



HOKKAIDO UNIVERSITY

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_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 齊藤 健太

審査担当者 主 査 教 授 本久 順一

副 査 教 授 富田 章久

副 査 教 授 浅井 哲也

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)

与えられた制約を満たす変数の組み合わせを求める組合せ最適化問題は、有限資源の合理的分配など現代社会の課題解決に不可欠な数理問題である。最適化問題の多くは解析解が存在せず求解は探索的手法に頼らざるを得ない。問題規模が拡大し変数が増加すると組合せが膨大になる「組合せ爆発」が生じるため、逐次的処理を行うノイマン型計算機では求解不能となる。近年、イジングマシンと呼ばれる磁性体の物理に着想を得た最適化計算システムの研究開発が進んでいるものの、システム実装の難易度が高い上に、解くべき問題をシステムに設定する段階で高い計算コストが必要、システムが非解状態に収束するなど種々の難しさがある。これら課題を克服する新たな最適化計算システムが望まれている。

単細胞生物ながら高度な情報処理能力を持つ生物粘菌アメーバの行動様式を電子的に模倣したシステム「電子アメーバ」は、生物の能力を踏襲し高い解探索能力を持つことが期待される。しかし、NP 完全や NP 困難と呼ばれる計算複雑性クラスに属し、実社会の課題に関与する最適化問題に対して、電子アメーバでの探索法やその能力は未解明である。

以上の背景のもと、本論文の目的は、電子アメーバによって計算複雑性の高い組合せ最適化問題の解探索を可能にし、その能力を明らかにするとともに、解の質 (最適性) を高める手法を開拓することである。本研究では、生物粘菌の動きを模倣するアメーバコアをアナログ回路で実装し問題をマップするフィードバック回路をデジタル回路で実装したハイブリッドシステムと、全系を完全アナログ化したシステムを構成した。本システムによる充足可能性問題 (SAT)、最大グラフカット問題 (Max-cut)、巡回セールスマン問題 (TSP) の解探索を可能にし、物理実装回路や回路シミュレーションを用い性能を評価した。さらに従来計算システムでは極力抑制してきた信号遅延や振動を性能改善に役立てる手法を開拓した。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。

第 1 章では、本研究の背景と目的、各章の概要が示されている。

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電子アメーバ解探索システムおよび最適化問題について述べている。

第 3 章では、従来最適化システムとしてイジングマシンについて解説している。

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ている。アメーバコアをアナログ回路、フィードバック回路をマイクロコントローラで実装し、SATの解探索を実験実証した。また物理実装回路を用い解探索性能を評価し、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非対称ダイナミクスをアメーバアルゴリズムに導入し、アメーバアルゴリズムにより電子アメーバのゆらぎに対する解探索挙動を再現した。さらに適切な非対称ダイナミクスの導入により解探索能力が向上することを明らかにした。

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ている。本システムでMax-cutやTSPのマッピング方法を見出し、解探索可能であることを実験実証した。また回路シミュレーションにより電子アメーバで得られる解の質が無作為抽出法を上回ることを示した。さらに従来計算機に実装した局所探索アルゴリズムと比較し、大規模な問題になると電子アメーバの解探索性能は従来計算機を上回ることを明らかにした。

第6章では、アナログ電子アメーバにおける回路遅延を利用した解の質の向上について述べている。回路遅延フィードバックにより電子アメーバの出力が振動することに着目し、これが試行錯誤をもたらした解の質向上につながることを数値シミュレーションによって見出した。挙動を定式化したモデルに遅延を導入することで実験結果を再現できることを確認した。また有限の遅延が解の質の向上をもたらすこと、および、探索時間と解の質がトレードオフの関係にあることを明らかにした。これら知見にもとづき遅延スケジューリングによる解質向上手法を編み出した。

第7章では、本論文の結論を述べている。

以上を要するに、本論文は生物粘菌の探索能力をアナログ電子回路上に再現し、これを応用し巡回セールスマン問題など複数の組合せ最適化問題を解くことを可能にし、性能を明らかにするとともに、解探索能力をさらに高める方法も見出している。生物に倣ったアナログ電子システムに関し新知見を得たものであり、電子計算工学分野に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。