

歩行者情報を考慮した動的信号機制御システムの提案

Proposal of a Dynamic Traffic Signal Control System Considering Pedestrian Information

山田 悠司^{1*} 井原 史渡² 林 健² 藤森 立¹ 須賀 聖¹ 栗原 聡²

Yuji Yamada¹, Fumito Ihara², Ken Hayashi², Ryu Fujimori¹, Satoshi Suga¹ 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 Technology, Keio University

² 慶應義塾大学理工学部

² Faculty of Science and Technology, Keio University

Abstract: 交通渋滞は環境問題や経済的損失を引き起こす要因であり、渋滞を解消する手法として、信号機の制御パラメータを適切に制御し、交差点状況に応じた信号機の挙動を実現させる手法がある。一方で、交通渋滞の解消のために信号機パラメータを制御する手法では、取り扱う交通情報が車両情報のみに留まる事も少なくない。しかしこの場合、信号機制御によって車両の遅れ時間を減少させることができる反面、しわ寄せとして歩行者の待ち人数を増加させてしまう問題がある。本研究では、従来のパラメータ制御による交通信号スプリット制御手法において、車両情報に加え歩行者の情報も考慮して制御する手法を提案した。手法の検討においては、交通シミュレーションソフト SUMO を用いて交差点・車両の流れ・歩行者の流れを再現し、車両情報のみを考慮した制御モデルと、歩行者情報も併せて考慮した制御モデルを比較することで性能評価を行った。その結果、歩行者情報を考慮した手法によって歩行者待ち人数が減少することを確認した。

1 はじめに

都市部における交通渋滞は環境問題や経済的損失を引き起こす要因として問題視されており、問題解消のための研究が盛んに行われている。交通渋滞の要因としては主に、車両が密集し頻繁に加速・減速・停止が行われる交差点周辺における渋滞が挙げられる。その為、渋滞解消へのアプローチの一つとして、交差点における信号機の制御パラメータを適切に操作し、交差点の交通状況に応じた信号機の挙動を実現させる手法が挙げられ、その研究は一定の成果を挙げている。信号機の制御パラメータを制御する手法としては、定周期制御と呼ばれる、事前に観測した交通パターンに対して適切なパラメータを設定し、その値を固定して制御する手法がある。また、MODERATO[1]は日本の主要交差点において導入されている信号機制御手法であり、感知器情報を管制センターに集約することで制御エリア内信号機の制御パラメータを一括管理することができる。

また、小中ら [2] や大野ら [3] は管制センターを介さず各信号機が自律的に制御パラメータを決定する自律

分散信号機制御を用い、より即応性の高い信号機制御手法を提案した。この制御手法は各交差点に対応する制御エージェントを配置し、各エージェントが自律的に信号機制御を行うことにより、定周期制御では対応できない交通事故のような突発的な交通状況の変動への対応を可能にし、また MODERATO が抱えていた、個々の交差点の交通状況に対して即応し辛いという課題の改善を行なった。即応性の高い自律分散制御手法としては遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ最適化手法 [4, 5] や深層強化学習を用いた手法 [6, 7] など存在するが、交通状況が複雑に変動する現実空間においては計算コスト等の制約により、汎用的な制御には至らないという課題が存在する為、動的な交通状況における即応性という観点において大野ら [3] の研究が残した功績は大きい。

一方で、上で挙げたような交通渋滞の解消のために信号機パラメータを制御する手法では、取り扱う交通情報が車両情報のみに留まる事も少なくない。多くの交差点は車道と歩道によって構成され、車両の通行とは別に歩行者の通行が存在する。歩行者による交通流も、交差点の交通状況を構成する要素の一つであり、適切な信号機制御を実現するためには歩行者の情報を考慮することも必要である。車両交通流のみの円滑化を

*連絡先：慶應義塾大学大学院理工学研究科
〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
E-mail: aeol.yy@keio.jp

目的とした制御では、歩行者の待ち時間を増加させてしまうなど、歩行者にとっては最適にならない状況も発生する。

そこで本研究では、自律分散によって高い即応性を実現した大野ら [3] の交通信号機スプリット制御手法を基に、車両情報に加えて歩行者の情報も考慮した信号機制御手法を提案し、従来の信号機制御手法を改善することで歩行者交通流の円滑化を図る。手法の検討においては、交通シミュレーションソフト SUMO を用いて交差点・車両・歩行者等の諸要素をシミュレーション空間上で再現し、車両情報のみを考慮した制御モデルと、歩行者情報も併せて考慮した制御モデルを比較することにより提案手法の有効性を検証する。

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図る。「現示」とは一つの交差点において、歩行者も含むある一組の交通流に対して同時に与えられている通行権、またはその通行権が割り当てられている時間帯のことを言い、一般的な十字四枝交差点においては東西・南北方向の二現示が用いられる。交差点形状によっては現示数は増加し、右折車専用現示や歩行者専用現示といった現示も存在する。現示を制御するパラメータとして以下の三つが挙げられる。

- サイクル長：現示が青、黄、赤と一巡し再度青になるまでの時間
- スプリット：交差点内における現示ごとの青時間比率
- オフセット：交差点間におけるサイクル開始時間のずれ

交差点におけるサイクル長は、長く設定し過ぎると無駄な待ち時間を増加させ、逆に短く設定し過ぎると車両や歩行者が交差点を通過しきれなくなるため、交通状況や交差点の大きさなどを考慮して決定される。スプリット制御は所与のサイクル長を基に、現示毎の交通量の過多を考慮して割り当てる青時間の比率を設定し、一サイクルにおける交差点の交通流を改善する。オフセット制御では、隣接交差点間における距離や交通状況を考慮し、サイクルの開始時間をずらすことにより交差点間の交通流の円滑化を図る。本研究では上記の三つのパラメータ制御の内、スプリットの値を制御する手法に着目し検討した。

3 信号機スプリット制御手法

本研究では、個々の交差点が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を提案し、性能の評価及び考察を行う。このモデルでは、それぞれの信号機に自律エージェントを配置し、各エージェントが担当交差点における信号機制御パラメータを決定する。2章で述べたように、各エージェントは担当交差点における信号機のスプリット値のみを制御する。先行研究として大野らが提案しているスプリット制御 [3] を基にしており、本研究では改良として、車両情報に加え歩行者情報も考慮する手法を提案する。

本研究はスプリットのみの制御を検討しているため、制御対象エリア内ではサイクル長は固定で、隣接交差点間でのサイクル開始時間のずれを発生させないことを前提とする。また、各交差点エージェントは自交差点の制御に必要な情報としてスプリット等の制御パラメータを把握することができ、交差点内に設置されたセンサにより担当交差点における局所的な交通状況を把握することができる。

3.1 信号機スプリット制御

本節では、各交差点におけるスプリット制御に関して説明する。

3.1.1 車両のみを考慮した制御手法

本研究では、大野らのばねモデル [3] に改良を加えたスプリット制御手法を用いて、各交差点のスプリット制御を行う。各交差点に配置されたエージェントは、担当交差点において観測した交通量を基に、ばねモデルの釣り合いの式を用いて一サイクル毎のスプリットを算出する。各交差点における現示は図 1 のように定義される。

図 1 に示したように、ばねモデルによる信号機制御手法では現示に対応したばねがお互いに釣り合いを保っている。図 1 の例では二現示であるため二つのばねで構成されているが、現示数が増えた場合はばねの個数を増やすことで対応できる。各現示において発生した交通流は、ばねに加わる力として仮想的に表現される。サイクル長固定の仮定により、ばねの全長は常に一定であるが、交通量の多い現示のばねにはより多くの力が加わるためばねの釣り合いの位置が変化する。これはばねモデルにおける変位量として定義され、変位したばねの長さの比率がスプリット比率として制御に導入される。ここで交通量とは、各交差点に流入する車両および歩行者の量を表す指標である。車両交通量の定義に関しては大野らのばねモデル [3] に準拠してお

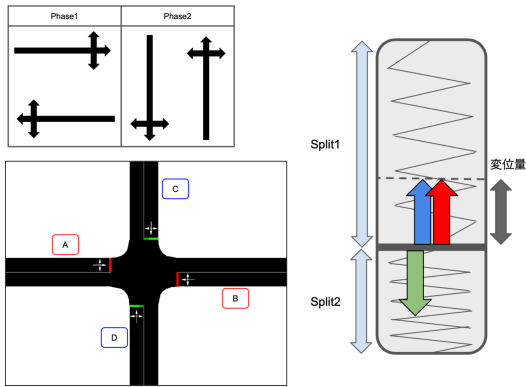


図 1: 二現示交差点によるばねモデルの概略図

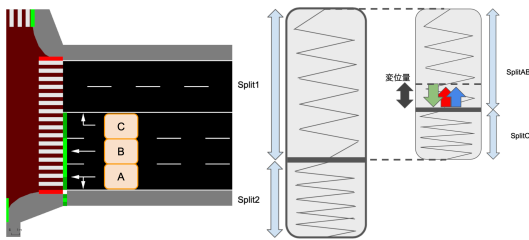


図 2: 右折専用レーンを考慮したばねモデルの概略図

り、交差点への車両流入台数と、現示毎の車両はけ残り台数を用いて算出した数値となっている。

また、交差点の車道に右折専用レーンが存在する場合には図 1 のモデルに改良を加えた右折専用レーン対応のばねモデルによってスプリット計算を行うことができる。右折専用レーンがある道路とは、図 2 に示すような、直進左折レーンおよび右折専用レーンを含む三車線を想定しており、全方向通行可能な現示と右折車のみが通行できる右折専用現示によってサイクルが構成される。

このような交差点を考慮するばねモデルでは、まず右折専用現示を考慮しない通常のスプリット計算を行うことにより、全方向通行可能な現示と右折専用現示を合成した一つの現示と見做して暫定的なスプリット比率を算出する。その後、一度比率の定まったばねの内部で直進右折現示と右折専用現示を分割し、それぞれの現示に対応するばねを設定する。この二つのばねは、長さの合計が分割前のばねの長さに等しくなるよう保たれるという条件のもと、初めに行なったスプリット比率の算出方法と同様の方法でばねの変位置量およびスプリットを算出し、最終的な青時間の長さが決定される。

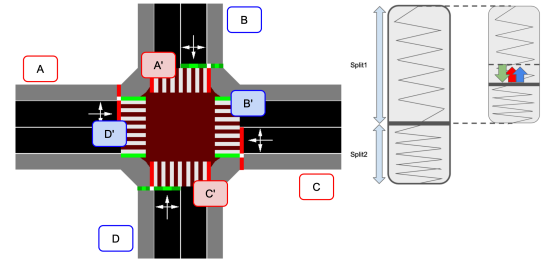


図 3: 歩行者を考慮したばねモデルの概略図

3.1.2 歩行者を考慮した制御手法

3.1.1 節で説明したばねモデルによるスプリット制御手法を改良し、歩行者情報を考慮するばねモデルの概略図を図 3 に示す。

歩行者情報を考慮するばねモデルでは、車両のみを考慮するばねモデルでは想定されていなかった側道・歩行者溜まり・横断歩道等を観測対象とすることで、歩行者交通流を考慮する。具体的には、各現示に対応するばねの内部に車両用のばねに加え、歩行者用のばねが設定される。それぞれのばねは 3.1.1 節で説明したのと同様の原理で、対応する交通流の量に応じたばねの力を受け、通常のばねモデルと同様に、釣り合いの位置の変化を表す交差点の変位置量を計算するために用いられることでスプリット比率の算出に反映される。歩行者の交通量は、その現示における車両交通量と併せて変位置量の計算に用いられ、歩行者交通量と車両交通量をそれぞれの考慮度合いで重み付けした値を基に総合的な交通量が与えられる。総合的な交通量の計算式は重み係数を W として以下のように定義する。

$$[\text{交通量}] = W[\text{歩行者交通量}] + (1 - W)[\text{車両交通量}] \quad (1)$$

ここで、重み係数 W は各情報の考慮度合いを示すために設定する値である。重み係数が大きいほど、交差点のばねモデルにおいて歩行者用のばねから受ける力の割合が大きくなり、意味合いとしては歩行者を重要視するスプリット制御を行うことになる。また、 $W = 0$ では歩行者を一切考慮しないことになるため、本提案手法の基となった大野ら [3] の手法と全く同一の制御となる。

4 歩行者情報考慮に関する評価実験

この実験では 3.1.2 節で述べた歩行者情報を考慮したスプリット制御手法についての、評価実験に関する説明を行う。

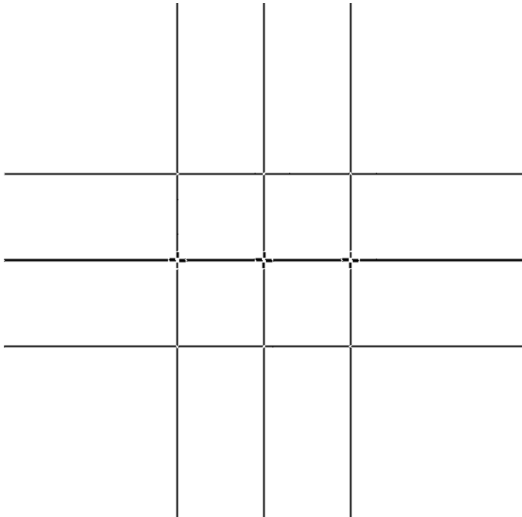


図 4: 3x3 ネットワーク外観図

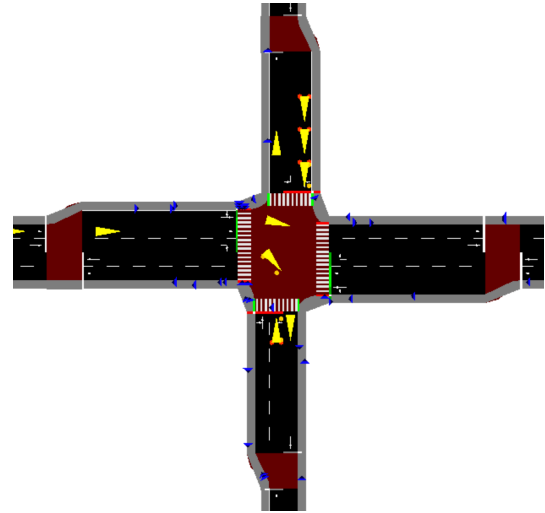


図 6: 実験画面例

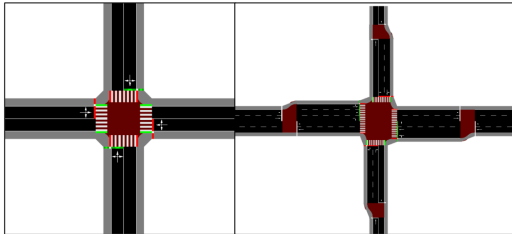


図 5: 各交差点の詳細図

4.1 実験概要

評価実験では、交通ネットワークをシミュレーションする環境として交通シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) を用いた。SUMO はドイツ航空宇宙センターにて開発されているオープンソースの交通系物理シミュレータであり、道路ネットワークの作成、車両に加え歩行者の作成、信号機の各種パラメータ操作による現示の制御、シミュレーション空間上の交通情報の取得等の機能を有しており、後述するように GUI では画面上に道路ネットワークとそこで稼働する車両・歩行者・信号機の現示の様子などを視覚化することができる。

実験用ネットワークとしては、十字路のみで構成された三列三行、計九交差点が存在する碁盤状の道路ネットワークを想定した。SUMO における実験環境の外観図を図 4 に示す。

この交通ネットワーク上には東西方向に三列の車道が走っているが、この内上下の二列を非幹線道路、中央の一行を幹線道路として設定した。非幹線道路および幹線道路の道路および交差点形状を図 5 に示す。

設定項目	車両	歩行者
大きさ	4.3m	0.215m
最高速度	180km/h	5.4km/h
通行の優先度	低	高

幹線道路は双方向二車線とその外側に通る歩道で構成され、幹線道路の通る交差点に流入する手前で右折専用レーンを含む三車線に分岐する。非幹線道は、双方向一車線のみとその外側に通る歩道で構成され、非幹線道路同士の交差点では右折専用レーンは存在しない。また、非幹線道路と幹線道路が交差する場合、非幹線道路側にも右折専用レーンを設け二車線に分岐する。

実験時にネットワーク上で車両および歩行者が通行している GUI 画面の例を図 6 に示す。

シミュレーション期間は 14400step、各交差点における一サイクルの長さは 100step で固定とした。なお、SUMO 上では時間の単位が step であり、1step が現実時間の 1 秒に相当する。

また、シミュレーション内での車両および歩行者の各種設定を表 1 に示す。「大きさ」はシミュレーション上で作成した車両および歩行者の前方から後方までの長さを示す。「通行優先度」は同時刻に二者間の通行ルートが交差した場合に通行の順序を決める優先度を示しており、本実験では歩行者を優先的に通行させる設定にしている。

実験に用いた車両および歩行者流入数の step 帯毎における設定を表 2、表 3 に示す。

車両流入数・歩行者流入数共に、3600step 毎に東西・南北の比率を変化させ、より複雑な道路環境を想定し

表 2: 車両流入数設定

[step]	南北 [台/h・車線]	東西 [台/h・車線]
0 ~ 3600	180	540
~ 7200	540	180
~ 10800	180	540
~ 14400	540	180

表 3: 歩行者流入数設定

[step]	南北 [人/h・車線]	東西 [人/h・車線]
0 ~ 3600	180	540
~ 7200	540	180
~ 10800	180	540
~ 14400	540	180

た。また、歩行者情報を考慮する度合いを示す重み係数 W の値としては 0.1, 0.3, 0.5 の三つの値を設定し、それぞれ実験を行なった。

最後に、本実験では提案手法の有効性評価を行うため、比較手法として歩行者を考慮しない大野らの制御 [3] を用いた。

4.2 実験結果

それぞれの制御手法を用いて歩行者および車両を走らせた際の累積待ち人数・待ち台数を表 4 に示す。

表 4 より、歩行者情報を考慮しない制御に比べ、一定の割合 W で歩行者情報を考慮する制御では累積待ち人数が減少していることが分かる。また、最も歩行者を考慮した $W = 0.5$ の制御においては歩行者を考慮しない制御に比べ約 2.9% の待ち人数を減少させている。一方、累積待ち台数に関しては歩行者情報を考慮する制御手法では、定周期制御よりは少ない値になっているが、大野らの手法に比べ増加する結果となっており、特に歩行者情報を考慮する割合を示す重み係数が最も高い $W = 0.5$ では、歩行者を考慮しない制御に比べ約 7.9% の待ち台数を増加させる結果となった。

表 4: 実験結果

制御手法	待ち人数 [人]	待ち台数 [台]
定周期制御	1387223	2940408
大野ら [3] の制御	1334365	1962861
W=0.1	1304768	2054131
W=0.3	1306859	2102415
W=0.5	1295494	2117677

4.3 考察

実験結果より、ばねモデルによるスプリット制御手法に歩行者情報を取り入れる制御手法では、ネットワーク全体における累積歩行者待ち人数を減少させる効果があることが分かり、本手法の有効性を確認できた。一方で、歩行者情報を取り入れることにより累積車両待ち台数を増加させてしまうことも確認した。

歩行者待ち人数を減少させた要因としては、歩行者交通流としてばねに加わる力がばねモデルにおける各交差点の変位量に影響し、ばねの釣り合いの位置が変化した結果、スプリット比率の算出値に影響を与え、歩行者がより通過しやすいスプリット比率となったことが考えられる。また歩行者によってばねに加わる力は、従来の車両のみによるばねの釣り合いにとっては外乱要因であり、車両にとって通過しやすいスプリット比率からは遠ざかってしまった結果、車両の待ち台数が増加してしまっただことが考えられる。

5 結論および今後の展望

本研究では、大野らが提案したマルチエージェント動的信号機制御モデル [3] を改良し、歩行者情報を考慮した信号機制御手法を提案した。実験では提案手法の評価を行い、歩行者情報を考慮することによる制御によって歩行者待ち人数を減少させることを確認した。歩行者情報を考慮することは、交通信号制御の目的が車両交通流のみの円滑化に偏重することを防ぎ、より現実世界において適用可能な制御モデルを構築することを可能にする。今後の展望として、本研究では歩行者交通流をサイクル毎に不足無く取得できることを前提としたが、現実空間を想定した場合、設置できるセンサ数の制約により交差点四方向のうち一箇所しか情報を取得できないことや、通信頻度の制約により一定の時間間隔でしか情報を取得できないことなど、シミュレーション上との差異が考えられる。本研究が携わる NEDO プロジェクトでは、プロジェクトの一環として実証実験が計画されているため、実証実験に向け更なる手法の精緻化を図っていく必要がある。また、本研究では歩行者情報の考慮として単に、歩行者交通流の円滑化に焦点を当ててスプリット制御手法の検討を行ったが、より詳細に考慮する場合車両と歩行者とのインタラクションを考える必要がある。例えば、交差点においては右折・左折する車両は横断歩道上を通過する為、同タイミングで通行しようとする歩行者と通行路が交差するが、この際車両は歩行者を優先的に通過させるために余計な待ち時間を発生させてしまう。このような歩行者-車両間の相互作用によって発生する車両や歩行者の待ち・遅れに関しても、詳細に検討し制御

に反映させていくことでより現実空間に即した制御手法を構築することができると考えられる。

謝辞

本件は、NEDO・人工知能技術適用によるスマート社会の実現事業「人工知能を活用した交通信号制御の高度化に関する研究開発」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Sakakibara, H., Usami, T., Itakura, S. and Tajima, T.: MODERATO (Management by Origin-Destination Related Adaptation for Traffic Optimization), *Proceedings 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No. 99TH8383)*, pp. 38–43 (1999).
- [2] 小中裕次郎, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原聡 : 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, 人工知能学会全国大会論文集第 24 回全国大会 (2010), pp. 2I1OS52–2I1OS52 (2010).
- [3] 大野啓介, 神崎陽平, 高屋英知, 栗原聡 : マルチエージェント動的信号機制御システムの提案, 研究報告知能システム (ICS), Vol. 2020, No. 15, pp. 1–8 (2020).
- [4] Goto, Y., Komaya, K. and Fukuda, T.: A simulation experimental study of traffic signal control by using genetic algorithm, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 115, No. 6, pp. 784–792 (1995).
- [5] 西原稔貴, 松元駿太, 上瀧剛, 内村圭一, 杉谷浩, 石垣信一 : 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 (ITS), 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報, Vol. 111, No. 441, pp. 263–268 (2012).
- [6] van der Pol, E.: Deep reinforcement learning for coordination in traffic light control, *Master's thesis, University of Amsterdam* (2016).
- [7] Li, L., Lv, Y. and Wang, F.-Y.: Traffic signal timing via deep reinforcement learning, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 3, No. 3, pp. 247–254 (2016).