

Oponentní posudek dizertační práce

Kvantové a klasické strojové učení pro kvantové informační protokoly

Dizertant: Mgr. Jan Roik, školitel: doc. Mgr. Karel Lemr, Ph.D.

Tématem předložené dizertační práce je perspektivní problematika kvantového provázání a kvantového zpracování informace, které se autor pokusil efektivně propojit s další doposud samostatnou výzkumnou oblastí, totiž umělých neuronových sítí, umělé inteligence a strojového učení. Tomuto se autor systematicky věnoval v rámci 3 pokročilých experimentálních schémat. Tři vybrané experimenty byly prováděny v rámci Společné laboratoře optiky Palackého univerzity a Akademie věd České republiky. V prvním experimentu je pozornost věnována problematice přesnosti detekce entanglementu pomocí umělé neuronové sítě. Dále autor zaměřil svou pozornost na kvantifikaci entanglementu získanou z kolektivních měření zpracovaných pomocí strojového učení. Jako třetí vybraný experiment autor popisuje studium trasování v kvantově komunikačních sítích podpořených strojovým učením. Tyto tři významné experimenty tvoří jádro předložené dizertační práce. Dizertant se detailně a samostatně věnoval jednotlivým 3 experimentům. Téma dizertace je tak velmi aktuální a perspektivní, zejména pro další rozvoj kvantových technologií, protože efektivně propojuje dvě doposud často samostatně uvažované oblasti – kvantové zpracování informace a umělé neuronové sítě a strojové učení. Je zřejmé, že takováto předložená dizertační práce může být velmi významná pro další rozvoj oboru. Téma předložené práce je vědecky aktuální, s ohledem na současný dynamický rozvoj vědecké oblasti kvantových technologií a souvisejícího aplikačního potenciálu.

Posuzovaná dizertační práce má 120 stran, obsahuje 31 obrázků, grafů a několik tabulek, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 218. Jak je z práce i samostatného seznamu vlastní literatury v závěru práce patrné, autor dizertace publikoval celkem 3 publikace v impaktovaných časopisech, v přímém vztahu k tematice dizertace jsou využity 2 práce – *Physical Review Applied*, *Physical Letters A* (+ jedna práce byla zaslaná do redakce). Kromě toho autor publikoval ještě 2 vědecké práce (*Journal of Optics* a arXiv), spolu s dvěma českými články (Jemná mechanika a optika), ve všech je také dizertant (kromě arXivu) 1. autorem.

Samotná práce je členěna do 6 hlavních číslovaných kapitol, zahrnujících – po úvodní kapitole 1, přinášející motivaci dizertace, cíle a strukturu práce (představení 3 provedených experimentů), všechny podstatné výsledky práce. Tyto části jsou následně doplněny seznamem autorových publikací ve vztahu k dizertaci, přehledem literatury (218 položek) a podrobným dodatkem s šesti částmi, rozšiřujícím jednak obsah hlavních kapitol, jednak poskytující prohlášení autorů a obsah příloženého CD.

Kapitola 2, nazvaná *Methods and tools*, se zabývá představením základních pojmů (umělá neuronová síť, techniky optimalizace, představení kvantových stavů, které se dále využívají, jakož i svědka kvantového propojení a kvantovou teleportaci. Následující 3 kapitoly jsou po řadě věnovány 3 konkrétním experimentům, kterým se dizertant věnovala (v korelaci se 3 publikacemi): (1) Kapitola 3 – Přesnost detekce entanglementu pomocí umělé neuronové sítě a člověkem navrženého svědka entanglementu, (2) Kapitola 4 – Kvantifikace entanglementu z kolektivních měření zpracovaných pomocí strojového učení, a (3) Kapitola 5 – Trasování v kvantově komunikačních sítích podpořených strojovým učením. Ve 3. kapitole se autor podrobně věnuje tématu přesnosti kvantového propojení, zabývá se kolektivními měřeními a umělou neuronovou sítí, diskutuje experimentální implementaci a získané výsledky. Obdobně se ve 4. kapitole autor podrobně věnuje tématu (2), tedy vyčíslení kvantového propojení, opět pomocí zpracování strojovým učením z kolektivních měření. Nakonec se autor v 5. kapitole věnuje poslednímu tématu, tedy topologiím kvantových sítí, trasovacím algoritmům a svým výsledkům, získaným pro realistické případy (vliv bílého šumu, vliv poklesu amplitudy, vliv korelovaného fázového šumu, vývoj kvantové sítě). Poté, v závěrečné fázi práce, následuje přehled autorových publikací, přímo souvisejících s předloženou dizertací (dizertant je vždy 1. autorem), přehledem použité literatury. Práce je uzavřena bohatými dodatky s doplňujícími materiály.

Po formální stránce je práce zpracována na nadprůměrné velmi pěkné grafické úrovni, text je psán velmi čtivě, zároveň se snahou o přesné vyjadřování. Co se týče formální i stylistické úrovně anglického jazyka, v němž je práce napsána, je na velmi dobré úrovni, pokud mohu posoudit. Text práce obsahuje minimum překlepů a formálních chyb. Využití obrázků a grafů je adekvátní, efektivní a promyšlené. Dle mého názoru je struktura vlastní práce zvolena vhodně, text je dostatečně podrobný, diskutující konkrétní výsledky.

Z odborného hlediska považuji práci za jednoznačně přínosnou a užitečnou pro další výzkum. Výsledky práce mohou být významné pro další výzkum v dané oblasti kvantových technologií, propojenou

s moderními přístupy strojového učení, ve třech zkoumaných oblastech. Dizertant dle mého názoru zvládl danou náročnou problematiku v celé komplexní šíři tak, že je schopen vlastní tvůrčí vědecké práce, v širších souvislostech. Jsem přesvědčen, že výsledky mohou být velmi významné pro další výzkum v dané oblasti, na mezinárodní úrovni.

Předložená dizertační práce přináší pochopitelně celou řadu podnětů a dotazů pro diskuzi, viz následující dotazy a připomínky, k některým vybraným (podle časových možností při obhajobě) by se mohl dizertant v rámci obhajoby vyjádřit:

- 1) Mohl by autor porovnat obecně možnosti spolu s výhodami a nevýhodami klasického a kvantového strojového učení?
- 2) V práci je pro programování neuronové sítě, alespoň v rámci 1. experimentu, využit TensorFlow 2.0. (odkaz [166]). Mohl by uchazeč krátce představit tento systém, spolu s jeho výhodami či nevýhodami?
- 3) Poprosil bych dále o komentář – vysvětlení obr. 3.4, na straně 35. Je možno uvažovat o nějaké další optimalizaci / vylepšení tohoto grafu?
- 4) V prvním experimentu je využita veličina tzv. „collectibility“, viz též dodatek A.2, kde je uvedena definice (A.5). Mohl by dizertant tuto definici fyzikálně přiblížit, resp. komentovat její vhodnost?
- 5) V práci je využit též tzv. Dijkstraův algoritmus, viz též Dodatek A.5. Je možno aplikaci Dijkstrova algoritmu blíže komentovat a vysvětlit?
- 6) Mohl by dizertant komentovat, též ze zkušeností, získaných v rámci této práce, jak vidí budoucí součinnost kvantové informatiky a strojového učení a umělých neuronových sítí?
- 7) Konečně, plánuje student pokračovat v dané či příbuzné problematice i v rámci svého dalšího kariérního postupu? Jaké jsou jeho další aktuální plány?

Závěr: Předloženou dizertační práci je možno z odborného i formálního hlediska hodnotit jako vynikající, obsahující původní výsledky, což je podpořeno i kvalitními publikacemi dizertanta (2 kvalitní již vyšlé publikace s přímou vazbou na dizertaci, další publikace v recenzním řízení). Všechny stanovené cíle dizertační práce tak byly splněny. Práce přináší nové unikátní poznatky a je přínosná jak pro vlastní pochopení studovaných jevů, tak pro další výzkum a praktické aplikace. Získané výsledky přispějí k rozvoji daného oboru, na mezinárodní úrovni. Práce svědčí o dostatečné schopnosti zvládnout experimentálně složitou a komplexní problematiku. **Závěrem prohlašuji, že předložená dizertační práce splňuje dle mého názoru veškeré požadavky na dizertační práce kladené příslušnými právními předpisy. Práci proto jednoznačně doporučuji k obhajobě pro získání akademicko-vědeckého titulu Ph.D.**

Ivan Richter

V Praze dne 15. května 2023

prof. Ing. Ivan Richter, Dr.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra fyzikální elektroniky
Břehová 7, 115 19 Praha 1
E-mail: richter@jfifi.cvut.cz