

力積予測に基づく交通信号の自律分散制御

加納剛史¹, 杉山雄規², 石黒章夫¹

¹ 東北大学電気通信研究所, ² 名古屋大学情報科学研究科

概要

これまで数多くの交通信号の制御方策が提案されてきたが、いずれも予期せぬ交通量の変化に対して適応することが困難であった。この問題解決のため本研究では、力学的な考察に基づいた交通信号の自律分散制御方策を提案する。具体的には、各信号機において、現時刻から一定時間の間に赤信号や前の車から受ける力積を Optimal Velocity モデルを用いて計算し、力積が小さくなるように信号の切り替え判定を行う。さまざまな車両密度の条件下でシミュレーションを行ったところ、いずれの場合においても提案手法が効果的に機能することを確認できた。

Decentralized Control of Traffic Signals Based on Prediction of Impulses

Takeshi Kano¹, Yuki Sugiyama², and Akio Ishiguro¹

¹ Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

² Department of Complex Systems Science, Nagoya University

Abstract

Although various control schemes of traffic signals have been developed, they could not adapt to unpredictable changes in the amount of traffic. To tackle this problem, we here propose an autonomous decentralized control scheme of traffic signals on the basis of physics consideration. More specifically, impulses given by red signals or preceding cars are calculated at each traffic signal by using optimal velocity model, and traffic signals are switched so that the impulses are reduced. We performed simulations with changing number of cars, and the results showed that the proposed control scheme works properly under all conditions examined.

1 はじめに

現代社会において、道路交通システムは産業にも生活にも不可欠である。しかしながら近年、交通渋滞が深刻な社会問題となっており、エネルギー消費や環境汚染により多大な経済損失がもたらされている。この問題解決のためには、個々がマイカー通勤をやめる、交通量の需要に合った道路網の構築をする、などといった対策がもちろん必要であるが、交通信号の制御方策の確立もまた重要な課題の一つである。交通信号を道路状況に応じて柔軟かつ適切に制御することができれば、交通渋滞の緩和につながると期

待される。

1950年代に交通信号制御の研究が産声をあげて以降、これまで数多くの制御方策が提案されてきた [1-5]。その多くは、「前もって得られた交通需要量や車両感知器から得られたセンサ情報をもとに、『サイクル長』『スプリット』『オフセット』などのパラメータを個別に設計する」というものであった。また近年では、遺伝的アルゴリズム [6]、結合振動子 [7-9]、ファジー論理回路 [10]、ニューラルネットワーク [11,12] などを用いた、従来の枠組みに捉われない新しい制御手法も提案されている。しかしながら、いずれの

制御方策も、想定状況下ではある程度適切に機能するものの、予期せぬ交通量の変化に対応することは困難であった。この事実は、制御則設計にあたっての重要な本質が依然として欠落していることを示唆している。

そこで本研究では、基本に立ち返り、力学的な考察に基づいて交通信号の制御方策を導き出す。各車にとって望ましい状態は、「赤信号や前の車の存在によって走行が妨げられない状態」である。そこで筆者らは、「走行の妨げ」を表す指標として赤信号や前の車が後続車に与える「力積」に着目し、各信号機付近の車にかかる力積を小さくするように信号機の切り替えを行う自律分散制御方策を提案する。碁盤の目の道路で車両密度を変えてシミュレーションを行った結果、いずれの車両密度の場合においても提案制御則が効果的に機能することを確認したので報告する。

2 モデルと提案手法

2.1節で概要を述べ、2.2, 2.3節で補足説明を行う。

2.1 概要

本研究では、できる限り単純化したモデルを構築して交通信号制御の本質を炙り出すことを目標としている。それゆえ、初動段階から複雑に入り組んだ現実的な道路網を考えるのではなく、一辺の長さが L の正方形のフィールド内に南北・東西に走る道路が各 M 本等間隔で並んだ碁盤の目の道路網を考える (図 1(b))。各交差点には信号機が配置されている。車は時間 t ごとにフィールドの各端点から確率 p で出現し (当該道路に存在する車の数が N 台に達しているときは車は出現しない)、右左折せず直進する。歩行者や自転車等の存在は考えないものとする。各信号機は「東西が青で南北が赤」、「東西が赤で南北が青」の 2 現示を有し、黄色信号は考えない。なお、現示を切り替える際にすべての信号が赤になるクリアランス時間を設け、この時間を δt とする。各信号機にはカメラが設置され、当該信号機と四方に隣接する信号機の間が存在する車の位置と速度を検出できるものと仮定する。各車の振る舞いは Optimal velocity (OV) モデル [13] を用いて記述する (2.2 節参照)。

提案する信号制御方策の流れを図 1(a) に示す。時間 t ごとに、得られた車の位置と速度の情報をもとにして各信号機で内部モデルを作成し、現時刻から

時間 T にわたって各車が赤信号もしくは前の車から受ける力積を、i) 現時刻においてすぐに信号を切り替える、ii) 信号を切り替えない、iii) 現時刻から $n\Delta$ だけ時間が経過してから信号を切り替える (Δ は正の定数、 n は自然数、 $n\Delta < T - \delta t$)、のそれぞれの場合について計算する (2.3 節参照)。そして、i) の場合の力積 I_1 が ii) の力積 I_2 および iii) の場合の力積 $I_{3-1}, I_{3-2}, I_{3-3}, \dots$ よりも小さい時のみ現示の切り替えを行う。

2.2 Optimal Velocity (OV) モデル

車の振る舞いは以下の OV モデル [13] を用いて記述する：

$$\dot{v}_i = a\{V(\Delta x_i) - v_i\} \quad (1)$$

ここで、 i は車に割り振られた番号、 v_i は車の速度、 a は感応度と呼ばれるパラメータである。 Δx_i は前の車との距離を表すが、本研究においては Δx_i を「前方に存在する車と赤信号のうちもっとも近いものまでの距離」と定義する。 $V(\Delta x_i)$ は目標速度であり、以下のように表される：

$$V(\Delta x_i) = v_0[\tanh\{\kappa(\Delta x_i - d)\} + \tanh(\kappa d)] \quad (2)$$

ここで、 v_0, κ, d は正の定数である。

2.3 内部モデルの作成方法および力積の計算

内部モデルでは、当該信号から南北・東西に無限に伸びる道路上に、カメラで検出した情報通りに車の位置・速度を設定する (図 1(c))。そして、各車を (1), (2) 式に従って時間 T にわたり時間発展させる。その際、赤信号や前の車が後続車に与える「力積」を計算する (本論文で用いる「力積」の意味が一般的に用いられている力積の意味と一致するかどうかは議論の余地があるが、ここではその詳細には立ち入らず「力積」という用語を用いる)。

力積は以下のようにして計算できる。車の質量 m はすべての車について等しいと仮定すると、赤信号もしくは前の車との距離が Δx_i の時、運動方程式は (1) 式より以下のように表される：

$$m\dot{v}_i = ma\{V(\Delta x_i) - v_i\} \quad (3)$$

となる。ところが、もし仮に i 番目の車の前に赤信号や他の車が存在しなかったとすると、運動方程式は

$$m\dot{v}_i = ma\{V(\infty) - v_i\} \quad (4)$$

となるはずである。(4) 式で得られる自己駆動力を基準に取り、基準と (3) 式で得られる i 番目の車の

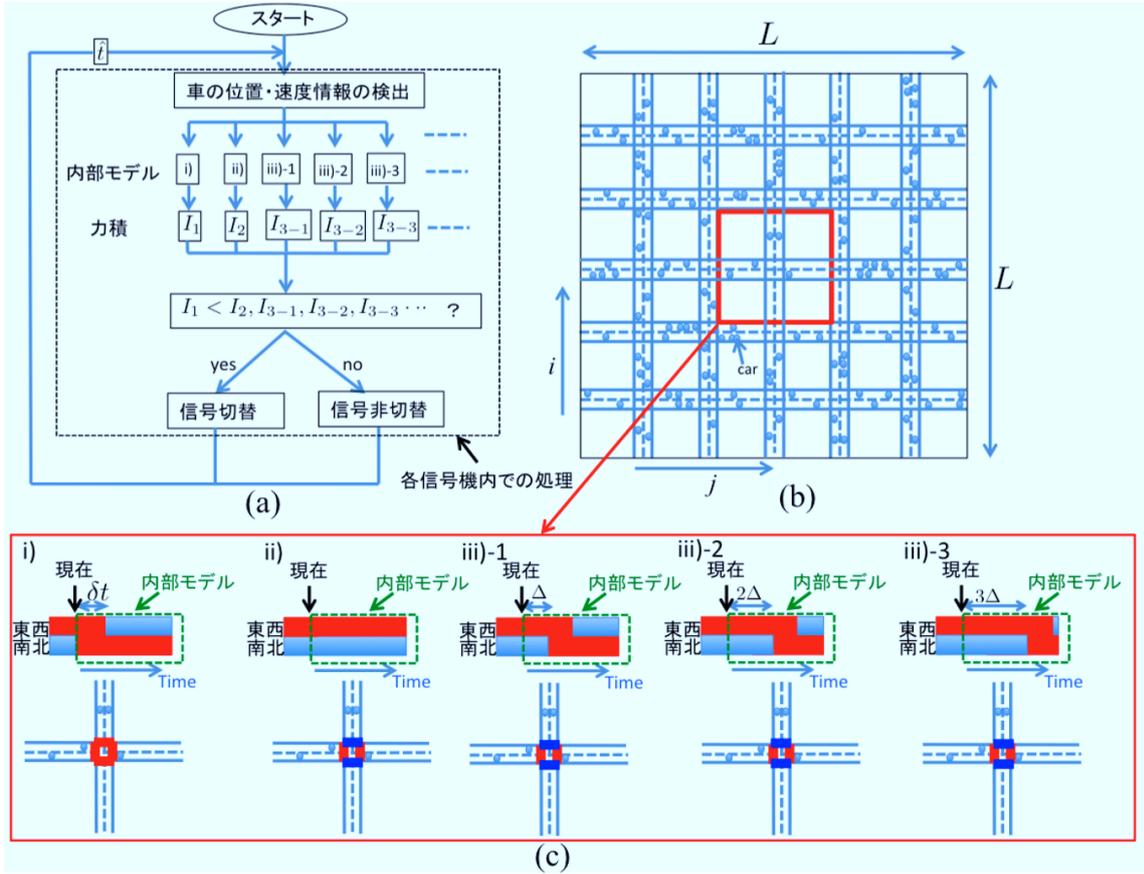


図1: モデルおよび提案制御則の概要. (a) 制御則のフローチャート. (b) モデルとして採り上げた道路網 (図は $M = 5$ の場合). 赤枠で囲った領域は枠の中心部の信号機がカメラで車を検出できる範囲. (c) 内部モデル. 上段は信号機の状態の時間変化, 下段は内部モデルの初期状態を示す.

実際の自己駆動力の差を取ることで、「前の車や赤信号の存在によって減少した i 番目の車の自己駆動力」を求めることができる. この減少分を「赤信号もしくは前の車が i 番目の車に与える力 F_i 」と解釈・定義する. すなわち, F_i は, (3) 式と (4) 式の差を取ることで,

$$F_i = ma\{V(\infty) - V(\Delta x_i)\} \quad (5)$$

と求められる. よって求める力積は $\sum_t \sum_i F_i$ となる. ただし, \sum_t はすべてのタイムステップについての総和, \sum_i はすべての車についての総和を表す.

3 シミュレーション結果

提案制御則の妥当性を検証するため, シミュレーションを行った. 西と南からのみ車が出現する場合と全方向から車が出現する場合のそれぞれについて, 車の出現確率 p を変えてシミュレーションを行った. 評価指標としては, 全車の平均速度を用いた. 用いたパラメータの数値は下記の通りである: $a = 1.5$

$[s^{-1}]$, $v_0 = 10 [ms^{-1}]$, $\kappa = 0.1 [m^{-1}]$, $d = 20 [m]$, $\delta t = 3 [s]$, $\tilde{t} = 2 [s]$, $\hat{t} = 0.1 [s]$, $\Delta = 0.2 [s]$, $L = 1.0 [km]$, $M = 5$, $N = 100$. Runge-Kutta 法を用い, タイムステップの刻みは $0.02 [s]$ で 20000 タイムステップ施行した.

内部モデルの計算時間 T を変化させた時の結果を図 2 に示す. 全般的に, $T = 6 \sim 14 [s]$ 付近で平均速度がもっとも高くなっていることがわかる. これは, 隣接する信号間距離を車の最高速度で割った特徴的な時間 $7.27 [s]$ と比して同程度かやや大きい程度である. 次に, $T = 12 [s]$ の場合において, 一定周期で現示を切り替えた場合との比較を行った. 結果を図 3 に示す. 提案手法の場合の方が一定周期で現示を切り替えた場合よりも顕著に平均速度が高くなっていることがわかる. このことから, 提案手法は車両密度によらず効果的に機能することが確認できた.

なお, \hat{t} および Δ を上述の特徴時間 ($7.27 [s]$) 程

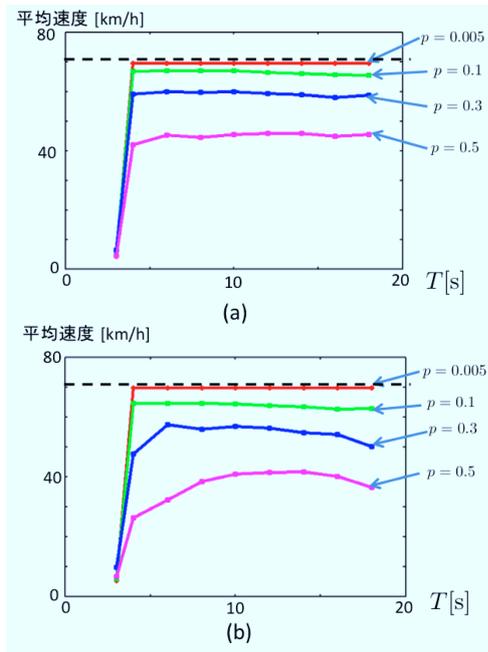


図 2: 平均速度の T 依存性. (a) 西と南からのみ車
が出現する場合, (b) 全方向から車が出現する場
合. 破線は最高速度を示す.

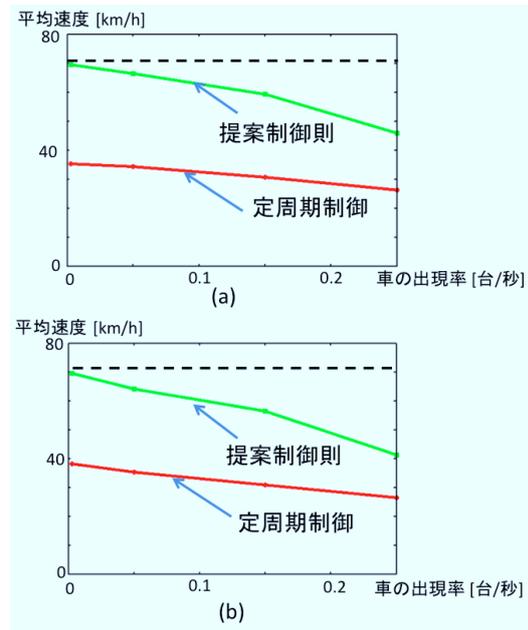


図 3: 一定周期で切り替えを行った場合との比較.
(a) 西と南からのみ車が出現する場合, (b) 全方向
から車が出現する場合. 破線は最高速度を示す.

度まで大きくしても, \hat{t} および Δ を十分小さくした
場合の 80% 程度の平均速度が保たれることを確認
済みである. それゆえ, 内部モデルの計算処理は現
実的に十分可能であると考えられる.

4 まとめおよび今後の展望

予期せぬ交通量の変化にも適応可能な交通信号の
制御方策を確立するため, シンプルなモデルを構築
し, 力学的な考察に基づいて制御則の設計を行った.
赤信号や前の車が後続車に与える「力積」に着目し,
信号機付近の車に与えられる力積が小さくなるよう
に現示の切り替えを行う自律分散制御則を構築した.
シミュレーションの結果, さまざまな車両密度の道
路において提案制御則が適切に機能することを確認
した.

本研究では碁盤の目の道路かつ車の右左折がない
状況を仮定してモデル化を行った. これらの仮定が
成り立たない一般的な状況で提案制御則が適切に機
能するかについては, 今後検証する予定である.

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金挑戦
的萌芽研究 (課題番号 26630193) からの援助によっ
て行われた. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- [1] 交通工学研究会, “改訂交通信号の手引”, (2008).
- [2] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotstalos, and Y. Wang, Proc. of the IEEE, **91** (2003) 2043
- [3] S. P. Shepherd, Working Paper, Institute of Transport Studies, University of Leeds (1992) 349.
- [4] P.B. Hunt, D.L. Robertson, and R.D. Bretherton, Traffic Eng. Control, **23** (1982) 190.
- [5] N.H. Gartner, Transp. Res. Rec. **906** (1983) 75.
- [6] J.J. Sanchez-Medina, M.J. Galan-Moreno, and E. Rubio-Royo, IEEE Trans. Intel. Transport. Sys., **11** (2010) 132.
- [7] K. Sekiyama, J. Nakanishi, I. Takagawa, T. Higashi, and T. Fukuda, IEEE Int. Conf. Sys. Man, Cybern., **4** (2001) 2481.
- [8] I. Nisikawa, IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks, **2** (2004) 1273.
- [9] M. Sugi, H. Yuasa, J. Ota, and T. Arai, SICE Annual Conference (2003), 1954.
- [10] S. M. Rahman and N. T. Ratrouf, J. Trans. Sys. Eng. Info. Tech., **9** (2009) 58.
- [11] T. Ohira, K. Inoue, and Y. Takeshima, Int. Conf. Neural Info. Proc. Intel. Info. Sys. (ICONIP) (1997) 939.
- [12] D. Srinivasan, M.C. Choy, and R.L. Cheu, IEEE Trans. Intel. Trans. Sys., **7** (2006) 261.
- [13] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E **51** (1995) 1035.