

GAによる系統交通信号の 共通サイクル長に関する研究

小田原 正和¹・久井 守²

¹大学院理工学研究科知能情報システム工学専攻

²知能情報システム工学科

本研究では系統交通信号の共通サイクル長に着目し、GAを適用してその最適化を行い、主としてGAの適用性について検討した。共通サイクル長とともにオフセットも同時に最適化を行った。GAの遺伝子表現では、1つの相対オフセットにつき2進数3桁、共通サイクル長は6桁で表現した。評価指標は遅れと停止の加重和とし、TRANSYT交通流モデルで求めた。計算例から、越の理論解が得られることが確認でき、また現実的な道路交通条件および信号条件の下でもよい解が得られた。解の精度もほぼ満足できるものが得られたと考えられる。計算効率は勾配法とほぼ同程度で、しかも勾配法よりもよい解が得られた。

Key Words : traffic flow, traffic control, traffic management, ITS

1. はじめに

系統交通信号の制御パラメータとしては、共通サイクル長、スプリットおよびオフセットの3つがある。本研究では、これら3つの制御パラメータのうち共通サイクル長に着目し、GAを適用してその最適化を行い、主としてGAの適用性について検討する。

孤立交差点の最適サイクル長については Webster によって提案された式があるが、系統制御の共通サイクル長については、その決定法はあいまいであり、道路交通条件との関係もあまり明らかではない。共通サイクル長は最適オフセットに影響し、したがって制御効果にも大きく影響することから系統制御では重要な制御パラメータであると考えなければならない。したがって共通サイクル長の決定法を明確にすることはきわめて重要な課題である。

本研究では、共通サイクル長の決定法を明確にすることを最終目標として、複数のリンク数からなる系統信号区間を対象とし、共通サイクル長をGAによって最適化することを試みた。共通サイクル長を求めるためには、サイクル長に対してつねにオフセットを最適化しておくことが必要である。したがって本研究ではサイクル長とオフセットの同時最適化

を行う。最適化手法としてGAを用いたのは、次の2つの理由からである。

- ① 局所解を避け全域的最適解を探索するため
- ② サイクル長とオフセットの同時最適化を行うため

最適化の評価指標は系統信号区間の遅れと停止の加重和とし、交差方向の遅れと停止は考慮しない。評価指標の値を求めるためには何らかのモデルが必要である。そのモデルとしては、共通サイクル長とオフセットの関数として評価指標が求められるものであれば、方法論的にはどのようなモデルでもよいが、本研究では、交通現象の再現性を重視してTRANSYT交通流モデルを用いることとする。このモデルは一種のシミュレーションであるが、サイクル長やオフセットなどの信号制御パラメータを与えれば、それに応じて交通流を再現することができるモデルである。また右左折や車群の拡散を扱うこともできる。

2. 共通サイクル長に関する既存の研究

系統交通信号の制御パラメータについてはこれまでに多くの研究がなされている。そのうち、共通サイクル長に関する研究としては、越の研究¹⁾および

李・池之上の研究²⁾がある。越はリンク長を明確に考慮して、サイクル長と遅れの関係を明らかにした上で遅れを最小にするサイクル長について研究している。また李・池之上はリンクごとの確定的遅れとクリティカル交差点のランダム遅れの両者を考慮して最適サイクル長を求めている。これに対し久井らはリンク長のばらつきを考慮して共通サイクル長を求めべきであるという点を強調している³⁾。

越の理論では¹⁾、2信号間のリンクを往復した場合の平均遅れ d (s/台) は次式で与えられることを示した。

$$d = \frac{1}{2} \text{Min}_n |n \cdot C - T| \quad (1)$$

ここに

T : リンク往復所要時間 (s)

C : サイクル長 (s)

n : 整数 0, 1, 2, ...

基本的なオフセット型は、 n が 0 または偶数のときは同時式、 n が奇数のときは交互式である。これは次のような単一飽和方形波の仮定に基づいて理論的に導かれたものである。

- ① リンク両端の信号のサイクル・スプリット・飽和流量は等しい。
- ② 直進交通のみであり、速度は一定で車群の拡散はない。
- ③ スプリットは系統方向に対して青 50%、赤 50% であり、完全に飽和している。

式(1)の平均遅れを最小にするサイクル長 C^* は次式で与えられる。

$$C^* = \frac{T}{n} = \frac{2D}{nV} \quad (2)$$

ここに

D : リンク長 (m)

V : 系統速度 (m/s)

このサイクル長は 2 信号間のスループバンド幅最大化の観点からみても最適サイクル長となる。

高田らはスループバンド幅最大化オフセットを求めているが、孤立 2 信号に着目した場合のスループバンド幅最大化オフセット ξ は次のようになることを示している⁴⁾。

$$\xi = \begin{cases} 0 & 0 \leq \tau \leq 0.25 \text{ または} \\ & 0.75 \leq \tau \leq 1 \text{ のとき} \\ 0.5 & 0.25 \leq \tau \leq 0.75 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3)$$

ここに τ はリンクの走行所要時間をサイクル長で基準化したものである。

$$\tau = \frac{D}{CV} \quad (4)$$

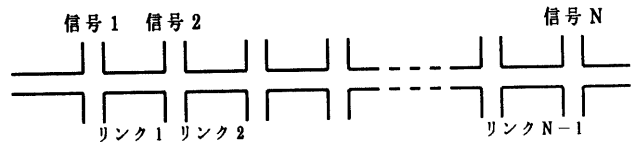


図-1 N信号からなる系統路線

高田らはこのオフセットを Normal Offset と称しているが、これは越の理論における基本的なオフセット型に一致する。

式(3)からわかるように、 τ が 0.25 または 0.75 の前後で、最適オフセットは同時式と交互式の間で不連続に大きく変化する。 τ はサイクル長によって変化するので、最適オフセットはサイクル長の変化に応じて不連続に大きく変化すると考えなければならない。遅れ時間を評価指標にした場合でも同様である。このようなことから、サイクル長とオフセットを、例えば勾配法のような手法で同時最適化することには無理がある。TRANSYT でも⁵⁾、サイクル長を同時最適化する場合には、いくつかのサイクル長を計算条件として与えて、hill-climbing 法でオフセットを最適化した後、それらの計算結果の中から、PI (Performance Index) を最小にするサイクル長を選ぶという手順による必要がある。

系統制御の制御パラメータを GA で最適化した研究^{6), 7)}はいくつかあるが、個体表現と計算法が必ずしも明確ではない。本研究では、オフセット最適化に GA を適用した筆者らの過去の研究⁸⁾を発展させ、基本的にはサイクル長を未知数に追加し、計算効率を改善したものである。また個体表現などの計算法を明確に示した。

3. GA における問題の設定

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) は確率的探索による解法であり、組み合わせ最適化問題に適しているとされている。

本研究では、図-1 に示すような N 信号からなる系統制御路線を対象とし、共通サイクル長と各リンクの相対オフセットを未知数とし、それを GA で最適化する。各リンクの相対オフセットと共通サイクル長の最適な組み合わせを求めることが目的である。勾配法とは異なり、GA では解の組み合わせを探索するので、目的関数が非凸関数でも適用可能であり、局所解に陥ってそこから離脱できないという危険を避けることが可能である。

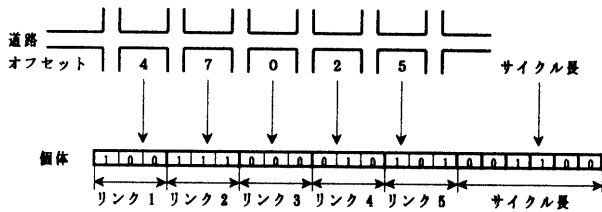


図-2 オフセットとサイクル長のコーディング方法

図-2 に示すように各リンクのオフセットは2進数3桁、サイクル長は2進数6桁でそれぞれコーディングする。図-2 のように6信号5リンクからなる路線の場合、2進数21桁の線列(個体)1個で1組の実行可能解を表現できることになる。一般にN信号からなる路線の場合の桁数は次のようになる。

$$3(N-1)+6$$

また2進数表現を10進数に換算すると、リンクkのオフセット I_k は0~7、サイクル長 I_N は0~63の範囲の値をとることになる。実際のオフセット γ_k はサイクル長Cを50等分した時間幅 ΔC を単位として表現し、サイクル長Cは40~150秒の範囲を表現することとする。そのためそれぞれ次のように変換する。

$$\gamma_k = \frac{50}{8} I_k \quad (5)$$

$$C = 40 + \frac{150-40}{63} I_N \quad (6)$$

最適化の評価指標は系統方向のPIとし、これはTRANSYT交通流モデルで求める。TRANSYT交通流モデルでは、サイクル長Cを50等分した50個の時間インターバル ΔC の交通流率によって車群パターンを表現する。リンク走行中の車群拡散を表現するために指数平滑化による平滑化処理を行う。PIは次式のように各リンクの遅れ時間(台・s/s)と停止回数(回/s)の加重和をすべてのリンクについて合計したものである。

$$PI = \sum (\text{遅れ時間} + K \cdot \text{停止回数}) \quad (7)$$

ここに

K: 停止回数の重み係数

各信号各流入部における遅れ時間は、待ち行列台数から計算できる確定的遅れと次式によるランダム遅れ(台・s/s)を合計して求める。

$$d_r = \frac{x^2}{4(1-x)} \quad (8)$$

ここに

x: トラフィック密度

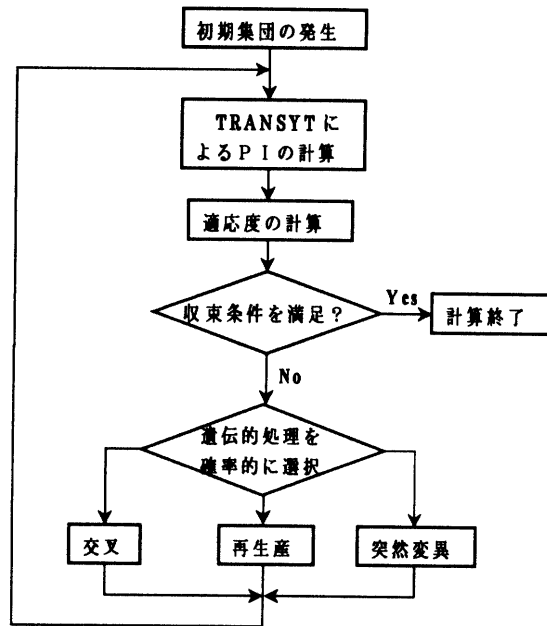


図-3 GAのフローチャート

4. 計算方法

(1) 基本的計算手順

本研究で用いた基本的なGAの計算手順は図-3に示すとおりである。

手順1: まず初期集団の個体(線列)を発生する。発生個数をM個とする。すなわちオフセットとサイクル長からなる実行可能解をM組作成する。作成方法としては、①優秀な線列導入方式と②乱数処理による方法の2通りの方法を併用する。浦田ら⁹⁾は、経験的に良好と思われる線列を初期集団に導入することを提案している。本研究では、初期集団内の個体のうち12個については、40秒から150秒まで10秒刻みのサイクル長を与えオフセットとして孤立1リンクの最適オフセットであるNormal Offsetを与える。残りの個体については乱数処理によりランダムに作成する。すなわち0と1の発生確率が等しくなる方法で2進数の線列を作成する。まったく同じ個体が作成された場合は作成し直す。

手順2: それぞれの線列(個体)で表されたオフセットとサイクル長を条件としてTRANSYT交通流モデルの計算を行い、各個体に対応するPIを求める。この場合、各信号の系統方向の青時間は次式で与える。

$$G = g(C-L) \quad (9)$$

ここに

G: 青時間(s)

g: 現示率

L: 損失時間(s)

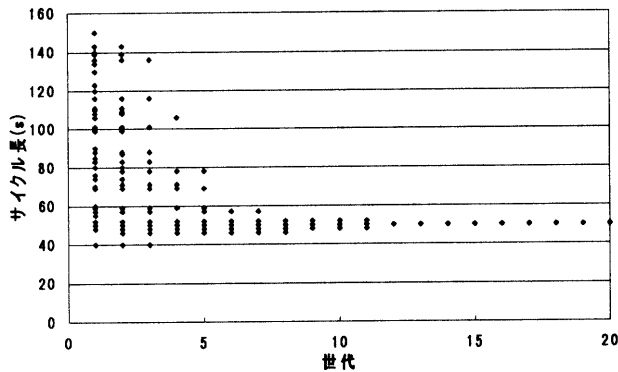


図-4 世代の経過に伴うサイクル長の分布

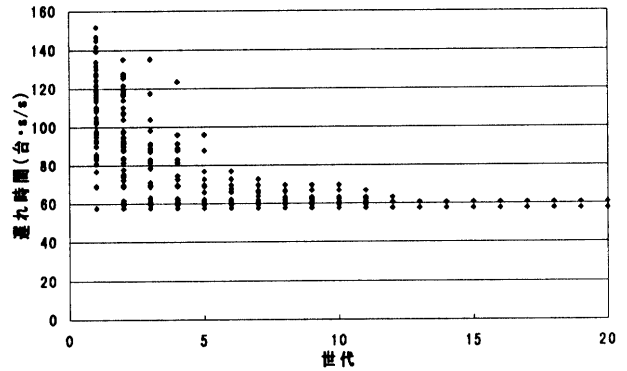
(D = 300 m, $p_m = 1\%$ の場合)

図-5 世代の経過に伴うサイクル長の分布

(D = 300 m, $p_m = 5\%$ の場合)

手順3：各個体に対するPIに対応して、次式で適応度関数 f を定義する。すなわちPIの逆数とし、かつ集団内のPIの違いを拡大強調するためにスケールリングを行って適応度関数とする。

$$f = (100 / PI)^4 \quad (10)$$

手順4：遺伝的操作によって次世代の個体を作成する。まず淘汰処理としては、各個体の適応度に比例した確率で選択する適応度比例方式を採用した。また同時に各世代における最も適応度の高い遺伝子を次世代に無条件に受け継ぐエリート保存方式を採用した。遺伝的操作については、交叉確率 $p_c = 70.0\%$ 、突然変異確率 $p_m(\%)$ 、再生産確率 $p_r = 100 - p_c - p_m$ とした。交叉は一点交叉とし、突然変異は線列上のある一点を変化させる反転処理とした。

手順5：GAの計算終了条件を満足すれば計算を終了し、そうでなければ手順2へ行く。GAの計算終了条件は、集団内の適応度の平均値が3世代連続して、 0.1×10^{-4} 以下になった場合とする。

手順6：計算が終了すれば、全個体の中から適応度最大の個体を選んでそれを解とする。

(2) 多段階反復計算

計算効率を考慮して、各リンクの相対オフセットは2進数3桁と桁数を小さくしている。そのために、オフセットの精度はサイクル長の12.5%にすぎない。そこでオフセットの精度を上げるために、基本的計算手順を数段階繰り返すことができるようにした。第1段階は基本的計算手順による計算である。第2段階は、第1段階で得られたオフセットを中心として、25% (12.5% × 2) のオフセット範囲を基本的計算手順で探索し、オフセットを3.125%の精度まで上げる。同様に第3段階まで計算すれば、精度は0.78125%とすることができる。ただしサイクル長は第1段階で得られた解に固定する。

5. GAの理論解再現性評価

越の理論では大きな仮定を設けているが、その仮定にたつ限り、最適サイクル長は式(2)で与えられ、また最適オフセットは n の値に応じて同時式または交互式オフセットとなる。ここではまず最初に、GAを適用すれば越の理論による最適サイクル長およびオフセットが得られるかどうかを計算例によって確かめる。そのために交通条件および信号条件を以下のように設定した。

系統速度： $V = 12 \text{ m/s}$ (両方向同一で一定)

飽和流量： $s = 0.50 \text{ 台/s}$ (各信号共通)

交通量： $q = 0.240 \text{ 台/s}$ (両方向同一)

現示率： $g = 0.50$ (各信号共通)

損失時間： $L = 0 \text{ s}$ (各信号共通)

右左折：なし

また車群の拡散がないという条件を実現するために、TRANSYTモデルのパラメータを次のようにした。すなわち、平滑化係数を1.0とし、また車群先頭車のリンク走行時間は平均走行時間の0.8倍ではなくこれを1.0倍とした。またPIの重み係数は $K = 0$ とした。このようにして評価指標は遅れ時間のみとし、越の仮定に合わせた。ただし遅れ時間にはランダム遅れを含めている。

計算対象は、6信号5リンク ($N = 6$) からなる3つの系統制御路線とし、いずれも信号は等間隔、すなわちリンク長は一定で次のようにした。() 内は式(2)より求めた最適サイクル長である。GAによりこのサイクル長が得られるかどうかを確かめる。個体数は $M = 50$ 個とした。

① 300 m (50 s)

② 420 m (70 s)

③ 540 m (45 s または 90 s)

計算結果を図4～図6に示す。図4と図5は、

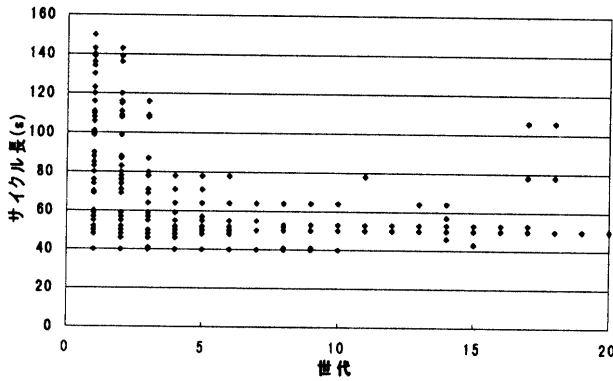


図-6 世代の経過に伴うサイクル長の分布
($D = 500 \text{ m}$, $p_m = 1\%$ の場合)

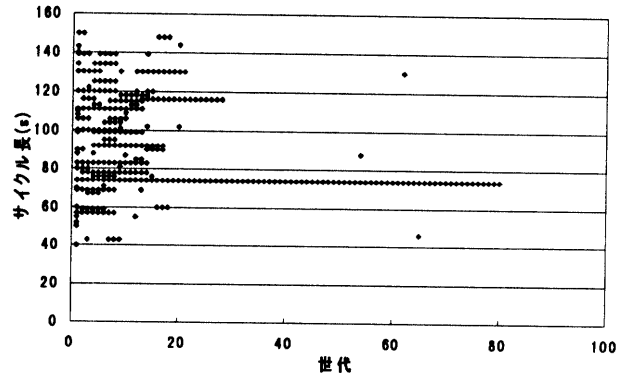


図-8 世代の経過に伴うサイクル長の分布

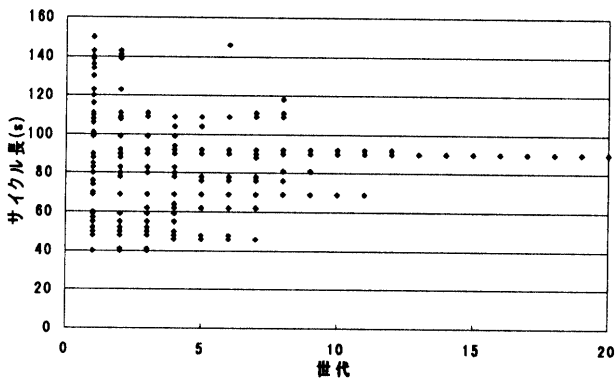


図-7 世代の経過に伴う遅れ時間の分布
($D = 300 \text{ m}$, $p_m = 1\%$ の場合)

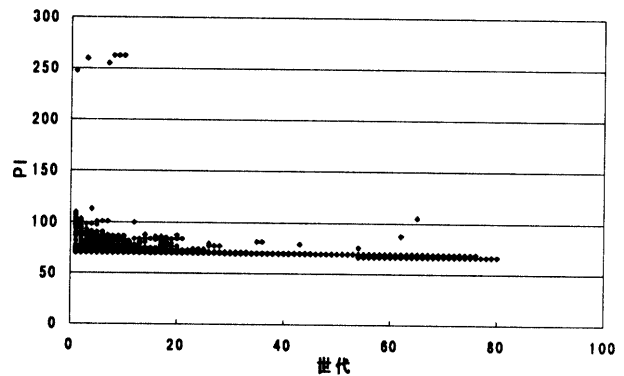


図-9 世代の経過に伴うPIの分布

世代の経過とともに 50 個のサイクル長の分布がどう変化するかを示したものである。図-4 はリンク長が 300 m の場合であるが、越の理論による最適サイクル長に解が収束していることがわかる。またオフセットは、各リンクとも交互式となり最適オフセットに収束した。図-4 は突然変異確率 p_m が 1% の場合であるが、 p_m を少し大きく 5% としても、図-5 に示すよう最適サイクル長に収束する。同様にリンク長が 420 m の場合は、サイクル長が最適サイクル長の 70 秒に収束し、またオフセットは各リンクとも最適オフセットである同時式に収束した。リンク長が 540 m の場合は、図-6 に示すようにサイクル長は 90 秒 ($n = 1$) に収束し、オフセットは最適の交互式に収束した。なお図-6 は p_m が 1% のときである。

図-7 は、リンク長 300 m、 $p_m = 1\%$ の場合について、世代の経過とともに 50 個の遅れ時間の分布がどう変化するかを示したものである。世代の経過とともに一定の値に収束することが確認できる。以上の結果より、越の理論を満足するような理論解を再現できることが確認できた。

6. 計算例によるGAの解の特性

(1) 一般的な計算条件の場合

越の理論は大きな仮定を前提にしているの、ここではその仮定を除き、できるだけ現実的な計算条件でGAの計算を行い、解の特性について検討する。用いた交通条件および信号条件は次の通りである。

系統速度： $V = 12 \text{ m/s}$ (両方向同一で一定)

飽和流量： $s = 0.50 \text{ 台/s}$ (各信号共通)

交通量： $q = 0.1875 \text{ 台/s}$ (両方向同一)

現示率： $g = 0.50$ (各信号共通)

損失時間： $L = 10 \text{ s}$ (各信号共通)

右左折：なし

車群の拡散はこれを考慮した。PIの重み係数は $K = 25$ とし、評価指標PIは遅れと停止の加重和とした。また $p_m = 1\%$ とし、 $M = 30$ とした。交通量 0.1875 台/s (675 台/h) は $C_{min} = L / (1 - q/gs)$ で求めた最小サイクル長がちょうど 40 秒となる交通量である。計算対象は、6 信号 5 リンク ($N = 6$) からなる系統制御路線とし、各リンクのリンク長は次のように与えた。

450 m, 200 m, 400 m, 150 m, 400 m

計算結果を図-8 および図-9 に示す。図-8 はサイ

表-1 GAの計算結果

サイクル長(s)	オフセット					PI
74	25	0	31	6	31	66.41
102	31	0	25	0	31	68.65
101	31	0	31	0	37	66.92
73	25	6	25	6	31	67.47
73	25	0	25	6	31	68.42
74	25	0	31	6	31	66.41
80	31	0	25	0	31	68.71
73	31	6	25	0	25	67.06
104	31	0	31	0	37	66.42
100	25	0	25	0	25	69.84

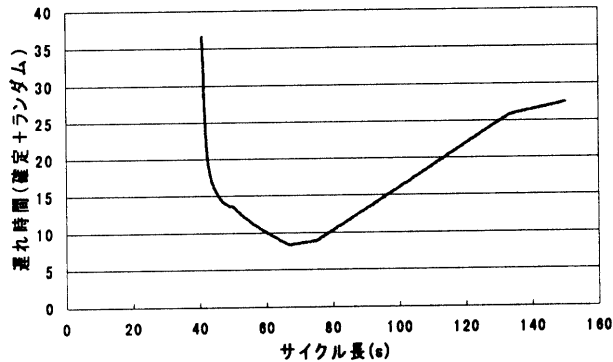


図-10 遅れ時間とサイクル長の理論的關係

クル長の分布であり、図-9はPIの分布である。それぞれ世代の経過とともにどう変化するかを示したものである。サイクル長もPIも一定の値に収束している。次にこのようなGAの計算を10回行って、得られたサイクル長、オフセットおよびPIを10組列挙すると表-1のようになった。表の最下行の結果以外は、サイクル長もPIも収束した。

74秒付近と104秒付近のサイクル長が多く得られている。この中からPIを最小にするサイクル長をみると74秒であった。これとは別に、式(1)の確定遅れと式(8)のランダム遅れ(ただし単位はs/台に換算している)の総和を求めサイクル長との関係を求めたのが図-10である。この図から遅れ時間を最小にするサイクル長として67秒が得られる。GAで求めたサイクル長はほぼこれに近く、一応最適サイクル長に近い解が得られたものと判断される。

(2) 多段階反復計算

第1段階のGA計算のみでは、オフセットの精度は十分ではない。したがって、ここではGA計算を第4段階まで実行して評価指標PIの改善度合いをみた。その結果を図-11に示す。この図では、GA計算を各段階とも10回反復し、得られたPIを10個ずつプロットしている。各段階では、前段階で得られた10個のPIのうち、最小のPIに対応する

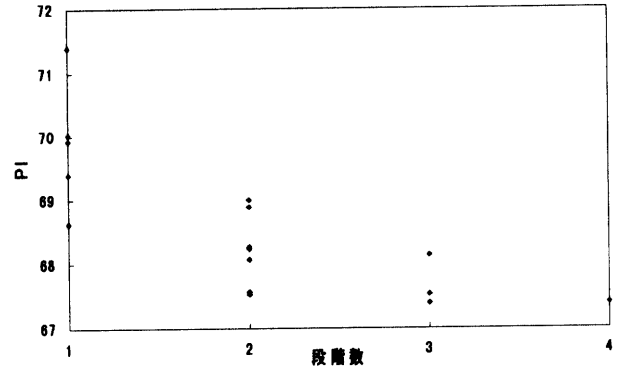


図-11 多段階反復計算によるPIの分布

表-2 GAと反復計算法の比較

手法	初期オフセット	サイクル長	オフセット	PI
GA		74	25 6 26 0 27	67.4
勾配法	下り優先	74	24 40 27 44 27	70.1
	平等	74	25 25 25 0 26	70.4
	上り優先	74	25 11 22 8 22	71.5
	同時式	74	0 0 26 0 27	83.9
	ランダム	74	48 3 24 45 23	84.3

オフセットを採用し、それを中心としてオフセットの精度向上のためのGA計算をさらに10回行う。第1段階から第4段階へ進むにつれてPIの分布幅が縮小しかつ小さくなって解の改善効果が発揮されていることがわかる。

(3) GAの計算効率

GAの計算効率を評価するためにGAと勾配法による最適化の結果を比較する。それを表-2に示す。計算条件は、 $p_m = 0.5\%$ とするが、それ以外は前節6(1)と同じである。GAは第4段階まで計算した結果である。勾配法のサイクル長はGAの結果である74秒を用いて、オフセットのみを最適化した。その場合初期オフセットとして5つのオフセットを用いた。その結果、最もよい解を得たのはGAであった。なお初期オフセットとして用いた平等オフセットは高田の方法⁹⁾をサブルーチン化して求めた。

なお勾配法は、評価関数をfとしたとき、最適オフセットの第k近似値 u_k は、式(11)に示すように、第(k-1)番目近似値における勾配 s_{k-1} を探索方向として α の1次元探索を行うという計算を反復する計算法である。勾配法としては、共役勾配法のFR法によつて求めた。

$$u_k = f(u_{k-1} - \alpha s_{k-1}) \tag{11}$$

FR法による計算では、TRANSYTによるPIの計

算回数は205回であった。サイクル長を2秒きざみで50通りについて計算すると仮定すると、総計算回数は10250回となる。それに対してGAの場合は、個体数30、世代数10、計算回数10を4段階反復すると仮定して、総計算回数は12000回となり、計算効率ほぼ同一である。

7. まとめ

本研究では系統交通信号の共通サイクル長に着目し、GAを適用してその最適化を行い、主としてGAの適用性について検討した。共通サイクルを求めるためにはオフセットの最適化を前提とするため、サイクル長とオフセットの同時最適化を行った。GAの遺伝子表現では、1つの相対オフセットにつき2進数3桁、共通サイクル長は6桁で表現した。評価指標は遅れと停止の加重和とし、TRANSYT交通流モデルで求めた。GAの計算例から、越理論の仮定を設定すれば、GAによって越の理論解が得られることが確認できた。また現実的な道路交通条件および信号条件の下でもよい解が得られた。解の精度もGAの多段階反復計算によってほぼ満足できるものが得られたと考えられる。計算効率については、勾配法の中のFR法とほぼ同程度であり、しかもFR法よりもよい解が得られた。

本研究では、計算例がまだ限られており、明確に結論づけるためにはなお検討が必要であるが、少なくともGAの適用法次第では有望な手法になるものと考えられる。今後の課題としては、さらに多くの計算例を通して、共通サイクル長と道路交通条件との関係を明確にし、さらには共通サイクル長の決定法を確立することが必要である。

参考文献

- 1) 越正毅：系統交通信号におけるサイクル制御の研究，土木学会論文報告集，No.241，pp.125-133，1975年
- 2) 李光勲，池之上慶一郎：系統交通信号における遅れの特性と最適サイクル長に関する研究，交通工学，Vol.27，No.4，pp.9-20，1992年
- 3) 久井守，清水紀子：リンク長のばらつきを考慮した系統信号サイクルと平均遅れの関係，第16回交通工学研究発表会論文報告集，pp.17-20，1996年
- 4) 高田弘，栗本譲：系統信号方式による街路交通制御に関する一考察，土木学会論文集，No.124，pp.11-20，1965年
- 5) D.I.Robertson：TRANSYT：A Traffic Network Study Tool，RRL Report LR 253，1969年
- 6) 織田，津久家，音喜多，増山：遺伝的アルゴリズムによる信号制御パラメータ最適化，第14回交通工学研究発表会論文報告集，pp.1-4，1994年
- 7) G.Q.Memon and A.G.R.Bullen：Multivariate Optimization Strategies for Real-Time Traffic Control Signals，Transportation Research Record 1554，pp.36-42，1996年
- 8) 河村圭，久井守，高橋昌之：GAの系統信号制御最適化への適用性，第15回交通工学研究発表会論文報告集，pp.89-92，1995年
- 9) 蒲田，有村，田村，樹谷，斉藤：GAを用いた複数モードのスケジューリング，土木計画学研究・論文集，No.13，pp.821-826，1996年

A Study on Common Cycle Length of Coordinated Signal System through Genetic Algorithm

Masakazu ODAWARA, Mamoru HISAI

In this paper, the common cycle length of coordinated signal system was optimized by using Genetic Algorithm and the applicability of GA was examined. The offsets were also optimized simultaneously. The genes of one relative offset were expressed by 3 bit and a common cycle length 6 bit. The objective function, a weighed sum of delay and stops, was evaluated by TRANSYT traffic flow model. From some numerical examples, it is found that theoretical solutions can be obtained and that under the realistic conditions good solutions can be obtained. The accuracy of solutions and computation efficiency were roughly satisfactory.