

推薦論文

GreenSwirl：交通渋滞の緩和を目指した信号制御 および経路案内方式の提案と性能評価

徐 家興^{1,a)} 川井 明^{2,b)} 柴田 直樹^{1,c)} 伊藤 実^{1,d)}

受付日 2015年4月12日, 採録日 2015年10月2日

概要：交通渋滞を引き起こす原因の1つは非合理的な交通信号サイクルであり、一定速度で走行する車両に連続する交差点をつねに青信号で通過させる方式である GreenWave が提案されている。しかし、GreenWave には対向車線と横断道路への影響、出入り口での渋滞などの問題がある。これらの問題点を解決するために、本論文では信号制御方式 GreenSwirl、および経路案内方式 GreenDrive を提案する。GreenSwirl は複数の GreenWave 道路を渦巻き状に配置し、車両の出入りをスムーズにする。また、GreenDrive は道路の走行時間を見積もり、車両の走行時間を短縮させる。ニューヨーク市マンハッタン島の道路網を対象に、交通流シミュレータ SUMO を用いたシミュレーションを通して、提案手法の時間短縮効果を確認した。

キーワード：GreenSwirl, GreenDrive, 交通信号制御, 交通流シミュレータ, SUMO

GreenSwirl: A Combination Method of Traffic Signal Control and Route Guidance for Reducing Traffic Congestion

JIAXING XU^{1,a)} AKIRA KAWAI^{2,b)} NAOKI SHIBATA^{1,c)} MINORU ITO^{1,d)}

Received: April 12, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: Inefficient setting of traffic signal cycles is one of the main causes of congestion. GreenWave is a method for controlling traffic signals which allows one-way traffic to pass through a series of intersections without stopping cars at red lights. There are still two problems with GreenWave. It blocks the crossing traffic, and it forms congestion at entry and exit to the roads with GreenWave. To solve these problems, we propose a method for controlling traffic signals, named GreenSwirl, in combination with a route guidance method, named GreenDrive. GreenSwirl controls traffic signals for a smooth flow of traffic by making signals turn green when cars arrive, and thus allowing cars to run without stopping on circular routes throughout the city. GreenDrive is a navigation system for optimizing the overall control of the city's traffic. We conducted simulation with the road network of Manhattan Island in New York, and confirmed advantages by our method over existing methods in average travel time, fuel consumption, etc.

Keywords: GreenSwirl, GreenDrive, traffic signal control, traffic simulator, SUMO

1. まえがき

近年、都市の人口および車の保有台数の増加にともなって、大都市で深刻な交通渋滞と、排気ガスによる大気汚染が社会問題となっている。2012年、中国の北京に発生した

本論文の内容は2014年7月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウムにて報告され、マルチメディア通信と分散処理研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

² 滋賀大学
Shiga University, Hikone, Shiga 522-0069, Japan

a) jiaxing-x@is.naist.jp

b) akira-kawai@biwako.shiga-u.ac.jp

c) n-sibata@is.naist.jp

d) ito@is.naist.jp

PM2.5 大気汚染においては、車の排気ガスが原因の PM2.5 粒子が 22% を占めた [1]。観測データでは、渋滞が発生している道路の PM2.5 濃度は、渋滞なしの道路より数倍も高かった [2]。渋滞原因の 1 つは非合理的な交通信号サイクルである。たとえば、道路に車両がないのに青信号が長く、直交する道路に多数の車両が待っていることがある。また、赤信号で止まっているとき、前方の交差点が青信号となり、目の前の信号と入れ替えに赤になることもたびたび経験する。大都市の一般道路を走行する自動車は、意外に長い時間停車している。気にするほどの渋滞がなく、60 km/h で走行しているつもりでも、1 時間の走行距離は 20 km 程度である。車を 0 km/h から 60 km/h まで加速させるエネルギーは、その車を 14.2 メートルの高さまで吊り上げるエネルギーと同じであり、この燃料消費は車両が停止・発進するたびに発生するため、渋滞の際には非常に大きな燃料浪費となる。うまく制御されている信号とそうでない信号が車両の実効速度や燃費、運転の安全性、さらに運転者の心理に与える影響の違いは大きい。

これらの問題を改善するために、交通最適化分野で多くの研究がなされてきている。研究には、大きく分けて (1) 動的経路案内 (DRG) と (2) 交通信号制御 (TSC) がある [3]。DRG の代表的実用例として、カーナビや VICS があげられる。最短距離経路を案内する方法がよく利用されているが、多くの車両が同じ経路に殺到して交通渋滞を引き起こし、走行時間が延長する可能性がある。経路間の交通量バランスの観点から、運転者を分散させる方式もあるが、長い経路を走行することを強いられる運転者がいて、公平性に問題がある。TSC において、実用化まで研究された方式としては GreenWave 法がある。GreenWave 法とは、適切にコントロールされた交通信号が車群の到着直前に青になり、運転者にとって青い波がやってくるような信号同期制御法であり、欧米中多くの都市において実験的運用がされている。しかし、期待されたほど結果が良くなく、多くの問題が発見された。たとえば、GreenWave は幹線道路のみに生成されるため、対向車線と横断道路の妨害、入口と出口の渋滞などの問題を引き起こす現象があげられる。

本研究では、上で述べた GreenWave 法の問題点の改善を目指し、車両走行効率向上を目指した信号制御方式 GreenSwirl [4] および経路案内法 GreenDrive を提案する。提案手法は信号制御部と経路案内部からなる。GreenSwirl では、複数の GreenWave を渦巻き状に発生させ、巨大な循環道路を構築する。この循環道路を優先道路と呼ぶ。優先道路に進入した車両は、理想状態では優先道路を出るまで法定速度で無停止に走行することができる。また、個々の運転者に最も有利な経路案内をしつつ、道路負荷を分散させるための経路案内手法 GreenDrive をあわせて提案する。この手法では経路の走行時間を見積もり、平均走行時間を最小化する。経路負荷変化に応じて車両を優先道路と

そうでない道路に振り分け、交通量を分散させ、車両の走行時間を短縮させる。

提案手法の性能を評価するために交通流シミュレータ SUMO と現実の道路網（ニューヨーク市マンハッタン島）を用いたシミュレーション評価を行い、車両の走行時間短縮効果を計測した。その結果、GreenWave 信号制御法と比べて GreenSwirl 法が平均 10%～25% 程度、既存の経路案内手法と比べて GreenDrive 法が平均 10%～29% 程度、それぞれ短縮させたことを確認した。

2. 関連研究

2.1 動的経路案内 (DRG, Dynamic Route Guidance)

動的経路案内 (DRG, Dynamic Route Guidance) [3] とは、トラフィックの空間分布を変更するための経路案内法である。この手法は車両に経路案内を行う際、主に以下のいずれかを目的とする。(1) 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、または燃料消費を軽減させる、(2) 密度の低い道路に案内することで、渋滞を軽減させる。

文献 [5] は k -最短経路探索アルゴリズム [6] を用いて、距離が短い複数の経路候補を運転者に案内する手法である。この手法では、経路候補を k 本用意することで、ユーザの習慣や好みに応じて走行したい経路を選択させる。しかし、大規模で複雑な道路網では k -最短経路を求めるための計算時間が長くなる一方、ユーザが最短経路を選ぶ傾向が強いため、実用面での有用性の問題がある。

文献 [7], [8], [9] では、DUA (Dynamic User Assignment) アルゴリズムが提案されている。この方式は信号のサイクルと車両の密度に基づき、道路の通過所要時間を見積もり、自動的に通りやすい道路に車両を案内する。すでに渋滞になった個所があれば、DUA は選択可能な経路から、最も所要時間の短い経路を運転者に提示する。ほぼ運転者の最適な判断と見なすことができ、運転者の上限と考えられる。しかし、DUA は未来の渋滞個所の予測や、それをあらかじめ軽減するような走行案内ができない。

文献 [10], [11] では、複数センサノード間の通信を用いた最短時間経路を計算する UTOSPF (Urban Traffic Open Shortest Path First) 経路案内方式が提案されている。道路に設置した複数センサノードが道路の通過所要時間を見積もり、交差点のセンサノード間で交通情報を共有することで、各ノードから他のノードまでの最短時間経路を計算できる。しかし、道路に複数センサを設置し、センサ間で通信できる必要があるなど、維持コストが高くなる。

1996 年、道路交通情報通信システム (VICS) は動的経路誘導を含むドライバ情報サービスを開始した [12]。日本では、カーナビゲーションはすでに一大産業として成功し、全国に高い密度で設置された VICS システムと連動することで、精度の高いナビゲーションサービスを提供して

いる。欧米では、専用のカーナビゲーション機器は遅れているが、PC やスマートフォンを媒体としたカーナビゲーションサービスが急速に発展している。Google Map のトラフィック表示機能はその代表格である。

2.2 交通信号制御 (TSC, Traffic Signal Control)

交通信号制御 (TSC, Traffic Signal Control) [3] は、交通信号制御によって都市交通を最適化する手法である。この手法では、車両グループ (車群) の到来タイミングを推測し、車群を停止させずに交差点を通過させる。複数の連続する交差点を同期させて信号サイクルを調整することが一般的である。

文献 [13] では交差点付近にセンサを配置し、信号待ちしている車両を検出したうえで、交通信号を制御する手法を提案している。この手法は青信号時間が延長可能と仮定しており、車群のサイズをセンサによって検出し、そのサイズに応じて青信号の長さを増減させる。しかし、センサの設置維持コストがかかるだけでなく、信号サイクル比率を変更すると、交差点を中心とした付近エリアの全道路セグメントの交通容量が変化し、かえって渋滞を引き起こす可能性がある。また、歩行者の待ち時間も増加する。

文献 [14] では複数交差点信号制御のためのルールに基づいたマルチエージェントによる手法を提案している。各交差点にエージェントが配置され、近隣エージェントの情報を収集し、周辺道路の交通状況を検知することで、交通渋滞が発生しにくいように信号を制御する。しかし、コストの問題に加えて、交通情報がリアルタイムに変動する中で交通信号を連続的に変更する必要があるため、適切な信号制御は非常に困難である。実現面で問題が多い。

文献 [15] ではファジィ最適化アルゴリズムに基づいた信号制御手法を提案している。交差点の過去の交通データを分析し、信号タイミングを調整する。しかし、大規模な道路網における不均衡なトラフィックフロー問題を解決できず、多数の交差点信号機を協調制御することは困難である。

文献 [16] では、車車間通信を利用した信号制御システムを提案している。この手法では、各信号機に無線通信機が設置されていると仮定し、車両は車載無線通信機を利用して自身の情報を信号機に送信する。信号機はリアルタイムで得た車両の位置と速度情報に基づき、最適な青信号と赤信号の時間を計算する。右左折車両も考慮して待ち時間を短縮させ、燃費効率を向上させる。しかし、この手法は車載無線通信機の高い普及率を想定しており、普及率が低い場合にはあまり効果が見込めない。

文献 [17] では、各道路セグメントを走行する車両にスムーズに通過できる推薦速度を提供する GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory) システムが提案されている。このシステムでは、V2I (vehicle-to-infrastructure) 技術を利用し、交通信号機のサイクルやタイミングなどの

情報を収集する。文献 [18], [19] では、車両密度が低い場合と大規模交通網について GLORA システムの実験をした。結果として、停止時間と燃料消費を削減できた。しかし、このシステムは車両密度が高い場合に適用できず、システムの搭載率が低い場合に効果が薄い。

3. GreenWave

GreenWave [20], [21] はある方向の道路上に位置する複数交通信号機を協調制御し、一定速度で走行する車両グループが連続する交差点を無停止で通過することを目指す技術である。図 1 のように GreenWave が適用された道路を **GreenWave 道路** と呼ぶ。双方向の走行のバランスを配慮する旧来の交通信号制御手法と異なり、GreenWave はあえて道路における双方向の公平性を無視し、片方向を優先方向とする。この方向を走行する車両は一定速度で走行する場合、赤信号に遭遇しにくい。一方、逆方向を走行する車両は制御を行わない場合と同程度以上の頻度で赤信号に遭遇する可能性がある。優先方向を設けることにより、優先方向を走行する車両は高速道路を走るように飛躍的に速くなり、走行効率が大幅に向上する。また、その結果、トータルの交通容量は通常より大きくなる。具体的な信号制御方式を以下に示す。

3.1 信号制御方式

GreenWave は道路の信号を集中的に制御する。すべての交差点信号が直線上に並んでいることを仮定する。GreenWave 道路の信号サイクルは、始点信号のサイクルに依存して決定される。図 2 は信号制御の一例である。

下記のとおり信号機のサイクルを設定する。GreenWave 道路優先方向の最初の信号 S_1 の 1 回の青信号期間に通過させたい車群のサイズ (車両台数) を E 、車両が交差点を通過する時間を T_p 秒とすると、 S_1 の青信号時間 G は最短 $T_p E + \alpha$ 秒必要である (式 (1) 参照)。ただし、 α は 0

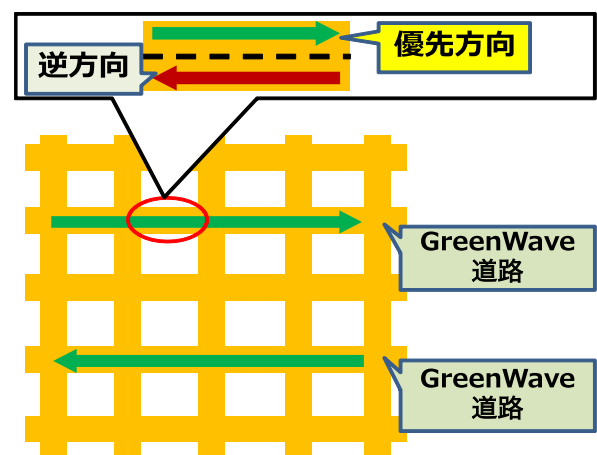


図 1 GreenWave
Fig. 1 GreenWave.

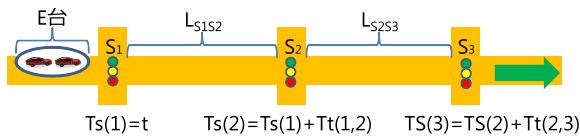


図 2 GreenWave の協調信号制御方式

Fig. 2 Collaborative control of traffic signals in GreenWave.

表 1 信号制御のパラメータ

Table 1 Parameters for collaborative control.

パラメータ	単位	意味
G	s	1 回信号サイクルの青信号時間
T_p	s	1 台車両が交差点を通過する時間
E		1 回の青信号期間に通過させたい車両台数
$T_s(r)$	s	優先方向に沿う番号 r の信号機の青信号が始まる時刻
$T_t(r, r+1)$	s	車両が番号 r と $r+1$ 信号機間の道路セグメントを通過する時間
V	km/h	走行速度
α, β		時間の誤差を吸収させる係数

以上の定数とし、車両の加速度に費やす時間の誤差などを吸収させる。 S_1 の青信号が始まる時刻を t とし、 G 秒後、 S_1 は黄信号に変わると同時に、車群の全車両がちょうど通過し終わる。最初の信号機 S_1 の信号サイクルを設定した後、次の信号 S_2 のサイクルを同じになるように設定する。

$$G = T_p \cdot E + \alpha \quad (1)$$

次に、GreenWave 道路に設置した各信号機の青信号が始まる時刻 $T_s(r)$ を調整する (式 (2) 参照)。GreenWave 道路優先方向に沿う信号数を r とする。信号 S_1 から次の信号 S_2 までの道路セグメントの長さを $L_{S_1 S_2}$ とし、車群は法定速度 V で走行する場合、このセグメントを通過するのに必要な時間は $L_{S_1 S_2}/V + \beta$ 秒である (式 (3) 参照)。すなわち、信号 S_2 を $t + L_{S_1 S_2}/v + \beta$ より先に青に切り替えれば、 S_1 から来た車群は停止することなく交差点を通過できる。

GreenWave 道路に進入・離脱する車両により、車群のサイズは変動するが、信号に止められた車両は、次の車群の先頭となるため、一般的に 1 回だけ信号を待てば、車群内の位置がリセットされ、次回から長く無停止で走行可能となる。

$$T_s(r) = \begin{cases} t & r = 1 \\ T_s(r-1) + T_t(r-1, r) & r > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_t(r, r+1) = L_{S_r S_{r+1}}/V + \beta \quad (3)$$

3.2 問題点

- GreenWave は片方向であるため、図 3 のように優先方向の逆方向の車線は悪影響を受け、渋滞が発生しやすくなる。2014 年 4 月中国南京での実験的運用において、4km にわたって信号機が 10 個ある幹線道路で

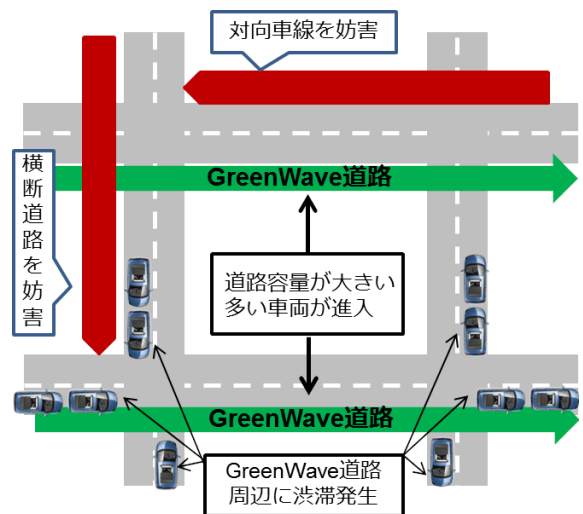


図 3 GreenWave の問題点

Fig. 3 Problems of GreenWave.

GreenWave が設置された。優先方向では走行 4 分、停止 1 回に対し、逆方向は走行 9 分、停止 6 回という結果が観測された。

- 交差する道路の通行妨害になる。横方向の道路に GreenWave を生成すれば、縦方向の道路には同時に GreenWave を生成できず、縦方向の車両はスムーズに走行できない。
- GreenWave 道路は信号制御により、道路容量は一般道路の数倍に拡大されるが、一般道路と接続する入口・出口がボトルネックになり、GreenWave 道路周辺に渋滞が起き、やがて GreenWave 道路に渋滞が起きる。

GreenWave は多くの国で実験運用されてきた。コペンハーゲン、アムステルダム、サンフランシスコに自転車の GreenWave 道路が実現されており、自転車は約 15～18 km/h の速度で赤信号で停止せずに走行できる。コペンハーゲンでは、緊急車両専用の GreenWave 道路が一部で実現されている。中国の北京と広州の幹線道路において実験的に運用している。しかし、イギリス運輸省は 2009 年に、GreenWave はかえって都市交通に不利益を与える可能性があると警告した [23]。

4. 提案手法

本研究では信号制御方式 GreenSwirl および経路案内方式 GreenDrive を提案する。

単発の GreenWave 道路にとまなう問題点を改善するために、GreenSwirl は、図 4 のように複数の GreenWave 道路を生成し、渦巻き状に配置する。これをまず簡単な予備実験で車両の走行をシミュレートしてみた結果、図 5 の地図において、外周の道路では車両平均速度が速く、周辺の渋滞など GreenWave の問題が起きなかったが、内部の小回り道路では平均速度が遅く、渋滞が発生しやすいという現象を確認した。この問題を解決するには、交通量を適切

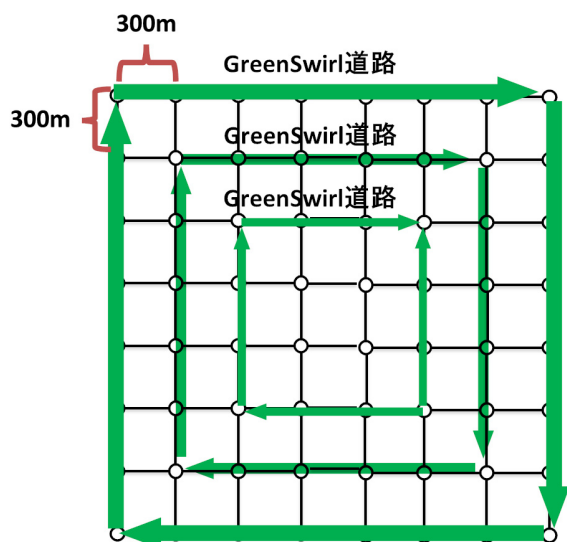


図 4 予備実験で用いた地図
Fig. 4 The map used in preliminary experiment.

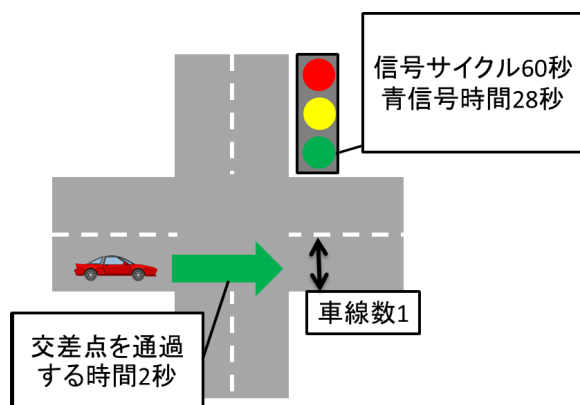


図 5 道路セグメントの例
Fig. 5 A image of road segments and intersection.

に走りやすい外周道路に振り分けながら、個々の車両の走行時間を最小化する経路案内手法が必要である。

4.1 前提条件と諸仮定

まず、本論文で使用する用語の定義、提案手法を適用するための必要設備や条件などについて述べる。

用語定義

渋滞：警視庁交通部交通量統計表により、一般道路では走行速度が 20 km/h 以下になった状態を渋滞と認める。本論文はこの規定を渋滞の定義に用いる。

道路セグメント：信号機または交差点によって区切られた道路区間である。

道路セグメントの交通容量：各道路セグメントで単位時間内に通過できる車の台数である。図 5 の片方向 1 車線の道路では、信号サイクル 60 秒のうち、青 28 秒、黄 4 秒、赤 28 秒の場合、車 1 台が交差点を通過するのに 2 秒かかるのであれば、交通容量は 14 台/分となる。道路セグメントの交通容量 = 車線数・青信号期間/通過所要時間（通過所

要時間は車両速度に基づく定数）である。車線数も定数のため、実質道路容量は信号サイクルだけに左右される。より大きい交通量が発生しない限り、理論上渋滞は発生しないが、停車中の車両の加速時間や、路肩駐車による車線数減少・車両速度低下などにより、実際の交通容量はもっと低くなる。

優先方向：図 4 のように道路のある方向を優先方向とし、一定速度で走行する車両は赤信号に遭遇せずに交差点を通過できるようにする。

GreenWave 道路：GreenWave 信号制御方式で設定された道路である。

GreenSwirl 道路：提案手法である GreenSwirl の信号制御方式で設定された渦巻き状道路である。

必要設備に対する仮定

カーナビゲーションシステムの装備：提案手法により経路案内を受けるために、カーナビゲーションシステムおよび通信機能が必要である。ただし、この仮定は必ずしも全車両を対象とせず、一部の車両がシステムを装備しているとする。

交通信号制御可能：中央交通管理サーバより信号サイクルの制御が可能とする。

トラフィック検知可能：VICS センサなどにより、道路通行中の車両の速度が検知可能とする。ただし、全道路ではなく、一部の道路のみ検知可能とする。

4.2 提案手法：GreenSwirl と GreenDrive

提案手法は信号制御部と経路案内部からなる。

GreenSwirl は複数の GreenWave 道路を渦巻き状に発生させ、それぞれのスタート地点と終着地点を連結し、巨大な循環道路を配置する。この循環道路を **GreenSwirl 道路** と呼ぶ。GreenSwirl 道路に進入した車両は、渋滞がなければ GreenSwirl 道路を出るまでほぼ無停止で法定速度で走行できる。GreenSwirl 道路を出る際、目的地に近い場所で降りることで、走行時間の短縮を実現する。大小異なる複数の GreenSwirl 道路を生成し、車両が適切に優先道路を切り替えることにより、大部分の道のりで GreenSwirl 道路を利用することが可能である（図 6）。

GreenDrive は交通量の過度な集中による渋滞を避け、交通量を分散させながら、車両を適切に GreenSwirl 道路を走行させるための経路案内機能である。経路の走行時間を見積もり、シミュレーションにより未来の渋滞を予測し、あらかじめ渋滞を軽減するように車両案内を行う。

4.2.1 信号制御方式 GreenSwirl

GreenSwirl 道路を配置する方針は、交通量の大きい区域どうしをつなぐ幹線道路の信号を制御し、大多数の車両の流れる方向に有利な信号となるようにすることである。

(1) **GreenSwirl 道路の配置**：都市や道路の形状、トラフィック特性に対応して異なる形の GreenSwirl 道路

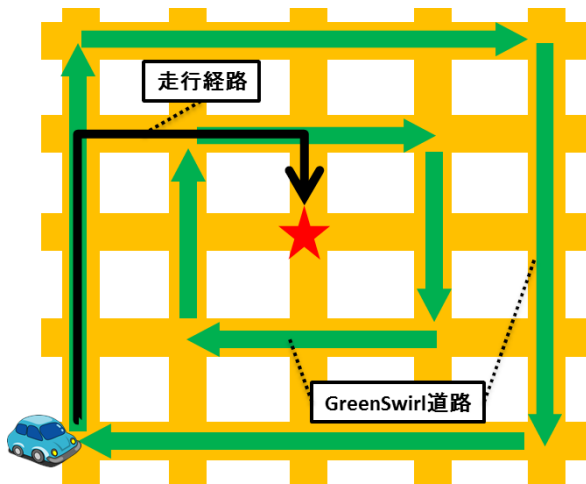


図 6 GreenSwirl のイメージ
Fig. 6 A image of GreenSwirl.



図 7 マンハッタン地図に配置された GreenSwirl
Fig. 7 GreenSwirl in Manhattan road map.

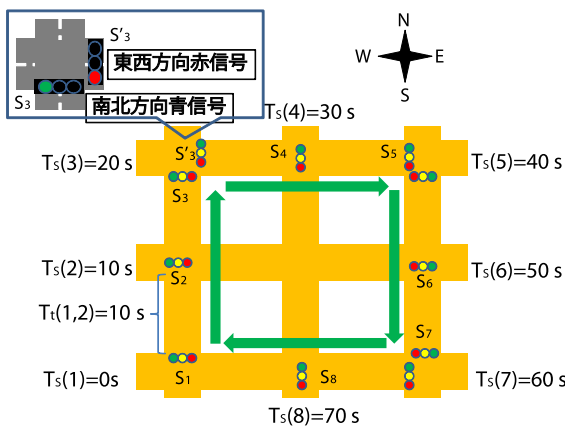


図 8 GreenSwirl の協調信号制御方式
Fig. 8 Collaborative control of traffic signals in GreenSwirl.

を配置する必要がある。たとえば、ニューヨーク市マンハッタン島は中心に公園があり、一方通行の道路が多く、車両が直行する幹線道路に集中するという特徴があり、中央の公園付近を速く通過し、幹線道路の交通量を分散するために図 7 のように GreenSwirl 道路を配置することは一案である。

- (2) 信号制御：各 GreenSwirl 道路では、優先方向の最初の信号（起点となる信号を適当に定める）をサイクルベースとし、次の信号をこれと協調するように設定する。図 8 は信号制御の例である。車両が各道路のセグメントを通過する時間を 10s とし、最初の信号 S_1 の

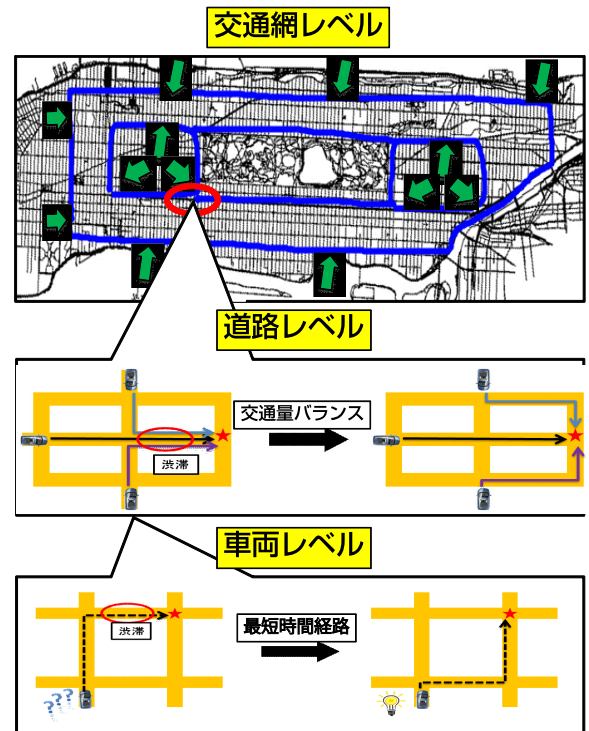


図 9 GreenDrive ナビゲーションのイメージ
Fig. 9 A image of GreenDrive navigation.

青信号が始まる時刻を 0s としている。右左折時、すなわち道路の乗り換え時の信号設定は重要である。たとえば、 S_3 の北行き青信号の時刻を 20s とする。車両は無停止で南北通行が可能であり、 S_3 で右折した車両も滞りなく右折していく。このとき、 S_3 交差点の東西方向の制御信号 S'_3 は当然赤信号を点灯している。GreenWave 方式の場合、東西方向の次の交差点、 S_4 は S'_3 と連動し、右折した車両を停止させることになる。しかし、GreenSwirl では、 S_4 は S'_3 ではなく、 S_3 と連動させるため、右折車両は S_4 を無停止で通過可能になる。ほかの右折信号も同様の方法で設定される。

4.2.2 経路案内方式 GreenDrive

車両に最短走行時間経路を案内しながら、交通量を分散させるために、経路案内手法を用いる。GreenDrive は経路を走行する時間を見積もり、車両の平均走行時間を最小化する経路案内を行うために、そこで、過去の交通データを利用し、右左折などの影響を考慮することで各道路を通過する見積り時間を算出する。GreenSwirl 道路に適切に案内することで、車両走行時間を短縮させて交通渋滞を緩和させる効果を達成する。経路案内は図 9 のように 3 つのレベルに分けられる。

- 交通網レベル：交通網は GreenSwirl 道路と普通道路を分けている。図 9 の道路網の濃い青の道路は GreenSwirl 道路である。GreenSwirl 道路走行見積り時間が普通道路より短いと、GreenSwirl 道路を優先的に案内することで、GreenSwirl 道路の利用率を上げ

る。中心部交通量の一部を外周に分散させ、中心部の負担を軽減させることで、都市中心の交通渋滞が軽減される。

- **道路レベル**：GreenSwirl 道路の交通容量が超過する場合も渋滞に陥ってしまうため、特定道路の交通量を分散させることが必要である。道路レベルで特定道路の交通量と渋滞程度を分析し、道路走行見積り時間を調整することで、GreenSwirl 道路の利用度を最適に調整する。
- **車両レベル**：目的地までの複数経路の中で最短走行時間の経路を見つける。車両レベルで、交通データを利用し、右左折などの影響を考慮することで各道路走行見積り時間を設定する。設定した道路走行見積り時間に従って、各車両に最短時間経路を案内することで、車両の走行時間を最小化する。

GreenDrive と DUA 方式との相違点

GreenDrive と DUA 方式は以下の点において異なる。

- DUA は各車両用の経路リストを用意し、通過所要時間の短い上位数本の経路から、ある選択確率に基づき、案内経路を決定する。通過所要時間を計算する際、その時点の信号サイクルや車両の密度を用いる。
- GreenDrive は各車両の案内経路を決定するには似た機構を採用するが、通過所要時間を計算する際、信号サイクルや車両の密度のほか、右左折の数、交差点を通過するための時間も考慮する。さらに、仮決定した結果に対し、走行シミュレーションを行い、渋滞が発生するかを観測する。繰り返した回数の中から最も軽い渋滞をもたらす案内結果を正式に採用する。

GreenDrive アルゴリズム

従来の動的経路案内手法 [8] は交通情報を収集した後に交通網の全道路走行見積り時間を調整する。車両の経路は変動が大きいので、車両走行時間は大きく変動する。また、一部の道路に渋滞があるため、渋滞の道路に対し、見積り時間を少しずつ調整し、最適な見積り時間を求める必要がある。そこで、過去の交通データを利用し、道路走行見積り時間を繰り返し調整することで、最適な道路走行見積り時間を見つける。各車両に最短時間経路を案内する GreenDrive アルゴリズムを以下に示す。

このアルゴリズムの入力は各車両の出発点と目的点 (P)、道路集合 (S)、各道路セグメントの走行見積り時間の初期値 (E_0) である。 E_0 は道路の長さや法定速度に基づいて算出される。アルゴリズムの出力は、全車両の平均走行時間が最短の経路 R_{BEST} である。以下、Algorithm 1 の各部について説明する。

L8：各車両に提示する推薦走行経路を算出する。関数 $k_ShortestPathRoute(P, S, E)$ は、 k -最短時間経路探索アルゴリズムにより、各車両の走行ルートを算出し、走行経路を出力する。

Algorithm 1 GreenDrive Algorithm

```

1: Input  $P$ : Departure places and destinations for all vehicles
2: Input  $S = \{s_0, \dots, s_k\}$ : Set of all road segments
3: Input  $E_0 = \{e_{0,s_0}, \dots, e_{0,s_k}\}$ : Set of initial estimated
   travel time for all road segments
4: Parameter  $N$ : Number of iteration
5: Parameter  $z$ : Number of road segments to update
6: Parameter  $\gamma$ : Smoothing factor
7:
8:  $R = R_{BEST} = k\_ShortestTimeRoute(P, S, E_0)$ ;
9: //  $R$ : Travel routes for all vehicles
10: //  $R_{BEST}$ : The best routes for all vehicles so far
11: for  $n = 1 \rightarrow N$  do
12:    $M = SUMO\_Simulate(R, S)$ ;
13:   //  $M = \{m_{s_0}, \dots, m_{s_k}\}$ : Observed travel time for all
   road segments
14:   for each  $s \in S$  do
15:     if  $s \in$  the top  $z$  congested road segments in  $M$  then
16:        $e_{n,s} = \gamma e_{n-1,s} + (1 - \gamma)m_s$ ;
17:     else
18:        $e_{n,s} = e_{n-1,s}$ ;
19:     end if
20:   end for
21:    $E_n = \{e_{n,s_0}, \dots, e_{n,s_k}\}$ ;
22:    $R = k\_ShortestTimeRoute(P, S, E_n)$ ;
23:   if total travel time for  $R$  is shorter than  $R_{BEST}$  then
24:      $R_{BEST} = R$ ;
25:   end if
26: end for
27: return  $R_{BEST}$ ;

```

L11–L26：探索を N 回繰り返す。

L12：道路集合 S と k -最短時間経路探索アルゴリズムにより算出した走行経路 R を入力として都市交通流シミュレータ SUMO を用いてトラフィックのシミュレーションを行い、観測された道路通過所要時間を M に代入する。

L14–L20：シミュレーション結果に基づき、最も渋滞している z 本の道路セグメントを選択し、走行見積り時間 $e_{n,s}$ を実測値を加味して更新する。しかし、見積りの平均走行時間に振動が発生し、収束しにくくなる。そこで、指数平滑移動平均線 EMA (Exponential Moving Average) に基づき、式 (4) のように行う。車両密度が低い場合、平滑化係数である γ の値を 0.99 に設定すると、収束が早くなる。車両密度が高くなるにつれ、 γ の値を 1 に近づける必要がある。早く収束させるには、 γ を試行錯誤で探す必要がある。本研究の実験では、車両台数 10,000, 15,000, 20,000 台のとき、それぞれの γ を 0.999, 0.9995, 0.9999 とし、繰り返す回数が 1,000 になるまでに収束した。

$$e_{n,s} = \gamma e_{n-1,s} + (1 - \gamma)m_s \quad (4)$$

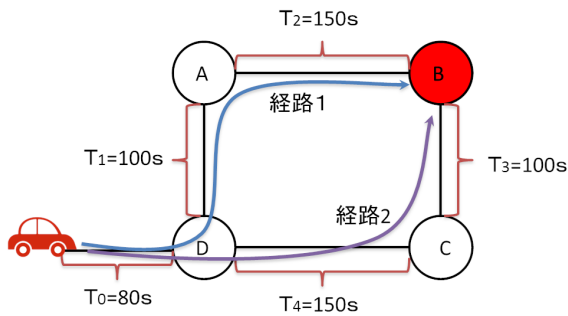


図 10 車両の複数ルート候補
Fig. 10 Route candidates for a car.

L21–L25：更新した見積り時間を基に k -最短時間経路探索アルゴリズムを用いて各車両の走行ルートを算出する。全車両の走行時間の合計を計算し、 R_{BEST} を更新する。

k -最短時間経路探索アルゴリズム

GreenDrive で経路走行時間を見積もる際、 k -最短時間経路探索アルゴリズムを用いる。多くの車両が同じ目的地へ向けて走行する場合に、特定の経路への集中を避け、交通量を分散させるために、最短時間経路の上位から k 本の経路を計算し、ランダムに 1 つ経路を選択し、車両に案内する。

例：図 10 において、 $k = 1$ 、 B 点を目的地として、交差点 A 、 C 、 D を含むマップで、各道路を通過する見積り時間を設定した。また、右左折によって交差点を通過する時間を、左折：20 秒、右折：10 秒、直行：0 秒とした。目的地までの 2 つの経路走行時間の計算を以下に示す。

経路 1： $D \rightarrow A \rightarrow B$

時間： $T_0 + T_D(\text{左折}) + T_1 + T_A(\text{右折}) + T_2 = 360 \text{ s}$

経路 2： $D \rightarrow C \rightarrow B$

時間： $T_0 + T_D(\text{直行}) + T_4 + T_C(\text{左折}) + T_3 = 350 \text{ s}$

この結果では経路 2 の走行時間が短いため、車両に経路 2 を案内する。

5. 実験評価

提案手法の性能を評価するために、交通流シミュレータ SUMO と現実の道路網データを用いて評価を行った。ニューヨーク市マンハッタン島の道路網で車両の走行時間短縮効果をシミュレーションにより計測し、提案手法と比較手法を分析した。その結果、提案手法は顕著に車両走行時間を短縮できたことを確認した。また、提案経路案内手法の搭載率が低くても、ある程度性能が発揮できることを確認した。以下、実験評価で用いたシミュレータ、実験設定、比較手法、実験結果について述べる。

5.1 実験環境

- シミュレータ：SUMO (Simulation of Urban MOBility) [9]。ドイツ開発チームにより開発されたオープンソース道路交通流シミュレータ。

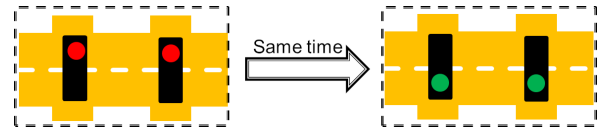


図 11 Synchronized 一斉変化制御手法
Fig. 11 Traffic signal control method: Synchronized.

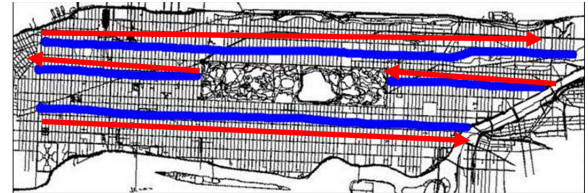


図 12 実験地図での GreenWave 道路配置
Fig. 12 GreenWave in simulation map.

- 実験地図：OpenStreetMap [24] のニューヨーク市マンハッタン島の道路網、対象エリアの幅は 4 km、長さは 20 km である。エリアの特徴として、幹線道路は双方向、2 車線であり、普通道路は一方通行で、1 車線である。
- 実験する車両台数：5,000 台、10,000 台、15,000 台、20,000 台
- 各車両の出発地と目的地はランダムに設定する。1 秒間に 30 台の車両が現れ、上限数に達するまで増え続ける。
- シミュレーション時間 (simulation step)：50,000 秒。
- 車両最大密度：33 台/km (20,000 台ケース)。
- 全道路の法定速度：60 km/h。
- 提案手法：GreenSwirl 道路の構築は図 7 における青色の道路である。外の GreenSwirl 道路は幹線道路ではなく、中の GreenSwirl 道路は幹線道路で構築した。提案経路案内手法では $k = 1, 3$ 、見積り時間を調整する道路数 $z = 25$ 、実験回数 $q = 1,000$ 。

5.2 比較手法

提案手法は GreenSwirl と GreenDrive からなる。そのため、比較対象手法として、信号制御手法と経路案内手法をそれぞれ用意した。

5.2.1 従来信号制御方式

- Synchronized**：シミュレータ SUMO にあらかじめ実装された信号制御手法であり、全部の信号はいつせいに变化する。すなわち、図 11 のようにある道路がいつせいに全部青になり、直行する道路はいつせいに全部赤になる。
- GreenWave**：交通容量が高い幹線道路のみに GreenWave を設定する。本論文では GreenWave 道路は図 12 の青色道路である。GreenWave 道路は信号が連動し、その他の道路は Synchronized 方式である。

5.2.2 比較手法一覧

- **Shortest Path** 方式は Dijkstra 法を用いて出発地から目的地までの最短距離経路を案内する。渋滞回避をせず、最短経路だけを出力する簡易カーナビのような経路案内方式である。ほぼ運転者の走行効果の下限と考えられる。
- **DUA** 方式は渋滞情報を利用し、通過所要時間の短い経路を案内する。ほぼ運転者の走行効果の上限と考えられる。
- **GreenDrive** 方式は未来の渋滞状況を見積もり、渋滞を最大限に軽減するうえ、各車両に通過所要時間の短い経路を案内する。ただし、100%の車両が本手法を搭載することは現実的ではないため、複数の搭載率を以下のように設定した。
 - 全車両搭載（搭載率 100%）の場合、全車両は GreenDrive を搭載し、その案内に従う。GreenDrive 性能の上限になる。
 - 部分車両搭載（搭載率 75%, 50%, 25%）の場合、搭載車両は提案手法で提示された経路に従うが、他の車両は最短距離経路を走行する。

5.3 実験結果と考察

5.3.1 k -最短時間経路探索アルゴリズムにおける実験結果

k -最短時間経路探索アルゴリズムを用いて、マンハッタン地図で分散案内の効果を調べた。本来、 k を大きくすると、選択肢となる経路候補数が増え、分散案内による渋滞軽減の効果が得られると思われるが、今回は異なる結果を観測した。

マンハッタン島の道路網は格子状となっており、主要道路がメインに利用される構造である。 k -最短時間経路探索アルゴリズムを適用すると、ほとんど同じ経路が選ばれ、始点と終点付近でわずかに分岐する結果となり、複数道路の走行時間を探索する意義を失った。

そこで、アルゴリズムに経路の相違率ファクタを設け、一定率以上に相違性のある経路を探索すると、主要道路を通る経路とほとんど通らない経路が選ばれ、最短走行時間の経路 2 番、3 番の経路は走行時間の差が大きく、選択肢として同列に扱うと、図 13 に示されたように、走行時間がかえて増大する結果が現れた。この結果をふまえ、以降の実験では $k = 1$ とした。

5.3.2 信号制御方式の性能比較結果

図 14 (a)~(c) のグラフは信号制御手法の走行時間短縮性能を示している。Synchronized, GreenWave, GreenSwirl の 3 種の信号制御方式で作成した地図において、それぞれ、Shortest Path, DUA, GreenDrive で経路を案内した。いずれの経路案内方式においても、GreenSwirl 道路の平均走行時間が最も短かった。

車両密度が大きい状況 (20,000 台) において、GreenSwirl

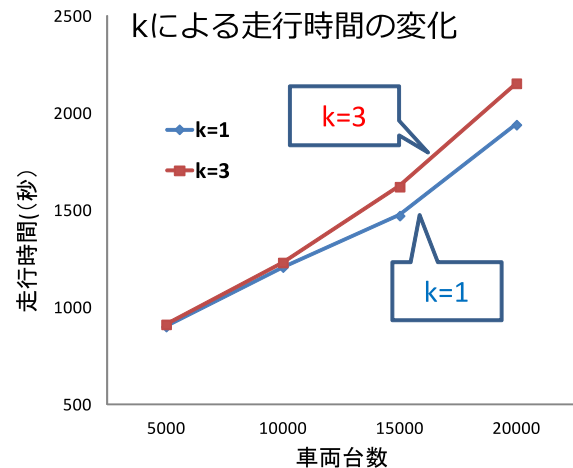
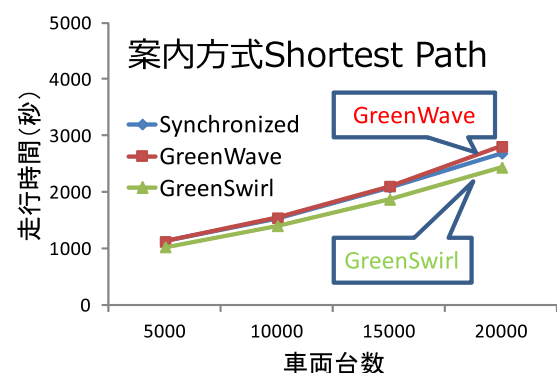
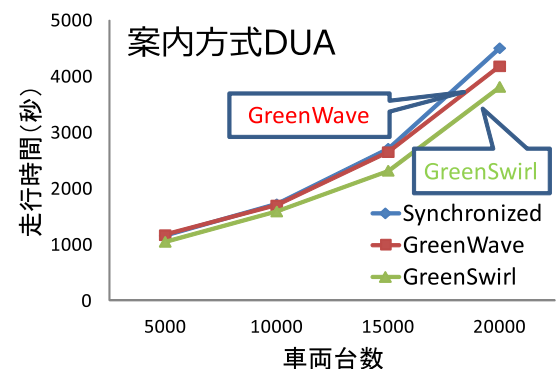


図 13 k による走行時間の変化

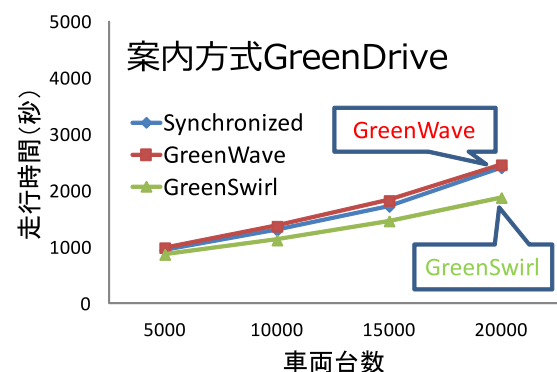
Fig. 13 Travel time comparison by k .



(a) Shortest Path 経路案内のとき



(b) DUA 経路案内のとき



(c) GreenDrive 経路案内のとき

図 14 特定経路案内方式のもと、信号制御方式の走行時間への影響

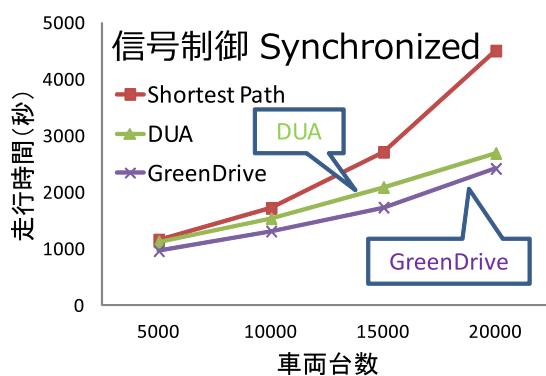
Fig. 14 Travel time comparison by signal control methods under specified route navigation.

道路を利用する場合、最も効果が出にくい Shortest Path 案内では、GreenWave より約 10%，最も効果が出やすい GreenDrive 案内では、GreenWave より約 25% 走行時間を短縮した。

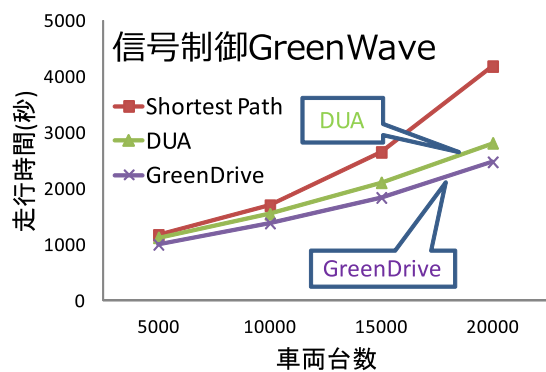
5.3.3 経路案内方式の性能比較結果

図 15 (a)~(c) のグラフは、経路案内手法の違いによる走行時間を比較している。いずれの場合でも、GreenDrive が最も良い結果を示した。

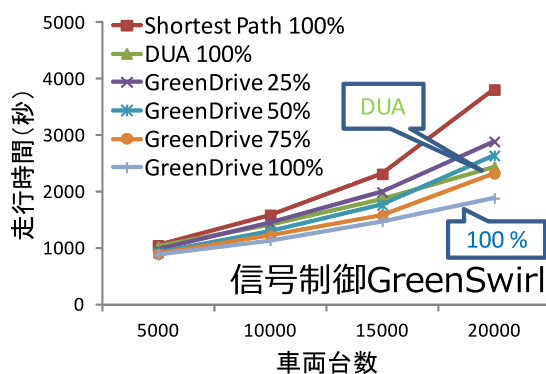
車両密度が大きい状況 (20,000 台) において、GreenDrive 経路案内方式を利用する場合、最も効果が出にくい Synchronized 信号では、DUA 案内より約 10%，最も効果が出やすい GreenSwirl 信号では、DUA 案内より最大約 29% 走行時間を短縮した。



(a) Synchronized 信号制御のとき



(b) GreenWave 信号制御のとき



(c) GreenSwirl 信号制御のとき

図 15 特定信号制御方式のもと、経路案内方式の走行時間への影響

Fig. 15 Travel time comparison by route navigations under specified signal control method.

特に、図 15 (c) では、GreenDrive の搭載率を変えた場合の結果も示している。DUA (100%) は約 GreenDrive (50%) とほぼ同じ性能を示したが、GreenDrive 搭載率 100% の場合、DUA よりも 29% 走行時間短縮効果が観測された。

5.3.4 交通情報が得られる道路の割合設定による結果

日本における道路センサ (VICS) の実際の設置率は約 30% と考えられる。また、日本においては一部の車両のカーナビに交通情報のフィードバック機能があり、Toyota, Nissan, Honda の 3 社はトータルで約 1% のデータフィードバックを受けている。このデータのフィードバック 1% をセンサ 30% に加味するシナリオも比較対象とする。Algorithm 1 における繰返し回数のパラメータを $p = 300$ とし、アルゴリズム実行終了時の平均走行時間を比較した。

図 16 は、GreenSwirl 道路における DUA と GreenDrive 案内法の走行時間の比較結果である。本実験では、道路のセンサ設置率を 30%, 70%, 100% とした。一方、DUA では、その手法を実現する必要上センサ設置率を 100% のみとする。

車両 5,000 台 (低密度) から 20,000 台 (高密度) まで増やし、すべてのケースにおいて、DUA より、GreenDrive の搭載率が高いほど走行時間が短くなることが観測された。

車両密度 15,000 台と 20,000 台のとき、興味深い結果が観測された。センサ搭載率 30% プラスフィードバック 1% の性能がセンサ搭載率 70% の性能を上回ったことが分かった。これは車両数の増加にともない、フィードバックする車両数も増え、フィードバックされた情報の量がセンサ 70% よりも多くなったと推測される。この結果から、フィードバック機能を有する車載機をわずかに普及させるだけで、大量の道路センサの情報収集効果に匹敵することが分かった。

5.3.5 走行距離と燃料消費の性能比較

シミュレータ SUMO に燃料消費計測機能 [25] が実装されており、これを利用して、提案手法の燃料消費を計測した。

図 17 (a), (b) は各車両の走行距離と燃料消費を示している。GreenDrive は、最短時間経路を案内することで長

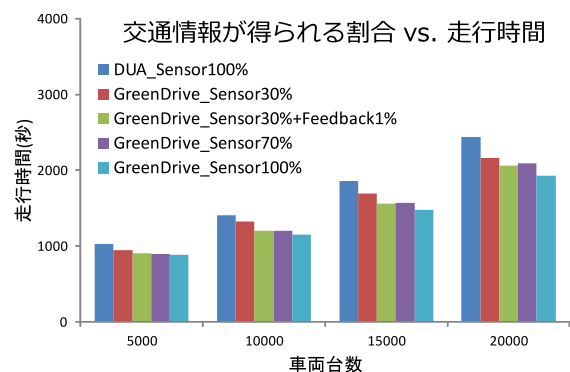


図 16 交通情報が得られる道路の割合設定による結果

Fig. 16 Travel time comparison based on receivable traffic information.

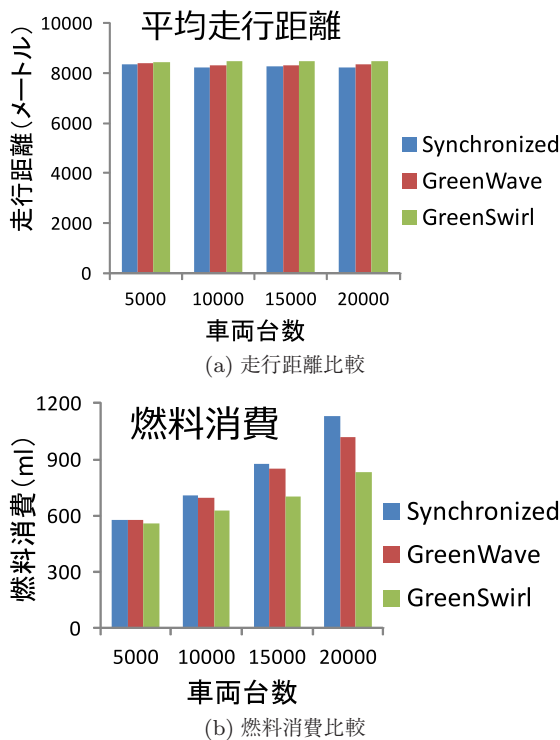


図 17 GreenDrive での走行距離と燃料消費

Fig. 17 Travel distance vs. fuel consumption by GreenDrive.

めの経路になり、そのため燃料消費の悪化が懸念される。そこで、各手法に関する燃料消費を比較した。

GreenDrive は大幅な走行時間を短縮させるが、迂回経路により走行距離が若干長くなった面はある。一方、図 17 (b) から、停車回数の減少により、燃料消費の効率が大幅に改善されていることが分かる。都市環境への寄与や個人の燃料節約にも提案手法は有効であると結論できる。

6. まとめ

本研究では、交通渋滞を緩和させ、車両走行時間を最小化させることを目的とした。GreenWave をベースに、交通信号制御方式 GreenSwirl および経路案内手法 GreenDrive を提案した。GreenSwirl は複数の GreenWave 道路を渦巻き状に発生させ、巨大な循環道路 (GreenSwirl 道路) を構築する。GreenSwirl 道路に進入した車両は、渋滞がなければほぼ無停止で走行できる。GreenSwirl 道路の最適な利用率を確保し、車両走行時間を短縮するために、経路案内機能も必要である。GreenDrive では各道路を通過する時間を見積もり、各車両に最短時間経路を案内する。

ニューヨーク市マンハッタン島の地図を基に交通流シミュレータ SUMO を用いて評価シミュレーションを行った結果、信号制御機能による交通トラフィック処理能力において、GreenSwirl は GreenWave と比べて、平均走行時間を約 10%~25% 短縮し、また、GreenDrive 経路案内機能を用いる場合、DUA より平均走行時間を約 10%~29% 短縮したことを確認した。

本研究では、道路を横断する歩行者の存在を考慮しなかったが、特に、GreenSwirl 道路で右折する際には歩行者の存在は無視できない。これは、歩車分離式信号を導入する、あるいは、過去の交通データから歩行者の横断時間の情報を加味することで解決可能であると考えられる。今後の課題として、異なる都市の地図を用いて GreenSwirl の効果を評価する。さらに、ここでは GreenSwirl 道路を人手で選定していたが、現実規模の都市では人手での設計は困難であり、また、最適な信号制御パターンを人手で生成することは不可能である。GreenSwirl 道路の自動設計は解決すべき重要な課題である。

参考文献

- [1] 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 (Jan. 2013).
- [2] En. JieJing. ORG: Beijing congested road PM 2.5 exceeded twice the number of vehicles to be controlled, available from (<http://en.jiejing.org/view-2411.html>) (accessed 2014-09-01).
- [3] Li, X., Zeng, F., Chen, G. and Ding, W.: Design of a multi-route optimal simulation system for urban traffic controls, *Computer Engineering & Science*, Vol.10, pp.126-130 (Oct. 2010).
- [4] Xu, J., Sun, W., Shibata, N. and Ito, M.: GreenSwirl: Combining Traffic Signal Control and Route Guidance for Reducing Traffic Congestion, *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference 2014 (IEEE VNC 2014)*, pp.179-186 (Dec. 2014).
- [5] Hershberger, J., Maxel, M. and Suri, S.: Finding the k shortest simple paths: A new algorithm and its implementation, *ACM Trans. Algorithms (TALG)*, Vol.3, Issue 4, pp.26-31 (2007).
- [6] Martins, E. and Pascoal, M.: A new implementation of yen's ranking loop less paths algorithm, *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, Vol.1, No.2, pp.121-133 (2003).
- [7] Behrisch, M., Krajzewicz, D., Wagner, P. and Wang, Y.-P.: Comparison of Methods for Increasing the Performance of a DUA Computation, *Proc. DTA2008 International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, No.EPFL-CONF-154987 (June 2008).
- [8] Krajzewicz, D., Behrisch, M. and Wang, Y.: Comparing performance and quality of traffic assignment techniques for microscopic road traffic simulations, *Proc. DTA2008 International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, No.EPFL-CONF-154987 (June 2008).
- [9] Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Rossell, C. and Wagner, P.: Sumo (simulation of urban mobility), *Proc. 4th Middle East Symposium on Simulation and Modeling*, pp.183-187 (2002).
- [10] Karim, F. and Mohammad, K.: UTOSPF: A distributed dynamic route guidance system based on Wireless Sensor Networks and Open Shortest Path First protocol, *IEEE International Symposium Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp.558-562 (Oct. 2008).
- [11] Karim, F. and Mohammad, K.: UTOSPF with Waiting Times for Green Light Consideration, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*

- (SMC), pp.4170–4174 (Oct. 2009).
- [12] Tsugawa, S., Aoki, M., Hosaka, A. and Seki, K.: A survey of present ivhs activities in Japan, *Control Engineering Practice*, Vol.5, pp.1591–1597 (Nov. 1997).
 - [13] Taale, H.: Comparing methods to optimise vehicle actuated signal control, *Road Transport Information and Control*, pp.114–119 (2002).
 - [14] Greenwood, D., Burdiliak, B., Trencansky, I., Armbruster, H. and Dannegger, C.: Greenwave distributed traffic intersection control, *Proc. 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Vol.2, pp.1413–1414 (2009).
 - [15] Nair, B. and Cai, J.: A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered, *Intelligent Vehicles Symposium*, pp.1229–1233 (June 2007).
 - [16] Gradinescu, V., Gorgorin, C., Diaconescu, R., Cristea, V. and Iftode, L.: Adaptive traffic lights using car-to-car communication, *Proc. IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC 2007 Spring)*, pp.21–25 (Apr. 2007).
 - [17] Konstantinos, K., Kernchen, R., Dianati, M. and Rieck, D.: Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform, *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp.918–923 (2011).
 - [18] David, E., Halmos, B. and Germanm, R.: Potentials and limitations of Green Light Optimal Speed Advisory systems, *IEEE Vehicular Networking Conference 2013 (IEEE VNC 2013)*, pp.103–110 (2013).
 - [19] Bodenheimer, R., Brauer, A., Eckhoff, D. and German, R.: Enabling GLOSA for Adaptive Traffic Lights, *IEEE Vehicular Networking Conference 2014 (IEEE VNC 2014)*, pp.171–186 (2014).
 - [20] Warberg, A., Larsen, J. and Jrgensen, R.: Green Wave Traffic Optimization – A Survey, *Informatics and Mathematical Modeling* (2008).
 - [21] Sasaki, M. and Nagatani, T.: Transition and saturation of traffic flow controlled by traffic lights, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol.325, Issues 3–4, pp.531–546 (2003).
 - [22] Ikeda, T., Kitagawa, E. and Morimatsu, E.: Environmental evaluation of non-stop driving assistance service by high-spatiotemporal resolution traffic simulator, *17th ITS World Congress* (2010).
 - [23] BBC News: Drivers catch green lights ‘wave’, available from http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/7998182.stm (accessed 2014-09-01).
 - [24] OpenStreetMap homepage, available from <http://www.openstreetmap.org/> (accessed 2014-09-01).
 - [25] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility, *Proc. International Journal on Advances in Systems and Measurements 2012*, Vol.5, No.3 (2012).

推薦文

車両の走行効率を考慮した新たな信号制御方式 Green-Swirl を提案している。複数の環状道路を渦巻き状に発生させるという発想は興味深いものであり、また、多くの国で注目されている実現可能性の高い信号制御方式 (GreenWave) における問題点を改善する手法を提案している。シミュ

レーションにより、平均走行時間の観点で比較を行い、提案手法が従来手法と比べて走行時間を短縮できていることを示している。以上より、本研究会からの推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 重野 寛)



徐 家興

2013 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程に入学。交通信号最適化や SUMO 交通流シミュレータに関する研究に従事。



川井 明 (正会員)

2003 年大阪大学基礎工学部卒業、2005 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了、2008 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2008 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2013 年大阪大学サイバー

メディアセンター特任助教。2014 年より滋賀大学経済学部准教授、現在に至る。博士 (情報科学)。モバイルアドホック、車車間通信に関する研究に従事。IEEE 会員。



柴田 直樹 (正会員)

1996 年大阪大学基礎工学部中退、1998 年基礎工学研究科博士前期課程修了、2001 年基礎工学研究科博士後期課程修了。2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2004 年 4 月滋賀大学経済学部情報管理学科准

教授。2012 年 9 月より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授、現在に至る。分散システム、ITS、並列アルゴリズム等の研究に従事。ACM, IEEE 各会員。



伊藤 実 (正会員)

1977 年大阪大学基礎工学部卒業, 1979 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1979 年大阪大学基礎工学部助手. 1986 年大阪大学基礎工学部講師. 1989 年大阪大学基礎工学部助教授. 1993 年より奈良先端科学技

術大学院大学情報科学研究科教授, 現在に至る. 工学博士. データベース理論, 効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事. ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員.