

イジングマシンを活用したスケーラブルな量子コンパイラの開発 —近未来の量子計算技術を支えるコンパイラの構築—

1. 背景

昨今の量子技術の目覚ましい発達により、量子コンピュータはついに現実のものとなった。量子コンパイラとは、このような物理デバイス上で量子計算を実行するために必要不可欠なソフトウェアの一つである。

一般に、物理デバイス上の量子ビット(物理量子ビット)は隣どうしの量子ビットとしか相互作用できないという制約がある。また、物理デバイスは扱える量子ゲートに制限があるほか、演算実行時にエラーが発生するという課題も抱えている。量子コンパイラはこれらの制約を守りながら、できるだけ正確に動作するように量子回路を物理的に実装(コンパイル)する。

量子回路のコンパイルでは、量子回路中の仮想量子ビットをデバイス上の物理量子ビットに割り当てる、Qubit Routing 問題の最適化が重要である。Qubit Routing 問題では、相互作用する仮想量子ビットが極力近づくように、かつ移動を最小限に抑えるように仮想量子ビットの配置・移動を行う。Qubit Routing 問題は最適化が非常に難しく、NP 困難に属していることが示されている。

このような複雑な問題を解く有効な手段の一つに、イジングマシンの活用がある。イジングマシンは QUBO という形式の最適化問題に特化したソルバーであり、従来のコンピュータでは解きにくいクラスの問題の準最適解を高速にサンプリングすることができる。イジングマシンの実装は量子コンピュータよりも進んでおり、既に数十万変数の問題を扱えるものも存在する。

本プロジェクトはイジングマシンの実装の優位性に着目し、特に大規模量子デバイスに対する Qubit Routing 問題への応用に取り組む。量子デバイスの規模は近年急速に拡大しており、2022 年 11 月には IBM 社により 433 量子ビットのデバイスが発表された。このような大規模デバイス向け量子コンパイラへの需要は今後増していく一方であり、量子ビット数の増加に対して頑健な、スケーラブルな量子コンパイラが今後重要になると予測される。

2. 目的

本プロジェクトの目的は、Qubit Routing 問題の最適化にイジングマシンの利点を最大限活かしつつ、大規模デバイスに対しても効率的に動作する量子コンパイラを作成することである。大規模デバイスに向けたコンパイラ作成における一番大きな課題は QUBO 問題サイズの肥大化であり、これの抑制が本プロジェクトのメインの目標となる。

QUBO 問題規模の削減により、イジングマシンの更なる有効活用が可能になるほか、計算時間の大幅な短縮によるユーザビリティ向上が想定される。

本プロジェクトを通じた取り組みにより、大規模デバイスを用いた次世代の量子コンピューティングの効率化を実現したいと考えている。また、本プロジェクトの成果物がイジングマシンの能力を大いに発揮するキラーアプリケーションとなることで、イジングマシン開発のさらなる加速が期待される。

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトで開発した量子コンパイラ「ISAAQ (ISing mAchine Assisted Quantum compiler)」は、Python ライブラリとして実装されている。コンパイルを行う上で必要な機能(量子回路の読み込み、Qubit Routing 問題の生成、イジングマシンによる求解、量子回路の合成、実行結果に基づいたパラメータ更新など)はモジュールとして分割されており、コードの可読性・拡張性が高いのが特徴である。

QUBO 問題規模を削減するために、ISAAQ には二種類の工夫が施されている。

一つ目の工夫は物理デバイスに対する階層的クラスタリングの活用であり、これによって仮想量子ビットの配置決定問題を複数の QUBO 問題に分割している(図1)。QUBO 問題のサイズは仮想量子ビットと物理量子ビットのペア数に対応するため、仮想量子ビットの割り当て先を数個程度にまで減らすことで、問題サイズを量子ビット数の線形オーダーにまで削減することができた。

階層的クラスタリングを用いるメリットは、大クラスターへの割り当て結果を使って小クラスターへの割り当てを決定できる点にある。これにより、巨視的な探索から微視的な探索へとスケールを変えながら仮想量子ビットを割り当てることが可能になった。さらに、QUBO 問題の大きさはイジングマシンの結果には依存せずクラスターの分割数のみによって決定されるため、イジングマシンを使う前に実行環境に合わせて問題サイズを調整できるという利点もある。

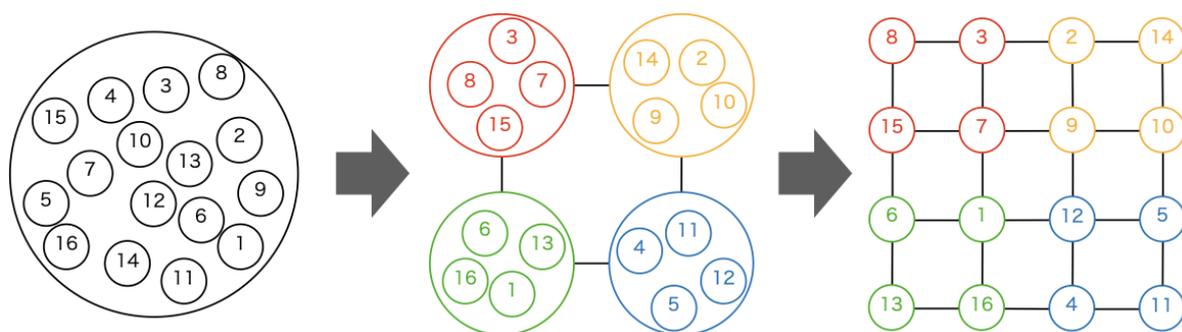


図1：階層的クラスタリングによる配置決定問題の分割

二つ目の工夫は、主要な仮想量子ビットの抽出による QUBO 削減およびコンパイル性能の向上である。ISAAQ では相互作用を持つ仮想量子ビットを「主要な仮想量子ビット」として抽出し、イジングマシンによる探索対象を制限している(図2)。これ

によって QUBO 問題の大きさをさらに削減することに成功し、Qubit Routing の高速化を実現した。

また、主要でない仮想量子ビットの配置決定問題は、最短経路問題や最小費用流問題として定式化可能であり、(古典的な)最適化アルゴリズムを使って効率的に解けることが明らかになった。これにより、イジングマシンと古典最適化アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド解法によるコンパイル効率化が実現した。

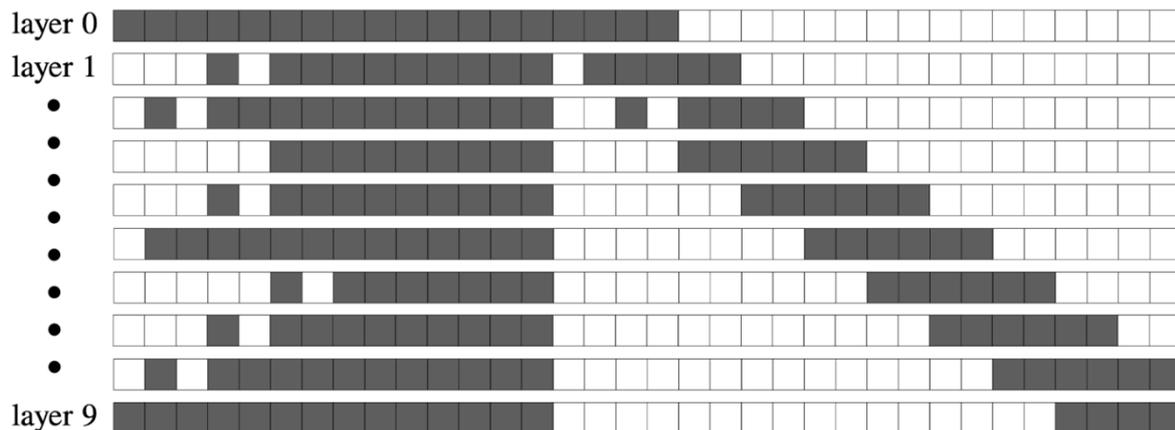


図 2：主要な仮想量子ビット(黒色)の分布例

4. 新規性・優位性

本プロジェクトの一番大きな成果は、コンパイラの適用範囲の大幅な拡大にある。SELECT 回路をベンチマークとして用いた数値実験では、上記の二つの工夫により QUBO 問題サイズが大幅に削減されていることが分かった。特に 342 量子ビットの回路に対しては、物理デバイスに対する階層的クラスタリングによって約 20 分の 1 に、主要な仮想量子ビットの抽出によってそこから約 7 分の 1 に問題サイズを削減できており、二つの工夫を組み合わせることで約 140 分の 1 にまで QUBO 問題を小さくすることに成功した(図 3 左)。

また、主要な仮想量子ビットの抽出はコンパイル性能の向上にも貢献することが明らかになり、イジングマシンと古典的な最適化アルゴリズムのハイブリッド解法によるメリットが示された(図 3 右)。

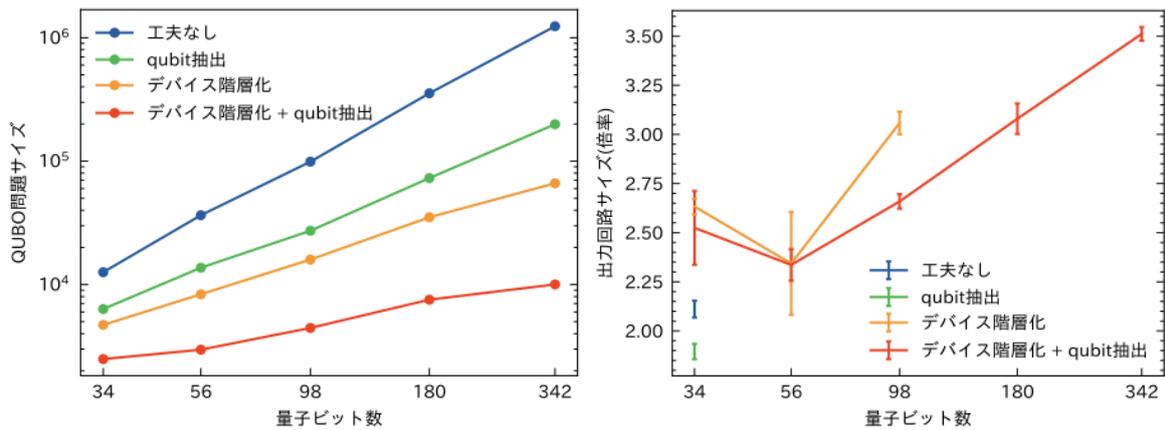


図3：QUBO 問題サイズ(左)、コンパイル性能(右)の比較結果

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本プロジェクトの成果は、コンパイルの高速化および性能向上により、大規模量子デバイスを使った量子計算の精度向上に大きく貢献する。量子コンパイラはユーザーからは直接見えない部分の最適化を行うものであるが、実機を用いた量子計算の実行に必要な不可欠なソフトウェアである。ISAAQ は多様な形状のデバイスに対して最適化可能であるため、非常に多くのユーザーが本成果物の恩恵を受けられると予想される。

イジングマシンの開発という観点では、ISAAQ はイジングマシンの強みを最大限に活用したキラーアプリケーションの一つとして見ることができる。イジングマシンは技術が成熟している一方で、有効なアプリケーションは未だ探索中である。本プロジェクトは Qubit Routing 問題におけるイジングマシンの有効性を確かめることにより、イジングマシンを使うことによる嬉しさの一つを提示することができた。このようなポジティブな成果はモチベーションの一つとして、今後のイジングマシン開発を後押しすると期待される。

量子ゲート方式における課題にイジングマシンを活用するというアイデアは、本プロジェクトが未踏ターゲット事業において初の試みである。このようなトピックの研究やアプリケーション開発は世界的に見ても非常に少なく、本プロジェクトは非常に先駆的な取り組みであったと考えている。

量子ゲート方式・量子アニーリング方式の両方にまたがるアイデアは、これらをまとめて「量子技術」として扱うまさに日本ならではの発想であると感じている。

イジングマシンは日本が世界をリードしている技術の一つであり、私自身も大いに期待している技術である。本プロジェクトが日本の学术界・産業界の活性化に寄与し、関連技術の発展や新たなブレイクスルー的技術の創発に貢献できたら幸いである。

6. 氏名（所属）

内藤 壮俊（東京大学大学院情報理工学系研究科）

（参考）関連 URL

本プロジェクトの成果物は以下の URL に公開されている。

<https://github.com/SoshunNaito/ISAAQ>