

地点感応制御における最適信号パラメータに関する考察 *
 A Study on Optimal Signal Parameters
 for the Responsive Control at an Isolated Intersection

麦倉武志 ** 吉井稔雄 *** 桑原雅夫 ****

By Takeshi MUGIKURA, Toshio YOSHII and Masao KUWAHARA

1. はじめに

交通観測技術の進歩によって、高精度の情報が得られるようになり、さらにはビーコンを介しての路車間通信によって、今までの感知器による情報とは別に旅行時間の情報が得られるようになった。しかし、こういった情報を有効に利用した、より高度な交通制御の方法についてはまだ確立されていないのが現状である。そこで、本研究は、単独交差点での信号制御に焦点をあて、より高度な交通感応制御手法を提案し、その有効性についての吟味を行った。

地点制御の信号パラメータ設定に関する理論として広く用いられている方法として Webster¹⁾の方法がある。しかしこの方法は、長いタイムスパンでの交通の均衡状態を仮定しているために、感応制御のような制御時間単位の短い制御に用いるのは適当ではない。

信号の交通感応制御システムで代表的なものとして、英国の SCOOT²⁾、豪州の SCAT³⁾、日本ではパタン選択制御⁴⁾と呼ばれる方式があり、それぞれに優れた運用実績を残している。しかし、いずれも用いるデータが感知器データに限られるという制約下で開発されたため、本来信号パラメータ設定の根拠になるべき単位時間当たりの遅れ最小化という観点からすると、必ずしも最適化を行っているとは言えない。

本稿は、地点感応制御における最適信号パラメータ設定に関する理論を、単位時間当たりの遅れを最

小化するという指標の下で構築し、さらにその理論による制御方法と Webster の方法との比較を通して、評価を行うというものである。

2. 地点制御の理論構築

2. 1. 設定条件

地点感応制御の理論構築にあたり、以下のような交差点形状および交通状況を設定する。

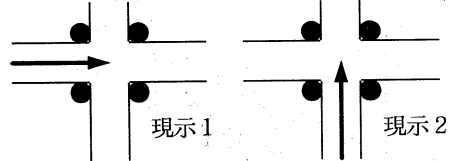


図1 交差点形状

・交差点形状

→図1のような2方向とも一方通行の交差点

- ・到着交通の分布 →ポアソン分布 (ランダム到着)
- ・出発交通の分布 →一様分布 (一定値に設定)
- ・赤時間開始時における待ち台数 → 正確に推定可能
- ・到着交通の平均流率 → 一定値

2. 2. 遅れの評価

信号制御の目的関数になる、単位時間当たりの遅れの導出方法について説明する。なお以下の文中でしばしば用いられる記号は以下の通りである。

- i : 現示 i の . . . λ_i : 到着交通流率
- j : j サイクル目の . . . S_j : 飽和交通流率
- G_i : 青時間長 λ : 飽和度
- C : サイクル長 Q_i : 初期待ち台数

また、1 サイクルとは各現示ごとに、赤時間に始まり青時間が終了するまでの時間とする。

(1) 1 サイクルで x 台到着する確率

1 サイクルで x 台到着する確率 $P_{\lambda, C}(x)$ は、ポアソン分布を用いて、

*キーワード: 交通制御

**学生会員 東京大学生産技術研究所

***正会員、工修、東京大学生産技術研究所

****正会員、Ph.D、東京大学生産技術研究所

(〒106 港区六本木 7-22-1 TEL:03-3401-0522 FAX:03-

3401-6286)

$$P_{\lambda C}(x) = Po(\lambda_i C) = \frac{e^{-\lambda_i C} \cdot (\lambda_i C)^x}{x!} \quad [1]$$

となる。

(2) サイクル開始時に、待ち台数が n_1 台である状態確率

サイクル開始時に待ち台数が n_1 台である確率を $Ps_i^j(n_1)$ とし、サイクル終了時 (次のサイクル開始時) に待ち台数が n_2 台である確率を $Ps_i^{j+1}(n_2)$ とし、 $Ps_i^j(n_1)$ と $Ps_i^{j+1}(n_2)$ の関係式を記述する。

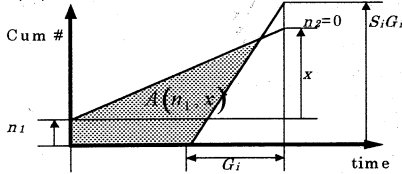


図2 1 サイクルで捌ききれる場合 ($n_2 = 0$)

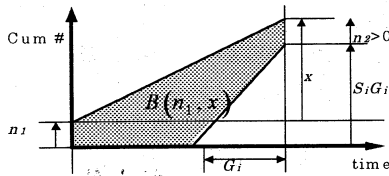


図3 1 サイクルで捌ききれない場合 ($n_2 > 0$)

1) $n_2 = 0$ のとき (1 サイクルで捌ききれるとき)

図2のように、捌ききれる場合は、 $n_1 + x \leq S_i G_i$ となるので、 $Ps_i^{j+1}(n_2)$ は、 $n_1 + x \leq S_i G_i$ となるような全ての (n_1, x) の組み合わせを考えればよい。ゆえに、 $Ps_i^{j+1}(n_2) = \sum_x \sum_{n_1} Ps_i^j(n_1) \cdot P_{\lambda C}(x) \cdot \delta_i^1(n_1, x)$ [2.1]

$$\text{ここで、} \delta_i^1(n_1, x) = \begin{cases} 1 & (n_1 + x \leq S_i G_i \text{ のとき}) \\ 0 & (n_1 + x > S_i G_i \text{ のとき}) \end{cases}$$

となる。

2) $n_2 > 0$ のとき (1 サイクルで捌ききれないとき)

図3のように捌ききれない場合は、 $n_1 + x > S_i G_i$ となる。捌き残り台数 n_2 は、 $n_2 = n_1 + x - S_i G_i$ となるので、 $Ps_i^{j+1}(n_2)$ は $n_2 = n_1 + x - S_i G_i$ のなるような全ての (n_1, x) の組み合わせを考えればよい。ゆえに、 $Ps_i^{j+1}(n_2) = \sum_x \sum_{n_1} Ps_i^j(n_1) \cdot P_{\lambda C}(x) \cdot \delta_i^2(n_1, x)$ [2.2]

$$\text{ここで、} \delta_i^2(n_1, x) = \begin{cases} 1 & (n_1 + x - S_i G_i = n_2 \text{ のとき}) \\ 0 & (n_1 + x - S_i G_i \neq n_2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

となる。

これで、 j サイクル目の状態確率より $j+1$ サイク

ル目の状態確率が求められる。

(3) 初期待ち台数の設定

1 サイクル目の初期待ち台数の観測値 Q_i より、1 サイクル目の状態確率は

$$Ps_i^1(n_1) = \begin{cases} 1 & (n_1 = Q_i \text{ のとき}) \\ 0 & (n_1 \neq Q_i \text{ のとき}) \end{cases} \quad [3]$$

で与えられるので、[2.1]、[2.2]、[3]を用いると、すべてのサイクル開始時の待ち台数の状態確率が得られることになる。

(4) 時間-累積交通量グラフを用いた1サイクル中の遅れの算出

1 サイクルの中では、一様到着、一様出発を仮定し、図2、3を参考にしながら、総遅れ $D_i(n_1, x)$ は、図の網掛け部分の面積で、

$$D_i(n_1, x) = \begin{cases} A_i(n_1, x) & (n_1 + x \leq S_i G_i \text{ のとき}) \\ B_i(n_1, x) & (n_1 + x > S_i G_i \text{ のとき}) \end{cases} \quad [4]$$

となる。

(5) N サイクル分の時間当たりの遅れの期待値

N サイクル分の時間当たりの遅れの期待値 Δ_N は

[1]-[4]を用いて

$$\Delta_N(G_1, G_2, Q_1, Q_2, N) = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{n_1} \sum_x Ps_i^j(n_1) \cdot P_{\lambda C}(x) \cdot D_i(n_1, x)}{NC} \quad [5]$$

となる。なお、ここで入力には青時間と初期待ち台数と制御サイクル数 N となっている。

(6) 制御時間単位 T における最適化問題

初期待ち台数に観測値、 N には動的な感應制御に用いる制御時間単位 T におけるサイクル数 T/C を用いると、青時間 (G_1, G_2) の最適化問題となる。目的関数は、[5]を利用して、

$$\Delta_T(G_1, G_2) = \frac{\sum_{j=1}^{T/C} \sum_{i=1}^N \sum_{n_1} \sum_x Ps_i^j(n_1) \cdot P_{\lambda C}(x) \cdot D_i(n_1, x)}{T} \quad [6]$$

となる。

2. 3. 信号パラメータ最適化の結果

[6]式を用いて各制御時間単位毎に最適化計算を行い、信号をパラメータ動的に変化させ、遅れを算出したものと、Webster の最適サイクル長 C_{opt} の式

$$C_{opt} = \frac{15L + 5}{1 - \lambda}, \quad L: \text{損失時間}$$

を用いて、飽和度の比にスプリットを配分し信号パラメータを定め、その結果を[6]式に代入し遅れを算出したものとを比較した結果が、図4、5である。なお、初期待ち台数が両方向とも0台の場合が図4、30台のものが図5である。流入交通流率：両方向とも720veh/h、飽和交通流率：1800veh/hとした。ここで動的な制御の効果を示す遅れ短縮効果は、

$$\text{遅れ短縮効果(\%)} = \frac{(\text{動的な制御の遅れ}) - (\text{Websterの制御の遅れ})}{(\text{Websterの制御の遅れ})} \times 100$$

と定義した。

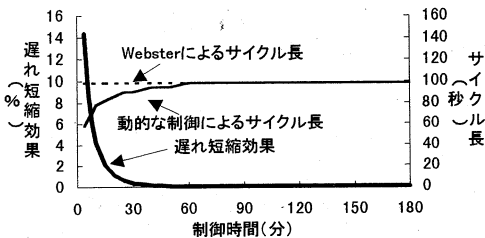


図4 捌き残りを考えない場合(初期待ち台数0台)

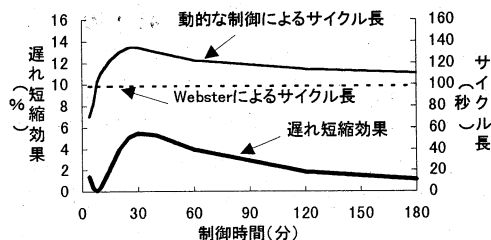


図5 捌き残りを考えない場合(初期待ち台数30台)

図4より初期待ち台数がない場合はサイクル長を短くすると遅れ短縮効果があり、さらに制御時間が短いほどその効果が大きくなるのがわかる。図5より初期待ち台数が多いときは、サイクル長を長くすると遅れ短縮効果があることが分かる。また、双方とも制御時間を長くすると Webster の方法の結果に収束することが分かる。

図5の制御時間約10分以下に注目すると、Websterの最適サイクル長より、短いサイクル長をとった方が望ましいということになる。これは、この方法が、制御時間の中だけの遅れを考えて制御しているため、制御時間終了時に捌き残った車がその後の遅れに与える影響について考えていないこと

が原因となっている。

そこで以下では、制御対象時間終了時に期待される捌き残りを考慮した分析を行う。

2. 4. 制御時間後の遅れの評価

制御時間終了後は一様到着、一様出発を仮定し、制御時間終了時に捌き残った n_i 台がその後の状況に付加的に与える遅れ時間をもって評価した。

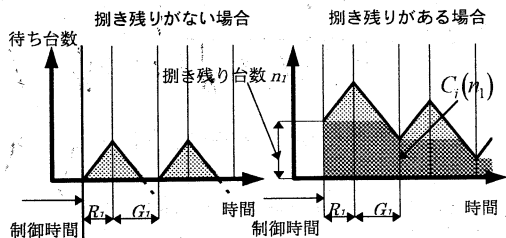


図6 捌き残り車による付加的な遅れ

図6の左図は制御時間終了時に待ち台数がないときの各時刻の待ち台数を示した図で、右図は捌き残りが n_i 台の時の同様な図である。このとき、図の灰色部分の面積 $C_i(n_i)$ が付加的な遅れとなる。この場合には、制御時間終了時に待ち台数が n_i 台であるという状態確率 $P_{S_i}^{last}(n_i)$ を用いて、捌き残り車がある場合の付加的な遅れの期待値を

$$D_s = \sum_{i, n_i} P_{S_i}^{last}(n_i) \cdot C_i(n_i)$$

により求める。これを単位時間当たりの遅れに換算し、[6]の目的関数に加えたもの

$$\Delta_s(G_1, G_2) = \Delta_T(G_1, G_2) + \frac{D_s}{T} \quad [7]$$

を目的関数とする。

2. 5. 信号パラメータ最適化の結果

図7は初期待ち台数が0台の時に、以上の方法で信号パラメータを最適化したものと Webster の方法で信号パラメータを設定したものとを比べたものである。なお設定値は2. 3. と同様である。この場合、サイクル長を短くすると遅れ短縮効果があり、さらに制御時間が短いほどその効果は大きくなるのが分かる。図8は初期待ち台数が30台の時に、同様に比べたものである。この場合、サイクル長を長くすると遅れ短縮効果があり、さらに制御時間が短いほどその効果は大きくなるのが分かる。また、2. 3. と同様に制御時間を長くすると Webster の

方法に収束することも確認できる。このことから捌き残りの効果を考えた動的な制御は、制御時間が短いほど有効である可能性が強いと言える。

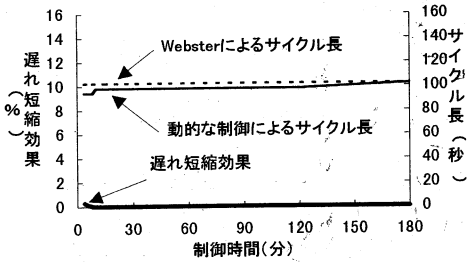


図7 捌き残りを考えた場合(初期待ち台数0台)

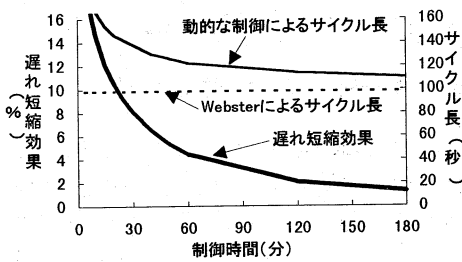


図8 捌き残りを考えた場合(初期待ち台数30台)

3. シミュレーションによる検証

2. 2.、2. 4. の理論の下で、実際に信号を運用すると、どの程度遅れを短縮する効果があるのか調べるために、乱数を用いてランダムに車両を発生させるシミュレーションを用いて動的な制御と Webster の方法による制御との比較を行った。

設定条件は

シミュレーション時間：20時間

飽和交通流率：1800veh/h

平均流入交通流率：両方向とも 720veh/h ($\lambda=0.8$)、810veh/h ($\lambda=0.9$) の2ケース

とし、それぞれ3回の計算を行い平均を取って比較した。

図9は、捌き残りを考えないで動的な制御をしたときの遅れ短縮効果について制御時間ごとに示したものである。この制御方法では、制御時間が短いと遅れ短縮効果はマイナスになるという結果が得られたが、これは捌き残りを考慮していないことが原因であると考えられる。図10は、捌き残りを考慮して動的な制御をした場合の比較結果である。 $\lambda=0.9$

の近飽和状態で、制御時間が短いときに遅れ短縮効果が得られることが分かる。

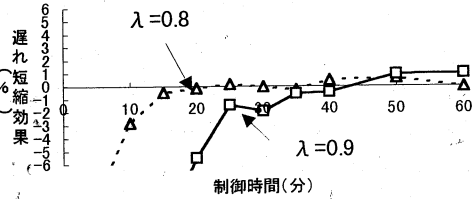


図9 シミュレーション結果(捌き残りを考えない)

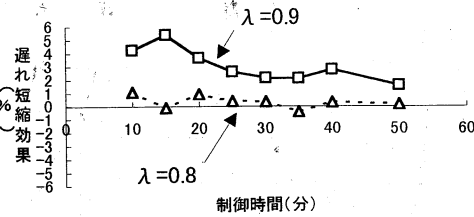


図10 シミュレーション結果(捌き残りを考える)

4. まとめ

本稿は、交通の計測技術向上を念頭に置き、単位時間当たりの遅れという指標を用いて地点感応制御における信号パラメータ最適化の理論を構築し、Websterの方法との比較を通してその効果について分析した。その結果、飽和度が大きく制御時間を短くとした感応制御を行った場合には、サイクル長固定の Webster の制御方法と比較して、有効であることが確認できた。

今後は、交通流率の変化を考慮した感応制御の理論構築、評価、オフセット等の他の信号パラメータを含めた系統、面制御の理論構築、評価を行っていく予定である。

なお、本研究を進めるにあたり貴重なご意見をいただきました、松下通信工業システム技術部の織田さん、神奈川県警察本部交通管制課の新倉さんに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. F. V. Webster, Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No.39, 1958
- 2) Hunt, Robertson and AI, SCOOT, a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Report N1014, Crowthorne, UK, 1981
- 3) Lowrie, P. R., SCATS - Principles, methodology, algorithm, IIE Conference on Road Traffic Signaling, IEE Publication 207, England, London, pp.67-70, 1982
- 4) 社団法人交通工学研究会編, 交通信号の手引, 1994