

目的地到着時間の増加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)}

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、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複数の経路を用いて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上で、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。

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 [2]。例えば、アメリカの都市部では渋滞の影響により、年間走行時間が約 88 億時間、燃料費は 1660 億ドルの増加が報告されている [3]。また、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 [4]、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。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。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。

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)[5] 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

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科

² 和歌山大学システム工学部

a) matsui.yusuke@g.wakayama-u.jp

b) tac@wakayama-u.ac.jp

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。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方法の一つに 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である。

DRGS の経路算出手法は、二種類に分類できる。一つは、一本の迂回路を用いる方法で、もう一つは、複数本の迂回路を用いる方法である。一本の迂回路を用いる方法として DSP (Dynamic Shortest Path) [6] と呼ばれる手法がある。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。また、DSP は経路誘導手法の中で基本的な手法であり、多くの研究で用いられている [7][8]。[7] は、車車間通信を用いた DRGS を提案しており、経路算出に DSP を用いている。[8] は、経路計算のコストに CI (Congestion Index) と呼ばれる指標を用いている。しかし、[6]-[8] の方法では、多くの車両が同じ迂回路を選択することになり、迂回先で新たな渋滞が発生する可能性が高くなる。[9] では、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。経路算出には、各車両が迂回路を選択する毎に迂回路に含まれる全道路の重みを用いる。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、[9] では、迂回先の交通容量を計算しておらず、迂回先での渋滞を高精度に制御する最適な経路計算はできない。

一方で、迂回路を複数本用意することで、特定の経路に車両を集中させない経路誘導手法がある [6],[10]-[13]。[10][11] は、迂回路を算出する際に k -最短路アルゴリズムを用いる。 k 本の迂回路に車両を分散させる割合を計算するために boltzmann 分布を用いる。確率分布に従って車両を複数の経路に分散させることで、迂回先で新たな渋滞が発生す

る確率を低減する。[6] では、RkSP (Random k Shortest Path), EBkSP (Entropy Balanced k -Shortest Paths) と呼ばれる手法を提案している。RkSP は、交通量の拡散による負荷分散により渋滞を緩和する手法である。 k -最短路アルゴリズムを用いて k 本の迂回路を算出し、その中からランダムに一つ経路を選択して各車両に経路を提供する。こうすることで、車両を複数経路に平均的に分散できる。しかし RkSP では、ランダムに経路を選択するため、迂回路に含まれる各道路のもともとの交通量を考慮しない。このため、もともと交通量の多い道路にも多くの車両を混入させることがあり、二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上で、エントロピーの考え方に基づいて、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。一般的に RkSP と比べて車両の走行時間を抑えられることから、他の研究においても EBkSP と似た経路誘導手法が用いられている [12][13]。[12] は、渋滞緩和に向けたアプリケーションを設計しており、経路算出に EBkSP を用いている。[13] は、中央サーバや路側機を用いない DRGS を提案しており、経路算出に EBkSP を用いている。

上記の手法 [6][10] 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、宛先への到着遅延が大きくなりがちである。また、限られた狭い範囲の車両を集中的に迂回させるため、近隣道路の交通容量を超過しやすく、迂回路で二次的な渋滞が発生しやすい問題もある。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。

これを踏まえて提案手法では、経路誘導による目的地到着時間の増加に着目する。渋滞地点からの距離によらず各車両の到着時間の増加を最小化するように経路誘導を行えば、渋滞による個々の車両への影響が最小限で済むため、迂回による到着時間の増加量が小さく、各車両の運転者の不満を抑えられる。同時に、提案手法は各道路の交通容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二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 et al. [14] 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

か国で 37,000 以上の交差点で既に使用されている SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) [15] 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 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、渋滞道路の近隣交差点に侵入する各車両に対して、次に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) に基づいて最短経路を通って宛先に向かう。最低限の経路誘導を行うため、経路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。

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、迂回路の交通容量に限りがあるため、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が大きくなりやすいため、車両の目的地到着時間も大きくなる傾向にある。提案手法は、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、3.2 項で提案手法で扱う変数等の諸定義を行う。3.3 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記した一覧表である。3.4 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 への最短経路を表す。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 $w(\cdot)$ の下での最短経路を 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 への最短経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。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おくと $n_r^{max} = \frac{len_r}{V_{len}^{avg} + g_{min}} \times lane_r$ 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 $d \in D$ への最短経路 $P_{(s,d)}$ 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。

ここまでの定義を表 1 に一覧として記載する。

表 1 変数の諸定義

記号	詳細
G	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

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、交差点付近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 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} や走行速度 ν_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、渋滞緩和に向けた各交差点での迂回交通量を計算するために、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、一定時間毎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。迂回制御表は、渋滞道路セグメント毎に作成される。つまり、複数ヶ所の渋滞があれば、同じ数の迂回制御表が作成され、中央サーバが保持する。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 $C_{(s_i, d_i)}^{diff}$ 、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。 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、渋滞道路セグメント r の交通容量 F_r^{cap} に対して、渋滞している現在の交通量が 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、 $F_r^{exc} = F_r^{cap} - F_r^t$ 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。この時、 $\alpha X_u \geq \beta F_r^{exc}$ を満たす交差点对集合の中で最小の優先順位を j とすると、 j 以下の優先順位を持つ交差点对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 (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 $j = 6$)、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 つの交差点对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。

表 2 迂回制御表

優先順位	出発交差点	宛先交差点	時間増加	迂回路に誘導可能な交通量	累積値
$L_{(s,d)}$	$s \in S$	$d \in D$	$C_{(s,d)}^{diff}[\text{min}]$	$E_{(s,d)}[\text{min}]$	$X_{(s,d)}[\text{min}]$
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
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
$i-1$	s_7	d_{12}	31	$E_{(s_7,d_{12})}$	$X_{(s_7,d_{12})}$
i	s_{14}	d_5	33	$E_{(s_{14},d_5)}$	$X_{(s_{14},d_5)}$
:	:	:	:	:	:

3.3.3 迂回制御表の構築

本研究では、一定時間毎に渋滞検知が行われ、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。また、迂回制御表は各渋滞道路セグメントにつき一つ構築される。本節では、検知した渋滞道路セグメントが一つの場合の迂回制御表の構築手順を述べ、次節で複数の渋滞道路セグメントが検知された場合の処理について述べる。

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) 渋滞道路セグメント r に対して迂回により削減すべき交通量 $F_r^{exc} = F_r^{cap} - F_r^t$ を算出する。
- (2) U^{all} の交差点対 $u = (s, d)$ を、 C_u^{diff} の昇順に取り出し、それぞれに対して手順 (3) 以下の処理を行う。
- (3) 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対の処理に進む。
- (4) 既に迂回制御表にエントリが含まれる交差点対 $u' = (x, d)$ で、 $P_u \subset P_{u'}$ 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。
- (5) 交差点 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。 $C_{(s,d)}^{diff}$ は既に計算済なので、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、今回の E_u も含めて、これまでに迂回制御表に加えた E_u の和である。
- (6) 交差点 s において交通量 E_u を B_u に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。
- (7) 交差点 s において交通量 E_u を迂回したと仮定して、 F_r^{exc} を交通量 E_u 分だけ減少させる (つまり $F_r^{exc} = F_r^{exc} - E_u$)。
- (8) 渋滞道路セグメント r に対して迂回により削減すべき交通量が $F_r^{exc} \leq 0$ になるまで手順 (2)~(7) の処理を行う。

手順 (1) は、渋滞道路セグメントに対して迂回により削減すべき交通量を算出する。手順 (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処理していく。手順 (3) は、経路が渋滞道路セグメント r を通らない

交差点対を排除する。手順 (4) は、交差点対間での車両流入数の整合性を保つための処理であり、この理由は後述する。手順 (5) は、各交差点対に対して、道路の許容量を基にして経路誘導する交通量を定め、迂回制御表にエントリとして追加する。手順 (6) は、経路誘導の結果として各道路の交通量が変ると推定されるので、この変化を計算し、各交差点対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 (7) は、経路誘導の結果として渋滞道路セグメント r に流入する車両が変わるので、渋滞道路セグメント r の削減すべき交通量を更新する。

手順 (5) の制限の理由は以下の通りである。既に迂回制御表にエントリが含まれる交差点対を $u_1 = (s_1, d)$ 、これから迂回制御表への追加を考えている交差点対を $u_2 = (s_2, d)$ とする。この時、 P_{u_1} が P_{u_2} に含まれる、つまり $P_{u_1} \subset P_{u_2}$ である場合を考える。この時、交差点 s_2 で迂回を行うと、交差点 s_1 に流入する交通量が変化する。既に計算した交差点 s_1 での迂回交通量 E_{u_1} は、交差点 s_1 に流入する交通量を基に計算するので、交差点 s_2 での迂回により、交差点 s_1 に流入する交通量に矛盾が生じる。よって、この場合には、 s_2 で u_2 に対する経路誘導をしない。

手順 (6) 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全ての交差点対 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 (6)(7) の計算を実行する。具体的には、手順 (7) 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対 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毎に、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常に把握しておく。具体的な手順を以下に示す。

- (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) 交差点対 $u \in U^{all}$ に対して、 A_u^{std} を更新する。(更新した各道路の交通量を元に、各交差点対に対して迂回可能交通量を計算する。)

3.3.4 複数の渋滞が発生した場合

先述の通り、本節では複数の渋滞道路セグメントを検知した際の各迂回制御表の構築手順について述べる。各迂回制御表は、対象領域内の全ての交差点対の集合を U^{all} 、渋滞道路セグメントの集合を $J \subset R$ とすると、次のような手順で構築される。なお、本手順は、単一セグメントの渋滞を想定した 3.3.3 項の手順に対して、手順 (2) を加え、手順 (9) を複数の渋滞に対応して少し修正したものである。

- (1) 各渋滞道路セグメント r に対して迂回により削減すべき交通量 $F_r^{exc} = F_r^{cap} - F_r^t$ を算出する.
- (2) J から F_r^{exc} が最小の渋滞道路セグメント $r \in J$ を取り出す.
- (3) U^{all} の交差点対 $u = (s, d)$ を, C_u^{diff} の昇順に取り出し, それぞれに対して手順 (4) 以下の処理を行う.
- (4) 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対の処理に進む.
- (5) 既に迂回制御表にエントリが含まれる交差点対 $u' = (x, d)$ で, $P_u \subset P_{u'}$ 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.
- (6) 交差点 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. $C_{(s,d)}^{diff}$ は既に計算済なので, 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, 今回の E_u も含めて, これまでに迂回制御表に加えた E_u の和である.
- (7) 交差点 s において交通量 E_u を B_u に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.
- (8) 交差点 s において交通量 E_u を迂回したと仮定して, F_r^{exc} を交通量 E_u 分だけ減少させる (つまり $F_r^{exc} = F_r^{exc} - E_u$).
- (9) 全ての渋滞道路セグメントが $F_r^{exc} \leq 0$ になるまで手順 (2)~(8) の処理を行う.

手順 (1) は, 各渋滞道路セグメントに対して迂回により削減すべき交通量を算出する. 手順 (2) は, 渋滞の規模が大きい渋滞道路セグメントから, 迂回制御表に交差点対を追加するための処理である. 手順 (3)~(8) では, 単一セグメントの渋滞を想定した 3.3.3 項の手順と同様である.

以上の手順に従って迂回制御表を構築することで, 各迂回制御表は, $\alpha X_u \leq \beta F_r^{exc} (r \in J)$ を満たすエントリのみで構成される.

例えば, 2つの渋滞道路セグメント a, b を検知し, それぞれの削減すべき交通量が $F_a^{exc} = 100, F_b^{exc} = 120$ と仮定する. まず, F_r^{exc} の値が大きい b から, 手順 (3)~(7) に従って迂回制御表に一つのエントリが追加される. この時 b の迂回制御表に追加されたエントリで $E_{(s,d)} = 30$ の迂回計画を立てたとすると, F_a^{exc}, F_b^{exc} はそれぞれ $F_a^{exc} = 100, F_b^{exc} = 90$ へと更新される. これにより, F_r^{exc} の大小関係が変わり, 次に迂回制御表にエントリが追加される渋滞道路セグメントは a となる. これを $F_a^{exc} \leq 0, F_b^{exc} \leq 0$ となるまで迂回制御表が構築される.

3.4 迂回制御アルゴリズム

本項では, 3.3 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. 複数の渋滞が同時に発生した場合には, それぞれに対応する複数の迂回制御表ができ

ることに注意されたい.

まず, 交差点付近に設置された路側機が収集した交通情報を基に渋滞検知を行う. 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 $F_r^{exc} = F_r^{cap} - F_r^t$ を算出する. 複数の道路セグメントで渋滞を検知した場合にはそれら全ての道路セグメント r に対して同様の値を算出する. 次に, 中央サーバは路側機から収集した情報を基に各渋滞道路セグメントの迂回制御表を計算する. 中央サーバは, 計算した迂回制御表に基づいて路側機に経路誘導を指示する. 具体的には, 全ての迂回制御表が持つ各エントリの出発地交差点 s において全ての対象車両に迂回誘導ができるように, 付近の路側機に必要な情報を送信する. 路側機は, 中央サーバから得た指示を基に全ての対象車両に対して, 迂回誘導を実施する.

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 にいくつか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渋滞時間等を測定することにより, 提案手法の性能評価を行う. 比較手法として, 経路制御を行わない場合と, 文献 [6] で用いられている経路誘導手法である DSP, RkSP, EBkSP 文献 [10] で用いられている経路誘導手法である PkSP を比較する. 先述の通り, これらの k -最短路を用いた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) [16] 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) [19] 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[17] から取得して利用した. 本シミュレーションでは主要な道路のみを対象として迂回誘導を行うため, 予め小さい道路を取り除き, 主要な一般道路のみの地図とした. 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. シミュレーションに使用した道路地図と各道路の交通量を示した図を図 1 に示す. 信号機は各交差点に設置されており一定時間で変化するものとし, 信号の周期は 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, 大阪市が発行した調査表 [18] を基に定義する. 文献 [18] には, 各道路の 12 時間あたりの交通量が記載されており, そ

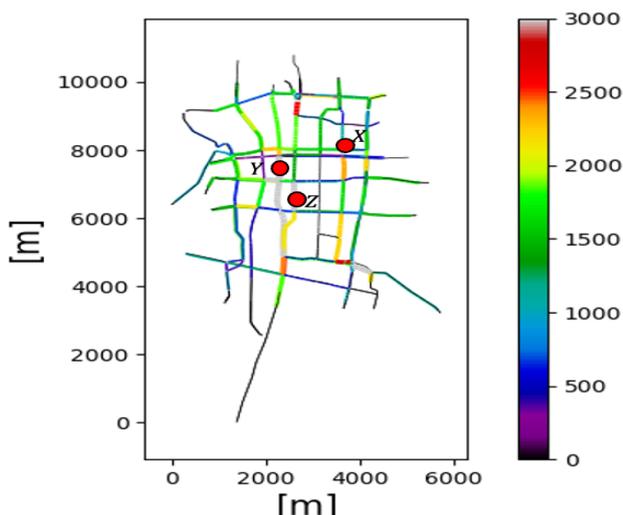


図 1 大阪市の主要な道路地図

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)
シミュレーション終了条件	全車両が目的地へ到着
信号モデル	一定周期
信号 1 サイクルの長さ	120 秒
車両の最大速度	60km/h
交通量	30000 台
渋滞検知を行う周期	300 秒
交通規制数	3
渋滞検知の際の閾値 δ	0.5
実際に経路誘導に従う確率	0.7
経路誘導に従う確率の想定値 α	0.8
渋滞拡大係数 β	1.3

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、シミュレーション内で車両が生成する時間を 2 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、30000 台となった。文献 [18] 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を交通量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、 $p_{(s,d)} = \frac{T_d}{\sum T_d}$ 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。

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。算出

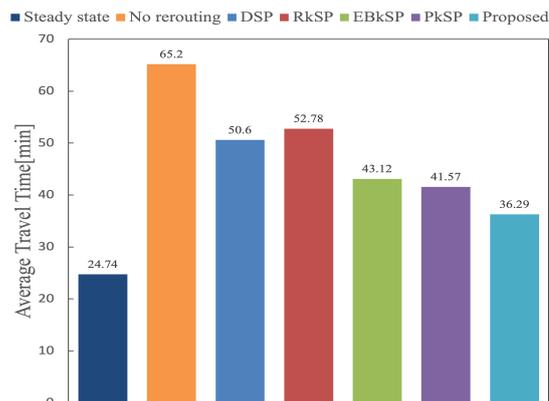


図 2 全車両の平均走行時間

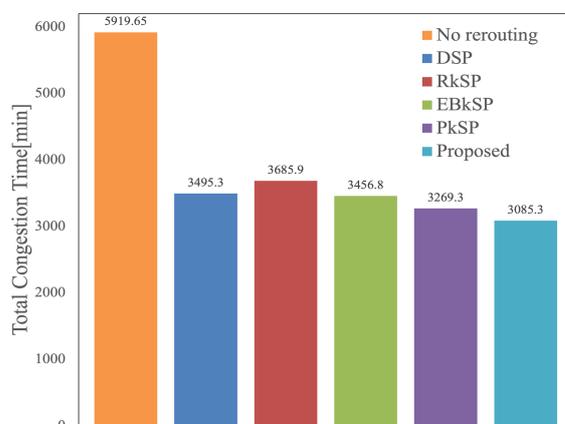


図 3 渋滞時間の総和

された定常状態の交通量を基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、いくつかの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 1 の地点 X, Y, Z の 3 箇所を選んだ。また、本研究での交通規制は、地点 X, Y, Z の各道路を封鎖することを意味する。交通規制は、対象領域内に車両が十分に行き渡り始めてから行うために、シミュレーション開始後 1800 秒からシミュレーション終了時刻までとした。本実験では、全車両が目的地まで到着することをシミュレーションの終了条件とし、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 $\delta = 0.5$ とした。実際に経路誘導に従う運転者の比率は 0.7、経路誘導に従う確率の推定値は $\alpha = 0.8$ 、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、DSP, RkSP, EBkSP, PkSP と比較した。また、交通規制と経路誘導をどちらも行わない場合 (SteadyState)、交通規制は行うが経路誘導を行わ

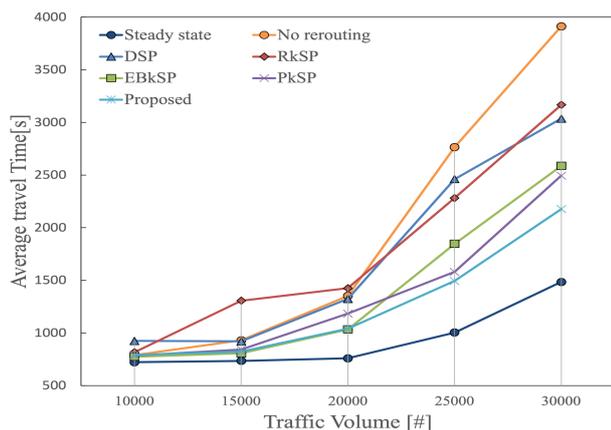


図 4 交通量を変化させた場合の全車両の平均走行時間

ない場合 (No-Rerouting) とも比較した。既存手法である DSP, RkSP, EBkSP, PkSP 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、かつ渋滞道路を予定経路に含む車両全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。この時、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 $k = 3, L = 2$ を本実験に適用した。

本実験のシミュレーション結果を述べる。全車両の宛先までの平均走行時間を図 2、渋滞時間の総和を図 3 に示す。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ることがわかる。また、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。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 3 は、各手法における渋滞時間の総和を比較している。渋滞時間の総和は、各道路セグメントに対して検知された渋滞時間を求め、全道路セグメントに対してその総和をとることで求める。図 3 を見ると、全ての手法が経路誘導を行わない場合と比較して、大幅に渋滞時間の総和を抑えている中で、特に提案手法の渋滞時間の総和が最も低い値となった。

4.4 交通量を変化させた場合の評価結果

交通量を変化させた場合に各手法の渋滞緩和効果がどのように変化するかを評価した。交通量を 10000 台から

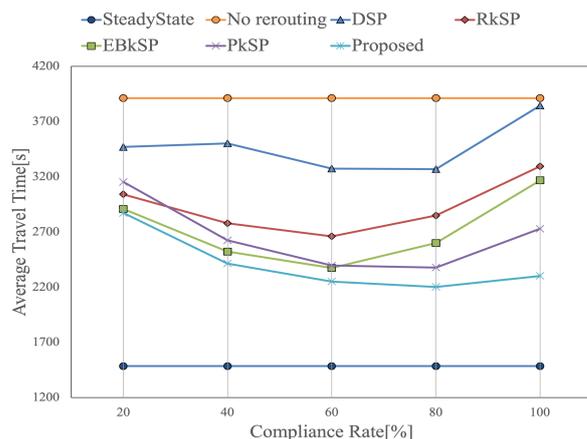


図 5 経路誘導に従う確率を変化させた場合の全車両の平均走行時間

30000 台まで 5000 台刻みで変化させた場合の全車両の平均走行時間を図 4 に示す。図 4 を見ると、全ての手法で交通量が増加すると全車両の平均走行時間が増加していることがわかる。比較手法に着目すると、迂回路の本数が一本の DSP に比べて、 k -最短経路法を用いる EBkSP, PkSP の方が交通量が多い場合においても車両の走行時間を抑えていることがわかる。これは、DSP が全ての車両に同一の経路を提示するのに対して、EBkSP, PkSP は車両を複数の経路に分散させることで迂回先での渋滞数を減らしたからである。一方で、提案手法は、交通量が大きくなるほど比較手法との平均走行時間の差が大きくなっており、渋滞を発生させない定常状態時の結果に最も近いことがわかる。提案手法では、経路誘導による宛先到着遅延を考慮し、迂回先の交通容量から経路誘導を行う車両数を算出することで、余分な迂回車両の発生を防ぎながら全車両の走行時間の総計を低減している。この効果が、交通量が増えるほど発揮されたため、比較手法との差が広がったと考えられる。

4.5 経路誘導に従う確率を変化させた場合の評価結果

経路誘導に従う確率は、渋滞緩和の結果に大きく影響する。そこで本研究では、経路誘導に従う確率を変動させた際に全車両の平均走行時間がどのように変化するかを評価した。また、提案手法で用いる、車両が経路誘導に従う確率の想定値 α を $\alpha = 0.8$ とした。経路誘導に従う確率を 0 から 100%まで 20%刻みで変化させた時の全車両の平均走行時間を図 5 に示す。図 5 を見ると、経路誘導に従う確率が小さい時は、比較手法と提案手法はともに全車両の平均走行時間の値に大きな差は見られない。しかし、経路誘導に従う確率が大きくなるにつれて、比較手法と提案手法の平均走行時間の差は大きくなっていく。これは、比較手法が迂回誘導を行う交通量を算出しておらず余分な迂回を発生させるのに対して提案手法が、渋滞削減に必要な交通量を計算して計画的に迂回量を計算した効果であると考えられる。

また、提案手法において経路誘導に従う確率が80%から100%にかけて車両の平均走行時間が少し増加しているのがわかる。これは、実際に経路誘導に従う確率が迂回率の想定値である α の値を超えたことで、迂回路の容量を超える車両を迂回路へと流したことが原因と考えられる。

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複数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。

今後の展望として、異なる道路網や交通パターンを変化させた場合においても提案手法が有用であるかどうかを検証していきたい。

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] International Transport Forum: Reducing Transport Greenhouse Gas Emissions: Trends and Data 2010, International Transport Forum 2010
- [3] D. Schrank, B. Eisele, and T. Lomax.: 2019 urban mobility report, Texas A&M Transportation Institute
- [4] J. Wang, M. Hu, C. Xu, G. Christakos, and Y. Zhao.: Estimation of Citywide Air Pollution in Beijing, PLoS ONE, Vol.8, No.1, e53400, DOI: 10.1371/journal.pone.0053400 (2013).
- [5] 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 1991, pp. 839-847, (1991).
- [6] J. Pan, I. Sandu Popa, K. Zeitouni, and C. Borcea.: Proactive vehicular traffic re-routing for lower travel time, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.62, No.8 (2013).
- [7] R.I. Meneguetto, G.P.R. Filho, L.F. Bittencourt, J. Ueyama, B. Krishnamachari and L.A. Villas.: Enhancing Intelligence in Inter-vehicle Communications to Detect and Reduce Congestion in Urban Centers, 2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ISCC.2015.8897528 (2015).
- [8] A. Lakas and M. Chaqfeh.: A novel method for reducing road traffic congestion using vehicular communication, IWCMC 2010 - Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 16-20, DOI : 10.1145/1815396.1815401 (2010).
- [9] A.M. De Souza, R.S. Yokoyama, R. Meneguetto, L.C. Botega and L. Villas.: SCORPION: A Solution using Cooperative Rerouting to Prevent Congestion and Improve traffic Condition, 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology, DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.71 (2015).
- [10] A.M. De Souza, R.S. Yokoyama, G. Maia, A. Loureiro and L. Villas.: Real-Time Path Planning to Prevent Traffic Jam Through an Intelligent Transportation System, 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), pp. 726-731, DOI: 10.1109/ISCC.2016.7543822 (2016).
- [11] A.M. De Souza, R.S. Yokoyama, A. Boukerche and G. Maia.: ICARUS: Improvement of traffic Condition through an Alerting and Re-routing System, Computer Networks, Vol.110, pp.118-132 (2016).
- [12] R. Liu, H. Liu, D. Kwak, Y. Xiang, C. Borcea, B. Nath, L. Iftode.: Themis: A Participatory Navigation System for Balanced Traffic Routing, 2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 14865301, DOI: 10.1109/VNC.2014.7013335 (2014).
- [13] A.T. Akabane, R. Immich, E.R.M. Madeira and L.A. Villas.: iMOB: An Intelligent Urban Mobility Management System Based on Vehicular Social Networks, 2018 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), pp. 1-8, DOI: 10.1109/VNC.2018.8628436 (2018).
- [14] S. Wang, S. Djahel, Z. Zhang and J. McManis.: Next Road Rerouting(NRR): A Multi-Agent System for Mitigating Unexpected Urban Traffic Congestion, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.17, No.10 (2016).
- [15] A.G. Sims, K.W. Dobinson.: The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.29, No.2 (1980).
- [16] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, D. Krajzewicz.: SUMO - Simulation of Urban MObility An Overview, International Conference on Advances in System Simulation, pp.63-68 (2011).
- [17] Open Street Map Foundation: Open Street Map, OpenStreetMap (online), 入手先 (<https://www.openstreetmap.org/>) (参照 2021-05-01).
- [18] 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).
- [19] A. Wegener, M. Piorowski, M. Raya, H. Hellbruck, S. Fischer, and J.P. Hubaux.: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators, Processing of the 11th communications and networking simulation symposium, pp.155-163 (2008).