

都市道路網における交通流円滑化システムの一設計

清水 光* 小林 正明** 石川 洋*

*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

E-mail: *{shimizu, h-ishika}@fuip.fukuyama-u.ac.jp

**kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、最初に、都市道路網の信号交差点の各流入路で成立する交通量収支に基づいて、渋滞長の総和を最小化させる信号制御システムと、出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間を評価関数とする動的経路誘導システムを設計する。つぎに、信号制御システムと動的経路誘導システムをリアルタイムで結合させて、都市道路網における交通流を総合的に円滑化させるシステムについて提案する。

キーワード：信号制御システム、信号制御アルゴリズム、動的経路誘導システム、平均 OD 旅行時間、推奨経路探索アルゴリズム、交通流円滑化システム

A Design of Traffic Flow Smoothness System in Urban Road Networks

Hikaru Shimizu*, Masa-aki Kobayashi** and Hiroshi Ishikawa*

*Department of Information Processing Engineering

**Department of Mechanical Systems Engineering

Faculty of Engineering, Fukuyama University

1 Gakuen-cho, Fukuyama-shi, 729-0292, Japan

E-mail: *{shimizu, h-ishika}@fuip.fukuyama-u.ac.jp

**kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

Abstract This paper studies a design of traffic flow smoothness system in urban road networks. 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 signal 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 in the traffic network is presented. The dynamic route guidance system is consisted of both the evaluation for the mean OD travel time and the recommendable route search algorithm. The traffic flow smoothness system, which is most effective to reduce the congestions in urban road networks, is designed by connecting the signal control system with the dynamic route guidance system in real time.

Key words signal control system, signal control algorithm, dynamic route guidance system, mean OD travel time, recommendable route search algorithm, traffic flow smoothness system

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、自動車利用者層は拡大し、わが国の自動車保有台数は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や燃料消費の増加、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。

本稿では、最初に、交通需要のサイクル長単位の時間変動に対応して、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。

つぎに、出発地から目的地までの最短平均 OD 旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路をドライバーに出力し、特定経路への交通流の集中を防ぐ動的経路誘導システムと推奨経路探索アルゴリズムについて提案する。

最後に、都市道路網内の渋滞長の総和を最小にする信号制御システムと、出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間を短縮する推奨経路をドライバーに表示する動的経路誘導システムを、リアルタイムで結合させる交通流円滑化システムと交通流円滑化アルゴリズムについて提案する。

2. 信号制御システム

2.1 信号制御システム

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1のようになる。交通ネットワークの信号交差点の流入路の各車線において、或る時間単位 ΔT (ここではサイクル長) で交通量収支の成立することが、交通量の測定データに基づいて検証できる。交通量収支は次式で表される。

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

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

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)、 $k=k \cdot \Delta T$ ($k=1, 2, \dots, k_j$) は時刻をそれぞれ表す (図1 参照)。また、 $x_e(i, j, m, k)$ 、 $x_i(i, j, m, k)$ 、 $x_o(i, j, m, k)$ 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。式 (2) の $c_x(i, j, m, k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(i, j, m, k)$ は或る交通流のもとで $x_o(i, j, m, k)$ を $c_x(i, j, m, k)$ で除した比率で捌け率とよぶ。捌け交通量は、或る交通流のもとでサイクル長や青信号スプリット、オフセットの3つの信号制御パラメータで制御できるものと仮定し、次式で表す。

$$x_o(i, j, m, k) = f[c_y(i, j, m, k), r_g(i, j, m, k), t_{off}(i, j, m, k)] \quad (3)$$

ここで、 $c_y(i, j, m, k)$ 、 $r_g(i, j, m, k)$ 、 $t_{off}(i, j, m, k)$ 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。なお、青信号スプリット $r_g(i, j, m, k)$ は各信号交差点の現示に基づいて設定され、対向方向の交通に対して同じ値が配分される。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。

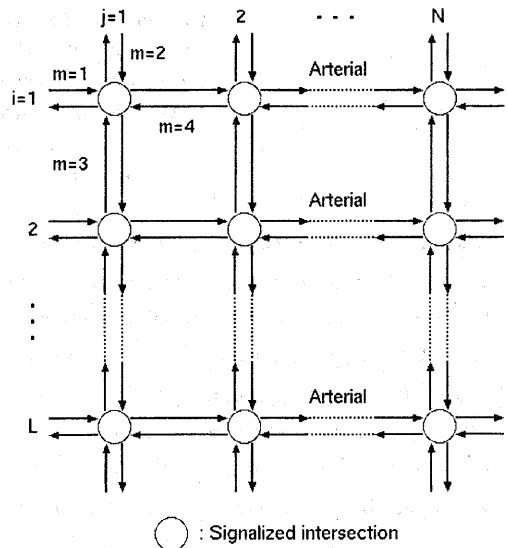


図1 2方向交通ネットワークの交通流

$$\begin{cases} x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) \\ \quad + x_i(i, j, m, k) - u(i, j, m, k) \\ y_e(i, j, m, k) = l_m(i, j, m, k) \times x_e(i, j, m, k) \end{cases} \quad (4)$$

上式で、制御入力の上限は式(2)によって決定され、飽和特性を有する。渋滞長 $y_e(i, j, m, k)$ 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。

渋滞長の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。そのとき、各信号交差点における渋滞長フィードバック制御システムが構成される²⁾。

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。

$$e(i, j, m, k) = l_r(i, j, m, k) - y_e(i, j, m, k) \quad (5)$$

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般に一樣ではなく、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。

$$\begin{cases} 0 & e(i, j, m, k) \geq 0 \\ |e(i, j, m, k)| & e(i, j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

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。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad (7)$$

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³⁾が付き、信号制御アルゴリズムも階層的になる(図2、表1参照)。

2.2 信号制御アルゴリズム

信号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を確認されたバランス制御アルゴリズム²⁾を用い、式(7)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: 幹線道路毎に、式(8)で表現される幹線道路の評価関数 $J_o(k)$ 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。

$$J_o(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad i=1,2,\dots,L \quad (8)$$

Step 2: オフセット制御の観点から、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(8)の評価関数 $J_o(k)$ 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(7)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のオフセットを Fieser の方法⁴⁾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。

$$x_i'(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) \quad (9)$$

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。

信号制御アルゴリズムの各 Step は、図2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 Step1 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。次に、Step2 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 $J_o(k)$ を最小にするように探索される。最後に、Step3 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

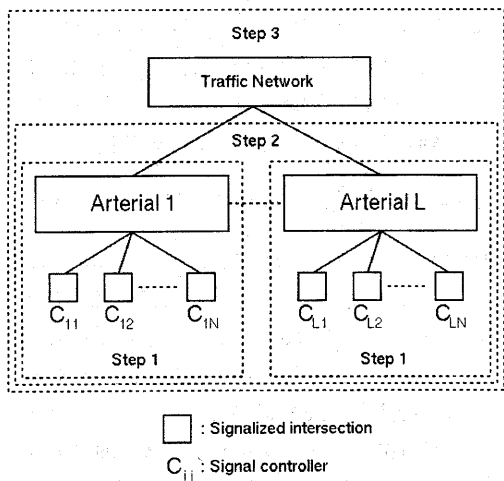


図2 信号制御アルゴリズムの階層構造

表1 信号制御アルゴリズムの評価関数

Step	Performance criteria
Step1	Minimize $J_a(k)$ c_y, r_g, t_{off}
Step2	Minimize $J_a(k)$ r_g, t_{off}
Step3	Minimize $J_n(k)$ t_{off}^*

で評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように求められる。

以上提案した信号制御システムと信号制御アルゴリズムを用いて広島県福山市内道路網でシミュレーションを実行した結果、現実のパターン選択法に関する測定値に比べて有効な制御結果を得ることができた⁹⁾ (図3参照)。

3. 動的経路誘導システム

動的経路誘導システムは、出発地(Origin)から目的地(Destination)までの最短平均OD旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路をドライバーに示すことにより特定経路への交通流の集中を防ぎ、交通渋滞を回避、および軽減するシステムである。このシステムでは平均OD旅行時間を評価関数として最適経路を探索する。

3.1 平均OD旅行時間の算定

各リンクの走行時間と停止時間は、交通流の状

況やオフセット制御の有無、下流側信号交差点での車の進行方向により異なるので、図4に示すような場合分けに基づいて解析する⁹⁾。

3.1.1 渋滞無し・オフセット制御有りの場合

オフセット制御により車は下流側信号交差点を青信号で通過し、最も円滑に走行できる。

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

リンク走行時間 t_{run} のみとなる。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} \quad (10)$$

ここで、リンク走行時間 t_{run} はリンク距離 d や待ち車列長 y_l 、リンク走行速度 v を用いて次式で求められる。

$$t_{run}(i, j, m, k) = (d - y_l) / v \quad (11)$$

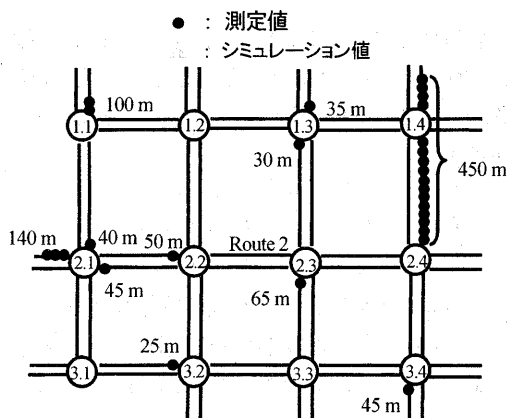


図3 直進車線に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

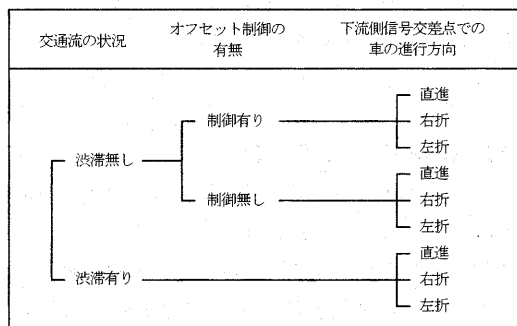


図4 リンク旅行時間解析の場合分け

ここで、式を簡潔に表現するために右辺の変数については添字を省略した。また、解析に用いる変数の意味と単位を表2に示す。

・停止時間

オフセット制御有りの場合でも全ての車が信号交差点で停止することなく通過できるわけではない。黄信号で交差点に到着した場合の停止時間と赤信号で到着した場合の停止時間の和に交差点停止割合 P_s を掛け、次式で求める。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y(t_y/2 + t_r + t_s) + P_r(t_r/2 + t_s) \} \quad (12)$$

但し、信号交差点が近接している道路では、赤信号時間が半分以上経過した段階で信号交差点に車が到着することは少なく（上流側信号交差点を右左折で通過した場合や交差街路から流入した場合を除く）、赤信号の初期の段階から停止するケースが多い。このような場合、停止時間は以下のように表せる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y(t_y/2 + t_r + t_s) + P_r(t_r + t_s) \} \quad (13)$$

ii) 下流側信号交差点を右折

・走行時間

リンク走行時間 t_{nm} に右折待ち車列捌け時間 t_{cr}

を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{nm} + t_{cr} \quad (14)$$

ここで、右折待ち車列捌け時間 t_{cr} は、右折車線の待ち車列台数 q_r と右折車線の交通処理量 ϕ_r を用いて次式で求められる。

$$t_{cr}(i, j, m, k) = q_r / 2\psi_r \quad (15)$$

・停止時間

対向直進交通量が多い場合、直進青現示から右折青現示までの遅れ時間 t_{dr} の1/2と発進遅れ t_s を加え、次式で求める。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dr}/2 + t_s \quad (16)$$

iii) 下流側信号交差点を左折

・走行時間

下流側信号交差点を右折するときと同様な考えで、リンク走行時間 t_{nm} に左折待ち車列捌け時間 t_{cl} を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{nm} + t_{cl} \quad (17)$$

ここで、左折待ち車列捌け時間 t_{cl} は次式で求められる。

$$t_{cl}(i, j, m, k) = q_l / 2\psi_l \quad (18)$$

・停止時間

横断歩行者が多い場合、直進青現示から左折青現示までの遅れ時間 t_{dl} の1/2と発進遅れ t_s を加え、以下のように表せる。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dl}/2 + t_s \quad (19)$$

3.1.2 渋滞無し・オフセット制御無しの場合

車は下流側信号交差点で青・黄・赤のいずれかの信号に遭遇する。青信号で交差点に到着した場合はそのまま直進通過できるが、黄または赤信号で到着した場合は一度停止し、次の青信号で通過できる。

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

黄または赤信号で交差点に到着した場合は、リ

表2 変数の意味と単位

変数	意味	単位
T_r, t_{nm}	リンク走行時間	(s)
T_s	リンク停止時間	(s)
P_s	交差点停止割合	
t_{cr}, t_{cl}, t_{dl}	直進・右折・左折待ち車列捌け時間	(s)
t_g, t_y, t_r	青・黄・赤信号時間	(s)
C_y	サイクル長	(s)
P_g, P_y, P_r	青・黄・赤信号の確率	
q_s, q_r, q_l	直進・右折・左折車線の待ち車列台数	(台)
ϕ_s, ϕ_r, ϕ_l	直進・右折・左折車線の交通処理量	(台/s)
t_{dr}, t_{dl}	直進青現示から右折・左折青現示までの遅れ時間	(s)
t_s	発進遅れ	(s)
α_r, α_l	青信号で下流側信号交差点を右折・左折できない確率	

リンク走行時間 t_{rm} に直進待ち車列捌け時間 t_{cs} を加え、以下のように表せる。

$$T_r(i, j, m, k) = P_g \cdot t_{rm} + P_y(t_{rm} + t_{cs}) + P_r(t_{rm} + t_{cs}) \quad (20)$$

ここで、直進待ち車列捌け時間 t_{cs} は次式で求められる。

$$t_{cs}(i, j, m, k) = q_s / 2\psi_s \quad (21)$$

・停止時間

青信号で交差点に到着した場合の停止時間は 0 である。黄または赤信号で交差点に到着した場合は、各々の停止時間をそれぞれ加え、以下のように表せる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_y(t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r(t_r / 2 + t_s) \quad (22)$$

ii) 下流側信号交差点を右折

・走行時間

リンク走行時間 t_{rm} に右折待ち車列捌け時間 t_{cr} を加え、以下のように表せる。直進青現示で交差点に到着する場合の内、対向直進車や歩行者などにより右折できない場合は右折待ち車列捌け時間 t_{cr} が加わる。

$$T_r(i, j, m, k) = P_g(t_{rm} + \alpha_r \cdot t_{cr}) + P_y(t_{rm} + t_{cr}) + P_r(t_{rm} + t_{cr}) \quad (23)$$

・停止時間

直進青現示で交差点に到着する場合は、走行通できる場合と停止する場合の期待値の和より求める。

$$T_s(i, j, m, k) = P_g\{\alpha_r(t_g / 2 + t_y + t_r + t_{dr} + t_s) + t_g(1 - \alpha_r) / 4\} + P_y(t_y / 2 + t_r + t_{dr} + t_s) + P_r(t_r / 2 + t_{dr} + t_s) \quad (24)$$

iii) 下流側信号交差点を左折

・走行時間

下流側信号交差点を右折するときと同様な考えで、リンク走行時間 t_{rm} に左折待ち車列捌け時間 t_{cl} を加え、以下のように表せる。

$$T_r(i, j, m, k) = P_g(t_{rm} + \alpha_l \cdot t_{cl}) + P_y(t_{rm} + t_{cl}) + P_r(t_{rm} + t_{cl}) \quad (25)$$

・停止時間

下流側信号交差点を右折するときと同様な考えで、以下のように表せる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_g\{\alpha_l(t_g / 2 + t_y + t_r + t_{dl} + t_s) + t_g(1 - \alpha_l) / 4\} + P_y(t_y / 2 + t_r + t_{dl} + t_s) + P_r(t_r / 2 + t_{dl} + t_s) \quad (26)$$

3.1.3 渋滞の場合

ここでは、信号制御は適切に行われ、信号交差点に青信号で到着した場合、その青信号を 1 回見送り、次の青信号で通過できると仮定する。詳細な解析については文献 7) を参照願いたい。

3.1.4 平均 OD 旅行時間

交通ネットワークの或る出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間 $T_{OD}(k)$ は、その経路に沿った平均リンク旅行時間の総和より次式で求められる。

$$T_{OD}(k) = \sum_i \sum_j \sum_m \{T_r(i, j, m, k) + T_s(i, j, m, k)\} \quad (27)$$

3.2 推奨経路探索アルゴリズム

都市道路網の出発地から目的地までの最短平均 OD 旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路を探索するアルゴリズムは以下のように示される。

Step 1: 旅行車のドライバーが車載の入力装置より現在地と目的地を入力する。

Step 2: 推奨経路の平均 OD 旅行時間算定に必要な最新交通情報（待ち車列長、走行速度、信号現示など）をオンライン入力する。

Step 3: 平均リンク旅行時間を重みとして平均 OD 旅行時間を算定し、動的経路探索アルゴリズムを用いて現在地から目的地までの推奨経路を求める。

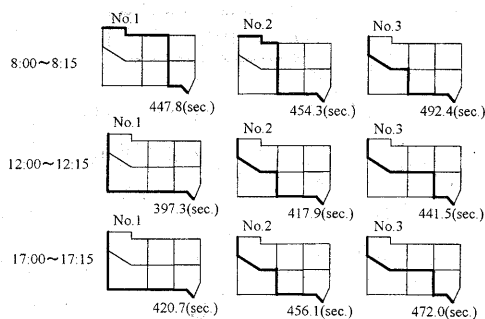


図4 推奨経路探索アルゴリズムより求めた各時間帯の推奨経路

Step 4: 出発地から目的地までの最短平均 OD 旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路を車載の出力装置に表示する。

ドライバーは複数の推奨経路の中から経路を選択し走行するものと仮定する。

以上提案した平均 OD 旅行時間の算定と推奨経路探索アルゴリズムを用いて広島県福山市内道路網でシミュレーションを実行した結果を図4に示す。図4のNo.1の経路はどの時間帯においても交通量の多い国道2号線（中央の東西方向の道路）を避け、右左折回数も少なくなっている。

4. 交通流円滑化システム

4.1 交通流円滑化システム

都市道路網内の渋滞長の総和を最小にする信号制御システムと、都市道路網の出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間を短縮する動的経路誘導システムをリアルタイムで結合させた交通流円滑化システムを図5に示す。

4.2 交通流円滑化アルゴリズム

信号制御システムと動的経路誘導システムをリアルタイムで結合させた交通流円滑化システムの制御アルゴリズムは以下のように示される。

Step 1: 交通流円滑化システムのパラメータや評価関数、初期条件などを設定する。

信号制御システム

Step 2: 車両感知器より得られた待ち車列長や走

行速度、交通量の測定値を信号制御アルゴリズムに入力する。

Step 3: 信号制御アルゴリズムを用いて渋滞長の総和に関する評価関数を最小にする三つの信号制御パラメータを求める。そして、求められた信号制御パラメータと車両感知器より得られた測定データを交通流円滑化システムのメモリに入力する。

Step 4: 三つの信号制御パラメータを用いて交通信号機を制御し、交通ネットワーク内の渋滞長の総和を最小にする。

動的経路誘導システム

Step 5: ドライバーは、車載入力装置から現在地と目的地を入力する。

Step 6: 待ち車列長や走行速度、信号制御パラメータなどを用い推奨経路探索アルゴリズムより求められた推奨経路を平均 OD 旅行時間の短い順にソートし、車載出力装置に表示する。

Step 7: ドライバーは、出力された複数の推奨経路の中から目的地までの経路を選択する。

5. まとめ

本稿では、都市道路網の主要道路で日常的に発生している交通渋滞を総合的に解消、または軽減する交通流円滑化システムを提案した。本研究の内容を要約すると以下になる。

① 都市道路網内の渋滞長の総和をリアルタイムで最小にする信号制御システムを構成した。

② 出発地から目的地までの複数の推奨経路をドライバーに出力し、特定経路への交通流の集中を防ぐ動的経路誘導システムを構成した。

③ 信号制御システムと動的経路誘導システムをリアルタイムで結合させ、都市道路網内の交通流を総合的に円滑にする交通流円滑化システムを提案した。

今後、広島県福山市内道路網を対象に交通流円滑化システムのシミュレーションを実行し、有効性や問題点などについて考察する予定である。

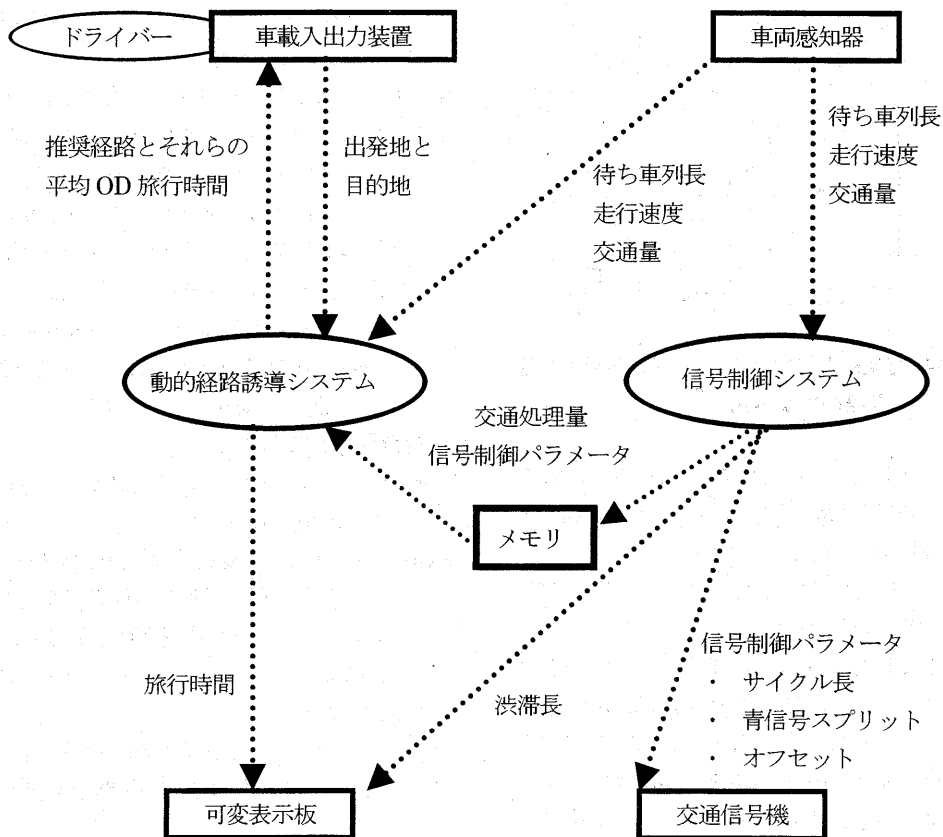


図 5 交通流円滑化システム

参考文献

- 1) 交通工学統計：交通工学，Vol.36，No.5，p.85 (2001).
- 2) 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).
- 3) 海老原：交通システム工学（2），コロナ社，pp.132-133(1985).
- 4) 塙 克郎：交通信号，技術書院，pp.56-67(1966).
- 5) Ishikawa, H., Shimizu, H., Sobata, Y. and Kobayashi, M.: Congestion Control System in Urban Road Networks, Preprints of the 10th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Tokyo, pp.247-252(2003).
- 6) 小林，清水：交通流の円滑生の解析，計測と制御，Vol.41，No.3，pp.181-186(2002).
- 7) 小林，清水，馬屋原，石川：交通ネットワークにおける OD 旅行時間の解析と算定、情報処理学会研究報告、Vol.2002，No.48，pp.1-8(2002).
- 8) 小林，清水，米澤，難波：交通ネットワークの動的経路探索アルゴリズム，第 17 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.169-172(1997).