

METODY WALIDACJI WSPÓŁCZESNYCH ARCHITEKTUR KWANTOWYCH

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

MGR PAULINA LEWANDOWSKA

PROMOTOR: DR HAB. ZBIGNIEW PUCHAŁA, PROF. IITIS PAN

PROMOTOR POMOCNICZY DR HAB. INŻ. ŁUKASZ PAWELA, PROF. IITIS
PAN

Streszczenie

W ostatniej dekadzie możemy obserwować, jak urzeczywistnia się idea budowy i praktycznego wykorzystania komputerów kwantowych. Producenci urządzeń typu NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) weszli szturmem na rynek techniki informatycznej, dzięki czemu mamy obecnie szeroki wybór komputerów kwantowych, opartych na różnych architekturach i odpowiadających im rodzajach oprogramowania. Wśród dostawców sprzętu, którzy oferują publiczny dostęp do urządzeń opartych na bramkowym modelu obliczeń, można wymienić takie firmy jak Rigetti, IBM, Oxford Quantum Group, IonQ czy Xanadu. Jeśli natomiast wziąć pod uwagę urządzenia wykorzystujące inne paradygmaty, to warto wspomnieć o D-Wave i ich kwantowych wyżarzaczach, czy urządzeniach QuEra opartych na atomach neutralnych. Jak już wspomniano wyżej, większość producentów zapewnia użytkownikom własne oprogramowanie czy interfejsy aplikacji służących uzyskiwaniu dostępu do urządzeń. Dzięki temu obecnie każdy jest w stanie wykonywać proste obliczenia na komputerach kwantowych.

Powszechnie wiadomo jednak, że urządzenia typu NISQ mają swoje ograniczenia. Powstaje więc naturalne pytanie: w jakim stopniu wiarygodne będą obliczenia przeprowadzane z ich wykorzystaniem? Odpowiedzi na to pytanie może dostarczyć nam proces walidacji. Przez pojęcie walidacji architektur kwantowych rozumiemy testowanie poprawności ich funkcjonowania i zdolności do wykonywania zadań, do których zostały zaprojektowane. Ze względu na licznie występujące błędy istnieje zatem istotna potrzeba opracowania procesów walidujących, które pozwolą dokładnie ocenić, na ile precyzyjnie działają pewne platformy obliczeniowe.

Celem niniejszej dysertacji jest opracowanie sposobów walidacji współczesnych architektur kwantowych typu NISQ opartych na bramkowym modelu obliczeń. W pracy analizujemy zarówno aspekty teoretyczne, jak i inżynierskie. Szczególną uwagę poświęcamy konstruowaniu metod walidacji, a następnie implementacji modeli na współczesnych architekturach kwantowych. Chcemy bowiem pokazać, że skonstruowane przez nas modele teoretyczne pozwolą również na uzyskanie praktycznych metod benchmarkowania współczesnych systemów kwantowych. Ostatnim, lecz nie mniej ważnym aspektem dysertacji jest wdrożenie i zaimplementowanie powstałych algorytmów na urządzeniach kwantowych.

Rozpoczynamy od rozpatrzenia metody walidacji opartej na schemacie uczenia się pomiarów von Neumanna. W tym przypadku rozważamy sytuację, w której używamy nieznanego pomiaru N razy eksperymentalnie, a następnie chcemy przybliżyć jego postać, gdy utracimy do niego dostęp. Strategię tę zwykle wykonuje się w dwóch etapach. Pierwszy z nich polega na przygotowaniu pewnego początkowego stanu kwantowego i zaimplementowaniu nieznanego pomiaru N razy, co pozwala nam przechowywać informację o tym pomiarze do późniejszego wykorzystania. Natomiast drugi etap polega na zaimplementowaniu operacji odzyskiwania, dzięki której otrzymujemy przybliżenie nieznanego pomiaru. Schemat jest optymalny, gdy osiąga najwyższą możliwą wierność przybliżenia. Zadanie to ma na celu wyznaczenie wierności przybliżenia oryginalnego pomiaru względem pomiaru nauczonego. Ponadto chcemy wyznaczyć najefektywniejszy algorytm, który realizuje to zadanie.

W standardowym schemacie uczenia się pomiarów von Neumanna wykorzystywane są sieci kwantowe, znane również jako kwantowe komby. W rozprawie rozszerzamy

to podejście dzięki wykorzystaniu kwantowej teorii struktur przyczynowo-skutkowych. Pokazujemy potencjał i przewagę nad standardowym schematem użycia tej teorii w problemie uczenia się pomiarów von Neumanna. W tym celu opisujemy część strategii odpowiedzialną za przechowywanie operacji kwantowej za pomocą macierzy procesu, i wówczas liczymy wartość funkcji wierności. W efekcie funkcja wierności przybliżenia rośnie, a co za tym idzie – zwiększa się precyzja pomiaru nauczonego.

W naszej pracy wprowadzamy również metodę walidacji na podstawie schematu rozróżniania pomiarów von Neumanna. Aby zobrazować schemat rozróżniania, rozpatrzmy eksperyment, w którym wykorzystujemy nieznaną urządzenie pomiarowe. Wiemy jedynie, że wykonuje ono jeden z dwóch pomiarów kwantowych. Naszym celem jest wskazanie – możliwie z jak największym prawdopodobieństwem – który z pomiarów został wykonany w trakcie eksperymentu. Następnie chcielibyśmy opracować optymalną strategię rozróżniania, czyli taką, dla której uzyskujemy maksymalne prawdopodobieństwo poprawnego rozróżnienia. Będziemy zainteresowani głównie schematem rozróżniania w zakresie pewnej rodziny kubitowych pomiarów von Neumanna. Dla tej rodziny pomiarów obliczymy dokładną wartość prawdopodobieństwa poprawnego rozróżnienia i skonstruujemy optymalną strategię.

Jako inżynierski aspekt pracy wprowadzamy PyQBench – innowacyjną platformę open source przeznaczoną do testów porównawczych komputerów kwantowych opartych na bramkowym modelu obliczeń. PyQBench weryfikuje poprawność działania urządzeń typu NISQ dzięki wykorzystaniu schematu rozróżniania pomiarów von Neumanna. Oferujemy potencjalnym użytkownikom także interfejs wiersza poleceń (CLI) do uruchamiania testów porównawczych przy użyciu parametryzowanej rodziny pomiarów kubitowych w bazie Fouriera. Dodatkowo – w przypadku bardziej zaawansowanych scenariuszy rozróżniania – PyQBench może być wykorzystywany jako biblioteka Python. Dzięki PyQBench pokazemy, że zaproponowane modele walidacji i uzyskane wyniki przyczyniły się do powstania nowego aspektu benchmarkingu urządzeń typu NISQ.

Rozważamy również schemat certyfikacji pomiarów von Neumanna rozumiany jako kwantowe testowanie hipotez. W tej rozprawie jesteśmy zainteresowani dwupunktowym schematem certyfikacji, w którym hipotezy – zerowa i alternatywna – są zbiorami jednoelementowymi. Naszym celem jest zminimalizowanie prawdopodobieństwa popełnienia błędu II rodzaju, przy założeniu pewnego ustalonego poziomu istotności. Podobnie jak w zadaniu rozróżniania chcemy wyznaczyć optymalną strategię certyfikacji, dla której prawdopodobieństwo popełnienia błędu II rodzaju będzie minimalne. Ponownie szczególną uwagę poświęcamy schematowi certyfikacji dla pewnej rodziny kubitowych pomiarów von Neumanna. Na podstawie otrzymanych wyników mamy zamiar rozszerzyć platformę PyQBench o kolejny schemat benchmarkowania komputerów kwantowych typu NISQ.

Dzięki powyższym wynikom pokazujemy, że zaproponowane modele walidacji przyczyniły się do powstania nowego aspektu benchmarkingu urządzeń typu NISQ. Wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie można streścić w dwóch hipotezach.

1. Wykorzystanie kwantowej teorii struktur przyczynowo-skutkowych w problemie uczenia się pomiarów von Neumanna zapewnia wydajniejsze metody walidacji urządzeń kwantowych.
2. Metody walidacji bazujące na zadaniu rozróżniania i certyfikacji pomiarów von Neumanna stanowią efektywną metodę benchmarkowania ówczesnych komputerów

kwantowych opartych na bramkowym modelu obliczeń.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów i trzech dodatków. Pierwszy rozdział zawiera wstęp do kwantowej teorii informacji i motywację prowadzonych badań. W kolejnych dwóch rozdziałach zamieszczono wprowadzenie do matematycznego języka informatyki kwantowej. Pozostała część dysertacji została napisana na podstawie trzech opublikowanych artykułów naukowych oraz jednego artykułu będącego w procesie recenzji.

Pierwsza praca, zaprezentowana w rozdziale 4, dotyczy schematu uczenia się pomiarów von Neumanna. Następnie, w rozdziale 5, badamy możliwość wykorzystania kwantowej teorii struktur przyczynowo-skutkowych w problemie uczenia się pomiarów von Neumanna. W rozdziale 6 skupiamy się na kolejnej metodzie walidacji jaką jest rozróżnianie pomiarów kwantowych. Na podstawie uzyskanych rezultatów, w rozdziale 7, przedstawiamy innowacyjną platformę PyQBench typu open-source do testów porównawczych komputerów kwantowych opartych na bramkowym modelu obliczeń. W rozdziale 8 wprowadzamy schemat certyfikacji pomiarów von Neumanna. W oparciu o uzyskane rezultaty rozszerzamy PyQBench o kolejny benchmark komputerów kwantowych typu NISQ. Rozdział 9 zawiera wnioski z rozprawy i podsumowuje wyniki przedstawionych badań.

Lista publikacji

Pogrubioną czcionką zaznaczono publikacje związane z niniejszą rozprawą.

Opublikowane prace

1. Przemysław Sadowski, Łukasz Paweła, Paulina Lewandowska, and Ryszard Kukulski *Quantum walks on hypergraphs*, International Journal of Theoretical Physics, vol. 58, (2019). arXiv: <https://arxiv.org/abs/1809.04521>
2. Paulina Lewandowska, Ryszard Kukulski, and Łukasz Paweła, *Optimal representation of quantum channels*, Computational Science - ICCS 2020, (2020). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2002.05507>
3. Ryszard Kukulski, Paulina Lewandowska, and Łukasz Paweła, *Perturbation of the numerical range of unitary matrices*, Computational Science - ICCS 2020, (2020). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2002.05553>
4. **Paulina Lewandowska, Aleksandra Krawiec, Ryszard Kukulski, Łukasz Paweła, and Zbigniew Puchała, *On the optimal certification of von Neumann measurements*, Scientific Reports, vol. 11, (2021). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2009.06776>**
5. **Paulina Lewandowska, Ryszard Kukulski, Łukasz Paweła, and Zbigniew Puchała, *Storage and retrieval of von Neumann measurements*, Physical Review A, vol. 106, issue 5, (2022). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2204.03029>**
6. Paulina Lewandowska, Łukasz Paweła, and Zbigniew Puchała, *Strategies for single-shot discrimination of process matrices*, Scientific Reports, vol. 13, (2023). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2210.14575>

Preprinty

1. **Konrad Jałowiecki, Paulina Lewandowska and Łukasz Paweła, *PyQBench: a Python library for benchmarking gate-based quantum computers*, (2023). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2304.00045>. Under review SoftwareX.**