位相モデルによる信号機広域制御ダイナミクスの提案[†]

西川 郁子*・中澤 重人*・喜多 一**

Area-wide Control of Traffic Signals by a Phase Model[†]

Ikuko NISHIKAWA*, Shigeto NAKAZAWA* and Hajime KITA**

A coupled system of phase oscillators is proposed for a signal control of an urban traffic network. An area-wide control is given by a network of autonomous systems, which exchange local information without any central monitoring system. Each signal is modeled by a simple phase oscillator with a periodic motion, and pair-wise interactions with the adjacent signals control its offset to attain a desired value. The interaction strength depends on a traffic flow density between the corresponding pair of adjacent signals. The proposed control method is applicable to a rather general traffic flow including a loop road, a one-way road, left or right turn traffic at an intersection and any number of roads at an intersection. The results of computer simulations on several traffic flow patterns and conditions in a system of 2×2 signals are shown both with a macro model described by a flow density and with a micro model considering the dynamics of an individual car. Statistics such as an average travel time show that the effective control is achieved adaptively by the proposed method compared with several simple offsets in most conditions.

Key Words: traffic signal control, phase oscillator, phase coupling, offset control, traffic flow simulator

1. はじめに

交通管制は、道路交通流の安全確保と円滑化を目的としているが、そのうち一般道路上の交通流を直接制御する手段として交通信号機制御がある^{1), 2)}。現代社会の都市街路網における交通渋滞の緩和や交通事故の減少をはかるべく、多数の信号機が設置されているが、そこでは、空間的に分布する道路網上で、時間的に変動する交通流に適応した信号制御が求められる。各種の制御方式を制御対象単位で大別すると、点、線、面単位、すなわち、各信号機を独立に扱い各交差点での待ち時間縮小を目指す地点制御、路線上の信号機列を連動させる系統制御、地域道路網の全信号機を連係制御する広域制御に分けられる³⁾。歴史的には、信号制御は地点制御から始まり、近年の交通流の増大と街路網の拡大に伴って系統制御へと発展し、コンピュータ処理能力の増大により広域制御が可能となった。

現在の主な制御方式は、中央のコンピュータが集中制御するもので、各信号機や車両感知器を専用回線で接続し、交通

流情報を常時取得し、各時点での交通状況に基づき実時間で制御パラメータを算出し、現場に伝送する。この方式はプログラム形成方式と呼ばれるが、膨大な情報を常時伝送し処理する必要があり、また、回線や中央制御系の障害によりシステム全体が影響を受けうる。このほか、あらかじめ想定した複数の交通状況に対してオフラインで制御パラメータを算出しておき、制御時には実際に取得した交通状況に応じて既出のパラメータ値から選択するプログラム選択方式も従来から用いられている。この方式では実時間の計算コストは抑えられるが、設計や経験的予測の負担が増し、また動的な適応に劣り、想定外の突発事象への対応に欠けることになる。いずれも、街路網の大規模化に伴い制御の困難さが増大することには変わりはない。

これに対し、各信号機に自律性を持たせ、空間的に分散した信号機群が局所的な交通情報を共有しつつ、相互作用による協調制御を実現する方法が最近いくつか提案されている^{4), 5), 10)}。本論文でも、各信号機の自律性と、動的に変化する流量情報を介した単純な近接相互作用に基づく信号制御方式を提案する。関連研究のうち、提案手法に近いものは関山らの報告⁴⁾と杉らの報告¹⁰⁾であり、いずれも提案手法と同様に位相振動子の同期現象を用いている。ただし文献4)では、振動数の同期自体が常には成り立たず、用いた相互作用型に起因して、同期時にも目標とするオフセットを制御し難い。また文献10)は、反応拡散場の離散化により振動子系を導入しており、提案手法における一実現例(4.2節で示す、

[†] 第7回創発システムシンポジウムで一部発表(2001・8)

* 立命館大学理工学部 草津市野路東1-1-1

** 大学評価・学位授与機構 東京都文京区大塚 3-29-1

* Department of Computer Science, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu

** National Institution for Academic Degrees, 3-29-1 Otsuka, Bunkyo, Tokyo

(Received June 20, 2002)

(Revised November 28, 2002)

直進流のみを考慮した双方向系)と等価であるが、このままでは一方通行路や右左折流、進路別現示をもつ信号機などに拡張できない。そこで本論文では、さらに一般的に拡張するために、位相振動子系に立脚した信号制御方式を提案する。これら信号制御への応用以外にも、非線形振動子結合系の同期現象は、結合系の自律分散性により近年多くの分野で工学的応用が試みられ、多脚ロボットの歩行生成^{11)~17)}や連想記憶、最適化など^{18)~20)}への適用事例が報告されている。さらに、ほかの自律分散系による信号制御法の提案として、たとえば文献5)は、強化学習型マルチエージェントによりパラメータを学習するものだが、提案手法や4),10)では、連立微分方程式の定常解として短時間でオフセット値が得られるのに対し、多くの学習時間が必要となる。

一般に交通信号機は、青・黄・赤各信号の周期的な呈示により交通流を制御し、その属性は、サイクル長(周期)、オフセット(信号機間の青信号開始時刻のずれ)、スプリット(1周期中の主道路の現示の割合)の3パラメータで記述される。本研究では、都市街路網サブエリア内の広域制御を対象とし、エリア内の信号機群は共通のサイクル長を持つものとし、今回は信号機間のオフセット制御のみを行なう。ここで各信号機現示の時間変化の周期性に注目すると、信号機の状態は位相自由度のみをもつ位相振動子⁹⁾で記述できることに気付く。そこで、流量変化に応じてオフセット制御される信号機群を、流量に対応する結合強度に応じて所定の位相差で同期する位相振動子の相互作用系によりモデル化する。各信号機は自励振動子ゆえに中央制御系を必要とせず、局所回線の障害により孤立系となった場合にも、交差する道路に交互に通行権を与える周期的現示を示すといった信号機としての最小機能を保持しうる。提案モデルをオフセット制御に用いることの妥当性を簡単な解析で示した後、計算機実験によってモデル信号機系の特性を調べ、さらに個々の車両の走行までを模擬した交通シミュレーションにより交通制御における有効性を検討する。

以下ではまず2章で、都市街路網と交差点信号機の属性、制御パラメータ、制御目標などを説明する。つぎの3章で、各信号機を位相振動子でモデル化する。振動子対に対する相互作用とその基本的な特性を簡単に解析し、前章でみた信号機対に対するオフセット制御目標との対応を示す。続く4章で、都市街路サブエリア内の信号機群に対する制御方式として、2次元格子空間上の位相振動子系を提案する。まず、3章で述べた相互作用系を用いて、直交街路網における直進流のみを考慮した基本制御式を示す。つぎに、一方通行路、交差点での右左折流、進路別現示をもつ信号機、任意の分岐数を持つ交差点などに対応して、制御式を順次拡張する。そして5章では、まず、交通状況を交通流量のみで表現したマクロモデルにより、提案した信号機オフセット制御系の振舞いを調べる。つぎに、個別車両の走行を記述するミクロな交通流シミュレータにより、平均旅行時間などの評価指標を用いて、ほかのいくつかの典型的な固定オフセット系と比較する。最

後の6章でまとめと今後の諸課題を述べる。

2. 都市街路網と信号制御

2.1 都市街路網

都市街路網のサブエリアを考え、各交差点に信号機が設置されているものとする。ここでサブエリアを有界な2次元格子空間で表わし、格子点 C_i で表わされる交差点に信号機 i が置かれているとする。格子は直交街路などに直接対応するわけではなく交差点の隣接関係を表わす位相幾何的表現であって街路の空間配置とは区別され、また以下のモデルは正方格子・三角格子といった格子形状にはよらない。境界からエリア内部に車両が流入・流出するが、エリア内には吸い込みや吐き出し点はなく、流入した車は領域内を通行後、必ず境界外へ流出する。すなわち、信号待ち・渋滞以外で駐車することはなく、交差点や道路上の交通流は、各点での流入量と流出量が等しく流量が保存される。

各信号機の現示(ある方向の交通に通行権を与える青信号時間帯)は周期的であり、一般に、サイクル長、オフセット、スプリットの3つの制御パラメータで記述される。交通信号機制御の中心的課題は、これらのパラメータ値の決定である。このうちサイクル長は、系統制御や広域制御においては共通に設定されることが多く、また、スプリットは交差点単位で制御されることが多い。これらに対しオフセット制御は、系統・広域制御で最も重要と考えられ、その設定法について従来から多くの研究がなされてきた³⁾。そこで、本論文で考えるサブエリア内の信号機も、すべて共通のサイクル長 T を持つものとする。 T は一定範囲の実数値をとるが、以下では時間的にも不変とする。またスプリットも共通として固定し、オフセット制御のみを行なう。

2.2 制御目標

従来より用いられる単純な車両通行モデルとして、つぎの設定を考える。まず、サブエリア内での全車両の定常走行速度を一定値 v とする。このとき、各車両がその行程上できるだけ多数の交差点を減速・停車せずに通過し、旅行時間が短縮されることで交通が円滑化される。そのためには、全信号機のスプリットが共通の場合、速度 v で隣接交差点間を走行するのに要する時間だけ、つぎの信号機のオフセットが遅延していれば、その区間をその向きに速度 v で走行する車両の最大数が連続する信号を青信号で通過できる。そこで、隣接する2機の信号機 i, j 間で、 j から i への道路距離が L_{ji} のとき、 $j \rightarrow i$ 方向の交通に対する i, j 間の目標オフセット値(i の j からの遅延時間)を先の走行所要時間 L_{ji}/v で与えることにする。ここではそれをサイクル長 T で正規化して無次元量とし、さらに次章のモデルとの対応から1周期を 2π で規格化した次式で表わすことにする。

$$\Delta_{ji} = 2\pi \cdot \frac{L_{ji}}{Tv} \pmod{2\pi} \quad (1)$$

前述の仮定より、これは j を直進で通過する交通流のみを考慮した値である。ほとんどの道路では双方向で距離が等しい

($L_{ij} = L_{ji}$) と考えられるが、このとき、 $i \leftrightarrow j$ の双方向の目標オフセット値とも等しく Δ_{ji} となるため、 $\Delta_{ji} = 0$ または π でない限り、両者を同時に満たすことはできない。このように、一般には1対間でも同時に双方の目標オフセットを達成できない。信号待ち車両の軽減という制御目標からは、より交通流量の多い有向対 $j \rightarrow i$ に対して優先的に目標オフセットを満たすような調整が必要になる。なお、双方向の流量が等しい区間では、次節のことが知られている。

2.3 双方向等流量区間の最適オフセット

隣接信号機対 i, j の目標オフセット値 (1) が互いに等しいとする ($\Delta_{ij} = \Delta_{ji} \equiv \Delta$ とおく。ただし遅延の向きは逆)。双方向の流量が等しいとき、両目標オフセットの単純平均をとると平均値は0あるいは π となる (Fig. 1 参照。オフセットは mod 2π であることに注意)。このうち、元の両オフ

Fig. 1 An average value of a couple of offsets

セット値 $\pm\Delta$ に近いのは、

$$\begin{cases} 0 \leq |\Delta| < \pi/2 & \text{のとき } 0 \\ \pi/2 < |\Delta| < \pi & \text{のとき } \pi \end{cases} \quad (2)$$

である。

交通流を最も単純化した単一飽和交通流モデルを用いて、目標オフセット値からのずれによって生じる待ち時間を、ずれの関数として求めると、(2) 式の値を互いのオフセットにとったときに、両方向で生じる待ち時間の総和が最小となることがわかる⁶⁾。さらに、車両を考慮したマイクロモデルによる交通シミュレータ実験によって得られた最適オフセットも、それとほぼ一致することが報告されている⁸⁾。このように簡単な解析および計算機実験より、双方向の流量が等しい場合の最適オフセットを (2) 式で与えるのは妥当だと思われる。

全交差点間隔が等しい正方街路で考えると、隣接信号機対の目標オフセットは、交差点間距離 L を用いてすべて互いに

$$\Delta = 2\pi \cdot \frac{L}{Tv} \quad (3)$$

となり、上記の意味で最適オフセットを与える (2) 式は、 $|\Delta| < \pi/2$ のとき全信号機間のオフセットが 0 (同時型)、 $\pi/2 < |\Delta| < \pi$ のとき隣接信号機間のオフセットが半周期 (交互型) となる。

3. 位相モデルにおける同期

3.1 信号機の位相モデル

サイクル長 T で周期的な現示を繰り返す信号機 i の各時刻 t での状態は、1 サイクル中の位置を示す位相で表わすことができる。ここでは位相を、1 周期を 2π で規格化した無次元量 $\phi \in [0, 2\pi)$ で表わし、信号機 i の時刻 t での位相 $\phi_i(t)$ は周期 T での等速運動で与えられるものとする。これ

により信号機 i の状態は、位相変数 $\phi_i(t)$ のみをもつ位相振動子⁹⁾の、振動数 $\omega = 2\pi/T$ による時間変化を示す次式で表わされる。

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega \quad (4)$$

原点 $\phi_i = 0$ の取り方は任意のため、ここでは Fig. 2 に示すように交差点 C_i での主道路の青信号開始時刻に取る。対象とするサブエリア内で主道路の方向を共通に取り、スプリットも共通のとき、信号機 i の j からの遅延としてのオフセットは $\phi_j - \phi_i$ と書ける。

Fig. 2 Dynamics of a signal described by a phase model

3.2 1 対の相互作用系

ともに (4) 式で記述される 2 つの系 ($i = 1, 2$) が、各時刻の位相差で定まる強度で相互作用する以下の結合系を考える。

$$\begin{cases} \frac{d\phi_1}{dt} = \omega_1 + \Gamma(\phi_2 - \phi_1) \\ \frac{d\phi_2}{dt} = \omega_2 + \Gamma(\phi_1 - \phi_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Gamma(\phi) = K \cdot \sin(\phi - \delta) \quad (K: \text{結合強度係数}) \quad (6)$$

結合型を与える $\Gamma(\phi)$ には周期 2π の任意の関数を用いるが、Fourier 展開の最低次として (6) 式を用いた場合の解析結果が最も豊富に知られている。このとき、元の 2 系の振動数が異なる場合 ($\omega_1 \neq \omega_2$) には結合強度 K によって振動数同期が生じ、また、元の振動数が等しい場合 ($\omega_1 = \omega_2$) には位相差 $\phi_1 - \phi_2$ が一定値となる唯一の安定な同期解をもつ⁹⁾。

以下の例で、その基本的性質をみる。

$$\begin{cases} \frac{d\phi_1}{dt} = \omega + K_1 \cdot \sin(\phi_2 - \phi_1 - \delta) \\ \frac{d\phi_2}{dt} = \omega + K_2 \cdot \sin(\phi_1 - \phi_2 - \delta) \end{cases} \quad (7)$$

(ただし $K_1, K_2 > 0$)

において、位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ は、常に 1 つの安定定常解 $\Delta\phi_0$ を持つことが簡単な解析よりわかる⁹⁾。特に、

- 一方にのみ相互作用項が与えられる場合には、

$$\begin{cases} K_1 = 0 \text{ のとき } & \Delta\phi_0 = \delta \\ K_2 = 0 \text{ のとき } & \Delta\phi_0 = -\delta \end{cases}$$

となる。つまり、 ϕ_1 の相互作用項は $\Delta\phi = -\delta$ を、 ϕ_2 の相互作用項は $\Delta\phi = \delta$ を目標とし、一般に、各相互作用項は、 $\sin(\cdot)$ の引数が 0 となる位相差を達成する作用として働く⁹⁾。

- 双方の強度が等しい ($K_1 = K_2$) 場合には、

$$\begin{cases} 0 \leq |\delta| < \pi/2 \text{ のとき } & \Delta\phi_0 = 0 \\ \pi/2 < |\delta| \leq \pi \text{ のとき } & \Delta\phi_0 = \pi \end{cases} \quad (8)$$

$\delta = \pi/2$ のときは任意の $\Delta\phi$ 値が中立安定

となる. このように, 安定な定常位相差 $\Delta\phi_0$ は, ϕ_1 および ϕ_2 がそれぞれ目標とする位相差 $\Delta\phi = -\delta$ および δ の間の一つの値をとり, その値は結合強度 K_1, K_2 によって連続的に変化する. つまり, 等強度のときはその近い方の中間値 0 あるいは π , 強度差があるとより強い側の目標値に近い値をとり, 他方が無視できる程度に強度差があると強い側が目標値を達成することがわかる⁹⁾.

さらに, 2次元正方格子上に配置された振動子系に対し, 隣接振動子対にすべて等しい結合強度 K による (7) 式の相互作用を与えた場合, $0 < |\delta| < \pi/2$ のときすべて同位相 (同時型), $\pi/2 < |\delta| \leq \pi$ のとき隣接間で逆位相 (交互型) が唯一の安定定常解となる⁹⁾.

3.3 振動子対と信号機対の対応

(7) 式で与えられる振動子対の定常位相差として, 前節で示した, 双方が等強度の場合の (8) 式は, 双方向の流量が等しい信号機対間の最適オフセットに対する 2.3 節の (2) 式と一致する. よってまた, 正方格子上ですべての強度 (流量) が等しい場合の同期型, 交互型の出現も一致している. さらに, 結合強度差がある場合には, 強い側が目標とする位相差により近い定常値をとる性質も, 2.2 節に述べたオフセット制御の目標に合致する.

信号機の各有向対に対する目標オフセットが (1) 式で与えられるとき, 1 対間でも, まして多数の信号機からなるサブエリア内の全有向対に対して (1) 式を満たすことは一般にはできない. そのため, 各目標値からのずれを含む妥協解の中から, サブエリア全体での交通流円滑化のための最適解を, 区間流量に応じて決める必要があるが, 信号機数が増えるにしたがい計算は困難となる. そこで本研究では, 本章で示した振動子系の性質を利用したオフセット制御方式を, 次章に提案する.

4. 振動子系によるオフセット制御

4.1 オフセット制御の基本式

サブエリア内の信号機群を, 均一の振動数 $\omega = 2\pi/T$ をもつ 2次元格子点上の位相振動子系としてモデル化する. 3.2 節でみたように, i, j 対に対する $\sin(\phi_j - \phi_i - \delta)$ 型の位相差相互作用は, 位相差 δ による同期をもたらすことを利用して, 信号機対の目標オフセット値 Δ を相互作用項中の定数 δ にとる. また, 有向区間 $C_j \rightarrow C_i$ の流量 K_{ji} に応じたオフセット制御として, 流量の大きい有向対を優先的に目標オフセット Δ_{ji} に近付けるために, 振動子間の結合強度を流量 K_{ji} の単調増加関数 $F(K_{ji}) > 0$ で与える.

以上より, 直交街路における直進交通流のみを考慮した隣接信号機間のオフセット制御を, 次式にしたがう ϕ_i によって与える.

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \varepsilon \cdot \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} F(K_{ji}) \cdot \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta_{ji}) \quad (9)$$

ただし, N_i は i の隣接信号機の集合, $|N_i|$ はその要素数を表わし, $\varepsilon > 0$ は共通の結合強度係数とする. 以下の実験では, $F(K) \propto K, K^2$ を用いた.

なお文献 4) でも位相振動子系によるオフセット制御を扱っているが, そこでは振動数の分布系 $\{\omega_i\}_i$ に対して, 振動数同期によるサイクル長 T_i の変化を利用した制御を試みており, また結合型では常に $\delta = 0$ とするなど, δ を目標オフセット値に設定してサイクル長一定の信号機群に対するオフセット制御を行なう本提案式とは, 結合系の性質も振動子系の適用法も本質的に異なっている.

基本式 (9) は, 直進流のみを考慮し, また, j から i への交通流に対して下流側の信号機 i でのみ目標オフセット値 Δ_{ji} の達成をはかるものとなっている. さらに, 直進や右左折といった進路ごとに異なる現示 (各交差点での進行方向に応じた青矢印信号などで示される現示) は考慮していない. つぎにそれらに対応した拡張を順に示す. いずれも, 隣接信号機間でのみオフセットの協調制御を行なう点は共通である. なお以下では, 表記の簡潔さのため, $\varepsilon = 1.0, F(K) = K$ とした.

4.2 双方向相互作用と一方通行路

前節の基本式 (9) は, 隣接信号機間の交通流に対して, 流れの下流側にのみ制御が作用する形式となっている. これは, i, j 間に $j \rightarrow i$ 向きの交通流しかない ($K_{ji} = K > 0, K_{ij} = 0$) 一方通行路に対して,

$$\begin{cases} \frac{d\phi_i}{dt} = \omega + K \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta) \\ \frac{d\phi_j}{dt} = \omega \end{cases} \quad (10)$$

を与える (ここでは $\Delta_{ji} = \Delta$ と略記した) ことからわかる. そこでこの形の相互作用を, 本稿では単方向相互作用と呼ぶことにする.

これに対し, 対の双方に制御項を等しく分配して与える以下の基本式を, 双方向相互作用系として新たに提案する.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \left\{ \frac{K_{ji}}{2} \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta_{ji}) \right. \\ \left. + \frac{K_{ij}}{2} \sin(\phi_j - \phi_i + \Delta_{ij}) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

このとき, $K_{ji} = K > 0, K_{ij} = 0$ の一方通行路に対しては,

$$\begin{cases} \frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \frac{K}{2} \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta) \\ \frac{d\phi_j}{dt} = \omega + \frac{K}{2} \sin(\phi_i - \phi_j + \Delta) \end{cases} \quad (12)$$

となる (ここでも $\Delta_{ji} = \Delta$ とした).

このように i, j の一対のみを考える場合は, 単方向系の (10) 式, 双方向系の (12) 式のいずれでも, 対間で達成すべき目標オフセットには互いにフラストレーションはなく, 定常位相差 $\phi_j - \phi_i = \Delta$ が得られる. 両系に本質的な差異はなく, 3.2 節でみた基本特性も全く同じである.

つぎに, 一方通行の環状路を考える. 巡回路上に n 機の信号機 $i = 0, \dots, n-1$ が存在し, $i \rightarrow i+1$ 方向の一方通

行, 隣接対間の目標オフセット $\Delta_{i,i+1}$ はすべて同一の Δ とする. このとき, 単方向系 (9) 式では,

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + K \sin(\phi_{i-1} - \phi_i - \Delta), \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (13)$$

また, 双方向系 (11) 式では,

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \frac{K}{2} \sin(\phi_{i-1} - \phi_i - \Delta) \\ + \frac{K}{2} \sin(\phi_{i+1} - \phi_i + \Delta), \quad i = 0, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (14)$$

(ただし ϕ の添字はいずれも $\text{mod } n$ をとる)

となり, 両相互作用は異なる制御を与える. 数値計算による比較結果を, 5.1 節に示す. 一方通行の環状路は, 両相互作用系の差異が特に顕著になる例であり, 一般に i, j 間に双方向流がある道路では, 両系の差異は軽減され则认为られる.

なお, ここで用いた「単方向・双方向相互作用」は, 本稿で導入した分類および用語である. 力学系としては, ϕ_i から ϕ_j への相互作用係数を, K_{ij} とするか (単方向系), あるいは, $\frac{1}{2} \cdot (K_{ij} + K_{ji})$ とするか (双方向系) による本質的な差異はないようにみえるが, 後者はポテンシャル系となり, 位相差の平衡点への収束性が保証される. さらに, 提案手法のように信号機制御に適用する場合には, 所定の交通流量 K_{ij}, K_{ji} のもとで異なる相互作用, よって, 異なるオフセット値を与えるため区別が必要となる. また, この分類にしたがうと, 文献 10) で反応拡散方程式の離散化から導出された制御は, 双方向系で直交路直進流のみを考慮した例として位置付けられる.

4.3 右左折流を考慮した制御式

基本式 (9) では, $j \rightarrow i$ 間の交通流は交差点 C_j, C_i にいずれも主道路あるいは従道路から流入する, すなわち, C_j を直進した後 i に流入する交通流のみを想定している. 一般に, 各交差点での右左折流を考慮すると, 制御式は以下の (15) 式で与えられる. なおここでも, 共通のサイクル長 T , スプリット s をもつ直交路網とする. よって, 表記の簡単化のため以下で各信号機での黄信号時間やクリアランス時間を 0 とすると, $0 \leq \phi_i < s \cdot 2\pi$ が主道路の青信号時間帯, $s \cdot 2\pi \leq \phi_i < 2\pi$ が従道路の青信号時間帯である.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in N_j, l \neq i} \\ K_{lji} \cdot \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta_{ji} + \Pi_{lji}) \end{aligned} \quad (15)$$

ただし, K_{lji} は有向区間 $l \rightarrow j \rightarrow i$ を通行する流量であり, 流量の保存則 $\sum_{l \in N_j, l \neq i} K_{lji} = K_{ji}$ を満たす. この K_{lji} は, 交差点 C_j において, l から流入し i へ流出する交通流量として, 原理的に計測可能な量である. また, 定数 Π_{lji} は, C_j での進路変更に応じて

$$\Pi_{lji} = \begin{cases} 0 & : C_j \text{ で直進} \\ s \cdot 2\pi & : C_j \text{ で主道路から従道路に} \\ (1-s) \cdot 2\pi & : C_j \text{ で従道路から主道路に} \end{cases} \quad (16)$$

をとる. (15) 式は, 右左折も含めた各交通流 $l \rightarrow j \rightarrow i$ に対して, 信号機 j における現示開始時刻から Δ_{ji} だけ遅延

して信号機 i における現示が開始するような制御に相当する. 特にスプリット $s = 0.5$ のとき,

$$\Pi_{lji} = \begin{cases} 0 & : C_j \text{ で直進} \\ \pi & : C_j \text{ で右左折} \end{cases} \quad (17)$$

(15) 式では, i から 1 つ上流の交差点 C_j での進路変更を考慮するために, 2 つ上流の交差点 C_l から出た交通分流ごとに考えている. ここでは, Δ_{ji} は区間 $j \rightarrow i$ のみによるものとし, 右左折に要する交差点内での加減速や停止などは無視した. 直進流のみの場合には, (15) 式は (9) 式に帰着される.

前節の双方向相互作用系 (11) 式では, (15) 式右辺に以下の項が追加され, 1 つ下流の交差点 C_l からの流れ $li \rightarrow j$ を考えることになる (係数 $1/2$ は表記の簡潔さのため省いた).

$$\begin{aligned} + \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in N_i, l \neq j} \\ K_{lij} \cdot \sin(\phi_j - \phi_i + \Delta_{ij} - \Pi_{lij}) \end{aligned} \quad (18)$$

4.4 進路別現示や任意の分岐数に一般化した制御式

前節までは直交路で考え, また信号機 i の現示は, C_i への流入方向のみにより流出の向きにはよらない, すなわち, 直進・右左折車両に対して同時に通行権を与えるものとした. ここではより一般的に, 任意の交差道路数を持ち, 各進行方向ごとの現示を個別に与えうる信号機群に対して, 同様のオフセット制御式を示す. そのために, 以下の再定式化を行なう.

交差点 C_i に流入する道路 (およびその道路上で i に隣接する信号機も同一視) の集合を I_i , 同じく流出する道路 (およびその上の隣接信号機) の集合を O_i とし, $l \in I_i$ から $k \in O_i$ への流量を K_{lik} とする. i でのすべての進路 $l \rightarrow i \rightarrow k$ ($\forall l \in I_i, \forall k \in O_i$) に対する現示の周期的変化は, 1 つの位相変数 ϕ_i によって記述されるが, これは主道路に対する現示に対応しており, $\phi_i = 0$ が主道路直進流への青信号開始時刻である. そこでほかの進路に対する現示も, それぞれ位相 $\phi_{lik} = \phi_i - \psi_{lik}$ で表わし, $\phi_{lik} = 0$ をその現示の開始時刻とする. ここで, 基準位相 ϕ_i からのずれ ψ_{lik} (現示の開始時刻の遅延で $0 \leq \psi_{lik} < 2\pi$) は, スプリットやクリアランス時間, 各進路に対する青 (矢印) 信号時間長などによりあらかじめ設定される定数である.

有向区間 $j \rightarrow i$ の交通流に対する隣接信号機 i, j 間の協調は, 交通流 $l \rightarrow j \rightarrow i, \forall l \in I_j$ に対する現示 ϕ_{lji} と, 交通流 $j \rightarrow i \rightarrow k, \forall k \in O_i$ に対する現示 ϕ_{jik} を目標オフセット Δ_{ji} で同期させることで実現する. ここで, 隣接交差点 C_j, C_i での各交通流分布 $\{K_{lji}\}_{l \in I_j}, \{K_{jik}\}_{k \in O_i}$ は一般に独立ではないが, 以下では独立性を仮定し, すなわち, ϕ_{lji} と ϕ_{jik} の同期をはかる相互作用項には, K_{lji} と K_{jik} の積でその結合強度を与え, $K_{ji} = \sum_{l \in I_j} K_{lji} = \sum_{k \in O_i} K_{jik}$ で規格化することにする. このとき, 制御式は以下となる.

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \frac{1}{|I_i|} \sum_{j \in I_i} \sum_{l \in I_j, l \neq i} \sum_{k \in O_i, k \neq j} \frac{K_{lij} K_{jik}}{K_{ji}} \cdot \sin(\phi_{lji} - \phi_{jik} - \Delta_{ji}) \quad (19)$$

前節のように、1) 直交街路で、2) ψ_{lik} が流入路 l の方向のみにより、3) 全信号機 i で共通スプリット s を持つ場合には、

$$\psi_{lik} = \begin{cases} 0 & : l \text{ が主道路} \\ s \cdot 2\pi & : l \text{ が従道路} \end{cases} \quad (20)$$

となることより、

$$\begin{aligned} \phi_{lji} - \phi_{jik} - \Delta_{ji} &= \phi_j - \psi_{lji} - (\phi_i - \psi_{jik}) - \Delta_{ji} \\ &= \phi_j - \phi_i - \Delta_{ji} + \Pi_{lji} \end{aligned} \quad (21)$$

ただし Π_{lji} は (16) 式で与えられる。よって、 $\sum_{k \in O_i} K_{jik} = K_{ji}$ より (19) 式は (15) 式に帰着される。

これに対する双方向系では、 $l \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow k$ 区間の交通流を考えた、以下の項が (19) 式右辺に追加される (係数 $1/2$ は省いた)。

$$+ \frac{1}{|O_i|} \sum_{j \in O_i} \sum_{k \in O_j, k \neq i} \sum_{l \in I_i, l \neq j} \frac{K_{lij} K_{ijk}}{K_{ij}} \cdot \sin(\phi_{ijk} - \phi_{lij} + \Delta_{ij}) \quad (22)$$

ここでも $\sum_{k \in O_j} K_{ijk} = K_{ij}$ より (22) 式は (18) 式に帰着される。

5. 計算機シミュレーション

5.1 単方向および双方向相互作用系の比較

本節ではまず、単方向および双方向相互作用系を比較するために、両者の差が端的に現れる例として、Fig. 3 のような n 信号機 $S_0, \dots, S_{n-1}$ を持つ一方通行の環状道路を考える。

Fig. 3 n signals on a oneway loop road

これに対して、単方向系；

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + K \sin(\phi_{i-1} - \phi_i - \Delta), \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (23)$$

および、双方向系；

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} &= \omega + \frac{K}{2} \sin(\phi_{i-1} - \phi_i - \Delta) \\ &\quad + \frac{K}{2} \sin(\phi_{i+1} - \phi_i + \Delta), \\ i &= 0, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (24)$$

(ただし ϕ の添字はいずれも $\text{mod } n$ をとる)

Fig. 4 Time development of the phase differences between $\phi_i (i = 1, 2, 3)$ and ϕ_0 , and the frequency $d\phi_0/dt$ of S_0 (a dot-dash-line) for $d = 1.2$

の数値実験を行ない、定常解や過渡過程を比較した。信号機数 $n = 4$ 、結合強度係数 ε も含む流量 $K = 0.5$ 、振動数 $\omega = 1.0$ 、また目標オフセット $\Delta = 2\pi/(n \cdot d)$ 、ただし $d = 1.2, 0.8$ とした。この 2 つの値のうち、 $d = 1.2$ のとき一対系は同位相同期が安定解、 $d = 0.8$ のとき一対系は逆位相同期が安定解である。初期状態依存性をみるために、4 つの初期位相値は、 $[0, 2\pi]$ ($0 < r < 1$) の一様乱数により与えた。

Fig. 4, 5 に、信号機 S_0 と各信号機 $S_i (i = 1, 2, 3)$ の位相差 $\phi_i - \phi_0$ および S_0 の振動数 $d\phi_0/dt$ の時間変化を示す。ただし、図では位相差を $[-0.1, 2\pi - 0.1]$ に規格化して示した。

図より、同位相同期が安定な $d = 1.2$ の場合には、単方向、双方向系ともに同位相同期および等位相差 $2\pi/n = \pi/2$ での同期が存在し、双方向系の方が等位相差 $\pi/2$ での同期が生じやすい (basin 領域が広い)。また、単方向系では相互作用の非対称性より、過渡過程でオーバーシュートが見られる。定常解での振動数は、一般には相互作用項の影響により ω よりずれるが、ここでの双方向系は両隣の対称性により振動数の変化は生じない。

なお、収束性については両系は一般に異なる性質を持つ。双方向系は、前述のようにポテンシャルを有することにより必ず収束する。単方向系ではこれが成り立たないため、系が拡大し流量パターンが複雑になるにしたがい、収束しない場合が生じやすくなる。次節以降に示す 2×2 信号機系のシミュレーションでは、いずれの流量パターンに対しても、異なる初期値に対してすべて収束したが、たとえば、 3×3 信号機系で複雑な流量パターンを与えた場合、初期値によっては収束せず位相差が周期的に変化する例が少数ではあるが見られた。

Fig. 5 Time development of the phase differences between ϕ_i ($i = 1, 2, 3$) and ϕ_0 , and the frequency $d\phi_0/dt$ of S_0 (a dot-dash-line) for $d = 0.8$

5.2 信号機系に対するマクロシミュレーション

本節では、 2×2 機の信号機系に対して数種の流量パターンを与え、前章で提案した制御式の定常解として得られるオフセット値を数値実験により求める。ここでは、 2×2 の直交街路を考え、 ψ_{lik} 値は流入路 l の方向のみにより、全信号機が共通のスプリット $s = 0.5$ を持つものとし、右左折流に対する Π_{lji} を含めた 4.3 節の (15), (18) 式を用いる。結合強度係数 $\varepsilon = 0.1$ 、基準流量 $K = 1.0$ 、振動数 $\omega = 1.0$ 、また隣接対間の目標オフセット値は $\Delta = 3\pi/8$ あるいは $5\pi/8$ とした。この 2 つの Δ 値では、隣接対が同位相同期（同時型）、あるいは、逆位相同期する解（交互型）が、それぞれ安定定常解の一つとして存在する。なおここでも Δ 値は、区間を直進等速で通過する交通流のみを考慮した制御目標値であり、右左折流に対しては、交差点での停止や加減速も考慮して、より大きな値に設定する必要がある。

流量および隣接信号機間の目標オフセット値として、以

Fig. 6 4 patterns of traffic flows and target offsets Δ for a system of 2×2 signals. (a) Pattern 1: one flow is 2 or 3 times in density (b) Pattern 2: one pair of adjacent signals have a different target offset Δ (c) Pattern 3: one straight flow and a cyclic flow (d) Pattern 4: one straight flow and a detour

下の **Fig. 6** に示す 4 パターンを与えた。4 機の信号機 S_i ($i = 0, \dots, 3$) が i 値を中央に示した円で表わされている。図の (a) パターン 1 では、4 本の各道路に双方向流があり、そのうち太線で示された 1 方向のみが $K = 2, 3$ と流量が多い。(b) パターン 2 では、4 対の隣接信号機間の目標オフセット値のうち、 S_0, S_1 対の 1 対のみがほかと異なる値であり、ほかの 3 対が $\Delta = 3\pi/8$ のときは $5\pi/8$ 、ほかの 3 対が $\Delta = 5\pi/8$ のときは $3\pi/8$ をとり、フラストレーションの大きな系となっている。流量は全 8 方向とも等しく $K = 1$ とする。(c) パターン 3 では、交差点 $0 \rightarrow 1$ の流れは、初回は 1 を右折し $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 0$ の巡回路を経て、2 度目は 1 を直進で通過する。(d) パターン 4 では、交差点 0 で 1 への直進流 ($K = 1$) から、 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ への迂回流 ($K = 1$) が分流し、1 で再び合流する。このように、パターン 3, 4 では右左折流が主体となる。

Table 1 Offset values obtained by the proposed method for the 4 patterns shown in Fig. 6 ($\times 2\pi$)

	$\phi_1 - \phi_0$	$\phi_2 - \phi_0$	$\phi_3 - \phi_0$
Pattern 1 ($K = 2$)			
$\Delta = \frac{3\pi}{8}$	0.922/0.909	0.000/0.940	0.010/0.970
$\Delta = \frac{5\pi}{8}$	0.580/0.593	0.000/0.061	0.490/0.531
Pattern 1 ($K = 3$)			
$\Delta = \frac{3\pi}{8}$	0.891/0.874	0.000/0.917	0.004/0.959
$\Delta = \frac{5\pi}{8}$	0.611/0.628	0.000/0.084	0.495/0.542
Pattern 2			
$\Delta = \frac{3\pi}{8}$	0.500/0.375	0.499/0.250	0.875/0.125
$\Delta = \frac{5\pi}{8}$	0.000/0.876	0.626/0.250	0.500/0.626
Pattern 3			
$\Delta = \frac{3\pi}{8}$	0.063/0.063	0.375/0.375	0.689/0.689
$\Delta = \frac{5\pi}{8}$	0.437/0.437	0.625/0.625	0.813/0.813
Pattern 4			
$\Delta = \frac{3\pi}{8}$	0.876/0.845	0.626/0.564	0.313/0.281
$\Delta = \frac{5\pi}{8}$	0.626/0.657	0.375/0.438	0.188/0.219

Table 1 に、4つのパターンにおいて $\Delta = 3\pi/8$ あるいは $5\pi/8$ としたときに、単方向系および双方向系で得られたオフセット値を示す（表中 / の前後がそれぞれ単方向および双方向系での結果．表では位相差を $[0, 1) \times 2\pi$ で示した）．また、表中のオフセット値のうち、 $\Delta = \frac{3\pi}{8}$ の場合のみ、その可視化を Fig. 7 に示す．図では、 S_0 の位相を基準値 0 として各信号機 $S_i (i = 1, 2, 3)$ の位相を、Fig. 2 のように反時計回りで回転する矢印の角度により表わした．各信号機は Fig. 6 と同じ配置の円で示され、隣接信号機を結ぶ弧は、その間の交通流に対応し（Fig. 6 と同様に左側通行で向きを表わす）、弧の太さが流量に対応する．円中の濃淡 2 種の矢印の角度が、それぞれ単方向系（濃色）と双方向系（淡色）で得られたオフセット値を示し、スプリット $s = 0.5$ のときの従道路のオフセットもあわせて破線の矢印で示した．

Fig. 7 Visualization of the offsets shown in Table 1 for $\Delta = \frac{3\pi}{8}$. Top: Pattern 1, Bottom: Patterns 2, 3 and 4

これより、つぎのことが見られる．パターン 1 は非対称性が小さいため、完全に対称な場合に出現する同時型あるいは交互型のオフセットから、流量が大きい交通流を優先する側に少しずれた値をとる．ずれは流量とともに大きくなり、双方向系では、生じたずれを各隣接対で均等に吸収する傾向がある．パターン 2 では、与えられた目標オフセットから生じるフラストレーションの結果、非対称性の高いオフセットとなり、表に示した以外に複数の定常解が生じる．ここでも、双方向系では各対のオフセットをより均等化する傾向が見られる．パターン 3 では、 $0 \rightarrow 1$ の交通流が 0 での直進流と右折流の混合である結果 0,1 間の相互作用が消え、全系統でフラストレーションがなく、いずれでも目標オフセット値が達成されている．パターン 4 ではフラストレーションが存在するが、双方向系は各隣接対でより均等化していることがわかる．

なお、この 2×2 の 4 信号機系では、対称性のみを考慮したオフセット値として、以下の 4 つが存在する；1) 同時型 ($\phi_0 = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3$)、2) 交互型 ($\phi_1 - \phi_0 = \phi_3 - \phi_0 = \pi, \phi_2 = \phi_0$)、3) 右周り型 ($\phi_1 - \phi_0 = \phi_2 - \phi_1 = \phi_3 - \phi_2 = -\pi/2$)、4) 左周り型 ($\phi_1 - \phi_0 = \phi_2 - \phi_1 = \phi_3 - \phi_2 = \pi/2$)．

次節では、これら 1)~4) のオフセット値と、Table 1 に示したオフセット値を用いて、個々の車両の走行までを模擬した交通シミュレーションを行なう．

5.3 車両を含めたミクロシミュレーション

本節では、前節で提案法によりオフセット値を求めた 4 パターンに対して、各車両の走行を陽に表現したミクロな道路交通流シミュレーションを実行し、車両の平均旅行時間や平均遅延時間などの評価指標によって提案法の性能を評価する．

以下で用いた道路交通流シミュレータ MELROSE^{7),8)}は、道路網、車両および交通制御系が分離して構成され、車両走行には前車両追従モデルを拡張した仮想障害物追従に基づく自律型走行モデルを用いることで、自由走行、追従走行のほか、信号遵守、交差点内行動、車線変更、合流、待機なども統一的に扱うものである．そこではまず各運転者の意思決定モデルにより加減速・停止判断を行ない、つぎに各車両の動特性に基づき、車両の運動モデルにより車両の加速度・速度・位置を更新する．そのために、運転者の属性および車両の特性を表現する多数のパラメータが設定されるが、その詳細は省く．以下の実験では基準設定値を用いた．

この環境のもとで、提案法の単方向系、双方向系によるオフセット値、および、比較する固定オフセットとして、同時型、交互型、さらにパターン 3 および 4 に対しては、それぞれ右周り型および左周り型の各オフセットによるミクロシミュレーションを行なった．実験では、4 信号機ともサイクル長 $T = 120 \text{ sec}$ 、スプリット $s = 0.5$ 、黄信号時間 0 sec、クリアランス時間 0 sec とし、時間 30 min 相当のシミュレーションにより定常性を確認した上での統計量として、全車両の平均旅行時間、平均停車時間、平均待ち台数などを求めた．交差点間距離を 400 m、車両の定常走行速度を 64 km/h および 38.4 km/h とし、目標オフセット値を $\Delta = 3\pi/8$ および $5\pi/8$ に設定した． $K = 1.0$ の基準流量は 200 台/h および 400 台/h（ただし $K = 3$ の区間をもつパターン 1 と右左折流の多いパターン 4 では 300 台/h）とし、 $K = 2, 3$ に対してはそれらの 2, 3 倍とした．ここで、交差点飽和と交通量は約 2000 台/h であり、よって飽和度は 0.2 ~ 0.6 程度である．

Fig. 8 に、各設定に対して得られた平均旅行時間を同時型の場合との比で示す．まず、いずれのパターンでも、単方向と双方向系の違いはさほど大きくない（パターン 3 では、両系が完全に同一オフセットを与えるためミクロシミュレーション結果も同一である）．パターン 1 では、 Δ 値に応じて同時型あるいは交互型が良好なことは既知だが、Table 1, Fig. 7 より提案法はそこから若干のずれを与える．得られた統計量データから結果の詳細を見ると、このずれは同時型に対しては有効に働き、交互型では必ずしもそうではない．その理由として、直進の車両走行においても生じる加減速を考慮すると、オフセット値を (1) 式による Δ 値よりやや大きめに設定する方が望ましいと考えられる．進路や道路環境によって発生する加減速や停止に伴って増加する Δ 値は、原理的には実測可能な量であり、提案法にとっては、制御パラメータでは

なく外生的なパラメータである。よって、本シミュレーションでは、より大きな Δ 値を概数で与え、それに伴うオフセット値の変化が平均旅行時間に及ぼす影響を見て、評価するにとどめる。そこで、 $\Delta = 5\pi/8$ 系に対して $\Delta = 6\pi/8$ とした提案法によるオフセット値を適用すると、4例中3例までが交互型よりさらに短い平均旅行時間を与えた。ただし以上はいずれも、オフセット値のずれも含めて、Fig. 8で顕著に示されるほどの大きな差異ではない。結合強度係数を K^2 にとると、それに応じてオフセットのずれは大きくなるが、旅行時間における改善は特に見られない。パターン2では、3対の目標オフセットを満たす同時型あるいは交互型がその逆に比べて良好だが、提案法がさらに勝るのがわかる。パターン3および4においては、 $\Delta = 3\pi/8$ の場合には右周り型および左周り型、 $\Delta = 5\pi/8$ の場合には同時型が最良の結果を示し、提案法がそれに次ぐ（パターン4の $\Delta = 5\pi/8$ では提案法が最良）。これは、ミクロシミュレーションにおいては、右左折を伴う交通流では必ず交差点付近で加減速が生じ、前述と同様に望ましいオフセットが(1)式による Δ 値より大きいためと考えられる。そこでここでも、 $\Delta = 3\pi/8(5\pi/8)$ 系に対して $\Delta = 4\pi/8(6\pi/8)$ とした提案法によるオフセット値を適用したところ、 $\Delta = 3\pi/8$ の系に対して $\Delta = 4\pi/8$ とした場合には、パターン3,4でそれぞれ右周り型、左周り型と同じ結果となった。また、 $\Delta = 5\pi/8$ の系に対して $\Delta = 6\pi/8$ とした場合の結果をTable 2に示す。表中の4例のうち下線で示した3例までが同時型より旅行時間が短縮し最良の結果

Table 2 Average travel times [sec] for Patterns 3 and 4 by the offsets obtained by $\Delta = 6\pi/8$

Basic flow density [car/h]	200	400/300
Pattern 3		
In-phase	422.9	568.5
Uni-direc. by $\Delta = 6\pi/8$	433.9	<u>552.9</u>
Uni-direc. by $\Delta = 5\pi/8$	447.8	572.5
Pattern 4		
In-phase	243.3	279.9
Uni-direc. by $\Delta = 6\pi/8$	<u>234.8</u>	<u>274.1</u>
Uni-direc. by $\Delta = 5\pi/8$	237.2	277.6

果を与えている。以上より、各有向区間に対する適切な Δ 値のもとで提案法により得られるオフセット値系の有効性がわかる。

なお本節のミクロシミュレーションにおいては、Fig. 8とTable 2に示した平均旅行時間以外に、評価指標として平均停車時間や平均遅延時間、平均停車回数、平均待ち台数、最大待ち台数の各統計量を求めた。いずれも性能評価においてはほぼ同様の傾向を示したため、ここでは平均旅行時間データのみを示しそれをもとに議論した。

6. おわりに

本稿では、各交通信号機を位相振動子でモデル化し、2次元格子空間上の振動子結合系の同期現象を用いた、信号機系のオフセット制御を提案した。まず、直交街路網における直進流に対して基本制御式を導入し、それが、一方通行路、交差点での右左折流、進路別現示をもつ信号機、任意の分岐数を持つ交差点などに自然に拡張できることを示した。提案法により得られたオフセットを用いて、個別車両の走行を記述するミクロな交通シミュレーションを行ない、全車両の平均旅行時間を評価指標として典型的な固定オフセット系と比較し、その有効性を確認した。

今後は、相互作用型を検討するとともに、交差点での各方向の流量に応じたスプリット変化の導入や、変動交通流に対する適応的オフセット制御における提案法の有効性などを検討したい。また、本稿で示した進路別現示や任意分岐数へ一般化した制御式を用いるには、スプリットやクリアランス等、本稿のシミュレーションでは直交街路網を想定して単純値に固定した諸パラメータ値の、適切な設定が必要となる。それらの探索も含めて、一般化制御式の有効性を検証したい。

謝辞 交通流シミュレータソフトウェア MELROSE の利用に当たってご協力いただいた三菱電機（株）先端技術総合研究所ならびに（株）創発システム研究所に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 佐佐木, 飯田: 交通工学, オーム社 (1992)
- 2) ミニ特集 都市道路網の交通流制御システム, 計測と制御, 41-3 (2002)
- 3) 織田利彦: 交通信号制御の発展的経緯と今後の展望, システム/制御/情報, 45-5, 240/247 (2001)
- 4) 関山, 中西, 高川, 東, 福田: 信号交通網におけるオフセットパターンの自己組織化, 第13回自律分散システム・シンポジ

Fig. 8 Average travel times for the 4 patterns in Fig. 6. The results for bi- and uni-directional couplings, anti-phase and clockwise/anti-clockwise offsets are shown by the ratios to the results obtained by in-phase offsets.

ウム, 45/50 (2001), 関山, 中西, 高川, 東, 福田: 信号ネットワークの自己組織化制御, 日本ファジィ学会 第10回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, 121/124 (2000)

- 5) 参沢, 木村, 広瀬, 大里: 強化学習型マルチエージェントによる交通信号制御, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J83-D-I-5, 478/486 (2000)
- 6) 越 正毅: 系統交通信号におけるサイクル制御の研究, 土木学会論文報告集, 241, 125/133 (1975)
- 7) 後藤, 駒谷, 福田: 自律型走行モデルによる道路交通シミュレータの開発, 電気学会論文誌, D-166-5, 569/577 (1996)
- 8) 後藤幸夫: 自律型走行モデルによる道路交通シミュレーションとその交通制御問題への応用, 学位論文 (2000)
- 9) Y. Kuramoto: Chemical Oscillations, Waves and Turbulence, Springer-Verlag (1984)
- 10) 杉, 湯浅, 新井: 交通信号網の自律分散型制御, 第1報: グラフ上の反応拡散方程式によるオフセット制御, 第7回創発システムシンポジウム (2001), 杉, 湯浅, 新井: グラフ上の反応拡散方程式による交通信号網の自律分散制御, 第14回自律分散システムシンポジウム, 235/238 (2002)
- 11) S. Kimura, M. Yano and H. Shimizu: A self-organizing model of walking patterns of insects, Biol. Cybern. 69, 183/193 (1993)
- 12) S. Kimura, M. Yano and H. Shimizu: A self-organizing model of walking patterns of insects II, Biol. Cybern. 70, 505/512 (1994)
- 13) K. Tsujita, K. Tsuchiya, A. Onat, S. Aoi and M. Kawakami: Locomotion Control of a Multiped Locomotion Robot with CPG Principles, Proc. of The Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2, 421/426 (2001)
- 14) 藤井, 石黒, 大津, 内川, 青木, P. Eggenberger: 動的再編成ニューラルネットワークによる二脚歩行動作の実現, 第13回自律分散システムシンポジウム, 129/132 (2001)
- 15) 高橋, 横井, 嘉数: 粘菌自己組織化モデルによる分散ロボット制御系第13回自律分散システムシンポジウム, 349/352 (2001)
- 16) 小田島, 湯浅, 羅, 伊藤: 多脚歩行ロボットの消費エネルギーに基づいた創発的歩容生成, 日本ロボット学会誌, 17-8, 1149/1157 (1999)
- 17) 鈴木, 稲垣, 湯浅, 熊谷, 新井: 自律分散型多脚歩行ロボットの耐故障性に関する研究~消費エネルギーバランスに着目した耐故障性アルゴリズム~第14回自律分散システムシンポジウム, 309/314 (2002), 稲垣, 湯浅, 鈴木, 熊谷, 新井: 自律分散型多脚歩行ロボットの歩行パターン生成に関する研究~CPGモデルの構築とハードウェアの開発~第14回自律分散システムシンポジウム, 315/320 (2002)
- 18) 青柳富誌生: 振動子ニューラルネットワークによる連想記憶モデルの解析, 科学研究費重点領域研究「創発的機能形成のシステム理論」研究成果報告書, 181/188 (1999)
- 19) 西山, 土屋, 辻田: 非線形振動子系にもとづく組合せ最適化問題の解法, 第14回自律分散システムシンポジウム, 67/72 (2002)
- 20) 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1087/1096 (2001)

西 川 郁 子 (正会員)

1984年京都大学理学部物理学科卒業, 90年同大学院博士課程単位取得退学. 90年神戸大学大学院自然科学研究科助手, 93年立命館大学理工学部情報工学科助手を経て, 95年同情報学科助教授となり, 現在に至る. 博士(理学). ニューラルネットワーク, 遺伝的アルゴリズムなどの研究に従事.

中 澤 重 人

2001年立命館大学理工学部情報学科卒業. 同年同大学大学院理工学研究科情報システム学専攻博士前期課程に入学し, 在籍中. 知能システムの研究に従事.

喜 多 一 (正会員)

1982年京都大学工学部電気工学科卒業, 87年同大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学. 同年京都大学工学部助手, 97年より東京工業大学総合理工学研究科助教授, 2000年より大学評価・学位授与機構教授となり, 現在に至る. 工学博士. 社会・エネルギーシステム, ニューラルネットワーク, 遺伝アルゴリズムの研究に従事.