

マルチエージェントモデルによる分散型リアルタイム信号機制御システム

Distributed and Real-time Traffic Light Control System using Multi Agent Model

白井 嵩士*¹
Takashi Shirai

小中 裕次郎*¹
Yujiro Konaka

矢野 純史*²
Junji Yano

西村 茂樹*²
Shigeki Nishimura

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*4}
Satoshi Kurihara

*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

*⁴JST CREST

JST CREST

Traffic jam is one of critical issues in urban life. By which, many social problems, for example, time loss, economical loss, and environmental pollution are caused. There are two typical methods for solving traffic jam, improvement of car navigation system and control of traffic lights. We focus on control of traffic lights. Existing traffic light control system is basically centralized control type and lacks robustness and scalability. If the central computer becomes breakdown, all traffic lights received the damage of it. In this paper, we propose a new traffic light control system based on multi-agent model. The result of simulation tests shows that our model makes it possible to manage traffic light more efficiently.

1. はじめに

近年の都市部に於て恒常的に発生する交通渋滞は、時間的損失や環境汚染などの様々な問題の主要な原因として指摘されていることから、早急に解決すべき問題の一つである。交通渋滞解消の手段としては、(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 [玉置 10] 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近年コンピュータ制御によるシステムが運用がされているものの、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。

一般道路の場合、交通渋滞が起こりうる起点となるのは交差点である。交差点では信号機により様々な方向から車両の通過を制御する必要がある。しかし信号機により、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、渋滞発生のボトルネックとなる可能性が高い。交差点での交通流を制御するには、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。

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る。もう 1 つはリアルタイムに計測される交通流を管制センターで管理し、自動的にパラメータを制御する方式であり、日本においては MODERATO と呼ばれるシステムなどの運用が導入されている(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事前に測定しておき、ラッシュ時や夜間、

日中などそれぞれに対応させて算出したパラメータを、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、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。後者の MODERATO に代表される管制センターによる制御方式にはいくつかの種類が存在するが、基本的には、道路に設置されるセンサーにて車両の通過を感知して交通流を推定し、その情報を基に信号機を制御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、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。また、本論にて取り上げる交差点間の信号機の制御を連携させる制御については、予め連携を行う交差点集合が設定されており、一部の交差点を管理しておらず、交通状況の変化への対応が不十分である。このため、次世代の信号機制御に向けたさらなる知的制御方式の登場が望まれる。

このような背景において、従来の管制センターによる制御を前提とし、新しい信号機制御方式を開発する研究が行われている。代表的なものとして、遺伝的アルゴリズム(GA)による最適解の探索の手法 [高橋 03][Sanchez-Medina 10] が挙げられる。GA を用いることで、交通流の改善が大いに期待される一方で、制御するエリアの拡大に伴い、計算コストが指数関数的に増加するにより、最適解探索に時間がかかり、リアルタイム性が損なわれる可能性が指摘される。

次世代の信号機制御に求められるのはリアルタイムに得られる道路状況に即応できるシステムであり、そのためには交

連絡先: 白井 嵩士, 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:shirai@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

差点に設置される信号機が自律性を持ち、交差点同士が自律協調することで道路状況に即応できる枠組みが必要であると考える。この立場に関する研究としては、強化学習法を用いる方法 [参沢 00][Oliveira 05] や、位相振動子を導入した手法 [西川 08] などが挙げられる。それぞれ先駆的な研究であるのだが、これらの研究では問題が単純化され、後述する信号機の制御に用いられるパラメータのうち、一部のみに着目したり、極小規模な道路ネットワークによる検証に止まっており、現実の複雑な道路ネットワークに導入するためには、アルゴリズムや計算コストの再検討が必要となる。

そこで、本論では、各交差点にその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、エージェント同士にて協調することで、効果的に交差点同士が連携して信号機制御を行う方法を提案する。これはマルチエージェントによる自律分散型の制御であり、連携を行う交差点集合を交通流にあわせて変化させる点に注目することで、従来の制御方式と比較して柔軟性の高い制御が可能である。実現性を念頭に置いた設計に重きを置き、今回はシミュレーションによる基本的な有用性の検証を行った。

以降第 2 章で信号機を制御する上での基本的なパラメータと、その中で本研究にて着目する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. 着目する信号機制御パラメータ

交差点では複雑な交通流が形成され、同時に交通事故や交通渋滞が発生しやすい場所である。信号機はこの交通流を円滑に対処することを目的として設置される。一般的に信号機の制御は、現示の決定と制御パラメータの設定の 2 段階によって行われ、4 枝交差点では 2 現示方式がしばしば採用される。また右折専用車線が設けられている場合、右折専用信号による現示が追加される場合もある。信号機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。制御パラメータは、サイクル長 (信号 1 周期の長さ)、クリアランス (1 サイクル中の、いかなる車も通行を許可されない時間の長さ)、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、青信号開始時刻のずれ) の 4 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、隣接信号機間におけるずれを相対オフセットという。

信号機制御は大きく 2 つの方向、スプリット制御とオフセット制御に分けることができる。スプリット制御は個々の信号機の現示の長さを制御し、オフセット制御は隣接する信号機同士での青信号が開始されるタイミングを制御するものである。特にオフセットの制御については複数の交差点が関わるパラメータであるため、制御に関わる交差点集合が与えられ、サイクル長を共通にするなどの制御が行われる。この交差点集合をサブエリアと呼び、オフセットを調整し、一定速度にて車が走行する状況において青信号が続き、その区間において車が赤信号機にて停車せずに進むことができるようにする政策のことを「グリーンウェーブ (あるいはスルーバンド)」と呼ぶ。

従来の研究では、スプリットの制御に着目したものの [参沢 00][Oliveira 05]、オフセットに着目したものの [西川 08] のように、一部のパラメータに限って制御手法が提案されてきた。また、クリアランスは簡単のため省略されており、クリアランスの省略に伴い、サイクル長も一定であることから、現実の信号機に導入するためには、クリアランスの考慮およびサイ

クル長の制御を含めた検討が必要である。このため、本研究ではスプリット、オフセットの制御手法を提案するとともに、サイクル長の制御もあわせた総合的なマルチエージェント型の信号機制御方式を提案する。また、特に上記 MODERATO において自律制御化が遅れている、オフセット制御に伴うサブエリアの設定に着目する。

3. マルチエージェント型制御手法

本研究では、以下のようなマルチエージェントモデルによる制御を提案する。

3.1 エージェント

本手法では、交通量が予め設定したしきい値を超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パケット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、サブエリアを動的に組織化する。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。

- 制御の中心となる起点モード。この状態のエージェントを起点エージェント A_c と呼ぶ。
- 起点エージェントに従って制御を行う従属モード。
- 他のエージェントと協調を行わない独立モード。

交差点 i を管理するエージェントを A_i とし、 i に隣接する交差点を j とする。 A_i は以下の情報を取得できる。

- i と j の間の距離 $l_{(i,j)}$ 。
- i から j に向かう車の交通量 $p_{(i,j)}$ 及び車の速度 $v_{(i,j)}$ 。
- j から i に向かう車の交通量 $p_{(j,i)}$ 及び車の速度 $v_{(j,i)}$ 。
- i に設置されている信号機のサイクル長 C_i 、スプリット S_i 、オフセット O_i 。
- サイクル開始時刻 T_i 、現在のタイムカウント t_i 。

交通量 p は、信号 5 周期の間に通過した車の台数合計から算出した、単位時間あたりの値を用いる。これは予備実験において、1 周期毎の値を用いた場合と、2~10 周期の合計を用いた場合で検証を行い、最も効果が高かったものを選択した。また、 i に流入する交通量の総数 P_i を、 $P_i = \sum_j p_{(j,i)}$ と定める。 T_i は各サイクルの開始時刻である。 t はサイクル開始からの時間の経過を表し、時刻が T_i のとき、 $t_i = 0$ である。

取得した情報を基に、各エージェントは 1 サイクル毎にサイクル長、スプリット、オフセットの計算を行い、必要に応じて協調を行いつつ、管理する交差点に設置された信号機の制御を行う。協調の提案および各パラメータの計算、更新は、サイクル開始時 ($t_i = 0$) に行われる。各制御パラメータの計算および制御は次の通りである。

3.2 サイクル長の計算

本手法では、サイクル長の制御には Webster の式を用いる。Webster の式では、最適サイクル長 C_o は式 (1) から得られる。

$$C_o = \frac{l \cdot 5L + 5}{1 - \lambda} \quad (1)$$

ここで L は車が交差点を通行できない時間、すなわちクリアランスの時間である。また λ は交差点の飽和度を表す。

基本的に、交差点に設置された信号機は、交差点ごとで異なる値をとる。しかし、オフセットの制御を行う際に、隣り合う交差点の信号機においてサイクル長が互いに異なった場合、1 サイクル毎に青信号開始時間にずれが生じてしまう。このため本手法では、エージェントの協調によるサブエリアの動的組織化の際、サイクル長を共通とするプロセスを導入する。

3.3 スプリットの計算

著者らの従来の研究 [白井 11] では、スプリットの計算には佐藤らが提案したばねモデル [佐藤 08] を用いていた。本手法では小中らが提案した新しいばねモデル [小中 10] を導入した。

3.4 オフセットの計算

本節では相対オフセットの計算式について述べる。隣接する交差点 i, j 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。道路の上下方向の交通量の偏りが大きい場合、交通量が多い方向を優先するオフセットを導入する。ここで $p_l = \text{Max}(p_{(i,j)}, p_{(j,i)})$, $p_s = \text{Min}(p_{(i,j)}, p_{(j,i)})$ とする。しきい値 γ , δ ($\gamma > \delta$) に対して, $\frac{p_l}{p_s} \geq \gamma$ を満たすとき、相対オフセット O_r を

$$O_r = \frac{l_{(i,j)}}{v_l} \quad (2)$$

で与える。 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 2 よりも大きい時は、優先する方向の車が対象の交差点に到達するとき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 2 の値は、相対オフセットの最大値となる。また、 $\gamma > \frac{p_l}{p_s} > \delta \geq 1$ を満たすとき、双方向の交通量を考慮した平等オフセットを計算する必要がある。しかし通常のシステム制御や広域制御では、道路上の交差点を全て考慮したうえで平等オフセットを与えるため、本研究の目的とは反するものである。このため、本手法では交差点間の道路の上下方向交通量の比に対する 1 次関数の相対オフセット

$$O_r = \frac{l_{(i,j)}}{v_l(\gamma - \delta)} \left(\frac{p_l}{p_s} - \delta \right) \quad (3)$$

を与える。

以上から A_i が A_j に対して提案するオフセットの値 $O_{(i,j)}$ は、 $p_{(i,j)} \geq p_{(j,i)}$ の場合は $O_{(i,j)} = -O_r$, $p_{(i,j)} < p_{(j,i)}$ の場合は $O_{(i,j)} = O_r$ である。 A_j が提案を受け入れた場合、 $T_j = T_i$, $O_j = O_i + O_{i,j}$ となる。

3.5 エージェントの動作

本節では、オフセットの制御に伴うサブエリアの構築までの各エージェントの動作を述べる。筆者らがこれまで提案してきたアルゴリズム [白井 11] は次の通りであった。

1. 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になることができる。 A_i が起点モードとなるための条件は、独立モードかつ $P_i > \alpha$ を満たすこと、または従属モードかつ $P_c > P_i$ を満たすことである。ここで α は車流入台数に関するしきい値である。
2. 起点モードとなったエージェント A_c は、隣接交差点 j のエージェント A_j に対して、 $p_{(c,j)} > \beta$ または $p_{(j,c)} > \beta$ の場合、オフセット調整の提案を行う。提案を行う際、算出したオフセットの値 $O_{(c,j)}$ とともに、 $T_c, P_c, l_{(c,j)}$ を A_j に送信する。
3. A_c からの提案を受け取った交差点 A_j が独立モードの場合、 A_j は無条件に提案を受け入れる。 A_j が他の起点エージェント $A_{c'}$ の提案を受け入れている従属モードの場合、 $P_c > P_{c'}$, または $P_c = P_{c'}$ かつ $l_{(c,j)} > l_{(c',j)}$ の場合提案を受け入れる。 A_j が起点モードの場合、 $P_j < P_c$ の場合は提案を受け入れ、 $P_j > P_c$ の場合は受け入れず起点モードとして振舞う。提案を受け入れた A_j は A_c の提案に従う従属モードとなり、連携してオフセットの調整を行う。このとき $T_j = T_c$, $O_j = O_c + O_{c,j}$ となる。
4. 従属モードとなった A_j は、隣接交差点 k に対して、 $p_{(j,k)} > \beta$ または $p_{(k,j)} > \beta$ を満たす場合、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。 A_j は提

案の伝達の際、算出したオフセットの値 $O_{(j,k)}$, T_j, P_c , 及び c と k の間の距離 $l_{(c,k)} = l_{(j,k)} + l_{(c,j)}$ を A_k に送信する。

5. 3. と同様に、提案を受け入れた A_k 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。

本研究では、各信号機のクリアランスの導入に伴い、エージェント A_i は式 (1) に従ってサイクル長の制御を行う。また、 $t_i = 0$ のとき、必要に応じて隣接するエージェント A_j に対して提案を行う。協調を行う場合、両者のサイクル長は $C_i = C_j$ を満たすことが望ましい。このため、前述のプロセスに加えて、提案受け入れの条件に、サイクル長の違いに起因する条件を加えた。また、サイクル長の共通化のプロセスを追加した。

- 起点エージェント A_c からの提案を受け取ったエージェント A_j が独立モードの場合、 $t_j \leq \epsilon C_j$ または $t_j \geq (1 - \epsilon) C_j$ の場合、 A_j は提案を受け入れる。 A_j が他の起点エージェント $A_{c'}$ の提案を受け入れている従属モードの場合、 $P_c > P_{c'}$, または $P_c = P_{c'}$ かつ $l_{(c,j)} > l_{(c',j)}$ のどちらかの条件に加え、 $t_j \leq \epsilon C_j$ または $t_j \geq (1 - \epsilon) C_j$ の場合提案を受け入れる。提案を受け入れた A_j は A_c の提案に従う従属モードとなり、連携してパラメータの調整を行う。このとき $T_j = T_c$, $O_j = O_c + O_{c,j}$, $C_j = C_c$, $t_j = t_c = 0$ となる。

ここで ϵ は、サイクル開始時間からの時間経過のしきい値を表す。

4. 実験・結果

4.1 交通シミュレータ

本研究では交通シミュレータを作成し、評価実験を行った。道路上の車の動きには ASEP モデル [西成 06] を用いた。シミュレータでは、車は道路ネットワークの外部から供給される。また、車の外部からの流入量と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。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。隣接する交差点間の距離は全て 50 セルとし、全ての車の速度 v は 1 セル毎ステップとした。各交差点に設置されている信号機のサイクル長はすべて 400 ステップとした。また、式 2 および式 3 のしきい値を、 $\gamma = 1.5$, $\delta = 1.1$ と定めた。エージェントが起点エージェントとなるときのしきい値 α は、交差点の交通容量の 60% とした。またエージェント同士が協調を行うためのしきい値 β は、交差点の交通容量の 25% とした。サイクル開始時刻からの時間経過のしきい値 ϵ は $\epsilon = 0.1$ とした。ここで交差点の交通容量とは、信号 1 サイクルの間に通過することができる車の最大数とし、交通容量 Cap_i は

$$Cap_i = \frac{c_i v}{Car + Distance} \quad (4)$$

で与える。 Car は車 1 台が占有するセル数、 $Distance$ は最小車間セル数であり、今回は $Car = 1$, $Distance = 1$ とした。また、シミュレーションの初期状態では、道路上には車が存在しないものとする。

4.2 評価実験

10×10 の比較的大きな格子状の道路ネットワークに本手法を適用し、道路ネットワーク全体において交通流にあわせたサブエリアの形成が行われるかを検証した。今回は以下のように車の流入確率を設定し、10000 ステップ毎に 1, 2, 3, 4, 1 の

順で変化させながら、シミュレータを 100000 ステップ動作させた。

1. 交差点 (3,9) の南側, 交差点 (6,9) の南側, 交差点 (9,3) の東側から 10 % の確率, 交差点 (3,0) の北側, 交差点 (6,0) の北側から 15 % の確率, 交差点 (0,3) の西側から 20 % の確率で, それぞれ車を流入させた。
2. 交差点 (3,9) の南側, 交差点 (9,3) の東側, 交差点 (9,6) の東側から 10 % の確率, 交差点 (3,0) の北側から 15 % の確率, 交差点 (0,3) の西側, 交差点 (0,6) の西側から 20 % の確率で, それぞれ車を流入させた。
3. 交差点 (3,9) の南側, 交差点 (6,9) の南側, 交差点 (9,6) の東側から 10 % の確率, 交差点 (3,0) の北側, 交差点 (6,0) の北側から 15 % の確率, 交差点 (0,6) の西側から 20 % の確率で, それぞれ車を流入させた。
4. 交差点 (6,9) の南側, 交差点 (9,3) の東側, 交差点 (9,6) の東側から 10 % の確率, 交差点 (6,0) の北側から 15 % の確率, 交差点 (0,3) の西側, 交差点 (0,6) の西側から 20 % の確率で, それぞれ車を流入させた。

その他の方向からの車の流入確率はそれぞれ 2.5 % とした。また, 交差点 (3,3), 交差点 (3,6), 交差点 (6,3), 交差点 (6,6) では, 全ての方角から流入する車の進行方向確率を直進 75 %, 右折 10 %, 左折 15 % とし, それ以外の交差点では直進 95 %, 右折 2.5 %, 左折 2.5 % とした。以上の条件で, オフセットの制御については, 本手法による動的オフセットと, 全ての信号機が同時に切り替わる同時オフセットを用意した。スプリットの制御については, 小中らのばねモデル [小中 10] と, 佐藤らのばねモデル [佐藤 08] を用意し, 赤信号により停車中の車台数を比較した。

実験は 5 回行い, 平均値を求めた。この結果を図 1 に示す。シミュレーション開始から終了時までの停車中の車台数の平均は, 動的オフセットおよび小中らのばねモデルの場合は 427 台, 動的オフセットおよび佐藤らのばねモデルの場合は 512 台, 同時オフセットおよび小中らのモデルの場合は 533 台, 同時オフセットおよび佐藤らのモデルの場合は 595 台であった。以上から, 同時オフセットと比較して, 本手法により交通流の改善を行えることが確認できた。また同時オフセットの場合, 佐藤らのモデルから小中らのモデルに変更した場合, 約 11 % の改善であったのに対し, 動的オフセットの場合は約 17 % の改善となり, 本手法と小中らのモデルの組み合わせにより, 交通流の改善がより効果的に行われることが示された。

5. まとめ

本研究では, マルチエージェントモデルによる自律的な信号機制御方式の提案とその基本的な有効性の検証を行った。各エージェントは隣接エージェントとの通信からパラメータを調整するため, 集中制御方式に比べて動的な道路変化への即応性が高まるとともに, 事故や災害などで交差点や信号機をつなぐネットワークが分断されてしまった場合でも, 動作可能な交差点同士は引き続き交通制御を自律的に継続することが可能であると考えられる。

今後はより複雑な道路に適用した場合についてのシミュレーション実験を行うことや, スプリットやオフセットについては他にもいくつかの手法があることから, MODERATO との比較も含めて, 検討を行っていく必要がある。また実際に実用化を念頭においた場合, 本手法では全ての交差点にセンサーを設置し, エージェントを実装する必要があることから, 金銭的なコストの検討も行う必要がある。

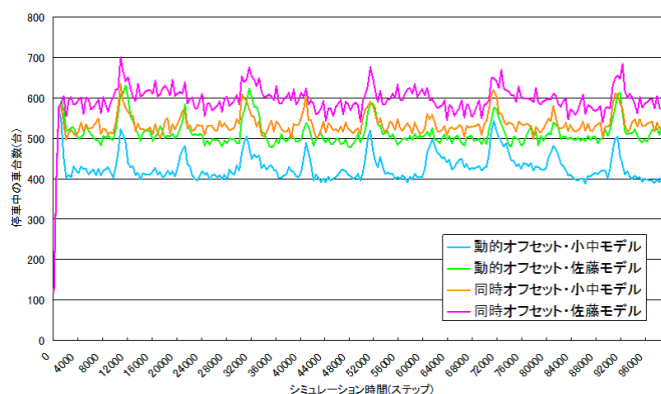


図 1: 停車中の車台数の比較

参考文献

- [小中 10] 小中裕次郎, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原聡: パネモデルによる信号機スプリット値分散制御法の構築, 第 24 回人工知能学会全国大会論文集 CD-ROM (2010).
- [参沢 00] 参沢匡将, 木村春彦, 広瀬真樹, 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).
- [西川 08] 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, Vol.52, No.5, pp.163-168 (2008).
- [西成 06] 西成活裕: 渋滞学, 新潮社 (2006).
- [Oliveira 05] Denise de Oliveira, Ana L.C. Bazzan, Victor Lesser: Using Cooperative Mediation to Coordinate Traffic Lights: a Case Study, Proceedings of Fourth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp.463-469 (2005).
- [Sanchez-Medina 10] Sanchez-Medina, J. J., Galan-Moreno, M. J., and Rubio-Royo, E.: Traffic Signal Optimization in La Almozara District in Saragossa Under Congestion Conditions, Using Genetic Algorithms, Traffic Microsimulation, and Cluster Computing, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol.11, No.1, pp.132-141 (2010).
- [佐藤 08] 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).
- [白井 11] 白井嵩士, 矢野純史, 西村茂樹, 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, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.2, pp.324-329 (2011).
- [高橋 03] 高橋聖, 風間洋, 藤倉智一, 中村英夫: 遺伝的アルゴリズムによる交通流量の変動に適した最適信号機オフセットの探索, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.3, pp.204-210 (2003).
- [玉置 10] 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, 人工知能学会論文誌, Vol.25, No.3, pp.394-399 (2010).