

交通ネットワークの信号制御に関するシステム理論的 考察

清水 光^{*} 藤井 温子^{**} 小林 正明^{***}

^{*}福山大学 工学部 情報処理工学科
^{***}福山大学 工学部 機械システム工学科
〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵
^{**}弓削商船高等専門学校 情報工学科
〒794-2593 愛媛県越智郡弓削町下弓削1000番地
E-mail: *shimizu@fuip.fukuyama-u.ac.jp
**haruko@info.yuge.ac.jp
***kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、各信号交差点における渋滞長の信号制御システムを交通量収支に基づいて離散形時変非線形ダイナミックシステムで表現し、フィードバック制御を用いて構成する。また、渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように、3つの信号制御パラメータを統一的に探索する信号制御アルゴリズムについて提案する。最後に、広島県福山市内交通ネットワークにおいて、提案した渋滞長の信号制御システムと信号制御アルゴリズムのシミュレーション結果について考察する。

キーワード：交通量収支、ダイナミックシステム、フィードバック制御、信号制御アルゴリズム、

A System-Theoretic Study of the Signal Control in Urban Road Networks

Hikaru Shimizu^{*} Haruko Fujii^{**} and Msa-aki Kobayashi^{***}

^{*}Department of Information Processing Engineering
^{***}Department of Mechanical System Engineering
Faculty of Engineering, Fukuyama University
1 Gakuen-cho, Fukuyama-shi, 729-0292, Japan
^{**}Department of Information Science and Technology
Yuge National College of Maritime Technology
1000 Yuge-cho, Ochi-gun, Ehime-ken, 794-2593, Japan
E-mail: *shimizu@fuip.fukuyama-u.ac.jp
**haruko@info.yuge.ac.jp
***kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

Abstract This paper studies signal control methods which control congestion lengths systematically on two-way traffic arterials and in two-way traffic networks. The signal control system of the congestion length is described by a nonlinear time-varying discrete dynamic system and synthesized by using feedback control.

Keywords: volume balance, dynamic system, feedback control, signal control algorithm

1. はじめに

近年、我が国の自動車保有台数は図1に示すようにほぼ直線的に増加してきた⁹⁾。この原因として、経済の発展、生活水準の向上、車の技術革新、道路の整備、女性ドライバーの増加などが挙げられる。この結果、交通量が増加し、都市の主要幹線道路では朝夕のラッシュ時を中心に交通渋滞が日常的に発生している。交通渋滞は旅行時間や燃料消費の増加、環境汚染や騒音を招き、社会的マイナス要因となっている。

交通渋滞を解消する対策として、道路の整備や交差点の改良、交通規制、信号制御、動的経路誘導、交通需要管理などが挙げられる。これらの中で、信号制御システムは幹線道路や都市道路網の渋滞制御に有効な1つのシステムである。信号制御システムでは、サイクル長や青信号スプリット、オフセットから成る3つの信号制御パラメータが、信号交差点の流入交通量や待ち車列台数の時間変動に対応してオンラインで制御される。

3つの信号制御パラメータは以下のように定義される²⁾。サイクル長は信号表示によって与えられる現示が一巡する間の所要時間。青信号スプリットはサイクル長に対する青時間の比率。また、オフセットは基準時点から各信号機の青信号開始時点のズレを絶対オフセット、隣接信号機間の青信号開始時点のズレを相対オフセットという。

次に述べるような信号制御法が交通ネットワークの渋滞を制御するために提出された。青信号スプリットは、信号交差点の各流入路の飽和度比³⁾⁴⁾や負荷比⁶⁾⁷⁾に基づいて遅れ時間を最小化する値が計算された。また、理想的に仮定された一方向交通ネットワークの各流入路の待ち車列長をバランス化する

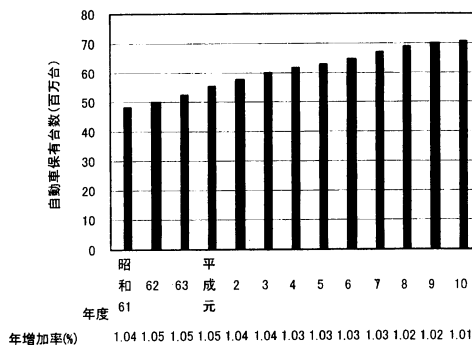


図1 自動車保有台数の増加

青時間が分散コントローラを用いて求められた⁸⁾。サイクル長は、遅れ時間を最小化するように Webster の式⁹⁾を用いて算定された⁵⁾⁶⁾¹⁰⁾。オフセットは、リンクの遅れと停止台数の線形結合で定義される評価関数の最小化より³⁾、また、上りと下りの交通量とサイクル長に基づいて最良なパターン⁶⁾がそれぞれ求められた。

上記の信号制御法では、3つの信号制御パラメータが各評価関数を最小化するように個別に探索されている。幹線道路や都市道路網では、一般に朝夕のラッシュ時に信号交差点の流入交通量が急激に増加するので、3つの信号制御パラメータは系統的に探索されることが望ましいと考えられる。

本稿では、交通需要のサイクル長単位の時間変動に対応して、幹線道路と交通ネットワークの渋滞長をオンラインで制御する信号制御システムと信号制御アルゴリズムについて提案する。最初に、信号交差点の流入路の各車線単位で成立する交通量収支に基づいて、渋滞のメカニズムを定量的に明らかにする。つぎに、捌け交通量の算定に必要な交通処理量について解析する。各信号交差点における渋滞長の信号制御システムを交通量収支に基づいて離散形時非線形ダイナミックシステムで表現し、フィードバック制御を用いて構成する。また、渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように、3つの信号制御パラメータを統一的に探索する信号制御アルゴリズムについて提案する。最後に、広島県福山市内交通ネットワークにおいて、提案した渋滞長の信号制御システムと信号制御アルゴリズムのシミュレーション結果について考察する。

2. 渋滞の解析

2.1 交通量収支

信号交差点における待ち車列の形成原理が到着流率（単位時間あたりの交通需要量）と飽和交通流率（台/青1時間）および各信号時間を用いて考察され、与えられた交通条件において待ち車列の消滅時間、遅れ時間などが解析されている¹¹⁾¹²⁾。

交通ネットワークの信号交差点の各車線におけるサイクル長単位の交通量の変動を考慮すると、時間単位 ΔT （サイクル長単位に等しい）で交通量収支が成立し、以下のように記述される。

$$x_o(k) = x_c(k-1) + x_i(k) - x_o(k) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_o(k) = \xi(k)c_x(k) \\ x_c(k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $k=k\Delta T$ ($k=1,2,\dots,k_j$) は時刻を表し、 $x_e(k)$, $x_i(k)$, $x_o(k)$ はそれぞれ超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量を表す。また、 $c_i(k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(k)$ はある交通量のもとで $x_o(k)$ を $c_i(k)$ で除した比率を表す。渋滞長制御で基本的な役割を果たす渋滞メカニズムは、(1)式の交通量収支に基づいて定量的に記述される。

i) 各信号交差点における渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が零より大きくなるとき発生する。すなわち、

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &= 0 \quad \text{and} \\ x_i(k) &> x_o(k) \end{aligned} \quad (3)$$

ii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が零以下になるときに消滅する。すなわち、

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &> 0 \quad \text{and} \\ x_e(k+1) + x_i(k) &\leq x_o(k) \end{aligned} \quad (4)$$

iii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が正值に保つ間継続する。すなわち

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &> 0 \quad \text{and} \\ x_e(k+1) + x_i(k) &> x_o(k) \end{aligned} \quad (5)$$

上式で流入交通量 $x_i(k)$ が与えられると仮定すると、

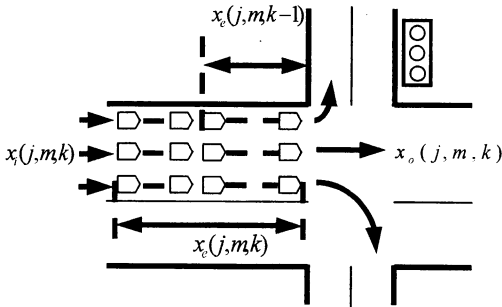
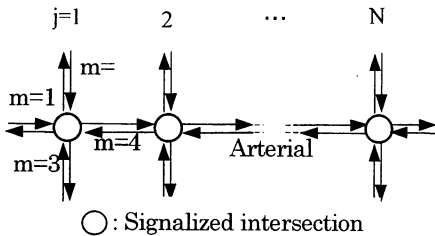


図2 各流入路の交通量収支



○: Signalized intersection

図3 二方向交通幹線道路の交通流

信号交差点の渋滞制御は(4)式の条件を満足するように捌け交通量を制御する問題に帰着させることができる。

2.2 交通処理量

信号交差点の交通処理量は、実際の道路、交通及び信号制御条件のもとで、与えられた一定時間内に、車線または車道のある断面もしくは一様な区間を通過することが期待できる車両の最大数と定義される。信号交差点の各流入路の交通容量は、車線別に以下のように解析される。

$$c_{xl}(i, j, m, k) = s_l n_l(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \quad (6)$$

$$c_{xs}(i, j, m, k) = s_s n_s(i, j, m) \cdot r_s(i, j, m, k) \quad (7)$$

$$c_{xsl}(i, j, m, k) = s_s n_{sl}(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_s(i, j, m, k) \quad (8)$$

$$c_{xr}(i, j, m, k) = s_r n_r(i, j, m) \cdot r_r(i, j, m, k) \quad (9)$$

$c_{xl}(i, j, m, k)$, $c_{xs}(i, j, m, k)$, $c_{xsl}(i, j, m, k)$, $c_{xr}(i, j, m, k)$ は左折、直進、直進・左折、右折の各車線の交通容量を表す。つぎに、 $r_l(i, j, m, k)$, $r_s(i, j, m, k)$, $r_r(i, j, m, k)$ は大型車混入率、バス運行頻度、左折率に関する補正率を表す。 s_l , s_s , s_r は左折、直進、右折車線の飽和交通量を表し、 $n_l(i, j, m, k)$, $n_s(i, j, m, k)$, $n_{sl}(i, j, m, k)$, $n_r(i, j, m, k)$ は各車線数を表す。以上の各車線の交通容量に青信号スプリットをかけて信号交差点の各流入路に対する交通処理量が求まる。各流入路の交通処理量は或る交通条件のもとで車線数と青信号スプリットに比例する。

3. 渋滞長制御システム

3.1 幹線道路

二方向交通幹線道路における渋滞長の信号制御システムが構成される。幹線道路の各信号交差点における交通量収支は次式で記述される (図2参照)。

$$\begin{aligned} x_e(j, m, k) &= x_e(j, m, k-1) + x_i(j, m, k) \\ &\quad - x_o(j, m, k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_o(j, m, k) = \xi(j, m, k) c_i(j, m, k) \\ x_e(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

ここで、図3に示されるように j は信号交差点の位置、 m は車の流入路をそれぞれ表す。各信号交差点の交通量収支において以下のことが仮定される。流入交通量 $x_i(j, m, k)$ は車両感知器により時々刻々測定

される。捌け交通量 $x_o(j, m, k)$ は3つの信号制御パラメータによって制御される。

$$x_o(j, m, k) = f[c_y(j, m, k), r_g(j, m, k), t_{off}(j, m, k)] \quad (12)$$

ここで、 $c_y(j, m, k)$, $r_g(j, m, k)$, $t_{off}(j, m, k)$ はそれぞれサイクル長、青信号スプリット、オフセットを表す。制御入力 $u(j, m, k)$ を次式で定義する。

$$u(j, m, k) = f[c_y(j, m, k), r_g(j, m, k), t_{off}(j, m, k)] \quad (13)$$

制御入力 $u(j, m, k)$ は式(11)によって決定され、図4に示されるように飽和特性を有する。以上より、渋滞長の信号制御システムは次式の離散形時変非線形ダイナミックシステムで表される。

$$\begin{cases} x_e(j, m, k) = x_e(j, m, k-1) + x_r(j, m, k) - u(i, j, m, k) \\ y_c(j, m, k) = l_m(j, m, k) \cdot x_e(j, m, k) \end{cases} \quad (14)$$

渋滞長 $y_c(j, m, k)$ は状態変数 $x_e(j, m, k)$ に変換係数 $l_m(j, m, k)$ を乗じて求められる。なお、変換係数 $l_m(j, m, k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当する。

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l_r(j, m, k)$ を、制御入力に3つの信号制御パラメータ

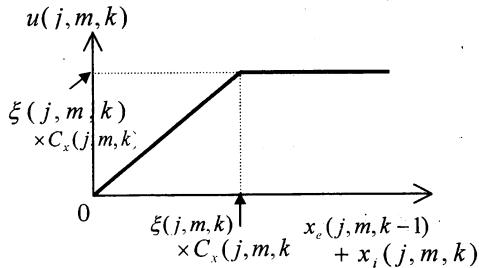


図4 制御入力特性

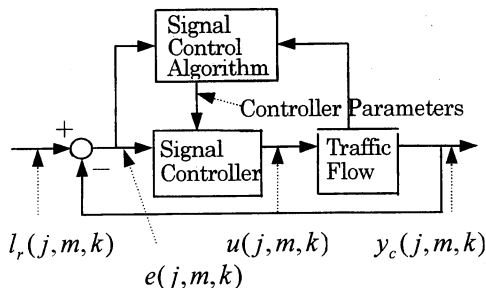
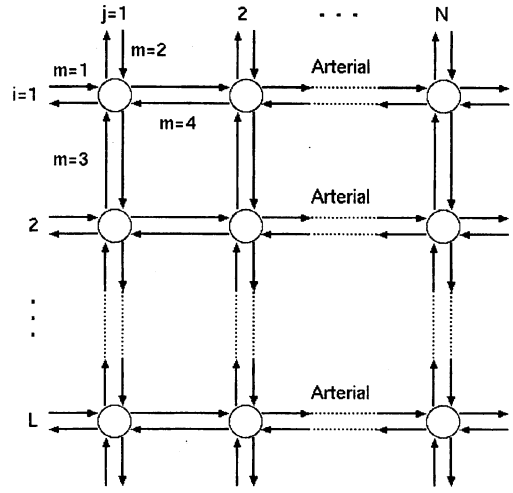


図5 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム



○ : Signalized intersection

図6 2方向交通ネットワークの交通流

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は図5で構成される。制御偏差 $e(j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(j, m, k) = l_r(j, m, k) - y_c(j, m, k) \quad (15)$$

幹線道路の各信号交差点の流入路において、交通容量に対する流入交通量の比率は一般に一様ではなく、過飽和信号交差点の渋滞制御を優先する観点から以下の関数 $g(j, m, k)$ を定義する。

$$g(j, m, k) = \begin{cases} 0 & e(j, m, k) \geq 0 \\ |e(j, m, k)| & e(j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

二方向交通幹線道路の渋滞長の信号制御システムの目的は、次式の評価関数 $J_a(k)$ を最小にする制御入力を求めることである。

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

ここで、 N は幹線道路上の信号交差点数を表す。

3.2 都市道路網

本稿で対象とする2方向交通ネットワークの交通流を表すと図6のようになる。捌け交通量を或る交通流のもとで3つの信号制御パラメータ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以下の非線形ダイナミ

ックシステムで記述される。

$$\begin{cases} x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) \\ \quad - u(i, j, m, k) \\ y_e(i, j, m, k) = l_m(i, j, m, k) \cdot c_e(i, j, m, k) \end{cases} \quad (18)$$

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(図6 参照)。2 方向交通ネットワークの渋滞長信号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。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad (19)$$

2 方向交通ネットワークの渋滞長信号制御システムでは、幹線道路の場合と異なってオフセットの閉路に関する制約条件⁽¹³⁾が付き、信号制御アルゴリズムも階層的になる(図7, 表1 参照)。

4. 信号制御法

4.1 幹線道路

二方向交通幹線道路の渋滞長制御のためにバランス制御アルゴリズムが提案される。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 $J_n(k)$ を最小にするように3つの信号制御パラメータを系統的、逐次的に探索する。

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 $\xi(j, m, k)$ や、変換変数 $l_m(j, m, k)$ 、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 $c_y^{(0)}(j, m, k)$ に等しく設定し、流入交通量 $x_i^{(0)}(j, m, k)$ を入力する。ここで、上付添字⁽⁰⁾ 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。

$$\begin{aligned} x_i^{(n)}(j, m, k) &= x_i^{(n-1)}(j, m, k) \\ &\quad + x_e(j, m, k-1) \end{aligned} \quad (20)$$

Step 4. 信号交差点の各流入路の交通処理量 $c_x^{(0)}(j, m, k)$ を、各車線交通処理量の総和より算定する。

$$\begin{aligned} c_x^{(n)}(j, m, k) &= c_{xl}^{(n)}(j, m, k) \\ &\quad + c_{xs}^{(n)}(j, m, k) \\ &\quad + c_{xr}^{(n)}(j, m, k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{cases} c_{xl}^{(n)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xl}(j, m, k) \\ c_{xs}^{(n)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xs}(j, m, k) \\ c_{xr}^{(n)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xr}(j, m, k) \end{cases} \quad (22)$$

ここで、 $c_{xl}(j, m, k)$ 、 $c_{xs}(j, m, k)$ 、 $c_{xr}(j, m, k)$ はそれぞれ左折、直進、右折車線の交通容量を表し、 $r_{gl}^{(0)}(j, m, k)$ 、 $r_{gs}^{(0)}(j, m, k)$ 、 $r_{gr}^{(0)}(j, m, k)$ はそれぞれ各車線の青信号スプリットを表す。

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 $x_e^{(0)}(j, m, k)$ を車線単位の交通量収支に基づいて算定する。

$$\begin{aligned} x_e^{(n)}(j, m, k) &= x_i^{(n)}(j, m, k) \\ &\quad - x_o^{(n)}(j, m, k) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{cases} x_o(j, m, k) = \xi(j, m, k) \cdot c_x(j, m, k) \\ x_e(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

Step 7. 渋滞長 $y_e^{(0)}(j, m, k)$ を変換係数 $l_m(j, m, k)$ を用いて車線単位で算定する。

$$y_e^{(n)}(j, m, k) = l_m(j, m, k) \cdot x_e^{(n)}(j, m, k) \quad (25)$$

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

$$\begin{aligned} \max\{ &|e^{(\kappa)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, \\ &|e^{(\mu)}(j, 3, k)|, |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} \leq \varepsilon \\ &\varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (26)$$

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。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

$$\begin{aligned} \max\{ &|e^{(\kappa)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, \\ &|e^{(\mu)}(j, 3, k)|, |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} > \varepsilon \\ &\varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (27)$$

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。

$$\begin{cases} r_{gl}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gl}(j, m) \\ r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gs}(j, m) \\ r_{gr}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gr}(j, m) \end{cases} \quad (28)$$

ここで、すべての流入路において直進交通が主流で $r_{gs}^{(n+1)}(j,m,k) \geq r_{gs}^{(n)}(j,m,k)$ 、 $r_{gs}^{(n+1)}(j,m,k) \geq r_{gs}^{(n-1)}(j,m,k)$ 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 Step 11 へ進み、 $r_{gs}^{(n+1)}(j,m,k) \leq r_{gs,max}$ が成立する場合は Step 4 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。

$$c_y^{(n+1)}(j,m,k) = c_y^{(n)}(j,m,k) + \Delta c_y(j,m) \quad (29)$$

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¹⁹⁾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(26)の制御指標が満足されるまで式(28)と式(29)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 信号交差点の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。

4.2 都市道路網

ネットワーク制御アルゴリズムは、幹線道路の渋滞長制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¹⁹⁾を用い、式(19)で表される2方向交通ネットワークの評価関数を最小化する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(30)で表される幹線道路の評価関数 $J_{\alpha}(k)$ 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。

$$J_{\alpha}(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j,m,k) \quad i=1,2,\dots,L \quad (30)$$

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交通ネットワーク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(30)の評価関

数 $J_{\alpha}(k)$ 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 $t_{off}^*(i,j,m,k)$ を、その閉路に関する制約条件のもとで式(19)の評価関数 $J_{\alpha}(k)$ 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 $x_i(i,j,m,k) / c_y(i,j,m,k)$ 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。

$$x_i(i,j,m,k) = x_e(i,j,m,k-1) + x_i(i,j,m,k) \quad (31)$$

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7と表1に表されるように階層構造になっている。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 $J_{\alpha}(k)$ 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 $J_{\alpha}(k)$ を最小にするように求められる。

5. シミュレーション

5.1 幹線道路

二方向交通幹線道路の渋滞長制御に対するバランス制御アルゴリズムが、広島県福山市内国道2号線の四つの信号交差点で朝夕のラッシュ時にサイクル長単位でシミュレーションされた。国道2号線の東行き交通に対して、 $j=1$ の信号交差点で2車線から3車線に増加し、 $j=4$ の信号交差点では逆に3車線から2車線に減少する。この車線数の変化によって、二つの信号交差点を境に交通容量が大きく変動し、渋滞長制御の観点から重要な信号交差点となる。渋滞長制御システムと信号制御に関するパラメータや流入交通量は実測値に基づいて設定した。また、基

準入力となる許容渋滞長は全流入路に対して $l_{(j,m,k)}=0m$ と設定した。

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交通量や待ち車列台数の時間変動に対応して制御した結果、過飽和信号交差点直進車線で現実には発生している渋滞長をほぼ 0m に制御することができた。 $j=2$ と $j=3$ の信号交差点においても現実には渋滞が発生しているが全ての車線で 0m に制御することができた。

5.2 都市道路網

広島県福山市内 2 方向交通ネットワークの渋滞長制御のシミュレーションは、式(18)の渋滞長信号制御システムに基づき、4.2 の信号制御アルゴリズムを用いて行った¹⁷⁾。この時、福山市内 2 方向交通ネットワーク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は、信号交差点全体が見える場所にビデオカメラを設置してサイクル長単位で測定した。このシミュレーションでは、

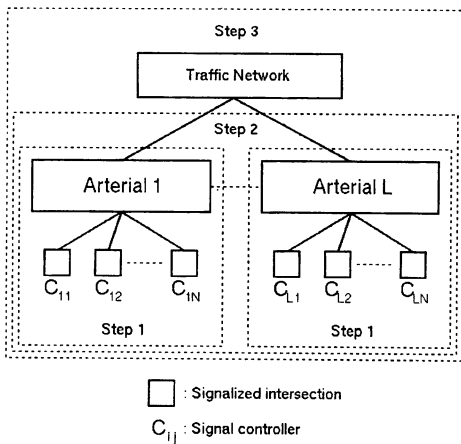


図7 ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造

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 $J_n(k)$ c_y, r_g, t_{off}
Step 2	Minimize $J_n(k)$ r_g, t_{off}
Step 3	Minimize $J_n(k)$ t_{off}^*

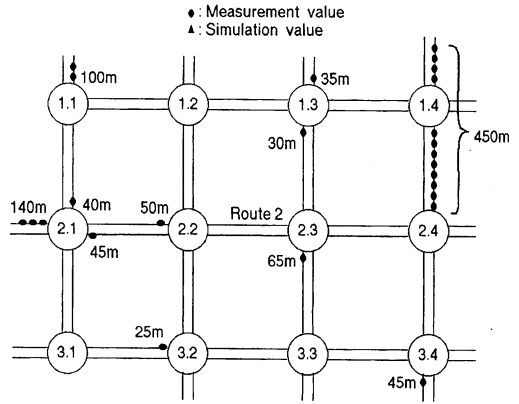


図8 直進車線に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

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、単一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文献¹⁰⁾で示している。

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を用いて流入交通量や待ち車列台数の時間変動に対応して広範囲に、きめ細かく、また、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、図8に示されるように(1.4)信号交差点における南行き方向の直進車線で現実には発生している渋滞長をほぼ 0m に制御することができた。また、合計 9 つの信号交差点で渋滞が発生しているにも関わらず、全ての信号交差点の全流入路の渋滞長をほぼ 0m に制御することができた。この図で、渋滞長の測定値は朝夕のラッシュ時を通しての最大値を示している。

6. まとめ

本稿では、2 方向交通幹線道路と 2 方向交通ネットワークにおける渋滞長の信号制御システムと信号制御アルゴリズムを確定的制御システムの観点から提案した。交通ネットワークの渋滞長制御では、幹線道路の場合と異なってオフセットに閉路に関する制約条件が付き、信号制御アルゴリズムも階層的でより複雑になる。また、信号交差点数が多くなり、シミュレーションに必要なパラメータも多くなる。主な研究結果は以下のようにとまとめられる。

- (i) 信号交差点の流入路の各車線単位で成立する交通量収支に基づいて、渋滞のメカニズムを定量的に記述した。
- (ii) 各信号交差点における渋滞長の信号制御システム

ムを、サイクル長単位の交通量収支に基づいて離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述し、フィードバック制御を用いて構成した。

- (iii) 3つの信号制御パラメータを制御偏差の総和が最小化されるように系統的に探索できるバランス制御アルゴリズムを提案した。
- (iv) オフセットの閉路に関する制約条件のもとで、2方向交通ネットワークの渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように、3つの信号制御パラメータを段階的、かつ統一的に探索するネットワーク制御アルゴリズムについて提案した。
- (v) 広島県福山市内の幹線道路および交通ネットワークにおけるシミュレーション結果とパターン選択法による信号制御の測定値の比較より、提案した渋滞長の信号制御システムと信号制御アルゴリズムは、2方向交通幹線道路と2方向交通ネットワークの渋滞長制御に有効であると考えられる。

今後の課題として以下の点が考えられる。本稿で用いた渋滞長信号制御システムのパラメータ $\xi(i,j,m,k)$ と $l_m(i,j,m,k)$ は交通流や車種別混入率によってそれぞれ変動する。また、車線単位の流入交通量や捌け交通量、リンク走行速度の測定には車両感知器が必要である。

謝辞 本研究を進めるにあたり貴重ご協力をいただいた広島県警察本部交通部の関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 交通工学統計：交通工学、Vol.35, No.5, pp.93 (2000).
- 2) 交通工学用語辞典、技術書院 (1984).
- 3) Hunt,P.B., Robertson,D.I., Bretherton,R.D. and Winton,R.I. : SCOOT-a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Laboratory Report 1014 (1981).
- 4) Al-Khalili,A.J. : The Optimum Green Split of a Cycle Time, IEEE Trans., SMC-15, pp.675-681 (1985).
- 5) 柴田潤、山本豊俊：都市街路網における渋滞制御、システムと制御、Vol.29, No.2, pp.123-131 (1985).
- 6) Miyata,S., Noda,M. and Usami,T. : STREAM (Strategic Realtime Control for Megalopolis-Traffic) Advanced Traffic Control System of Tokyo Metropolitan Police Department, Proc. of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, Vol.1, pp.289-297 (1995).
- 7) Sakakibara,H., Usami,T., Itakura,S. and Tajima,T. : MODERATO (Management by Origin-Destination Related Adaptation for Traffic Optimization), Proc. of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, pp.38-43 (1999).
- 8) Davison,E.J. and Ozguner,U. : Decentralized Control of Traffic Networks, IEEE Trans., AC-28, pp.677-688 (1983).
- 9) 交通信号の手引、(社)交通工学研究会、pp.120-123 (1994).
- 10) Al-Khalili,A.J. : Urban Traffic Control - A General Approach, IEEE Trans., SMC-15, pp.260-271 (1985).
- 11) A.D.May : Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, pp.338-360 (1990).
- 12) 齊藤 威：交通渋滞予測のための道路交通現象の再現、電気学会誌、Vol.117, No.9, pp.600-603 (1997).
- 13) 海老原、岡本：交通システム工学 (2)、コロナ社、pp.132-133 (1985).
- 14) 堀克郎：交通信号、技術書院、pp.56-67 (1966).
- 15) 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、Vol.42, No.7, pp.1876-1884 (2001).
- 16) Shimizu, H. and Ikenoue, J.: Prediction of Traffic Congestion at A Signalized Intersection, Proc. of the First China-Japan International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, Beijing, pp.372-379 (1989).
- 17) 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、Vol.45, No.4, pp.1154-1162 (2004).