

群知能型交通情報補間システムの提案

The Proposal of Swarm Intelligence-based Control Approach for Interpolating Traffic Information

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

Satoshi Suga¹, Ken Hayashi², Fumito Ihara², Yuji Yamada¹, Ryu Fujimori¹ 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: 都市部にて頻発する交通渋滞は時間的損失や経済的損失、環境汚染などを引き起こすため深刻な社会問題の一つとして挙げられる。このような背景から、近年では交通渋滞の解消を目指した研究が盛んに行われている。交通渋滞解消に向けたアプローチの一つとして、適切な交通信号機制御が挙げられる。交通信号機制御に関する研究では、交通情報の利用を前提とするものが多い。このとき、交通情報は交差点にセンサーを設置することで得られるが、現実の道路環境では、立地条件やコストなどからセンサーを設置することが困難な交差点が存在する。また交通情報は時間経過や突発的なイベントにより変化する。そこで、本研究ではACOアルゴリズムを用いて、センサー設置交差点からの交通情報をもとに交通量が類似する経路を創発させることで、センサー未設置交差点の交通情報を動的に補間するシステムを提案する。シミュレーション実験の結果、提案手法は従来手法と比べて動的に正しく交通情報を補間できることが示された。

1 はじめに

日本では、移動手段として自動車利用の需要が高い。しかし、自動車の利用増加は渋滞や環境への負担、交通事故の増加などの問題をもたらしている。特に都市部にて頻発する交通渋滞は、ドライバーの時間的損失や経済的損失、排気ガスの排出による環境汚染を引き起こす原因になり得るといった深刻な社会問題の一つとして挙げられる。日本全国で年間に発生する時間的損失は約38.1億時間、経済的損失は12兆円と言われており、産業活動に悪影響を与えている。一般道路の場合、交通渋滞が起こる原因の一つは交差点である。交差点では、信号機により車両の通過を制御することで、交通の安全を確保し交通の流れを円滑にする。しかし、信号機により車両の通行が制限されるため、交通流に即さない信号機制御は渋滞を発生させる原因となる。そのため、信号機のパラメータを適切に制御し、円滑な交通流を生み出すことは、交通渋滞緩和のアプローチとして有効である。こうした背景から、近年では交通渋滞緩和に向けた信号機制御に関する研究が盛んに行われている。例えば、Xuらはグリーンウェーブを渦状

に発生させ、グリーンウェーブの渦に合わせて経路案内を行うGreenDriveと組み合わせることで交通渋滞を緩和するシステムを提案した[1]。また大野らは、ばねモデルを用いてスプリットを制御する各交差点の信号機が、隣接する交差点の信号機と連携して自律的に信号機制御を行う、自律分散型信号機制御手法を提案した[2]。

交通渋滞緩和に向けた信号機制御に関する研究では、信号機のパラメータを制御するうえで、車両の通過台数といった交通情報を取得し、取得した交通情報を用いて信号機制御を行う方法が多く存在する。このとき、実環境でこのような研究を実現するためには、交通情報を取得するために、車両感知センサー等を交差点に設置する必要がある。しかし、現実の道路環境では、立地条件やコスト面の問題から、センサーを設置することが困難な交差点が存在する。そのため、交通渋滞緩和に向けた信号機制御に関する研究を実環境で実現するためには、センサー未設置の交差点の交通情報を補間する必要がある。

一般的な交通流は、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、時間経過によって変化を伴う。また、突発的な事故やイベントの開催などによって、一時的な交通流の変化が生じるなど複雑な動態を示す。そこで本研究では、車両感知センサーが設置さ

*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: ssuga@keio.jp

れていない交差点に流入する道路を対象とした動的な交通情報補間システムの提案を行う。関連研究として、小川らは、フェロモンコミュニケーション法を用いて、交通情報の相関性が高い道路リンク関係を発見することで、交通情報を取得できない道路リンクの交通情報を補間し、効果的に信号機制御を行う手法を提案した[3]。また神崎らは、小川らの提案したフェロモンコミュニケーション法において、エージェントが車線数や右左折を考慮した動きを行うよう改善することで、センサー設置交差点の位置関係を把握することができ、より広範囲に交通情報を伝播させる手法を提案している[4]。しかし、神崎らの手法は、車両数の多い道路リンクに対して、適切なフェロモン場の形成がされにくく、相関性の高い道路リンクを発見することが難しいことから、実際の交通情報と大きく異なる交通情報を補間するケースがあるといった課題や、適切なフェロモン場を形成するためのパラメータ設定が手間であるといった課題が挙げられる。そこで本研究では、神崎らの提案したフェロモンコミュニケーション法をもとに、車両数の多い道路リンクに対して、より適切に交通情報補間ができるようなシステムを提案する。また、神崎らの提案したフェロモンコミュニケーション法を改良し、パラメータ数を削減した交通情報補間システムを提案する。

2 群知能型交通情報補間システム

2.1 システム概要

本研究におけるシステムの概要について述べる。まず、センサー設置交差点から得られる各道路リンクの交通情報をもとに、群知能アルゴリズムの一つである、Ant Colony Optimization(以下、ACO)アルゴリズム[5]に基づいた経路創発によって、類似な交通流の経路を創発させる。そして、ACOアルゴリズムにより創発された経路に基づき、センサー未設置交差点における道路リンクの交通情報を補間する。ここで述べている道路リンクとは、交差点によって区切られる片方向道路のことである。また、交通情報とは、各道路リンクの単位時間あたりの交通量である。各道路リンクの交通情報の補間は信号機の1サイクル長ごとに行われる。以後、この時間間隔をタイムスパンと呼ぶ。タイムスパンは短く設定すれば、リアルタイムな交通情報の予測値が得られるが、一回の解析に用いる交通情報が少なくなり、精度が落ちる欠点がある。一方、タイムスパンを長くすることで、交通情報を多く確保できるため予測精度の向上が期待できるが、交通情報補間のリアルタイム性に乏しくなる。これらはトレードオフの関係にあり、適切なタイムスパンを設定する必要がある。

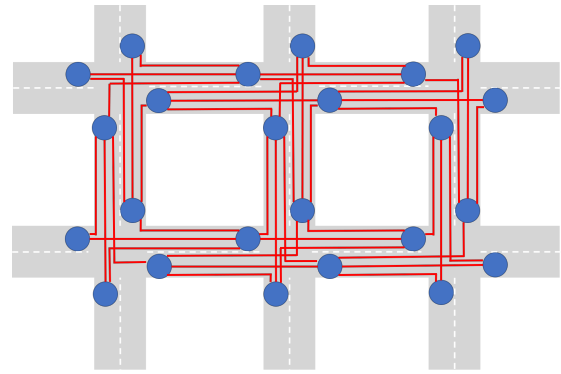


図 1: エージェントが動作するネットワーク空間

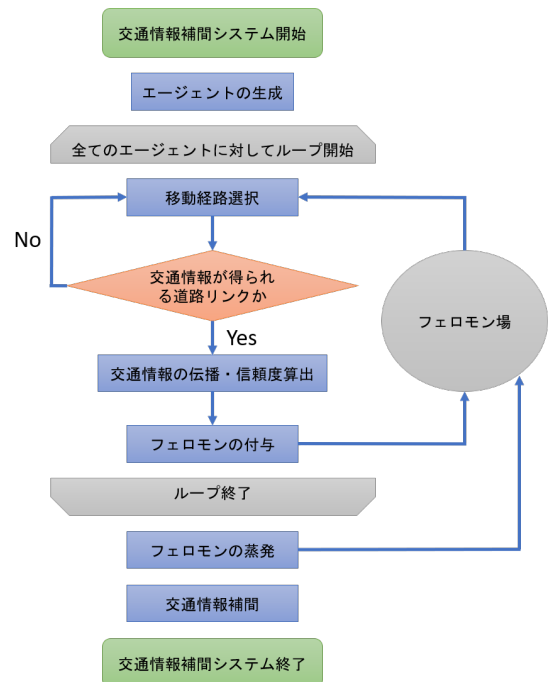


図 2: 交通情報補間システムの流れ

本研究では、ACOアルゴリズムに基づき類似な交通量間の経路を創発させる必要がある。そのため、まずアリエージェントが動作する空間を用意する必要がある。本研究では、道路環境をもとに、各道路リンクをノードとし、進行可能な道路リンク間をエッジとして結んだネットワーク空間を構築する(図1)。そして、交通量の類似度をフェロモン場とする空間で、アリエージェントが交通情報を運ぶことで、類似な交通量間の経路を創発させる。

ACOアルゴリズムによる交通情報補間システムについての詳細を述べる。まず、アリエージェントは交通情報を得られる道路リンク上にその道路リンクの交通情報を所持した状態で生成される。その後、フェロモン場上のフェロモン量に基づいて移動経路を決定し、移動先の道路リンクへ所持している交通情報を伝播させ

る。アリエージェントは、別の交通情報が得られる道路リンクにたどり着くまで、フェロモン場に基づく経路選択を行い、移動する。移動後に、自身の所持する交通情報と移動先の交通情報を比較し、移動経路の評価を行い、その評価値として移動経路上のフェロモン値を更新する。以上を繰り返すことで類似な交通流の経路を創発し、適切な交通情報の補間を達成することを試みた。また、類似な交通流は、時間帯と共に変化することが考えられるため、ACO アルゴリズムの有する柔軟性や適応性は有効な性質であるといえる。図2に交通情報補間システムのフローチャートを示す。

2.2 エージェントの生成

まず、交通情報が得られる各道路リンク上にアリエージェントを生成する。時刻 t 、道路リンク i におけるアリエージェントの生成数を $N_i(t)$ 、アリエージェントの生成元の交通情報を $RV_i(t)$ と表す。生成されたアリエージェントは生成元の交通情報の移動平均値 ($\overline{RV_i(t)}$) を所持しており、他の道路リンクへこの情報を広める役割を持っている。各道路リンクにおいて生成されるアリエージェント数 $N_i(t)$ は生成元の交通情報の移動平均値 $\overline{RV_i(t)}$ に基づき決定される。

$$N_i(t) = \overline{RV_i(t)} \quad (1)$$

2.3 移動経路選択

次に各アリエージェントの移動経路を決定する。各アリエージェントの移動先道路リンクの選択肢は、自身の道路リンクの進行方向に接続している道路リンクである。従って、例えばアリエージェントが4差路の交差点に接続する道路リンクに存在している場合、直進先の道路リンク、右折先の道路リンク、左折先の道路リンクの3つの道路リンクが移動先の選択肢となる。

各道路リンクは、それぞれの各移動対象道路リンクに対して交通情報の類似度を示すフェロモン値を有する。このフェロモン値はアリエージェントのフェロモンの付与により増加し、またフェロモンの蒸発によって減少する。また、 $t=0$ のシステム開始時には全ての移動対象道路リンクへのエッジに初期値 τ_{ini} が与えられる。

各アリエージェントはフェロモン値が高い経路を好んで選択するように設定されている。道路リンク i から移動対象道路リンク j を考えたとき、移動対象道路リンクのフェロモン値を $\tau_j(t)$ とすると、道路リンク i から j へのアリエージェントの移動確率 $p_{i,j}(t)$ は以下のように定義される。

$$p_{i,j}(t) = \frac{\tau_j(t)}{\sum_j \tau_j(t)} \quad (2)$$

このとき、アリエージェントは一定の確率 A_{random} で式 (2) による経路選択によらず、ランダムに移動対象道路リンクの中から1つの道路リンクを選ぶように設定されている。これは、過度なフェロモン場の収束が発生し、他の類似度の高い道路リンクへの経路が発見されなくなってしまう事態を防止するためのものである。以上の手法に従って、別の交通情報を得ることができる道路リンクに到達するまで経路選択と移動を実行していく。

2.4 交通情報の伝播と信頼度算出

交通情報補間を行う際に、アリエージェントによって伝播された交通情報に対して信頼度をもとに補間を行う(補間の詳細は2.7節で述べる)。本節では、信頼度の算出方法について説明する。各アリエージェントは移動経路決定後、決定した対象道路リンクへ移動を行い、通過経路上の補間対象の道路リンクに対して、自身の所持する交通情報を伝播する。また、交通情報の伝播と同時に、通過した経路情報によって自身の所持する交通情報の信頼度を算出する。一般的に補間対象道路リンクから近い道路リンクで生成されたアリエージェントの所持する交通情報は、補間対象道路リンクの交通情報と類似であるという信頼度は高く、補間対象道路リンクの交通情報と類似度が高いと判断されている道路リンクから生成されたアリエージェントの所持する交通情報は、当然のことながら補間対象道路リンクの交通情報と類似であるという信頼度が高いと考えられる。従って、信頼度に関わる要素は、移動ホップ数と移動経路のフェロモン値とした。

道路リンク i から発生したエージェント k が道路リンク m を通過していた時、エージェントの移動ホップ数を $h_{i,m}$ とした場合、エージェント k が所持する補間交通情報 $AV_m^k(t)$ 、信頼度 $AR_m^k(t)$ を以下の様に計算する。

$$AV_m^k(t) = \overline{RV_i(t)} \quad (3)$$

$$AR_m^k(t) = (1 - H_{reduce})^{h_{i,m}} \times \frac{\sum_m \tau_j(t)}{h_{i,m}} \quad (4)$$

このとき、 H_{reduce} はエージェントの移動距離に対する信頼度の減少率を示すパラメータであり、 $H_{reduce} \in (0, 1]$ である。本研究では $H_{reduce} = 0.05$ とした。

2.5 フェロモンの付与

各アリエージェントは、フェロモンを付与しながら移動してきた経路を辿り、生成元の道路リンクまで戻る。付与されるフェロモン量はエージェントの生成元

の交通情報と移動先の交通情報の類似度で決定される。すなわち、交通情報が類似な道路間では、フェロモンが多く付加され、その結果より多くのアリエージェントが類似な道路リンクへの経路を選択しやすくなるといった、正のフィードバックループが働く。道路リンク i で生成されたアリエージェントが道路リンク p へ移動したとき、このエージェントの通過した経路におけるフェロモン増加量 $\Delta\tau_{i,p}(t)$ は、以下のように計算する。

$$d = \sqrt{(RV_i(t) - RV_p(t))^2} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{i,p}(t) = \frac{1}{1+d} \quad (6)$$

このとき、 d は二つの道路リンクの交通情報のユークリッド距離を表す値である。

2.6 フェロモンの蒸発

フェロモンは一回の創発フェイズごとに一定割合 e ($e \in (0, 1]$) だけ蒸発する。この蒸発作用により、類似度の低い道路リンク間のフェロモン値が下がり、類似度の高い道路リンク間に対して効率的に交通情報を伝播させることができる。本研究では $e = 0.05$ とした。

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) \times (1-e) \quad (7)$$

2.7 交通情報補間

全てのアリエージェントが移動を終えると、各道路リンクは自身に伝播された補間候補交通情報の中から、最も信頼度の高いものを伝播補間交通情報として採用する。道路リンク m において、伝播された補間候補交通情報が o 個であり、それらの内容が $AV_m^1(t)$, $AV_m^2(t)$, ..., $AV_m^o(t)$ および $AR_m^1(t)$, $AR_m^2(t)$, ..., $AR_m^o(t)$ であった場合、伝播補間値 $PV_m(t)$ および伝播信頼度 $PR_m(t)$ は以下ようになる。

$$PV_m(t) = AV_m^l(t) (l = \operatorname{argmax} AR_m^k(t)) (k = 1, 2, \dots, o) \quad (8)$$

$$PR_m(t) = AR_m^l(t) (l = \operatorname{argmax} AR_m^k(t)) (k = 1, 2, \dots, o) \quad (9)$$

以上の手順を経て、センサー未設置の交差点における道路リンクの交通情報が補間される。

3 評価実験

3.1 実験環境

提案システムの有効性を評価するため、本研究では交通シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility)

を用いて、シミュレーションによる評価実験を行った。シミュレータにおける 1step は実時間の 1 秒に対応している。シミュレーションの道路環境として、 11×12 の格子状の道路ネットワークを用いる。各流入路は 1km、交差点間の距離は 500m として設計した。また、センサー設置交差点と未設置の交差点が交互になるよう、一部の交差点にセンサーを設置した。センサーが設置してある交差点では、交差点へ流入する車両の台数を取ることができるものとする。また本研究において、センサーによって観測可能な範囲は 150m として設定した。

3.2 評価方法

交通量の多い主要な交通流を形成する道路リンクを対象に、センサー未設置交差点に流入する道路リンクの交通情報補間の精度を評価する。精度の評価方法として、シミュレータで取得した正解データに対する補間値の残差平方和を算出する。評価対象の範囲は、シミュレータ自体に入出する車両の影響を省くために、周囲 2 交差点ずつを除いた 7×8 の交差点までとし、アリエージェントの行動範囲は評価対象の範囲内とした。

比較手法として、道路交通センサスにおける一般交通量調査によって得られた交通量データを用いた交通状況把握手法を比較手法とする。実験シミュレータによって得た、シミュレーション時間分の交通量データを道路センサスによって得られた交通量データとし、その平均値を比較手法による補間値とする。

4 実験結果

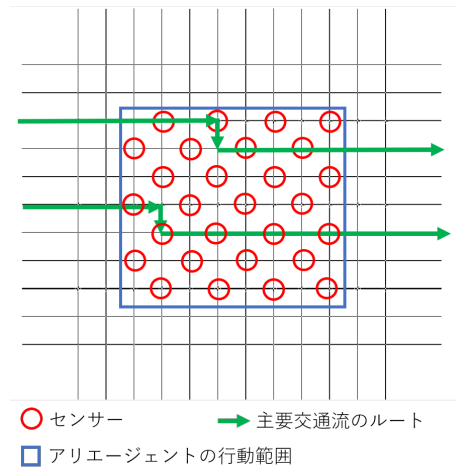


図 3: 実験 1 のシミュレーション内容

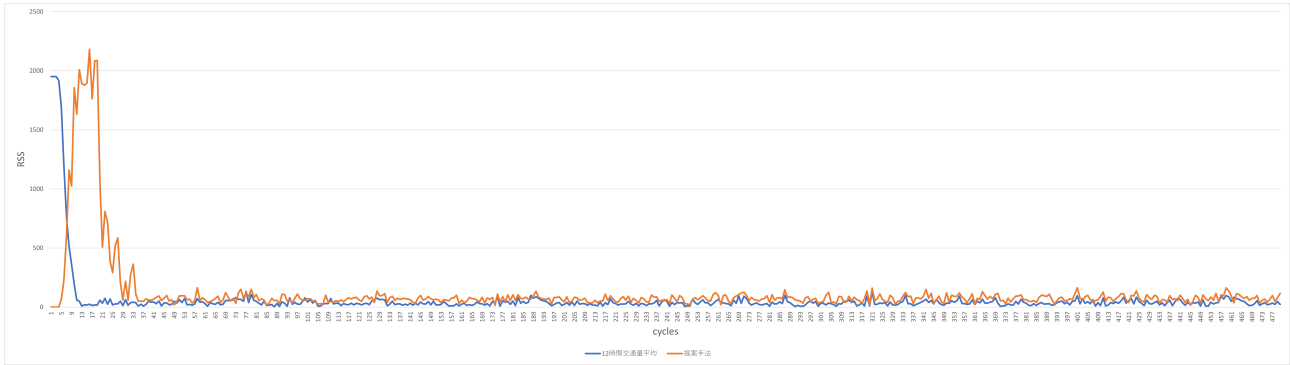


図 4: 実験 1 の結果

4.1 実験 1

実験 1 のシミュレーション内容を図 3 に示す。交通量の多い主要な交通流が 2 か所存在するシミュレーションで実験を行った。主要な交通流は全シミュレーション期間を通して変化しない。シミュレーション期間は 43200step(=12 時間) で実験を行った。主要な交通流を形成する車両は、一定の時間間隔で流入口から流入し、あらかじめ定められた経路を進む。また、主要な交通流を形成する車両以外に、各流入口から 1%/step の確率で流入し、各交差点で直進 80%、右折 10%、左折 10% の確率で進路を選択する車両も混在している。

実験 1 の結果を図 4 に示す。横軸はサイクル数、縦軸は残差平方和を表している。図 4 の青線が比較手法の 12 時間交通量平均、橙線が提案手法の結果を示している。シミュレーション初期で比較手法の残差平方和が高いのは、初期の段階では車両が流入し始めた段階のため、道路環境上に車両が存在していないことが原因であると考えられる。提案手法では、比較手法に遅れて残差平方和が高くなっている。これは、道路環境に車両が存在している状態に、フェロモン場が適応していない段階のため、アリエージェントが補間対象の道路リンクに適切な交通情報を伝播できていないことが原因であると考えられる。しかし、時間経過によってフェロモン場が交通状況に適応し、残差平方和を小さくできていることが分かる。実験 1 では、主要交通流を形成する車両が一定の時間間隔で流入することから、主要交通流の車両数は全シミュレーション時間であまり変化しないため、比較手法が優れたパフォーマンスを示している。しかし、提案手法も比較手法に近いパフォーマンスを示すことができた。

4.2 実験 2

実験 2 のシミュレーション内容を図 5 に示す。交通量の多い主要な交通流が 2 か所存在するシミュレーション

で実験を行った。主要な交通流はシミュレーションの前後半で変化する。シミュレーション期間は 43200step、前半 21600step、後半 21600step で実験を行った。主要な交通流は前半、後半どちらも 2 か所である。実験 1 と同様に、主要な交通流を形成する車両は、一定の時間間隔で流入口から流入し、あらかじめ定められた経路を進み、主要な交通流を形成する車両以外は、各流入口から 1%/step の確率で流入し、各交差点で直進 80%、右折 10%、左折 10% の確率で進路を選択する。

実験 2 の結果を図 6 に示す。横軸はサイクル数、縦軸は残差平方和、青線が比較手法の結果、橙線が提案手法の結果を示している。実験 2 では、シミュレーションの前後半で交通流が変化するため、比較手法の残差平方和は実験 1 と比べて高くなっている。一方、提案手法では、シミュレーション前半は実験 1 と同様の結果を示している。シミュレーション後半初期では、フェロモン場が交通流の変化に対して適応していないため、残差平方和が急激に上昇している。その後、残差平方和の結果が大きく振動している箇所が見られる。これは、フェロモン場が交通流の変化に適応してきている段階であり、アリエージェントが交通流変化前に大きかったフェロモンを辿ることで、正しくない交通情報を補間するケースと、交通流変化後の上昇中のフェロモンを辿ることで、正しい交通情報を補間するケースが混在しているためであると考えられる。その後、フェロモン場は交通流の変化に適応し、残差平方和を小さくできていることが分かる。実験 2 において、提案手法は比較手法と比べて優れたパフォーマンスを示すことができた。また、交通流の変化に対して動的な交通情報補間が行われていることが示された。

5 まとめ

本研究では、スマートな交通信号制御に向けた研究の課題である、センサー未設置の交差点において交通情報の取得が不可能な問題に対して、ACO アルゴリズム

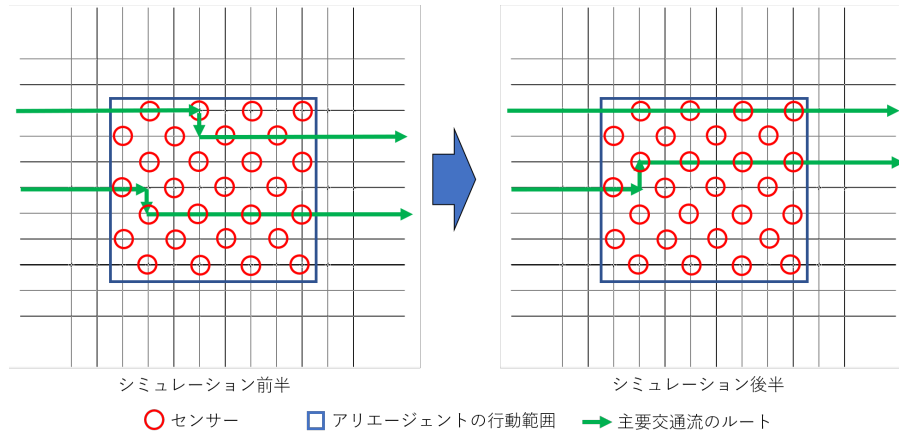


図 5: 実験 2 のシミュレーション内容

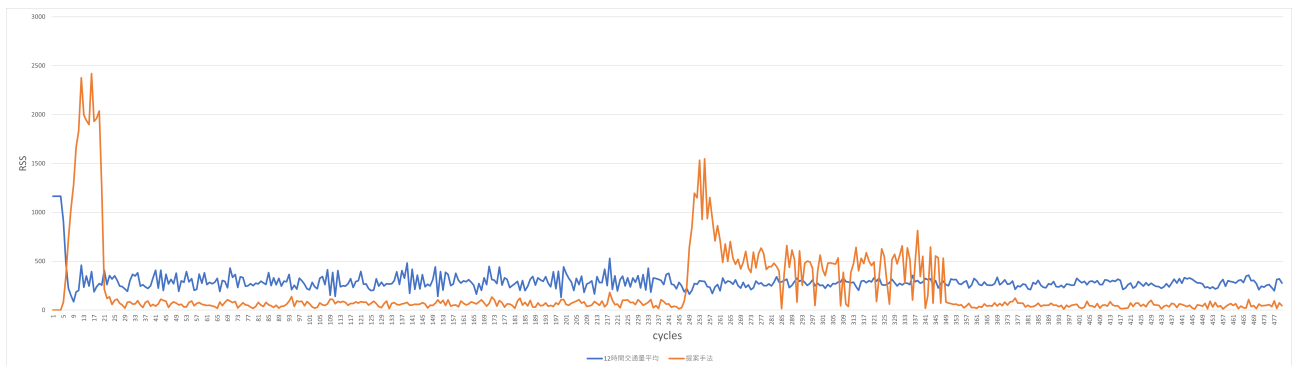


図 6: 実験 2 の結果

ムを用いて交通情報補間を行うシステムを提案した。また、提案手法の評価として、車両数の多い主要な交通流を有するシミュレーションで従来手法との比較実験を行った。実験の結果、交通流変化を伴わないパターンの場合、提案手法は従来手法に近いパフォーマンスを示すことができた。一方、交通流変化を伴うパターンの場合、提案手法は従来手法より優れたパフォーマンスを示すことができ、動的な交通流変化に対して、動的に対応した交通情報補間を行うことができることが示された。

本研究では、1つのセンサー配置状態のみで実験を行っている。今後の課題として、様々なセンサーの設置状況に対する、提案手法の有効性を確認する必要がある。また、実環境の交通流や道路環境は非常に複雑である。本研究では主要な交通流を形成する格子状の道路ネットワークにおいて実験を行ったが、実際の道路環境に即したシミュレーションへの適応も重要な課題である。

謝辞

本研究は、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] Xu, J., Sun, W., Shibata, N. and Ito, M.: GreenSwirl: Combining traffic signal control and route guidance for reducing traffic congestion, 2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC) (2014).
- [2] 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).
- [3] 小川亮, 坪井一晃, 栗原聡: 群知能メカニズムによる交通制御システムの提案, 人工知能学会全国大会論文集第31回全国大会 (2017).
- [4] 神崎陽平, 大野啓介, 栗原聡: 群知能アルゴリズムによる交通情報補間システムの提案, 研究報告知能システム (ICS), Vol. 2020, No. 10, pp. 1-7 (2020).
- [5] Dorigo, M., Birattari, M. and Stutzle, T.: Ant colony optimization, IEEE computational intelligence magazine, Vol. 1, No. 4, pp. 28-39 (2006).