

## 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

## Construction of Autonomous Traffic Light Control System using Multi-Agent Model

佐藤 和宏\*1    長岡 諒\*1    安場 直史\*1    矢野 純史\*2    香川 浩司\*2    森田 哲郎\*2  
 Kazuhiro Satoh    Ryo Nagaoka    Yasuba Naohumi    Junji Yano    Kouji Kagawa    Tetsuo Morita

沼尾 正行\*3    栗原 聡\*3  
 Masayuki Numao    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

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

In this paper, we propose autonomous traffic light control system for reducing traffic jam. Traffic jam become an everyday affair in urban area because of increase in the number of vehicles. Traffic jam cause the time loss, the growth in consumption of fuel and the destruction of environment. Therefore it is urgent need to reduce traffic jam. One of the promising approach to cope with this problem is improvement of traffic light control system. Traffic light control system has a significant impact on efficiency of traffic. However existing traffic light control system has several problems. One of those problem is that existing system can not cope with changing volume of vehicles. Thus we propose a autonomous traffic light control system using multi-agent model which is able to cope with changing volume of vehicles using less communication and calculation cost.

## 1. 序論

近年、自動車保有台数の増加に伴い交通流が増加し、その結果、都市部を中心に交通渋滞が日常化している。交通渋滞の発生は、時間の損失、燃料消費量の増加、環境に与える悪影響などの原因となるため、早急な解決が望まれている。

交通渋滞解消のアプローチのひとつに、信号機制御システムの改善がある。信号機の制御パラメータは、交通状態に応じて最適な値が変化し、道路の交通状況は、日中と夜間などの時刻の変化や交通事故などの原因によって、動的に変化する。信号機の制御パラメータも交通状況の変化に合わせて動的に変化させることが望ましい。

しかしながら、定時制御方式や中央管理型の交通応答方式などの現在主に使われているシステムでは、動的な交通状況の変化に十分に対応することは難しい。定時制御方式とは、予め計算しておいたパラメータを用いる方法である。パラメータを何組か用意しておき、時間帯によって切り替えることで、日中と夜間の交通状況の変化などには対応することもできるが、交通事故などの予期しない交通状況の変化に対しては対応することができない。これに対して中央管理型の交通応答方式は、交通状況に応じて自動的に制御パラメータを変化させる方法であり、予期しない交通状況の変化に対しても対応することが可能である。ただし、各交差点の交通状況を一度中央サーバに集め、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即応性が低くなるという問題がある。また、制御対象地域が広がると計算コストが大きくなるという問題もある。

そこで本研究では、これらの問題を解決するためにマルチエージェントモデルを用いた自律分散的な信号機制御システムを提案する。これは、個々の交差点をエージェントとみなし、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更するエージェントを組み合わせることで、大域的に効率の良い動作を実現するシステムである。個々のエージェントは局所的な情報のみから自律的に判断を行うので、中央管理型のような速度の問題や計算コストの問題が発生しない。中央管理型のように最適な制御パラメータを保障することは出来ないが、実際の運用を考えると最適性よりも即応性の方が重要になると考えられるため、中央管理型よりも自律型のシステムの方が信号機制御に適しているといえる。

従来の自律型の信号機制御の研究として、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モデルを用いた研究 [4]、非線形結合振動子モデルを用いた研究 [5] などがある。しかし従来の研究では、2 現示 4 枝の交差点についての議論が中心である点や、碁盤目状の道路ネットワークでの評価が中心である点など、実際の運用を考えた場合柔軟性に欠けるといえる。そこで本研究では、ばねモデルという単純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す。

以降、2 章では交通信号制御の一般的な方法について述べる。3 章で提案する信号機制御システムについて述べ、4 章で提案システムの検証実験を報告する。最後に 5 章に結論を述べる。

## 2. 交通信号制御

一般的に信号機制御は、現示の決定、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、図 1 に示す

連絡先: 佐藤 和宏, 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:satoh@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

2 現示が用いられる．現示の決定は，道路条件と交通条件とから総合的に判断してなされる．現在のところ，最適な現示を決定するアルゴリズムは存在しない．

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3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：一周期の長さ．
- スプリット：1 サイクル中で各現示に与えられる時間の比率．
- オフセット：近隣の交差点との，一周期の開始時間のずれ．

なお本研究では，現段階ではスプリットの制御のみについて議論を行う．現示は図1に示す2現示として決定されており，制御パラメータのうちサイクル長，オフセットについては固定されているものとする．

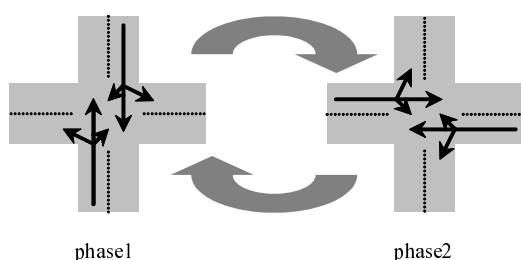


図 1: 2 現示方式

### 3. 提案システム

#### 3.1 概要

本研究では，マルチエージェントシステムを用いた自律的信号機制御システムを提案する．個々のエージェントは，交差点と一対一に対応し，局所的な情報を用いて自律的に信号機の制御パラメータを変更する．個々のエージェントが知覚できる情報としては，次の3種類を仮定する．

- 近隣の道路上の車の台数
- 交差点に流入する車の台数と，交差点から流出する車の台数
- 隣接する交差点の制御パラメータ

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形成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，上で述べているようにスプリットのみを扱う．

#### 3.2 スプリット制御

次に，個々のエージェントのスプリット制御について説明する．ここでは，次の方針に従って個々の信号機のスプリットを制御する．

1. 信号機のスプリットの目標値を，局所的な交通流と隣接する交差点の制御パラメータを元に決定する．

2. 目標スプリットが最小ポテンシャルとなるような，ばねモデルを設計する．
3. 上記のばねモデルにしたがって，各信号機のスプリットを更新する．

このような単純な力学モデルに基づいた制御を行うことで，突発的な交通流の変化に対して即応性の高い制御が可能になると期待される．

#### (a) スプリットの目標値

ここでは，以下の2つの目標値を考え，それらの加重平均を最終的なスプリットの目標値とする．

目標値 1 各現示のスプリットを，それぞれの交通量に比例させる．

目標値 2 各現示のスプリットを，隣接交差点の対応する現示のスプリットと等しくする．

目標値 1 は，独立した交差点のみを考えた時の目標値である．独立した交差点の交通流のみを考えた場合，交通量の多い現示には多くの時間を割り当て，交通量の少ない現示には少ない時間を割り当てるといように，交通量に比例して各現示のスプリットを設定することが最適である事が知られている [6]．

目標値 2 は，隣接する交差点同士の負荷分散を考えた時の目標値である．例えば，隣り合う二つの信号機の青時間に大きな差がある場合，青時間が短い信号機はボトルネックとなりそこで渋滞が発生する可能性がある．また青時間が長い信号機では，余分な青時間は効率の改善に寄与せず，他の現示の青時間を無駄に奪うことになる．そのため，負荷を分散させる事を考えた場合，隣り合う信号機同士の青時間は出来るだけ等しくすることが望ましい．

以上のように，交通工学の分野の知見から上の2つの目標値を設定した．これらの2の目標を同時に満たすことは出来ないため，ここでは2つの目標値に重みをつけて平均することで，最終的な目標値とした．

#### (b) ばねモデル

上記の目標値に従ってスプリットを変化させるために，ばねモデルを考える．図2に提案するばねモデルの概念図を示す．図中の円柱は，各交差点における各現示の時間比を表している．円柱内部の2つのばねにより目標値 1 を実現し，円柱同士をつなぐばねにより目標値 2 を実現する．

これらのばねから構成されるばねモデル全体のポテンシャルは，以下の式で与える．

$$W = \sum_i \sum_p \left( W_{(i,p)} + \sum_{i'} \sum_{p'} W_{(i,p,i',p')} \right) \quad (1)$$

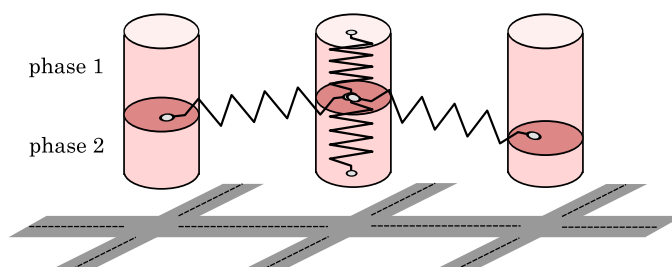


図 2: ばねモデル

ここで、 $W$  は全体のポテンシャルを表す。 $W_{(i,p)}$  は交差点  $i$  の現示  $p$  のスプリットの値を変化させるばねの持つポテンシャルを表す。これは図2における円柱内のばねの持つポテンシャルであり、目標値1に対応する。 $W_{(i,p,i',p')}$  は交差点  $i$  の現示  $p$  と交差点  $i'$  の現示  $p'$  のスプリットの差を小さくするばねの持つポテンシャルを表す。これは図2における円柱間をつなぐばねのポテンシャルであり、目標値2に対応する。

目標値1に対応するばねのポテンシャルは、次の式により与える。

$$\begin{aligned} W_{(i,p)} &= \frac{1}{2} k x^2 \\ &= \frac{1}{2} \beta \sum_e q_e (1 - \pi_{(e,i,p)}) (\sigma_{(i,p)} - L_{(i,p)})^2 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 $q_e$  は道路  $e$  上の車台数を表し、 $\pi_{(e,i,p)}$  は現示  $p$  の時に道路  $e$  から交差点  $i$  に車が流入する確率を表す。 $\sigma_{(i,p)}$  は交差点  $i$  の現示  $p$  のスプリットを表し、 $L_{(i,p)}$  は交差点  $i$  の現示  $p$  のスプリットの下限值を表す。また、 $\beta$  は目標値1と目標値2を加重平均する際の重みを表す。式(2)の偏差  $x$  に対応する項から分かるように、スプリットが長くなると対応するばねのポテンシャルは大きくなるので、常にスプリットを短くする方向に力がかかることになる。また交通量の多い現示ほどばね定数  $k$  は小さくなるため、交通量の多い現示はスプリットが長くなり、交通量の少ない現示はスプリットが短くなる。このように、式(2)に示すばねが、目標値1に対応することがわかる。

目標値2に対応するばねのポテンシャルは、次の式により与える。

$$\begin{aligned} W_{(i,p,i',p')} &= \frac{1}{2} k x^2 \\ &= \frac{1}{2} (1 - \beta) \sum_e q_e (\pi_{(e,i,p)} \pi'_{(e,i',p')} + \pi'_{(e,i,p)} \pi_{(e,i',p')}) (\sigma_{(i,p)} - \sigma_{(i',p')})^2 \quad (3) \end{aligned}$$

ここで  $\pi'_{(e,i,p)}$  は現示  $p$  の時に交差点  $i$  から道路  $e$  に車が流出する確率を表す。式(3)の偏差  $x$  に対応する項から分かるように、隣接する交差点のスプリットとの差が大きくなると、対応するばねのポテンシャルが大きくなるので、隣接する交差点の間でスプリットを等しくする力が働いていることになる。また、間の道路の交通量に比例してばね定数  $k$  は大きくなるため、交通流の多い道路を介してつながっている交差点ほど、スプリットの差を小さくする力が大きくかかることになる。このように、式(3)に示すばねが、目標値2に対応することがわかる。

#### (c) スプリットの更新

式(1)のポテンシャル関数を最小にする方向に、各現示のスプリット  $\sigma_{(i,p)}$  を変化させる。式(4)に示すようにポテンシャル関数を微分することで勾配を求め、勾配が最大となる方向にスプリットを更新する。

$$\sigma_{(i,p)} \leftarrow \sigma_{(i,p)} - \alpha \frac{dW}{d\sigma_{(i,p)}} \quad (4)$$

ここで  $\alpha$  は、一度の更新における変化の割合を決めるパラメータである。

今回は2現示である事から、現示1と現示2のスプリットの間には  $\sigma_{(i,p1)} = 1 - \sigma_{(i,p2)}$  という条件が成り立つ。そのため、信号機  $i$  のスプリットに関するポテンシャル関数の勾配は以下

のように求めることが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{dW}{d\sigma_{(i,p1)}} &= \beta \sum_e q_e (1 - \pi_{(e,i,p1)}) (\sigma_{(i,p1)} - L_{(i,p1)}) \\ &\quad - \beta \sum_e q_e (1 - \pi_{(e,i,p2)}) (1 - \sigma_{(i,p2)} - L_{(i,p2)}) \\ &\quad + (1 - \beta) 2 \sum_{i'} \sum_{p'} \sum_e q_e (\pi_{(e,i,p1)} \pi'_{(e,i',p')} + \pi'_{(e,i,p1)} \pi_{(e,i',p')}) (\sigma_{(i,p)} - \sigma_{(i',p')}) \quad (5) \end{aligned}$$

この式は、信号機  $i$  の近隣の交通流に関する情報と、近傍の交差点の情報のみを含んでいるので、最初に仮定したエージェントの知覚情報のみから計算することが可能である。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験環境

提案手法の有効性を検証するために、交通シミュレータを用いた評価実験を行った。シミュレーション環境は、 $4 \times 4$  の碁盤目状の道路網を用いた。図3に環境の概略を示す。図において、 $i1 \sim i16$  は交差点を表し、矢印は道路を表す。ここで隣接する交差点間の距離は全て200mとした。また車の長さは4mとし、車の速度は14m/s(約50km/s)であるとした。信号機のパラメータは、サイクル長が120秒、初期スプリットが0.5であるとした。またスプリットの更新は、式(4)に基づき4/14秒周期で行うこととした。また  $\alpha$  は0.2、 $\beta$  は0.5とした。

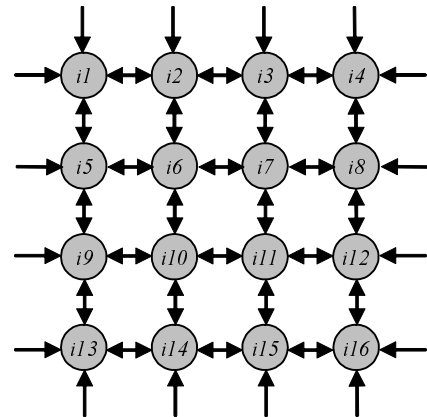


図3: シミュレーション環境

道路上の車の動きには ASEP (Asymmetric Simple Exclusion Process: 非対称単純排他仮定) モデル [7] を用いた。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る。このような単純なモデルによって、比較的現実の交通流に近い現象が再現されることが知られている。交差点では、各車は確率的に進路を決定するとした。また、車は外部から接続する道路上に一定周期で発生し外部に接続する道路にたどり着いた時点で消滅するとした。

これらの環境を用いて、解の質と収束性の二つの観点から提案手法の評価を行った。

### 4.2 実験結果と考察

まず、解の質の評価実験について説明する。解の質を評価するために、提案手法とスプリット固定との間で、シミュレータ

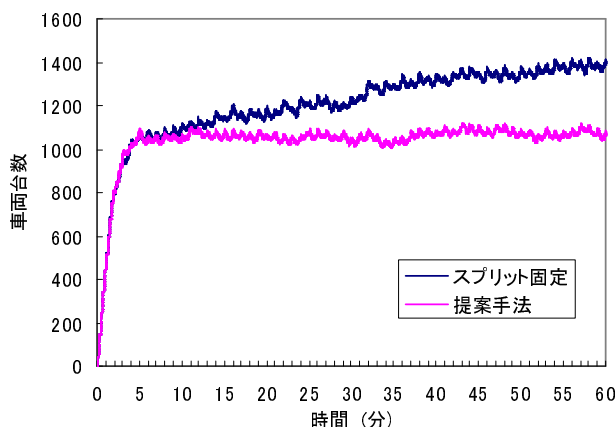


図 4: 車台数の変化

全体の車台数の時間変化の比較を行った。このシミュレータ全体の車台数が少ないほど、交通が効率よく流れていることを表す。結果を図 4 に示す。ここで車の流入率は東西方向の流入路では一分あたり 31.5 台、南北方向の流入路では一分あたり 21 台とした。図 4 より、スプリット固定の場合、時間変化と共に車台数が線形に増加している。つまりスプリット固定では設定した交通量をさばき切れずに、交通渋滞が発生していることがわかる。これに対して提案手法では、開始から約 5 分の時点で車台数の増加が止まり、それ以降は 1000 付近から増加しない。このことから、提案手法を用いることで、スプリット固定に比べ効率の良いスプリットを求めることが可能であることが確認できた。

次に、収束性の評価実験について説明する。収束速度を評価するために、突発的な交通状況の変化に対するスプリットの変化について調べた。突発的な変化として、交差点  $i_{10}$  と  $i_{11}$  の間の道路が通行止めになるという事態を想定した。図 5 に結果を示す。ここで車の流入率は全ての流入路で等しく一分あたり 21 台とした。通行止めは、開始 30 分の地点で発生させている。図からわかるように通行止めの前後の交差点では、通行止め発生直後にスプリットの変化が始まり約 10 分後には新しい値に収束している。また交差点  $i_9$ ,  $i_{12}$  のスプリットも、変化の大きさに差はあるが同様の変化をしていることが分かる。このことから、交通流の変化に対するスプリットの収束性が確認できた。

## 5. 結論

本研究では、ばねモデルを用いた自律的信号制御システムを提案した。このシステムは、信号機の制御パラメータを交差点単位で自律的に制御するため、交通流の変化に対して低い計算コストと通信コストで即応性の高い適応が可能である。また従来の自律的信号制御の研究と異なり、ばねモデルという単純な力学モデルに基づいてパラメータの制御を行うため、2 現示 4 枝交差点以外の交差点にも無理なく拡張することが可能であると期待できる。

## 6. 今後の課題

今後の課題としては、まず他の手法との比較が考えられる。现阶段では解の効率と収束性の二つの観点から提案手法の動作

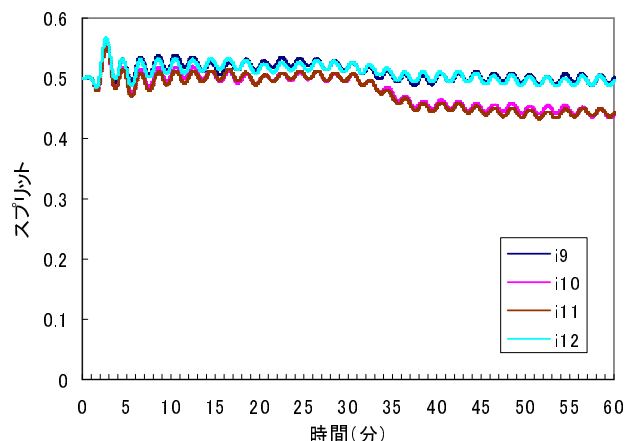


図 5: 交通状況の変化に対するスプリットの変化

の確認を行ったが、他の手法との比較は行っていないので提案手法の有効性については議論できていない。そこで、解の質と収束速度の両方の観点から、他の自律的信号制御の研究と比較を行う必要がある。このほかに、3 現示以上への拡張やスプリット以外のパラメータの制御、そして基盤状の環境ではなく実際の道路ネットワークを用いた評価などが今後の課題として挙げられる。

## 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-I, Vol. J83-D-I, 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誌, Vol.39, No.1, pp.51-58, 2003.
- [6] 越正毅, "交通工学", 技術書院, 1989.
- [7] 西成活裕, "渋滞学", 新潮社, 2006.