

# 交通工学と制御工学の統合による 交通流制御システムの設計

清水 光\* 小林 正明\*\* 藤井 温子\*\*\* 石川 洋\* 川久保 和雄\* 新谷 敏朗\*

A Design of Traffic Flow Control System Based on Unity between  
Traffic Engineering and Control Engineering

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

## ABSTRACT

This paper proposes the signal control system, dynamic route guidance system and traffic flow control system from the system-theoretic view point which unifies the traffic engineering and the control engineering. The capacity which determine the upper limit of the outgoing volumes for the volume balance is influenced by the road design such as the lane number, legal speed and channelizing island. The large scale control system of a traffic network described by a nonlinear time-varying discrete dynamic system is synthesized by using the three-level hierarchical control. As examples of the unity between the traffic engineering and the control engineering, the signal control system, dynamic route guidance system and traffic flow control system are constructed and evaluated about their effectiveness in a traffic network.

キーワード：道路設計，交通解析，交通流ダイナミクス，階層制御，システム最適化

Keywords: road design, traffic analysis, traffic flow dynamics, hierarchical control, system optimization

## 1. はじめに

自動車は、貨物輸送や商用、通勤、通学、買い物、旅行、趣味などの目的で広く利用され、現代社会において欠くことのできない交通機関となっている。ガソリン自動車は、1885年にドイツのダイムラーによって発明されたと言われている<sup>1)</sup>。その後、数多くの改良が加えられて現在の高性能で高能率な自動車となっている。

自動車交通の特長は、ドア・ツ・ドアの輸送や時間の制約がない、快適な車内、高速走行などが挙げられる。また、近年の経済の発展や生活水準の向上、道路の整備、自動車の技術革新、女性ドライバーの増加などに伴って、我が国の自動車保有台数は図1に示されるように増加の一途をたどり、2002年には約7,730万台に達している<sup>2)</sup>。この図で年増加率は前年比で表されている。その結果、都市地域の

主要道路を中心に朝夕のラッシュ時に交通量が増加し、交通渋滞が日常的に発生している。

交通渋滞の発生により、旅行時間や燃料消費、大気汚染などが増加し、交通事故の一因になっていると言われてい。社会的にマイナス要因となる交通渋滞を解消、または、軽減する対策として、道路の整備<sup>3)</sup>や交差点の改良、交通規制、信号制御<sup>4)-8)</sup>、動的経路誘導<sup>9),11)</sup>、交通需要管理<sup>12),13)</sup>などが挙げられる。これらのうち、信号制御システムと動的経路誘導システムは、時々刻々と変動する交通流ダイナミクスに応じて、リアルタイムで渋滞長を制御したり最適経路を探索するのに適している。交通工学では、交通流をスタティックシステムで表現し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)は個別に制御される。また、制御工学では理想的に仮定された一方向交通ネットワークの待ち車列長を青信号スプリットの

\*情報処理工学科 \*\*機械システム工学科 \*\*\*弓削商船高等専門学校

分散制御によりバランス化する方法が提案されている<sup>9)</sup>。そこで、交通ネットワークの信号制御システムでは、信号交差点の流入交通量や待ち車列台数の時間変動に応じて、広範囲にきめ細かく3つの信号制御パラメータを統一的にリアルタイムで探索できるアルゴリズムの開発が望まれている<sup>7,8)</sup>。交通ネットワークの動的経路誘導システムでは、リンクの交通流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などを考慮に入れてリンク旅行時間を精度良く解析することが望まれている<sup>9,10)</sup>。

本稿では、与えられた道路条件と交通条件のもとで、時々刻々と変動する交通ネットワークの交通量や待ち車列長をダイナミックシステムで表現し、交通工学と制御工学を統合する観点から、一貫性を持って交通流を制御するシステム理論的手法について提案する。最初に、交通流を制御するシステムの構造を決定する道路設計、ならびに交通流の円滑性・安全性の解析やモデリングの基礎となる交通解析について考察する。つぎに、各信号交差点における渋滞長の信号制御システムを車線単位、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表現し、フィードバック制御を用いて構成する。交通ネットワークの渋滞長制御システムを大規模システムの3レベル階層制御を用いて、3つの信号制御パラメータの最適化問題として定式化する。最後に、交通工学と制御工学の統合例として、信号制御システムと動的経路誘導システムの構成や機能、有効性などをシミュレーションにより示し、これら2つのシステムをオンラインリアルタイム結合させた交通流制御システムの構成や制御アルゴリズムについて提案する。

## 2. 交通工学

交通工学は、旅客および貨物の安全、便利かつ経済的な輸送と関連して、道路、街路およびそれに接する土地の計画と幾何学的設計、ならびにその上の交通の運営をあわせて取り扱う工学の分野であると定義されている<sup>14)</sup>。ここでは、交通工学の中で交通流の円滑化と安全性に関係する道路設計と交通情報の解析について考察する。

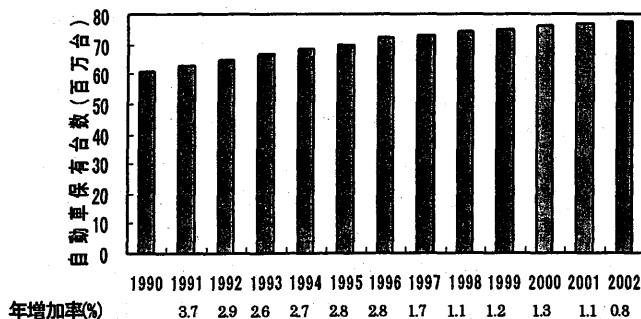


図1 自動車保有台数の増加

## 2.1 道路設計

道路の第1種から第4種までの種別と1級から5級までの級別は、その道路の性格や地域、地形および計画交通量(台/日)によって適用すべき基準が定まり、それによって、道路の横断構成や設計速度が定められる。車線の幅員は、道路構造令によって道路の種別級別毎に規定されている。道路の中心線が3次元的に描く線の形状を表す道路の線形には、平面線形と縦断線形がある。道路の中心線の形状を平面的にみたものを平面線形、縦断面にみたものを縦断線形という。道路の線形は、建設費や設計・施工の難易を左右するだけでなく、自動車の走行の安全性や快適性、経済性にも影響する。道路の種別や級別、設計速度、車線幅員、車線数、側方余裕の設計値によって、リンクの交通容量が決定される。ここで、交通容量は、与えられた道路条件と交通条件のもとで交通を通することができる道路の能力と定義される<sup>15)</sup>。

交差点では交差の種類や導流島の有無、車線構成などによって交通容量が決定される。図2の斜め信号交差点では国道2号線と交差道路が鋭角で交差している。そのために導流島が設置されて左折交通の円滑化が図られ、国道2号線からの右折が禁止されている。東行き流入路は直進3車線、左折1車線から構成されているのに対して、西行き流入路は直進1車線が直左1車線に置き換えられている。また、南行き流入路は右折2車線、直進1車線、直左1車線から構成されているのに対して、北行き流入路は右折が1車線減少している。このように各信号交差点の構造や機能、

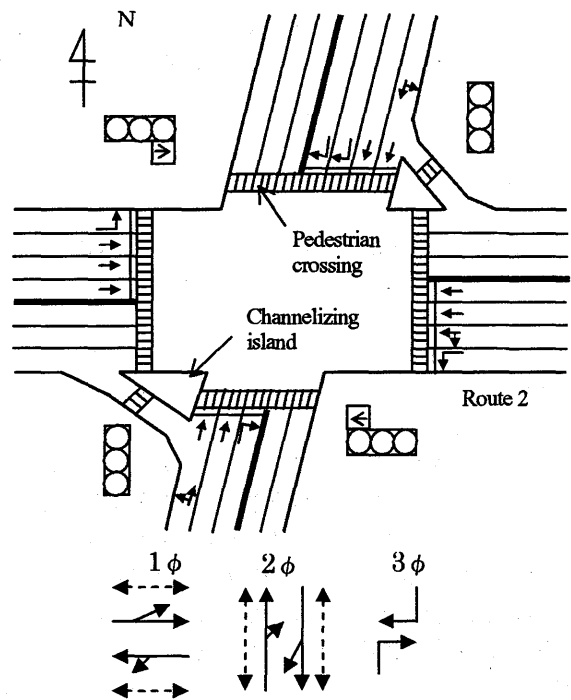


図2 斜め信号交差点

交通流などを反映して各車線が構成されている。

現示数は 1φ, 2φ, 3φ の 3 現示から構成され、実線は車に対する現示で、破線は歩行者に対する現示をそれぞれ表している。ここで、現示は、信号表示によって同時に通行権を与える、ある交通流あるいは交通流の組み合わせとして定義される<sup>15)</sup>。1φ で国道 2 号線の直進、左折の通行と歩行者の横断が認められ、2φ で交差道路の直進と右折、歩行者の横断が認められている。また、3φ で交差道路の右折の通行が認められている。国道 2 号線と交差する道路からの左折交通は、導流島が設けられているので、他の通行を妨げなければいづれの現示においても通行が認められている。

信号交差点の各流入路の交通容量は、車線幅員が 3.0m 以上で十分大きな値であると仮定すると、車線別に以下のように解析される。

$$c_{xl}(i, j, m, k) = s_l n_l(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_b(i, j, m, k) \cdot r_c(i, j, m, k) \quad (1)$$

$$c_{xs}(i, j, m, k) = s_s n_s(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_c(i, j, m, k) \quad (2)$$

$$c_{xsl}(i, j, m, k) = s_s n_{sl}(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_b(i, j, m, k) \cdot r_c(i, j, m, k) \quad (3)$$

$$c_{xr}(i, j, m, k) = s_r n_r(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_c(i, j, m, k) \quad (4)$$

$c_{xl}(i, j, m, k)$ ,  $c_{xs}(i, j, m, k)$ ,  $c_{xsl}(i, j, m, k)$ ,  $c_{xr}(i, j, m, k)$  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、 $r_l(i, j, m, k)$ ,  $r_b(i, j, m, k)$ ,  $r_c(i, j, m, k)$ ,  $r_r(i, j, m, k)$  は大型車混入率、バス運行頻度、側方余裕、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  $\Psi_x(i, j, m, k)$  が求まる。信号交差点の交通処理量は、実際の道路、交通およ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であると定義する。各流入路の交通処理量はあ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。

## 2.2 交通解析

現実の交通ネットワークにおいて信号制御システムや動的経路誘導システム、これら 2 つのシステムをオンラインリアルタイム結合させた交通流制御システムなどを開発設計するために交通情報を解析する必要がある。交通情報は時間的に変動しない静的交通情報と時々刻々と変動する動的

交通情報に分類される。

リンクの静的交通情報には、リンク長や車線数、車線幅員、側方余裕、道路の線形、交通規制（法定速度、一方通行）などがあり、信号交差点の静的交通情報には、交差形状、導流島、車線構成、右折禁止、現示などがある。広島県福山市内交通ネットワークにおける幾つかの静的交通情報を図 3、図 4、図 5 に示す。

リンク車線数は、図 3 に示されるように国道 2 号線が 3 車線、国道 313 号線が 2 車線、福山駅前通りが 4 車線とな

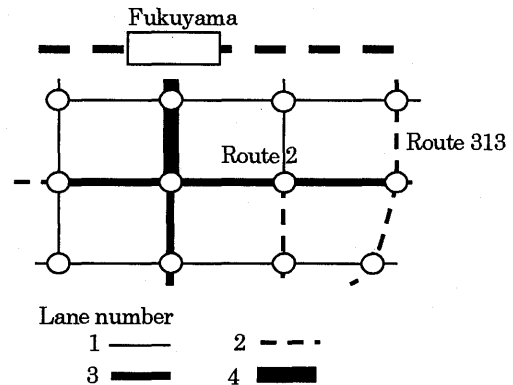


図 3 福山市内交通ネットワークの車線数

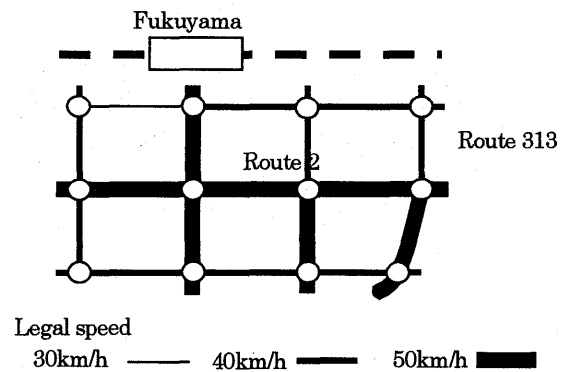


図 4 福山市内交通ネットワークの法定速度

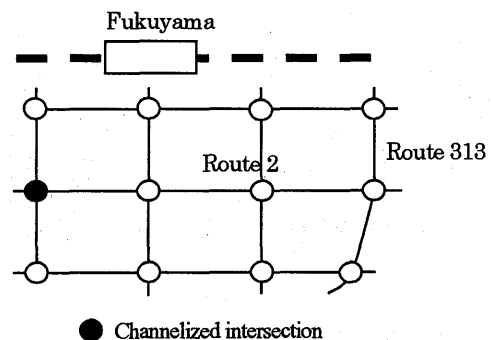


図 5 福山市内交通ネットワークの交差形状

っており、それ以外のほとんどのリンクは1車線となっている。車の走行速度を決定する法定速度は、図4に示されるように国道2号線など2車線以上のリンクで50km/hとなっているが、半数以上のリンクが1車線で40km/hとなっている。信号交差点の交差形状は、図5に示されるように交通ネットワークが格子状になっており、十字交差とT字交差で構成されている。国道2号線上で車線数が2車線から3車線に変化する1つの信号交差点において、国道2号線からの左折交通を円滑にするために導流島が設置されている。

リンクの動的な交通情報には、走行速度や旅行時間、交通規制(専用レーン、優先レーン)などがあり、信号交差点の動的な交通情報には、交通量や待ち車列長、信号制御パラメータなどがある。福山市内交通ネットワークにおける幾つかの動的な交通情報を図6と図7に示す。

図6は、図8の福山市内交通ネットワークの(2,1)信号交差点における4流入路の直進交通量の変動を朝夕のラッシュ時にサイクル長単位で示す。国道2号線上の直進交通量(m=1, m=4)が、それに交差する道路の直進交通量(m=2, m=3)の約3倍から4倍と多く、東行き交通(m=1)で

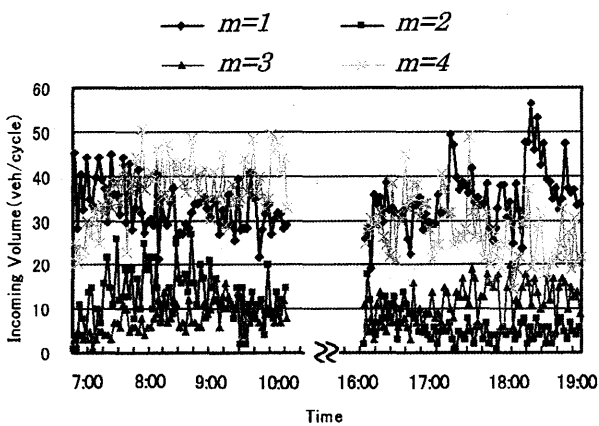


図6(2,1)信号交差点における直進車の流入交通量

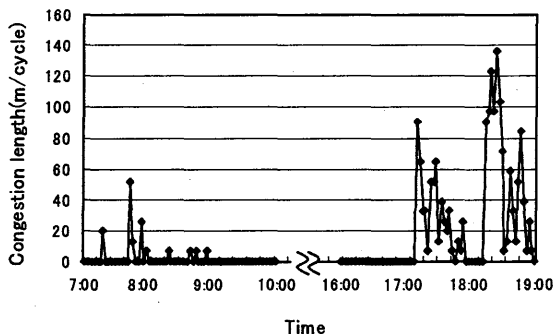


図7(2,1)信号交差点における東行き交通(m=1)の直進車線に対する渋滞長

は流入交通量が18時10分すぎに急増していることがわかる。図7は、同じく(2,1)信号交差点における東行き交通の直進車線で発生する渋滞長の変動を示す。流入交通量が急増する夕方のラッシュ時に最大約140mの渋滞が発生している。

### 3. 制御工学

自動制御は、制御すべき量を目標値と一致させるために、その量を検出し目標値と比較し、その差異に応じた訂正動作を自動的に行わせることと定義される<sup>16)</sup>。ここでは、交通ネットワークの信号交差点における渋滞長を交通量や待ち車列台数の時間変動に対応して信号現示で自動制御する問題について考察する。

#### 3.1 交通流ダイナミクス

2方向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、ある時間 $\Delta T$ (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。

$$x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) - x_o(i, j, m, k) \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_o(i, j, m, k) = \xi(i, j, m, k) \cdot \psi_x(i, j, m, k) \\ x_e(i, j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

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。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、捌け交通量を表し、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、

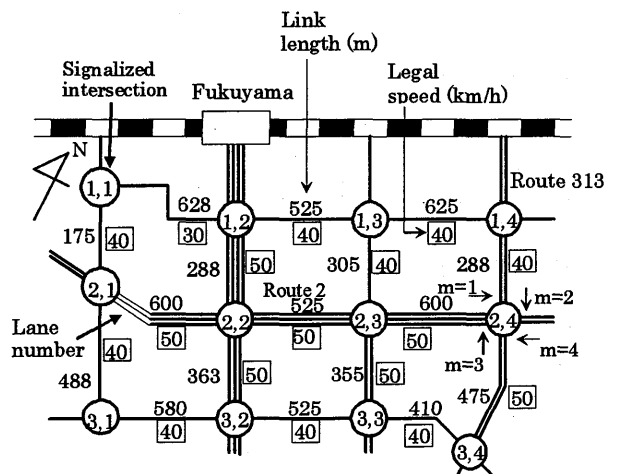


図8 福山市内交通ネットワーク

消滅のメカニズムは(5)式に基づいて定量的に記述される。(6)式の  $\Psi_x(i,j,m,k)$  は各流入路の交通処理量,  $\xi(i,j,m,k)$  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よぶ。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。

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

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。なお, 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し車種構成によって変動する。

### 3.2 大規模システムの制御

多くのリンクや流入路, 信号交差点から構成される2方向交通ネットワークの渋滞長制御は, 宇宙ステーションや原子力発電プラント, 電力システムなどの制御と同様に, 大規模システムの制御問題である。

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構成される<sup>7)</sup>。制御偏差  $e(i,j,m,k)$  を次式で定義する。

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

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般に一律ではなく, 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。

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

2方向交通ネットワークの渋滞長信号制御システムの問題は, 流入交通量  $x_i(i,j,m,k)$  が車両感知器よりサイクル長単位で入力されると仮定すると, (7)式を制約条件とし, 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問題に帰着させることができる。

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

ここで,  $N$  と  $L$  は交通ネットワークの東西南北方向の信号交差点数をそれぞれ表す。

研究の対象とした図8の福山市内交通ネットワークでは, リンクの車線数や法定速度, 交通規制, ならびに信号交差点の交差形状や車線構成, 現示, 流入交通量などが位置によって異なり, 制御パラメータも多いため, 渋滞長の信号制御に階層制御を用いる<sup>17)</sup>。

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<sup>7)</sup>を用い, (10)式で表される2方向交通ネットワークの評価関数  $J_n(k)$  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<sup>8)</sup>。

ネットワーク制御アルゴリズムの各Stepは, 図9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  $c_j(i,j,m,k)$  が2方向交通幹線道路の評価関数  $J_n(k)$  を最小にするようにバランス制御アルゴリズムを用いて探索される。つぎに, 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  $J_n(k)$  を最小にするようにバランス制御アルゴリズムを用いて探索される。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で評価関数  $J_n(k)$  を最小にするように求められる。このようにネットワーク制御アルゴリズムは, 3つの信号制御パラメータを制約条件のもとで最適化する3レベルの階層制御となる。

### 4. 交通工学と制御工学の統合例

交通工学は, 交通ネットワークを構成するリンクや信号交差点の構造および機能を設計する学問分野であり, 信号制御システムや動的経路誘導システム, 交通流制御システムの基本的な静的構造を決定する。それに対し, 制御工学は, 交通ネットワークの交通流をダイナミックシステムで表現し, 制御システムの評価関数を最適化するような制御

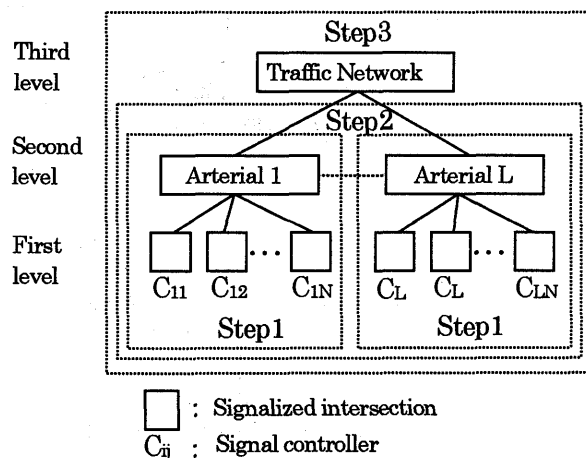


図9 ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造

入力を自動的に探索する学問分野であり、信号制御システムや動的経路誘導システム、交通流制御システムを最も効率よくリアルタイムで稼働させる。ここでは、これら2つの学問分野をシステム理論的手法により統合させた3つのシステムの構成や機能、ならびに有効性などについて考察する。

#### 4.1 信号制御システム

交通ネットワークの信号制御システムは、図10に示される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、ネットワーク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。

図8に示される広島県福山市内2方向交通ネットワークにおいて、主要幹線道路である国道2号線が市内の中心部を東西方向に通じ、(2,1)から(2,4)信号交差点までは片側3車線、法定速度は50 km/hとなっている。また、南北方向の幹線道路として、JR福山駅から南に延びる道路と、(1,4)、(2,4)、(3,4)信号交差点を通過する合計2本の道路があり、対象となる信号交差点は全部で12地点ある。

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、(7)式の渋滞長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。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、超過流入交通量などは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、合計9つ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、全ての信号交差点の全流入路の渋滞長を0 mに制御することができた。このことより、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、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。また、渋滞流や非渋滞流の交通流、単独信号交差点や幹線道路、都市道路網の制御対象にかかわらず一貫性をもって使用できる信号制御システムと信号制御アルゴリズムであることがシミュレーションより確かめられた<sup>18)</sup>。

#### 4.2 動的経路誘導システム

交通ネットワークの動的経路誘導システムは、図10に示されるようにドライバーが車載入出力装置より出発地と目的地をオンライン入力し、経路探索アルゴリズムを用いて最短旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路を探索し、推奨経路とそれらの平均OD旅行時間を車載入出力装置にリアルタイムで出力する。ここで、複数の推奨経路を探索するのは、2つの経路の間で時間的に交互に振動するような不安定性を避けるためである。ドライバーは複数の推奨経路の中から最も適当と判断した経路を選択し走行する。また、

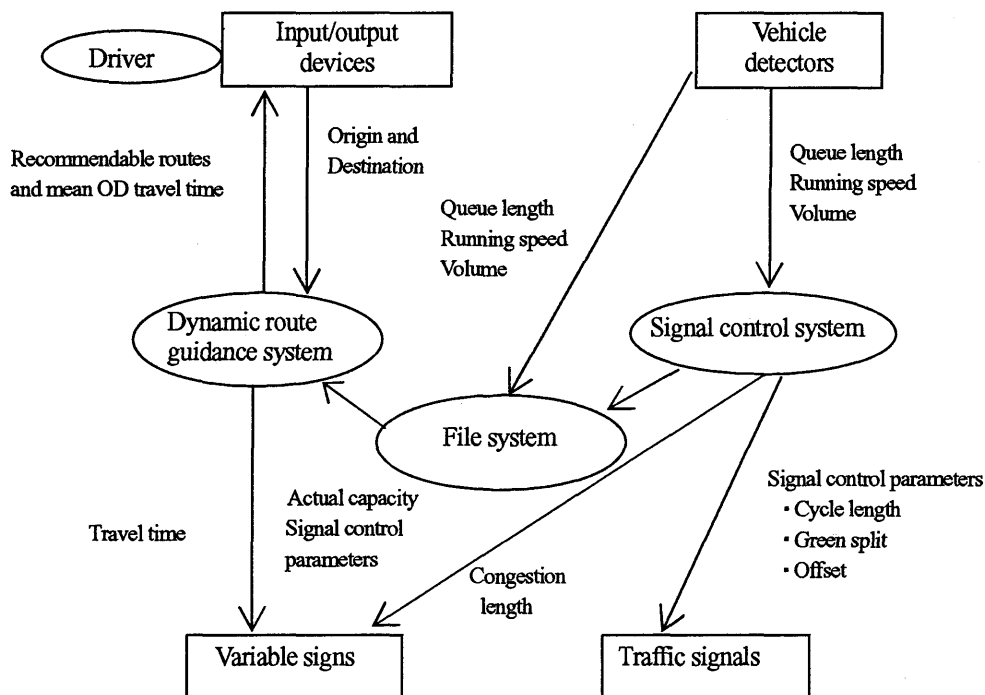


図10 交通流制御システムの構成

利用頻度の大きい主要な OD 旅行時間を可変表示板にリアルタイムで出力し、一般のドライバーに供する。これらの情報に基づいて特定リンク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り、信号制御システムの制御入力の限界（飽和特性）を補完する。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ので、その構成単位である平均リンク旅行時間を精度良く解析することが必要である。

#### 4.2.1 平均リンク旅行時間の解析

各リンクの旅行時間を構成する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 11 に示すような場合分けに基づいて解析する<sup>9),10)</sup>。ここで、走行時間は車が実際に動いている時間であり、停止時間は赤信号や渋滞、右左折待ちなどにより車が静止している時間である。

図 11 の場合分けの内、渋滞なし・オフセット制御有りの場合における平均リンク旅行時間について以下で解析する。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。

##### i) 下流側信号交差点を直進

###### ・走行時間

リンク走行時間  $t_{run}$  に直進待ち車列捌け時間  $t_{cs}$  を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = (1 - P_s)t_{run} + P_s t_{cs} \quad (11)$$

ここで、交差点停止割合  $P_s$  はオフセット制御に基づいて算定され、リンク走行時間  $t_{run}$  はリンク長  $d$  や待ち車列長  $y_s$ 、リンク走行速度  $v$  を用いて次式で求められる。

$$t_{run}(i, j, m, k) = (d - y_s) / v \quad (12)$$

また、直進待ち車列捌け時間  $t_{cs}$  は、直進車線の待ち車列台数  $q_s$  と直進車線の交通処理量  $\psi_{xs}$  を用いて次式で求められる。

$$t_{cs}(i, j, m, k) = q_s / 2\psi_{xs} \quad (13)$$

Traffic Flow	Offset Control	Moving Direction at Downstream Signalized Intersection
non-congestion	control	straightaway
		right-turn
congestion	non-control	left-turn
		straightaway
		right-turn
		left-turn
		straightaway
		right-turn
		left-turn

図 11 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、待ち車列長  $y_s(i, j, m, k)$  のダイナミクスは、(5)式の交通量収支において超過流入交通量  $x_e(i, j, m, k)$  を任意の時刻の待ち車列台数に置き換え、距離に換算することによりサイクル長単位で記述される。平均リンク旅行時間の解析に用いられる変数の意味と単位を表 1 に示す。

##### ・停止時間

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。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r (t_r / 2 + t_s) \} \quad (14)$$

ここで、 $P_y$  と  $P_r$  は  $t_y / C_y$ 、 $t_r / C_y$  でそれぞれ求められる。また、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下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。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r (t_r + t_s) \} \quad (15)$$

##### ii) 下流側信号交差点を右折

###### ・走行時間

リンク走行時間  $t_{run}$  に右折待ち車列捌け時間  $t_{cr}$  を加え、次式で求める。

表 1 変数の意味と単位

$T_r, t_{run}$	Link running time	(s)
$T_s$	Link stopping time	(s)
$P_s$	Stopping rate at the downstream signalized intersection	
$t_{cs}, t_{cr}, t_{cl}$	Outgoing time of straightaway, right-turn and left-turn lane queues	(s)
$t_y, t_r$	Yellow time and red time	(s)
$C_y$	Cycle length	(s)
$P_y, P_r$	Probability of yellow time and red time	
$q_s, q_r, q_l$	Queueing number of vehicles of straightaway, right-turn and left-turn	(veh.)
$\psi_{xs}, \psi_{xr}, \psi_{xl}$	Actual capacity on the approach of straightaway, right-turn and left-turn lanes	(veh./s)
$t_{dr}$	Time difference of green initiation between straightway and right-turn directions	(s)
$t_{dl}$	Time difference of green initiation between straightway and left-turn directions	(s)
$t_s$	Starting delay	(s)

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cr} \quad (16)$$

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  $\Psi_{xr}$  を用いて次式で求められる。

$$t_{cr}(i, j, m, k) = q_r / 2\Psi_{xr} \quad (17)$$

・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。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dr} / 2 + t_s \quad (18)$$

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  $t_{run}$  に左折待ち車列捌け時間  $t_{cl}$  を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cl} \quad (19)$$

ここで、左折待ち車列捌け時間  $t_{cl}$  は次式で求められる。

$$t_{cl}(i, j, m, k) = q_l / 2\Psi_{xl} \quad (20)$$

・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。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dl} / 2 + t_s \quad (21)$$

渋滞なし・オフセット制御無し、ならびに渋滞の場合における平均リンク旅行時間も、同様に走行時間と停止時間に分けて解析する<sup>10)</sup>。

交通ネットワークのある出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間  $T_{OD}(k)$  は、以上の解析のに基づき、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。

$$T_{OD}(k) = \sum_i \sum_j \sum_m \{T_r(i, j, m, k) + T_s(i, j, m, k)\} \quad (22)$$

#### 4.2.2 経路探索アルゴリズム

交通ネットワーク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出力装置より出発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, 交通量, 交通処理量, 信号制御パラメータなど) をファイルシステムからオンライン入力する。

Step 3: 4.2.1 で述べた解析に基づいて平均リンク旅行時間を算定し、ダイクストラ法<sup>19)</sup>を用いて出発地から目的地までの幾つかの推奨経路を平均 OD 旅行時間の短い順に探索する。

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入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最も適当と判断した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 旅行時間の解析と経路探索アルゴリズムを用いて図 8 に示される広島県福山市内交通ネットワークでシミュレーションを実行した。シミュレーションはリンク旅行時間の測定データ数の制約から 15 分単位で行った。図 11 のリンク旅行時間解析の場合分けは、試験車走行法による測定結果に基づき以下のように行った。渋滞の有無は渋滞に起因する停止回数に基づき、また、オフセット制御の有無は赤信号に起因する停止回数に基づき、それぞれ半別した。リンク走行速度  $v$  と待ち車列台数  $q$  は、各経路、各時間帯におけるリンク毎の測定値の平均値を用いた。発進遅れ  $t_s$  は待ち車列台数と発進遅れの散布図から得られた一次式でそれぞれ求めた。オフセット制御有りの場合の交差点停止割合  $P_s$  は、測定データ数の制約と単純化のため非常に小さく無視できると仮定した。以上の解析に基づいて求めた平均リンク旅行時間および平均 OD 旅行時間の算定値と試験車走行法による測定値の相対誤差は、いずれも  $\pm 10\%$  以内に納まった<sup>10),20)</sup>。出発地を(1,1)信号交差点、目的地を(3,4)信号交差点として朝夕のラッシュ時と正午の

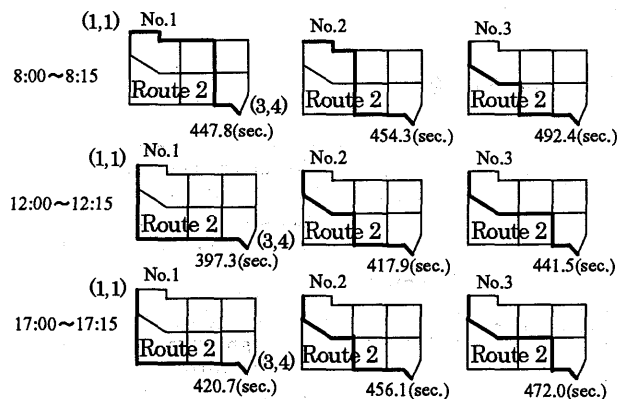


図 12 経路探索アルゴリズムより求めた各時間帯の推奨経路



シミュレーション結果を図 12 に示す。図 12 の No.1 の最短平均 OD 旅行時間経路は、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、停止時間を短縮するために右左折回数も少なくなっている。このようにファイルシステムのオンライン交通情報を用いて、ドライバーの出発地から目的地までの推奨経路を探索することができる。

### 4.3 交通流制御システム

交通ネットワークの渋滞長の総和を最小にする信号制御システムと、交通ネットワークを利用するドライバー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オンラインリアルタイムで結合させた交通流制御システムの構成は図 10 で示される。このシステムにより、信号交差点の流入交通量や捌け交通量の時間変動に対応して渋滞長や OD 経路をリアルタイムで効果的に制御し、交通ネットワークの交通流の円滑化を総合的に計ることが可能になる。交通流制御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: 交通流制御システムのパラメータや初期値などを設定する。

#### 信号制御システム

Step 2: 車両感知器よりサンプリング周期  $\Delta T$  でオンライン入力された走行速度や待ち車列長、交通量の測定値をネットワーク制御アルゴリズムに入力する。

Step 3: ネットワーク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 3 つの信号制御パラメータの最適値を求める。求められた最適信号制御パラメータと車両感知器より入力された測定データを交通流制御システムのファイルシステムに入力する。

Step 4: 3 つの最適信号制御パラメータを用いて交通信号機の現示（表示時間）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。また、主要信号交差点の渋滞長を可変表示板に表示する。

以上の Step 2 から Step 4 までの処理をサンプリング周期  $\Delta T$  で常時実行する。

#### 動的経路誘導システム

Step 5: ドライバーは、車載入出力装置から出発地と目的地を経路探索アルゴリズムに入力する。

Step 6: 走行速度や待ち車列長、交通量、最適信号制御パラメータなどをファイルシステムより経路探索アルゴリズムに入力し、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、車載入出力装置に表示する。また、利用頻度の大きい主要な OD 旅行時間を可変表示板にリアルタイムで表示する。

Step 7: ドライバーは、出力された複数の推奨経路の中から最も妥当と判断した目的地までの走行経路を選択する。

以上の Step 5 から Step 7 までの一連の処理はドライバーの要求時に稼働し、主要な OD 旅行時間の算定と表示はサンプリング周期  $\Delta T$  で常時実行する。

交通流制御アルゴリズムの処理手順を示すと図 13 のようになる。

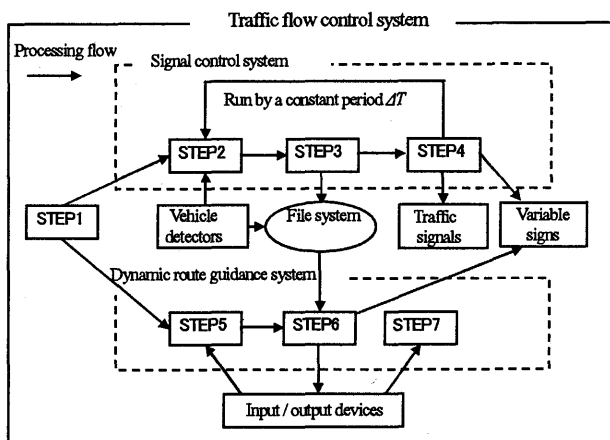
## 5. まとめ

本稿では、交通ネットワークの交通流を円滑にするダイナミックシステムの制御について交通工学と制御工学を統合するシステム理論的観点から提案した。交通工学は交通ネットワークにおける交通流ダイナミック制御システムの構造を決定する道路や信号交差点の設計、ならびに交通解析を担う学問分野であり、制御工学は交通ネットワークの交通流ダイナミクスの記述とオンラインリアルタイム制御を担う学問分野であるといえる。

システム理論的手法を用いて交通ネットワークの信号制御システムや動的経路誘導システムが有効に機能することをシミュレーションにより確かめた。また、これら 2 つのシステムをオンラインリアルタイムで結合し、交通ネットワークの交通流の円滑化を総合的に、また効果的に計れるシステム構成と制御アルゴリズムについて提案した。主な研究結果は以下のようにまとめられる。

(i) 交通ネットワークの交通流ダイナミクスの基礎となる交通量収支において、捌け交通量の上限値を決定する交通処理量は、ある交通条件と信号制御条件のもとで車線構成や車線幅員、導流島、法定速度などの道路設計によって決定される。

(ii) 交通ネットワークの静的、動的交通情報の解析は、交通ネットワークの交通流制御システムの解析やモデリング、シミュレーションにおいて基礎的役割を果たす。



(iii) 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かかわらず一貫性をもって有効に働くことを確認した。

(iv) システム理論的観点から交通工学と制御工学を統合した例として、交通ネットワークにおける信号制御システムと動的経路誘導システムの構成や機能、有効性などについて示した。また、これら 2 つのシステムをオンラインリアルタイム結合させた交通流制御システムの構成と制御アルゴリズムの有効性について提案した。

以上の研究結果は、ITS（高度道路交通システム）の発展の一つの基礎になるものと考えられる。

今後の課題として以下の点が考えられる。動的経路誘導システムの平均 OD 旅行時間のシミュレーション精度をリアルタイムで正確に求めるために、サイクル長単位で旅行時間を測定する。また、現在すでに開発されている信号制御システムと動的経路誘導システムの双方をオンラインリアルタイムで結合させ、交通流制御アルゴリズムが現実の交通ネットワークにおいてどのように機能するかをシミュレーションにより検討する。

#### 参考文献

- 1) 樋口健治他編集, 自動車の事典, 朝倉書店, p.4 (1978).
- 2) 交通工学統計, 交通工学, Vol.39, No.1, pp.84-85 (2004).
- 3) 鈴木道雄編著, 道路 (II) - 計画と幾何設計 -, 技報堂出版, pp.53-78 (1980).
- 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) E.J. Davison and Ü Özgüner, Decentralized Control of Traffic Networks, IEEE Trans., AC-28, pp.677-688 (1983).
- 6) 宇佐美, 榊原, 道路網の信号制御システム, 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.205-210 (2002).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) 小林, 清水, 石川, 藤井, 都市道路網における旅行時間の解析と算定, 第 3 回 ITS シンポジウム 2004, pp.383-389 (2004).
- 11) 天目, 山口, 道路網の動的経路誘導システム, 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.211-216 (2002).
- 12) 東京都環境局自動車公害対策部, 東京都におけるロードプライシングの検討状況について, 交通工学, Vol.37, No.1, pp.41-48 (2002).
- 13) 本間正勝, ロンドンのロードプライシング, 交通工学, Vol.39, No.6, pp.74-81 (2004).
- 14) 米谷栄二監修, 交通工学, 国民科学社, p.3 (1977).
- 15) 交通工学用語辞典, 技術書院 (1984).
- 16) 田中正吾 編著, 制御工学の基礎, 森北出版, p.4 (1996).
- 17) 田村坦之編, 大規模システム, 昭晃堂, pp.65-71 (1986).
- 18) M.Kobayashi, H.Shimizu, H.Fujii and H.Ishikawa : Signal Control of Traffic Flow Dynamics in Urban Traffic Networks, SICE Annual Conference 2005, Okayama, PP.1996-2002 (2005).
- 19) E.W. Dijkstra, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, 1, pp.269-271 (1959).
- 20) H. Shimizu, M. Kobayashi and Y. Yonezawa, Dynamic Route Search of the Shortest Mean Travel Time, Proc. 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Nagoya, pp.567-572 (1998).