

交通システムにおける動的な信号機制御方法の提案

Adaptive traffic signal control for transportation system

大野啓介^{1*} 神崎 陽平¹ 高屋 英知¹ 栗原 聡²
Keisuke OHNO¹, Yohei KANZAKI¹, Eichi TAKAYA¹, and Satoshi KURIHARA²

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科

¹ Graduate School of Science and Engineering, Keio University

² 慶應義塾大学理工学部

² Faculty of Science and Engineering, Keio University

Abstract: 交通渋滞は大気汚染問題や経済的損失などの様々な問題を引き起こし、社会的に深刻な問題となっている。この交通渋滞を解消するためのアプローチの一つとして、信号機制御に関する研究が盛んに行われている。我々もこれまで、各交差点の信号機に信号パラメータを制御するエージェントを配し、各エージェントが交通流の変化に即応して信号機の制御パラメータを自律的に操作することで、動的な交通流に対応した手法を提案している。しかし、このモデルでは二現示四枝交差点での検証にとどまっており、五差路や右折専用レーンを考慮できていなかった。そこで、本研究では五差路や右折専用レーンに対応した制御モデルを提案し評価を行った。更に、オフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせたモデルも提案し、有用性の検証を行った。

1 背景

本研究では、交通信号機を適切に制御することで交通流の円滑化を目指す。交通渋滞は、大気汚染問題や経済的損失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。交通渋滞を解消するアプローチの一つとして、信号機制御による交差点の交通流の円滑化が挙げられる。一般的な道路の場合、交通渋滞の起点となるのは、主に車両が密集する交差点である。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を適切に操作する必要がある。しかしながら、通勤時間帯のラッシュ時と昼間では交通流が大きく異なるように、交通流は時間の経過とともに大きく変化する。また、突発的な事故や工事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を交通流の変化に応じて動的に変動させることが、交通流の円滑化には欠かせない。

現在日本で使われている信号機制御システムは大きく二つに分けることができる。一つ目は、あらかじめ設定した制御パラメータで動作する方法である。この方法では、事前に測定した交通流パターンに対応させて算出したパラメータを設定するため、測定時の交通流パターンにおいては制御の効果が見込めるものの、突発的な事故などに即応することは困難である。もう一

方は、交通道路に設置された感知器等から得られる交通情報をもとに、交通管制センターで適切な制御パラメータを算出する手法であり、日本においてはこの手法である MODERATO[1] が主要交差点の信号機制御に導入されている。MODERATO に代表される管制センターによる制御方式では、いくつかの制御方法が存在するが、基本的には道路上に設置された感知器による感知情報やプローブ情報を一定の時間感覚で管制センターで収集し適切なパラメータを一括で推定している。交通状況に合わせた制御により、前者に比べて渋滞緩和の効果が大きくなると期待できるが、管制センターによる集中制御方式であるため、収集エリア全体を管理する上では効果的ではあるが、動的に変化する個々の交差点の交通状況への即応性が低くなるという問題点がある。

この問題に対して、即応性の高い自律分散的な信号機制御システムが提案されている。これは、個々の信号機が局所的な情報を用いて自律的に信号機制御パラメータを変更するシステムであり、GA を用いたパラメータの最適化を行う手法や、振動同期を用いた信号機制御の最適化、マルチエージェント強化学習による信号機制御など、多様な研究が行われている [2, 3, 4]。しかし、これらの研究では限定的な道路環境で検証されていたり、計算コストの面から小規模の道路ネットワークによる検証にとどまっている。そこで我々は、計算コストと通信コストを抑えた即応性の高い信号制御モデルを提案している [5, 6, 7]。各交差点の信号機に

*連絡先：所属機関：慶應義塾大学大学院
住所：〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
E-mail：kskon@keio.jp

パラメータを制御する自律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自律分散的に信号機制御を行うマルチエージェントモデルである。小中らは、各交差点に割り当てられたエージェントがばねモデルを用いてスプリット制御を行い、隣接交差点のみと協調制御を行うことで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 [5]。白井らや高橋らは、小中らのスプリット制御に加えてオフセット制御にも着目している [6, 7]。これらの研究の課題として、二現示四枝交差点での検証にとどまっており、より複雑な交差点への対応が挙げられている。よって本研究では、より複雑な道路環境として、五差路や右折専用レーンにも対応した動的な信号機制御モデルを提案する。また、オフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせたモデルも提案する。

2 交通信号機制御

交通信号機制御では、現示を切り替えるパラメータを制御することで交通流の円滑化を目指す。現示とは、一組の交通流の通行権であり、普通の四枝交差点では、南北方向と東西方向の二現示が用いられる。

この現示を切り替えるパラメータとして、サイクル長（青、黄、赤と変わり、再び青になるまでの時間）、スプリット（交差点内での、各現示の青時間比率）、オフセット（交差点間のサイクルを開始する時間のずれ）の三種類が使用される。サイクル長は基本的に周辺交差点で共通の値を取ることが多い。スプリット制御では、与えられたサイクル長を基に各現示へ割り当てる青時間の比率を調整する。スプリット制御は交差点ごとに行われるが、オフセット制御では隣接する交差点間のサイクル長の開始時間をずらすことで、その交差点間の交通流を円滑にすることが期待される。

3 提案手法

本研究では、マルチエージェントによる信号機制御手法を提案し、評価及び考察をする。このマルチエージェントモデルでは、各交差点の信号機にパラメータを制御する自律エージェントを配置し、それぞれのエージェントは自身が管理する交差点に関する交通情報を用いて自律的に信号機制御を行う。また、隣接する交差点のエージェントから得られる隣接交差点の交通情報を用いて、隣接エージェント間で協調制御を行う。

信号機を制御するパラメータとして、スプリットとオフセットに着目し、各エージェントによる交差点毎のスプリット制御、隣接エージェントとの協調による隣接交差点間のオフセット制御、更にオフセット制御

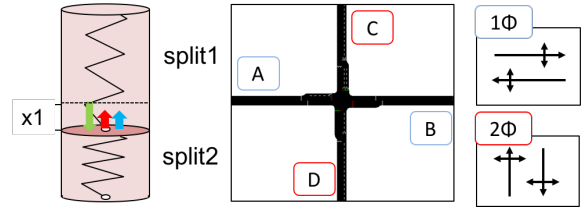


図 1: 十字路におけるばねモデルの概略図

時に隣接交差点間のスプリット協調制御を行うモデルを提案する。交差点毎のスプリット制御では、小中らが提案したばねモデル [5] に改良を加えたスプリット制御モデルを提案する。隣接交差点間のオフセット制御では、白井らが提案したオフセット制御モデル [7] を用いる。また、オフセット制御時のスプリット協調制御については、佐藤らが提案した協調ばねモデル [8] を改良したモデルを提案する。

3.1 交差点毎のスプリット制御

各交差点に配されたエージェントは、自身が管理する交差点の交通量をばねの釣り合いの式に取り入れることで、一サイクル毎にスプリットを計算する。

3.1.1 十字路及び T 字路でのスプリット制御

図 1 は本システムで用いられている十字路及び T 字路でのばねモデルの概略図である。赤、青、緑の矢印はそれぞれ、*split1* によるばねが及ぼす力、*split2* によるばねが及ぼす力、外部から働く力であり、それぞれが押し合うことで釣り合いの状態を保っている。二現示の場合、AB 方向と CD 方向のスプリットを *split1*、*split2*、外部から働く力として東西方向と南北方向の交通量の差 d とする。ばね定数を k とすると、変位 x は

$$x = \frac{d}{2k} \quad (1)$$

と表される。また、 $split1 + split2 = 1$ の関係より、

$$split1 = \frac{1}{2} + \frac{d}{2k} \quad (2)$$

$$split2 = \frac{1}{2} - \frac{d}{2k} \quad (3)$$

となる。スプリットが 0 か 1 になってしまうと、片方の現示にしか交通権が与えられなくなってしまうため、スプリットの下限値を 0.1、上限値を 0.9 とした。

ここで、交通量は流入量に捌け残り台数を加えたものとする。また、渋滞長が大きい時ほど最後尾の車両が交差点を通過するのに時間がかかるという問題を考

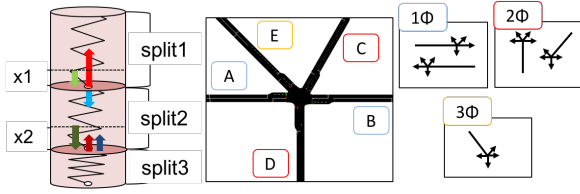


図 2: 五差路におけるばねモデルの概略図

慮するために、捌け残り台数が多い時ほどより交通量が多くなるよう定めた。この関係式は、

$$q = \frac{n_{inflow}}{n_{lane}} + a \frac{n_{res}}{n_{lane}} \quad (4)$$

と表される。 q が交通量、 n_{inflow} が流入量、 n_{res} が捌け残り台数、 n_{lane} がレーン数であり、 q はレーン毎の平均を取っている。また、右辺第二項は係数 a を底とする指数関数であり、捌け残り台数が多いほどこの項がより大きな値を取る。この q を用いて、交通量差 d は以下のように表される。

$$d = \frac{\max(q_A, q_B) - \max(q_C, q_D)}{\max(q_A, q_B) + \max(q_C, q_D)} \quad (5)$$

q の添字はそれぞれ、十字路のどの道路かを示している。T 字路の場合は道路が一本少ないため q を一つ減らすことで対応する。また、各現示で上り方向と下り方向で交通量に差が生じるため、交通量が多い方向を選択するために最大値を取っている。

3.1.2 五差路でのスプリット制御

図 2 は三現示の場合の五差路でのばねモデルの概略図である。図 1 のばねモデルに、ばねをもう一本追加することで三現示のスプリット制御に対応する。

赤、青、緑の矢印は 3.1.1 項と同様の定義であり、茶、紺、深緑の矢印はそれぞれ、 $split2$ によるばねが及ぼす力、 $split3$ によるばねが及ぼす力、外部から働く力である。三現示の場合、AB 方向、CD 方向、E 方向のスプリットを $split1$ 、 $split2$ 、 $split3$ 、外部から働く力として AB 方向と CD 方向の交通量の差を d_1 、CD 方向と E 方向の交通量の差 d_2 とする。このとき、変位 x_1 、 x_2 はそれぞれ

$$x_1 = \frac{2d_1 + d_2}{3k} \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{d_1 + 2d_2}{3k} \quad (7)$$

と表される。また、 $split1 + split2 + split3 = 1$ の関係より、

$$split1 = \frac{1}{3} + \frac{2d_1 + d_2}{3k} \quad (8)$$

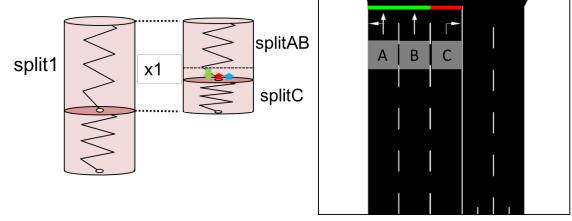


図 3: 右折専用レーンを考慮したばねモデルの概略図

$$split2 = \frac{1}{3} + \frac{d_2 + d_1}{3k} \quad (9)$$

$$split3 = \frac{1}{3} - \frac{d_1 + 2d_2}{3k} \quad (10)$$

となる。3.1.1 項同様にそれぞれのスプリットの上限值は 0.9、下限値は 0.1 としている。また、 d_1 、 d_2 は以下のように定義している。

$$d_1 = \frac{\max(q_A, q_B) - \max(q_C, q_D)}{\max(q_A, q_B) + \max(q_C, q_D) + q_E} \quad (11)$$

$$d_2 = \frac{\max(q_C, q_D) - q_E}{\max(q_A, q_B) + \max(q_C, q_D) + q_E} \quad (12)$$

3.1.3 右折専用レーンを考慮したスプリット制御

図 3 は十字路での右折専用レーンを考慮したばねモデルの概略図である。3.1.1、3.1.2 項で求めたスプリットを基に、直進左折レーンと右折専用レーンのスプリットを計算する。

図 3 の赤、青、緑の矢印はそれぞれ $splitAB$ によるばねが及ぼす力、 $splitC$ によるばねが及ぼす力、外部から働く力である。A、B レーンのスプリットを $splitAB$ 、C レーンのスプリットを $splitC$ 、外部から働く力として AB レーンと C レーンの待ち台数の差 d_l とする。 $splitAB + splitC = split1$ の関係より、3.1.1 と同様に考えると、

$$splitAB = split1 \left(\frac{1}{2} + \frac{d}{2k} \right) \quad (13)$$

$$splitC = split1 \left(\frac{1}{2} - \frac{d}{2k} \right) \quad (14)$$

となる。各スプリットの上限值は 0.9、下限値は 0.1 である。また、待ち台数が比較的少ない状況においてスプリットが過剰に反応することを防ぐため、C レーンの待ち台数が $splitC$ の下限値 0.1 で交差点を通り抜けられる数の場合は、 $splitC$ は 0.1 に固定する。ここで、車両は 2 秒に 1 台交差点を通り抜けられると仮定している。待ち台数の差 d_l は、

$$d_l = \frac{\max(q_A, q_B) - q_C}{\max(q_A, q_B) + q_C} \quad (15)$$

とし, q は現示が始まる直前のそれぞれのレーンの待ち台数を表している.

3.2 交差点間のオフセット制御

オフセット制御は, 隣接する交差点間の交通量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超えたとき, その交差点のエージェントが, 隣接エージェントにオフセット制御の提案をする [7]. 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, 制御の中心となる起点モード, 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のいずれかの状態を取る.

隣接する交差点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. 交通量の偏りが多い道路方向を優先するようにオフセットを導入する. ここで, 対抗する道路の交通量を p_l , p_s とし, $\frac{p_l}{p_s} \geq \gamma$ を満たすとき, 相対オフセット O_r を

$$O_r = \frac{L}{v_l} \quad (16)$$

で与える. L は交差点間の距離であり, v_l は p_l の方向の制限速度である. 従って, 式 (16) の値は最大オフセットとなる. また, $\gamma \geq \frac{p_l}{p_s} \geq \delta \geq 1$ を満たす場合, 相対オフセットは

$$O_r = \frac{L \left(\frac{p_l}{p_s} - \delta \right)}{v_l (\gamma - \delta)} \quad (17)$$

を与える.

3.3 交差点間のスプリット協調制御

交差点間のスプリット協調制御では, 3.1 節で求めた各交差点エージェントの変位 x を基に, 交差点間をつなぐばねを用いて隣接エージェント間で新たに変位 x_a , x_b を求める. 図 4 は交差点間のスプリット協調ばねモデルの概略図である.

赤, 青, 緑の矢印は 3.1 節と同様の定義であり, 灰色の矢印は交差点間をつなぐばねが及ぼす力である. 3.1 節の方法で求めた各交差点の変位をそれぞれ y_a , y_b とし, 交差点間ばねのばね定数を k_c とする. また, 隣接交差点間でスプリットが大きい値を取る方に近付けるよう協調制御を行う. 従って, 図 4 の場合, 変位 x_a , x_b はそれぞれ,

$$x_a = y_a \quad (18)$$

$$x_b = y_b + \frac{k_c}{2k} (y_a - y_b) \quad (19)$$

と表される.

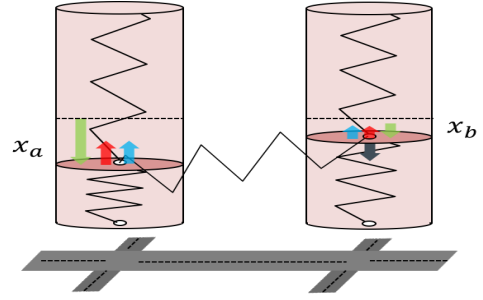


図 4: 交差点間協調ばねモデルの概略図

4 評価実験

交通シミュレータ SUMO[9] を用いて, 提案システムの評価を行った. 各交差点において, 左折車両, 直進車両, 右折車両の比率は 1:8:1 に設定した. ばね定数 $k = 1$ とし, 協調ばね定数 $k_c = 0.1$, 係数 $a = 1.2$ とした. オフセット制御時の閾値は [7] より, $\gamma = 1.5$, $\delta = 1.1$ とした. また, SUMO 上では時間の単位が step であり, 1step = 1 秒である. 本システムでは, 交差点への流入路の交通情報を取得するための感知器として, 交差点から 150m 地点までの車両の速度, 長さ, 位置を取得できる電波レーダーを想定して実験を行った.

4.1 実験 1

3.1.2 項で述べた五差路でのばねモデルによるスプリット制御の有用性を示すための評価実験を行った. 図 2 と同様の道路環境において, 五差路でのばねモデルによるスプリット制御と各道路からの流入量比に合わせたスプリット比による静的な制御との比較を行った. 各流入路は 2 車線, 長さは 1km であり, 交差点手前 50m 付近から右折専用レーンを設けた. 実験 1 での車両の流入量比は, $1\phi : 2\phi : 3\phi = 6 : 3 : 1$ とし, 静的制御でのスプリット比も同様である. サイクル長は 120step, 車両の流入間隔は 1 台/2step とし, シミュレーション期間は 6000step とした. 評価指標は 1step 辺りの平均待ち台数とした.

4.2 実験 2

次に, 3.1.3 項で述べた, 右折専用レーンを考慮したばねモデルによるスプリット制御の有用性を示すための評価実験を行った. 交差点は五差路とし, 静的制御, 3.1.2 項の右折レーンを考慮していないばねモデル, 3.1.2 項と 3.1.3 項の組み合わせによる右折レーンを考慮したばねモデルの三つの手法で比較を行った. 車両の流入比, 静的制御のスプリット比, サイクル長, シ

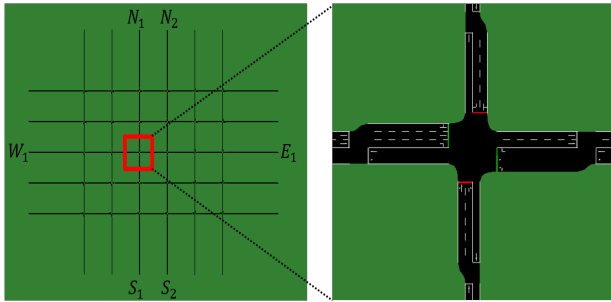


図 5: 実験 3 における道路環境

シミュレーション期間、評価指標は実験 1 と同様に設定した。また、右折専用レーンから車両が溢れて渋滞が発生する状態を作り出すために、車両の流入間隔を 1 台/step とした。

4.3 実験 3

最後に、3.1 節、3.2 節、3.3 節の手法を組み合わせたオフセット制御及びスプリット協調制御の有用性を示すための評価実験を行った。オフセット制御及びスプリット協調制御のため、制御対象交差点を 2 交差点とした。また、制御対象交差点への車両の流入パターンをより実際の環境に近付けるために、制御対象交差点の周辺に複数交差点を用意し、図 5 のような道路ネットワークを構築した。東西の道路は 2 車線、南北の道路は 1 車線とし、交差点手前 50m 付近から右折専用レーンを設けた。各流入路は 1km あり、交差点間の距離は 500m とした。比較手法として、小中らが提案したばねモデルによるスプリット制御 [5]、3.1.1 項で提案したスプリット制御手法、3.3 節で提案したスプリット協調を常に行う制御手法、交差点内のみのスプリット制御と 3.2 節で提案したオフセット制御を組み合わせた手法での評価実験を行った。車両の流入間隔は 1 台/step、サイクル長は 100step、シミュレーション期間を 14400step とした。図 5 の道路環境において、中央左側からの流入路を W_1 、中央右側からの流入路を E_1 、中央上側からの流入路をそれぞれ N_1 、 N_2 、中央下側からの流入路をそれぞれ S_1 、 S_2 、それ以外の各流入路を「その他」とし、それぞれの流入路からの車両流入パターンを表 1 に示す。評価指標は、制御対象交差点周辺における 1step 辺りの平均待ち台数及び全車両の総待ち時間とした。

4.4 実験結果

実験 1、実験 2 の結果を図 6、図 7 に、実験 3 の結果を図 8、表 2 に示す。

表 1: 実験 3 : 各流入路からの車両流入パターン

time [step]	W_1 [台/h]	E_1 [台/h]	N_1, N_2, S_1, S_2 [台/h]	その他 [台/h]
0~3600	1800	1600	500	180
~7200	1800	1300	500	180
~10800	1800	1000	500	180
~14400	1800	700	500	180

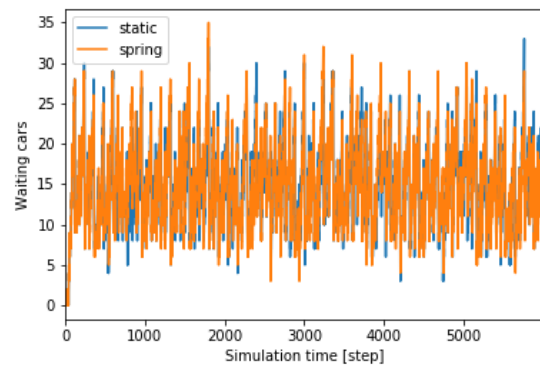


図 6: 実験 1 : 待ち台数の比較

図 6 から、五差路でのばねモデルによる制御 (黄) と静的制御 (青) の待ち台数に大きな違いが見られないことが分かる。交通量が完全に分かっている状況において、静的制御は理想的な値を取ると考えられるため、五差路でのばねモデルによる制御が適切に動作していることが分かる。また、平均待ち台数を比較してみると、両者とも 14.7 台/step となった。また標準偏差は静的制御の場合 5.10 台、ばねモデルの場合は 5.25 台であった。

図 7 からは、右折専用レーンを考慮したばねモデルによる制御 (緑) が他の制御手法に比べて、シミュレーション期間の 1000step 以降、明らかに待ち台数が低い値を取っていることが分かる。更に平均待ち台数を比較してみると、静的制御 (青)、右折専用レーンを考慮していないばねモデル (黄)、右折専用レーンを考慮しているばねモデルは順に、163 台/step、146 台/step、49 台/step となった。更に、静的制御と右折専用レーンを考慮していないばねモデルを比較しても、後者の方が待ち台数が少ない値を取っていることが分かる。このことから、交通量が多い場合においても五差路におけるばねモデルが有効に動作していることが分かる。

図 8 は、各 step における累積総待ち時間を示している。この結果から、オフセット制御とスプリット協調制

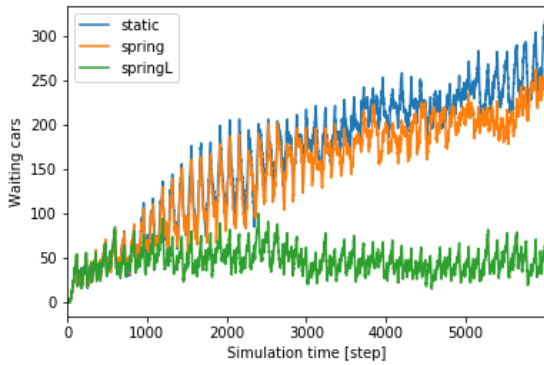


図 7: 実験 2 : 待ち台数の比較

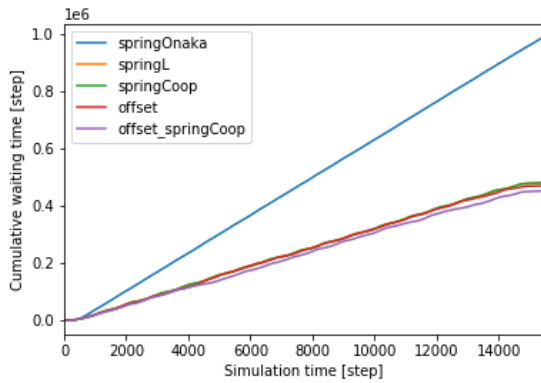


図 8: 実験 3 : 累積総待ち時間の比較

御を組み合わせた手法(紫)が一番低い値を取っていることが分かる。次は、交差点間はオフセット制御で交差点内のみでスプリット制御を行う手法(赤)が低い値を取っている。3.1.1 項で提案した交差点内スプリット制御のみの手法(黄)は、スプリット協調制御手法(緑)とほとんど同じ値を取っている。そして、小中らが提案したばねモデルによるスプリット制御手法 [5](青)が一番高い値を取っていることが分かる。更に、交通量の変化に応じて、オフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせた手法(紫)と他の制御手法と値の開きが大きくなっていることが分かる。また、表 2 はそれぞれの手法における、平均待ち台数及び総待ち時間を示している。この表から、待ち台数と総待ち時間においてオフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせた手法(紫)が一番低い値を取っていることが分かる。

表 2: 実験 3 : 各手法の比較結果

制御手法	平均待ち台数 [台/step]	累積総待ち時間 $\times 10^6$ [step]
小中らの手法 [5](青)	64.2	9.9
スプリット (黄)	31.3	4.8
スプリット協調 (緑)	31.3	4.8
オフセット (赤)	30.6	4.7
協調オフセット (紫)	29.4	4.5

5 考察

実験 1, 実験 2 の結果より、五差路対応ばねモデルによるスプリット制御が有効であることが示された。実験 1 では車両の流入頻度が 1 台/2step であり、渋滞が起きない状態であった。この状態においてばねモデルは正常に動作したことから、交通量が少ない状況においてもばねモデルの有用性が示されたと考えられる。また、実験 2 では車両の流入頻度が 1 台/1step であり、渋滞が起きやすい状態であった。この状態において静的制御よりばねモデルによる制御の方が待ち台数において少ない結果となったことから、五差路におけるばねモデルは交通量の大小に関わらず、有効に動作すると思われる。

また、実験 2 の結果より、右折専用レーンを考慮したばねモデルも有効であることが示された。この実験 2 では、1000step 辺りで右折専用レーンの渋滞が始まり、右折待ち車両が直進レーンまで溢れており、更にこの溢れた渋滞が直進レーンを通過する車両を妨害することで余計に渋滞が発生していた。その結果、右折専用レーンを捌ききれない手法では、1000step 以降に待ち台数が著しく増加している。しかし、右折専用レーンを考慮したばねモデルでは右折専用レーンでの渋滞を捌くことができたため、右折専用レーン及び直進レーンでの渋滞が生じず待ち台数が少ない結果となった。

実験 3 の結果から、オフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせた手法が有効であることが示された。また、3.1.1 項で述べたスプリット制御モデルが小中らの制御モデル [5] より改善されていることが分かる。これは、小中らのばねモデルでは外部から働く力 d として、交通量差のみを与えていたのに対し、提案モデルでは交通量差を総交通量で正規化し、更に渋滞長や捌け残り台数を考慮していたためであると考えられる。また、常に交差点間でスプリットの協調制御をするのではなく、オフセット制御時とスプリット協調制御を組み合わせることが交通流の円滑化に繋がっていると考えられる。

6 おわりに

本研究では、小中らが提案したモデル [5] を改良した十字路でのばねモデル、五差路や右折専用レーンにも対応したばねモデル、更にオフセット制御とスプリット協調制御を組み合わせた動的な信号機制御手法を提案した。各実験では、提案手法の評価を行い、五差路対応ばねモデルや右折専用レーンを考慮したばねモデルが交通流を円滑にすることを確認した。また、オフセット制御やスプリット協調制御のみではなく、両方を組み合わせた制御手法がより交通流の円滑化に繋がることが確認した。

今後の課題として、制御対象交差点を増やし、五差路やT字路を含めたより現実的な道路ネットワークにおいて評価を行うことが考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたってご助言を頂いたオムロンソーシアルソリューションズ株式会社の岡部浩史氏、馬淵透氏、今吉英司氏に感謝する。

参考文献

- [1] Bergez, J. E., Debaeke, P., Deumier, J. M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., & Wallach, D. (2001). MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological modelling*, 137(1), 43-60.
- [2] 高橋聖, 風間洋, 藤倉智一, & 中村英夫. (2003). 遺伝的アルゴリズムによる交通流量の変動に適応した最適信号機オフセットの探索. *電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)*, 123(3), 204-210.
- [3] 西川郁子. (2008). 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*, 52(5), 163-168.
- [4] de Oliveira, D., Bazzan, A. L., da Silva, B. C., Basso, E. W., Nunes, L., Rossetti, R., ... & Lamb, L. (2006, December). Reinforcement Learning based Control of Traffic Lights in Non-stationary Environments: A Case Study in a Microscopic Simulator. In *EUMAS*.
- [5] 小中裕次郎, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, & 栗原聡. (2010). バネモデルによる信号機スプリット値分散制御法の構築. In *人工知能学会全国大会論文集 第 24 回全国大会 (2010)* (pp. 2I1OS52-2I1OS52). 一般社団法人 人工知能学会.
- [6] 高橋光紀, 篠田孝祐, 諏訪博彦, & 栗原聡. (2014). 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. *研究報告知能システム (ICS)*, 2014(7), 1-6.
- [7] 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. (2011). 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*, 26(2), 324-329.
- [8] 佐藤和宏, 長岡諒, 安場直史, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, ... & 栗原聡. (2008). 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. In *人工知能学会全国大会論文集 第 22 回全国大会 (2008)* (pp. 333-333). 一般社団法人 人工知能学会.
- [9] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO-simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind.