

マルチエージェントモデルによる 信号制御シミュレーションの検討

高橋 光紀¹ 篠田 孝祐¹ 諏訪 博彦¹ 栗原 聰¹

概要 :

交通渋滞は時間的損失だけではなく、経済的損失、環境汚染などの社会的問題を引き起こし、都市生活において深刻な問題となっている。この交通渋滞の問題を解消するために高度なカーナビゲーションシステムや、信号制御手法が提案されている。その中でも、各交差点に存在する信号機を制御するエージェントを配することで、交通流の変化に即応して信号機のパラメータ値を自律的に操作し、動的な交通流にも対応した研究がある。しかし、従来のシミュレーションモデルでは車の待ち台数から信号制御の有用性を評価していたため、個々の車の挙動についての評価までには至らなかった。そこで本研究では個々の車が道を通過する時間に着目したシミュレーションを行った。その結果、交通量の増加と共にグリーンウェーブが形成され、交通流が円滑化されたことを確認した。また、グリーンウェーブの発生に伴い、グリーンウェーブとは他方向に進行する車の通過時間について分散が大きくなつたことを確認した。

1. はじめに

近年の都市部にて恒常に発生する交通渋滞は、ドライバーの時間的損失だけではなく、輸送の遅れに伴う経済的損失や燃料消費の増加、さらには排気ガスの排出による環境汚染などの主要な原因として指摘されている。特に世界各国で環境問題に関する議論が活発に交わされていることもあり、交通渋滞は早急に解決すべき問題の一つである。交通渋滞解消のアプローチとして最適な交通情報の提供手法や信号制御システムの改善がある[1]。一般的な道路の場合、交通渋滞が起こりうる起点となるのは、主に交差点である。交差点では様々な方向からの車の通過を制御する必要があり、そのため交差点に設置される制御器が信号機である。交差点での交通流を滞留させることなく制御するには、信号機を制御するパラメータ値を適切に操作する必要がある。更に、朝夕のラッシュ時と昼間では交通量が大きく異なるように、交通流は時間の経過とともに変化する。また、突発的な事故や、イベントの開催などでも、交通流に変化が生じる。そのため、信号機の制御パラメータ値を交通流の変化に応じて動的に操作することが全体的な最適化には欠かせない。

これに対し、各交差点に存在する信号機を制御するエージェントを配し、エージェント同士が協調することで、効

果的に交差点同士が連携して信号機制御を行い自律的に信号のパラメータを制御する手法が研究されている。佐藤らは、ばねモデルを用いたスプリット制御を行うことで、各エージェントが間接的に協調し、低い計算コストと通信コストで即応性の高い制御システムを構築した[2]。白井らは、信号機制御のパラメータとしてオフセットに着目し制御を行っている[3]。各エージェントを直接的に協調させることで、隣接する信号機同士のオフセットを調整し、一定速度にて車が走行すると青信号が続く区間を形成する。その区間において赤信号にて停車せずに進むことができるようになる「グリーンウェーブ」を動的に発生させる。

どちらの研究も制御方法の有用性について、提案手法の有無で比較を行い評価を行っている。しかし、評価実験において、シミュレーションの領域内における、車の待ち台数について着目して評価しているため、個々の車の挙動についての評価を行うまでには至っていない。信号機は車の通過を排他的に制御するため、特定の方向の交通流に対して偏った信号制御を行った場合、他方向に対して影響があると考えられる。そのため、個々の車の挙動についても評価する必要がある。そこで、本研究では、マルチエージェントモデルにより信号制御を行った場合のシミュレーションについて、個々の車の通過時間に着目して評価し、検討する。

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications

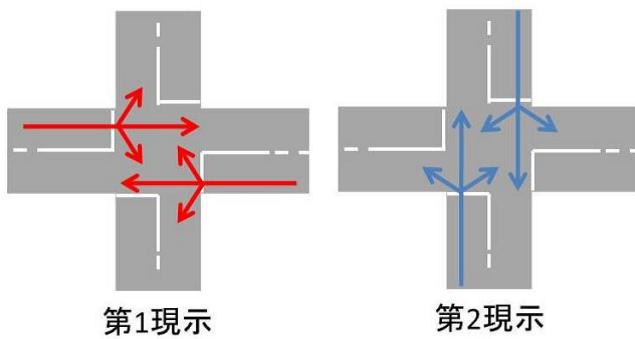


図 1 2 現示方式

2. 信号制御手法

一般的に信号制御は現示の決定、制御パラメータの決定の2段階によって行われる[4]。現示(phase)とは、信号周期のうちある交通流または交通流の組み合わせに対して交通圈を与える表示時間をいう。普通の4枝交差点では、図1に示す2現示が用いられる。一般に、現示数を増やして相交錯する交通流を分離する方が安全性が向上するが、現示の切り替え時に損失時間が生じるため、効率が低下し、交通容量が減少する。

信号制御パラメータは、現示を切り替えるタイミングを決定する。信号制御パラメータとして以下の3種類を用いる。

- サイクル長：信号1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：近隣交差点の信号機間における青信号開始時間のずれ。

なお、オフセットは、ある共通な基準時間からのずれを絶対オフセットという。また、交差点をそれぞれ独立で管理する制御を地点制御、道路に属する交差点を関連付けて管理する制御を系統制御、複数の道路に属する交差点をまとめて管理する制御を広域制御という。

信号制御には、大きく2つの方向に分けて考えることができる。スプリット制御とオフセット制御である。スプリット制御は、個々の信号機の赤と青の時間間隔を制御し、オフセット制御は隣接する信号機同士での赤や青が開始されるタイミングを制御するものである。

3. マルチエージェントによる信号制御手法

本研究ではマルチエージェントによる信号制御手法についてシミュレーションによる評価を行う。マルチエージェントによる信号制御手法は、各交差点に配置されるエージェントが、自身が管理する交差点に流入する車両数に関する情報を、隣接する交差点に設置されるエージェントから得られる局所的な情報を用いてお互いに協調を行い、

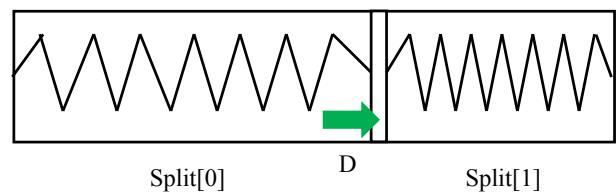


図 2 2 現示のばねモデル

それが自律的に信号機制御パラメータを調整する。調整するパラメータとしてスプリットとオフセットがあり、本研究で使用するそれぞれの制御手法について述べる。

3.1 スプリット制御

本研究では、スプリット制御にばねモデルを用いたスプリット制御モデル[2]を用いる。交差点における各エージェントは、各道路の交差点が青信号の状態の時に接続された各道路の交通流の情報を取得する。この情報から、各エージェントは、提案されたばねモデルに基づいて各現示のスプリット比をそれぞれ算出する。この時、各エージェントは局所的な情報をのみを用いてスプリット比の値を算出し、直接的に他のエージェントと相互に作用しないため、即応性と、低い通信コストの特徴をもつ制御となる。

2現示（赤信号と青信号）の信号が一般的な十字路の交差点に設置している場合のスプリット制御について考える。この時、2現示のうち、第1現示 $phase_1$ のスプリットが $split[0]$ と定義され、第2現示 $phase_2$ のスプリットが $split[1] = 1 - split[0]$ と定義される。ばねモデルの概略図を図2に示す。交通流は力であると考え、ばねを押すように力が加わる。ばねモデルの式は以下の式(1)として定義される。

$$K(C - Csplit[0]) + D = K(C - Csplit[1]) \quad (1)$$

C はサイクル長であり、 D は、 $phase_1$ と $phase_2$ の間の交通流の差であり、 K は1ステップ中の赤信号で停車している車の台数として定義されるばね定数である。またスプリットは以下の式(2)として定義される。

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

しかし、式(2)では $split[0] \geq 1$ もしくは $split[1] \geq 1$ となる場合があり、 $split \geq 1$ では1サイクルよりも大きくなるため、信号の現示を変更することができない。従ってスプリットの最大値を0.9、最小値を0.1とする。

3.2 オフセット制御

オフセット制御は、2つの連続する交差点間の交通流に基づいて算出される。交通量があらかじめ設定した閾値を越えたエージェントが起点となり、協調の提案が隣接エージェントにバケツリレーの要領で提案されていくことで、グリーンウェーブを形成する一連の交差点集合を動的に組

織化する [3]. 各エージェントは自分が管理する交差点での交通量から、次のいずれかの状態（モード）をとる。

- 起点モード：制御の中心となる
 - 従属モード：起点エージェントにしたがって制御を行う
 - 独立モード：他のエージェントと協調を行わない
- グリーンウェーブ形成までの各エージェントの動作として5つのステップがある。

Step1

道路ネットワーク中のどのエージェントでも起点モードとなることができる。エージェントが起点モードとなるための条件は、管理する交差点の車流入総数がある閾値を越えている。あるいは、自身が従属モードであるが、起点モードとなっている他のエージェントを管理する交差点の車流入総数を、自分が管理する交差点の車流入総数が越えていることである。

Step2

起点モードとなったエージェントは、隣接交差点との間において、交通量が閾値を越えている場合、隣接する交差点の信号機を管理するエージェントに対しオフセット調整の提案を行う。起点モードとなったエージェントは隣接する交差点のエージェントに対し提案を行う際、自身の青信号開始時間、隣接する交差点との間の道路における交通量から算出したオフセットの値、自分が管理する交差点の車流入総量、および自身から隣接する交差点までの距離を送信する。

Step3

起点モードとなったエージェントから提案を受け入れた隣接する交差点のエージェントは、起点モードとなったエージェントの提案を受け入れたことを意味する従属モードとなり、連携してオフセットの調整を行う。

Step4

従属モードとなった、交差点のエージェントは、隣接する交差点との間の道路の交通量が閾値を越えている場合、隣接する交差点の信号機を管理するエージェントに対しオフセット調整の提案をバケツリレーの要領で伝達する。従属モードのエージェントは、自身の青信号開始時間、隣接する交差点との間の道路における交通量から算出したオフセットの値、起点モードとなったエージェントの車流入総量、及び起点モードとなったエージェントからの距離を隣接する交差点に送信する。ただし、提案の相手が従属モードかつ、起点モードとなったエージェントからの距離が、自身よりも近い場合、提案は行わない。これは提案のための情報伝達経路がループ構造を形成してしまうことを防ぐためである。

Step5

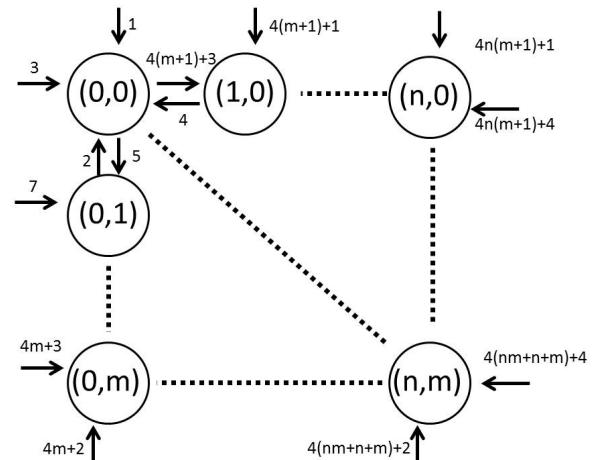


図3 シミュレーション環境

3ステップと同様に、提案を受け入れたエージェントは従属モードとなる。このように提案の伝達を繰り返し、グリーンウェーブを形成する。

4. 交通シミュレータ

交通渋滞は、ドライバーの時間的損失や輸送の遅れに伴う経済的損失など、時間の損失が主要な問題となっている。そのため、車が道路を通過する時間についても測定が可能なシミュレータを作成する。シミュレータでは、道路上の車の動についてASEP(Asymmetric Simple Exclusion Process:非対称単純排他仮定)モデルを用いて表現する[5]。ASEPモデルでは車が1台入ることができるセルを用いて、道路を離散的なセルの列として考える。車の動きは車が隣のセルに移るということで表現される。このモデルでは、車は定められた方向のみ移動することができ、セルには2台以上の車を入れることはできない。以上から、このモデルは比較的現実の交通流に近い現象が再現される。

シミュレータ内の道路ネットワークでは各交差点に座標を割り当てた。また、各交差点に接続された道路についても番号を割り当てた(図3)。シミュレータでは、車は表示される道路ネットワークの外部から供給される。外部からの車の流入量、交差点での進行方向は、それぞれ確率を設定することで表現する。

これらの条件の他に、信号制御手法について個々の車に着目したシミュレーションを行うために、発生した車一つ一つに固有の番号を与える。固有の番号を与えることによって個々の車を識別することが可能になり、個々の車がどのように移動したかの認識することが可能になる。また、それぞれの車は、現在地、通過時間、グリーンウェーブが発生している交差点を通過したかどうかの情報を持つ。現在地は交差点に接続された道路の番号と、道路のセルの番号で表す。通過時間は、車がシミュレータの領域に流入してから、領域の外部に出るまでの時間を測定する。グリー

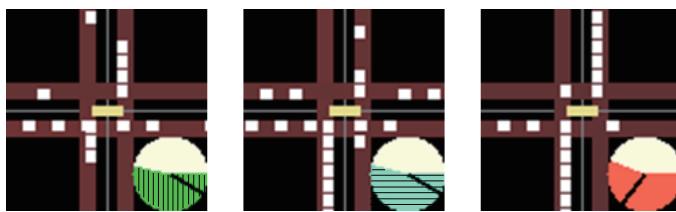


図 4 各モードの表示

ンウェーブが発生している交差点を通過したかの判断は、通過する交差点が、起点モードもしくは従属モードであった場合、グリーンウェーブを発生させている交差点を通過したとみなす。

また、シミュレータ上でエージェントの状態を図 4 のように示す。左の緑色の状態が起点モード、真ん中の水色の状態が従属モード、右のオレンジ色の状態が独立モードのエージェントである。色のついた場所にあるときを第 1 現示とし、白色の場所にあるが第 2 現示を表示である。車は、第 1 現示では左右方向へ移動することができ、第 2 現示では上下方向に移動することができる。

5. 評価実験

マルチエージェントを用いた信号制御手法について評価を行う。使用するシミュレータは ASEP モデルに従うため、時間はステップ数で、距離はセルの個数で表す。ここでは実験環境として、 10×10 の道路ネットワークを用意した。ここで隣接する交差点間の距離は全て 50 セルとし、車の速度は 1 セル/ステップとした。流入した車は各交差点で右左折は行わない。この条件より実験を行う。

実験 1

10×10 の比較的大きな格子状の道路ネットワークに適用し、道路ネットワーク全体においてグリーンウェーブ効果が見られるかどうかを検証した。信号制御手法として、前述のスプリット制御のみを行った場合と前述のスプリット制御、オフセット制御の二つの制御を行った場合の信号待ちの車台数を比較した。交差点 (3,0) の北側、交差点 (9,5) の東側、交差点 (6,9) の南側から 10 % の確率、交差点 (6,0) の北側、交差点 (3,9) の南側から 15 % の確率、交差点 (0,5) の西側から 20 % の確率で、それぞれ車を流入させた。また、これ以外の方向からの車の流入確率はそれぞれ 2.5 % とした。このとき、各信号機のサイクル長は 400 ステップとした。

実験 2

次に、グリーンウェーブについて個々の車の通過時間に着目して評価を行った。車の通過時間を各車が流入してから外部へ流出するまでの時間を通過時間と定義し検証した。この実験の信号制御手法として前述のスプリット制御とオフセット制御が各交差点で行われて



図 5 実験 1:検証終了時のシミュレータの様子

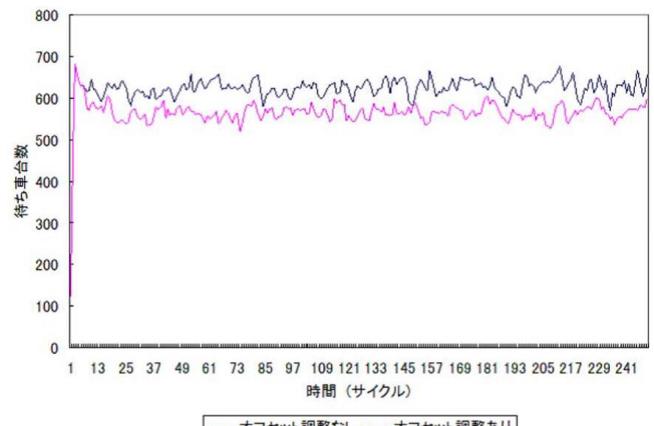


図 6 実験 1:待ち台数の変化

いるものとする。交通量が少なく、グリーンウェーブが発生していない場合と、交通量が増加し、グリーンウェーブが発生した場合の車の通過時間について比較した。車の流入確率は、10000 ステップまでは外部から車が流入する確率を 2.5 % とした。そして、10000 ステップから 20000 ステップまでは、交差点 (6,0) の北側が 15 % の確率、交差点 (0,3), (0,6) の西側が 20 % の確率、交差点 (6,9) の南側と交差点 (9,3) と交差点 (9,6) の東側が 10 % の確率でそれぞれ車を流入させた。また、それ以外の方向からの車の流入確率は 2.5 % とした。この条件のもと、各車の通過時間について評価を行った。各信号機のサイクル長は 200 ステップとした。

実験 1 の結果を図 5, 図 6 に、実験 2 の結果を図 7, 図 8, 図 9 に示す。

実験の図 5, 図 7 から、実験 1 では交差点 (0,5) と交差点 (9,5) を結ぶ道路、交差点 (3,0) と交差点 (3,9) を結ぶ道路、及び交差点 (6,0) と交差点 (6,9) を結ぶ道路上のエージェントが従属モードとなりグリーンウェーブを形成するように



図 7 実験 2:検証終了時のシミュレータの様子

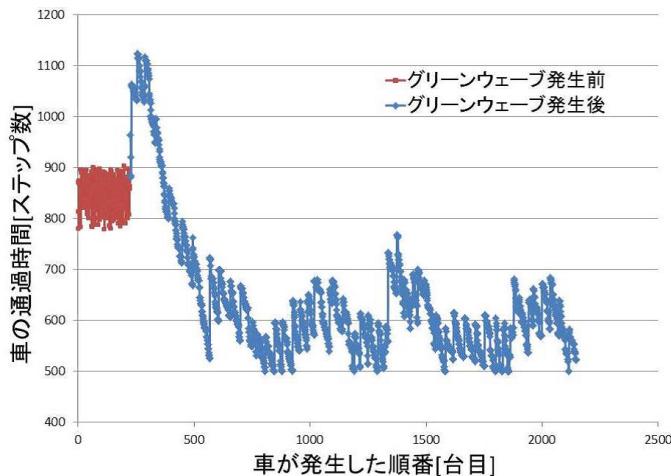


図 8 実験 2:交差点 (0,3) の西側から発生した車の通過時間

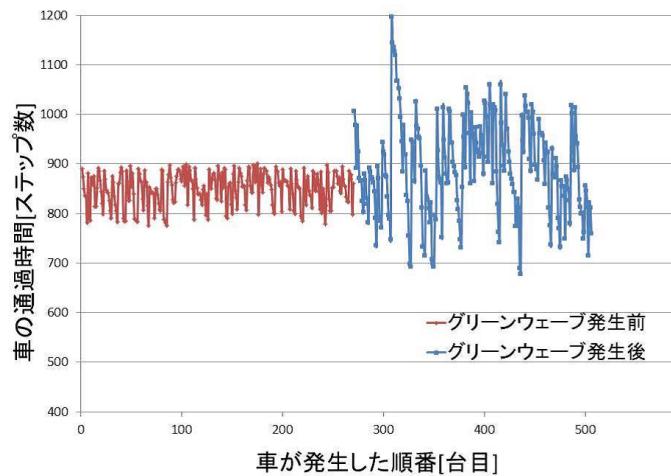


図 9 実験 2:交差点 (0,0) の北側から発生した車の通過時間

制御が動作していることが分かる。実験 2 では交差点 (0,3) と交差点 (9,3) を結ぶ道路、交差点 (0,6) と交差点 (9,6) を結ぶ道路、交差点 (6,0) と交差点 (6,9) を結ぶ道路でグリーンウェーブを形成するように制御が動作していることを確認した。

次に実験 1 の図 6 から、スプリット制御に加えオフセッ

ト制御を行った場合、待ち台数が低い数値であることが分かる。更に実験開始時から終了時までの平均値を比較すると、オフセット制御を行わない場合は 622 台であることに対し、オフセット制御を行った場合は 564 台となった。これらの結果より、オフセット制御を行うことで更なる交通流の円滑化が行えたと言える。グリーンウェーブの形成によって、交通量の偏りが大きいとき、より良い効果が得られることが確認できた。また、交通量の多い幹線道路が複数存在するような道路ネットワーク中においても、エージェントの協調から、自律的に広域制御を行うことが確認できた。

実験 2 の結果である図 8 は交差点 (0,3) の西側から流入した車の通過時間を示している。縦軸が車が流入してから外部へ流出するまでの時間、横軸が発生した車の順番である。グラフの赤い部分が各交差点がグリーンウェーブを形成する前に発生した車の通過時間であり、青い部分が車の発生量が増加し、グリーンウェーブを形成するために各交差点が協調しているときに発生した車となっている。この結果より、交通量が増加したにもかかわらず車の通過時間が短くなっていることから、グリーンウェーブを形成することで、信号で停車することが減り、スムーズに移動することができると言える。

図 9 は交差点 (0,0) の北側から流入した車の通過時間を示している。この結果も同様にグラフの赤い部分が各交差点がグリーンウェーブを形成する前に発生した車であり、青い部分が車の発生量が増加し、グリーンウェーブを形成するために各交差点が協調しているときに発生した車となっている。この結果より、グリーンウェーブ発生前では各車の通過時間が安定しているのに対し、他の交差点の交通量が増加したことによるグリーンウェーブの形成の影響を受けて、車の通過時間の分散が大きくなることが確認できた。以上より、交通量が増加した場合でも、マルチエージェントモデルによる信号制御が動作し、交通流が円滑化されたことを確認できた。また、グリーンウェーブを形成するオフセット制御によって、グリーンウェーブの向きではない交通流は通過時間の分散が大きくなること確認した。

6. おわりに

本研究では、マルチエージェントモデルによる信号制御シミュレーションについて、車の通過時間に着目して評価を行った。シミュレーションでは信号制御としてスプリット制御とオフセット制御の 2 つの制御を行う。この制御について個々の車が通過する時間について評価を行った。その結果、交通量の増加に伴い、信号の制御が動作し、交通流の円滑化が行われることを確認した。また、グリーンウェーブの向きではない交通流は通過時間の分散が大きくなることを確認した。

今後の課題として、個々の車が識別されたことから、そ

それぞれの車のルートを決定し、より現実に近いシミュレーションを行う必要がある。また、車の停止や移動中などの状態情報を交差点に送信することで、車路間通信を実現し、更なる信号制御の精度向上が考えられるため、今後拡張する予定である。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、白井嵩士様には、研究について助言して頂き深く感謝します。

参考文献

- [1] 玉置洋, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾 正行, 栗原 聰, 複数の交通情報を効率的に利用する最適な交通情報提供手法の構築, 第 23 回人工知能学会全国大会論文集, CD-ROM, 2009
- [2] 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 聰, マルチエージェントモデルによる自律的信号制御システムの構築, 第 22 回人工知能学会全国大会, 2008
- [3] 白井嵩士, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾 正行, 栗原 聰, マルチエージェントモデルによる信号機オフセット制御法の提案, 第 24 回人工知能学会全国大会, 2010
- [4] 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, オーム社, 2008.
- [5] 西成活裕: 渋滞学, 新潮社, 2006.