

都市街路における排気ガス量の削減を目的とする 車車間通信を想定したリアルタイム信号制御手法の提案

富 樫 祐 二^{†1} 梅 津 高 朗^{†1} 東 野 輝 夫^{†1}

現在、自動車による排気ガス量の削減が求められている。自動車の排気ガス量は同一の走行経路でも挙動によって大きく変化するため、信号機制御による交通制御が削減に効果的であると考えられる。しかし、既存の交通制御システムの大半は排気ガス量削減を目的とせず、また車両情報の収集が車両感知器の設置状況に依存する。本稿では排気ガス量削減を目的に、車車間通信による情報収集を用いたリアルタイム信号機制御手法を提案する。提案手法では車車間通信を用いるため、感知器を必要とせず、車種などのより詳細な車両情報の反映が可能となる。提案手法は、単一交差点向けの制御手法を元に、複数の信号機の協調によって交差点の密集する区域全体での削減を行う。シミュレーション実験を通して本手法による排気ガス量の削減効果、および、平均旅行時間短縮を確認した。

Proposal of real-time traffic signal control system for reduction of vehicle emissions on urban street by using inter-vehicle communication.

YUJI TOGASHI,^{†1} TAKAAKI UMEDU^{†1}
and TERUO HIGASHINO^{†1}

Recently, reduction of vehicle emissions is required. To control vehicles by traffic signal control is effective to reduce vehicle emissions because amount of vehicle emissions is strongly affected by behavior of vehicles. However, existing traffic signal control systems intended to reduce vehicle emissions are in the minority, and systems that collect traffic information by vehicle detectors depend on coverage of vehicle detectors. In this paper, we propose a real-time traffic signal control technique using vehicle information collected by inter-vehicle communication. By using inter-vehicle communication, systems do not require vehicle detector, and can use more detailed vehicle information such as vehicle type information. The proposing technique coordinately controls traffic signals to reduce vehicle emissions in whole areas contains intersections densely

based on an existing real-time signal control technique for single intersection. Through simulation based evaluation, we show that the proposing technique is efficiently to reduce vehicle emissions. In addition, the average travel time by the proposing technique is no longer than that of comparing techniques.

主な用語

車車間通信 信号制御 リアルタイム制御 協調制御 排気ガス量削減

1. ま え が き

現在、温室効果ガスによる地球温暖化は大きな環境問題であり、温室効果ガスの排出量の削減は早急の課題である。2006年度の東京都の調査によると、発生した温室効果ガスの運輸部門の占める割合は26.2%に上り¹⁾、大部分が自動車の排気ガスによるものである。

自動車による排気ガス量の推計方法については様々な研究がなされており、自動車毎の挙動は無視して大域に対して長期のスパンで概算を行うマクロモデル²⁾や、自動車の走行時の挙動から排気量を求めるマイクロモデル^{3),4)}などが多数提案されている。マイクロモデルによると、自動車による排気ガス量は、加速時に発生するものの割合が大きく、同一の距離を走行する場合でも、一定の速度で走行する場合と、停止と発進を何度も行う場合では排気量に大きな違いが出る事が分かっている⁵⁾。よって、交通流上の車両の挙動を制御する交通信号制御の動作を改善することによって、発生する排気ガス量を削減できると考えられる。

しかし、現在稼動している交通制御システムは、渋滞や遅れ時間の縮小を目的としたものが大半であり、排気ガス量の削減という観点から制御を行うシステムは少ないのが現状である。また、感知器を用いて動的に制御を行う方式では、感知器が設置されていないエリアの交通情報が把握できないという問題点がある。そして、複数の信号を協調制御する場合にはエリア内の情報を1箇所を集積し制御を行うため、高度な制御を行うためには莫大な計算や回線の大容量化が必要となり⁷⁾、分散制御の必要性が指摘されている⁸⁾。

そこで本稿では、排気量削減を目的とし、車車間通信による車両情報を用いたリアルタイム信号制御手法を提案する。車車間通信によって交通情報を把握することで、得られる交通情報が車両感知器の設置状況に依存しないという利点がある。また、車種や速度といった車両情報がより正確に得られるという利点もあり、車種情報を用いた制御を行うなど、より精

^{†1} 大阪大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

密なシステムが可能となる。制御は、交差点付近の自動車同士による車々間通信を交差点の信号機が受信し、得られるリアルタイムな交通情報を元に行うことを想定する。

また、都市街路では信号機の配置間隔が短く、各信号機が独立して制御を行った場合に全体として最適とならない場合がありえるため、提案手法では、得られた車両情報を複数の信号機で共有し、協調的に制御することで、都市街路全体として排気ガス量の削減を行う。これは、信号機間で付近の交通量の大きさによってパラメータを決定する順序を定め、段階的に制御パラメータを決定することで実現する。制御パラメータを決定した信号機は、付近に存在する各車両が自身を通過する時刻の情報を隣接する信号機に送信する。これにより、各信号機は、隣接する信号機の中で、先に制御パラメータを決定した信号機による動作の影響を考慮した制御パラメータの決定を行うことができる。また、順序を決定した後のパラメータ決定は、各信号機で独立して行えるため、分散制御が可能となる。

提案手法の評価のため、マイクロ交通シミュレーションソフトウェアである VISSIM⁹⁾ 上に本手法を実装し、都市街路を想定した、道路が格子状で信号交差点間の間隔が短いマップを用い、車両密度・マップの形状・サイクル長・主道路と従道路に交通量の差がある場合などの状況で、同時式オフセット制御方式や交互式オフセット制御方式と平均排気ガス量を比較するシミュレーション実験を行った。実験結果より、本手法による排気ガス量の削減効果を確認し、平均旅行時間についても比較対象と同等以下の短さとなることを確認した。

2. 関連研究

2.1 従来の信号機制御

まず、信号機制御において一般的に使用される用語説明を行う。

- 信号現示：交差点に流入する各交通流に割り当てられる通行権、または割り当てられる時間帯。
- サイクル長：信号機の表示が一巡する時間の長さ。
- スプリット：交差点の各現示の長さのサイクル長に対する比。
- オフセット：同一の系統上に位置する複数の信号機の、各々のサイクルの開始時刻と、基準となる開始時刻の間のずれを表す値。

現在稼働している信号機の制御手法として、リアルタイムの情報を用いない手法では、時間帯毎に固定のパラメータの組を切り替える定周期制御、リアルタイムの車両情報を用いる手法では端末感応制御などが挙げられる。

リアルタイムな交通状況に即した制御を行う端末感応制御では、道路上の車両感知器に

よって得られる短期間の交通量の変化に合わせてパラメータの調整を行う方式であり、プログラム選択方式とプログラム生成方式に分類される。プログラム選択方式は、感知器によって得られる道路状況に合ったパラメータがあらかじめ登録されているパラメータの組の中から選択される手法である。プログラム生成方式は路上に設置された車両感知器の情報からパラメータを生成する方式である。ただし、これらの信号制御手法は、道路上に設置された車両感知器の位置に依存し、感知器間で交通状況を把握することができない。

また、中央感応制御と呼ばれる方式は、ある路線または面に存在する複数の交差点を対象とした制御であり、対象区域の車両感知器によって得られた情報を交通管制センターが集積し、その情報を元に対象区域の各交差点のパラメータを生成する方式であり、上記の他の手法と異なり、対象区画内の各信号機で協調のとれた制御を行うことができる。しかし、交通管制センターで必要とされる処理は対象区画の信号機の数が多ければ莫大となり、分散制御の必要性があると考えられている。また、制御に用いる情報は車両感知器の設置状況に依存し、車両感知器が未設置である区画の情報を知ることができない。

また、既存の研究では、ニューラルネットワーク・遺伝的アルゴリズムなどのセミヒューリスティクスを用いてパラメータの設定を行う制御手法が提案されている^{10),11)}。これらは、車両感知器などから得られる各交通流の交通量などの入力に対して評価値が最適となるようなパラメータを探索し、1時間に数回程度の間隔で定期的に信号機に制御パラメータを出力するという手法であり、交通量の変化に対して動的に対応することが出来る。

このように、現在稼働している制御手法では、サイクル長・スプリット・オフセットのパラメータを調節する手法が主となっている。しかし、これらの手法は数分、または数時間という期間毎の交通量の変化に対応したパラメータを出力することで、平均遅れ時間や平均停止回数の減少に一定の効果があると思われるが、ある瞬間における車両分布に対応した最適なパラメータを出力することは出来ない。

2.2 リアルタイム信号機制御手法

リアルタイムの車両情報を用いて、瞬間毎の各交通流の車両分布に合わせた最適な信号現示を行う手法として、Controlled Optimization of Phase at an Intersection(COP)と呼ばれる制御手法が考案されている¹²⁾。この手法は、信号交差点に流入する各交通流上の各車両について、車両速度や交差点に対する位置といった車両情報が分かっているときに、任意の評価関数による評価値が最適となるようなパラメータを決定する手法である。ただし、ここではパラメータを、信号交差点に流入する交通流に対して通行権を与える各々の時間帯をフェーズと呼んだときの、各フェーズの開始時刻と長さの意味として用いる。

表 1 COP アルゴリズムの各記号の意味
Table 1 Symbols used in COP algorithm.

T	サイクル長
P	フェーズの数
r	クリアランス時間
γ	最小青時間
$v_{i,j}$	フェーズ i が時刻 j に終了する場合の評価値
$x_{i,j}$	フェーズ i が時刻 j に終了する場合に、評価値を最小とするようなフェーズ i の長さ
$f(i, j, k)$	フェーズ i が、長さ k で時刻 j に終了する場合の、 $j - (k + r) \sim j$ の時間の評価値
$q(s, t, d)$	停止回数が s 、遅れ時間が d 、車種が t である場合の車両の評価値
s_i	評価値を最適とするフェーズ i の終了時刻

COP では、分割統治法を用いて、各フェーズのパラメータの全ての組み合わせの中から最適なものを探索する。以下に、COP によるパラメータ探索の流れの概要を示す。ただし、各記号の意味は表 1 で示されている通りであり、クリアランス時間は黄色信号時間と赤信号時間の和を、最小青時間は各フェーズに最低限保障される青時間の長さを表す。

- (1) $i \leftarrow 1$
- (2) for $j = r, \dots, T\{$
 if $i = 1$ then $v_{i,j} \leftarrow \text{Min}\{f(i,j,k) + v_{i-1,j-k-r} \mid k \in \{\gamma, \gamma + 1, \dots, j - r\}\}$
 otherwise $v_{i,j} \leftarrow \text{Min}\{f(i,j,k) \mid k \in \{\gamma, \gamma + 1, \dots, j - r\}\}$
 また、最小となるとき k を k^* とし、 $x_{i,j} \leftarrow k^*$
- (3) $i = P$ ならば、4. に進む。 $i < P$ ならば、 $i \leftarrow i + 1$ として 2. に戻る。
- (4) $s_P = T$
 for $i = P - 1, \dots, 1\{$
 $s_i = s_{i+1} - x_{i+1, s_{i+1}} - r$
 }

$f(i, j, k)$ は、 $j - (k + r) \sim j$ の時間帯に対して、 $j - (k + r) \sim j - r$ までがフェーズ i で $j - r \sim j$ までクリアランス時間であると仮定した場合のフェーズ i の評価値であり、この場合の各車両の評価値の総和である。ある車両の評価値は、車種情報 t に加え、車両位置と車両速度から位置する交通流と到着予想時刻を求め、 $j - (k + r) \sim j$ の時間帯に車両に発生する停止回数 s や遅れ時間 d を予測することで、 $q(s, d, t)$ によって求められる。予想停止回数 s は、 $j - (k + r) \sim j - r$ の期間に交差点で停止する回数で、その期間に車両が交差点に到着するが通行権を与えられていない、または到着予想時刻がクリアランス時間であるならば 1 であり、それ以外ならば 0 となる。予想遅れ時間 d は、信号待ち時間や信号

待ちの後の再加速による時間のロスから求められる。

本稿で提案する信号制御手法は、この COP のアルゴリズムを元に、排気ガス量に対する最適化を行うために CO₂ 排気量に関する値を出力する関数を各車両の評価関数 q とし、複数の信号機から成る信号機ネットワーク向けに拡張したものである。

2.3 車両の排気量モデル

自動車による排気ガス量の推計方法としては、一定期間において対象エリア全体における排気量を概算するマクロモデル²⁾と、各々の車両の挙動から、それぞれの瞬間における排気量を求めるミクロモデル^{3),4)}に大別される。マクロモデルとしては、車種や平均速度ごとの排出係数と、交通量調査などで計測された地域や時間帯毎の交通量を元に割りだされた走行量を用いて、特定の車種・時間帯・地域における排出量を推計する方法が提案されている。マクロモデルは、都市や町全体のような広域における排出量を求める方法としては十分な精度があり有用であると考えられるが、各々の自動車の挙動と排気量の関係については知ることができない。

そこで、時間分解能が高く、狭い範囲においても用いることのできるモデルとして、ミクロモデルが数多く提案されている。文献³⁾や文献⁴⁾は、実際の走行データから回帰分析によって車種毎の係数を算出し、算出した係数と車両の速度や加速度を用いて排気ガス量を計算するモデルである。文献³⁾のモデルでは、車両の速度や加速度によって、車両の状態を 4 つの走行モードに分類し、それぞれの場合で個別の式を用いて排気量の算出を行う。文献⁴⁾のモデルでは、式 (1) によって排気量を求めるモデルである。

$$E_n(t) = \text{Max}\{E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n^2(t) + f_4 a_n(t) + f_5 a_n^2(t) + f_6 v_n(t) a_n(t)\} \quad (1)$$

ただし、 $E_n(t)$ はある時刻 t における排気ガス量、 E_0 と $f_1 \sim f_6$ は係数、 $v_n(t)$ は時刻 t の車両の走行速度、 $a_n(t)$ は時刻 t の車両の加速度を表す。係数は車種によって異なり、それぞれの値は表 2 に示された通りである。

3. 車々間通信を用いた信号機の環境最適化制御手法の概要

本稿では、2.2 節で述べた既存のリアルタイム信号制御手法である COP を、車々間通信を仮定した情報収集手法と組み合わせて都市街路における排気ガス量の最適化手法を提案する。

3.1 排気ガス量最適化に用いる評価関数

COP の手法では、フェーズとパラメータの組み合わせに対する評価値は、各パラメータの示す時間帯に各フェーズに対応する信号表示を行うことによって各車両に発生する停止や

表 2 車種毎の排気ガス量見積もりパラメータ

Table 2 Estimation parameter for emission of each vehicle type.

車種	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
ガソリン車	0	5.53e-1	1.61e-1	-2.89e-3	2.66e-1	5.11e-1	1.83e-1
ディーゼル車	0	3.24e-1	8.59e-2	4.96e-3	-5.86e-2	4.48e-1	2.30e-1
バス	0	9.04e-1	1.13	-4.27e-2	2.81	3.45	1.22

表 3 車種毎のガソリン車に対する排気量の比 c_t

Table 3 Ratios of each vehicle type's emission to gasoline vehicle.

車種	c_t
ガソリン車	1.00
ディーゼル車	2.53
バス	1.67

遅れ時間を求め、停止や遅れ時間から求められる各車両の評価値の総和を求めることによって得ている。従って、COP の手法を排気ガス量に対する最適化に適用するには、停止と遅れ時間から排気ガス量に従った値を求めることができる評価関数が必要となる。

詳細な排気ガス量の予測には個々の自動車のマイクロシミュレーションが必要となるが、COP においてそのようなシミュレーションを用いることは計算量の面から非現実的である。そこで提案手法では、停止回数と遅れ時間による排気ガス量の関係を、1 回の停止によって発生する排気ガス量が、遅れ時間によって発生する排気ガス量の何秒分に相当するかという係数を用いることで近似的に表すこととする。今回はこの係数として、ガソリン車が直線道路を停止せずに走行する場合と途中で 1 回停止する場合の排気ガス量の差の平均値を交通流シミュレータにより得られた交通量を元に計算し、これによって得られた停止回数当りの排気ガス量を、式 1 と表 2 によって得られるガソリン車のアイドリング時における 1 秒当たりの排気ガス量で割った値を用いた。

また、2.3 節で述べたように、同一の挙動であっても車種によって排気ガス量が異なるため、車種による排気ガス量の違いを一般的なガソリン車何台分に相当するかという係数を用いて表現することとし、ここでは表 3 に示されるような係数を用いた。表 3 の値は、式 1 と表 2 によって得られる各車種の排気ガス量の式と、ガソリン車の排気ガス量の式がなるべく一致するようにしたときの、ガソリン車の式に掛かる係数である。具体的には、各車種の式と係数を掛けたガソリン車の式に対して、一般道路を走行する車両を想定した、速度 0km/h~50km/h、加速度-4m/s²~4m/s² の範囲における二乗誤差を求めたときに、二乗誤差が最小とするような係数である。

以上より、本手法では停止回数 s 、遅れ時間 d 、車種番号 t に対する排気ガス量の評価関数 $q(s, d, t)$ として式 (2) を用いる。ただし、遅れ時間に対する停止の係数を k 、車種 t に対する係数を c_t とする。

$$q(s, d, t) = c_t(sk + d) \quad (2)$$

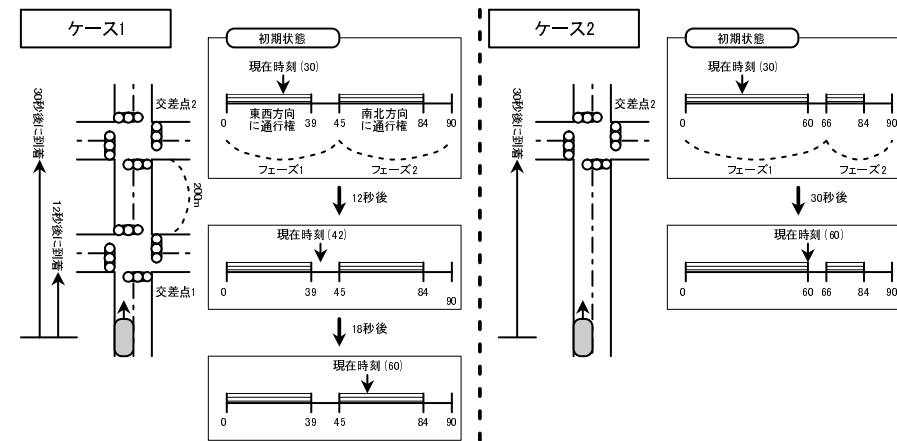


図 1 COP の都市街路における問題の例
Fig.1 Problem of COP in urban street.

3.2 複数の信号機の協調制御

2.2 節で述べたように、COP による制御では、対象の信号交差点に流入する各車両の到着予想時刻が必要であり、到着予想時刻が求められない車両を考慮することができない。よって、制御パラメータを決定する上で考慮される車両情報は、対象の信号機に隣接する道路上に存在する車両の情報のみである。これは、隣接する道路上に存在しない車両は自身との間に別の信号機が存在しているため、その信号機による信号待ちの影響が考えられ、車両の到着予想時刻が求められないためである。つまり、COP による制御では、制御に用いる事ができる車両情報の多さは、隣接する道路の長さに依存すると言える。

しかし、都市街路では信号機の設置間隔が比較的短く、各信号交差点に隣接する道路の長さも短いため、最適な制御に必要な情報が充分得られない可能性がある。例えば、図 1 の

ケース1のように、交差点の間隔が200mで、30秒後に時速40kmの車両が交差点2に到着する場合について考える。車両が等速ならば、交差点1を通過してから交差点2に到着するまでの時間は18秒であるため、12秒後に交差点2は車両の存在を知ることになる。説明の簡単化のために信号機パラメータが理想的にリアルタイム制御されているとしても、時刻30秒の時点で用いられている交差点2のパラメータの決定にこの車両の存在は反映させられていない。12秒後、交差点2は車両の存在を知るが、このとき既にフェーズ切替え状態となっているため、フェーズ1の長さは延長できない。よって、30秒後、車両が交差点2に到着したとき、交差点2は南北方向に交通権を与えるフェーズ2であり、車両は信号待ちとなる。対して、ケース2のように交差点1と交差点2の間隔が長く、交差点2が車両の到着を30秒前に知っている場合について考える。この場合では、30秒前に車両の到着を考慮したパラメータに変更ができるため、フェーズ1の延長が可能であり、車両は信号待ちを回避できる。

そこで、各信号機が同時にパラメータ決定を行うのではなく、各信号機にパラメータ決定を行う順序を割り当てることで段階的にパラメータ決定を行っていき、パラメータを決定した信号機から順に隣接する信号機に自らの持つ車両情報を送信していくという制御を行う。

例えば、図1のケース1と同様の状況で、図2のように、信号機1のパラメータを決定してから信号機2のパラメータを決定するという動作を行ったとする。まず、信号機1は持っている周辺の車両情報を用いてパラメータ設定を行うが、これにより、信号機1は各車両について、自身で信号待ちが発生するかどうか、また信号待ちの時間は何秒になるかを予想できる。パラメータ決定を行った信号機1は、隣接する信号機2に、この信号待ち情報を付加した車両情報を送信する。続いて信号機2がパラメータ決定を行うが、このとき信号機1から受信した情報を用いることで、信号機1に隣接する範囲に存在する車両の情報を含んだパラメータ決定を行うことができる。このように、他の信号機から車両情報を受信することで、受信した信号機は広範囲の車両情報を取得する場合と同等の効果を得ることができる。よって、段階的なパラメータ決定を行う制御によって、各信号機がより広い範囲の車両情報を取得することができ、3.2節の例で発生したような問題が緩和されると考えられる。

ここで、より効率的な制御を行うためには、各信号機のパラメータ決定の順序をどのように決めるかという事が重要である。例えば、交通量の多い交差点と交通量の少ない交差点が隣接している場合を考える。仮に交通量の多い交差点のパラメータを先に決定すると、交通量の多い交差点は多数の車両情報を隣接交差点に送信し、この車両情報が隣接する交通量の少ない交差点のパラメータ決定に大きな影響を与えると考えられる。逆に、交通量の少ない

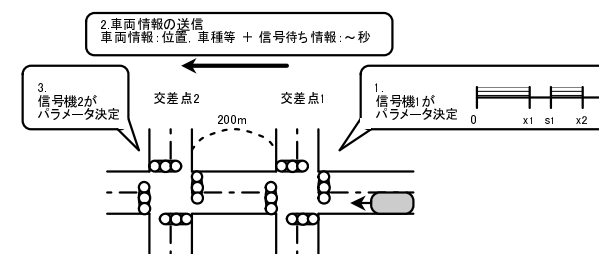


図2 信号間での情報共有の例

Fig. 2 Example of information sharing among traffic signals.

交差点のパラメータを先に決定した場合は、交通量の多い交差点が受信する車両情報の量は小さいため、パラメータ決定に与える影響は前者と比べて相対的に小さくなると思われる。このように、隣接する交差点間においては、交通量の多い交差点が先にパラメータを決定することで、全体にとって使える情報量が増加し、より適切な制御が行えると考えられる。

3.3 複数信号機の協調制御の流れ

本手法は、対象区画内の信号機に対して、数秒程度のサイクル毎にパラメータ調節を行う事によって制御を行うが、サイクル毎の具体的な動作は次の通りである。

- (1) 各信号交差点が流入車両の情報を受信する。
- (2) 各信号交差点の制御パラメータの決定順序を決定する。
- (3) 決定された順序で各信号交差点が制御パラメータを設定する。

3.3.1 流入車両情報の受信

車両情報は、各信号交差点が交差点周辺に存在する車両から発信される、車車間通信のパケットを受信することによって得る。車車間通信によって得られ、制御に用いられる車両情報を表4に示す。

車両速度、車両分類、車両の位置情報はCOPにおいて車両の評価値を求める際に必要となり、進行ベクトルは車両が信号機に流入するかどうかを判別するために用いる。加えて、制御では車両が左折・右折・直進レーンのどれに位置しているかというレーン番号、車両と信号交差点までの距離の情報が必要となる。これらは、各信号交差点が自らの位置情報と、隣接する道路の形状の情報を知っているとすれば、車両の位置情報から求めることが出来る。

3.3.2 制御パラメータの設定順序の決定

3.3節では、各信号交差点に対してパラメータの決定を行う順序を設定し、段階的にパラ

表 4 車両情報

Table 4 Vehicle information used in information sharing.

車両 ID	車両を識別するためのナンバー
時刻	送信時刻 YYYY/MM/DD/hh/mm/ss
車両分類	普通車やトラックといった分類
車両速度	0km/h~100km/h
車両の位置情報	緯度経度情報 世界測地系 WGS-84
進行ベクトル	進行後方情報 16 方位系

メータ設定を行うことで、各々の信号交差点の用いることができる車両情報が増加することについて述べた。本手法では、信号交差点間の交通量の差を用いて各交差点のパラメータ決定優先度を求め、優先度の値に従ってパラメータ決定を行う。交差点 v_1 と v_2 が隣接しているときには、 $v_1 \cdot v_2$ はそれぞれ、隣接する道路上の車両情報から、 v_1 を通過して v_2 に流入する交通量と、 v_2 を通過して v_1 に流入する交通量を求め、これらの値を比較することで $v_1 \cdot v_2$ の優先度の大小を決定する。仮に前者の値が大きければ v_1 の優先度は v_2 よりも高く、後者の値が大きければ v_2 の優先度を v_1 よりも高くなるように設定する。よって、優先度を決定する手順は次のようになる。ただし、各記号の意味は表 5 である。

(1) 全ての $u \in V$ に対して $P_u^0 \leftarrow 0$, $t \leftarrow 0$

(2) 全ての $u \in V$ に対して以下の動作を行う。

$v_1, v_2, \dots, v_m \in V$ を、 u と隣接し、かつ各 v_i が $amount(u, v_i) \leq amount(v_i, u)$, $P_{v_i}^t < P_{MAX}$ であるような信号交差点の集合として、 $P_u^{t+1} \leftarrow \text{Max}\{P_u^t, P_{v_1}^t, P_{v_2}^t, \dots, P_{v_m}^t\}$

(3) 全ての $u \in V$ で $P_u^{t+1} = P_u^t$ か $t = t_{MAX}$ ならば終了。そうでなければ $t \leftarrow t+1$ として 2. へ戻る。

ここで、優先度の最大値 P_{MAX} を設定しているのは、信号機のパラメータの更新サイクルは数秒程度だが、1 サイクルの間で階層的にパラメータ設定を行わなければならない、階層の深さに制限をかける必要があるためである。よって、 P_{MAX} の値は、パラメータを更新する 1 サイクルの長さ、1 つの信号交差点のパラメータ決定にかかる時間に依存する。

3.3.3 制御パラメータの設定

各信号交差点のパラメータ決定は、先程の方法によって決められた優先度の小さい順に行う。制御パラメータ設定の流れは以下の通りである。ただし、記号の意味は表 5 である。

(1) $V' = V$, $t \leftarrow 0$ とする。

(2) $u \in V'$ かつ $P_u = t$ であるような全ての信号交差点 u に対して、COP アルゴリズムでパラメータの決定を行う。パラメータの決定を行った交差点は、 V' に含まれる全ての隣接交差点に車両情報を伝達し、 V' から除く。

表 5 優先度決定手順で用いる各記号の意味

Table 5 Symbols used in priority decision procedure.

V	信号交差点の集合.
$amount(u, v)$	$u, v \in V$ とする. u を通過して v に流入する交通量.
P_u^t	$u \in V$ とする. t サイクル目で求められた u の優先度.
P_{MAX}	優先度の最大値.
t_{MAX}	繰り返し回数の上限值.

表 6 シミュレーション環境

Table 6 Simulation environment.

マップの形状	格子状
信号交差点間の間隔	200m
交通流平均の車両発生密度	100 台/h~250 台/h
サイクル長	90sec
シミュレート間隔	5 回/シミュレーション秒
車種毎の発生確率	ガソリン車: 89[%] ディーゼル車: 10[%] バス: 1[%]
パラメータの決定間隔	5[sec]

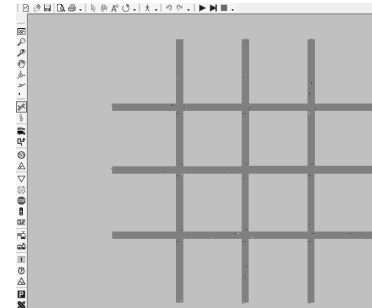


図 3 VISSIM の実行画面

Fig. 3 Screen shot of VISSIM

(3) V' が空になれば終了。そうでなければ $t \leftarrow t+1$ として、2. へ戻る。

隣接交差点への車両情報の伝達では、持っている各車両情報に対して、位置や車線、向きの情報からどの隣接交差点に対して流出するかを判断し、信号待ちの情報を付加して伝達する。

4. シミュレーション実験による評価

4.1 評価環境

提案する信号制御手法の有効性を評価するため、ミクロ交通シミュレーションソフトウェアである VISSIM 上に本手法を実装し、シミュレーション実験を行った。VISSIM は、指定したマップ上に指定した交通量を発生させたとき、現実のドライバーに近い性質で各車両の挙動をリアルタイムにシミュレートすることができるシミュレータである。3x3 マップでシミュレーションを行ったときの VISSIM の実行画面の例を図 3 に示す。シミュレーションは表 6 に示す環境で行った。

4.1.1 評価方法

ランダムに発生させた車両の平均の排気ガス量を指標とする。排気ガス量は、各車両の車種とシミュレート間隔毎の速度、加速度の記録から式(1)の排気量モデルによって求める。また、マップ形状による比較では平均旅行時間の比較も行った。旅行時間は車両がマップ上に出現した時刻から、マップを通過するまでの時間であり、信号機による遅れを評価する指標である。

4.1.2 比較対象

本手法を評価する際に、一般的な系統路線に用いられる制御方式である、同時オフセット方式と交互式オフセット方式を比較対象とした。

4.2 性能評価

提案手法の評価項目として、以下の1~3.の項目を変化させたときの平均排気ガス量の比較を行った。また、1.に関しては平均旅行時間の比較も行った。

(1) マップの形状

マップの形状が3x3, 2x5の格子状の道路のそれぞれの場合で計測を行う。各交通流の平均の車両発生密度は100[台/h]~250[台/h]まで変化させる。

(2) 車両発生密度の比

東西方向の系統路線を主道路、南北方向の系統路線を従道路とし、主道路と従道路の車両発生密度の比を、5:5~9:1まで変化させる。使用するマップは2x5で、比が5:5の段階での各交通流の車両発生密度を150[台/h]とする。

(3) サイクル長

各信号機のサイクル長を60~120secまで変化させる。使用するマップは2x5で、各交通流の車両発生密度は150[台/h]とする。

4.2.1 マップの形状と平均排気ガス量・平均旅行時間

それぞれのマップの車両発生密度と平均排気ガス量の関係を、図4と図5に示す。どちらのマップにおいても全体的に、比較対象と比べて排気ガス量が削減されていることが分かる。マップ毎の結果を比較すると、3x3のマップの方は2x5のマップに比べて排気ガス量の削減された幅が小さいことが分かるが、これは3x3のマップのように各道路系列の長さが等しい状況では、各々の交通流の交通量が均一になりやすく、リアルタイム制御によるメリットが得られにくかったためであると思われる。

また、それぞれのマップの車両発生密度と平均旅行時間の関係を、図6と図7に示す。どちらのマップでも、平均旅行時間はほぼ比較対象と同等かそれ以下に抑えられていることが

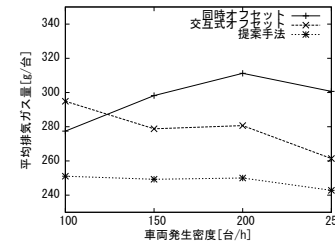


図4 車両発生密度対平均排気ガス量(2x5マップ)
Fig.4 Emission vs. vehicle density(2x5 map).

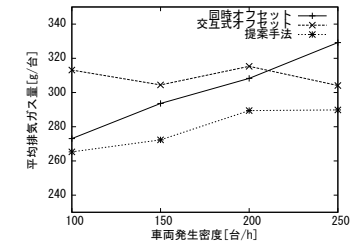


図5 車両発生密度対平均排気ガス量(3x3マップ)
Fig.5 Emission vs. vehicle density(3x3 map).

分かる。これは、制御において基準となる評価関数が遅れ時間と停止回数をを用いた式であったため、遅れ時間を少なくすることで排気ガス量を削減しようとする動作が行われたからであると考えられる。また、停止回数と信号待ち時間、旅行時間には相関性があると考えられるため、排気ガス量を削減するために停止回数を削減しようとする動作によって旅行時間の削減も行われたためであると思われる。

4.2.2 発生車両密度の比と平均排気ガス量

主道路と従道路の発生車両密度の比と平均排気ガス量の関係を図8に示す。結果より、提案手法による平均排気ガス量は、主道路の交通量の占める割合が増加することで減少する傾向であることが分かる。リアルタイム制御による各フェーズ長の調節は、調節によって停止や待ち時間が少なくなる車両の数と、停止や待ち時間が増加する車両の数の差が大きくなるほど平均排気ガス削減に効果があると考えられるが、主道路の車両発生確率を高くするにつれ、主道路に対して交通権を与えるフェーズを長くする制御を行ったときに、停止や待ち時間が少なくなる車両は多く、停止や待ち時間が増加する車両は少なくなる。このように、1回のパラメータ調節によって得られる効果が、主道路の車両発生確率に伴って高くなり、平均排気ガス量削減につながったと考えられる。

4.2.3 サイクル長と平均排気ガス量

サイクル長と平均排気ガス量の関係を図9に示す。提案手法による排気ガス量は、サイクル長が80秒のときに最も少なくなり、80秒との差が大きくなるにつれて排気ガス量も大きくなっていることが分かる。サイクル長を短くすると、リアルタイム制御によって一定時間内に調整可能なフェーズ数が増加するためリアルタイム制御による効果は大きくなると思われるが、クリアランス時間の占める割合も増加する。対して、サイクル長を長くするとクリアランス時間による停止回数の増加の影響は小さくなるが、リアルタイム制御による効

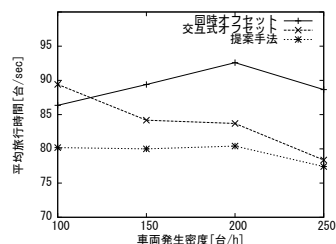


図 6 車両発生密度対平均旅行時間 (2x5 マップ)
Fig. 6 Delay vs. vehicle density(2x5 map).

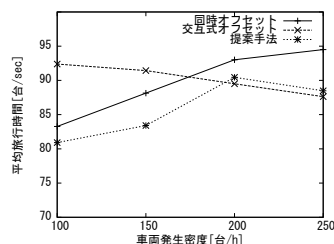


図 7 車両発生密度対平均旅行時間 (3x3 マップ)
Fig. 7 Delay vs. vehicle density(3x3 map).

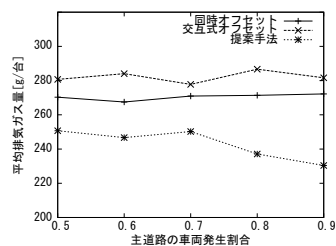


図 8 発生車両密度比対平均排気ガス量
Fig. 8 Emission vs. ratio of vehicle generation.

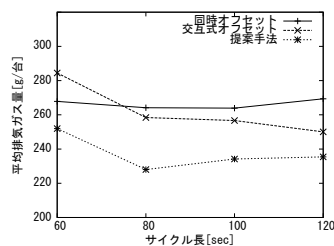


図 9 サイクル長対平均排気ガス量
Fig. 9 Emission vs. cycle length.

果は小さくなる。結果より、クリアランス時間による影響とリアルタイム制御によるメリットに対して、サイクル長を適切なトレードオフ点に設定することで、排気ガス量の削減効果は向上することが分かる。

5. まとめ

本稿では、都市街路における自動車の排気ガス量の削減を目的としたリアルタイム信号制御手法を提案した。提案手法では、対象区域内の各信号機が車車間通信で周辺の車両情報を収集し、交通量に基づき決定される順序で、排気ガス量に対する評価関数を用いて段階的にパラメータ決定を行う。パラメータを決定した信号機が隣接する信号機に車両情報を送信することで、車両情報を受信した信号機は送信元の信号機の動作を考慮した協調動作を行う。

ミクロ交通流シミュレータ上でのシミュレーション実験では、都市街路のように信号機が小さい間隔で格子状に配置されているマップにおいて、提案手法は非リアルタイムな手法による制御より自動車の平均排気ガス量を削減でき、平均旅行時間も同等以下に抑えられるこ

とが確認された。また、交通量の偏りがある程度存在する状況により適しており、サイクル長を適切な長さで設定することで効果が高まることが分かった。

今後の課題は、今回提案した手法では車車間通信や信号機間通信の方式を考慮していないため、様々な車車間通信の方式を想定した環境での動作確認を行うことや、車車間通信シミュレータとの連携による評価などである。また、制御に用いる評価関数を工夫することで、各車両の待機時間に極端な不公平が生じないように改良することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 東京都環境局：“都における温室効果ガス排出量総合評価(2006年度実績)”，2009.
- 2) 棚橋 巖, 寺田 重雄, 平井 洋, 國見 均：“大気環境評価に用いる交通流モデル”，情報処理学会研究報告 ITS[高度交通システム], Vol.20, pp.45-50, 2005.
- 3) 横田 久司, 鹿島 茂, 國領 和夫, 田原 茂樹：“走行動態に基づく自動車からの環境負荷推計モデルの開発”，大気環境学会誌, Vol.40, No.2, pp.67-82, 2005.
- 4) L. I. Panis, S. Broekx, R. Liu：“Modelling Instantaneous Traffic Emission and the Influence of Traffic Speed Limits”, *Science of the Total Environment*, Vol.371, pp.270-285, Elsevier Science, 2006.
- 5) H. Rakha, Y. Ding：“Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and Emissions”, *American Society of Civil Engineers, Journal of Transportation Engineering*, Vol.129, No.1, pp.23-32, 2003.
- 6) 交通工学研究会：“改訂 交通信号の手引”，丸善, 2006.
- 7) 佐藤 京助, 岸本 健吾, 戸谷 昌弘, 山田 雅也, 浅田 昌利：“交通管制システム用 IP ルータの開発”，SEI テクニカルレビュー, Vol.164, 2004.
- 8) 西川 郁子：“振動同期を用いた交通信号制御法について”，システム制御情報学会誌 システム/制御/情報, Vol.52, No.5, pp.163-168, 2008.
- 9) PTV system：“VISSIM: A microscopic Simulation Tool to Evaluate Actuated Signal Control including Bus Priority”, *In Proceedings of the 64th ITE Annual Meeting*, 1994.
- 10) 岩岡 浩一郎, 織田 利彦：“リアルタイム交通信号最適化制御”，土木計画学研究講演集, Vol.25, 2002.
- 11) T. Li, D. Zhao, J. Yi：“Adaptive Dynamic Programming for Multi-intersections Traffic Signal Intelligent Control”, *In Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.286-291, 2008.
- 12) S. Sen, K. L. Head：“Controlled Optimization of Phases at an Intersection”, *Institute for Operations Research and the Management Sciences, Transportation Science*, Vol.31, No.1, pp.5-17, 1997.