

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 12 日現在

機関番号：17104  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2012～2015  
課題番号：24500019  
研究課題名(和文) ナチュラルコンピューティングにおける非同期性に関する研究

研究課題名(英文) Studies on asynchronicity on natural computing

## 研究代表者

藤原 暁宏 (FUJIWARA, AKIHIRO)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：10295008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：新しい計算パラダイムの1つとして注目を集めているナチュラルコンピューティングは、細胞などの各資源の活動を並列分散処理における計算資源として用いて、自然界における様々な性質や原理を元に計算を行うモデルである。

本研究では、従来のナチュラルコンピューティングで無視されがちな生体系のもつ非同期性について計算能力の検証を行うとともに、非同期性を考慮したアルゴリズムの提案を行う。また、並列処理を用いて非同期性を考慮した計算モデルのシミュレータの開発を行い、そのシミュレータを用いて提案アルゴリズムの正当性、及び、実効性の検証を行う。

研究成果の概要(英文)：Natural computing, which has considerable attention as one of next-generation computing paradigm, is a computation model based on features and laws of nature. In the natural computing, activity of biological resources, such as living cells, is considered as a hardware that executes parallel and distributed computation.

In the present study, I first verify computational universality of the natural computing with asynchronicity. Although the asynchronicity is an important feature of living of nature, the feature is not considered in conventional natural computing. I next propose algorithms for natural computing with asynchronicity. In addition, I develop simulators for the asynchronous natural computing using parallel processing, and verify correctness and efficiency of the proposed algorithms on the developed simulator.

研究分野：アルゴリズム

キーワード：アルゴリズム ナチュラルコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

ナチュラルコンピューティングには、神経の伝達経路をモデルとするニューラルコンピューティングや DNA の性質を用いて計算を行う DNA 計算など、多くの種類がある。本研究では、最初に、これらナチュラルコンピューティングの中で近年特に注目を集めている膜計算を対象として計算能力の検証とアルゴリズムの提案を行う。

この膜計算は、生物の細胞の活動を並列分散計算としてモデル化した計算パラダイムであり、細胞の持つ、

(a) 1つの細胞はいくつかの膜の階層構造により構成される

(b) 各膜内の要素は、独立した生命活動を行う

という2つの特徴を計算に利用する。

(a)の特徴である膜の階層構造は、識別子のついた均一な膜の包含関係として抽象化され、各膜に含まれる要素は、データを表す記号列を意味するオブジェクトとして定義される。また、(b)の特徴である要素の生命活動は、各オブジェクトに対する進化規則として定義される。

このように膜計算では、膜及び膜内のオブジェクトに対して進化規則を繰り返し適用し、膜及びオブジェクトを進化させることにより計算を行う。膜計算におけるオブジェクトはそれぞれの進化規則に応じて並列に進化可能なため、これらの進化を並列計算とみることができる。

また、各オブジェクトが進化規則に従って進化するだけでなく、各膜も進化規則により複数の膜に分裂することができる。したがって、膜計算の各ステップですべての膜が2つの膜に分裂すれば、多項式回の進化規則の適用に対して膜の個数は指数関数的に増加する。この指数個に分裂した膜の中でのオブジェクトの進化を計算ととらえると、膜計算では多項式ステップで指数個の計算を並列実行可能であると考えることができる。

## 2. 研究の目的

前述のように、膜計算では、膜及び膜内のオブジェクトに対して進化規則を適用し、膜及びオブジェクトを進化させることにより計算を行う。この計算において、従来の膜計算では、議論を単純化するために、複数のオブジェクトに対してそれぞれ適用できる進化規則があれば、すべてのオブジェクトはそれぞれの進化規則に従って並列かつ同時に進化するという極大並列則と呼ばれる規則を採用している。この極大並列則を仮定すると、オブジェクトの進化の過程は限定されるので、膜計算における計算結果が考えやすくなるという長所がある。

しかしながら、細胞等の生命活動は本質的な非同期性を持っている。例えば、生物の細胞が分裂を行う場合に、分裂の条件が整ったからといって全ての細胞が完全に同時に分

裂するわけではなく、不規則な順序で細胞分裂が行われていく。このように、生命活動全体での進化に対して同期や特定の順序を仮定することは困難であり、すべての要素は独立して生命活動を行うという非同期性を仮定する方が自然である。

そこで本研究では、膜計算において、複数のオブジェクトに対してそれぞれ適用できる進化規則があれば、少なくとも1つのオブジェクトはそれぞれの進化規則に従って並列に進化するという非同期並列則と呼ばれる規則を採用する。この非同期並列則による膜計算は、前述の生命活動のより正確なモデル化であるといえるが、その反面、オブジェクトの進化の順序が規定できなくなるので、進化の過程が非決定的になり、正しい計算結果を得られるか否かの検証が複雑になる。これに対して、本研究では、最初にこの非同期並列則を用いた場合に計算モデルの計算能力がどのように変化するかについて検証を行う。次に、この非同期並列則を用いる膜計算において、どのような非決定的な計算順序でも最終的に正しい計算結果が得られるアルゴリズムの提案を行うことを目的とする。

また、ナチュラルコンピューティングにおいては、膜計算以外にも、細胞群の情報伝達の仕組みを計算に用いるスパイキングニューラルPシステムや、酵素を用いる数値膜計算と呼ばれるモデルが提案されている。スパイキングニューラルPシステムは、細胞をモデル化したニューロンと呼ばれる計算部と、シナプスと呼ばれるネットワーク部により構成されており、各ニューロンから発生するスパイクと呼ばれる電位を用いて計算と通信を行う計算モデルである。また、酵素を用いる数値膜計算は、生産関数と分配プロトコルにより構成される進化プログラムに従って動作する計算モデルであり、酵素により進化プログラムの実行が制御される。これらの計算モデルについても、既存研究では非同期性についての考察はほとんど行われていないので、非同期性を考慮した場合の計算能力の検証や、非同期性を考慮したアルゴリズムの提案を行っていく。

加えて、提案アルゴリズムの正当性や実効性を検証するために、非同期性を考慮したこれらの計算モデルに対するシミュレータの開発も併せて行う。提案アルゴリズムの検証のためには実際に細胞等を用いた実験を行うことが有効であると考えられるが、生化学分野における技術的な問題により、実際の実験を行うには困難が伴う。本研究では、必要となる資源やオブジェクトの量なども考慮に入れつつ、提案アルゴリズムの実際の効率を正確に見積もることのできる実用的なシミュレータの開発を目指す。また、非同期性を考慮したナチュラルコンピューティングでは計算過程が膨大になるため、計算負荷の高いシミュレーションを行う必要がある。そ

ここで、提案シミュレータとしては、複数の CPU を搭載した計算機による並列処理環境にて実行可能なものを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、膜計算において数値データを表現するデータ構造の提案を行うとともに、このデータ構造を元に、非同期性を考慮した基本演算を実行する効率のよいアルゴリズムの提案を行う。また、この研究と並行して、1 台の計算機上で動作する非同期性をもつ膜計算のシミュレータの開発を行い、アルゴリズムの正当性や効率に関する検証を行う。

加えて、膜計算以外のスパイクニューラル P システムや酵素を用いる数値膜計算においても、非同期性を考慮した場合の計算能力の検証や、非同期性を考慮したアルゴリズムの提案を行うとともに、シミュレータの開発やアルゴリズムの正当性や効率に関する検証を行う。

最後に、実際の細胞における制約等を考慮しながら提案アルゴリズムの改良や新たなアルゴリズムの提案を行うとともに、複数の CPU を搭載した計算機による並列処理環境を用いるシミュレータを構築する。また、このシミュレータを用いて、非同期性を考慮した提案アルゴリズムの大規模シミュレーションを行うことにより、アルゴリズムの実効性を考察する。この実効性の検証は、膜計算だけではなく、スパイクニューラル P システムや酵素を用いる膜計算などナチュラルコンピューティングにおける広範囲の計算モデルについて考察を行う。

### 4. 研究成果

本研究に関して得られた主な研究成果を以下に示す。

#### (1) 非同期膜計算による充足可能性問題とハミルトン閉路問題の解法

生物の細胞活動においては、それぞれの構成要素が独立した生命活動を行っており、本質的に非同期な動作を行っている。しかしながら、従来の膜計算においては、すべての構成要素が同時に進化するという同期式の動作が仮定されており、生物特有の動作の非同期性を無視した現実的とは言い難い計算モデルとなっていた。

そこで本研究では、生命活動の本質である非同期性を考慮した膜計算モデルを用いて、充足可能性問題、及び、ハミルトン閉路問題を解く P システムを提案した。

まず、非同期膜計算において充足可能性問題を解く非同期 P システムを示した。この非同期 P システムは、与えられる  $n$  変数  $m$  節の乗法標準形の論理式に対して、論理式を真とする変数割り当てが存在するか否かを計算するものであり、 $O(mn)$  種類のオブジェクトを用いて、 $O(mn)$  並列ステップ、及び、

$O(mn2^n)$  逐次ステップで実行可能である。

次に、非同期膜計算においてハミルトン閉路問題を解く非同期 P システムを示した。この非同期 P システムは、頂点数  $n$  のグラフに対して、ハミルトン閉路が存在するか否かを計算するものであり、 $O(n^2)$  種類のオブジェクトを用いて、 $O(n^2)$  並列ステップ、及び、 $O(n!)$  逐次ステップで実行可能である。

#### (2) 非同期膜計算における基本演算と因数分解

本研究では、非同期膜計算において、加算、乗算、及び、因数分解を実行するアルゴリズムを提案した。

まず、非同期膜計算において加算を実行するアルゴリズムを示した。このアルゴリズムは、2 つの  $m$  ビットの 2 進数の加算を、 $O(m)$  種類のオブジェクトを用いて、 $O(m)$  逐次ステップ、及び、 $O(m)$  並列ステップで実行するものである。

次に、非同期膜計算において乗算を実行するアルゴリズムを示した。このアルゴリズムは、2 つの  $m$  ビットの 2 進数の乗算を、 $O(m^2)$  種類のオブジェクトを用いて、 $O(m^3)$  逐次ステップ、及び、 $O(m \log m)$  並列ステップで実行するものである。

最後に、上記のアルゴリズムを用いて、膜計算において因数分解を実行するアルゴリズムを示した。このアルゴリズムは 2 つの素数の積からなる  $m$  ビットの正の整数に対し、因数分解を実行し、解として 2 つの素因数を出力するもので、 $O(m^2)$  種類のオブジェクトを用いて  $O(4^{m^2} \log m)$  逐次ステップ、及び、 $O(m \log m)$  並列ステップで実行可能である。

#### (3) 非同期膜計算による計算困難なグラフ問題の解法

本研究では、生命活動の本質である非同期性を考慮した膜計算モデルを用いて、計算困難な様々なグラフ問題に対して、効率よく解を求めるアルゴリズムを提案した。

まず、頂点数  $n$  のグラフに対して、最大独立集合問題、最小頂点被覆問題、クリーク問題、及び、グラフ彩色問題を解くアルゴリズムを非同期膜計算を用いて提案した。これらのアルゴリズムは、いずれも、 $O(n^2)$  並列ステップ、及び、 $O(n^2 2^n)$  逐次ステップで実行可能である。

次に、頂点数  $n$  のグラフに対して、グラフ分割問題、及び、支配集合問題を解くアルゴリズムを非同期膜計算を用いて提案した。これらのアルゴリズムは、いずれも、 $O(n^2)$  並列ステップ、及び、 $O(n^2 2^n)$  逐次ステップで実行可能である。

#### (4) 酵素を用いた非同期数値膜計算における基本演算アルゴリズム

膜計算のひとつである数値膜計算 (EN P システム) は、膜構造と経済学に影響を受けた計算モデルであり、数値変数を進化プログラ

ムによって、変化させることで計算を行う。加えて、酵素を用いて数値膜計算の進化プログラムを制御する計算モデルを、酵素を用いた数値膜計算と呼ぶ。

本研究では、まず、この酵素を用いた数値膜計算において、非同期性を考慮し、比較交換操作、および、ソートを実現するアルゴリズムを提案した。

まず、2 入力の比較交換操作を実行するアルゴリズムを非同期数値膜計算を用いて提案し、 $O(1)$  並列ステップ、及び  $O(1)$  逐次ステップで実行可能であることを示した。次に、提案した比較交換操作を実行するアルゴリズムを用いて、 $n$  入力の奇偶転置ソートを実行するアルゴリズムを非同期数値膜計算を用いて提案し、 $O(n)$  並列ステップ、及び  $O(n^2)$  逐次ステップで実行可能であることを示した。

#### (5) 非同期性をもつナチュラルコンピューティングに対するシミュレータの開発

ナチュラルコンピューティングにおいては、実際の細胞などの生化学的物質を用いた計算は容易ではないため、提案アルゴリズムの検証が困難である。そこで、ナチュラルコンピューティングにおいては、いくつかのシミュレータが提案されているが、それらは非同期性を考慮していないため、本研究で提案したアルゴリズムを検証することは困難である。

そこで本研究では非同期性をもつナチュラルコンピューティングにおいて、非同期膜計算や酵素を用いた非同期数値膜計算の実行をシミュレートするシミュレータを実装した。このシミュレータは GPGPU を用いた並列処理環境において実装され、シミュレーション処理の高速化を達成している。

また、本シミュレータ上のシミュレーションによって、提案アルゴリズムの検証を行い、提案アルゴリズムが正確に実行可能であることを示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) K. Tanaka, A. Fujiwara, Asynchronous P systems for hard graph problems, International Journal of Networking and Computing, 査読有, Vol. 4, No. 1, pp. 2-22, 2014.

<http://www.ijnc.org/index.php/ijnc/article/view/70>

(2) T. Murakawa, A. Fujiwara, Arithmetic Operations and Factorization using Asynchronous P Systems, International Journal of Networking and Computing, 査読有, Vol. 2, No. 2, pp. 217-233, 2012.

<http://www.ijnc.org/index.php/ijnc/article/view/45>

(3) H. Tagawa, A. Fujiwara, Solving SAT and Hamiltonian cycle problem using asynchronous P systems, IEICE Transactions on Information and Systems (Special issue on Foundations of Computer Science), Vol. E95-D, 査読有, No. 3, pp. 746-754, 2012.

DOI: 10.1587/transinf.E95.D.746

〔学会発表〕(計 15 件)

(1) Y. Nishida, A. Fujiwara, P systems for a compare-and-exchange operation and sorting, 7th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, 査読有, pp. 328-333, 2015 年 12 月 9 日, 札幌市産業振興センター(札幌市)

(2) T. Shiiba, A. Fujiwara, Asynchronous enzymatic numerical P systems for compare-and-exchange operation and sorting, 3rd International symposium on Applied Engineering and Sciences, (SAES 2015), 査読有, 2 pages, 2015 年 11 月 23 日, Universiti Putra Malaysia (Malaysia)

(3) T. Shiiba, A. Fujiwara, Asynchronous enzymatic numerical P systems for the compare-and-exchange and sorting, 査読無, 第 11 回情報科学ワークショップ, pp.189-190, 2015 年 9 月 17 日, タナベ名古屋研修センター(愛知県北名古屋市)

(4) Y. Nishida, A. Fujiwara, Asynchronous membrane computing for the compare-and-exchange and sorting, 第 11 回情報科学ワークショップ, 査読無, pp.191-197, 2015 年 9 月 17 日, タナベ名古屋研修センター(愛知県北名古屋市)

(5) A. Nakanishi, A. Fujiwara, Reaction systems for logical operations and sorting, 6th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, 査読有, 5 pages, 2014 年 12 月 11 日, グランシップ(静岡県静岡市)

(6) S. Maeda, A. Fujiwara, Enzymatic numerical P systems for basic operations and sorting, 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, 査読有, 6 pages, 2014 年 12 月 5 日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

(7) 中西昭文, 藤原暁宏, 生化学反応計算における基本演算およびソートの実現, 第 10 回情報科学ワークショップ, 査読無,

pp.195-199, 2014年9月18日, ツネイシしまなびビレッジ(広島県福山市)

(8) 前田翔平, 藤原暁宏, 酵素を用いた数値膜計算における基本演算およびソートの実現, 第10回情報科学ワークショップ, 査読無, pp.200-205, 2014年9月18日, ツネイシしまなびビレッジ(広島県福山市)

(9) K. Hasuo, A. Fujiwara, Asynchronous P systems for uniform graph partitioning and related graph problems, Proceedings of the International Conference on Foundations of Computer Science, 査読有, 7 pages in CD-ROM, 2014年7月23日, Las Vegas (USA)

(10) 蓮尾弘太, 藤原暁宏, 非同期膜計算におけるグラフ分割問題及び支配集合問題の解法, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 査読無, 1ページ, 2013年9月30日, 熊本大学,(熊本県熊本市)

(11) K. Tanaka, A. Fujiwara, Asynchronous P systems for maximum independent set and related graph problems, Proceedings of 15th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models, 査読有, pp. 620-629, 2013年5月21日, Boston (USA)

(12) K. Tanaka, A. Fujiwara, Asynchronous P systems for graph coloring problems, International Conference on Networking and Communications (ICNC), 査読有, pp. 254-258, 2012年12月7日, 沖縄県男女共同参画センターにいる(沖縄県那覇市)

(13) S. Aoki, A. Fujiwara, Asynchronous SN P systems for sorting, International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 査読有, pp. 221-225, 2012年12月7日, 沖縄県男女共同参画センターにいる(沖縄県那覇市)

(14) 田中幸平, 藤原暁宏, 非同期膜計算におけるグラフ彩色問題の解法, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 査読無, 2012年9月26日, 長崎大学(長崎県長崎市)

(15) R. Hamabe, A. Fujiwara, Asynchronous SN P systems for logical and arithmetic operations, International Conference on Foundations of Computer Science, 査読有, pp. 58-64, 2012年7月17日, Las Vegas (USA)

〔図書〕(計2件)

(1) 藤原 暁宏, 森北出版, アルゴリズムとデータ構造(第2版), 2016, 192

(2) 藤原 暁宏, 森北出版, はじめて学ぶオートマトンと言語理論, 2015, 192

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)  
取得状況(計0件)

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤原 暁宏 (FUJIWARA AKIHIRO)  
九州工業大学・大学院情報工学研究院・  
教授

研究者番号: 10295008