

論文内容の要旨

博士論文題目

Studies on Methods for the Synthesis of Quantum Circuits

(量子回路の合成に関する研究)

氏名

Yumi Nakajima (中島 裕美)

(論文内容の要旨 1200 字程度)

本論文は、量子計算を表す行列から、サイズの小さな量子回路を合成するための量子回路の合成手法に関する研究成果をまとめたものである。量子コンピュータは、量子力学の原理に基づいて動作する新しいコンピュータであり、いくつかの問題について現在のコンピュータよりもはるかに高速に計算できることが期待されている。量子コンピュータ上で高速計算を実現するためには、量子コンピュータ専用のアルゴリズムが必要である。量子回路は、所望の演算を構成する基本演算の構成を図で記述したもので、効率的な量子アルゴリズムに用いられる量子計算には、多項式サイズの量子回路が存在する。一般の n 量子ビットの演算を、できるだけ小さなサイズの量子回路に変換する問題は、量子回路合成における基本的な問題である。本研究の主要な成果は以下の通りである。

第一に、量子 2 準位系において、任意の n 量子ビットの量子計算から、効率的な量子回路を自動合成する手法を提案する。提案手法は、KAK 分解と呼ばれる行列分解と分割統治法に基づいている。提案手法の利点は、一般の n 量子ビットの量子 Fourier 変換から、多項式サイズの量子回路を自動合成できる点にある。他の手法では、単純化や最適化を途中で行わなければ多項式サイズの量子回路を自動生成することはできない。

第二に、上記の手法を量子 d 準位系に応用した場合の効率的な自動合成の手法を提案する。量子 d 準位系とは、1 量子ビットで 0 から $d-1$ までの d 値の重ね合わせ状態を表現する系で、現在のコンピュータにおける多値論理に相当する枠組みである。量子 d 準位系の場合は、量子 2 準位系よりも計算誤差を小さくすることができるなどの利点があり、状況によっては量子 2 準位系よりも

有用になることが期待されている。しかしながら、従来の量子回路の自動合成手法の枠組みをそのまま量子 d 準位系に応用すると、余分な基本操作の数が指数関数的に増大してしまう問題があった。本研究では、量子 d 準位系に適した新しい KAK 分解の枠組みと分割統治法を考案する。提案手法では、従来手法と比較して、量子ビット数が小さい場合には、必要な 2 量子ビット間の演算の数を劇的に削減できる。

第三に、計算量理論と深い関わりを持つ重要な量子アルゴリズムの一つである AJL アルゴリズムに対して、従来手法よりも効率的な量子回路を合成する手法を提案する。AJL アルゴリズムは、現在のコンピュータ上では多項式時間で解くことができそうにないと考えられているが、量子コンピュータでは、問題を定義する変数 k と m が n の多項式の場合には、多項式時間で解けることが示されている。本研究では、AJL アルゴリズムで用いられる量子計算に対して、従来手法よりも効率的な量子回路を合成する手法を提案する。これにより、従来 AJL アルゴリズムが多項式時間で解けるための条件とされていた変数 k が n の多項式で抑えられるという条件は不要であり、AJL アルゴリズムの効率が変数 m にのみ依存することを示した。

(論文審査結果の要旨) (A4 1枚 1、200字程度)

量子コンピュータは、量子力学の原理に基づいて動作する新しいコンピュータであり、いくつかの問題について現在のコンピュータよりもはるかに高速に計算できることが期待されている。現在のコンピュータと同様に、量子コンピュータ上の計算(量子計算)の中にも、高速に実行できる演算とそうでない演算がある。また、所望の量子計算に対して、それを実現する量子コンピュータ上の基本演算の組み合わせは複数存在する。量子回路合成における基本的な課題の一つは、所望の量子計算に対して、少ない基本演算数の量子回路を合成する手法を確立することである。本論文は、そのような量子回路の合成手法に関する考察を行ったもので、得られた主要な成果は以下のとおりである。

【1】量子2準位系における量子回路の自動合成手法の提案。任意の n 量子ビットの演算から、できるだけサイズの小さな量子回路を自動合成することを目指したものである。本論文では、分割統治法と行列分解を組み合わせた手法により、効率的な量子回路を自動合成する手法を提案した。また、従来手法では最適化などが必要であるのに対し、提案手法では、 n 量子ビットの量子Fourier変換に対して、既知の多項式サイズの量子回路が自動合成できることを示した。

【2】量子 d 準位系における量子回路の自動合成手法の提案。量子 d 準位系とは、現在のコンピュータにおける多値論理に相当する系で、1量子ビットで0から $d-1$ までの d 値の重ね合わせ状態を表現する系である。量子2準位系の合成手法をそのまま量子 d 準位系に拡張すると、生成される量子回路のサイズが、理想的な量子回路のサイズに対して指数関数的に大きくなるという問題があった。本論文では、量子 d 準位系に適した新しい分割統治法の枠組みを提案し、効率的な量子回路を自動合成する手法を提案した。提案手法は量子ビット数が少ない場合に特に有効であり、従来手法により合成される量子回路と比較して、はるかに少ない基本演算数の量子回路を自動合成できることを示した。

【3】AJLアルゴリズムに対する効率的な量子回路の合成手法の提案。AJLアルゴリズムは、近似的なJones多項式を求める量子アルゴリズムであり、計算量理論と深い関わりを持つ。本論文では、従来のAJLアルゴリズムの量子回路よりも、効率的な量子回路を合成する手法を提案した。従来のAJLアルゴリズムの量子回路のサイズは、入力サイズを定義する3つの変数 k, m, n に依存していた。提案手法では、AJLアルゴリズムの量子回路のサイズは、変数 n にのみ依存することを示した。

以上、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。