

信号機制御の現状と高度化の展望

—オフセット制御—

(株)日立製作所 日立研究所 横田 孝義, 井上 健士, 堀田 都
〒319-1292 茨城県 日立市 大みか町7-1-1

交通流は、対象となる系に人間の行動が絡むためモデル化が困難であり、またセンサーの関係上可観測となっていない。このため信号機の制御は、メカトロ等で使われるような制御理論が適用できず、基本的にパターン選択と呼ばれる幾つかの信号機パターンをタイマーやセンサーで切り替えるといった手法を中心に議論され、実用化されている。本稿では、特にオフセットに対する信号機制御に関する現状および課題と、今後の信号制御の高度化の展望を述べる。

1. 現状の信号制御とその課題

信号機の制御は、交通安全の確保という制約の下、閑散交通のときには停止回数及び旅行時間の低減、過飽和交通のときには交通量の最大化及び旅行時間の低減が基本的な目標となる。ここで、信号機の制御は現状、サイクル（信号機の周期）、スプリット（青時間のサイクル比）、オフセット（隣り合う信号機の青時間の開始の秒数差）の3つのパラメータを変化させるようにしている。以下それぞれのパラメータの設定及びオフセットの追従について述べる。

1.1 サイクルとスプリット

サイクル、スプリットの値については、ある程度適切な制御方法が確立している¹⁾。このサイクルを短くすると、車の待ち時間が短くなるものの切り替えによる全赤及び黄色の損失時間が増大し、交通容量が低下する。またサイクルを長くすると車の待ち時間が増大するものの、上記損失時間が低下し交通容量が増えるという性質を持つ¹⁾。このため渋滞する状況ではサイクルを伸ばすような傾向にある。しかし、あまりサイクルを伸ばしすぎると、歩行者の横断待ち時間が増え苦情が出る等の問題があるため、現状では170秒程度までしか伸ばすことができない。

スプリットは、大きな幹線道路が交差するような状況では、交通需要の配分比により値を決めると車の待ち時間が最小となることが知られている¹⁾。また幹線道路に交通需要の少ない従道路が交差する場合には、従道路側の秒数を横断歩行者が安全に渡りきれるように設定する。この秒数は各県によって基準が違うが、基本的に横断距離の1.5倍程度の秒数を確保している。この結果、運用者がサイクルを縮めると幹線道路のスプリットが小さくなるため、サイクルを上げざるをえない。またスプリットの値を1%変化させるだけで、過飽和時には1時間あたりに100m程度の渋滞が成長すると言われているため、この値の設計は慎重を極める。これらの2つの値は、時間軸でみると可範囲ではサイクル単位で変化させることができるが（但し、サイクルの変更には通常オフセットの変更を伴うため、後述するオフセット追従の問題が起きる）、あまり自由度が無い。

尚このサイクルとスプリットの自動生成に関して、U型自動生成が実現されている²⁾。この自動生成機能により、単独交差点での最適な運用が可能となるが、交差点間隔が短く、相互の交通流が干渉する場合にはその適用が困難となる。

1.2 オフセットと系統制御

系統制御は、サブエリアと呼ばれる¹⁾サイクルが同じ値になる交差点をまとめた単位で行う。このサブエリア内では信号機のサイクル毎に車群が形成されるため、オフセットによる信号機制御の効果（いわゆる系統効果）が高い。この各オフセットのオフライン設定手法について表1にまとめる¹⁾³⁾。

表1. 主なオフセットのオフライン設定手法

	手法	モデル	シミュレーション方式	最適化方法	リアルタイム性	精度
非飽和	台形投射方式	スルーバンド	代数的	代数的	◎	△
	TRANSYT (ODET)	車群	タイムスキャン	最急降下	○	○
過飽和	SATURN	流体	タイムスキャン	最急降下	△	×
	CONTRAN	パケット	タイムスキャン	最急降下	△	×
	日立方式	1台毎、加速減速無限大	イベントスキャン	最急降下、GA	×	△

この表1に示すように、非飽和時にはオフセット計算のオンライン化が可能であり、実際に一部の県警においてTRANSYTをベースにしたオンライン計算が実現している。しかし、過飽和時には現状オンライン化は難しい。一方オンラインでオフセット、サイクル、スプリットの制御を行う方法としてイギリスのSCOOTがある。しかしSCOOTは非飽和交通にしか対応できていない、またセンサーの数が各リンクに大量に必要であるという課題がある¹⁾。

このオフセットを決定する評価値として、現状停止回数、旅行時間、総交通量最大化といったものがある。しかしこれらの評価値が必ずしも、ドライバー、住民にとって適切でないという課題がある。例えば夜間の閑散交通の場合には、信号機が連続して青になるとスピードを出しすぎて事故が起りやすい。また、渋滞時に従道路を混ませ幹線道路の円滑化を図ると、従道路が青のときに横断歩行者がいても強引に主道路に流入する車が増え歩行者の安全が確保できなく、また付近住民及びドライバーからの苦情が殺到することになる。このため、安全の評価や地域事情等を考慮した評価をも取り入れる必要がある。

更に系統制御を行う上で押しボタン信号の問題もある。押しボタン信号を系統に入れると、系統のサイクルに同期した横断しか許されなくなるため歩行者の待ち時間が増え、苦情の電話がきたり、歩行者の信号無視が多くなり好ましくない。しかし、押しボタン信号を系統から除外すると交通流が乱れ系統制御の効果が低下する。この兼ね合いをも考慮しなければならない。

1.3 過飽和時の系統制御

過飽和時のオフセットの制御は、基本的にボトルネックとなる信号交差点を通過できる交通量を上流側の交差点の主道路、従道路へどう配分するかの問題であり、サイクルの制御のように交通容量を増やすことができない。しかしながらオフセットによる系統制御は、旅行時間に敏感に作用し、また可範自由度も高いためこの活用に期待が持たれている。

過飽和時モデルとしては、発進波、停止波及び車群を再現できる範囲で、できるだけ計算時間の短いものが必要である。このため、我々はタイムスキャンのマイクロシミュレーションや流体モデルの数値解法を用いずに、速度2値のイベントスキャン方式のマイクロシミュレーションを使用している。また最適化手法として、評価関数がローカルミニマムに陥らないようなGA法と、微調整が可能な最急降下法の2通りを用意している。この適用例として2 km程度の一直線道路

で、ピーク時に 540 秒程度要した旅行時間が 340 秒程度に低減されるといった結果が得られた。しかしながら、この方式では従道路側の待ち時間が増大するという問題点がある。このため地域事情を考え、ある従道路に関しては優先的に車の流入を行うような戦略的なオフセットの設定が必要となる。

1.4 オフセット追従

オフセット値の変更は、歩行者横断秒数の確保及び、ドライバーへの影響を考慮して数周期に分けて徐々に行わなければならない¹⁾。オフセットを変更する際の動作であるオフセット追従は交通流を乱すことがシミュレーション及び経験上解っているため、できるだけオフセット追従に要する時間を短くする必要がある。また目標のオフセットに対し、追従中のオフセット位相が 180 度ずれる現象であるオフセット反転が起こると、交通渋滞を引き起こす可能性がある。このため、オフセット追従を極力避けるように信号機の制御を行わなくてはならない。ここでオフセット追従を頻発させない対策として、一度オフセット追従を起こすと一定時間オフセット追従を受け付けないロックイン、そのロックインの解除のロックアウトが信号制御に取り入れられている。そのためオフセットの変更は、ある一定時間後の交通状況を予測する必要がある。図 1 にオフセット追従を最短に行った場合と、オフセット反転を回避した場合の様子を例を示す。

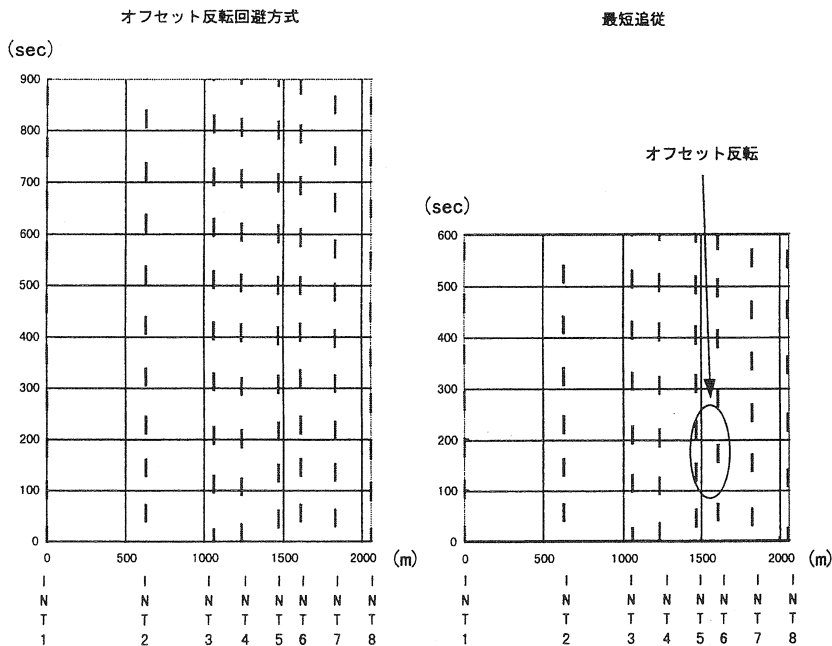


図 1 オフセット追従

次にオフセット追従を解くアルゴリズムについて紹介する。オフセット追従は各交差点毎にプラス追従、マイナス追従の 2 通りの組み合わせを持つ組み合わせ最適化問題である。通常この問題は NP 問題（解く手続き数が多項式オーダーでない問題）であるが、1 直線状の道路ネットワークでは P 問題（解く手続き数が多項式オーダーである問題）となりリアルタイムで解くことができる⁴⁾。また任意のネットワークに対してもリアルタイムで解くことができるアルゴリ

ズムを我々は提案している。また我々は、一般的にオフセット反転は免れることができないことを証明している。

2. 今後の信号制御の展望

信号機の高度化を行う際予算の関係上、現状インフラに乗せられるようなアルゴリズムでなければ、実現不可能である。このため、現状インフラを極度に變更しないような信号制御の手法の検討を行う必要がある。

2.1 オブザーバ問題

前述で述べたように、オフセットの制御はオフセット追従を伴うため、予め一定時間後の交通状況を予測しなければならない。この予測手法とし ARMA のような線形時系列予測ではなく、実際の人間行動及び交通流の物理的特性に基づくモデルにより行うようにする必要がある。

また現実問題、感知器の数が元の状態変数を推定できるようになっていない。これは、分布定数の系を限定された地点感知器で補うという本質的な不整合に起因しているものと思われる。上記分布定数的系を把握するために必要な離散的なセンサーの設置密度等の理論が不在であることが問題であるし、このような理論化はたとえ出来たとしてもコストの関係上現実問題不可能であろう。このため、分布定数的な状態変数を得るため、双方向ビーコン等の路車間通信によって車の走行軌跡をアップリンクし、その軌跡データにより交通状況を再現する等のいわゆるフローティングカーのような移動体センサの普及に期待がかかる。また画像感知器を用いて、走行軌跡の再現や、交差点の右左折率の取得ないし、センサーデータフュージョンによる誤差の低減、データの補間も行う必要がある。

2.2 擬似的な現代制御による信号機制御

現状信号機制御は、分布定数的系の道路に対してであるため、必ずしも可制御とはいえない。このため、現代制御に使用されるオイラー・ラグランジュの変分問題としてとらえることは難しい。また前述したオフセット追従の問題は定常から定常へ交通状況が変遷する場合を仮定しており、必ずしも非定常に適應したものではない。このため従来のパターン選択による手法では交通流に対して必ずしも良い制御を行えるとは限らない。

このため信号機制御を、目標値の無い汎関数を最小化するような制御の問題と捕らえることにする。この汎関数を最小化する信号機のパラメータの組み合わせ最適化問題を通常リアルタイムで解くことは絶望的である。しかし、あるタイムステップを切り、前のパラメータを初期値にし、大幅に値を變更しない範囲で次のパラメータを最急降下等のヒューリスティックな方法で解くことにより、リアルタイム化が可能であると思われる。さらに言えば、交通需要をさばくという観点を離れ、制御パラメータによって、交通需要自体に立ち入った視点で検討する必要がある。

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 平成6年7月第1版
- 2) 平成6年度 UTMS 推進協議会活動報告書, UTMS 平成7年6月
- 3) 井上健士, 二村光信, 横田孝義, 佐野豊: 渋滞時におけるイベントスキャン方式シミュレーションを用いたオフセット設計, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J81-A No. 4 pp. 578-589 1998.
- 4) 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.