくとも、優先順位の高いどちらか一方のみしか経路制御表には追加されない。

手順 (4) の誘導可能交通量 E_u の計算は、 u よりも優先順位の高いすべての交差点对 u' に対する交通量 $E_{u'}$ の迂回がなされたと仮定して行う必要がある。よって、本手順では、エントリが追加されるたびに、その迂回がなされた道路

交通の状態を一時変数として保持しながら手順(4), (5)の計算を実行する. 具体的には, 手順(5)の許容追加交通量の更新は, 次の手順で行う. この際に, 各道路セグメント r の交通量を一時変数 F_r^{std} として記憶し, これらの値から計算される各交差点对 u の許容追加交通量 A_u^{std} も同様に一時変数として記憶する. エントリが追加されるごとに, 迂回される交通量に合わせてこれらの値を増減することで, 適切な許容追加交通量をつねに把握しておく.

- (1) 各道路セグメント $r' \in P_u$ に対して, $F_{r'}^{std}$ から E_u を引く (最短経路の道路から迂回分の交通量を差し引く).
- (2) 各道路セグメント $r' \in B_u$ に対して, $F_{r'}^{std}$ に E_u を加える (迂回路の道路に, 迂回分の交通量を加える).
- (3) 交差点对 $u \in U^{all}$ に対して, A_u^{std} を更新する (更新した各道路の交通量をもとに, 各交差点对に対して迂回可能交通量を計算する).

手順(5)のとおり, 提案手法では迂回路に交通容量が確保できない場合は, 迂回路における渋滞を防ぐために, その交差点对に対する経路誘導を実施しない. 迂回路の交通容量を確保できる交差点のみで解決できない重度の渋滞に対しては, 自然に渋滞が解消するに任せる.

3.4 迂回制御アルゴリズム

この項では, 3.3 節で作成した迂回制御表をもとに車両に経路を提供する手順を説明する. まず, 時刻 t に道路セグメント r の渋滞が検出された場合, 迂回により削減すべき交通量 $F_r^{exc} = F_r^{std} - F_r^t$ を算出する. 次に, 全交差点に侵入する全車両に対して, 迂回誘導を実施する. 迂回誘導は, 次の手順で行う. 各交差点 $i \in I$ に侵入する車両 v のそれぞれに対して, v に対応する交差点对 u を求める. 各車両はそれぞれの宛先 $d \in D$ を持つため, $u = (i, d)$ となる. この u に対して, $\alpha X_u \leq \beta F_r^{exc}$ であれば迂回路 B_u を v に提示して経路誘導する. この迂回誘導は, 渋滞が検出されている間は継続して実施されるが, 渋滞が解消すると停止される. なお, 本研究では, 同時に発生する渋滞は1カ所のみと仮定しており, 同時に複数箇所の渋滞が発生した場合には対応していない. 結果として, 複数箇所の渋滞が発生しても, はじめに検出された渋滞に対応する迂回誘導のみが継続される.

4. 評価

4.1 評価方法

提案手法により車両の平均走行時間を低減しつつ渋滞を緩和できることを, シミュレーションにより確認する. 都市部の道路網を想定し, 渋滞のない定常状態において, ある時刻 t に一部の道路セグメントで交通規制をかけることで, 渋滞を発生させる. この渋滞を提案手法および比較手法を用いて解消し, その間の車両の平均走行時間や誘導車両数等を測定することにより, 提案手法の性能評価

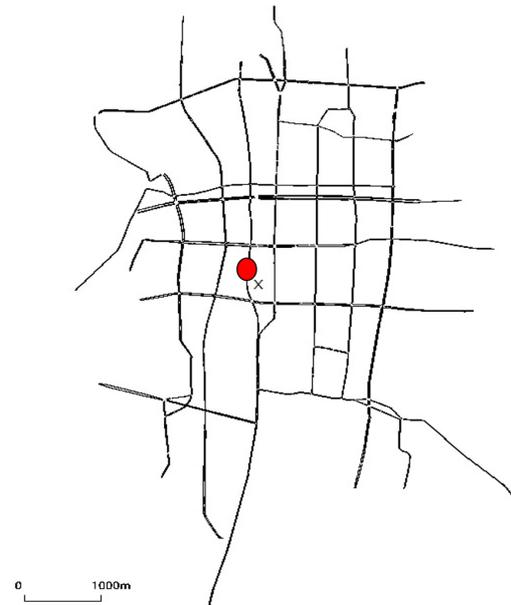


図3 大阪市の主要な道路地図

Fig. 3 The road map of Osaka city.

を行う. 比較手法として, 経路制御を行わない場合と, 文献[5]で用いられている経路誘導手法である DSP, RkSP, EBkSP, FBkSP, AR*を比較する. 先述のとおり, これらの手法は他の文献等でもよく用いられる代表的な手法である. シミュレーションは, 交通流シミュレータ SUMO (Simulation for Urban MObility) [8]を用いた. また, 渋滞検知や車両の経路誘導をする動作は, SUMOの連携モジュールである TraCI (Traffic Control Interface) [11]を用いて実装した.

4.2 評価シナリオ

都市部の交通を再現するために, 大阪市の道路地図を OpenStreetMap [9] から取得して利用した. 本シミュレーションでは主要道路のみを対象として迂回誘導を行うため, あらかじめ小さい道路を取り除き, 主要道路のみの地図とした. 前処理後の道路地図を図3に示す. 前処理の結果, 本実験で使用した道路網では, 交差点は66個, 交差点に接続する道路セグメントは241本となった. 交差点には信号機が設置され, 信号の周期を120秒に設定した. 車両は, 出発地と宛先を道路網の端とし, 一定の時間間隔で発生させる. その際の交通量は, 大阪市が発行した調査表[10]をもとに定義する. 文献[10]には, 各道路ごとの12時間あたりの交通量が記載されており, その値からシミュレーション時間内の交通量を求める. その結果, シミュレーション時間を3時間として, シミュレーション時間内に生成される全車両数は, 21,607台となった. また, 文献[10]は各道路の交通量のみが記載されており, 各車両の移動経路や宛先は不明である. このため, 地図上の道路の端点を車両の出発地および宛先として, 出発地から宛先の間の車両の移

動経路を以下の手順により生成した。

- (1) 宛先となる全交差点の交通量 $T_d, (d \in D)$ とその合計値 $\sum_{d \in D} T_d$ を算出する。
- (2) 各出発地 $s \in S$ から各宛先 $d \in D$ に向かう交通量の比率 $p_{(s,d)}$ を (1) から算出する。具体的には、 $p_{(s,d)} = \frac{T_d}{\sum_{d \in D} T_d}$ とする。
- (3) 出発地となる交差点の交通量 $T_s, (s \in S)$ に (2) で求めた比 $p_{(s,d)}$ を用いて各宛先の交通量 $T_{(s,d)}$ を算出する。具体的には、 $T_{(s,d)} = T_s \times p_{(s,d)}$ とする。

たとえば、出発地となる交差点を s, s の宛先となる交差点を d_2, d_3, d_4, d_5 としたときは次のようになる。まず文献 [10] から得られるのは、出発地である交差点の交通量 T_s と、 s の宛先 d_2, d_3, d_4, d_5 のそれぞれの交通量 $T_{d_2}, T_{d_3}, T_{d_4}, T_{d_5}$ である。手順 (1) で、各宛先 d_2, d_3, d_4, d_5 のそれぞれの交通量が $T_{d_2} = 800$ 台、 $T_{d_3} = 700$ 台、 $T_{d_4} = 900$ 台、 $T_{d_5} = 1,100$ 台である場合、その合計値を求めると $\sum_{d \in D} T_d = 3,500$ 台となる。次に、手順 (2) で s から各宛先に向かう交通量の比率を手順 (1) の値を用いて求めると、 $p_{(s,d_2)} = 0.23$ 、 $p_{(s,d_3)} = 0.2$ 、 $p_{(s,d_4)} = 0.26$ 、 $p_{(s,d_5)} = 0.31$ となる。 $T_s = 1,200$ 台である場合、手順 (3) では、手順 (2) で求めた比率から $T_{(s,d_2)} = 276$ 台、 $T_{(s,d_3)} = 240$ 台、 $T_{(s,d_4)} = 312$ 台、 $T_{(s,d_5)} = 372$ 台と求まる。

定常状態の交通状況を算出するために、先ほど定義した交通量を用いて SUMO でシミュレーションを行う。定常状態の交通量を算出する際のシミュレーション時間は 10,800 秒とした。算出された定常状態の交通量をもとに迂回制御表を構築した。

本評価のシナリオでは、定常状態の交通状況において、ある道路セグメントにおいて交通規制を行い、渋滞を発生させた。交通規制を行う道路セグメントは、定常状態で最も交通量の多い道路セグメントである、図 3 の地点 X を選んだ。交通規制は、地点 X の片側 3 車線のうち 2 車線を規制する。交通規制をかける時刻はシミュレーション開始後 4,200 秒とし、その後に 10,800 秒のシミュレーションを行った。渋滞検知を行う周期は 300 秒、渋滞道路かどうかを判定する際の閾値は $\delta = 0.7$ とした。経路誘導に従う運転者の比率は $\alpha = 0.7$ 、渋滞の拡大係数は $\beta = 1.3$ とした。シミュレーションの設定値を表 3 にまとめる。

4.3 評価結果

提案手法 (proposed) を、経路誘導を行わない場合 (noreroute)、DSP, RkSP, EBkSP, FBkSP, AR* と比較した。既存手法である DSP, RkSP, EBkSP, FBkSP, AR* では、パラメータ L と k によって性能が変わる。2 つの交差点を結ぶ道路を 1 セグメントとすると、渋滞道路からの距離をセグメント数で表せる。 L は経路誘導を行う車両の範囲を、この距離で表す。つまり、 $L = 2$ の場合には、渋滞道路からの距離が 2 以内の道路上に存在し、かつ渋滞道路

表 3 シミュレーションの設定値

Table 3 Simulation settings.

項目	詳細
シミュレーター	SUMO
対象領域	大阪市 (主要道路)
シミュレーション時間	15,000 秒
信号 1 サイクルの長さ	120 秒
車両の最大速度	60 km/h
渋滞検知を行う周期	300 秒
渋滞検知の際の閾値 δ	0.7
経路誘導に従う確率 α	0.7
渋滞拡大係数 β	1.3

を予定経路に含む車両すべてに経路誘導を行う。 k は、 k -最短経路アルゴリズムにより迂回路を計算する際のパラメータであり、算出する迂回路の数を表す。このとき、迂回路はそれぞれ枝独立なものが計算される。本研究では、 k と L の適切な値を決めるために事前実験を行い、最も性能が良かった値を本実験に適用した。

事前実験の結果を図 4 に示す。図 4(a) は、 k の値を $k = 2$ で固定した際に L の値を変動させた場合の経路誘導を行った全車両の平均走行時間を示している。図 4(a) から、本シナリオでは $L = 3$ で全車両の平均走行時間が最も良い値を示すことが分かる。 L が小さいと渋滞を迂回するのに十分な迂回が実行できず、 L が大きいと必要以上の車両を迂回させてしまうため効率が悪化すると考えられる。図 4(b) は、 L の値を $L = 3$ で固定した際に k の値を変動させた場合の経路誘導を行った全車両の平均走行時間を示している。図 4(b) から、 $k = 2$ で全車両の平均走行時間が最も良い値を示すことが分かった。 k の値が大きいと効率の悪い迂回路を使用してしまうためと考えられる。以上より、本実験では、 $L = 3, k = 2$ とし評価を行う。

本実験のシミュレーション結果を述べる。本実験では、全手法においてすべての走行車両が宛先に到達することができた。全車両の宛先までの走行時間を図 5(a)、経路誘導を行った全車両の宛先までの走行時間を図 5(b)、経路誘導を行った車両数を図 5(c) に示す。図 5(a) を見ると、経路誘導を行わない場合と比較して、他のすべての手法は大幅に平均走行時間を低減しており、経路誘導を行わなければ深刻な渋滞が起こることが分かる。渋滞を発生させない場合の平均走行時間は約 808 秒であったので、各手法とも、迂回誘導によって平均走行時間は少し増加している。しかし、全車両の中で経路誘導を受けた車両の割合が低いことから、各渋滞緩和法の効果については他の図を参照する必要がある。

図 5(b) は、経路誘導により迂回路を走行した車両に限定して走行時間を比較している。どの手法も迂回により平均走行時間は増加するが、提案手法が最も増加量が小さい。また、車両の走行時間のばらつきが提案手法で最も小さい。

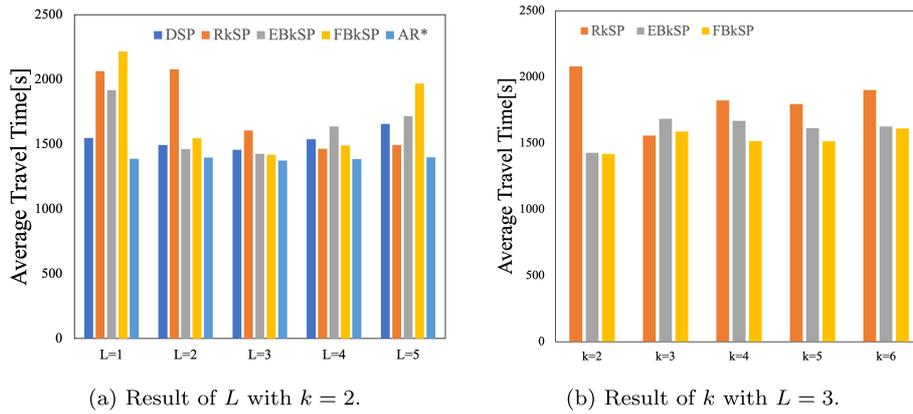


図 4 事前実験の結果

Fig. 4 Results of preliminary evaluation.

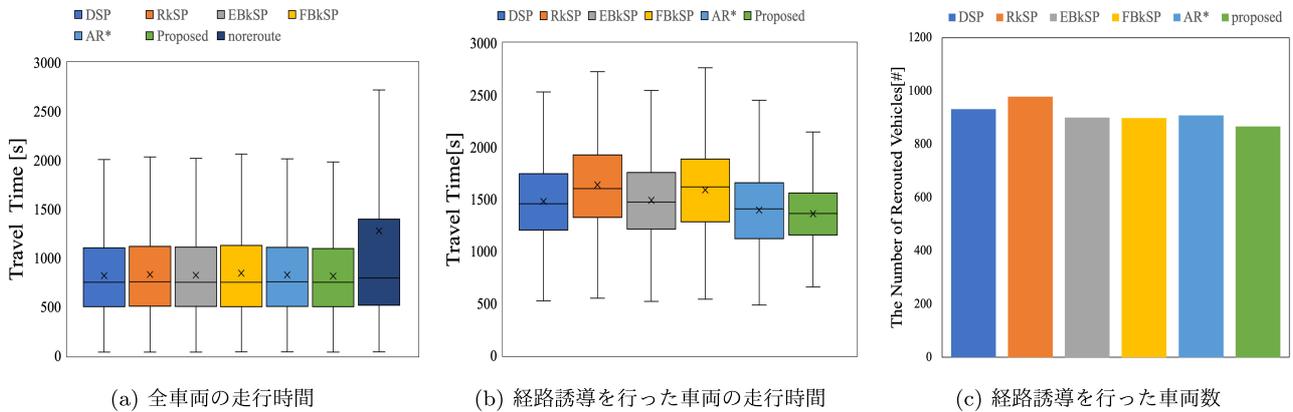


図 5 評価結果

Fig. 5 Main simulation results.

これは、比較手法が複数の最短経路に負荷を分散するだけなのに対して、提案手法が各車両の目的地への到達遅延を考慮して迂回計画を計算した効果であると考えられる。

図 5 (c) は迂回経路に経路を変更した車両数であるが、多少の差はあるものの、いずれの手法もおおむね同程度の数の車両を迂回することで渋滞を緩和したことが分かる。シミュレーション全体の走行車両数は約 2.1 万台なので、約 4% 程度の車両が迂回したことになる。ここで図 3 (b), (c) をあわせ見ると、どの手法でも同程度の数の車両が迂回し、迂回車両の走行時間は提案手法が最も小さい。すなわち、道路交通全体としての渋滞による走行時間への影響は、提案手法が最も小さく、他の手法よりも優れている。

さらに本実験では、迂回を行った車両を対象として、車両 1 台あたりの経路誘導による宛先到着遅延を比較した。宛先到着遅延は、各手法で経路誘導を行った場合の走行時間と交通規制をかけずに渋滞を発生させない場合の走行時間の差分として算出した。結果を図 6 に示す。図 6 を見ると、提案手法が経路誘導による時間増加を最も抑えていることが分かる。結果が負の値をとるのは、迂回路の交通量が結果としてもとの予定経路よりも少なかったため、宛先までの到着時間が短縮された車両の効果と考えられる。

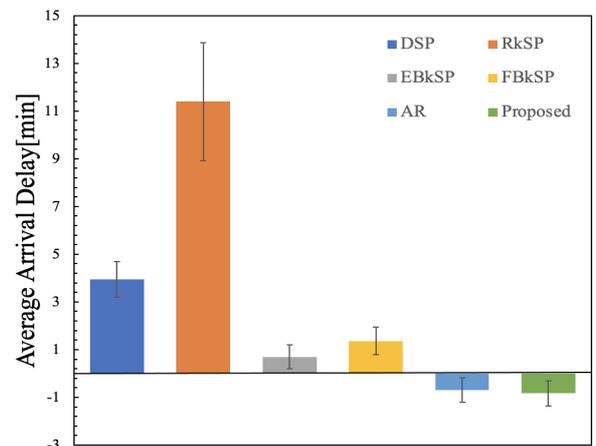


図 6 車両 1 台あたりの経路誘導による宛先到着遅延

Fig. 6 Average delay due to rerouting.

5. 考察

評価結果から、提案手法が他の手法に比べて走行時間を短縮できることが分かった。比較手法を提案した文献 [5] では、計算量の観点でも評価が行われているが、本実験では、計算量の評価を行っていない。理由としては、そもそも提案手法と比較手法の前提が異なり計算量の比較ができ

ないことと、実用面を考えてもあまり計算量が問題にならないと判断したためである。文献 [5] において、迂回路の計算は車両ごとに実行されることが想定される。一方、提案手法は迂回路の計算は車両ごとではなく交差点ごとに実行される。つまり、そもそもの計算の単位が異なるため、単純な比較はできない。また、比較手法では渋滞道路セグメントから距離 L の範囲で迂回計算がなされるのに対して、提案手法はより幅広く地図全体の全交差点対に対して迂回計算がなされる。つまり、提案手法の計算量は地図に依存するが、実際には有効な迂回路が存在する範囲は限られるため、渋滞箇所に応じて適切な範囲を定めてその範囲内の全交差点対に対して迂回路の計算をすることになる。しかし、そのような範囲を適切に求める方法については本論文では対象外としており、計算量を求めるにあたって前提とすべき交差点対の数を想定することはできない。また、提案手法はクラウドに配置された中央サーバにて迂回経路表の計算がなされることを前提としている。このように中央サーバで計算する場合には、交差点対ごとに経路計算の並列計算ができることを考えると、実運用時には十分な数の並列計算機を用意しておけば良いと考えられる。なお、本論文の評価に用いた大阪市の地図では、実装の都合で交差点に接続する道路セグメント数に対応する 214 回の Dijkstra アルゴリズムにより全交差点対に対する経路計算を実行したが、計算時間は第 8 世代 Intel i5 を搭載したデスクトップ PC において 3 秒程度である。

本実験から、単一の渋滞であれば、本手法を適用することで渋滞解消を図れることを示した。しかし、提案手法は単一の渋滞を解消する手法であり、同時に発生した複数の渋滞には対応できない。よって今後は、複数の渋滞を同時に解決する方法を検討していく必要がある。一方で、我々は単一の渋滞に対応できることも意義があると考えている。たとえば、事故や何らかの異常による渋滞であれば、本研究が適用できると考えられる。もちろん、対象領域を広げることで複数箇所と同時に異常が発生する可能性は上がるが、同時にそのような異常が発生する可能性はさほど高くないと考えられる。また、特定地域を走行する車両数が増加した場合には、同時に複数の渋滞が発生する可能性が上がると考えられる。しかし、はじめにある渋滞が発生し、それにともない周囲の車両が経路を変更した結果として別の渋滞が発生した場合には、まずはもとの渋滞を解消することで、結果的にそこから派生した渋滞も緩やかに解消に向かうと考えられる。このように、複数の渋滞を同時に解決する方法を検討することは今後の課題として重要であるが、現段階のように単一の渋滞のみに対応する方法であっても有効に働く状況は存在し、提案手法の意義はあると考えている。

6. おわりに

本研究では、車両が渋滞道路を迂回するときの宛先までの時間増加を考慮した経路誘導手法を提案した。具体的には、各交差点間の最短経路と迂回経路を走行するのにかかる推定時間の差分を求め、この差分が小さい交差点から優先して経路誘導を行う。これにより、宛先までの到着時間の増加を抑えつつ渋滞緩和を行うことができる。

本研究では、対象領域内の 1 カ所で渋滞が発生した際に、提案手法で渋滞を緩和する際の効率を評価した。提案手法の比較対象として、経路誘導を行わない場合と関連研究で用いられている経路誘導手法と比較を行った。その結果、提案手法では経路誘導を行った全車両の平均走行時間を低減することが明らかとなった。以上のことから、提案手法は、突発的な事故等により一部の道路が渋滞を起こした状況において有用であることを示した。

今後の課題としては、対象領域で複数の道路セグメントで渋滞が起きたときでも対応できるように提案手法を改良することが考えられる。

参考文献

- [1] 国土交通省：効果的な渋滞対策の推進, 国土交通省 (オンライン), 入手先 (<https://www.mlit.go.jp/road/index.html>) (参照 2021-05-01).
- [2] Wang, J., Hu, M., Xu, C., Christakos, G. and Zhao, Y.: Estimation of Citywide Air Pollution in Beijing, *PLoS ONE*, Vol.8, No.1, e53400, DOI: 10.1371/journal.pone.0053400 (2013).
- [3] Sparmann, J.M.: Benefits of dynamic route guidance systems as part of a future oriented city traffic management system, *Vehicle Navigation and Information Systems Conference 1991*, pp.839–847 (1991).
- [4] De Souza, A.M., Yokoyama, R.S., Maia, G., Loureiro, A. and Villas, L.: Real-Time Path Planning to Prevent Traffic Jam Through an Intelligent Transportation System, *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, Vol.1, pp.726–731 (2016).
- [5] Pan, J., Popa, I.S., Zeitouni, K. and Borcea, C.: Proactive vehicular traffic re-routing for lower travel time, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.62, No.8 (2013).
- [6] Wang, S., Djahel, S., Zhang, Z. and McManis, J.: Next Road Rerouting (NRR): A Multi-Agent System for Mitigating Unexpected Urban Traffic Congestion, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.17, No.10 (2016).
- [7] Sims, A.G. and Dobinson, K.W.: The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.29, No.2 (1980).
- [8] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. and Krajzewicz, D.: SUMO – Simulation of Urban MObility An Overview, *International Conference on Advances in System Simulation*, pp.63–68 (2011).
- [9] Open Street Map Foundation: Open Street Map, OpenStreetMap (online), available from (<https://www.openstreetmap.org/>) (accessed 2021-05-01).
- [10] 国土交通省：平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査 (道

路交通センサス), 国土交通省 (オンライン), 入手先
(<http://www.pref.osaka.lg.jp/doroseibi/h27sensasu/index.html>) (参照 2021-05-01).

- [11] Wegener, A., Piorkowski, M., Raya, M., Hellbruck, H., Fischer, S. and Hubaux, J.P.: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators, *Proc. 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, pp.155–163 (2008).



松井 雄資 (学生会員)

1996年生。2020年和歌山大学システム工学部システム工学科卒業。2021年現在, 和歌山大学大学院システム工学研究科博士前記課程在学中。交通渋滞緩和に向けた自動車の経路誘導手法に関する研究に従事。



吉廣 卓哉 (正会員)

1975年生。1998年京都大学工学部卒業。2000年同大学大学院情報学研究科博士前期課程修了。2003年同研究科博士後期課程修了。博士(情報学)。2003年和歌山大学システム工学部助教。2009年同学部講師, 2012年准教授。グラフ理論, インターネットルーティング, 無線アドホックネットワーク, バイオインフォマティクス, データベースシステム等の研究に従事。電子情報通信学会, 日本データベース学会, IEEE, ACM 各会員。本会シニア会員。