

平成 23 年 3 月 31 日現在

研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2008 ～ 2010  
 課題番号： 20700013  
 研究課題名（和文） 膜計算モデルにおける基本演算アルゴリズムに関する研究  
 研究課題名（英文） Studies on basic algorithms for membrane 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・准教授  
 研究者番号： 10295008

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、ナチュラルコンピューティングの1つとして近年注目を集めている膜計算において、基本演算を実行するアルゴリズムの提案を行う。まず、基本となるデータ構造を提案し、そのデータ構造を用いて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、並列膜計算シミュレータの開発を併せて行い、そのシミュレータ上での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）：

In the present study, I propose basic algorithms for membrane computing, which is a representative example of natural computing. I propose data structures for the membrane computing, and also propose efficient algorithms for executing basic operations using the data structures. In addition, I develop simulators, which can be executed in parallel processing, for the membrane computing. I also verify correctness and efficiency of the proposed algorithms on the developed simulators.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 情報学・情報学基礎

キーワード： 膜計算, 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

本研究で対象とする膜計算とは、Páun により提案された新しい計算モデルであり、生物の細胞の活動をモデル化したパラダイムである。この膜計算では、生物の細胞の持つ、

(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。

具体的に説明すると、(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。

この膜計算と現在の計算機との大きな違いは、生命活動の特性に由来する最大並列則である。最大並列則とは、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に進化するというものである。この最大並列則により、膜計算におけるオブジェクトの進化を並列計算とみすことができる。

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最大並列則に従って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、最大並列則に従って行われるオブジェクトの進化を計算ととらえると、膜計算では、多項式回の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

本研究に関しては、以下の2つを主要な目的としている。

(1) 膜計算における効率の良い基本算アルゴリズムの提案

本研究で対象とする膜計算においては、計算困難な問題に対するアルゴリズムに対しては多くの研究が行われているが、算術演算や論理演算といった基本演算を実行するためのアルゴリズムはほとんど提案されていない。そこで本研究では、膜計算における基本演算を実行するための基本的データ構造を提案するとともに、様々な基本演算に対して効率のよいアルゴリズムの提案を行う。

対象とする基本演算は、比較的実現容易と予想される論理演算や算術演算だけでなく、データベース処理にも応用可能な辞書演算等も予定している。加えて、提案アルゴリズムに関しては、関連研究のDNA計算におけるアルゴリズムとの共通点、類似点や相違点も明らかにしていく予定である。

## (2) 膜計算シミュレータの開発

(1)において提案するアルゴリズムの正当性や実効性を検証するために、膜計算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を用いた実験を行うことが有効であるが、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、必要となる膜やオブジェクトの量なども考慮に入れつつ、提案した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。なお、このシミュレータは並列処理環境にて実行可能なものを構築予定である。

## 3. 研究の方法

本研究において提案する膜計算に関するアルゴリズムに関しては、理論的な計算モデルを用いてアルゴリズムの考案を行うとともに、その正当性の理論的な証明を行っている。

また、本研究において開発するシミュレータに関しては、Java等のプログラミング言語を用いて実装し、クラウド等の並列分散処理環境において利用可能なものとする。

## 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) 膜計算における辞書演算及び最大値計算

本研究では、膜計算において、辞書演算、及び、最大値計算を実行するアルゴリズムを提案した。まず、膜計算を用いて辞書演算の挿入、探索、削除の操作を実行するアルゴリズムを示した。これらのアルゴリズムは、 $n$ 個の $m$ ビットの2進数により表される辞書データに対して、 $O(mn)$ 種類のオブジェクトを用いて $O(1)$ ステップで実行可能である。また、この辞書演算を用いることにより、入力に対応する解を記憶するメモリ機能を実現可能であることを示した。

次に、膜計算を用いて最大値を計算するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、 $n$ 個の $m$ ビットの2進数を表すオブジェクトに対してその最大値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 $O(m)$ ステップで実行可能である。

(2) 膜計算において定数ステップで実行可能な基本演算アルゴリズム

本研究では、膜計算において、論理演算、及び、加算を実行するアルゴリズムを提案した。

まず、最初に、膜計算において論理演算を実行するアルゴリズムを2つ示した。1つ目のアルゴリズムは、2入力1出力の論理演算を実行するアルゴリズムであり、 $O(1)$ 種類のオブジェクトを用いて $O(1)$ ステップで計算するアルゴリズムである。2つ目のアルゴリズムは、多入力の論理演算を実行するアルゴリズムであり、 $n$ 入力1出力の論理積、論理和、及び、排他的論理和を計算する。このアルゴリズムは、 $O(n)$ 種類のオブジェクトを用いて $O(1)$ ステップで実行可能である。

次に、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 $O(1)$ ステップで実行可能である。

(3) 膜計算における因数分解

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

まず、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、 $O(m^2)$ 種類のオブジェクトを用いて、 $O(\log m)$ ステップで実行するものである。

次に、膜計算において多入力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、 $m$ 個の $2m$ ビットの2進数を、2個の $2m$ ビットの2進数へ束ねた後、加算を実行するもので、 $O(m^2)$ 種類のオブジェクトを用いて $O(\log m)$ ステップで実行するものである。

また、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 $O(\log m)$ 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正の整数 $c$ 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 $O(m)$ ステップで実行可能である。

(4) 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。

(5) 非同期膜計算における因数分解

本研究では、各進化規則が非同期に適用されるという非同期膜計算モデルを用いて、加算や乗算等の基本的な演算を行うアルゴリズムの提案を行った。また、これらのアルゴリズムを用いて、計算困難とされている因数分解を行うアルゴリズムの提案も行った。

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、 $m$ 個の $m$ ビットの2進数の加算を $O(m)$ ステップで実行するものである。

次に、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個の $m$ 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 $O(m \log m)$ ステップで実行するものである。

最後に、上記の乗算アルゴリズムを用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 $p$ 、 $q$ の積からなる正の整数 $n$ の入力に対し、因数分解を実行し、解として2つの素因数 $p$ 、 $q$ を出力するものであり、 $O(m^2)$ 種類のオブジェクトを用いて $O(m \log m)$ ステップで実行可能である。

(6) 非同期膜計算シミュレータの開発

膜計算においては、生物の細胞を元にした計算モデル上での計算を考えるが、実際の細胞を用いた計算は容易ではないため、提案Pシステムの正当性の検証が困難である。そこで、いくつかの膜計算シミュレータが提案されているが、それらは膜計算における非同期性を考慮していないため、非同期膜計算において提案されたPシステム

を検証することは困難である。

そこで本研究では、この非同期膜計算において、進化規則とオブジェクトの集合を入力とし、P システムの実行に従い、膜とオブジェクトの状況を表示するような非同期膜計算シミュレータを提案した。なお、このシミュレータはクラウド上に実装され、インターネットからアクセス可能なものである。

また、実験によって、作成した非同期膜計算シミュレータが、いくつかの提案 P システムを正確に実行できることを示した。

## 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 1 件)

(1) A. Fujiwara, T. Tateishi, Logic and arithmetic operations with a constant number of steps in membrane computing, International Journal of Foundations of Computer Science, 査読有, 2011. (to appear)

[学会発表] (計 1 1 件)

(1) 神戸文香, 藤原暁宏, 抑制性ニューロンを用いた SN P システムにおける因数分解, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, 査読無, D-1-4, 2011 年 3 月 14 日, 東京都市大学世田谷キャンパス(世田谷区).

(2) 村川誉幸, 藤原暁宏, 非同期膜計算における算術演算及び因数分解, 査読無, 第 6 回情報科学ワークショップ, 2010 年 9 月 3 日, ホテル長島(桑名市), pp. 47-54.

(3) 石井康太, 藤原暁宏, 非同期膜計算シミュレータの開発, 第 6 回情報科学ワークショップ, 査読無, 2010 年 9 月 3 日, ホテル長島(桑名市), pp. 37-46.

(4) K. Ishii, A. Fujiwara, H. Tagawa, Asynchronous P systems for SAT and Hamiltonian Cycle Problem, World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, 査読有, 2010 年 12 月 17 日, 北九州国際会議場(北九州市), pp. 520-526.

(5) A. Kambe, A. Fujiwara, Arithmetic Operations and Factorization in Membrane Computing, The 13th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation, 査読有, 2010 年 7 月 24 日, 金沢市文化ホール(金沢市), pp. 124-131.

(6) 田川博文, 藤原暁宏, 非同期膜計算による充足可能性問題とハミルトン路問題の解法, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 査読無, D-1-11, 2010 年 3 月 18 日, 東北大学川内キャンパス(仙台市).

(7) 神戸文香, 藤原暁宏, 膜計算における算術演算, 及び, 因数分解, 第 5 回情報科学ワークショップ, 査読無, 2009 年 9 月 6 日, 国際青年会館(広島市), pp. 23-44.

(8) Y. Tokumaru, A. Fujiwara, Procedures for floating point operations with DNA molecules, International Conference on Foundations of Computer Science, 査読有, 2009 年 7 月 14 日, Monte carlo hotel (Las Vegas, USA), 6 pages in CD-ROM.

(9) H. Tagawa, A. Fujiwara, Dictionary operations in membrane computing, International Conference on Foundations of Computer Science, 査読有, 2009 年 7 月 13 日, Monte carlo hotel (Las Vegas, USA), 7 pages in CD-ROM.

(10) A. Fujiwara, T. Tateishi, Computation with a constant number of steps in membrane computing, 11th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models, 査読有, 2009 年 5 月 25 日, Aurelia Convention Centre & Expo (Rome, Italy), 7 pages in CD-ROM.

(11) 田川博文, 藤原暁宏, 膜計算における辞書演算及び最大値計算, 査読無, 第 4 回情報科学ワークショップ, 2008 年 9 月 8 日, 国民宿舎豊公荘(長浜市), pp. 80-100.

[図書] (計 0 件)

[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・  
准教授

研究者番号: 10295008