



Title	Study on Amoeba-inspired Electronic Computing System for Solving Optimization Problems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	斉藤, 健太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14587号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81605
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kenta_Saito_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 斉藤 健太

学 位 論 文 題 名

Study on Amoeba-inspired Electronic Computing System for Solving Optimization Problems

（生物粘菌アメーバに倣った最適化問題を解く 電子計算システムに関する研究）

少子高齢化による働き手の減少は日本国が継続的な成長をするために解決すべき課題の一つである。この課題を解決するためには、例えば、人員配置や流通経路の最適化などの限られた資源を有効に割り当てることが必要不可欠である。これらは最適化問題として定式化される。最適化問題は問題規模が大きくなると組み合わせ爆発が発生するため、逐次的に処理を行う既存計算機では求解困難な問題である。そのため、自然現象に着想を得た「イジングマシン」と呼ばれる最適化問題専用計算システムが開発された。しかしイジングマシンの変数間結合に起因して、イジングマシンに解く問題をマッピングするためには高い計算、回路コストを要する。また実社会の課題は複雑な制約を持つことが多いが、イジングマシンはその動作原理から制約を満たした解を発見することが困難である。これらの課題を解決する新しい原理、システム構成で解を探索する専用システムの開発が必要である。

生物粘菌アメーバの解探索挙動を電子的に模倣した「電子アメーバ」は、イジングマシンの抱える課題を克服可能な解探索システムの一つである。生物粘菌は単細胞生物ながら高度な情報処理能力を持つことが知られている。粘菌を用いた解探索システムが開発され既存計算機では計算困難な問題を解けることが実証された。粘菌の解探索挙動を電子的に模倣した電子アメーバは高い解探索性能を持つことが期待される。

これまでに電子アメーバで簡単な最適化問題を解けることが実証された。しかし、既存の計算機では求解困難な NP 完全や NP 困難と呼ばれるクラスに属する問題を解けることは報告されていない。実社会の課題はそれらのクラスに属することが多いため、電子アメーバの社会実装やイジングマシンとの性能比較のためには、電子アメーバがこれらの問題を解けることを実証する必要がある。また、電子アメーバにおいて、Max-cut や TSP に対する解の最適性を高めるための手法は検討されていない。実社会の課題は制約を満たすだけでなく最適性を高めることが必要な場合があるため、解の最適性を高める手法が必要である。

以上の背景のもと、本論文の目的は充足可能性問題 (SAT) や最大カット問題 (Max-cut)、巡回セールスマン問題 (TSP) などの問題を解ける電子アメーバ解探索システムを構築し、その解探索性能の評価ならびに解の最適性を高める手法を見出すことである。電子アメーバは解を探索するアメーバコアと解く問題をマップするフィードバック回路から成る。本研究では、アメーバコアをアナログ回路で実装しフィードバック回路をデジタル回路で実装したアナログデジタルハイブリッドシステムと、全てアナログ回路で実装した完全アナログシステムを開発した。開発したシステムを用いて電子アメーバの SAT や Max-cut、TSP に対する解探索性能を物理実装回路や回路シミュレーションにより評価した。さらにアナログ回路上の遅延により発生する不安定な状態を解の質向上のために利用した。本論文はこれらの成果をまとめたものである。

本論文は 7 章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景と目的、各章の概要を示した。

第2章では、生物粘菌アメーバを用いた解探索システムとそのシステムに電子的に模倣した電子アメーバ解探索システムについて説明し、それらのシステムが解く最適化問題について述べた。

第3章では、これまでに開発されているイジングマシンについてレビューし、その弱点を指摘した。

第4章では、アナログデジタルハイブリッドで実装された電子アメーバについて述べた。アメーバコアをアナログ回路で、解く問題を変えるためにフィードバック回路をマイクロコントローラで実装した。その電子アメーバが SAT を解けることを実験的に実証した。また実装回路を用いて電子アメーバの SAT に対する解探索性能を評価し、解探索性能はゆらぎの性質に依存していることを明らかにした。電子アメーバの解探索挙動を理解するために、その解探索挙動に着想を得たキャパシタ充放電の非対称ダイナミクスをアメーバアルゴリズムに導入した。その結果、アメーバアルゴリズムは電子アメーバのゆらぎの性質に対する解探索挙動を再現した。さらに、非対称ダイナミクスを導入したアメーバアルゴリズムの性能は、変数の数を大きくしたとき、非対称ダイナミクス導入前のアルゴリズムと比べて指数関数的に向上した。

第5章では、完全アナログ回路で実装された電子アメーバについて述べた。アメーバコアはアナログ回路で実装され、フィードバック回路は積和演算としきい処理を行うアナログ抵抗クロスオーバー回路で実装された。本章で提案した電子アメーバが Max-cut や TSP を解けることを実験的に実証した。また電子アメーバの Max-cut と TSP に対する解探索性能を回路シミュレータにより評価した。その結果、電子アメーバの得られる解の質はランダムに解を生成する無作為抽出で生成された解の質と比較して劣化せず、電子アメーバは質の高い解を得た。さらに従来コンピュータ上に実装した局所探索アルゴリズム (離散ホップフィールドニューラルネットワーク、2-opt 法) と比較して、最大カット問題の場合は約 90 ノード以上の問題で、巡回セールスマン問題の場合は約 50 都市以上の問題で電子アメーバの解探索性能は従来コンピュータを上回ることを明らかにした。その性能差は問題規模が大きくなるほどに広がった。

第6章では、電子アメーバで TSP や Max-cut を解く際のアナログ回路上の遅延を利用した解の質向上手法について述べた。第5章で開発した完全アナログ電子アメーバの出力変数は回路上の遅延フィードバックによって振動した。この振動が最適化問題を解く際に解の質向上に必要な試行錯誤に対応するという仮説を立て、数値シミュレーションによって仮説の検証を行った。電子アメーバの解探索挙動を定式化したモデルに遅延を導入すると、実験結果と同じように変数は振動しながら時間発展し、最後は定常状態となり解を発見した。このとき、遅延を導入しなかった場合と比べて、得られた解の質は向上した。同時に解に到達するまでの時間も増加した。これらの結果から回路上の遅延を大きくすることで、解探索時間と引き換えに解の質を高められると結論付けた。また遅延の大きさを時間の経過とともに減少させる遅延スケジューリングを導入し、解の質は一定の遅延を加える場合よりも向上した。さらにバウンズバックルールの正規化係数の値を小さくすることにより、より良い解が得られることを明らかにした。

第7章では、本論文の結論を述べた。