

二方向交通幹線道路の信号制御アルゴリズム

清水 光 真柴 博樹

福山大学工学部情報処理工学科

〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵

E-mail: shimizu@fuip.fukuyama-u.ac.jp

概要： 本稿では、二方向交通幹線道路の渋滞長を制御するアルゴリズムについて考察する。最初に、幹線道路の各信号交差点の各車線に対して或る時間単位で交通量収支が成立する。交通量収支に基づいて、渋滞長制御で基本的役割を果たす渋滞のメカニズムが定量的に記述される。つぎに、渋滞長の信号制御システムが離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述され、フィードバック制御を用いて構成される。サイクル長や青信号スプリット、オフセットから成る三つの信号制御パラメータを幹線道路の渋滞長の総和が最小化されるように系統的に探索するアルゴリズムについて提案する。最後に、測定値とシミュレーション値の比較により、提案したアルゴリズムの制御結果について考察する。

キーワード： 交通量収支、渋滞メカニズム、非線形ダイナミックシステム、バランス制御アルゴリズム

A Signal Control Algorithm of Two-Way Traffic Arterials

Hikaru SHIMIZU and Hiroki MASHIBA

Department of Information Processing Engineering

Faculty of Engineering, Fukuyama University

1 Gakuen-cho, Fukuyama 729-0292 Japan

E-mail: shimizu@fuip.fukuyama-u.ac.jp

Abstract: This paper studies a signal control algorithm which controls congestion lengths on the two-way traffic arterial systematically. The volume balance is held for each lane at each signalized intersection of arterials for a certain duration. The congestion mechanism which plays an essential role to control congestion lengths is described quantitatively based on the volume balance at each signalized intersection. 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. A balance control algorithm in which the three signal control parameters consisting of the cycle length, green split and offset are controlled systematically so as to minimize the sum of congestion lengths on the arterial is presented. From the comparison between measurement values and simulation values, it is confirmed that the balance control algorithm works effectively to reduce the congestion lengths on the arterial.

Keywords: Volume balance, Congestion mechanism, Nonlinear dynamic system, Balance control algorithm

1. はじめに

近年、自動車保有台数の増加に伴って、交通渋滞が都市交通ネットワークにおいて増加している。交通制御は道路標示や道路標識、信号などを組み合わせて実施されている。これらの中で、信号制御は幹線道路の渋滞制御に有効な一つの方法である。信号制御では、サイクル長や青信号ス

プリット、オフセットから成る三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長の時間変動に対応して制御される。

これまで、次に述べるようなオンライン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。一つの現示に対する f 係数に基づいて最適青信号スプリットを決定する方法が提案された[1]。各現示に対する青信号スプリット

が各交通流の負荷比に基づいて計算された[2]。交通流のサイクル毎の不規則な変動を考慮して青時間を変更された[3]。サーボ機構問題のロバスト分散コントローラが信号制御に応用された[4]。最適オフセットが、遅れや停止回数、燃料消費、CO 排出などの最小化、あるいは、これらの任意の組み合わせの最小化について求められた[5]。各サブエリアに対する交通量やサイクル長に依存するオフセットのパターン選択法が、東京都の交通制御システムに応用された[2]。オフセット最適化法が制御対象の各信号交差点の評価関数を大域的に最小にした[3]。サイクル長が、不飽和である経路に沿って遅れと停止回数を最小化するように[6]、また、過飽和信号交差点の交通容量を最大化するように[2]、それぞれ制御された。

上記の信号制御法では、三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制御されている。幹線道路では、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、三つの信号制御パラメータは系統的に、かつ、協調的に制御されるべきであると考えられる。

本稿では、二方向交通幹線道路の渋滞長を確定的に制御する観点から考察する。最初に、各信号交差点の交通量収支に基づいて、渋滞の発生、継続、消滅のメカニズムが定量的に記述される。つぎに、幹線道路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。三つの信号制御パラメータを評価関数が最小になるように系統的に制御するアルゴリズムが提案され、最後に、広島県福山市内国道2号線におけるシミュレーション結果について考察する。

2. 信号制御システム

2.1 渋滞のメカニズム

交通ネットワークの信号交差点の各車線において、或る時間単位 ΔT で交通量収支が成立する。それは図1を参照して以下のように記述される。

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

$$\begin{cases} x_o(k) \leq \xi_{\max}(k) c_x(k) \\ x_e(k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $k = k\Delta T$ ($k = 1, 2, \dots, k_f$) 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、 $c_x(k)$ は

各流入路の交通容量、 $\xi_{\max}(k)$ は或る交通流のもとで $x_o(k)$ を $c_x(k)$ で除した最大値を表す。

渋滞長制御で基本的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時発生する。すなわち、

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

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

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

- iii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が正値を保つ間継続する。すなわち、

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

2.2 信号制御システム

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。

$$\begin{aligned} x_e(j, m, k) &= x_e(j, m, k-1) \\ &+ x_i(j, m, k) \\ &- x_o(j, m, k) \end{aligned} \quad (3)$$

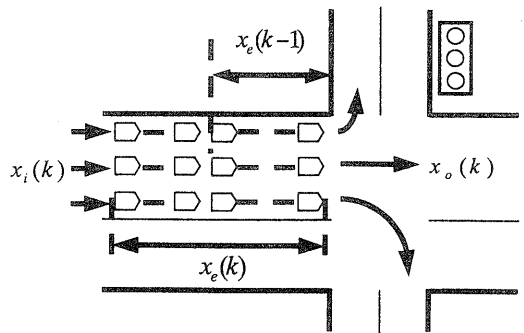


図1 各信号交差点の交通量収支

$$\begin{cases} x_o(j, m, k) \leq \xi_{\max}(j, m, k) c_x(j, m, k) \\ x_e(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、図2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 $x_o(j, m, k)$ は三つの信号制御パラメータによって制御される。

$$x_o(j, m, k) = f[c_y(j, m, k), r_g(j, m, k), t_{\text{off}}(j, m, k)] \quad (5)$$

ここで、 $c_y(j, m, k)$, $r_g(j, m, k)$, $t_{\text{off}}(j, m, k)$ 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。

$$u(j, m, k) \triangleq f[c_y(j, m, k), r_g(j, m, k), t_{\text{off}}(j, m, k)] \quad (6)$$

以上より、渋滞長の信号制御システムは次式で表される。

$$\begin{cases} x_e(j, m, k) = x_e(j, m, k-1) + \\ \quad x_i(j, m, k) - u(j, m, k) \\ y_c(j, m, k) = l_m(j, m, k) x_e(j, m, k) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、制御入力 $u(j, m, k)$ の上限は(4)式によって決定され、信号制御システムは離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述される。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。

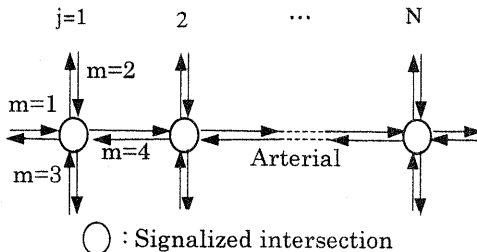


図2 二方向交通幹線道路

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、制御入力に三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は図3で構成される。制御偏差 $e(j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(j, m, k) \triangleq l_r(j, m, k) - y_c(j, m, k) \quad (8)$$

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樣ではないので、以下の関数 $g(j, m, k)$ を定義する。

$$g(j, m, k) \triangleq \begin{cases} 0 & e(j, m, k) \geq 0 \\ |e(j, m, k)| & e(j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

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。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j, m, k) \quad (10)$$

ここで、 N は幹線道路上の信号交差点数を表す。

3. 信号制御アルゴリズム

バランス制御アルゴリズムが二方向交通幹線道路の渋滞長制御に応用される。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渋滞長の最大値を等しくし、かつ、三つの信号制御パラメータを評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように系統的、逐次的に制御する。

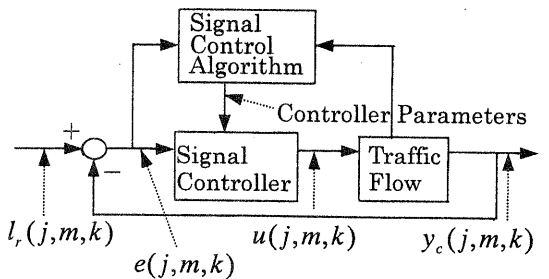


図3 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

Step 1. 各信号交差点における信号制御パラメータの初期値や上下限值、増分などが設定される。

Step 2. 時間区間 ΔT がサイクル長 $c_y^{(n-1)}(j, m, k)$ に等しく設定され、流入交通量 $x_i^{(n-1)}(j, m, k)$ が入力される。ここで、上付添字 $^{(n-1)}$ は繰り返し計算回数を表す。

Step 3. 流入交通量が次式で再計算される。

$$x_i^{(n-1)}(j, m, k) = x_i^{(n-1)}(j, m, k) + x_e(j, m, k-1) \quad (11)$$

Step 4. 信号交差点の各流入路の交通容量 $c_x^{(n-1)}(j, m, k)$ が、各車線交通容量の総和より算定される。

$$c_x^{(n-1)}(j, m, k) = c_{xl}^{(n-1)}(j, m, k) + c_{xs}^{(n-1)}(j, m, k) + c_{xr}^{(n-1)}(j, m, k) \quad (12)$$

$$\begin{cases} c_{xl}^{(n-1)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n-1)}(j, m, k) c_{xl}(j, m, k) \\ c_{xs}^{(n-1)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n-1)}(j, m, k) c_{xs}(j, m, k) \\ c_{xr}^{(n-1)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n-1)}(j, m, k) c_{xr}(j, m, k) \end{cases} \quad (13)$$

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、 $r_{gl}^{(n-1)}(j, m, k)$, $r_{gs}^{(n-1)}(j, m, k)$, $r_{gr}^{(n-1)}(j, m, k)$ はそれぞれ各車線の青信号スプリットを表す。

Step 5. 各車線の青時間が定義に基づいて算定される。

Step 6. 超過流入交通量 $x_e^{(n-1)}(j, m, k)$ が交通量収支に基づいて算定される。

$$x_e^{(n-1)}(j, m, k) = x_i^{(n-1)}(j, m, k) - x_o^{(n-1)}(j, m, k) \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_o^{(n-1)}(j, m, k) \leq \xi_{\max}(j, m, k) c_x^{(n-1)}(j, m, k) \\ x_e^{(n-1)}(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Step 7. 渋滞長 $y_c^{(n-1)}(j, m, k)$ が変換係数 $l_m(j, m, k)$ を用いて算定される。

$$y_c^{(n-1)}(j, m, k) = l_m(j, m, k) x_e^{(n-1)}(j, m, k) \quad (16)$$

Step 8. 各信号交差点の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が算定される。

Step 9. もし、次の制御指標

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(\kappa)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, \\ |e^{(\mu)}(j, 3, k)|, |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} \leq \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (17)$$

が満足され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 $^{(\kappa), (\omega), (\mu), (\lambda)}$ 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

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(\kappa)}(j, 1, k)|, |e^{(\omega)}(j, 2, k)|, |e^{(\mu)}(j, 3, k)|, \\ |e^{(\lambda)}(j, 4, k)|\} > \varepsilon, \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

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次式で修正する。

$$\begin{cases} r_{gl}^{(n)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n-1)}(j, m, k) + \Delta r_{gl}(j, m) \\ r_{gs}^{(n)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n-1)}(j, m, k) + \Delta r_{gs}(j, m) \\ r_{gr}^{(n)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n-1)}(j, m, k) + \Delta r_{gr}(j, m) \end{cases} \quad (19)$$

もし、 $r_{gs}^{(n)}(j, m, k) > r_{gs, \max}$ が成立すれば **Step11** へ進む、

$r_{gs}^{(n)}(j, m, k) \leq r_{gs, \max}$ が成立する場合は **Step4** へ帰る。

Step 11. サイクル長が次式によって修正される。

$$c_y^{(n)}(j, m, k) = c_y^{(n-1)}(j, m, k) + \Delta c_y(j, m) \quad (20)$$

もし、 $c_y^{(n)}(j, m, k) > c_{y, \max}$ が成立すれば Step12 へ進み、

$c_y^{(n)}(j, m, k) \leq c_{y, \max}$ が成立する場合は Step2 へ帰る。

Step 12. 得ら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[7]により算定される。

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実行される。

4. シミュレーション結果と考察

二方向交通幹線道路の渋滞長のバランス制御アルゴリズムが、図4に示される福山市内国道2号線で7時から19時までシミュレーションされた。シミュレーションに必要なパラメータや流入交通量は、測定データに基づいて四つの信号交差点で設定された。基準入力 $l_i(j, m, k) = 0m$ と設定した。サイクル長と青信号スプリットの積で定義される青時間は、(10)式の評価関数 $J_a(k)$ を最小化するように制御される。四つの信号交差点で共通的に制御されるサイクル長は、指標 $x_i'(j, m, k)/c_x(j, m, k)$ が最大値となる臨界信号交差点の流入交通量の変動に対応して制御される。サイクル長の測定値とシミュレーション値を比較すると図5に示されるようになり、バランス制御アルゴリズムにより広範囲に、かつ適応的に制御されている。

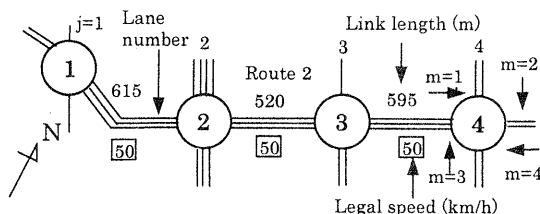


図4 福山市内の二方向交通幹線道路

直進車に対する青信号スプリットの測定値とシミュレーション値を臨界信号交差点において比較すると、図6と図7に示されるようになり、バランス制御アルゴリズムにより広範囲に、かつ適応的に制御されている。先に得られたサイクル長と青信号スプリットの最適値を用いて Fieser の平等オフセットを算定した。以上のように、三つの信号制御パラメータを(10)式の評価関数 $J_a(k)$ を最小化するように系統的に探索した。その結果、現実には図8と図9に示されるように渋滞が発生しているにもかかわらず、バランス制御アルゴリズムでは四つ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。

5. まとめ

本稿では、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。主な内容は以下になる。

- i) 信号交差点の各流入路の交通量収支に基づいて、渋滞長の信号制御システムが離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述される。
- ii) 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、フィードバック制御により構成される。
- iii) 二方向交通幹線道路の渋滞長が系統的に、かつ逐次的に制御されるバランス制御アルゴリズムを提案した。
- iv) 測定値とシミュレーション値の比較より、バランス制御アルゴリズムが渋滞長制御に有効に働くことを確認した。

参考文献

- [1] A.J.Al-Khalili, "The Optimum Green Split of a Cycle Time", *IEEE Trans.*, SMC-15, pp.675-681, 1985.
- [2] 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, pp.289-297, 1995.
- [3] 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.
- [4] E.J.Davison and Ü.Özgüner, "Decentralized

Control of Traffic Networks”, *IEEE Trans.*, AC-28, pp.677-688, 1983.

- [5] A.J.Al-Khalili, “A General Approach to Relative Offset Settings of Traffic Signals”, *IEEE Trans.*, SMC-15, pp.587-594, 1985.
- [6] A.J.Al-Khalili, “Urban Traffic Control – A General Approach”, *IEEE Trans.*, SMC-15, pp.260-271, 1985.
- [7] 塙 克郎 “交通信号”, 技術書院 1996.

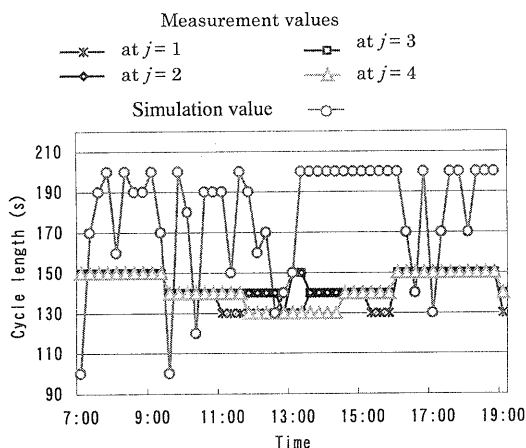


図5 四つの信号交差点に共通なサイクル長の測定値とシミュレーション値の比較

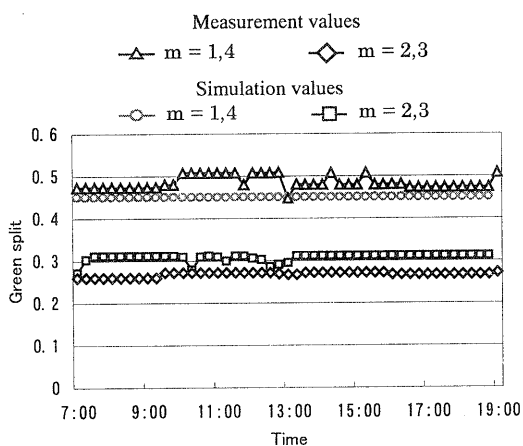


図6 $j=2$ の信号交差点の直進車に対する青信号スプリットの比較

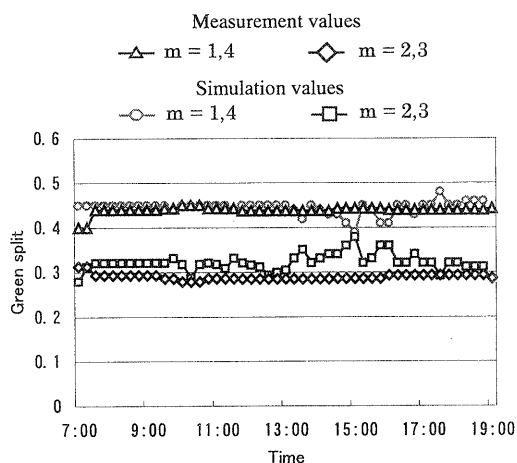


図7 $j=4$ の信号交差点の直進車に対する青信号スプリットの比較

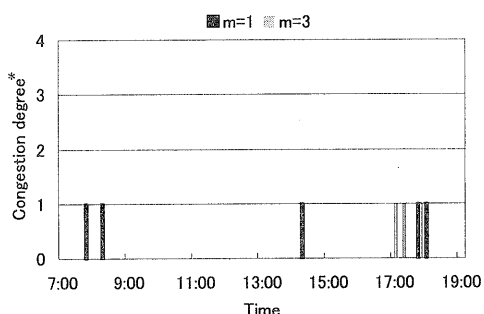


図8 $j=2$ の信号交差点の各流入路における渋滞度の測定値

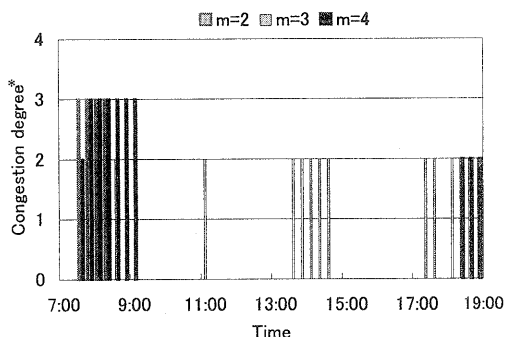


図9 $j=4$ の信号交差点の各流入路における渋滞度の測定値

* 渋滞度は、渋滞長を非線形量子化関数で変換して得られる。