

都市道路網の渋滞制御システム

清水 光* 石川 洋* 小林 正明** 川久保 和雄* 新谷 敏朗*

Congestion Control System in Urban Road Networks

Hikaru SHIMIZU* Hiroshi ISHIKAWA* Masa-aki KOBAYASHI**
Kazuo KAWAKUBO* and Toshio SHINTANI*

ABSTRACT

This paper studies deterministic control methods of the congestion in urban road networks. A congestion length control system is synthesized by using the feedback control. The decentralized control method, pattern selection method and parameter optimization method are described briefly. From the comparison of congestion lengths and signal control parameters between the pattern selection method and the parameter optimization method, it is confirmed that the network control algorithm work effectively to reduce the congestion lengths in an urban road network.

キーワード: 渋滞長制御, 分散制御, パターン選択, パラメータ最適化

Keywords: congestion length control, decentralized control, pattern selection, parameter optimization

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もなって, 自動車利用者層は拡大し, わが国の自動車保有台数は年増加率約 1.0%の割合で直線的に増加してきた[1]. その結果, 交通量が増加し, 朝夕のラッシュ時には主要幹線道路を中心に交通渋滞が日常的に発生する一因になっている. 交通渋滞は旅行時間の増加や燃料消費, 排気ガスによる大気汚染, 騒音などの社会的マイナス要因を発生させている. 現在, 交通流の円滑化を図るために道路の整備[2]や交通需要管理, 信号制御システムや動的経路誘導システムなどの研究開発が進められている. これらの中で, 信号制御システムは, 与えられた道路条件, 交通条件のもとで都市道路網の渋滞を制御するのに有効な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, 車のリンク走行速度などの時間変動に対応して制御される.

3つの信号制御パラメータは以下のように定義される[3].

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信号時間の比率. 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.

本稿では, 都市道路網の渋滞長を確定的に制御する方法について考察する. 最初に, 都市道路網の渋滞長制御システムがフィードバック制御により構成される. つぎに, 分散制御やパターン選択, パラメータ最適化による信号制御法について記述し, 最後に, 広島県福山市内道路網におけるパラメータ最適化法によるシミュレーション結果と現行のパターン選択法による測定値の比較に基づいて, ここで提案した制御システムや信号制御アルゴリズムが有効に働くことを具体的に述べる.

2. 渋滞長制御システム

渋滞長の制御システムは, 各信号交差点の各車線単位の交通量収支に基づいて, 以下の非線形ダイナミックシステムで記述される.

*情報処理工学科 **機械工学科

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

ここで、図1に示されるように 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、 k は時刻をそれぞれ表す。また、 $x_e(i, j, m, k)$ と $x_i(i, j, m, k)$ はそれぞれ超過流入交通量と流入交通量を表す。上式で、制御入力 $u(i, j, m, k)$ の上限は交通処理量 $c_x(i, j, m, k)$ や捌け率 $\xi(i, j, m, k)$ などによって決定され、図2に示されるように飽和特性を有する。渋滞長 $y_c(i, j, m, k)$ は、待ち車列の平均車頭間隔 $l_m(i, j, m, k)$ に状態変数 $x_e(i, j, m, k)$ を乗じて求められる。

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l(i, j, m, k)$ 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。そのとき、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3で構成される。制御偏差 $e(i, j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(i, j, m, k) \triangleq l_r(i, j, m, k) - y_c(i, j, m, k) \quad (2)$$

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。

$$g(i, j, m, k) = \begin{cases} 0 & e(i, j, m, k) \geq 0 \\ |e(i, j, m, k)| & e(i, j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

都市道路網の渋滞長の信号制御システムの目的は、次式の評価関数 $J_n(k)$ を最小にする制御入力を求めることである。

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

ここで、図1に示されるように L, N は都市道路網内の路線 i と j における信号交差点数を表す。

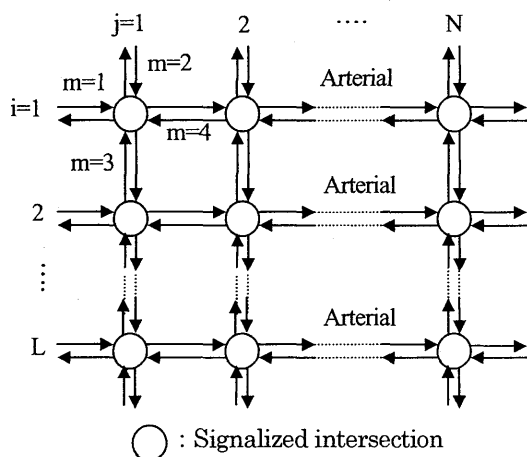


図1 2方向交通ネットワークの交通流

3. 信号制御法

つぎ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[4], [5]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1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[6],[10],[11]。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[4]、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的に探索されている。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。

ここでは、信号交差点の交通量収支に基づき、渋滞長の総和を最小化させるように3つの信号制御パラメータを系統的に探索する。このパラメータ探索は、現実の制約条件のもとで制御システムの評価関数 $J_n(k)$ を最小化の問題に帰着し、繰り返し計算により最適解が得られる[12],[13],[14]。

3.1 分散制御法

n 個の飽和信号交差点から成る1方向交通ネットワークの微小変動モデルは、制御入力を $u_i(t)$ 、出力を $y_i(t)$ として

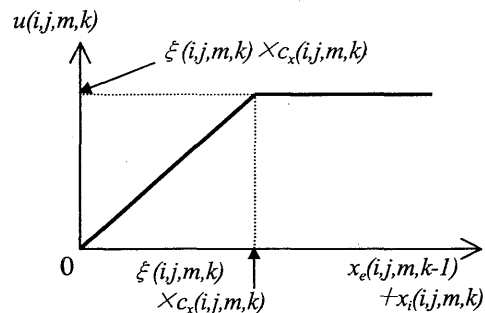


図2 制御入力の特徴

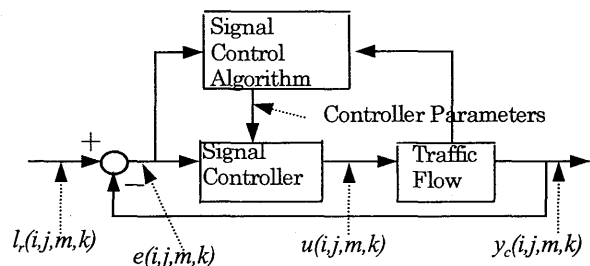


図3 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

次式で記述される[8].

$$\begin{cases} \Delta \dot{y} = B [\Delta u_1 \Delta u_2 \dots \Delta u_n]^T + E \Delta f \\ [\Delta y_1 \Delta y_2 \dots \Delta y_n]^T = I_n \Delta y \end{cases} \quad (5)$$

ここで, $\Delta u_i \triangleq c_{\max} \Delta g_i$, c_{\max} は最大交通容量, Δf は微小変動交通量, $\Delta y_i \triangleq \Delta g_x^i - \Delta g_y^i$, g_x と g_y はお互いに交差する流入路の青信号時間, B と E は $n \times n$ の係数行列, I_n は $n \times n$ の単位行列をそれぞれ表す. $\det B \neq 0$ で Δy_i は測定可能であるという条件のもとで, 次の青信号時間の微小変動 Δg_i を得る.

$$\Delta g_i = \frac{1}{c_{\max}} \left\{ \varepsilon_1 \Delta y_i + \varepsilon_2 \int_0^t \Delta y_i d\tau \right\} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad \varepsilon_1 > 0, \quad \varepsilon_2 > 0$$

上式は, 行列 B が実数の固有値を持てば任意の $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$ に対して成り立つ. また, 行列 B が複素数の固有値を持てば任意の $\varepsilon_1 > 0$, 十分に小さい $\varepsilon_2 > 0$ に対して成り立つ. 上式の解 Δg_i は, 1 方向交通や交通容量の最大化, 一様交通流などの仮定のもとで導出されたものである.

3.2 パターン選択法

現在, わが国で実用化されている信号制御システムでは, 3 つの信号制御パラメータがあらかじめ設定された複数のパターンの中から交通状況に最も適切なパターンを選択して決定されている[9].

青信号スプリットは次式

$$A(k) = \alpha X(k) + \beta O(k) \quad (7)$$

で定義される交通状態量 $A(k)$ に基づいて 6 種類のパターンに分割される. ここで, $X(k)$ は計測交通量, $O(k)$ は計測占有率, α と β は定数を表す. 6 種類のパターンは, 主道路優先や従道路優先, 主従道路平等, 非飽和状態などから成り立つ.

サイクル長は次式

$$\rho(k) = (x_i(k) + w(k)) / s \quad (8)$$

で定義される負荷率 $\rho(k)$ に基づいて 5 種類のパターンに分割される. ここで, $x_i(k)$ は流入交通量, $w(k)$ は待ち車列台数, s は飽和交通流率を表す. パターン間のサイクル長の差は 10~15 秒程度である.

オフセットは, 上りと下りの双方向の交通量とサブエリアのサイクル長に基づいて 10 種類のパターンに分割される. 10 種類のパターンは, 上り優先や下り優先, 上り下り平等, 非飽和状態などから成り立つ.

3.3 パラメータ最適化法

ここでは, 都市道路網の渋滞長を 3 つの信号制御パラメータの系統的探索により最小化するネットワーク制御アルゴリズムについて述べる. ネットワーク制御アルゴリズム

は, バランス制御アルゴリズム[13]を用い, 式(4)で表される都市道路網の渋滞長の総和に関する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(9)で表される幹線道路の評価関数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.

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j, m, k) \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

Step 2. オフセット制御の関係から, Step1 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(9)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 $t_{off}^*(i, j, m, k)$ を, その制約条件のもとで式(4)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 $x_i'(i, j, m, k) / c_x(i, j, m, k)$ が最大となる信号交差点間のオフセットを Fieser の方法[15]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.

$$x_i'(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) \quad (10)$$

ii) 次に, オフセットの制約条件[16]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 $k=k_f$ まで繰り返す.

ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造と評価関数を図 4 と表 1 にそれぞれ示す. 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 $c_x(i, j, m, k)$ が探索される. 次に, Step 2 で幹線道路上の信号交差点の青信号スプリット $r_e(i, j, m, k)$ 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.

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や変動範囲は, 実測値や試行錯誤などに基づいて設定される. また, オフセットの最適値がサイクル長と青信号スプリットの最適値を用いて Fieser の方法により探索される.

4. 信号制御システムの評価

広島県福山市内交通ネットワークにおいて, 提案した信

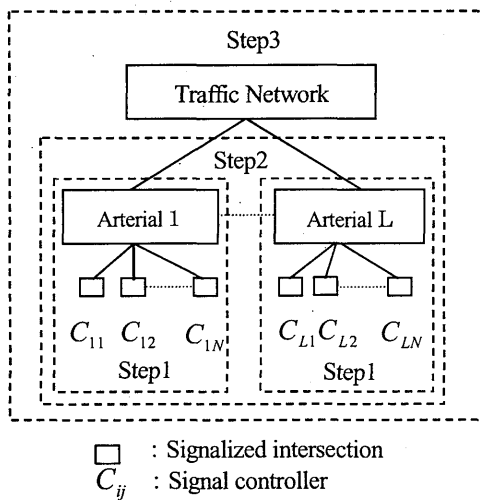


図4 ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造

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

号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムのシミュレーションを実行した。まず、シミュレーションの対象となる広島県福山市内交通ネットワークにおける各信号交差点の渋滞の状況について述べる。つぎに、信号制御パラメータや渋滞長に関するシミュレーション値と測定値を比較し、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムの有効性について考察する。

4.1 広島県福山市内交通ネットワーク

シミュレーションの対象となる広島県福山市内交通ネットワークを図5に示す。対象となる信号交差点は全部で12個あり、渋滞の状況は以下に述べる通りである。最初に、(1.1)信号交差点では、南行き方向において朝夕のラッシュ時に流入交通量が増加し渋滞が発生している。(1.4)信号交差点では、南行き方向において夕方のラッシュ時に渋滞が発生している。また、(2.1)信号交差点では、東行き方向の車線数が2車線から3車線に増加しているが、朝夕のラッシュ時に流入交通量が増加し、東行き方向において先詰まり現象が発生し渋滞が多発している。さらに、(2.3)信号交差点では、北行き方向において車線数が2車線から1車線

に減少し、夕方のラッシュ時に渋滞が発生している。(2.4)信号交差点では、南行き方向において夕方のラッシュ時に流入交通量が急激に増加し、渋滞が大きく発生している。最後に、(3.4)信号交差点では、北行き方向において夕方のラッシュ時に流入交通量が増加し、渋滞が発生している。

以上の調査結果より、福山市内交通ネットワークにおいて特に重要な信号交差点は、流入交通量が多い国道2号線上と、(2.4)信号交差点を中心とした南北の(3.4)、(1.4)信号交差点であるといえる。

4.2 測定値とシミュレーション値の比較

シミュレーションに用いた交通量と各パラメータは、平成12年と13年の夏期の平日の朝夕のラッシュ時にサイクル長単位で測定した。ここでは、特に流入交通量が多く渋滞が発生している(1.4)、(2.4)、(3.4)信号交差点において、測定値とシミュレーション値を比較し相違点について考察する。国道2号線上の(2.1)、(2.2)、(2.3)、(2.4)信号交差点の渋滞長制御のシミュレーション結果については文献[13]、[17]を参照されたい。基準入力となる許容渋滞長は全流入路に対して $l_c(i,j,m,k)=0m$ と設定した。信号交差点の各流入路における直進1車線あたりの流入交通量を図6、7、8に示す。(1.4)信号交差点では夕方のラッシュ時に南行き交通量が増加している。(2.4)信号交差点では夕方18時前から19時にかけて南行き交通量が急増し、渋滞が発生している。(3.4)信号交差点では南北方向の交通量が多く、夕方の一部で北行き交通量が増加している。

ネットワーク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積で求める青時間は式(9)の評価関数を最小化するように探索される。サイクル長は指標 $x_i'(i,j,m,k) / c_i(i,j,m,k)$ が最大となる過飽和信号交差点の流入路の交通量の変動に対応して探索され、全信号交差点で共通な値に設定される。3つの信号交差点におけるサイクル長のシミュレーション値と測定値を比較すると図9のようになる。現実のパターン選択法において、サイクル長は負

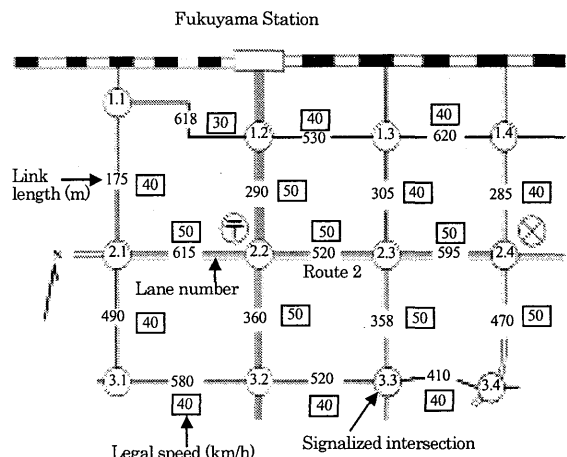


図5 広島県福山市内の2方向交通ネットワーク

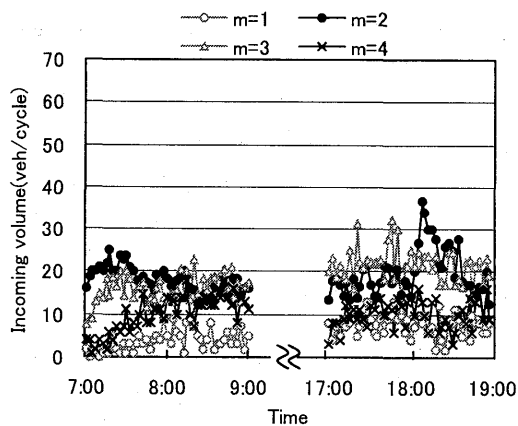


図6 (1.4)信号交差点における直進車の流入交通量

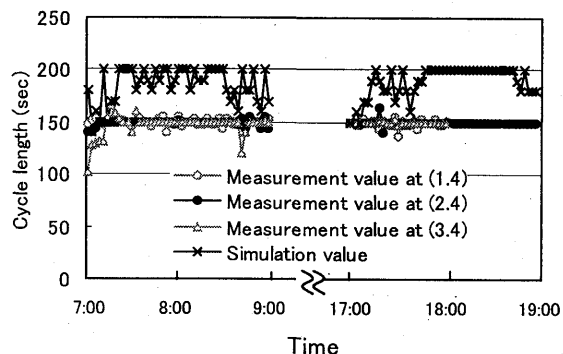


図9 各信号交差点におけるサイクル長のシミュレーション値と測定値の比較

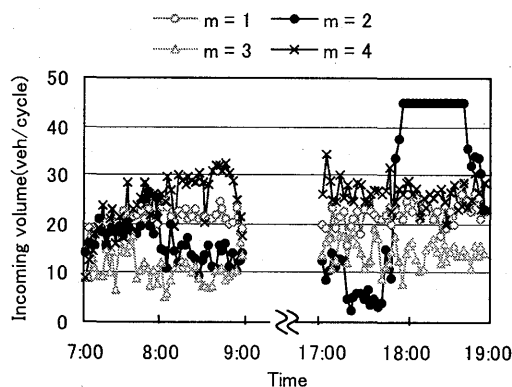


図7 (2.4)信号交差点における直進車の流入交通量

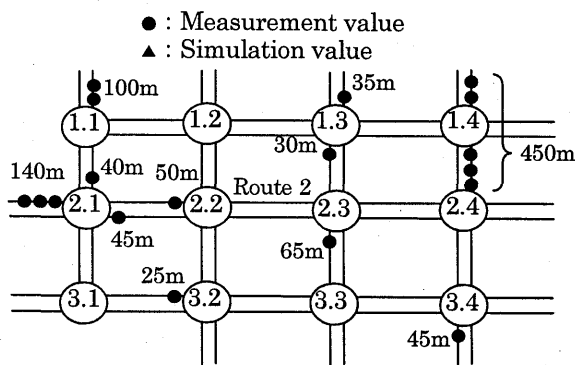


図10 直進車線に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

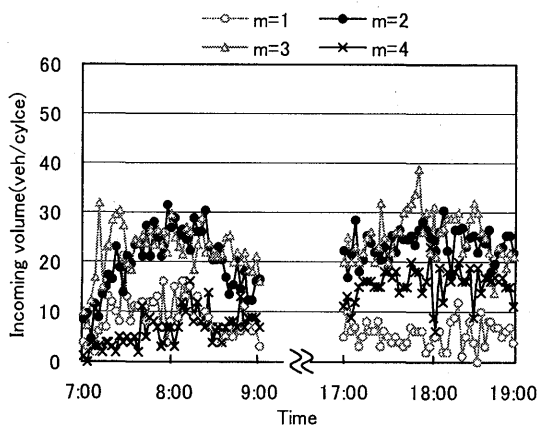


図8 (3.4)信号交差点における直進車の流入交通量

荷率に基づいて幾つかの種類のパターンに分割される。図9より、現実のパターン選択法では(1.4), (2.4)信号交差点で150秒を中心に小さく変動し, (3.4)信号交差点で100秒から170秒の範囲で変動している。それに対し, シミュレーションでは流入交通量の変動に対応して140秒から200秒までの広範囲で, 渋滞長の総和を最小化するように適応的に

制御されている。

青時間の測定値とシミュレーション値を(1.4), (3.4)信号交差点で比較すると以下ようになる。(3.4)信号交差点の7時の前半を除き, 測定値の変動幅は小さい。それに対し, シミュレーション値は夕方からのラッシュ時をはじめ, 流入交通量の変動に対応して広範囲にきめ細かく制御されている[18]。

(1.4)-(2.4)信号交差点間, および(2.4)-(3.4)信号交差点間の南行き方向に対する相対オフセットのシミュレーション値と測定値を比較すると以下ようになる。パターン選択法による相対オフセットは, サイクル長と上り下り交通量の値に応じて複数のパターンの中から選択している。パターン選択法によって制御されている測定値は, サイクル長150秒に対して午前, 夕方ともに50~60秒程度ずれている。それに対し, シミュレーション値は(1.4)-(2.4)信号交差点間ではほぼ同時式表示となり, (2.4)-(3.4)信号交差点間では, オフセットの制約条件の影響で60秒から110秒の範囲で不規則に制御されている[18]。

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

ズムを用いて以上のように交通量や待ち車列台数、車のリンク走行速度の時間変動に対応して渋滞長の総和を最小化するように統一的に広範囲で制御した結果、図 10 に示すように合計 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 0 m に制御することができた。

5. おわりに

本稿では、都市道路網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説明した。最初に、渋滞長制御システムを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した。また、分散制御やパターン選択、パラメータ最適化による信号制御法について説明した。広島県福山市内交通ネットワークにおいて渋滞長制御システムとネットワーク制御アルゴリズムを用いてシミュレーションした結果、現実に朝夕のラッシュ時に 9 つの信号交差点で渋滞が発生しているにもかかわらず、3 つの信号制御パラメータが流入交通量や待ち車列台数、車のリンク走行速度などの時間変動に対応して渋滞長の総和を最小化するように広範囲に、きめ細かく探索され、制御目標をほぼ達成することができた。

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制御システムのパラメータ $\xi(i,j,m,l,k)$ と $l_m(i,j,m,l,k)$ 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、走行速度の測定には車両感知器が必要である。

最近、ITS(Intelligent Transport Systems) の世界会議が、ヨーロッパ、アジア、北米の各地域を持ち回りで毎年開催されている。この会議において信号制御法は最も重要な研究テーマの一つとなっており、ある意味では一国の技術力の威信をかけた議論の場とも思える状況に遭遇したことがあった。交通ネットワークの信号制御システムの開発と設計は、制御工学者にとって魅力の多い分野であると思われる。

参考文献

- [1] 交通工学統計：交通工学, vol.36, No.5, 85 (2001)
- [2] 斎藤威：第 5 次交通安全施設等整備事業五箇年計画の評価, 交通工学, vol.33, No.2, 11/21 (1998)
- [3] 交通工学用語辞典, 技術書院 (1984)
- [4] 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)
- [5] A.J.Al-Khalili, : The Optimum Green Split of a Cycle Time, IEEE Trans., SMC-15, 675/681 (1985)
- [6] S.Miyata, M.Noda, and T.Usami : 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, 289/297 (1995)
- [7] H.Sakakibara, T.Usami, S.Itakura and T.Tajima : MODE-RATO (Management by Origin-Destination Related Adaptation for Traffic Optimization), Proc. of IEEE/IEEE/JSAP International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, 38/43 (1999)
- [8] E.J.Davison and Ü.Özguner : Decentralized Control of Traffic Networks, IEEE Trans., AC-28, 677/688 (1983)
- [9] 交通信号の手引, (社) 交通工学研究会, 120/123 (1994)
- [10] 柴田, 山本 : 都市街路網における渋滞制御, システムと制御, vol.29, No.2, 123/131 (1985)
- [11] A.J. Al-Khalili : Urban Traffic Control – A General Approach, IEEE Trans., SMC-15, 260/271 (1985)
- [12] H.Shimizu, H.Kita, and H.Mashiba : Signal Control Algorithms of a Traffic Network, Proc. of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Nagoya, 573/578 (1998)
- [13] 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, 第 42 巻, 第 7 号, 1876/1884 (2001)
- [14] H.Shimizu, H.Mashiba, Y.Sobata and M.Kobayashi : Optimization of Signal Control Parameters for Two-Way Traffic Arterials, Preprints of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP/Symposium on Large Scale Systems, Bucharest, 485/490 (2001)
- [15] 堀克郎 : 交通信号, 技術書院, 56/67 (1966)
- [16] 海老原 “交通システム工学(2)”, コロナ社, 132/133 (1985).
- [17] 清水光 : 路線の渋滞制御システム, 計測と制御, Vol.41, No.3, 199/204 (2002).
- [18] H.Ishikawa, H.Shimizu, Y.Sobata and M.Kobayashi : Optimization of Signal Control Parameters for Traffic Networks, Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 2002, Hiroshima, 791/796 (2002).