

学位論文の要旨	
氏名	Mohamed Ahmed Saber El-fiky
学位論文題目	Study on Discrete Quantum Adiabatic Computation in Combinatorial Search Problems
<p>本論文は、主として断熱定理に基づいた新しい量子アルゴリズムを設計するための最新のパラダイムに関する研究を行ったものである。このアルゴリズムは、離散的量子断熱計算アルゴリズムとして知られている。本研究では、主に離散的量子断熱計算アルゴリズムを使用して、NP完全問題などの組み合わせ探索問題を解き、アルゴリズムの高速化と探索コスト削減を目的としており、離散的量子断熱計算アルゴリズムで用いられているステップ関数として、2次関数など非線形関数をいくつか提案し、さらに、より良いパラメータ設定も示したものである。</p> <p>第1章は、従来の古典的な計算方法を改良して新しいアルゴリズムを見つけようとするに至った歴史や、断熱量子計算の考え方について説明し、本研究の動機づけについて述べ、本論文の全体構造を示す序文となっている。</p> <p>第2章は、量子計算のキュービット、干渉効果、量子並列処理など本研究に関係する基本概念を説明し、同時に、使用する組み合わせ探索問題として充足可能性問題を定義している。さらに、本研究で検討した断熱進化モデルと、従来の量子計算として知られている回路モデルの違いを説明している。</p> <p>第3章は、断熱量子計算の新規性、および、初期状態から終状態までユニタリ変換で量子状態を発展させるために、どのように断熱定理を使用するかについて記述している。さらに、断熱計算を適用する方法として数値例も示し、続いて、ローカルな断熱計算とグローバルな断熱計算との概念的相違を定義し、および、最小エネルギー・ギャップの重要性、そして、効率的な断熱量子計算アルゴリズムの設計方法について説明した。</p>	

第4章は、量子ヒューリスティック探索アルゴリズム(QHS)について詳細に述べ、量子ヒューリスティック探索アルゴリズムを用いてナップザック問題を解いた際の実験結果について、使用したパラメータ設定も含め、まとめた。さらに、3つの異なった種類のナップザック問題においてランダムに生成された問題で解き、最後に、量子ヒューリスティック探索アルゴリズムと古典的な遺伝的アルゴリズムとを比較しながら、ペナルティ関数とランダムリペアの2つの方法を使用して行い、その比較実験の結果をまとめ、良好な結果が得られた。

第5章では、非線形のステップ関数を用いた断熱量子計算アルゴリズムについてまとめた。この方法は、2次関数を用いたステップ関数で本研究において初めて提案されたものである。比較のために、従来提案された数々のステップ関数のパラメータ設定やそれらの最小エネルギーギャップも参考として簡潔にまとめた。さらに、数値シミュレーション実験で使用したシミュレータの主な機能を説明し、ステップ関数として、3次関数や線形関数を用いた方法や量子アニーリング法と、本研究の提案手法とを比較した結果、本手法が優れていることが判明した。シミュレーション実験は、20量子ビットまでの変数を使用し、3-SAT問題を解いた。シミュレーション実験により、パラメータの改良がまだ期待できるということと、他の手法よりも本提案手法の方が優れているということが明らかになった。

第6章は、これまでの研究を拡張し、アルゴリズムの探索コスト削減と探索行動改善に結びつくパラメータ Δ 値を改良した手法を提案した。続いて、28量子ビットまでの変数を使用し、3-SAT問題を解いた実験結果と、解発見率の比較とそれぞれに対応する最小エネルギーギャップ、及び、すべての主手法の探索コストをまとめた。

第7章は結論で、今までの研究の総括を述べ、提案手法は、従来の手法よりも優れており、探索コストとして $O(n)$ が得られ、パラメータ Δ 値の最適化を行うと更に探索性能を改善することが分かった。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第363号	氏名	Mohamed Ahmed Saber El-Fiky
審査委員	主査	中山 茂	
	副査	森 邦彦	澁田孝康

学位論文題目 Study on Discrete Quantum Adiabatic Computation in Combinatorial Search Problems
(組み合わせ探索問題における離散的量子断熱計算の研究)

審査要旨

提出された学位論文及び論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は組み合わせ探索問題における離散的量子断熱計算の研究について述べたもので、全文7章より構成されている。

第1章は、従来の古典的な計算方法を改良して新しいアルゴリズムを見つけようとするに至った歴史や、断熱量子計算の考え方について説明し、本研究の動機づけについて述べ、本論文の全体構造を示す序文となっている。

第2章は、量子計算のキュービット、干渉効果、量子並列処理など関係する基本概念を説明し、使用する組み合わせ探索問題として充足可能性問題を定義している。さらに、本研究で検討した断熱進化モデルと、従来の量子計算として知られている回路モデルの違いを述べている。

第3章は、断熱量子計算の新規性、および、初期状態から終状態までユニタリ変換で量子状態を発展させるために、どのように断熱定理を使用するかについて記述している。さらに、断熱計算を適用する方法として数値例も示し、最小エネルギー・ギャップの重要性、そして、効率的な断熱量子計算アルゴリズムの設計方法について説明している。

第4章は、量子ヒューリスティック探索アルゴリズムについて述べ、量子ヒューリスティック探索アルゴリズムを用いてナップザック問題を解いた際の実験結果について、使用したパラメータ設定も含め、まとめている。3種類のナップザック問題においてランダムに生成された問題で解き、最後に、量子ヒューリスティック探索アルゴリズムと古典的な遺伝的アルゴリズムとを比較しながら、ペナルティ関数とランダムリペアの2つの方法を使用して行い、その比較実験の結果として、良好な結果が得られた。

第5章では、非線形のステップ関数を用いた断熱量子計算アルゴリズムについてまとめている。この方法は、2次関数を用いたステップ関数で本研究において初めて提案されたものである。比較のために、従来提案されたステップ関数のパラメータ設定やそれらの最小エネルギーギャップも参考として簡潔にまとめている。さらに、数値シミュレーション実験の主な機能を説明し、ステップ関数として、3次関数や線形関数を用いた方法や量子アニーリング法と、本研究の提案手法とを比較した結果、本手法が優れていることを示した。シミュレーション実験は、20量子ビットまでの変数を使用し、3-SAT問題を解いた。シミュレーション実験により、パラメータの改良がまだ期待できるということと、他の手法よりも本提案手法の方が優れているということが明らかになった。

第6章は、これまでの研究を拡張し、アルゴリズムの探索コスト削減と探索行動改善に結びつくパラメータ値を改良した手法を提案した。続いて、28量子ビットまでの変数を使用し、3-SAT問題を解いた実験結果と、解発見率の比較とそれぞれに対応する最小エネルギーギャップ、及び、すべての主手法の探索コストをまとめた。第7章は結論で、提案手法は、従来の手法よりも優れており、パラメータ値の最適化を行うと更に探索性能を改善することが分かった。

以上、本論文は、離散的断熱量子計算に関する研究で3-SAT問題におけるステップ関数の非線形化について検討を行い、計算の高速化と探索コストの削減を明らかにした。これは、今後さまざまな組み合わせ最適化問題に広く応用されることが期待される。よって、審査委員会は博士(工学)の学位論文として合格と判定する。

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第363号	氏名	Mohamed Ahmed Saber El-Fiky
審査委員	主査	中山 茂	
	副査	森 邦彦	湊田孝康

主査及び副査2名で構成される審査委員会は、平成24年2月7日に学位申請者「Mohamed Ahmed Saber El-Fiky」に対して、論文の内容について説明を求めた。これに引き続き、参加者15名を含めて質疑応答を行うとともに、関連事項について諮問を行った結果、いずれに対しても満足すべき回答が得られた。主な質疑応答は、以下の通りであった。

質問1: You mentioned about four different methods linear, cubic, quadric, annealing. Do all the methods belong to adiabatic algorithm? Which is your original method?

回答1: Yes, all the methods are used with the adiabatic algorithm and here simply we use the discrete version of the adiabatic algorithm which contain two operators, one of them to shift the phase, and the other one to mix the state. Our point is how can we shift and mix. I mean how fast and how slowly to apply the functions, so we use different formula for this operators. Quadric variation is my original method.

質問2: You used 100 instance of 3-SAT problems. Is it right? So which algorithm did you use to generate this instances?

回答2: Yes, I used 100 random instances of 3-SAT problems. I used a SAT generator called G2 algorithm.

質問3: Why did you choose to use G2?

回答3: Because I find it easy to use and I can control the parameters such as number of bits number of clauses, the difficulty of the problems, and the number of expected solutions.

質問4: Is there any idea rather than changing the phase functions formula or tune the parameter delta setting to improve the adiabatic algorithm?

回答4: Actually I was thinking recently about another idea to use another Hamiltonian in the middle of the evolution process, so it could operate as local evolution rather than to be global over the whole time. And I expect it to be a effective method

質問5: What will happen if parameter delta value was very big or very small?

回答5: When I tried to use big delta values, I found the results decline and go to zero as delta increase, and that is because when delta value is so big, it increases the phase shift and state mixing operator effect and may the operators effect the probability amplitudes, and cause it to turn around the unit circle and mistake the evolution to different final state. When Delta is very small, the phase shift is very week and decreases the speed of the evolution and makes it require more number of steps. The experiments revealed that best delta value for 3-SAT problems is to be below the 1.

質問6: How did you decide the delta values?

回答6: We generate 200 randomly generated 3-SAT problems, and solve it repeatedly and take the median of best solution for each problem dimension, then we could find the relation between the best delta value and the number of the bits

質問7: If we change the problem from 3-SAT to 4-SAT, will delta values be needed to be tuned again?

回答7: No in solving SAT problems the presented setting for delta is ok. However if we change the problem to another such as TSP, I am sure that it will be needed to find other suitable values

など約20の質問に対して的確に答えた。

以上の結果を受け、上記審査委員会は全員一致で、学位申請者は、大学院博士後期課程の修了者としての学力ならびに見識を十分に有するものと判断し、博士（工学）の学位を与えるに足る資格を持つと認めた。