

竹 内 久 治 佐 竹 徳 己
井 手 幹 生 穂 坂 重 孝



安全かつ円滑な交通の確保は、都市機能に必要不可欠な要素であり、運転者や環境にとって優しいという観点からもその重要性はますます高まっている。現行の交通信号制御は、管制センタで対象エリア全体の制御を行う集中制御方式であるが、システムが大規模になるにしたがい、その改良や維持に多くの時間と費用が伴うようになってきている。近年、生物の進化をモデルとした分散知能の研究が進み、様々な分野で自律分散システムが実用化されつつある。本報では、これら分散知能の考えに基づいて開発した、新しい分散型交通信号制御システムについて報告する。

1. はじめに

信号機によって交通流を制御する交通信号制御は、交通管制システムの根幹を成すシステムである。現行の交通信号制御は、管制センタで対象エリア全体の制御を行う集中制御方式であるが、扱う交差点数が増大するにつれ、その改良や維持に多くの時間と費用が伴うようになってきている。近年、生物の進化をモデルとした分散知能の研究が進み、ロボットやエレベータ等の最適制御に、単なる集中処理の分割化にとどまらない、新しい自律分散システムが実用化されつつある。当社では、これらの考えを基にして、分散知能を有する分散型交通信号制御の研究に取り組んできた。

本報では、その概要及びシミュレーションによる評価結果を報告する。

2. 現状の交通信号制御方式

本項ではまず、交通信号制御のパラメータを解説した上で、現状の集中型制御の方式と課題について述べる。

2.1 制御パラメータ

(1) サイクル

信号現示が一巡する時間をサイクルと呼び、その長さを秒で表す。現示とは、ある交通流または交通流の組合わせに対して通行権を与える表示時間をいう。一般的な十字路

交差点は図1の現示1と現示2から成る2現示表示であり、右折交通量が多い場合には現示3の右折現示が追加される。サイクルが短すぎれば全赤時間や発進遅れに伴う損失が増すため渋滞の原因となり、逆に長すぎれば無駄な青時間が増えることになる。

(2) スプリット

1サイクルの時間のうち、各現示に割り当てられる時間配分をスプリットと呼び、秒または%で表す。

(3) オフセット

路線を走行する車両が、信号で停止することなく各交差点をスムーズに通過できるよう隣接する交差点の青信号開始時間に差を設ける(図2)。この時間差をオフセットと呼び、秒または1サイクルの時間に対する%で表す。

2.2 現状の制御方式と課題

前述のとおり、現行の交通信号制御は集中制御の形態を取り、その制御方法はパターン選択制御が基本となっている。パターン選択制御は、交通量調査に基づいてあらかじめ幾つかのパラメータパターンを作成しておき、運用時の交通需要に応じて、該当するパターンを選んで実行する方法である。このパターン選択制御には以下の課題が指摘されている。

- (1) 想定外の交通状況に対して対応できない。
- (2) パラメータパターンの作成には多くの労力と専門的な知識が必要である。近年では徐々にオンライン処理が実用化

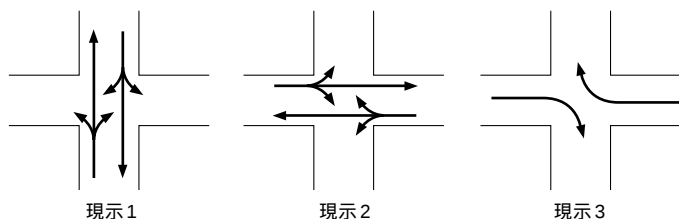


図1 現示



図2 制御パラメータ

され始めているが、十分に行き渡ってはいない。

- (3) 制御の実行は、あらかじめ分割したサブエリア単位で行い、その中の交差点はすべて共通のサイクルで動作させるが、共通サイクルはサブエリア内の重要交差点の負荷率から求め、オフセットは上り下りの交通量比から決定するというように、統一的な制御指標に基づいたパラメータ算出やサブエリア分割が行われていない。制御指標の1つとして遅れ時間が有効とされているが、サブエリア全体のパラメータを遅れ時間の関数として求める解法がなく、また遅れ時間自体も直接計測することが困難なため、現状では異なった指標に基づく制御方法となっている。
- また、集中制御方式では、交通信号制御に限らず、システムが大規模になるにしたがって一般的に以下の問題がある。
- (4) システムの肥大化に伴いその複雑度は増大し、改良や拡張、保守が困難かつ高価となる。
- (5) 集中制御の対象が広がるにつれ、一つ一つの対象に応じたきめ細かな制御ができなくなる。このため変動や外乱に対する応答性の向上が難しい。
- (6) 集中制御では、各対象と1対1に接続する通信形態を採ることが多く、通信や保守にかかる費用が高価である。これらの課題に対する取組みの一つとして分散制御方式が考えられており、実用化の検討が行われている。

3. 分散制御方式のコンセプト

近年、分散知能化技術が目覚ましい進展を遂げており、生物の進化をモデルとした自律分散システムの研究が活発に行われている。

これらの研究は例えば、

- 単純な知能しか持たない蟻が、餌を見つけると一列になって巣に運ぶ仕組み。
- 多数の蜂が、1個の巣を協調して作る仕組み。

というような、個々には比較的単純な個体が、その相互作用によって一つ一つの集積以上の能力を発揮できている仕組みに着目したもので、ロボットの群制御やエレベータの最適運転などに実際に適用されつつある。

これらの分散知能を交通信号制御に適用する際の考え方は、各交差点の分散知能化により“それぞれが自身の交差点の交通信号制御を行いながら、相互の情報交換により、系全体として制御指標を最適とする制御を行う”ことである。これを実現するための具体的な作業は、各個体すなわち各交差点が実行する、簡潔で精緻な共通の制御ルールを定義することであり、そのルールに相互の協調関係を適切に記述することである。

今回開発した分散制御アルゴリズムは4つの基本ルールから成り、制御指標は遅れ時間の最小化としている。以下これらのルールについて解説する。

4. 分散制御方式の分散知能（制御ルール）

4.1 基本ルール

(1) ルール1

このルールは、それぞれの制御機が自身の交差点で必要

なサイクル及びスプリットを生成し、それを隣接交差点と交換することが目的である。一交差点での遅れ時間を最小とするサイクル長は、以下のWebsterの近似式で求められる。

$$C_{opt} = \frac{1.5L + 5.0}{1 - \lambda}$$

ここで、

C_{opt} : 遅れ時間を最小とするサイクル長

L : 損失時間（黄時間＋全赤時間）

λ : 交差点負荷率（流入流量／飽和交通流量）

本ルールではこの式を基に必要なサイクル長を算出し、各現示の負荷比でスプリットを決定する。

なお、流入流量は、制御機間の通信をいかし、上流交差点で計測する流出予測交通流量を用いることで、交通流の変動に対し予測的な制御を行うようにしている。

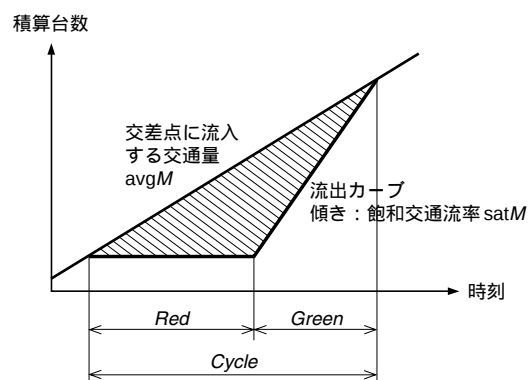
(2) ルール2

ルール2は隣接交差点との協調動作を定義する。各制御機は、ルール1で算出した、自身の必要サイクル長／スプリットで実行すべきか、それとも隣接交差点のいずれかにサイクル長を合わせて実行すべきか、それぞれのケースで予想遅れ時間を比較し、その値が最も小さくなるケースを選定する。

一交差点での遅れ時間は、交通流を時間平均量で扱えば簡略的に図3のとおり表すことができる。このルール2の段階では、交通の流れを把握し制御目標を求めることが目的であるため、この簡略式に基づいて遅れ時間を評価している。

隣接交差点にサイクル長を合わせず自身の必要サイクル長／スプリットで実行するとすれば、各交差点で図3の遅れ時間が生じる。

隣接交差点にサイクル長を合わせたとすれば、オフセットを取ることで遅れ時間を削減できる。図4に示すように、交差点AからB方向への平均流入量を $avgM_{ab}$ 、交差点BからA方向へのそれを $avgM_{ba}$ とし、大きい流量の方向に優先オフセットを与えるとすると、サイクル長を合わせた交差点A及びBで生じる遅れ時間は、



$$1 \text{ サイクル当たりの遅れ時間 (斜線部)} = \frac{1}{2} \times \text{Red} \times \text{avgM}$$

図3 遅れ時間の簡略算出法

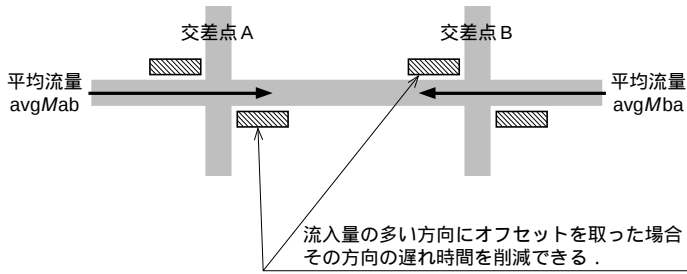


図4 遅れ時間の簡略算出法（2交差点間）

$$\begin{aligned} \text{遅れ時間} = & \frac{1}{2} \times \text{red} \times (\text{avgMab} + \text{avgMba}) \\ & + \frac{1}{2} \times \text{red} \times \text{MIN}(\text{avgMab}, \text{avgMba}) \end{aligned}$$

となる。ここでredは赤時間を示す。

一方、ある隣接に合わせてサイクル長を大きくすれば、赤時間も長くなるためその他の隣接交差点との間での遅れ時間が増加することになる。サイクル長の異なる交差点Cとの間の遅れ時間は、

$$\text{遅れ時間} = \frac{1}{2} \times (\text{redA} + \text{redC}) \times (\text{avgMca} + \text{avgMac})$$

となり、redAが長くなる分、遅れ時間が増える。

すべての隣接交差点との間で、上記方法により予想遅れ時間を計算し、最終的にその値が最も小さくなるサイクル長/スプリットを選定する。

(3) ルール3

ルール3はオフセットの算出である。ルール2で決定したサイクル長と同じ値を持つ隣接交差点との間で、最適なオフセット秒数を探索する。サイクル長/スプリットが決定した2交差点間での最適オフセットの算出は容易である。

ここまでのルール1～3で算出したパラメータを制御目標とする。これらのルールは、一定周期（3～6秒）で繰り返し実行しており、常に系全体の状態を遅れ時間最小化の方向へ向かわせている。

(4) ルール4

ルール4は制御目標に合わせ制御を行う実行部である。目標到達後は、その交差点で計測可能な項目（待ち行列長や走行速度等）に基づき、遅れ時間がより小さくなる方向

へパラメータを自動調整していく。

4.2 分散制御の動作

以上の基本ルールにより、各制御機は遅れ時間（厳密には遅れ時間の予測値）最小化という指標ですべてのパラメータを算出し、その結果、系全体が交通流に応じて自然発生的に共通サイクルエリアを分割・形成するように動く。

このような、分散化したレベルでの遅れ時間最小化が、系全体のレベルとしても最適であるかということは証明できない。しかしながら、系全体を一括して最適化計算する手法は、最適点が極値に落ち込んだり解空間上を次々に移動するなどの問題があって非常に困難かつ不安定であり、そのために論理的に根拠のないサブエリアや重要交差点を用いるよりは、各々の交差点での遅れ時間最小化を結合させる本手法の方が、少なくとも簡潔で安定性・統一性に優れていると考えられる。

5. シミュレーション評価

5.1 シミュレーション条件

開発した分散制御アルゴリズムの評価として、図5に示す11交差点でのシミュレーションを実施した。シミュレーションコードは、東大生産技術研究所が中心となって開発されたAVENUEを用いた。

図6は本シミュレーションにおける交通量変化を、おおよその交差点負荷率で表したものである。シミュレーション時間は2時間10分で、負荷率が90%を超える時間帯がある。

5.2 シミュレーション結果

図7に総遅れ時間結果を示す。グラフは、5分ごとに各路線で発生した遅れ時間を積算したものであり、グラフの高さが系全体の総遅れ時間を表す。左側のグラフは、一定サイクル長（120秒）同時オフセットの実行結果であるが、これに比して分散制御では総遅れ時間の合計値で約56%の削減となった。

図8は、ある交差点のサイクル/スプリットの実行結果であるが、交通量の変化に応じてパラメータが生成されている様子が分かる。なお、サイクルは初期値120秒、上限150秒で実行している。

本シミュレーションに当たっては、オフラインでの調整は一切無く、また交差点出口の超音波感知器を使いルール1～3で得られた制御目標のみで実行させている。ルール4のり

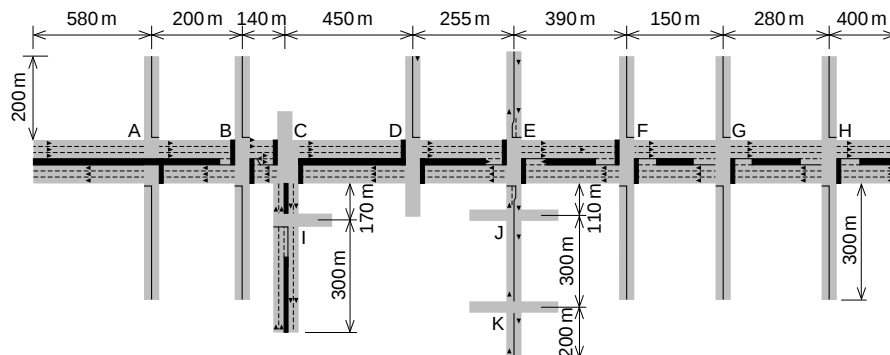


図5 シミュレーション構成

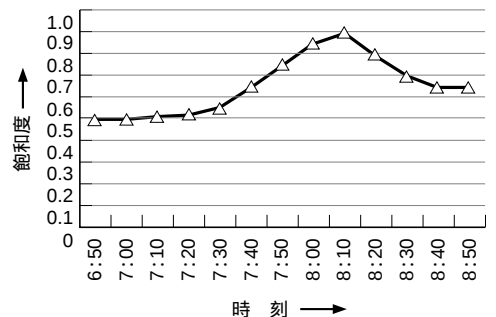


図6 交差点飽和度

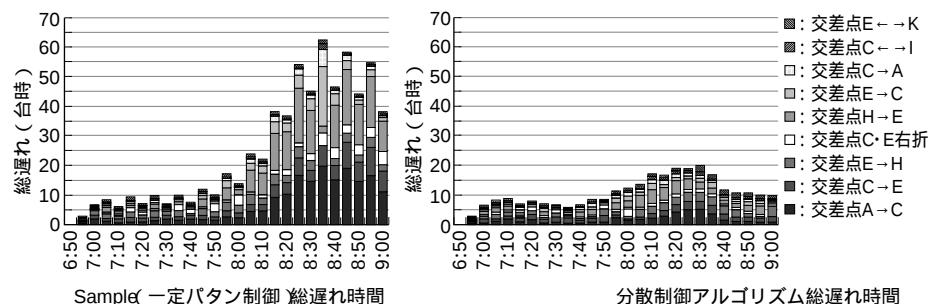


図7 シミュレーション結果

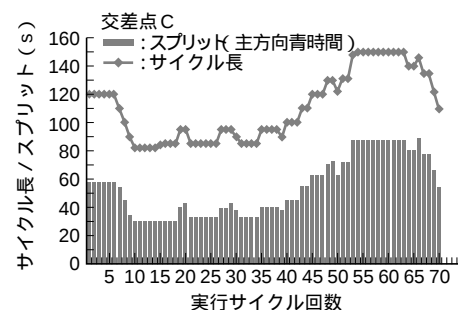


図8 サイクル/スプリット実行結果

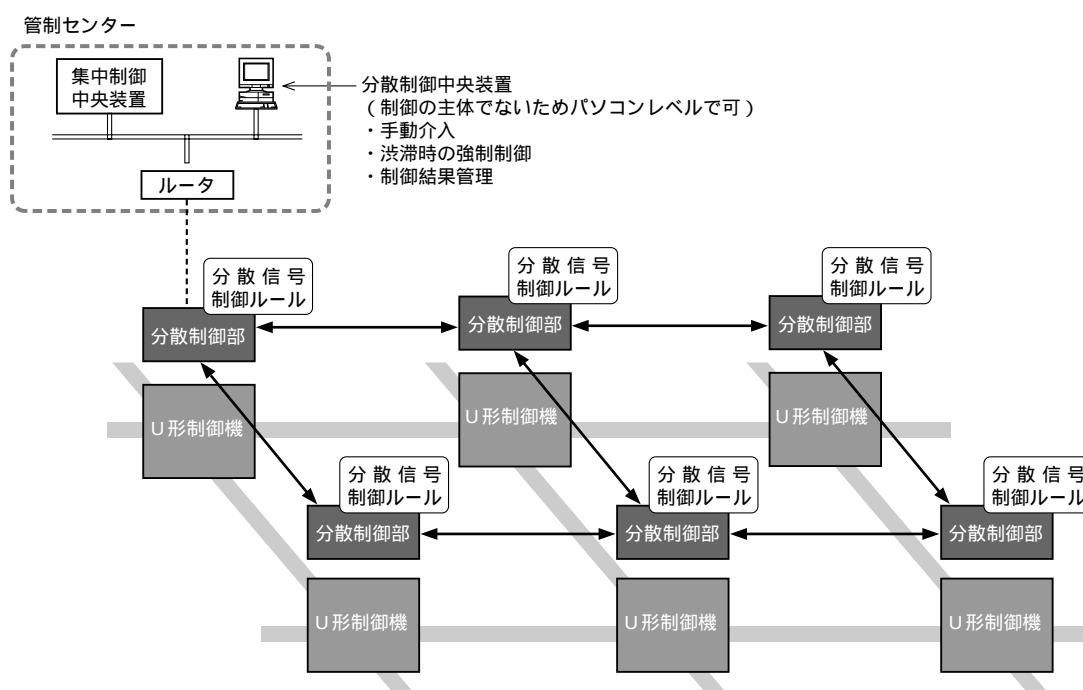


図9 分散制御システムの構成

アルタイム調整を組み入れれば、さらに遅れ時間は改善できると考えられる。

6. 分散制御システムの構成

図9に分散型交通信号制御システムの構成を示す。各交差点はLAN型の伝送方式を使って隣接の交差点と相互に接続する。分散制御は、中央からの指令どおりに動く現行の制御機に、分散制御ユニットを付加するだけで実現可能とする。制御機にとっては、パラメータの生成機能が個々に分割して配置されたに過ぎず、現行の制御機が持つ信頼性・安全性を継承することができる。

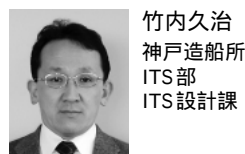
このような分散制御では、管理・監視を行う中央装置も小規模化できる。小さなエリアでは、図示したようなパソコンクラスでの管制も可能となる。

7. ま と め

分散知能を適用した分散型交通信号制御では、実際の交通流に自然発生的に適応する自動制御が可能である。また、システムを拡張する際には、同じ制御ルールを持つ制御機を接

続するだけで、そのまま全体として作用する。これにより、複雑かつ高価なパラメータの設計・保守作業を大幅に省くことが可能である。さらに、分散型交通信号制御では、通信費用の削減ばかりでなく、装置故障に対するリスク分散という観点からも優れている。

これからの交通信号制御は、欧米を始めとして分散制御の実用化が加速すると考えられる。今後は、さらに研究を続け、実フィールドへの適用を進めていく予定である。



竹内久治
神戸造船所
ITS部
ITS設計課



佐竹徳己
神戸造船所
ITS部
ITS営業課



井手幹生
技術本部
高砂研究所
神戸技術開発・研究
推進グループ主幹



穂坂重孝
技術本部
高砂研究所
神戸技術開発・研究
推進グループ主席