

系統交通信号の高度化を意図した パターン切り替え制御の最適化の効果とその限界

久井 守¹・山本 耕作²

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

²工修 日立公共システムエンジニアリング(株) (〒135-8633 東京都江東区東陽 2-4-18)

本研究では、交通量変動に応じて制御パターンを切り替えるパターン選択型の交通応答式系統制御を対象とし、制御の高度化を意図して制御パターン切り替え制御を最適化し、切り替え頻度と制御効果の関係について検討した。制御パターン切り替え政策はDPで最適化し、評価指標の総遅れ時間はシミュレーションで求めた。計算例から、交通量変動にตอบสนองして制御パターンを切り替えると制御効率は改善されることがわかった。しかし切り替え頻度が多すぎるとかえって制御効率の悪化をまねくので、切り替えによる制御効率が期待できるような交通量変動のある時間帯を考慮し、また切り替えが過度にならないように配慮して切り替え制御を実施するのが望ましいということがわかった。

Key Words: pattern selection, cycle length, offset transition, DP, total delay

1. はじめに

ITSが進展する中で、例えばUTMSにみられるように交通信号制御の高度化の試みがいくつも実行されるようになってきた。最新の通信技術と情報処理技術を活用した信号制御の高度化は今後さらに進められるものと思われる。しかしながら、信号制御の高度化においては、幅広い多様な信号制御技術のどの部分をどのように高度化していくのかがひとつの大きな課題であると考えられる。また投資額とその効果の両面を考慮してどの部分から優先的に高度化していくかといった優先順位の問題も重要な課題であるといえよう。

そこで本研究では、交通量変動に応じて制御パターンを切り替えるパターン選択型の交通応答式系統制御を対象とし、制御の高度化を意図して制御パターン切り替え政策を最適化する方法を提案する。ここで、制御パターンというのは、系統信号の共通サイクル長、オフセットおよび青時間からなる一組の制御パラメータをいう。また切り替え政策というのは制御に用いた制御パターンとその切り替え時刻の系列をいう。ここで提案する最適化法によってモデル計算を行い、これを通して交通量変動に応じて制御パターンをきめ細かく切り替えた場合すなわち交通応答制御の高度化を行った場合の効果とその限界について検討する。具体的には制御パタンの切り替え頻度と制御効率との関係を検討し、その結果から信号制御高度化戦略の方向性について考察を行う。

本研究では次のような前提を設ける。①交通量変動パターンは予め予測され完全に既知である。②予め適切な制御パターンが必要なだけ用意されている。③オンライン制御への適用を考慮したものではなく、オフラインでの検討を目的とする。④交通量の計測と制御の間の時間遅れは考慮しない。⑤基本的には共通サイクル長の切り替えを中心に考える。ただし共通サイクル長が変化すると一般に最適オフセットも変化するので共通サイクル長とオフセットは一体のものとする。⑥各交差点では主道路と交差道路の交通量比は一定と仮定し、したがって望ましい現示率は既知で一定とする。⑦各交差点では右左折交通や右折現示は考慮しない。

具体的には、M組の制御パターンが与えられ、また切り替え回数Nが指定されたという条件で制御パターン切り替え政策を最適化するが、この問題はDPによって定式化できることを示す。またDPによって最適切り替え政策を具体的に計算する。最適化の基準としては、系統制御路線の系統方向全体の総遅れ時間とする。この総遅れ時間はシミュレーションによって求める。シミュレーションではオフセットの追従処理も内蔵していて、オフセット追従時の交通流の乱れを自動的に考慮できるようにしている。

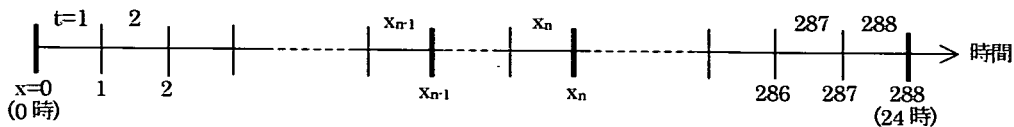


図-1 時刻 x と時間帯 t の定義と相互関係

2. 研究の背景

国内の系統制御、すなわち共通サイクル長とオフセットの制御はそのほとんどがパタン選択制御である。したがって本研究ではこのパタン選択制御を対象として高度化制御について検討するが、パタン選択制御とは異なる制御として SCOOT¹⁾ のように到着車群に応答してリアルタイムでサイクルごとにオフセット調整を行う制御がある。また交差点への到着交通の計測値およびその短期予測に基づいて時々刻々信号現示の切り替え判断を行う UTOPIA²⁾ や OPAC³⁾ などの制御方式がある。この両方式はもはやサイクル長や青時間長の概念をもたない制御方式である。これらの制御では、局所的な交通状況の変化を考慮することは可能であるが、系統全体の制御効率をどのようにして維持するかがひとつの課題であり、また従来の交通応答制御と比較して有利かどうかも課題として考えられる。

パタン選択制御に関する研究としては、交通量変動パタンといくつかの制御パタンが与えられたという条件で、多段系統制御の制御パタン切り替え政策を DP で最適化した研究がある⁴⁾。ただしこの研究では、切り替え時の交通混乱は考慮していない。したがって制御パタンをできるだけ多く用意しかつできるだけ頻りに切り替えを行うのがよいというやや非現実的な結果にならざるを得なかった。それに対して、本研究では、オフセット追従時の交通の乱れによる遅れ時間の増加を考慮している点、およびシミュレーションで遅れ時間を求め実現現象の再現性を改善している点が大きな特徴であり新しい点である。

また自動感應系統制御の切り替え基準⁴⁾ や単一交差点制御を対象とした交通量の集合化⁵⁾ について検討した研究もあるが、これらの研究ではオフセット切り替え時の混乱を考慮していないし、あるいは制御パラメータとしてオフセットを含まない単一交差点の信号制御に関するものである。

3. 制御パタン切り替え政策の最適化

総遅れ時間最小の観点からすると、一般に交通量が大きくなるとサイクル長を大きくし、逆に交通量が小さく

なるとサイクル長を小さくするのが望ましい。サイクル長が変化すると、それに対応する最適オフセットも変化する。したがって交通量変動がある場合には、それに応じてサイクル長およびオフセット、すなわち制御パタンを切り替えていくのが望ましい。そのように制御パタンを切り替えることによって制御効率を改善することが期待できるのである。ただし切り替え政策を誤るとかえって逆効果となるおそれがあり、切り替え政策の最適化が必要となる。

そこでまず制御パタン切り替え政策は DP (ダイナミックプログラミング) の手法を用いて最適化できることを示す。ここでは M 組の制御パタンが与えられたとして 1 日 24 時間を最適化の対象とし、この時間帯で生じる総遅れ時間を評価指標とした場合の定式化を示す。また制御パタンの切り替え回数が N 回と指定されたものとする。このような前提に立つと、総遅れ時間を最小にする最適な切り替え政策は次のような DP の 1 次元配分過程として定式化することができる。

$$f_n(x_n, P_k) = \min_{i, x_{n-1}} \{f_{n-1}(x_{n-1}, P_i) + \sum_{t=x_{n-1}+1}^{x_n} D(P_i, P_k, t)\} \quad (1)$$

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

ただし、 $f_0(x_0, -) = 0$, $x_0 = 0$, $x_N = 288$

ここに、

t : 5 分間隔で表した時間帯の番号

($t = 1, 2, \dots, 288$)

x_n : 第 n 回目の切り替え時刻

P_k : 第 k 番目の制御パタン ($k = 1, 2, \dots, M$)

(P_k はサイクル長, 絶対オフセット, 現示率を要素とするベクトル)

$D(P_i, P_k, t)$: 時刻 x_{n-1} で制御パタン P_i から制御パタン P_k へ切り替えた場合に時間帯 t において生じる遅れ時間 (秒または時間)

$f_n(x_n, P_k)$: 時間帯 0 ~ x_n を n 分割し、第 n 分割目を制御パタン P_k で制御した場合に時間帯 0 ~ x_n において生じる総遅れ時間の最小値

時刻 x と時間帯 t は図-1 に示すように定義する。遅れ時間 D は切り替え時刻 x_{n-1} の関数でもある。時間帯 t の交通需要、すなわち交通量変動パタンは与えられたものとし、これは上り下りで異なるようにすることができる。式(1)の関数方程式の意味は図-2 に示すとおりであ

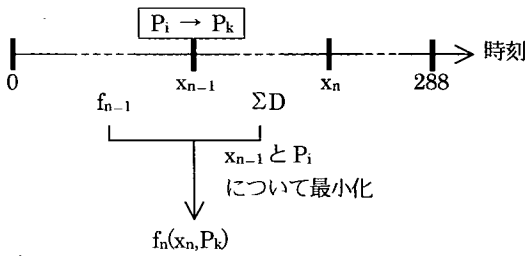


図-2 関数方程式の意味

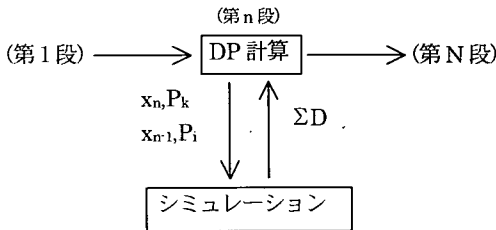


図-3 階層型の計算過程

る。すなわち、時刻 x_{n-1} までの最適政策による最小遅れ時間 f_{n-1} と、時刻 x_{n-1} で制御パタンを P_i から P_k に切り替えた場合に x_{n-1} から x_n の時間帯で生じる遅れ時間の和 ΣD を、 x_{n-1} と P_i について最小化したものをあらためて f_n とし、これを x_n および P_k の関数として表すという意味である。この関数方程式に基づいて第1段から第 N 段まで計算すればよい。各段の計算では、図-3に示すように2レベルの階層型の計算過程をとる。すなわち上位レベルから x_n 、 P_k 、 x_{n-1} 、 P_i を計算条件として指示し、下位レベルではその条件の下でシミュレーションを行い遅れ時間 ΣD を求めて上位レベルへ返すという計算方式としている。

4. 遅れ時間を求めるシミュレーション

遅れ時間 D を計算するために図-4に示すように K 信号からなる系統信号路線を対象として車両の走行挙動を再現する Time Scanning 方式のシミュレーションを作成した。これに制御パタン切り替え政策を与えて系統路線方向の総遅れ時間を計算できるようにした。このシミュレーションを実行して求めた車両走行軌跡の1例を図-5に示す。この図では2台おきの車両について走行軌跡を描いている。シミュレーションでは各車両の停止時間を累積することによって遅れ時間を計算する。またサイクル長の切り替えとオフセット追従ができるようにしている。

さらに制御パタン切り替え政策の最適化を行うために

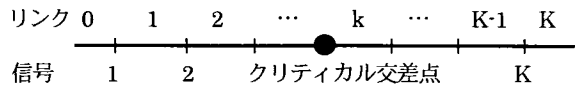


図-4 シミュレーション対象路線

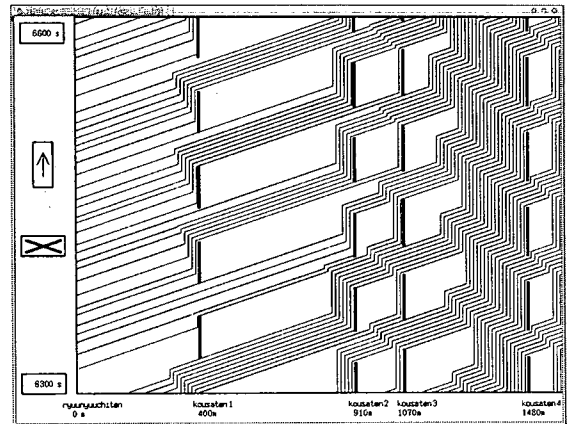


図-5 シミュレーションでの車両走行軌跡の例

式(1)のDP計算を組入れている。これにより、総遅れ時間を最小にするような制御パタンの最適切り替え政策を求めることができる。シミュレーションの要点は次のとおりである。

- ① 時刻の原点は信号1の青開始時点とする。
- ② リンク長、車線数、上下両方向の流入交通需要、共通サイクル長、現示率、絶対オフセットなどの道路条件、交通条件および信号条件は任意に与えることができる。
- ③ 各車両の速度は一定で加速、減速は考えない。
- ④ 停止時の車頭距離はこれを考慮し、したがって物理的な待ち行列長および先詰まりは自動的に考慮できるようにしている。
- ⑤ 各車両の進行方向は直進のみとし、右左折流出と交差道路からの流入は考慮しない。
- ⑥ 両端からの流入交通はポアソン分布に従う。
- ⑦ 信号が青に変わって発進する先頭車両は発進遅れを受け、後続の待ち行列車両は飽和流とし、飽和交通率は入力データで与える。
- ⑧ 絶対オフセットは基準信号(信号1)に対する青開始時刻の時間的ずれで定義する。
- ⑨ 黄時間は赤時間に含まれるものとする。

本シミュレーションでは停止線前後の加減速による走行軌跡を定速走行と停止の2モードの軌跡におきかえて加減速による遅れを正しく遅れ時間として評価できるようにした。ただし青時間は有効青時間でおきかえることとする。このようにすれば青開始時の発進遅れを考慮でき、また遅れ時間の計算に問題は生じない。また過飽和時や近飽和時の待ち行列の影響を考慮に入れるためにジ

ヤム密度に対応する停止時の車頭距離を考慮した。ただし停止車列に接近する車両の減速は考慮していないので、リンクに貯蓄される停止車は実現象よりもやや多くなる場合もあり得る。これは追従走行または $k-v$ 関係を考慮していないためであり、2モード走行という仮定からくるひとつの限界である。

交差点の右左折交通、右折車線および右折現示を考慮することは重要であるが、本研究では系統制御の共通サイクル長の切り替え制御を主な課題としており、個別交差点の右左折処理といったマイクロ制御については考慮していない。しかし右左折交通が円滑に処理できる程度の量であれば、用意すべき制御パタンの設定の問題にはなっても切り替え制御にはあまり影響はないものと考えられる。ただし右左折交通が直進交通を妨げるような場合や過飽和時については、右左折交通がどの程度切り替え制御に影響するかを判断することは困難である。

対象路線両端からの流入交通はポアソン到着とし、これによってサイクルごとの到着交通量を変化させた。このような到着のランダム性をとりいれて、一様到着による遅れを上回る遅れの増加分、すなわちランダム遅れを考慮した。しかしこのような考慮をしても切り替え制御に及ぼす影響はあまり大きくはないものと思われる。

5. オフセット追従方法

(1) オフセット追従問題

制御パタンを切り替える場合、共通サイクル長とスプリットは1度に切り替えることができるが、オフセットは交通安全などの理由で数サイクルにわたって切り替える必要がある。このようなオフセット切り替え動作をオフセット追従⁶⁾と呼ぶ。

オフセット追従を行うためには、まず交差点ごとに変更後の絶対オフセットと変更前の絶対オフセットの差をとってオフセット変更量を求める。次にサイクル長を伸ばす方向に変更するプラス追従と、逆にサイクル長を縮める方向に変更するマイナス追従のいずれかを決定し、その結果として各交差点のオフセット追従量が決まる。ただしオフセット追従の途中では交通流に乱れるが生じるため、各交差点のオフセット追従方向は適切に決定する必要がある。

変更途中の相対オフセットが変更後の相対オフセットと位相が 180° ずれるような状態をオフセット反転という⁶⁾。オフセット反転が発生すると交通流の乱れが大きくなるため、オフセット反転リンク数を最小にするという条件でオフセット総追従量を最小にするようなオフセット追従方向を求めることが重要な問題となる。

本研究ではすべての交差点の追従方向を総当たり法で

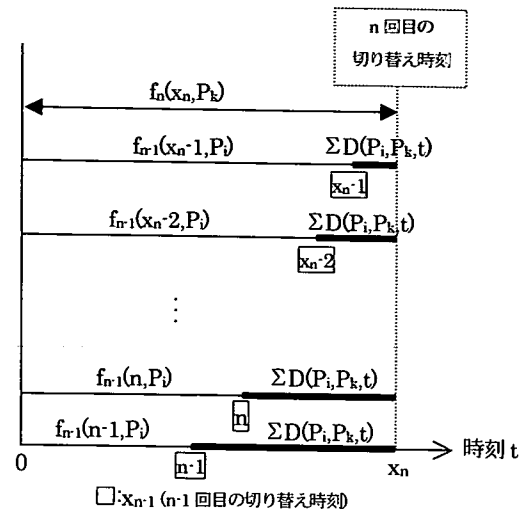


図-6 $f_n(x_n, P_k)$ の計算過程

計算し、オフセット反転箇所数を最小にするという条件でオフセット総追従量が最小になるように追従方向を決定した。ただし、組合せ数を少なくするために井上らの研究で示されたリンクの連結グループの考え方をい用い、連結グループごとに総当たり法を用いた^{7), 8)}。

(2) オフセット追従の方法

オフセット追従に必要なサイクル数は各交差点でそろえること、および1回の追従量の上限は通常の例を参考にこれをサイクル長の1/8とすること⁶⁾、という2つの条件からオフセットの追従方法を定める。そのためにまず1回の追従量が上限を越えないように各交差点の必要サイクル数を求める。その中で必要サイクル数が最も多い交差点の必要サイクル数を全交差点共通の必要サイクル数とする。

各交差点の1回の追従量は、全交差点共通の必要サイクル数と追従量から求める。各交差点のオフセット追従は、共通サイクル長の切り替え終了後、青開始時刻と同じ時に開始する。

6. 制御パタン切り替え政策の具体的な計算法

(1) 遅れ時間の計算

DP計算は、M組の制御パタンを与え、切り替え回数Nを指定した上で、式(1)を用いて行う。ここで切り替え回数というのは、対象時間帯の分割個数すなわち用いる制御パタンの延べ回数のこととし、したがって実際の切り替え回数は $(N-1)$ 回となる。

表-1 DPによる最適切り替え政策の計算過程

n	k									
	1		2		3		4		5	
	$f_n(x_n,1)$	$x_{n-1,i}$	$f_n(x_n,2)$	$x_{n-1,i}$	$f_n(x_n,3)$	$x_{n-1,i}$	$f_n(x_n,4)$	$x_{n-1,i}$	$f_n(x_n,5)$	$x_{n-1,i}$
1	$f_1(1,1)$	-, -	$f_1(1,2)$	-, -	$f_1(1,3)$	-, -	$f_1(1,4)$	-, -	$f_1(1,5)$	-, -
	$f_1(24,1)$	-, -	$f_1(24,2)$	-, -	$f_1(24,3)$	-, -	$f_1(24,4)$	-, -	$f_1(24,5)$	-, -
	$f_1(288,1)$	-, -	$f_1(288,2)$	-, -	$f_1(288,3)$	-, -	$f_1(288,4)$	-, -	$f_1(288,5)$	-, -
2	$f_2(2,1)$	1, 2	$f_2(2,2)$	1, 1	$f_2(2,3)$	1, 2	$f_2(2,4)$	1, 2	$f_2(2,5)$	1, 2
	$f_2(80,1)$	50, 5	$f_2(80,2)$	48, 5	$f_2(80,3)$	4, 5	$f_2(80,4)$	24, 2	$f_2(80,5)$	33, 2
	$f_2(288,1)$	99, 2	$f_2(288,2)$	118, 5	$f_2(288,3)$	87, 2	$f_2(288,4)$	21, 5	$f_2(288,5)$	11, 5
3	$f_3(3,1)$	2, 3	$f_3(3,2)$	2, 1	$f_3(3,3)$	2, 1	$f_3(3,4)$	2, 2	$f_3(3,5)$	2, 2
	$f_3(212,1)$	180, 2	$f_3(212,2)$	92, 1	$f_3(80,3)$	46, 5	$f_3(212,4)$	60, 2	$f_3(212,5)$	110, 2
	$f_3(288,1)$	212, 2	$f_3(288,2)$	230, 3	$f_3(288,3)$	218, 2	$f_3(288,4)$	204, 2	$f_3(288,5)$	80, 4

一般の第n段について、すなわち時間帯0~ x_n をn個の時間帯に最適分割した場合の $f_n(x_n, P_k)$ の値をシミュレーションで求める計算過程を図-6に示す。(n-1)回目の切り替えで制御パタンを P_k に切り替えるときの可能な切り替え時刻 x_{n-1} は(n-1)から $(x_n - 1)$ まで $(x_n - n + 1)$ とおりに存在し、また切り替え前の制御パタン P_i が(M-1)とおりに存在する。したがって時刻 x_n までの総遅れ時間を $(x_n - n + 1) \times (M - 1)$ とおりに求め、その中の最小値を $f_n(x_n, P_k)$ とし、そのときの x_{n-1} と P_i が最適な切り替え時刻と切り替え前の制御パタンとなる。第n段以降の計算に備えて、M個の制御パタン P_k と $x_n = n \sim 288$ に対して求めた最小遅れ時間 $f_n(x_n, P_k)$ と、それに対応する切り替え時刻 x_{n-1} および切り替え前の制御パタン P_i 、すなわち切り替え政策を整理し記憶しておく。

$f_n(x_n, P_k)$, ($x_n = n, n + 1, \dots, 287, 288$)を求めるためには24時間シミュレーションを $(x_n - n + 1) \times (M - 1)$ 回実行する必要がある。そのシミュレーションでは、すでに記憶している第n段以前の切り替え政策を用いて実行する。また5分間集計の遅れ時間 $D(P_i, P_k, t)$ を求める必要があるが、その計算過程を図-7に示す。

制御パタンの切り替えに要する時間は制御パタンの組合せによって異なる。時刻 x_n までの間に制御パタンの切り替えが完了しない場合もある。このような場合にはその切り替え時刻 x_n に対する $D(P_i, P_k, x_n)$ に大きな値を与えておいて、最適な切り替え政策に採用されないようにした。

(2) 切り替え時刻と制御パタンの決定

表-1に示すように $n = 1 \rightarrow N$ のそれぞれのnについて $f_n(n, P_k) \sim f_n(288, P_k)$ とそれに対応する切り替え時刻 x_{n-1} と切り替え前の制御パタン P_i を計算する。それが終了すれば、逆向きに $n = N \rightarrow 1$ まで遡っていくことにより最適切り替え政策、すなわち最適な切り替え時刻と

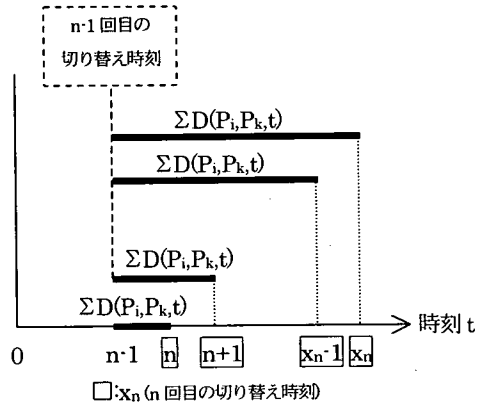


図-7 ΣD(Pi, Pk, t)の計算過程

制御パタンの系列が得られる。その逆向きの過程では、まず $f_N(x_N, P_k)$ の中で遅れ時間が最小となる制御パタン P_k をさがし、そのときの切り替え時刻 x_{N-1} と切り替え前の制御パタン P_i を得る。これを(N-1)回目の切り替え時刻と切り替え後の制御パタンとして表から $f_{N-1}(x_{N-1}, P_k)$ をさがす。以下同様にして1回目の切り替え時刻と切り替え前の制御パタンまで求めていけば最適切り替え政策を求めることができる。

(3) 最適切り替え時刻の計算手順

- ① $n = 1$ の場合、式(1)を用いて各制御パタン P_k ($k = 1, 2, \dots, M$)について $f_1(1, P_k)$ から $f_1(288, P_k)$ までの計算を行う。
- ② $n = 2$ の場合、①で求めた $f_1(x_1, P_i)$ を用いて時刻 x_1 で制御パタンを P_i から P_k に切り替えた場合の $f_2(x_2, P_k)$ ($x_2 = 2 \sim 288$)を計算する。この場合 $f_2(x_2, P_k)$ は x_1 と P_i のすべての組合せの中から最適の組合せを選びその値を求める。 $f_2(x_2, P_k)$ とそれに対応する x_1 および P_i を記憶する。

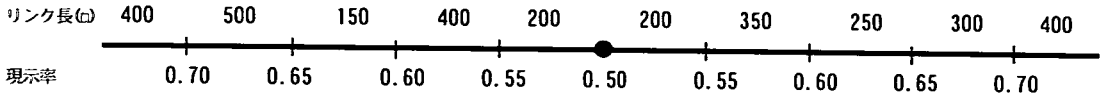


図-8 計算対象路線のリンク長と現示率

- ③ $n = 3$ の場合, ②で求めた $f_2(x_2, P_i)$ を用いて時刻 x_2 で制御パタンを P_i から P_k に切り替えた場合の $f_3(x_3, P_k)$ ($x_3 = 3 \sim 288$) を計算する. この場合 $f_3(x_3, P_k)$ は x_2 と P_i のすべての組合せの中から最適の組合せを選びその値を求める. $f_3(x_3, P_k)$ とそれに対応する x_2 および P_i を記憶する.
- ④ $n = N$ まで同様の計算を行う
- ⑤ $f_N(288, P_k)$ の値を最小にする制御パタン P_k を求める.
- ⑥ $f_N(288, P_k)$ に対応する切り替え時刻 x_{N-1} および制御パタン P_i を①~④で求めた計算結果から求める.
- ⑦ 同様の作業を繰り返し x_1 まで求める.

以上の作業から N 回の最適切り替えのタイミング x_1, x_2, \dots, x_N ($=288$) が求められるので, この値から時刻を計算すれば制御パタンの最適切り替え時刻を求めることができる.

表-1 は $M=5$ 個の制御パタンを与え, 切り替え回数を $N=3$ 回と指定した場合の最適切り替え政策を求める計算過程を示している. まず $n=1, 2, 3$ の順に各制御パタン P_k ($k=1, 2, \dots, 5$) を設定した場合の $f_n(1, P_k)$ から $f_n(288, P_k)$ を計算し, その計算に用いた x_{n-1} と制御パタン P_i を記憶する. 次に $f_3(288, P_k)$ の中から遅れ時間が最小になるような制御パタンを選び (表の場合は P_5), それに対応する切り替え時刻 $x_2=80$ と切り替え前の制御パタン P_4 を求める. 同様の作業を $n=1$ まで繰り返すと 2 回の最適切り替え時刻と制御パタンの系列が決定される. その結果時刻 $x_1=24$ で制御パタンを P_2 から P_4 へ変更し, 時刻 $x_2=80$ で P_4 から P_5 に変更するのが最適であるということになる.

7. 計算例

(1) 計算対象路線

制御パタンの最適切り替え政策を具体的に計算する. そのために, 図-8 に示すような 9 信号 10 リンクの系統信号路線を作成し, これを計算対象路線とする. この路線のリンクはリンク長にばらつきをもたせたリンク構成とした. 150m というリンク長の短いリンクも含めている. 路線中央部の交差点はクリティカル交差点と想定する. 各交差点の現示率はクリティカル交差点に近づくにつれ

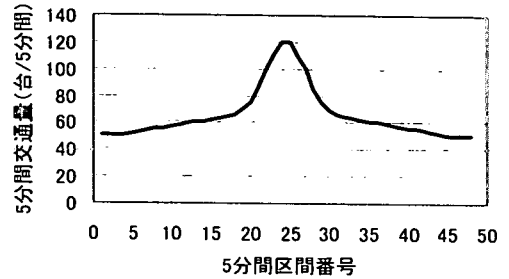


図-9 5分間交通量の変動

て小さくなるように与えた. 対象時間帯は 1 日 24 時間ではなく, 計算時間を考慮し, また 4 時間程度で十分と判断して 4 時間とした. 交通量変動は朝の立ち上がり夕方方の減少を考慮に入れて図-9 のように昼間の時間帯は省略した形とした. 昼間の時間帯の交通量変動を対象とした計算例は (5) であらためて行う. また上り下り両方向の交通量変動は等しいと仮定した. 両方向の交通量が異なる場合は共通サイクル長の切り替えというよりむしろ上り優先か下り優先かというオフセット切り替えの問題となるからである.

(2) 制御パタンの設定

制御パタンの最適化は本研究の目的ではないが, 共通サイクル長とオフセットは道路交通条件に対して最適化したものが望ましい. しかし厳密に最適化することは必ずしも容易ではない. そこでまず共通サイクル長については, 交通量の変動パタンの幅広い交通条件に対応するために 40 秒から 150 秒まで 10 秒きざみで 12 とおりに用意した. またオフセットについては $GA^{(9)}$ を用いて概略の最適設計を試みた. 設計条件としては, 各共通サイクル長に対して, 交通需要条件を 0.1 台/秒から 0.025 秒きざみで 0.4 台/秒まで 13 ケース与えて合計 156 組のオフセットを求めた. このようにして非飽和から近飽和まで幅広い交通量の変動パターンに対応できるようにした. ただし過飽和となるケースはこれを除外するようにした. 評価指標 (適応度関数) は TRANSYT で求めたが TRANSYT は過飽和交通を扱うことができないからである. 評価指標は遅れ時間と停止回数の加重和である. 停止回数の重み係数は 25 とした. 平滑化係数は 0 とし車群の拡散はないものとした. これによって定速走行と停止の 2 モード走行に対応させた. 以上のようにして概略設計した制御パタンから表-2 に示す $M=12$ 個の制御パタンを選択した. 表

表-2 切り替え政策に用いた制御ボタン(M=12)

制御ボタン	サイクル長	絶対オフセット				
1	40	0.00	0.02	0.66	0.86	0.34
		0.84	0.56	0.08	0.54	
2	50	0.00	0.02	0.84	0.26	0.92
		0.26	0.78	0.26	0.76	
3	60	0.00	0.46	0.24	0.68	0.42
		0.68	0.14	0.88	0.30	
4	70	0.00	0.46	0.48	0.00	0.72
		0.54	0.96	1.00	0.54	
5	80	0.00	0.50	0.48	0.98	0.96
		0.14	0.72	0.78	0.28	
6	90	0.00	0.70	0.54	0.08	0.00
		0.82	0.34	0.34	0.82	
7	100	0.00	0.48	0.48	0.10	0.98
		0.10	0.44	0.52	0.74	
8	110	0.00	0.44	0.52	0.10	0.16
		0.38	0.50	0.62	0.88	
9	120	0.00	0.46	0.54	0.20	0.10
		0.16	0.30	0.42	0.68	
10	130	0.00	0.56	0.56	0.30	0.22
		0.28	0.42	0.56	0.78	
11	140	0.00	0.52	0.48	0.33	0.28
		0.36	0.50	0.74	0.98	
12	150	0.00	0.24	0.10	0.90	0.82
		0.92	0.12	0.28	0.18	

の中のサイクル長は秒単位、絶対オフセットの単位は対サイクル長比である。この制御ボタンの選択では、交通量変動に応じた遅れ時間の変化をシミュレーションであらためて評価し、幅広い交通量水準に対応できるように考慮して選択した。40秒、50秒など小さいサイクル長も含めているが、これは夜間など交通量が少ない時間帯では遅れ時間を小さくするという理論的な判断によるものである。

なお主道路と従道路の飽和度比は一定と考へ、図-8に示すように現示率は既知で一定と仮定する。

(3) 最適切り替え政策の特徴

表-2の中から、ボタン1, 3, 5, 7, 10の5種類の制御ボタンを選び、これと図-9の交通量変動を条件としてそれぞれ4時間のシミュレーションを行い、総遅れ時間を5分ごとに集計したものを図-10に示す。計算条件は、飽和交通流率0.9台/青秒、系統速度12m/秒とし、損失時間は発進遅れも考慮して20秒とした。

図において遅れ時間が大きくなっている部分は過飽和となつて渋滞が延伸した状態を示している。全体の傾向として交通量が少ない時間帯ではサイクル長を小さくした方が総遅れ時間は小さくなり、交通量が多い時間帯ではサイクル長を大きくした方が総遅れ時間は小さくなる

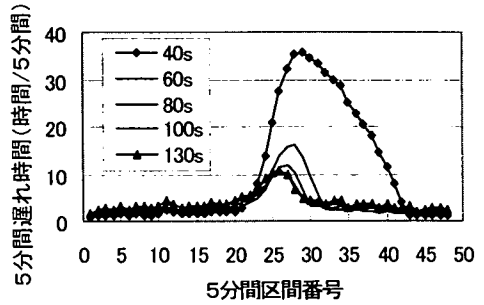


図-10 5分間遅れ時間の変化

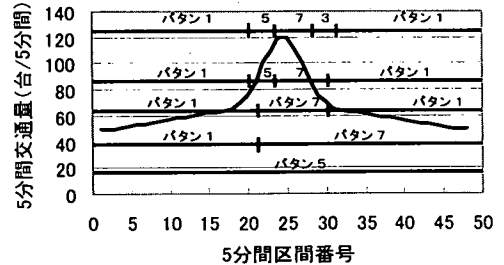


図-11 最適切り替え政策 (M=5の場合)

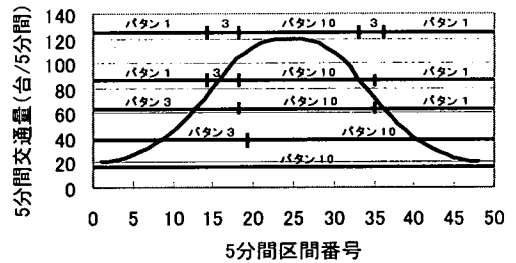


図-12 最適切り替え政策 (M=5の場合)

という結果になった。

これら5種類の制御ボタンが与えられたM=5の場合について4時間の時間帯を対象としてDP計算を行い、最適切り替え政策を求めた。この場合、制御ボタンの切り替え開始から次の切り替え開始まで最低15分は待たなければならないという制約を設けた¹⁰⁾。この計算結果から切り替え回数N=1~5回の場合の切り替え時刻と制御ボタンを示したのが図-11である。この図から、最適切り替え政策の特徴として、交通量の少ない時間帯においてはサイクル長の小さい制御ボタンが使われ、交通量の多い時間帯においてはサイクル長の大きい制御ボタンが使われていることがわかる。またこの例のように短時間の間に交通量が大きく増減するような場合には、その増減の大きい時間帯を細かく区切って制御ボタンを切り

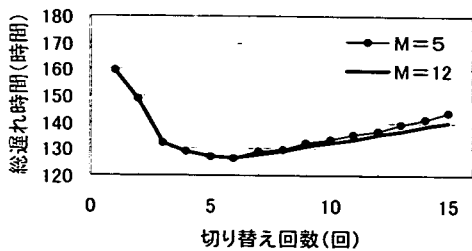


図-13 切り替え回数と総遅れ時間の関係

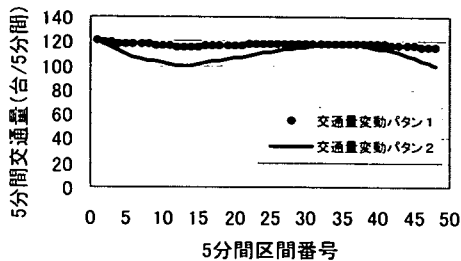


図-14 日中を想定した5分間交通量の変動

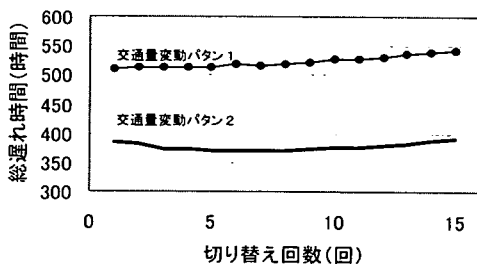


図-15 切り替え回数と総遅れ時間の関係 (M=6)

替えるのがよいという結果となっていることがわかる。

表-2の制御パターン12個をすべて用いたM=12の場合についても最適切り替え政策を求めた。その結果、N=3およびN=4の場合では30~48の時間帯でパターン2を用いるのがよいという点を除いて、5種類の制御パターンを用いた場合とほぼ同様の結果が得られた。なお当然のことではあるが、M=12の場合で採用された制御パターン5個のみを用いて最適切り替え政策を求めた結果、M=12の場合とまったく同じ結果が得られた。

次に5分間交通量の変動幅は図-9より少し大きく20~120の範囲とし、逆に増減率を緩やかにした交通量変動を対象とした場合についても計算した。その結果、図-12に示すように制御パタンの切り替え時刻は図-11ほど集中せず、それよりも分散するという結果となった。このように交通量変動パターンによって最適切り替え政策は

微妙に異なることがわかった。

(4) 交通量変動が大きい場合の最適切り替え回数

図-11の交通量変動を対象とした場合について、制御パタンの切り替え回数と総遅れ時間の関係を図-13に示した。この図から交通変動にあわせて切り替え回数を増やしていくと総遅れ時間は小さくなり、制御効率が改善されることがわかる。しかし切り替え回数をあまり多くすると逆に交通流の乱れによる遅れ時間が卓越することとなり、総遅れ時間は大きくなることがわかる。

久井の研究¹¹⁾では制御パターン切り替え時の交通混乱を考慮していなかったため、切り替え回数を増やせば増やすほど総遅れ時間は減少するという結果であった。本研究では切り替え時の交通流の乱れを考慮し、実際の交通現象を反映させた結果、切り替え回数を増やしすぎると逆に総遅れ時間は増加するという結果となった。このようにして総遅れ時間を最小にする最適切り替え回数が存在することがわかった。用意した制御パターン数M=5の場合、最適切り替え回数は6回となった。また総遅れ時間の改善効果は、切り替えを行わない場合すなわちN=1の場合に比較して改善量で159.7-126.5=33.2時間、改善率で20.8%であった。この計算例では、M=12の場合も、最適切り替え回数は6回、総遅れ時間の改善効果は20.8%でM=5の場合とまったく同じとなった。図-11のように短い時間に交通量が大きく増減する場合には切り替え制御の効果は大きくなる。

図-13よりM=5の場合とM=12の場合を比較すると、用意する制御パターンを多くすれば、制御効率を改善できる可能性は高くなることがわかる。しかしその改善効果は用意する制御パターンそのものにも左右されるであろう。

次に図-12の交通量変動を対象とした場合の最適切り替え回数は5回となった。しかし制御の改善量は232.7-207.4=25.3時間、改善率は10.9%となり、いずれも図-11の場合より小さい。M=12とした場合でも、制御の改善量は232.7-205.2=27.5時間、改善率は11.8%にとどまる。図-12のように交通量変動幅が大きくてもその変化が緩やかな場合の切り替え制御の効果は小さくなることがわかった。

(5) 交通量変動が小さい場合の最適切り替え回数

朝のピーク時を過ぎた時刻から夕方までの交通量が大きく、しかしその変動幅が小さい日中の時間帯を想定した交通量変動を図-14に示す。交通量変動パターン1は5分間交通量の変動幅を115~120とした場合、交通量変動パターン2は同じく100~120とした場合である。この交通量変動を条件とし、パターン3, 5, 7, 9, 10, 12の6個の制御パターンを与えて最適切り替え政策を求めた。その結果から切り替え回数と総遅れ時間の関係を求めた。そ

れを図-15に示す。この図から交通量変動パターン1の場合、すなわち交通量変動があまり大きくない場合は切り替えを行わない方がよいこと、すなわち最適切り替え回数は1回であることがわかった。ただし、交通量変動パターン2のような変動幅の場合には、最適切り替え回数は5回となった。また総遅れ時間の改善率は384.3-368.9=15.4時間で、改善率は4.0%となり、図-14のように交通量変動幅が小さい場合の切り替え制御の効果は小さくなることがわかった。

(6) 切り替え制御の効果とその限界

切り替え回数と総遅れ時間の関係からみると、交通量変動幅がある程度以上ある場合には、4時間あたりでみて数回程度の切り替えで総遅れ時間がかなり減少し、さらに切り替え回数を増やしてもその効果は次第に減衰し、切り替え回数を5~6回程度を越えて増やすと逆に制御効率が悪化することがわかる。したがってパターン切り替え制御の効果にはおのずとその限度があり、過度にその切り替え回数を増やしてもそれに見合う効果がつねに期待できるわけではない。

したがって交通量変動にあわせて頻繁にきめ細かく制御パターンを切り替えるような制御方式をとる場合には慎重な配慮が必要である。例えば、あらゆる可能な交通条件に対して厳密な最適制御パターンを多数用意し、しかも切り替え時に生じる交通流の乱れを少なくできるような制御パターンの組合せまたは追従方法をとること、さらに短期交通量予測を行い、それに基づいて制御遅れの影響を最小限にとどめるといような方向性をもって制御システムの高度化を指向することが望まれる。

あるいは系統信号の中でクリティカルとなっている交差点のマイクロ制御など高度化の効果が期待される部分を模索しそこに高度化の重点を移していくことも重要である。

(7) 制御パターンのリアルタイム生成に関する考察

本研究では、パターン選択型の系統制御を対象としたが、現状ではパターン選択からリアルタイムの自動生成へと移行する状況でもある。すでに国外ではSCOOTに代表されるようなパターン選択とは異なる制御が行われており、国内でも一部でオフセットのフィードバック制御が試みられたし、MODERATOでもオフセットの自動生成が一部で試みられている。

ここで制御パターンのリアルタイム自動生成という場合、

①オンラインで収集した交通条件を与えて共通サイクル長やオフセットなどの制御パラメータをリアルタイムで求めるという方式と、②サイクルごとに制御パラメータの微調整をくり返して評価指標を改善するという方式、の2つが考えられる。両方式とも予め最適な制御パターン

を用意したり更新したりする手間を必要とせず、また予期せぬ交通状況が出現してもそれに対応することができるという長所がある。しかし前者の方式では依然として制御パターンの切り替えの必要はあり、したがって切り替え政策の最適化という視点が必要である。後者の方式は、遅れ時間などの評価指標を勾配法で最小化するのと同等の考え方であり、したがって適切な初期解(初期パターン)を設定するなどして局所解を回避する工夫が必要となる場合もあると考えられる。もし交通量の時間変動にあわせて初期解を何回も設定し直す必要があるような場合には、初期パターンの設定頻度とそのタイミングが問題となり、これは制御パターンの切り替え政策と同様の問題となる。

このように考えると、パターン選択型の系統制御を対象とした切り替え政策の最適化の考え方は、系統制御のリアルタイム自動生成でも生かされる可能性があると期待される。

8. 結論

(1) 本研究のまとめ

- 本研究ではパターン選択型の系統信号制御を対象とし、制御の高度化を意図して制御パターン切り替え制御の最適化を行い、切り替え制御の最適化の効果とその限界について考察した。その結果を要約すると次のとおりである。
- ①切り替え政策はDPによって最適化することができる。
 - ②シミュレーションで評価指標の遅れ時間を求める下位システムとDP計算を行う上位システムからなる2レベルの計算方式で最適化計算を行うことができる。
 - ③限られた計算例からではあるが、交通量の変動に応じて制御パターンを切り替えていくと制御効率がよくなる。
 - ④しかし切り替え回数を増やしていくと次第にその効果が減衰し過度に切り替え回数を増やすと逆に制御効率の悪化を招く。
 - ⑤計算例によると、交通量変動幅がある程度以上ある場合、総遅れ時間を最小にする最適切り替え回数は対象時間4時間で5~6回程度である。
 - ⑥切り替え政策の最適化による制御効果は、短い時間に交通量が大きく増幅する場合に大きくなる。
 - ⑦交通量変動幅が小さい場合や、変動幅が大きくてもその変化が緩やかな場合の制御効果は相対的に小さくなる。

(2) 残された課題

本研究では、交差点の右左折交通を考慮していない。右左折交通、右折車線および右折折示を考慮した場合の検討は今後の課題である。右左折交通が多い場合は制御パターン設定が課題となり、また過飽和時の右左折処理や

右左折交通のランダム性をどう扱うかも課題となるであろう。

道路条件・交通条件など多様な計算条件について計算例を蓄積することも課題である。道路条件ではリンク構成、車線構成などを考慮すること、また交通条件では上り下り両方向の交通量変動パターンが異なる場合を考慮することなどが必要である。さらに実際の道路交通条件について検討することも興味深い課題である。

(3) 今後の展開可能性

本研究では、制御パターン作成時にオフセット追従の円滑性を考慮するというはしていない。しかし円滑な追従ができるようなオフセットをあらかじめ用意するかまたは自動生成することができれば、切り替え時の交通流の乱れが少なくすむと期待される。したがって円滑な追従を考慮したオフセットパターンの生成についても検討していきたい。

パターン選択型の系統制御では、最適な制御パターンの生成とその組合せ、オフセット追従方法、時間遅れの少ない予測制御などに配慮して高度化を指向することが望まれる。

あるいは系統信号の中でクリティカルとなっている交差点の近飽和または過飽和時のマイクロ制御など高度化の効果が期待される部分を模索しそこに高度化の重点を移していくことも重要ではないかと考えられる。

参考文献

- 1) Hunt,P.B., Robertson,D.I. and Bretherton,R.D. : Split,Cycle and Offset Optimisation Technique, *Traffic Engineering & Control*, pp.190-192, 1982, April.
- 2) Gartner,N.H. : OPAC : A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control, *Transportation Research Record 906*, pp.75-81, 1983.
- 3) Mauro,Vand Di Taranto,C. : UTOPIA, *IFAC Control, Computers, Communications in Transportation*, pp.245-252, 1989.
- 4) 市原薫, 枝村俊郎共編:道路施設工学, 森北出版, pp.191-197, 1976.
- 5) 桑原雅夫:交通信号制御における交通需要の集合化に関する研究, *交通工学*, Vol.26, No.4, pp.7-16, 1991.
- 6) 交通工学研究会:交通信号の手引, pp.81-85, 1994.
- 7) 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.
- 8) 久井 守, 小田原 正和, 森川 雅之:系統信号システムの制御パターン切り替え戦略に関する研究, *山口大学工学部研究報告*, Vol.50, No.1, pp.53-60, 1999.
- 9) 小田原 正和, 久井 守:GAによる系統交通信号の共通サイクル長に関する研究, *山口大学工学部研究報告*, Vol.49, No.2, pp.65-71, 1999.
- 10) 交通工学研究会:交通信号の制御技術, p.108, 1983.
- 11) 久井 守:複数信号機の最適制御に関する基礎的研究, pp.123-131, 1975.

(2001. 9. 17 受付)

EFFECT AND ITS LIMITATION OF ADVANCED TRAFFIC-RESPONSIVE CONTROL BY SWITCHING CONTROL PATTERN OF COORDINATED SIGNAL SYSTEM

Mamoru HISAI and Kousaku YAMAMOTO

In this paper, a relationship between control efficiency and frequency switching control pattern according to traffic fluctuation on coordinated signal system based on pattern selection was studied. The switching policy was optimized by using DP, and total delay as a criterion was evaluated through time-scanning simulation. From some computational examples, it was found that switching control to be responsive to traffic demand improve control efficiency. However, it was also found that avoidance of excessive switching was better except for remarkable traffic fluctuation because a reverse effect was recognized by the excessiveness.