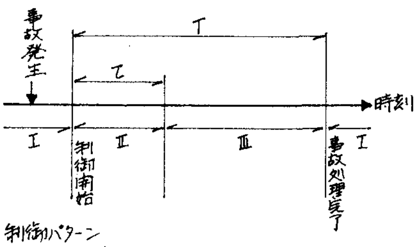
IV-75 都市高速道路の緊急時制御に関する一考察

名古屋工業大学 正員 松井 寛
建設省 正員 佐藤佳朗

1. はじめに

緊急時制御とは、自然渋滞の予防の平常時制御と異なり、予知できない原因、たとえば交通事故などによって発生する渋滞に対して、その拡大を予防し、できるだけ早くその解消を図り、円滑な交通流を回復することを目的とする制御である。緊急時制御の方法として、迂回指示、流出指示、流入ランプ制御などがあるが、本文では流入ランプ制御に基づく方法について考える。なお本文では、交通事故等の発生前後の制御パターンの切替を図-1のように考える。ここにTは事故処理所要時間で、これは経験的に与えられているものとする。τは事故発生に伴う渋滞の解消時間で本文ではこのτを最小とする制御を緊急時制御と呼ぶ。

図-1

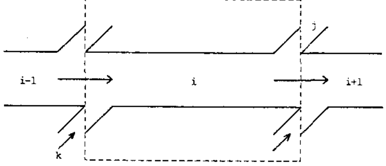


制御パターン
I : 平常時制御又は制御なし
II : 緊急時制御
III : 事故処理中の平常時制御

2. 制御モデル

[状態方程式] 高速道路本線上及びオンランプ上の交通流の時間変動を記述する状態方程式を作成する。まず本線上については、制御の対象区間を方向別にm個の区間に分割し、各区間に番号をつける。さて図-2に示すようなそれぞれ1つのオンランプとオフランプを両端に持つ標準的な区間iに注目する。この区間iの交通密度 $x_i(t)$ の変化率は一般に次式によって表わされる。

図-2



$$l_i \frac{dx_i(t)}{dt} = u_k(t) + Q_i^{(in)} - Q_i^{(out)} \quad (i=1,2,\cdots m) \qquad (1)$$

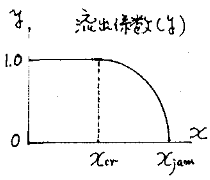
上式は流体における連続方程式に相当するもので、l_iは区間iの区間長、$u_k(t)$ はオンランプkからの流入交通量で、これが本制御モデルにおける制御変数である。また$Q_i^{(in)}$, $Q_i^{(out)}$ はそれぞれ区間iへの流入量、流出量である。なお$Q_i^{(in)}$, $Q_i^{(out)}$ の与え方であるが、ここでは事故発生に伴う渋滞が上流側へ拡大していく状態を表現できるよう、次のように仮定した。

$$Q_i^{(in)} = \begin{cases} P_{i-1,i}\, q_{i-1} & 0 \le x_i \le x_{cr} \\ P_{i-1,i}\, q_{i-1}\sqrt{1-\left(\dfrac{x_i - x_{cr}}{x_{jam}-x_{cr}}\right)^{\alpha}} & x_{cr} < x_i \le x_{jam} \end{cases}$$

$$Q_i^{(out)} = \begin{cases} q_i & 0 \le x_{i+1} \le x_{cr} \\ P_{i,i+1}\, q_i\sqrt{1-\left(\dfrac{x_{i+1} - x_{cr}}{x_{jam}-x_{cr}}\right)^{\alpha}} + (1-P_{i,i+1})\, q_i & x_{cr} < x_{i+1} \le x_{jam} \end{cases}$$

ここにq_{i-1}, q_i はそれぞれ区間i-1, iの交通量、$P_{i-1,i}$, $P_{i,i+1}$ は区間i-1とi、区間iとi+1との間の推移確率、x_{cr}は臨界密度、x_{jam}は飽和密度、αは経験的に与えられる定数である。$\sqrt{\ \ }$ で与えられる部分を流出係数と呼び、これは上流区間から下流側区間への流出量 q_i が、下流側区間の混雑状況によって受ける影響の程度を表わす。なお各区間の交通量 q_iは区間の平均速度と交通密度の積で与えられ、また平均速度は交通密度の関数形で与えられることが知られているから、結局 $Q_i^{(in)}$, $Q_i^{(out)}$ ともに密度の関数形で表わされることになる。よって(1)式は交通密度を状態変数とする非線形微分方程式となる。

図-3



さて、次にオンランプブース前の流入待ち行列に関する状態方程式を考える。時刻tにおけるオンランプkの待ち行列長を $w_k(t)$、流入需要量を $q_k(t)$ とすれば、状態方程式は簡単に次のように書ける。

$$\frac{dw_k(t)}{dt} = q_k(t) - u_k(t) \qquad (2)$$

[制約条件] 本モデルでは2つの制約条件を導入する。1つは制御変数 $u_k(t)$ に関するもので、オンランプからの許容流入量に対する非負条件とランプ容量制約で、以下のように定式化できる。

$$0 \leq u_k(t) \leq S_k \qquad (k=1,2,\cdots r) \qquad (3)$$

ここにS_kはオンランプkの容量である。

他の制約条件は流入待ち行列に関するもので，非負条件と待ち行列に制限値M_kを設けるものである。

$$0 \leq w_k(t) \leq M_k \qquad (k=1,2,\cdots,r) \qquad (4)$$

〔評価基準〕 緊急時制御は渋滞発生後に適用される事後的制御であり，従ってその制御の目的は，渋滞の拡大を防ぎ，できるだけすみやかに円滑な交通流を回復することである。そのためには，事故発生による本線容量の低下の程度に応じた新しい安定交通流状態にすみやかに移行することである。これはいわゆる最短時間制御の問題となり，その評価基準は次のように定式化される。

$$J \equiv \tau = \int_0^\tau dt \longrightarrow min. \qquad (4)$$

ここに制御開始時刻を時間軸の原点にとり，τはその制御時間を表わす。なおこの制御では，未知の制御終了時刻τにおける本線上の状態変数（密度）の終端状態が指定されることになる。

$$x_i(\tau) = C_i \qquad (i=1,2,\cdots m) \qquad (5)$$

ここにC_iは事故により車線の1部が閉塞された状態で円滑に交通流がさばけるときの密度で，これはあらかじめ計算しておくものとする。なおw_kに対する終端状態は指定されない。

結局以上の問題は，終端状態一部指定，終端時刻未定の最大原理問題となる。解法としては，境界条件として状態変数の初期値と終端値が指定されているものに対しては，対応する補助変数の境界条件は与えられない。そこで解法のアルゴリズムとして，補助変数の初期値と制御時間を仮定することにより，その制御結果において状態変数の終端値が指定された値と一致するまで繰り返し計算を行うことになる。ここでは補助変数の初期値と制御時間を変数として，状態変数の終端値の誤差の和を最小化するという方法をとり，以下の計算例では非線形シンプレックス法を用いた。

3. 制御対象区間の範囲

緊急時制御を行う際，制御対象となる区間の範囲を高速道路網全体に広げることは，計算量が膨大となり制御効率からみても必ずしも得策ではない。本文では制御対象区間の指定方法として，次の2通りの考え方を示す。

①. 事故発生区間iの車線閉塞により，この区間の交通量をS_iだけ減らす必要があるとする。問題の区間より上流側に存在するオンランプ及びオフランプに下流側から順に番号をつけ，それぞれの流入量，流出量を$u_1, u_2 \cdots$，$v_1, v_2 \cdots$としたとき

$$u_1+u_2+\cdots+u_{n'} - v_1 - v_2 - \cdots - v_{n''} \geq S_i$$

が成立するn'個のオンランプまでを制御対象区間とする。なおn''は第n'番目のオンランプまでの間に存在するオフランプの数である。

②. 上流側に有効に迂回指示ができる迂回路が存在するところでは，その分岐点までを制御対象区間とする。

実際には，上の①，②で決まるどちらか小さい方の制御対象区間を採用すればよい。

4. 計算例

図-4

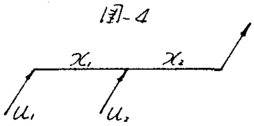


図4に示すような区間数2，流入ランプ数2の簡単なモデルでの計算例を示す。入力データは次の通りである。車線数を2車線とし，速度－密度曲線は3次曲線を仮定し，阪神高速道路空港線の資料に基づき最小二乗法で決定した。（相関係数 0.951） この結果本線容量は76.0台/分/2車線（2280台/時/車線）となり，また区間長は2区間とも2000m，ランプ容量80台/分，$u_1=u_2=38$台/分とした。また流出係数の中の定数αは，やはり阪神高速道路の資料に基づき0.3とおいた。状態変数の初期値及び終端値は次のとおりである。$x_1^0=0.026$，$x_2^0=0.2$，$w_1^0=w_2^0=0$，$x_1^\tau=0.026$ $x_2^\tau=0.095$．ここでは区間2で事故が発生し，区間2で1車線閉塞された状態を想定している。なおオンランプの待ち行列制限はこの計算例では考えていない。

計算の結果は次の通りである。

制御時間 $\tau = 8.4$分

ランプ制御

$$u_1 = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 7.6^{分} \\ 80^{台/分} & 7.6^{分} < t \leq 8.4^{分} \end{cases}$$

$$u_2 = 0 \qquad 0 \leq t \leq 8.4^{分}$$

このように，最適制御解は，まず制御開始と同時に制御対象区間内すべてのランプを閉鎖し，以後徐々に最上流側ランプから開放していくようなパターンを示している。

参考文献 松井寛，"非定常交通流における都市高速道路の流入制御" 土木学会中部支部発表会 1980