

バネモデルによる信号機スプリット値分散制御法の構築

Construction of Traffic Light System dispersing split value using Spring Model

小中 裕次郎*¹
Yujiro Konaka

矢野 純史*²
Junji Yano

香川 浩司*²
Kouji Kagawa

森田 哲郎*²
Tetsuo Morita

沼尾 正行*³
Masayuki Numao

栗原 聡*³
Satoshi Kurihara

*¹大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻

Department of Information and Physical Sciences, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*²住友電気工業株式会社 情報通信研究所

Information and Communication Labs, Sumitomo Electric Industries, Ltd

*³大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

Nowadays, the traffic jam becomes an serious problem in our urban life. The biggest factor of generating the traffic jam is the intersection and the traffic light. Current traffic light control system is basically centralized control type and usually centralized type control system lacks robustness and scalability. So, in this paper, we proposed a new distributed traffic control system based on spring-model. From comparative evaluation, basic efficiency has been confirmed.

1. 序論

近年、自動車保有台数が増加し、都市部を中心に交通渋滞が日常化している。交通渋滞の発生により、到着予定時間の遅延や燃料消費量の増加、さらには車の排気ガスによる環境汚染問題など、さまざまな問題が発生し、早急な渋滞の解決が求められている。

交通渋滞を解消するアプローチの一つに、信号機制御システムの導入がある。一般道路における渋滞の最大の原因は交差点での信号待ちであり、交差点の信号を交通量に応じていかに最適にコントロールするかが大きな課題である。現在使われている信号機制御システムには、パターン制御方式と、中央管理型の制御方式の二つがある。パターン制御方式は、事前の交通調査に基づき、交通状況に対応する複数の制御パターンを予め設定し、パラメータを何組か用意して、時間帯によって切り替える方法である。この方法では、日中や夜間などの、ある程度予測できる交通状況には対応できるが、交通事故など、突発的に変化する交通状況には対応が難しい。中央管理型の制御方式は、個々の信号機が交通量を検知し、中央サーバが信号機の情報を制御する最適な制御パラメータを計算し、それぞれの信号機に適用する方法である。この方法では、予期しない交通状況にも対応することができるが、中央サーバで全信号機の制御パラメータを計算するため、状況の変化に対して応答性が低くなるという問題がある。当然ながら、制御対象地域が広がると計算コストが増大するという問題もある。

以上の点から、我々は、各信号機に自律性を与え、分散して制御をおこなう方式が理想と考える。同じ立場をとる従来の自律型の信号機制御システムの研究としては、マルチエージェント強化学習を用いた研究 [1][2][3] や、フェロモンコミュニケーションを用いた研究 [4]、非線形結合振動子モデルを用いた研究 [5]、そしてばねモデルによる信号機制御システム [6] などがある。ただし、これらの中で [6] の着眼点が興味深い。この

研究では、バネモデルというシンプルな力学モデルを用いることで、柔軟性の高い信号機制御システムの構築を目指したものである。しかしながら、バネモデルが高い有用性を持つことを明らかにしたものの、自律分散的ではないという欠点を持ち、さらに 5 叉路など複雑交差点への拡張が難しいモデルとなっていた。

よって、本研究ではバネモデルをベースとした自律分散的な信号機スプリット値更新制御システムの構築を目指す。実際の運用を考えると、ドライバーはリアルタイムな情報を必要とするため、最適性と同時に応答性も重要であり、また、設置されている信号機の量を考えると、通信コストができるだけ抑えられるシステムであることが望ましい。そこで、本研究では個々の交差点にエージェントを配置させ、局所的な情報のみを用いて自律的に制御パラメータを変化させる方法を提案する。

2. 交通信号制御

信号機制御は、現示の決定と、および制御パラメータの決定の 2 段階によって行われる。現示 (phase) とは、一組の交通流の通行権である。普通の 4 枝交差点では、南北方向と東西方向の 2 現示が用いられる。現示の決定は、道路条件と交通条件から総合的に判断して決定される。制御パラメータは現示を切り替えるタイミングを決定する。通常、制御パラメータとして以下の三種類を用いて、周期的な現示の切り替えを行う。

- サイクル長: 「青, 黄, 赤」と一周変化するのにかかる時間
- スプリット: 1 サイクルにおける青信号の割合
- オフセット: 近隣の交差点との、一周期の開始時間のずれ

本研究では、スプリットの制御のみを扱い、サイクル長、オフセットは固定されているものとする。また、今回の実験では、提案アルゴリズムの基本性能を確認するために、2 現示 4 枝交差点のみを用いて実験を行う。

連絡先: 小中 裕次郎, 大阪大学産業科学研究所沼尾研究室, 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1, Tel(Fax):06-6879-8426, E-mail:konaka@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では、一つの交差点の信号機のスプリット値の比をバネモデルにてモデル化し、個々の信号機が交通状況を知覚することで、適切なスプリット値を求めていく。個々のエージェントが知覚できる情報は、次の3種類である。

- 近隣の道路上の車の台数
- 交差点に流入する車と、交差点から流出する車の台数
- 隣接する交差点の車の台数やスプリット値

各エージェントが、これらの局所的な情報を元に自律的に制御パラメータを変更することで、大局的に効率のよい信号機の動作パターンが自己組織化されることを目指す。なお現段階では、エージェントが変更するパラメータとしてはスプリットのみを扱う。

3.2 スプリット値計算

3.2.1 スプリット値計算概要

スプリット値計算は、次の方針に従って、個々の信号機がそれぞれ独立にスプリット値を計算する。

1. 自身の交差点の東西方向の交通量と南北方向の交通量を比較し、交通量の差をばねのつり合い式に盛り込むことでスプリット値の調整を行う
2. 隣接する交差点では、上流から下流に流れる交通量に注目し、上流で渋滞が発生し下流にて渋滞が起きる可能性が高い場合は、上流からの流入を制限するようなバネモデルの制御を行い、新たにスプリット値を計算する。

3.2.2 交差点内のスプリット値計算

信号機内では、渋滞をばねのつりあいの式に取り入れることでスプリット値を計算する。図1は本システムで用いられているバネモデルの概略図である。お互いが押し合うことでつりあいの状態を保っている。青の矢印は $split[0]$ によるばねが

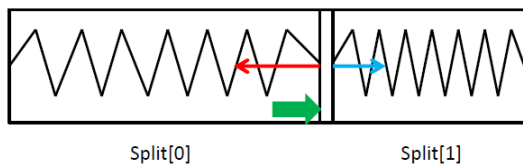


図1: バネモデルの概略図

及ぼす力、赤の矢印は $split[1]$ によるばねが及ぼす力、緑の矢印は交通量の差から導き出される力である。ここで、東西から流入してくる車の台数から、南北から流入する車の台数を引いた値を交通量の差によってバネに加わる力とし、これを D とする。バネの自然長をサイクル長とみなし、サイクル長を L 、バネ定数を、東西方向と南北方向のスプリット値をそれぞれ $split[0]$ 、 $split[1]$ とすると、バネのつりあいの式は

$$K(L - L \times split[0]) + D = K(L - L \times split[1]) \quad (1)$$

となる。ここで、2 現示 4 枝交差点を考えた場合、東西方向と南北方向のスプリット値には、 $split[1] = 1 - split[0]$ の関係があるので、

$$split[0] = \frac{(kL + D)}{2kL} \quad (2)$$

ここで $split[1] = 1 - split[0]$ であるので $split[0]$ も求めることができる。

以上のようにして個々の信号機はスプリット値を更新していく。しかし、この計算手法では 1 以上の値が求まってしまう場合がある。また、スプリットの値が 0 や 1 になってしまうと、一方の交差点にしか車が流入せず、それ以降の値の更新が期待出来ない。以上のような理由から、スプリット値の上限値を 0.9、下限値を 0.1 と定めた。

3.2.3 隣接交差点間で行われるスプリット値計算

本システムでは、上流の交通流から下流での渋滞を予測し、予測値が下流で信号待ちしている車よりも多くなってしまった時に、上流の交差点のスプリットを小さくするという手法を提案する。

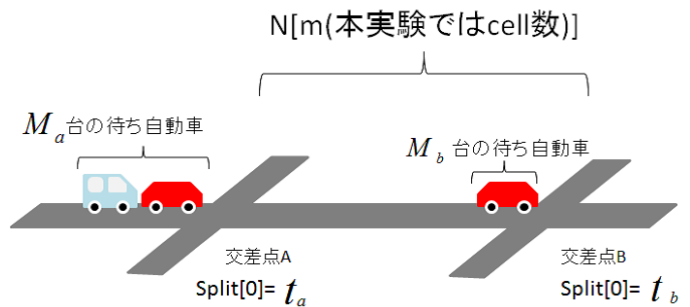


図2: 隣接交差点間におけるスプリット値計算の概略図

図2のような隣接している2つの交差点を考える。車は交差点Aから交差点Bに流れており、交差点Aから交差点Bに車が供給される。交差点間の道路を e 、道路の距離を N 、スプリット値をそれぞれ t_a 、 t_b 、それぞれの交差点における待ち自動車数を M_a 、 M_b とし、サイクル長を L とする。これらの値から、それぞれの交差点で処理できる最大待ち自動車数を求める。最大待ち自動車数を M_{amax} 、 M_{bmax} とすると、青時間は Lt_a 、 Lt_b であるので、 $2k - 1 = \alpha$ の関係式を用いると次式が得られる。

$$2M_{amax} - 1 = Lt_a \quad (3)$$

$$2M_{bmax} - 1 = Lt_b \quad (4)$$

となる。整理すると、交差点A,Bでの最大待ち自動車数は

$$M_{amax} = \frac{Lt_a}{2} \quad (5)$$

$$M_{bmax} = \frac{Lt_b}{2} \quad (6)$$

となる。交差点Aで信号待ちしている自動車が全て直進すると仮定して、交差点Bに流れるものとする。このときの交差点Bを通過することのできる車の台数を求める。交差点間の距離が N セルであるとして、 k 台目にとまっている車が交差点Bの信号機が変わるときに交差点Bを超えた場合、次式が成り立つ。

$$2k - 1 + N = Lt_b \quad (7)$$

この式から、交差点Bを超えることのできる車の台数 $k_{a \ b}$ は

$$k_{a \ b} = \frac{(Lt_b - (N - 1))}{2} \quad (8)$$

となる．次に M_{amax} , M_{bmax} , k_{a-b} から, スプリットを
変化させるときの上流の予測値をもとめる．予測値は最大待ち
自動車数や, 実際の自動車数によって変化してしまうので, い
くつかの場合分けが必要となってくる．

[場合 1] $M_{amax} > \frac{(Lt_a-1)}{2}$, $M_{bmax} > \frac{(Lt_b-1)}{2}$

交差点 A からは $\frac{(Lt_a-1)}{2}$ の車が道路 e に流れ, 交差点
B では $M_{bmax} - \frac{(Lt_b-1)}{2}$ の車がそのまま交差点に留まっ
てしまう．交差点 A から道路 e に流入し交差点 B を通
過できず道路 e に留まってしまい交差点 B の待ち自動車
となってしまふ車と, 交差点 B の待ち自動車で, そのま
ま交差点 B に留まってしまふ車の合計が, 信号機が変わ
る前の待ち自動車数 M_b よりも大きくなってしまふそう
な時, 上流の交差点の青時間を小さくする必要が出てく
るので, 条件式は

$$M_b < (M_{bmax} - \frac{(Lt_b-1)}{2}) + (\frac{(Lt_a-1)}{2} - k_{a-b}) \quad (9)$$

となる．式 (9) に式 (8) を代入して整理すると, 条件式
は次式ようになる．

$$N < L(t_a - 2t_b) + 1 \quad (10)$$

場合 1 において, 式 (10) が成り立つ時, 上流の交差点 A
のスプリット値を小さくする．

[場合 2] $M_{amax} > \frac{(Lt_a-1)}{2}$, $M_{bmax} \leq \frac{(Lt_b-1)}{2}$

交差点 A からは $\frac{(Lt_a-1)}{2}$ の車が道路 e に流れ, 交差点 B
で信号待ちしている車が全て流れるてしまう場合, 場合
1 と同様に考えると, 条件式は次のようになる．

$$N > L(t_a - t_b) - 2M_b \quad (11)$$

場合 2 において, 式 (11) が成り立つとき, 上流の交差点
のスプリットを小さくする．

[場合 3] $M_{amax} \leq \frac{(Lt_a-1)}{2}$, $M_{bmax} > \frac{(Lt_b-1)}{2}$

交差点 A からは M_a の車が道路 e に流れ, 交差点 B で
は $M_{bmax} - \frac{(Lt_b-1)}{2}$ の車がそのまま交差点に残ってしま
う場合, 上記と同様に考えると, 条件式は次式のように
なる．

$$N < 2(M_a - t_b) \quad (12)$$

場合 3 において, 式 12 が成り立つとき, 上流の交差点の
スプリットを小さくする．

[場合 4] $M_{amax} \leq \frac{(Lt_a-1)}{2}$, $M_{bmax} \leq \frac{(Lt_b-1)}{2}$

交差点 A, B で信号待ちしている自動車がすべて流れた場
合, 上記と同様に考えると, 条件式は次式のようになる．

$$N > 2(M_b - M_a) + t_b + 1 \quad (13)$$

場合 4 において, 式 (13) が成り立つとき, 上流の交差点
のスプリットを小さくする．

スプリットの更新は, 車の流れが東西方向である場合と, 車
の流れが南北方向である場合で, 次のように更新する．

(a) 車の流れが東西方向である場合

$$split[0] = split[0] - \beta \quad (14)$$

$$split[1] = split[1] + \beta \quad (15)$$

(b) 車の流れが南北方向である場合

$$split[1] = split[1] - \beta \quad (16)$$

$$split[0] = split[0] + \beta \quad (17)$$

なお, 交差点内におけるスプリット計算と同じ理由からスプ
リット値の上限を 0.9, 下限値を 0.1 とする．

このように, 提案手法では個々の交差点がそれぞれ局所的な
情報を用いて周りの交差点と協調して安定を目指す, [6] で
は個々のスプリット値を計算する際に全交差点からの情報を必
要とする手法となっていた．また, あまりに簡潔化バネモデル
としてしまったため, 3.2.3 節にて提案した交差点間の調整に
おいて [6] ではうまく調節ができない場合が発生してしまう．

4. 検証実験と結果

4.1 実験環境

本研究では, ASEP(Asymmetric Simple Exclusion Process:
非対称単純排他過程) モデル [8] を採用している．ASEP は,

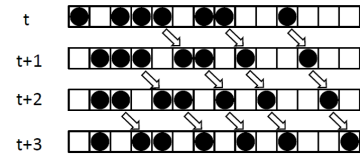


図 3: ASEP モデルによる車の動き

セルオートマトン法の一つであり, 連続的なものを離散的に表
現する手法である．このモデルでは道路を離散的なセルの列と
して考え, 車はそのセルを排他的に占有しながら一方向に移
動する粒子であると考ええる．本研究の交通シミュレータの道路
は, 道路をセルの列と考え, 車はそのセルにそって移動してい
く．図 3 のように前のセルが他の車にて占有やれていない状態
においてのみ進むことができるが, 前のセルが車で埋まってい
るときは動くことはできない．このような状況は, 渋滞してい
て車が進むことができないような状況に似ており, この ASEP
法は実際の車に近い動きを表現することができる．

4.2 提案手法と従来手法との比較実験

実験 1 では, 従来手法 [6] と, スプリットを 0.5 で固定され
た時と提案手法との比較を行った．実験環境は, 10×10 の道
路ネットワークを用いた．東西方向から 0.15, 南北方向から
0.01 の割合で車が流入する．サイクル長は 400 ステップであ
り, スプリットの初期値は 0.5 とした．バネ定数は, 60 ステ
ップの間に交差点が処理できる最大待ち自動車数とし, $k = 30$
とした．また $\beta = 0.1$ とする．交差点間の道路は 200 セル, 交
差点に車が入ると 0.8 の確率で直進し, 0.1 の確率で右折と左
折をおこなう．20000 ステップ, シミュレータを動かした後,
ネットワーク上の車の総数の遷移をグラフにして比較した．

実験結果を図 4 に示す．20000 ステップ後の交通量を比較
すると, スプリットを固定した場合に比べると, 車の台数が約
20% 減少した．また, 従来手法と比較しても約 5% 車の台数
が減少しており, 従来手法よりも高いパフォーマンスを得られ
ることが確認できた．

4.3 隣接制御の動作実験

実験 2 では特定の道路における車の速度を小さくし, 供給に
大きな差がある交差点の組み合わせを作ること, スプリット

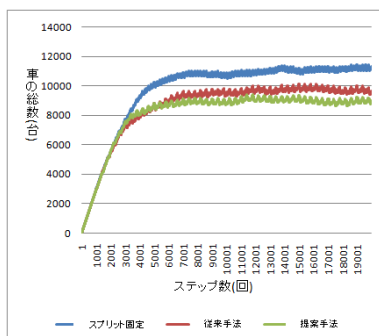


図 4: 実験 1 における交通量の遷移

値制御の効果を検証した。実験には図 5 のような 10×10 の碁盤目状の交通ネットワークを用い (2,2),(2,3) 方向, (3,6),(3,5) 方向, (5,4),(6,4) 方向, (8,3),(7,3) 方向に車が流れるときは, 車の速度が $\frac{1}{4}$ となるよう設定した。

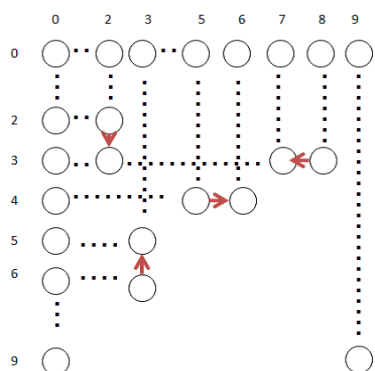


図 5: 実験 2 で用いた交通ネットワーク

この実験では,隣接交差点間でスプリット制御をおこなうモデルと,おこなわないモデルを比較した。車を投入する割合や,交差点での進行方向決定の割合,サイクルやスプリットの初期値は実験 1 と同様の値とした。一定時間シミュレータを動かした後,車の総数を比較した。

実験結果を図 6 に示す。300 サイクル (120000 ステップ) 後

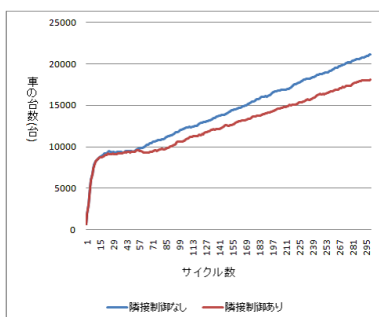


図 6: 実験 2 における交通量の遷移

には,約 15%,交通の流れがスムーズになっていることが確認できた。

5. 結論と課題

本論では,バネ定数を固定し,東西方向と南北方向から流入してくる交通量の情報を用いてスプリット値計算を行う信号機制御モデルを提案した。比較実験から,従来手法よりも高いパフォーマンスを得ることが確認できた。流入する交通量のみを扱っているため,右折専用信号機や 5 叉路以上の複合交差点への拡張も可能であるが,これに関しては現在,取り組んでいる段階である。また,本研究では,上流に,車の供給量が高い交差点があった場合,上流の交差点の青信号の時間を小さくすることで,その道路間の渋滞を抑える手法を用いたが,実験 2 においてその効果が得られることが確認できた。以上の結果から本研究の提案手法は信号機制御に適していると考えられる。

しかし,本研究で用いたシミュレーションには限界があり,複数の交差点に渋滞がまたがってしまうという状況を作ることができない。このような状況ではほとんど車が動けないために,交差点に流入する車の量が少なくなり,交通量が少ないと誤認されてしまう。そのため,提案手法では上記の状況では渋滞を拡大させてしまう可能性がある。今後の研究では渋滞が複数の交差点にまたがる場合,提案手法の制御が及ぼす影響と,最も効率的な制御方法を考えなければならない。また,隣接交差点間でのスプリット計算は,道路がある程度長い状況下で実験を行った。しかし,実際の道路網では,交差点間の道路距離はさほど長くないため,一つ隣の上流の交差点で信号待ちしている車が下流の交差点を通過してしまう場合がほとんどである。したがって,実際の交通網を考えた場合,1 つ上流の交差点だけでなくある程度上流の交差点を考える必要がある。

参考文献

- [1] 参沢匡将, 木村春彦, 広瀬貞樹, 大里延康, "強化学習エージェントによる交通信号制御", 電子情報通信学会論文誌 D-1, Vol. J83-D-1, No.5, pp.478-486, 2000.
- [2] Marco Wiering, "Multi-Agent Reinforcement Learning for Traffic Light control.", Machine Learning: *Proceedings of the Seventeenth International Conference (ICML'2000)*, pp.1151-1158, 2000.
- [3] D. Oliveira, and A. L.C. Bazzan, and B. C. Silva, and E. W. Basso, and L. Nunes, and R. J. F. Rossetti, and E. C. Oliveira, and R. Silva, and L. C. Lamb, "Reinforcement learning based control of traffic lights in non-stationary environments: a case study in a microscopic simulator." *Proceedings of the 4th European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS06)*, pp.31-42, December, 2006.
- [4] D. Oliveira, P. Ferreira, and A. L. C. Bazzan. "Reducing traffic jams with a swarm-based approach for selection of signal plans." *Proceedings of Fourth International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence - ANTS 2004*, Vol. 3172 of LNCS, pp.416-417, Berlin, Germany, 2004. Springer-Verlag.
- [5] 杉正夫, 湯浅秀男, 新井民夫, "グラフ上の反応拡散方程式による交通信号網の自律分散型制御," 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.1, pp.51-58, 2003.
- [6] 佐藤和宏, 長岡諒, 安場直史, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原聡, "マルチエージェントモデルによる自律的信号機制御システムの構築", 第 22 回人工知能学会全国大会, 2008.
- [7] 越正毅, "交通工学", 技術書院, 1989.
- [8] 西成活裕, "渋滞学", 新潮社, 2006.