過飽和状態における信号最適制御の安定性について

信州大学工学部　正会員　奥谷　巌
信州大学工学部　　　　　○宮坂　英治

1　まえがき

本研究では、わが国の大都市で一般的である過飽和街路網の信号制御を対象とし、制御の入力情報である交通需要の予測値の精度が制御目標に対していかなる影響を及ぼすかについて基礎的な検討を行う。信号制御に用いる入力交通需要はすべて予測値から構成されており、そこには誤差の介在は不可避であることから、そうした不完全な情報をもとに決定された制御政策は当然のこととして真の最適政策から離れることとなる。よって、ここでは複数交差点からなるネットワークを対象とし、このような問題がどのように解明できるかについて基礎的な立場から検討しようとするものである。

2　待ち行列長

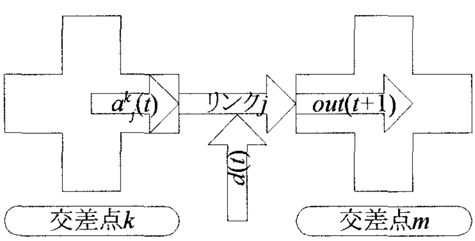

図 1: 待ち行列長

信号制御をするための交通変量の1つである待ち行列長について述べる。図1のような2つの交差点kと交差点mの間のリンクjについて考える。「時点$t+1$においてリンクjで青信号待ちをしている待ち行列長：$x_j(t+1)$」は、「時点tにおいてリンクjで青信号待ちをしている待ち行列長：$x_j(t)$」、リンクjから流出していく交通量である「流出交通量：$out_j(t+1)$」、リンクjに流入してくる交通量である「流入交通量：$in_j(t+1)$」を用いて次式のように表すことができる。

$$x_j(t+1) = x_j(t) - out_j(t+1) + in_j(t) \quad \cdots\cdots (1)$$

本研究では、流入交通量が絶え間なく発生している過飽和の状態を仮定しているので、青信号を表示しても通過する車がないという状態はないとする。よって、「流出交通量：$out_j(t+1)$」は「1周期あたりの飽和交通量：$s_j(t+1)$」と「1周期の時間に対するリンクjの流出を許す有効青時間の割合：$u_j(t+1)$」を用いて次式のように表すことができる。

$$out_j(t+1) = s_j(t+1) \times u_j(t+1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

本研究では1周期を単位時間としているので、交差点の1つの方向からの流出量表現には式(2)を用いる。

リンクjへの「流入交通量：$in_j(t+1)$」は「時点tで交差点kを通過した交通量のうちリンクjへ流入する交通量：$a^k_j(t)$」と「リンクjへの発生交通量：$d_j(t)$」の和となる。

$$in_j(t) = a^k_j(t) + d_j(t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

式(2)と式(3)を用いると、式(1)は次式のようになる。

$$x_j(t+1) = x_j(t) - s_j(t+1) \times u_j(t+1) + a^k_j(t) + d_j(t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

3　信号制御

3.1　飽和度を用いた時点ごとの制御

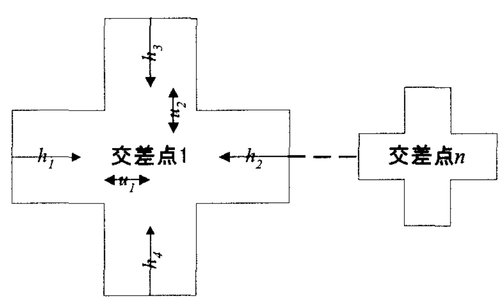

図 2: ネットワーク

例えば、図2の交差点1のような交差点において、式(5)で定義される「時点$t+1$におけるリンクjの飽和度：$h_j(t+1)$」を用い、現示iにおける最大の飽和度H_iの比と

有効青時間の割合の比が等しくなるように信号パラメータを設定する。

$$h_j(t+1) = \frac{x_j(t)}{s_j(t+1)} \quad \cdots\cdots (5)$$

$$H_1 = \max\{h_1(t+1), h_2(t+1)\} \quad \cdots\cdots (6)$$

$$H_2 = \max\{h_3(t+1), h_4(t+1)\} \quad \cdots\cdots (7)$$

$$H_1 : H_2 = u_1(t+1) : u_2(t+1) \quad \cdots\cdots (8)$$

こうした信号制御方式は現実のものに近い制御方式であるが、各時点ごとに便宜的経験則を適用しており、一定の時間範囲を見通した最適制御とは無縁のものである。

3.2 遅れ最小化基準による最適制御

南北方向への有効青時間の割合u_2は$u_2 = 1$(全体) $- u_R$(全赤時間) $- u_1$と表せるので、東西方向のu_1のみを設定する。この制御は、制約条件、目的関数が以下のとおりに表せる線形計画問題となる。

制約条件

式(4)で表される待ち行列の計算式 ……… (9)

$$0 \leqq u_1(t+1) \leqq 1 - u_R - u_2^{\min} \quad \cdots\cdots (10)$$

$$0 \leqq x_j(t+1) \leqq x_j^{\max}(t+1) \quad \cdots\cdots (11)$$

式(10)は1周期の時間のうち、全赤時間u_R、u_2方向に最低$u_2^{\min}$割り当てると、u_1方向への有効青時間の割合の最大値は$1 - u_R - u_2^{\min}$となる制約条件式である。式(11)は待ち行列長が許容待ち行列長$x_j^{\max}(t+1)$以下となるという制約条件式である。

目的関数

$$\sum_t \sum_j x_j(t+1) \rightarrow \min \quad \cdots\cdots (12)$$

本目的関数が遅れを最小にすること等価となることは容易に示すことができる。

4 計算例

式(12)を用いると一度に扱う変数の数が膨大となり計算を行うことができないので、今回はまず基礎的研究として、目的関数を式(13)として計算を行ってみた。

$$\sum_j x_j(t+1) \rightarrow \min \quad \cdots\cdots (13)$$

まず、「発生交通量：$d_j(t)$」と「飽和交通量：$s_j(t+1)$」に正規乱数を用いて誤差を与え、予測値とする。このようなデータに、上記のような待ち行列長や信号制御の理論を用い真値による制御と予測値による制御を行い、それぞれの「有効青時間の割合：$u_j(t+1)$」と「待ち行列長：$x_j(t+1)$」を求める。図2で$n=5$とした、直列5交差点のネットワークにおいて時点11までの制御を行う。図3に交差点1のu_1方向の有効青時間の割合を示す。図3において、□：飽和度,真値、●：飽和度,予測値、△：最適制御,真値、◆：最適制御,予測値、による計算結果である。

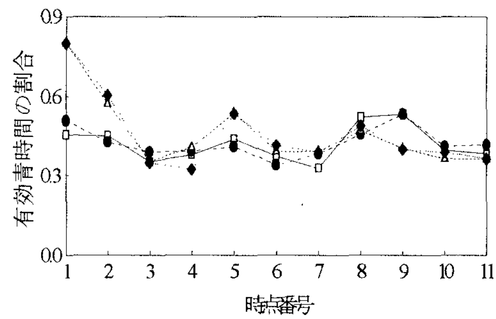

図 3: 交差点1の有効青時間

飽和度を用いた信号制御、最適制御の両者ともに真値による制御と予測値による制御に大きな差がなく、時点数が大きくなっても誤差は大きくならない。これは、まず、今回の計算例では比例した両制御ともに1時点先の予測値を用いており、したがって誤差水準がそれほど高くないこと、及び、待ち行列長が長くなる方へ誤差が生じる時点と、待ち行列長が短くなる方へ誤差が生じる時点があり、誤差を打ち消しあっているためだと考えられる。

予測値によって導かれた信号機の設定に真の流入交通量を流したときの待ち行列長の合計は、飽和度を用いた信号制御：8032(台)、最適制御：6964(台)となる。最適制御では飽和交通量が大きいリンクに可能な限り、つまり待ち行列長がゼロになるまで有効青時間を割り当てる制御となり、少しでも誤差が生じると飽和交通量が大きいリンクに無駄な青時間が生じる場合がある。それにも関わらず待ち行列長の合計は飽和度を用いた制御より小さくなる。