3302 GAにおける種々の工夫

Several Innovations in Application of GA

正 杉本博之(北海学園大学) Lu Bianli(シーイーサービス)

Hiroyuki SUGIMOTO, Hokkaigakuen University, S26/W11, Chuuou-ku, Sapporo
Lu BIANLI, C.E.Service Co. Ltd., Nishioka 2-8-5-27, Toyohira-ku, Sapporo

Genetic Algorithm consisted of three genetic operators, ~reproduction, crossover and mutation~, is called simple GA. Simple GA may be applied to many optimization problem which includes discrete variables or/and functions, but sometimes it does not work well. This paper explains the several innovations that were proposed to improve the reliability and efficiency of simple GA. They are growth operator for combinatorial problem, column remedy of missing bits for also combinatorial problem, big mutation for both of combinatorial and scheduling problem, coding method for the problem that includes both of the combinatorial and the scheduling problem, and also coding method for the scheduling problem in which the preceding operations are included.

Key Words: GA, Growth Operator, Missing Gene, Big Mutation, Mix Problem, Constrained Scheduling Problem

1. まえがき

「繁殖・淘汰」,「交叉」,および「突然変異」の3オペレータから構成されるGAを単純GAと呼ぶ。GAが日本の工学分野に紹介された¹⁾のは,この単純GAであったので,離散的な問題として解決が難しかったトラス構造物の設計²⁾を例に取り種々応用が試みられた。結果は惨憺たるものであった³⁾。

結果が良くならない内容を分析すると,線列(string)の多様性が大きすぎて,生物進化との相似性が保たれていないことだろうということになった。そのために「成長」という概念が導入された。

GAにおける種々の工夫の中には,上記の「成長」のように計算効率と信頼性(より良い解が,より高い確率で得られる)の向上のためのものがまずある。それらの中で,「成長」,「消失ビットの解消」および「大変異」について説明する。

GAはきわめて適応性が高く多くの問題に適用可能という側面がある。どんな問題でも力づくで定式化すれば,それはそれ自身で可能ということになる。しかし,その結果むやみに致死遺伝子(実現不可能な設計に翻訳される線列)がでることになり実質的に適応不適ということになる。このためには,コーディング,デコーディングが重要になる。比較的成功した例として,「組合せ問題とスケジューリング問題の混合問題」と「選択的スケジューリング問題」におけるコーディングの例を紹介する。

2. 成長^{4) 5) 6)}

単純GAは,前述のように,繁殖,淘汰,交叉,および突然変異の3つのオペレータから構成される。一連の研究においても,当初は,これらの3つを基本とし,線列のコーディング法,交叉法に種々の検討を加えて離散的最適化問題への応用を試みた。しかし,比較的簡単な問題でも,なかなか安定的に良い答が得られなかった。

GAにおいては,線列の多様性が,良好な設計を安定的に得るために必須の条件であるが,単純GAのみの考え方では,線列の多様性が余りにランダム過ぎて,良い設計を生成しなかったと考えられた。

一方,一般の構造設計においては,その設計に関する蓄積された知識ベースがある場合が多い。局部的に有効という意味でローカルルールということもある。GAの応用に際しては,知識ベースとの結合の必要性も指摘されているが,本研究におい

ても,容易に利用できる知識を用いて繁殖・淘汰の前に線列にある確率で改良し,改良後に繁殖・淘汰する方法を検討しGAの信頼性の向上を図ることを試みた。

改良の具体的な手続きは,設計問題に依存するものであるが,その基本的な概念は,各線列を,ローカルルールを用い,明らかに良くなるという方向に改良することにより線列の多様性の質を向上させようとするものである。この改良の手続きを,生命体の営みと対照させると,生物の1世代間の成長に近い概念であるため,この手続きを総称して「成長オペレータ」と呼ぶことにした。

例えばトラス構造物等の骨組構造物であれば,以下のような手続きが考えられる。

- ①余裕があり過ぎる構造物の贅肉を落とす: 応力の制約条件に対して余裕のある部材のみ,そのランクを,制約条件ぎりぎり満足するランクまで下げる。
- ②危険な構造物を安全にする: 応力の制約条件を満足しない部材のみ,そのランクを満足するランクまで上げる。
- ③何も改良しない。

各線列毎に,上記の①,②,③の手続きを,それぞれ1/3の確率で選択して改良が実行される。

この成長オペレータは,獲得形質が遺伝するという観点からはラマルキズムにより,また,突然変異に方向性を与えるという観点からは,今西進化論により,その生物学的な説明がなされるものである。

成長オペレータにより改良された線列は,バイナリーに変換されGAのプロセスの中に戻されることにより周辺に影響を及ぼすことになる。

GAの計算には,いくつかのパラメータがある。コーディング法(バイナリィ,グレイ),人口サイズ,ランダムシース,外点罰金関数の罰金係数,交叉確率,突然変位確率等である。単純GAではこれらのパラメータの選択は大きな影響を与えるが,成長オペレータを用いると,これらのパラメータの選択はほとんど影響を与えなくなる⁷⁾。成長オペレータの卓越した効果を示しているものと思われる。

3. 消失ビット⁸⁾

GAのプロセスを詳細に観察すると,少なくない頻度で,線列集団の特定のビットの位置の値が総て0か1になる現象が見られる。これを,「消失ビット」と呼ぶ。0であれば1が,1で

および MBL (Missing bits in lower figures) と略する。

Table 1 Example of strings with missing gene

Design Variable	l_1					l_2					l_3					l_4				
Figure	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
string-①	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
string-②	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
string-③	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
string-④	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
		↑					↑	↑				↑	↑				↑	↑	↑	
Schemata	*	1	*	*	*	0	1	*	*	*	0	0	*	*	*	1	1	*	0	*

Table 2 Schemata and effect of missing gene

Design Variable	Schemata	Range of values	Missing values
l_1	* 1 * * *	8-15, 24-31	0-7, 16-23
l_2	0 1 * * *	8-15	0-7, 16-31
l_3	0 0 * * *	0-7	8-31
l_4	1 1 * 0 *	24, 25, 28, 29	0-23, 26, 27, 30, 31

れば 0 が、線列集団の特定の列から失われているからである。

GA のプロセスは、繁殖・淘汰と交叉および突然変異を基本としているが、前 2 者では、消失ビットは解消されない。それらの処理によっては、線列内部のビットの位置関係はまったく変わらないからである。突然変異によって、わずかに解消され得るが、突然変異の確率は一般に低く設定されており、更に特定の位置の消失ビットが解消される可能性は極めて少ない。

消失ビットは、最適な設計が存在する範囲を、当初の範囲から特定の範囲に狭める効果がある。それ自身は受け入れるべきものと考えられるが、実際の現象を観察すると、必ずしも（準）最適設計が存在する範囲に困っている場合のみではなく、また世代（繰り返し回数）のかなり早期から発生していることもある。上記のように、一度現れると、最後まで解消されない状態と考えるべきであるので、状況に応じては強制的に解消されなければならない現象と考えた。

消失ビットの例を Table 1 に示した。この例では、人口サイズは 4、設計変数の数は 4 である。各設計変数は、それぞれ 32 の候補の中から選ばれることとして、5 桁で表現されている。桁の欄の 1 は最上位桁を表し、5 は最下位の桁を表す。表中↑で示された桁が消失ビットである。例えば、設計変数 1 の 2 桁目はすべての線列で 1 となっており、0 が消えている。あるいは、設計変数 4 の 4 桁目はすべての線列で 0 となっており、1 が消えている。GA の手続きの繁殖・淘汰、あるいは交叉では、これらの桁の位置関係は変わらない。また、突然変異の確率は低く、特定の桁（例えば設計変数 1 の 2 桁目）が選ばれる可能性は極めて少ない。よって、一度失われた値がその列に復活することはほとんどない。

Table 1 には、各設計変数のスキーマを示している。これらより、消失ビットが出た場合の各設計変数の取り得る値の範囲は、Table 2 のように限定される。

消失ビットの出方は 2 種類あり、Table 1 の例では、設計変数 2 あるいは設計変数 3 のように、最上位の桁から現れる場合と、設計変数 1 あるいは設計変数 4 の 4 桁目のように、一つ前の桁に消失ビットはなく、途中から現れる場合とがある。前者を上位桁の消失ビット、後者を下位桁の消失ビットと呼ぶことにし、それぞれ、MBH (Missing bits in higher figures)、

Fig.1 Mutation and Big Mutation

Table 2 に示すように、MBL を含む場合の設計変数の取り得る値の範囲は分離された空間となるのに対し、MBH を含む場合は、当初の設計空間を単一の領域に狭めることになっている。

上で説明した消失ビットは、最適化の過程における何らかの情報と考えることもできるが、GA の手続きの過程での好ましくない、あるいは早過ぎる領域の限定とも考えられる。特に分離された空間の設定は、不自然であり、解消された方がより良い設計が得られると考えられる。また、世代の初期に現れる消失ビットは、解消された方が選択の幅を広めるという意味で好ましいし、世代の後期では、何らかの情報と考えるべきであるの。

で、収束性からもそれ程解消する必要はないと考えられる。これらの考察により、MBL に対しては高い確率で、MBH に対しては相対的に低い確率で、また、早い世代では高い確率で、遅い世代では低い確率で消失ビットを解消する方法が提案され、数値計算例で、特に人口サイズが少ない場合に有効性が示されている⁸⁾。

4. 大変異⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

GA では、突然変異の確率を高くするとランダムサーチと変わらなくなるので、一般に 1% 前後の低い値が設定される。しかし、世代が進むに従い、集団中の線列が似てくる。そのため、時には初期収束が起これ、予想(期待)とは程遠い設計に収束してしまうことになる。それで、適当な世代間隔で、あるいはあらかじめ設定した条件が現れたら、高い確率の突然変異（例えば 50%）を導入することにした。これを「大変異」という。

大変異の導入は Fig. 1 に示されている。毎世代に 5% の常時突然変異を行うとともに、あらかじめ設定している判定条件に基づく初期収束が検出されたら（適当な世代間隔の場合もある）高い確率の突然変異（大変異）が導入されている。

5. 組合せ問題とスケジューリング問題の混合問題

ライフラインには、上・下水道、ガス、通信、あるいは道路等の交通施設があるが、それらが地震等の自然災害を受ける場合、1 種類の被害に限定されることは考えられず、複数のライフラインが同時に被害を受けると考えられる。それらの被害の

復旧工事は、同時に着工できるものと、時間的に階層関係にあり、一つが処理できないと次の段階に進めないという場合がある。後者の状況を被害の時間的階層性とよぶことにする。例えば、下水道と道路が同時に被害を受けている場合、道路が開通しなければ下水道の被災箇所へ到達できないとか、あるいは、道路網だけの復旧工事を考えても、道路本体自身の被害と、周辺の構造物等が道路上に倒壊しその撤去が必要な場合などは、担当する復旧班の性格もおおのずと異なり、道路上の遮蔽物を撤去しなければ道路本体自身の復旧作業は出来ない等である。

これらの問題は、時間的な階層性を考慮しなくとも、組合せ問題とスケジューリング問題の混合問題になる。

記号を使って表現すると、以下のように定義される。

ある地域に災害が発生し、その地域の1つあるいは複数のライフラインに、N層の時間的階層関係のある被害が、各層毎に n_i ($i=1-N$) 件発生した。この被害を復旧するために、各層の被害内容に対応するN種類の復旧班が活動可能であり、それぞれ m_i ($i=1-N$) 班待機している。これらの復旧箇所と復旧班を、

$$\left. \begin{array}{ll} D_j^i (\text{復旧箇所}) & : j=1 \sim n_i \\ R_k^i (\text{復旧班}) & : k=1 \sim m_i \end{array} \right\} i=1 \sim N \quad (1)$$

とすると、決めるべきことは、時間的階層性を考慮した上で、 D_j^i ($j=1 \sim n_i, i=1 \sim N$) をどのような順に手をつけるかということと、それらを R_k^i ($k=1 \sim m_i, i=1 \sim N$) にどのように配分するかということになる。

この最適順序、最適配分の問題には、その善し悪しを評価する目的関数が必要となるが、ここでは、単に復旧内容を評価する目的関数Fがあるとし、それを最小あるいは最大にするように、式(1)の復旧箇所の着工順序と復旧班の配置が決められるとする。

GA は、組合せ問題およびスケジューリング問題にそれぞれ対応して応用されその有効性を示してきたが、上記の問題のようにスケジューリング問題と組合せ問題(配分問題)が混在する場合にも、コーディングおよび交叉法を工夫することにより比較的容易に応用できる。

この問題は、N種類の被災内容を持ち、それぞれ n_i ($i=1-N$) 箇所の被災箇所と m_i ($i=1-N$) の対応する復旧班がある。そこで、GAの線列をまずN個のブロックに分け、各ブロック内でそれぞれ前半に工事順位を10進数で、後半に復旧班の担当工事箇所を2進数でコーディングすることにする。1ブロックの線列全体の概念をTable 3に示した。

前半に工事の順番が10進数で表示され、後半に工事の担当班がバイナリで表現される。

例えば、復旧箇所が9、復旧班が4の問題で次のような線列が得られれば、

[8 3 9 1 2 5 6 7 4 | 11 00 11 00 01 00 11 01 10]

後半部分は次のように10進数に変換され、

[8 3 9 1 2 5 6 7 4 | 4 1 4 1 2 1 4 2 3]

各班の担当工事と順番は、Table 4のようにデコードされる。

以上のようなコーディング法により、時間的階層性がある問題の復旧工事の順序と、担当復旧班の決定が同時にできることになる。

次に交叉法であるが、スケジューリング問題と組合せ問題が混在しているので、各設計変数のグループ毎に交叉する多点交叉法を用いることになる¹²⁾。

この問題にさらに復旧班の協力関係をコーディングした研究が発表されている¹³⁾。

Table 3 Coding concepts for mix problem

Operation order						Working crew					
1	2	...	i	...	n	1	2	...	j	...	m
p_1	p_2	...	p_i	...	p_n	q_1	q_2	...	q_j	...	q_m

p_i : i-th operation, q_j : crew for j operation

Table 4 Operations and order of each crew

crew	operation order
1	2→6→4
2	8→5
3	9
4	3→1→7

6. 選択的スケジューリング問題¹⁴⁾

土木事業における多くの建設工事は、多数の工事要素からなるのが一般的である。それらの工事要素の総てあるいは一部の間には、何らかの順序関係があり、全体の工事計画の策定においては、その順序関係を守ることが要求される。例えば、B工事の前にはA工事が完了していなければならないとか、C工事の前には、D、E、Fの工事が完了する必要がある等々である。このような問題には、ネットワークの考え方が適用され、PER (programming evaluation and review technique) などが利用される。

しかし、例えば公共事業における中長期整備計画のように、一つの建設工事のみを対象にするのではなく、同時に進行する多数の工事の事業計画を、限られた予算の中で策定しなければならないことも多くある。その時、全体の工事計画の早期完了を一つの目標として考慮しながら、適正な予算の配分により最大のメリットを受益者(例えば住民)に与えるような事業計画が望ましいのは言うまでもないことである。

この問題は、「個々の事案において工事要素間の順序関係を守りながら、同時に進行する多数の工事要素の事業計画を、与えられた制約条件のもとで、与えられた目的関数を最大(最小)にするように決定する問題」として整理される。具体的には、ある地域における複数の橋梁の建設計画とか、ある道路ネットワーク上の多数の橋梁の維持・補修計画とかが対応する。

説明のための例題として、Fig.2にアロー・ダイアグラムを、Table 5に先行工事の関係と工事要素の通し番号を示した。これらに示された工事要素の前後関係は必ず守らなければならない、工事期間、工事予算の制約の下で与えられた目的関数を最小(最大)にするように工事計画が決定される。

これは、一見大変複雑な問題に見えるが、スケジューリング問題におけるGAの交叉法が有する特性と、コーディング法を工夫すると、きわめて簡単に定式化される。

つまり、

「ある順序関係が初期に総ての線列に組み込まれていれば、その順序関係は交叉を繰り返しても崩れることはなく、逆に1つでも順序関係が守られていなければ、交叉を繰り返す過程でその順序関係は崩される。」という特性である。

ここで、交叉法は、スケジューリング問題のための総ての交叉法ではなく、ある特定の交叉法に限られる¹⁴⁾。

この結果、初期線列の生成が重要になってくる。総ての線列において、先行工事の関係は守らなければならない。文献14)にその初期線列の生成法が説明されている。

次ページの線列, および Table 6 は, 初期線列の一例, およ
び工事要素の着工順と各年度の予算を想定した場合の各年度
に割り振られる工事要素を示している.

Fig.2 Arrow diagrams of each project

Table 5 Preceding operations and serial numbers

Project	Number	Operation	Preceding operation
1	1	a ₁₁	
	2	a ₂₁	
	3	a ₃₁	
	4	a ₄₁	
	5	a ₅₁	a ₁₁
	6	a ₆₁	a ₃₁
	7	a ₇₁	a ₄₁ a ₆₁
	8	a ₈₁	a ₂₁ a ₅₁ a ₆₁
	9	a ₉₁	a ₇₁ a ₈₁
2	10	a ₁₂	
	11	a ₂₂	a ₁₂
	12	a ₃₂	
	13	a ₄₂	a ₃₂
	14	a ₅₂	a ₁₂ a ₃₂
	15	a ₆₂	a ₂₂ a ₄₂ a ₅₂
	16	a ₇₂	a ₂₂
	17	a ₈₂	a ₆₂ a ₇₂

Table 6 Applications of operations to each year

Year	1	2	3	4	5
project-1	a ₄₁	a ₃₁	a ₂₁ a ₆₁	a ₁₁ a ₇₁ a ₅₁ a ₈₁	a ₉₁
project-2	a ₁₂ a ₃₂	a ₂₂ a ₄₂	a ₇₂ a ₅₂	a ₆₂	a ₈₂

[10 12 4 | 11 13 3 | 2 6 16 14 | 1 7 15 5 8 | 17 9]

この場合, 突然変異は, 一般に順序関係を崩す形で用いられ
る. 上記の問題では, どのような場合でも順序関係が崩される
ことは好ましくないで, 突然変異は用いないことになる. そ
の代わり, 交叉確率を通常の値 (60%程度) よりも大きい値に
設定し突然変異の役割の一部を負わせることにする.

参考文献

- 1) 和田健之助: 遺伝的アルゴリズム, 構造設計における最適化システム技術委員会第8回定例会資料, 1991, 7.
- 2) 杉本博之: 近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究, 土木学会論文集, No. 432/I-16, pp. 79-88, 1991, 7.
- 3) Lu Bianli・杉本博之・山本洋敬: 遺伝的アルゴリズムの応用に関する基礎的研究, 第2回システム最適化に関する講演論文集, pp. 181-186, 1991, 11.
- 4) 杉本博之・Lu Bianli: トラス構造物の離散的最適化問題へのGAの応用に関する基礎的研究, 計測自動制御学会 第10回システム工学部会研究会資料, pp.103-110, 1992, 2.
- 5) 杉本博之: GAの工業設計への応用に向けて, 数理科学 11, pp.45-50, 1992, 11.
- 6) 杉本博之・Lu Bianli・山本洋敬: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, no.471/I-24, pp.67-76, 1993, 7.
- 7) Lu Bianli・杉本博之: GAにおけるパラメータの効果に関する研究, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.619-626, 1995, 3.
- 8) 杉本博之・Lu Bianli・片桐彰憲: 消失ビットの解消によるGAの性能向上に関する研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.365-372, 1996, 3.
- 9) 杉本博之・上前孝之・田村亨: GAの道路補修, 建設工事の順序決定問題への応用, 計測自動制御学会 第11回システム工学部会研究会資料, pp.81-87, 1993, 2.
- 10) 田村亨・杉本博之・上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への応用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994, 1.
- 11) Lu Bianli・久保洋・杉本博之: GAによる複合体の最適材料選択に関する研究, 日本機械学会論文集, (A 編), 61 巻 584 号 1995, 4.
- 12) 杉本博之・片桐彰憲・田村亨・Lu Bianli: GAによるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.517-524, 1997, 3.
- 13) 杉本博之・田村亨・有村幹治・斎藤和夫: 復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.135-148, 1999, 7.
- 14) 古田均・杉本博之・井上泰具・横田哲也・廣瀬彰則・中谷武弘: 中長期事業計画問題へのGAの応用, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.497-502, 1998, 3.