

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Śmierzchalskiego pt.: „Sieci neuronowe i tensorowe w badaniu kwantowych procesorów wyżarzających”

Tematyka rozprawy:

Rozprawa doktorska mgra Tomasza Śmierzchalskiego poświęcona jest zagadnieniu badania kwantowych procesorów wyżarzających z wykorzystaniem sieci neuronowych i tensorowych. Jest to niewątpliwie ważny problem naukowy, a wykorzystanie rzeczywistych wyżarzaczy kwantowych D-Wave jako przedmiotów oceny czyni go dodatkowo potencjalnie atrakcyjnym dla praktyków.

Recenzowana praca liczy 150 stron i składa się z: wykazu opublikowanych współautorskich prac doktoranta, streszczenia w języku polskim i angielskim, wprowadzenia, 8 rozdziałów, bibliografii oraz czterech dodatków. Dla rozdziałów 3-8 został jasno sprecyzowany wkład doktoranta oraz relacja zawartości wspomnianych rozdziałów do opublikowanego już materiału. Doktorant był zaangażowany w prace projektowe oraz implementację pakietu SpinGlassPEPS.jl, a także jego weryfikację oraz naukową interpretację uzyskanych wyników. Samodzielnie przygotował oraz uruchomił kontrolowane środowisko do oceny wyżarzaczy kwantowych zgodnie z zunifikowaną procedurą. Był także odpowiedzialny za zaprojektowanie eksperymentów związanych z badaniem termodynamicznych własności wyżarzaczy kwantowych; projekt i implementację narzędzia do mitygacji błędów z użyciem uczenia ze wzmocnieniem oraz implementację i uruchomienie dokładnych symulacji adiabaticznej dynamiki niewielkich układów kwantowych. Doktorant zajmował się także (w kilku obszarach samodzielnie) projektowaniem eksperymentów obliczeniowych oraz prezentacją i interpretacją uzyskanych wyników. Są to kluczowe elementy i pozwalają ocenić uzyskane wyniki jako osiągnięcia doktoranta.

W liczącej 180 pozycji bibliografii zawierającej istotne pozycje z zakresu tematyki rozprawy, występuje 5 współautorskich pozycji doktoranta. Prace te zostały opublikowane w specjalistycznych czasopismach (SoftwareX, Physical Review Applied, Scientific Reports) oraz w materiałach konferencji ICCS 2022 o zasięgu międzynarodowym.

Główną tezą rozprawy jest stwierdzenie, iż rzetelna ocena wyżarzaczy kwantowych wymaga benchmarkingu wykraczającego poza analizę najlepszego pojedynczego rozwiązania. Autor zakłada, że w procesie wspomnianej wcześniej oceny konieczne jest uwzględnienie:

- silnych klasycznych punktów odniesienia,
- właściwości próbkowania,
- różnorodności uzyskiwanych konfiguracji,
- fizycznego kosztu obliczeń, a w szczególności ich efektywności termodynamicznej.

Cel ten został osiągnięty poprzez zaproponowanie oraz implementację heurystyki opartej na sieciach tensorowych (pakietu SpinGlassPEPS.jl), a następnie jej wykorzystanie w procesie oceny wyżarzaczy

kwantowych D-Wave dla losowych instancji szkła spinowego dla grafów Pegasus i Zephyr. W recenzowanej rozprawie doktorskiej zaproponowane zostały spójne ramy oceny wyżarzaczy kwantowych wraz z ich zastosowaniem do współcześnie dostępnych kwantowych procesorów wyżarzających. Podejmowany w rozprawie problem naukowy badania kwantowych procesorów wyżarzających z wykorzystaniem sieci neuronowych i tensorowych został trafnie sformułowany.

Tematyka rozprawy jest aktualna ze względu na obserwowany w ostatnim czasie znaczący postęp w obszarze obliczeń kwantowych przez znaczący rozwój technologii oraz ułatwiony dostęp do komputerów kwantowych dla nauki. Wynikiem wspomnianego rozwoju jest wdrożenie obliczeń kwantowych w różnych obszarach co najmniej na poziomie demonstracyjnych (*proof of concept*). Komputery kwantowe dają możliwość rozwiązywania problemów w zasadniczo odmienny sposób w porównaniu z metodami klasycznymi, potencjalnie oferując znaczące korzyści. W mojej ocenie podejmowana w recenzowanej rozprawie tematyka badań w obszarze oceny możliwości wyżarzaczy kwantowych stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

Za najważniejsze wyniki zamieszczone w rozprawie, stanowiące oryginalny wkład Autora w dyscyplinę, uważam:

1. Opracowanie pakietu SpinGlassPEPS.jl - heurystyki opartej na sieciach tensorowych, przystosowanej do grafów o strukturze quasi-dwuwymiarowej zgodnej z łącznością procesorów QPU.
2. Bezpośrednie porównanie wyżarzaczy kwantowych D-Wave z klasycznymi oraz inspirowanymi kwantowo algorytmami optymalizacyjnymi dla losowych instancji szkła spinowego dla grafów Pegasus i Zephyr.
3. Analiza wyżarzaczy kwantowych z perspektywy termodynamicznej.
4. Przeprowadzenie dokładnych symulacji adiabaticznej dynamiki niewielkich układów kwantowych.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że recenzowana praca ma charakter naukowy i może być przedmiotem rozprawy doktorskiej. W mojej ocenie uzyskane przez Autora wyniki w istotny sposób uzupełniają istniejący stan wiedzy. Podjęcie przedstawionego w pracy problemu badawczego jest w pełni uzasadnione.

Zarówno strona informatyczna, jak i matematyczna rozprawy nie budzi zastrzeżeń. W bibliografii zostały zawarte najistotniejsze pozycje z zakresu sieci neuronowych i tensorowych, kwantowego wyżarzania oraz zarówno klasycznych metod optymalizacji jak i inspirowanych kwantowo. Należy także podkreślić umiejętność zaplanowania i przeprowadzenia przez Autora rozprawy złożonych eksperymentów obliczeniowych. Dysertacja zawiera ponadto wiele rysunków, tablic i wykresów, które dodatkowo ilustrują i ułatwiają analizę uzyskanych wyników.

Rozprawa została napisana poprawnie, jednak Autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć:

1. Tezy pracy nie zostały jasno uwypuklone w tekście. Czytelnik w trakcie lektury rozprawy bez większych trudności jest w stanie odczytać tezy recenzowanej rozprawy doktorskiej niemniej jednak dobrą praktyką jest zamieszczanie tez pracy w osobnym podrozdziale rozprawy doktorskiej.
2. W rozdziale 3 przykład użycia został zaprezentowany dla regularnej topologii, ze wskazaniem, że można też użyć topologii D-Wave (Pegasus, i Zephyr). Ilustracyjny przykład byłby interesujący także dla topologii D-Wave.
3. W rozdziale 5 i 6 eksperymenty obliczeniowe były przeprowadzone tylko na niedostępnym już wyżarzaczku kwantowym D-Wave 2000Q w topologii Chimera podczas gdy w rozdziale

4 zaprezentowane zostały wyniki dla topologii Pegasus i Zephyr, a w rozdziale 7 tylko dla topologii Pegasus. Rozszerzenie eksperymentów obliczeniowych o wyniki dla topologii Pegasus (rozdział 5 i 6) i Zephyr (rozdział 7) pozwoliłoby potencjalnie na uzyskanie szerszego obrazu w kontekście oceny wyżarzaczy kwantowych.

4. Drobne błędy redakcyjne np. Rysunek 1.3 - brak jednostek czasu na osi.

Wymienione powyżej uwagi merytoryczne i redakcyjne nie mają zasadniczego wpływu na wagę i jakość przedstawionych w rozprawie wyników i nie wpływają też w znaczący sposób na ogólną pozytywną jej ocenę. Autor zastosował metody badawcze właściwie dobrane do problematyki wykorzystania sieci neuronowych i tensorowych w badaniu kwantowych procesorów wyżarzających, a dobór cytowanej literatury nie budzi zastrzeżeń.

Zawartość rozprawy doktorskiej potwierdza solidny stan wiedzy kandydata w zakresie informatyki technicznej i telekomunikacji w obszarze wykorzystania sieci neuronowych i tensorowych w badaniu kwantowych procesorów wyżarzających. Sformułowania zawarte w rozprawie są zapisane przy pomocy adekwatnych narzędzi matematycznych i prezentują wysoki poziom merytoryczny doktoranta w zakresie podstaw matematycznych obliczeń kwantowych.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w niniejszej recenzji i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) oceniam, że:

- rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,
- doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgra Tomasza Śmierzchalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.