

自動分散制御による動的な 信号機制御パラメータ制御モデルの提案

小中 裕次郎^{†1} 白井 嵩士^{†1} 西村 茂樹^{†2}
矢野 純史^{†2} 香川 浩司^{†2} 森田 哲郎^{†2}
沼尾 正行^{†3} 栗原 聡^{†4}

近年，都市部の慢性的な渋滞を解決するために，信号機を交通量に応じて制御することにより渋滞を解消しようとする試みが各国で行われている．現在の信号機制御は集中制御方式によるものがほとんどではあるが，交通流の動的な変化に対応するのは非常に困難であり，大きなブレイクスルーを生み出すまでには至っていない．そこで本研究ではパネモデルに基づく自律分散制御による，ダイナミックに変化する交通流に柔軟に対応することを可能とする信号機制御モデルを提案する．

Proporsal of dynamic traffic light control system using automatic dispersion control

YUJIRO KONAKA,^{†1} TAKASHI SHIRAI,^{†1}
SHIGEKI NISHIMURA,^{†2} KOUJI KAGAWA,^{†2}
TETSUO MORITA,^{†2} MASAYUKI NUMAO^{†3}
and SATOSHI KURIHARA^{†4}

Nowadays,each country dissolves congestion by controlling the signal. But, In a present signal control, the one by the centralized control method is most, so it is very difficult to correspond to a dynamic change in the traffic flow and it has not come to invent big breakthrough. So,in this paper,we proposed a new distributed traffic control system based on automatic dispersion control.From comparative evaluation,basic efficiency has been confirmed.

1. はじめに

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手段としては，(1) 渋滞の検知と予測に基づく効率的なナビゲーションによる方法と，(2) 効率的な信号機制御による方法の2つが考えられる．前者は VICS や Probe システムなど急速な進展が見られるが，信号機制御に関しても数年前よりコンピュータ制御による新しいシステムの運用が開始されつつあるものの，前者ほどの革新的な進展は見られていない．そこで，本論では信号機制御に対する性能向上に着目する．

一般道路における渋滞の最大の原因は交差点である．交差点では様々な方向からの車両の通過を制御する必要があり，交通流を制御するために各方向からの交通量が多い交差点では信号機が設置される．しかし信号機により，車両の通過が排他的に制御され，ある一定時間に交差点を通過できる車両数（交通容量）が制限されてしまう．そのため，交差点を通過できず車両による待ち行列が必ず発生し交差点が渋滞発生のボトルネックとなる可能性が高い．そこで，交通流を制御するために，交通量に応じて，信号機パラメータを適切に操作することが重要になってくる．

これに対し，現在主に用いられている信号機制御システムは大きく2つに分類することができる．1つはあらかじめ算出した信号機制御パラメータを用いる方法であり，もう1つはリアルタイムに計測される交通流を利用してコンピュータ制御にて自動的にパラメータを制御しようとする方式であり，日本においては MODERATO¹⁾ と呼ばれるシステムの運用が導入されつつある（海外では OPAC(米),SCOOT (英),UTOPIA(伊) などがある）．

まず，前者は交差点の交通流を長期間に渡り事前に測定しておき，その結果を基に交通流に応じた複数の信号機制御パラメータを算出し，ラッシュ時や夜間，日中などそれぞれに対

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

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

^{†4} 大阪大学産業科学研究所, JST CREST

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, JST CREST

応したパラメータを決められたスケジュールで変化させるというものである。この方法では、恒常的な変化には効果が見込めるものの、予め算出したパラメータをスケジュールに従って変化させるため、当然ながら突発的な事故などに即応することは困難である。そこで登場したのが後者の MODERATO に代表されるコンピュータ制御方式である。こちらはいくつかの種類が存在するものの、基本的にはしくみは同じであり、道路に設置されるセンサーにて車両の通過を感知して道路における車の流れを推定し、その情報を基に信号機を制御しようとするシステムである。リアルタイムな情報を利用することで、前者に比べて大きな渋滞緩和を達成できているものの、システムは階層化されているとはいえ、基本的には集中制御方式にて実現されており、全体を管理する上では効果的であるが、動的に変化する複雑なシステムを管理するには不向きである。また、センサーから得られるリアルタイムな情報に対しても、予めシミュレーションにて得られたパラメータ集合の中から適切なものを選択する手法であり、リアルタイムな情報を活かすことは出来てはいない。その他、集中制御を用いた先行研究として遺伝的アルゴリズムによる研究²⁾がある。この方式では信号機の最適解を求めることが可能だが、解を算出するのに多くの計算コストを要するという欠点がある。

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³⁾⁴⁾⁵⁾や、非線形結合振動子モデルを用いた研究⁶⁾がある。しかし、これらの先行研究は、問題が単純化されて過ぎて実際の道路状況とかけ離れていたりと、 3×3 などの極小範囲の道路ネットワークを用いた検証で話が終わっているため、実際の道路ネットワークへの導入は難しい。

本研究では、各交差点にエージェントを配置し周辺の情報から自律分散的に信号機パラメータを計算する方法を提案する。エージェントが自律的に信号機パラメータを求めることにより、動的に変化する交通流に対して柔軟に対応し、リアルタイムに信号機制御を行うことが可能となる。

以降第2章で信号機を制御する上での基本的パラメータについて述べた後、第3章にて提案手法を述べ、第4章で検証実験の内容及び結果を、そして第5章にて結論を述べる。

2. 信号機制御パラメータ

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。信号機制御で用いられるパラメータは以下の四種類を用いて、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サイクルにおける一つの現示の通行許可時間の割合
 - オフセット：近隣の交差点との、一周期の開始時間のずれ
 - クリアランス：黄色時間とすべての信号機が赤になる全赤時間の和
- 交差点で車両を効率よく捌くためには、それぞれの方向から流入する交通量に応じてスプリット値を適切に振り分けることが重要になる。

また、サイクル長の中には、それぞれの現示の青時間に加えてクリアランスの時間が含まれている。クリアランスは車の安全を確保するために設けられた時間であり、サイクルの大きなさ次第でサイクルに占める割合が変化するため、サイクル制御に大きくかかわっている。例えば、交通量が少ない場合、信号待ちの待ち時間を小さくするためにもサイクルは短くてよい。しかし、交通量が多い場合、クリアランスがサイクルに占める割合を少なくして車両を通過する時間をできるだけ増やしたいため、サイクルを長くする必要がある。したがって、交通量に応じてサイクル長を変化させなければならない。

オフセットは、一つの交通の流れをスムーズに制御するために設けられる。上りと下りの道路で交通量に大きな差がある場合、交通量の大きな流れに対して青信号の開始時間をずらしてオフセットを設けてやることで、車をスムーズに運行させることができる。オフセットの先行研究としてはマルチエージェントシステムによるオフセット制御研究⁷⁾がある。

本研究ではスプリットとサイクルの制御モデルを考える。個々の信号機が周辺の道路から流入する交通量に応じてスプリット値を各現示に振り分け、交通量からサイクル長を計算するモデルを考案する。スプリットとサイクルの制御は、それぞれの交差点で独立して行われるのに対し、オフセット制御は交通の流れに対して行われる制御である。したがって、オフセット制御とスプリット、サイクル制御は別次元の問題として考えることができ、今回の実験では周辺の信号機とのオフセットはないものとする。また、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枝交差点を用いて実験を行う。

3. 提案手法

スプリット値制御とサイクル制御は別々に行う。サイクル制御が一周期間にどれほどの車が交差点を通過できるかを制御するのに対し、スプリット値制御は各現示での交通量に応じて求めたサイクルをどう振り分けるかを制御していく。したがって、スプリット値とサイ

クルが互いに影響することはほとんどないと考えることができる。

3.1 スプリット値制御

3.1.1 スプリット値制御

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。

3.1.2 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。

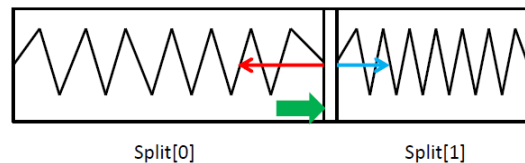


図1 バネモデルの概略図
Fig.1 Outline of spring model

青の矢印は $split[0]$ によるばねが及ぼす力、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 K 、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

$$K * (L - L * split[0]) + D = K * (L - L * split[1]) \quad (3.1)$$

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、

$$split[0] = \frac{(kL + D)}{2kL} \quad (3.2)$$

この $split[0]$ の値から、同時に $split[1]$ の値も求まる。

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。

3.1.3 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いう時に、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。

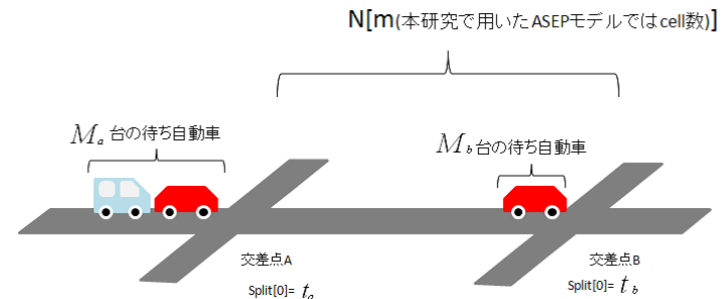


図2 隣接交差点間におけるスプリット値計算の概略図
Fig.2 Outline of calculating split value between Adjacent intersections

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。

$$2M_{amax} - 1 = Lt_a \quad (3.3)$$

$$2M_{bmax} - 1 = Lt_b \quad (3.4)$$

整理すると、交差点 A, B での最大待ち自動車数は

$$M_{amax} = \frac{Lt_a}{2} \quad (3.5)$$

$$M_{bmax} = \frac{Lt_b}{2} \quad (3.6)$$

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。

$$2k - 1 + N = Lt_b \quad (3.7)$$

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

$$k_{a \rightarrow b} = \frac{(Lt_b - (N - 1))}{2} \quad (3.8)$$

となる。次に M_{amax} , M_{bmax} , $k_{a \rightarrow b}$ 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 に留まってしまう交差点 B の待ち自動車となってしまう車と、交差点 B の待ち自動車で、そのまま交差点 B に留まってしまう車の合計が、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いそうな時、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

$$M_b < (M_{bmax} - \frac{(Lt_b - 1)}{2}) + (\frac{(Lt_a - 1)}{2} - k_{a \rightarrow b}) \quad (3.9)$$

となる。式 (3.9) に式 (3.8) を代入して整理すると、条件式は次式ようになる。

$$N < L(t_a - 2t_b) + 1 \quad (3.10)$$

場合 1 において、式 (3.10) 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。

$$N > L(t_a - t_b) - 2M_b \quad (3.11)$$

場合 2 において、式 (3.11) 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、条件式は次式ようになる。

$$N < 2(M_a - t_b) \quad (3.12)$$

場合 3 において、式 3.12 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、条件式は次式ようになる。

$$N > 2(M_b - M_a) + t_b + 1 \quad (3.13)$$

場合 4 において、式 (3.13) 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

$$split[0] = split[0] - \beta \quad (3.14)$$

$$split[1] = split[1] + \beta \quad (3.15)$$

(b) 車の流れが南北方向である場合

$$split[1] = split[1] - \beta \quad (3.16)$$

$$split[0] = split[0] + \beta \quad (3.17)$$

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。

3.2 サイクル制御

本研究では MODERATO におけるサイクル長計算¹⁾ を使用しており、このサイクル長計算では、飽和交通流量に対する、待ち行列量と流入流量を加えた量の割合を負荷率として計算し、サイクル制御の指標としている。ある現示 i における負荷率 ρ_i は次式で計算される。

$$\rho_i = (Q_{out} + k * E) / S \quad (3.18)$$

Q_{out} は流出流量を表しており、一周期に道路から交差点に流出する車の台数に等しい。 E は交差点での待ち行列台数であり、 S は飽和交通流率「台/時」を表している。 k は E の使

用率であり、使用率が高いと待ち行列がそのまま残っていることを示している。なお負荷率を計算する際、その現示において最も負荷率の高い方向からの負荷率を、その現示の負荷率として採用する。

以上の値から求めた ρ を用いて目標サイクル値を計算する。目標サイクル長 C は次式で計算される。

$$C = (a_1 * L + a_2) / (1 - a_3 * \sum \rho_i) \tag{3.19}$$

L は損失時間、 a_1, a_2, a_3 は係数をあらわしている。損失時間というのは、クリアランスにより車が一台も通過できない時間のことである。

4. 検証実験と結果

4.1 実験環境

本研究では、格子状の交通シミュレータを用いて実験を行った。それぞれの交差点は図3のように座標が与えられ、隣接する交差点は道路で接続されている。実際に使った交通シミュレータは図5であり、この図は4x4の格子状ネットワークを表している。これらの道路での車の動きはASEP(Asymmetric Simple Exclusion Process:非対称単純排他過程)モデル⁸⁾というセルオートマトン法的一种を採用しており、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られる。車は図4のように前のセルが他の車にて占有さ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 実験1

実験1では、交通シミュレータを用いて今回の提案手法の性能を調べた。この実験ではOliveiraらによる手法³⁾を比較対象として用いた。ここで、比較手法の概要について説明する。個々の交差点にはエージェントが配置されており、このエージェントは信号機の青信号の振り分けを東西60秒-南北30秒(WE/EW優位)と、東西30秒-南北60秒(NS/SN優位)にする二つの戦略を持っている。それぞれのエージェントは自身の戦略と隣のエージェントの戦略と四方から流入してくる車の台数から、自身のコスト関数を計算する。そしてそれぞれのエージェントで求めたコストを足し合わせることでグローバルコスト関数を求め、そのグローバル関数が小さくなるようにエージェントは自身の戦略を制御していく。以上の

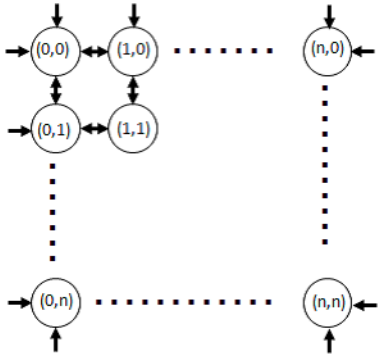


図3 交通シミュレータ概要
Fig. 3 Outline of traffic simulator

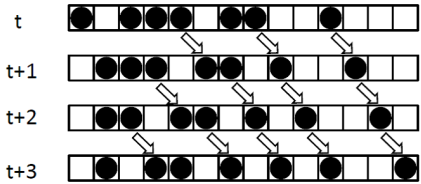


図4 ASEPモデルによる車の動き
Fig. 4 How of car to run on ASEP model

ような流れで比較手法で信号機制御を行っていく。今回の実験では、10x10の道路ネットワークで行い、y=2,3,6,7,8の東西方向とx=2,3,6,7,8の南北方向から10%の割合で車が投入され、その他の方向からは1%の割合で車が投入される。交差点間の道路のセル数は50、車間距離は4セルとし、停止した車は自身の手前4セルに車が存在すれば発車することができない。この実験での定数は、それぞれk=0.2, a1=1.0, a2=, a3=1, 損失時間は20ステップ、飽和流入量率はそのサイクル時間で交差点を通過することのできる最大交通流量とする。40000ステップ運転したのち、ネットワークに存在する総自動車数を比較した。

結果は図6となり、提案手法のほうが約30%小さくなるという結果が得られた。これはOliveiraによる手法では、東西:南北のスプリット値の振り分けが2:1か1:2の二通りしかなく、細やかなスプリット値計算ができなかったためと考えられる。

4.3 実験2

実験2ではサイクル変化がどのような影響を与えるかを調べた。サイクル制御を行うものとサイクルを175ステップで固定したものをを用いた。サイクル175ステップというのは実際の信号に直すと約1分弱ほどの時間であるが、サイクル長としては小さい値であり、交

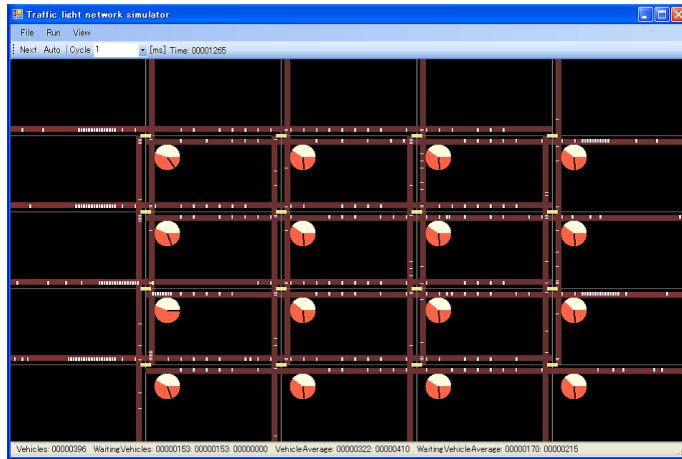


図 5 交通シミュレータ
 Fig.5 traffic simulator

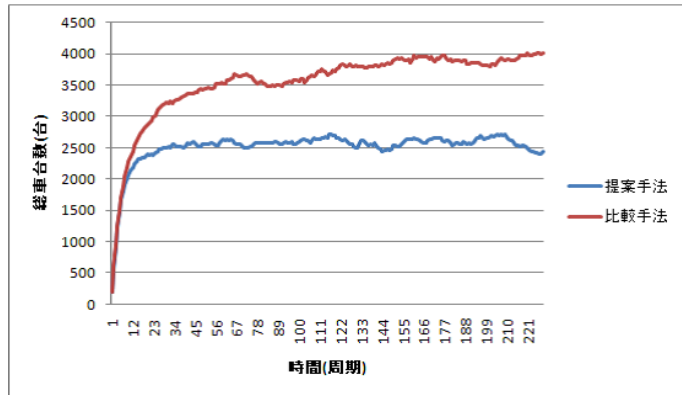


図 6 実験 1 における交通量の遷移
 Fig.6 Transition of traffic in experiment1

通量が大きい場合には適さない値である．したがって東西方向から 10 % という大きな交通量をながして車の流れを調べた．その他の南北方向からは 1 % の割合で車を投入し，それ以外は実験 1 と同じ環境で実験を行った．

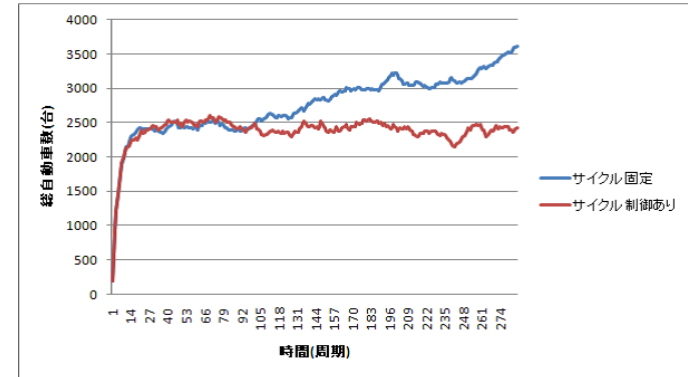


図 7 実験 2 における交通量の遷移
 Fig.7 Transition of traffic in experiment2

結果は図 7 となった．サイクルが小さい場合クリアランスにより車が通過できる時間が減ってしまい，交通量が大きくなるとどうしても処理できなくなってしまうことが結果から読み取れる．

4.4 実験 3

実験 3 ではスプリット値制御で用いられる隣接交差点間の制御の性能を検証した．実験には図 8 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．本来の交通ならば道路の車線数によって車の供給量の差ができるのだが，今回用いたシミュレータでは一つの車線しか持たないため，道路の速度を小さくすることで供給量差を疑似的に作り出している．

この実験では，隣接交差点間でスプリット制御を行うモデルと，行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． $\beta = 0.1$ とした．これは，事前に行った予備実験の結果 $\beta = 0.1$ が最も高いパフォーマンスを示したためである．一定時間シミュレータを動かした

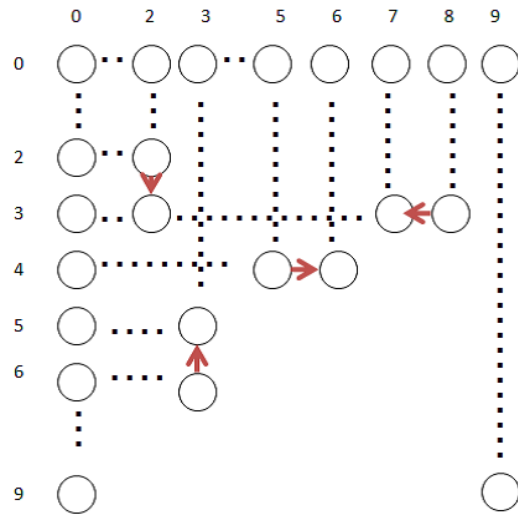


図 8 実験 3 で用いた交通ネットワーク
Fig.8 Traffic network in experiment3

後、車の総数を比較した。

実験結果を図 9 に示す。120000 ステップ後には、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

本論文では、自動分散制御を用いて、交差点に配置されたエージェントがスプリット値とサイクル値の二つの信号機パラメータを自律的に求めるモデルを考案した。パ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にスプリット値を計算し、交通量に応じてサイクルを計算するこのシステムは検証実験により高いパフォーマンスを得られることが確認できた。また、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期待できる。

現在、交差点に流入した車の台数から次の周期の信号機パラメータを求めているが、これは過去の情報を用いているために実際の交通からは少し遅れている。今後の研究では、上流の交通から近未来の交通状況を予測し信号機パラメータを決定するシステムを考えていか

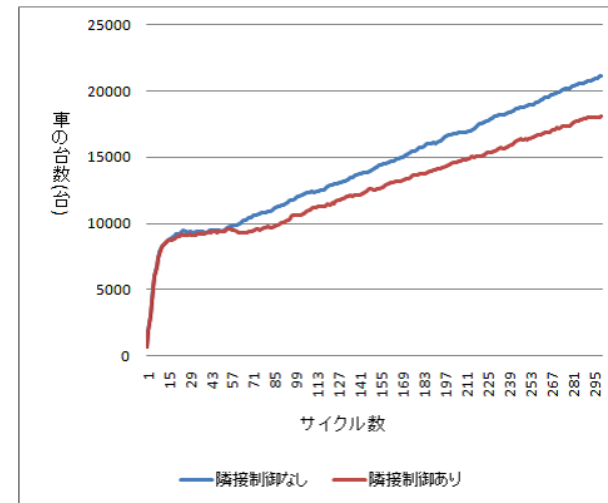


図 9 実験 3 における交通量の遷移
Fig.9 Transition of traffic in experiment3

なければならない。

参 考 文 献

- 1) 下口 義次, 小林 雅文, 端野 勝裕, 中倉 邦彦, 大谷 良雄, 斎藤 健, “鳥取交通管理センター高度化システムの構築”, SEI テクニカルレビュー・第 165 号 2004.
- 2) Javier J. Sa'nchez-Medina, Manuel J. Gala'n-Moreno, Enrique Rubio-Royo, “Traffic signal optimization in “La Almozara” district in Saragossa under congestion conditions, using genetic algorithms, traffic microsimulation, and cluster computing”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 132-141, March 2010.
- 3) de Oliveira, D. Bazzan, Ana Lesser “Using Cooperative Mediation to Coordinate Traffic Lights: a Case Study” Proceedings of Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 463 – 469, July 2005.
- 4) Zhang Jia Jie, Hunan, China, “Network of Multi-Agent Traffic Controllers”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage, pp.175-179, 2009 July.
- 5) 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.

- 6) 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.
- 7) 白井 高士, 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システムを用いた信号機オフセット制御方法の構築 ", 第 24 回人工知能学会全国大会, 2010.
- 8) 西成活裕, "渋滞学 ", 新潮社, 2006.