

ITSセンシング技術を活用した交通信号制御アルゴリズム¹

A Traffic Signal Control Algorithm using ITS Sensing Technologies¹

越正毅²・桑原雅夫³・赤羽弘和⁴・尾崎晴男⁵・安井一彦⁶
中村英樹⁷・大口敬⁸・吉井稔雄⁹・堀口良太¹⁰・小根山裕之³
By Masaki KOSHI², Masao KUWAHARA³, Hirokazu AKAHANE⁴, Haruo OZAKI⁵,
Kazuhiko YASUI⁶, Takashi OGUCHI⁷, Hideki NAKAMURA⁸, Toshio YOSHII⁹,
Ryota HORIGUCHI¹⁰, Hiroyuki ONEYAMA³

1. はじめに

ITS の進展により交通流のセンシング技術や情報の通信技術の高度化が進んでいる。特に、様々な画像処理技術を用いた個別車両の識別技術の向上により、個々の車両について遅れ時間などの評価指標が直接計測できるようになっている。しかしながら、既存の信号制御アルゴリズムではそれらの情報を活用しておらず、制御パラメータ（サイクル、スプリット、オフセット）は基本的には人手によって事前設定され、自動最適化にはなっていない。このため、良好の制御を維持するためには十分な人手をかけなければならないが、現実にはそのための資金、体制が不十分であって必ずしも常に良好な制御状態とはなっていない。

そこで本稿では、ITS のセンシング技術により遅れ時間を直接計測・評価し、信号パラメータを自動的に逐次更新させる新しい信号制御のアルゴリズムを提案する。

2. 制御アルゴリズムの概要

今回提案する制御アルゴリズムの基本は、各交差点（あるいはリンク）毎に到着発進パターンを計測し、遅れ時間を直接計測・評価し最小化する方向に信号パラメータ（スプリット、オフセット、サイクル）を自動追従させようとするものである。その際、平均的交通状況に対して

事前にある程度の精度で初期設定されていることが前提であり、現実の交通状況の期待値からの乖離に追従してパラメータを逐次修正して行く。これにより、制御性能を時間的に連続して維持し、かつそれに要する労力や費用の削減が図られる。また、それぞれの制御アルゴリズムは各交差点において分散処理され、サイクル長など共有すべき情報は交差点間の通信により情報交換を行うため、集中制御方式と比較して通信回線の所要容量や制御用計算機システムの所要処理能力の低減が可能である。これにより、交通管制システムによる中央一括管理と比較して大幅なコストダウンも期待される。

ここで提案するアルゴリズムは非飽和、すなわち、飽和度（需要÷飽和交通流率）がある一定値以下（例えば 0.85 以下）である状況を想定しており、近飽和、過飽和時に適用するのは適当ではない。測定値に基づき飽和度を判定し、近飽和、過飽和時には制御方法を切り替えることとなるが、具体的な近飽和、過飽和時の制御については稿を改めて示すこととする。

2. 1 AVI による到着・流出累加図の作成

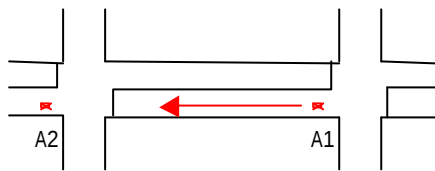
本手法は交差点の到着、流出累加図に基づいて遅れ時間を直接的に計測し、より遅れ時間が減少する方向に信号パラメータを逐次調整しようとするものである。従って、本手法ではここで説明する到着、流出累加図の作成が最も基本的かつ重要となる部分である。

到着・流出累加図の作成には AVI データを用いる（ここで AVI とは車両感知機能を備えたナンバープレート自動読み取り装置のことを指し

¹キーワード：ITS，信号制御，AVI，遅れ時間

²（財）高速道路技術センター，³東京大学生産技術研究所，⁴千葉工業大学，⁵東洋大学，⁶日本大学，⁷名古屋大学，⁸東京都立大学，⁹高知工科大学，¹⁰㈱アイ・トランスポート・ラボ

（連絡先（東大生研）：東京都目黒区駒場 4 - 6 - 1，
TEL03-5452-6098，FAX03-5452-6420）



☒ : AVI (感知器機能あり)

図 1 AVI 設置位置イメージ

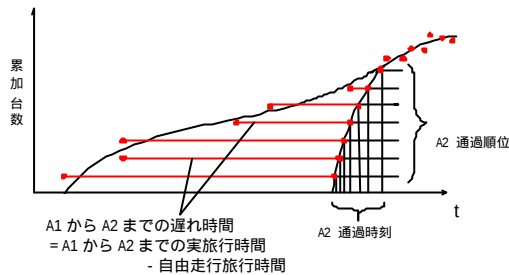


図 2 AVI による到着・流出累加図作成イメージ
 であり、2 点間のナンバープレートマッチングにより旅行時間の計測が可能である。図 1 のように交差点直下流に AVI が設置されているとする。A2 の通過時刻順に描いた累加図が流出累加図となる。一方、流出累加図に対して、通過順位の対応する車両について AVI より得られた A1 から A2 の遅れ時間 (= A1 から A2 までの旅行時間 - 自由走行旅行時間) 分だけ時間を前にずらしてプロットすると、当該車両の A2 への到着時刻が得られ、この点にあわせるようにスムージングすることにより到着累加図が作成される (図 2)。

ここで、AVI では必ずしも全車の所要時間を計測できなくてもよいが、流出累加図を正確に描くためには下流側 (A2) で全車両の通過時刻が検知される必要がある。

2.2 スプリットおよびオフセットのシフトによる遅れの増減

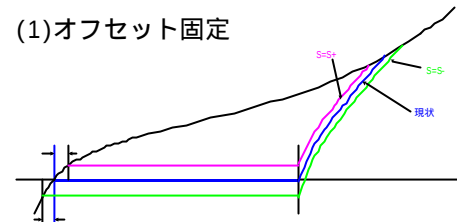
2.1 により得られた到着・流出累加図に基づき、サイクル長を固定してスプリット (青時間) 及びオフセットを D だけ増減させた場合の遅れ時間の変化量を算出し、表 1 に示すような遅れ時間増減のテーブルを作成する。スプリット、オフセットを増減させると、それぞれ流出曲線が図 3 のように変化するため、遅れ時間の変化量を到着・流出累加図上での面積として算

表 1 スプリット及びオフセットのシフトによる遅れの増減量の一覧表示

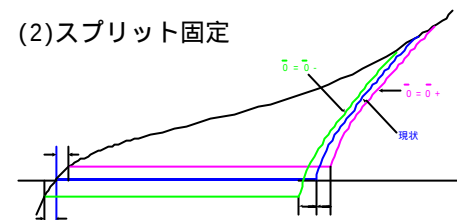
オフセット		$\bar{O}$		
		$-\Delta$	0	$+\Delta$
スプリット	$-\Delta$	f_{-}	f_{-0}	f_{-+}
	0	f_{-0}	現状 $f_{00} = 0$	f_{0+}
	$+\Delta$	f_{+}	f_{+0}	f_{++}

f は現状からの遅れの増減量であり、増加の場合を正とする。

(1) オフセット固定



(2) スプリット固定



(3) オフセット・スプリット

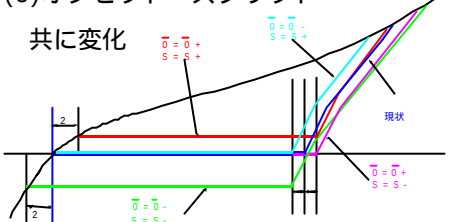


図 3 スプリットおよびオフセットのシフトによる遅れの増減

出することができる。

2.3 サイクル長の増減の効果

サイクル長の増減による効果としては、オフセット効果、ロスタイム効果、および飽和交通流率効果を考える。なお、サイクルを変更した場合には、上流からの到着波形がサイクル長に比例して相似的に変化するものと仮定する。同様に、スプリットはサイクルに比例して増減するものとする。

(1) オフセット効果

サイクル長を変更すれば、必然的にオフセットも変化する。現状のオフセットを $\bar{o}$ とすると、

サイクル長を C から $C+2\Delta$ に変化させた場合には、リンク両端のオフセットは、両端均等にそれぞれ $\bar{o}+\Delta$ となり、 C から $C-2\Delta$ に変化した場合には、 $\bar{o}-\Delta$ となるものとする。すなわち、サイクル変更をオフセットに対して中立にするため両端均等となるようにする。この場合、オフセット効果による遅れ時間は以下の手順により計算される。

(a) 各系統リンクにつき、両端出路停止線の f_{0+} の和 $= \bar{o}f_{0+}$ および f_{0-} の和 $= \bar{o}f_{0-}$ を求める。

(b) すべての系統リンクにつき、

$$\bar{O}F_+ = \sum_{\sigma} \bar{o}f_{0+} \cdot \left(\frac{C+2\Delta}{C}\right)^2, \text{ および}$$

$$\bar{O}F_- = \sum_{\sigma} \bar{o}f_{0-} \cdot \left(\frac{C-2\Delta}{C}\right)^2 \text{ を求める。}$$

ここで、 $\bar{O}F_+$ はサイクル長を C から $C+2\Delta$ に改訂した場合、 $\bar{O}F_-$ は C から $C-2\Delta$ に改訂した場合の 1 サイクルあたりの遅れの増減量を示す。

(2) ロスタイム効果

サイクル長を C から $C+2\Delta$ あるいは C から $C-2\Delta$ に変更することによって有効青時間が増減する。ここでは、このロスタイム効果による遅れの増減を以下の通り算出する。

(a) 各停止線につき以下を求める。

- ・ サイクル長を C から $C+2\Delta$ としたときの 1 サイクルあたりの遅れ増分

$$\begin{aligned} Sf_+ &= \left(\frac{C+2\Delta-L}{C-L} - \frac{C+2\Delta}{C}\right) \cdot G \cdot \frac{f_{++}}{\Delta} \cdot \left(\frac{C+2\Delta}{C}\right) \\ &= \frac{2GL}{C(C-L)} \cdot f_{++} \cdot \left(\frac{C+2\Delta}{C}\right) \end{aligned}$$

- ・ サイクル長を C から $C-2\Delta$ としたときの 1 サイクルあたりの遅れ増分

$$\begin{aligned} Sf_- &= \left(\frac{C-2\Delta-L}{C-L} - \frac{C-2\Delta}{C}\right) \cdot G \cdot \frac{f_{--}}{\Delta} \cdot \left(\frac{C-2\Delta}{C}\right) \\ &= \frac{-2GL}{C(C-L)} \cdot f_{--} \cdot \left(\frac{C-2\Delta}{C}\right) \end{aligned}$$

(b) すべての停止線につき $SF_+ = \sum Sf_+$ および $SF_- = \sum Sf_-$ を求める。ここで、 SF_+ はサイクル

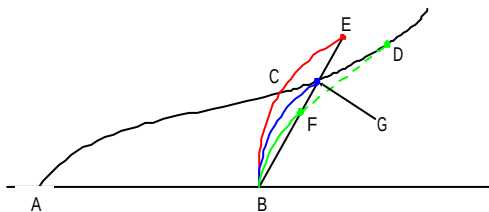


図4 サイクルの増減の飽和交通流率への影響

長が C から $C+2\Delta$, SF_- は C から $C-2\Delta$ とした時のロスタイム効果による 1 サイクルあたりの遅れの増減を示す。

(3) 飽和交通流率効果

飽和交通流率が青時間の経過に伴って変化する（通常は減少する）ことにより、サイクル変更で遅れが増減する。図4は到着・流出累加図でそのイメージを示したものである。曲線BGは現在の飽和交通流率による流出曲線、BEはBGを $C/(C-2\Delta)$ だけ拡大した曲線、BDはBGを $C/(C+2\Delta)$ だけ縮小した曲線及びその延長（波線部）を表す。その際、面積ABGは現在の1サイクルあたりの遅れであり、面積ABCはサイクル長を C から $C-2\Delta$ に変更したときの遅れの $\{C/(C-2\Delta)\}^2$ 倍、同様に、面積ABDは、サイクル長を C から $C+2\Delta$ に変更したときの遅れの $\{C/(C+2\Delta)\}^2$ 倍である。従って、飽和交通流率効果による遅れは以下の通り算出される

(a) 各停止線ごとに以下の値を求める。

- ・ サイクル長を C から $C+2\Delta$ に改訂したときの 1 サイクルあたりの遅れ r_+

$$r_+ = ABD \cdot \left(\frac{C+2\Delta}{C}\right)^2$$

- ・ サイクル長を C から $C-2\Delta$ に改訂したときの 1 サイクルあたりの遅れ r_-

$$r_- = ABC \cdot \left(\frac{C-2\Delta}{C}\right)^2$$

(b) すべての停止線の r_+ および r_- の和を計算し、 $R_+ = \sum r_+$ および $R_- = \sum r_-$ を求める。

R_+ はサイクル長を C から $C+2\Delta$, R_- は C から $C-2\Delta$ としたときの 1 サイクルあたりの遅れとなる。

(4) 総合効果

上記(1)～(3)で掲げた各効果は本来互いに独立ではないが、近似的に和をとることにより全効果を考慮した 1 サイクルあたりの遅れを算出する。また、時間あたり遅れは、1 サイクルあたり遅れに時間あたりサイクル数を乗ずる。これより、サイクル長の変更による時間あたりの遅れの増減は以下の通り計算される。

- ・ サイクル長を C から $C+2D$ に改訂したときの
時間当たりの遅れの増減 C_+

$$C_+ = (\overline{OF}_+ + SF_+ + R_+) \cdot \frac{1}{C+2D} - \sum ABG \cdot \frac{1}{C}$$

- ・ サイクル長を C から $C-2D$ に改訂したときの
時間当たりの遅れの増減 C_-

$$C_- = (\overline{OF}_- + SF_- + R_-) \cdot \frac{1}{C-2D} - \sum ABG \cdot \frac{1}{C}$$

2.4 パラメータシフト量の決定

2.2 及び 2.3 で示した評価方法により信号パラメータの改訂による遅れ時間の増減量を各交差点毎に評価できる。そこで、対象とする全交差点について、考えうるすべてのパラメータシフト量の組み合わせで遅れ時間の変化量を算出し、最も遅れ時間の小さくなる組み合わせを選択する。以下、いくつかの組み合わせ方法について、計算量などの関係も踏まえて考察を行う。

(1) サイクルとオフセットの組み合わせ

各リンクについて、サイクルとオフセットの組み合わせで改訂する場合を考える。組み合わせとしては以下の場合が考えられる。

- (a) 各リンクにつきサイクル長が C で不変の場合：以下の3通り

オフセットが上流交差点で $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} + \Delta$ 、下流交差点で $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} - \Delta$ となる場合

上下流交差点でオフセットが変わらない

オフセットが上流交差点で $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} - \Delta$ 、下流交差点で $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} + \Delta$ となる場合

- (b) サイクル長が変化する場合：以下の2通り

サイクル長は C から $C+2\Delta$ となる場合

(上下流交差点ともにオフセットが $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} + \Delta$ となる)

サイクル長は C から $C-2\Delta$ となる場合

(上下流交差点ともにオフセットが $\bar{o} \Rightarrow \bar{o} - \Delta$ となる)

従って、系統内の N 交差点 $N-1$ リンクの場合、探索する組み合わせの数は

$$(N-1) \times 3 + 2 \text{ 通り}$$

となる。

(2) 3 パラメータの同時決定

次に、3 パラメータを同時に決定する場合の組み合わせの数を考える。各交差点につきスプリット変更の組み合わせは3通り(2 現示の場合)あるため、(1)に加えてスプリットも同時に決定する場合 $\{(N-1) \times 3 + 2\} \cdot 3^N$ 通りのサイクル、スプリット、オフセットの組み合わせがある。 $N=10$ とすると、

$$\{(N-1) \times 3 + 2\} \cdot 3^{10} = 29 \times 59,049 = 1,712,421 \text{ 通り}$$

である。この組み合わせ数は過大であるため、以下に示すようにスプリットは各交差点ごとに独立に決定した方が現実的である。

(3) スプリットの各交差点の個別決定とサイクル・オフセットの同時決定

スプリットは厳密には個別単独には決定できないが、便宜的にサイクルおよびオフセットは現状が保たれているものとして、表1のオフセット固定の場合、すなわち f_{-0} 、 f_{00} 、 f_{+0} の値を用いて交差点毎にすべての現示を考慮した遅れ時間の変化量を算出し、これらの比較からスプリットシフト量を決定する。

次に、上で決定されたスプリットを用いて、(1)で示したサイクルとオフセットの組み合わせについて遅れの増減量を算出し、これらの比較からサイクル及びオフセットを同時に決定する。このときのサイクルとオフセットの場合の数は、(1)で示したとおり $(N-1) \times 3 + 2$ 通りである。 $N=10$ (10 交差点 9 リンク) とすれば、 $9 \times 3 + 2 = 29$ 通りとなり、(2)の場合と比較してもきわめて少数の組み合わせの探索で十分となる。

3. 今後の展開

2004 年 10 月に ITS 世界会議が名古屋で開催されるのにあわせて、警察庁及び UTMS 協会が中心となって本提案アルゴリズムを含む ITS 技術を用いた新しい信号制御技術のデモ実験が行われる予定である。今後、このデモ実験に向けて、シミュレーションモデルを用いたアルゴリズムの検証を行うとともに、実際の適用に向けた細部の検討を進めていく予定である。