

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考察

高橋 光紀¹ 篠田 孝祐¹ 諏訪 博彦² 栗原 聡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、信号制御手法に関する研究が盛んに行われている。我々もこれまで、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手法を提案している。しかし、この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、制御が行われることで車がどのように移動しているかまでの評価には至らなかった。そこで本研究では、待ち台数だけではなく、車の通過時間についても評価を行った。この評価結果より、制御方法について考察する。

1. はじめに

近年の都市部にて恒常的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、そのために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。しかしながら、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。以上のような問題に対し、GAを用いたパラメータの最適化を行う手法や、強化学習と関数近似アルゴリズム、またはファジィ制御を組み合わせた

制御を行うことで対応する手法が提案されている [2][3][4]。更に、適応信号制御について実環境で試験をする研究や、振動同期を用いた交通信号機制御法など、多様な研究が行われている [5][6]。その他には、プローブ情報を用いた異常検出の提案や、車両や歩行者の位置、進行方向を活用した制御システムの提案など、新たな交通流検出技術の活用による交通流の制御も行われている [7][8]。しかし、これらの研究では小規模な道路ネットワークや限定的な環境の検証にとどまっており、現実の様々な道路ネットワークに導入する際には、計算コストやアルゴリズムの最適化、実環境における交通流検出精度の検証などが問題として考えられる。そこで、我々は、これまで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を提案している [9][10]。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 [9]。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 [10]。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する「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

¹ 電気通信大学大学院情報システム学研究科
The University of Electro-Communications
² 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
NARA Institute of Science and technology

有無で車の待ち台数の比較を行い評価を行っている。信号機は車の通過を排他的に制御するため、車の待ち台数を減少させることが効率的な信号制御といえる。しかし、車にとっての円滑な走行とは、出発地点から目的地までの移動時間が短縮されることとなる。そのため、車の移動時間に着目した評価も重要である。先行研究の評価実験において、シミュレーションの領域内における、車の舞台数について着目して評価をしているため、車の通過時間についての評価を行うまでには至っていない。そこで、本研究では、マルチエージェントモデルを用いた信号制御を行った場合のシミュレーションについて、待ち台数に加えて、車の通過時間についても評価を行うことで、信号制御方法の効果について考察する。

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 [11]。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圏を与える表示時間をいう。

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し、サイクル長 (信号1周期の長さ)、スプリット (1回のサイクル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) の3種類が使用される。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を使用し、評価、考察する。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と、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のみを用いてお互いに協調を行い、それぞ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 [9] 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。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 [10]。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

隣接する交差点の信号機間の相対オフセットは、交差点間の道路の交通量から算出する。道路の対向する交通量の偏りが多い方向を優先するオフセットを導入する。ここで、 p_l 多い方向の交通量、 p_s を少ない方向の交通量とし、 γ と δ を閾値としたときに、 $\frac{p_l}{p_s} \geq \gamma$ を満たすとき、すなわち交通量の偏りが大きい場合、相対オフセット O_r を

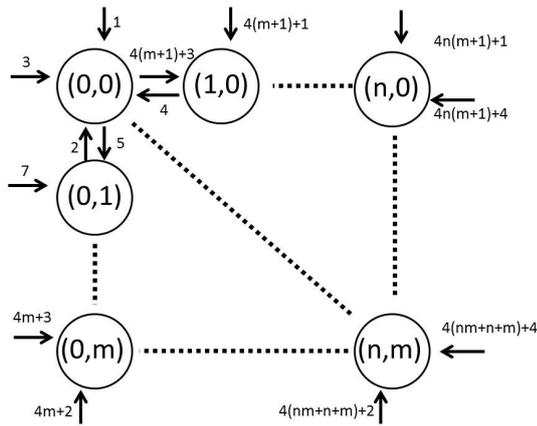


図 1 シミュレーション環境

$$O_r = \frac{L}{v_l} \quad (3)$$

で与える。 L は信号機間の距離を表し、 v_l は交通量の多い方向の車の速度を表す。 相対オフセットの値が式 (3) よりも大きいときは、優先する方向の車が交差点に到達する時にはまだ赤信号であり、無駄な待ち時間が生じる。このため式 (3) の値は、相対オフセットの最大値となる。また、 $\gamma > \frac{p_l}{p_s} > \delta \geq 1$ を満たす、交通量の偏りが小さい場合、交差点間の道路の対向する交通量の日に対する 1 次関数の相対オフセット

$$O_r = \frac{L \left(\frac{p_l}{p_s} - \delta \right)}{v_l (\gamma - \delta)} \quad (4)$$

を与える。

4. 交通シミュレータ

本研究では車の挙動について評価実験を行うために、シミュレータを作成した。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 [12]。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 1)。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。流入確率は、各道路に対して 1step ごとに 1 台の車が流入する確率を表す。そのため、100% では 1step ごとに車が流入し、1% では 100step に 1 台程度の車が流入する。



図 2 各モードの表示

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た。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。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。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、グリーンウェーブが発生させている交差点を通過したとみなした。

また、シミュレータ上でエージェントの状態を図 2 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、右の橙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 及び 1×20 の道路ネットワークを用意して使用した。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。また、閾値を [10] より $\gamma = 1.5$ と $\delta = 1.1$ とした。車の通過時間は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。この条件より実験を行う。

5.1 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車の待ち台数と、通過時間に着目し、信号制御方法の評価を行った。この実験では、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と通過時間を比較した。車の流入率が 20% の道を 1 つ、15% の道を 2 つ設定し、その道と対向する 3 つの道の車の流入率を 10% として設定した。この流入率の道は 10000step 毎に場所を変更する。また、それ以外の道は全て 2.5% の確率で車を流入させ、50000step ま



図 3 実験 1:検証終了時のシミュレータの様子

でシミュレーションを行った。このとき各信号機のサイクル長は 200 ステップとした。

5.2 実験 2

次に、対向する交通量の差が発生した場合の信号制御について検証を行うために 1×20 の道路ネットワークによる実験を行った。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車の通過時間を比較した。東西の車の流入率を 22.5% として設定し、30000step と 60000step のときに東側の車の流入率を 5% 減らした。また、北側、南側の車の流入率は 5% として 100000step までシミュレーションを行った。このとき各信号機のサイクル長は 400step とし、流入した車は各交差点で右左折を行わない。

5.3 実験 3

実験 2 と同様に 1×20 の道路ネットワークを使用し、交差点に流入する車の総量が同一であり、対向する交通量の差がある場合について実験を行った。西側の車の流入率を 15%，東側の車の流入率を 5% とした場合と、東側の車の流入率を 20%，西側の流入率を 0% とした場合の車の通過時間についてスプリット制御のみを行った場合と、スプリット制御、オフセット制御の二つを行った場合を比較した。両方の設定において、北側、南側の車の流入率は 5% として 50000step までシミュレーションを行った。この時の各信号機のサイクル長は 200step とし、流入した車は各交差点で右左折を行わない。

5.4 実験結果

実験 1 終了時のシミュレータの様子を図 3 に、実験 1 を 5 回行った平均の結果を図 4、図 5 に示す。実験 2 を 5 回行った平均の結果を図 6、図 7 に示す。実験 3 の結果を図 8 に示す。

実験の図 3 から、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制御が動作していることを確認した。

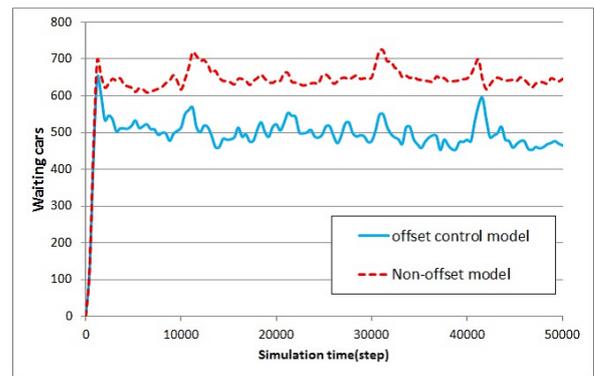


図 4 実験 1:待ち台数の変化

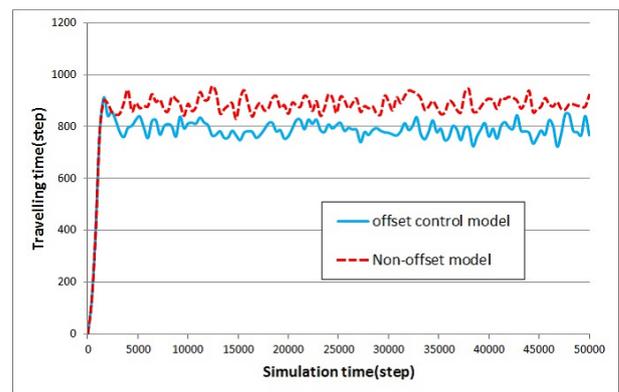


図 5 実験 1:通過時間の変化

次に実験 1 の時間による待ち台数の変化を図 4 に示す。この結果から、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 641 台/step であることに對し、オフセット制御を行った場合は 469 台/step となった。また、実験 1 において、全車両の通過時間について、400step ごとに平均とした値を図 5 に示す。この結果からもスプリット制御に加えオフセット制御を行った方が、通過時間の平均が短い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通過時間の平均値を比較すると、オフセット制御を行わなかった場合は 888step であることに對し、オフセット制御を行った場合は 798step 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ると言える。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 の時間による待ち台数の変化を図 6 に示す。この結果から、スプリット制御に加えてオフセット制御を行った場合、対向する交通量の差が大きくなるにつれて、スプリット制御のみよりも効果的な制御が行えていることが分かる。次に図 7 は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、

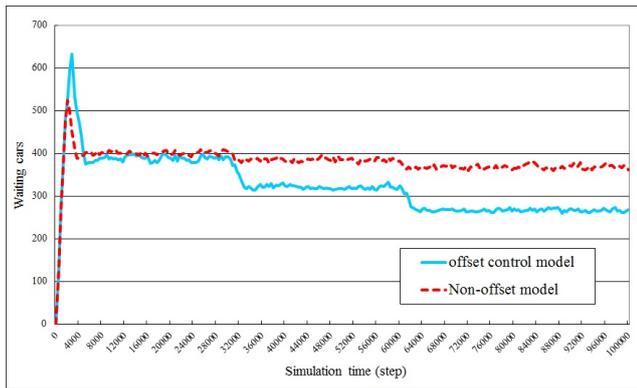


図 6 実験 2:待ち台数の変化

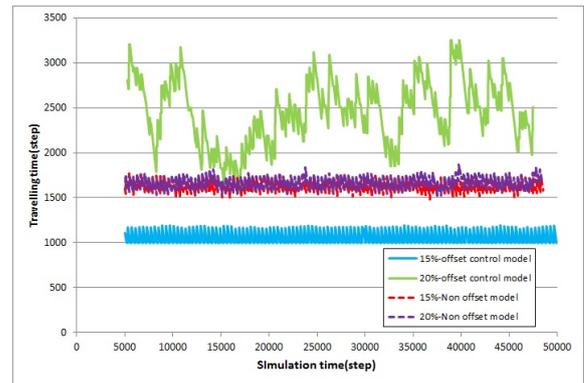


図 8 実験 3:西側から発生した車の通過時間

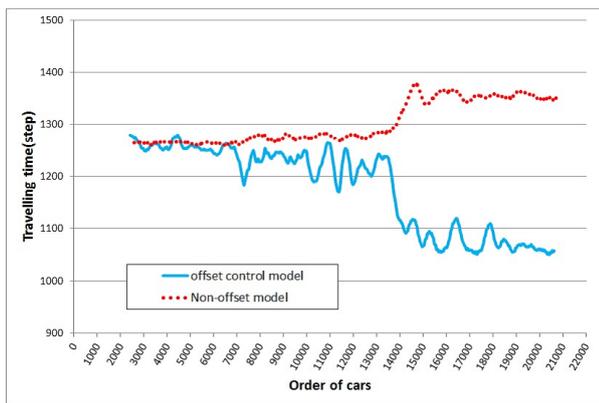


図 7 実験 2:西側から発生した車の通過時間

横軸が発生した車の順番である。赤い点線がスプリット制御のみを行った結果を示し、青い線がスプリット制御に加えオフセット制御も行った結果を示している。この結果より、オフセット制御を行った場合、交通量の差が大きくなるにつれて、通過時間が短くなるように制御することができていることを確認した。この結果より、オフセット制御を行うことで交通量の差がある場合でも効果的な信号制御を行うことができ、交通流の円滑化が行えると言える。

実験 3 において西側から流入した車の通過時間の変化を図 8 に示す。スプリット制御のみを行った場合では流入量に関わらず 1600step 程度で通過することができる制御になっている。これに対し、オフセット制御も加えて行った場合では、西側からの流入率が 15%、対向する交通流が 5% の場合では 1100step 程度で通過することができる制御になっているが、西側からの流入率が 20% で対向する交通流が無い場合では通過時間が最長で 4322step、最短で 1550step となり、他の制御と比較して著しく通過時間が長い制御となった。これらの結果より、使用したオフセット制御は対向する交通流がある場合安定してグリーンウェーブを形成することが可能であると言える。

6. 考察

実験 1, 実験 2, 実験 3 の結果より、スプリット制御, オフセット制御それぞれについて考察する。

スプリット制御は、実験 1 において 4 回の交通量の変化に対応し制御を行っていることから、自律的な制御が行えていることが分かる。しかし、実験 2 では交通量が増え、シミュレータ領域内に流入する車の総量は減少したにもかかわらず、待ち台数が少なくなるような制御をすることはできなかった。この要因として、本研究で用いたばねモデルによるスプリット制御は、現実ごとの交通流の変化に着目して制御しているため、東西どちらかの交通量の変化に対応する制御ではないことがある。また、東西方向の交通量が減少したことに伴って、南北方向の交通流を通すスプリットが増加したのだが、実験 2 で用いた 1×20 の道路ネットワークでは南北方向の車が滞留することがほとんどないモデルであるために待ち台数が減少しなかったと考察する。

オフセット制御は、スプリット制御のみを行ったモデルよりも実験 1, 実験 2 の両方において、待ち台数、通過時間共に、効率的な制御である結果となった。本研究で用いたオフセット制御は対向する交通流の交通量の差によってオフセットを変更し、動的にグリーンウェーブを形成する制御となっている。そのため、東西南北 4 方向のどの交通流の変化にも対応することが出来るようになり、スプリット制御の南北または東西の 2 方向の交通流の変化よりも複雑な交通流の変化に対応することが可能となる。実験 1, 実験 2 のどちらも対向する交通流の量に差が発生する設定でシミュレーションを行っていたため、オフセット制御が、この交通量の差に対応するようにグリーンウェーブを形成することで、円滑な交通流を実現したと考察する。

しかし、実験 3 の結果から、対向する交通量の差があった場合でも対向する交通流が無い場合、安定したグリーンウェーブを形成することが困難であることがわかる。この要因として、グリーンウェーブが形成されることによって大量の車が通過することと、ほとんど車が通過しないことが繰り返されるためであると考察する。これは、グリーンウェーブが形成される最初の交差点の赤信号で滞留する車の集団が、青信号と同時に進行することで大量の車が進行し、再度最初の信号が赤になった時に後に続く車がなくな

ることが繰り返されるため発生する。そのため、対向する交通流が無い場合、交通量が急激な変化を繰り返す。この急激な変化に対応するようにグリーンウェーブを形成し、解消することを繰り返すため、安定してグリーンウェーブが形成されず、実験3の結果のようになったと考察する。

7. 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、車の待ち台数に加えて通過時間についても評価を行い考察した。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つの制御を行った。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、交通量の変化に伴い、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、本研究で使用したオフセット制御は対向する交通流がある場合、安定してグリーンウェーブが形成されることを確認した。評価より、スプリット制御は東西、南北の2方向の交通流の変化に対応し、オフセット制御では東西南北の4方向の交通流の変化に対応可能であると考えられる。

今後の課題として、対向する交通流が無い場合でも安定したグリーンウェーブを形成する信号制御の構築や、スプリット制御、オフセット制御の二つを協調した制御の構築が考えられる。

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 聡, "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] 西原稔貴, I Gede Pasek Suta Wijaya, 松本駿太, 上瀧剛, 内村圭一, "マルチエレメント GA による道路交通信号パラメータの最適化と実環境における検証", 電子情報通信学会 信学技報, pp 263-268, 2012
- [3] Weirong Liu, Jing Liu, Jun Peng, Zhengfa Zhu, "Cooperative Multi-agent Traffic Signal Control System Using Fast Gradient-descent Cunction Approximation Cor V2I Networks", IEEE ICC Mobile and Wireless Networking Symposium, pp 2562-2567, 2014
- [4] Wei Lu, Yunlong Zhang, Yuanchang Xie "A Multi-Agent Adaptive Traffic Signal Control System Using Swarm Intelligence and Neuro-Fuzzy Reinforcement Learning", IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, pp 233-238, 2011
- [5] Joseph K.Lam, Sinisa Petrovic, Perry Craig "Adaptive Traffic Signal Control Pilot Project for the City of Surrey", TAC Annual Conference, 2011
- [6] 西川郁子, "振動同期を用いた交通信号機制御法について", システム/制御/情報, Vol52, No.5, pp 163-168, 2008
- [7] 赤塚裕人, 高須淳宏, 安達淳 "プローブカーを用いた自動交通異常検出", 電子情報通信学会 信学技報, pp 13-18, 2012
- [8] 麻生敏生, 長谷川孝明, "高度デマンド信号制御方式", 電子情報通信学会 信学技報, pp 25-30, 2011
- [9] 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制御システムの構築", 第22回人工知能学会全国大会, 2008
- [10] 白井嵩士, 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
- [11] 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, オーム社, 2008.
- [12] 西成活裕: 渋滞学, 新潮社, 2006.