

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11816

研究課題名（和文）種々の制約のある量子計算機の能力の解析

研究課題名（英文）On the power of restricted quantum computation models

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実現初期段階での量子計算機を想定し、その能力の解析を行うとともに、量子アルゴリズムに対して実験的な評価を行うためのシミュレータの高速化を行った。量子計算機の能力の理論的な解析については、実現初期段階の量子計算機をオートマトンでモデル化した。その上で、オートマトンを解析することにより、量子モデルと古典モデルの差異を理論的に証明した。また、量子計算機の能力の実験的な解析に向けて、特定の演算について、ハードウェア上で効率的にシミュレーションを行う手法を開発した他、高速計算のための要素技術の開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子状態の扱いは技術的に困難な点が多く、量子計算機が実現した初期の段階では、状態遷移やメモリの扱いに関して様々な制約が付くものと予想されている。このような場合、状況によっては量子計算機の方が古典計算機よりも能力が低くなることが知られている。本研究の意義は、このような制約をアルゴリズム上の工夫で上手に回避し、制約のない量子計算機と同等、あるいはそれ以上に扱えるようにする手法を開発したことにある。別の見方をすれば、制約のある量子計算機がどのような状況で古典計算機より優位になるのかを解明したともいえる。

研究成果の概要（英文）：We proposed several quantum computation models, and analyzed them. We also developed a quantum computer simulation environment in order to conduct experimental evaluation of quantum algorithms. As for the analysis of quantum computation models, we proved that certain quantum models can be more powerful than classical counterparts. We also developed a method that can efficiently simulate the Walsh-Hadamard transform on a hardware simulator. In addition, we developed a fast parallel merge algorithm for GPGPUs.

研究分野：量子計算

キーワード：量子計算機 量子計算モデル 量子オートマトン 量子アルゴリズム 量子コンピュータシミュレータ
affineオートマトン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子状態の扱いは技術的に困難な点が多く、量子計算機が実現した初期の段階では、状態遷移やメモリの扱いに関して様々な制約が付くものと予想されている。例えば、量子力学上の制約から量子計算機は可逆な計算しか行えないため、実現初期の小規模な量子計算機では計算の履歴を保存するメモリ領域を十分に確保できず、場合によっては古典計算機よりも能力が低くなることが知られている。このような制約をアルゴリズム上の工夫で上手に回避し、制約のない量子計算機と同等に扱えるようにする手法の開発が、研究開始当初の重要な課題とされていた。

また、通常、量子アルゴリズムは理論的な解析による評価(計算量的評価)を行うが、近年、理論的评价が必ずしも適切でないアルゴリズムも考案されている。例えば、発見的手法による量子アルゴリズムや、量子機械学習アルゴリズムである。これらのアルゴリズムは理論的な評価が困難であることが多く、シミュレーションによる実験的な評価が適切である。こういった実験的评价が適切なアルゴリズムに対して、高速にアルゴリズムのシミュレーションを行う環境の構築が必要であった。

2. 研究の目的

上述の点を踏まえ、本研究では、量子計算機が実現した初期の段階を想定し、様々な制約が課された状況下でも、量子計算機が古典計算機に比べて優位性を保てるように制約を回避(克服)する手法を考案することを目的とする。また、それと同時に、実現初期の量子計算機を対象とした量子アルゴリズムの開発を行う。

実現初期段階の量子計算機をモデル化するに際しては、量子オートマトンが向いていると考えた。取り扱うメモリの制約をオートマトンの記憶域の性質としてモデル化することや、状態遷移に制約を付加することで、理論的な解析が行えるモデルを構築することができる。このようにして構築したモデルの量子計算版および古典計算版を用意し、両者の間で計算可能な関数のクラスの差異を示すことで、量子計算モデルの優位性を示すことが本研究の目的である。また、そのような関数の特徴を詳しく調べることで、実現初期段階の量子計算機に課される制約のうち、今後ハードウェア的に解決すべき制約と、アルゴリズムの工夫で回避できる制約(解決の優先度が低い制約)を明確にすることができ、量子計算機の実現に向けての指標を与えることが可能になる。

また、発見的手法を用いた量子アルゴリズムや量子機械学習アルゴリズムは、その性能を理論的に解析するのが困難であり、実際にアルゴリズムを実行した上で解の質を評価し、パラメータのチューニングを行う作業を繰り返す必要がある。このためには量子アルゴリズムのシミュレーションを繰り返す必要があるが、本研究では、これに関する取り組みとして、まず高速なシミュレータの開発を行うことを目的とする。様々な制約がある量子コンピュータが対象であるため、その制約によって可能な演算が限られることに着目し、シミュレーションの高速化にもつなげられると考えた。

3. 研究の方法

量子オートマトンは量子チューリング機械のメモリアクセスに制約が付いた計算モデルと見做することができる。量子計算機が実現された初期の段階では、使用できる量子メモリの量やアクセス方法に制約が付くことが考えられるため、その状況を量子オートマトンでモデル化する。また、実現初期段階の量子計算機では、その演算の自由度にも様々な制約が付くと予想される。このような演算の自由度は、オートマトンの状態遷移の制約として表すことができる。このように制約を持った計算機をオートマトンで表現し、その量子モデル、古典モデルに対して計算可能な関数のクラスを解析する。つまり、「量子モデルでは計算可能であるが、古典モデルでは計算不可能な関数が存在すること」を数学的に証明することにより、量子計算機の優位性を示すことができる。さらには量子計算モデルに非常に近い性質を持つ affine 計算モデルの解析も行う。当該モデルを通して量子モデルの能力を推測することを念頭に組み込んだ研究である。

量子コンピュータシミュレータの開発に関しては、量子アルゴリズムに頻出する特定の演算の高速化を目指した。ハードウェア上でシミュレーションを行う際の細かな演算のスケジューリングを工夫することでメモリアクセスを効率化できると考えた。

その他にも、シミュレーションのための要素技術として GPGPU 向けの並列マージ処理の高速化手法の開発を行った。通常、データ列を細粒度で分割すると、一つの分割に対する処理は軽くなるが、その分、分割自体に時間がかかる。一方で粗粒度で分割すると一つの分割に対する処理が複雑化し時間がかかる一方で、分割に要する時間は少なく済む。本研究では、粗粒度で分割を行い、一つの分割に対する処理の最適化を行うことで、粗粒度分割のデメリットを抑えるアプローチをとった。

4. 研究成果

本研究ではオートマトンの理論的な解析として、(1)量子カウンタオートマトンの能力の解析、

および(2)affine オートマトンの能力の解析を行った。さらに量子コンピュータのシミュレーションに関する研究として(3)ウォルシュ アダマール変換を高速にシミュレーションする手法の開発、および、シミュレーションのための要素技術の開発として(4)GPGPU を用いた高速な並列マージ処理の研究を行った。以下にその詳細を述べる。

(1) 量子カウンタオートマトンの能力の解析について

ある種のプロミス付き問題に対し、それを誤りなく解くことができる 1 方向量子カウンタオートマトンが存在することを示す一方で、同じ問題が古典の 1 方向決定性カウンタオートマトンでは解くことができないことを証明した。本結果は制約のある計算モデルであっても、量子モデルが古典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。

古典オートマトンに関する結果として、1 方向ラスベガス 1 カウンタオートマトンと 1 方向決定性 1 カウンタオートマトンの間の能力の差を示した。

ブラインドカウンタオートマトンの言語の認識能力についての予想を否定する結果も得ている。この結果は Yakaryi Imaz によって示された量子アルゴリズムをもとに、確率アルゴリズムへと応用したものである。さらに、ブラインド / 非ブラインドカウンタオートマトンに関して、いくつかのセパレーションを行う結果を得ている。

(2) affine オートマトンの能力の解析について

量子カウンタオートマトンに近い性質を持つ affine カウンタオートマトンについて、誤りのない計算を行う際の言語の認識能力について、古典計算モデルよりも優れていることを示す等、affine カウンタオートマトンとその他のモデルの能力の比較を行った。具体的には、ある種の言語がエラーなし計算の条件下で、実時間 affine カウンタオートマトンでは認識できるが、1 方向決定性プッシュダウンオートマトンや実時間 k カウンタオートマトンでは認識できないことを証明した。本結果は、カウンタを持つ affine 計算モデルが、「カウンタよりも強力な記憶装置であるスタックをもつ古典モデルよりも能力が高くなる場合がある」、また、「複数個のカウンタを持つ古典モデルと比較しても能力が高くなる場合がある」ことを示しており、affine 計算の長所に関する知見を与えるものである。

affine オートマトンは状態数に関しても優位性があるという結果も得た。具体的には、エラーなし計算の条件下で、3 状態の実時間 affine カウンタオートマトンでは特定の正規言語の族を認識できるが、実時間決定性 k カウンタオートマトンでは状態数が言語のパラメータに応じて増えることを証明した。

affine カウンタオートマトンでは、加算のみしかできないカウンタであっても有用である証拠として、当該モデルがある種の非正規言語を片側有界誤りで認識できることを証明した。

ある種のプロミス付き問題について、ラスベガス affine 有限オートマトンでは認識できるが、2 方向量子有限オートマトンに関しては多項式時間では認識できないことを示した。

有界誤り affine 有限オートマトンや有界誤り 2 方向量子有限オートマトンでは認識できるかどうか知られていない言語について、affine 有限オートマトンで認識する方法を示した。

(3) 量子コンピュータシミュレータの開発について

量子コンピュータシミュレーションに際して頻繁に行われる演算にウォルシュ-アダマール変換がある。ウォルシュ-アダマール変換は様々な量子アルゴリズムのコアとして使用されるため、この演算を高速化できれば、量子アルゴリズムシミュレーションの高速化を図れる。本研究では、ハードウェア量子コンピュータシミュレータ向けに、ウォルシュ-アダマール変換を小さな変換に分割し、パイプライン方式で演算を処理することで高速化する手法を考案した。提案手法では、データフローの適切な調整とアドレス計算の工夫により、パイプラインがストールすることなく演算を行える。

(4) GPGPU 向け並列マージ処理の高速化手法の開発について

GPGPU 向け並列マージ処理の高速化手法の開発を行った。本手法は MergePath と呼ばれるマージ処理の分割法を応用したものであり、マージ処理を分割する際の粒度を粗くすることで、分割に要する処理時間を低減し、大域メモリのバンド幅を最大限活用できる。実験により、大規模な入力に対しては限界に近い性能を持つことを確認したうえで、従来手法と比較した場合の優位性も含め詳細な性能比較を行った。また、提案手法は、メモリ領域の確保を不要とすることにより、要素数の小さなマージに関しても、性能の劣化が少ないアルゴリズムであるという点についても示すことができた。

以上に述べたように、理論研究・実験研究の両方において、成果を上げている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 千葉 理揮、中西 正樹	4. 巻 J106-D
2. 論文標題 粗粒度分割を用いた並列マージ処理の高速化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 173 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2022JDP7019	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 Nakanishi Masaki, Khadiev Kamil, Prusis Krisjanis, Vihrovs Jevgenijs, Yakaryilmaz Abuzer	4. 巻 33
2. 論文標題 Exact Affine Counter Automata	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Foundations of Computer Science	6. 最初と最後の頁 349 ~ 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S012905412241009X	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 Ayaka Kobori, Rio Takahashi, and Masaki Nakanishi	4. 巻 2
2. 論文標題 A hardware architecture for the Walsh-Hadamard transform toward fast simulation of quantum algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CCF Transactions on High Performance Computing	6. 最初と最後の頁 211 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42514-020-00028-7	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, Abuzer Yakaryilmaz, and Aida Gainutdinova	4. 巻 21(4)
2. 論文標題 New results on classical and quantum counter automata	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Discrete Mathematics & Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23638/DMTCS-21-4-12	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

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ayaka Kobori, Rio Takahashi, and Masaki Nakanishi
2. 発表標題 A hardware simulator architecture for quantum heuristic search algorithms
3. 学会等名 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ラトビア	University of Latvia		
ロシア連邦	Kazan Federal University		