

期待混雑度を用いた交通信号の最適化

Optimization of Traffic Signals by using Expected Traffic Congestion

江澤 広泰 † 向直人 †

† 東京理科大学大学院 工学研究科 電気工学専攻
東京都千代田区九段北 106-0073
j4309617@ed.kagu.tus.ac.jp

† 東京理科大学 工学部第一部 電気工学科
東京都千代田区九段北 106-0073
mukai@ee.kagu.tus.ac.jp

1. はじめに

近年、増加傾向にある渋滞等の道路交通問題を解決する手段として、Intelligent Transportation System(ITS)が注目を集めている。ITSとはコンピュータ、エレクトロニクス、および高度なセンシング技術を使用することによって、交通問題を解決するシステムの総称であり、その重要なテーマの1つとして、交通渋滞問題が挙げられる。渋滞の原因の一つは信号待ちによって引き起こされる遅延であり、新たな信号制御手法の提案が期待されている。本稿では、信号待ちによる交通渋滞を緩和するために、期待混雑度と呼ばれる渋滞指標を用いて、交通信号を動的に最適化することを目的とする。

現行の交通信号制御では、混雑状況を基に予め用意された制御パターンから最適なものを選択するパターン選択法が主流である。しかし、交通状況に適したパターンを予め作成すること、作成したパターンから最適パターンを選択することは困難である。これに対し、マルチエージェントを用いた信号制御手法が提案されている[1-3]。この手法では交通状況を反映した動的な制御が可能であるが、隣接信号との関係性が考慮されていない。また、遺伝的プログラミングや強化学習などを用いて隣接信号の状況を考慮した学習型の信号制御手法が提案されている[4]。しかし、学習型の信号制御手法は交通状況の学習時間が必要であり、時々刻々と変化する交通状況にリアルタイムに対応することが難しい。さらに、車両のプローブ情報（位置情報・速度情報）に基づきリアルタイムに信号を制御する車両感应型の信号制御が提案されている[5-11]。しかし、現状の車両感应型の信号制御では一方方向のみを考慮しており、通過車両数が多い交差点での制御には不十分である。

そこで、本研究では、各車両の経路情報を共有することにより混雑状況を予測し、信号を制御する手法を提案する。提案手法では、各車両は定期的に自身の経路情報を中央サーバに送信する。中央サーバは経路情報を基に現在から将来までの混雑状況（期待混雑度）を予測し、各信号を制御しているエージェントにデータを送信する。各エージェントは期待

混雑度を基に信号制御パラメータ（サイクル、スプリット、オフセット）を決定する。

第2章では信号制御モデルの定式化を行い、第3章では期待混雑度による信号制御手法を提案する。第4章では提案システムのシミュレーション結果を示し、最後に第5章で本研究についてまとめる。

2. 交通信号制御問題の定式化

本章では、本稿が対象とする交通信号制御問題を定式化する。また、車両間で共有される経路情報について述べ、期待混雑度を定義する。

2.1. 道路モデル

図1に道路モデルの例を示す。例に挙げた道路は5つの信号(S_0, S_1, S_2, S_3, S_4)と、その間を繋ぐリンクで構成されている。リンク $l(S_0, S_1)$ は信号 S_0 から S_1 へ向かう道路に対応している。

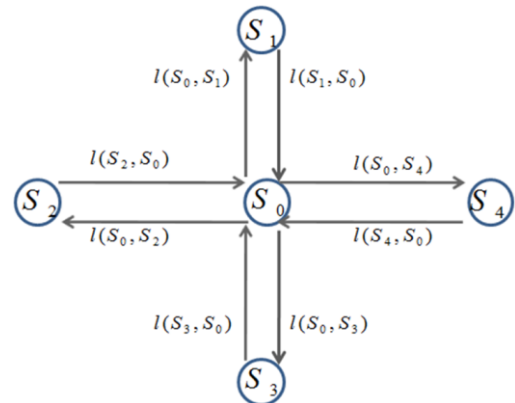


図1 道路モデル

また後述する信号制御パラメータの更新条件に合わせ、道路網を以下の3種類に分類する。

・隣接グループ

中心信号に対して流入するリンクを隣接グループとする。グループ内の経路上を走行する車両は中心信号の表示の影響を受ける。図1の道路モデルでは、

図 2 に示すように、 (S_1, S_0) , (S_2, S_0) , (S_3, S_0) , (S_4, S_0) が S_0 の隣接グループとなる。

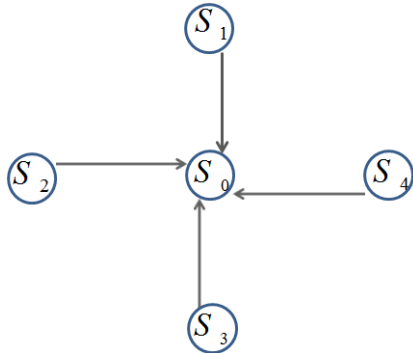


図 2 隣接グループ

・同期ペア

隣接グループにおいて同一直線上にあるリンクを同期ペアとする。同期ペアでは常に同色の信号表示が行われる。図 1 の道路モデルでは、図 3 に示すように $\{(S_1, S_0), (S_3, S_0)\}$, $\{(S_2, S_0), (S_4, S_0)\}$ と 2 組の同期ペアが存在する。

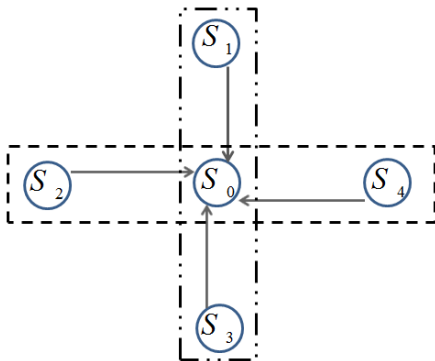


図 3 同期ペア

・協調ペア

協調ペアは流入リンクと流出リンクのペアで構成される。流入リンクを通過した車両は信号通過後に流出リンクへ移動する。図 4 に示すように、流入リンク (S_3, S_0) に対する流出リンク (S_0, S_1) , (S_0, S_2) , (S_0, S_4) が協調ペアとなる。

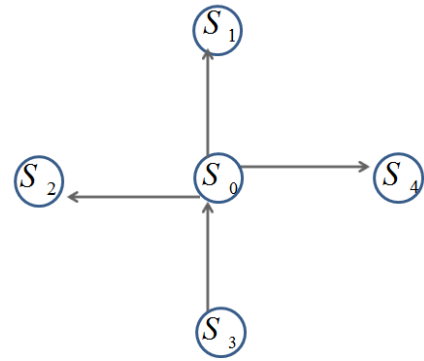


図 4 協調ペア

2.2. 信号パラメータ

信号を制御するための各種パラメータについて述べる。本稿では、サイクル、スプリット、オフセットの 3 つの制御パラメータを用いる。

● サイクル長

各信号で各表示が一巡するのに要する時間。本稿では、都市における一般的な表示時間を基にその範囲を 90~180 秒とした。また、モデル簡略化のため黄色表示は青と同様と見なし、青赤の 2 色でサイクルを構成した。図 5 においては、信号 S_0 のサイクルは 120 秒である。

● スプリット

1 サイクル中に、各表示に割り当てられる時間であり、サイクル長に対する比で表現される。また、極端な信号制御を避けるため、その比は 30%以上、70%以下とした。図 5 においては、信号 S_0 のスプリットは青 50%、赤 50%である。

● オフセット

協調ペアを制御する 2 信号間のサイクル開始時間のずれ。協調動作を要求した信号を基準に設定される。信号 S_0 が S_1 に同期要求を送ると、2 信号間の距離を基にオフセットが設定される。図 5 においては、オフセットは 40 秒に設定されている。

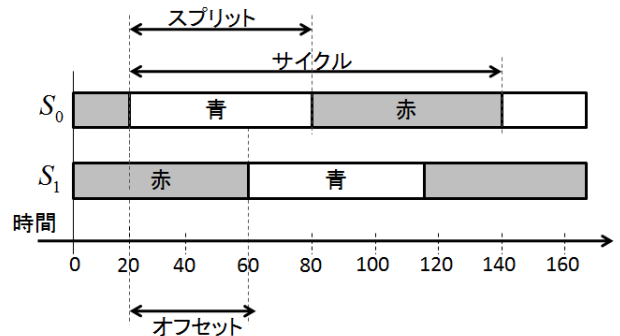


図 5 信号制御パラメータ

ここで、オフセットによる効果を図 6 を用いて説明する。\$S_3\$ から \$S_1\$ へ向かう車両が \$S_0\$ を通過し \$L(S_0, S_1)\$ 上を移動していると仮定する。車両が信号 \$S_1\$ 下に到着する時間と、青表示に変わる時間が同時であれば車両は \$S_1\$ で信号待ちをせずに走行できる。このように、オフセットを最適化することで信号待ち時間を低減させることができる。

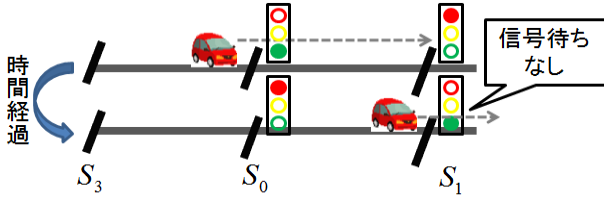


図 6 オフセットの効果

3. 期待混雑度

本章では、期待混雑度を定義する。期待混雑度は、山下ら[12]によって提案された、現状を含んだ将来の混雑度を表す指標であり、各車両の経路情報を基に算出される。提案システムでは、算出された期待混雑度を基に信号パラメータを動的に最適化する。

3.1. 経路情報の定式化

各車両は定期的に自身の経路情報を中央サーバに送信する。送信する経路情報は図 7, 8に示すように、交差点間を繋ぐ複数のリンクで構成される。また、シミュレーションでは、車両は出発地点から目的地まで最短距離となる経路を選択するものとする。

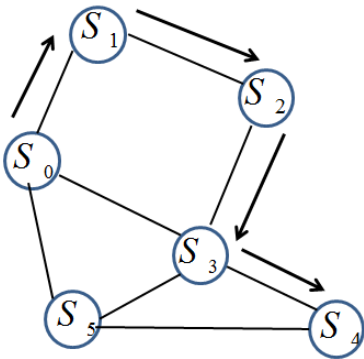


図 7 走行経路

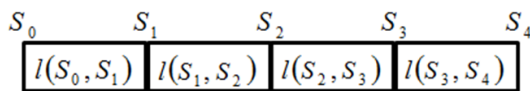


図 8 経路情報

3.2. 期待混雑度の算出

以下に期待混雑度算出の手順を示す。期待混雑度は現在から将来までの混雑度を表す指標である。

(1) 各車両は予定されている自身の経路情報を定期的にサーバに送信する。

(2) 各車両の経路情報から、各リンクの通過重み

\$PW\$ を算出する。通過重みは以下の式で定義される。\$l\$ は対象とするリンクの ID, \$m\$ は経路上に含まれるリンクの総数, \$n\$ は現在地から目的地まで降順に 1 から \$m\$ までを付けた値である。

$$PW(l) = \frac{n}{m} \quad (1)$$

例えば、図 9 において、車両 1 の経路はリンク 4 → リンク 3 → リンク 2 であり、現在地から目的地まで 3 つのリンクを含んでいる。この時、各リンクの通過重み \$PW\$ は、経路に沿って降順に割り当てた重み係数を総リンク数で割った値であり、\$PW(4) = 3/3\$, \$PW(3) = 2/3\$, \$PW(2) = 1/3\$ となる (近い将来に通過するリンクの重みを相対的に大きく設定する)。

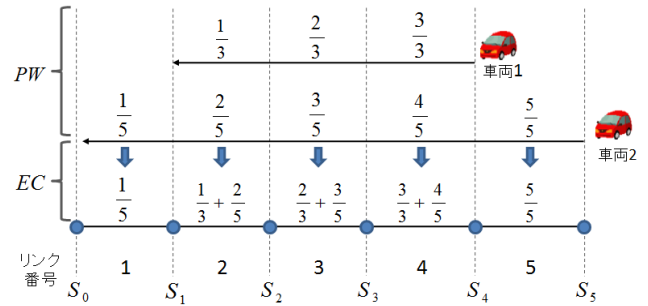


図 9 期待混雑度の算出例

(3) 通過重み \$PW\$ を用いて、各リンクの期待混雑度を算出する。リンク \$l\$ の期待混雑度 \$ETC(l)\$ は、式 (2) に示すように、リンク \$l\$ の通過重み \$PW(l)\$ の総和で与えられる。変数 \$\alpha\$ (\$\alpha \ge 1\$) は、将来の混雑度の影響を調整するパラメータである。例えば、\$\alpha\$ の値を大きくすると、期待混雑度は近い将来の混雑度の重みが大きくなり、逆に、\$\alpha\$ の値を 1 とすると、期待混雑度は将来の混雑度を考慮した値となる。

$$ETC(l) = \sum PW(l)^\alpha \quad (2)$$

4. 期待混雑度を利用した信号制御

本章では、提案する信号制御システムについて述べる。従来手法の多くは強化学習を用いて強調動作を決定している。しかし、パラメータの学習期間が必要であり、予期せぬ交通状況の変化には対応できない。そこで、本稿では、現在から将来のおおまかな混雑状況(期待混雑度)を用いることで、動的に信号間の協調を実現する手法を提案する。期待混雑度が高い交差点では、車両の集中が発生するため、時間経過と共に、隣接信号に車両が移動していくことが予想される。そこで、期待混雑度が高い信号と周辺信号が協調することで、交通全体の信号待ち時間

減少を試みる。また、同時にサイクル長、スプリットについても期待混雑度を用いて制御する。

4.1. 信号制御システム

提案システムは、経路情報を収集する中央サーバと、各信号を制御する交差点エージェントによって構成される。

● 中央サーバ

中央サーバは期待混雑度の計算を行う。また定期的に期待混雑度の更新を行い交差点エージェントに予測データを送信する。

● 交差点エージェント

交差点エージェントは中央サーバからの情報を基にサイクル、スプリットを調整する C-S 制御と信号間での協調動作を決定する O 制御の 2 種類の制御を行う。

4.2. サイクル長・スプリット (C-S) 制御

各信号はサイクルの終了時に、期待混雑度 ETC を用いて、サイクル長・スプリットを決定する。

● サイクル長の制御

隣接グループにおける平均期待混雑度 $AETC$ を式(3)を用いて算出する。ここで、 AG は隣接グループを表わしている。

$$AETC(AG) = \frac{\sum_{l \in AG} ETC(l)}{|AG|} \quad (3)$$

$AETC$ が閾値 θ_1 より大きい場合は β だけサイクル長を増やす。また、小さい場合は β だけサイクル長を減らす。

● スプリットの制御

同期ペアにおける期待混雑度の合計 $TETC$ を式(4)を用いて算出する。ここで、 SP は同期ペアを表わしている。

$$TETC(SP) = \sum_{l \in SP} ETC(l) \quad (4)$$

隣接グループ内の同期ペア間で、 $TETC$ との差を比較し、閾値 θ_2 より大きい場合、 $TETC$ の小さいペアのスプリット比率を γ だけ減らし、大きいペアのスプリット比率を γ だけ増やす。

4.3. オフセット (O) 制御

最初に、期待混雑度が閾値 θ_3 より大きい流入リンクを持つ協調ペアを選択する。次に、選択された各協調ペアの流入リンクと流出リンクの期待混雑度の比率を算出する。算出した比率が閾値 θ_4 より大きい場合には協調ペアでオフセットを調整し、協調動作を開始する。協調動作開始後、2 信号は動作維持のため、サイクル、スプリットを同期する。

ここで、図 10 に示すように、信号 S_1 が信号 S_2 に協調動作を要求したとき、信号 S_2 は信号 S_1 のサイクル開始のタイミングから、式(5)で算出するオフセット値だけずらして、サイクルを開始する。つまり、 t_1 、 t_2 が信号 S_1, S_2 の現サイクルの終了時間だとすると、この差がオフセットと等しくなるように調整する。式(5)は、信号間の平均移動時間を表わしており、 $D(s_1, s_2)$ は信号間の距離、 V は車両の平均移動速度である。

$$OFFSET = \frac{D(s_1, s_2)}{V} \quad (5)$$

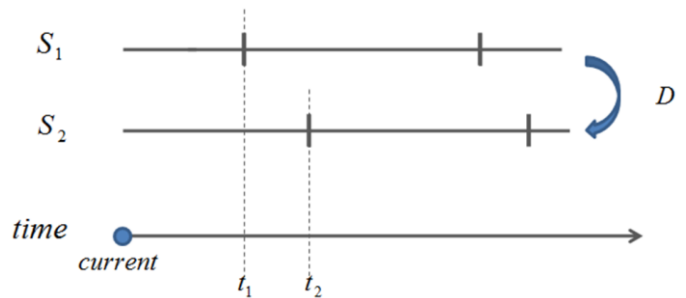


図 10 協調動作

例えば、図 11 に示すように、流入リンク $I(S_3, S_6)$ に対して 3 つの協調ペアが存在し、流入リンクと流出リンクの期待混雑度の比が $0/5$ 、 $4/5$ 、 $1/5$ であると仮定する。このとき、最も値の大きい流出リンク $I(S_6, S_1)$ が選択され、この期待混雑度の比が閾値 θ_4 より大きい場合に協調動作を開始する。

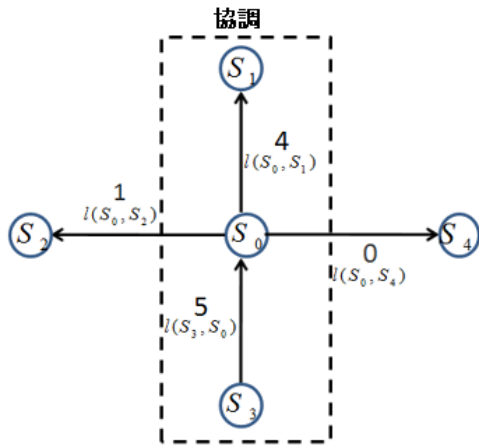


図 11 協調動作の決定

車両の移動速度は、車両間の距離によって決定され、表 1 に示すように 4 段階の値をとる。車両同士の衝突を避けるため、車両間の距離が流速より少ない場合には、速度を一段階下げる。逆に、進行経路上に障害がなければ、速度を一段階ずつ上げていく。また、信号制御に用いられるパラメータの値を表 2 にまとめる。

表 1 車両移動速度

stage	速度(km/h)	速度(pixel/step)
0	0	0.0
1	11	0.2
2	27	0.5
3	54	1.0

5. シミュレーション

本稿では、提案する期待混雑度を用いた信号制御手法と、従来型の信号制御手法との、車両の信号待ち時間を比較し、提案手法の有効性を評価する。

5.1. シミュレーション環境

皇居周辺約 5km 四方の主要幹線道路地図を基に、図 12 に示すような、62 の交差点で構成される道路ネットワークを作成した。各車両はネットワークの外周ノードから流入し、最短距離でランダムに設定された目的地を目指す。また、設定される目的地は一様分布・偏向分布に従う。一様分布では、全交差点からランダムに目的地が決定されるため、道路網全体に車両が分布する。偏向分布では、特定の交差点が目的地として選択される確率を高くし、局所的な車両の集中による渋滞が発生しやすい環境を想定している。

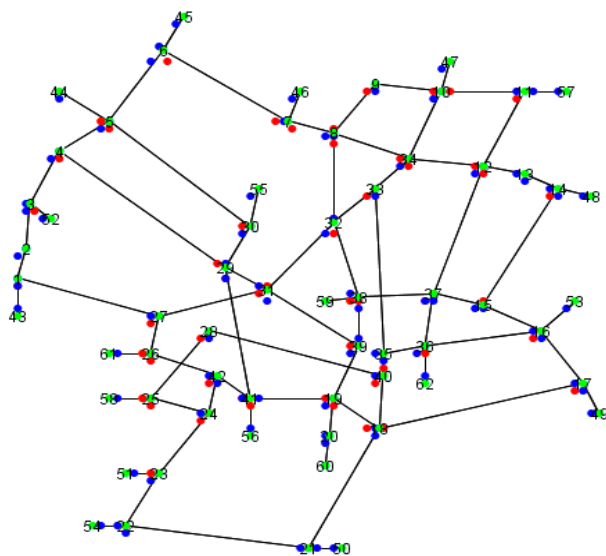


図 12 皇居周辺 5km 四方の主要幹線道路

表 2 各種パラメータ

パラメータ	値
θ_1	サイクル長
θ_2	10
θ_3	サイクル長
θ_4	70%
α	1
β	5
γ	5%

5.2. 信号制御モデル

本稿では、以下の 5 つの信号制御モデルで平均信号待ち時間の比較を行い、提案制御法の効果を検討した。

- 固定信号

サイクル・スプリットを一定に保つ。

- C-S (青時間利用率)

青表示中の車両通過数を基に算出される値を基にサイクル・スプリットの決定を行う。青表示の時間が冗長な場合には、青時間利用率が悪化するため、利用率を改善するようにパラメータを決定する。

- C-S (待ち台数)

信号待ちをしている車両数を基にサイクル・スプリットを決定する。交差点内で各道路の待ち台数を比較し、混雑している道路の青表示時間を優先的に増加する。

- C-S (期待混雑度)

期待混雑度を基にサイクル・スプリットを決定する。将来の混雑度を考慮し、交差点内の各道路の優先度を決定する。

・C-S+O (期待混雑度)

O 制御の開始条件を満たしている道路では O 制御を優先して行い、それ以外の道路では C-S 制御 (期待混雑度) を行う。O 制御により、局所的に交通流を改善できるが、周辺の交通流が悪化する可能性がある。このため、O 制御に C-S 制御を組み合わせることで、オフセットによる周辺交通状況の悪化を防ぐ。

5.3. シミュレーション結果

図 13 は各信号制御モデルにおける車両の平均待ち時間を示している。提案する C-S 制御は、従来の制御法と比べ、待ち時間が改善されていることがわかる。一様分布では、O 制御と C-S 制御と組み合わせても C-S 制御と同等程度の結果しか得ることができなかった。これは O 制御を優先することで、サイクル長、スプリットの修正ができなくことが原因であり、協調動作における閾値の調整が必要であることを示している。しかし、一部経路に混雑が集中する偏向分布では、待ち時間が改善しており、O 制御が特定経路が混雑するような環境では有効であることを示している。

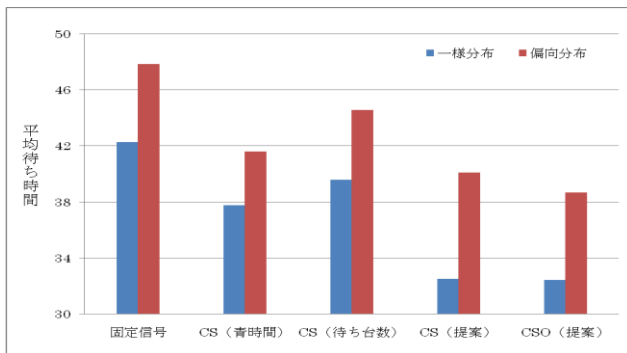


図 13 各信号モデルの平均待ち時間

図 14 は期待混雑度の変数 α を 1~4 で変化させたときの平均待ち時間である。変数 α が小さいときには、期待混雑度は将来の混雑度の影響をより受けることになり、大きい場合には現状の混雑度を大きく反映する。結果から、 $\alpha=2$ が最も優れていることがわかる。 $\alpha=1$ の場合には、必要以上に将来混雑度を考慮してしまったため、遠方の車両に対しても制御をかけてしまう。また、 $\alpha \geq 3$ では、現状の混雑度の重みが大きくなり過ぎるため、混雑状況が悪化する結果となった。また、O 制御は局所的に交通流を最適化できるが、協調対象以外の信号との関係が悪化する可能性がある。C-S 制御には関係悪化を防ぐ狙いがあったが、将来混雑度を考慮しない C-S 制御では、その効果も弱く、O 制御との相性も悪化する結果となった。

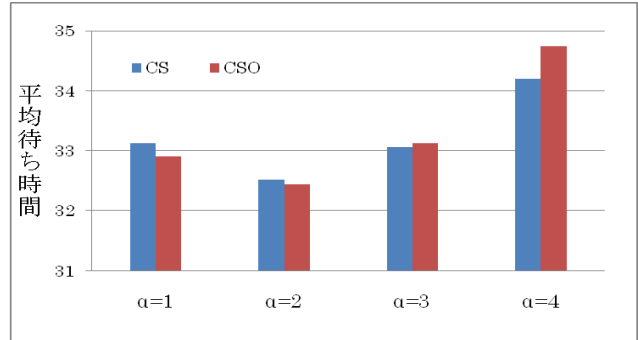


図 14 期待混雑度と平均待ち時間の関係

6. 結論

本研究では、車両の経路情報から将来的な混雑度を予測することで、リアルタイムな交通状況を反映する信号制御手法を提案した。またシミュレーションでは、提案手法が待ち時間を改善し、交通流の最適化に効果があることを明らかにした。

今後の課題は、O 制御の開始条件 (閾値) の最適化と、協調動作後のパラメータ調整である。また、今回のシミュレーション環境では、車両集中による移動速度の減速を考慮していない。より現実的なシミュレーション・モデルを構築する必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり、貴重なご指導・御助言を頂いた内田直之教授に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1]. Kato, T., Kim, Y.W., Suzuki, T., Okuma, S.: Model predictive control of traffic flow based on hybrid system modeling, IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences, Vol. 88, NO.2, pp.549-560, 2005
- [2]. Wei, W., Gong, s., Liu, H.: A coordinated urban traffic signal control approach based on multi-agent, In Proceeding of International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), pp. 263-267, 2009
- [3]. Chen, R.S., Chen, D.K., Lin, S.Y.: Actam: Cooperative multi-agent system architecture for urban traffic signal control, IEICE transactions on information and systems, Vol.88, No.1, pp.119-126, 2005
- [4]. 熊谷潤一, 小島康夫, 高重聡一, 亀谷由隆, 佐藤泰介: 頻出部分木発見法を用いた遺伝的プログラミングの交通信号制御法への適用, 人工知能学会論文誌, Vol.22, No.2, pp.127-139, 2007
- [5]. 今井洋介, 加藤泰典, 長谷川孝明: 高度デマンド信号制御方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-A, No.1, pp. 62-77, 2005

[6].今井洋介, 加藤泰典, 長谷川孝明: 高度デマンド信号制御方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J91-A, No.1, pp. 33-43, 2008

[7].麻生敏正, 長谷川孝明: 拡張したシミュレータによる高度デマンド信号制御方式の性能評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-A, No.6, pp. 419-433, 2009

[8].麻生敏正, 長谷川孝明: ユビキタス・センサ・ネットワーク時代の信号制御方式, 第8回ITSシンポジウム, pp. 67-72, 2009

[9].花房比佐友, 飯島護久, 堀口良太: リアルタイム信号制御アルゴリズムのためのプローブ情報を利用した遅れ時間評価, 第8回ITSシンポジウム, pp. 207-212, 2009

[10]浅野美帆, 堀口良太, 桑原雅夫: 交通シミュレーションを利用した信号制御アルゴリズム評価のための仮想社会実験, 交通工学 Vol.39,No.2,pp.39-45, 2004

[11] 浅野美帆ほか:遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御, 土木計画学研究・論文集 Vol.20,No.4,pp.879-886, 2003

[12]. 山下倫央, 車谷浩一, 中島秀之: 交通流の円滑化に向けた協調カーナビの提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No.1, pp.177-187, 2008