

氏名(本籍)	井床 利生
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 10009 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査学術院	理工情報生命学術院
学位論文題目	Optimization of Circuit Transformation and Scheduling in Quantum Compilers (量子コンパイラにおける回路変換とスケジューリングの最適化)
主査	筑波大学 教授 工学博士 久野 誉人
副査	筑波大学 准教授 博士(理学) 佐野 良夫
副査	筑波大学 教授 博士(理学) 繁野 麻衣子
副査	筑波大学 教授 博士(工学) 亀山 幸義
副査	筑波大学 准教授 博士(工学) 中井 央

論文の要旨

量子プログラムを制御命令列に変換する量子コンパイラは、量子計算機を操作・利用するうえで不可欠であるが、出力される命令列を最適化して量子ビットのコヒーレンス時間内にすべての計算を終わらせることができれば、エラー耐性のない現在の量子計算機でも計算結果の忠実度は向上する。実用的な量子コンパイラでは、独立した複数のタスクに処理を分割して必要な変換を行うため、各タスクでの最適化を適切に行う必要がある。この論文では、量子プログラムが量子回路(量子ゲートの系列)という数学的に抽象化された表現形式で与えられるものとし、「量子回路マッピング」と「量子回路スケジューリング」の2つのタスクに注目して、それぞれに組合せ最適化問題としての定式化を与えている。この定式化には、これまでの研究であまり検討されていなかった量子ゲートの可換性が十分に考慮されている。こうして定式化されたそれぞれの組合せ最適化問題に対し、厳密な解を生成するアルゴリズムを与えるだけでなく、実用性を重視した発見的アルゴリズムも提案している。これらのアルゴリズムを計算機上に実装し、量子ゲートの可換性が解の最適性に与える影響などを計算実験によって評価・分析している。主だった章の内容は以下のとおりである：

まず、量子コンパイラが行う各種のタスクの解説と関連する既存の研究を紹介し、量子回路マッピングと量子回路スケジューリングの2つのタスクの位置付けなどについて説明している。

次に、量子回路マッピングに対する研究成果の報告を行っている。具体的には、量子ゲートの可換性を考慮した量子回路マッピングの最適化問題としての定義を与え、接続制約を満たすためのゲートの追加が2種類の方法で可能なことを示している。そこで、最適化問題を拡張して定式化したのち、厳密な解を生成するアルゴリズムを与え、計算実験によって量子ゲートの可換性を考慮したことによる解の改善の定量的評価を行っている。さらに、発見的な解を生成するアルゴリズムも提案しており、

計算実験によって既存のアルゴリズムとの性能の比較を行っている。

続いて、量子回路スケジューリングに対する研究成果を報告している。ここでも量子ゲートの可換性を考慮し、量子回路スケジューリングの最適化問題としての定義を与えている。定義された最適化問題がジョブショップ・スケジューリング問題の特殊ケースと見做せることを示し、その知見に基づいて制約プログラミングとしての定式化、および混合整数計画問題としての定式化を与えている。さらに計算実験を通し、量子ゲートの可換性を考慮することによって解がどの程度改善されるかを定量的に評価している。また、このタスクの前に行われる他のタスクの最適化が量子回路スケジューリングでの最適化に与える影響についても実験によって分析している。

審 査 の 要 旨

【批評】

現在の量子計算機にはエラー耐性がなく、計算の忠実度を上げるうえでコンパイラーが行う各種タスクの最適化は重要な課題である。この論文では、量子回路マッピングと量子回路スケジューリングの2つのタスクに注目し、組合せ最適化問題としての定式化を行っており、従来の研究ではあまり検討されることのなかった量子ゲートの可換性を考慮している点に優れた新規性がある。

量子回路マッピングに関しては、接続制約を満たす方法としてこれまで主に用いられてきた SWAP ゲートの挿入に加え、新たに Bridge ゲートへの置換も許した問題の定式化を行い、厳密な解を生成するアルゴリズムを与えている。さらに実用性を重視して発見的アルゴリズムの提案も行い、このアルゴリズムによって得られる回路の追加 CNOT ゲート数が既存の方法よりも遥かに少ないことを計算実験によって実証している。

量子回路スケジューリングについては、ジョブショップ・スケジューリングと同様の離接グラフで表現できることを示し、制約充足プログラミングを用いた厳密アルゴリズムと発見的アルゴリズムを構築している。計算実験により、量子ゲートを考慮することによってスケジュール長が改善されること、その改善の度合いが前段に行われるタスクに影響されるものの、平均的には安定していることを明らかにしている。

数理最適化の応用として比較的新しい分野であるが、提案された手法は現時点で第一級と言える。ゲート分解や回路簡略化など量子コンパイラーの他のタスクに対する最適化も期待される。

【最終試験の結果】

令和3年1月28日、理工情報生命学術院において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。この結果とシステム情報工学研究群情報理工学位プログラムにおける達成度評価による結果に基づき、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。