オフセット設計ツール台形投射方式の拡張*

Extension of Offset Design Tool Based on Trapezoidal Projection Method*

井上健士**・末次直明***・横田孝義****

By Takeshi Inoue**・Naoaki Suestugu***・Takayoshi Yokota****

1．はじめに

交通事故、交通渋滞の対策手法の一つとして、信号制御システムの高度化はますます重要となっている。特に信号制御の要素の一つであるオフセットは、その調整により信号機での車両停止回数、及び交通事故が減るという効果により[1]、その高度化が期待されている。また最近では、オフセットをオンラインで計算するニーズが高まり、このオンライン化の計算方法としてTRANSYT[2]、台形投射方式[3,4]が注目されている。ここで台形投射方式は幾何モデルのため計算が高速であり、時差信号が無くかつ停止車両の無い場合には最適解が得られ、停止車両がある場合でも準自動的な論理接続により最適解が得られ易い。さらに混雑する交通状況にも対応が可能であり、車群を分断しないため信号灯機が黄色のときに無理に交差点に侵入する車が少なくなり交通安全上好ましい。

そこで本稿では台形投射の高速性、安全性等の特徴に着目し、オフセットオンライン設計ツールとしての完全自動化を目指して台形投射方式の拡張を行う。まず計算機での計算を容易にするため、台形投射方式の代数的取り扱いを提案し、時差信号を扱えるようにする。次に車両停止があるかどうかの判定方法を提案し、車群の停止個所を与えた場合の停止時間が最小となるオフセットの求め方を与える。最後に論理接続を拡張した車群の停止個所の与え方を提案する。

*キーワーズ：ITS、交通制御、交通管理

**正会員、(株)日立製作所日立研究所
(茨城県日立市大みか町7-1-1、
TEL:0294-52-5111、FAX:0294-52-7629)
***非会員、福岡県警察本部交通部
(福岡県福岡市博多区東公園7-7、
TEL:092-641-4141、FAX:092-641-7494)
****非会員、(株)日立製作所日立研究所

2．台形投射方式と信号機の代数的表現

本章ではまず台形投射方式の原理を説明し、次にサイクル C で表示を繰り返す信号機の代数の表記を提案する。なお本稿では交通状態を非飽和と仮定し、基準時刻に対する青の開始時間のことを「オフセット」と呼ぶことにする。

(1) 台形投射方式

まず台形投射方式の原理を簡単に説明する。図1に示すように上り車群、下り車群が信号機で停止しない状態の走行を考える。

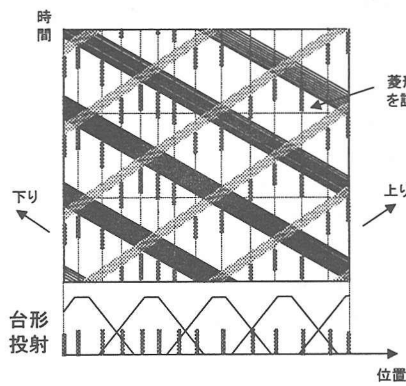


図1　台形投射方式

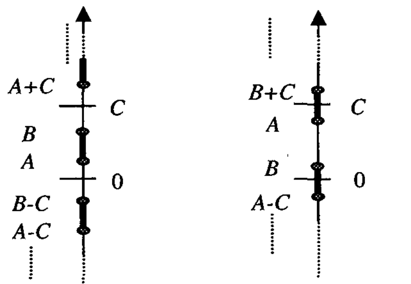
ここで車群が存在しない図1中の菱形の部分に赤信号が来るならば、車群を止めることが無い。このことを利用した信号機オフセット設定方式が台形投射方式である。この菱形の最大区間長が図1下方の台形（上り下りのバンド幅が同じ場合には三角形となる）となる。この台形内に信号機の赤時間が入っているならば車両の停止しないオフセットが存在することになる。台形投射により得られるオフセットは、高速車両を信号機の赤で停止させる傾向にあり[3]、交通安全が確保され易い。

(2) 信号機代数

本節では台形投射を表現する準備のため、同一周期 C で繰り返す閉区間の代数を定義する。なお本節では抽象的な代数について述べ、物理的な意味は述べない。まず、以下の区間を定義する($a \leqq b$)。

$$[a,b] \oplus (C) = \{x \mid a + Cm \leq x \leq b + Cm,\ m:\text{整数}\} \quad \cdots(1)$$

$[a,b]$とは$\{x \mid a \leqq x \leqq b\}$、$[a,b)$とは$\{x \mid a \leqq x < b\}$を意味する。また$(C)$は$C$の倍数の集合、$\Phi$は空集合、$\oplus$は直和を意味する。(1)の集合は、図2で示される周期Cで繰り返される区間を意味する。



(a) $A \leqq B$の場合　　(b) $A > B$の場合

$A = a \bmod C$　　$B = b \bmod C$

図2 集合$[a,b] \oplus (C)$

この$[a,b] \oplus (C)$に関して、以下の定理群が成立する（x,y,a,bは任意の実数。導出は単純であるが煩雑となるため省略する）。

$$x - d \in [a,b] \oplus (C) \Leftrightarrow x \in [a+d, b+d] \oplus (C) \quad \cdots(2)$$

$$-x \in [a,b] \oplus (C) \Leftrightarrow x \in [-b,-a] \oplus (C) \quad \cdots(3)$$

$0 < a,b < C$のとき、

$$[x, x+a] \oplus (C) \subset [y, y+b] \oplus (C) \Leftrightarrow x - y \in [0, b-a] \oplus (C) \quad \cdots(4)$$

$$[x, x+a] \oplus (C) \cap [y, y+b] \oplus (C) \neq \Phi \Leftrightarrow y - x \in [-b, a] \oplus (C) \quad \cdots(5)$$

集合$[a,b] \oplus (C)$は周期Cで繰り返すため、0からCのみに着目しても良い。この$[a,b] \oplus (C)$を$[0,C)$に限定した集合を$[a,b] \bmod C$と表現する。$[a,b] \bmod C$は次のようになる。

$$[a,b] \bmod C = \begin{cases} [0,C) & b - a \geq C \\ \Phi & b < a \\ \{x \mid x = y \bmod C, y \in [a,b]\} & oterwise \end{cases} \quad \cdots(6)$$

3．台形投射における車群停止判定方法

前述した代数により台形投射方式のオフセットの存在条件、車群停止を与えられたときのオフセットの存在条件を表現する。ここで、信号機は周期Cで繰り返し表示を行い、車群も上流交差点で整流され周期Cで繰り返し到着するものとする。対象ネットワークとして、一直線道路上にn個の交差点がある場合を考え、交差点を左より順番に1,…,nと番号付けする。そして交差点1からnの方向を上りとし、交差点nから1の方向を下りとする。ここで車群の出発時刻は、端の交差点の青開始時刻と一致するものとする。

車群が信号機で車群が停止しない条件は、車群の通過する時間帯が、信号機が青となる時間に含まれることである。この条件を(2)-(5)より計算すると、車が停止しない条件は以下となる（但し交差点1とnを除く）。

$$\theta \in [\tau_j - f_{u,j},\ \tau_j + f_{d,j}] \oplus (C) \quad (j=2,\cdots,n-1) \quad \cdots(7)$$

τ_j：交差点1から交差点jまでの上り車群ノンストップ走行時間—交差点nから交差点jまでの下り車群ノンストップ走行時間（単位は秒）

$f_{u,j}$：交差点j上り青時間－上りバンド幅(単位は秒)

$f_{d,j}$：交差点j下り青時間—下りバンド幅(単位は秒)

バンド幅：車群が通過する時間(単位は秒)

θ：下り車群の出発時刻—上り車群の出発時刻(単位は秒)

(7)より同一交差点において、上り下り別々に異なる青時間を設定できるため、時差信号が扱えるようになる。この(7)を満たすθの秒数区間を、$[0,C)$に限定した集合をI_jと置く($j=2,\cdots,n-1$)。このI_jにθが含まれるならば、交差点jで上り下りで車群無停止となる。次に交差点jでオフセットと上り車群出発時刻が一致場合、(2)-(5)より以下の存在条

表1 オフセット存在条件

	θ(下り車群出発時刻—上り車群出発時刻)の範囲($\neq \Phi$)							
無停止	U_1	$\cap I_2$	$\cap \cdots$				$\cap I_{n-1}$	$\cap D_n$
交差点k上り停止	U_1	$\cap I_2$	$\cap \cdots$	$\cap I_{k-1}$	$\cap U_k(x)$	$\cap I_{k+1}(x) \cdots$	$\cap I_{n-1}(x)$	$\cap D_n(x)$
交差点n上り停止	U_1	$\cap I_2$	$\cap \cdots$				$\cap I_{n-1}$	$\cap \{(\tau_n+x) \mathrm{mod} C\}$
交差点1下り停止	$\{(\tau_1-x) \mathrm{mod} C\}$	$\cap I_2$	$\cap \cdots$				$\cap I_{n-1}$	$\cap D_n$
交差点k下り停止	$U_1(-x)$	$\cap I_2(-x)$	$\cap \cdots$	$\cap I_{k-1}(-x)$	$\cap D_k(-x)$	$\cap I_{k+1} \cdots$	$\cap I_{n-1}$	$\cap D_n$

D_j:交差点jで下り車群青開始固定、上り車群無停止条件となる時間区間
U_j:交差点jで上り車群青開始固定、下り車群無停止条件となる時間区間 $(1<k<n)$
I_j:交差点jで上り下り車群が無停止条件となる時間区間 x:停止時間 $(0<x<$赤時間$)$ $I(x)$:集合Iをxシフトした集合

件となる。

$$\theta \in [\tau_j, \tau_j+f_{d,j}] \oplus (C) \quad \cdots(8)$$

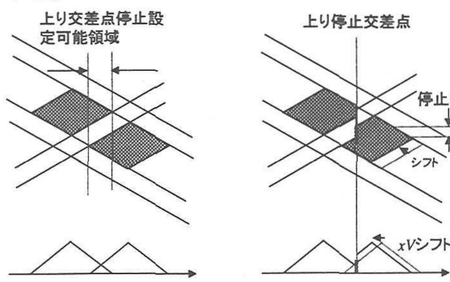
この(8) を満たすθの秒数区間を、$[0,C)$に限定した集合をU_jと置く。このU_jにθが含まれるならば、交差点jで上り車群の時刻が青開始に固定されているとき下り車群が無停止となる。同様に交差点jでオフセットと下り車群出発時刻が一致場合以下の存在条件となる。

$$\theta \in [\tau_j-f_{u,j}, \tau_j] \oplus (C) \quad \cdots(9)$$

この(9) を満たすθの秒数区間を、$[0,C)$に限定した集合をD_jと置く。このD_jにθが含まれるならば、交差点jで下り車群の時刻が青開始に固定されているとき上り車群が無停止となる。

これらの(7)-(9)の条件を元に、車群停止位置が指定されたときのオフセット存在条件を表1に示す($I(x)$とは集合Iをxだけシフトした集合、ハッチング部分は車群停止の影響を受ける区間である。また端の交差点での条件は、車群が青開始よりx秒前に到着することにより求められる)。この表1のθの範囲がΦでなければ、停止を設定した交差点以外で車群が停止しないようにできる。これは、交差点kの上りに停止をx秒置いたとき、上り車群はx秒遅れ、更に交差点kでの車群出発時刻とオフセットが一致する条件により求められる。下りに停止個所を置いたときも同様である。

ここで車群の停止のある場合での台形投射方式の菱形の変形を、図3で説明する。但し説明のため上りに停止個所のある場合に限定する。ここで車群停止がある際、車群停止を設定した交差点より下流側の菱形を左上に停止時間だけずらすことになる。なお各交差点における下り車群、上り車群の到着時刻がが与えられるならば、従来の台形投射の方法によりオフセットは求められるため、オフセットの範囲については省略する。また車群停止が複数個所必要な場合の処理については後述する。



(a) 停止設定前 (b) 停止設定後

V: 上り下りの走行速度の調和平均[m/sec]

図3 停止における台形投射の扱い

これらの車群停止条件の計算を次の例題で説明する。

【例題】

サイクル100秒、スプリット50%、リンク長200m、走行速度60km/h、バンド幅20sec、4交差点の場合を考える。このとき、各々の交差点における車群無停止条件の区間は表2となる(区間のmod100は省略する。また数字の単位は秒である)。

表2 例題における車群出発時間差範囲

交差点 j	U_j	D_j	I_j
1	[-36,-6]		
2	[-12,18]	[-42,-12]	[-42,18]
3	[12,42]	[-18,12]	[-18,42]
4		[6,36]	

ここで、$U_1 \cap I_2 \cap I_3 \cap D_4 = \Phi$ より停止個所が必要となる。また $U_1 \cap I_2 \cap I_3 \neq \Phi$, $I_2 \cap I_3 \cap D_4 \neq \Phi$ より、交差点1から3、ないし2から4まではノンストップとできるため、停止個所は少なくとも1箇所の可能性がある。そこで1箇所車群停止を設定した全組み合わせを判定すると、表1により次の表3となる。ここで、停止時間を x 秒とする。

表3 例題における停止が与えられたときの条件

停止個所	θの存在する範囲	x最小値
交差点2上り	$[-36,-6] \cap [6+x,18+x]$	46
交差点3上り	$[-36,-6] \cap [12+x,36+x]$	*28*
交差点4上り	$[-18,-6] \cap \{(36+x)\mathrm{mod}100\}$	46
交差点1下り	$\{(-36-x)\mathrm{mod}100\} \cap [6,18]$	46
交差点2下り	$[-36-x,-12-x] \cap [6,36]$	*28*
交差点3下り	$[-18-x,-6-x] \cap [6,36]$	46

x が最小値となるとき、表3の「θの存在する範囲」が点集合となるため、表3の3列目が成立する。従い停止個所が1箇所の場合には、交差点3の上りないし交差点2の下りに車群停止を設定した場合が最適であり、かつ停止秒数は28秒が最小となる。そして交差点3の上りに停止個所を置いた場合の車両走行軌跡を図4に示す。

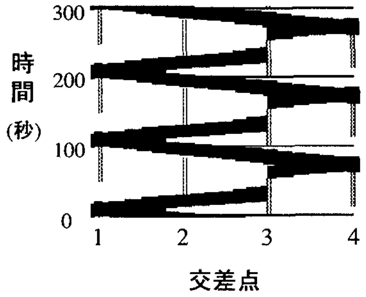


図4 例題の解の車両走行軌跡

次に、停止個所の最適化方法について簡単に述べる。これは台形投射における論理接続[3]と同じ様に行う。まず交差点群をまとめる。このまとめ方は、交差点群内で停止の無いようにした交差点集合とする。そして交差点群同士の接続は、以下のように行う。

まず2つの交差点群の θ の存在範囲を、上り側区間E(上り交差点群より一番右の交差点を除いた θ の範囲),下り側区間F(下り交差点群より一番左の交差点を除いた θ の範囲)と置く。またEの右端交差点を k とする。そして $E(-x) \cap D_k(-x) \cap F(0) \neq \Phi$ となる最小の x と、$E(0) \cap U_{k+1}(y) \cap F(y) \neq \Phi$ となる最小の y を求める。$x<y$ の場合、交差点 k の下りに x 秒停止となる。$y<x$ の場合、交差点 $k+1$ の上りに y 秒停止となる。このようにして交差点群の接続により車群が停止する交差点を決定すれば良い。

4. おわりに

本研究では、台形投射方式の代数的な表記を提案し時差信号に対応できるようにし、車群が停止しない場合、ないし車群停止が与えられたときのオフセットの存在条件を導出した。更に論理接続を拡張し、停止個所の与え方を提案し台形投射方式の完全自動化のための目途を立てた。

今後の課題としては、オフセットの制約として、近い交差点間での交互オフセットの回避や、ある交差点でのオフセットを固定させる場合への対応である。また本方式の異なるサイクルへの対応、及びTRANSYTとの実運用比較についても検討していきたい。

参考文献

1)林琴也:交通工学基礎講座, 月刊交通 Sep. 1997.

2)Robertson, D.I.:"TRANSYT:a traffic network study tool", Road. Res. Lab. Report, LR253.Crowthorne, 1969.

3)Naoaki Suetsugu:Trapezoidal Projection through-band Analysis, IIS YOKOHAMA Nov.1995.

4)吉尾 泰知:スルーバンド設計装置の開発について, 交通工学 Vol.22 No.1 pp.43-46 1987.