

OPONENTSKÝ POSUDOK NA DIZERTAČNÚ PRÁCU

Názov PhD práce: **EXPLOITATION OF GPU IN GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING ALGORITHMS
VYUŽITÍ GPU PRO ALGORITMY GRAFIKY A ZPRACOVÁNÍ OBRAZU**

Autor PhD práce: **Ing. Radovan Jošth**
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
Vysoké učení technické v Brně

Oponent PhD práce: **Doc. Ing. Ľudovít Trajtel', PhD.**
Katedra informatiky
Fakulta prírodných vied
Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici

Na základe listu žiadosti o vypracovanie predkladám nasledovný oponentský posudok na uvedenú dizertačnú prácu.

1) Súlad s odborom dizertácie a aktuálnosť témy z hľadiska súčasného stavu vedy:

Aktivity a prebiehajúce procesy v odbore špecifického nasadzovania informačných technológií a architektúr zvyšujú náročnosť na uplatňovanie nových postupov pri ich analyzovaní a vyhodnocovaní. Pod vplyvom meniacich sa požiadaviek praxe sme, platí to aj o doktorandovi, nútení hľadať nové prístupy, algoritmy, metódy a techniky.

Práca je vypracovaná v súlade s odborom dizertácie, zameranie dizertačnej práce na modifikáciu (v snahe až podstatne ich vylepšiť) troch skupín algoritmov (list iv; „... detekcia objektov v reálnom čase, spektrálna analýza obrazu a detekcia čiar v reálnom čase“) v prospech GPU a GPGPU v spojitosti s využitím CUDA rozhrania je veľmi aktuálne z hľadiska potrieb praxe a rovnako aj z hľadiska rozvoja predmetnej teórie.

2) Pôvodnosť a originálny prínos dizertačnej práce

Dizertačná práca Ing. Radovana Joštha z Fakulty informačních technologií, Ústavu počítačové grafiky a multimédií Vysokého učení technického v Brně prináša presvedčivú analýzu, fundovanú interpretáciu a diskusnú problematizáciu javov a súvislostí predmetnej témy, ako jednej z výraznejších tendencií v uplatňovaní a nasadzovaní architektúry GPU a GPGPU, a to predovšetkým nad vybranými (úspešne už implementovanými, ale primárne vyvinutými pre CPU procesory) algoritmi grafiky a spracovania obrazu v snahe tieto algoritmy modifikovať, v súlade s dopytom praxe ich významnejšie vylepšiť a syntetizovať do originálnych použiteľných riešení. Posudzovaná práca syntetizuje výsledky dlhšieho systematického výskumu v predmetnej oblasti, zároveň otvára, navrhuje a konkrétne rieši celý rad nových výskumných otázok spojených s prezentovanou témou.

Medzi podstatné výsledky dizertačnej práce, ktoré oceňujem, možno zaradiť:

- vykonanie a vyhodnotenie výskumu v zmysle zadania vo vybraných troch hlavných vyznačených algoritmových oblastiach možného nasadenia a využívania (vrátane odhadu na budúcu efektívnu využiteľnosť (pozn.: nižšie je v tejto súvislosti položená otázka pre doktoranda) v oblastiach ako „surveillance (= dohľadovanie)“, resp. „industrial tasks (= priemyselné úlohy)“
- analýza/y algoritmických vylepšení prostredníctvom vybraných metód a postupov a syntéza nových riešení s využitím špecifických vlastností (v pozitívnom slova zmysle) rozhrania CUDA a orientáciu na GPU a GPGPU,
- priebežné „modelovanie/testovanie“, prezentácia a objasňovanie výsledkov (i čiastkových); aj s ich verifikáciou a vytvorením konkrétnych výstupov (8 článkov celkom, 4 produkty/aplikácie (DLL, MATLAB plgs)).

- praktické ukážky a presné opisy konkrétnych algoritmov/postupov s poznámkami a radami doktoranda vhodné pre okamžité využitie výstupov práce pri konkrétnom nasadení v podmienkach širokej odbornej praxe (i pre prípadné školiace a edukačné účely).
- formulovanie konkrétnych opatrení a odporúčaní doktoranda pre prax.

Otázka 1 (vo vyšších súvislostiach sa doktoranda pýtam)

Ako odhadujete možnosti dnešných GP a GPGPU pri používaní Vašich algoritmov a ich nasadení tak, aby toto bolo efektívne a kvalitné?

Rád konštatujem, že dizertačná práca prináša mnohé cenné poznatky, zovšeobecnenia, a vlastné/pôvodné stanoviská doktoranda k riešeným problémom. Pripomínam, že v práci vykonaný a cez výsledky prezentovaný výskum ma veľmi zaujal, pretože v odbore, v ktorom autor dizertačnej práce spracoval túto tému, považujem hľadanie atribútov kvality a efektivity dnes už za nevyhnutné. Týmto krátkym úvodom chcem zvýrazniť význam predloženej PhD práce, ktorej ambíciou je nielen analyzovať a dokumentovať súčasný stav, ale aj ukázať a ponúknuť možnú cestu aktívneho nasadenia modernej architektúry GPU a GPGPU; vrátane jej začlenenía do konkrétnych algoritmických a výpočtových postupov. Zhrnutie výsledkov práce a formuláciu konkrétnych prínosov doktoranda pre rozvoj vedy a praxe tak možno jednoznačne akceptovať.

Prvá kapitola dizertačnej práce ponúka čitateľovi dobre napísaný úvod (listy 1 až 5; *Introduction*) do spracúvanej problematiky. V ňom sa, okrem súčasného stavu študovanej problematiky, doktorand venuje výkladu obecných pojmov, skratiek (samostatne ich uvádza a vysvetľuje v *Nomenclature* (listy 153 až 155)) a postupov v predmetnej oblasti. Uvádza čitateľa do spracovanej odbornej oblasti a do jej podrobností, na základe štúdia aktuálnych literárnych prameňov a praktických poznatkov rámcuje problematiku, kategorizuje ju, naznačuje očakávania, zdôrazňuje význam architektúry GPU a GPGPU. Vysvetľuje a súvislostne poukazuje na cieľ/ciele PhD práce (pozri aj *Abstract*), naznačuje možnosti predmetnej oblasti a stanovuje si konkrétne úlohy, ktoré pre neho z toho vyplývajú; tiež poukazuje na štruktúru PhD práce (list 2; *Thesis Structure*). V kapitole 1.1. (list 3; *Research Motivation*) zacielfuje pozornosť čitateľa do troch vybraných hlavných problémových častí; v následných troch podkapitolách ich stručne charakterizuje a objasňuje. V tejto časti práce (resp. i ďalej) mi trošku chýba doktorandovo formulovanie hypotéz; to je hádam jediný tieň dopadajúci na túto kapitolu/prácu. Hypotézy síce v ďalšom texte PhD práce v súvislostiach rezonujú, ale nie sú osobitne zvýraznené a pregnantne formulované.

Otázka 2

V jednej z prác, na ktoré sa doktorand odvoláva (list 102; „*The Hough transform was formalized by Princen et al. [74] and described as a hypothesis testing process*“), resp. tvoria základ/oporu pre jednu z častí PhD práce, boli formulované hypotézy; aký je z pohľadu doktoranda dnešný pohľad na ne, resp. stav vedomostí o nich?

V druhej kapitole (listy 7 až 32; *GPU Architecture and GPGPU*) sa autor venuje GPU architektúre, približuje je zrod i súčasný stav, vlastným pohľadom poukazuje na jej/ich (GPU a GPGPU) smerovanie, veľmi podrobne túto tému rozpracúva a charakterizuje; v zrozumiteľných súvislostiach zdôrazňuje aj nástup a význam CUDA. V tejto súvislosti chválím rozhľad autora i uskutočnenie viacerých jeho realistických aktivít v zvolených témach (pozn.: vid' aj *Radovan Josth-Publications Citations Products Activities.pdf*). V celej tejto druhej kapitole práce rezonuje osobný prístup, vzťah autora k opisovanej problematike i jeho zanietenosť pre túto architektúru.

Tretia kapitola (listy 33 až 78; *Real/Time Object Detection Using CUDA*) je objasňujúcim textom štartujúcim z roviny naznačenej predovšetkým prácou z roku 2001 referovanou doktorandom ako [92]. Celá kapitola je veľmi dôležitým informačným pohľadom spojeným práve s možným využitím

kvalitatívne nových výpočtových prostredí. Význam tejto kapitoly PhD práce spočíva nielen vo vysvetlení obsahu a úrovne nárokov, ktoré prinášali postupné zmeny originálneho „detektora“ z práce [92] a vo zvýraznení ich dôsledku a dopadov podporujúcich jeho výkon, ale najmä v doktorandovom postupe v konečnom dôsledku prinášajúcom implementácie CUDA v spojitosti s opisom jednotlivých funkčných blokov algoritmov, na ktoré sa doktorand zameriava (a prezentuje ich veľmi podrobné objasnenie). V kapitole sú informácie a fakty o dvoch skutočnostiach a funkciách (list 40; *Local Rank Functions*, resp. list 42; *Local Rank Patterns*), ktoré v tejto súvislosti bral v počiatočnom štádiu do úvahy, tiež veľmi precízne rozpracované a opísané následne vykonané činnosti a rozhodnutia doktoranda prepojené v LRP s implementačnými CUDA krokmi (list 44; „1. loading and representing the classifier data; 2. image pre-processing; 3. object detection and 4. retrieving results“), ktoré absolvoval. Doktorand tu priebežne realizuje „monitoring“ vlastných uvažovaných vylepšení. Vyhodnocuje stav spôsobený navrhovanými čiastkovými zmenami alebo radikálnymi/inovativnými rozhodnutiami, trénuje s rôznymi parametrami, spracúva analytické a optimalizačné ukazovatele a klasifikátory vplývajúce na efektívnosť v podmienkach (najmä pamäťových) a čase, aby použitím najmodernejších nástrojov vždy následne „modeloval“ potenciálne (i čiastkové) inovácie a publikoval ich spolu s výsledkami vykonaných elementárnych krokov. Na základe zistených skutočností vyvodzuje závery a navrhuje spôsob riešenia (veľmi sa mi páčilo rozhodnutie/návrh „*Thread Rearrangement*“ (list 47); vidno, že doktorand má aj veľmi rozsiahle a podrobné vedomosti z oblasti hardvéru a pamäťových podsystemov) špecifických problémov alebo konkrétne opatrenia. Ani pri podrobnom čítaní som nenatrafil na také skutočnosti a fakty, ktoré by boli v rozpore s tým, čo doktorand uvádza. V tejto súvislosti zároveň (a platí to pre celú dizertačnú prácu) oceňujem i to, že v texte kapitoly, ale i v opise a hodnoteniach čiastkových krokov a rozhodnutí, sa doktorand o vykonaných aktivitách nevyjadruje len v prvej osobe jednotného čísla, ale objektivizuje aj vklad ďalších riešiteľov/spolupráčov do skúmanej problematiky (list 33; „*The research on real-time object detection presented within this chapter was performed in cooperation with the following list of co-authors: Adam Herout, Pavel Zemčík, Lukáš Polok, Michal Hradiš, Roman Juránek and Jiří Havel.*“; a podobne už aj v *Acknowledgements*, resp. i v *Research Achievements*).

Štvrtá kapitola (listy 79 až 100; *Spectral Image Analysis Using CUDA*) má (v súvislosti s obsahom) dobre a jednoznačne zvolený názov. Túto kapitolu práce možno chápať ako dôležitú a potrebnú pre uvedenie čitateľa do konkrétnych detailov riešenej problematiky. Jej rozsah – 21 strán – je primeraný, obsah bohato postačujúci. Prináša podrobnosti o zapojení doktoranda v dvoch líniách vychádzajúcich z kľúčových prác [41] a [4] citovaných významných autorov (list 79; „*Principal Component Analysis*“, resp. „*Non-Negative Tensor Factorization*“). Výskum v línii PCA algoritmov bol priamo motivovaný požiadavkou lekárskej praxe a z tejto pozície ho aj doktorand v predloženej PhD práci rozpracúva, aby následne publikoval efektívny spôsob algoritmu/výpočtu korelačnej matice (listy 82 až 85) so zdôraznením zapojenia CUDA. Na tomto mieste zdôrazňujem originalitu doktorandovho návrhu, publikované grafy dosiahnutých výsledkov (listy 90 a 91). Ako pragmatik oceňujem v tomto prípade aj upozornenie doktoranda na problém „rýchlosti“ pamäte. Motiváciou doktoranda pri výskume v línii NTF algoritmov bola predovšetkým snaha o zrýchlenie výpočtov. Dosiahnutý výsledok (evidentné zrýchlenie oproti iným už publikovaným riešeniam) považujem za jeden z významných prínosov tejto dizertačnej práce.

Piata kapitola (listy 101 až 124; *Real Time Line Using CUDA*) začína všeobecne známym konštatovaním, že štandardná „*Hough transform*“ je pre použitie v reálnom čase pomalá. Dva spôsoby modifikovanej schémy Houghovej transformácie pri skúmaní detekcie čiar v reálnom čase, doktorandove dve východiská (list 105; *Small Read/Write Memory of Accumulators*, resp. list 107; *Harnessing the Edge Orientation*) pri hľadaní/výskume možnej algoritmickej optimalizácie, považujem za správne; boli na tomto mieste priamo podriadené architektúre dnešných grafických procesorov s konštatovaním/rozhodnutím vyhovieť pamäťovo ohraničenému, avšak veľmi rýchlemu prostrediu. Konečná doktorandom predložená CUDA implementácia priniesla oproti klasickému riešeniu výrazné zrýchlenie a možnosť dosiahnuť takmer spracovanie v reálnom čase. Ako pri predošlom čiastkovom hodnotení doktorandovho riešenia, aj tu rád konštatujem, že pri optimalizovaní dokonale zúročil nielen

dobré orientovanie sa v doterajších známych riešeniach, ale aj dokonalé poznanie uvažovaného výpočtového prostredia pri skúmaní čiastkových úspechov na ceste k finálnemu algoritmu. Rovnako aj tu vyzdvihujem inovatorstvo doktorandovho návrhu, tiež sa mi páčia publikované grafy/obrázky dosiahnutých výsledkov (listy 120 až 124).

V šiestej kapitole (listy 125 až 138; *Research Achievements*) doktorand špecifikuje svoj vlastný podiel na kolektívnych vedeckých aktivitách vykonaných v súvislosti s riešenou problematikou. V prvej podkapitole uvádza prehľad prác/aktivít, ktoré on v rámci predmetnej oblasti vykonal pri sústredení sa predovšetkým na CUDA implementáciu a optimalizáciu. V druhej podkapitole predstavuje v rámci výskumu finalizované (i tie kolektívne vytvorené) produkty. Pôvodnosť, originalitu i rozsah vstupu doktoranda to nijako neznižuje.

V siedmej kapitole (listy 139 až 144; *Conclusions*) je rekapitulovaný priebeh aktivít, sú zrozumiteľne zvýraznené a presne zhodnotené jednotlivé prínosy dizertačnej práce, sú formulované závery a konkrétne odporúčania pre prax.

V kapitole *References* je uvedená použitá literatúra, za ňou sú prílohy. Spolu s textom predchádzajúcich kapitol dizertačnej práce tvoria citované publikácie harmonický celok prezentujúci vydarený celkový odborný a vedecký pohľad na predmetnú problematiku (uvádzajúci ju aj v širších súvislostiach) naznačujú a vytyčujú ďalšie otvorené problémy.

Dizertačnú prácu Ing. Joštha som si prečítal pozorne. Uvádza tému, ktorá mi je blízka. Lahko som si teda mohol urobiť komplexný obraz o význame predložených návrhov a riešení a v tejto súvislosti využiť rolu oponenta všímať si viac chyby. Preto na tomto mieste môjho posudku neopakujem (v súhlase s doktorandom a obsahom siedmej kapitoly) čo v PhD práci bolo, čo bolo dobré. Sústreďujem sa najmä na to, čo sa mi nejavilo ako celkom správne, resp. vhodné pre tento typ práce. S radosťou ale konštatujem, že nájsť niečo "zlé a nevhodné" sa mi nepodarilo.

Otázka 3

Ako dostanete výsledky Vašej dizertačnej práce do reálneho života?

3) Odborná úroveň a kvalita práce

PhD práca je vypracovaná na 160 stranách textu i tabuliek a obrázkov. Jej neoddeliteľnou súčasťou sú dve v nej zahrnuté prílohy v rozsahu 2 strán (listy 157 až 160). Práca je po stiahnutí *Declaration, Acknowledgements, Contents* rozčlenená do siedmich základných kapitol (vrátane *Introduction*, resp. *Conclusions*) a častí *References, Nomenclature, Appendix A, Appendix B*. Odborná úroveň dizertačnej práce potvrdzuje, že doktorand sa v predmetnej oblasti vyzná a dobre orientuje. Celá dizertačná práca, ktorá sa mi javí ako veľmi kvalitná, preukazuje samostatné zvládnutie problematiky a schopnosť doktoranda tvorivo vedecky myslieť.

Z formálneho hľadiska je práca spracovaná pedantne, prehľadne i účelne, gradácia jednotlivých kapitol odpovedá ich dôležitosti, kapitoly na seba dobre nadväzujú, ich obsah je odborne aj vedecky primeraný a prínosný. Jediná moja drobná výhrada smeruje k *References*. Niektoré uvádzané položky nie sú spracované v úplnom súlade s platnou ISO normou (podľa mne dostupných informácií je aktuálna česká norma kompatibilná s našou ISO/STN 690: 2012). V práci by tiež mal byť formálne presnejšie uvádzaný opis obrázkov, tabuliek a grafov (podľa odporúčaní sa obrázky a grafy „podpisujú“, ale tabuľky sa „nadpisujú“ (ich opis má byť uvedený nad tabuľkou (listy 69, 70, 72, 74, 75, 88, 89, 135, 142)); text opisu nemá končiť bodkou (listy 10, 11, ...) a ich zdroj; zdroj obrázkov, tabuliek a grafov v predloženej práci niekde jednoznačne vyplýva zo súvislostí, resp. je citovaný (s výhradou *Figure 2.7?*). Odhadujem (možno sa mýlim), že niektoré obrázky a grafy sú/boli publikované už v minulých prácach doktoranda/spolupráčov, ostatné boli zrejme pripravené výhradne pre predkladanú dizertačnú prácu. Z ich opisu to však nie je jednoznačne zrejme. Predložené výsledky sú v práci spracované na dobrej odbornej úrovni, grafická prezentácia (kvalita spracovania obrázkov, tabuliek, grafov) je na vysokej úrovni, celá dokumentácia práce je dostatočne inštruktívna a dobre dokladuje celú

prácu. Chcem zdôrazniť, že práca je tiež kvalitnou odbornou polemikou. V práci som nenašiel závažné formálne nedostatky (pozri list 11: podľa odporúčaní nesmie byť len samotná skratka nadpisom; ...). K úrovni slovného vyjadrovania sa doktoranda a ku gramatike v práci nemám žiadne podstatné výhrady. V oponovanom texte som našiel iba minimum drobných gramatických chýb (pozri list 142: správne „symmetry“; list 144: správne „computers“). V texte je veľa odborných pojmov a výrazov (a táto téma vo všeobecnosti doposiaľ (u nás na Slovensku, rovnako v Českej republike) nie je v celom rozsahu kodifikovaná). To skoro vždy prináša hrozbu frekventovaného použitia „anglikanizmov a amerikanizmov“ alebo tzv. „odborného slangu“. Doktorand sa však tomuto úskaliu veľmi úspešne vyhol. Za jazyk práce zvolil angličtinu, čo prinieslo zrozumiteľný a vysoko odborný text. Použitá terminológia odpovedá súčasnému poznaniu, doktorand pracuje s modernými a kodifikovanými pojmami.

4) Vedecká činnosť a vedecká erudovanosť doktoranda

Neoddeliteľnou súčasťou dizertačného konania je aj zhodnotenie vedeckej činnosti doktoranda. Na tomto mieste chcem vyzdvihnúť snahu doktoranda o systematicky a vecne prezentovanú syntézu v širokom zábere, napriek tomu však zrozumiteľnú a v okruhu riešenej problematiky originálnu. Jasnosť, prehľadnosť a rešpektovanie názorov odbornej komunity je v celej práci výhodou, ktorú doktorand bezo zvyšku uplatňuje. Predložená PhD práca demonštruje vedeckú aktivitu R. Joštha v predmetnej oblasti a je významným príspevkom k rozvoju viacerých skúmaných entít. Pozoruhodným znakom predloženej práce je nielen široký výskumný a metodologický záber, ale aj vysoká odborná kompetencia doktoranda. Reprinty/zoznam vybraných uverejnených publikácií doktoranda súvisiacich s danou problematikou poskytujú doplňujúce informácie relevantné jeho kľúčovým myšlienkam. Zároveň tieto publikácie naznačujú široký záber vedeckej práce Ing. Joštha a šírku možností v spracovanej oblasti. Dobrý výber a aktuálnosť tém, ktorých riešeniu sa venoval a venuje, nepochybne reflektuje aj citačná ozva na jeho práce. Jeho publikačnú aktivitu považujem za nadštandardnú. Z prehľadu publikačnej a aj inej vedeckej činnosti Ing. Joštha vidno, že táto jeho činnosť je dlhodobo vhodne zacielená a primerane dimenzovaná. Dokladované aktivity doktoranda nepochybne naplňajú požiadavku na jeho vedeckú erudovanosť.

5) Ďalšie skutočnosti, dokresľujúce obraz doktoranda

Na záver si ešte dovoľím niekoľko postrehov a poznámok.

Problematika, ktorú rieši doktorand je vysoko aktuálna. Problém vstupu optimalizovaných algoritmov do vybraných oblasti nasadenia do praxe je akceptovaný v širokom meradle. Samotná doktorandská práca má pre predmetnú oblasť veľký význam, pretože okrem potvrdenia nástupu architektúr GP a GPGPU poukazuje na význam optimalizácie algoritmizovateľných aktivít, ponúka relevantnú metodiku a technológiu/rozhranie CUDA. Dizertačnú prácu Ing. Joštha považujem za prínosnú. Oba jej rozmery, teoretický aj experimentálny, sú naplnené vrchovato, komplexne a inštruktívne. Samotná práca je veľmi potrebná. Metódy spracovania práce považujem za správne, dosiahnuté výsledky sú prínosné, umožňujú prakticky okamžitú implementáciu.

Na základe preštudovaných všetkých podkladov predložených k obhajobe Ing. Joštha a po posúdení jeho dizertačnej práce konštatujem, že práca spĺňa požiadavky na dizertačné konanie. Prácu odporúčam predložiť k obhajobe a po jej úspešnom obhájení udeliť doktorandovi vedecko – akademickú hodnosť

„philosophiae doctor“ v skratke „PhD“.

Doc. Ing. Ľudovít Trajtel, PhD.

V Banskej Bystrici, 22. 2. 2015