免疫的問題空間の分割・統合に基づく最適化システムの提案
A proposal of optimization algorithm with division and integration based on immune cell-cooperation

當間 愛晃 * 遠藤 聡志 ** 山田 孝治 ** 宮城 隼夫 **
Naruaki Toma* Satoshi Endo** Koji Yamada** Hayao Miyagi**

* 琉球大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, University of the Ryukyus.
** 琉球大学 工学部
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus.

Abstract: The objective of this paper is to propose an optimization algorithm based on immune cell-cooperation. In biological immune system, the cell-cooperation is a concept that solves unknown vast antigens by productions of varied specific antibodies through cooperations between mono and/or hetero immune cells. Our algorithm solves combinatorial optimization problems by divisions and integrations adapting the cell-cooperation. Some computer simulations are designed to clarify the basic performances as well as the characteristics and features of the proposed method. We expect that a problem of 'combinatorial explosion' be improved.

キーワード：最適化，免疫システム，細胞間協同作用，分割・統合
Keywords: Optimization, Immune system, cell-cooperation, division-and-integration

1 はじめに

あらゆる工学モデルの基礎である最適化問題は，その探索空間の爆発的拡大という特徴を内包していることから，真の最適解 (大域的最適解) を求めるという厳密解法よりも，高速に近似解を求めるための手法が数多く研究されてきた．なかでも，ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズム (GA) 等に代表される適応的アルゴリズムは，従来の工学的最適化手法にはない生物の優れた情報処理機能に基づいており，その有効性は様々な研究により示されている [Back 97]．

近年，脳神経系，遺伝適応系と並ぶ第三の生体システムとして免疫システムが取り上げられている [Bersini 91, Forrest 90, Ishida 96, Toma 00, 石黒 97, 高橋 98, 森 97]．免疫システムは，多様性のある抗体の産生およびその自己調節機構，抗体の特異性や免疫学的記憶に基づいた一次免疫応答および二次免疫応答などの他の系には見られない様々な高次情報処理機構や未解明な機構を数多く有している．特に，免疫システムはそのシステムの性質上，未知の膨大な抗原に迅速に反応し，抗原排除等の適切な免疫応答を機能することが必須である．免疫システムでは，そのような膨大な抗原に対応するための手段として，複雑なパターンで構成される一つの抗原に対し

- 種類の異なる免疫細胞 (マクロファージ，T 細胞，B 細胞など) による協同作用 (図 1)，
- 同一種の異なるパターンに反応できる細胞群による組み合わせ解決 (図 2)，

を並列・分散して協同させることにより非常に多様な抗体産生を可能としている．ここで，自己体内の外から進入してきた抗原 (または非自己) を認識・識別するために用いられる情報は **MHC** と呼ばれ，その並列性・分散性は細胞間協同作用という処理により実現されている．

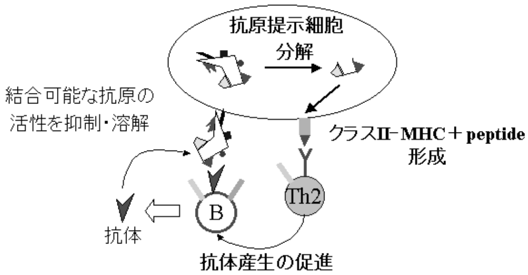


図 1: 細胞間協同作用 (異種間)

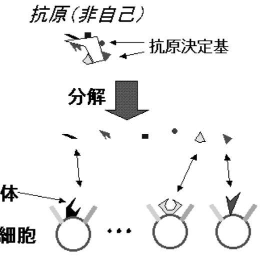


図 2: 細胞間協同作用 (同種間)

本原稿では，冒頭で述べた組み合わせ爆発に対する新たな手法として，免疫システムの自己・非自己認識機構や細胞間協同作用の並列分散処理機能を応用した，探索空間の分割 統合を動的に決定するメカニズムを組み込んだ最適化システムを提案する．また，提案手法の探索動作を検証するため，組み合わせ問題の一例として広く採用されている巡回セールスマン問題 (TSP) へと適用する．免疫システムは，抗原を幾つかの部分情報に分割し抗原提示する，もしくは，もともと抗原の一部分にのみ反応できるような免疫細胞群により認

識され，それら免疫細胞群全体として抗原を処理するようになる．本手法においても，与えられた最適化問題を分割したサブ問題を作成し，それらを解くことができる解の集合を統合することにより元の問題を解く，という枠組みとなっている．このような構成により，組み合わせ爆発（$N!$）における要素数 N を（見かけ上）減じ，高速に近似解を求めることを目指している．

2　提案手法

計算機実験において TSP を扱うため，TSP に適用する際に行った定式化を含めて，本手法のアルゴリズムを示す．

各セールスマンは，（1）巡回経路（= 候補解）と，（2）その巡回経路を評価するための目的関数，（3）巡回経路を分割・統合するための 2 つ情報処理機構，そして（4）突然変異処理，を有し，以下に示すアルゴリズムに従い探索を行う．なお，通常の TSP におけるセールスマンは一人であるが，本手法においては問題を分割し，分割されたサブ問題を一人のセールスマンが巡回するため，複数のセールスマンが同時に存在する．

[**Step1.** 問題および免疫細胞群の定義，初期化] 問題の定式化（都市数，都市配置，目的関数の決定），およびセールスマンの定義（分割処理，統合処理，MHC）を行う．また，初期セールスマン数や都市の MHC 情報はランダムに初期値を決定する．MHC とは各セールスマンの ID であり，各都市がその都市を巡回するセールスマン ID を情報として有する．MHC は，他のセールスマンを認識し，分割・統合する際に参照するために用いる．

[**Step2.** 目的関数計算]　各セールスマンの巡回経路の評価値，およびそれらを統合した全セールスマンの評価値を求める．ここでは，全体の評価値を総和により算出した．

[**Step3.** 分割処理]　各セールスマンは現在の巡回経路に対し分割処理を試し，分割後の二つの巡回経路を求める．分割した結果，元の評価値よりも分割後の二つの巡回経路の評価値を総和した値が良い場合にのみ分割結果を反映させる．なお，分割処理とは問題に依存した処理である．ここでは，元の巡回経路の任意の二点間により決定されるサブツアーを求め，それを除いた巡回経路とサブツアーの二つに分割する，という処理を用いた．

[**Step4.** 統合処理]　各セールスマンは他（非自己）の巡回経路を自己の巡回経路に含めるかどうかの統合処理を試し，統合後の巡回経路を求める．統合した結果，元の評価値よりも統合後の評価値が良い場合にのみ統合結果を反映させる．なお，統合処理も分割処理と同様に問題に依存しており，ここでは，自己の巡回経路の任意の個所に非自己の巡回経路を含める，という処理を用いた．

[**Step5.** 突然変異]　各セールスマンは，巡回経路に突然変異操作を実行し，新たな候補解を求める．突然変異後の候補解が元の評価値よりも良い評価値となる場合にのみ候補解を次ステップにおける巡回経路として設定する．

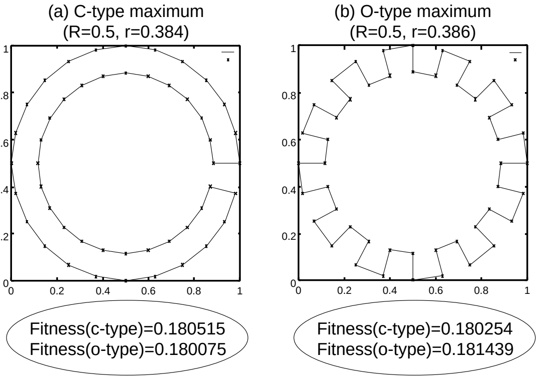


図 3: C-type と O-type

以下，終了条件（処理ステップ数）に達するまで Step2～5 を繰り返す．

3　計算機実験

3.1　二重同心円型 TSP

本手法の基本性能および探索動作を検証するため，二重同心円型 TSP を採用した．二重同心円型 TSP は，二重の同心円上に同数の都市が均等に並んだ都市配置における最短経路を探索する問題であり，二つの特徴的な優良解（C-type, O-type）を有する．その内外円の半径比によって最適解，局所解が入れ替わるだまし問題となっている．図 3 に，だまし問題における二つの優良解の一例を示す．

3.2　設計

TSP に本手法を適用するため，以下の設計を行った．

1. コーディング：解である抗体の文字列表現としてパス表現を採用した．
2. 目的関数：式 1 のように設定した．式 1 において，$subtour$ とは 1 セールスマンの巡回経路を意味し，$Cost()$ はその巡回経路を訪問するのに要するコストを求める関数である．

$$min(\sum Cost(subtour)) \tag{1}$$

3. 分割処理・統合処理：前述の通り，パス表現された巡回経路に対し任意の分割・統合ポイントを決定し，処理後のコストが減少する場合にのみ各々の処理を施すという，シンプルな処理機構として設計を行った．

3.3　問題設定

実験で扱った TSP と本手法で扱うパラメータを表 1 に示す．

表 1: パラメータ設定

最適解のタイプ	C-type
都市数	25
外円の半径	0.500
内円の半径	0.384
初期セールスマン数	12
終了ステップ数	5000

3.4 結果と考察

本手法による探索の結果，最適解であるC-typeを獲得することができた（図4）．

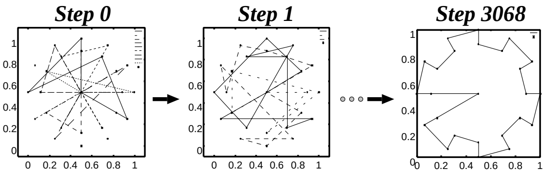


図 4: ステップ毎の候補解の一例

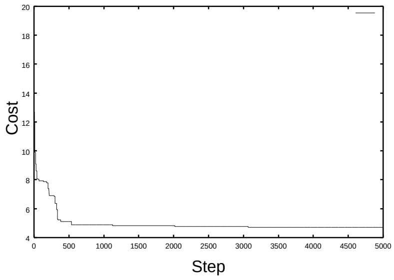


図 5: ステップ毎のコスト推移

図5は，ステップ毎のコストの減少過程を示しており，約500ステップまでに最適解に対する9割程度の解を獲得している．また，終了ステップ数までに探索した個体数は，分割処理が5,016（そのうち実際に候補解として処理を実行した個数は6），統合処理が18（同16），突然変異処理が5,002（同35）であり，総計10,036個体を探索していることになる．なお，GAのように各ステップ毎に単位数（集団数）分を探索していないのは，(1)各ステップ毎に存在するセールスマン数が異なる，(2)分割により新たに生じたセールスマンや，1つに統合されたセールスマンも同一ステップにおいて再度処理の対象となる，(3)巡回都市数が1の場合には分割処理を行わない，または1セールスマンが全ての都市を巡回している場合には統合処理を行わない，ということに起因する．探索点総数が1万個体というのは，25都市問題の問題サイズから考えても非常に少ない個体数であり，本手法が高速に近似解を求められる可能性が期待できる．なお，本手法において1万個体を要したというのはあくまでも一例であり，平均的にこの程度で最適解を獲得可能であるかは，今後検討を進める予定である．

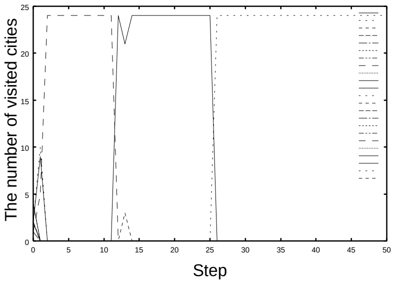


図 6: ステップ毎の各セールスマンが巡回した都市数（分割領域）の推移

次に，分割処理や統合処理が探索にどのように影響を及ぼしているかを検証する．図6は，各セールスマンが巡回した都市数をステップ毎に示しており，極めて早いステップ数（ステップ5～30）において一人のセールスマンで全都市を訪問する解が作成されている．分割処理や統合処理が実行されたのも多くがこの初期ステップであり，その一例を図7と図8に示す．

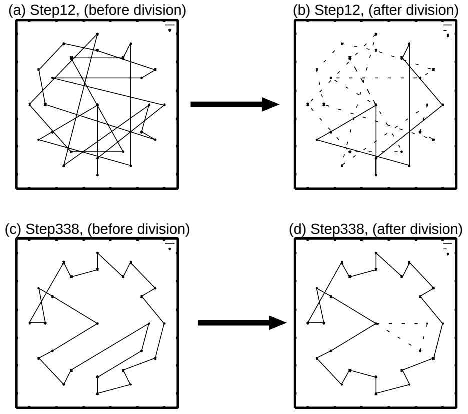
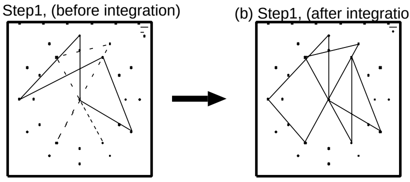


図 7: 分割処理例

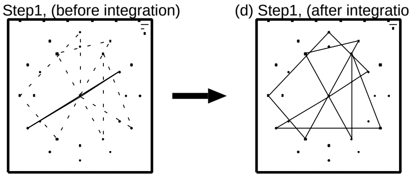
図7の（a）～（b）は，初めて分割処理を実行したステップであるが，目に見える程の改善は確認できない．それに対し，(c)～（d）は，最後に分割処理を実行したステップであり，内円右下の2都市を他のセールスマンに巡回させることにより，中央下の巡回経路が最適な部分解へと改善された様子が確認できる．

同様に，統合処理を実行した例を図8に示す．同図の（a）～（d）は，初期ステップにおいて実行された統合処理であり，統合されたセールスマン（b）がさらに他のセールスマンと統合（d）された例である．また，(e)～（f）への統合は，図7の下部で実行された分割結果に対し統合処理を実行した例であり，同一ステップの初期の解（図7（c））から段階的に改善されている様子が確認できる．

(a) Step1, (before integration) (b) Step1, (after integration)



(c) Step1, (before integration) (d) Step1, (after integration)



(e) Step338, (before integration) (f) Step338, (after integration)

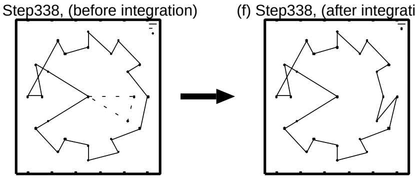


図 8: 統合処理例

4　おわりに

本稿では，免疫システムの細胞協同作用の概念を応用した最適化システムを構築し，計算機実験によりその探索動作や基本性能を検証した．免疫システムにおける細胞協同作用とは，異種の，または同種の細胞群の協同作用や組合せにより膨大な多様性を持つ抗体を産生する枠組みであり，非常に優れた並列分散型システムといえる．

本手法の探索動作は，計算機実験により検証したように，分業と統合，そして突然変異に基づき解を改善するように探索を行う．従って，適切に探索を行うためには，それらの処理を適切に設計することが最重要である．本実験においては，各々の処理は全てランダムな決定に基づいたシンプルな機構であるにも関わらず，非常に少ないコストで最適解を獲得することができた．しかし，本手法の中核の一つである分割処理が実際に実行された回数は5,016中6回と極めて少ない．これは，分業する際のサブツアーが任意の二点間により決定されるため，効率の良いサブツアーを求めることが困難であることに原因があると考えられる．分業処理をより適切に実行するためには，例えば，TSPに特化した交叉操作（サブツアー交換交叉[山村 92]）を応用したサブツアーの決定方法の導入や，その部分問題をGA等により解決することで改善が可能と思われる．突然変異処理も同様に改善が可能であろう．今後の課題として，それらを含めた情報処理機構の改善や，他の手法との性能比較や探索動作の比較による有効性の検証，本手法がどのような最適化問題に対応可能であるかの検証を検討している．

謝辞

本論文を執筆するにあたり，Lymphocyte Biology Section, Laboratory of Immunologyの伊藤靖氏から，免疫学における適切な御指摘を頂いた．また，人工免疫の設計・応用に関し，北海道大学調和系工学分野の皆様から，貴重な御意見，御討論を頂いた．ここに謝意を表する．

本研究は，平成12年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の補助を受けて行った．

参考文献

[Back 97] T.Back (editor) :“Proceedings of The Seventh International Conference on Genetic Algorithms”, Morgan Kaufmann（1997）.

[Bersini 91] H.Bersini and F.J.Varela : “The Immune Recruitment Mechanism : A Selective Evolutionary Strategy”, Proc. of ICGA 91,（1991）.

[Forrest 90] S.Forrest and A.S.Perelson : “Genetic Algorithm and the Immune System”, Proc. of PPSN 90, pp.320-325,（1990）.

[Goldberg 89] D.E. Goldberg : “Genetic algorithm, search optimization and machine learning”, Addison Wesley.S. (1989).

[Ishida 96] Y.Ishida and N.Adachi : “Active Noise Control by an Immune Algorithm : Adaptation in Immune System as an Evolution”, Pro. ICEC 96, pp.150-153（1996）.

[Toma 00] N. Toma, E. Satoshi, K. Yamada, H. Miyagi : “The Immune Distributed Competitive Problem Solver Using MHC and Immune Network”, Proc. of The 2nd Joint International Workshop - ORSJ Hokkaido Chapter and ASOR Queensland Branch -, pp82-89 (2000).

[石黒 97] 石黒 章夫，近藤 敏之，渡邊 裕司，白井 靖浩，内川 嘉樹 :“免疫ネットワークに基づく自律移動ロボットの分散型行動調停機構の創発的構築に関する一手法”，電学論C，117巻7号（1997）.

[高橋 98] 高橋 和彦，山田 孝行 :“免疫機構のニューラルネットワークの学習への適用に関する一考察”，第8回インテリジェント・システム・シンポジウム，pp.369-372（1998）.

[森 97] 森 一之，築山 誠，福田 豊生 :“免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化”，T.IEE Japan, Vol.117-C, No.5, pp.593-598（1997）.

[山村 92] 山村 雅幸，小野 貴久，小林 重信 :“形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法”，人工知能学会誌, Vol.7, No.6, Nov, pp.117-127（1992）.

論文受付番号　71

問い合わせ先　郵便903–0213
沖縄県中頭郡西原町字千原1番地
琉球大学 工学部 情報工学科
當間愛晃
TEL: 098-895-8714　FAX: 098-895-8727
E-mail: tnal@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp