

経路選択と時間価値の異質性を考慮した 自律分散型信号制御の評価

吉澤 尚輝¹・佐津川 功季²・井料 隆雅³

¹学生会員 東北大学工学部 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: naoki.yoshizawa.s4@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助教 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: satsukawa@tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: iryo@tohoku.ac.jp (Corresponding author)

道路を利用する車両が、公共交通を含む旅客交通システム全体に与える外部性に異質性を持つときは、それを考慮した交通制御を行うことがシステム全体の性能を高めるために必要である。信号制御においては、バス優先制御のような公共交通の車両を優先する手法がこれに該当する。一方で、MaaS(Mobility-as-a-Service)などの発展による旅客交通の多様化は、バスのような交通流の中ではごく限られた車両だけでなく、多くの車両に多様な外部性を与えることになる。本研究では、外部性の差異を単に時間価値の差異をみなし、異なる時間価値を持つ車両が混在するときの自立分散型信号制御を、経路選択を考慮して評価する。交通シミュレーション SUMO 上に信号交差点を含む簡単なネットワークを構築し、それを用いて複数の経路選択規準の元で、時間価値の差異を考慮する提案手法を実行し、その結果を評価する。

Key Words: *adaptive signal control, mobility-as-a-service, traffic simulator*

1. はじめに

道路の混雑緩和施策を考えるときには、どのような車両、あるいはどのような利用者が他の車両や利用者に迷惑をかけているか、いわゆる負の外部性がどの程度であるかを知らなくてはならない。一般的な交通工学においては、バスのような公共交通機関を別にすれば、この外部性を考えるときに車両や利用者の異質性を考えることは一般的ではなかった。しかし、MaaSなどの発展は、道路を走行する各車両が交通システム全体（道路だけでなく公共交通も含めて）において持つ役割に多様性をもたらすことが予想される。例えば、公共交通と連携した移動を担う車両であれば、公共交通の利用促進による正の外部性を、通常交通混雑による負の外部性と併せて持つことになる。一方で、例えば、客待ちを目的として道路を走り回る車両は、旅客の輸送に資することなく道路の容量を消費していることになり、負の外部性しか持たないものとも考えることもできよう。

外部性を考慮して交通システムを最適に運用するもとも一般的には混雑料金だが、それ以外にも、交通信号制御のような交通システム内での資源割振の最適化によるアプローチも考えられる。交通信号において正の外部性の高い車両を優先する施策としてよく用いられているのはバス優先信号である。これについてす

で多くの事例があり実装もなされている¹⁾。ただし、これらの既存事例は多数の一般車に対して少数の車両を優先する制御で、例えばバスに有利なように青時間を延長したりフェーズを入れ替えたりするなど、時々やってくるバスを優先的に通す、という形で実装されている。このような方法は、優先対象の車両が増えれば適用できなくなることは容易に想像できる。よって、各車両が交通システム上で多様な役割を持つ状況に向いている方法とは必ずしもいえない。

各車両の多様性を考慮した信号制御の方法論を考えるのであれば、既存の優先制御手法ではなく、一般的な適応型信号制御手法を拡張するほうがおそらく近道だろう。適応型信号制御手法には、実道での実績も多い SCOOT²⁾ も含めて多数の方法があるが、本研究では、混雑の外部性が出やすい過飽和交差点に対して、および、経路選択のあるネットワーク上での適用を目指し、Policy P_0 と呼ばれる適応型信号制御手法をベースとした制御方法の開発を目指す。Policy P_0 は、Smith³⁾ により提案された方法で、各枝の飽和交通流率と遅れ時間の積を等しくするように信号パラメータを調整する制御であり、キューを明示的に考慮したモデルでの適用もなされている⁴⁾。

本研究では、Policy P_0 を、車両ごとに優先度が異なる状況に対応できるように拡張することを試みる。評価指標としては優先度で重みづけした総走行時間を用

いる。このことは、車両の時間価値に異質性があるとみなしていることと等価である。時間価値のような線形の重みづけは、各車両の交通システム上で持つ役割を代表するにはごく簡便ではあるものの、最低限の特徴を捉えているとはいえるだろう。拡張した方法の有効性を評価するために、交通シミュレーション SUMO⁵⁾を用いる。SUMO 上で、Smith⁴⁾ が用いたのと同様の 2 経路ネットワークを構築し、2 経路が合流する地点の信号機について P_0 を適用する。

本論文は 4 章からなる。第 1 章で研究の背景と目的を述べた。第 2 章で交通シミュレーションおよび制御方法の設定について説明する。第 3 章でシミュレーションの計算結果を示す。第 4 章で考察と今後の課題を述べる。結果については本稿ではその一部のみを示している。

2. シミュレーション設定

本章では数値計算およびそれに用いたシミュレーションについて説明する。

(1) SUMO

本稿では、マイクロ交通シミュレーター ‘SUMO (Simulation of Urban MObility)’ を用いて数値計算を行った。SUMO はドイツ航空宇宙センターが開発しているオープンソースの交通シミュレーターであり、高度交通システム (ITS) 研究分野で広く用いられている。SUMO では個別の車両の走行挙動を追従モデルに基づき表現しており、各車両の速度・加速度パラメータ・走行経路などを自由に設定できる。

(2) ネットワーク

本稿では、図-1 に示すネットワークで数値計算を行った。このネットワークは単一起点 (node0)・単一終点 (node3) の起終点構造を持つ。起点と終点を結ぶ経路は二つ存在し、各利用者はどちらかの経路を選択して起点から終点まで走行する。リンク 1 を通る経路 (「直行

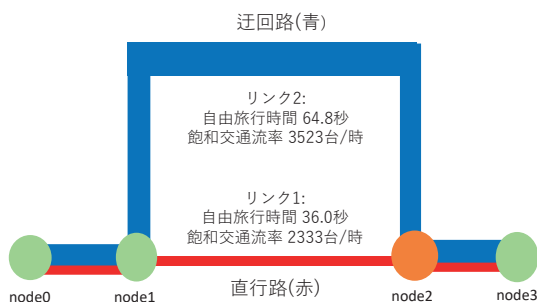


図-1 今回利用したネットワークの模式図

路」と呼ぶ)は、自由流旅行時間が短い飽和交通流率は小さい。一方で、リンク 2 を通る経路 (「迂回路」と呼ぶ)は、自由流旅行時間は長い飽和交通流率は大きい。各リンクの自由流旅行時間およびそのリンクの下流側の交差点での飽和交通流率は図中に記載した。シミュレーション上では飽和交通流率は直接設定できるものではないので、各リンクの飽和時における車頭時間を計測し、そこから逆算することで求めた。

単一の起点からは一定の交通流率で交通需要が流入する。本稿では、この流率が 2600 veh/h となるように車両の出発間隔を設定した。この流率は、少なくとも直行路側の飽和交通流率よりも大きい値であることに注意したい。各車両の速度や加速度などのパラメータは、SUMO のウェブサイトに記載された⁶⁾ 標準的なものを参考にしているが、最高速度を 13.89 m/sec に、運転手の習熟度を表す σ を 0.0 に変更している。

起点から流入した各車両は指定された経路選択規準に従って直行路か迂回路に進入する。本研究では、事前に経路を指定する方法と、ネットワークの現在の状況によりドライバーが動的に経路を決定する 2 つの方法を考える。本稿では前者の方法において、直行路には 800 veh/sec、迂回路には 1800 veh/sec と設定したときの結果についてのみ示す。

交差点 (ノード 2) では信号制御が行われており、青信号が出されているリンクのみから車両が流出する。初期設定では、接続する二つのリンク 1, 2 のそれぞれに対して、30 sec ずつ青時間を割り当てている。ただし、信号表示の切り替わり時には黄表示時間を 3 sec、全赤表示時間を 2 sec 設けている。そのためサイクル長は 70 sec となる。固定制御では信号パラメータはここで書いたものを継続して用いる。それ以外の制御では、このパラメータを初期値とし、そこから個々の方法で指定される手順に従ってパラメータを調整する。

各車両は旅行時間の時間価値に対して異なる異質性を持っている。本稿では二種類の車両が存在するものとし、片方は旅行時間に対して 1 倍、もう片方は 10 倍の旅行時間を経験するものとする。そして、後者の車両は直行路に 50% の割合で含まれるものとしている (この設定は、経路選択に対する仮定にもなることには注意されたい)。なお旅行時間の異質性は、各車両が異質性の分だけ重みづけされた旅行時間を (いわば) 仮想的に経験することを示すのであり、ネットワーク上の物理的な車両挙動は二種類の車両で同じであることには注意されたい。

(3) Policy P_0

各リンクに出される青時間の割合 (スプリット) について、本稿では固定制御の他に、自律分散的な制御

ルールである Policy P_0 を用いて制御することを考える。さらに Policy P_0 については、車両の異質性を考慮するものと考慮しないものの二種類を考える。

異質性を考慮しない（通常の）Policy P_0 では、信号交差点に接続する各リンクについて、車両の平均待ち行列遅れ時間と飽和交通流率から定められる「プレッシャー」を計算する。数学的にはプレッシャーは次のように定義される：いま、シミュレーションを実行する計画時間 $[0, T]$ を信号制御の間隔 dT でいくつかの時間帯に分割しよう。分割した各時間帯 $[0, dT], \dots, [T-dT, T]$ の集合を \mathcal{T} と表す。ここである時間帯 $t \in \mathcal{T}$ を考え、この時間帯でのリンク i における平均待ち行列遅れ時間を $d_i(t)$ 、飽和交通流率を s_i とすると、このリンクのプレッシャー $p_i(t)$ は、

$$p_i(t) = s_i d_i(t), \quad (1)$$

と表される。そして、このプレッシャーが各リンクで等しくなるように、プレッシャーが大きく（飽和交通流率で重みづけされた）遅れ時間が大きいリンクのスプリットを徐々に増加させ、別のリンクのスプリットを徐々に減少させる。本稿における計算では、スプリットを変更する間隔を $dT = 140 \text{ sec}$ （サイクル長の 2 倍）とし、この間隔ごとにプレッシャー $p_i(t)$ の大小を判定し、大きい方の青時間を 1 sec 増加させ、短い方の赤時間を 1 sec 減少させている。サイクルやロスタイムは不変としている。

異質性を考慮する Policy P_0 （これを Policy P_0^w とする）では、プレッシャーの計算の際に、前述した時間価値の異質性により重みづけされた旅行時間を用いる。すなわち、供給側の要素である交差点性能（飽和交通流率）だけでなく、需要側の要素である時間価値も同時に考慮していることになる。プレッシャーの計算では、各車両の待ち行列遅れ時間に重み（1 または 10）を掛けたものの平均値 $d_i^w(t)$ を計算し、これを式 (1) の $d_i(t)$ として用いる。そして導出された、異質性により重みづけされたプレッシャー $p_i^w(t)$ が大きい方のリンクについて、 P_0 と同じ手順でスプリットを増加させている。

3. 数値計算結果

数値計算の結果を表-1 に示す。まず、固定制御と Policy P_0 について比較すると、（重みづけしない）総旅行時間と重みつき総旅行時間の両方において、Policy P_0 の方がより効率的であることがわかった。次に Policy P_0^w の結果をみると、二種類の総旅行時間は固定制御のものよりより改善していることがみて取れる。ただし、Policy P_0^w より、Policy P_0 の方が改善していることもわかる。従って、今回の数値計算では、適応的な信号制

表-1 各制御手法における総旅行時間と重みつき総旅行時間

| 制御手法 | 総旅行時間 [h] | 重みつき 総旅行時間 [h] |
|----------------|-----------|-------------------|
| 固定制御 | 1306 | 2458 |
| Policy P_0 | 217 | 466 |
| Policy P_0^w | 428 | 616 |

御により、通常の総旅行時間と重みつき総旅行時間の双方が改善することがわかった。しかし、車両の時間価値の異質性を考慮して信号を制御することは、異質性を考慮しない素朴な信号制御より好ましいわけではないこともわかった。

図-2 に、各信号制御における青時間の時々刻々の変化を示す。これらの図を比較すると、Policy P_0 と P_0^w 実装時のいずれにおいても、迂回路に青時間が多く割り当てられていることがわかる。これは、信号交差点が飽和状態にあるときは、飽和交通流率が高い方により多くの青時間を割り振ることで、交差点の捌け交通量（スループット）を改善していることを意味する。すなわち、スループットが改善して待ち行列がより減少するようになることで、待ち行列が生じる負の外部性が減少し、その結果総旅行時間が改善されていることがわかる。このメカニズムは既存の Policy P_0 と整合的である。

しかし、二つの信号制御の図を比較すると、Policy P_0^w では青時間はかなり不規則（青時間の挙動が不安定に）変動していることがわかる。これは、ランダムに流入する重みつきの車両がプレッシャーに影響することで、信号制御も不安定化したためである。これにより、信号交差点のスループットや待ち行列台数、および負の外部性の減少効果も不安定化することが予想される。その結果、今回の数値計算では、総旅行時間の改善度合いが通常の（安定的な）Policy P_0 より低くなってしまったと考えられる。

4. 終わりに

本稿では、外部性の差異を単に時間価値の差異をみなし、異なる時間価値を持つ車両が混在するときの自立分散型信号制御を、経路選択を考慮して評価する方法について示した。交通シミュレーション SUMO 上に信号交差点を含む簡単なネットワークを構築し、それを用いて複数の経路選択規準のうち 1 つで、時間価値の差異を考慮する提案手法を実行し、その結果を評価した。

本稿では経路選択規準のうち事前に経路を指定する

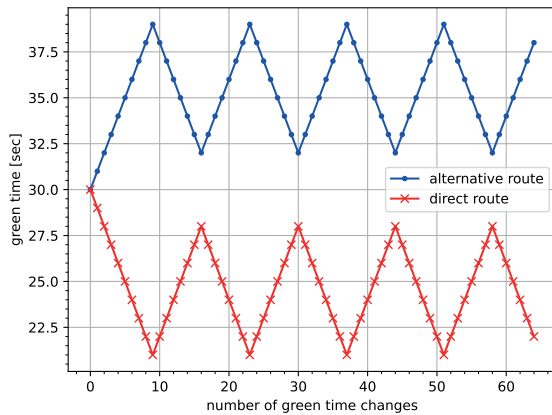
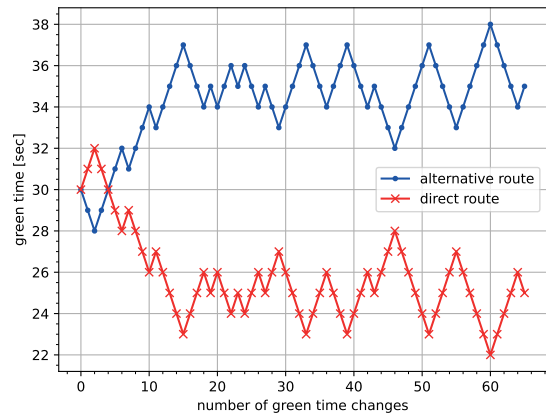
図-2-a Policy P_0 図-2-b Policy P_0^w

図-2 各信号制御における、時々刻々の青時間の変化。ここで alternative route は迂回路，direct route は直行路を表している

方法による計算結果のみを示した。示した結果においては、固定制御に比べて P_0 や P_0^w が重み付き旅行時間を減少させていることは確認できた。一方で、重み付きの旅行時間を指標としても、 P_0^w は P_0 に対して有効とはいえない結果になった。このことは、プレッシャー p_i^w の計算方法に改善が必要であることを示唆する。この改善方策や、事前指定以外の経路選択規準による結果とその考察については口頭発表において報告する。

謝辞： 本研究は、日本學術振興会 科学研究費補助金（若手研究「高度な動的制御のためのゲーム理論に基づくネットワーク交通流解析理論の構築（課題番号：20K14843，代表：佐津川功季）」，および基盤研究(A)「MaaS + CV 時代の次世代交通システムに向けたインフラと制度の設計（課題番号：20H00265，代表：井料隆雅）」の助成を受けた研究の一環として実施された。

参考文献

- 1) Diakaki, C., Papageorgiou, M., Dinopoulou, V., Papamichail, I., and Garyfalia, M.: State-of-the-art and -practice review of

- public transport priority strategies, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol.9, No.4, pp.391–406, 2015.
- 2) Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R., and Winton, R.: SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals, *TRRL LABORATORY REPORT*, Vol.1014, 1981.
- 3) Smith, M. J.: Traffic control and route-choice; a simple example, *Transportation Research Part B*, Vol.13, No.4, pp.289–294, 1979.
- 4) Smith, M. J., Liu, R., and Mounce, R.: Traffic control and route choice: Capacity maximisation and stability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.81, pp.863–885, 2015.
- 5) Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flotterod, Y. P., Hilbrich, R., Lucken, L., Rummel, J., Wagner, P., and Wiebner, E.: Microscopic traffic simulation using SUMO, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, Vol.2018-November, pp.2575–2582, 2018.
- 6) DLR and contributors: Sumo homepage, 2021, <https://sumo.dlr.de/docs/index.html#introduction>.

EVALUATION OF DISTRIBUTED SIGNAL CONTROL CONSIDERING ROUTE CHOICES AND HETEROGENEOUS VALUE OF TIME

Naoki YOSHIKAWA, Koki SATSUKAWA and Takamasa IRYO