

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Zobrazování dělených Catmull-Clark ploch na GPU metodou sledování paprsku</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Vojtěch Kratochvíl</b>
<b>Typ práce:</b>	bakalářská
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra počítačů
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jaroslav Sloup
<b>Pracoviště vedoucího práce:</b>	Katedra počítačové grafiky a interakce

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Práce si klade za cíl zobrazovat dělené Catmull-Clark plochy, se kterými získal student praktické zkušenosti v kurzu o 3D modelování, pomocí metody sledování paprsků. Zadání práce považuji za náročnější, neboť byť se jedná o reimplementaci dobře popsané existující metody, tak musel student z odborné literatury nastudovat řadu teoretických věcí, se kterými se během studia nesetkal, nezbytných k pochopení řešené problematiky a implementaci řešení na GPU s využitím OpenGL compute shaderů.	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno s většími výhradami</b>
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Autor implementoval funkční aplikaci zobrazující dělené Catmull-Clark plochy pomocí metody sledování paprsku a jako sadu trojúhelníků vzniklou jejich teselací. Pro zrychlení výpočtů je využita hierarchie obálek postavená na CPU nad Bézierovými a Gregoryho plochami, které vzniknou aproximací dělených ploch pomocí knihovny OpenSubdiv. Implementované řešení vykazuje řadu nedostatků, počínaje nespolehlivým importem modelů pomocí knihovny OpenSubdiv, pokračující chybějícím výpočtem osvětlení v implementované metodě sledování paprsku či velmi povrchním vyhodnocením kvality a rychlosti implementace. Za problematiku považuji rychlost vykreslování metodou sledování paprsků, která zobrazuje v rozumném čase pouze malé scény, zatímco pro větší scény obsahující desítky tisíc ploch je z praktického hlediska nepoužitelná, neboť nedosahuje ani jednoho snímku za vteřinu, což je řádově méně než u referenčního řešení, které student reimplementoval.	

<b>Aktivita a samostatnost při zpracování práce</b>	<b>C - dobře</b>
<i>Posuďte, zda byl student během řešení aktivní, zda dodržoval dohodnuté termíny, jestli své řešení průběžně konzultoval a zda byl na konzultace dostatečně připraven. Posuďte schopnost studenta samostatně tvůrčí práce.</i>	
Student po celou dobu pracoval samostatně a docházel na domluvené pravidelné konzultace, kde diskutoval postup prací a dosažené výsledky. Aktivně vyhledával a studoval dostupné informační zdroje týkající se řešené problematiky, čímž prokázal, že je schopen samostatně tvůrčí práce a řešení komplexních úloh. Bohužel během implementace narazil na problémy s importem dat knihovnou OpenSubdiv, které se podařilo vyřešit jen částečně, což se projevilo časovým skluzem, díky kterému již nestihl aplikaci řádně otestovat, analyzovat důvod pomalého zobrazování ploch metodou sledování paprsků a tento problém odstranit. Méně důsledný byl i při tvorbě textu práce, který jsem v rozumné formě viděl tři dny před odevzdáním.	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>D - uspokojivě</b>
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Po odborné stránce má práce uspokojivou úroveň. Autor zvolil správný postup řešení, nastudoval principy dělených ploch, metodu sledování paprsku a stavbu hierarchie obalových těles (BVH). Získané znalosti propojil ve vytvořené aplikaci, která přesouvá výpočty týkající se metody sledování paprsku na grafickou kartu s využitím OpenGL compute shaderů.	

Výhrady mám k ne zcela zvládnuté integraci knihovny OpenSubdiv, resp. k ne zcela funkčnímu generování aproximace dělených ploch a s tím spojeným nedostatečným otestováním funkčnosti implementace. V práci postrádám analýzu, proč je implementace mnohem pomalejší než referenční řešení, které dosahuje zhruba o dva řády lepších výsledků. Za nevhodný také považuji způsob vizualizace výsledků metody sledování paprsků, neboť nebyl implementován výpočet normály nutný pro výpočet osvětlení, bez kterého nelze rozeznat detaily či zakřivení zobrazovaných ploch.

Za slabinu celé práce považuji velmi zjednodušené testování vytvořené aplikace. Student použil pět testovacích scén, ale chybí detailní informace o hloubce vytvořené hierarchie, počtu primitiv v listech stromu, není také jasná vazba mezi počtem stěn, počtem uzlů stromu a počtem plátů vzniklých dělením původní geometrie modelů. Testovací scénery 4 a 5 jsou dle mého názoru totožné a jedná se o chybu v textu.

Kapitola 6 nazvaná Ukázka aplikace uvádí pouze vizuální výstupy aplikace pro jednotlivé testovací scénery bez jakéhokoliv textu osvětlujícího a diskutujícího problémy jednotlivých implementovaných módů zobrazení. Na obrázcích 6.9 až 6.16 je patrná nekonzistence zobrazení testovaných scén, v některých módech zobrazení chybí plochy (metoda sledování paprsku x teselace), nicméně v textu není vysvětleno, čím jsou tyto problémy způsobené.

Z teoretického hlediska bych uvítal podrobnější popis dělicího schéma Catmull-Clark, které je pro celou práci stěžejní. Chybí také rešerše jiných způsobů vykreslování dělených ploch, než je zvolená metoda sledování paprsku, např. metody založené na teselaci (aproximace povrchu trojúhelníkovou sítí). Z hlediska splnění cílů práce postrádám vyhodnocení splnění funkčních i nefunkčních požadavků na aplikaci uvedených v kapitole týkající se analýzy.

V práci je uvedeno velké množství algoritmů, které jsou bez bližšího vysvětlení jejich principu těžko pochopitelné. Příkladem je algoritmus 8 refineSurface(), na straně 23, který neuvádí nastavení maximální hloubky dělení maxLevel, jaké hodnoty parametru byly použity v práci či zdůvodnění dvou vnořených cyklů. V algoritmu 12 findBestSplitPlane() se znovu zbytečně počítá rozsah souřadnic přes všechna primitiva (boundsMin a boundsMax), přitom byl už předtím spočítán funkcí updateNodeBounds(), která je volána před dělením uzlu. Dále chybí popis implementačních detailů týkajících se serializace hierarchie obálek do bvhBufferu, který je následně využit v OpenGL.

#### **Formální a jazyková úroveň, rozsah práce**

**D - uspokojivě**

*Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.*

Z typografického a formálního hlediska je práce na uspokojivé úrovni. Text práce je rozdělen do logicky navazujících kapitol. Z textu je patrné, že byl psán ve spěchu na poslední chvíli, neboť obsahuje velké množství překlepů, anglických názvů a nevysvětlených symbolů (např. "limit surface", "piecewise polynomial surface", "set", "Butterfly scheme", "vyhodnocení Limit stencils", ray.rD v algoritmu 23, right, up, forward v algoritmu 21), které celkovou úroveň práce degradují. Nevhodný z hlediska pochopení je také zvolený překlad anglického slova patch jako úsek. Kapitoly týkající se analýzy, testování a ukázek výstupů aplikace jsou příliš strohé. Celkově by práci prospělo neuvádět pouze algoritmy, ale nejprve vysvětlit jejich principy, neboť bez toho jsou velmi těžko pochopitelné.

#### **Výběr zdrojů, korektnost citací**

**B - velmi dobře**

*Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.*

Použité informační zdroje jsou relevantní a v práci řádně citované. Výtku mám pouze k výběru zdrojů týkajících se metody sledování paprsku, kde bych uvítal kromě odkazování na webové stránky firmy NVIDIA i jiné hodnotnější informační zdroje ve formě knih či článků.

#### **Další komentáře a hodnocení**

*Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.*

Při testování vytvořené aplikace jsem narazil na následující nedostatky a chyby:

- Aplikace nefunguje stejně v release a debug módu, release verze nenačítá správně modely pomocí knihovny OpenSubdiv a zběžnou analýzou kódu se mi nepovedlo odhalit příčinu.
- Při zobrazení aproximovaného povrchu modelů trojúhelníky pomocí metody sledování paprsku vznikají díry, což je způsobeno nedostatečným odladěním konstant ve výpočtu průsečíku trojúhelníku s paprskem ve funkci intersectTri().
- Zobrazování modelů metodou sledování paprsků nefunguje spolehlivě, modely působí „zubatě“ jako by na sebe plochy vzniklé dělením nenavazovaly. Chyba je pravděpodobně spojena se zmíněným problémem načítání modelů knihovnou OpenSubdiv či nesprávnou implementací získání ploch opakovaným dělením původní geometrie modelu.

### **III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE**

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení.*

Autor naimplementoval aplikaci pro zobrazování dělených Catmull-Clark ploch na GPU metodou sledování paprsku, jejímuž praktickému nasazení brání neefektivní implementace a nespolehlivé načítání modelů pomocí knihovny OpenSubdiv. Celkově by práci prospělo rozsáhlejší průběžné testování, které mohlo odhalit řadu nedostatků, kterými výsledné řešení trpí. Na druhou stranu považuji téma, které si autor zvolil, za náročnější, k čemuž jsem přihlédl i v celkovém hodnocení.

K práci mám následující otázky:

- Při stavbě hierarchie obálek (BVH) používáte techniku binningu, tj. dělení prostoru do N stejně velkých částí, tzv. binů. Prováděl jste nějaké testy, jak nastavení počtu dělení ovlivní kvalitu postaveného BVH? Jakou hodnotu jste použil v implementaci?
- Na obrázcích 6.9 až 6.16 je patrná nekonzistence zobrazení testovaných scén, v některých módech zobrazení chybí plochy (metoda sledování paprsku x teselace). Čím si tyto rozdíly vysvětlujete?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě**.

Datum: 3.6.2025

Podpis: