

確定的信号制御システムの開発と設計

清水 光* 小林 正明** 藤井 温子*** 川久保 和雄* 新谷 敏朗*

Development and Design of Deterministic Signal Control System

Hikaru SHIMIZU* Masa-aki KOBAYASHI** Haruko FUJII***
Kazuo KAWAKUBO* and Toshio SHINTANI*

ABSTRACT

This paper studies the development and design for deterministic signal control system in urban road networks from the viewpoint of a traffic flow control. The signal control system of the congestion length is described by a nonlinear time-varying discrete dynamic system and synthesized by using the feedback control based on the volume balance at each signalized intersection. The balance control algorithm and network control algorithm in which the three signal control parameters consisting of the cycle length, green split and offset are searched systematically so as to minimize the sum of congestion lengths at signalized intersections are presented. The configuration and the development procedure of the deterministic signal control system are presented based on our studies. From the comparison of congestion lengths and signal control parameters between measurement values and simulation values, it is confirmed that the signal control system and control algorithms work effectively to minimize the congestion lengths at signalized intersections.

キーワード：信号制御システム，バランス制御アルゴリズム，パラメータ最適化，システム開発
Keywords: signal control system, balance control algorithm, parameter optimization, system development

1. はじめに

近年、経済の発展や生活水準の向上、道路の整備、車の技術革新などに伴って、我が国の自動車保有台数は単調に増加の一途をたどってきた。その結果として交通量が増加し、交通渋滞や交通事故、燃料消費、CO₂ 排出量などの増加の一因となっている。

交通流の円滑化と安全化の対策として、道路の整備¹⁾や交差点の改良、交通規制、信号制御²⁻⁷⁾、動的経路誘導⁸⁻¹⁰⁾などが実施されてきた。交通渋滞の主な原因の一つとして交通需要の急激な増加が挙げられ、信号制御システムや動的経路誘導システムによる交通流のオンライン制御が有効であると考えられる。

本稿では、交通需要の時間変動に対応して3つの信号制

御パラメータを統一的に制御し、都市道路網の渋滞長の総和を最小にする確定的信号制御システムの開発と設計について提案する。

現在まで、信号制御システムとして SCOOT や SCAT、MODERATO などが実用化されている。MODERATO をはじめ、我が国におけるパターン選択法は、渋滞や遅れ時間の減少などで一定の効果のあることが確認されている。一方、それらの課題として、3つの信号制御パラメータが個別的に最適化されており、統一性を欠いていること、交通流ダイナミクスの記述が交通流や制御対象の規模などに関して首尾一貫性を欠いていること、などが挙げられる。以上の結果、信号制御パラメータの探索が粗くなり、制御効果を十分上げることができていないものと考えられる。

本稿で提案する信号制御システムは、信号交差点流入路

*情報工学科 **機械システム工学科 ***弓削商船高等専門学校

における交通流ダイナミクスを車線単位、サイクル長単位の交通量収支に基づいて表現する。そのために、渋滞流や非渋滞流、また、単独信号交差点や幹線道路、都市道路網などのネットワーク形状にかかわらず、一貫性を持って記述することができる。

2. 信号制御システム

都市道路網の各信号交差点において車線単位、サイクル長単位で以下の交通量収支が成立する。

$$x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) - x_o(i, j, m, k) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_o(i, j, m, k) = \xi(i, j, m, k) \psi_x(i, j, m, k) \\ xe(i, j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 i と j は信号交差点の位置、 m は信号交差点への車の流入路 ($m=1$ は東行き、 $m=2$ は南行き、 $m=3$ は北行き、 $m=4$ は西行き) をそれぞれ表す。 $k=k/\Delta T$ は時刻を、 $x_e(i, j, m, k)$ 、 $x_i(i, j, m, k)$ 、 $x_o(i, j, m, k)$ は超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量をそれぞれ表す。ここで、超過流入交通量は流入路の黄信号終了時における待ち車列台数を表す。渋滞の発生、継続、消滅のメカニズムは(1)式に基づいて車線単位で定量的に記述される。(2)式の $\psi_x(i, j, m, k)$ は各流入路の交通処理量で交通容量に青信号スプリットを乗じて求められ、 $\xi(i, j, m, k)$ はある交通流のもとで $x_e(i, j, m, k)$ を $\psi_x(i, j, m, k)$ で除した比率で捌け率と呼ぶ。捌け交通量のある交通流のもとで3つの信号制御パラメータ(サイクル長、青信号スプリット、オフセット)で制御できると仮定して、制御入力 $u(i, j, m, k)$ で置き換えると、渋滞長の信号制御システムは単独信号交差点だけでなく幹線道路や都市道路網の全ての信号交差点において、次式の非線形ダイナミックシステムで一貫性をもって記述される。

$$\begin{cases} x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) - u(i, j, m, k) \\ y_c(i, j, m, k) = l_m(i, j, m, k) \cdot x_e(i, j, m, k) \end{cases} \quad (3)$$

渋滞長 $y_c(i, j, m, k)$ は状態変数 $x_e(i, j, m, k)$ に変換係数 $l_m(i, j, m, k)$ を乗じて求められる。ここで、変換係数 $l_m(i, j, m, k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当する。制御入力 $u(i, j, m, k)$ は(2)式によって決定され飽和特性を有する。

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l_r(i, j, m, k)$ を、制御入力に3つの信号制御パラメータを、出力に渋滞長をそれぞれ対応させる。その時、各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システムが図1で構成される。

制御システムにおいて制御偏差 $e(i, j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(i, j, m, k) \triangleq l_r(i, j, m, k) - y_c(i, j, m, k) \quad (4)$$

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般に一様ではなく、飽和度が最大となる流入路を優先的に制御する考えより、以下の関数 $g(i, j, m, k)$ を定義する。

$$g(i, j, m, k) \triangleq \begin{cases} 0 & e(i, j, m, k) \geq 0 \\ |e(i, j, m, k)| & e(i, j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

2方向交通都市道路網の渋滞長制御システムの目的は、次式の評価関数 $J_n(k)$ を最小にする制御入力 $u(i, j, m, k)$ のパラメータを統一的に求めることである。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad (6)$$

(3)式で記述される信号制御システムは、渋滞流や非渋滞流にかかわらず成立する交通量収支に基づいており、昼間と夜間を問わず適用することができる。

3. 信号制御法

3つの信号制御パラメータを統一的に制御して信号交差点の流入路における渋滞を解消することが信号制御システムの目的である。ここでは、単独信号交差点や幹線道路をはじめ、都市道路網における信号制御法についてパラメータ最適化の観点から考察する。

3.1 単独信号交差点

都市道路網の最も基本的な構成単位である単独信号交差点における信号制御法としてバランス制御アルゴリズムを提案する。ここで、バランス制御アルゴリズムとは、信号交差点において互いに交差する流入路の制御偏差の最大値を等しくし、かつ、評価関数 $J_s(k)$ を最小にする2つの信号制御パラメータ(サイクル長と青信号スプリット)を統一的、逐次的に探索する計算法と定義する。

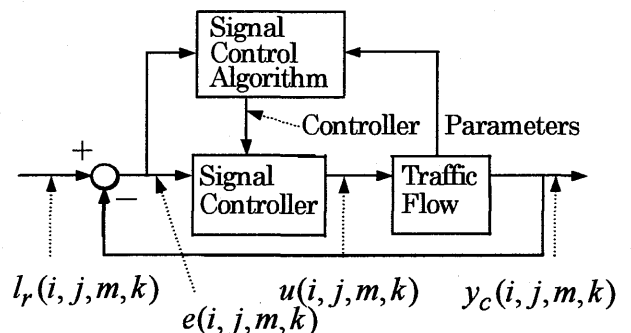


図1 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

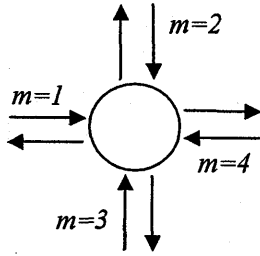


図2 単独信号交差点の交通流

$$J_s(k) = \sum_{m=1}^4 g(m, k) \quad (7)$$

バランス制御アルゴリズムの計算手順を示すと以下のようになる。

- Step 1. 各信号交差点における現示と信号制御パラメータ（サイクル長、青信号スプリット）の初期値や上下限值、きざみ幅、ならびに比率 $\xi(m, k)$ や、変換係数 $l_m(m, k)$ 、閾値 ε などを設定する。 $m=1$ において以下の計算を行う。
- Step 2. 時間区間 ΔT をサイクル長 $c_y^{(n)}(m, k)$ に等しく設定し、流入交通量 $x_i^{(n)}(m, k)$ を入力する。ここで、上付添字⁽ⁿ⁾ は繰り返し計算回数を表す。
- Step 3. 渋滞時の流入交通量を車線単位で再計算する。

$$x_i^{(n)}(m, k) = x_i^{(n)}(m, k) + x_e(m, k-1) \quad (8)$$

- Step 4. 信号交差点の各流入路の交通処理量 $\Psi_x^{(n)}(m, k)$ を、交通容量を用いて車線別に算定する。

$$\begin{cases} \Psi_{xl}^{(n)}(m, k) = r_{gl}^{(n)}(m, k) \cdot C_{xl}(m, k) \\ \Psi_{xs}^{(n)}(m, k) = r_{gs}^{(n)}(m, k) \cdot C_{xs}(m, k) \\ \Psi_{xr}^{(n)}(m, k) = r_{gr}^{(n)}(m, k) \cdot C_{xr}(m, k) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 $\Psi_{xl}(m, k)$ 、 $\Psi_{xs}(m, k)$ 、 $\Psi_{xr}(m, k)$ はそれぞれ左折、直進、右折車線の交通処理量を表し、 $C_{xl}(m, k)$ 、 $C_{xs}(m, k)$ 、 $C_{xr}(m, k)$ は各車線の交通容量を、また、 $r_{gl}^{(n)}(m, k)$ 、 $r_{gs}^{(n)}(m, k)$ 、 $r_{gr}^{(n)}(m, k)$ は各車線の青信号スプリットをそれぞれ表す。

- Step 5. 各車線の青時間をサイクル長と青信号スプリットの積より算定する。
- Step 6. 超過流入交通量 $x_e^{(n)}(m, k)$ を車線単位の交通量収支に基づいて算定する。

$$x_e^{(n)}(m, k) = x_i^{(n)}(m, k) \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_o^{(n)}(m, k) = \xi(m, k) \cdot \Psi_x^{(n)}(m, k) - x_o^{(n)}(m, k) \\ x_e^{(n)}(m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

- Step 7. 渋滞長 $y_e^{(n)}(m, k)$ を変換係数 $l_m(m, k)$ を用いて車線単位で算定する。

$$y_e^{(n)}(m, k) = l_m(m, k) \cdot x_e^{(n)}(m, k) \quad (12)$$

- Step 8. 単独信号交差点における信号制御パラメータの関係式に基づいて、全流入路の青信号スプリットや青時間などを車線単位で算定する。

- Step 9. もし、次の制御指標

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(\kappa)}(1, k)|, |e^{(\omega)}(2, k)|, \\ |e^{(\mu)}(3, k)|, |e^{(\lambda)}(4, k)|\} \leq \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

を満足すれば、得られたサイクル長と青信号スプリットを最適値とし、 $k=k+1$ において Step2 へ帰る。ここで上付添字 (κ) 、 (ω) 、 (μ) 、 (λ) は各流入路に対する繰り返し計算回数を表す。

- Step 10. 一方、次の制御指標

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(\kappa)}(1, k)|, |e^{(\omega)}(2, k)|, \\ |e^{(\mu)}(3, k)|, |e^{(\lambda)}(4, k)|\} > \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

が成立すれば、制御偏差が最大となった流入路の青信号スプリットをきざみ幅 $\Delta r_{gl}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gs}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gr}(j, m)$ だけそれぞれ微小増加させる。

$$\begin{cases} r_{gl}^{(n+1)}(m, k) = r_{gl}^{(n)}(m, k) + \Delta r_{gl}(m) \\ r_{gs}^{(n+1)}(m, k) = r_{gs}^{(n)}(m, k) + \Delta r_{gs}(m) \\ r_{gr}^{(n+1)}(m, k) = r_{gr}^{(n)}(m, k) + \Delta r_{gr}(m) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、すべての流入路において直進交通が主流で $r_{gs}^{(n+1)}(m, k) \geq r_{gl}^{(n+1)}(m, k)$ 、 $r_{gr}^{(n+1)}(m, k) \geq r_{gs}^{(n+1)}(m, k)$ なる関係を仮定した。もし、 $r_{gs}^{(n+1)}(m, k) > r_{gs}^{\max}$ が成立すれば Step11 へ進み、 $r_{gl}^{(n+1)}(m, k) \leq r_{gs}^{\max}$ が成立する場合は Step4 へ帰る。ここで r_{gs}^{\max} は直進青信号スプリットの上限值を表す。

- Step 11. サイクル長が次式によってきざみ幅 $\Delta c_y(j, m)$ だけ微小増加される

$$c_y^{(n+1)}(m, k) = c_y^{(n)}(m, k) + \Delta c_y(m) \quad (16)$$

もし、 $c_y^{(n+1)}(m, k) > c_{y\max}$ が成立すれば $k=k+1$ において Step 2 へ帰り、 $c_y^{(n+1)}(m, k) \leq c_{y\max}$ が成立する場合は Step 2 へ帰る。ここで、 $c_{y\max}$ はサイクル長の上限值を表す。

このバランス制御アルゴリズムは、初期時刻 $k=1$ から最

終時刻 $k=k_f$ まで逐次実行される。この信号制御アルゴリズムでは、サイクル長と青信号スプリットの初期値は下限値より出発し、式(13)の制御指標が満足されるまで式(15)と式(16)によって修正される。

3.2 幹線道路

単独信号交差点がリンクで直列に接続された図3の幹線道路における信号制御法は、単独信号交差点におけるバランス制御アルゴリズムをオフセットに関して拡張することにより記述される。バランス制御アルゴリズムでは、信号交差点において互いに交差する流入路の制御偏差の最大値を等しくし、かつ、評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように3つの信号制御パラメータを統一的、逐次的に探索する。

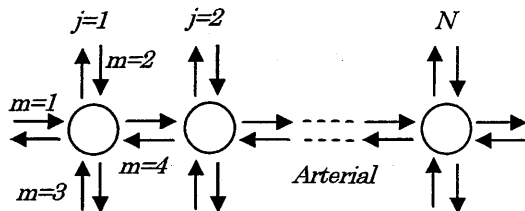
$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j, m, k) \quad (17)$$

- Step 1. 各信号交差点における現示と信号制御パラメータ（サイクル長、青信号スプリット）の初期値や上下限值、きざみ幅、ならびに比率 $\xi(j, m, k)$ や、変換係数 $l_m(j, m, k)$ 、閾値 ε などを設定する。 $m=1$ とおいて以下の計算を行う。
- Step 2. 時間区間 ΔT をサイクル長 $c_y^{(j, m, k)}$ に等しく設定し、流入交通量 $x_i^{(j, m, k)}$ を入力する。
- Step 3. 渋滞時の流入交通量を車線単位で再計算する。

$$x_i^{(n)}(j, m, k) = x_i^{(n)}(j, m, k) + x_e(j, m, k-1) \quad (18)$$

- Step 4. 信号交差点の各流入路の交通処理量 $\Psi_x^{(j, m, k)}$ を、交通容量を用いて車線別に算定する。

$$\begin{cases} \Psi_{xl}^{(n)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) \mathbf{C}_{xl}(j, m, k) \\ \Psi_{xs}^{(n)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) \mathbf{C}_{xs}(j, m, k) \\ \Psi_{xr}^{(n)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) \mathbf{C}_{xr}(j, m, k) \end{cases} \quad (19)$$



○ : Signalized intersection

図3 幹線道路の交通流

ここで、 $\Psi_{xl}(j, m, k)$ 、 $\Psi_{xs}(j, m, k)$ 、 $\Psi_{xr}(j, m, k)$ はそれぞれ左折、直進、右折車線の交通処理量を表し、

$C_{xl}(j, m, k)$ 、 $C_{xs}(j, m, k)$ 、 $C_{xr}(j, m, k)$ は各車線の交通容量を、また、 $r_{gl}^{(j, m, k)}$ 、 $r_{gs}^{(j, m, k)}$ 、 $r_{gr}^{(j, m, k)}$ は各車線の青信号スプリットをそれぞれ表す。

- Step 5. 各車線の青時間をサイクル長と青信号スプリットの積より算定する。
- Step 6. 超過流入交通量 $x_e^{(j, m, k)}$ を車線単位の交通量収支に基づいて算定する。

$$x_e^{(n)}(j, m, k) = x_i^{(n)}(j, m, k) - x_o^{(n)}(j, m, k) \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_o^{(n)}(j, m, k) = \xi(j, m, k) \cdot \psi_x^{(n)}(j, m, k) \\ x_e^{(n)}(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

- Step 7. 渋滞長 $y_c^{(j, m, k)}$ を変換係数 $l_m(j, m, k)$ を用いて車線単位で算定する。

$$y_c^{(n)}(j, m, k) = l_m(j, m, k) \cdot x_e^{(n)}(j, m, k) \quad (22)$$

- Step 8. 各信号交差点における信号制御パラメータの関係式に基づいて、全流入路の青信号スプリットや青時間などを車線単位で算定する。

- Step 9. もし、次の制御指標

$$\max\{|e^{(k)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, |e^{(\mu)}(j, 3, k)|, |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} \leq \varepsilon \quad (23)$$

$\varepsilon > 0$

を満足すれば、得られたサイクル長と青信号スプリットを最適値として Step12 へ進む。

- Step 10. 一方、次の制御指標

$$\max\{|e^{(k)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, |e^{(\mu)}(j, 3, k)|, |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} > \varepsilon \quad (24)$$

$\varepsilon > 0$

が成立すれば、制御偏差が最大となった流入路の青信号スプリットをきざみ幅 $\Delta r_{gl}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gs}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gr}(j, m)$ だけそれぞれ微小増加させる。

$$\begin{cases} r_{gl}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gl}(j, m) \\ r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gs}(j, m) \\ r_{gr}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gr}(j, m) \end{cases} \quad (25)$$

ここで、すべての流入路において直進交通が主流で $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) \geq r_{gl}^{(n+1)}(j, m, k)$ 、 $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) \geq r_{gr}^{(n+1)}(j, m, k)$ なる関係を仮定した。もし、 $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) > r_{gs, \max}$ が

成立すれば Step11 へ進み、 $r_{gs}^{(n+1)}(j,m,k) \leq r_{gs,max}$ が成立する場合は Step4 へ帰る。ここで $r_{gs,max}$ は直進青信号スプリットの上限值を表す。

Step 11. サイクル長が次式によってさきみ幅 $\Delta c_y(j,m)$ だけ微小増加される。

$$c_y^{(n+1)}(j,m,k) = c_y^{(n)}(j,m,k) + \Delta c_y(j,m) \quad (26)$$

もし、 $c_y^{(n+1)}(j,m,k) > c_{y,max}$ が成立すれば Step 12 へ進み、 $c_y^{(n+1)}(j,m,k) \leq c_{y,max}$ が成立する場合は Step 2 へ帰る。ここで、 $c_{y,max}$ はサイクル長の上限值を表す。

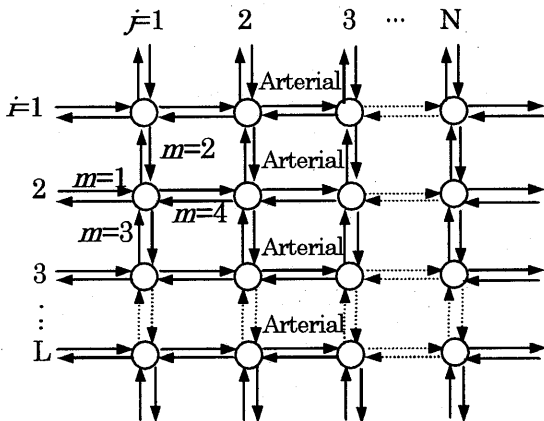
Step 12. 探索されたサイクル長と青信号スプリットの最適値を用いて、幹線道路の連続通過帯幅を最大にする平等オフセットが Fieser の方法¹¹⁾により探索される。

このバランス制御アルゴリズムは、初期時刻 $k=1$ から最終時刻 $k=k_f$ まで、また、 $j=1$ から $j=N$ までの全信号交差点について逐次実行される。この信号制御アルゴリズムでは、サイクル長と青信号スプリットの初期値は下限値より出発し、式(23)の制御指標が満足されるまで式(25)と式(26)によって修正される。また、オフセット制御の関係からサイクル長は N 地点の信号交差点における最大値が共通に設定され、各信号交差点の青信号スプリットは改めて再計算される。

3.3 都市道路網

単独信号交差点がリンクで格子状に接続された図4の都市道路網における信号制御法は、幹線道路におけるバランス制御アルゴリズムを、幹線道路に交差する方向のオフセットに関して拡張することにより記述される。ここでは、都市道路網における信号制御アルゴリズムをネットワーク制御アルゴリズムと呼ぶことにする。

ネットワーク制御アルゴリズムは、幹線道路の渋滞長制



○ : Signalized intersection

図4 都市道路網の交通流

御でその有効性が確認されたバランス制御アルゴリズムを用い、式(6)で表される2方向交通都市道路網の評価関数を最小にする3つの信号制御パラメータを段階的に、かつ統一的に探索する。

Step 1. 各幹線道路毎に、式(27)で表される幹線道路の評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように、3つの信号制御パラメータをバランス制御アルゴリズムを用いて探索する。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j,m,k) \quad i=1,2,\dots,L \quad (27)$$

Step 2. オフセット制御の観点から、Step 1 で探索されたサイクル長の最大値を都市道路網内における全ての信号交差点のサイクル長として共通に設定し、式(27)の評価関数 $J_a(k)$ を最小にする残り2つの信号制御パラメータをバランス制御アルゴリズムを用いて再度探索する。

Step 3. 隣接して並行する2つの幹線道路間を接続するリンクのオフセット値 $i_{off}^*(i,j,m,k)$ を、その閉路に関する制約条件のもとで式(6)の評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように算定する。

i) 最初に、2つの並行する幹線道路間を接続するリンク間において指標 $x'_i(i,j,m,k) / \Psi_x(i,j,m,k)$ が最大となる信号交差点間のオフセットを Fieser の方法により算定する。ここで、 $x'_i(i,j,m,k)$ は次式で表される渋滞時の流入交通量を表す。

$$x'_i(i,j,m,k) = x_e(i,j,m,k-1) + x_i(i,j,m,k) \quad (28)$$

ii) 次に、オフセットの閉路に関する制約条件のもとで残りの信号交差点間のオフセットを算定する。

以上の制御アルゴリズムを初期時刻 $k=1$ から最終時刻 $k=k_f$ まで逐次繰り返す。

ネットワーク制御アルゴリズムの各 Step は、図5と表1に表されるように階層構造になっており、 $C_y(i,j,m,k), r_g(i,j,m,k), t_{off}(i,j,m,k), t_{off}^*(i,j,m,k)$ の順に値が求められる。すなわち、最初に Step 1 で全ての信号交差点に共通に設定されるサイクル長 $c_y(i,j,m,k)$ が探索される。つぎに、Step 2 で幹線道路上の信号交差点の青信号スプリット $r_g(i,j,m,k)$ とオフセット $t_{off}(i,j,m,k)$ が、評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように探索される。最後に、Step 3 で幹線道路間を接続するリンクのオフセット $t_{off}^*(i,j,m,k)$ が、その閉路に関する制約条件のもとで評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように求められる。

4. 信号制御システムの開発

4.1 システム構成

都市道路網の信号制御システムは、図 6 に示すように車両感知器よりリンク走行速度や待ち車列長、交通量をオンライン入力し、信号制御アルゴリズムを用いて3つの信号制御パラメータの最適値を探索し、それらを用いて信号機の現示をリアルタイムで制御する。また、主要信号交差点の渋滞長を可変表示板に出力し、一般のドライバーに供する。

4.2 システム開発

都市道路網の交通流の円滑化と安全化を交通流ダイナミクスのデジタル制御の観点から実現する確定的信号制御システムの開発は、都市道路網の道路条件や交通条件が与えられていると仮定すると、図 7 に示される手順で行われる。

道路解析では、交通容量解析や信号制御に必要な都市道路網の各リンクのリンク長や車線数、車線幅員、側方余裕、設計速度、交通規制などをはじめ、各信号交差点の交差形状や車線構成などについて調査する。交通解析では、交通量収支や交通容量を解析するために必要な信号交差点の各

流入路における流入交通量や待ち車列台数、待ち車列長、大型車混入率、路線バスの運行頻度、捌け交通量、左折率などについて調査する。交通容量解析では、必要な変数や定数の値を求める。

信号制御システムの開発では、交通流ダイナミックシステムの表現や制御システムの構成、評価関数などについて決定する。信号制御アルゴリズムの開発では、都市道路網の各信号交差点における渋滞長の総和を最小にする3つの信号制御パラメータを統一的に探索する計算手順を求める。シミュレーションでは、対象とする道路網の道路条件や交

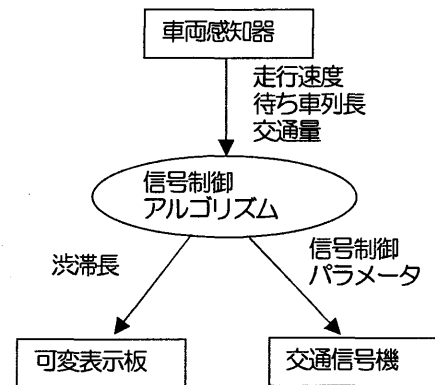


図 6 信号制御システムの構成

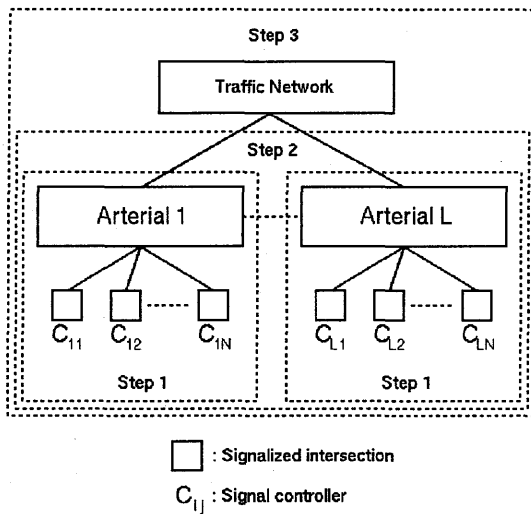


図 5 ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造

表 1 ネットワーク制御アルゴリズムの評価関数

Step	Performance criteria
Step 1	Minimize $J_a(k)$ C_y, I_g, t_{off}
Step 2	Minimize $J_a(k)$ I_g, t_{off}
Step 3	Minimize $J_n(k)$ t_{off}^*

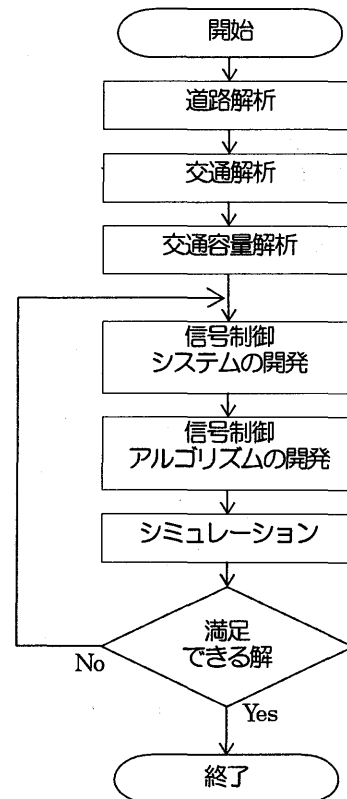


図 7 信号制御システムの開発手順

通条件をはじめ、信号制御パラメータの上下限值やきざみ幅、初期値などを入力し、シミュレーションプログラムを用いて3つの信号制御パラメータの最適値や各流入路の渋滞長などを求める。

最後に、求められた解が妥当で満足できるものであればシミュレーションは終了し、そうでなければ信号制御システムの開発に戻って再検討する。

4.3 開発事例

図7で示される開発手順に従って、福山市内道路網における渋滞長の信号制御システムを開発した事例について紹介する。

12の主要信号交差点から構成される福山市内道路網の渋滞長制御のシミュレーションは、信号制御システムに基づき、ネットワーク制御アルゴリズムを用いて行った。福山市内道路網の道路条件や交通条件、信号制御条件の調査データをシミュレーションの入力データとして使用した。流入交通量や捌け交通量、超過流入交通量などは車線単位、サイクル長単位で測定した。このシミュレーションでは、入力データが同一であれば同一のシミュレーション結果が得られる。また、単独信号交差点において渋滞長が実用的な精度で再現できることを確認している。

3つの信号制御パラメータをネットワーク制御アルゴリズムにより流入交通量や待ち車列台数、リンク走行速度などの時間変動に対応して広範囲に、きめ細かく、評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように統一的に制御した結果、現実には多くの信号交差点で朝夕のラッシュ時に渋滞が発生しているにも関わらず、シミュレーションでは全ての信号交差点の全流入路の渋滞長を0mに制御することができた。このことより、本稿で提案した信号制御システムと信号制御アルゴリズムは、現在使用されている信号制御法であるパターン選択法に比べて有効に働くことを確認した。さらに、ここで提案した信号制御システムと信号制御アルゴリズムは、交通流や制御対象に関わらず、すなわち、渋滞流や非渋滞流、また、単独信号交差点や幹線道路、都市道路網において一貫性をもって適用でき、有効に機能することを確認している⁹⁾。

5. まとめ

本稿では、交通量や待ち車列長、リンク走行速度などの時間変動に対応して3つの信号制御パラメータを統一的に制御し、各信号交差点における渋滞長の総和を最小にする確定的信号制御システムの開発と設計について提案した。

主な研究内容は以下のようにまとめられる。

(i)信号交差点の各流入路において車線単位、サイクル長単位で成立する交通量収支に基づいて交通流ダイナミクスを記述した。

(ii)渋滞長の信号制御システムは、超過流入交通量を状態

変数に選び、離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述した。

(iii)単独信号交差点をはじめ、幹線道路、都市道路網において一貫性を持って適用できる信号制御システムと信号制御アルゴリズムを提案した。

(iv)道路解析からシミュレーションに至る信号制御システムの開発手順を示し、その有効性を福山市内道路網において確認した。

本稿で提案した信号制御システムを実用化するに当たって、交通量や待ち車列長、リンク走行速度をオンライン計測する車両感知器の設置場所について具体的に調査する必要があるものと思われる。

参考文献

- 1) 鈴木道雄編著：新体系土木工学 62 道路(II)—計画と幾何設計一、技報堂出版(1980).
- 2) P.B.Hunt, D.I.Robertson, R.D.Bretherton and R.I.Winton, SCOOT-A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Laboratory Report 1014(1981).
- 3) E.J.Davison and U.Ozguner, Decentralized Control of Traffic Networks, IEEE Trans., AC-28, pp.677-688(1983).
- 4) K.Hayashi and M.Sugimoto, Signal Control System (MODERATO) in JAPAN, Proc. of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.988-992(1999).
- 5) 宇佐美、榊原：道路網の信号制御システム、計測と制御、41-3, pp.205-210(2002).
- 6) 清水、真柴、傍田、小林：幹線道路の渋滞長制御、情報処理学会論文誌、42-7, pp.1876-1884(2001).
- 7) 石川、清水、傍田、小林：交通ネットワークの渋滞長制御、情報処理学会論文誌、45-4, pp.1154-1162(2004).
- 8) 小林、清水：交通流の円滑性の解析、計測と制御、41-3, pp.181-186(2002).
- 9) H.Shimizu, M.Kobayashi, H.Fujii and S.Katagiri, An Analysis of Mean Link Travel Time in Urban Road Networks and Its Applications, Proc. of SICE Annual Conference 2007, pp.1438-1443(2007).
- 10) 天目、山口：道路網の動的経路誘導システム、計測と制御、41-3, pp.211-216(2002).
- 11) 堀克郎：交通信号、技術書院、pp.56-67(1966).