

マルチエージェント動的信号機制御システムの提案

大野 啓介^{1,a)} 神崎 陽平¹ 高屋 英知¹ 栗原 聡²

概要: 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らず、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。

Proposal of Multi-agent Based Dynamic Traffic Signal Control System

1. はじめに

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、大気汚染や経済的損失など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目に見えるものの、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る。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。しかし、管制センターによる集中制御方式であるため、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 [2] や、振動同期を用いた信号機制御の最適化 [3]、マルチエージェント強化学習による信号機制御 [4] など、多様な方法が提案されている。しかし、これらの方法は、計算コスト等の都合から、小規模の道路ネットワークのような、限定的な道路環境で効果検証がなされている。そこ

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

² 慶應義塾大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

a) kskon@keio.jp

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、ばねモデルを用いてスプリットを制御する各交差点のエージェントに隣接交差点のエージェントと協調させるマルチエージェントモデルを提案し、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 [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]. しかし、これらの研究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マルチエージェントによる動的な信号機制御モデルを提案する.

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

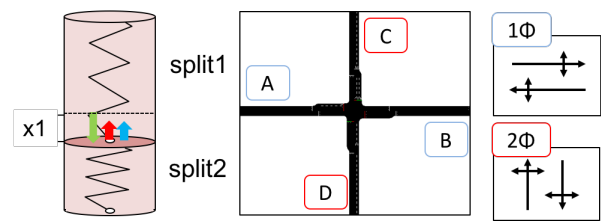


図 1 十字路におけるばねモデルの概略図

Fig. 1 Spring model for four-way intersections.

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は、白井らが提案したオフセット制御モデル [6] をもとに行う. また、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.

ここで、本研究において各エージェントは以下の情報を取得できるものとする.

- センサ範囲内の車線毎の車の台数
- センサ範囲内の車線数
- 現在時刻 t
- 自交差点 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 , 青信号開始時間 T_i , 相対オフセット
- 隣接交差点 j との交差点間距離 $l_{(i,j)}$
- 自交差点 i のセンサ範囲内に流入する車の台数 $p_{(i,j)}$ 及び車の速度 $v_{(i,j)}$

更に、隣接エージェントとの連携によって以下の情報を取得できるものとする.

- 隣接交差点 j の車流入総数 P_j .
- 隣接交差点 j との間の道路における交通量から算出したオフセット値 $O_{(j,i)}$
- 隣接交差点 j に設置されている信号機の、ばねモデルにより算出される変位 x , 青信号開始時間 T_i , 相対オフセット

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

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

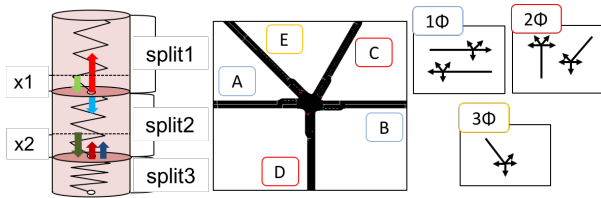


図 2 五差路におけるばねモデルの概略図

Fig. 2 Spring model for five-way intersections.

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に定めた。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

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

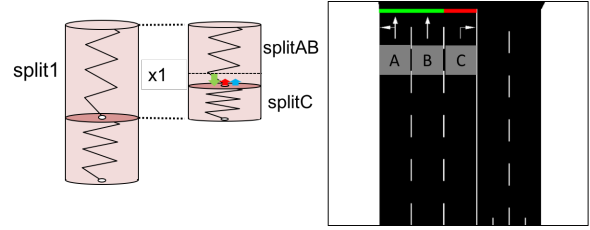


図 3 右折専用レーンを考慮したばねモデルの概略図

Fig. 3 Spring model corresponding to right turn lanes.

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

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

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

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

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

となる。3.1.1 項同様にそれぞれのスプリットの上限値は 0.8, 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値は 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

白井ら [6] によるオフセット制御手法をもとにオフセット制御を行う。各エージェントは、自身が管理する交差点での交通量及び隣接エージェントとの連携により、以下のいずれかの状態をとる。

- 起点モード：制御の中心となるモード。この状態を起点エージェント A_C とする。
- 従属モード：起点エージェントに従って制御を行うモード。
- 独立モード：他のエージェントと協調制御を行わないモード。この状態を初期モードとする。

白井ら [6] は、交通量が予め設定した閾値を超えたエージェントが起点となり、隣接するエージェントに対してパケツリレーの要領で協調の提案をしていくことでグリーンウェーブを形成する交差点集合を動的に自己組織化させている。しかし、本研究では局所的な情報のみを用いることを前提としているため、オフセット制御は隣接交差点同士のみで行われることとする。本研究におけるオフセット制御は、二現示四枝交差点を例にとって以下の手順で行われる。

- (1) 自身が独立モードの場合、自交差点 i の現示 g 方向における車両流入総数 $P_{(i,g)}$ が閾値 α を超えると起点モードとなる。現示 g' 方向においても車両流入総数 $P_{(i,g')}$ が閾値 α を超えた場合、車両流入総数が多い現示方向に関して起点モードとなる。従属モードの場合は、 $P_{(i,g)} > P_{(C,g)}$ の時、起点モードとなる。
- (2) 起点エージェント A_C は、現示 g 方向のうち交通量が大きく流れている方向の隣接交差点 a のエージェントに対してオフセット調整の提案を行う。この際、青信号開始時間 T_C 、オフセット値 $O_{(C,a)}$ 、車流入数 $P_{(C,g)}$ 、交差点 a までの距離 $l_{(a,C)}$ の情報を提供する。
- (3) 交差点 a のエージェントは、独立モードの場合は無条件に提案を受け入れる。他の起点エージェント $A_{C'}$ に従属している場合は、 $P_{(C,g)} > P_{(C',g)}$ または $P_{(C,g)} = P_{(C',g)}$ かつ $l_{(a,C)} > l_{(a,C')}$ の時に提案を受け入れる。起点モードの場合、 $P_{(a,g)} < P_{(C,g)}$ であれば提案を受け入れ、 $P_{(a,g)} \geq P_{(C,g)}$ であれば提案を受け入れず起点モードとして振る舞う。提案を受け入れた場合、 A_C に対して従属モードとなりオフセット調整を行う。この時、交差点 a の青信号開始時間は $T_a = T_C + O_{(C,a)}$ となる。

ここで、閾値 α は、対応する現示方向の交通容量の 50% とする。

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

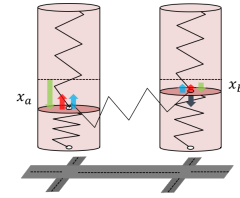


図 4 交差点間協調ばねモデルの概略図

Fig. 4 Cooperative spring model.

先するよう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 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 節の方法で求めた自交差点の変位を y 、隣接交差点 a の変位を y' とし、交差点間ばねのばね定数を k_c とすると、変位 x は以下の式で求められる。このとき、変位 x を更新するのは自交差点のみである。

$$x = y + \frac{k_c}{2k} \left(\sum_a y' - y \right) \quad (18)$$

また、自交差点が五差路の場合は図 5 のようなばねモデルとなる。図 5 中の左上に位置する交差点を自交差点とし、見やすさのため自交差点に接続する円柱間ばねのみを表示している。五差路の場合は、自交差点に対する交差点間ばねを繋ぐ面が二つ存在するため、対応する現示の円柱内ばねが接続されている面同士を繋ぐことにする。自交差点の 1ϕ と 2ϕ のばねに挟まれた面の変位を y_1 、もう一方の面の変位を y_2 、自交差点の 1ϕ と 2ϕ のばねに挟まれた面と接続している隣接交差点 a の面の変位を y'_1 とし、自交差点の 2ϕ と 3ϕ のばねに挟まれた面と接続している隣接交差点 b の面の変位を y'_2 とすると、変位の更新式は以下のようになる。

$$x_1 = y_1 + \frac{2k_c}{3k} \left(\sum_a y'_1 - y_1 \right) + \frac{k_c}{3k} \left(\sum_b y'_2 - y_2 \right) \quad (19)$$

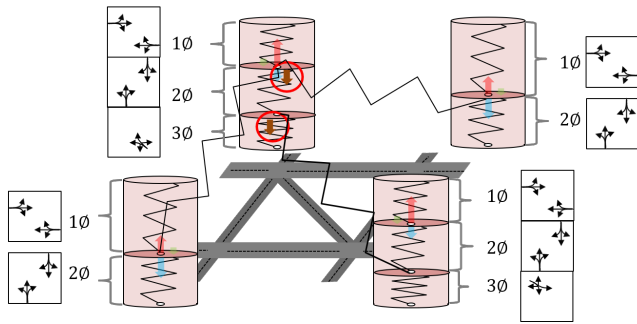


図 5 五差路における交差点間協調ばねモデルの概略図

Fig. 5 Cooperative spring model for five-way intersections.

$$x_2 = y_2 + \frac{k_c}{3k} \left(\sum_a y'_1 - y_1 \right) + \frac{2k_c}{3k} \left(\sum_b y'_2 - y_2 \right) \quad (20)$$

4. 交差点間のオフセット及びスプリット協調制御

交差点間のオフセット及びスプリット協調制御は、3.2節で述べたオフセット制御手法と3.3節で述べたスプリット協調制御手法を組み合わせた手法である。

オフセット制御により起点モードになったエージェントとそのエージェントに対して従属モードとなったエージェント間のみで、3.3節で述べたスプリット協調制御を行う。3.2節手順2の、起点エージェントが隣接交差点のエージェントにオフセット調整の提案を行う際、起点エージェントが管理する交差点の変位 y' の情報を追加で提供する。起点エージェントの変位 y' を受け取った従属エージェントは、十字路及びT字路の場合、以下の式に従って自身の変位を更新する。

$$x = y + \frac{k_c}{2k} (y' - y) \quad (21)$$

式18の右辺第二項で y' に関して総和をとっていたが、式21においては二交差点間だけの制御であるため、 y' に関して総和をとらない形となっている。

五差路の場合も同様に、総和をとらずに自身の変位を更新する。ここで、起点エージェントが管理する交差点とのばねを繋ぐ面が、自交差点の 1ϕ と 2ϕ のばねに挟まれた面である場合は式22に従い、自交差点の 2ϕ と 3ϕ のばねに挟まれた面である場合は式23に従って更新を行う。

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + \frac{2k_c}{3k} (y'_1 - y_1) \\ x_2 &= y_2 + \frac{k_c}{3k} (y'_1 - y_1) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + \frac{k_c}{3k} (y'_2 - y_2) \\ x_2 &= y_2 + \frac{2k_c}{3k} (y'_2 - y_2) \end{aligned} \quad (23)$$

5. 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[6]より、 $\gamma = 1.5$ 、 $\delta = 1.1$ とした。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。

5.1 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、AB : CD : E = 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。

5.2 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。

5.3 実験3

実験3では、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6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、交差点内だけのスプリット

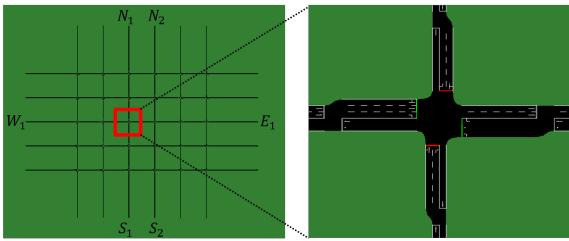


図 6 実験 3 における道路環境

Fig. 6 Road settings in Experiment 3.

表 1 実験 3：各流入路からの車両流入パターン

Table 1 Experiment 3 : An inflow pattern.

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

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。サイクル長は 100step, シミュレーション期間を 14400step とした。図 6 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。

5.4 実験 4

実験 4 では、より現実に即した道路環境において提案手法の評価をするため、図 7 に示す 11×12 の交差点が存在する道路環境を構築し、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評価実験を行った。比較手法は、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とした。サイクル長は 100step, シミュレーション期間を 14400step である。制御対象交差点は図 7 中の全交差点とし、評価対象の交差点は周囲 2 交差点ずつを除いた 7×8 の交差点とした。各流入路は 1km となっており、交差点間距離は 500m である。また、図 7 の上から 3, 6, 9 本目の道路は東西方向に幹線道路を見立てており、上から順に五差路を含む幹線道路、十字路のみの幹線道路、T 字路を含む幹線道路としている。それ以外の道路は一般道路を見立てている。幹線道路は 2 車線となっており、幹線道路上の交差点手前 50m 付近には右折専用レーンを設けている。対して、一般道路は 1 車

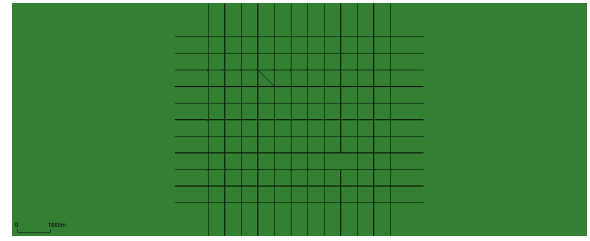


図 7 実験 4 における道路環境

Fig. 7 Road settings in Experiment 4.

表 2 実験 4：各流入路からの車両流入パターン

Table 2 Experiment 4 : An inflow pattern.

time [step]	幹線道路東側 [台/h]	幹線道路西側 [台/h]	その他 [台/h]
0~3600	1800	900	180
~7200	1200	1200	180
~10800	900	1800	180
~14400	700	700	180

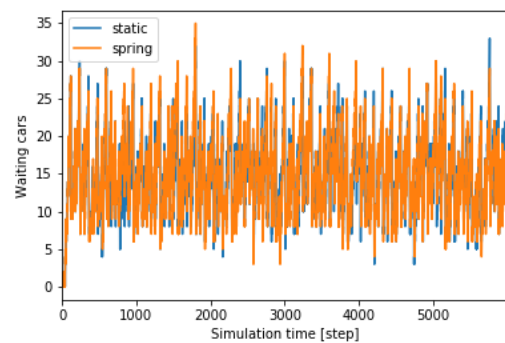


図 8 実験 1：待ち台数の比較

Fig. 8 Experiment 1 : A comparison of waiting cars.

線となっており、一般道路上の交差点には右折専用レーンは設けていない。実験 4 における、車両流入パターンは表 2 の通りである。

評価指標は、評価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。

5.5 実験結果

実験 1, 実験 2 の結果を図 8, 図 9 に、実験 3 の結果を図 10, 表 3 に、実験 4 の結果を図 result6, 表 4 に示す。

図 8 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 9 からは、右折専用レーンを考慮したばねモデルによ

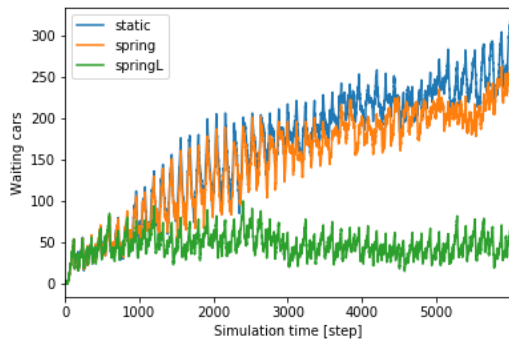


図 9 実験 2：待ち台数の比較

Fig. 9 Experiment 2: A comparison of waiting cars.

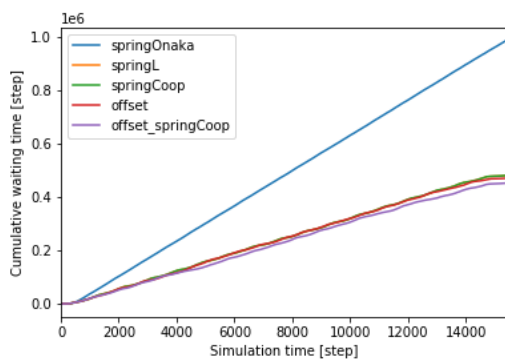


図 10 実験 3：累積総待ち時間の比較

Fig. 10 Experiment 3: A comparison of cumulative waiting time.

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 10 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

表 3 実験 3：各手法の比較結果

Table 3 Experiment 3: A comparison with other approaches.

制御手法	平均待ち台数	累積総待ち時間
	[台/step]	$\times 10^6$ [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

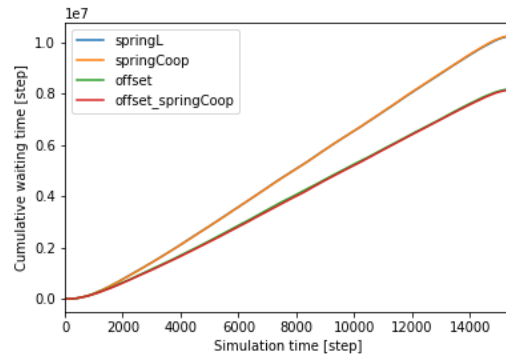


図 11 実験 4：累積総待ち時間の比較

Fig. 11 Experiment 4: A comparison of cumulative waiting time.

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 3 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 4 実験 4：各手法の比較結果

Table 4 Experiment 4: A comparison with other approaches.

制御手法	平均待ち台数	累積総待ち時間
	[台/step]	$\times 10^6$ [step]
スプリット (青)	666	10.2
スプリット協調 (黄)	667	10.3
オフセット (緑)	531	8.18
協調オフセット (赤)	529	8.15

図 11 は、実験 4 における step 毎の累積総待ち時間の比較結果をプロットしている。横軸がシミュレーション時刻であり、縦軸が累積総待ち時間である。青色が右折専用レーンを考慮したばねモデルによる制御の結果、黄色がスプリット協調ばねモデルによる制御の結果、緑色がオフセット制御と交差点内ばねモデルによる制御の結果、赤色がオフセット制御と協調ばねモデルを組み合わせた制御による結果である。この結果から、実験 3 と同様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手法 (赤) 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(緑)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(青)は、スプリット協制御手法(黄)とほとんど同じ値を取っている。また、表4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制御を組み合わせた手法(赤)が一番低い値を取っていることが分かる。

6. 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、有効に動作すると考えられる。

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, 実験4の結果から、オフセット制御とスプリット協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か力 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制御をするのではなく、オフセット制御とスプリット協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。

7. 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を確認した。

今後の課題として、歩行者を考慮したモデルへと拡張し、その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ャ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). MOD-ERATO: 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] 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.
- [7] 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.
- [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.