

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00007

研究課題名（和文）メモリアクセスに制約のある量子計算機の能力の解析

研究課題名（英文）Analysis of quantum computers that have constraints on memory accesses

研究代表者

中西 正樹（Nakanishi, Masaki）

山形大学・地域教育文化学部・教授

研究者番号：40324967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：メモリアクセスに制約のある量子計算機の能力の理論的な解析を行った。具体的には、特定の量子オートマトンを取り上げ、ある言語について、量子オートマトンで認識できるが、対応する古典オートマトンでは認識できないことを示した。これにより、量子オートマトンでは計算できるが古典オートマトンでは計算できない関数が存在することが言え、量子計算機の優位性が示す成果を得た。また、量子計算機の高速シミュレータの開発に関しても複数の成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子計算機は従来の計算機と比べて高速に問題を解くことができるため、大きな注目を集めている。量子計算機は量子状態を利用するため、その実装には高度な技術が必要となる。そのため、将来、実用規模の量子計算機が実現される初期の段階では、その動作に様々な制約が課されることが予想され、特に量子メモリについては様々な制約の下でのみアクセスが可能になると考えられる。本研究成果は、そのような実現初期段階の量子計算機を効率的に使うための指針となりうる。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the computational power of quantum computers that have restrictions on memory accesses. It was shown that there is a quantum automaton that can recognize a certain language, while the classical counterpart cannot recognize it. This implies that there is a function that can be computed by a quantum automaton, while it cannot be computed by the classical counterpart; quantum computers can be more powerful than classical computers. Moreover, we developed several methods that boost quantum computer simulators.

研究分野：量子計算

キーワード：量子計算機 量子オートマトン 量子計算機シミュレータ 量子アルゴリズム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

<<量子計算機の実現について -実現初期段階の量子計算機->>

量子計算機は従来の計算機(以後、古典計算機と呼ぶ)と比べて高速に問題を解くことができるため、大きな注目を集めている。量子計算機は量子状態を利用するため、その実装には高度な技術が必要となるが、当時から様々な実装技術の研究が進展しており、量子計算機の実現の可能性が高まっている。しかし、将来、実用規模の量子計算機が実現される初期の段階では、その動作に様々な制約が課されることが予想され、特に量子メモリについては様々な制約の下でのみアクセスが可能になると考えられる。様々な制約のため、実現初期段階の量子コンピュータがどこまでその能力を発揮できるかについては不明な点が多く、これらを解明する必要があった。

<<メモリアクセスに制約のある量子計算機 - 従来の計算機に対する優位性 - >>

量子計算機上で実行可能な演算は量子力学に起因する制約上、可逆な演算でなければならない。このことは、量子計算機上での処理はその履歴を何らかの形で記憶する必要があることを意味し、多くの場合量子メモリにその履歴を保持する必要性が生じる。しかしながら、実現初期段階の量子計算機においては、使用できるメモリ量の上限に制約が課されることが予想され、したがって、可逆性の制約を満たしながら演算を行うことが困難な状況が生じる。実際、メモリ量の制約は量子計算機の能力を大きく制限し、場合によっては古典計算機よりも能力が劣る結果になることが知られている。その一方で、メモリ量が制限されている状況下でも量子計算が有効に働く例も知られており、実現初期段階の量子計算機であっても用途を限定することで効率的な計算が行えると言える。このような背景から、実現初期段階の量子計算機の能力についての解明が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究では上述の点を踏まえ、メモリ量の制約のみでなく、メモリアクセスに対する様々な制約を考慮した上で量子計算機の有用性を示すことが目的である。(図1参照)

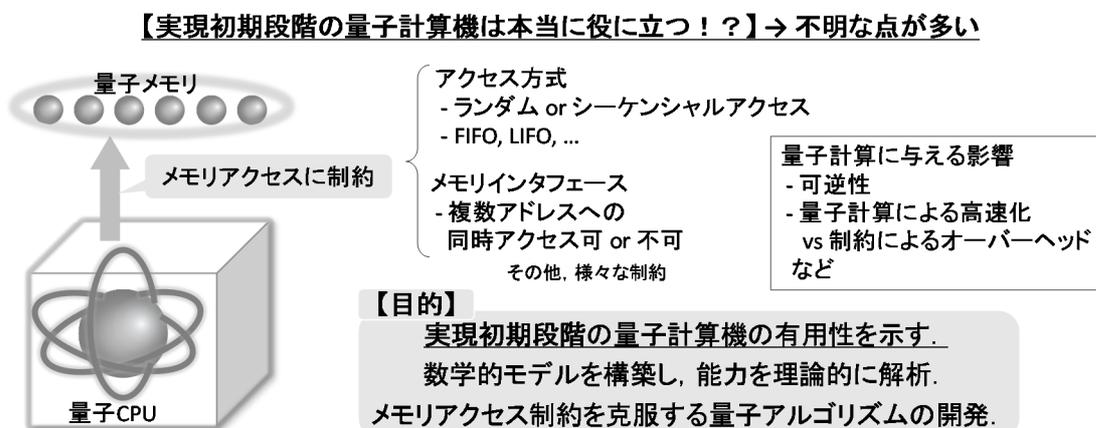


図1 研究の目的

本研究では、メモリアクセスに制約がある量子計算機に対応する数学的モデルを構築し、その能力の解析を行う。主に、以下の2つのテーマについて研究を行った。

#### (1) メモリアクセスに制約がある量子計算機の能力のオートマトンを用いた解析

「どのような制約が量子計算モデルの能力を低下させるのか?」、「制約があるにもかかわらず、量子計算モデルがその能力が発揮できる状況は?」これらの観点から、量子計算モデルを解析し、量子計算機が苦手・得意とする計算を明らかにする。なお、ここで解析とは、量子オートマトンが認識する言語クラスの特徴付けや、量子アルゴリズムの計算量の解析を指し、古典計算モデルと比較することで行う。制約の付いた量子計算モデルを対象とすることにより、量子計算機の能力を低下させる要因の切り分け・特定が容易になる。

#### (2) メモリアクセスに制約がある量子計算機向け高速アルゴリズムの開発

量子計算機が苦手とする制約下であっても、一部の特定の計算に関しては古典計算機に対する優位性を示せる場合があると予想される。そのような特定の計算に対する高速な量子アルゴリズムを開発することで、メモリアクセスに制約がある量子計算機、つまり、実現初期段階の量子計算機を効率的に扱うための指針を得ることができる。(図2参照)

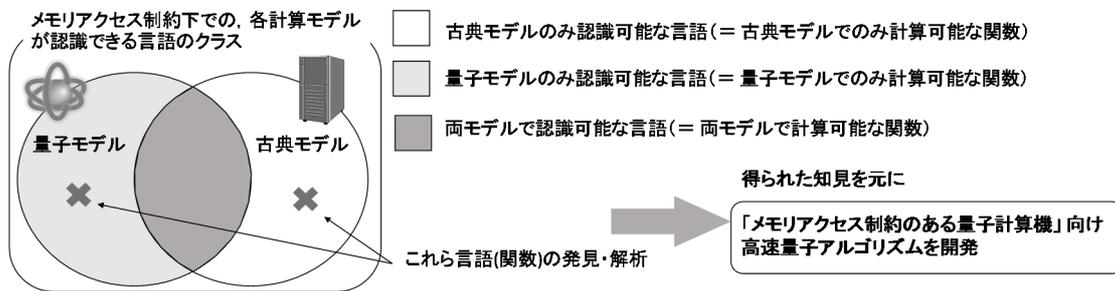


図 2 研究の流れ

### 3. 研究の方法

- (1) 本研究では、「メモリアクセスに制約がある量子計算機のモデルの能力」を理論的に解析する研究を行った。モデルとしては量子オートマトンと呼ばれる量子チューリングマシンに制約を付けたモデルを用いた。

#### <<メモリアクセス制約の表現方法>>

メモリアクセスに対する制約は量子オートマトンにおける作業テープへのアクセス方法の制限で表す。例えば LIFO 型アクセスのみを許す場合は、メモリをスタックで表現したオートマトンである量子プッシュダウンオートマトンでモデル化する。

#### <<能力の比較方法>>

一般的にオートマトンの計算能力は、そのオートマトンが認識する言語のクラス (= オートマトンで計算可能な関数のクラス) の大きさで表される。本研究では、量子オートマトンと古典オートマトンそれぞれが認識する言語のクラスの包含関係を比較することで、計算モデルの能力を特徴付ける。具体的には、特定の量子オートマトンを取り上げ、ある言語について、量子オートマトンで認識できるが、対応する古典オートマトンでは認識できないことを示す。これにより、量子オートマトンでは計算できるが古典オートマトンでは計算できない関数が存在することが言え、量子計算の優位性が示せる。

- (2) 量子計算機の振る舞いは理論的な解析が困難である場合も多く、シミュレーションによる解析が有効になる場合も見受けられる。本研究ではメモリアクセスの制約を利用した量子計算機シミュレーションの高速化を行う。量子計算は並列性を有するため、ハードウェアによる並列処理との親和性が高い。そこで、ハードウェアを用いた量子計算機シミュレータを開発し、それを利用して発見的量子アルゴリズム等の理論的な解析が困難な量子アルゴリズムの解析へとつなげる。

### 4. 研究成果

#### (1) 量子計算モデルに関する研究

量子コンピュータの能力の理論的な解析を行う上で、量子計算モデルに非常に近い性質を持つ affine カウンタオートマトンに着目した。そのうえで、affine カウンタオートマトンが、対応する古典決定性モデルよりも能力が高いことを、プロミス付き問題を用いて示した。つまり、affine カウンタオートマトンで解くことができるが、決定性カウンタオートマトンでは解くことができないプロミス付き問題が存在することを示した。この成果をもとに、今後、affine カウンタオートマトンと量子カウンタオートマトンの関係を調べることで、量子計算モデルの能力を特徴づけることにつながると考えられる。

ガーベッジテープ付き量子プッシュダウンオートマトンと呼ばれる計算モデルについての解析を行い、ガーベッジテープ付き量子プッシュダウンオートマトンでは誤りなしで解くことができるが、決定性プッシュダウンオートマトンでは解くことができないプロミス付き問題が存在することを示した。この結果は、量子計算モデルが古典計算モデルよりも能力が高くなる場合があることを示すものである。

他にも古典計算機の能力に関して、実数を出力する際の領域計算量の解析を行い、有限オートマトンを含め、使用できるメモリ領域に制約がある際に計算可能な実数の特徴を明らかにする等の結果を得ている。

## (2) 量子コンピュータシミュレータの開発

汎用量子コンピュータシミュレータとして GPGPU を用いたシミュレータを設計した。この GPGPU 量子コンピュータシミュレータの高速化手法として、メモリアクセス回数を低減する手法を提案し、実験によりその有効性を確認した。これは量子アルゴリズムが行列の積で表されることをもとに、行列演算の線形性を利用し、量子アルゴリズムのスケジューリングを最適化することで実現している。

用途を限定した量子コンピュータシミュレータとして、正則グラフ上の量子ウォークシミュレーションを行うハードウェア量子ウォークシミュレータを開発した。FPGA を用いることで、与えられたグラフに応じてシミュレータを再構成することができ、これにより、大幅な省面積化に成功した。

HHL アルゴリズムと呼ばれる連立方程式を高速に解く量子アルゴリズムの高速なシミュレータアーキテクチャを開発した。HHL アルゴリズムは様々な量子アルゴリズムのコアとなりうるアルゴリズムであるため、その高速化は多くのアルゴリズムの高速化につながると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Masaki Nakanishi and Marcos Villagra	4. 巻 arXiv:1805.02572
2. 論文標題 Computational Complexity of Space-Bounded Real Numbers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakanishi Masaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Quantum Pushdown Automata with Garbage Tape	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Foundations of Computer Science	6. 最初と最後の頁 425~446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0129054118500132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaki Nakanishi, Kamil Khadiev, Krisjanis Prusis, Jevgenijs Vihrovs, and Abuzer Yakaryilmaz	4. 巻 EPTCS 252
2. 論文標題 Exact affine counter automata	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 15th International Conference on Automata and Formal Languages	6. 最初と最後の頁 205~218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Ambainis, K. Iwama, M. Nakanishi, H. Nishimura, R. Raymond, S. Tani, and S. Yamashita	4. 巻 vol.25, no.4
2. 論文標題 Quantum Query Complexity of Almost All Functions with Fixed On-set Size	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 computational complexity	6. 最初と最後の頁 723~735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00037-016-0139-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Nakanishi, N. Morioka, and K. Shoji	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Cache-aware quantum circuit simulation on a GPGPU	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. of the 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016)	6. 最初と最後の頁 11~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kimika Beppu, Kanae Nakabayashi, and Masaki Nakanishi
2. 発表標題 A hardware architecture for simulating the HHL algorithm
3. 学会等名 22nd Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中鉢大喜, 中西正樹
2. 発表標題 FPGAを用いた正則グラフ上の量子ウォークのシミュレーション
3. 学会等名 第35回量子情報技術研究会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----