

# 系統交通信号の制御パラメータ連続自動調整によるリアルタイム制御の一方式

## A Method of Real-Time Control for Traffic Signal Coordination through Sequential Adjustment of Control Parameters

久井守\*\*・金子数馬\*\*\*

By Mamoru HISAI\*\*・Kazuma KANEKO\*\*\*

### 1. はじめに

系統交通信号はサイクル長を共通の長さに統一した上でオフセットを設定して一連の信号を制御する制御方式である。制御パラメータ、すなわち共通サイクル長およびオフセットを交通状況の変化にあわせてどのように最適性を維持していくかが系統制御の最大の課題である。

わが国の系統制御では、制御パラメータの形成方式による制御の試みも一部では行われているが、現在のところ、共通サイクル長およびオフセットはいずれもプログラム選択方式による制御が主流となっている。プログラム形成方式によるリアルタイム制御はクリティカル交差点のサイクル制御とスプリット制御を中心に行われているのが現状である。

プログラム選択制御では、共通サイクル長やオフセットなどの制御パラメータを準備したり、アップデートするのに人手とコストを要し、また想定外の交通状態には対応できないなどの欠点がある。したがって制御パラメータを毎サイクル自動的にオンラインで調整し、それによってつねに最適制御を維持することができれば、人手を要することなくコスト的に効率のよいリアルタイム制御システムが構築できることになる。

そのためには、オフセットとサイクル長を毎サイクル自動的に微調整するための方法論を確立することが必要である。本研究は、その方法論を確立するために筆者らが行ってきた一連の検討結果<sup>1),2),3)</sup>をまとめたものである。

本研究では1本の系統信号路線を対象とし、プログラム選択制御の欠点を克服するような連続自動調整による一つの制御方式を提案することを目的とする。プログラム選択制御では、制御対象路線の代表地点で交通量を計測し、あらかじめ用意した制御プログラムの中からその交通量に対応した制御パラメータを選択して制御を行

う。これに対して本研究では、オンラインで計測した交通量をベースにし、リアルタイムで交通流再現シミュレーションを行い、そのシミュレーションによって得られる評価指標（本研究では遅れ時間）を最小にする最適な制御パラメータを逐次生成する。ただし最適化する制御パラメータは、例えばオフセットの場合は、オフセットそのものではなく、現行の絶対オフセットを既知とし、その変更量（または調整量）の最適化を行う。得られた最適変更量はリアルタイムで実行するというのが方法論の基本的考え方である。

### 2. 既往の関連研究と本研究の位置づけ

制御パラメータの自動生成に関する既往の研究は多数ある。それらは大きく3つに分類することができる。

第1分類の研究は、制御パラメータをリアルタイムで自動調整するというものである。国内では3つの制御パラメータを同時に自動調整する浅野らの研究がある<sup>4)</sup>。海外ではSCOOTが普及している<sup>5)</sup>。これら第1分類の研究は評価指標を改善する方向に逐次制御パラメータを移動するという方法によるものである。考え方としては勾配法による最適化といえる。したがって局所解を回避するための工夫が必要ではないかと考えられる。

第2分類の研究は、リアルタイムシミュレーションで評価指標を求めながら制御パラメータを最適化するという研究である。オンラインで最適オフセットを自動生成する研究<sup>6)</sup>、およびサブエリア構成を含め制御パラメータを一括して最適化する研究がある<sup>7)</sup>。前者はTRANSYTのリアルタイム版であり、後者の研究は局所解を回避するためにRS(Random Search)などの組合せ最適化の手法を用いている。ただし両研究では、得られたオフセットを実現するためにはプログラム選択制御と同じくオフセット追従が必要になるものと思われる。

第3分類の研究は、交差点への到着交通に応じて青信号の打ち切りか延長かを常時判断するというサイクルレスの制御である<sup>8),9)</sup>。海外ではローリングホライズンの概念によるリアルタイム制御方式としてOPAC<sup>9)</sup>、UTOPIA<sup>10)</sup>、RHODES<sup>11)</sup>がある。

本研究は、リアルタイムシミュレーションで評価指標を求めるという第2分類に属する研究である。ただし

\*キーワード： 交通流，交通制御，ITS

\*\*正会員，准教授，山口大学工学部知能情報工学科

（山口県宇部市常盤台2 46 1

TEL：0836 85 9533 E-mail：hisai@yamaguchi-u.ac.jp）

\*\*\*学生員，山口大学大学院理工学研究科

（山口県宇部市常盤台2 46 1

TEL：0836 85 9533 E-mail：e014ff@yamaguchi-u.ac.jp）

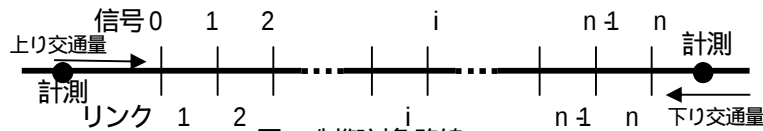


図 1 制御対象路線

オフセットについては、その変更量を最適化することとし、したがってオフセット追従方向も同時に最適化できるというのが本研究の利点である。また浅野らの研究とは異なり、本研究では遅れ時間などの評価指標を直接計測することはしない。しかし逆に交通流計測装置は既存システムの感知器を用いるだけですむというメリットがある。また最適化手法としては反復局所探索法を用いることとし、局所解を回避することを明確に意図している。

### 3. 連続自動調整制御の基本的考え方

#### (1) 制御対象

本研究では図 1 に示すような 1 本の系統信号路線を対象とする。信号番号は左から 0, 1, 2, 3, ... とし、またリンク番号は左から 1, 2, 3, ... とする。交通条件は非飽和とする。その上でオフセットと共通サイクル長の連続自動調整による最適制御を検討し、その方法論を提案する。過飽和は対象外とする。過飽和条件下ではオフセット制御よりもむしろ青時間制御（スプリット制御）が重要となり、また非飽和時とは異なる観点から制御論理を考える必要があるからである。

#### (2) リアルタイムシミュレーション

本研究ではオンラインで交通流を計測し、得られた計測情報をベースにしてリアルタイムで対象路線の交通流再現シミュレーションを行うものとする。非飽和を前提としているので交通現象は信号周期をサイクルとするほぼ周期的な現象と考えてよく、したがってシミュレーション対象時間は短くてもよい。評価指標として用いる遅れ時間など、制御に必要な情報はこのシミュレーションから推定計算によって求める。これが方法論の基本的考え方である。

非飽和を前提とするので、シミュレーションモデルは TRANSYT タイプの交通流モデルでもよい。近飽和交通も扱えるようにしたいという場合には離散モデルも考えられる。本研究では方法論の提案であるから TRANSYT タイプの交通流モデルを用いることとする。その場合、オンライン情報として対象路線境界への到着交通需要量が最低限必要である。

#### (3) オンライン交通流計測

本研究では交通流再現シミュレーションで最低限必要

な交通量はオンライン計測によって収集するものとする。すなわち図 1 に示すように制御対象路線両端の上り交通量と下り交通量はオンライン計測によって収集する。交差点流入部ごとの右左折率やリンク走行速度も必要であるが、ここではオフライン調査で得られたものとして扱うこととする。遅れ時間は直接計測せず、シミュレーションによって推定するものとする。したがってある程度の推定誤差は覚悟しなければならない。推定精度を高めるためには計測情報を増やす必要があるが、計測と通信に要するコストが高くなる。精度とコストの関係で考慮すべき問題ともなる。また情報の集計や伝達に起因する時間遅れを小さくすることについても十分にこれを考慮しなければならない。IT 技術の進展で得られるようになった交通情報も多く、これらをうまく活用することができれば、それも望ましいことである。

#### (4) グローバル最適化手法

本研究では、オフセットの最適状態を維持するために、絶対オフセットの現在値を既知とし、その変更量（調整量）を未知数として最適化するという考え方とする。サイクルごとの交通量変化に応じて絶対オフセットの最適調整量を求め、その結果に従って絶対オフセットをリアルタイムで調整する、というのが方法論の基本的考え方である。サイクルごとに求められる調整量が小さい場合には微調整となり、それを繰り返すことによって最適制御を維持することができ、プログラム選択制御におけるオフセット追従は必要ではなくなる。しかし、局所解に陥るようなことは絶対に避けなければならない。したがって最急降下法のような最適化手法は望ましくない。最適化手法としては局所解を回避しグローバル最適解の探索を明確に意図したものでなければならない。局所解を回避することを考慮してこれまでは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いてきた<sup>1), 2)</sup>。しかしリアルタイム制御に適用するためには演算速度の速い計算法が望ましい。したがって本研究では GA よりも演算効率が良いと思われる反復局所探索法を用いることとする。

#### (5) オフセットのリアルタイム制御の実行

系統制御のオフセットについては信号ごとの絶対オフセットと、隣接信号間の相対オフセットという 2 とおりの定義がある。この 2 とおりのオフセットは互いに変換

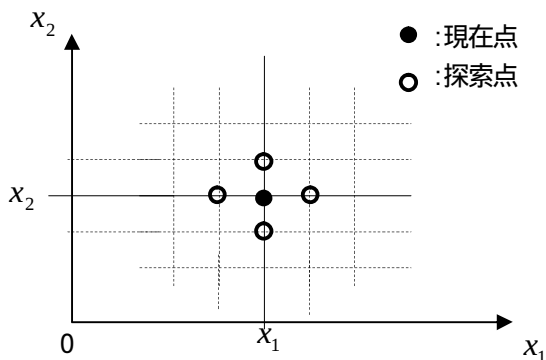


図 2 局所探索

が可能であるから、オフセット最適化ではそのいずれを未知数にとってもさしつかえはない。ただし実際にオフセットをリアルタイムで変更するには、信号ごとに絶対オフセットを変更することが必要である。このことを考慮して、本研究では絶対オフセットの現在値を既知とし、その変更量を未知数とし、逐次その最適化を行うこととする。最適化で得られた変更量がプラスの場合は、その信号のサイクル長を大きくすることによって絶対オフセットを変更し、マイナスの場合はサイクル長を小さくすることによって変更する。

ところで絶対オフセットの1サイクル当たりの最大追従量はサイクル長 $C$ の $\pm 1/8$ 、すなわち $\pm C/8$ とされている<sup>12)</sup>。絶対オフセットの変更量がこの最大追従量を上回る場合には、複数のサイクルにわたってオフセットを変更することが必要になる。絶対オフセットの変更量が $\pm C/4$ 以下であれば、オフセット変更は2サイクルで完了し、制御の時間遅れや交通流の乱れは少なくともすむ。したがって絶対オフセット変更量を最適化する場合に、その変更量にこのような上下制限を課したいところではあるが、そのようにすると最適性が必ずしも保証されないので留意する必要がある。

#### 4. 反復局所探索法

##### (1) メタ戦略

本研究ではメタ戦略と総称される最適化手法の中から、GAよりも演算効率が良いと思われる最適化手法として反復局所探索法(Iterated Local Search: ILS法)を採用し、オフセットの連続自動調整に適用することとする。

メタ戦略というのは、柳浦・茨木から引用すると、

- 1) 過去の探索の履歴を利用して新たな解を生成し
- 2) 生成した解を評価し次の解の探索に必要な情報をとり出す、という操作を反復して最適解を求める計算法である<sup>13)</sup>。メタ戦略は目的関数の勾配を用いる探索手法ではなく、GAと同じく、いわば確率探索手法であり、全域

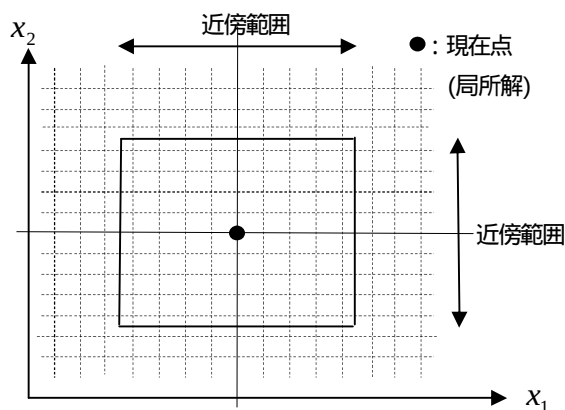


図 3 近傍範囲内で新しい初期点を設定する

的最適解の探索を意図した手法であるという点に特徴がある。

##### (2) 反復局所探索法ILSの計算法

反復局所探索法は、ランダムに初期点(現在点)を与え、連続して全域解を改善することができなかった局所探索の回数が、あらかじめ指定した最大反復回数に達するまで、次の2つのステップを反復して全域的最適解を求めようという計算法である。

ステップ1: 2変数の場合は図2のような格子点の中から、現在点の上下左右4個( $n$ 変数の場合は $2^n$ 個)の探索点について目的関数または評価指標(Performance Index: PI)を求め、その中からPIが最小となる点に移動しそれを新しい現在点とする。PIが減少しなくなるまで現在点の移動をくり返す。

ステップ2: PIが減少しない、すなわち局所解に達したら、図3に示すようにその局所解を中心とする近傍範囲内にランダムに点を取り、それを新しい初期点(現在点)とし、ステップ1に戻る。

近傍範囲は、反復回数が小さいうちは探索範囲の10%程度からはじめて、次第に大きくし、最終的には70%程度となるようにした。格子点の間隔 $\Delta x$ は問題に応じて適切な値を選択する必要がある。本研究では、絶対オフセットの変更量を最適化する場合の格子点間隔は原則0.02(単位は対サイクル長比)とした。これはサイクル長を50分割したヒストグラムで車群パターンを表現するというTRANSYT交通流モデルを用いることを考慮したためである。

##### (3) 反復局所探索法ILSの選択

メタ戦略の中でも、特に反復局所探索法を選択したのは、演算効率などの性能比較をした筆者らの研究結果に基づいている<sup>3)</sup>。具体的には、メタ戦略<sup>13), 14), 15)</sup>の中から一般に用いられることが多く、かつプログラミングが

表 1 ILS と GA の性能比較

| 最適化手法    | シミュレーション<br>平均実行回数 | PI<br>最小値 | PI<br>最大値 | PI<br>平均値 | 平均計算<br>時間[秒] |
|----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| ILS(10)  | 9999               | 0.00      | 15.35     | 2.38      | 1.3           |
| ILS(200) | 25471              | 0.00      | 1.17      | 0.33      | 3.0           |
| GA(50)   | 241531             | 0.00      | 2.73      | 1.31      | 54.3          |

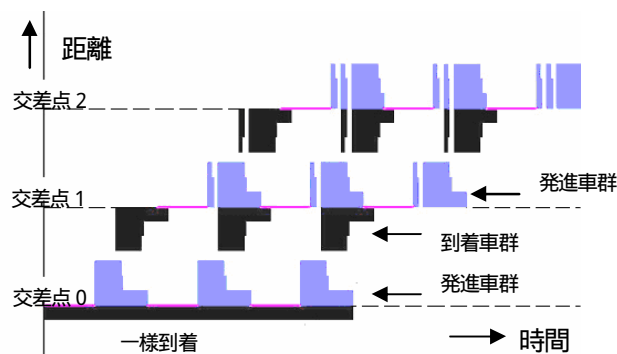


図 5 TRANSYT 交通流モデルによる車群パターン(拡散なし)

比較的容易な次の 5 つの計算法を比較した結果である。

- アニーリング法(Simulated Annealing: SA法)
- アント法(Ant Colony System: ACS法)
- 誘導局所探索法(Guided Local Search: GLS法)
- タブー法(Tabu Search: TS法)
- 反復局所探索法(Iterated Local Search: ILS法)

#### (4) ILS と GA の性能比較

ILS と GA の性能比較も筆者らの研究<sup>3)</sup>で示しているが、その結果を引用して表 1 に示す。この表は図 4 に示すように 500m 間隔に 9 信号がある路線を対象として相対オフセットの最適化を行った結果を示したものである。未知数は変更量ではなく相対オフセットそのものとした。未知数は 8 個である。上下制限約条件はなしとした。初期相対オフセットはすべて 0.0 とし、両手法のプログラムを 25 回ずつ実行して 25 個の解を求めた。評価指標 PI は TRANSYT 交通流モデルによるシミュレーションを実行して求めた。TRANSYT 交通流モデルとメタ戦略を組み合わせさせた信号制御最適化もいくつか行われている<sup>7), 16)</sup>が、本研究の性能比較はこれらと同じ範疇の研究となる。なおここに評価指標 PI というのは遅れ時間と停止回数の加重和である。

この表 1 ではシミュレーションの実行回数、PI の最小値、最大値、平均値および計算時間の観点から性能評価を行った。シミュレーション実行回数は PI を求めた回数であり、ILS の場合は探索した探索点の個数となり、GA の場合は個体の総数に等しくなる。この実行回数と計算時間はほぼ比例する。計算条件は、サイクル長

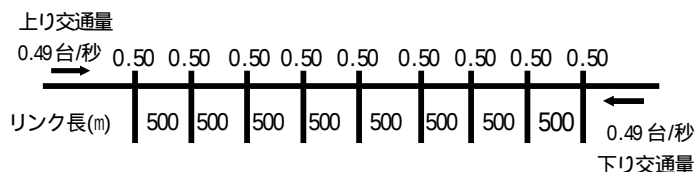


図 4 交差点が等間隔の路線

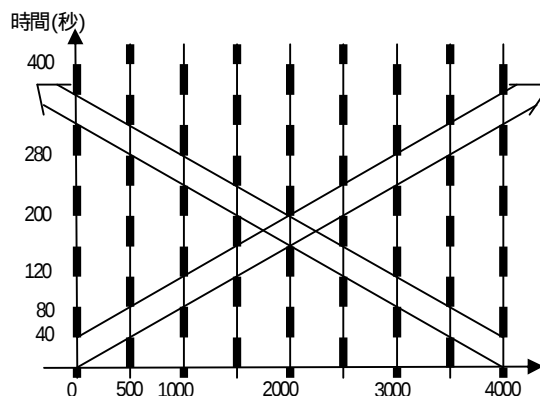


図 6 完全優先オフセット

$C=80$ 秒、損失時間 $L=0.0$ 秒、走行速度 $v=12.5$ m/秒、飽和交通流率 $s=1.0$ 台/青秒、右左折なし、車群拡散なしとする。図 5 は右左折も車群拡散もない場合の TRANSYT 交通流モデルの車群パターンの例を示したものであるが、図 4 に示すように交通量は 0.49 台/秒と飽和に近いので、到着車群と発進車群はいずれも図 5 の階段波とは異なり飽和方形波に近いものとなる。この対象路線とこの交通条件では図 6 に示すように最適相対オフセットは全リンクで 0.5 となる。これは上り完全優先オフセットであり、かつ下り完全優先オフセットでもある。したがって PI の最小値は 0.0 となる。このように最適解が既知となるように道路交通条件を設定したものである。

表 1 では ILS は最大反復回数が 10 回の場合と 200 回の場合の 2 つを示している。GA は集団サイズ 50、最大世代数を 100 とする計算を 100 回反復した。遺伝的操作は交叉、再生産および突然変異の 3 つを用いた。計算には CPU が Pentium、クロック周波数 2.5GHz のパソコンを用いた。プログラミング言語は c 言語とした。限られた計算例ではあるが、ILS で最大反復回数を 10 回とした場合、PI の最大値と平均値はいずれも GA より劣るが、最大反復回数を 200 回まで増やすと PI の最大値と平均値はいずれも GA より小さくなり、しかも計算時間は GA の 1/10 程度ですむという結果となった。この結果から、以降の計算では ILS の最大反復回数は 200 回と設定して計算を行った。

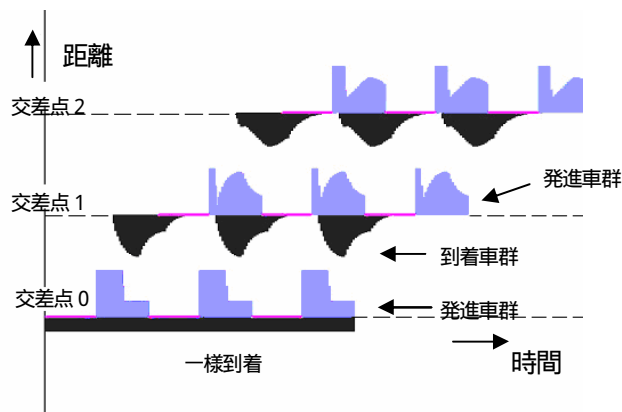


図 7 TRANSYT 交通流モデルによる車群パタン(拡散あり)

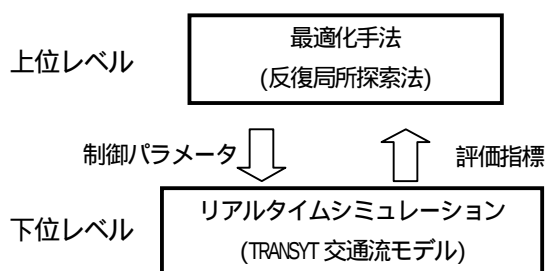


図 9 オフセットの最適化計算

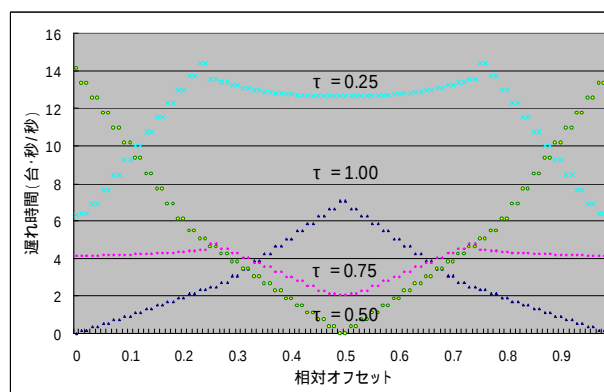


図 8 TRANSYT 交通流モデルで求めた遅れ時間

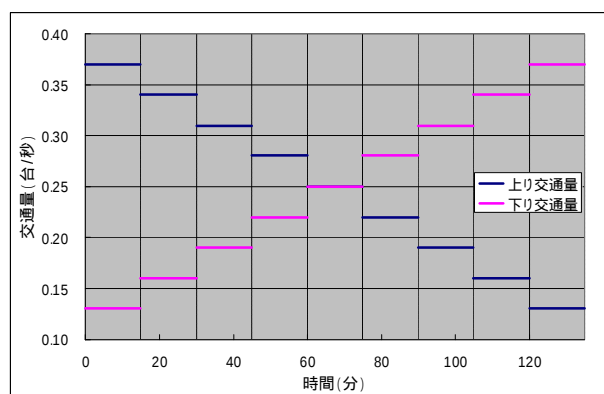


図 10 交通量水準の時間変化

## ( 5 ) TRANSYT交通流モデル

表 1では評価指標PIをTRANSYT交通流モデルによるシミュレーションで求めたが、このTRANSYT交通流モデルというのはサイクル長を50分割した50個の時間区間ごとの交通流率をヒストグラムで表わす車群モデルである。TRANSYTは信号群のスプリットとオフセットをオフラインで設計するためのツールであり、世界的に広く用いられている。本研究ではTRANSYTの中の交通流モデルの部分を独自にプログラム化し、これを用いて交通流を再現し遅れ時間を求めることとする。図 5は車群拡散がない場合の例であるが、車群拡散がある場合の車群パタンの例を示すと図 7のようになる。実際の制御システムに実装する場合には、対象路線の境界に到着する交通量をオンラインで計測し、これを入力条件としてリアルタイムでシミュレーションを行って遅れ時間を求めることを想定している。2信号1リンクの上下両方向の合計遅れ時間と相対オフセットの関係をTRANSYT交通流モデルで求めた例を図 8に示す。図中の $\tau$ はリンク長の時間距離(対サイクル長比)である。

## 5．オフセットの連続自動調整による制御の実行例

### ( 1 ) オフセットの連続自動調整による制御の計算法

本研究では、絶対オフセットの現在値を既知とし、その変更量を最適化する。評価指標 PI の遅れ時間はTRANSYT 交通流モデルで求める。PI は遅れ時間と停止回数の加重和であるが、ここでは停止回数は評価指標に含めないこととした。遅れ時間は交差点に到着する車群パタンのこうむる確定的な遅れ時間にランダム遅れを流入部ごとに加算して求めるようにした。ランダム遅れはTRANSYT 交通流モデルではWebsterの遅れ公式第2項の $1/2$ 、すなわち $x/4(1-x)$ で求める(単位は台・秒/秒)。ここに $x = qC/sG$ である。 $s$ は飽和交通流率、 $q$ は交通量、 $C$ はサイクル長、 $G$ は青時間である。

最適化は図 9に示すように最適化手法を上位レベルとし、リアルタイムシミュレーションを下位レベルとする2レベルの計算方式とする。上位からはオフセットおよびサイクル長などの制御パラメータを与え、それを条件として下位でシミュレーションを行い、評価指標を求めてそれを上位に返すという計算方式である。

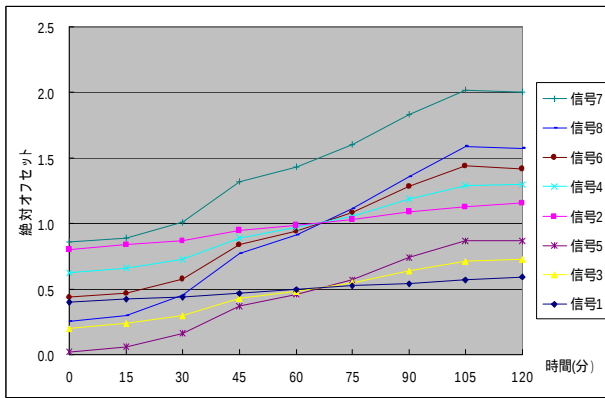


図 11 絶対オフセットの時間推移

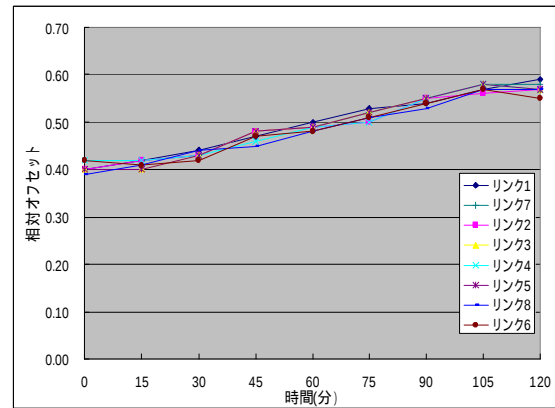


図 12 相対オフセットの時間推移

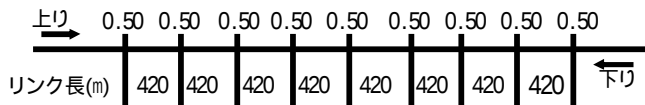


図 13 交差点が等間隔の路線

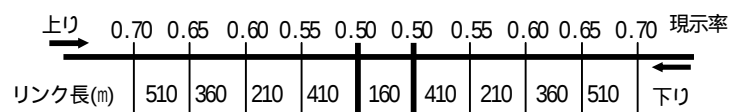


図 14 左右対称の路線

## (2) 計測交通量の集計と制御遅れ

本研究の制御手法を実際に適用してリアルタイム制御を実行する場合には、交通量計測に最低でも1サイクルは必要である。オフセット変更量の計算時間は数秒としても、オフセット変更には通常1～2サイクル必要である。オフセット変更量が多い信号がある場合にはオフセット変更時に最大4サイクル程度は必要となる。ただしオフセット変更途中でも、交通量は常時計測しその計測交通量に対するオフセット変更量の計算は毎サイクル実行することができる。したがってオフセット変更が終了したら、その次のサイクルで新たに求めたオフセット変更量を実行することができる。

次に示す2つの計算例では対象路線両端への到着交通量の計測、オフセット変更量の計算、およびオフセット変更の3つが交通量水準変更の時点で同時に瞬間的に実行されるという仮定の下で計算を行う。したがって計算結果として得られた遅れ時間は、オフセット変更途中の交通流の乱れや制御遅れの影響を考慮したものにはなっていない。したがってその計算結果は理想的な制御が実行されたとしたときの最良の結果を示したものであると解釈しなければならない。

## (3) オフセットの連続自動調整による制御の計算例

### a) 計算例1

対象路線は図13に示すようにリンク長をすべて420mとし、等間隔に9信号がある路線とする。現示率は全信号0.50とする。それ以外の計算条件は、 $C=100$ 秒、 $L=10.0$ 秒、平均速度  $v=12.0$ m/秒 (43.2km/h)、 $s=0.9$ 台/青秒(片側2車線)、右左折なし、車群拡散ありとする。

交差方向の交通は考慮しない。右左折なしとしたのは、オフセット制御を評価するときの攪乱要因となるのを避けようと考えたためである。交通量(台/秒)は図10に示すように上り方向は0.37から0.25をへて0.13まで0.03ずつ減少し、下り方向は0.13から0.25をへて0.37まで0.03ずつ増加するものとする。9水準の交通量水準からなる交通量変化を仮定する。また交通量水準は15分ごとに変化し、15分間は一定の水準を維持するものと想定する。

未知数は絶対オフセットの変更量とし、また原則としてその変更量には上下制限約は課さないものとし、交通量水準が変化することに絶対オフセットの最適変更量を求めた。

基準信号0を除いた交差点ごとの絶対オフセットの推移を図11に示す。この図の絶対オフセットは基準信号の絶対オフセットに対する値に換算したものである。またリンクごとの相対オフセットに換算したものの推移を図12に示す。平均速度によるリンク走行所要時間は35秒で、サイクル長に対する比率は0.35となる。すなわち上り方向完全優先オフセットは0.35、下り方向完全優先オフセットは0.65となる。図12の相対オフセットの変化をみると0.40強から0.60弱まで変化している。すなわち交通量が上り優勢から下り優勢へ変化するのに対応して、オフセットも上り優先から下り優先へ変化しており、交通量変化に着実に応答していることがわかる。なおこの計算例では絶対オフセット変更途中の交通流の乱れは考慮せず、交通量変化に応じて最適オフセットが時間的にどう推移するかという点に着目している。

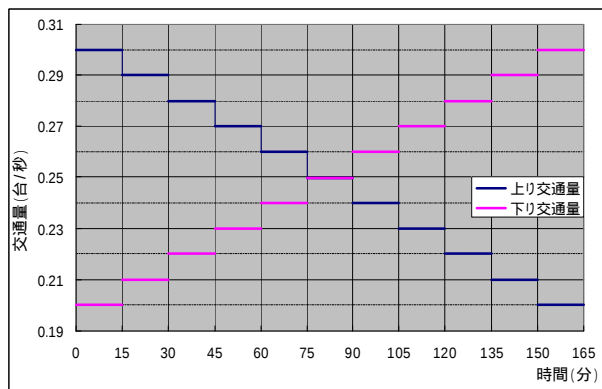


図 15 交通量水準の時間変化

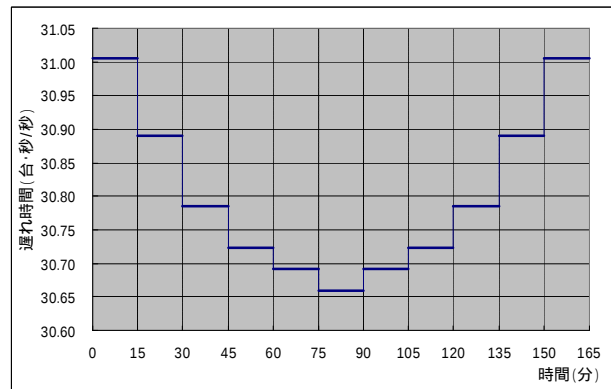


図 16 遅れ時間の時間推移

表 2 絶対オフセットの推移 (制約が $\pm C/1$ の場合)

| 交通量水準 |      | 最適絶対オフセット |      |      |      |      |      |      |      |      |      |        | PI |
|-------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|----|
| 上り    | 下り   | 0         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |        |    |
| 0.30  | 0.20 | 0.85      | 0.36 | 0.79 | 0.87 | 0.31 | 0.38 | 0.81 | 0.83 | 0.27 | 0.73 | 31.005 |    |
| 0.29  | 0.21 | 0.99      | 0.49 | 0.93 | 0.00 | 0.46 | 0.53 | 0.96 | 0.97 | 0.42 | 0.87 | 30.889 |    |
| 0.28  | 0.22 | 0.97      | 0.49 | 0.93 | 0.99 | 0.46 | 0.50 | 0.94 | 0.94 | 0.41 | 0.85 | 30.785 |    |
| 0.27  | 0.23 | 0.93      | 0.47 | 0.91 | 0.97 | 0.44 | 0.45 | 0.90 | 0.88 | 0.36 | 0.81 | 30.723 |    |
| 0.26  | 0.24 | 0.89      | 0.42 | 0.89 | 0.93 | 0.43 | 0.46 | 0.92 | 0.89 | 0.38 | 0.83 | 30.692 |    |
| 0.25  | 0.25 | 0.91      | 0.45 | 0.92 | 0.93 | 0.45 | 0.42 | 0.88 | 0.86 | 0.37 | 0.83 | 30.660 |    |
| 0.24  | 0.26 | 0.87      | 0.40 | 0.88 | 0.91 | 0.42 | 0.39 | 0.88 | 0.82 | 0.35 | 0.79 | 30.692 |    |
| 0.23  | 0.27 | 0.87      | 0.41 | 0.92 | 0.91 | 0.43 | 0.40 | 0.90 | 0.82 | 0.36 | 0.81 | 30.723 |    |
| 0.22  | 0.28 | 0.88      | 0.40 | 0.93 | 0.91 | 0.45 | 0.40 | 0.90 | 0.82 | 0.36 | 0.84 | 30.785 |    |
| 0.21  | 0.29 | 0.87      | 0.40 | 0.93 | 0.89 | 0.44 | 0.36 | 0.88 | 0.78 | 0.34 | 0.81 | 30.889 |    |
| 0.20  | 0.30 | 0.94      | 0.47 | 0.99 | 0.95 | 0.51 | 0.44 | 0.96 | 0.86 | 0.41 | 0.89 | 31.005 |    |

表 3 絶対オフセットの推移 (制約が $\pm C/2$ の場合)

| 交通量水準 |      | 最適絶対オフセット |      |      |      |      |      |      |      |      |      |        | PI |
|-------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|----|
| 上り    | 下り   | 0         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |        |    |
| 0.30  | 0.20 | 0.85      | 0.36 | 0.79 | 0.87 | 0.31 | 0.38 | 0.81 | 0.83 | 0.27 | 0.73 | 31.005 |    |
| 0.29  | 0.21 | 0.84      | 0.35 | 0.79 | 0.87 | 0.32 | 0.38 | 0.81 | 0.82 | 0.28 | 0.72 | 30.889 |    |
| 0.28  | 0.22 | 0.82      | 0.33 | 0.79 | 0.85 | 0.32 | 0.36 | 0.83 | 0.81 | 0.28 | 0.73 | 30.785 |    |
| 0.27  | 0.23 | 0.89      | 0.42 | 0.86 | 0.92 | 0.40 | 0.43 | 0.88 | 0.86 | 0.34 | 0.80 | 30.723 |    |
| 0.26  | 0.24 | 0.81      | 0.35 | 0.82 | 0.86 | 0.35 | 0.39 | 0.84 | 0.80 | 0.29 | 0.74 | 30.692 |    |
| 0.25  | 0.25 | 0.83      | 0.36 | 0.82 | 0.84 | 0.36 | 0.34 | 0.80 | 0.76 | 0.28 | 0.73 | 30.660 |    |
| 0.24  | 0.26 | 0.82      | 0.35 | 0.83 | 0.86 | 0.37 | 0.33 | 0.81 | 0.76 | 0.26 | 0.72 | 30.692 |    |
| 0.23  | 0.27 | 0.78      | 0.30 | 0.81 | 0.81 | 0.33 | 0.29 | 0.79 | 0.71 | 0.23 | 0.68 | 30.723 |    |
| 0.22  | 0.28 | 0.77      | 0.30 | 0.82 | 0.82 | 0.35 | 0.28 | 0.80 | 0.72 | 0.25 | 0.71 | 30.785 |    |
| 0.21  | 0.29 | 0.81      | 0.33 | 0.86 | 0.82 | 0.36 | 0.27 | 0.80 | 0.70 | 0.24 | 0.72 | 30.889 |    |
| 0.20  | 0.30 | 0.73      | 0.27 | 0.80 | 0.76 | 0.32 | 0.23 | 0.76 | 0.66 | 0.21 | 0.68 | 31.005 |    |

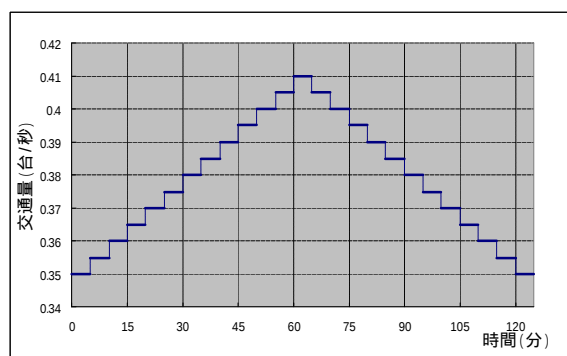


図 17 交通量水準の時間変化

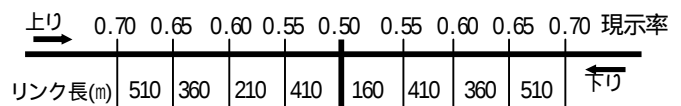


図 18 クリティカル交差点を中心とした路線

## b) 計算例2

次に図 14 に示すように現示率とリンク長が左右対称であるような道路条件について計算を行う。交差点数は 10 交差点である。それ以外の計算条件は、 $C=100$  秒、 $L=10.0$  秒、 $v=12.0$  m/秒、 $s=0.9$  台/青秒、右左折なし、車群拡散ありとする。

交通量(台/秒) は、上り方向は 0.3 から 0.2 まで 0.01 ずつ減少し、下り方向は 0.2 から 0.3 まで 0.01 ずつ増加するものとする。11 水準の交通量水準からなる交通量変化を仮定する。また交通量水準は 15 分ごとに变化するものと想定し、その交通量変化を図 15 に示す。この道路・交通条件では、交通量が上下両方向とも 0.25 台/秒の前後で PI が対称になると予想されるが、図 16

に示した計算結果では予想どおりの結果となっていることがわかる。これにより遅れ時間を最小にするオフセット制御が適正に実現されているものと思われる。絶対オフセットの推移を表 2 に示す。これはオフセット変更量の上下制限約を $\pm C/1$ とした場合、すなわち制約がない場合の結果である。また表 3 はオフセット変更量制約を $\pm C/2$ とした場合である。この 2 つの表を比較すると、いずれも不連続にオフセットが反転するような動きは示していない。小幅な微調整のくり返しにとどまって 1~2 サイクルで変更可能である。絶対オフセットは異なる推移を示しているが、相対オフセットはほぼ同じ推移を示し、また PI も同じ推移をするという結果となっている。

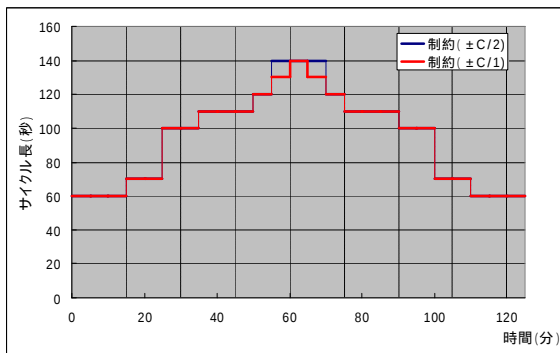


図 19 サイクル長の時間推移

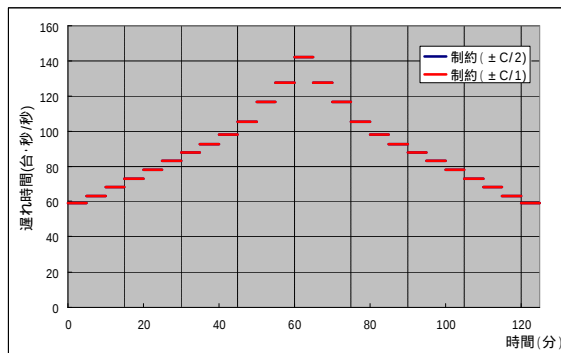


図 20 遅れ時間の時間推移

### c) 計算結果についての考察

オフセットの連続自動調整制御に関する2つの計算例では、計算結果が定性的にあらかじめ想定可能であるような道路条件および交通条件を設定して計算を行った。その結果、想定通りの結果が得られた。したがって本研究で提案した制御手法は有用性があると期待される。しかし計算例が限定的であり、モデルの検証としては必ずしも十分ではない。今後は多様な道路条件と交通条件について計算例を蓄積して検証を重ねていくことが必要であると思われる。

## 6. サイクル長の連続自動調整による制御の実用例

### (1) サイクル長の連続自動調整による制御の計算法

サイクル長の最適化についても、オフセットと同様、サイクル長そのものではなく、サイクル長の変更量を未知数としてその最適化を行う。サイクル長の現在値は既知とし、それに対して $\pm 30$ 秒(10秒刻み)の計7通りのサイクル長を作り、それぞれのサイクル長についてオフセット最適化を行う。オフセットは、絶対オフセットの変更量を未知数としILSによって最適化を行う。その中から遅れ時間を最小にするサイクル長とそのときのオフセットの組合せを最適サイクル長と最適オフセットとする。ただし、サイクル長の探索範囲は60~150秒とする。したがって現在値が例えば60秒の場合には5通りのサイクル長について最適化計算を行うこととなる。

### (2) サイクル長の連続自動調整による制御の計算例

一般に交通量が増加すれば最適サイクル長は大きくなり、減少すれば最適サイクル長も小さくなる。そこで、サイクル長とオフセットの同時最適化を行い、その結果について検証を行う。交通量水準は図17に示すような時間変化を仮定する。すなわち交通量水準(台/秒)は上下両方向等しく、0.35から0.41まで0.005ずつ増加し、次に0.41から0.35まで0.005ずつ減少するものとする。また交通量水準は5分ごとに变化するものと想定する。

道路条件は図18に示すとおりである。それ以外の計

算条件は、 $L=10.0$ 秒、 $v=12.0$ m/秒、 $s=0.9$ 台/青秒、右左折なし、車群拡散ありとする。またサイクル長の初期値は $C=80$ 秒とし、オフセットの未知数は絶対オフセットの変更量とし、その変更量には上下限制約がある場合となしい場合の2通りの条件下で最適化を行う。

計算結果を図19および図20に示す。交通量の増減に伴いサイクル長が定性的に予想されるとおりの変化を示す結果となった。したがってサイクル長の制御が期待通りに機能していることがわかる。ただし、オフセット制御の場合と同じく、この場合も計算例が限定的である。サイクル長制御ではリンク長とその分布が影響することもあると考えられるので、対象路線については、多様な道路条件について計算例を蓄積することが必要であると考えられる。なおこの計算例では遅れ時間にはランダム遅れを考慮しているが、サイクル長の最適制御ではこれを考慮することが重要である。

## 7. まとめ

本研究では、1本の系統信号路線を対象とし、プログラム選択制御の欠点を克服するために、オフセットの連続自動調整によるリアルタイム制御の一つの方法を提案した。すなわちオンラインで計測した交通情報をベースにしてリアルタイムでシミュレーションを行い、それによって得られる評価指標を最小にする最適のオフセット調整量をサイクルごとに求め、得られた最適調整量をリアルタイムで実行するという制御である。最適化手法としては、局所解を回避し、全域的最適解を求め、しかも演算効率のよい反復局所探索法を用いた。計算例では、結果が定性的に想定されるような道路条件および交通条件を設定して計算を行った。その結果、あらかじめ想定されたとおりの結果が得られた。したがって本研究で提案する手法は有効である可能性を確認することができた。しかしながら、計算例は限定的であり、普遍的な結論を得るためにはさらに計算例を蓄積することが必要であると考えられる。

したがって今後の課題としては、右左折交通を考慮した場合、およびその他多様な道路条件および交通条件について計算例を蓄積することが必要である。またリアルタイムシミュレーションに取り込む計測情報とその集計タイミングおよび制御遅れへの対応について検討することも必要である。

#### 参考文献

- 1) 久井 守, 伊賀上 聡: 系統交通信号の制御パラメータの連続調整による自動生成の計算法, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, 2003
- 2) 伊賀上 聡, 久井 守: 系統交通信号のオフセット自動生成によるリアルタイム制御, 山口大学工学部研究報告, Vol.56, No.1, pp.53-61, 平成17年  
<http://memoirs.lib.e.yamaguchi-u.ac.jp/>
- 3) 新川 力, 岡田亘平, 久井 守: 信号制御の最適化におけるメタ戦略の比較と制御パラメータの連続自動調整への適用, 山口大学工学部研究報告, Vol.57, No.1, pp.21-24, 平成18年 <http://memoirs.lib.e.yamaguchi-u.ac.jp/>
- 4) 浅野美帆ほか: 遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.4, pp.879-886, 2003.9
- 5) Hunt, P.B., Robertson, D.I. and Bretherton, R.D.: Split, cycle and offset optimisation technique: the SCOOT on-line traffic signal optimisation technique, Traffic Engineering & Control, pp.190-192, April 1982
- 6) 宇佐美 勤, 榊原 肇: 道路網の信号制御システム, 計測と制御, 第41巻, 第3号, pp.205-210, 2002.3
- 7) 岩岡浩一郎, 織田利彦: リアルタイム交通信号最適化制御, 土木計画学研究・講演集, Vol.25, 2002
- 8) 小林雅文, 宇佐美 勤, 大田利文: リアルタイム情報を用いた次世代の信号制御方式, 土木計画学研究・講演集, Vol.25, 2002,
- 9) Gartner, N.H.: OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control, Transportation Research Record 906, pp.75-81, 1983
- 10) Mauro, V. and Di Taranto: UTOPIA, IFAC Control, Computers, Communications in Transportation, pp.245-252, 1989
- 11) Mirchandani, P. and Head, L.: A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms and analysis, Transportation Research, Vol.9C, No.6, pp.415-432, 2001
- 12) 交通工学研究会編: 改訂交通信号の手引き, 丸善, p.89, 平成18年7月
- 13) 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組合せ最適化 - メタ戦略を中心として -, 朝倉書店, pp.54, pp.73-122, 2002年
- 14) 三井和男ほか: 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, コロナ社, pp.19-32, 2004年
- 15) Fred Glover and Gary A. Kochenberger: Hand book of Metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, 2003
- 16) 織田利彦, 音喜多 亨, 津久家智光, 橋場加奈: メタ戦略による TRANSYT 交通流モデルにおける交通信号制御最適化, システム制御情報学会論文誌, Vol.10, No.10, pp.547-555, 1997

---

### 系統交通信号の制御パラメータ連続自動調整によるリアルタイム制御の一方式\*

久井 守\*\*・金子数馬\*\*\*

本研究では、1本の系統信号路線を対象とし、プログラム選択制御の欠点を克服するために、オフセットの連続自動調整によるリアルタイム制御の一つの方法を提案した。すなわちオンラインで計測した交通情報をベースにしてリアルタイムでシミュレーションを行い、それによって得られる評価指標を最小にする最適のオフセット調整量を逐次求め、得られた最適調整量をリアルタイムで実行するという制御である。最適化手法としては、局所解を回避し、全域的最適解を求め、しかも演算効率のよい反復局所探索法を用いた。いくつかの計算例を通して提案手法の有効性を確認することができた。

---

### A Method of Real-Time Control for Traffic Signal Coordination through Sequential Adjustment of Control Parameters

By Mamoru HISAI\*\*・Kazuma KANEKO\*\*\*

In this paper, a method of real-time control was proposed to overcome the deficiency of program selection for traffic signal coordination through sequential adjustment of absolute offsets for each signal. The method is a control policy to implement optimal adjustment obtained through real-time simulation based on the on-line measurement of traffic flow. Iterated Local Search (ILS) was employed as an optimization technique, since it aims to obtain global optimal solution avoiding local solution and has a calculation efficiency. The proposed method was found to be promising through some calculation examples.

---