

# 目的地到着時間の増加を抑えて渋滞を緩和する 自動車の経路誘導手法

松井 雄資<sup>1</sup> 吉廣 卓哉<sup>1</sup>

**概要：**近年、都市の人口増加に伴い大都市で交通渋滞が発生し、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。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常に把握しておき、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  $k$ -最短経路計算に基づいた経路誘導を行う方法などが提案されているが、これらの手法は交通量の拡散による負荷分散をしているだけで、各車両が渋滞により経験する時間増加を直接的には扱っておらず、最適化の余地が残る。本研究では、把握されている現在の交通量を基に、各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経路を走行していると仮定した上で、渋滞道路に流入する車両のうち、到着時刻の遅延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。その結果、迂回路に誘導したことによる到着遅延の総量が最小になるような経路誘導により、渋滞を解消することができる。交通流シミュレーションにより評価を行った結果、提案手法は既存研究と比較して各車両の到着遅延の平均を最も抑えられる渋滞解消が可能であることを示した。

## 1. はじめに

近年、都市の人口及び車両の保有台数の増加に伴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。例えば、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。以上のことを踏まえて、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、それに伴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速くであれば、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、領域の交通状況が常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

<sup>1</sup> 和歌山大学

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。第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。第3章では、提案手法を説明する。第4章ではシミュレータで提案手法を実装し、評価を行う。第5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一つに 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 et al. [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みなす。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、 $k$ -shortest path algorithm 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 et al. [5] では、DSP (Dynamic Shortest Path), 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、特定の経路に車両が集中し、迂回先で新たな渋滞を引き起こす可能性がある。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、 $k$ -shortest path algorithm 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一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ため、迂回先での新たな渋滞が発生しにくい。しかし RkSP では、ランダムに経路を選択するため、全車両の宛先までの走行時間を最小化できていない。EBkSP は、経路誘導に複数の迂回路を用意する。この際に、どの車両をどの経路に割り当てるかを決定するのに  $Pop(p_i)$  という値を用いる。 $Pop(p_i)$  は、各経路  $p_i$  の車両割り当て数を指す。各車両へ経路を提供する際には  $Pop(p_i)$  が小さい経路に車両を割り当てる。こうすることで、各車両が複数の経路へある程度均等に割り当てられるようになる。FBkSP は、経路誘導に複数の迂回路を用意し、各経路  $p_i$  上の全道路セグメントの交通量を算出する。各車両へ経路を提供する際には、対象領域内の各道路セグメントの交通量が最小化するように経路を選択し車両を割り当てる。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。

上記の手法 [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、渋滞道路の近隣道路の車両全てを対象として迂回誘導をしており、迂回した場合の走行時間の増分は考慮していない。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、どうしても宛先への到着遅延が大きくなりがちである。また、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出る。さらに、限られた狭い範囲の車両のみを迂回させるため、近隣道路の許容交通量を超過しやすく、迂回路で二次的な渋滞が発生しやすい問題もある。提案手法のように迂回による到着遅延を最小化するアプローチを取れば、渋滞による道路交通全体への影響を最小限に止めることができる。また、提案手法は各道路の許容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渋滞も考慮した経路誘導が可能になる。

異なるアプローチの既存研究も紹介しておく。Shen et al. [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。具体的には、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おり、NRR は、27 か国で 37,000 以上の交差点で既に使用されている 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を指す。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路を計算するのではなく、渋滞道路の近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して宛先に向かう。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2つの問題があることは変わらない。

### 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。全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、全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した際に、目的地までの到着時間がどれだけ増加するかを算出し、その値が小さいものから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渋滞の解消が可能になる。

本節以降に提案手法の詳細について述べる。まず、4.2 項で提案手法で扱う変数等の諸定義を行う。4.3 項では、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基に算出した一覧表である。4.4 項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。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距離の差を  $C_{(s,d)}^{diff} = w(B_{(s,d)}) - w(P_{(s,d)})$  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  $t$ 、及び道路セグメント  $r \in R$  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。また、 $r$  上に存在し得る車両の最大数は  $V_{len}^{avg}$  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  $\delta$  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、 $r$  の交通容量を

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

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

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。

ここまでの諸定義を表1に一覧として記載する。

表 1 変数の諸定義

記号	詳細
$G$	グラフ (道路トポロジー)
$I$	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
$\nu_r^t$	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
$\nu_r^{std}$	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
$\delta$	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 $B_{(s,d)}$ の許容交通量
$A_{(s,d)}^{std}$	定常状態での迂回路 $B_{(s,d)}$ の許容交通量

### 3.3 迂回計画

#### 3.3.1 定常状態における交通量の把握

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常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  $\nu_r^t$ 、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。よって、予定経路が  $s$  と  $d$  を通る車両で、時刻  $t$  の単位時間あたりに交差点  $s$  に到着する数  $T_{(s,d)}^t$  を計算できる。各道路  $r$  の重み  $w(r)$  は、道路を通過するために要する時間  $w(r) = \frac{len_r}{\nu_r^t}$  で表される。また、上記の値を用いて、定常状態の平均車両速度  $\nu_r^{std}$  と交差点  $s$  への到着数  $T_{(s,d)}^{std}$  が計算できる。

#### 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。迂回制御表は、表 4.2 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の) 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、交差点対を  $u = (s, d)$  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  $L_u$  は交差点対  $u$  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対  $u'$  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  $\beta F_r^{exc}$  だけ、予定経路が  $r$  を通る車両を迂回路に誘導すれば、渋滞が解消され则认为する。迂回制御表から、優先度が高い順に交差点対を選択するが、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  $\alpha$  を掛けた値が  $\beta F_r^{exc}$  を超える必要がある。この時、 $\alpha X_u \geq \beta F_r^{exc}$  を満たす交差点対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対で経路誘導を実施する。

例えば、 $F_r^{exc} = 85, \beta = 1, \alpha = 1$  と仮定すると、表 2 の 6 行目までの交差点対に対して経路誘導を行えば (つまり  $k = 6$ )、単位時間あたり 86 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  $F_r^{exc} = 85$  台を超えているため、これら 6 つの交差点対に対して経路誘導を行えば、渋滞を解消できると考えられる。

#### 3.3.3 迂回制御表の構築

先述の通り、迂回制御表は道路セグメント  $r$  の渋滞検出時に構築される。迂回制御表は、対象領域内の全ての交差点対の集合を  $U^{all}$  とすると、次のような手順で構築される。

- (1)  $U^{all}$  の交差点対  $u = (s, d)$  を、 $C_u^{diff}$  の昇順に取り出し、手順 (2) 以下の処理を行う。
- (2) もし  $r \notin P_u$  であれば、 $u$  を読み飛ばして次の交差点対の処理に進む。
- (3) 迂回制御表に含まれる交差点対  $u' = (x, d)$  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対の処理に進む。
- (4) 定常状態における迂回路の許容交通量  $A_u^{std}$  を誘導可能交通量  $E_u$  とし (つまり  $E_u = A_u^{std}$ )、迂回制御表に加える。 ( $L_u$  は、初期値を 1 とし、行を加えるたびに 1 ずつ加算する。)
- (5)  $u$  に対して交通量  $E_u$  を迂回したと仮定して、全ての  $u' \in U^{all}$  に対する  $A_{u'}^{std}$  を更新する。

手順 (1)(2) では、 $U^{all}$  に含まれる全ての交差点対を、 $C_u^{diff}$  の小さい順に順番にループ処理する。手順 (3) は、一台の車に複数回の経路誘導をしないための処理であり、

表 2 迂回制御表

優先順位 $L_{(s,d)}$	出発交差点 $s \in S$	宛先交差点 $d \in D$	時間増分 $C_{(s,d)}^{diff}[min]$	迂回路に誘導可能な交通量 $E_{(s,d)}[台/分]$	累積値 $X_{(s,d)}[台/分]$
1	$s_1$	$d_1$	3	13	13
2	$s_2$	$d_2$	3	12	25
3	$s_1$	$d_2$	6	15	40
4	$s_3$	$d_1$	8	21	61
5	$s_1$	$d_3$	8	14	75
6	$s_4$	$d_2$	9	11	86
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
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，道路の許容量を基にして経路誘導する交通量を定める．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，各交差点对の許容交通量を更新する．手順 (3) の制限の理由は以下の通りである．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，既に  $s_2$  で  $u_2$  に対する経路誘導をされた後である．本研究では，一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．従って，この場合には  $s_2$  で  $u_2$  に対する経路誘導をしない．その結果， $C_u^{diff}$  が最小の交差点对の間に宛先を同じとする交差点对は迂回制御表に含めないことになる．

手順 (5) の許容交通量の更新は，次の手順で行う．なお，道路セグメント  $r$  の交通量は先述の通り  $F_r^t$  を測定することで得られるが，本アルゴリズムにおいては， $F_r^t$  を一時変数  $F_r^{std}$  として記憶しておき，この値を増減して  $r$  の予想流量を管理する．また，交差点对  $u$  の許容交通量  $A_u^{std}$  も同様に， $A_u^t$  の値をアルゴリズム実行時点で一次変数  $A_u^{std}$  に記憶して管理する．

- (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．
- (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．
- (3) 交差点对  $u \in U^{all}$  に対して， $A_u^{std}$  を更新する．

### 3.4 迂回制御アルゴリズム

この章では，4.3 項で作成した迂回制御表を基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， $r$  の現在処理可能な流量  $F_r^{exc} = F_r^{std} - F_r^t$  を算出する．各車両はそれぞれの宛先  $d \in D$  を持ち，宛先に対して重み  $w(\cdot)$  の下での最短路を予定経路とする．そして，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．具体的には，車両  $v$  から侵入先の交差点と宛先交差点を取得し交差点对  $u$  を求める．この時，路側機が各交差点に侵入する車両と通信できることを前提とする．各車両  $v$  の交差点对  $u$  を求めた後， $\alpha X_u \leq \beta F_r^{exc}$  であれば迂回路  $B_u$  を  $v$  に提示して経路誘導を実施する．迂回路に誘導された車両は，確率  $\alpha$  で迂回路に経路を変更し，確率  $1 - \alpha$  で変更しない．

## 4. 評価

### 4.1 評価目的

本研究の評価目的は，提案手法を用いることで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確認し，その性能を比較評価する．想定する場面としては，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渋滞を発生させる．その後提案手法により，渋滞道路セグメントに向かう車両数を低減し，渋滞を緩和する際の効率を評価する．提案手法の性能を，経路誘導を行わない場合と，関連研究 [5] で用いられる経路誘導手法 DSP，RkSP，EBkSP と比較する．これらは，この分野で最も代表的な手法と考えられる．性能評価の指標は，経路誘導を行った全車両の宛先までの平均走行時間，経路誘導を行った車両数とする．5.2 項に評価方法を示し，5.3 項に評価結果を示す．

### 4.2 評価方法

本研究では，交通流シミュレータ SUMO (Simulation for Urban MObility) [8] を用いて評価を行う．SUMO は，ITS の分野で広く用いられるシミュレータである．他車両との衝突や信号を考慮したモビリティモデルを実装してお

り、現実的なモビリティを生成できる。対象領域は現実の道路網に沿って行うため、OpenstreetMap[9]から大阪市の道路地図を取得した。また、主要な道路を取り出すために取得した地図から小さい道路を取り除いた。これは、経路誘導により提供される経路が、狭くて小さい道路を含むと運転者に負担がかかるためである。前処理後の道路地図を図1に示す。交差点には信号機が設置され、信号の1サイクルの時間は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、大阪市の発行した調査表[10]を基に定義する。[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。つまり、シミュレーション時間が3時間の場合は、すべての交通量を4で割る。シミュレーション時間内に生成される全車両数は、21607台とした。また[10]には、宛先ごとの交通量は記載されていないので、出発地から宛先までの交通量を以下の手順(1)から(3)で定義する。

- (1) 各出発地  $s \in S$  に対して、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  $s \in S$  からすべての宛先  $d \in D$  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。

例えば、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[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、 $T_{d_5} = 1100$  台である場合、その合計値を求めると  $\sum_{d \in D} T_d = 3500$  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(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。 $T_s = 1200$  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10800秒とした。そして、定常状態の交通量を基に迂回制御表を構築する。

定常状態での交通量を求めた後、一部の道路セグメントで渋滞を引き起こす状況を設定し渋滞緩和性能を評価する。この際のシミュレーション時間は10800秒とした。渋滞を引き起こす道路セグメントは、定常状態で最も交通量の多い道路セグメント(図1の地点X)とする。渋滞の起

こし方は、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4200秒とした。シミュレーション中に道路網の交通状況を変更する際には、TraCI (Traffic Control Interface) [11]を用いる。TraCIは、SUMOと連携して、シミュレーション進行中の各時刻の状態を取得し、車両等の動作を変更できる。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。

表3 シミュレーションの設定値

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	10800 秒
信号1サイクルの長さ	120 秒
車両の最大速度	60km/h
車両流入数	21607 台
渋滞検知を行う周期	300 秒
交通規制をかける時刻	4200 秒
渋滞検知の際の閾値 $\delta$	0.7
経路誘導に従う確率 $\alpha$	0.7
渋滞拡大係数 $\beta$	1.3

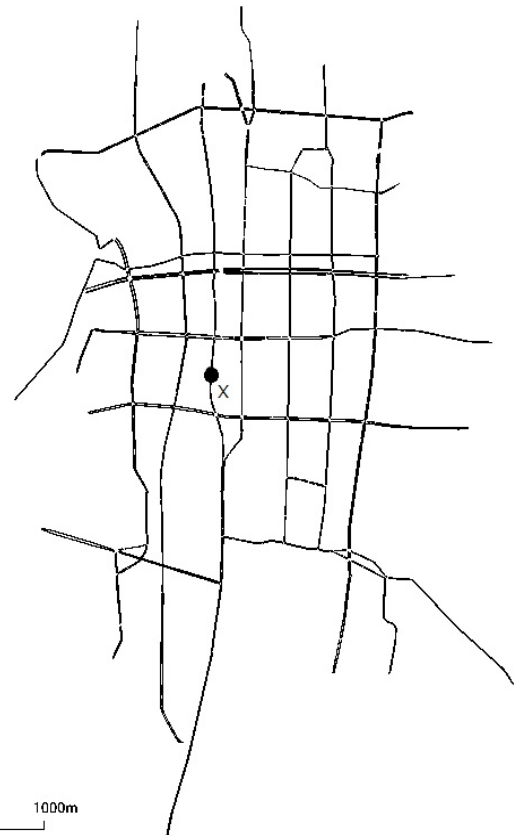


図1 大阪市の主要な道路地図



### 4.3 評価結果

シミュレーション評価の結果を述べる。全車両の宛先までの平均走行時間を図2、経路誘導を行った全車両の宛先までの平均走行時間を図3、経路誘導を行った車両数を図4に示す。ここでは、提案手法（proposed）を、経路誘導を行わない場合（noreroute）、DSP、RkSP、EBkSPと比較した。DSP、RkSP、EBkSPで用いられる $L$ の値と $k$ の値は、それぞれ $L = 3$ 、 $k = 2$ とした。 $L$ は、1セグメントを2つの交差点を結ぶ道路とした時に、渋滞道路からのセグメント数に基づいた距離を表す。つまり $L = 1$ の時では、渋滞道路からの距離が1の道路上に存在し、かつ渋滞道路を予定経路に含む車両全てに経路誘導を行うことになる。 $k$ は、 $k$ -shortest path algorithmを用いる際のパラメータであり、算出する迂回路の数を表す。迂回路はそれぞれ枝独立なものが計算される。なお、 $L = 3$ は、 $k = 2$ とした事前実験において最も既存手法の性能が良かった値である。 $k = 2$ は、 $L = 3$ とした際に、最も既存手法の性能が良かった値である。

図2を見ると、経路誘導を行わない場合と比較して、他の全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っていることが確認できる。渋滞を発生させなかった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3は、経路誘導により迂回路を走行した車両に限定して平均走行時間を比較している。どの手法でも迂回により平均走行時間は増加しているが、提案手法が最も増加時間が短い。これは、比較手法が複数の最短経路に負荷を分散してい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4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、いずれの手法も概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わかる。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も併せ見ると、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。即ち、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。

## 5. 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

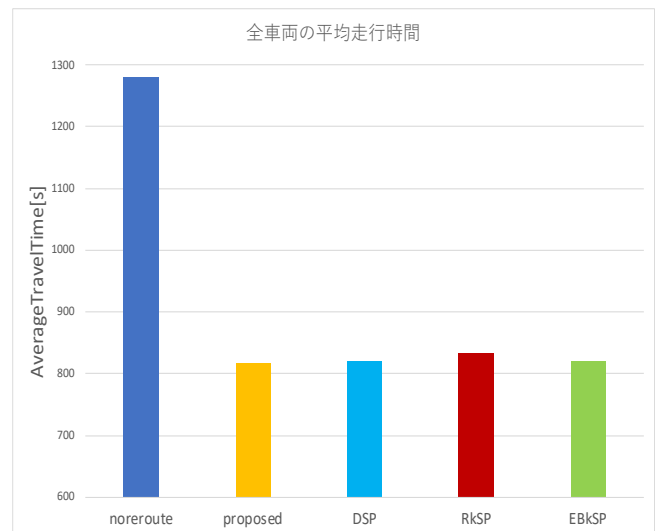


図2 全車両の平均走行時間

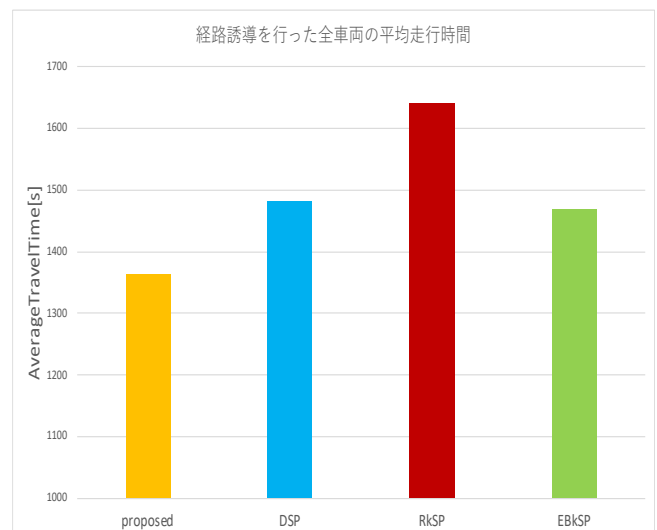


図3 経路誘導を行った全車両の平均走行時間

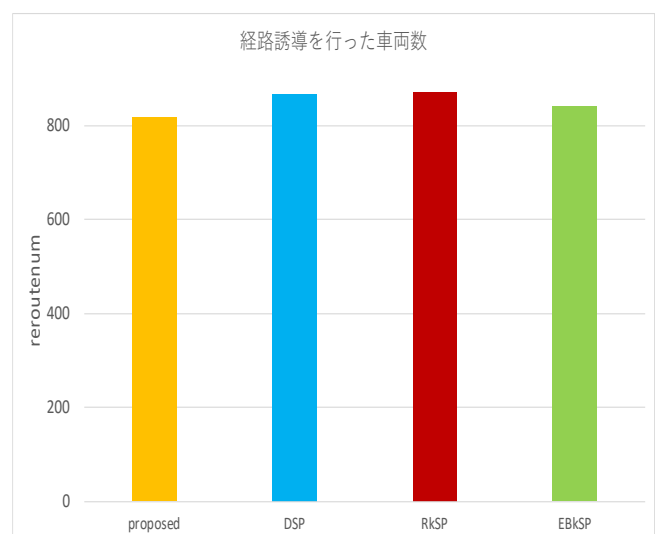


図4 経路誘導を行った車両数

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、対象領域内の一部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時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 HP, 入手先 (<https://www.mlit.go.jp/road/index.html>) (参照 2019-01-01).
- [2] Wang, J. , Hu, M. , Xu, C. , Christakos, G. and Zhao, Y. "Estimation of Citywide Air Pollution in Beijing", (PLoS ONE, Volume: 8, No.1, e53400, Jan. 2013)
- [3] J.M. Sparmann. "Benefits of dynamic route guidance systems as part of a future oriented city traffic management system", Vehicle Navigation and Information Systems Conference, (Oct. 1991)
- [4] Allan M. De Souza, Roberto S.Yokoyama, Guilherme Maia, Antonio Loureiro and Leandro Villas. "Real-Time Path Planning to Prevent Traffic Jam Through an Intelligent Transportation System", IEEE Symposium on Computers and Communication (Volume : 1, pages 726-731, August. 2016)
- [5] J. Pan, I. Sandu Popa, K. Zeitouni, and C. Borcea. "Proactive vehicular traffic re-routing for lower travel time" , IEEE Transactions on Vehicular Technology ( Volume : 62 , Issue : 8 , Oct. 2013 )
- [6] Shen Wang, Soufiene Djahel, Zonghua Zhang and Jennifer McManis. " Next Road Rerouting(NRR) : A Multi-Agent System for Mitigating Unexpected Urban Traffic Congestion", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems ( Volume: 17, Issue: 10 , Oct. 2016)
- [7] A. G. Sims, K. W. Dobinson. " The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits", IEEE Transactions on Vehicular Technology ( Volume: 29 , Issue: 2 , May. 1980 )
- [8] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, Daniel Krajzewicz. "SUMO - Simulation of Urban MObility An Overview", International Conference on Advances in System Simulation (pages 63-68, 2011)
- [9] Open Street Map, 入手先 (<https://www.openstreetmap.org/>) (参照 2019-01-01).
- [10] 平成 27 度 全国道路・街路交通情勢調査(道路交通センサス), 入手先 (<http://www.pref.osaka.lg.jp/doroseibi/h27sensasu/index.html>) (参照 2019-01-01).
- [11] Axel Wegener, Michel Piorkowski, Maxim Raya, Horst Hellbruck, Stefan Fischer<sup>1</sup> and Jean-Pierre Hubaux. "TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators", Processing of the 11th communications and networking simulation symposium(pages 155-163, 2008)