

## 高速道路における交通状態の動的推定

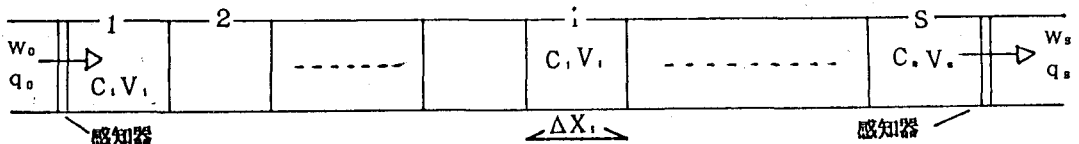
信州大学工学部 正会員 奥谷 巖  
信州大学工学部 ○瀬戸 雅章

### 1 はじめに

周知のように、わが国の都市内及び都市間高速道路における交通需要の増加は著しく、交通渋滞が慢性化している。こうしたことは車の迅速なトリップの完了を図るという高速道路本来の指名を大きくそこなうものであることから、交通管制という手法により、そうした事態の打開を図る必要があることについては、広汎な共通認識があるといえよう。そのような交通管制システムの確立に際し最も基本的であり、かつ重要な事項の1つとして、対象とする高速道路ネットワークの刻々の交通状態を、監視・把握することがあげられる。しかしながら高速道路上における交通感知器の設置密度は、都市街路に比して際めて低水準にとどまっている現状がある。本研究では、こうしたことに鑑みて、高速道路の限定された地点に設置された感知器からの交通計測情報をもとに、感知器間の時間的・空間的交通状態の動態を、システム設計上要求される精度で推定するという問題について考究する。

### 2 推定理論

ここでは下図に示したような感知器に挟まれた高速道路の区間を考え、それをS個のサブ区間に分割する。そして以下のような記号を定義する。



$C_i(t)$ : 区間  $i$  の交通密度  $V_i(t)$ : 区間  $i$  の空間平均速度

$q_i(t)$ : 区間  $i$  の下流端における交通量 ( $i=1, 2, \dots, S-1$ )  $\Delta X_i$ : 区間  $i$  の長さ

$w_0(t)$ : 対象区間上流端に設置された感知器によって計測された平均速度

$q_0(t)$ : 対象区間上流端に設置された感知器によって計測された交通量

$w_s(t)$ : 対象区間下流端に設置された感知器によって計測された平均速度

$q_s(t)$ : 対象区間下流端に設置された感知器によって計測された交通量

われわれは、対象区間を1つの動的システムとみなし上下流端における観測情報によりシステムの状態を推定することを考える。このためにはシステムの状態を表現するシステム方程式(状態方程式)と観測方程式が必要となるが、まずシステム方程式の1つとして次式のように表される連続の方程式を考える。

$$C_i(t+1) = C_i(t) + (T/\Delta X_i)(q_{i-1}(t) - q_i(t)) + e^1_i(t) \quad \text{-----①}$$

ただし、 $q_i(t) = \alpha V_i(t) - C_i(t) + (1-\alpha)V_{i+1}(t) + C_i(t)$  として与える。また  $e^1_i(t)$  は誤差項、 $T$  は、単位時間の長さである。さらに他の1つのシステム方程式としては、以下に示すような、ベインモデルに従う運動方程式を採用する。

$$\begin{aligned} V_i(t+1) = & V_i(t) + (T/\tau) [V_f \{1 - [C_i(t)/C_{\max}]\} - V_i(t)] \\ & + (T/\Delta X_i) (\nu/\tau) (C_i(t) - C_{i+1}(t)) / (C_i(t) + \kappa) \\ & + (T/\Delta X_i) [V_i(t) (V_{i-1}(t) - V_i(t))] \\ & + e^2_i(t) \quad \text{-----②} \end{aligned}$$

ここに  $\tau$  は、反応時間、 $V_f$  は自由速度、 $C_{\max}$  は最大交通密度、 $\nu$ ,  $\kappa$ ,  $a$ ,  $b$  はパラメータ、 $e^2_i(t)$  は

誤差項を表している。

他方、観測方程式であるが、すでに記した記号の定義からもわかるとおり観測量としては、 $q_0(t)$ ,  $w_0(t)$ ,  $q_1(t)$ ,  $w_1(t)$ の合計4個が存在している。従って、理論的には4つの観測方程式の導入が可能であるが、M. Cremer<sup>(1)</sup>による実証的研究から $q_0(t)$ については、第一区間に対する入力項として扱うほうがよいことがわかっているので、本研究でもそれを踏襲する事とし以下に示すように $w_0(t)$ ,  $q_1(t)$ ,  $w_1(t)$ に関する計3つの観測方程式を考える。

$$w_0(t) = (1 + \varepsilon_1) V_1(t) - \varepsilon_1 V_2(t) + \eta_1(t) \quad \text{-----} \quad ③$$

$$w_1(t) = (1 + \varepsilon_2) V_2(t) - \varepsilon_2 V_{2-1}(t) + \eta_2(t) \quad \text{-----} \quad ④$$

$$q_1(t) = (1 + \varepsilon_2) V_2(t) C_1(t) - \varepsilon_2 V_{2-1}(t) C_{2-1}(t) + \eta_3(t) \quad \text{-----} \quad ⑤$$

ただしこれらの観測方程式は対象とする3つの観測量が関連する状態量の外播値として与えられるという仮定に基づいている。③～⑤式に現れる $\eta_1(t) \sim \eta_3(t)$ は、観測誤差  $\varepsilon_i$ は外播パラメータを示す。

さて上に示した状態方程式及び観測方程式をベクトル表示すると次式ようになる。

$$x(t+1) = f(x(t)) + e(t) \quad (\text{システム方程式}) \quad \text{-----} \quad ⑥$$

$$z(t) = h(x(t)) + \eta(t) \quad (\text{観測方程式}) \quad \text{-----} \quad ⑦$$

ここに、 $x(t)$ ,  $z(t)$ は、状態量及び観測量を要素とするベクトル量であり  $f$ ,  $H$ は①～⑤を現す関数である。 $f(x(t))$ 及び $h(x(t))$ は明らかに状態量の非線形関数であるが、ここでは、統計的線形化理論に従ってこれらの関数の線形化を図る。すなわち、 $f(x(t)) \approx f_0(t) + F(t)x(t)$  としたとき近似誤差の任意の二次形式を最小にするという基準により  $f_0(t) = \overline{f(x(t))}$ ,  $F(t) = \{ \overline{f(x(t)) x(t)^T} - \overline{f(x(t))} \overline{x(t)^T} \} P^{-1}(t)$  のように求められる。ここにへは観測量 $z(t_{i-1})$ が得られているという条件下における期待値を意味するものとする。また $t(t_i | t_{i-1})$ は、推定誤差の分散共分散行列である。同様にして観測方程式についても  $h(x(t_i)) \approx h_0(t_i) + H(t_i)x(t_i)$  として線形近似される。このようにして方程式の線形近似がなされると状態量 $x(t_i)$ の推定値は、以下のような観測更新アルゴリズム並びに時間更新アルゴリズムに従い刻々とその値が得られることになる。

(観測更新アルゴリズム)

$$\hat{x}(t_i | t_i) = \hat{x}(t_i | t_{i-1}) + K(t_i) [z(t_i) - \hat{z}(t_i | t_{i-1})] \quad \text{-----} \quad ⑧$$

$$K(t_i) = P(t_i | t_{i-1}) H(t_i)^T [H(t_i) P(t_i | t_{i-1}) H(t_i)^T + R(t_i)]^{-1} \quad \text{-----} \quad ⑨$$

$$P(t_i | t_i) = P(t_i | t_{i-1}) - K(t_i) H(t_i) P(t_i | t_{i-1}) \quad \text{-----} \quad ⑩$$

ここに $R(t_i)$ は、 $\eta(t_i)$ の分散共分散行列を表しており、また  $\hat{z}(t_i | t_{i-1}) = h(\hat{x}(t_i | t_{i-1}))$  である。

(時間更新アルゴリズム)

$$\hat{x}(t | t_i) = f(\hat{x}(t_i)) \quad \text{-----} \quad ⑪$$

$$\hat{P}(t | t_i) = F(t) P(t_i | t_i) + P(t | t_i) F(t)^T + Q(t) \quad \text{-----} \quad ⑫$$

観測更新アルゴリズムにより $x(t_i | t_i)$ 及び $P(t_i | t_i)$ が計算されているものとしたとき、 $x(t_i | t_{i+1})$ ,  $P(t_i | t_{i+1})$ は、⑪⑫式の微分方程式を数値的に積分することにより求められる。

### 3. 適用例

まず最初の適用例として実際の高速道路に対する適用を考える。対象区間は、全長2.5kmの区間でありそれを、500mのサブ区間に分割したとき、図1と同様に上下流端における交通量並びに速度が計測されている。さらに区間2の下流端における交通量及び速度のデータも存在している。従って区間2の状態量推定の精度チェックが可能である。もう一つの適用例としてはトラフィックシミュレーションから得られたデータを用いた適用例を考える。シミュレーションモデルとしては現実的対応が可能であるDYNEMOを採用するものとし、速度、交通量に加え密度の推定についても検討する。詳細は講演で発表する。

(参考文献)

(1) M. Cremer INSIDENT DETECTION ON FREEWAYS BY FILTERING TECHNIQUES