改良型免疫アルゴリズムの提案と評価*

金 井 亮^{*1}, 尾 田 十 八^{*2}

Proposal and Evaluation of Improved Immune Algorithm

Ryo KANAI^{*3} and Juhachi ODA^{*3} Department of Human and Mechanical Engineering, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

The Immune Algorithm (IA), which is optimum method based the human immune system, is suitable for gaining several solutions at once. This method is similar to Genetic Algorithms (GA), and is hoped to be able to use several local rules of GA. On the other hands, IA may have the demerit that is hard to deal with many parameters. In this paper, we suggest the improved Immune Algorithm. This method is improved by review of Immune System, and uses both secondary response and response control by endocrine system. It's hoped that new added functions affect searching ability. Additionally, the effect may be able to cut one of complex parameters. This method is applied to some simple problems that search the extremum in the functions and traveling salesman problem. As the results, it's able to control one of parameters depending on the searching situation and suggested the potential of cutting parameter. The validity of this method is checked.

Key Words: Optimum Design, Immune System, Immune Algorithm, Meta-Heuristics

1. 緒 言

組み合わせ最適化問題では、問題の規模に応じて探索領域、組み合わせ数が指数関数的に増大する。その結果、解が実用に耐えうる時間内に得られないどころか、十分な解を得ることができないことも多い。このような最適化問題の解法として、遺伝的アルゴリズム等のメタヒューリスティックが盛んに用いられている。その理由としては、主に以下の特徴が挙げられる。

- (1) 多点同時探索
- (2) 定式化が不要
- (3) 感度情報が不要

特に(2), (3)の利点から、容易に広範囲な問題に適用可能であり、現在ジョブショップスケジューリング問題、トラベリングセールスマン問題をはじめとする組み合わせ最適化問題等に利用されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしその一方で手法そのものの容易さから、他の手法の方が有効であるような問題にも用いられている。特に遺伝的アルゴリズムのデメリットとして、以下の特徴が挙げられる。

- (1) 評価回数が膨大
- (2) 最適性の保証がない

これから、一回の評価に時間がかかるもの、特に感度が計算でき、評価回数の減少を図れる問題に関しては解くことは可能であるが、有効性は著しく減少する。

以上の状況下において、新しい最適化手法の提案やローカルルールの研究もされている⁽³⁾⁽⁴⁾。その中の1つに、人の免疫機構をアナロジーして複数の解候補を得ようとする免疫アルゴリズムが森らによって提案され⁽⁵⁾⁽⁶⁾、現在も研究されている⁽⁷⁾。

この手法は探索手段が異なるものの、変数の扱い方や探索点の生成法が遺伝的アルゴリズムと似ている。そのため、遺伝的アルゴリズムに用いられた有効なローカルルールがそのまま免疫アルゴリズムに利用できることが期待される。その一方、類似した性質に基づくデメリットも有してしまうと考えられる。例えば遺伝的アルゴリズムはパラメータ調整が経験則に因る上に、問題への依存性も有している⁽⁸⁾。免疫アルゴリズムでは遺伝的アルゴリズムと比較してパラメータ数が増加しており、それらがほぼ全て、探索に影響を及ぼしている。そのため、遺伝的アルゴリズムよりも調整が困難となる。

* 原稿受付 2006年9月7日。

^{*1} 正員、金沢大学工学部(〒920-1192 金沢市角間町)。^{*2} 正員、フェロー、金沢大学工学部。

E-mail: ryo-k@t.kanazawa-u.ac.jp

本研究では、近年の研究で明らかになった免疫機構に着目し、探索挙動を変更して探索効率向上を図ると共に、複雑化するパラメータ調整への対策を講じる。具体的には従来のGAのようにパラメータ設定にある程度の指針を立てると言う形ではなく、パラメータの減少、もしくはパラメータ値に対してロバスト性を有するような機能のブラックボックスをアルゴリズム内に設ける形で行う。これらにより、パラメータ調整の手間が少ない探索効率の向上した改良型免疫アルゴリズムを提案することを目的とする。

2. 免疫機構

この章では本論文で用いる免疫応答や、それに関連する近年明らかになった免疫機構について簡単に説明する。

2.1 脊椎動物の免疫応答 免疫応答とは、生体内に侵入する異物(以下抗原)に対して対応する生体防御反応である⁽⁴⁾。その反応を担う細胞により、自然免疫系、適応免疫系と分かれている。この適応免疫系が脊椎動物特有の反応であり、その特徴として2段階の応答となっている点が挙げられる。

最初の抗原刺激の際に発生する応答が一次応答であり、二次刺激以降に発生するのが二次応答である。一次応答では細胞毒性により抗体産生を行うことで抗原を排除し、その抗原に有効な抗体の情報を記憶細胞に分化することで免疫記憶を獲得する。これを免疫学的記憶という。それに対し、一次応答によって免疫記憶の獲得後、再びその種の抗原に感染した場合に二次応答が発生する。この応答では、記憶細胞からの抗体産生を急激に行うことにより、抗原を速やかに排除する。その際の急激に抗体の濃度が上昇する現象をブースター効果という。

2.2 免疫応答の制御 近年の研究報告より、神経系・内分泌系は各種ストレスを起因として免疫機能を調節することが明らかとなった。具体的には、精神的・身体的ストレスは視床下部に影響し、コルチコトロピン放出ホルモン(CRH)を放出させる。これが下垂体からの副腎皮質刺激ホルモン(ACTH)分泌、さらには副腎皮質からのグルココルチコイド(Gc)分泌を促すことにより、免疫制御を引き起こしている。

3. 改良型免疫アルゴリズム

この章では前章で述べた免疫機構の特徴を基に、新たな改良型免疫アルゴリズムを提案し、それについて説明する。

3.1 二次応答 2.1 で述べた適応免疫系における免疫学的記憶、一次応答は従来のIAの根本をなす機構であ

る。その一方、二次応答は一回の試行内には用いられておらず、従来のIAでの扱いは、以前解いた類似問題に対して用いると言う形になっている。二次応答を用いた他の研究⁽¹²⁾もあるが、本研究ではこれを以下のように用いることを考える。

まず、IAにおける一次応答、二次応答の定義について考える。本来一次応答では抗原排除可能な抗体を産生することが可能である。その場合抗原排除可能な抗体は大域的最適解となるが、最適性原理や感度計算を用いていないため、本来の免疫細胞へと分化するまでの探索過程を一次応答とする。

一方、一次応答との対比を考慮すると、二次応答は記憶細胞から抗体を産生させる過程と考えられる。免疫応答では速やかに抗原を排除させるため大量の抗体が産生されるが、IAとしての二次応答ではどのように定義し、どのような形で抗体を産生するか問題となる。

本手法では、記憶細胞から更なる解を得るべく、記憶細胞近傍に探索点を生成させることとした。その際の近傍とは、具体的には自己・非自己を認識する閾値から決定し、生成された抗体は、元の記憶細胞から自己として認識される。また、探索が進むにつれて記憶細胞は複数分化するため、新たに産生する抗体数に何らかのルールを設けなければならない。そこで、記憶細胞間の類似性からその細胞が持つ特異性を判別し、その密度に応じて発生させることとした(図1参照)。

3.2 内分泌系の応答制御 前節の二次応答は探索挙動の効率化を図るためのものである。その一方、この応答制御は複雑化するパラメータ調整への対策として用いることとした。

外部刺激に対して免疫応答制御を引き起こしているが、この反応を用いてパラメータの削減を図る。具体的には探索過程を外部刺激としてIAパラメータを状況に応じて制御させる。ここでどのパラメータを制御することにより削減対象とするかは、本報では自己抑制に関するパラメータである閾値を制御することとした。

Fig.1 Antigen presentation from memory cell

次にIAにおける外部刺激の定義、および制御方法であるが、二次応答の機能を考慮して以下のようにする。

- ・記憶細胞への分化がない期間、すなわち二次応答の継続期間を外部刺激とする。
- ・その刺激量に応じて閾値を次式のように変化させる。

$$s = s_0 \left\{ 1 + \cos \left(\frac{t}{t_{end}} \pi \right) \right\} \quad \cdots(1)$$

ここで、 s は閾値、 s_0 は基本閾値、 t は二次応答継続期間、 t_{end} は収束条件としている。通常、閾値は0.5前後の値を取ることが多い。このことから、式(1)により、抗体群は二次応答直後には記憶細胞周辺の探索を行い、徐々に領域全体へと広がり、最終的にはランダム探索をするようになる。

3.3 提案するアルゴリズム 前節までに述べた免疫機能を用いた処理である二次応答と内分泌系による制御を従来のIAに用いる。具体的には二次応答内に内分泌系の処理を加える。そのため、本研究で提案する改良型免疫アルゴリズムは図2のようなフローチャートで示される。

この手法は次のような特徴が挙げられる。

- ・一世代で複数の記憶細胞への分化が可能である。
- ・二次応答で記憶細胞周辺の探索を充分に行う。
- ・収束判定が近くなると探索点が拡散し、新たな解候補を得ようとする。
- ・パラメータの省略が可能。

図中薄墨で塗りつぶしてある処理が本手法での改良点となる。

Fig.2 Flow chart of IA

4. 数値計算例

前章で提案した手法を簡単な計算問題へと適用し、新たに加えた機能が意図したように作用しているか否かを確認する。

4.1 最大値探索問題 まず、以下のような2変数最大値探索問題に提案手法を適用し、追加した機能の効果を確認する。

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^2 [i \cos((i+1)x + i)] \sum_{j=1}^2 [j \cos((j+1)y + j)] \rightarrow \text{Max} \quad \cdots(2)$$

$$\text{subject to } -3.5 \leq x, y \leq 0 \quad \cdots(3)$$

この関数 f の x - y 平面上での形状を図3に示す。A点〜E点が局所解となり、最大値はA点である。この問題に対し、改良型IAのパラメータとして、抗体数は100、記憶細胞数は20、遺伝子長34bit、交叉率60%、突然変異率1.0%とした。また、遺伝子のコーディング方法は次式のようにした。

$$\left. \begin{aligned} x &= -3.5 \times \sum_{i=1}^{17} \frac{a_i \cdot 2^{17-i}}{2^{17}-1} \\ y &= -3.5 \times \sum_{i=18}^{34} \frac{a_i \cdot 2^{34-i}}{2^{17}-1} \end{aligned} \right\} \quad \cdots(4)$$

このコーディングはすべての実数値計算例で値域や遺伝子長を変更して同様に用いる。

収束条件は200世代記憶細胞が更新されない場合は解が収束したとみなし、探索を終了する。この問題においては、短い期間での解更新がない場合に収束したと見なせると考えられる。しかし、ここではその収束性の傾向を確認する意味で収束条件を長くしている。

免疫アルゴリズムの利点として、複数の解が得られることが挙げられるが、今回提案した改良型手法でその点を確認する。

Fig.3 Contour drawing and local solution

20回の試行を行った結果、全ての探索において、大域的
最大値を含む局値を全て記憶細胞に保存していた。特に図3
中E点の関数値は他の局値と異なり、かなり小さい値とな
っている。しかし、記憶細胞への分化時に関数値だけでなく
記憶細胞との類似性をチェックしていることにより、保
存されていたと考えられる。このことから従来の利点を
有していると考えられる。一方で、図4に二次応答の発生
状況や自己抑制の度合いなどを示す。縦軸に抗体群の x 座
標の分散、抗体群の y 座標の分散、二次応答発生、閾値、
抑制力を取り、横軸に世代を取っている。ここで言う抑制
力は各世代において自己抑制により消滅した抗体の割合を
示している。このグラフは先に述べたパラメータを用いた
試行の内の1つを抜き出したものである。

このグラフより明らかなように、「応答直後に徐々に分
散が低くなり、そしてまた高くなる」現象がほぼ全ての応
答で確認できる。また二次応答直後は頻繁に記憶細胞が更
新されて二次応答が発生し、拮がってはまた数度発生する
といった傾向も確認される。

この結果は良好な結果であるが、その閾値の制御式(1)
を用いており、この式が結果に強く影響を及ぼしているこ
とが推察される。また、式(1)の効果として中間期での変化
が急峻になることが挙げられ、二次応答後半で強い自己抑
制が訪れるのではないかと考えられる。そこで、比較的簡
単な関数で構成される次の式(5)を比較対象として用いるこ
ととした。

$$s = 2s_0 \left(a - \frac{t}{t_{end}} \right) \quad \cdots (5)$$

この式(5)は式(1)と異なり傾きが一樣なため、徐々に抑制
が訪れると期待される。

式(5)を用い、先と同条件の下、同様に20回試行を行っ
た。結果としては、式(1)を用いた結果と同様全ての試行で
5つの解を記憶細胞に保存していた。また、二次応答の発生
状況や自己抑制の度合いなどを図5に示す。縦軸と横軸は
先の図4と同様である。この図5からも上述と同様の結果
が得られており、抗体濃度が高まる過程、今回の探索では
特に二次応答発生から50世代での閾値の変化が濃度の变化
よりも小さい限りは、記憶細胞周辺の探索を阻害せず、閾
値を与える関数として充分であると考えられる。

4.2 最小値探索問題 IAの最も大きな利点は複数の
解候補を得ることが可能なことである。4.1の例題でも複
数の解を得ることは確認しているが、より多くの解候補が
ある場合でこの点を確認する。

以下のようなRastrigin関数と呼ばれる n 変数最小値探
索問題に提案手法を適用する。

$$F = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \rightarrow \text{Min} \quad \cdots (6)$$

$$\text{subject to } -5.12 \leq x_i \leq 5.12 \quad \cdots (7)$$

図6にこの関数の $x=x_1, y=x_2$ とした時の鳥瞰図を示す。
この問題に対し、 $n=2, n=20$ として、本手法がどの程度の
解探索能力を有しているかを確認する。

Fig.4 Searching behavior

Fig.5 Searching behavior

4.2.1 2変数 Rastrigin 関数 改良型 IA のパラメータとして、抗体数は100、記憶細胞数は20、遺伝子長34bit、交叉率60%、突然変異率1.0%、基本閾値0.45、閾値を与える関数は式(1)を用い、自己認識閾値0.75とした。20回の試行を行った結果、どの試行でも同じような記憶細胞群を得た。その一例を図7に示す。図からも明らかなように、大域的最小解を含む20種類の解候補を得ている。これは設定した記憶細胞数と同数であり、そのことから従来と同等の利点を有していると考えられる。また、20回の試行における平均評価回数は64,440回となった。

4.2.2 20変数 Rastrigin 関数 改良型 IA のパラメータとして、抗体数は300、記憶細胞数は20、遺伝子長200bit、交叉率60%、突然変異率1.0%、基本閾値0.45、自己認識閾値0.75とした。

結果、最小解近傍($F=2.6555014e-3$)を含む複数解を得ることができた。また、このときの評価回数は838,200となった。最小解近傍であって、厳密解($F=0$)を得られなかった点や、実数値 IA でなく離散値による結果である点を考慮しても充分良好な結果と言える。

Fig.6 Function of Rastrigin ($n=2$)

Fig.7 Result of memory cell ($n=2$)

4.3 巡回セールスマン問題 次に図8に示すような二重同心円上、等間隔に配置された都市群に対し、改良型 IA を適用した。ここで、抗体数は100、記憶細胞数は20、遺伝子長34bit、交叉率60%、突然変異率1.0%、自己認識閾値0.74とした。これを用いて10回の試行を行った結果を図9に示す。

10回中9回の試行で図9(a)に示される最適解(最短ルート)を得ることができた。残る1回の試行で得られた図9(b)の解も交差したルートはなく、局所解の1つと言える。この図9(b)は最適解が2箇所変化したものである。局所解から最適解へと変わるには、評価関数が変化しない中でのルート変更が必要となっている。そのため、二次応答での探索が進まないために最適解が得られなかったと考えられる。

また、比較のため同条件下で通常の IA との比較を行った。今回提案した手法では平均150世代で解を得ることができたのに対し、従来のものでは400世代前後となっている。この点からも明らかなように、従来の IA と比較すると非常に速い速度で探索が行われていることから、大幅な探索効率の上昇を図れたと言える。

5. 結 言

本研究では、近年の研究で明らかになった免疫機構に着目し、探索挙動から探索効率向上と複雑化するパラメータ調整への対策を講じた改良型免疫アルゴリズムを提案し、

Fig.8 City map

(a) global optimum root

(b) local optimum root

Fig.9 Searching result

本手法が従来の IA がもつ複数解探索の能力を有していることはもちろん次の特徴を確認した。

- 1) 二次応答, 内分泌系による応答制御を用いることにより, 探索の効率化を計ると共に, 自己抑制を探索状況に応じて制御することが可能となった。
- 2) 探索状況に応じて閾値を設定できることにより, 基本閾値を固定しパラメータを省略することの可能性を示唆した。

文 献

- (1) Nagahama, H. et al., Application of Genetic Algorithms to Determining Priority of Urban Road Improvement, Proceedings of Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.49, No.4(1994-9), pp768-769.
- (2) Hasegawa, H. and Kawamo, K., A Method for the Shape and Topology Optimization of Mechanical Structures by Using Genetic Algorithm, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.61, No.581(1995), pp183-190.
- (3) Sato, H. et al., A New Generation Alternation Model of Genetic Algorithms and Its Assessment, Transactions of The Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol.12, No.2(1997), pp82-91.
- (4) Arakawa, M. and Hagiwara, I., Development of Adaptive Range Genetic Algorithms, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.63, No.616(1997), pp138-145.
- (5) Ishida, Y. et al., Immune system and the application (in Japanese), (1998), Corona Corporation.
- (6) Toma, N. et al., The Proposal and Evaluation of an Adaptive Memorizing Immune Algorithm with Two Memory Mechanisms, Transactions of The Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol.15, No.6(2000), pp1097-1106.
- (7) Hasegawa, S. et al., An Examination on Jobshop Scheduling Problem in consideration of diversity, Proceedings of the 13th Design & Systems Conference, No.03-27(2003-10), pp136-139.
- (8) Iba, H., Basic of Genetic Algorithms (in Japanese), (1994), Ohmsha.
- (9) Ivan, R. et al., Illustrated immunology (in Japanese), (1990), Nankodo Co.
- (10) Yada, J., Immunology with illustrations (in Japanese), (1990), Medical View Co.
- (11) Kikuchi, K. and Ueda, T. ed., Medical immunology (in Japanese), (2001), Nankodo Co.
- (12) Toma, N. et al., The proposal and Evaluation of an Adaptive Memorizing Immune Algorithm with Two Memory Mechanisms, Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol.15, No.6(2000), pp1097-1106.