

# GreenSwirl 信号制御および経路案内方式の提案と性能評価

徐 家興<sup>1,a)</sup> 孫 為華<sup>2,b)</sup> 柴田 直樹<sup>1,c)</sup> 伊藤 実<sup>1,d)</sup>

**概要:** 近年、大都市で深刻な交通渋滞が社会的問題となっている。渋滞を引き起こす原因の一つとして非合理的な交通信号サイクルが考えられる。信号サイクルを改善する技術として GreenWave が中国の複数の都市で実験されてきたが、結果は満足できるものではなかった。GreenWave は一定速度で走行する車両は連続する交差点を常に青信号で通過させるが、対向車線と横断道路の妨害、入口と出口の渋滞などを引き起こす現象がある。この問題点を解決するために本稿では信号制御方式 GreenSwirl および経路案内方式 GreenDrive を提案する。都市規模の対象区域で複数の GreenWave 道路を渦巻き状に発生させ、GreenDrive 案内方式で道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。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 を用いて、ニューヨーク市マンハッタン島と北京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実験で計測し、平均走行時間が短縮できたことを確認した。

## 1. はじめに

近年、都市の人口および車の保有量の増加に伴って、大都市では深刻な交通渋滞と自動車排気ガスによる大気汚染が社会問題となっている。2012年中国北京に発生した PM2.5 大気汚染において、車の排気ガスが大きい原因であると指摘されている [1]。観測データでは、渋滞道路の PM2.5 濃度は一般の道路より数倍も高いことが分かった [2]。交通渋滞は道路交通のほか、環境保護の課題でもある。渋滞の起因は多様にあるが、一つは非合理的な交通信号サイクルと思われる。例えば、ある道路に車両がほとんどないのに青信号が長く、直交している道路の上で車両が長蛇の列になっていることがある。また、ある道路で赤信号を待っているとき、前方の交差点に無駄な青信号が点灯し、目の前の信号と入れ替えに赤になることは運転者なら誰もが経験したであろう。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、さらに運転者の感情に与える影響の違いは非常に大きい。

この問題を改善するために高度交通システムの最適化分野で多くの研究がなされている。大きく分けて (1) 動的経路案内 (DRG) と (2) 交通信号制御 (TSC) という二つの方針がある [3]。動的経路案内の代表的実用例として、

カーナビや VICS が挙げられる。最短距離経路を案内する方法がよく利用されているが、同じ経路に多くの車両が殺到する場合があります、却って交通渋滞を引き起こし、走行時間が延長するケースがある。一方、交通信号制御手法の中に、実用化されたのは GreenWave 法である。この手法では、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る。欧米中多くの都市において実験的運用が導入されている。しかし一方、多くの問題点も発見され、対向車線と直行道路への悪影響、幹線道路入口と出口に渋滞を引き起こしやすい現象などが挙げられる。

我々の研究グループでは、GreenWave 法の改善を目指し、車両走行効率の向上を目的とした信号制御方式 GreenSwirl および経路案内法 GreenDrive を提案している。対象地域の交通量特徴に基づき、車両流入の多い地区に向けて、複数の GreenWave 道路を渦巻き状に配置する。これを優先道路と呼び、進入した車両は理想状態においては出るまで無停止に一定速度で走行することが可能である。特定方向の車両が走行しやすくなる半面、交通量分布の歪みによる渋滞、その他の方面を走行する車両への悪影響を防止するために、運転者への経路案内手法 GreenDrive も提案する。特定の道路に車両が集中しないよう、事前を持って交通量負荷を分散させながら、各車両に目的地へ最も到着時間が短いと思われる経路を案内する。

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 と現実の道路網を用いたシミュレーション評価を行った。米国ニューヨーク市マンハッタン島および中国北京の道路網で車両の走行時間短縮効果を計測し、その結果、

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
NAIST, Ikoma, Nara 631-0194, Japan

<sup>2</sup> 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

GreenWave 信号制御法と比べて GreenSwirl 法が平均 10～20%程度，既存の経路案内手法と比べて GreenDrive 法が平均 10～70%程度，車両の走行時間を短縮させることに成功した。

## 2. 関連研究

交通最適化分野で多くの研究が交通渋滞を緩和させ，車両走行効率を向上することを目的としている。これらの研究は大きく分けて (1) 動的経路案内 (DRG) と (2) 交通信号制御 (TSC) がある。

### 2.1 動的経路案内

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，渋滞を軽減する。

文献 [4] は  $k$ -最短経路アルゴリズム [5] を用いて，複数の距離が短い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  $k$ -最短経路を計算する場合，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，現実において有用性がある問題がある。

文献 [6] では，経路間の交通量分散を目的とした，DUA (dynamic user assignment, 動的利用者最適配分) アルゴリズムが提案されている。文献 [7] では，DUA アルゴリズムは複数の動的な経路案内手法と比較し，格子状地図で車両走行時間が一番短いことを確認した。この手法では，ある選択確率に従って各車両に経路を案内し，各経路の走行時間を繰り返し調査することで交通量分散の効果を達成する。しかし，利用者の視点で最適化を行っていないため，長い走行時間を有する経路を強いられる利用者が発生するなど，利用者に受け入れられにくい。

文献 [8][9] では，最短走行時間を発見するアルゴリズムを提案している。各交差点の交通信号の青時間と赤時間を考慮し，車両が道路を通過する時間を見積もり，車両密度が低い場合に正確な最短走行時間を計算できる。しかし，この手法は道路の渋滞や車両の待ち時間を考えておらず，案内された経路に多くの車両が進入した場合，見積もりが破たんする。

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

交通信号制御 (TSC, Traffic Signal Control) [3] とは，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ことである。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である。

GreenWave 法 [10] 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 法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 手法はあえて道路における双方向の公平性を犠牲にし，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の頻度で赤信号に遭遇する可能性がある。

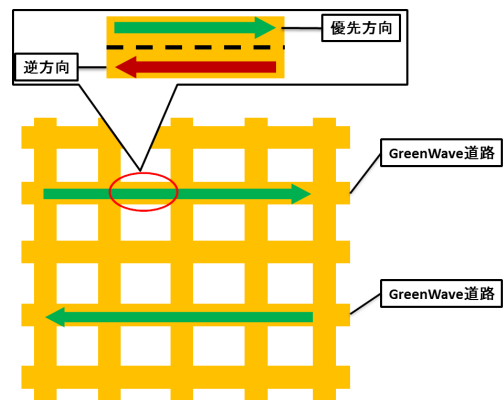


図 1 GreenWave

GreenWave 法は優先方向を設けることにより，道路の利用効率を向上させる。本来，双方向道路は一定の公平性を持ち，どちらの針路を走行しても所要時間は大きく異なることはない。逆に言えば，どちらの針路を走行しても大して速くない。GreenWave 法では，あえて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あたかも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。トータル交通容量は通常よりはるかに大きくなる。具体的な信号制御方式を以下に示す。

#### 信号制御方式

GreenWave 道路の信号を一意に制御することができる。信号制御手法では，すべての交差点信号は直進に並んでいる。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。

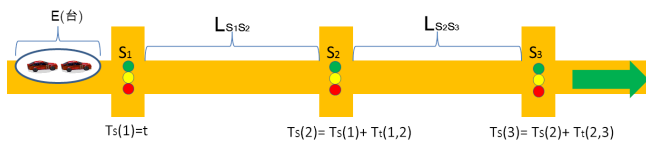


図 2 信号制御方式

下記の通りに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  $E$  とし、車両が交差点を全速で通過する時間を  $T_p$  秒とすると、式 (1) に示す  $S_1$  の青信号 (Green Period) 時刻  $G$  は最短  $T_p E + \alpha$  が必要である。ただし、 $\alpha$  は 0 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間を  $t$  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。

表 1 信号制御のパラメタ

パラメタ	単位	意味
$G$	s	一回信号サイクルの青信号時間
$T_p$	s	一台車両が交差点を通過する時間
$E$		一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
$\alpha, \beta$		時間の誤差を吸収させる係数

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

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

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

次は式 (2) に示す 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。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式 (3) に示す  $L_{S_1, S_2} / V + \beta$  秒である。すなわち、信号  $S_2$  が  $t + L_{S_1, S_2} / v + \beta$  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が可能となる。

**問題点** GreenWave は設計当初から問題点が一部予測され

ており、実験的運用を経て発見されたの問題点を含めて以下に挙げる。

- GreenWave は片方向であるため、図 1 のように優先方向と逆方向の車線は悪影響を受け、渋滞発生しやすくなる。2014 年 4 月中国南京での実験的運用において、4KM に渡って信号機 10 個ある幹線道路で GreenWave を設置された。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。

これら問題点の解消を目指し、我々のグループは信号制御方式 GreenSwirl と経路案内手法 GreenDrive を提案する。

### 3. 提案手法

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

単発の GreenWave 道路に伴う問題点を改善するために、GreenSwirl 方式は、図 3 のように複数の GreenWave 道路を生成し、渦巻き状に配置する方式である。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 3 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低く、渋滞発生しやすい現象を確認した。この問題を解決するには、交通量を適切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も必要である。

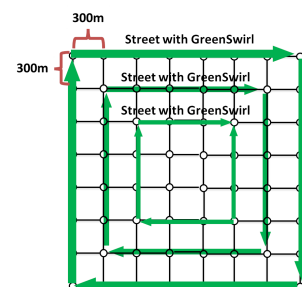


図 3 予備実験で用いた地図

#### 3.1 前提条件と諸仮定

まず、本稿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等について述べる。

### 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20km/h以下になった状態を渋滞と認める。本稿はこの規定を渋滞の定義に用いる。

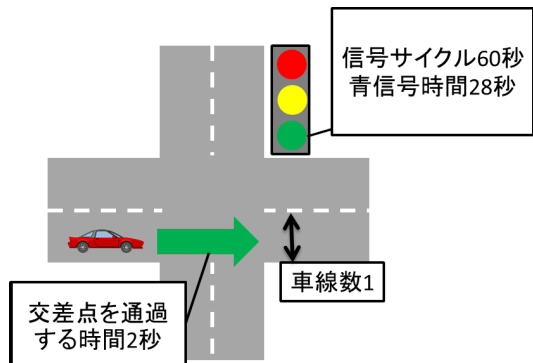


図4 道路セグメントの例

**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通過できる車の台数である。図4の片方向1車線の道路では、信号サイクルは60秒のうち、青28秒、黄4秒、赤28秒の場合、車一台が交差点を通過するには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3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利用可能と仮定する。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 センサーなどにより、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。

### 3.2 提案手法：GreenSwirl と GreenDrive

提案手法は信号制御部と経路案内内部から成る。

信号制御部 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（GreenSwirl 道路）を構築する。これに進入した車両は、渋滞がなければ出るまでほぼ無停止で法定速度で走行することが可能となる。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 道路を発生させ、車両が適切に優先道路を切り替えることにより、大部分の道なりに GreenSwirl 道路を利用することが可能である（図5）。

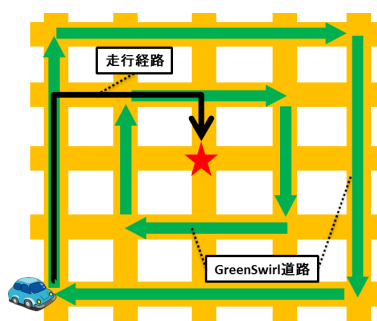


図5 GreenSwirl のイメージ

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に、経路案内機能も必要である。経路案内内部 GreenDrive では経路の走行時間を見積もり、それを最小化する経路を各車両に案内する。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の通過時間を見積もる。

#### 3.2.1 信号制御部 GreenSwirl

GreenSwirl 道路を構築する方針は、交通量の大きい区域同士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させることである。

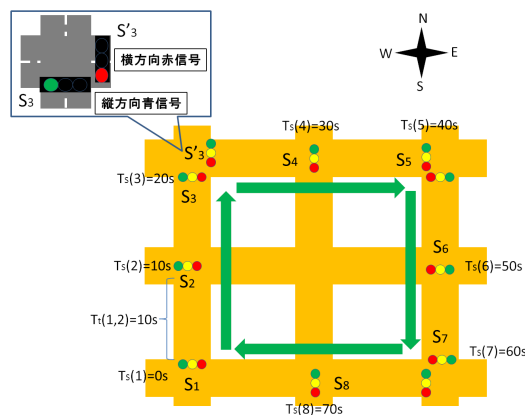


図6 GreenSwirl 道路の信号制御

各 GreenSwirl 道路では、優先方向の最初の信号から青信号時刻を設定し、次の信号をこれと協調するように設定する。図 6 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 方式では、 $S_4$  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な方法で設定される。

GreenSwirl 道路を選定する際、これまではマニュアルに行ってきた。都市の道路構造とトラフィックを観察し、適切と思われる幹線道路を手動にピックアップし、信号制御を行った。以下は設定した GreenSwirl 道路例である。



図 7 GreenSwirl 道路 (米国ニューヨークマンハッタン)

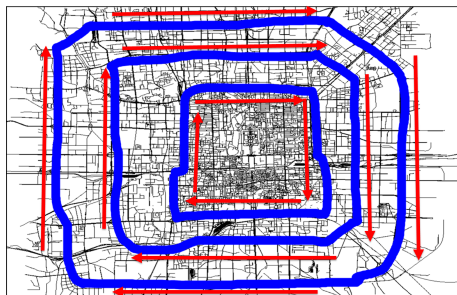


図 8 GreenSwirl 道路 (中国北京市)

### 3.2.2 経路案内部 GreenDrive

GreenDrive は各経路の走行時間を見積もり、車両が目的地まで最短走行時間を有する経路を案内する。過去の交通データを利用し、右左折、渋滞、GreenSwirl 道路配置など車両速度に影響する因子を考慮し、経路候補を走行する時間を見積もる。GreenSwirl 道路に過剰な車両を案内するとかえって渋滞を引き起こすため、必要に応じて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。GreenDrive は下図の通り、3つのレベルで経路走行時間を見積もる。

- 交通網レベル：GreenSwirl 道路と普通道路を区別し、

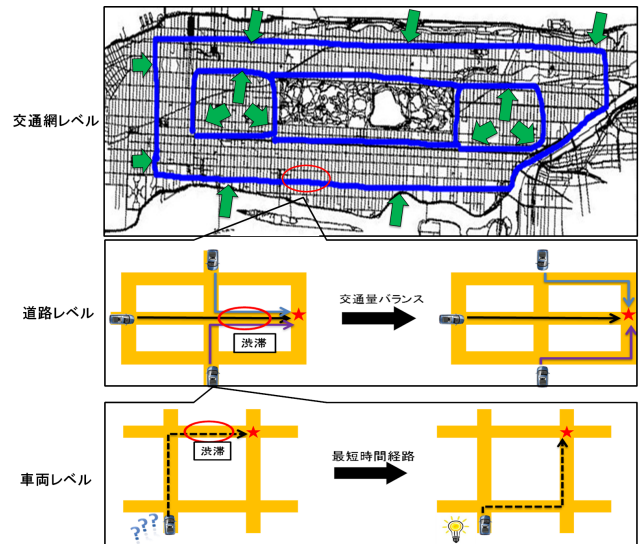


図 9 3つのレベルで見積もる GreenDrive 経路案内

青色道路は GreenSwirl 道路である。GreenSwirl 道路走行見積もり時間が普通道路より短いと仮定し、GreenSwirl 道路に優先的に車両を案内することで、まず GreenSwirl 道路の利用度を最大化させる。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することで、都市中心の交通渋滞を軽減させる。

- 道路レベル：GreenSwirl 道路の交通容量が超過すると渋滞に陥るため、特定道路の交通量を分散させる必要がある。道路レベルで特定道路の交通量と渋滞程度を分析し、道路走行見積もり時間を調整することで、必要に応じて GreenSwirl 道路の見積もり時間を増大させ、GreenSwirl 道路の利用度を微調整する。
- 車両レベル：車両レベルで、右左折の数や迂回経路などを考慮し、走行時間が最も短い複数の道路候補を設け、ランダムに車両へ割り当てることにより、特定道路に車両が殺到する問題を回避する。

#### 最短走行時間経路探索アルゴリズム

GreenDrive は、従来の動的経路案内手法 [7] 同様に、交通情報を収集・解析した後、交通網の道路走行見積もり時間を調整する。しかし、従来手法では全道路の見積もり時間を更新するため、車両の経路変動、走行時間の変動が大きく、振動現象が起きる場合が多い。GreenDrive では、全道路ではなく、少数の特に渋滞がひどい道路に対し、見積もり時間を少しずつ調整し、最適な見積もり時間を求める探索アルゴリズムを採用する。見積もり時間の探索アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 道路走行見積もり時間の初期値  $O_0$  を設定する。
- (2) 車両に最短時間経路を案内する。
- (3) 交通情報を収集する。
- (4) 収集した交通情報から道路の平均走行時間を算出し、渋滞の道路を渋滞の程度によって上位から  $z$  個を選択

する。渋滞道路の数が  $n$  より少ない場合は渋滞道路の数  $p$  を選択,  $p = 0$  の時に探索を完了する。

- (5) 選択した複数道路走行見積もり時間を式 (4) によって  $n$  回繰り返し, 計算した道路走行見積もり時間  $O_n$  調整する。他の道路走行見積もり時間は  $O_{n-1}$  と同じで設定する。
- (6) ステップ 2 に戻り,  $q$  回繰り返す。
- (7) 実験が終了した後に, 出力データを分析し, 車両走行時間が一番短い見積もり時間を最適な見積もり時間として出力する。

表 2 探索アルゴリズムのパラメータ

パラメータ	単位	意味
$z$		見積もり時間を更新する道路の数
$O_n$	$s$	第 $n+1$ 回実験で選択した $z$ 個道路走行見積もり時間
$p$		渋滞道路の数
$q$		実験回数
$Length$	$km$	道路の長さ
$V_{max}$	$km/h$	道路の最大速度
$\gamma$		見積もり時間の変更率
$M$	$s$	実験で測定した各道路の走行時間

ステップ 1 で道路走行見積もり時間の初期値を設定する手法は 2 つがある。1 つ目は各道路の道路長さ  $Length$  と法定速度  $V_{max}$  を割った値とする方法である。2 つ目では交通網レベルに GreenSwirl 道路と普通道路の最適な走行見積もり時間で設定する。(本実験は 1 つ目の手法を採用する)。

$$O_n = \begin{cases} Length/V_{max} & n = 0 \\ \gamma O_{n-1} + (1 - \gamma)M & n > 0 \end{cases} \quad (4)$$

#### 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, 経路の渋滞を避け, 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, ランダムで一つ経路を選択し, 車両に案内する。

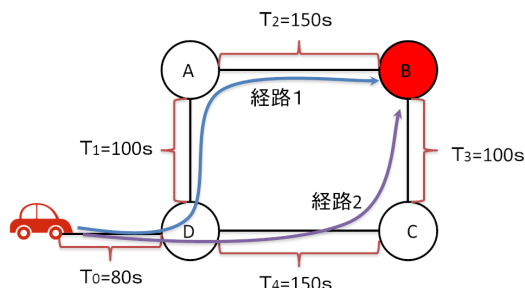


図 10 車両のルート

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もり時間を設定した。また, 右左折によって交差点を通過する時間左折: 20 秒, 右折: 10 秒, 直行: 0 秒のように設定した。目的地までの二つ経路走行時間の計算は以下に示す。

経路 1:  $D \rightarrow A \rightarrow B$

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

経路 2:  $D \rightarrow C \rightarrow B$

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

この結果では経路 2 の走行時間が一番短いため, 車両に経路 2 を案内する。

## 4. 評価実験と考察

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[11], [12], [13] と現実の道路網データを用いてシミュレーション評価を行った。米国ニューヨーク市マンハッタンと中国北京市の道路網を利用し, シミュレーションを通して複数の既存手法と比較した。まず, 簡単に既存手法を紹介する。

### 4.1 比較に用いた既存手法

信号制御と経路案内, それぞれ異なる手法を用いたため, 区分して紹介する。

#### 信号制御方式

**Synchronized**: シミュレータ SUMO に実装されている信号制御手法である。全信号は同時変化する。ある道路が一斉に青になり, 直交する道路は一斉に赤になる。

**GreenWave**: 交通容量が高い幹線道路のみに GreenWave を数本設定する。GreenWave 道路は信号が連動し, その他の道路は SUMO 信号方式である。

#### 経路案内方式

**Shortest Path**: Dijkstra 法を用いた出発地から目的地までの最短距離経路算出方法。

**DUA**: (Dynamic User Assignment) 方式は SUMO シミュレータのデフォルト経路案内方式である。交通量を分散させるために, DUA は各車両の経路リストを導入し, ある経路選択確率によって, 各車両に経路を案内する。車両の経路を計算する方法は道路走行見積もり時間のみを考える。

**GreenDrive 異なる普及率**: 現実世界では, ナビゲーションシステムの 100% の普及が不可能であるため, GreenDrive 手法において異なる搭載率を設定している。

- 搭載率 100%: 全車両は GreenDrive 手法を搭載し, その案内に忠実に従う。
- 搭載率 75%, 50%, 25%: 搭載車両のみが提案案内手法で提示された推薦経路を走行し, 他の車両は最短距離経路を走行する。

## 4.2 実験設定

- シミュレータ: SUMO(*Simulation of Urban MObility*), ドイツ開発チームにより開発された高機能道路交通シミュレータ.
- 地図ソース: 世界有名都市の地図無料で取得できる地図データベース OpenStreetMap[14].
- 地図1: 米国ニューヨーク市マンハッタン (図7), 南北4km, 東西20km, 一方通行の道路が多く, 実験車両台数: 5000/10000/15000/20000台. 道路数は約870本.
- 地図2: 中国北京市 (図8), 南北15km, 東西12km, 双方向道路が多く, 実験車両台数: 30000/50000台. 道路数は約1200本.
- 実験時間: 50000秒 (シミュレーションステップ).
- 最大速度: 60km/h.

また, 提案手法 GreenDrive で用いたパラメータとして, 見積もり時間を更新する道路数  $Z = 25$ , 繰り返し回数 1000 とした.

## 4.3 信号制御方式の性能比較

図11, 12は異なる信号制御方式による走行時間短縮の性能を表している. SUMO, GreenWave, GreenSwirlの3種の信号制御方式で作成したマップにおいて, それぞれ GreenDrive, DUA, ShortestPath で経路案内を行った結果, GreenSwirl 道路の平均走行時間が最も短かった.

GreenSwirl は複数の渦巻きを作ったため, 分散された交通量は複数の渦巻きに吸収され, どの方式においても渋滞が起きにくく, 最短走行時間を示した. SUMO 信号制御の場合, 車両がランダムに赤信号に遭遇するため, 渋滞が起きやすく, 以外, 走行時間が長くなりやすい. 一方, GreenWave 信号制御の場合, 交通量分散作用のある GreenDrive, DUA において, SUMO より短い走行時間を達成している. しかし, GreenWave 道路周辺は渋滞しやすく, また, 一方通行が多いマンハッタン地域では, 交通量分散のために迂回経路を通るように案内された車両は遠回りしたため, 結果的走行時間が長くなった.

また, 走行時間に注目すると, GreenDrive, DUA を用いた場合, どの信号制御方式の下での走行時間も交通量分散させない ShortestPath より短いことから, 交通量分散の重要性を示している.

## 4.4 経路案内方式の性能比較

図13, 14は経路案内手法の走行時間短縮性能を示している. ShortestPath, DUA それぞれ100%普及率の場合と, GreenDrive 各種普及率 (100%, 75%, 50%, 25%) を用いる時, 異なる信号制御道路での走行時間を比較する. その結果, GreenDrive が走行時間を短縮させる効果が最も大きいことが確認できた. GreenSwirl 信号制御方式の下で, DUA(100%) は GreenDrive (50%) の性能と拮抗し,

GreenDrive 方式の75%, 100%バージョンに及ばなかった. 両方の手法とも交通量分散を重要目的としているため, 平均走行時間が短いのはその影響を受けていると考えられる. ただし, DUA は100%の場合と GreenDrive50%が同等な結果を示したのは, DUA は各々の車の個別経路最適化していないことが原因だと考えられる.

## 4.5 走行距離と燃料消費の性能比較

図15, 16は各車両の走行距離と燃料消費を示している. GreenDrive 手法は最短時間経路を案内するために, 距離的に長めの経路になり, 余分な燃料消費が心配される. 各種手法を用いて, その走行距離を比較した.

GreenDrive は大幅な走行時間を短縮させる一方, 迂回経路により走行距離が若干長くなった面はある. しかし, 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この結果でわかる. 都市環境への寄与や個人の燃料節約にも提案手法は効力が発揮できる.

## 5. おわりに

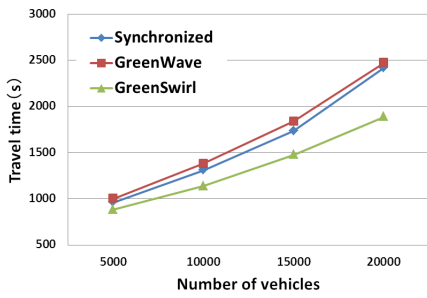
本稿では, 車両走行効率向上を目指した交通信号制御方式 GreenSwirl と案内手法 GreenDrive を提案した. マンハッタンと北京の地図で交通シミュレータ SUMO を用いて評価シミュレーションを行った結果, GreenWave 信号制御法と比べて GreenSwirl 法が平均10~20%程度, 既存の経路案内手法と比べて GreenDrive 法が平均10~70%程度, それぞれ短縮させることに成功した. さらに, 燃料の節約効果もシミュレーションで明らかに分かった.

今後, GreenSwirl の自動生成について取り組もうと考えている. 以下の手順で研究しようと考えている.

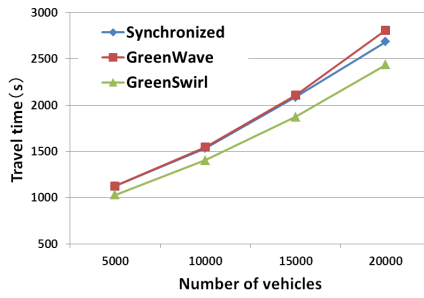
- (1) 実験対象のマップに対し, 最短時間経路を各車両に案内し, 走行させる.
- (2) 交通情報を収集し, 分析する.
- (3) 利用率 (または渋滞の程度) が高い複数道路を算出する.
- (4) 算出した道路を中心に GreenSwirl 道路を構築する.

## 参考文献

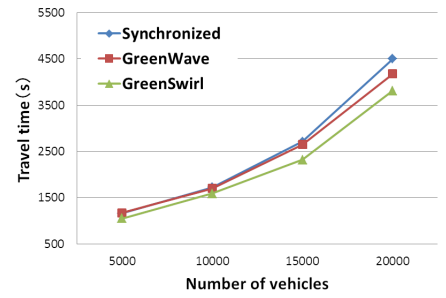
- [1] J.F. Wang, M.G. Hu, C.D. Xu, G. Christakos, and Y. Zhao, "Estimation of citywide air pollution in Beijing," PLoS ONE, vol.8, no.1, p.e53400, Jan. 2013
- [2] D.Q.W. Ru, "congested road vehicle pm2.5 exceeded twice." in Best News 2013 available from <http://www.best-news.us/news-5017251-Beijing-PM2.5-exceeded-two-times-congested-road-intends-to-regulate-the-number-of-vehicles.html>, accessed Oct 10, 2013.
- [3] X.d. LI, F.z. ZENG, G.y. CHEN, and W.x. DING, "Design of a multi-route optimal simulation system for urban traffic controls," Computer Engineering & Science, vol.10, pp.126-130, 2010.
- [4] J. Hershberger, M. Maxel, and S. Suri, "Finding the k



(a) GreenDrive

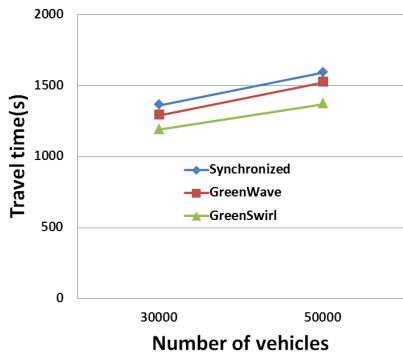


(b) DUA

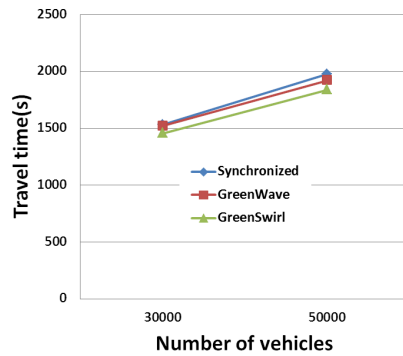


(c) Shortest Path

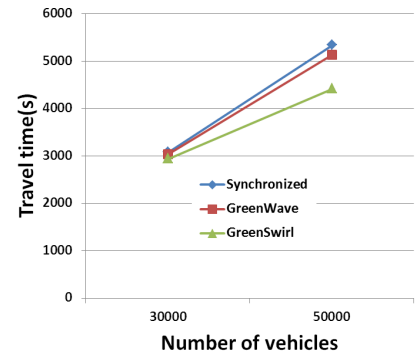
図 11 信号制御方式 Synchronized, GreenWave, GreenSwirl に対し, 異なる経路案内手法を用いた走行時間比較. 地図: Manhattan.



(a) GreenDrive

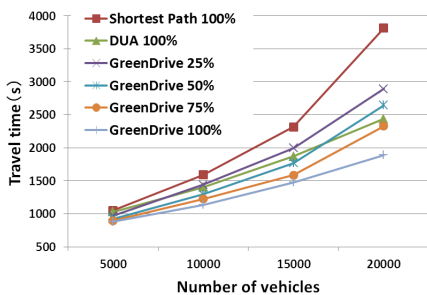


(b) DUA

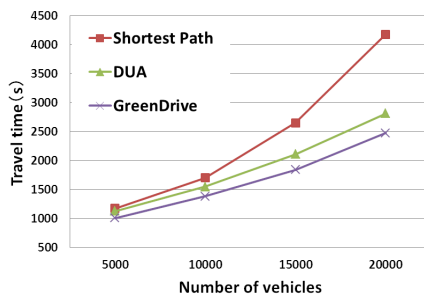


(c) Shortest Path

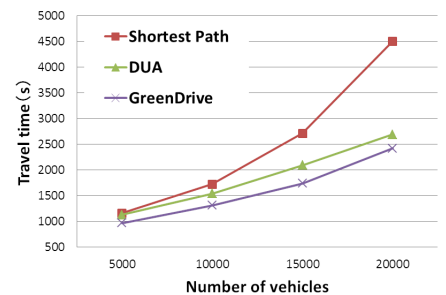
図 12 信号制御方式 Synchronized, GreenWave, GreenSwirl に対し, 異なる経路案内手法を用いた走行時間比較. 地図: Beijing.



(a) GreenSwirl(GreenDrive 普及率 100%, 75%, 50%, 25%)



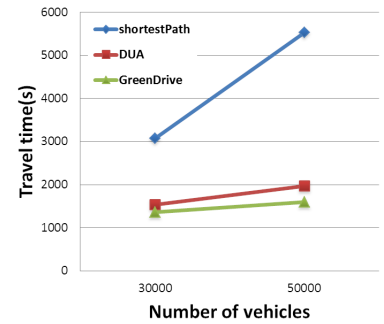
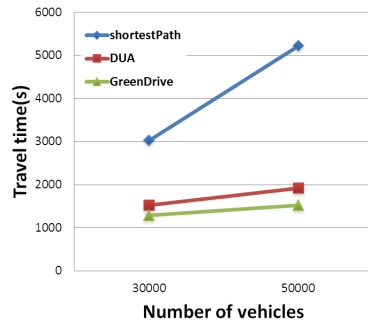
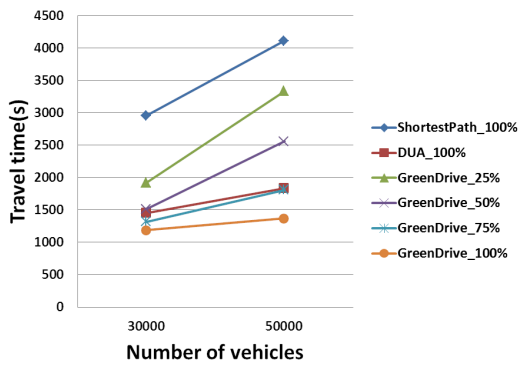
(b) GreenWave(各種手法 100%)



(c) Synchronized(各種手法 100%)

図 13 経路案内方式 ShortestPath, DUA, GreenDrive を用いた場合, 異なる信号制御道路を用いた走行時間比較. 地図: Manhattan.



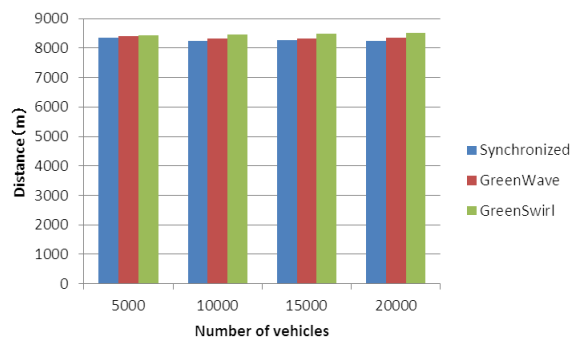
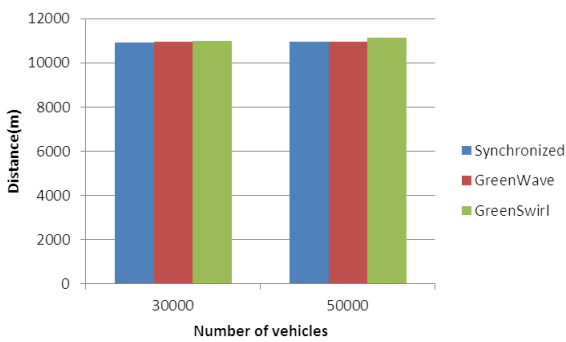


(a) GreenSwirl(GreenDrive 普及率 100%, 75%, 50%, 25%)

(b) GreenWave(各種手法 100%)

(c) Synchronized(各種手法 100%)

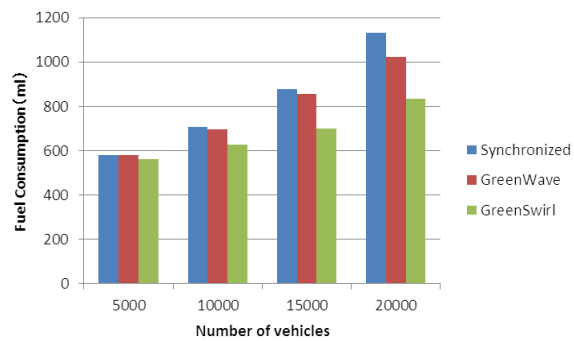
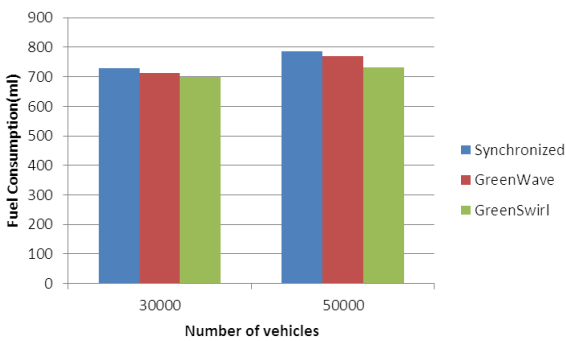
図 14 経路案内方式 ShortestPath, DUA, GreenDrive を用いた場合, 異なる信号制御道路を用いた走行時間比較. 地図: Beijing.



(a) 走行距離 (Beijing)

(b) 走行距離 (Manhattan)

図 15 GreenDrive を利用した手法の走行距離



(a) 燃料消費 (Beijing)

(b) 燃料消費 (Manhattan)

図 16 GreenDrive を利用した手法の燃料消費

- shortest simple paths: A new algorithm and its implementation,” *ACM Trans. Algorithms*, vol.3, no.4, Nov. 2007.
- [5] E. Martins, and M. Pascoal, “A new implementation of yen’ s ranking loopless paths algorithm, ” *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, vol.1, no.2, pp.121-133, 2003.
  - [6] Krajzewicz, D., Behrisch, M., Wang, Y. P.& Wagner, P. Comparison of Methods for Increasing the Performance of a DUA Computation. In *DTA2008 International Symposium on Dynamic Traffic Assignment* ,No. EPFL-CONF-154989,2008
  - [7] Krajzewicz, Daniel, Michael Behrisch, and Yun-Pang Wang. ”Comparing performance and quality of traffic assignment techniques for microscopic road traffic simulations.” *DTA2008 International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*. No. EPFL-CONF-154987. 2008.
  - [8] R.K. Ahuja, J.B. Orlin, S. Pallottino, and M.G. Scutell, “Dynamic shortest paths minimizing travel times and costs,” *Networks*, vol.41, no.4, pp.197-205, 2003.
  - [9] M. Khanjary, K. Faez, M. Meybodi, and M. Sabaei, “Shortest paths in synchronized trafficlight networks,” *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2011 24th Canadian Conference on, pp.000882-000886, May 2011
  - [10] A. Warberg, J. Larsen, and R. Jrgensen, *Green Wave Traffic Optimization - A Survey*, IMMTechnical Report-2008-01, Informatics and Mathematical Modelling, 2008.
  - [11] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, and D. Krajzewicz, “Sumo - simulation of urban mobility: An overview,” *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp.63-68, 2011.
  - [12] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C.Rössel, and P. Wagner, “Sumo (simulation of urban mobility),” *Proc. of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling*, pp.183-187,2002.
  - [13] D. Krajzewicz, E. Brockfeld, J. Mikat, J. Ringel, C.Rössel, W. Tuchscheerer, P. Wagner, and R. Wösl, “Simulation of modern traffic lights control systems using the open source traffic simulation sumo,” *Proceedings of the 3rd industrial simulation conference*, vol.2205, pp.299-302, 2005.
  - [14] OpenStreetMap homepage [Online], available from (<http://www.openstreetmap.org/>), accessed April 30, 2014.