

SSD: Solid State Drive

A Study on Applications of Custom File Metadata for High-functional and High-performance Server-based Storage



情報処理学会・学会誌「情報処理」

2022年8月15日 08:58



2021年度研究会推薦博士論文速報

【データベースシステム研究会】

深谷 崇元

((株) 日立製作所 研究開発グループ 主任研究員)

邦訳：拡張ファイルメタデータを用いたサーバベースストレージの高機能・高性能化に関する研究

■キーワード

ストレージ／ファイルシステム／分散システム

【背景】 たくさんの低価格な汎用サーバをつなげて、大規模なサーバベースストレージを実現

【問題】 サーバベースストレージの機能・性能不足

【貢献】 拡張ファイルメタデータを用いた高機能制御・高性能制御の確立

情報通信技術の発展により、クラウドや組織内で使われている情報基盤システムの大規模化が進んでいる。情報基盤システムで使われるアプリケーションのデータ

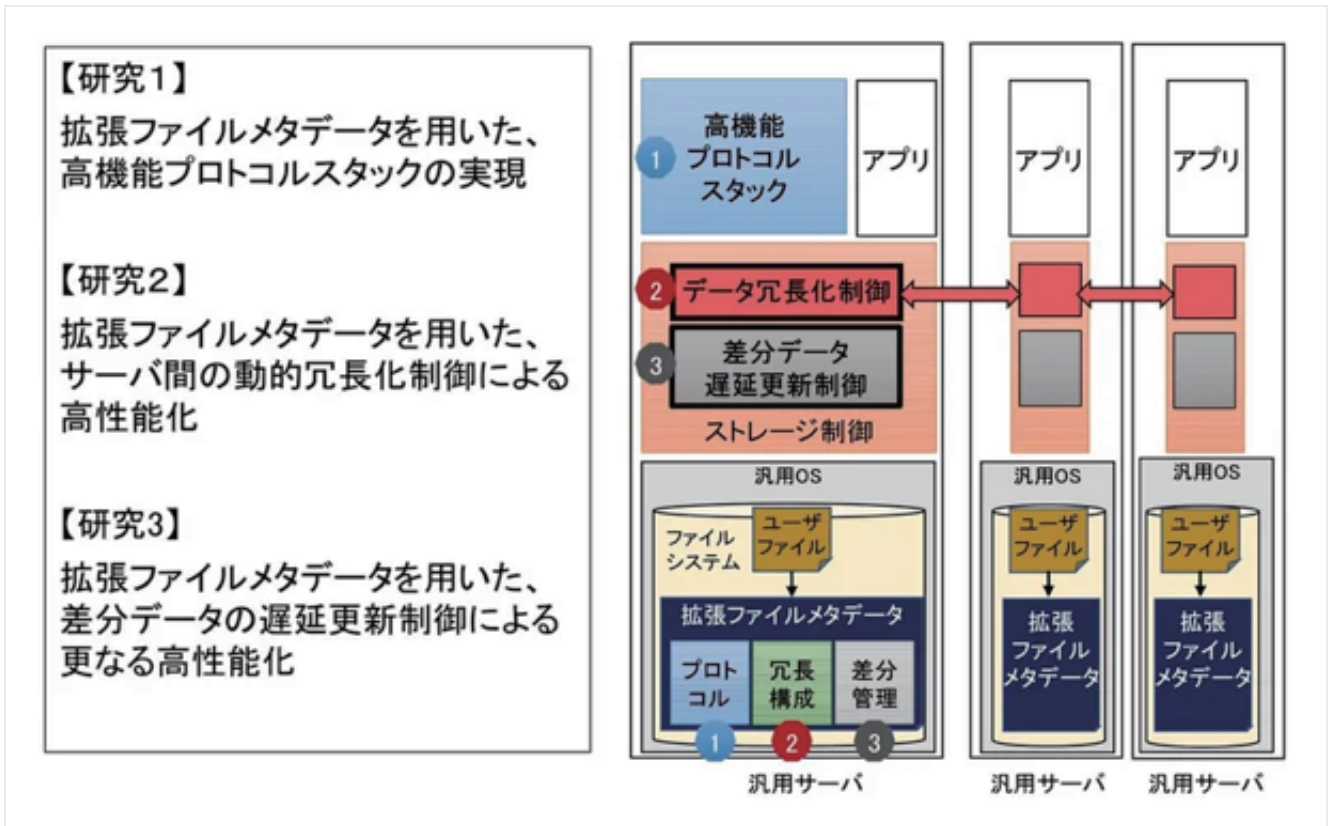
を格納するストレージにも、システム規模に比例した大容量と高性能が求められている。ストレージ専用のハードウェアやソフトウェアを使用する従来のストレージ装置では、装置単体の容量、性能に限界があり、大規模システムへの対応が難しい。そこで、たくさんの低価格な汎用サーバをつなげ、サーバ台数に比例した大容量・高性能を実現する、サーバベースストレージが広く使われるようになっていく。

このような動向に伴い、サーバベースストレージを当初の大容量データの格納に加え、仮想デスクトップ環境やデータベースなどの、より広い用途に使用することが期待されている。これらの用途では、WindowsやLinuxなどのデスクトップOSが使用するネットワーク通信プロトコルのサポートや、データ読み書き要求に対する短い応答時間が求められる。しかし、従来の大容量データ格納向けに設計されたサーバベースストレージは、提供機能が少なく、最新のネットワーク通信プロトコル（NFS、SMBなど）の一部しかサポートできていない。また、データアクセスのたびにサーバ間のネットワーク通信が多発し、応答時間が長くなってしまふ。そのため、サーバベースストレージの機能改善と、データアクセスの応答性能改善が課題となっている。

本研究はサーバベースストレージの用途を広げることを目的とし、サーバベースストレージの機能・性能改善方式を提案する。提案方式は、アプリケーションが使用するファイルデータに対し、拡張ファイルメタデータとよぶ追加制御情報の格納

領域を導入する。拡張ファイルメタデータに機能追加や高性能化に必要な制御情報を格納することで、サーバベースストレージの高機能・高性能化を実現する。高機能化では、拡張ファイルメタデータにプロトコル固有の情報を格納し、最新のネットワーク通信プロトコルをサポートする高機能プロトコルスタックを実現した（研究1）。高性能化では拡張ファイルメタデータにデータ冗長化の制御情報を格納し、サーバ間の動的冗長化制御を実現した（研究2）。動的冗長化制御はアプリケーションとデータを同じサーバに配置することで、応答時間を改善する。また、拡張ファイルメタデータに差分データの制御情報を格納し、更新データの遅延更新を実現することで、さらに応答時間を改善した（研究3）。

プロトタイプを用いた評価では、提案手法がサーバベースストレージの機能と性能を大幅に改善することを示した。さらに、ストレージの主要用途において、提案手法を適用したサーバベースストレージが、より多くの用途で機能・性能要件を満たし、使用できることを確認した。



参考文献

【研究1】

- 1) Fukatani, T., Sutoh, A. and Nakano, T. : A Method to Adapt Storage Protocol Stack Using Custom File Metadata to Commodity Linux Servers, International Journal of Smart Computing and Artificial Intelligence, Vol.2, No.1, pp.23-42 (2018).
- 2) Fukatani, T., Sutoh, A. and Nakano, T. : Adapting Storage Protocol Stack Using Custom File Metadata to Commodity Linux Servers, in Proc. of the 6th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), pp.249-

254 (2017).

【研究2】

3) Fukatani, T., Le, H. H. and Yokota, H. : Lightweight Dynamic Redundancy Control with Adaptive Encoding for Server-based Storage, ACM Transactions on Storage, Vol.17, Issue 4, pp.28:1-28:38 (2021).

4) Fukatani, T., Le, H. H. and Yokota, H. : Lightweight Dynamic Redundancy Control for Server-based Storage, in Proc. of the 38th International Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2019), pp.295-304 (2019).

5) 深谷崇元, Le H. H., 横田治夫 : サーバベースストレージにおける更新頻度を考慮した冗長化手法の提案と評価, 日本データベース学会和文論文誌, Vol.18-J, No.15 (2020).

【研究3】

6) Fukatani, T., Le, H H. and Yokota, H. : Delayed Parity Update for Bridging the Gap between Replication and Erasure Coding in Server-based Storage, Proceeding of the twelfth International Workshop on Accelerating Analytics and Data Management Systems Using Modern Processor and Storage Architectures (ADMS 2021) in conjunction with the 47th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2021), pp.1-9 (2021).

(2022年5月21日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月：2021年9月

学位種別：博士（工学）

大学：東京工業大学

正会員

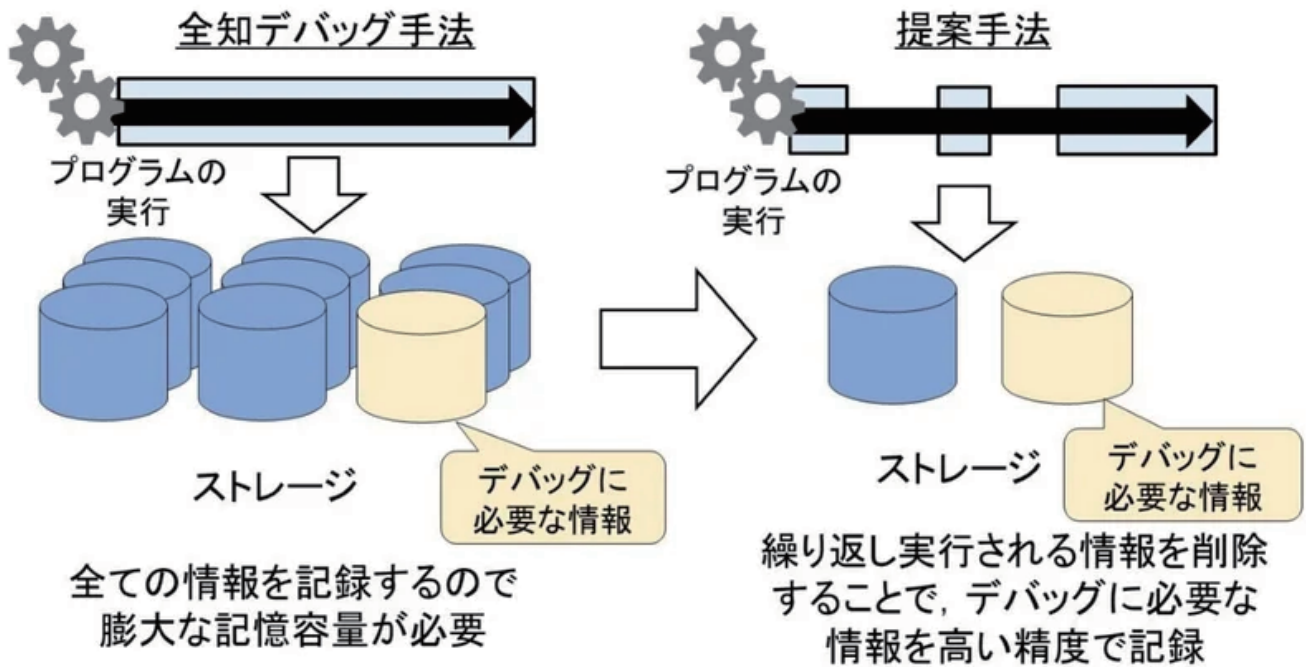
推薦文【コンピュータサイエンス領域】データベースシステム研究会

信頼性と性能を保って安価に情報を蓄積するサーバベースストレージが注目されている。信頼性を確保するための冗長構成を、容量効率とアクセス性能を考慮して、利用パターンに沿ってサーバ間で動的に変更する斬新で効率的な手法を複数提案し、効果を示している。その新規性、有用性は高く、難関のACM TOSに採択されている。

研究生活 企業研究で長年取り組んできたストレージについて、より深く研究したいという思いから、社会人博士として本研究に取り組みました。過去に会社で行った研究を一般化し、新たな応用手法を提案・評価して、博士論文にまとめまし

た。大学では自分のペースで研究を進めることができ、1つのテーマに長く深く向き合うことができました。一方、平日に仕事をし、早朝や深夜、休日にプロト開発や評価、論文執筆する生活は肉体的にハードでした。進捗が悪いときは精神的にもハードでした。卒業の見通しがたたず、家族に迷惑かけてまで続けるべきかを悩み、学位取得を諦めかけたこともありました。最終的に博士論文を書き上げ、念願の学位を取得できたことを、大変うれしく思います。

博士生活を通し、自分の研究の位置づけや意義を整理し、論文にまとめる方法を学ぶことができました。指導教員の横田治夫教授、支援いただいた日立製作所の関係者を始め、この研究に携わってくださった方々へこの場を借りてお礼を申し上げます。



Study on Cost-Effective Debugging Methods under Restricted Resources

♡ 1

情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:01



2021年度研究会推薦博士論文速報

[ソフトウェア工学研究会]



嶋利 一真

(奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 助教)

邦訳：限られた資源を用いた効率的なデバッグ手法に関する研究

■キーワード

デバッグ／プログラム解析／ソフトウェア可視化

【背景】 ソフトウェア開発におけるデバッグ作業のコストは大きい

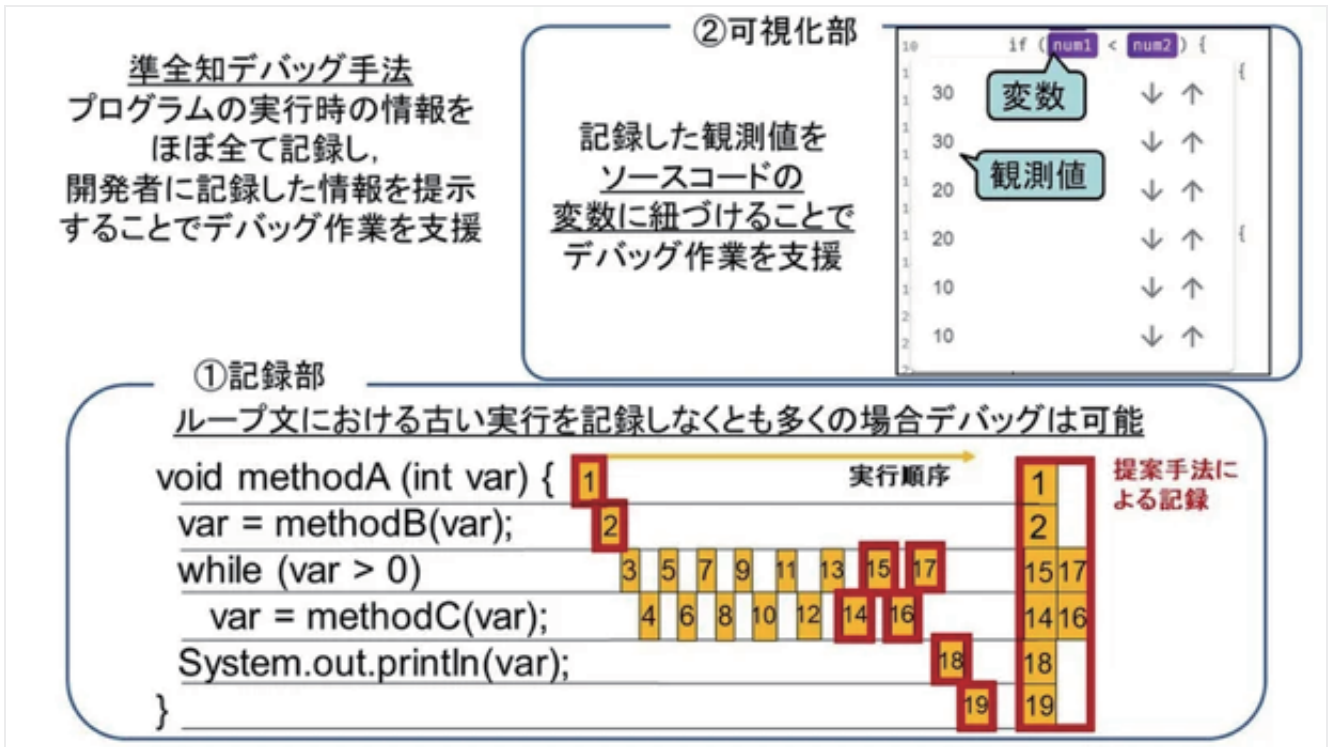
【問題】 デバッグ作業にかけられる資源は限られている

【貢献】 限られた資源で利用可能なデバッグ手法を開発した

ソフトウェアは近年の社会に必要不可欠であり、ソフトウェア開発には非常に多くの人材が携わっている。そのため、全世界のソフトウェア開発にかかるコストは増大しており、1年で2,600万人を超える人材と1.25兆米ドルを超える費用を要しているとの報告がなされている。ソフトウェア開発においては、設計やコーディング、プロジェクトの管理などのさまざまな作業が行われている。その中でも、ソフトウェアのバグを取り除いたり予期した挙動を行うように修正する作業であるデバッグには、ソフトウェア開発全体の4分の1、つまり312億米ドルと非常に大きなコストがかかっている。

デバッグにかかるコストを削減するためにこれまでに多くの研究がなされており、さまざまなデバッグ手法が提案されている。その1つに全知デバッグ手法 (Omniscient Debugging) と呼ばれる手法がある。全知デバッグ手法は、プログラムにおいて実行された命令とその観測された値をすべて記録し、記録した情報を用いてデバッグを行う手法である。この手法を用いることで、開発者は任意の時点におけるプログラムの状態の観測や、バグが起きているプログラム実行の完全な再現などが可能となり、デバッグ作業を効率良く行うことができる。しかし、この手法の課題としてプログラムにおけるすべての命令とその観測値を記録するため、膨大なストレージ容量が必要であるという点が挙げられる。特に、バグを含むプログラムについてはどのような実行になるかを予測できないため、命令の記録量を事前に予測することは困難となっている。そのため、記録量の問題は全知デバッグ手法を気軽に使用することが困難な原因の1つとなっている。

そこで、この研究では全知デバッグ手法における記録量の問題を解決する準全知デバッグ手法を提案した¹⁾。このデバッグ手法では、ループ文によって繰り返し記録された命令については、そのすべてを記録せずに最新数十件程度の記録にとどめても、デバッグに必要な情報は記録されているという仮説に基づいて、プログラムの命令とその観測値における記録量を削減している。実験の結果、準全知デバッグ手法によって多くの場合デバッグ事例において、デバッグに必要な情報は十分記録されていることが分かった。つまり、デバッグにおける記録量が限られている状況でも、準全知デバッグ手法で高い精度でデバッグが可能であることが示された。また、この研究では記録した情報をプログラムのソースコードに紐づけて、開発者のデバッグ作業を支援する可視化ツールの作成も行っている。このツールによって、準全知デバッグ手法を用いた実際のバグ修正が可能であることが示された²⁾。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

本研究で作成したツールのデモサイトを以下に示す。

<http://sel-nod3v.ics.es.osaka-u.ac.jp/>

参考文献

- 1) Shimari, K., Ishio, T., Kanda, T. and Inoue, K. : Near-Omniscient Debugging for Java Using Size-Limited Execution Trace, Proceedings of the 35th IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME 2019), pp.398-401, Cleveland, OH, USA (Oct. 2019).
- 2) Shimari, K., Ishio, T., Kanda, T., Ishida, N. and Inoue, K. : NOD4J: Near-

Omniscient Debugging Tool for Java Using Size-Limited Execution Trace,
Science of Computer Programming, Vol.206, pp.102630 (June 2021).

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（情報科学）

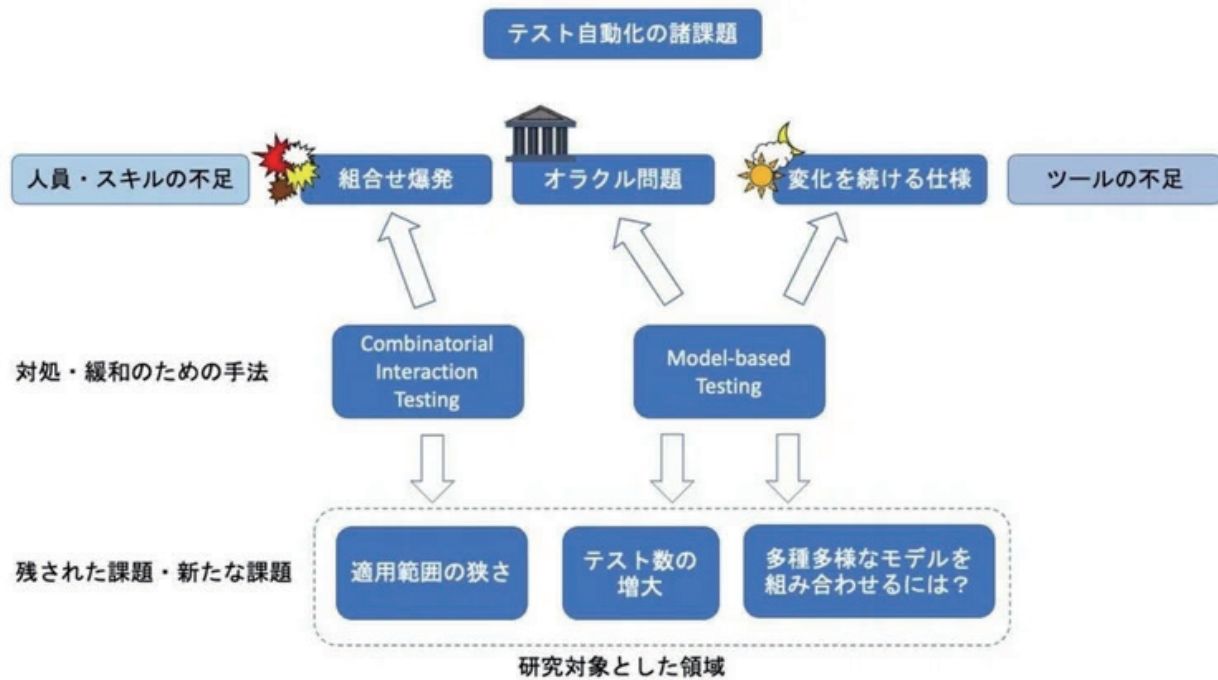
大学：大阪大学

正会員

推薦文【コンピュータサイエンス領域】ソフトウェア工学研究会

ソフトウェアの開発者自らが利用可能な資源に応じて効率的なデバッグ（ソフトウェアの欠陥除去）作業を行う解法を考案している。解法の一部は企業の実際の問題から出発し、その解決法、実装、評価を行っており、その有用性は企業でも確認している。このように研究成果は実践的価値の高いものである。

研究生活 学部生のころに長時間かけて些細なバグを修正するという経験を何度もしたことをきっかけに、デバッグに関する研究に興味を持ちました。特にプログラム実行時の情報をすべて取得してデバッグに利用するという手法に驚き、大学院ではこの手法の実用における課題である効率化について研究しました。博士課程に進むことで、長いスパンで多くの先生方や学生と協力してツールの作成や実験を行うことができ、さまざまな視点からこの研究テーマを究められ、非常に充実した日々を送ることができたと考えています。また、国内外の多くの研究者や企業の方との交流を通じて自身の研究成果が実際に他の研究グループや企業で使われたことは、何ものにも代え難い貴重な経験となりました。最後になりましたが、研究生活ならびに博士論文の執筆にあたってご指導をいただきました井上克郎教授、石尾隆准教授、松下誠准教授、神田哲也助教にこの場を借りて心よりお礼申し上げます。



A Study on Efficient Software Testing Processes by Covering Arrays and Combinatorial Join

♡ 1

情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:02



2021年度研究会推薦博士論文速報

[ソフトウェア工学研究会]



鵜飼 大志

(楽天グループ (株) プリンシパルソフトウェアエンジニア)

邦訳：カバリングアレイと組合せ結合を用いた効率的なソフトウェアテストング
プロセスについての研究

■キーワード

テスト自動化／ソフトウェアテスト／ソフトウェアモデル／組合せ爆発／
カバリングアレイ

【背景】 多様なコンポーネントからなるソフトウェアの効率的テストが困難

【問題】 対象システムをモデル化する手段の不在、モデル化に伴うテストすべき組合せの爆発的増加

【貢献】 多様なコンポーネントを統一的にテスト可能なモデル化する手法、これに伴う組合せ爆発に分割統治法の適用を可能にする手法の提示

近年の各種技術の改善に伴い、ウェブUIアプリ等、単純なシステムのテスト自動化は一般化した。一方で、外部への依存が大きなシステムや多様なコンポーネントからなるシステムのテスト自動化は依然として大きな困難が伴い、また単純なシステムやときには単体テストさえ、その達成度（テスト全体の自動化率、テストのバグ検知）には大きな格差がある。これには人材・スキル・予算配分の不足等運営上の問題、各種ツールの機能・汎用性の不足等比較的単純な技術上の要因もあるが、システムの複雑化に伴って必然的に生じ、かつ克服のための根本的対処法が示されていない本質的課題も多くある。考慮すべきシステム動作パターンの爆発的増加、いわゆる「組合せ爆発」と多様なモデルへの統一的適用が可能なモデルベーステスト手法が存在しないことなどである。これらの解決のために本論文が提案した手法を紹介する。

（多様・変容する仕様と組合せテスト） 現代のシステム開発においては開発期間中も仕様・設計の変更は続く。テストは入力値を変えつつ多数設計・実施するため冗長度が高い。仕様変更のたびに多数のケースを手作業で修正することは、実務上大

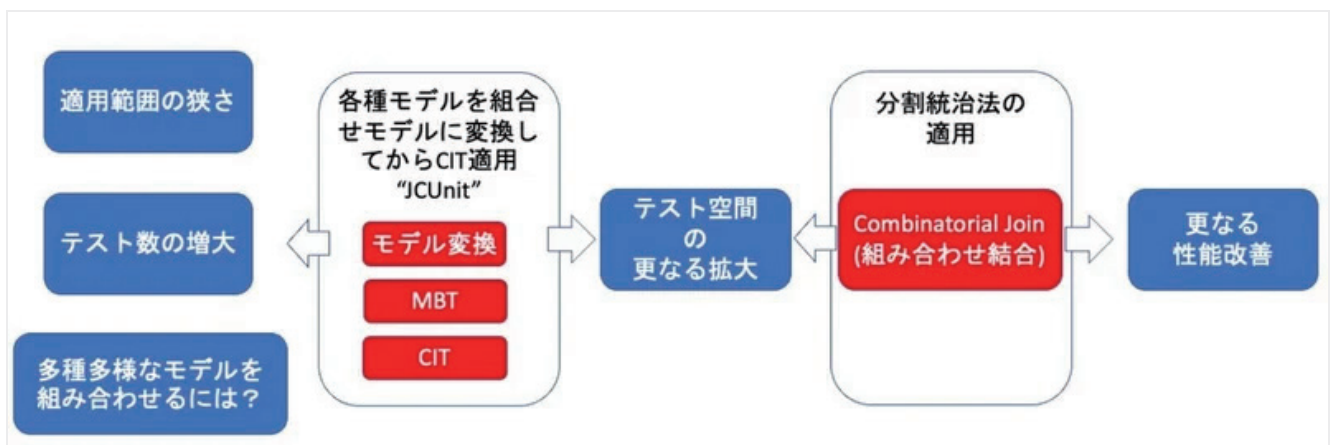
きな問題になる。システムの仕様をモデル化してテストケースを自動生成するモデルベーステスト手法は提案されてきたが、管理限界を超える膨大なテストケースの生成が生じる、あるいはテストすべき対象に提供されたモデルが適合しない問題などがあった。本研究では少数のテストで高い網羅率を実現する手法である「組合せテスト」を、多様なモデルに適用する能力を備えたツール「JCTest」を開発し、提案した¹⁾。

(組合せ結合) さて、信頼できるソフトウェアシステムは部品として再利用され、システムの規模は拡大する。一方、組合せテストの生成は仕様の複雑化に伴い急速に効率が悪化する。また、システム全体のテストケースを一度に生成するのが前提であり、サブシステムごとに生成したテストを統合する仕組みはない。これは組合せテストで用いるデータ「カバリングアレイ」の生成自体は盛んに研究されてきたものの、複数のカバリングアレイを連結して新しいカバリングアレイを生成する手法の研究は進んでいなかったためである。本研究では、組合せテストにおいて「分割統治」を可能とする新しい概念「組合せ結合」を提案し、その実装を示した。

(組合せ結合の性能改善) 「組合せ結合」の手法は分割統治法を組合せテストの分野にもたすが、結合自体に要する計算時間は無視できない。産業規模のソフトウェアのテスト入力はときとして数千に及び、実験結果によれば本手法の効率改善は必須であった。本研究では、テストの強度をいったん低下させてから結合する手法を示してこれを図り達成した。

(提案手法の効果) 「JUnit」を筆者が所属する会社の検索エンジンUIに適用し、自動生成したテストスイートがバグ検出能力を持つことを確認した²⁾。一方、組合せ結合については、組合せ結合を使用しない従来手法に比較して13～96%の生成速度の向上を行った³⁾。

(まとめ) 本研究は、組合せテストの技法を多様なモデルに統一的に適用しうるテスト自動化手法とそのツールを提示した。それに伴って生じるさらなる組合せ爆発への対処として「組合せ結合」の概念と実現方法、その改良を示し、これにより従来困難であった大規模で複雑な分散システムに対するテスト自動化の系統的手法を示した。また組合せ結合により効率的に発見できるバグの種類と実例を明らかにした。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

<http://dakusui.github.io/>

参考文献

- 1) <https://github.com/dakusui/jcunit>
- 2) Ukai, H. and Qu, X. : Test Design as Code: JCUUnit, 2017 *IEEE International Conference on Software Testing , Verification and Validation (ICST)* , pp.508-515 (2017), [doi: 10.1109/ICST.2017.58](https://doi.org/10.1109/ICST.2017.58)
- 3) Ukai, H., Qu, X., Washizaki, H. and Fukazawa, Y. : Accelerating Covering Array Generation by Combinatorial Join for Industry Scale Software Testing, *PeerJ Computer Science* 8:e720 (2022), <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.720>

(2022年5月24日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年2月

学位種別：博士（工学）

大学：早稲田大学

推薦文【コンピュータサイエンス領域】ソフトウェア工学研究会

ソフトウェアのコンポーネント内やコンポーネント間における各種の組合せ群を少

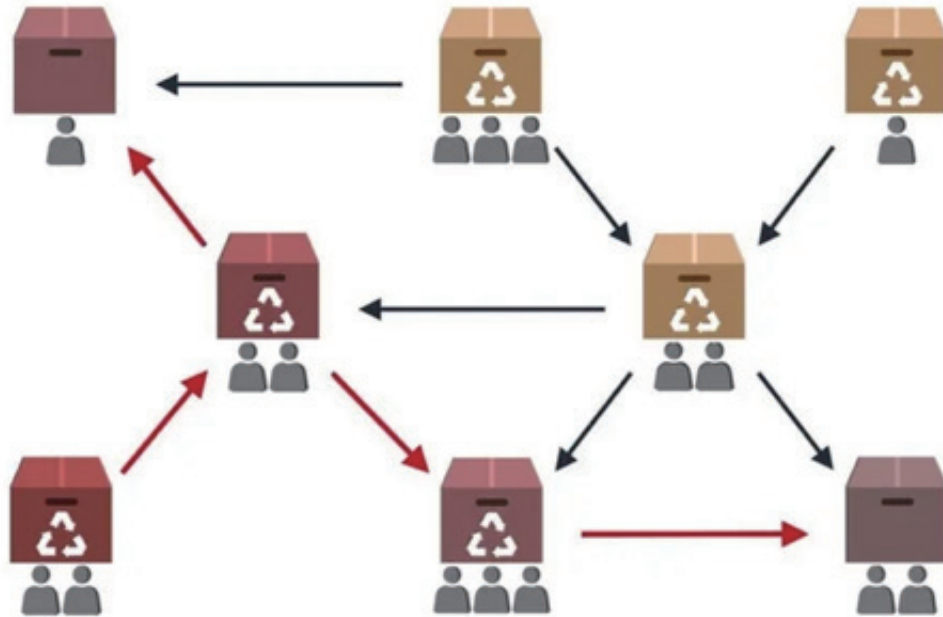
ないテストケースで効率良く網羅するための被覆配列へ分割統治の考え方を導入し、多様な製品の統一的テスト自動化の仕組みを実現した。国際的に評価されトップカンファレンスや難関雑誌に掲載され、成果は製品開発で利用されている。

研究生活 博士課程での研究のきっかけはオープンソースで開発している自作ツールJCUnitが米国の研究者の目にとまり、交流・ICST2017での論文発表に至ったことでした。

ソフトウェア検証の自動化は20年以上前からその利益が喧伝されていたにもかかわらず今なお発展途上です。


従来型のテストで重要だったスキルや考え方はあまり役に立ちませんが、逆に言えば若い方には挑戦のしがいがあり日本がこれから存在感を示せる分野とも考えています。

多くの方に専門として選んでいただくことを願っています。



Characterizing the Quality of Third-party libraries through Runnability and Risk Assessment in the Open Source Ecosystem

♡ 1

 情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:04



2021年度研究会推薦博士論文速報

[ソフトウェア工学研究会]



Bodin Chinthanet

(奈良先端科学技術大学院大学 特任助教)

邦訳：オープンソースエコシステムにおける実行可能性とリスク評価によるサードパーティライブラリの品質特徴づけ

■キーワード

ソフトウェアエコシステム／ソフトウェアリポジトリマイニング／

ソフトウェア脆弱性

【背景】 ソフトウェアは今や社会の共有資産

【問題】 サイバー攻撃に耐えバグもない状態にソフトウェアを保つのは至難の業

【貢献】 汎用性の高いプログラム部品（パッケージ）の高品質化

ソフトウェア（「プログラム」や「アプリ」と表現した方が馴染みがあるかもしれない）は、多くの人にとってとても身近な存在となっている。スマホの人気や売上は、カメラの性能だけでなく、便利で面白いアプリが使えるかどうか、で大きく変わる。また、皆さんが直接目にするもののないところでも、情報化社会を支える裏方としてソフトウェアは大活躍している。ソフトウェアは今や社会の共有資産であり、特に、使い勝手がよく使い道もいろいろと見込まれるソフトウェアやその一部は、ソフトウェアパッケージ（プログラム部品の集合体）としてまとめられ、広く配布、共有、活用されるようになってきている。ソフトウェアを資産として共有、活用する枠組み全体をソフトウェアエコシステムと呼ぶ。

ただし、作り手の意図通りに動作しサイバー攻撃にも負けない（バグや脆弱性が残っていない）ように作成したソフトウェアも、時間の経過とともに手直しが必要となる。ソフトウェアそのものは変化しないが、その利用環境や利用目的が変化すると意図通りには動作しなくなる。また、新たなサイバー攻撃にも対応しなければ

ならない。ソフトウェアエコシステムにおいてソフトウェアをバグや脆弱性が残っていない状態に保つことは容易ではない。

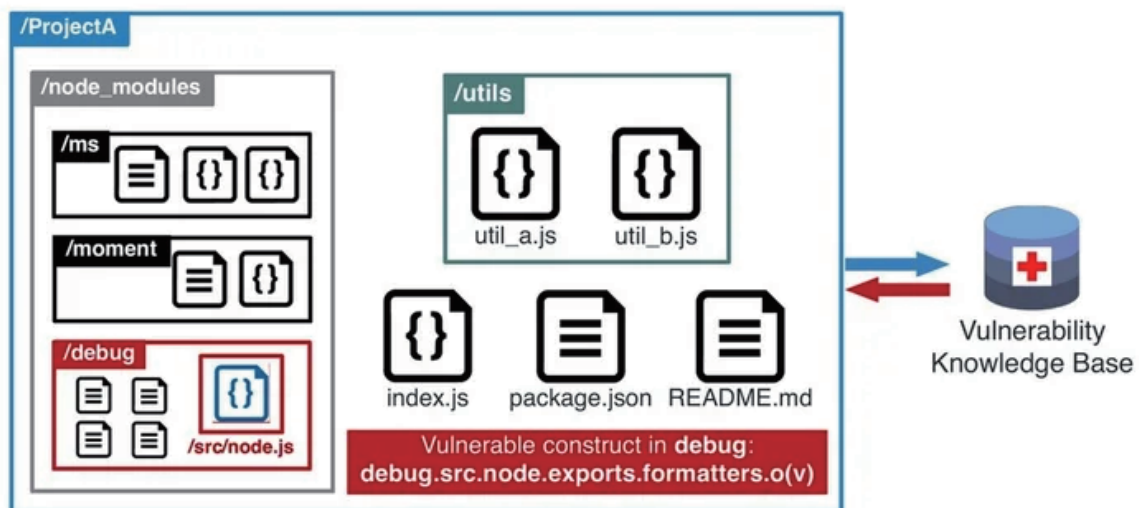
本研究では、ソフトウェアパッケージにおける品質評価と脆弱性伝搬に着目し、バグや脆弱性が残っていない状態にソフトウェアを保つ作業を支援する手法を提案している。

ソフトウェアパッケージの品質評価においては、第三者が作成したライブラリ（サードパーティライブラリ、パッケージの集合）の作成者（エコシステムにおける貢献者）とその利用者（エコシステムにおける一般の開発者）の双方を対象とした調査に基づき、ライブラリを構成するパッケージの特性値を定量化した。その結果、品質評価の観点では、パッケージの作成者と利用者の中で差異はなく、特に、パッケージの実行可能性を重視していることが分かった。さらに、パッケージ特性値を用いてその実行可能性を予測することで、高品質なパッケージの選択支援が可能であることも示した。

ソフトウェアパッケージの脆弱性伝搬については、開発プラットフォーム GitHub上で最大級とされているnpmエコシステムを対象として、サードパーティライブラリについて2009年4月から2020年8月までに提出された脆弱性報告を分析した。その結果、脆弱性伝搬における遅延は、脆弱性の深刻度、および、脆弱性発見からの経過時間、に大きく依存していることが分かった。そこで、パッケージ

に内在する脆弱性コードを検出するとともに、パッケージ利用時に脆弱性コードが実行されるかどうか（到達可能性）を評価する2つのプロトタイプツールをパッケージ利用者向けに実現した。同ツールを用いることで、脆弱性修正にかかわる作業に優先順位をつけ、脆弱性伝播における遅延を低減することができる。

ソフトウェア脆弱性報告の分析



参考文献

- 1) Chinthanet, B., Kula, R. G., McIntosh, S., Ishio, T., Ihara, A. and Matsumoto, K. : Lags in the Release, Adoption, and Propagation of npm Vulnerability Fixes, Empirical Software Engineering, Vol.26, No.47 (Mar. 2021), [doi:10.1007/s10664-021-09951-x](https://doi.org/10.1007/s10664-021-09951-x)

2) Chinthanet, B., Ponta, S. E., Plate, H., Sabetta, A., Kula, R. G., Ishio, T. and Matsumoto, K. : Code-based Vulnerability Detection in Node.js Applications: How far are we?, IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2020) (Sep. 2020), [doi:10.1145/3324884.3421838](https://doi.org/10.1145/3324884.3421838)

(2022年5月17日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2021年9月

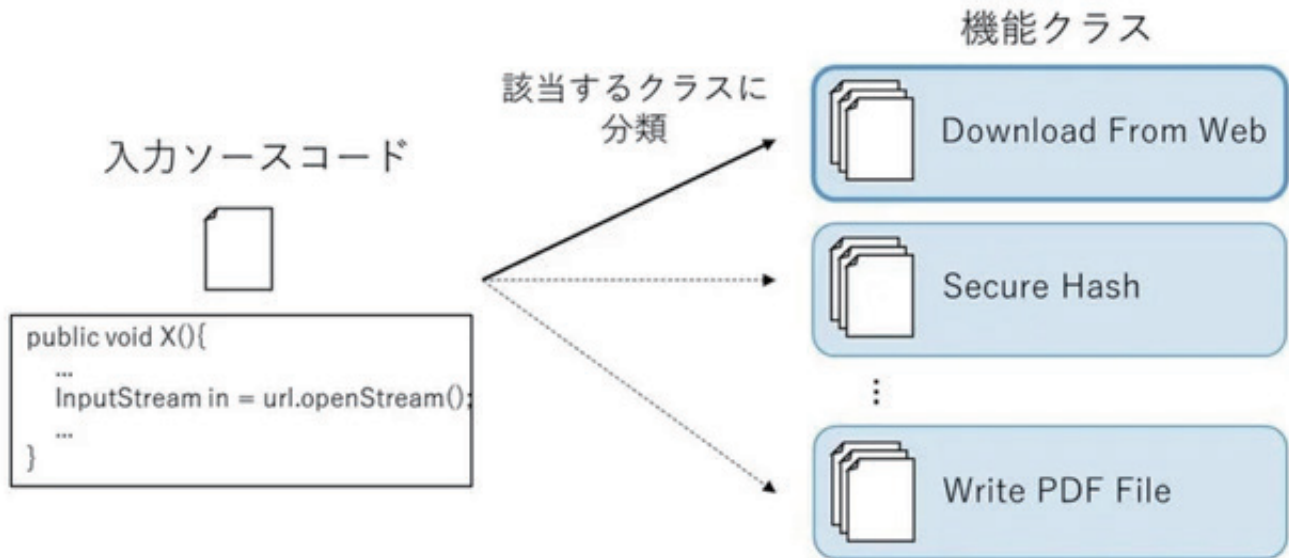
学位種別：博士（工学）

大学：奈良先端科学技術大学院大学

推薦文【コンピュータサイエンス領域】ソフトウェア工学研究会


本論文は、高品質なサードパーティライブラリとそこに含まれるパッケージをソフトウェア開発者が容易に選択することを可能にし、脆弱性伝搬の遅延低減にもつながる明確で具体的な知見を明らかにしている。その手法や得られた知見は、広くソフトウェア開発者支援の高度化、ソフトウェア工学研究の発展に大きく貢献する。

研究生活　私が博士課程に進むきっかけとなったのは、2015年6月から約2カ月間にわたって参加した、奈良先端科学技術大学院大学における研究インターンシップである。私は当時学部3年生で、博士課程への進学、ましてや、日本の大学への留学までは考えていなかった。研究インターンシップでは、ソフトウェアの特性やその開発過程が反映された膨大なデータの解析に取り組んだ。決して楽なものではなかったが、ソフトウェア開発に役立つ具体的な知見が数多く得られるなど、研究への興味が一気に高まった。あれから7年、研究活動が成果になかなか結びつかず迷いが生じる時期もあった。が、今になって思えば、誰も取り組んだことのない研究テーマにチャレンジしていたのだから、少しぐらいの回り道は当然のことであり、あれもこれもが研究者としての糧になっていると感じている。博士課程への進学は、皆さんに苦勞を強いる暗いものではなく、皆さんの可能性を広げ明るい未来をもたらすと、自信を持って言うことができる。



深層学習を用いたソースコード分類に関する研究

♡ 1

 情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:07



2021年度研究会推薦博士論文速報

[ソフトウェア工学研究会]



藤原 裕士
(日本電気 (株) SE)

■キーワード

ソフトウェア再利用／ソースコード分類／深層学習

【背景】 ソースコード分類がソフトウェア開発や保守に有用

【問題】 深層学習をソースコード分類に適用した既存研究が非効率

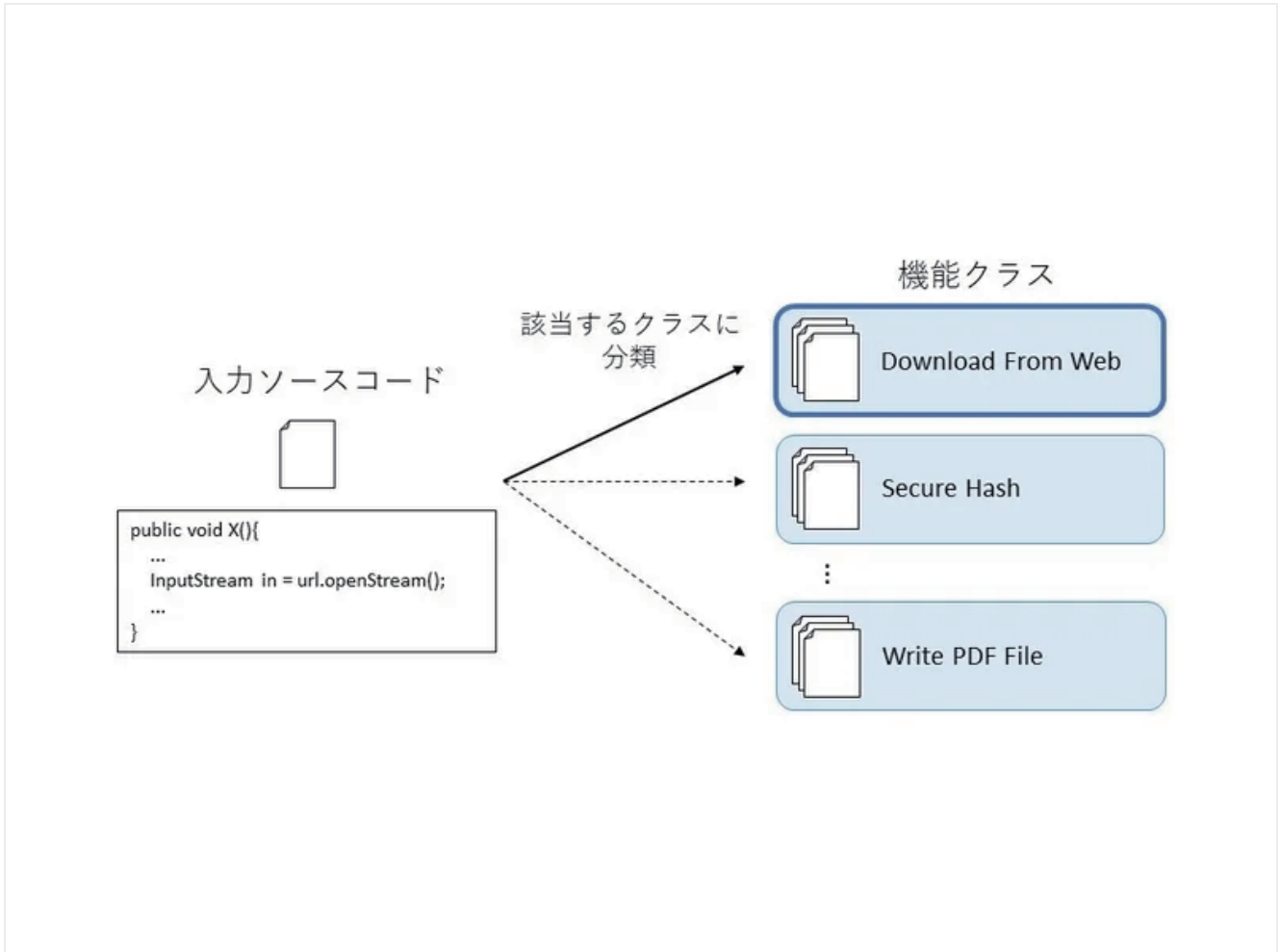
【貢献】 効率的に深層学習を適用するための方法を提案

現代社会では、大規模ソフトウェアを短期間かつ低コストで開発することが求め

られる。この要求を満たすため、ソフトウェア工学の研究が行われている。ソフトウェア工学とは、ソフトウェア開発・運用・保守に、体系的・専門別・定量的なアプローチを適用すること、およびそのアプローチについて研究することである¹⁾

ソフトウェア開発の生産性を向上させる取り組みのひとつにソフトウェア再利用がある。ソフトウェア再利用とは、新たなソフトウェアの開発に既存のソフトウェア部品を再利用することである。ソフトウェア再利用には、ソースコードの設計や記述、テストなどにかかるコストの削減といったメリットがある。そのため、再利用可能なソフトウェアの検索手法の研究が行われている。

ソフトウェア再利用を支援する手法のひとつにソースコード分類がある。ソースコード分類とは、ある基準に基づいて、類似した特徴を持つソースコードを同じクラスに分類する手法を指す。その基準はさまざまで、記述言語、コンポーネント間の依存関係、ソフトウェアの機能性、ファイルの機能性、関数の機能性などがある。このうち、私が研究したのは関数の機能性を基準にした分類で、概要図を以下に示す。



オープンソースソフトウェアリポジトリは、ソースコード分類を検索に活用している一例である。たとえばSourceForgeでは、登録されているソースコードが21種類の機能クラスに分類されてタグ付けが行われている。開発者はこのタグを用いて、要求する条件に当てはまるソースコードの検索を行うことが可能である。このように、ソースコード分類はソフトウェア開発工程の効率化に役立つと言える。

近年、深層学習を用いてソースコード分類を行う研究が盛んである。深層学習の

代表的な定義²⁾ のひとつを以下に示す.

深層学習とは、画像、音声、テキストなどの**データの意味**を理解するのに役立つ、複数のレベルの表現と抽象化を学習することである.

ちなみにソフトウェア工学の分野では、ソフトウェアの“機能性”を、ソフトウェアの“意味”と言い換えることがある。そのため、ソフトウェアの機能性に基づくソフトウェア工学の活動に深層学習が取り入れられるのは自然な流れである.

深層学習を用いたソースコード分類の既存研究の問題点として、私は以下の3つがあると考え、本研究³⁾ でこれらの問題の解決を試みた.

- (a) 学習ソースコード数の問題
- (b) 適切な深層学習モデルの調査不足
- (c) 汎化性能に関する問題

まず、(a) を解決するために、学習ソースコードの一部を変更して新たなソースコードを生成し、それを学習データに追加する手法を提案し、既存手法と精度を比較した.

次に、(b) の状況を鑑み、既存研究で利用されることが多い3種類のニューラルネットワークと2種類のソースコード表現方法をそれぞれ組み合わせた計6種類のソースコード分類手法の精度比較を行い、ソースコード分類に最適な深層学習モデルについての調査を進めた。

最後に、(c) を解決するために、既存研究で多く利用される分類アルゴリズムとは異なるアルゴリズムを使用した手法を提案し、既存手法と汎化性能を比較した。

本研究の詳細については博士論文³⁾に記載したため、お読みいただければ幸いです。

参考文献

- 1) 片山卓也, 土井範久, 鳥居宏次: ソフトウェア工学大事典, 朝倉書店 (1998) .
- 2) Deng, L. and Yu, D. : Deep Learning: Methods and Applications, Found. Trends Signal Process., Vol.7, No.3-4, pp.197-387 (2014).
- 3) 藤原裕士: 深層学習を用いたソースコード分類に関する研究, 大阪大学大学院情報科学研究科 博士学位論文 (2022) .

(2022年5月14日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（情報科学）

大学：大阪大学

推薦文【コンピュータサイエンス領域】ソフトウェア工学研究会

深層学習を用いてソースコード分類を行う既存手法にはさまざまな問題点がある。本論文では、既存手法が抱えるさまざまな問題の提起、問題の解決方法の提案、既存手法との比較や深層学習モデルの汎用性についての調査を行っており、本論文の知見は、深層学習を用いたソースコード分類技術の発展に繋がるものである。

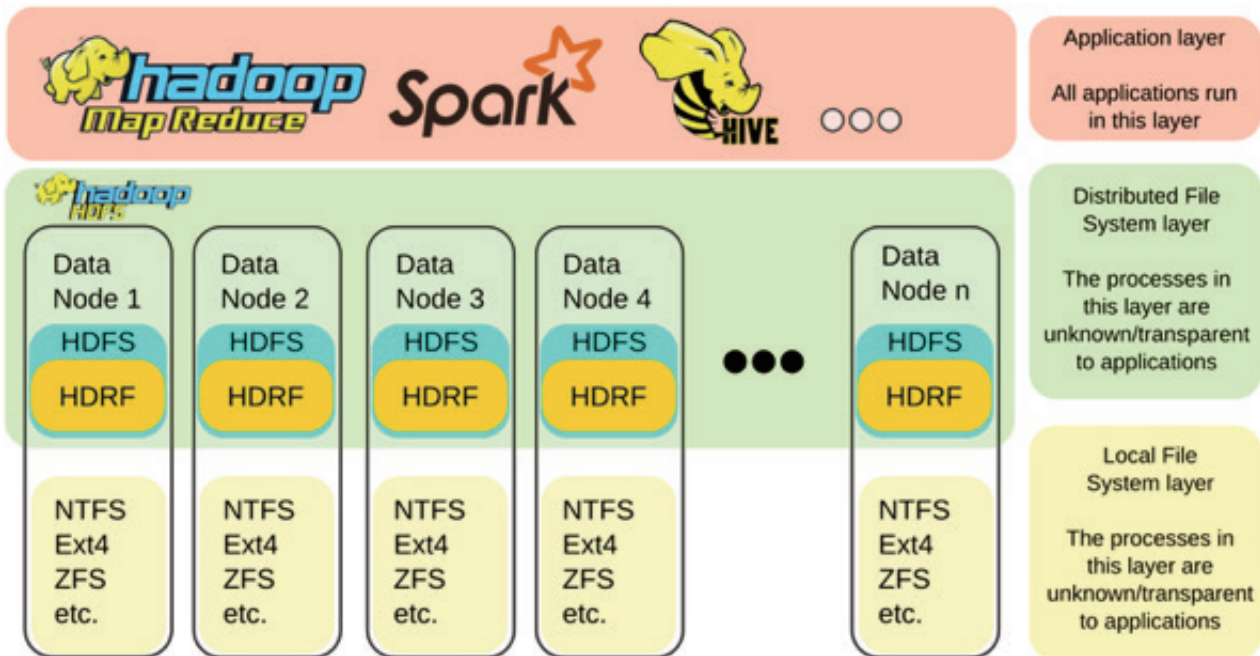
研究生生活

研究テーマを決めたきっかけ：大学の授業を通して、ソフトウェア工学に興味を持ったため、ソフトウェア工学講座の名を冠する研究室の配属を希望した。また、将棋が趣味で、ちょうどその時期に将棋ソフトにも深層学習が取り入れられ始めたため、深層学習にも興味があった。ソフトウェア工学に深層学習を適用する研究をす

れば、2つの興味深い分野について学べると考え、上記の研究テーマに決めた。

執筆・研究生活での体験談・苦労話：一時期、研究室内と共同研究先で1本ずつ、計2本の論文を並行して書く羽目になった。これはややこしくて大変だったので、1本ずつ執筆できるようスケジュールを立て、計画的に進めたほうがよいと思われる。

メッセージ：博士進学すると、修士で就職していった人に比べて有り余る時間を得ることができる。研究に対するやる気さえあれば、その時間を有効に使ってきっと良い経験ができると思うので、ぜひ頑張ってみてほしい。



Design and Implementation of Data Reduction Enabled Distributed File System



情報処理学会・学会誌「情報処理」

2022年8月15日 09:08



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会]

Ryan Nathanael Soenjoto Widodo

(楽天グループ (株))

邦訳：データ削減の可能な分散ファイルシステムの設計と実装

■キーワード

データ削減／分散ファイルシステム／Hadoop

【背景】 分散ファイルシステムにおけるデータ削減

【問題】 従来の手法ではデータ削減方式を実現することが困難であること

【貢献】 あらゆるアプリケーションに対応する分散ファイルシステム用データ削減
フレームワーク

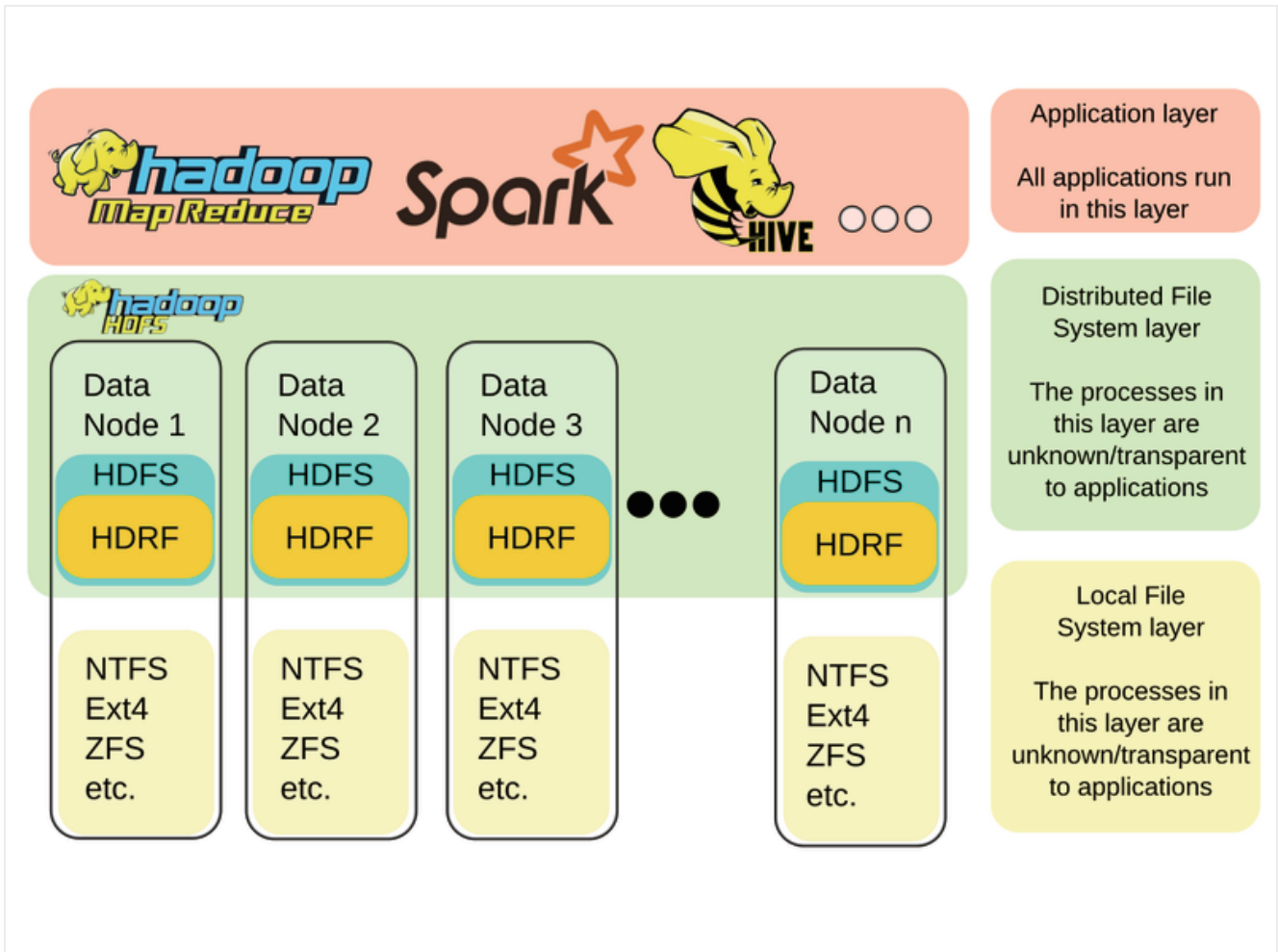
データ駆動型社会において、分散ファイルシステムはその拡張性から普及が進んでいる。分散ファイルシステムは、ストレージディスクの増設やストレージノードの増設により拡張することが可能である。また、データ削減方式によってストレージ効率を向上させれば、同じストレージ容量に保存できるデータ量を増やすことができる。後者は、前者に比べると追加コストは非常に少ないが、より多くの計算処

理とユーザの労力を必要とする。

経済的な観点から見ると、データ削減スキームを使用することは、どのようなストレージシステムにおいても、より多くのデータを保存するための最良の解決策となる。しかし、計算処理が増えることによる余分な待ち時間や、各アプリケーションや設定ファイルにデータ削減方式を追加したり有効にしたりするためのユーザの労力など、隠れたコストが発生する。また、ユーザの手間は、そのまま作業時間の増加やエンジニアの増員につながるため、コスト高になる可能性がある。しかし、この余分な待ち時間は、Lz4やGoogle Snappyなどの高速圧縮アルゴリズム（分散ファイルシステムがこれらのアルゴリズムに対応していることが前提）によって解決可能である。

ユーザの労力を最小限に抑えた上で、分散ファイルシステムでデータ削減を可能にするユニークな解決策に、ZFSのようなデータ削減を実行できるファイルシステムを使用する方法がある。ZFSは圧縮と重複排除を行うことができるが、データ削減スキーム（圧縮アルゴリズム）の選択肢は限られている。ZFSでデータ削減を有効にすること自体は、コマンドラインを入力するか、設定ファイルに行を追加するだけで簡単に実現可能である。しかし、データ圧縮方式の選択肢を増やすには、ファイルシステムのコードを複雑に変更する必要があるため、作業時間や労力が増える可能性がある。

そこで本研究では、Hadoop Distributed File System (HDFS) と呼ばれる分散ファイルシステムにおいて、Hadoop Data Reduction Framework (HDRF) というデータ削減フレームワークの利用を提案している。データ削減フレームワークは、ユーザが新しいデータ削減スキームをHDFSに追加するために使用する簡単なテンプレートを提供することができる。一度追加したスキームは、設定ファイルを通じて有効にすることができ、最も重要なことは、すべてのアプリケーションで動作することである。私たちの経験と実験によると、HDRFへのデータ削減スキームの追加は簡単で、HDFSの性能上のペナルティはごくわずか（5%未満）である。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

<https://www.linkedin.com/in/rnswidodo1/>

<https://orcid.org/0000-0003-3929-7377>

参考文献

1) Widodo, R. N. S., Abe, H. and Kato, K. : HDRF: Hadoop Data Reduction Framework for Hadoop Distributed File system, In Proceedings of the 11th

ACM SIGOPS Asia-Pacific Workshop on Systems, pp.122-129 (Aug. 2020).

2) Widodo, R. N. S., Abe, H. and Kato, K. : Hadoop Data Reduction Framework: Applying Data Reduction at the DFS Layer, IEEE Access, 9, 152704-152717 (2021).

(2022年4月26日)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

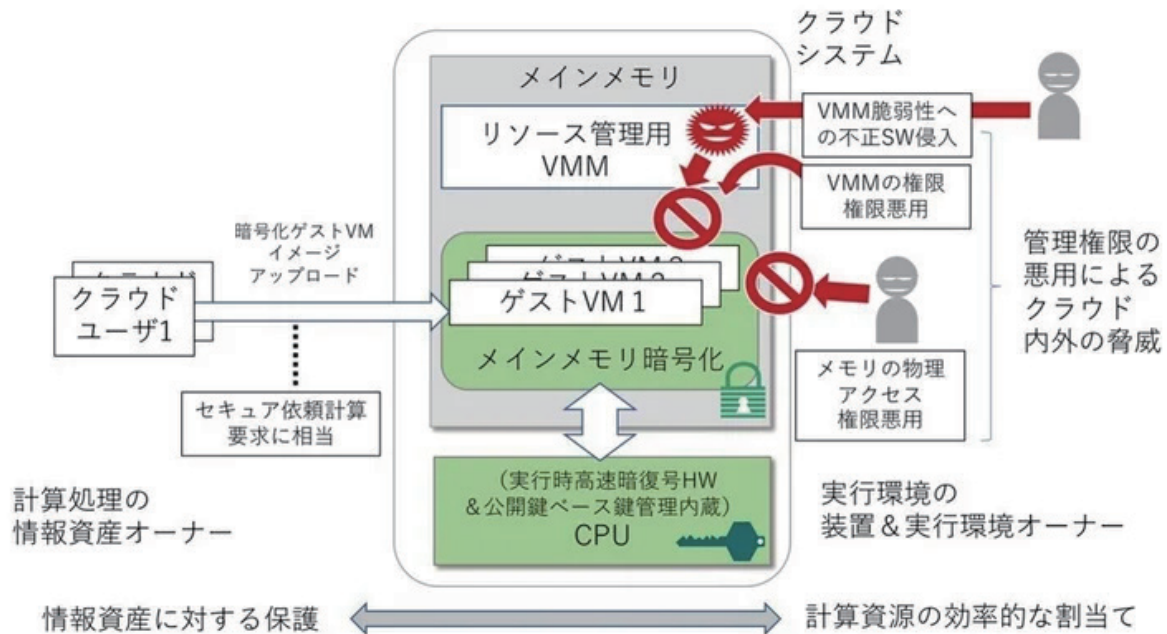
大学：筑波大学

推薦文【コンピュータサイエンス領域】システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会

ビッグデータの処理の高速化には、計算処理の効率化だけでなく、そのデータを保管するストレージについても効率化することが重要です。この研究は、ビッグデータを格納するためのファイルシステムを改良し、データ削減手法を効率的かつ容易かつ導入する方式や、データ削減を効率化する手法について提案しています。

研究生生活 研究テーマを決めるのは、私にとって非常に難しいことであった。当初、私はHadoop分散ファイルシステム上でデータ重複排除を可能にする研究を行いたいと考えていた。しかし、査読者のコメントでその分野の専門家から指摘されたように、より広い応用に役立つように研究テーマを変更する必要があった。私から博士号の取得を目指す人へのアドバイスをするならば、常にフィードバックを得るように心がけ、フィードバックを利用して常に改善することであろう。より質の高いフィードバックを得るには、一流の学会に研究論文を投稿するのが一番である。

博士課程を通じて学ぶことができたのは、知識や専門性だけではない。複雑なアイデアをどう表現するか、査読者のコメントや指導教官の指導にどう耳を傾けるか、そして何より、苦しいときにどう耐えるかを学んだ。加藤和彦先生、阿部洋丈先生、私の家族、そして、日本での留学機会を与えてくれた日本政府の支援に感謝する。



メインメモリの機密性ならびに完全性保護技術の研究



情報処理学会・学会誌「情報処理」

2022年8月15日 09:10



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会]

橋本 幹生

((株) 東芝 研究開発センター サイバーセキュリティ技術開発センター
エッジ&セキュリティ技術開発部)

■キーワード

コンフィデンシャルコンピューティング/メインメモリ暗号化&改ざん検証

【背景】 コンピュータシステムの管理権限や物理アクセス権限の悪用対策

【問題】 メインメモリ情報の暗号化ならびに改ざん検証の実現アーキテクチャ

【貢献】 メモリ暗号化対応CPUと改ざん検証対応VMMの提案ならびに実装評価

サイバー攻撃対策は、コンピュータ研究の大きな課題である。現在のサイバーセキュリティ対策は通信経路の不正アクセス対策が中心だが、クラウドの普及とともに、コンフィデンシャルコンピューティングという、コンピュータ内部のメインメモリを対象とした新しい攻撃対策が普及をはじめている。

本博士論文は、コンフィデンシャルコンピューティングの実用化に先駆けて行ったメインメモリの機密性と完全性に関する2つの脅威シナリオへの対策技術をまとめたものがある。セキュリティ対策では、軽減目標とする想定攻撃を脅威シナリオと呼ぶ。機密性に関する攻撃シナリオでは機密情報の漏洩防止が目標であり、完全性

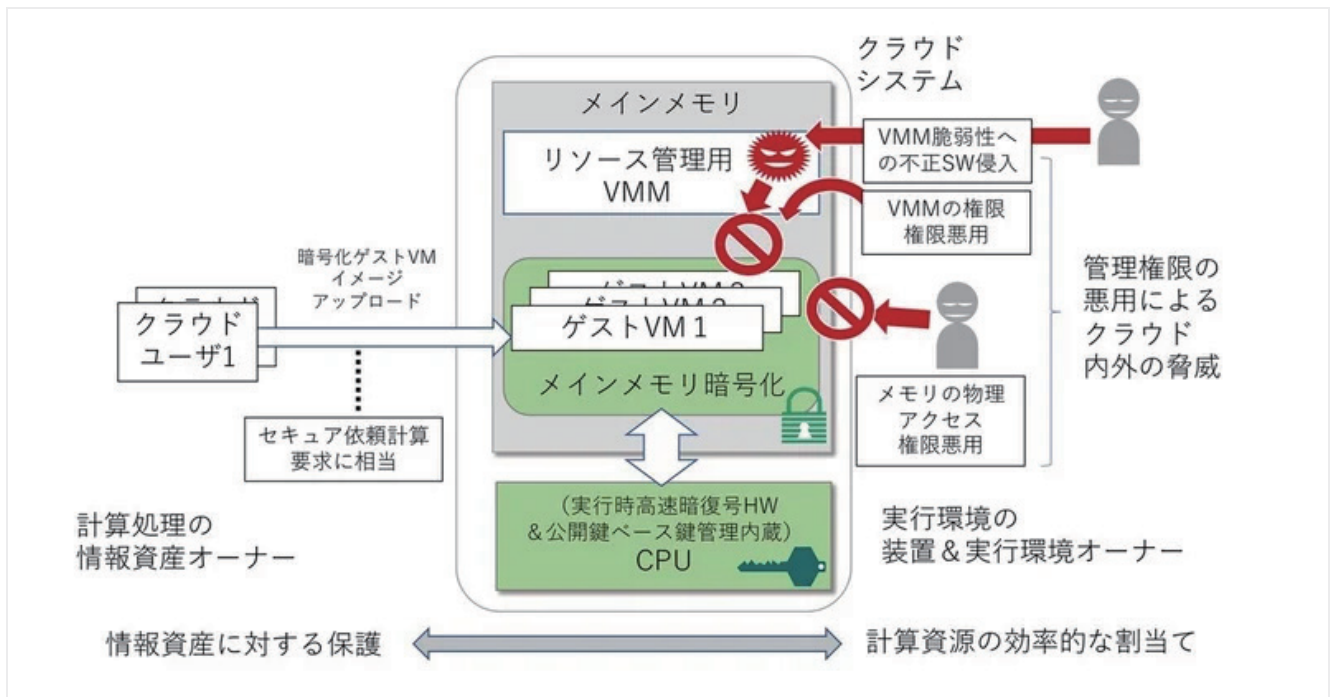
に関する攻撃シナリオでは保護対象情報の改ざん防止が目標となる。

本研究における機密性に関する脅威シナリオはデジタル著作権保護である。PCのDVD再生ではデジタルコンテンツを暗号化して配布し、ソフトウェアが復号処理を行う。過去に、システムを管理するOSの機能を利用して、秘密鍵や暗号化されていないコンテンツをユーザが不正に取得した事例が存在した。通常、OSはプロセス（プログラム）に必要なメモリを割り当て、使用を終えたメモリを回収して別のプロセスに割り当てる。この仕組みは限られた量のメモリを有効利用するために不可欠だが、悪用された場合には秘密鍵を読み出す攻撃手段にもなる。

本研究では、機密保護の対策として保護対象プロセスのメインメモリ上のデータをOSに依存せず保護するCPUハードウェア（HW）を提案している¹⁾、²⁾。CPUがメインメモリから内蔵キャッシュにデータを読み込むときにHW復号処理を行うことで、メインメモリ上のデータが常に暗号化状態となるCPUを試作実証した。暗号化以外に鍵管理やHWアクセス制御などを組み合わせることで、暗号化されたプロセスデータがOSに読み取られない保護機能と、OSがメモリ領域を再配分する機能という一見両立が困難な要求達成できた。

2004年の論文²⁾では、提案方式をクラウドのプライバシー保護に活用するアイデアも公表した（[図参照](#)）。クラウドに処理を依頼するユーザは、通常そこで処理される情報のオーナーでもある。一方、クラウド事業者は計算機のオーナーで

あり、物理的管理権限と、VMM（仮想マシンモニタ）のインストールやメモリ割り当ての管理権限を持つ。もしメモリ内容に対する不正な物理アクセスや、VMMの脆弱性に対する管理の不手際があった場合、ゲストVMの情報が流出の危険にさらされることになるが、メモリ暗号化はこのリスクを低減できる。メインメモリ暗号化は冒頭に述べたコンフィデンシャルコンピューティングの基盤技術であり、本研究はその源流の一つと位置付けることができる。



本研究のもう1つの脅威シナリオは、不揮発メインメモリを採用した社会インフラ機器に対して、物理アクセスによる改ざんを行うことで同機器を誤動作させて、被害を生じさせるものである。現在主流の揮発メインメモリ（DRAM）は電源断によりデータが消えるため、起動時にストレージのデータをメインメモリに展開する

必要がある。不揮発メインメモリ（MRAMなど）は電源断でもデータが保持されるため、あらかじめデータをメモリに展開しておけば電源の再投入と同時に処理を開始でき、省電力化・高速起動の観点で有利となるが、マイナス面として電源断の間にメモリ上の重要データが改ざんされる脅威が生じる。

この問題に対しては、汎用の仮想化機能を用いて、ゲストOSの改造なしで透過的なメインメモリ改ざん検証機能を提供する方式を提案、同機能をVMMとして実装し、LinuxゲストOSの性能評価を行った³⁾。検証ツリーのトポロジをVMM管理のシャドウページテーブルのトポロジと合致させ、両者を一体として管理し効率化することが特徴である。検証ツリーによる大容量メモリ改ざん検出の実用化はまだ模索が続いており、今後の動向に注目している⁴⁾。

参考文献

- 1) 橋本幹生, 春木洋美: 敵対的なOSからソフトウェアを保護するプロセッサアーキテクチャ, 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS) 45(SIG03(ACS5)), 1-10 (2004).
- 2) Hashimoto, M., Kawabata, T. and Haruki, H. : Secure Processor Consistent with Both Foreign Software Protection and User Privacy Protection, Proceedings of Security Protocols Workshop (Cambridge University) , LNCS-3957: 276-286 (2004), doi.org/10.1007/11861386_33
- 3) Hashimoto, M., Yamada, N. and Kanai, J. : TREBIVE: A TREE Based

Integrity Verification Environment for Non-volatile Memory System.,
Proceedings of IEEE PRDC 2015, pp.279-289 (2015)),
doi.org/10.1109/PRDC.2015.45

4) Hashimoto, M. : Overview of Memory Security Technologies, 2021
International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications
(VLSI-TSA), pp.1-2 (2021), [doi: 10.1109/VLSI-TSA51926.2021.9440133](https://doi.org/10.1109/VLSI-TSA51926.2021.9440133)

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

大学：筑波大学

正会員

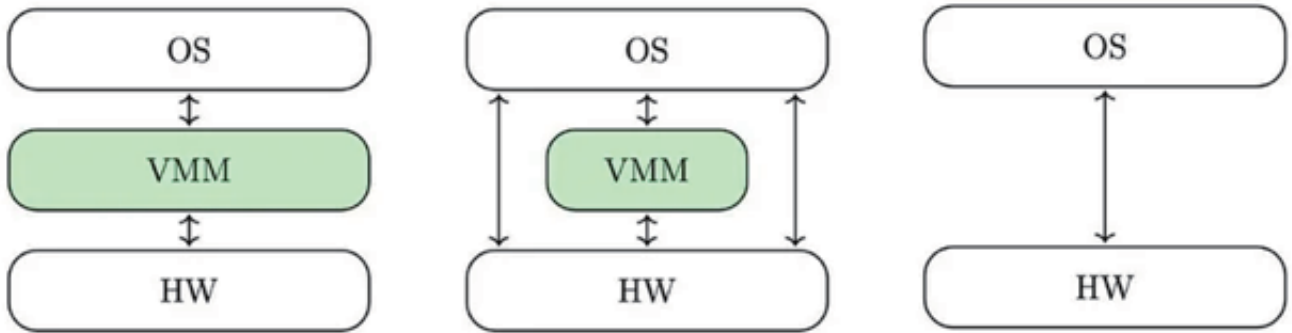
推薦文 [コンピュータサイエンス領域] システムソフトウェアとオペレーティン

グ・システム研究会

この論文では、コンピュータに搭載されたメモリの内容の盗み見や改ざんにそれぞれ

れ対抗するための手法の提案・評価が述べられています。どちらの提案手法も、FPGAやVMM上に実装した上で性能評価が実施され、実現可能性が高いことが示されている点が大変優れています。

研究生生活 この研究は勤務先の業務で行ったセキュリティ要素技術の研究を筑波大学の博士課程早期修了制度でご指導いただき博士論文にまとめたものです。2004年に発表したデジタル著作権保護向けのメインメモリ暗号化は、技術目標は達成できたものの残念ながら事情により実用化には至りませんでした。メインメモリ暗号化は現在コンフィデンシャルコンピューティングとして実用化されており、博士論文で両者の関係をまとめる機会が得られたのはよかったですと思います。メインメモリ暗号化の後、時間をおいて2014年にメインメモリ改ざん検証技術の論文を発表しました。私は学生時代の所属研究室は生命科学系であったため、博士論文の指導と審査をどこで受けるかについて悩みましたが、筑波大学の制度を知って加藤和彦先生、阿部洋丈先生にご相談申し上げたところ、指導をご快諾いただき、博士論文をまとめることができました。この場をお借りしてお礼申し上げます。



A Study on Operating System Virtualization Optimized for Functional Requirements



情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:12



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会]

味曾野 雅史

(ミュンヘン工科大学 博士研究員)

邦訳：機能要件に最適化されたオペレーティングシステムの仮想化に関する研究

■キーワード

仮想化技術／オペレーティングシステム／システムソフトウェア

【背景】 仮想化技術によりシステムソフトウェア機能の拡張が可能

【問題】 仮想化による性能のオーバヘッドや信頼が必要な要素の増加

【貢献】 複数のユースケースで機能要件に最適化した仮想化手法の提案と実現

仮想化とはずばり、物事の間になんか新たな抽象化レイヤーを導入することである。仮想化によって実際には存在しないものを、あたかも存在するかのように見せることが可能となる。仮想化という用語はさまざまな分野で利用されるが、ここでは特にオペレーティングシステム（OS）の仮想化を考える。OSの仮想化技術によって、たとえばWindows OS上のマシンで別のOSであるLinuxを動作させることが可能となる。普段よく耳にするクラウドサービスも、仮想化技術を用いて、1台のサーバ

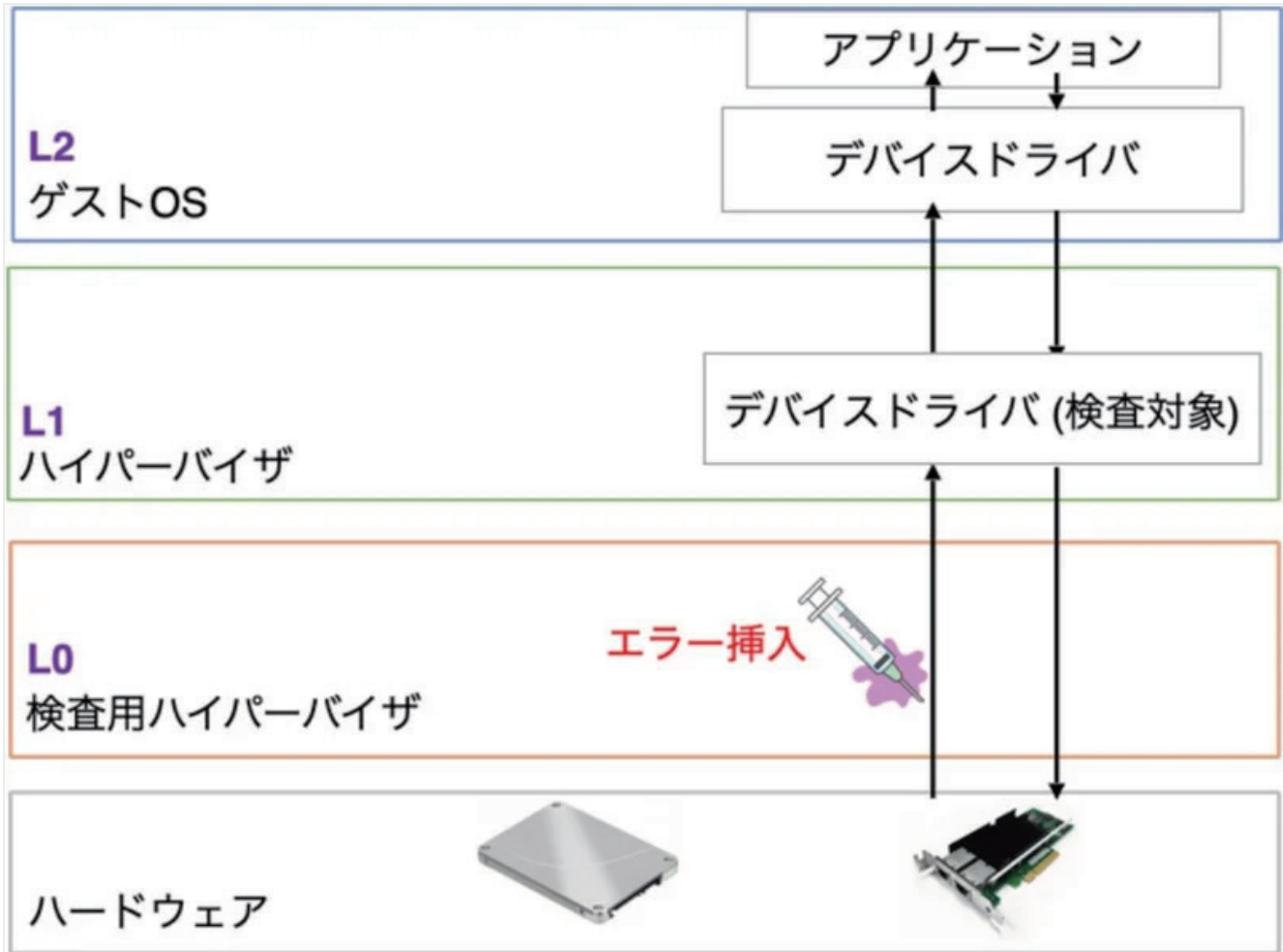
上で複数の（ときには何千台もの）仮想マシンを動作させることで、効率的な計算資源の利用を実現している。

さて、OSの仮想化というと、しばしば今言ったようなクラウドサービスのよう
に複数の仮想マシンを動作させることだと捉えられがちであるが、実際には仮想化
で実現できることはそれだけに限定されない。最初に書いたように、仮想化の本質
とは新たな抽象化レイヤーを導入することで、この抽象化レイヤーを導入するこ
とで、上位のレイヤー（OS仮想化の場合はOSそのもの）に対して透過的に処理が追
加できる点が最大の特徴である。仮想化によって、OSのセキュリティ機能を高め
たり、デバイスの機能を拡張することが可能となる。しかし、仮想化は銀の弾丸で
はない。汎用的な仮想化では、処理のオーバヘッドの増加や、信頼すべきソフトウ
ェアコンポーネントが増大するといった課題が存在する。本研究では、4つのユー
ースケースにおいて、機能要件に最適化した仮想化機構を設計し、通常の仮想化では
避けられない欠点を補う手法を提案した。

研究の1つとして実施したのが、仮想マシンの管理を司るハイパーバイザ
（Virtual Machine Monitor; VMMともいう）のデバイスドライバの検査である
1) , 3) 。デバイスドライバにバグがあると最悪ハイパーバイザ全体にそのバグの
影響が及ぶため、頑健なデバイスドライバはセキュリティ的に重要である。研究で
は、デバイスが故障したときにその故障をデバイスドライバが正しく処理できるか
どうかを、疑似的にエラーを挿入することで検査する手法を提案した（[図参照](#)）。

このとき、検査対象のデバイスドライバを持つハイパーバイザを、検査用のハイパーバイザの上で動作させる。このように入れ子になっている仮想化のことをネステッド仮想化と呼ぶ。通常のネステッド仮想化では、通常の仮想化よりもネストしている分、動作のオーバーヘッドが大きくなる。一方で、効率的な検査のためには動作オーバーヘッドは小さい方がよく、なにより動作オーバーヘッドがあまり大きいとデバイスがタイムアウトなどで通常とは異なる動作をする可能性がある。今回は1つの検査対象のハイパーバイザだけ動作できればよいという点に着目し、汎化に必要なエミュレーション処理を省くことで通常時はネストしていない仮想化と同等の性能を実現した。また実際に提案した手法を利用して、2つの商用ハイパーバイザにおいて複数のデバイスドライバのバグを発見した。

博士研究ではこのほかに、デバイス保護のためのIOMMU仮想化、NUMA環境で性能を最大限引き出すための仮想化²⁾、並びにハイパーバイザによるDDoS防止機構⁴⁾というユースケースに関して研究を実施した。



参考文献

- 1) Misono, M., Hatanaka, T. and Shinagawa, T. : DMAFV: Testing Device Drivers against DMA Faults, In Proceedings of the 37th ACM Symposium On Applied Computing (ACM SAC 2022) (Apr 2022).
- 2) 味曾野雅史, 林 遼, 品川高廣 : 仮想NUMAマシンの性能及び弾力性の向上, 第152回システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会, オンライン (2021年5月), 情報処理学会研究報告, 第2021-OS-152巻, 情報処理学会

(2021年5月) .

3) Misono, M., Ogino, M., Fukai, T. and Shinagawa, T. : FaultVisor2: Testing Hypervisor Device Drivers against Real Hardware Failures, In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom 2018), pp.204-211 (Dec. 2018).

4) Misono, M., Yoshida, K., Hwang, J. and Shinagawa, T. : Distributed Denial of Service Attack Prevention at Source Machines, In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC 2018), pp.488-495 (Aug. 2018).

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（情報理工学）

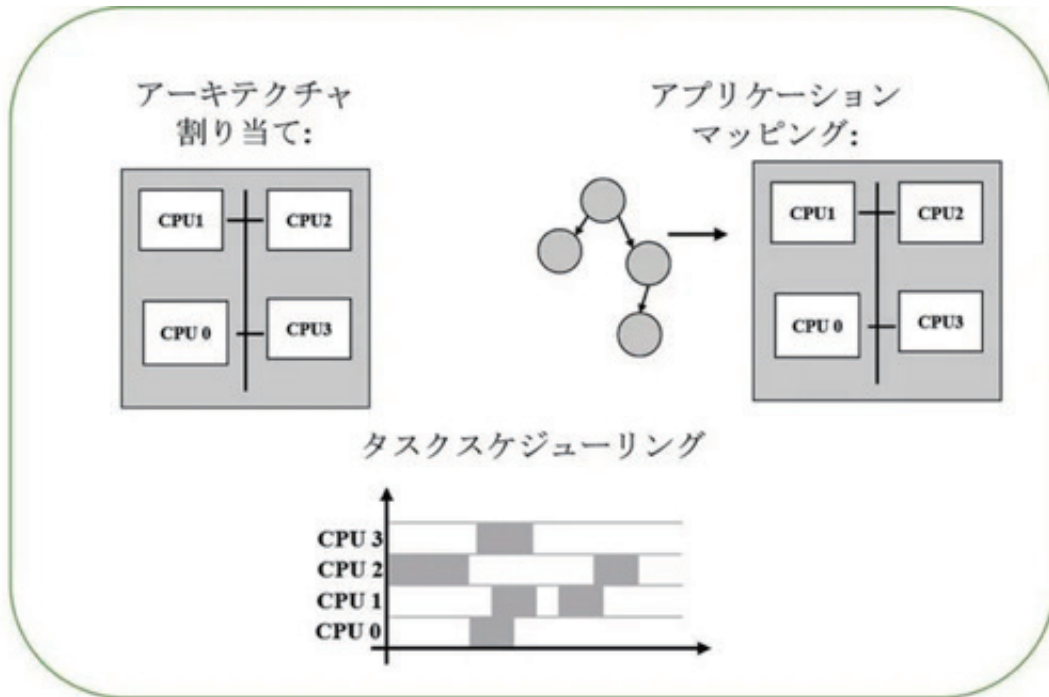
大学：東京大学

正会員

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会

仮想化技術は現代的なコンピュータシステムの構築に欠かせない技術ですが、仮想化するためのコストが大きいことが課題になっています。この研究は、仮想化を応用する先で必要となる機能要件に応じて、仮想化の度合いを変化させて最適化することで、機能と柔軟性のバランスをとることが可能な次世代技術を提案しています。

研究生活 もともとどうやってコンピュータは動いているのだろうか？という漠然とした疑問と好奇心で情報分野に進学しました。学部のあるころはコンピュータを制御しているオペレーティングシステムを勉強すればコンピュータのことが理解できるのでは？と最初は軽い気持ちでいましたが、システムソフトウェア分野は深淵で、研究しても研究しても底が見える気がしません。コンピュータシステムはもはや私たちの生活と切り離すことはできない必須の存在です。それらの基盤を支えるシステムソフトウェアを研究し、多くの人に利用される新しい仕組みができたなら幸せなことですし、何より自分で提案した新しい仕組みが実システム上で機能した瞬間はとても楽しいです。



Multicore Task Scheduling and High-Level Synthesis for Embedded Systems



情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:13



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムとLSIの設計技術研究会]

西川 広記

(大阪大学大学院情報科学研究科 助教)

邦訳：組込みシステム設計におけるマルチコアタスクスケジューリングと高位合成

■キーワード

組込みシステム／マルチコア／タスクスケジューリング

【背景】 組込みシステムにおけるマルチコア・メニーコアの普及

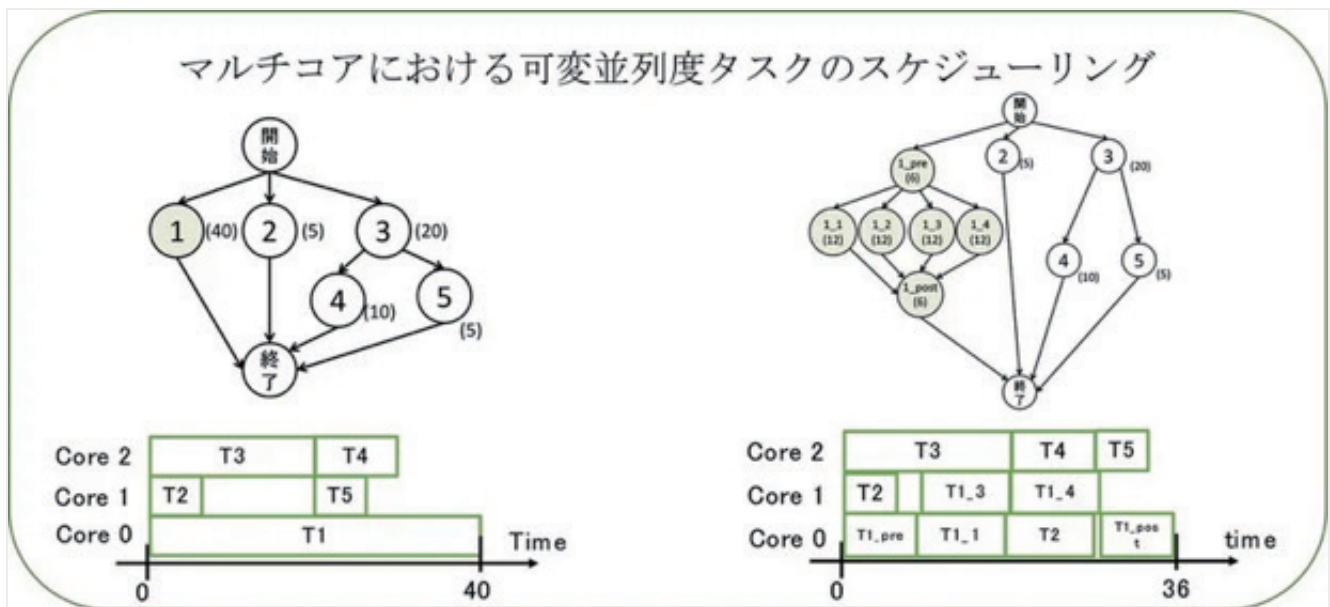
【問題】 マルチコアの能力を最大限に発揮するソフトウェア技術の不足

【貢献】 タスク間とタスク内の並列性を活用するスケジューリング手法の確立

マルチコアアーキテクチャは、組込みシステムの性能を高める技術として注目されている。この技術により、アプリケーションにおける処理単位であるタスクはマルチコアを用いて並列に実行可能となり、シングルコア以上の高性能化が実現される。しかしながら、組込みシステムにおけるコア数の増加に伴ってシステム設計はますます複雑化しており、設計自動化技術のさらなる発展が期待される。なかでも、組込みシステムの要求に応じてタスクの実行順序を最適に決定するタスクスケ

ジューリングと呼ばれる技術は組込みシステム設計においてきわめて重要な要素の一つである。本研究では、マルチコアを効率的に利用する種々のタスクスケジューリング手法を提案する。

タスクスケジューリングとは、アプリケーションにおけるタスクの実行順序を決定し、タスクをコアに割り当てる作業を指す。古典的なタスクスケジューリングでは、複数のタスクを異なるコアに割り当てることによりスケジュール長、すなわち全体の処理時間の短縮を目指す。各々のタスクは1個のコア上で実行されることが想定されていることが多い（図左下）。一方、本研究では、各タスクが複数のコア上で並列に実行されることを許し、各タスクに割り当てるコア数をタスクスケジューリングと同時に決定する（図右下）。



本研究では、このタスクスケジューリング問題に対し、良い解を高速に求める制約プログラミング手法を提案した¹⁾。提案した手法は従来の手法よりも良いスケジュールを発見可能で、スケジュール長を最大で81.9%削減することが示された。さらに、提案手法を2つの方向に拡張した。1つ目の拡張は、データ通信時の遅延の考慮である。マルチコア上では複数のタスクが並列に実行されるが、多くの場合は並列処理のために発生するデータの通信などの遅延によって全体の処理性能が低下する。そこで、データ通信の遅延を考慮したタスクスケジューリング手法を提案した。実験により、提案手法は従来手法に比べスケジュール長を平均22.5%短縮することを示した²⁾。2つ目の拡張は、消費エネルギーの考慮である。高性能だが消費電力が高いコアと、低性能だが消費電力が低いコアの2種類のコアを持つ非均質なマルチコアアーキテクチャを対象として、スケジューリングと同時にコアの種類を最適に決定することにより、総消費エネルギーを削減する。実験により、提案手法は従来手法に比べ最大で12.4%消費エネルギーを削減することを示せた³⁾、⁴⁾

参考文献

- 1) Nishikawa, H., Shimada, K., Taniguchi, I. and Tomiyama, H. : A Constraint Programming Approach to Scheduling of Malleable Tasks, *International Journal of Networking and Computing* , Vol.9, No.2, pp.131-146 (July 2019).
- 2) Nishikawa, H., Shimada, K., Taniguchi, I. and Tomiyama, H. : Mouldable

Fork-Join Task Scheduling Techniques with Inte- and Intra-Task Communications, *International Journal of Embedded Systems*, *Inderscience Publishers*, Vol.15, No.1, pp.69-81 (Apr. 2022).

3) Nishikawa, H., Shimada, K., Taniguchi, I. and Tomiyama, H. : Energy-Aware Scheduling of Malleable Fork-Join Tasks under a Deadline Constraint on Heterogeneous Multicores, *ACM SIGBED Review*, Vol.16, No.3, pp.57-62 (Oct. 2019).

4) Nishikawa, H., Shimada, K., Taniguchi, I. and Tomiyama, H. : Simultaneous Scheduling and Core-Type Optimization for Moldable Fork-Join Tasks on Heterogeneous Multicores, *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol.E105-A, No.3, pp.540-548 (Mar. 2022).

(2022年5月19日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

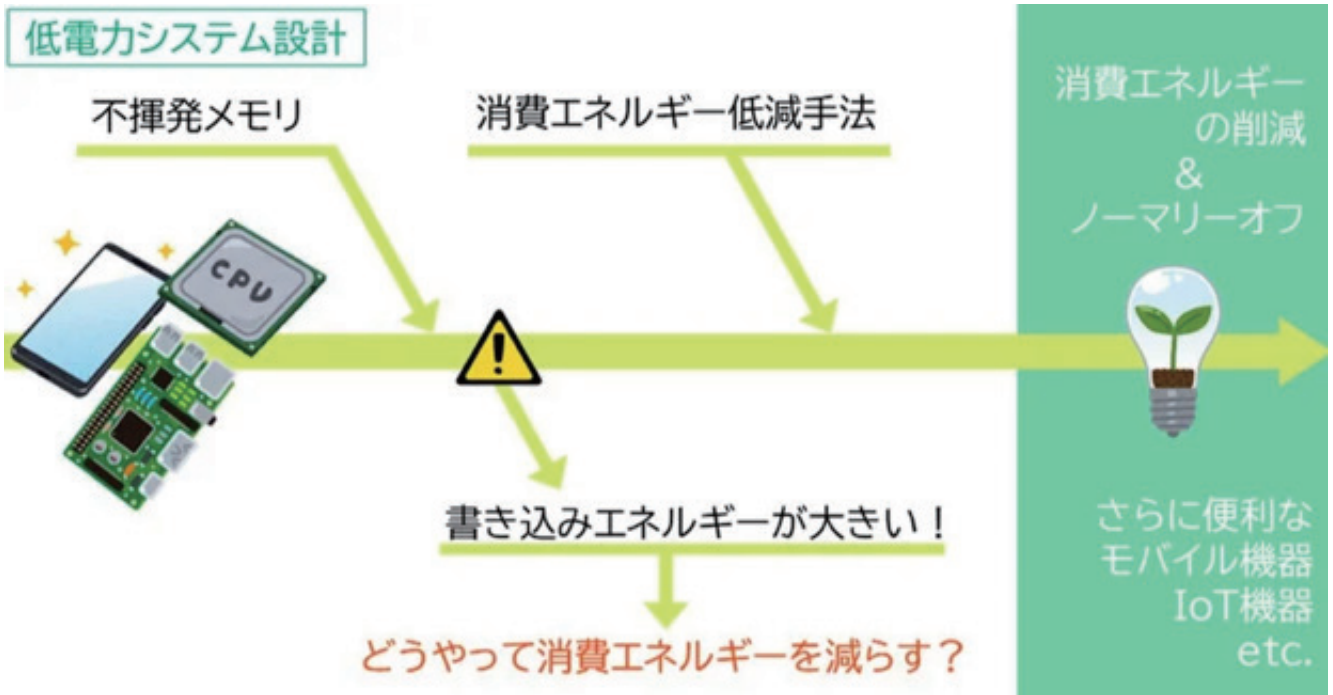
大学：立命館大学

正会員

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] システムとLSIの設計技術研究会

本論文では、マルチコア型の組込みシステムを対象とした種々のタスクスケジューリング手法を提案し、タスク間並列性と各タスク内データ並列性を同時に考慮することで、性能向上または消費エネルギー削減を実現している。今後ますます普及が進むマルチコア組込みシステムのソフトウェア基盤技術として高い価値を有する。

研究生活 学部生で立命館大学富山研究室に配属されて以来、博士課程に至るまで継続してマルチコア・メニーコアにおけるタスクスケジューリングの研究に従事してきました。それに並行し、博士課程ではその他数多くの研究プロジェクトに参画させていただきながらさまざまな関連分野に視野を広げることができました。これらのおかげで、1年短縮する形で本研究を博士論文にまとめることができました。この過程において、指導教員の富山宏之教授、共同研究者の孔祥博助教や大阪大学大学院情報科学研究科の谷口一徹准教授をはじめとして、研究室の先輩や同輩、後輩の皆様には数多くの助言や激励をいただきました。本研究は、これら多くの人々に支えられたからこそ成し得たことだと思います。今後、自身のますますの精進を図るとともに、瞬く間に発展を遂げる情報技術社会の礎として寄与できるよう、研究活動に励んでまいります。



オンチップメモリに不揮発メモリを利用した低電力システム設計手法に関する研究



情報処理学会・学会誌「情報処理」

2022年8月15日 09:15



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムとLSIの設計技術研究会]

松野 翔太

(同志社国際中学校・高等学校 教諭)

■キーワード

不揮発メモリ／低電力システム／ノーマリーオフ

【背景】 オンチップメモリに使われるSRAMのリークエネルギーが大きい

【問題】 代わりに使いたい不揮発メモリは書き込みエネルギーが大きい

【貢献】 不揮発メモリの大きな書き込みエネルギーによる影響を抑える

パソコンやスマートフォンには必ずプロセッサが搭載されている。プロセッサを高速に動作させるためのオンチップメモリに、たとえばキャッシュメモリやレジスタがある。レジスタは計算値の一時保存に、キャッシュはメインメモリへのアクセスコストを低減させる等のために置かれている。オンチップメモリは、期待される役割上、高速に動作するStatic Random Access Memory (SRAM) で構成されている。技術の進歩によって回路の配線幅がますます細くなり（プロセスルールの微細化）、小型で高性能なプロセッサを作ることができるようになったものの、微細化が進むと「漏れ電流（リーク電流）」が増えてしまい消費エネルギーが減りにくくなってしまった。SRAMの記憶素子は複数のトランジスタで構成されているため、トランジスタで生じるリークエネルギーをなくせない。そこで、異なる記憶素

子を使用した不揮発メモリが期待されている。今後の活用が期待されている不揮発メモリには複数の種類があり、いずれもリークエネルギーが小さいが、書き込みエネルギーがSRAMよりも大きい。すなわち、不揮発メモリでは、リークエネルギーの減少による消費エネルギーの減少が期待できる一方、書き込みエネルギーの増大による消費エネルギーの増大が懸念される。

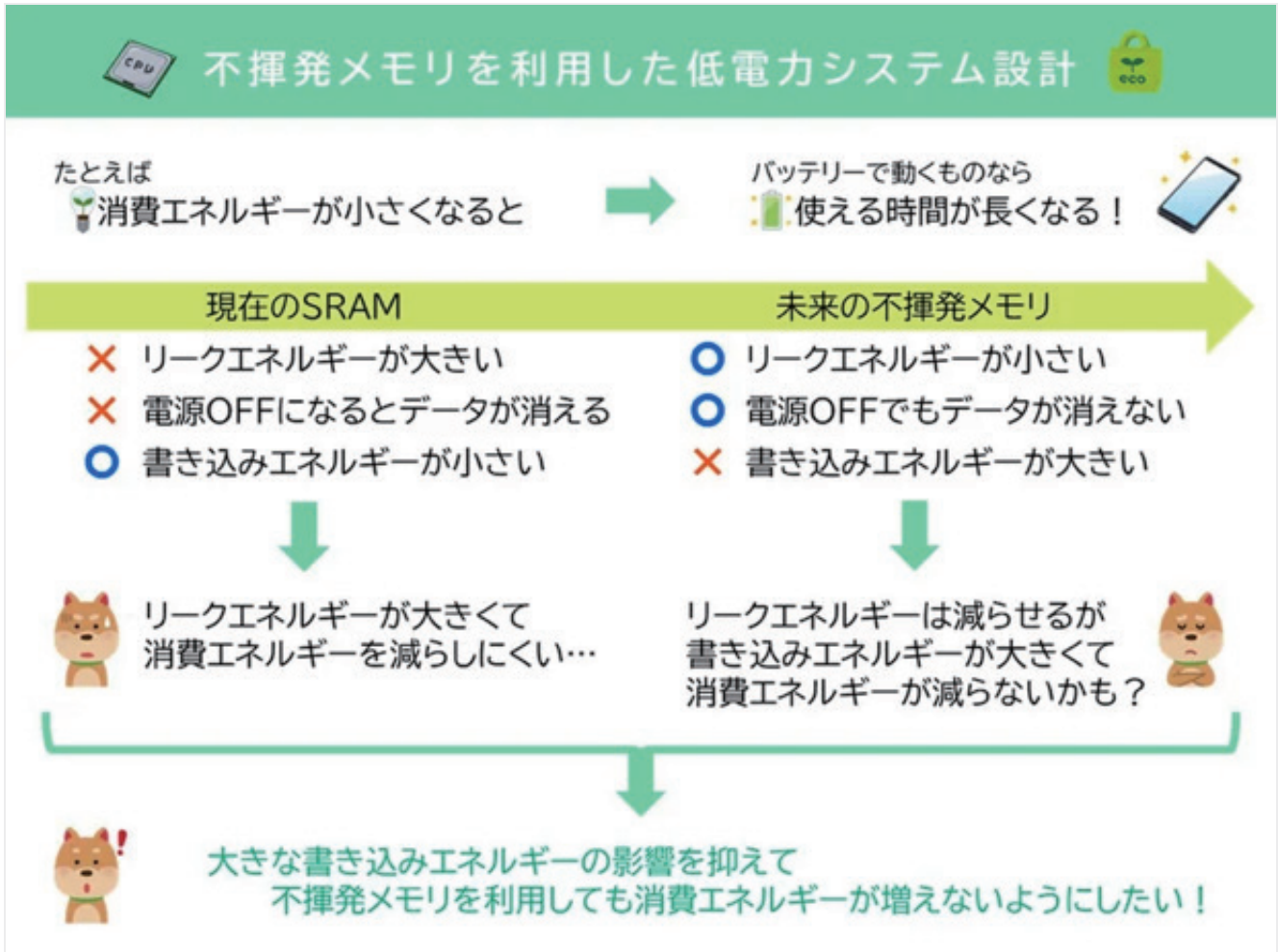
消費エネルギーは小さいに越したことはない。バッテリー駆動機器では、消費エネルギーが減れば動作時間が延びる。モバイル機器やIoT機器の活躍の場が広がる上で一層重要である。また、機器の待機時の消費エネルギーを削減する上で、電源を切ってもデータを失わない不揮発メモリの特性はプラスである。必要なとき以外は電源をOFFにしておくノーマリーオフ動作がしやすくなる。しかし、不揮発メモリを利用することで消費エネルギーが増えてしまっては、かえって動作時間が短くなってしまいかもしれない。

本研究では、不揮発メモリを利用した消費エネルギーの削減を目指している。不揮発メモリは不揮発特性を持つことやリークエネルギーが小さいことがプラスの特徴だが、書き込みエネルギーが大きいことはマイナスの特徴である。不揮発メモリの大きな書き込みエネルギーによって、全体の消費エネルギーも増加しかねない。

まず、二階層キャッシュにおける不揮発メモリ利用時の消費エネルギーの変化を評価した¹⁾。計算モデルを設計し、不揮発メモリを部分的に利用した構成におけ

る消費エネルギーの変化を、さまざまに条件を変えてシミュレーションした。二階層キャッシュにおける不揮発メモリの利用は、書き込みエネルギーが大きい不揮発メモリを利用した場合でも消費エネルギーを削減できるキャッシュ構成が存在し、消費エネルギーの削減に効果的であった。次に、プログラム中のビットパターンを活用したレジスタの消費エネルギー削減手法を提案した²⁾。32bitアーキテクチャでは、個々の命令は32個のビット（0または1）の集まりである。RISC-Vアーキテクチャでのプログラム実行時に出現頻度が高いビットの組合せを解析し、パターンに一致する命令の場合は、パターンに含まれる各ビットへの書き込みを抑制する。計算モデルを設計し、アプリケーションプログラム実行時の消費エネルギーをシミュレーションした。特定のパターンに一致する命令の書き込みエネルギーを主に削減することで、レジスタの消費エネルギーを削減した。

消費エネルギーの削減は、バッテリーや不安定な電源で動作することもあるモバイル機器やIoT機器では特に重要である。オンチップメモリの不揮発化は、リークエネルギーの削減につながるだけでなくノーマリーオフへの道にもつながる。大きな書き込みエネルギーを抑えて消費エネルギーを削減することは、モバイル機器やIoT機器の活躍の場をさらに広げることにつながる。



参考文献

- 1) Matsuno, S., Tawada, M., Yanagisawa, M., Kimura, S., Sugibayashi, T. and Togawa, N.: Energy Consumption Evaluation for Two-Level Cache with Non-Volatile Memory Targeting Mobile Processors, IEIE Trans. SPC, Vol.2, No.4, pp.226–239 (2013).
- 2) Matsuno, S., Tawada, M. and Togawa, N.: Reducing Writing Energy Consumption for Non-Volatile Registers Utilizing Frequent Patterns of

Sequential Bits on RISC-V Architecture, Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2021), pp.64–69 (2021).

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年2月

学位種別：博士（工学）

大学：早稲田大学

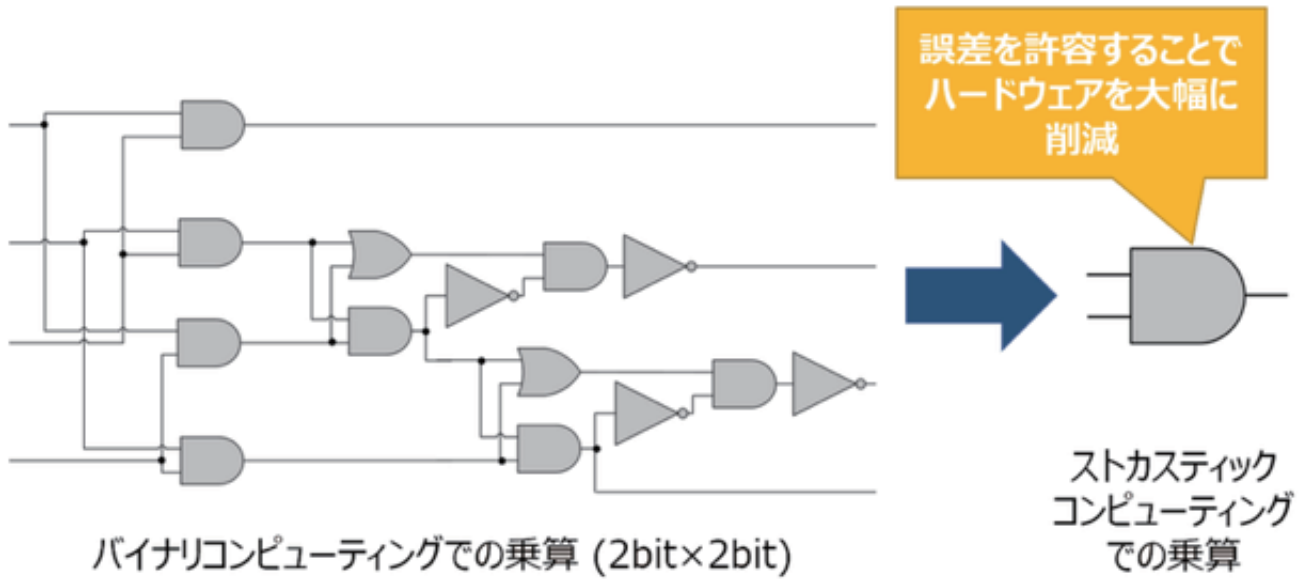
推薦文 [コンピュータサイエンス領域] システムとLSIの設計技術研究会

本論文では、不揮発メモリを用いた二階層キャッシュの有効性を論じるとともに、プログラム実行中のビットパターンに注目し、出現頻度が高いものをあらかじめ記憶することで、不揮発レジスタへの書き込みエネルギーを削減する手法を提案している。ノーマリーオフの実現に不可欠な不揮発メモリの活用に寄与する研究である。

研究生活 研究テーマは、大まかには学部生のころからの継続でした。休学も含め研究期間が長期にわたり、不揮発メモリの新しい試作品が開発されたり、RISC-Vというオープンソースの命令セットアーキテクチャ (ISA) が盛り上がってきたりと、研究内容を左右しうるさまざまなことがありました。それでも何とか続けられたのは、研究環境に恵まれ長期にわたり研究サポートを得られたからでした。

博士課程の学生にとって、学費と生活費の工面は、多くの人にとって大きな問題だと思います。私の場合は博士課程の途中でフルタイム労働者になったため、研究に使える時間は大幅に減り休学もしましたが、学費と生活費を捻出できなくなる心配が減りました。博士課程には修士課程からストレートに進学するルートが多いと思いますが、費用の懸念を払拭してからでもよいと思います。

博士号 (Ph.D.) を取得する過程、研究のサイクルを繰り返すことは非常に価値のある経験です。今これを読んでいるジュニア会員の皆さんは、ぜひ人生のどこかで考えてみてください。



Hardware Optimization of Stochastic Computing



情報処理学会・学会誌「情報処理」

2022年8月15日 09:17



2021年度研究会推薦博士論文速報

[システムとLSIの設計技術研究会]



石川 遼太
(日本IBM)

邦訳：ストカスティックコンピューティングのハードウェア最適化

■キーワード

ストカスティックコンピューティング／概算演算／論理回路設計

【背景】 データ処理の大規模化・高度化に伴うハードウェアコストの増加

【問題】 概算演算回路における汎用的な関数表現の制限

【貢献】 新たな回路の実現による表現可能な関数の拡大

近年、スマートフォンやパーソナルコンピュータなどの汎用ハードウェア機器だけでなく、画像処理による自動運転や、機械学習を用いたスマートスピーカーなど、専用ハードウェア機器も多数開発され、大規模なデータ処理が実現されている。また、組込みプロセッサなどのプログラム可能な部品により、ハードウェア機器を書き換え、データを処理させることもできる。実装するアプリケーションによっては必ずしも高精度な演算が必要となるとは限らない。特に、画像処理や機械学習では誤差があっても結果に影響を与えにくい。こうした背景から、演算に誤差を許容することでハードウェアの回路面積を小さくする概算演算が注目されている。

概算計算の一種であるストカスティックコンピューティング (Stochastic Computing, SC) は、数値をストカスティック数 (Stochastic Number, SN) と呼ぶビット列で表現し演算することで、回路面積が大幅に削減される。SNはビット列中の「1」の割合で数値が定義される。これにより、SN同士の乗算・加算は、精度によらずそれぞれ1つの論理積ゲート・選択ゲートによって表現される。つまり主要な算術演算が非常に単純な回路で実現される。

一方、SCでは関数表現の制限が大きな問題点である。その問題点の要因には大きく2つあり、1つ目はSNの複製である。一般に複雑な演算では、同じSNを複数の論理ゲートに入力する必要があるが、このときにSNの複製が必要となる。しかし、複製されたSNのビット列同士に相関があると期待通りの演算が実現できず許容できない大きな誤差の要因となる。2つ目の問題は、SCにおいて非連続な関数の

表現である。一般にSCによって連続関数を表現する方法はいくつも提案されているが、ステップ関数など実用上よく知られる非連続関数を汎用的に実現する方法は知られていない。

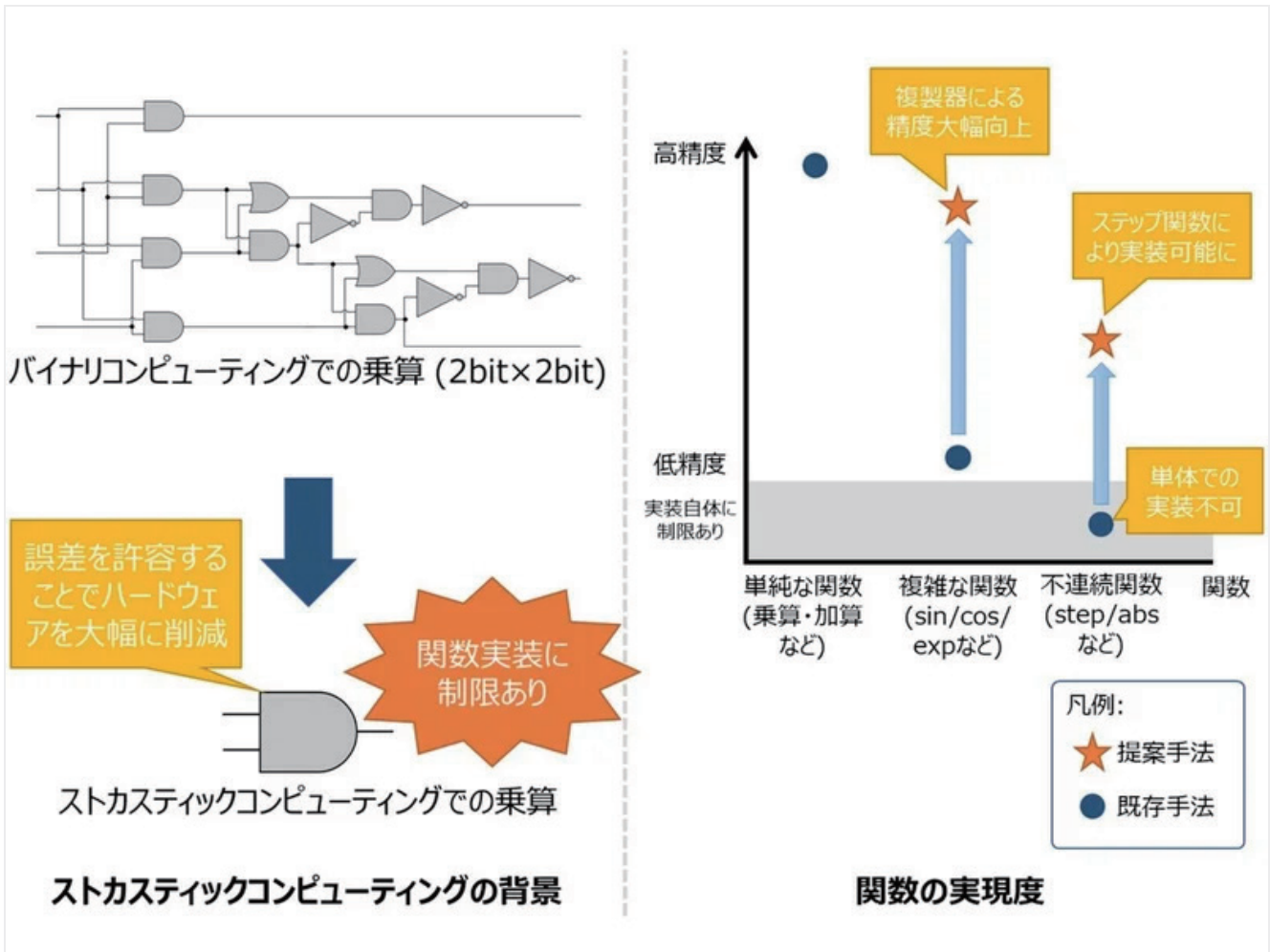
以上の背景のもと、効率の良いSN複製器と、SNを用いた非連続関数回路を実装し、評価した。本研究は、以下の3部で構成される。

第1部では、2種類のSN複製器を提案している。FSR (Flip-flop Selecting circuit using a Random bit stream) 複製器とRRR (Register based Rearrangement circuit using a Random bit stream) 複製器である。これらの複製器は、SNを入力すると、入力と値は等しく、相関が少なく、なおかつ異なるビット列のSNを生成する。複数の関数に対し、提案した2つの複製器を評価した結果、真値と比較し十分に誤差を小さくした演算が可能であることを確認している。RRR複製器は特に誤差が小さいことを確認している。

第2部では、第1部で提案されたRRR複製器を拡張し、 2^n RRR複製器を提案している。 2^n RRR複製器は、 2^{n-1} 個のRRR複製器を構成したもので、ハードウェアコストと精度をスケラブルに両立することを可能とする。理論的に n の値を大きくし、SNを表現するビット数を大きくすることで、誤差を小さくした演算が実現される。実際に提案した 2^n RRR複製器を用いて複数の関数で評価した結果を報告している。

第3部では、SNを用いた非連続関数の表現を提案している。非連続関数としてステップ関数を表現し、さらに別の関数を組み合わせることで、さまざまな非連続関数を表現している。実験で誤差評価する同時に、SNを表現するビット列が十分に長ければ、提案する表現は真の非連続関数に収束することも理論的に証明している。

以上、本研究では、概算計算の中でもSCに着目し、SNの複製と非連続関数の最適なハードウェア構成を提案し理論的・実験的に評価している。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

<https://www.togawa.cs.waseda.ac.jp/~ryota.ishikawa/>

参考文献

1) Ishikawa, R., Tawada, M., Yanagisawa, M. and Togawa, N. : Stochastic Number Duplicators Based on Bit Re-arrangement Using Randomized Bit Streams, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics,

Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.7, pp.1002–1013
(July 2018).

2) Ishikawa, R., Tawada, M., Yanagisawa, M. and Togawa, N. : Scalable Stochastic Number Duplicators for Accuracy-flexible Arithmetic Circuit Design, IPSJ Transactions on System LSI Design Methodology (T-SLDM), Vol.13, pp.10–20 (Feb. 2020).

3) 石川遼太, 多和田雅師, 戸川 望 : ストカスティック数を用いた絶対値関数及び不連続関数の実装と評価, 情報処理学会DAシンポジウム論文集, pp.65–70 (Sep. 2021).

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

大学：早稲田大学

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] システムとLSIの設計技術研究会

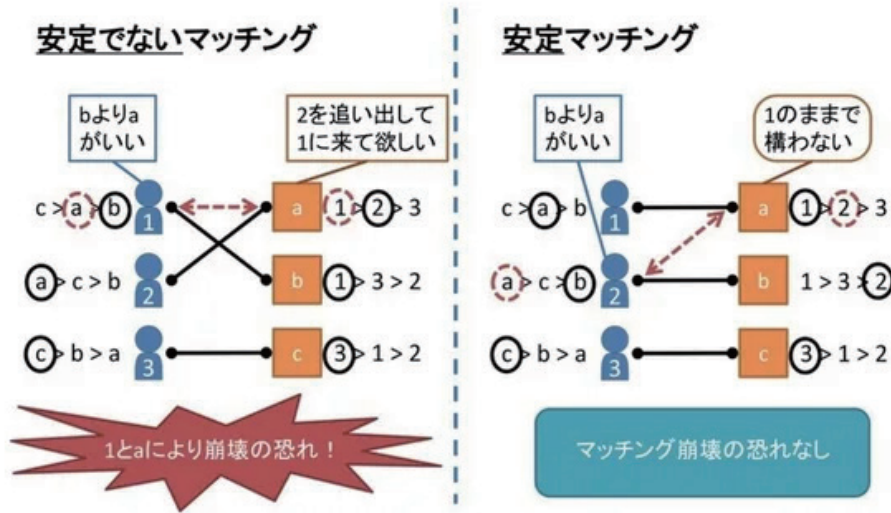
本論文では、概算計算の一種であるストカスティックコンピューティングを対象に、ストカスティック数の複製ならびにストカスティック数を用いた非連続関数を実現する効率的なデジタル回路構成を提案し、理論的・実験的な評価を行っている。高度情報通信社会に不可欠である概算計算技術の発展に寄与する研究である。

研究生活 研究テーマを決めたきっかけは、B3のときに勧められたことでした。回路の研究でありながら理論的に優位性を証明できるところに惹かれて研究にのめり込んでいました。学部・修士で研究を終わらせることがもったいないと感じたのと、経済的な負担の目途が立ったことで、博士後期課程への進学を決意しました。学費の捻出のため、課程の最後の2年間は企業でも働いていました。研究活動との両立には少々苦労しましたが、無事学位を所得できる運びとなり大変嬉しく思います。

学部・修士・博士と社会人を経験してみて感じたのは、「自分が本当にやりたい研究は博士課程でしかできない」ことです。やりたいことがあって博士進学を考えている方はぜひ検討いただければと思います。

最後に、博士号取得までの全過程においてご指導いただきました戸川望教授、多和田雅師先生、研究活動を支えてくださった研究室の皆様はこの場を借りて深くお

礼申し上げます.



安定マッチング問題の基本形 → 効率的なアルゴリズムが存在
 様々な条件付きの問題 → ?

Algorithms for Stable Matching Problems toward Real-World Applications



情報処理学会・学会誌「情報処理」
 2022年8月15日 09:18



2021年度研究会推薦博士論文速報

[アルゴリズム研究会]

濱田浩気

(日本電信電話 (株) NTT社会情報研究所 主任研究員)

邦訳：現実世界での応用に向けた安定マッチング問題のアルゴリズム

■キーワード

アルゴリズム理論 / 計算複雑さ / 安定結婚問題

【背景】 世の中にはマッチングを求めたい場面が多い

【問題】 実用の際に要望されるさまざまな条件付きの問題の難しさは不明

【貢献】 いくつかの条件下の問題の難しさの解明

生徒の学校への配属や大学での学生の研究室配属のように、2つの集合間で割り当て（マッチングと呼ぶ）を決めたい場面は多くある。安定マッチング問題は、各参加者がもう一方の集合内の参加者を好みの順に順位付けしているときに、どの参加者の2人組も現在の割り当てを壊す動機を持たないという、安定性と呼ばれる良い性質を持つマッチングを求める問題の総称である。

安定マッチング問題の基本形に対しては、常に安定マッチングが存在してその1つを効率良く計算する方法（アルゴリズムと呼ばれる）が知られている。このような、良い性質を持つマッチングを効率良く計算できるという実用性の高さから、安定マッチング問題はボストンの高校配属や日本の研修医の病院配属にも使われている。

安定マッチング問題の現実世界への応用をさらに進める際には、たとえばカップルを近くの病院に配属させたい、などのさまざまな追加の条件が望まれる。しかし条件次第で安定マッチングが存在しなかったり効率的な計算が難しかったりすることがある。そこで本研究ではさまざまな条件付きの安定マッチング問題の難しさの解明を目指し、以下の3つの観点から安定マッチング問題のアルゴリズムの研究を行った。

1. できるだけ安定なマッチングを求める問題

これまでに提案された安定マッチング問題の多くでは、安定でできるだけ多くの人がマッチするマッチング、のように安定マッチングの中で条件を満たすものを求めていた。しかし、応用によっては安定性より別の条件を優先したい場合がある。たとえば、研究室配属ではいくらマッチングが安定であっても一部の研究室に学生が偏っては困る。そこで、偏りが一定以下でできるだけ安定なマッチングを求める問題の定式化や、効率的なアルゴリズムの研究を行った¹⁾、²⁾。

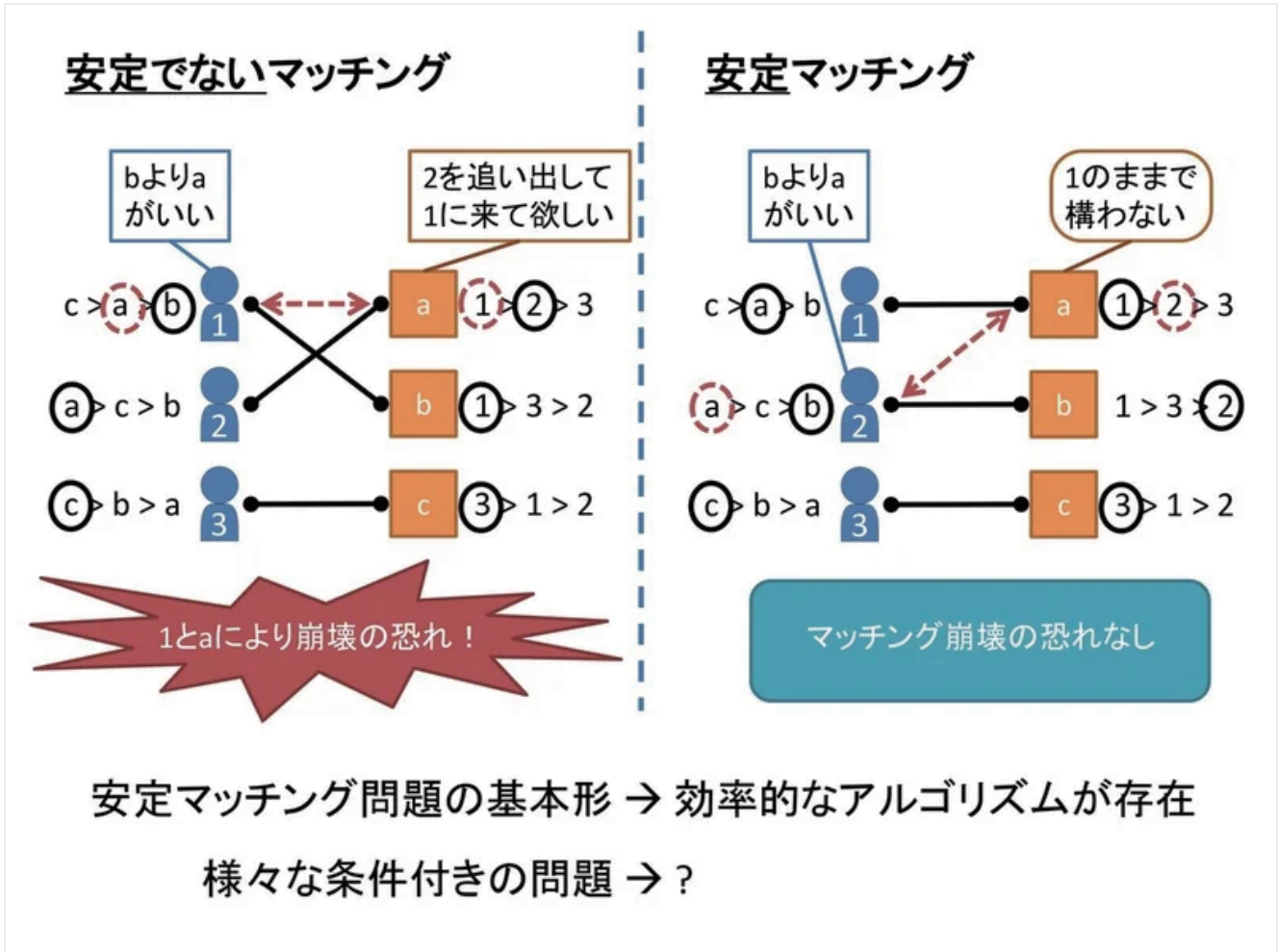
2. 物理的制約下の安定マッチング問題

現実世界では物理的な制約によりマッチングを実現できない場合がある。たとえば、配線同士の交差が許されないような場合である。このような制約を定式化して、参加者が平面上に配置されているときに、割り当てられた参加者同士を結ぶ線分が交差しないような安定マッチングを求める問題が考えられている。本研究ではこの問題を拡張したいくつかの問題を考え、効率的なアルゴリズムの提案や効率的に解くことが難しいことの証明を行った³⁾。

3. 耐戦略性を持つアルゴリズム

安定マッチング問題に対するアルゴリズムの性質の1つに、耐戦略性と呼ばれるものがある。耐戦略性は、どの参加者も希望順位を偽ってより望ましい結果を得ることができないという性質である。たとえば研究室配属を耐戦略性を持つアルゴリズムで行う場合は、あえて第2希望の研究室を第1希望と書いても得をしないため、学生は安心して正直な希望順位を提出することができる。本研究ではいくつかの拡張問題に対して耐戦略性を持つアルゴリズムの提案やアルゴリズムが存在しないことの証明を行った⁴⁾。

本研究ではこれら3つの観点からの研究により、さまざまな条件下での安定マッチング問題の計算の難しさの解明に貢献できたと考えている。



参考文献

- 1) Hamada, K., Iwama, K. and Miyazaki, S. : An Improved Approximation Lower Bound for Finding Almost Stable Maximum Matchings, Inf. Process. Lett. 109(18): 1036-1040 (2009).
- 2) Hamada, K., Iwama, K. and Miyazaki, S. : The Hospitals/Residents Problem with Lower Quotas, Algorithmica 74(1): 440-465 (2016).
- 3) Hamada, K., Miyazaki, S. and Okamoto, K. : Strongly Stable and Maximum

Weakly Stable Noncrossing Matchings, *Algorithmica* 83(9): 2678-2696
(2021).

4) Hamada, K., Miyazaki, S. and Yanagisawa, H. : Strategy-Proof
Approximation Algorithms for the Stable Marriage Problem with Ties and
Incomplete Lists, *ISAAC 2019*: 9:1-9:14.

(2022年5月31日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（情報学）

大学：京都大学

正会員

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] アルゴリズム研究会

卒論生の研究室配属のようなシステムをモデル化した組合せ問題の一つとして、安定マッチング問題があります。本論文では、利用局面に応じて修正を施したいいくつかの問題に対し、効率的なアルゴリズム設計や計算困難性に関する成果を得ていま

す。得られた成果はAlgorithmica, IPL, ESA, ISAACといった国際的に評価の高い論文誌や国際会議で発表しています。

研究生活 私は修士課程を修了して一般企業に就職後、会社員をしながら博士課程に進学した。研究テーマの候補としては、会社での研究と修士課程で研究していた安定マッチング問題の2つを考えた。選択の決め手は修士課程からお世話になっていた先生にご相談に伺ったところ受け入れてもかまわないと言ってくくださったことと、安定マッチング問題がとてもおもしろいことであった。

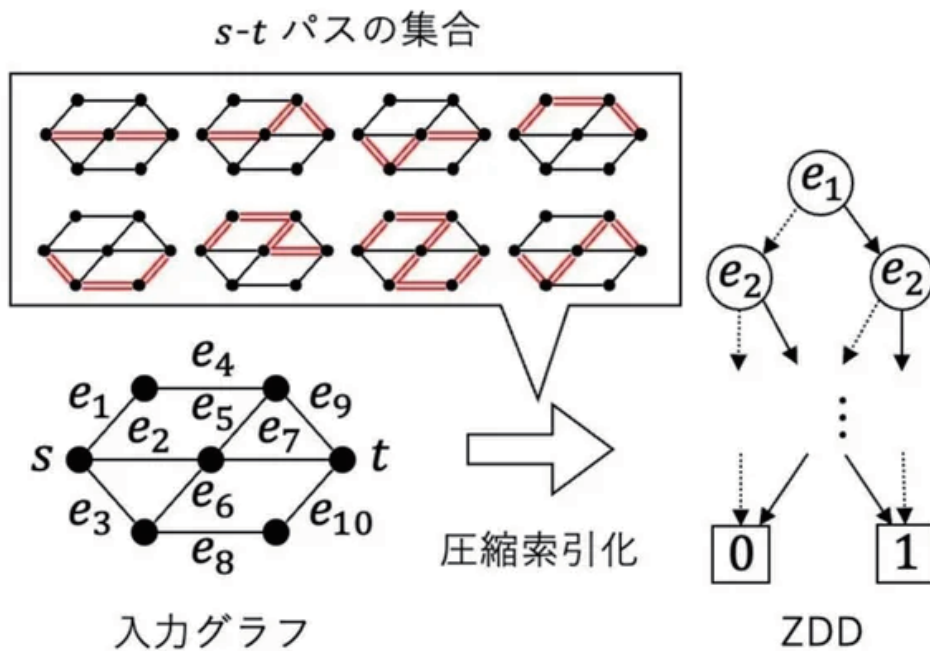
進学後は、会社での研究活動と並行して博士課程の研究や執筆を進める必要があった。ある程度の困難は覚悟をしていたつもりであったが、なかなかまとまった時間を確保できない中での研究はやはり大変であった。それでも研究は楽しく、また鍛えていただける貴重な機会を得られ、進学することにしてよかったと思う。

最後に、この場を借りて博士課程でお世話になった皆様にあらためてお礼申し上げたい。多くの方に助けていただいたおかげでなんとか修了することができた。



▲ 新型コロナウイルスに関する内容の可能性のある記事です。

新型コロナウイルス感染症やコロナワクチンについては、必ず1次情報として厚生労働省や首相官邸のウェブサイトなど公的機関で発表されている発生状況やQ&A、相談窓口の情報もご確認ください。*非常時のため、すべての関連記事に本注意書きを一時的に出しています。



Studies on Implicit Graph Enumeration Using DDs



情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:19



2021年度研究会推薦博士論文速報

[アルゴリズム研究会]

中畑 裕

(奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科情報科学領域 助教)

邦訳：決定グラフを用いた暗黙的グラフ列挙に関する研究

■キーワード

決定グラフ／列挙／アルゴリズム

【背景】 グラフ中のパスやサイクルなど，部分グラフの列挙は重要

【問題】 部分グラフの数は膨大で，すべてを陽に列挙することは困難

【貢献】 決定グラフを用いた暗黙的グラフ列挙アルゴリズムを提案

決定グラフを用いた暗黙的グラフ列挙

グラフとは，頂点と辺の集合で表現される離散構造である．グラフは最も基本的

な離散構造の1つであり、通信網、道路網、人間関係など、実世界の様々なネットワーク構造を数学的にモデル化するために広く使われている。与えられたグラフの中に内包されている部分グラフを解析することは、グラフに関する多くの組合せ問題を深く理解するために重要である。

近年、決定グラフ (DD) と呼ばれる圧縮データ構造の技法が進展しており、従来、陽に列挙することが不可能だった膨大な個数の組合せ集合データを、圧縮して暗黙的に効率よく表現することが可能となってきた。この技法を用いて、グラフに含まれる膨大な個数の部分グラフをDDにより暗黙的に列挙することで、グラフに関するさまざまな問題の厳密解を高速に求めることや、解の個数を厳密に数え上げることが可能となる。本研究は、DDを用いた部分グラフ列挙の技法について、いくつかの暗黙的列挙アルゴリズムを提案し、それらのアルゴリズムの計算量を理論的に見積もるとともに実験的に効率を評価したものである。

本研究では4つの問題を扱ったが、本稿では特に「禁止マイナー制約を満たす部分グラフの列挙」¹⁾ について紹介する。この研究では、DDで効率よく列挙できる部分グラフの種類を飛躍的に拡大した。

従来のDDによる部分グラフ列挙法では、部分グラフの各頂点の次数（接続する辺の本数）と頂点同士の連結性によって特徴づけできる部分グラフ（たとえば、パス、サイクル、全域木、クリーク、マッチングなど）を効率良く列挙できることが

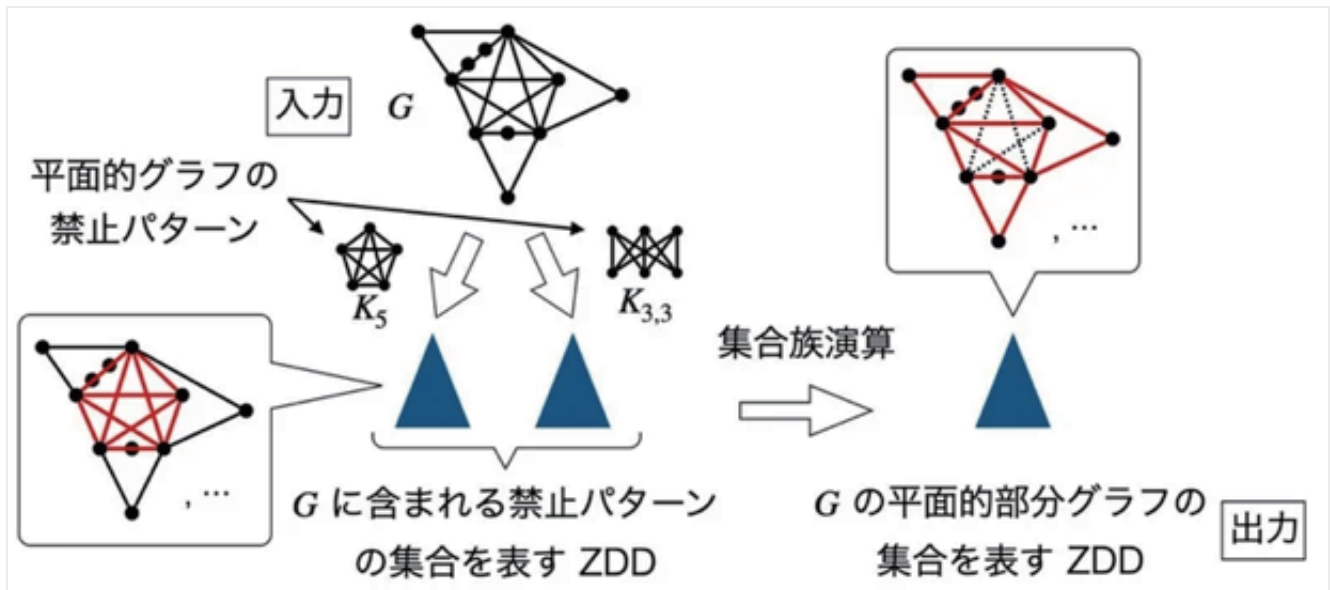
知られていた。一方で、平面的グラフ、外平面的グラフなど、重要であるがDDで効率良く列挙する方法が知られていないグラフも多かった。本研究では、グラフの「禁止マイナー制約」による特徴づけに注目し、そのような特徴づけを持つ部分グラフを列挙する方法を提案している。

マイナーとは、グラフの頂点削除、辺削除、辺縮約（辺の両端点を1つの頂点にまとめる操作）を繰り返して得られるグラフのことを指し、禁止マイナー制約とは指定されたグラフをマイナーとして含まないという制約である。禁止マイナー制約で特徴づけ可能なグラフとしては、平面的グラフ、外平面的グラフ、直並列グラフ、カクタスグラフなどが挙げられる。本研究ではマイナーの特殊ケースである「トポロジカルマイナー」を列挙するアルゴリズムを新たに提案し、これを用いて一部の禁止マイナー制約で特徴づけられる部分グラフを全列挙することが可能になることを示した。

本手法を用いてグラフに含まれる平面的な部分グラフを全列挙するアルゴリズムを実装し、実験により、提案アルゴリズムが愚直なバックトラック法より最大で約10万倍高速に、与えられたグラフのすべての平面的部分グラフを見つけられることを報告している。

本研究ではほかにも一般のグラフに対する避難所割当の列挙²⁾、バランス良いグラフ分割の列挙³⁾、項分岐決定グラフ（決定グラフの拡張）を用いた部分グラ

フの列挙⁴⁾ という問題を扱った。これらの問題を通し、DDを用いた暗黙的グラフ列挙技法の高速化と汎用化に寄与したといえる。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

<https://www.youtube.com/watch?v=Q4gTV4r0zRs>

参考文献

- 1) Nakahata, Y., Kawahara, J., Horiyama, T. and Minato, S. : Implicit Enumeration of Topological-minor-embeddings and Its Application to Planar Subgraph Enumeration, Proceedings of the 14th International Conference and Workshops on Algorithms and Computing (WALCOM 2020), pp.211–222 (2020).

- 2) Nakahata, Y., Kawahara, J., Horiyama, T. and Kasahara, S. : Enumerating All Spanning Shortest Path Forests with Distance and Capacity Constraints, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 101-A(9):1363–1374 (2018).
- 3) Nakahata, Y., Kawahara, J. and Kasahara, S. : Enumerating Graph Partitions Without Too Small Connected Components Using Zero-suppressed Binary and Ternary Decision Diagrams, In Proceedings of the 17th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2018), pp.21:1–21:13 (2018).
- 4) Nakahata, Y., Nishino, M., Kawahara, J. and Minato, S. : Enumerating All Subgraphs Under Given Constraints Using Zero-suppressed Sentential Decision Diagrams, In Proceedings of the 18th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2020), pp.9:1–9:14 (2020).

(2022年6月1日受付)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2021年9月

学位種別：博士（情報学）

大学：京都大学

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] アルゴリズム研究会

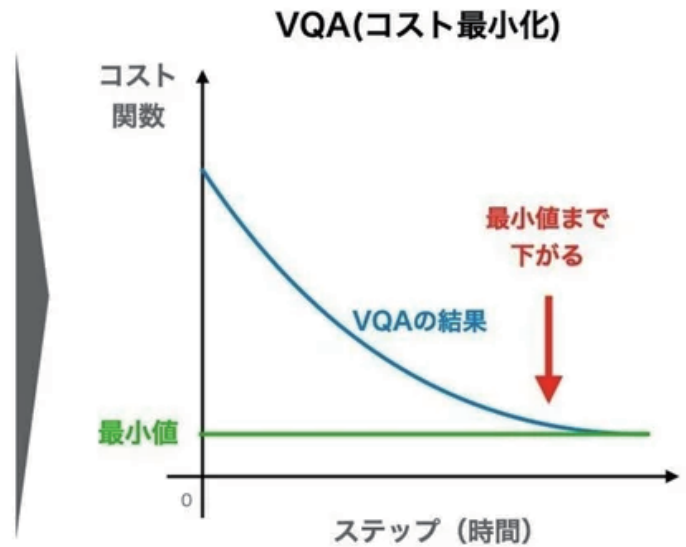
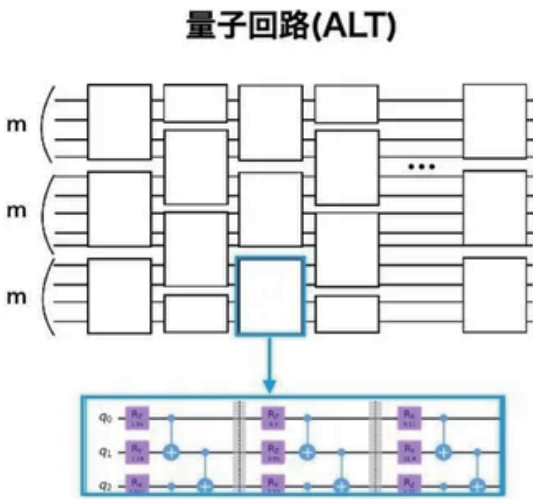
本論文は、避難所割当問題や、バランスの良いグラフ分割問題など、グラフ構造に関連する4つの課題を設定し、それらに対して効率の良い暗黙的列挙アルゴリズムを新規に提案し、理論的解析と実験的評価を行ったもので、国際会議SEA 2020やWALCOM 2020に論文採択されるなど国際的にも高く評価されている。

研究生活 競技プログラミングをきっかけにアルゴリズムに興味を持ち、修士課程からこのテーマの研究を始めました。先生方にアドバイスをいただきつつ自由に研究に取り組ませていただいたことは大変貴重な経験になりました。博士課程中にCOVID-19の影響で研究活動が制限され、モチベーションを保つのが難しい時期もありましたが、なんとかやりきれてよかったと思います。お世話になった皆様に感謝いたします。



⚠️ 新型コロナウイルスに関する内容の可能性のある記事です。

新型コロナウイルス感染症やコロナワクチンについては、必ず1次情報として厚生労働省や首相官邸のウェブサイトなど公的機関で発表されている発生状況やQ&A、相談窓口の情報もご確認ください。*非常時のため、すべての関連記事に本注意書きを一時的に出しています。



Noisy intermediate-scale quantum computation and its application



情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:22



2021年度研究会推薦博士論文速報

[量子ソフトウェア研究会]

中路 紘平

(学術振興会特別研究員PD)

■キーワード

量子計算／量子コンピュータ／量子力学

【背景】 量子コンピュータ開発の飛躍的進歩

【問題】 ノイズの多い量子コンピュータの社会実装に向けた課題解決

【貢献】 ノイズの多い量子コンピュータにおけるアルゴリズム提案

量子コンピュータ (Quantum Computer, 以下QC) は、量子力学的原理を情報処理に利用したコンピュータである。従来のコンピュータ (古典計算機) が0, 1を表すビットを情報処理の基本単位とするのに対し、QCは量子ビットを基本単位として用いる。古典計算機においては天文学的時間を要する因数分解・AI・量子化学計算等の問題が、QCを用いた情報処理 (量子アルゴリズム) によって指数関数的に高速に解けることが理論的に示されている。以上の背景から、世界中でQCの開

発が進められており、後述するノイズの問題がなければ、今後10年程度で（古典計算機では有限時間で解けない）実用的な問題を解ける規模のQCが開発できると予想されている。

一方、実用化に向けてはQCにおけるエラー（ノイズ）の問題を解決する必要がある。QC内での処理は、演算回数が増えるほどノイズが積み重なり計算結果が歪められる。将来的にはエラー訂正技術によりノイズを消去できるものの、今後20年程度で開発されるQCではエラー訂正を使わず、計算結果はノイズに直に曝されてしまう。このようなノイズを直に受ける中規模QCをNoisy Intermediate-scale QC (NISQ) と呼ぶ。NISQにおいては、従来の量子アルゴリズムが、その多すぎる演算回数ゆえ動作しないため、社会的にインパクトがありかつNISQで答えを出せるような量子アルゴリズム（NISQアルゴリズム）の開発に注目が集まっている。

本研究の貢献は、有望な3種類のNISQアルゴリズムを提案・検証したことにあ
る。その中の1つを下記でご紹介させていただく。

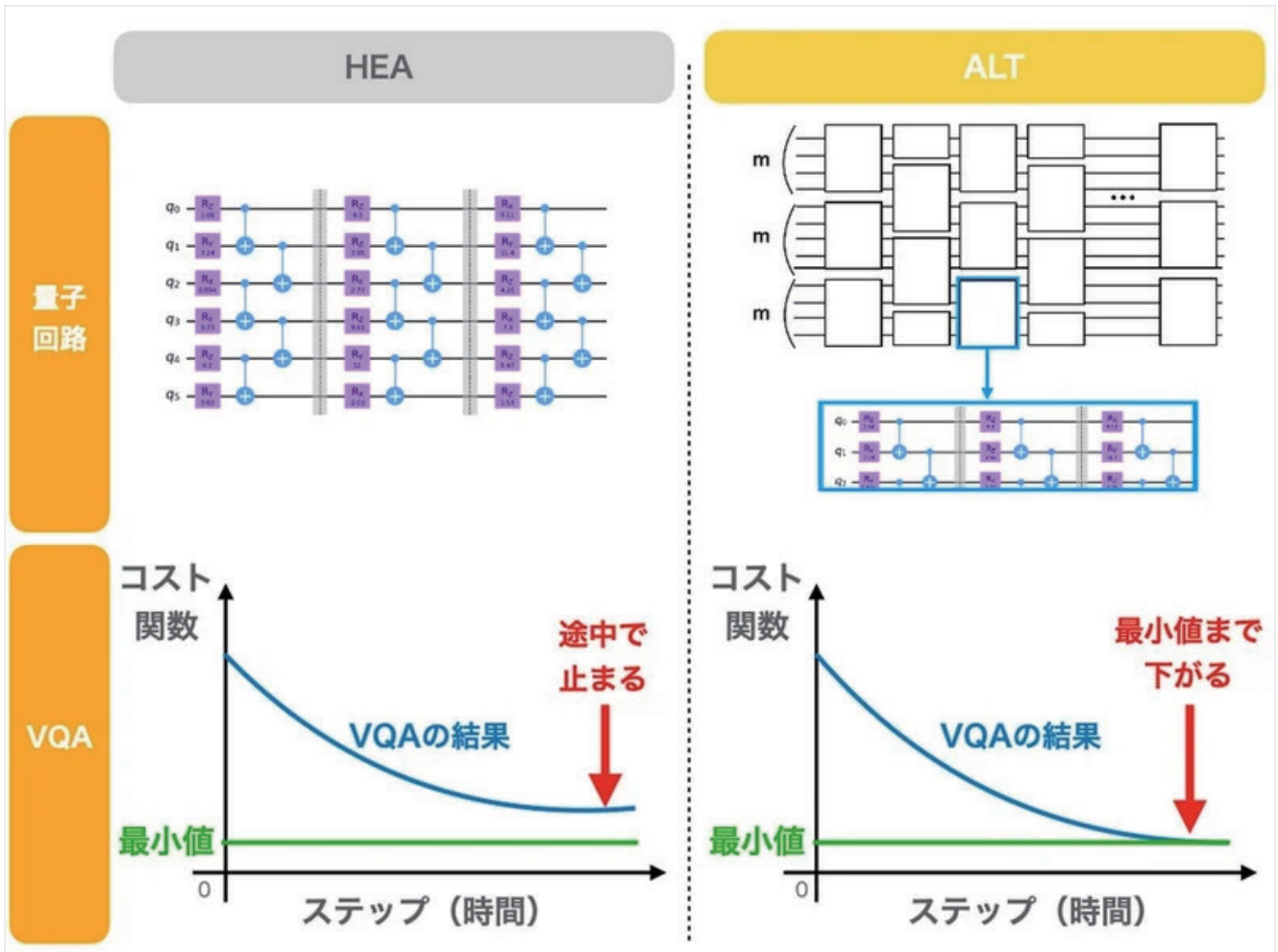
現在最も有望視されているNISQアルゴリズムは、変分量子アルゴリズム
（Variational Quantum Algorithm, VQA）と呼ばれる手法であるが、これは、情報処理の過程（量子回路）にパラメータを埋め込み、そのパラメータを逐次的に更新することで、コスト関数を最小化する量子回路（最適量子回路）を発見する手法

である。量子回路には特定の構造を持たせることができ、特にHardware efficient ansatz (HEA) と呼ばれる構造を持った量子回路が、最適量子回路を表現する能力（表現能力）の高さゆえに有望視されてきた。

一方、2019年にGoogle社の研究によって、HEAを使った場合、パラメータの更新が途中止まること（勾配消失問題）が理論的に指摘されており、VQAに暗雲が立ち込めてきた。その後、2020年に別のグループが、Alternating layered ansatz (ALT) を用いれば勾配消失問題を回避できることを理論的に指摘したが、果たしてALTがHEAと同様に十分な表現能力を持ち、VQAに利用可能かどうか分からなかった。

本研究では、ALTの表現能力を調べ、ALTは勾配消失問題を解決できるだけでなく、HEAと同等の十分な表現能力を持つことを理論的に証明した。また、VQAにおいてALTを量子回路として使うことで、HEAよりも結果が良くなる例を世界で初めて示した。

本研究によって、VQAが引き続き有望なNISQアルゴリズムであることを示すことができ、NISQの実社会への応用を加速したといえる。



(2022年5月23日)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

大学：慶應義塾大学

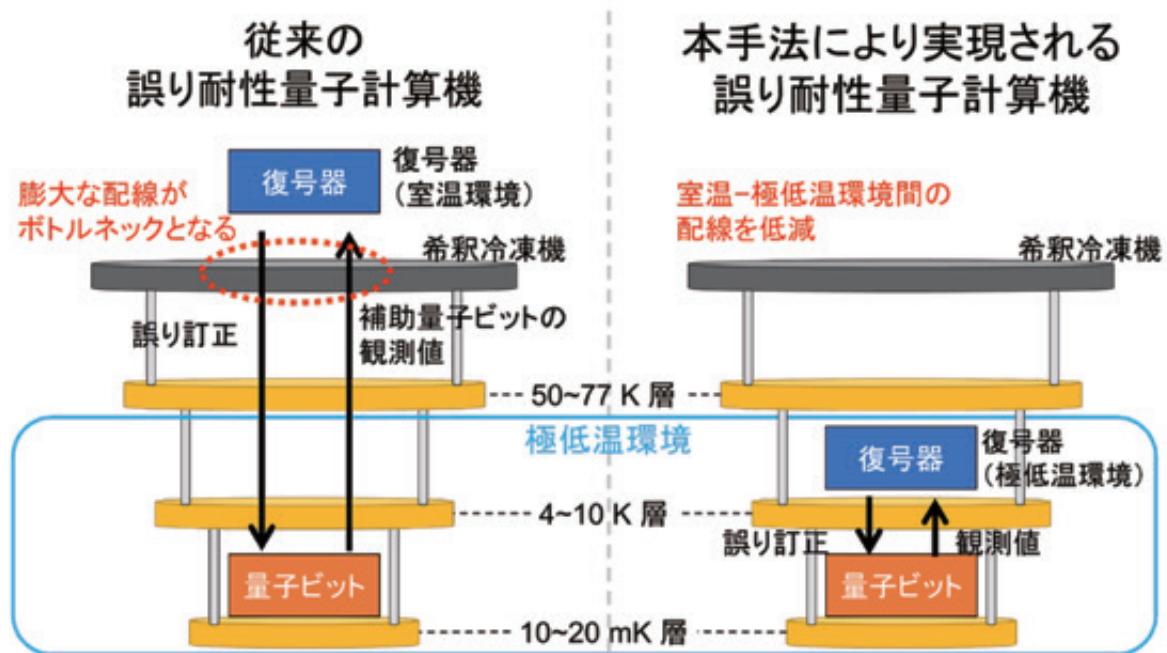
推薦文 [コンピュータサイエンス領域] 量子ソフトウェア研究会

近年ノイズの多い中規模量子コンピュータ (NISQ) の開発が盛んに進められており、世界中の研究者がNISQの応用方法に注目している。本博士論文は、金融、化学、AIの問題にNISQを効果的に用いる計算手法を提案/検証したタイムリーな内容となっており、その新規性、独創性が国際的に高く評価されている。

研究生活 量子コンピュータを使って新たなビジネスを作れないか、という動機で (社会人博士として) 研究を始めました。ほどなくして、実用化 (=新たなビジネスの創出) までには解決すべき課題が多くあり、一朝一夕にはいかないことを知るわけですが、そのころには、量子力学を使ったアルゴリズムを研究することの面白さにハマってしまい、当初の動機などすっかり忘れて研究に勤しんでいました。

研究開始とほぼ同時に新型コロナウイルスのパンデミックが発生したことで、オンラインの活動が主となり、雑談の中から生まれる研究がやりにくかったことはやや残念な点でした。ただ私が主に研究を行っていた、慶應義塾大学量子コンピューティングセンターでは、WebEx, Zoom, Slackなどオンラインでの研究行為をサポートする体制が整っており、指導教員の山本直樹先生も頻繁に議論してくださった

ことで、苦境の中でも楽しんで研究を進めることができたかと思います。



Online Quantum Error Correction Using a Superconducting Circuit

♡ 1

情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:23



2021年度研究会推薦博士論文速報

[量子ソフトウェア研究会]

上野 洋典

(日本学術振興会特別研究員PD (東京大学所属) /

ミュンヘン工科大学訪問研究員)

邦訳：超伝導回路を用いたオンライン量子誤り訂正についての研究

■キーワード

量子計算機 / 量子誤り訂正 / 超伝導回路

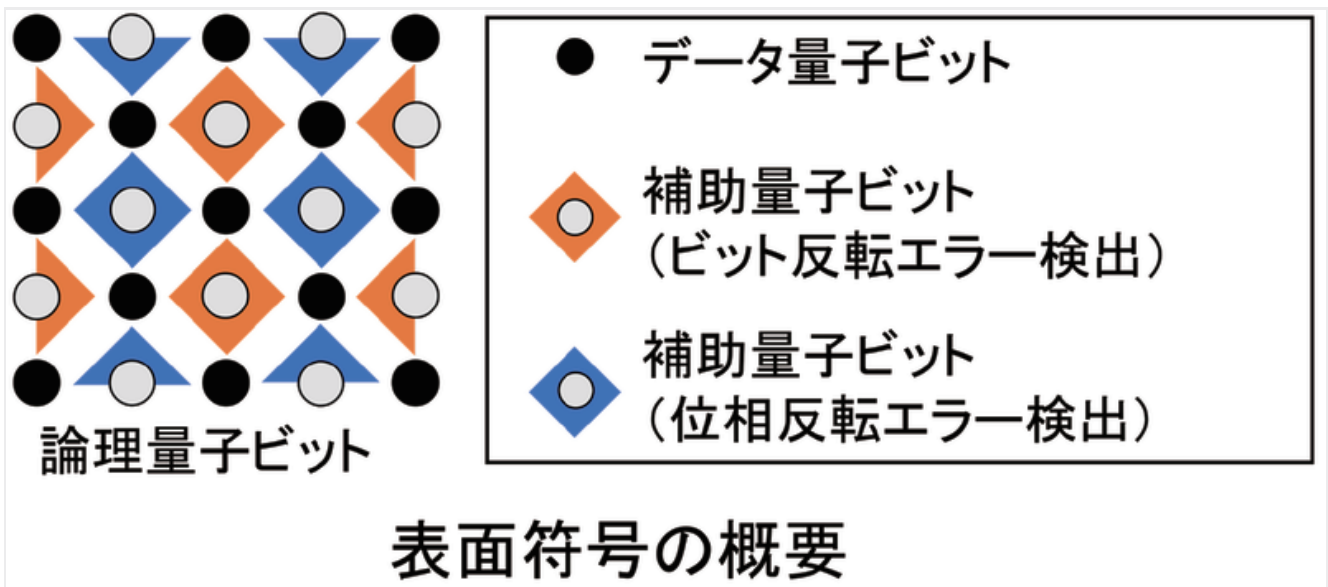
【背景】 量子計算機には誤り訂正が必須，超伝導量子ビットは極低温環境でのみ動作する

【問題】 通常は室温で動作する誤り訂正機構と極低温環境の超伝導量子ビットの間の配線が膨大

【貢献】 超伝導デジタル回路を用いて極低温環境で動作する量子誤り訂正機構を実現し，超伝導量子計算機システムの拡張性を飛躍的に向上

量子計算機は量子力学の重ね合わせの原理を活用した計算機であり，素因数分解などの問題を高速に解けることが期待されているため，人類の計算能力の質的な向上を目指して世界中で盛んに開発が進められている。量子計算機において計算を行う素子である量子ビットは，通常の計算機（古典計算機）に比べて誤り（エラー）

が生じやすい。そこで、量子情報を保持する複数のデータ量子ビットに加えて、データ量子ビットに生じた誤りの訂正に必要な情報を観測するための補助量子ビットをあわせて1つの誤り耐性を持つ量子ビット（論理量子ビット）を構成する、量子誤り訂正符号という枠組みが提案されている。代表的な量子誤り訂正符号である「表面符号」を用いた誤り訂正処理はグラフのマッチング問題に帰着されることが知られている。グラフマッチング問題は古典計算機で解くことができる。そのため、「復号器」と呼ばれるグラフマッチング問題を解く古典計算機と量子ビットを組み合わせることで、誤り訂正機能を持つ量子計算機（誤り耐性量子計算機）を構成できる。



量子ビットの実現方法はいくつかあるが、集積可能性と設計自由度の高さから「超伝導量子ビット」が、現在の量子計算機素子の第一候補として有望視されている。

る。超伝導量子ビットは極低温環境でのみ動作するという制約を持つため、極低温環境をつくりだす希釈冷凍機^{☆1}の中で動作するのが一般的である。一方、誤り訂正を行う復号器は一般に室温で動作する。そのため、量子ビットと復号器をつなぐ室温—極低温間の配線が必要となる。量子ビットの数が増えるにつれてこれらの配線が膨大となり、実装が困難となるため、現状の超伝導量子計算機の拡張可能性はこれらの配線により制限されている。復号器を極低温環境で動作させることで異なる温度環境間の配線を低減できるが、極低温環境で許容される消費電力は非常に小さく、通常の復号器を極低温環境で動作させることは現実的ではない。

本研究の前半では、極低温環境において高速・低消費電力で動作する超伝導デジタル回路^{☆2}を用いて、復号器を設計した¹⁾。これにより、極低温環境で動作する復号器を実現し、超伝導誤り耐性量子計算機の拡張可能性の向上を試みた。また、設計した復号器が十分高速に動作し、量子ビットの誤りの発生に追従してリアルタイムで誤り推定を行うことで蓄積を防ぐ「オンライン量子誤り訂正」を実行可能であることを示した。この手法により異なる温度環境間の配線を減らし、量子計算機の拡張可能性の飛躍的な向上が期待される。また、オンライン量子誤り訂正による量子ビットの誤り耐性の改善も期待される。

本研究の後半では、前述の超伝導デジタル回路を用いた量子誤り訂正手法のさらなる拡張を試みた。すなわち、前述の手法を機械学習手法の一種であるニューラルネットワークと組み合わせることで、誤り訂正性能のさらなる改善を行った。ま

た、誤り訂正を行う対象を単一の論理量子ビットから、論理ビット同士の演算へと拡張し、任意の量子計算に必要なすべての処理の誤り訂正を可能とした²⁾。

これらの手法により、超伝導誤り耐性量子計算機開発の進展に大きく寄与することが期待される。

☆¹ 希釈冷凍機：ヘリウムの2種類の同位体である ^3He と ^4He をそれぞれ液化し、 ^3He が ^4He に希釈される際に発生する希釈熱を用いて絶対零度 (-273.15°C) に近い極低温環境を作り出す装置。サムネイル画像のように温度の異なる複数の層からなる構造を持ち、超伝導量子ビットは $10\sim 20\text{mK}$ 程度の最下層で動作する。

☆² 超伝導デジタル回路：超伝導状態の素子からなるリングの中を通る磁束は離散的な値をとる、すなわちリング内に磁束が存在する状態と存在しない状態を容易に区別できるという性質を持つ。超伝導デジタル回路はこの性質を利用し、リング内の磁束の有無をデジタルの1と0にそれぞれ割り当ててデジタル計算を行う。超伝導現象を利用するため 4K 程度の極低温環境でのみ動作するという制約を持つが、通常の半導体デジタル回路に比べて高速・低消費電力である。

参考文献

1) Ueno, Y., Kondo, M., Tanaka, M., Suzuki, Y. and Tabuchi, Y. : QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface

Code, 58th IEEE/ACM Design Automation Conference (DAC) (2021).

2) Ueno, Y., Kondo, M., Tanaka, M., Suzuki, Y. and Tabuchi, Y. : QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery, 28th IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA) (2022).

(2022年5月31日)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（情報理工学）

大学：東京大学

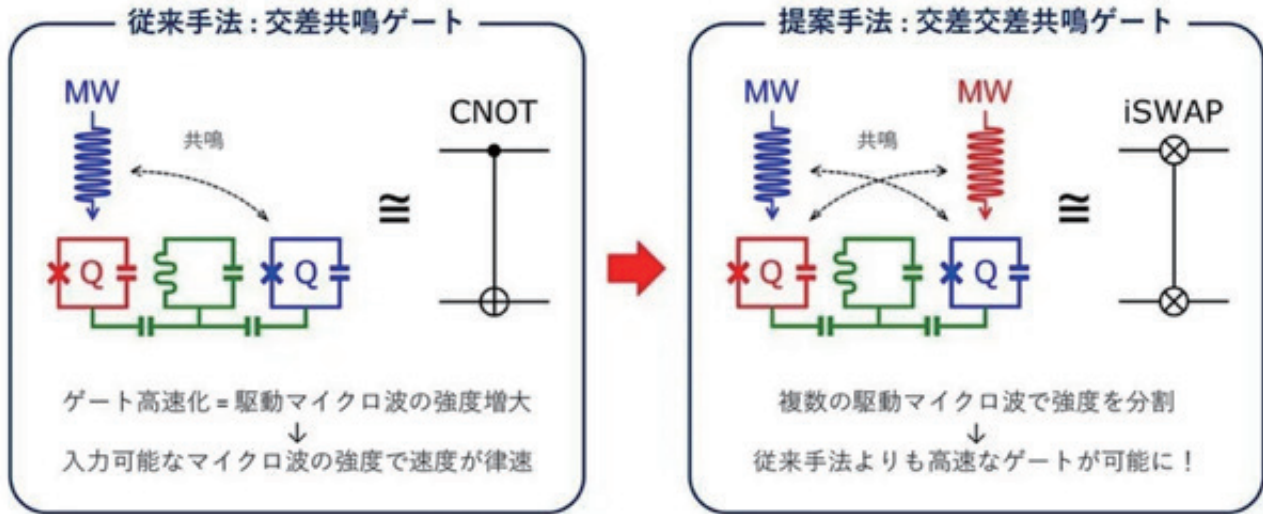
正会員

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] 量子ソフトウェア研究会

実用的な量子計算機には誤り訂正機構が必須であるが、極低温環境で動作する量子ビットと常温環境で動作する誤り訂正機構の間の膨大な配線が、量子計算機のスケラビリティを制限している。本論文は超伝導古典回路を用いて極低温環境で動作

する誤り訂正機構を提案し、将来の量子計算機のスケーラビリティを大きく向上した。

研究生生活 博士課程での研究テーマは、「『極低温環境で動いているもの（＝超伝導量子ビット）』の誤り訂正に、『高速・低消費電力であるが極低温環境でしか動かないもの（＝超伝導デジタル回路）』を使えば嬉しいのでは？」という素朴な発想から始まりました。従来の専門であったコンピュータ・アーキテクチャの知識に加え、量子計算理論、超伝導デジタル回路、さらにはグラフ理論や近似アルゴリズムなど、さまざまな分野の知見を体得しつつ研究を進めることができ、研究テーマが定まったあとはまったく退屈せずに研究に没頭することができました。人生のどこかで数年をかけて何かに没頭することができたのは、とても貴重な経験だったと思います。



超伝導量子演算回路の設計・制御・評価技術



情報処理学会・学会誌「情報処理」
2022年8月15日 09:26



2021年度研究会推薦博士論文速報

[量子ソフトウェア研究会]

部谷 謙太郎

(理研量子コンピュータ研究センター 特別研究員)

■キーワード

量子計算機／量子情報／超伝導量子ビット／マイクロ波

【背景】 量子計算機の開発には、高忠実度もつれゲートの実装が不可欠**【問題】** 従来のもつれゲートには実行速度とリークのトレードオフが存在**【貢献】** 多モードマイクロ波制御を活用し、上記トレードオフを緩和した

極低温環境下（ $\sim 10\text{mK}$ ）で量子化した超伝導回路からなる超伝導量子ビットは高い設計自由度と制御性を備え、集積化も容易なことから、量子計算機のハードウェアとして期待されている。近年では、数十から百個程度の量子ビットからなる中規模集積系が構築され、簡易的な量子アルゴリズムを実機に実装できるようになった。しかし現状、実行可能な量子アルゴリズムのサイズはデバイス上での制御品質が律速している状態にある。量子計算機の演算能力向上に向けて、制御品質の向上は必須の課題である。

現在、制御のボトルネックとなっているのは、量子ビット間に作用するもつれゲートである。従来、超伝導量子ビット間のもつれゲートでは交差共鳴と呼ばれる手法が用いられてきた。交差共鳴では結合する量子ビットの一方（制御量子ビット）

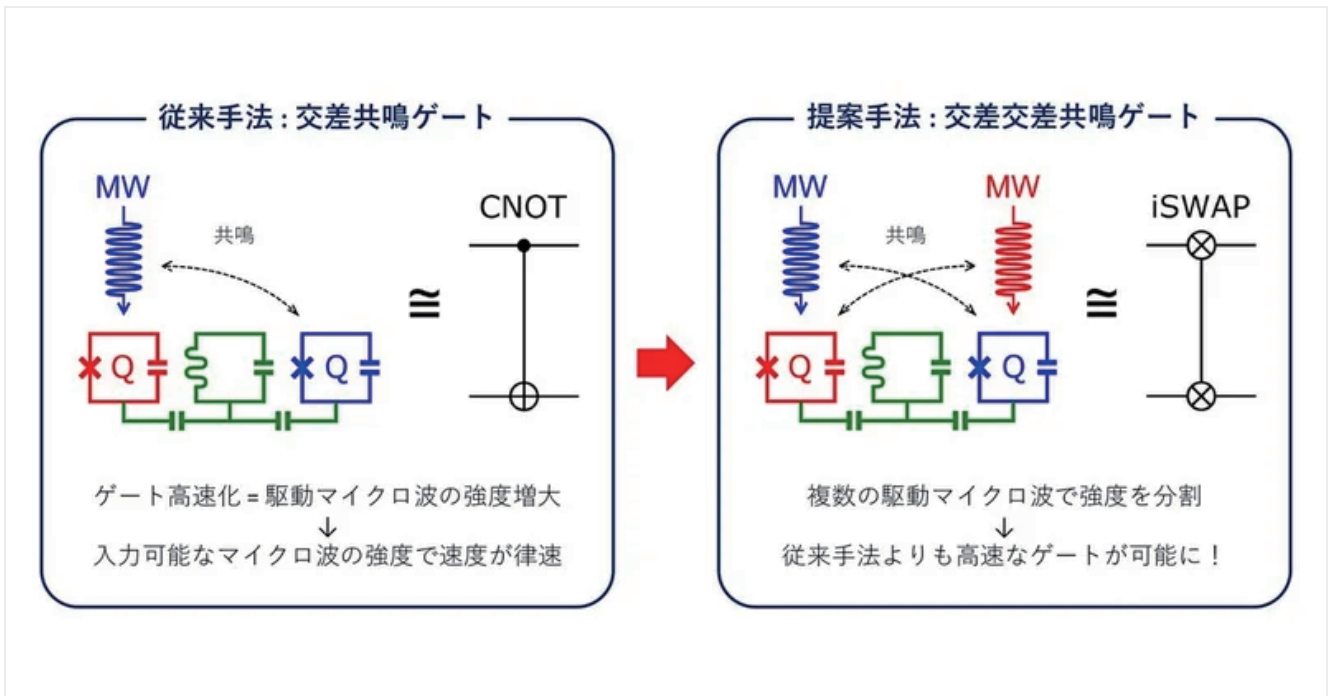
にもう一方（対象量子ビット）と共鳴するマイクロ波を照射する。このとき、制御量子ビットの状態に応じた対象量子ビットの状態変化、すなわち制御反転が生じ、量子もつれが生成される。超伝導量子ビットでは、時間とともに保持する量子情報を環境ノイズによって擾乱されるため、量子制御は擾乱のタイムスケール

（ $\sim 1\text{ms}$ ）よりも十分高速に実行される必要がある。交差共鳴ゲートの場合、駆動マイクロ波の照射強度を上げることで、ゲートの高速化が可能である。しかし、超伝導量子ビットでは、駆動マイクロ波の強度が強すぎると、量子状態が高次励起準位に遷移してしまうリークという問題が知られており、これによってゲート実行速度が律速されていた。

そこで本研究では、従来手法とは異なり、結合する量子ビットに2つのマイクロ波を同時に照射することで、もつれを分担して生成する交差共鳴を提案した。提案手法では、交差共鳴において用いられるマイクロ波の強度を分割して、2つのマイクロ波として照射するため、前述したリークに対して比較的堅牢となることが理論計算より明らかとなった。また、IBM社が提供するクラウド量子計算機上で実機実験を行った。実機実験では、まず交差共鳴の制御較正法を提案、実装した。交差共鳴では、従来の交差共鳴と異なり、複数マイクロ波の同時照射が必要となる。このとき、同時に照射された複数のマイクロ波は互いが互いの駆動条件に干渉し合うため、その制御較正には工夫が必要である。本研究では、干渉するマイクロ波の二重共鳴点を探索する手法を考案した。最後に、従来手法と提案手法の制御品質を乱択評価法と呼ばれる手法を用いて比較したところ、エラー率が40%程

度低減し、有意な制御品質の改善が見られた。

本研究ではほかにも、超伝導量子演算回路中の量子ビット共鳴周波数配置設計法、パウリゲートの等方的ゲートエラー増幅法の提案と実装、変分量子回路を用いた量子化学時間発展シミュレーション法の提案と実装に関して取り組んだ。これらの研究により、超伝導量子計算機的设计・制御・評価技術の発展に大きく貢献したと考えている。



■Webサイト／動画／アプリなどのURL

<https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.040336>

参考文献

1) Heya, K. and Kanazawa, N. : PRX Quantum 2, 040336 (2021).

(2022年5月20日)

(2022年8月15日note公開)

取得年月日：2022年3月

学位種別：博士（工学）

大学：東京大学

推薦文 [コンピュータサイエンス領域] 量子ソフトウェア研究会

本論文は、極低温環境で量子化した超伝導回路を用いて構成された簡易的な量子計算機について、同時多モード制御や、多重パルス列を用いた性能評価にまつわる新手法を提案し、またその優位性を実験的に検証するものである。独自性が高く大きく将来性が期待できる研究であるため「研究会推薦博士論文速報」に推薦する。

研究生活 博士課程における一番の学びは、手を動かすことで初めて課題が見え

てくる，ということでした。論文はポジティブに書かれる場合が多く，実際に実装して初めて見える要改善点が重要だと思うようになりました。逆に，テーマが思い付いてからは闇雲に手を動かすよりも，入念に理論計算を行い，筋道を立てて実験することが大切だと感じました。

これまでに村田学術振興財団の研究者海外派遣助成，日本学術振興協会の特別研究員制度，IPA独立行政法人の未踏ターゲット事業といったご支援があり，博士号を取得することができました。また，大学院で指導いただいた東京大学中村・宇佐見研究室の皆様，およびインターン生として採用，指導いただいたQunaSys Inc.，日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所の皆様とメンターの金澤直樹氏にはこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

