

# オフセット追従アルゴリズムの検討

## Offset Transition Algorithm Analyze

井上 健士・横田 孝義・伏木 匠

Takeshi Inoue, Takayoshi Yokota, Takumi Fushiki

(株)日立製作所 日立研究所 (〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1)

信号機間の位相であるオフセットの調整により交通の円滑化、交通安全や政策的な交通流の実現を図る場合、オフセットを徐々に変更するオフセット追従の動作が必要になる。このオフセット追従の実現方法の一つとして、追従中のオフセットが目標オフセットに対し180度となるオフセット反転を回避する方法がある。このオフセット反転を回避する場合での交通流への影響は現状不明な点が多い。しかし本稿では、オフセット反転回避は一つのオフセット追従手法とみなし、オフセット反転を回避するという場合の有効なアルゴリズムについて調べる。そしてオフセット反転を可能な限り回避する制約の下、オフセット追従に要する時間が短くなるような実用的なアルゴリズムを検討する。その解法を様々な組み合わせ最適化手法について、CPU時間、オフセット反転数、および追従に要する時間の評価を行う。

### 1. はじめに

我が国の信号制御は、円滑、安全、および流入抑制といった政策の交通状況为目标とし、通常その制御方法としてパターン選択<sup>1)</sup>を利用している。これはサイクル(信号機の周期)<sup>1)</sup>、スプリット(信号機の青時間のサイクル比)<sup>1)</sup>、オフセット(隣り合う信号機間の信号灯器の青開始ずれ時間)<sup>1)</sup>を予め計算したパターンとして格納し、タイマーまたは感知器の情報から適切なパターンを選択することにより交通状況に応じた信号機制御を行う<sup>1)</sup>手法である。このサイクル、スプリットのパターン切り替えは即時的に実行できるが、オフセットのパターン切り替えは、歩行者の横断秒数の確保、およびドライバーへの影響等の安全面を考慮しなければならないため、数周期に渡って、徐々に行われる。これをオフセット追従と呼ぶ<sup>1)2)</sup>。このオフセット追従の途中では、交通流の適切性が保証できず、このオフセット追従をどのように実行すべきかが信号制御の課題の1つであった。

このオフセット追従中に、オフセット反転(追従中のオフセットが目標のオフセットに対して180度となる状況)<sup>1)2)</sup>が起これると、予期せぬ交通状況が一時的に引き起こ

されることがある。例として、距離の短い交差点間での円滑化を目標とするとき、オフセット反転のために2交差点間を通過できる有効青時間が短くなることにより渋滞が発生したり、連続して信号機で車が停止する状況が発生したりする<sup>2)</sup>。逆に流入抑制を目標とするとき、オフセット反転により交通流が円滑に流れたりする。このオフセット反転が交通流にどのように影響するかは、全交通状況で明確ではない。たがドライバーから見ると、オフセット反転は明確な渋滞ボトルネック地点と認識され易く、苦情が起これやすい。こういった事情により、信号機の運用者はオフセット反転を回避することを望んでいた<sup>2)</sup>。

またオフセット追従の途中では、交通流が乱れ<sup>3)</sup>、更にオフセット追従に要する時間が長くなることは、制御が交通流の動きにすばやく適応できなくなることを意味する。従いオフセット追従に要する時間を短くする必要がある。そしてオフセット計算の自動生成を考慮するならば、現行計算機でのリアルタイム性を確保する必要がある。

そこで、本稿ではオフセット反転を回避するという一つのオフセット追従の方式とみなし、オフセット反転を回避する

制約の元オフセット追従時間を短くする、現状のシステムでのリアルタイムアルゴリズムについて検討を行う。

本稿では絶対オフセットの回転を許す運用形態で、かつ任意の道路ネットワークを対象とし、オフセット反転を可能な限り回避し、指定された制約を満たす条件の下、オフセット追従に要する時間が短くなるオフセット追従の解法アルゴリズムの検討を行う。そして様々な組み合わせ最適化手法についてオフセット反転数、追従時間、CPU時間を比較評価する。

## 2. オフセット追従とオフセット反転

本章では、オフセット追従方式についての説明を行い、そしてオフセット反転の定義および性質を述べる。

オフセット追従は、サイクルを伸ばすか縮めるかの2通りによる方式となっている。サイクルを伸ばす追従を+追従と呼び、サイクルを縮める追従を-追従と呼ぶ。そしてこの1周期とサイクルの差をオフセット追従幅と呼ぶ（プラス追従でサイクルの12.5%、またはサイクルの25%、マイナス追従でサイクルの12.5%の値が使われる）<sup>2)</sup>。ここで、基準時刻に対する各交差点の青開始時刻の差を絶対オフセットと呼び、オフセット追従に要した絶対オフセットの変更量をオフセット追従量 $\kappa$ と呼ぶことにする。 $\kappa$ は次式となる。

$$\kappa = \begin{cases} rC + \delta & + \text{direction transition} \\ -C - rC + \delta & - \text{direction transition} \end{cases}$$

$\delta = (E - I) \bmod C$  : オフセット変更量  
 $\kappa$  : 絶対オフセット追従量  
 $C$  : サイクル  
 $E$  : 変更後の絶対オフセット  
 $I$  : 変更前の絶対オフセット  
 $r$  : 回転数 ( $r=0,1,\dots$ ) (1)

ここで、 $r \geq 1$ となる場合は、目標の絶対オフセットになっても、更に現状の追従方向で絶対オフセットを $r$ 回転行うことである。次に、2交差点間のオフセットの関係を相対オフセットと呼ぶことにし、上流側の交差点を1、下流側の交差点を2とすると、追

従中の相対オフセットの移行量は交差点1, 2の絶対オフセット追従量の差となる。この相対オフセットの移行量が、サイクル $C$ の半分を超えるならばオフセット反転となる。文献[2]よりオフセット反転は、次の条件で現される。

$$\beta_2 - \beta_1 \neq 2\eta \quad (2)$$

$\beta$  : 特性値 ( $= (2r+1)\varphi$  奇数)  
 $r = \lfloor \beta/2 \rfloor$  : 回転数  
 $\varphi = \text{sign}(\beta)$  : 追従方向 ( $= \pm 1$ )

但し $\eta$ とは次で定義され、以後追従判定値と呼ぶ。

$$\eta = \begin{cases} -1 & -C < \delta_2 - \delta_1 \leq -C/2 \\ 0 & -C/2 < \delta_2 - \delta_1 < C/2 \\ 1 & C/2 \leq \delta_2 - \delta_1 < C \end{cases} \quad (3)$$

式(2)よりオフセット反転が起きないならばキルヒホッフの電圧則が成立する。即ち、オフセット反転が起きないなら、あるノードAから別のノードBへの辺に対応した $\eta$ の総和は、ノードAの特性値とノードBの特性値の差に対応する。また隣り合うノードA,Bで $\beta_A, \beta_B$ が固定されているときA,B間では、オフセット追従が終了までに、オフセット反転が $|\beta_A - \beta_B + 2\eta|/2$ 回引き起こされることになる。

但し、相対オフセットの初期状態が反転、または反転に近い場合については、一回だけオフセット反転としても良いとし、そのオフセット反転数をカウントしないことにする。その定式化については次章で述べることにする。

次に交差点間が短い(ex.100m以下)2交差点間での相対オフセットの性質について簡単に述べる。相対オフセットには2交差点で同時に青になる同時オフセット、位相が180度ずれて青になる交互オフセットと呼ばれるものがある。これを図1で説明する。交差点間が短いとき同時オフセットとすることは、主道路の交通は円滑となるが、従道路から主道路へ流入する車は抑制されることになる。即ち、主道路優先のための同時オフセットを目標にするときには、交

互オフセットがオフセット反転となり、このとき予期せぬ交通状況が引き起こされる(交互オフセットを目標とするときは、主道路と従道路から主道路へ流入する車の関係が逆になった状態となり、事情は同様である)。

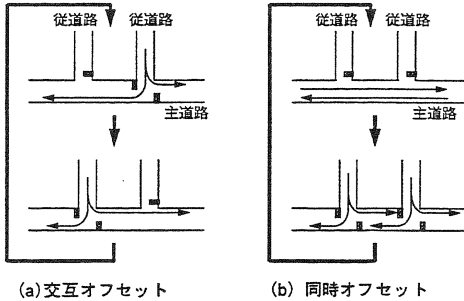


図1 同時、交互オフセットの流れ図

尚、交差点間の距離が離れると、車群、発進波、停止波の拡散によりオフセットの効果が薄れる。そのため、オフセット反転は交差点間の短い同一サイクルのエリアが対象となる。

### 3. オフセット追従問題の定式化と解法

本章ではオフセット反転を回避するためのアルゴリズムの定式化とその解法について説明を行う。

オフセット追従を行う際には、オフセット追従に要する時間を長くさせないため、通常絶対オフセットの回転数に上限 $N$ が設けられている(この条件は $|\beta_i| \leq 2N-1$ )。そして、対象となるネットワーク内のある特定の交差点での絶対オフセットの追従を最小にしたいという制約が課せられている。その下で、オフセット反転総数を最小にしそしてオフセット反転箇所数を最小にした上で、追従に要する時間を最小にする組み合わせ最適化と捕らえることができる(尚追従時間の優先順位は低い)。

次にそれぞれの評価について示す。総オフセット反転数は(4)、オフセット反転箇所数は(5)となる(各道路にペナルティーを付ける場合があるが、本稿では述べない)。

$$\sum_{k \in \text{linkset}} \frac{|\beta_{u(k)} - \beta_{d(k)} + 2\eta_k|}{2} \quad (4)$$

$$\sum_{k \in \text{linkset}} U(\beta_{u(k)} - \beta_{d(k)} + 2\eta_k) \quad (5)$$

$u(k)$ : リンク $k$ の上流交差点番号

$d(k)$ : リンク $k$ の下流交差点番号

ここで $U()$ は以下の関係を満たす関数である。

$$U(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

次に最終オフセット追従時間は(7)となる。

$$\max_{i \in \text{node set}} (\kappa_i + Ck_i) \quad (7)$$

$$\kappa_i = \frac{\beta_i - 1}{2} C + \delta_i, \quad k_i = \left\lceil \frac{|\kappa_i|}{\Delta(\text{sign}(\beta_i))} \right\rceil$$

$\lceil \cdot \rceil$ : 切り上げ

$\Delta()$ : 追従方向別のオフセット追従幅

( $\Delta(1)=C/4$  or  $C/8$ ,  $\Delta(-1)=C/8$ )。

これらの(4),(5),(7)の荷重となる評価関数を決め、その評価関数を最小にするように各交差点の特性値を求めれば良いことになる。尚、初期状態のオフセットが反転の関係に近い場合には、追従判定値に0または1の値をとる変数 $z$ を掛けることにより、反転を1回許す条件が付加できる。

次に解法について述べる。オフセット反転箇所数の評価値は非凸性であるため整数計画のままでは解くことができない。そのため、(4)と絶対オフセット追従量の荷重(近似的に追従時間を示す。尚この量は凸性があるため整数計画への適用が行い易い)を最小にする解を分枝限定法<sup>4)</sup>により列挙し、その中でオフセット反転箇所が短くなり、オフセット追従時間を短くなるものを選び出す方法とする。但しこの方法は補助的に利用する線形計画の変数が多くなり処理時間が増大する。そのため、別の方法として、集合被覆問題<sup>5)</sup>として近似的に最適化を実行する方法も用意する。このとき、オフセット反転が集合分割の境界に相当する。但しこの場合には、初期状態がオフセット反転に近い場合での反転を一回許す処理は実行できない。

そして他の組み合わせ最適化手法として、

タブ探索<sup>4)</sup>，線形サーチとの比較を行う。その結果を図2に示す。ネットワークは3交差点から実用上の上限である100交差点までをランダムに発生させ（道路数を交差点数の1.3倍），回転の上限を3とした場合のCPU時間，オフセット反転箇所数，および追従終了時間をプロットした。計算機はPentium® (Intel®) -II 400MHzのPC（信号機システムの約20倍の性能）を使用し，それぞれの値はランダムネットワーク100個の平均を取った。尚分枝限定ベースの手法は，計算時間の関係上36交差点分までしか行っていない。図2より分枝限定法をベースとした解法が最も解の質は良いが，リアルタイム性に問題がある。一方集合被覆問題としてとらえた方法はリアルタイム化として有望であることが解る。

#### 4. まとめ

現在信号制御で課題となっているオフセット反転を回避するようなオフセット追従問題のリアルタイムアルゴリズムの検討を行った。そして，分枝限定法をベースとした方法，集合被覆問題として解いた場合，タブ探索，線形サーチとの比較を行った。その結果，リアルタイム性，解の質を考慮して集合被覆問題として解いた方法が有望であるとの結論に達した。

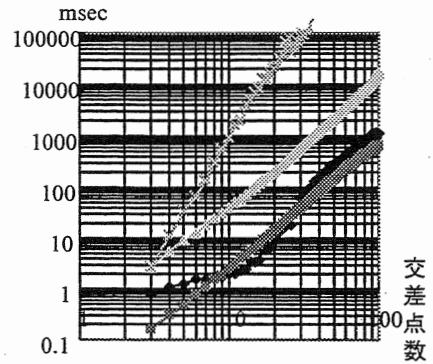
ここでネットワーク規模が大きいと，オフセット反転をある程度積極的に起こしオフセット追従を早めに終了させる方が良くとも考えられる。しかしそのためには，オフセット反転が交通流にどのように影響するか，およびドライバーへの心理状態への影響について，今後検討を行う必要がある。

#### 参考文献

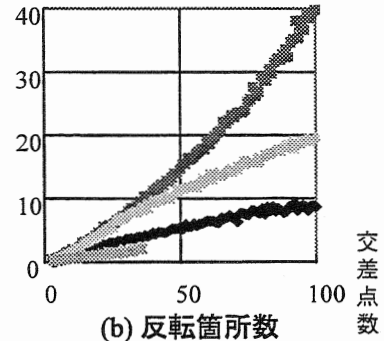
- 1) (社)交通工学研究会：交通信号の手引，(社)交通工学研究会 1994.
- 2) 井上健士，横田孝義：U型伝送を使用した道路交通信号におけるオフセット追従問題の最適解法，電子情報通信学会論文誌 Vol. J81-A No. 4 pp. 562-577 1998.
- 3) 高橋道哉，中西俊男：信号制御による交通流への影響とシミュレーション，成蹊大

学工学報告 NO. 33 pp. 2243-2245 1982.

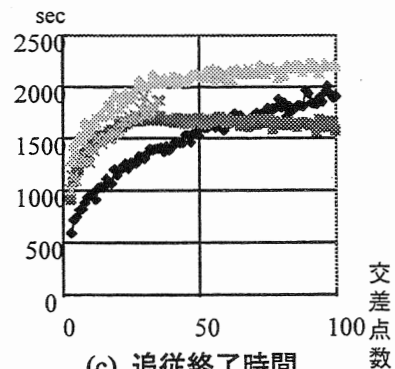
- 4) 茨木俊秀：離散最適化法とアルゴリズム，岩波講座 応用数学 方法 8 1993.
- 5) 今野浩，鈴木久敏：整数計画法と組み合わせ最適化，日科技連 1991.



(a) CPU時間



(b) 反転箇所数



(c) 追従終了時間

◆ 集合被覆      △ タブ探索  
 ■ 線形サーチ      × 分枝限定ベース

図2 各手法の比較