

Theory and Applications of Hybrid Quantum-Classical Optimization Algorithms

(Teoria i zastosowania hybrydowych algorytmów optymalizacji kwantowo-klasycznej)

Ludmila Botelho

Supervisor: dr hab. Jarosław Miszczak

25.06.2024

W ostatnich dziesięcioleciach społeczność naukowa była świadkiem szybkiej ewolucji komputerów, w wyniku której powstały potężne urządzenia w połączeniu z wyrafinowanymi metodami obliczania trudnych zadań, co pozwoliło nam zrewolucjonizować sposób, w jaki rozumiemy i przetwarzamy informacje. Jednocześnie społeczność naukowa była świadkiem pojawienia się nowego paradygmatu: technologia kwantowa jest obiecującą dziedziną, która potencjalnie zapewnia korzyści obliczeniowe. W szczególności kultowe algorytmy Shora i Grovera zwróciły uwagę społeczności informatyków na teoretyczną możliwość budowania algorytmów, które są szybsze w porównaniu do obecnie znanych z konwencjonalnych komputerów.

Wraz ze zbliżaniem się do fizycznych ograniczeń obecnej architektury, poszukiwanie alternatywnych metod obliczeniowych również przyczynia się do badań i rozwoju tak zwanych komputerów kwantowych. Jednak wysiłki zmierzające do zbudowania odpornych na błędy systemów przetwarzania kwantowego zaowocowały skromnymi sukcesami. Wdrożone obecnie urządzenia kwantowe są ograniczone skalą i hałaśliwe, znane jako komputery kwantowe o hałaśliwej pośredniej skali (NISQ). W tym scenariuszu kwantowo-klasyczne metody hybrydowe, takie jak Variational Quantum Algorithms (VQAs) i Quantum Annealing, pojawiły się jako kandydaci do wykonywania zadań optymalizacyjnych w tak ograniczonym scenariuszu. W szczególności możliwość zastosowania ograniczania błędów, post-selekcji i lepszego zrozumienia krajobrazów energetycznych może poprawić jakość wyników VQAs dla urządzeń NISQ.

Poza tym można również zapytać, co komputer kwantowy może zrobić w tej chwili. Na przykład interesujące jest, czy komputer kwantowy jest gotowy do wykonywania zadań związanych ze sztuką i kreatywnością. Konkretniej, poprzez dostosowanie ich do problemów optymalizacyjnych sformułowanych do rozwiązania w urządzeniach wyżarzających.

W tej rozprawie zaproponowałam dyskusję na temat tego, jak ulepszyć protokoły przyjazne dla NISQ w podejściu opartym na bramkach. Przedstawiłam dwie metody: pierwsza z

nich to schemat ograniczania błędów w wariacyjnych obwodach kwantowych poprzez post-selekcję w środku obwodu. Podejście to opiera się na badaniu prawidłowych podprzestrzeni uzyskanych za pomocą różnych kodowań, takich jak one-hot, k -hot, binary i domain-wall, które często pojawiają się w kodowaniu problemów optymalizacji kombinatorycznej i w chemii kwantowej. Druga to strategia heurystyczna, która wykorzystuje klasyczną optymalizację homotopii, ponieważ ma ona potencjalne zastosowanie w radzeniu sobie z wysoce nieliniowymi funkcjami. Strategia ta upraszcza poszukiwanie dobrych parametrów QAOA przy jednoczesnym utrzymaniu PQC na niezmiennym poziomie. Aby zaprezentować to podejście, zbadalam ważony problem Max-Cut na grafach Barabasiiego-Alberta. Wreszcie, pracowałam również nad zastosowaniami Analizy Kwantowej w Teorii Muzyki. Rozważałam problem komponowania muzyki w różnych aspektach, między innymi kompozycji melodii i rytmu. W celu redukcji muzyki potraktowałam problem jako wariant planowania zadań, gdzie każda maszyna jest instrumentem, a zadania są frazami muzycznymi. Korzystając z dostępnych komercyjnych wyżarzarek kwantowych, wygenerowałam utwory muzyczne, które są prezentowane w rozprawie.