



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Natálie Hinková

**Využití vícesnímkové fotogrammetrie v dopravních
interaktivních simulacích**

Diplomová práce

2021



K616..... Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Natálie Hinková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Využití vícesnímkové fotogrammetrie v dopravních interaktivních simulacích**

Název tématu (anglicky): Use of multi-image photogrammetry in transportation interactive simulations

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Prostudujte využití interaktivních simulací v oblasti dopravy a požadavky na tvorbu scén
- Popište princip vícesnímkové fotogrammetrie, metody získávání vstupních dat a proveďte analýzu aktuálních softwarových nástrojů
- Prostudujte techniky zjednodušování modelů pro využití v herních enginech pro interaktivní real-time simulace
- Navrhněte metodu pro využití modelů z vícesnímkové fotogrammetrie pro scény do interaktivních simulací
- Vytvořte interaktivní simulaci na základě vícesnímkové fotogrammetrie a popište parametry, možnosti a limity těchto scén



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Pavelka, K.: Fotogrammetrie 2, ISBN978-80-01-04719-4, 2011, skriptum ČVUT FSv
ŽÁRA, Jiří. Moderní počítačová grafika. 2., přeprac. a rozš. vyd. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0454-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Adam Orlický**
doc. Ing. Stanislav Novotný Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **10. června 2020**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Natálie Hinková
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 10. června 2020

Poděkování

Ráda bych tady poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Adamu Orlickému za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady a materiály, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. Dále také děkuji Ph. D. Zdeňku Svatému za poskytnutí dat pro zpracování diplomové práce. V neposlední řadě bych ráda poděkovala svým rodičům, sestřám a blízkým za psychickou a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 17. 5. 2021


podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Využití vícesnímkové fotogrammetrie v dopravních interaktivních simulacích

diplomová práce

květen 2021

Bc. Natálie Hlinková

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možným využitím vícesnímkové fotogrammetrie při tvorbě scén do vozidlových simulátorů. Na základě analýzy dostupných metod pro zjednodušení 3D modelů získaných pomocí fotogrammetrie je vybrána optimální metoda, která slouží jako základ pro novou metodu tvorby scénářů. Tato nová metoda je založena na reálných datech a její výsledky disponují fotorealistickou kvalitou virtuálního prostředí v simulacích.

ABSTRACT

This diploma thesis focus is the possible usage of multi-image photogrammetry in creating the scenes for vehicle simulators. On the base of analysis of the available methods for simplification of 3D models, which were produced by photogrammetry, is chosen one optimal method, which is the base for the new method of creating the scenarios. This method is based on real data and its results have photorealistic quality of the virtual environment in simulations.

KLÍČOVÁ SLOVA

Počítačová grafika, TIN reprezentace, vozidlový simulátor, scéna a scénáře, fotogrammetrie, optimalizace meshe, textura, UV mapa

KEY WORDS

Computer graphics, TIN representation, vehicle simulator, scene and scenarios, photogrammetry, optimization of the mesh, texture, UV map

Obsah

1. Seznam použitých zkratk	7
2. Úvod	8
3. Počítačová grafika	10
3.1. Reprezentace objektů v počítačové grafice	10
3.1.1. 2D grafika	10
3.1.2. 3D grafika	11
3.2. Základy modelování ve 3D	12
3.2.1. Softwary pro modelování	13
4. Vozidlové simulátory	16
4.1. Využití simulátorů	17
4.2. Tvorba scénářů do vozidlových simulátorů	18
4.2.1. Požadavky na scénář	19
4.2.2. Metody tvorby scén na Fakultě dopravní	22
4.2.3. Nedostatky popsaných metod	24
5. Fotogrammetrie	25
5.1. Dělení fotogrammetrie	25
5.2. Využití fotogrammetrie	26
5.3. Princip vícesnímkové fotogrammetrie	27
5.3.1. Základní pojmy	27
5.3.2. Princip	30
5.4. Sběr dat	30
5.5. Limity sběru dat	32
5.6. Zpracování dat	33
5.7. Výstupy zpracovaných dat	35
5.8. Problémy modelů při využití v interaktivních simulátorech	36
6. Metody optimalizace modelů	38
6.1. Shlukování bodů	38
6.2. Postupná decimace	39

7. Analýza dostupných nástrojů pro optimalizaci modelů	40
7.1. Zjednodušení trojúhelníkové sítě.....	40
7.1.1. Automatická redukce počtu trojúhelníků	40
7.1.2. Redukce počtu trojúhelníků s možností úpravy	43
7.2. Úprava textury	45
7.2.1. Přenesení textury	46
7.2.2. Úprava textury.....	48
8. Převod jednotlivých 3D modelů.....	50
9. Převod terénu	52
9.1. Převod celé oblasti	52
9.2. Využití uzlových bodů oblasti.....	56
10. Zhodnocení metody optimalizace modelů	58
10.1. Nedostatky metody.....	58
10.2. Výhody metody.....	58
11. Metoda tvorby scénáře s využitím fotogrammetrie	60
11.1. Ověření vizuální kvality.....	64
3. Závěr	66
12. Použité zdroje	70
13. Seznam obrázků	73
14. Seznam příloh.....	76

1. Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický název	Český překlad
2D	Two-dimensional	Dvoudimenzionální
3D	Three-dimensional	Trojdimenzionální
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	Pokročilé asistenční systémy
CT	Computed Tomography	Výpočetní tomografie
EEG	Electroencephalography	Elektroencefalografie
EKG	Electrocardiography	Elektrokardiografie
HMI	Human-machine Interface	Rozhraní člověk-stroj
LOD	Level of Details	Úroveň detailů
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline	Neuniformní racionální B-plochy
TIN	Triangulated Irregular Network	Síť nepravidelných trojúhelníků

2. Úvod

Technika je v dnešním světě velmi vyspělá a usnadňuje lidem život v mnoha oblastech. Například v oblasti dopravy přispívá technika ke zvyšování bezpečnosti, kapacit silnic a ke zlepšování životního prostředí. Za zvyšováním bezpečnosti stojí především vývoj nových asistenčních systémů, které řidičům pomáhají během jízdy. Tyto systémy však musí před svojí implementací do reálného provozu projít testováním, aby byla ověřena jejich správná funkčnost a spolehlivost.

Pro ověření těchto a dalších vlastností asistenčních systémů jsou v dopravě využívány simulátory. Díky simulátorům je možné tyto experimenty (testy na simulátoru) provádět mimo komunikace a není tak narušena plynulost silničního provozu a zároveň není ohroženo zdraví účastníků experimentu. Vozidlové simulátory se však také podílejí na výcviku budoucích řidičů i na tréninku profesionálních řidičů.

Aby mohly být výsledky experimentů akceptovatelné, musí simulátor vzbuzovat v probandech (účastnících experimentů) pocit skutečné jízdy v reálném prostředí. Jedním z nejdůležitějších parametrů pro dosažení tohoto vjemu je realističnost promítaného virtuálního prostředí (virtuální scény). Pokud by se proband necítil jako ve skutečném provozu, mohly by se jeho reakce a chování lišit od normálu a výsledky experimentů by tak nebyly použitelné.

Jedním z hlavních problémů v současných simulátorech je nedostatečná kvalita vizualizace promítaného virtuálního prostředí. Scéna v simulátorech je často tvořena jedním člověkem nebo menší skupinou lidí. Prostředí je pak vytvořeno podle jejich představ, což vždy nemusí korespondovat s pravidly architektonického a urbanistického řešení. Nejen celková scéna, ale i jednotlivé objekty ve scéně často nepřispívají realističnosti. Modely jsou dokonale hladké, pravidelné a jejich povrch je čistý. Jedná se o čisté fasády domů nebo o hladký povrch vozovky. Často je tento nedostatek nazýván „sterilita virtuálního prostředí“.

V reálném světě jsou však například silnice různě poškozené nebo na nich mohou být vidět brzdné stopy. Tyto zdánlivě malé skutečnosti nebývají v simulátorech často zachyceny. Avšak mohou mít výrazný vliv na vnímání probandů ve vytvořené scéně, které může být těmito detaily ovlivněno.

Tímto problémem jsem se rozhodla zabývat v rámci své diplomové práce a rozhodla jsem se prozkoumat možnost využití vícesnímkové fotogrammetrie pro tvorbu scén do interaktivních simulací. Vícesnímková fotogrammetrie je metoda, která umožňuje na základě série fotografií vygenerovat snímaný objekt nebo prostředí z reálného světa. S využitím modelů z této metody by mělo dojít k odstranění zmíněných nedostatků současných vozidlových simulátorů.

Problémem aplikace této metody ve vozidlových simulátorech je to, že se jedná o nonselektivní metodu rekonstrukce modelu. To znamená, že metoda při rekonstrukci modelu nedokáže rozlišit, jaké body (body na povrchu objektu) jsou pro ni důležité. Proto je výstupní 3D model často tvořen z milionu trojúhelníků. Takovéto modely nelze použít ve vozidlových simulátorech, jelikož by nebylo možné dostatečně rychle překreslovat snímky z virtuálního prostředí.

Hlavním přínosem této diplomové práce by mělo být nalezení metody pro tvorbu scén do vozidlových simulátorů na základě vícesnímkové fotogrammetrie. Nedílnou součástí této práce bude nalezení postupu pro optimalizaci výstupních 3D modelů pro možnou aplikaci v interaktivních simulacích. V surové podobě tyto modely nejsou použitelné kvůli své složitosti. Díky této metodě by mělo dojít ke zvýšení vizuální kvality virtuálního prostředí, které má přímý pozitivní vliv na reálné chování řidičů ve vozidlových simulátorech.

TEORETICKÁ ČÁST

3. Počítačová grafika

Počítačová grafika je technický obor, který umožňuje tvořit grafické objekty a provádět vizuální úpravy digitálních obrázků a modelů pomocí počítače. Nástroje počítačové grafiky jsou hlavním stavebním kamenem při tvorbě scén do interaktivních vozidlových simulátorů. Proto pro porozumění tvorbě tohoto prostředí je třeba rozumět základním pojmům z této oblasti.

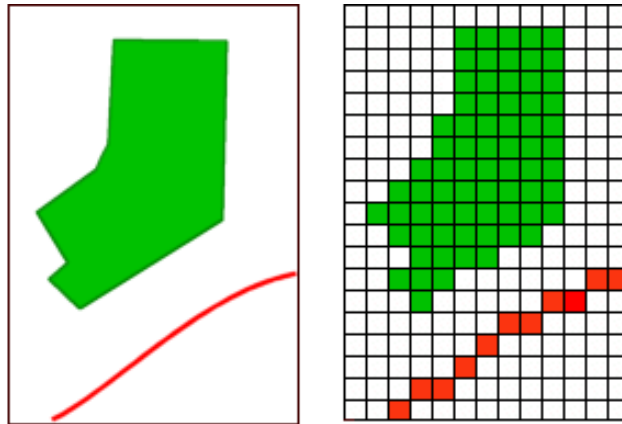
3.1. Reprezentace objektů v počítačové grafice

Počítačová grafika se nejčastěji dělí na 2D a 3D grafiku. 2D grafika se zabývá tvorbou a úpravou obrázků nebo fotografií. 3D grafika pracuje s trojrozměrnými objekty, které je s její pomocí možné vytvořit a dále editovat.

3.1.1. 2D grafika

2D grafika je dále dělena podle způsobu záznamu informace na rastrovou a vektorovou. V rastrové reprezentaci je obraz tvořen jednotlivými částmi, které jsou označovány jako pixely. Každý pixel nese informace o své barvě. Existují různé modely pro definici barvy. Některé jsou založeny na rozdělení barvy do jednotlivých barevných složek a některé jsou naopak založené na definování míry jasů, sytosti a odstínu. U rastrové grafiky je velmi důležitým parametrem rozlišení, které je definováno počtem pixelů v obrazu. Kvůli této vlastnosti se po přiblížení snižuje kvalita obrazu. [1]

Druhým způsobem záznamu informace ve 2D grafice je zápis pomocí vektorů. Základními stavebními prvky vektorové reprezentace jsou matematicky definované útvary. Nejjednodušším útvarem je bod, který je definován dvojicí souřadnic v ploše, avšak v této reprezentaci se lze setkat se všemi geometrickými tvary. Výhodou tohoto zobrazení je neomezené rozlišení obrazu, který po přiblížení neztrácí svou kvalitu. Porovnání obou způsobů záznamu informace je vidět na obrázku 1. [1]

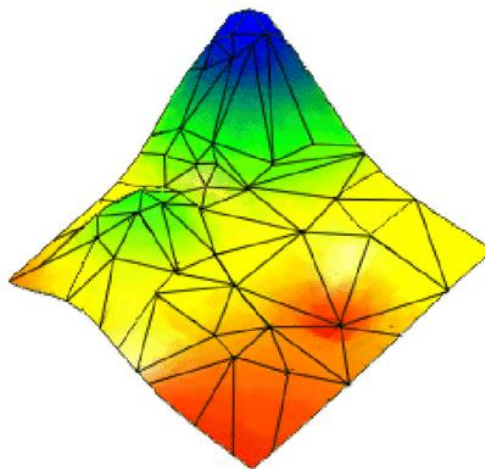


Obrázek 1: Reprezentace objektu ve vektorové podobě (vlevo) a v rastrové podobě (vpravo) zdroj [2]

3.1.2. 3D grafika

Ve 3D prostoru existuje několik způsobů reprezentace objektů. Nejčastější reprezentací v současné počítačové grafice je reprezentace pomocí hranic (hraniční reprezentace). Hranice může být dána množinou bodů, křivek nebo ploch. Podmnožinou hraniční reprezentace je TIN (Triangulated Irregular Network) reprezentace a NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) reprezentace, které patří v současné době k nejpoužívanějším typům reprezentace objektů v prostoru. [1]

Nejrozšířenější a nejvíce používanou reprezentací v současné 3D grafice je TIN reprezentace, kde je základním prvkem objektu trojúhelník. Objekt je definován sítí těchto trojúhelníků v prostoru, ve které je dodrženo pravidlo, že se trojúhelníky neprotínají. Tato síť bývá také nazývána „mesh“. Síť trojúhelníků nelze vytvořit hladký povrch objektu, a proto je kvalita modelu závislá na počtu trojúhelníků, kterými je tvořen. Příklad objektu zobrazeného v této reprezentaci je na obrázku 2.



Obrázek 2: Terén zobrazen v TIN reprezentaci, zdroj [3]

Reprezentace, která je díky své přesnosti využívána především ve strojírenství, je NURBS reprezentace. Tato reprezentace je založena na definování matematických ploch pomocí sítě řídicích bodů. [1]

Reprezentace TIN a NURBS jsou často přirovnávány k rastrové a vektorové grafice ve 2D. Kvalita TIN modelu je závislá na počtu trojúhelníků, kterými je tvořen, stejně jako je v rastrové grafice kvalita obrazu závislá na počtu pixelů. Naopak u NURBS reprezentace a u vektorové grafiky model, resp. obraz neztrácí svoji kvalitu po přiblížení.

Vedle hraniční reprezentace existuje také reprezentace objektu na základě svého objemu. V tomto případě je prostor rozdělen do několika částí. Každá část je definována prostorovými souřadnicemi a nese o sobě informaci, zda je část obsazena tělesem či nikoli. [1]

Poslední reprezentací je procedurální reprezentace. Objekt je v této reprezentaci generován pomocí určitého algoritmu. Tato reprezentace se využívá zejména v oblasti modelování organických objektů, které je velmi náročné definovat pomocí parametrů. Tento způsob generování se využívá například při generování stromů a rostlin. [1]

Ve vozidlových simulátorech se setkáváme především s rastrovou grafikou při tvorbě textur a TIN reprezentací pro generování modelů.

3.2. Základy modelování ve 3D

Veškeré 3D modely v počítačové grafice musí být nejdříve vytvořeny. Nejčastějším způsobem tvorby 3D modelů je využití speciálních programů pro jejich tvorbu (3D modelovací programy).

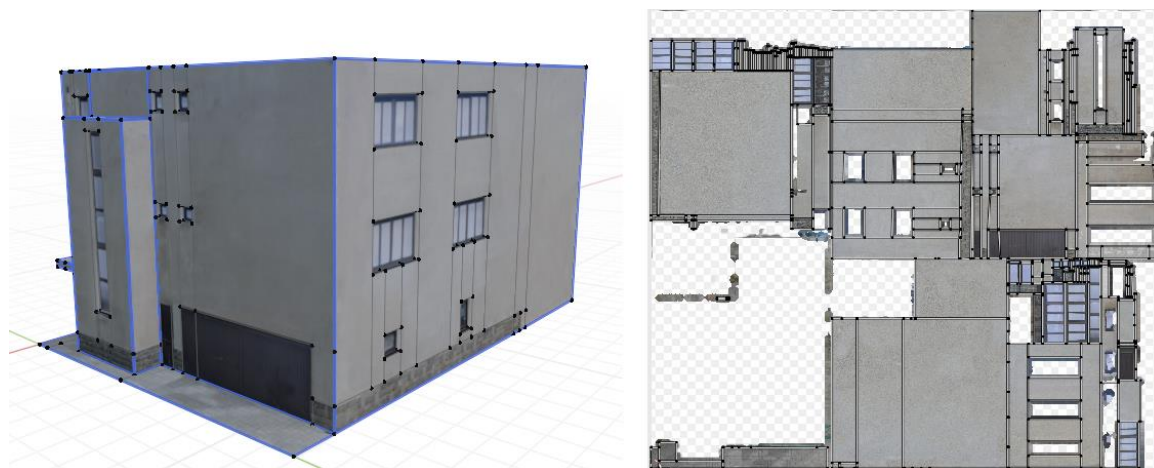
Základním principem modelování je využití tzv. geometrických primitiv. Jedná se o základní geometrické útvary, jako jsou krychle, koule, válec, prsteneček nebo jiné pravidelné mnohostěny. Tyto útvary lze skládat dohromady pomocí základních množinových operací, mezi které patří například sjednocení, průnik nebo rozdíl. Tento způsob modelování je vhodný zejména pro jednodušší a málo členité objekty.

Složitější útvary jsou modelovány pomocí křivek. Existuje několik druhů základních křivek, které jsou při modelování využívány. Pomocí nich lze vytvořit libovolný tvar, který může být například vytažen do prostoru. Samozřejmě existují i další způsoby modelování, avšak tyto dva popsané patří mezi nejčastěji používané při tvorbě virtuálního prostředí do vozidlových simulátorů.

Důležitým pojmem v modelování 3D objektů jsou textury. Textury jsou přiřazeny každému modelu a dodávají mu barvy a optické vlastnosti jeho povrchu, čímž je docíleno celkového vizuálního dojmu. Textura nejčastěji představuje 2D obrázek, který je nanesen na model UV

mapováním. Při mapování je nutné brát ohled na velikost textury a její případné linie. Například při tvorbě cihlové zdi musí velikost cihel odpovídat měřítku modelu a také musí být textura správně natočená, aby zeď nepůsobila dojmem, že je otočená. [1]

Umístění textury na povrchu modelu je definované tzv. UV mapou. Pro každý vrchol 3D modelu jsou definovány i tzv. UV souřadnice, které definují polohu na textuře, odkud má být aplikována barevná složka. Pomocí těchto souřadnic ve vrcholech modelu je následně dopočítáno zobrazení na celé ploše modelu. Na obrázku 3 je vidět model domu a jeho UV mapa. [4]



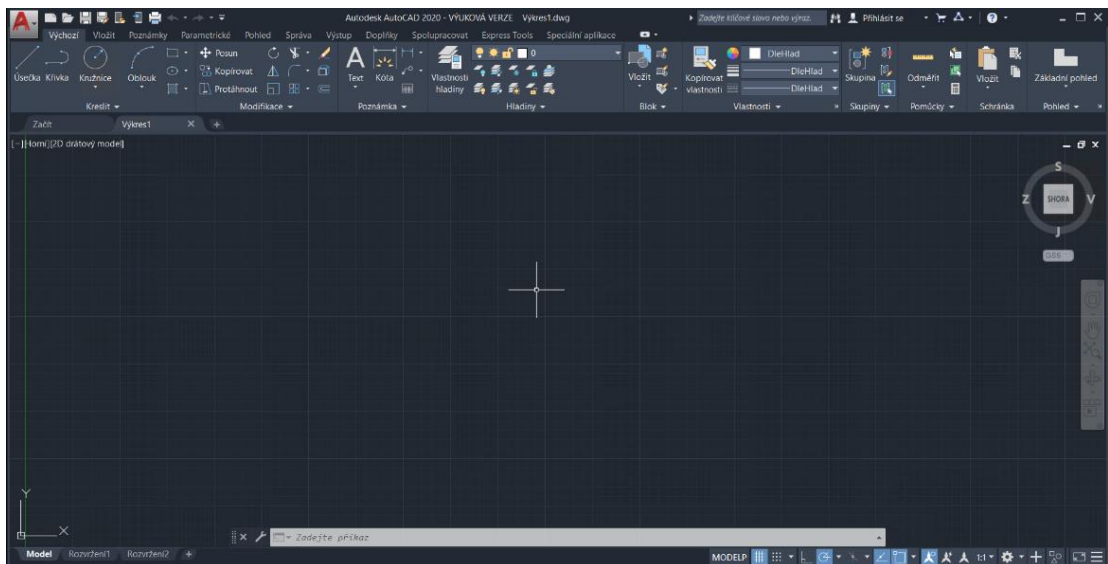
Obrázek 3: 3D model (vlevo) a jeho UV mapa (vpravo)

3.2.1. Softwarý pro modelování

K modelování objektů lze využít různých softwarů. K dostání je v současné době velké množství těchto programů, které nabízejí různé přístupy pro modelování. Každý software obsahuje několik nástrojů pro tvorbu 3D modelů a uživatel si tak může vybrat, jaký software mu nejvíce vyhovuje. Profesionální softwarý s velkým množstvím funkcí jsou často placeny, ale existují také pokročilé softwarý s volnou licenci.

AutoCAD

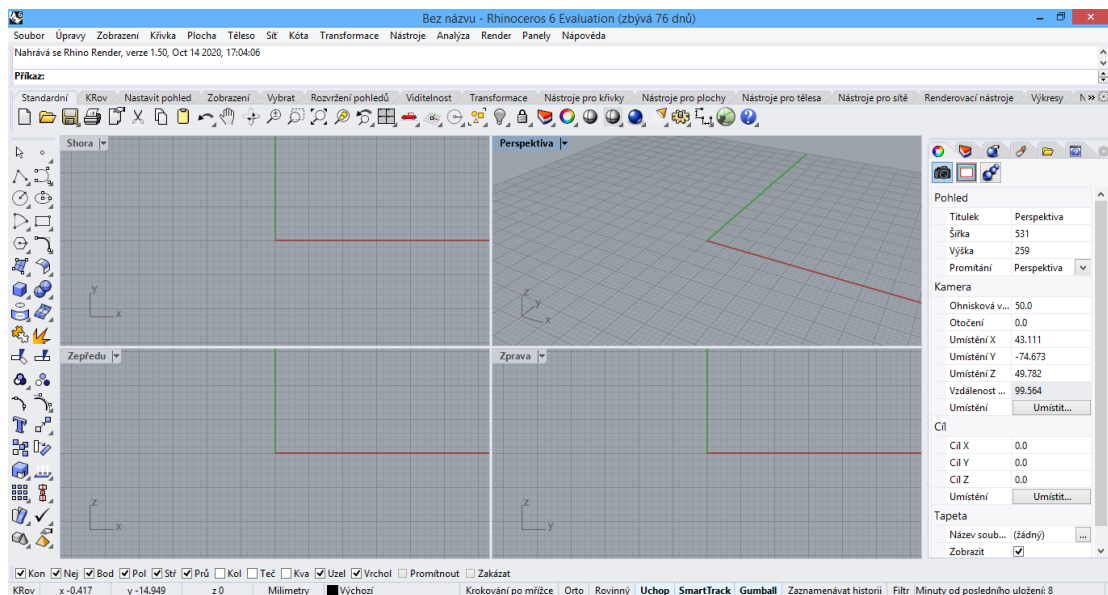
Jedním z placených softwarů je AutoCAD vyvinutý firmou Autodesk. Tento program je využíván hlavně architekty, projektanty a konstruktéry. Je v něm možné vymodelovat malé strojírenské součástky, ale i velké dopravní stavby. AutoCAD patří díky svým nástrojům a bezplatné licenci pro studenty k nejrozšířenějším programům pro 3D modelování. Rozhraní softwaru lze vidět na obrázku 4. [5]



Obrázek 4: Uživatelské rozhraní softwaru AutoCAD

Rhinceros6

Dalším placeným softwarem je program Rhinceros6. Tento software je určený především pro modelování v NURBS reprezentaci, ale je schopen objekty exportovat i v jiných reprezentacích (například TIN). Výhodou je jeho nízká cena při nutnosti komerčního modelování. Jeho rozhraní je ukázáno na obrázku 5. [6]

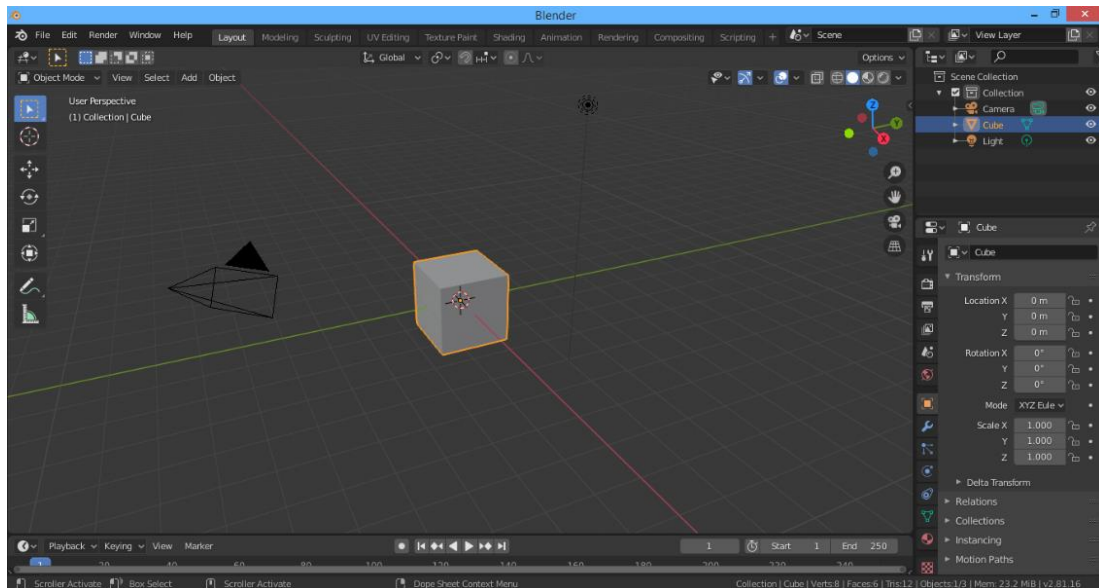


Obrázek 5: Uživatelské rozhraní softwaru Rhinceros6

Blender

Hlavním zástupcem neplacených 3D modelovacích softwarů je Blender. Díky rozsáhlé funkcionalitě svých nástrojů má tento program širokou uživatelskou základnu. K tvorbě objektů je možné využít základních geometrických útvarů. Kromě samotného modelování umožňuje

také tvorbu animací a speciálních efektů. Uživatelské rozhraní tohoto softwaru je znázorněno na obrázku 6. [7]



Obrázek 6: Uživatelské rozhraní softwaru Blender

Výše zmíněné programy jsou nejčastěji používány při tvorbě objektů do vozidlových simulátorů na Fakultě dopravní, ČVUT v Praze. Každý ze softwarů přináší různý přístup pro tvorbu modelů a záleží jen na modeláři, který přístup mu nejvíce vyhovuje. Avšak každým z těchto programů lze vymodelovat libovolný model.

4. Vozidlové simulátory

Vozidlový simulátor je nástroj sloužící pro simulaci jízdy vozidla ve virtuálním prostředí. Jeho konstrukce je tvořena celým vozidlem nebo pouze kokpitem dopravního prostředku a plochami, na které je promítáno okolní prostředí. Tyto plochy jsou nejčastěji monitory nebo plátna s projekcí obrazu pomocí projektorů. Pro dosažení vyšší realističnosti simulace jsou často simulátory doplněny o pohybovou plošinu, která simuluje síly působící na probanda. [8]

Simulátory jsou důležitou součástí výcviku nových řidičů, ale také tréninku profesionálních řidičů. Své využití mají také v oblasti experimentů zaměřených na chování řidičů v extrémních podmínkách nebo při testování HMI (Human-Machine Interface) a nových asistenčních systémů. Důvodem využití simulátorů je především bezpečnost testovacího prostředí, ve kterém nehrozí zranění účastníků provozu, a také stálé podmínky. Příklad vozidlového simulátoru s promítanou scénou je vidět na obrázku 7.



Obrázek 7: Interaktivní simulátor na Fakultě dopravní, ČVUT v Praze, zdroj [9]

Simulátor se skládá z několika subsystémů, které spolu musí komunikovat, aby byla zaručena správná funkce celé simulace. Mezi tyto subsystémy patří matematický model chování vozidla, řízení pohybové plošiny (pokud je součástí konstrukce), tvorba virtuální scény a scénáře a systém pro záznam jízdy. Součástí systému také někdy mohou být prostředky k následnému vyhodnocení experimentu. [8]

Scénu v simulátorech tvoří virtuální prostředí, které obklopuje probanda. Scénář je naopak posloupnost veškerých simulací a animací ve scéně, který je přesně vytvořen pro daný experiment. Jedním z nejdůležitějších prvků ve scénářích jsou spouštěče, tzv. „triggery“. Jedná se typicky o konkrétní místo na vozovce, které podává informaci, zda jím uživatel projel nebo ne. V případě, že řidič do dané oblasti vjel, je spuštěna vybraná situace, kterou může být například vběhnutí zvěře do vozovky. [8]

Vozidlové simulátory je možné dělit podle konstrukce na tzv. lehké a plnohodnotné. U lehkých simulátorů je použit pouze kokpit vozidla, kolem kterého jsou rozestavěny monitory, na které je promítáno virtuální prostředí. Proband tak není zcela obklopen vozidlem a okolním prostředím, takže dojem ze skutečného provozu není tak věrný. Výhodou je naopak snazší konstrukce a variabilita takového simulátoru. Je možné ho přizpůsobit podmínkám různých experimentů. [8]

Plnohodnotný simulátor je tvořen celým vozidlem. Z důvodu větší základní konstrukce je projekce okolního prostředí nejčastěji tvořena pomocí projektorů a pláten. Scéna je promítána do všech stran kolem probanda, takže v něm vyvolává pocit, že se nachází v reálném prostředí. Takový simulátor je náročnější z hlediska konstrukce na rozdíl od lehkých simulátorů a vyžaduje také vyšší pořizovací náklady. Naopak ale často disponuje vyšší věrohodností simulace jízdy. [8]

Dále se simulátory mohou dělit na ty, které mají pohybovou plošinu a na ty, které ji nemají. Simulátory s pohybovou plošinou nabízejí probandům věrnější pocit řízení skutečného vozidla. Během jízdy jsou simulovány síly, které za normálních podmínek působí na řidiče. Simulovány jsou zejména síly působící na řidiče při rozjezdu nebo při brzdění. Nejdůležitější vlastností je dosažení nízké latence mezi vizuálním vjemem a reakcí plošiny. Pokud není pohyb synchronizován s vizuálním vjemem, dochází často k nevolnosti probandů. Nevýhodou simulátorů s pohybovou plošinou je opět náročná konstrukce, vyšší náklady a také jejich údržba. [8]

4.1. Využití simulátorů

První oblastí, ve které simulátory nacházejí uplatnění, je výcvik řidičů v autoškolách. Nespornou výhodou této aplikace je možnost seznámení řidiče s teorií a následné otestování znalostí v bezpečných podmínkách vozidlového simulátoru, kde nehrozí dopravní nehoda s následky na zdraví. Je možné si takto vyzkoušet a osvojit základy řízení, které pak řidič snadněji přeneseme na skutečné vozidlo v reálném provozu.

Využívat simulátory nemusí pouze začátečníci. Například společnost DEKRA využívá svůj simulátor kamionu pro školení svých profesionálních řidičů a zdokonalení jejich jízdy. Na tomto

simulátoru probíhá i výuka správného chování řidiče a postupů při řešení nebezpečných situací. [10]

Své využití mají simulátory i v oblasti experimentů zkoumající fyziologické funkce řidiče nebo jeho obecné chování ve specifických situacích. U těchto experimentů je využíváno také doplňujících měřících přístrojů pro sledování řidičových fyzických stavů. Pomocí EEG (elektroencefalografie) je měřena například elektrická mozková aktivita a pomocí EKG (elektrokardiogram) je zaznamenána srdeční činnost. Na základě těchto hodnot může být posuzována například hladina únavy řidiče. Experiment na stanovení stupně únavy řidiče by byl ve skutečném provozu velmi nebezpečný a život ohrožující. Na simulátoru však žádné skutečné nebezpečí nehrozí, pokud řidič usne.

Druhou skupinou experimentů, ve kterých jsou simulátory využívány, je oblast HMI. Tato vědní disciplína se zabývá interakcí mezi vozidlem a řidičem. Při těchto experimentech je zkoumáno především rozložení ovládacích prvků na chování řidiče při jízdě a reakce na nové ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) systémy.

Pro každou simulaci ve vozidlovém simulátoru je snaha vytvořit virtuální prostředí, aby co nejvíce odpovídalo podmínkám a situacím v reálném světě a zároveň splňovalo požadavky na prováděný experiment nebo výcvik jízdy.

4.2. Tvorba scénářů do vozidlových simulátorů

Pro proces tvorby virtuálního prostředí (scény) je využito tří hlavních druhů softwarů. Prvním druhem jsou softwary pro modelování 3D objektů. Každý objekt, který se ve scéně nachází, je nutné samostatně vytvořit. Jedná se o různé objekty, které mohou být pozorovány v okolí komunikace. Jsou to veškeré okolní budovy od rodinných domků po kancelářské objekty nebo menší předměty jako lavičky nebo pouliční lampy. Zvláštní pozornost je třeba věnovat okolní vegetaci. Přírodní objekty jsou často velmi členité a složité z hlediska struktury. Proto je náročné je vymodelovat tak, aby splňovaly základní požadavky na scénu, které budou dále podrobněji popsány. Vzhledem k jejich složitosti a náročnosti na výpočetní výkon jsou do scény přidávány v posledních krocích, aby nezpůsobily problémy během celého procesu tvorby scénáře. [11]

Druhý software, který je potřeba k přípravě prostředí, je grafický editor. V tomto editoru jsou tvořeny a upravovány textury, které jsou přiděleny jednotlivým vymodelovaným objektům. Textury dodávají 3D modelům optické vlastnosti a definují, jak se mají zobrazovat ve virtuálním prostředí. Textury v současné době nemusí určovat jen barevné rozložení modelu, ale také mohou definovat odrazivost, strukturu povrchu, průhlednost a mnohé další optické parametry. [11]

Posledním použitým softwarem je engine, který se stará o vykreslování virtuálního prostředí. V tomto softwaru je často modelován terén virtuálního prostředí, na který jsou aplikovány jednotlivé modely. Zároveň jsou často v tomto enginu nastaveny veškeré simulace, animace a v některých případech i samotný fyzikální model pro ovládání vozidla. Tento software může být nově naprogramován pro potřeby simulátoru. Takový software je dokonale ovládán jeho tvůrcem a má otevřený zdrojový kód, což umožňuje jeho editaci. Často je však méně uživatelsky přívětivý. Naopak uživatelsky přívětivé jsou herní enginy, které je možné využít pro tvorbu scénářů. Dnes jsou takové softwary velmi vyspělé a nabízejí kvalitnější vizuální zobrazení než vlastní vytvořené softwary. Mnoho z nich poskytuje volnou licenci, a tudíž má široké spektrum uživatelů. Nevýhodou je uzavřenost vnitřního kódu softwaru, kdy uživateli není znám samotný proces výpočtu obrazu. Pokud ale program správně funguje, není tento problém překážkou pro uživatele. [11]

Interaktivní simulace patří do skupiny simulací, u kterých je vypočítáván výstupní obraz v reálném čase. Z těchto důvodů musí modely a textury splňovat podmínky pro snadné a rychlé vykreslování.

4.2.1. Požadavky na scénář

Zobrazení virtuálního prostředí se musí přizpůsobit pohybu uživatele v tomto prostředí. Dopředu není známa poloha řidiče a jeho natočení, a proto se musí obraz neustále překreslovat podle řidičova pohybu ve virtuálním prostředí. Zobrazení tohoto prostředí navíc musí probíhat v reálném čase a obnovovací frekvence musí být vyšší než 50 Hz, aby byl přechod vnímaného obrazu plynulý. To je základní požadavek, který ovlivňuje tvorbu scén. Veškeré objekty, které jsou ve scéně obsaženy, zpomalují výpočet obrazu, a proto nesmí být náročné na výpočetní výkon. Zároveň je ale nutné, aby tyto objekty stále odpovídaly realitě. Proto musí být nalezen kompromis mezi složitostí a realističností objektů. Složitost a realističnost objektů jsou dva hlavní parametry, na které jsou kladeny požadavky při tvorbě scénářů do interaktivních simulací. [11]

Složitost virtuálního prostředí

Objekty určené do vozidlových simulátorů jsou exportovány v TIN reprezentaci. Z hlediska složitosti je hlavním požadavkem, aby vytvořený model byl dostatečně zjednodušený tak, aby mohl být použit v interaktivních simulátorech. Hlavním kritériem pro tvorbu objektu je počet trojúhelníků, kterými je tvořen. Celkový počet musí být takový, aby byl stále zachován celkový vzhled objektu, ale zároveň musí být vytvořen minimálním množstvím trojúhelníků. Požadovaná složitost je však závislá na předpokládané minimální vzdálenosti objektu od pozorovatele. Budova, která se nachází v těsné blízkosti vozovky, by měla mít

vymodelované jednotlivé detaily a měl by u ní být jednoduše vymodelován interiér. Naopak u budovy, která se bude nacházet ve vzdálenosti 100 m od vozovky, je dostačující, pokud je vytvořena pomocí základních primitiv a je tvořena pouze desítkami trojúhelníků. Vzdálenější budovy mohou být v některých případech nahrazeny kulisou. Jedná se o dvojici trojúhelníků tvořící obdélníkovou plochu, na kterou je nanesena poloprůhledná textura. [11]

Pokud chceme vytvořit univerzální model, který se automaticky bude zjednodušovat na základě vzdálenosti od pozorovatele, tak je nutné vytvořit tzv. model s LOD (Level of Details). Jedná se o jednu z optimalizačních metod, které jsou používány pro snížení složitosti objektů. V případě LOD se jedná o rozdělení jednoho objektu do více úrovní složitosti. Objekt může být rozdělen na libovolný počet úrovní. V každé úrovni je pak složen z různého počtu trojúhelníků. S přibývajícím úrovní vždy ubývá počtu trojúhelníků. Tyto úrovně jsou vázány na vzdálenost uživatele od objektu. Čím blíže kameře se objekt nachází, tím menší úroveň LOD je zobrazována. V blízkosti objektu jsou tedy patrné jeho detaily, které se vytrácí s rostoucí vzdáleností od objektu. Příklad různých reprezentací jednoho objektu je znázorněn na obrázku 8. Jako poslední úroveň je u této metody často používána kulisa. Struktura LOD s kulisou se často využívá pro objekty vegetace. [11]



Obrázek 8: Reprezentace objektu ve 4 úrovních LOD, zdroj [12]

Dalším důležitým prvkem, který ovlivňuje výpočet simulace, je rozlišení textur. Textury by měly být tvořeny velikostmi, které jsou vždy mocniny dvou (např. 512x512, 1024x1024). Toto nastavení je důležité z hlediska optimalizace, kdy pro vzdálenější objekty se může používat poloviční rozlišení textury. [11]

Další vlastností, která je u textur důležitá, je počáteční rozlišení. Pro velmi blízké objekty je vhodné použít rozlišení 100 px/m. Při simulacích ve vozidlových simulátorech se toto rozlišení používá pro silnice. Naopak se vzrůstající vzdáleností je možné rozlišení snižovat. Pro objekty vzdálené 100 m od vozovky je možné použít texturu s rozlišením 20 px/m a nižší. [11]

Jedním z velmi důležitých vlastností pro snížení nároků na výpočet je možnost zapékání stínů (bake shadow). Jedná se o možnost „předpočítání“ stínů pro statické objekty, o kterých je

známo, že se nebudou ve scéně pohybovat. Tyto objekty jsou například terén, budovy nebo vegetace. Naopak pro veškeré animované objekty je nutné počítat stíny v reálném čase. [11]

Realističnost virtuálního prostředí

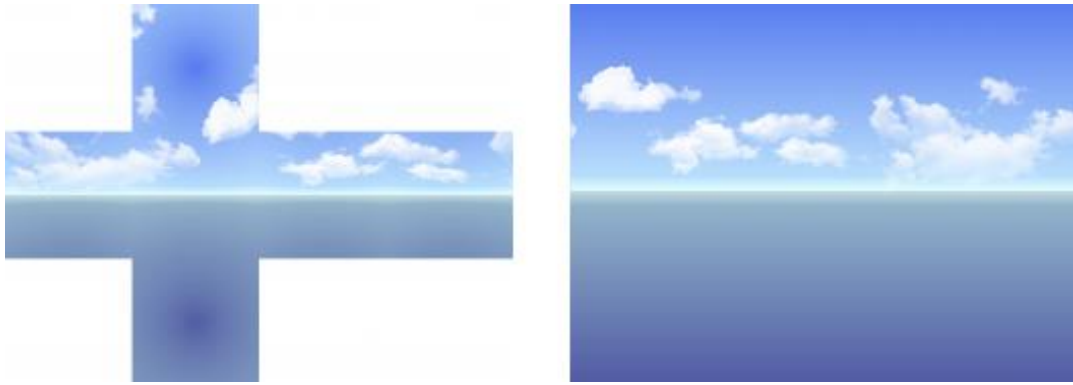
Druhým požadavkem, který je třeba dodržet při tvorbě modelů, je dostatečně realistický vzhled 3D objektů. K tomu pomáhá vhodná volba textur, které jsou přiděleny modelům. Textura je přidělena každému objektu s ohledem na jeho vlastnosti a musí být na objekt správně namapována. Textura musí být nastavena tak, aby na objektu působila přirozeně. Často jsou využívány tzv. bezešvé textury („seamless texture“), které je možné skládat na objekt jako dlaždice. Pokud jsou takové textury složeny k sobě, není patrný žádný přechod mezi jednotlivými obrázky, jak je vidět na obrázku 9. [11]



Obrázek 9: Bezešvá textura: samostatný obrázek kamenné zdi (vlevo) a složená textura (vpravo), zdroj [13]

V současné době se objektu nepřičítá jen textura, ale také materiál. Materiál je tvořen skupinou textur, u kterých mohou být definovány další optické vlastnosti. Vykreslení tohoto materiálu je dáno tzv. shaderem. Díky těmto shaderům lze nastavit přesné optické vlastnosti objektu, které odpovídají zobrazení v reálném světě. [11]

Pro získání větší reálnosti virtuálního prostředí je také možno využít tzv. skybox, který je vidět na obrázku 10. Jedná se o krychli, jejíž stěny jsou tvořeny texturou a která je používána pro vytvoření vzdáleného horizontu prostředí. Zároveň také ovlivňuje světelné podmínky scény. [11]



Obrázek 10: Samostatný skybox (vlevo) a aplikovaný skybox ve scéně (vpravo), zdroj [14]

Důraz je kladen také na detaily, které pomáhají dokreslovat dojem ze skutečného světa. Takovými detaily je například okolní provoz a pohyby chodců. Použitý vozový park musí odpovídat době, ve které jsou realizovány experimenty v simulátoru. Stejně tak oblékání chodců by mělo korespondovat se současným stylem. Neměla by chybět ani okolní vegetace a ani stíny všech objektů. [11]

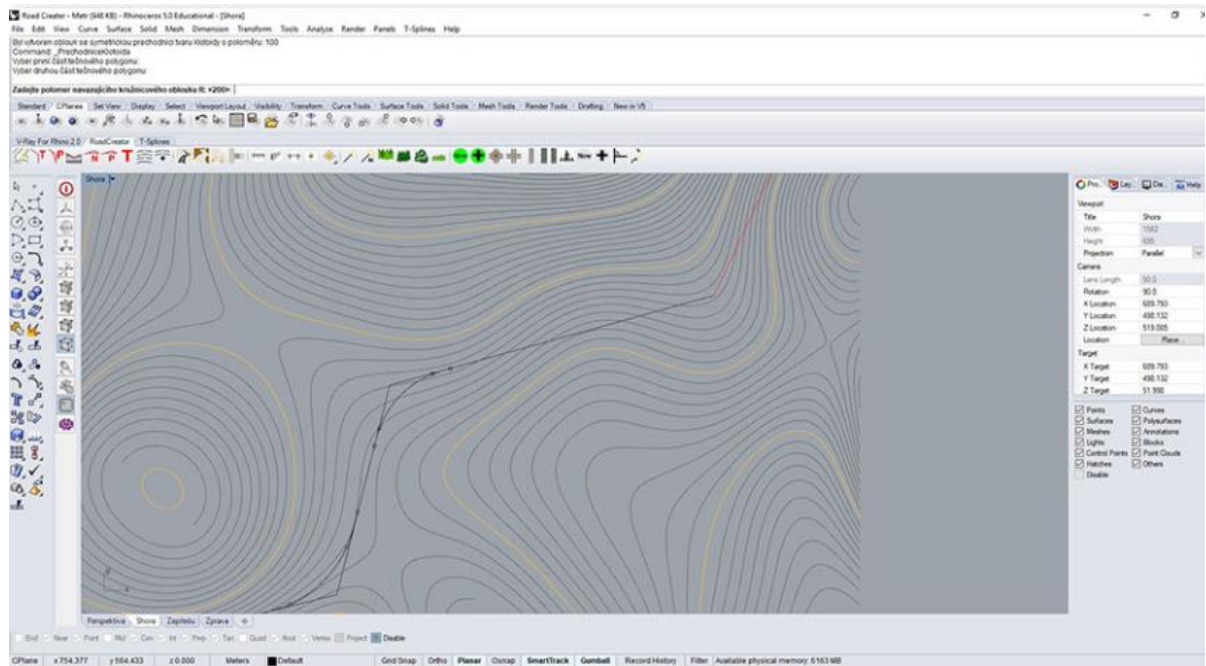
Snahou je vytvořit scénu, která splňuje všechny požadavky, je nenáročná na hardware a vzbuzuje v probandovi co nejvěrnější pocit reálného provozu. Způsoby tvorby těchto scén se stále vyvíjejí.

4.2.2. Metody tvorby scén na Fakultě dopravní

V této kapitole budou popsány způsoby tvorby scén, které byly nebo jsou stále používány na Fakultě dopravní, ČVUT v Praze. Vývoj metod používaných na Fakultě dopravní koresponduje s obecným vývojem metod tvorby scénářů ve světě.

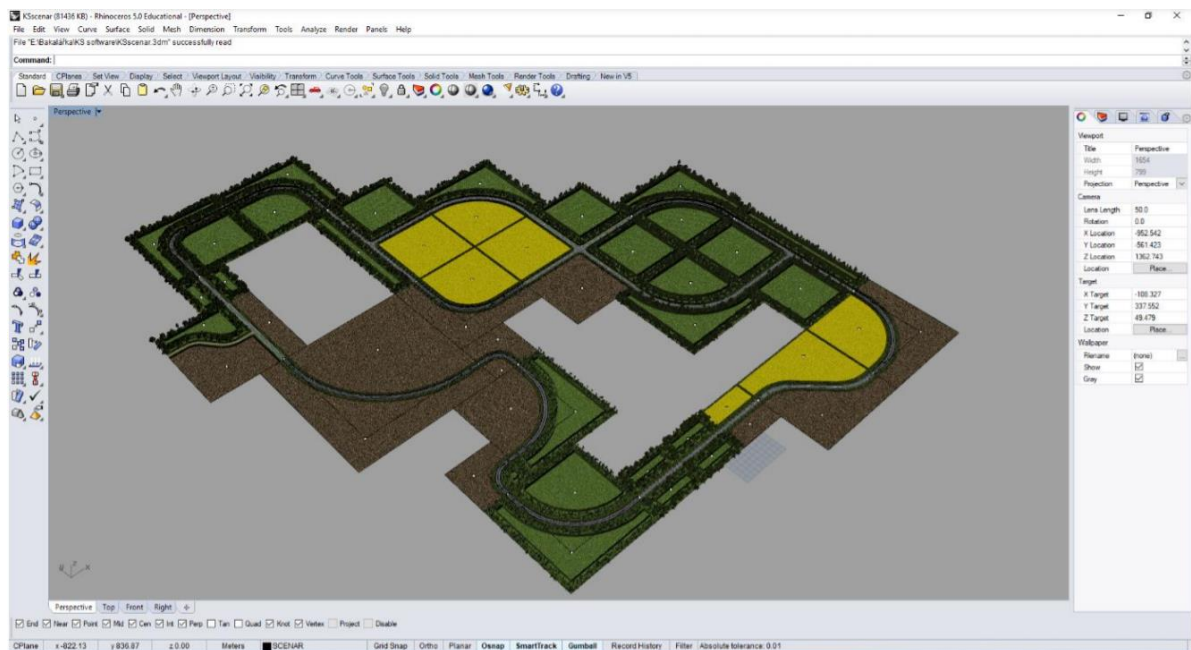
Při tvorbě prvních scén bylo jedinou možnou metodou skládání jednotlivých trojúhelníků za sebe. Složením byla vytvořena celková síť trojúhelníků, na kterou byla poté nanášena textura. Takový postup byl velmi časově náročný, protože bylo nutné každý trojúhelník vytvořit samostatně. Proto byla snaha vyvinout nové přístupy, které by usnadnily tvorbu scén. [15]

Později byla doc. Stanislavem Novotným vytvořena metoda pro automatické generování silniční infrastruktury. Tento postup výrazně zkrátil čas oproti předchozí metodě. Tato metoda ale neumožňovala tvorbu komunikací podle platných norem a také neřešila tvorbu okolního terénu. Proto byl vytvořen plugin RoadCreator for Rhino, který silniční síť tvoří na základě normy ČSN 73 6101. Tento postup byl vytvořen a popsán v diplomové práci Ing. Adama Orlického. Vedení komunikace je nejdříve navrženo ve 2D prostoru v terénu, jak je vidět na obrázku 11, a poté je možné upravovat její podélný profil. Zároveň tento plugin umožňuje automatickou tvorbu svahů komunikace. Kromě samotné silnice pomáhá i s tvorbou okolních objektů, jako jsou svodidla nebo dopravní značení. [16]



Obrázek 11: Vedení osy komunikace v RoadCreator for Rhino, zdroj [16]

Jednou z posledních dosavadních možností je generování scén skládáním jednotlivých bloků. Tento postup byl popsán v bakalářské a diplomové práci Kláry Pudové. V práci byl vytvořen plugin, který umožňuje tvorbu jednotlivých bloků scén, které se následně dají složit do sebe. Při tvorbě těchto bloků si uživatel může vybírat z databáze, která obsahuje několik silničních úseků nebo také různé typy vegetace. Výhodou této metody je rychlá tvorba scénáře. Nevýhodou pak je omezenost přednastavených bloků, které mohou být použity pouze pro určité typy scénářů. Příklad vytvořeného scénáře je na obrázku 12. [17]



Obrázek 12: Příklad vytvořeného scénáře pomocí blokového skládání, zdroj [17]

Jednou z nejmodernějších metod, která je nyní na Fakultě dopravní testována a začíná se používat, je metoda tvorby komunikační sítě pomocí uzlových prvků. Jedná se o metodu, při které jsou přednastaveny uzlové prvky (křižovatky, rozšíření vozovky atd.) a pro každý tento uzlový prvek jsou předdefinovány výstupy komunikace. Následná tvorba spočívá ve vkládání uzlových prvků do scény a jejich propojení. Celý proces je zautomatizovaný a umožňuje automatické generování zářezů a výkopů do terénu.

4.2.3. Nedostatky popsaných metod

Hlavním problémem všech těchto metod je nedostatečně reálný vzhled objektů. Ve scénářích jsou veškeré modely často hladké a čisté a zároveň také velmi pravidelné. Takové modely neodpovídají svým reálným předlohám. V simulátorech je asfalt na komunikacích čistý, jednolitý a bez jakéhokoli poškození. Reálná vozovka je často poškozena, jsou na ní patrné provedené opravy a krajnice může být často odlomená. Jedná se i o objekty v okolí silnice. Mohou to být například posprejované pouliční lampy, zničené lavičky nebo rozbité omítky domů. Tyto detaily dosud nebyly nijak vizualizovány v simulátorech, i když mají vliv na vnímání probandů.

Kvůli těmto nedostatkům jsem se ve své práci zaměřila na nalezení nového způsobu tvorby scén, který by byl založen na vícenímkové fotogrammetrii a na reálných datech. Díky fotogrammetrii je možné vytvořit 3D model na základě fotografií, na kterých je zachycen skutečný stav objektů z reálného světa.

5. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je technický vědní obor, pomocí kterého se získávají informace z obrazových záznamů. Samotné slovo fotogrammetrie pochází z řečtiny a je odvozeno od slov „fotos“, které znamená světlo, a „graphos“, které znamená záznam. Na zaznamenaném předmětu lze pak z obrazu odvodit velikost nebo jeho umístění v prostoru. Tento postup se dá uplatnit v několika oborech, jako je například stavebnictví, zemědělství nebo i doprava. [18]

Fotogrammetrie je nejčastěji využívána pro měření vzdáleností. Tyto informace díky fotogrametrii není nutné získávat přímo v terénu, ale je možné je odvodit později v počítači díky pořízeným fotografiím. Fotografie je možné pořídit i s pomocí dronů, což umožní získat data z těžko přístupného terénu.

Výhodou fotogrammetrie je také možnost zpracování jakkoli velkého objektu. Je možné pořídit snímky malé strojírenské součástky nebo velkého domu. Chyba zpracování je u této metody v řádu procent a není dána fixní hodnotou vzdálenosti, jako tomu je u 3D skenování. 3D skenery jsou vyráběny vždy pro určitý rozsah snímaného objektu a jejich chyba je definována jako fixní hodnota vzdálenosti. Pro dosažení nejmenší chyby je proto vždy vhodné použít skener, kdy se velikost snímaného objektu nachází v horní části rozsahu skeneru.

5.1. Dělení fotogrammetrie

Existují různé druhy fotogrammetrie, které se odvíjí od způsobu pořízení fotografií nebo od způsobu zpracování. Základním dělením fotogrammetrie je dělení podle počtu pořízených snímků, které jsou následně analyzovány. Jedná se o jednosnímkovou a vícesnímkovou fotogrammetrii.

Jednosnímková fotogrammetrie vychází pouze z jednoho snímku. Její využití je převážně v oblasti rovinných předmětů, jelikož z jednoho snímku je možné určit pouze rovinné souřadnice. Tato metoda není vhodná pro zachycení nerovného terénu nebo členitých objektů. Použitím této metody by v takovém případě došlo ke zkreslení výstupu a nebylo by možné správně určit vzdálenosti na daném objektu. Mohou být ale ze snímku získány základní vlastnosti objektu, jako je například rovnoběžnost hran a podobně. [19]

Vícesnímková fotogrammetrie se používá pro rekonstrukci a vyhodnocení 3D objektů. Pořízením většího množství fotografií se ze snímků dají získat potřebná data, díky kterým je možné zachycené objekty rekonstruovat v prostoru. Jen na základě fotografií nelze určit rozměry vytvořeného objektu. Proto je nutné doplnit fotografie o informaci vzdálenosti některých bodů, aby podle ní bylo následně možné upravit měřítko modelu. Vícesnímková

fotogrammetrie se dále dělí na stereofotogrammetrii a vícesnímkové prostorové protínání jinak také průsekovou fotogrammetrii.

Stereofotogrammetrie je metoda, která se snaží napodobit lidské vnímání. Na základě dvou fotografií pořízených ve stejné rovině se pomocí matematických výpočtů snaží vytvořit prostorový dojem a rekonstruovat 3D model. [18]

Vstupem do průsekové fotogrammetrie je dva a více snímků. Pro úspěšné pořízení modelu je třeba tyto snímky pořádit podle určitých pravidel. Je třeba objekt fotografovat tak, aby se vždy na sousedních snímcích protínaly osy záběru. Vždy dva pořízené snímky musí mít společnou část, díky čemuž je možné získat ze snímků potřebné informace. [19]

Dále je možné dělit fotogrammetrii podle způsobu získávání snímků, resp. podle polohy fotoaparátu. Na základě této vlastnosti se fotogrammetrie dělí na pozemní, leteckou a družicovou. Pozemní fotogrammetrie, nazývaná také blízká fotogrammetrie, je taková, kdy pozice kamery je na zemi. Použití této metody je možné pouze do určité vzdálenosti, aby bylo možné obraz následně zpracovat bez výrazných chyb. [18]

Druhým typem fotogrammetrie je taková, při které jsou snímky získávány z výšky. Jedná se o leteckou fotogrammetrii. Tento způsob umožňuje zachycení větší plochy než při pozemní fotogrammetrii. Metody zpracování jsou ale v tomto případě složitější kvůli nepřesnému určování prostorové polohy. [18]

Posledním způsobem pořízení snímků, jsou snímky získané z družic. Z počátku tato metoda nedosahovala přesných výsledků, ale v dnešní době se přesnost pohybuje v řádech desítek centimetrů. [18]

5.2. Využití fotogrammetrie

Fotogrammetrie má v dnešní době velmi široké využití. Na trhu jsou dostupné vyspělé softwary, které veškeré výpočty dělají automaticky a usnadňují tak práci odborníkům. Také díky různým druhům fotogrammetrie je možné její využití v několika různých oborech.

Velké využití má fotogrammetrie ve stavebnictví. Může být použita pro dokumentaci staveb a například i pro porovnání současného stavu s plánovaným. Výhodou této metody je to, že veškerá data jsou uložena v digitálním modelu a následná analýza rozměrů vzdálenosti a dalších vlastností může být provedena v pohodlí kanceláře. Díky tomu dochází k úspoře času a také financí.

Další obor, který fotogrammetrii využívá, je památkářství. V tomto oboru je fotogrammetrie využívána pro zaznamenání současného stavu památek, který může být následně například porovnáván s původním stavem. [19]

Fotogrammetrie nachází své uplatnění také v dopravě. Využití najde například v oblasti dopravních nehod, kdy je možné ihned nafotit místo nehody a veškeré informace pak určit ze snímků. Není třeba měřit a získávat informace na místě a zdržovat tak obnovení plynulého provozu.

Výsledky fotogrammetrie se uplatňují také v oblasti zemědělství. Zde je využívána například pro zaznamenání sklonu svahů, zjišťování rozsahu záplav nebo pro analýzu škod způsobenou přírodními kalamitami. [18]

Fotogrammetrii využijí i lékaři během rehabilitace pacientů. Často je fotogrammetrie využito pro měření velikostí částí těla nebo pro porovnání současného stavu pacienta s minulým. Principy fotogrammetrie se využívají také při vyšetřeních na CT (Computed Tomography). [18]

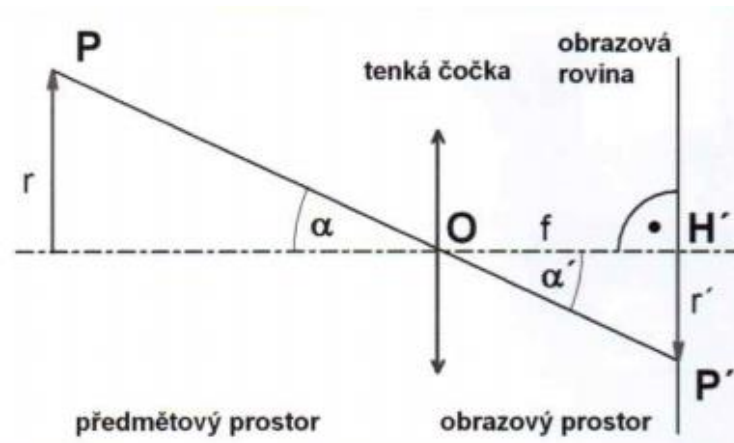
5.3. Princip vícesnímkové fotogrammetrie

Pro správné využití informací získaných fotogrammetrickými postupy je nutné rozumět principům fotogrammetrie. V této kapitole bude popsán princip vícesnímkové fotogrammetrie, díky které je možné rekonstruovat 3D model objektu na základě série fotografií.

5.3.1. Základní pojmy

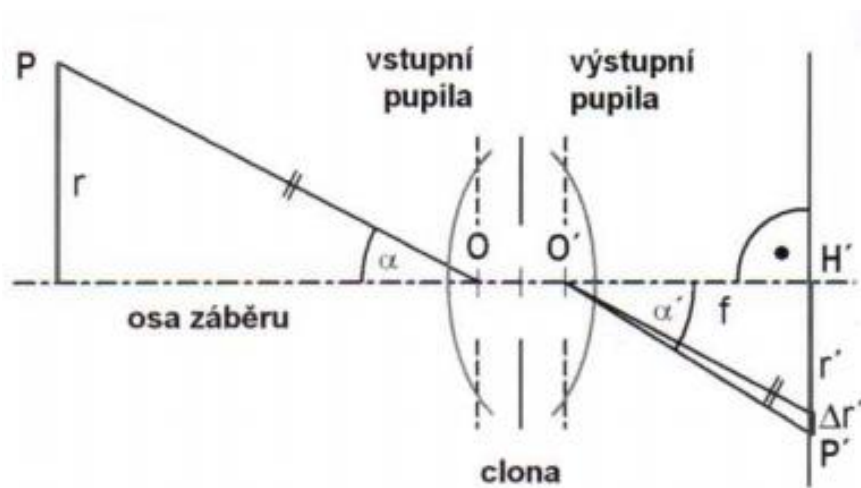
Nejdříve je nutné definovat pojem zobrazení. Fotografie jsou výsledkem zobrazení určitého objektu z reálného světa ve fotoaparátu a později pak v počítači nebo na papíře. Objekt v reálném světě je v zobrazení předmětovou částí a jeho promítnutí ve fotoaparátu je pak nazýváno obrazovou částí. [19]

Teorie zobrazení se dělí na zobrazení ideálním a reálným objektivem. V obou případech je obraz z předmětové části promítán na obrazovou rovinu v obrazové části. Světelné paprsky vstupují pod úhlem α a vystupují v obrazové části pod úhlem α' . V zobrazení ideálním objektivem jsou si předmětové a obrazové úhly rovny ($\alpha = \alpha'$). [18, 19]



Na obrázku 13 je vidět zobrazení ideálním objektivem. Obrazová rovina je protnuta optickou osou v bodě H' , který je nazýván hlavním bodem. Optická osa (na obrázku čerchovaně) rovinu protíná pod pravým úhlem. Vzdálenost f pak označuje vzdálenost hlavního bodu od středu promítání, který je označen písmenem O . [19]

V případě zobrazení reálným objektivem, které je znázorněno na obrázku 14, vstupují do zobrazení další faktory. Důležitou součástí objektivu je clona, která ovlivňuje, jaké množství světla vstupuje do objektivu. Otvor ve cloně, jehož velikost se mění s nastavením clony, se nazývá pupila. V předmětovém prostoru se jedná o vstupní pupilu, která má střed promítání v bodě O . Naopak v obrazovém prostoru se jedná o výstupní pupilu, jejíž střed zobrazení je v bodě O' . Střed promítání tedy není pouze jeden, a to způsobuje odlišnost úhlů α a α' , což způsobuje odchytky v zobrazení. [19]



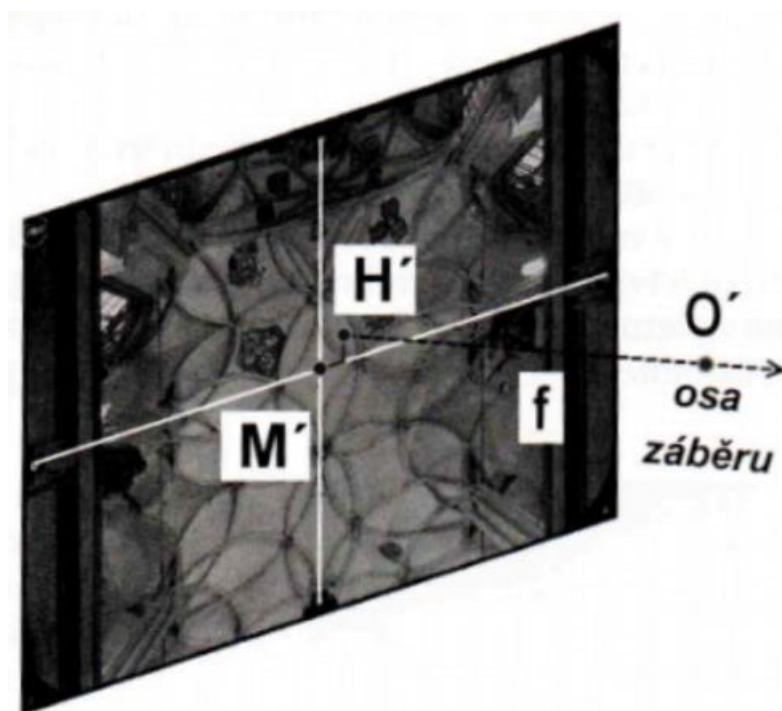
Dalším důležitým pojmem jsou prvky vnitřní orientace zobrazené na obrázku 15, které souvisí s pojmy popsány v zobrazení. Prvky vnitřní orientace je nutné znát, aby bylo možné

z pořízených fotografií získat potřebné informace pro vytvoření digitálního modelu. Pokud jsou známy tyto prvky, je možné dosáhnout přesných výsledků. Patří sem prvky vnitřní orientace měřičské komory (fotoaparátu), které definují geometrii paprsků uvnitř komory. [18]

Prvním prvkem je hlavní snímkový bod. „Hlavní snímkový bod H' je definován jako průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím v obrazovém prostoru středem promítání a který je kolmý na rovinu snímku. Je matematickofyzikálním počátkem systému snímkových souřadnic.“ [18]

V ideálním případě by tento bod H' odpovídal geometrickému středu snímku. Z důvodu technické konstrukce fotoaparátu tomu tak ale není, a proto se zavádí bod M' , který se nachází ve středu snímku. [18]

Dalším prvkem vnitřní orientace je konstanta komory f . Ta definuje vzdálenost od hlavního snímkového bodu H' ke středu promítání v obrazovém prostoru. Přibližně odpovídá ohniskové vzdálenosti objektivu. [18]



Obrázek 15: Prvky vnitřní orientace, zdroj [19]

Prvky vnitřní orientace jsou základem pro získání snímkových souřadnic. Snímkové souřadnice jsou rovinné souřadnice každého snímku. Počátek těchto souřadnic je umístěn v bodě M' . Pomocí těchto souřadnic jsou dále odvozeny další souřadnicové systémy, které vedou k rekonstrukci objektu. Nejdříve je ale nutné znát také prvky vnější orientace. [19]

Prvky vnější orientace se týkají umístění fotoaparátu v prostoru a jsou definovány pro každý snímek. Díky popsaným prvkům vnější orientace se dá určit poloha a orientace snímku v prostoru. Tyto prvky se odvíjí od středu vstupní pupily a od osy záběru. [19]

5.3.2. Princip

Pro zpracování snímků je nutné identifikovat společné body na fotografiích. Pokud se na snímku nachází nějaký bod, bude mít v modelu své prostorové souřadnice. Pokud se tento bod nachází i na jiném snímku, bude mít v budoucím modelu stejné prostorové souřadnice. Je třeba nalézt alespoň šest takových bodů mezi dvěma snímky, aby bylo možné vyřešit rovnici s neznámými. V dnešní době digitálních fotografií je možné k těmto výpočtům využít výpočetní techniku a není třeba tyto rovnice počítat ručně na papíře. Snímky se vloží do počítačového softwaru a ten potřebné rovnice vypočítá. [19]

Nejprve je potřeba nalézt tyto odpovídající si body na dvou snímcích a zjistit jejich snímkové souřadnice. Tyto body jsou nazývány „homologické“. V počítači je k nalezení těchto bodů využívána obrazová korelace. Pro snazší nalezení těchto bodů je vhodné, když má každý tento bod unikátní okolí a nedá se splést s bodem jiným. Pro nalezení homologických bodů je nutné stanovit podobnostní míru, která určuje, zda jsou dva body dostatečně podobné, aby mohly být označeny za homologické body. Pro výpočet je nejčastěji používán korelační koeficient, který určuje míru podobnosti mezi dvěma body. [18]

Pro vyhledávání bodů je také třeba vymežit okolí bodu, kde má být vyhledán. Následně je zvoleno tzv. vyhledávací okénko, které projde celou oblast. V každém kroku toto okénko vypočte korelaci mezi porovnávanými snímky, zaznamená polohu středu a následně se posune o jeden pixel. Poté jsou porovnány jednotlivé vypočtené korelační koeficienty a bod s nejvyšším koeficientem je označen za hledaný stejný bod. [18]

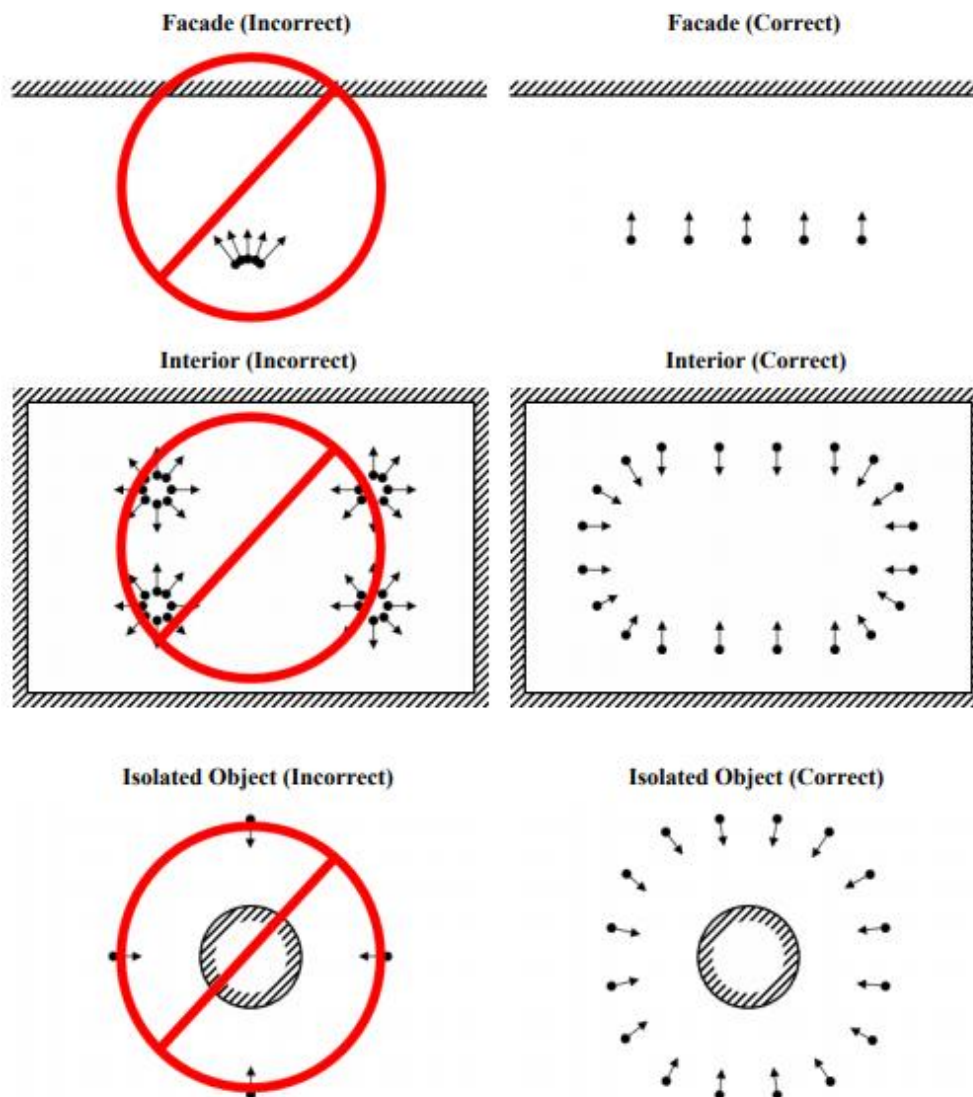
Pokud jsou identifikované společné body na fotografiích, je možné z jejich snímkových souřadnic a známých prvků vnější orientace získat finální geodetické souřadnice výsledného digitálního modelu. Pro převod z jednoho souřadnicového systému do druhého je využíváno matematických operací a pomocných souřadnicových systémů. Mezi tyto operace patří rovinná nebo prostorová rotace, translace nebo změna měřítka. Pomocí těchto úprav jsou z původních snímkových souřadnic získány výsledné geodetické souřadnice 3D modelu, který tak odpovídá realitě. [18]

5.4. Sběr dat

Výše popsaný postup popisuje, jak se snímky zpracovávají a vyhodnocují, aby z nich bylo možné dále získat informace. Avšak aby rekonstrukce modelu byla úspěšná, je důležité zaznamenávat fotografie podle určitých pravidel.

V dopravě, kdy dochází nejčastěji k rekonstrukci uličního prostoru, části komunikace nebo křižovatkového prostoru, jsou sbírána data pomocí fotografování snímaného prostoru z různých pozic člověkem nebo se často s výhodou využívá snímání pomocí dronu. Použití fotoaparátu omezuje pohyb pouze po zemi. Není tak možné kolmo zachytit například vyšší patra domu se všemi detaily.

Snímky musí být pořízeny tak, aby se některé jejich části překrývaly a bylo možné na nich najít stejné body, podle kterých se pak může určit poloha objektu v prostoru. Je tedy třeba si daný objekt prohlédnout a rozmyslet si, jak ho správně na snímcích zachytit. Rozvržení snímkování různých objektů jsou znázorněna na obrázku 16. Pokud je třeba zachytit celý objekt, musí být vyfocen ze všech stran a ze všech úhlů. Zároveň také není vhodné pořizovat příliš velké množství fotografií, protože následná tvorba modelu by byla časově náročná. Důležité také je snažit se objekt fotit tak, aby osa záběru byla kolmo na objekt a nedocházelo tak k výraznému zkreslení perspektivy.



Obrázek 16: Pozice fotoaparátu při fotografování různých objektů, zdroj [20]

Důležitou roli při pořizování fotografií hraje také počáteční nastavení fotoaparátu. Pro rekonstrukci je nutné, aby toto nastavení bylo po celou dobu snímání konstantní. Jejich změna by znamenala změnu prvků vnitřní orientace a následný proces tvorby modelu by tak byl velmi komplikovaný. Je tedy potřeba před zahájením snímání najít vhodné nastavení fotoaparátu, aby byly pořízené snímky kvalitní ze všech úhlů a stran za stejného nastavení. Výsledné fotografie musí být ostré na všech místech, proto je lepší volit vyšší clonové číslo. Jelikož toto číslo ovlivňuje také množství světla vstupujícího do objektivu, je nutné ho nastavit tak, aby byl objekt ve všech místech přibližně stejně osvětlený.

5.5. Limity sběru dat

Při pořizování snímků v prostoru se mohou vyskytnout určité překážky. Překážky mohou být na straně fotografa a otevřenosti prostoru pro pořízení fotografií nebo na straně samotného objektu.

V případě prostoru pro fotografování mohou překážku tvořit například stromy, které brání dostatečnému výhledu na objekt. Stromy a jiné překážky stíní výhled na objekt a ten pak není správně zrekonstruován z důvodu nedostatečného množství společných bodů na snímcích.

Problémy při tvorbě objektu však může působit i samotný objekt. Vliv na to může mít materiál zobrazovaného objektu. Například velmi lesklý materiál, co odráží světlo, vnáší do modelu nepřesnosti. Různé odlesky způsobí, že se během rekonstrukce nesprávně přiřadí dva body. Stejně tak je problém i u jednobarevného a hladkého povrchu. Takový povrch neobsahuje žádné jedinečné body, podle kterých by se rekonstrukce mohla řídit. Vzniká tak velká korelace ve velké skupině bodů a nedojde ke správné rekonstrukci.

Při fotografování objektu je také rozdíl, zda je focen uvnitř nebo venku. Pokud je zachycován venkovní objekt (dům, silnice apod.), je nutné brát ohled na počasí. Důležité to je především z hlediska světla. Ideální světelné podmínky pro pořizování fotografií jsou při zataženém obloze, kdy dochází k nepřímému osvětlení objektů. Slunce totiž může způsobit, že na objekt padá stín, který se navíc posouvá s časem a je pouze na některých částech objektu. To má za následek to, že nebudou správně nalezeny dva stejné body a nebude možné určit souřadnice. Pokud bude stín promítnut i do zrekonstruovaného modelu, je pak při úpravě těžce odstranitelný. Správnost výsledku může také ovlivnit déšť nebo sněžení. Výsledky také záleží na zvoleném nastavení clony, která ovlivňuje, kolik světla vstupuje do fotoaparátu. Pokud budou na snímcích přesevětlené objekty, nebude opět provedena správná rekonstrukce modelu.

5.6. Zpracování dat

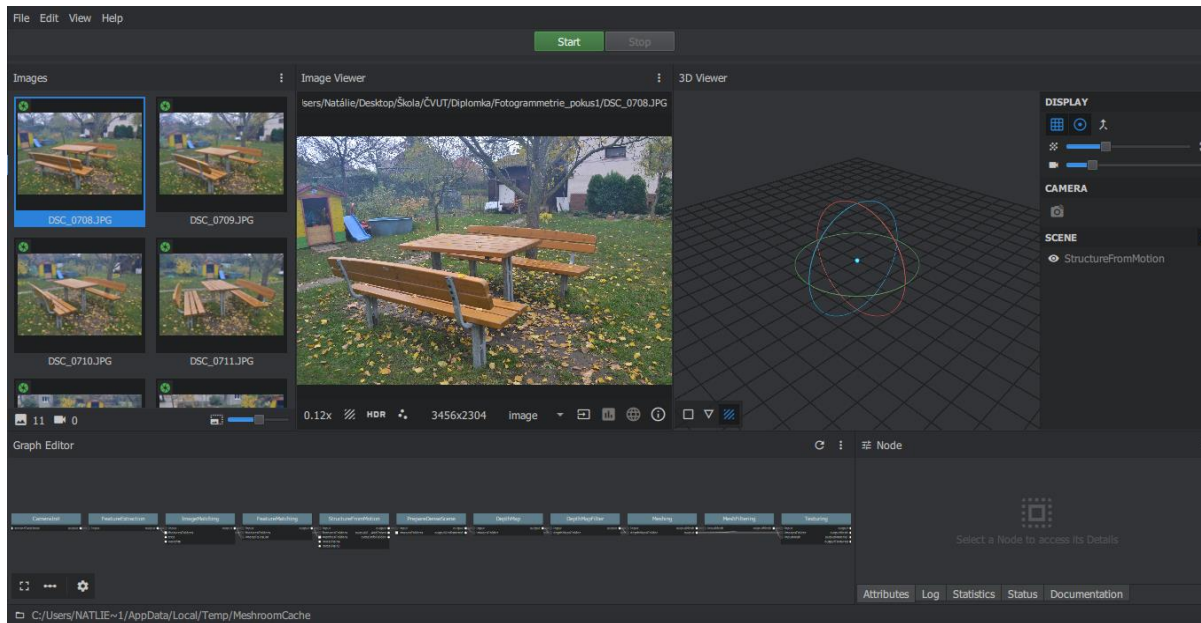
Pro zpracování fotografií existuje v současné době velké množství softwarů. Tyto programy vedou k rekonstrukci modelu, avšak některé programy jsou pokročilejší a disponují funkcemi pro následnou úpravu a export. Na současném trhu lze nalézt jak placené, tak bezplatné softwary.

Mezi volně dostupné softwary patří například AliceVision, Colmap, MicMac nebo Regard 3D. Naopak mezi placené pak patří například 3DF Zephyr, Autodesk ReCap, Correlator 3D nebo Agisoft PhotoScan.

Meshroom

Jedním ze softwarů, který umožňují převést fotografie na model, je Meshroom. Kromě rekonstrukce modelu z fotek, je také možné v tomto programu vytvořit model z videa. Meshroom je volně dostupný a neplacený software. Fotografie jsou zpracovány v 11 krocích,

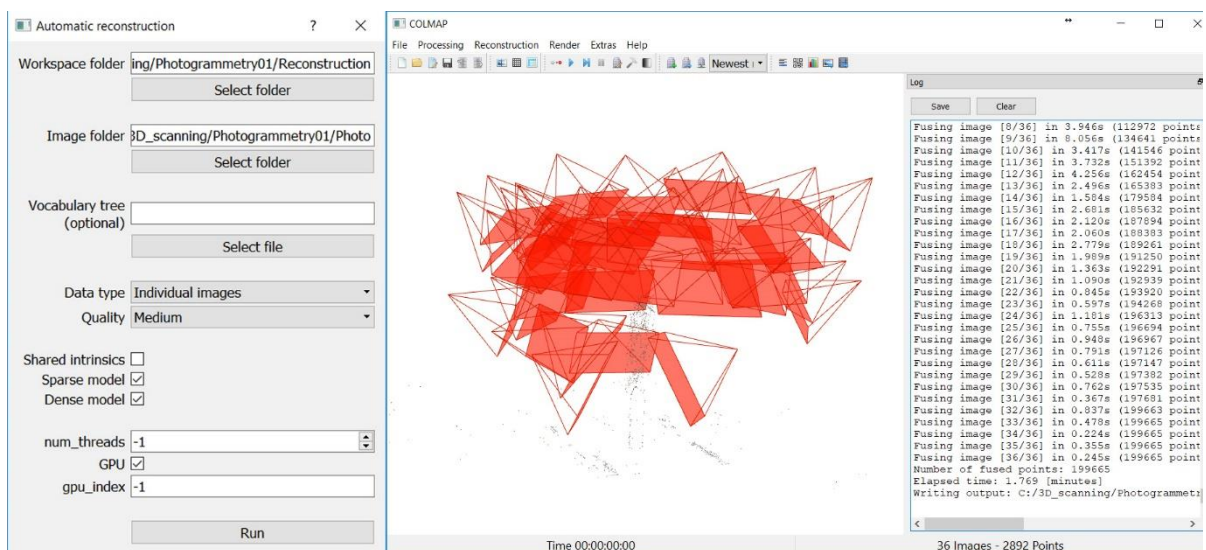
mezi které patří především získání polohy kamery a souřadnic z fotografií. Jeho uživatelské rozhraní je vidět na obrázku 17. [21]



Obrázek 17: Uživatelské rozhraní softwaru Meshroom

Colmap

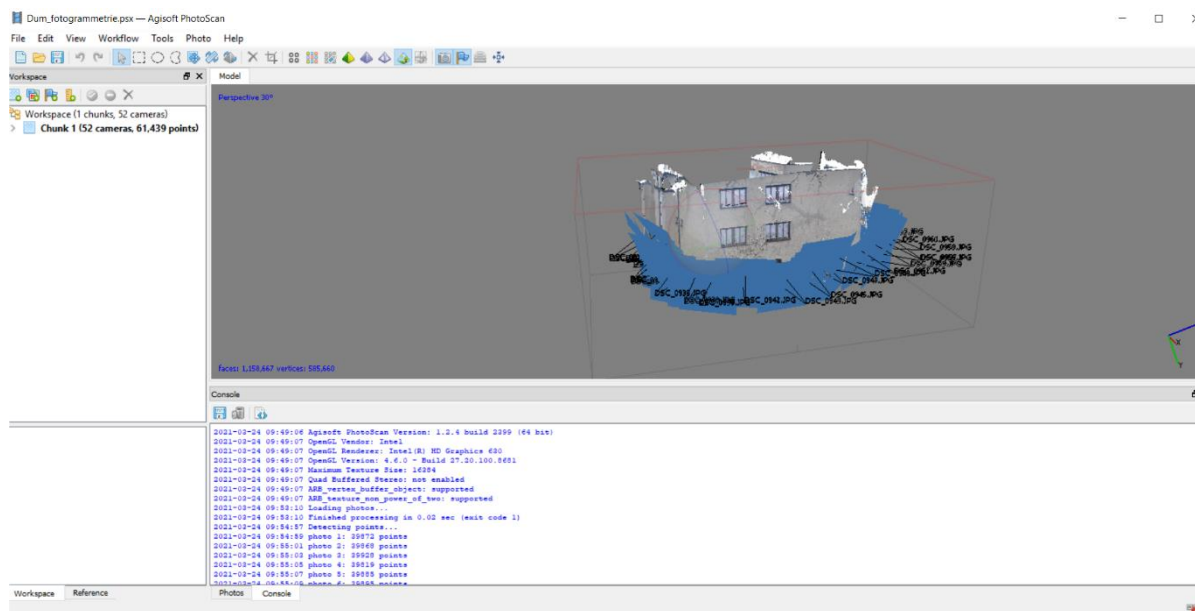
Dalším volně dostupným softwarem je Colmap, který lze použít pro vytvoření modelu z fotografií. Jeho rozhraní je vidět na obrázku 18. Colmap umožňuje pracovat s fotografiemi, které jsou seřazené v pořadí focení objektu, ale také s fotografiemi, které jsou zaznamenány náhodně. Tvorba modelu je rozdělena do tří hlavních částí: detekce a extrakce hlavních charakteristik, spojení těchto charakteristik a geometrické ověření a rekonstrukce obrazu. [22]



Obrázek 18: Uživatelské rozhraní softwaru Colmap, zdroj [23]

Agisoft PhotoScan

Mezi profesionální a placené softwary patří program Agisoft, který je vidět na obrázku 19. Proces zpracování probíhá ve čtyřech fázích: nalezení společných bodů, vytvoření bodového mračna, vytvoření polygonů a následná rekonstrukce modelu. Tento software je mezi profesionály jedním z nejčastěji používaných softwarů. [20]



Obrázek 19: Uživatelské rozhraní softwaru Agisoft

5.7. Výstupy zpracovaných dat

Všechny programy pracují s fotografiemi, na základě kterých rekonstruují 3D model. Během zpracování fotografií dochází k tvorbě jednotlivých výstupů. Prvním výstupem je mračno bodů na povrchu rekonstruovaného objektu. Často je toto mračno doplněno o informaci barvy v daném místě. Vzhledem k překryvu snímků je nalezeno velké množství společných bodů, které následně tvoří model. Počet bodů, ze kterých je výsledný model složen, může být v řádů milionů. To záleží na velikosti a struktuře daného objektu.

Tyto body často slouží k vytvoření dalšího výstupu fotogrammetrie, a tím je TIN model rekonstruovaného objektu. Tento model však často disponuje nedostatky, jelikož se program snaží propojit veškeré nalezené body. Mohou proto vznikat chyby na modelu. Proto je nutné před tvorbou tohoto TIN modelu odstranit body, které nemají být použity pro rekonstrukci.

Dalším výstupem těchto programů je textura modelu. Textura je generována na základě fotek a jsou na ní zaznamenány veškeré detaily povrchu objektu. Často jsou jednotlivé části modelu nahodile rozloženy na textuře a tvoří mozaiku. Na takové textuře nejsou patrné žádné plochy

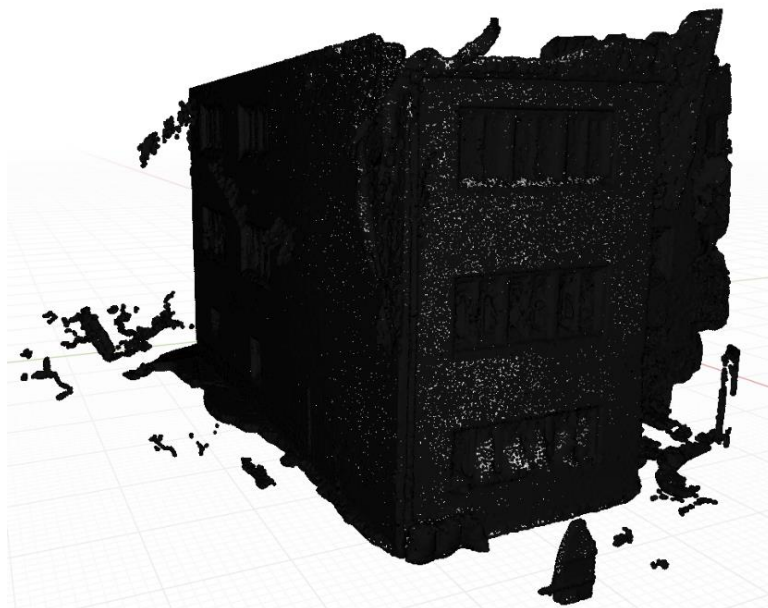
daného objektu. Některé softwary také umožňují tvorbu ortofotomapy ve vysokém rozlišení. Příklad výstupu programu Agisoft je vidět na obrázku 20.



Obrázek 20: Výsledný model vytvořený v programu Agisoft (vlevo) a jeho textura (vpravo)

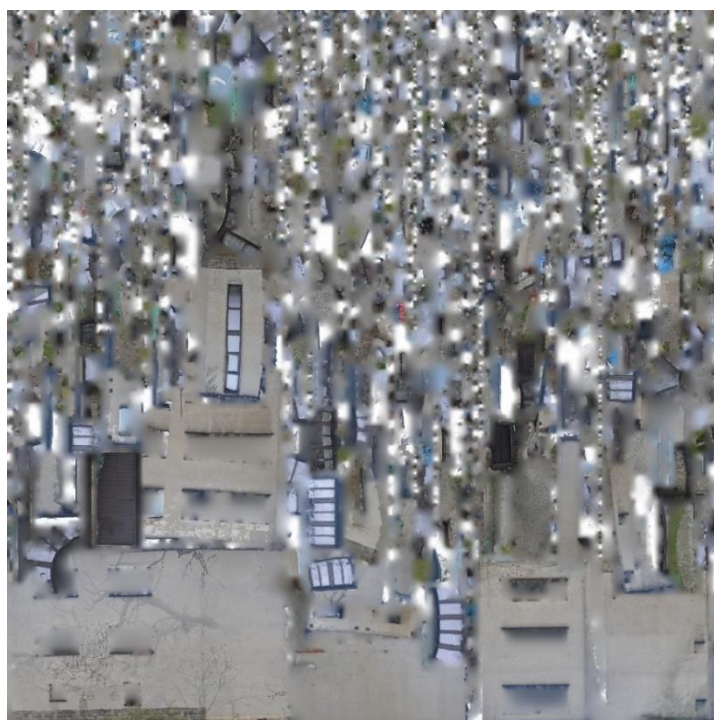
5.8. Problémy modelů při využití v interaktivních simulátorech

Zachycení detailů díky velkému množství bodů je právě nevýhodou těchto modelů při použití v interaktivních simulátorech. Takto složitý model je velmi náročný na výpočetní výkon a pro vizualizaci v reálném čase je tak nepoužitelný. Jelikož se jedná o nonselektivní metodu záznamu, není možné v softwarech nastavit, jaké body je třeba zachovat a jaké body je možné zanedbat při tvorbě modelu. Rekonstruovaný model se všemi body je znázorněn na obrázku 21.



Obrázek 21: Vytvořený model se zobrazenými body

Detailní textura také tvoří problém při použití v simulátorech. Vytváří se tzv. mozaiková textura zachycená na obrázku 22, ve které nejsou patrné žádné ostré hrany a hranice mezi jednotlivými částmi v modelu. Taková mozaiková textura se nedá použít na objekty ve scénářích. Hlavní problém této textury je při oddalování objektu ve scéně. Pokud se objekt oddaluje, snižuje se rozlišení textury. Sousední pixely jsou při oddálení textury spojeny dohromady a mozaiková textura by pak v takovém případě nebyla vykreslena správně.



Obrázek 22: Vytvořená mozaiková textura

6. Metody optimalizace modelů

Jak bylo popsáno výše, jedním z největších problémů modelů vytvořených fotogrammetrií, je velké množství trojúhelníků, ze kterých se skládají. Velký počet trojúhelníků je generován i v jedné rovině, kde by pro vykreslení stačilo pouze malé množství. Čím je objekt složitější, tím náročnější je na výpočetní výkon. Proto je nutné tyto modely zjednodušit. Existují různé metody, které lze na zjednodušení sítě trojúhelníků použít.

6.1. Shlukování bodů

Prvním způsobem je shlukování bodů. Tato metoda spočívá v redukci celkového počtu bodů. Body, které tvoří vrcholy trojúhelníků, jsou rozřazeny do shluků. Každý vzniklý shluk poté představuje nový bod. Rozřazení do shluků probíhá pomocí 3D mřížky. Nad celým modelem je vytvořena pomyslná 3D mřížka, jejíž buňky tvoří hranice jednotlivých shluků. V buňce poté vždy vznikne nový bod, pokud se v něm nachází nějaké vrcholy původních trojúhelníků. [24]

V dalším kroku je nutné spojit nově vytvořené body, které jsou nazývány reprezentativní vrcholy, aby vznikla nová zjednodušená síť trojúhelníků. Hrana je vytvořena vždy v případě, pokud existovala alespoň jedna hrana mezi některými vrcholy, z nichž byl vytvořen reprezentativní vrchol. Máme-li tedy reprezentativní vrchol P, tvořený z původních vrcholů p_0, p_1, \dots, p_m , bude spojen hranou s reprezentativním vrcholem Q, tvořeným z původních vrcholů q_0, q_1, \dots, q_n , pokud existovala alespoň jedna hrana (p_i, q_j) . Tato metoda je znázorněna na obrázku 23. [25]

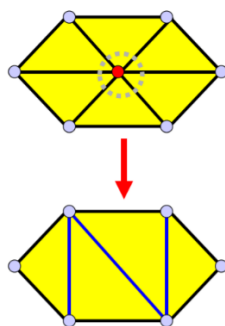


Obrázek 23: Shlukování bodů, původní vrcholy a body: černé, nově vytvořené: zelené, zdroj [24]

6.2. Postupná decimace

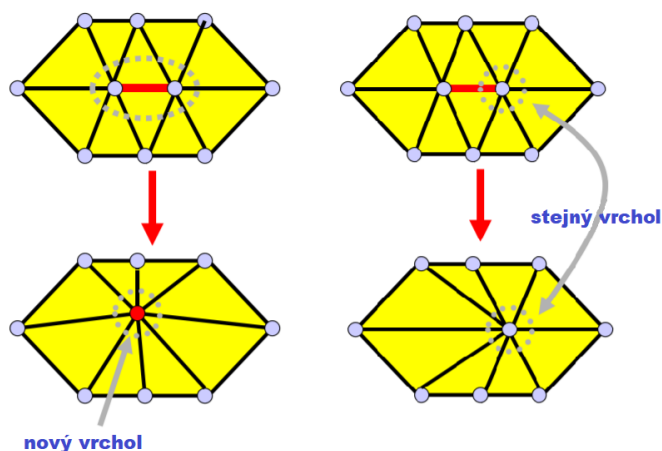
Dalším způsobem optimalizace modelu je postupná decimace. V případě postupné decimace se jedná o inkrementální redukci počtu trojúhelníků. Redukce je docílena odstraněním samotných vrcholů nebo celých hran. V určité oblasti modelu je vybrán vrchol pro odstranění a následně jsou provedeny změny v topologii sítě, aby byla opět tvořena pouze z trojúhelníků. Tento postup je iterativně opakován, dokud jsou k dispozici vrcholy, které je možné odstranit. [24]

Taková redukce bodů je možná dvěma způsoby. Prvním je odstranění jednoho vrcholu. Po odstranění vznikne v síti mezi ostatními s ním původně spojenými vrcholy mnohoúhelník, který je třeba opět rozdělit na trojúhelníky, jak je vidět na obrázku 24. [24]



Obrázek 24: Odstranění vrcholy a následná úprava trojúhelníkové sítě, zdroj [25]

Druhým způsobem je odstranění hrany. V tomto případě jsou dva vrcholy tvořící hranu spojeny dohromady. Vrcholy mohou být spojeny v místě uprostřed původní hrany (edge collapse), nebo může být jeden vrchol přesunut přímo do druhého vrcholu (half-edge collapse). Oba případy se liší, protože s přesunem vrcholu jsou přesunuty i hrany, takže každým způsobem je docílena jiné výsledné topologie sítě, jak je znázorněno na obrázku 25. [24]



Obrázek 25: Edge collapse (vlevo) a half-edge collapse (vpravo), zdroj [25]

PRAKTICKÁ ČÁST

7. Analýza dostupných nástrojů pro optimalizaci modelů

V praktické části bylo řešeno, jakým způsobem může být využita fotogrammetrie při tvorbě scénářů do vozidlových simulátorů. Nejdříve byla provedena analýza dostupných metod pro decimaci (snížení počtu trojúhelníků) modelů a z nich poté byla vybrána optimální metoda pro převod 3D modelů do interaktivních simulátorů. Na základě zkušenosti s výstupy z fotogrammetrie a jejich použitím ve vozidlových simulátorech bylo poté navrženo rozdělení praktické části do dvou dílčích úloh zpracování modelů. V první části bude řešena rekonstrukce jednotlivých objektů (budov apod.). Ve druhé části pak bude provedena rekonstrukce celé oblasti a bude prozkoumáno její následné možné využití.

7.1. Zjednodušení trojúhelníkové sítě

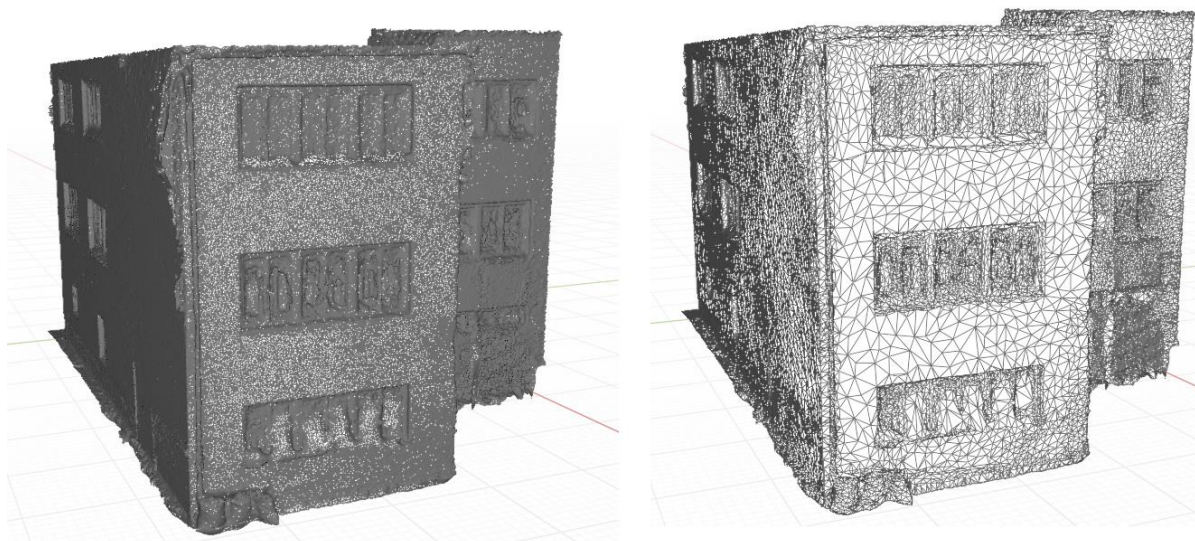
Nejdříve byly prozkoumány dostupné nástroje, které umožňují redukci trojúhelníků na základě metod popsaných v teoretické části. Pro praktickou část byl využit program Agisoft a pro následnou optimalizaci software Blender.

7.1.1. Automatická redukce počtu trojúhelníků

Pro první část diplomové práce byl využit rekonstruovaný model domu, který byl zpracován v programu Agisoft. Rekonstruovaný model byl vytvořen z 67 fotografií. Výstupní 3D model obsahoval celkem 890 728 trojúhelníků.

První způsob optimalizace, který byl v rámci této diplomové práce vyzkoušen, je automatická redukce dat. Při této redukci je možné snížit počet bodů, ale není možné určit, které body mají být zachovány. Optimalizace byla provedena pomocí programu Blender.

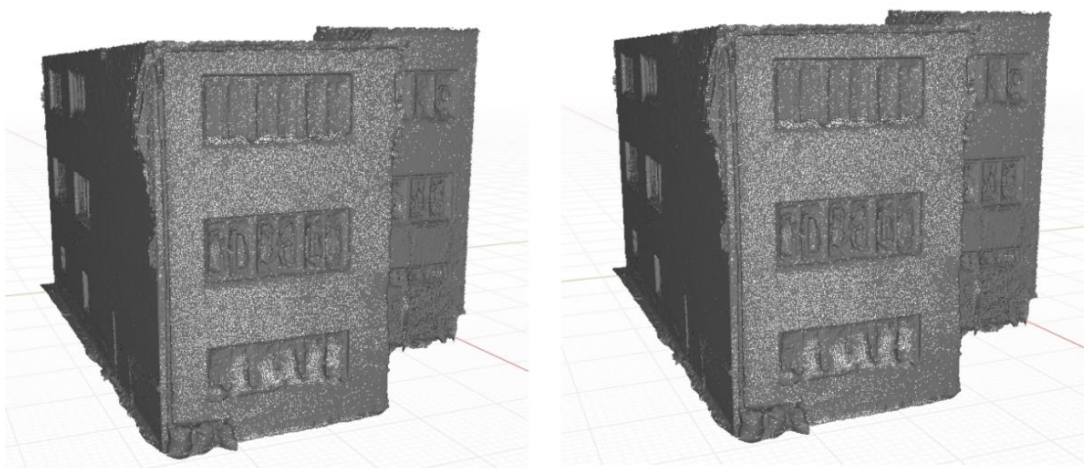
První způsob automatické redukce meshe (trojúhelníková síť tvořící model), který byl použit, je v programu Blender nazýván „Collapse“ a snižuje počet trojúhelníků náhodně. Nastavuje se poměr, v jakém bude počet trojúhelníků ve zjednodušeném modelu oproti původnímu. Dále je také možné nastavit, aby redukce proběhla symetricky podle vybrané osy. V případě 3D modelů používaných ve vozidlových simulátorech není tato varianta příliš vhodná, protože objekty většinou nejsou přesně symetrické a nelze tak vybrat osu, ve které by měla redukce proběhnout. Tento postup byl demonstrován s nastaveným poměrem 1:10, jak je vidět na obrázku 26.



Obrázek 26: Původní model (vlevo) a po redukcí meshe na 10 % z původního počtu (vpravo)

Po provedení úpravy se zredukoval počet trojúhelníků na 89 072. V tomto případě ale není možné zvolit si, které trojúhelníky zůstanou zachované a které ne. Jak je ale vidět na výstupním obrázku, tak metoda v tomto případě redukovala především body ve velkých rovinách, což je požadovaným výsledkem. Problém nastal u ostrých hran objektu. Z důvodu redukování vrcholů byly tyto hrany zaobleny a nově vzniklá síť trojúhelníků už nereprezentovala objekt přesně podle původních hranic. Zároveň také nebylo možné ovlivnit, jaký počet výsledných trojúhelníků bude v dané rovině. Další nevýhodou je vysoká náročnost na výpočetní výkon. V případě rozsáhlé redukce trojúhelníků může výpočet trvat až několik hodin, a navíc docházelo při výpočtu v programu Blender k jeho nestabilitě.

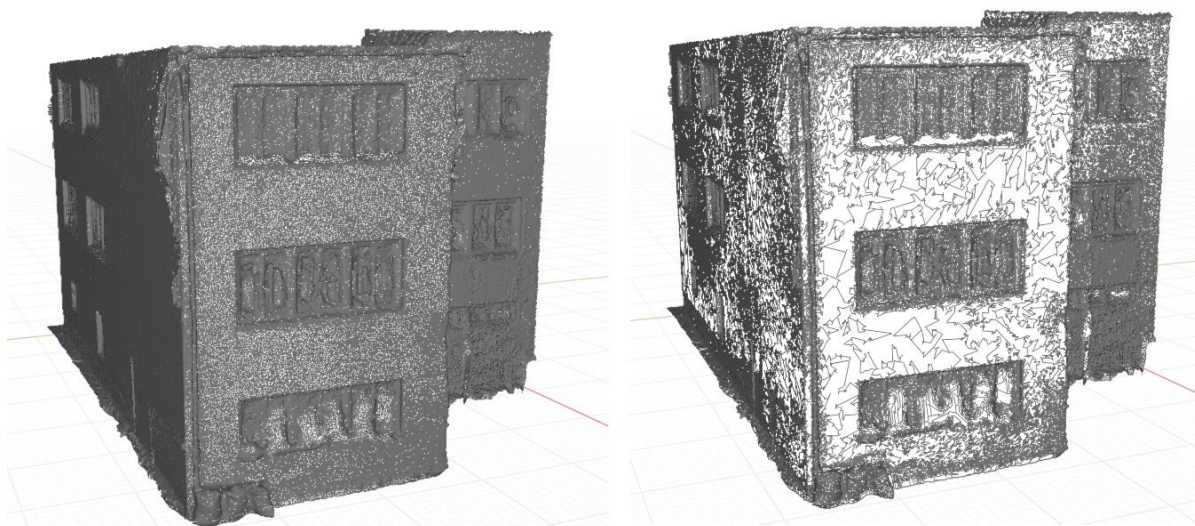
Druhou možností redukce je funkce Blenderu nazývaná „Un-Subdivide“. Tato varianta se snaží odstranit hrany, které se zdají být vytvořeny dělením delších hran. Je to tedy způsob redukce vrcholů odstraněním hran (edge collapse). V tomto případě se nastavuje pouze počet iterací. Funkce byla vyzkoušena s počtem 100 iterací a výsledek je vidět na obrázku 27. [26]



Obrázek 27: Model před (vlevo) a po provedení 100 iterací (vpravo)

V případě nastavení počtu iterací na 100 se původních 890 728 trojúhelníků zredukovalo na 887 476. Celý proces trval několik desítek minut a výsledek je skoro stejný jako původní. Proto byl tento způsob vyloučen jako možnost úpravy modelů do interaktivních simulátorů.

Poslední variantou, která byla vyzkoušena, je funkce Blenderu nazývaná „Planar“. Tento postup se týká spíše rovinných objektů, proto je to v případě 3D objektů nejméně použitelný způsob. Jak je vidět na obrázku 28, tato funkce vytvořila model, který se neskládá z trojúhelníků, ale z různých jiných polygonů.



Obrázek 28: Model před (vlevo) a po úpravě s pomocí funkce "Planar" (vpravo)

Ani jedna varianta neumožňuje vybrat si, které vrcholy se mají zachovat a které je třeba odstranit. Zároveň také toto snižování počtu trojúhelníků je poměrně náročné na výpočetní výkon a v případě velkých zjednodušení je tento postup časově velmi náročný.

7.1.2. Redukce počtu trojúhelníků s možností úpravy

Druhou možností redukce trojúhelníků je taková metoda, kdy je možné provádět určitou úpravu zredukované sítě trojúhelníků. Tato varianta umožňuje upravit hrany, podle kterých se uspořádá síť trojúhelníků nebo je možné nastavit koncový počet vrcholů.

Tento způsob úpravy nabízí například program Instant Meshes, ve kterém bude metoda demonstrována. Tento program umožňuje vložit jakýkoli objekt ve formátu .obj a z toho poté vytvořit stejný objekt skládající se z menšího počtu trojúhelníků. Tato metoda je více „elegantní“ než výše popsané metody, protože nabízí větší variabilitu pro zjednodušení a práci s výslednou sítí. [27]

Nevýhodou této metody je, že nepracuje s texturou. Objekt je importován bez jakékoli textury a pracuje se pouze s tvarem a vrcholy. Není tedy možné na první pohled poznat, jak úprava tvaru ovlivní texturu. Tento fakt je možné později ověřit v programu Blender.

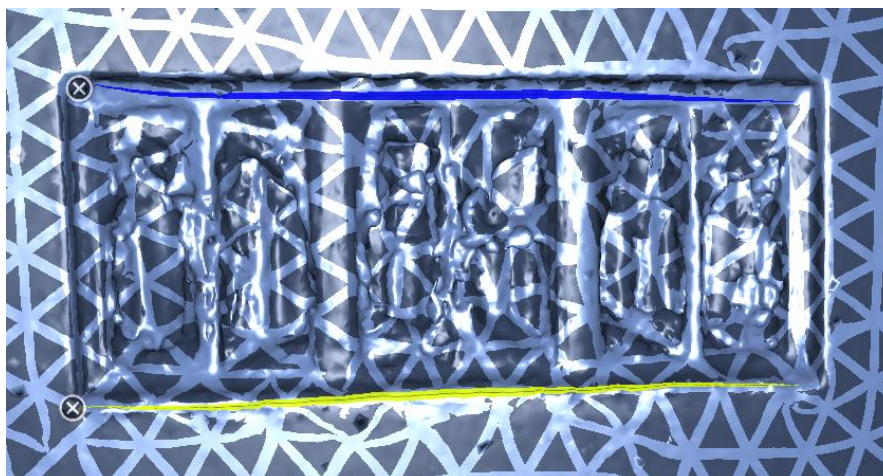
Hlavním nastavitelným parametrem v programu Instant Meshes jsou základní plochy, ze kterých se bude objekt skládat. Dále se dají nastavit detaily konfigurace, jako je například to, zda má výsledná síť trojúhelníků kopírovat hranice objektu. Hlavním nastavitelným parametrem je výsledný počet vrcholů, ze kterých se bude model skládat. Toto nastavení má svá omezení v závislosti na složitosti a povaze objektu.

V prvním kroku je nastaven základní geometrický tvar pro výslednou síť (čtverec nebo trojúhelník) a požadovaný počet výstupních vrcholů. Poté program spočítá orientační pozice trojúhelníků a zobrazí je na modelu, což je vidět na obrázku 29.



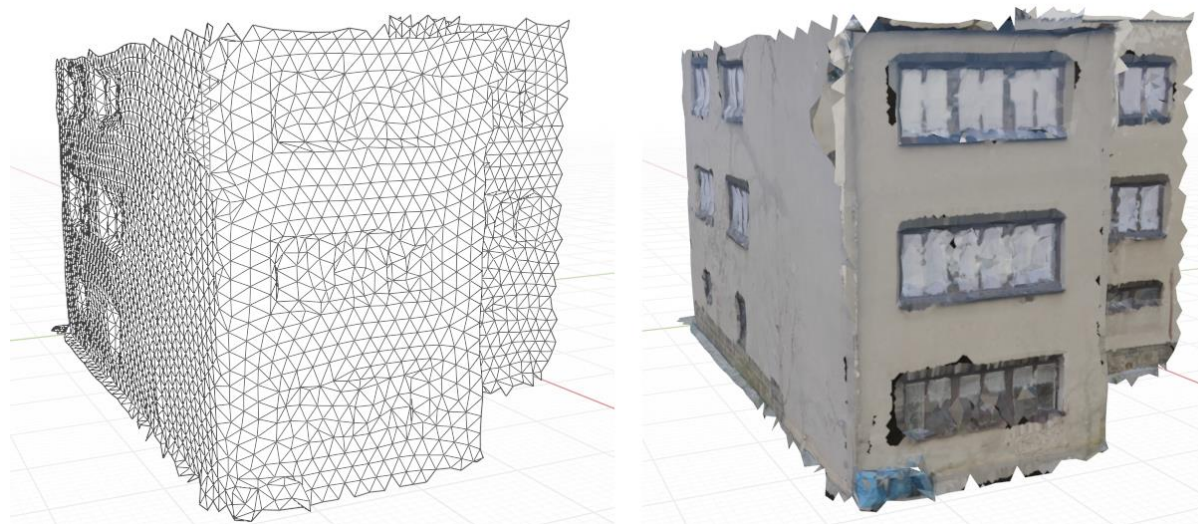
Obrázek 29: Ukázka sítě po nastavení koncového počtu trojúhelníků

S výslednou sítí je možné ještě dále pracovat. Je například možné nakreslit linii na modelu, které se budou trojúhelníky přizpůsobovat. Tento krok je zachycen na obrázku 30. Po takové úpravě je třeba opět přepočítat síť.



Obrázek 30: Ukázka vložení linií, podle kterých se přepočítá síť

Po získání výsledného modelu je potřeba objekt znovu importovat do Blenderu a přidat k němu původní texturu. Textura se snaží kopírovat tvar nového objektu, i když to vždy není úplně přesné právě kvůli zjednodušení. Samozřejmě se dá s texturou dále pracovat a upravit ji. Původní počet trojúhelníků, kterými byl dům tvořen, byl zredukován na 7 392. Celý proces proběhl v řádu minut a jeho výsledek je znázorněn na obrázku 31.



Obrázek 31: Výsledný model po úpravě v Instant Meshes (vlevo) a výsledný model po přidání textury (vpravo)

Nevýhodou takové redukce je, že bez textury není úplně zřetelné, jak bude výsledný model vykreslen. Tato metoda umožňuje další práci s úpravou sítě, jako je nastavení hran, od kterých se bude síť odvíjet, ale z důvodu deformace výsledného mapování textury na objekt je tato metoda nepoužitelná pro simulátory.

Poslední možností, která však není automatická, je vymodelování vlastního objektu dle předlohy (3D modelu) z fotogrammetrie. Tuto metodu sice nelze zautomatizovat, ale pro jednoduché objekty je velmi rychlá. Navíc nabízí přímou kontrolu nad tvorbou trojúhelníků. Vzorový rekonstruovaný dům byl ručně vytvořen během 5 minut. Díky předloženému high poly modelu (model s velký počtem trojúhelníků) z fotogrammetrie je velmi snadné zachytit přesný tvar a rozměry. Tato metoda však vyžaduje další práci s texturou, jak bude dále podrobněji popsáno.

Tato poslední varianta je vhodnou možností pro jednoduché modely. Taková rekonstrukce meshe je velmi rychlá a díky předloze odpovídá tvar a rozměr původnímu složitému objektu. Naopak pro rekonstrukci složitých objektů je vhodnější použít první popsanou automatickou metodu redukce meshe, protože manuální úprava trojúhelníkové sítě by byla časově náročná. Problém tu však zůstává u nemožnosti práce s výslednou sítí. Nelze upravit, jaké vrcholy mají být zachovány nebo jaké hrany mají být optimalizovány.

7.2. Úprava textury

Po aplikování poslední popsané metody zjednodušení sítě trojúhelníků zůstává stále problém s mozaikovou texturou, která je výstupem fotogrammetrie. Mozaiková struktura je ve vozidlových simulátorech nepoužitelná, protože by se při oddalování objektu

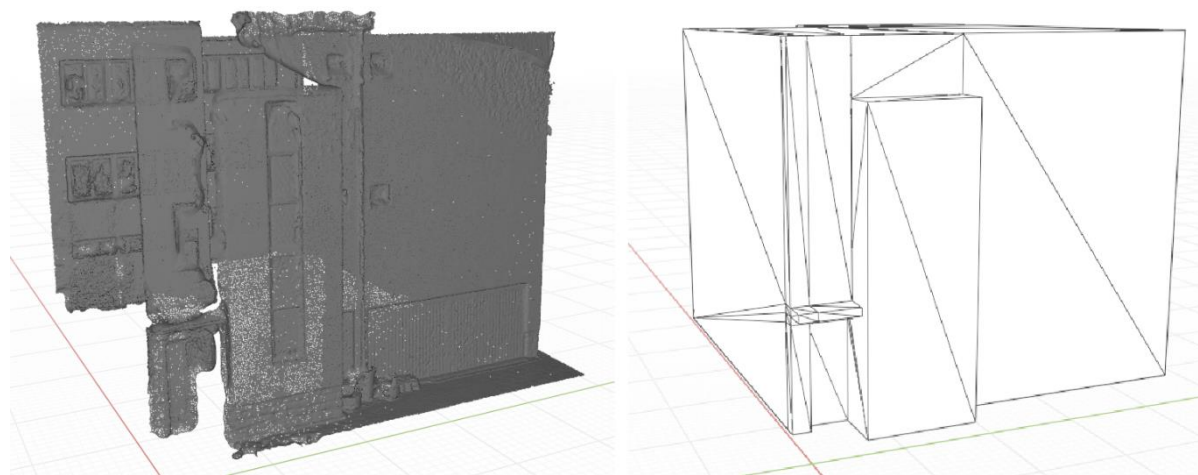
nevykreslovala správně. Tento problém se dá vyřešit přenesením původní textury na nově vymodelovaný zjednodušený model.

7.2.1. Přenesení textury

Texturu je možné přenést z původního modelu na nově vytvořený jednoduchý model, a tím je docíleno vytvoření nové textury, která už není mozaiková, a tu je poté možné využít v interaktivních simulátorech. Zároveň si tato textura zachová veškeré detaily, které obsahovala původní mozaiková struktura.

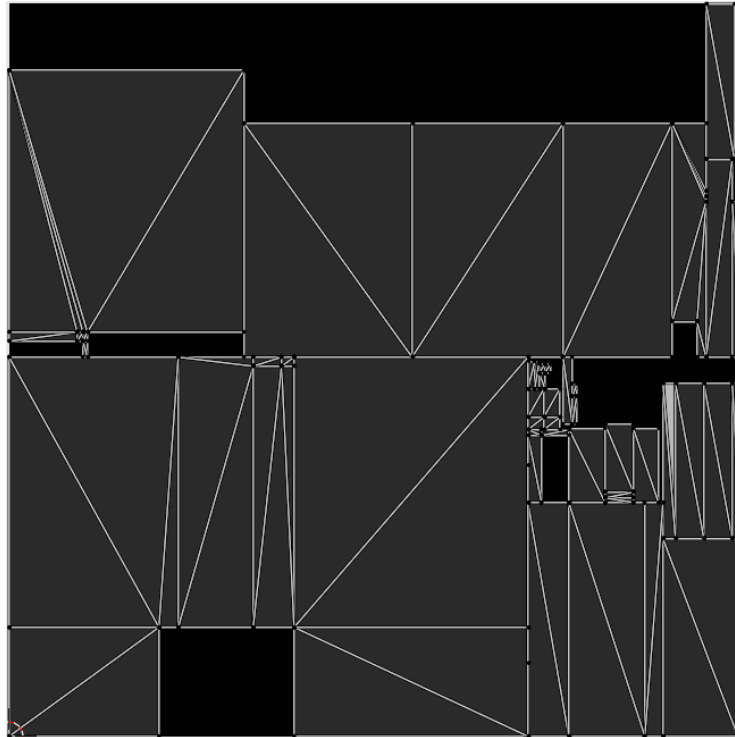
Pro přenesení textury je nejdříve potřeba vytvořit samostatně zjednodušený model původního objektu, na který je poté textura přenesena. Z původní mozaikové textury se tak stane textura, na které jsou patrné jednotlivé hrany a strany objektu.

Původní objekt musí být nahrazen jednoduchým geometrickým tvarem (například dům nahrazen kvádrem). Porovnání původního a nově vymodelovaného modelu je na obrázku 32. Při následujícím přesunu textury je možné, že v některých místech pak textura neodpovídá novému tvaru a je třeba nový model ještě upravit. Nejlepších výsledků je dosaženo, když nový a jednoduchý tvar co nejpřesněji kopíruje původní složitý objekt. Je tedy potřeba provést úpravy ve formě posunutí hran nebo bodů, aby byl výsledek co nejpřesnější.



Obrázek 32: Původní model (vlevo) a nově vytvořený jednoduchý model (vpravo)

Po vytvoření zjednodušeného modelu je možné na něj přenést texturu na základě mozaikové textury s požadovanými vlastnostmi. Před výpočtem nové textury je nutné jednoduchý model „unwrapovat“ (rozbalit). To znamená, že plochy modelu jsou rozvinuty na budoucí texturu tak, že se nepřekrývají. Tento proces unwrapování lze provést manuálně nebo využít automatické funkce programu Blenderu. Touto funkcí je „Smart UV Project“. Na obrázku 33 je znázorněná UV mapa unwrapovaného modelu.



Obrázek 33: Vytvořená UV mapa domu, šedé trojúhelníky tvoří povrch domu

Do připraveného rozvržení textury se následně nechají zapéct barvy z původního high poly modelu (model s velkým množstvím trojúhelníků) s mozaikovou texturou. To umožňuje software Blender pomocí funkce „Bake“. Nejdůležitějším nastavením této funkce je „Max ray distance“. Tento údaj definuje, jak od sebe mohou být vzdálené modely, aby se ještě textura přenesla. Různé hodnoty této funkce jsou znázorněny na obrázku 34.



Obrázek 34: Ukázka různého nastavení "Max ray distance": nízká hodnota (vlevo) a vysoká hodnota (vpravo)

Původní mozaiková textura je pomocí funkce „Bake“ zapečena do UV mapy nově vytvořeného jednoduchého modelu. V přenesené textuře už jsou patrné jednotlivé plochy modelu a jejich hranice a je možné ji využít pro objekty ve vozidlových simulátorech. Zároveň si textura

zachovává své detaily, a tím svůj realistický vzhled. Porovnání mozaikové textury a nové zapečené je vidět na obrázku 35.



Obrázek 35: Porovnání textur, původní (vlevo) a přenesená (vpravo)

7.2.2. Úprava textury

Přenesená textura nemusí vždy odpovídat přesně novému objektu. Kvalitnějších výsledků textury je možné docílit úpravou geometrie objektu nebo úpravou samotné textury.

Software Blender nabízí několik nástrojů pro úpravu textury. K úpravě je možné využít základních nástrojů pro kreslení, kdy je výsledné textury docíleno ručními opravami. Kreslení je prováděno pomocí digitálního štětce s nastavitelnou velikostí a palety barev. Tento způsob opravy je vhodný pro jednobarevné a jednoduché textury. V případě složitějších textur by byl časově velmi náročný, protože je nutné provést úpravy do detailu, aby nebyl narušen celkový dojem z textury.

Vhodnějším řešením je úprava textury pomocí fotografií. Nástroje Blenderu umožňují kreslit na texturu pomocí vložených obrázků. Tento postup umožňuje dosažení reálnějšího vzhledu textur, protože je do textury promítnut skutečný vzhled objektu z fotografie. V tomto případě stačí pouze správně nastavit polohu modelu objektu, jehož textura je upravována, vůči fotografii. Fotografie musí být přes model položena tak, aby se překrývaly stejné oblasti na fotografii a na modelu. Poté je možné promítnout libovolnou část fotografie do textury modelu. Takto upravená textura je ukázána na obrázku 36.



Obrázek 36: Přenesená textura (vlevo) a textura po úpravě (vpravo)

Proces úpravy textury je časově náročný. Vyžaduje to pečlivou práci, aby bylo docíleno reálného vzhledu textury. Textura může být upravována až několik hodin v závislosti na množství chyb, které nastaly při rekonstrukci modelu během fotogrammetrie. Výsledek této metody je vidět na obrázku 37.

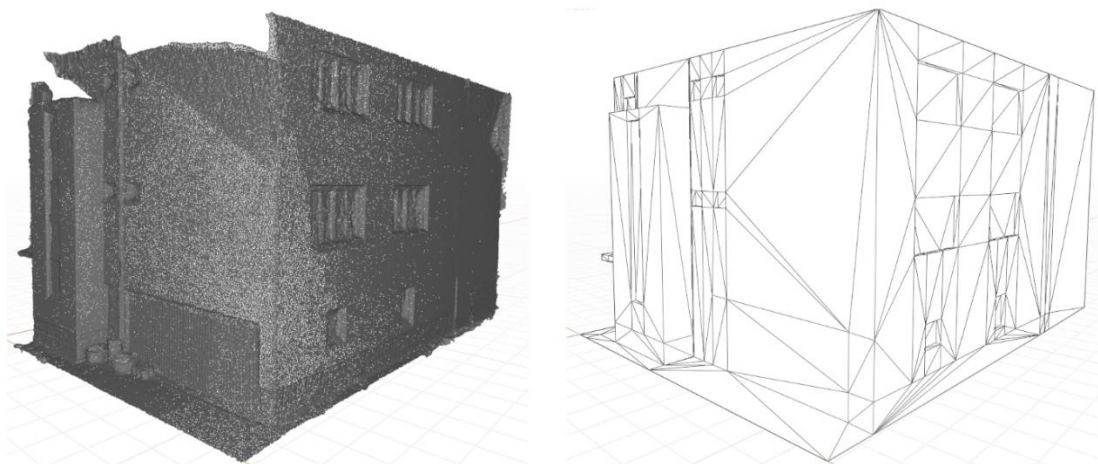


Obrázek 37: Výstupní model ze softwaru Agisoft (vlevo) a výsledný upravený model (vpravo)

Vytvoření jednoduchého modelu a přenesení textury trvá v řádu minut. Potřebný čas se odvíjí od složitosti objektu. V tomto případě bylo jednoduchého modelu domu dosaženo během několika minut. Z původních 890 728 trojúhelníků byl model upraven na 126. Celý způsob optimalizace modelu je sice časově náročný z důvodu úpravy textury, ale přináší kvalitnější výsledky ze všech zkoumaných metod. Výsledný model je dostatečně zjednodušený a zároveň umožňuje využít výhody 3D modelů zrekonstruovaných pomocí fotogrammetrie. Touto výhodou je především vytvořená textura, která odpovídá povrchům objektů v reálném světě. Proto byl tento postup využit dále v diplomové práci pro optimalizaci modelů.

8. Převod jednotlivých 3D modelů

Nejdříve byl zvolený postup aplikován na samostatný objekt. V tomto případě byl zvolen stejný model domu, na kterém byla metoda v minulé kapitole demonstrována. V tomto případě byl ale výsledný model zpracován podrobněji. Zvlášť byla vymodelována i okna a dveře pro reálnější celkový vzhled, jak je vidět na obrázku 38.



Obrázek 38: Původní model (vlevo) a upravený zjednodušený model (vpravo)

Původní objekt se skládal z 890 728 trojúhelníků. Zjednodušením bylo docíleno celkového počtu 604 trojúhelníků. Z původní mozaikové textury byla po úpravách získána textura domu s pevně danými plochami, kde jsou zároveň vidět všechny detaily, jako je například popraskaná omítka. Výsledky optimalizace jsou znázorněné na obrázku 39.

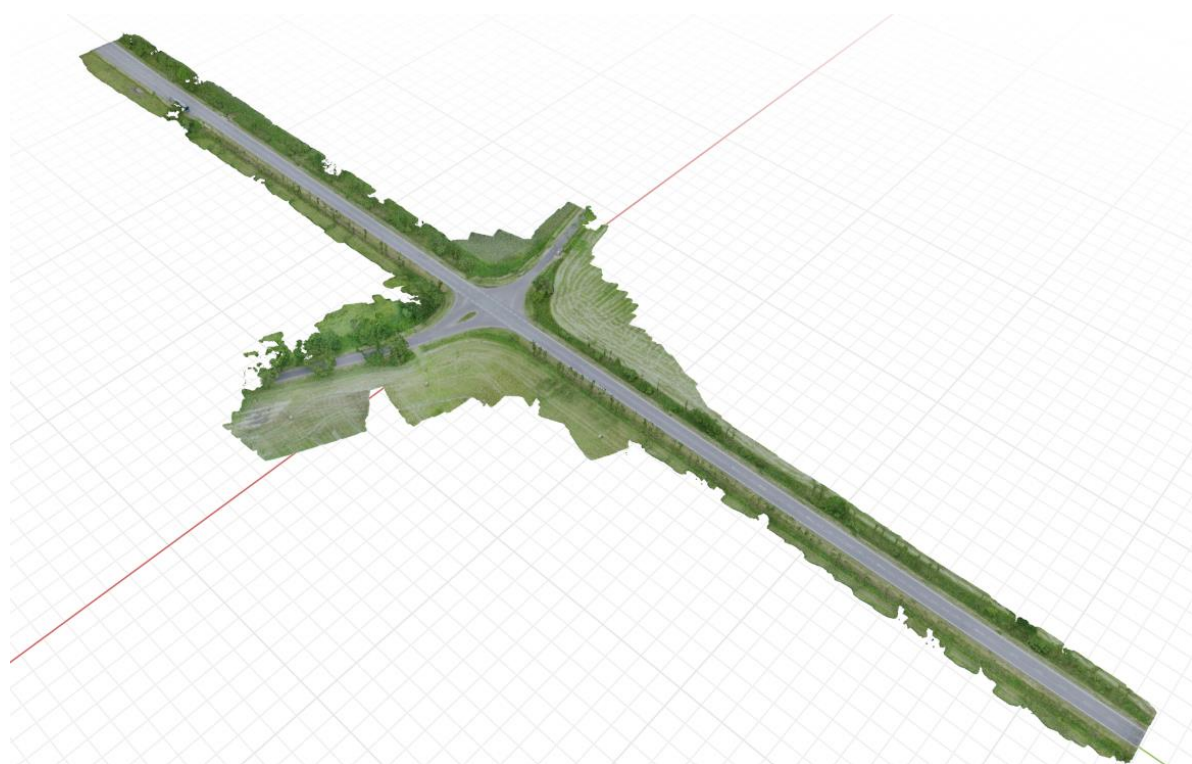


Obrázek 39: Výstupní model ze softwaru Agisoft (vlevo) a zjednodušený model s upravenou texturou (vpravo)

Model byl dostatečně zjednodušen pro použití ve vozidlových interaktivních simulátorech a zároveň zůstaly zachovány detaily textury. V tomto případě byla úprava textury časově velmi náročná z důvodu úprav perspektivy fotografií a rozsáhlých úprav nesprávně zrekonstruovaných míst původního modelu. Vytvoření samotného modelu zabralo několik minut, následná úprava textury pak trvala několik hodin.

9. Převod terénu

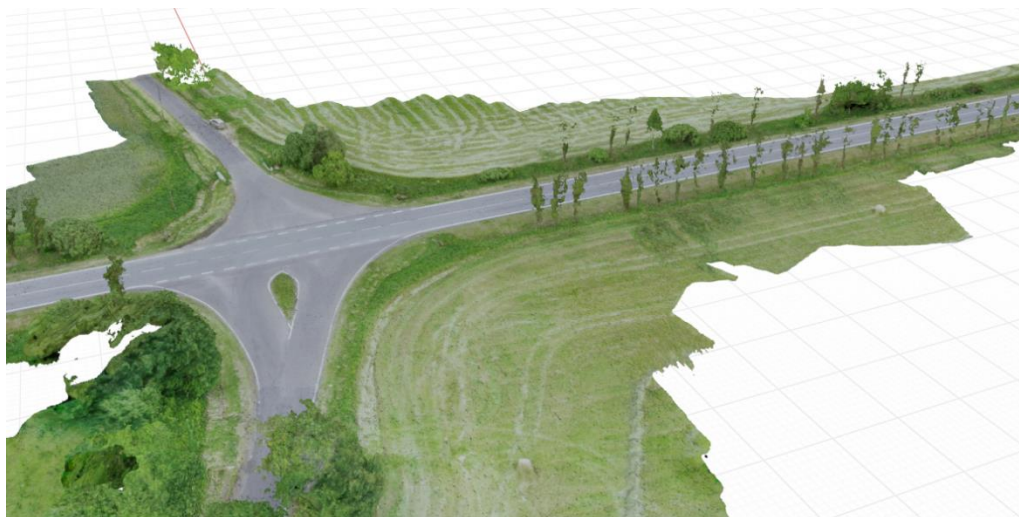
Druhá část diplomové práce se zabývala možným využitím zrekonstruované silniční sítě s terénem. Pro tuto část byla vybrána oblast křižovatky jižně od Toužimi, jejíž model byl poskytnut Ph. D. Zdeňkem Svatým a je vidět na obrázku 40. Model zachycuje samotnou křižovatku, její severní a jižní rameno a skládá se z celkového počtu 20 947 145 trojúhelníků, což je velikost, kterou nelze aplikovat pro vozidlové simulátory. Převod terénu byl v této diplomové práci rozdělen do dvou částí. V první části byla zrekonstruována celá oblast a ve druhé byl převeden pouze model křižovatky pro použití při tvorbě scénáře pomocí uzlových bodů.



Obrázek 40: Poskytnutý model křižovatky vytvořený v softwaru Agisoft

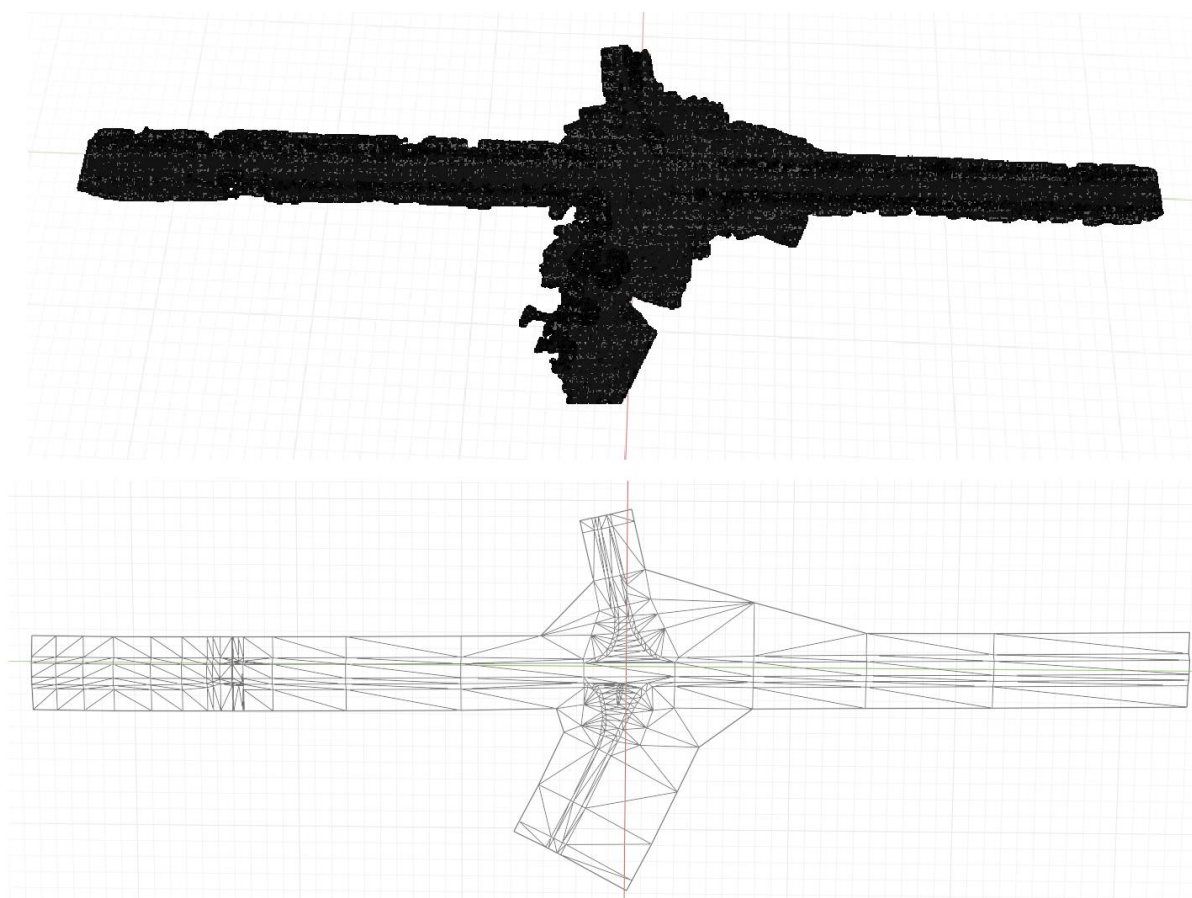
9.1. Převod celé oblasti

Nejdříve byl vytvořen jednoduchý model celé oblasti pomocí křivek tak, aby kopíroval tvar původního modelu. Problém při tvorbě působila okolní vegetace. Podél silnice jsou vysázeny stromy a nachází se zde i několik keřů. Přírodní objekty nelze zrekonstruovat pomocí fotogrammetrie ideálně z důvodu jejich složité členitosti, jak je vidět na obrázku 41, a proto je nutné je při optimalizaci modelu vynechat a dotvořit je později v samotném enginu.



Obrázek 41: Detail křižovatky s nepřesně zachycenými stromy

Nově vytvořený jednoduchý model se skládal z 594 trojúhelníků a je znázorněn na obrázku 42 v porovnání s původním modelem. Poté byla na zjednodušený model přenesena textura. Textura byla opět přenesena pomocí vytvořeného UV rozložení jednoduchého modelu a s využitím funkce „Bake“, která texturu zapekla.



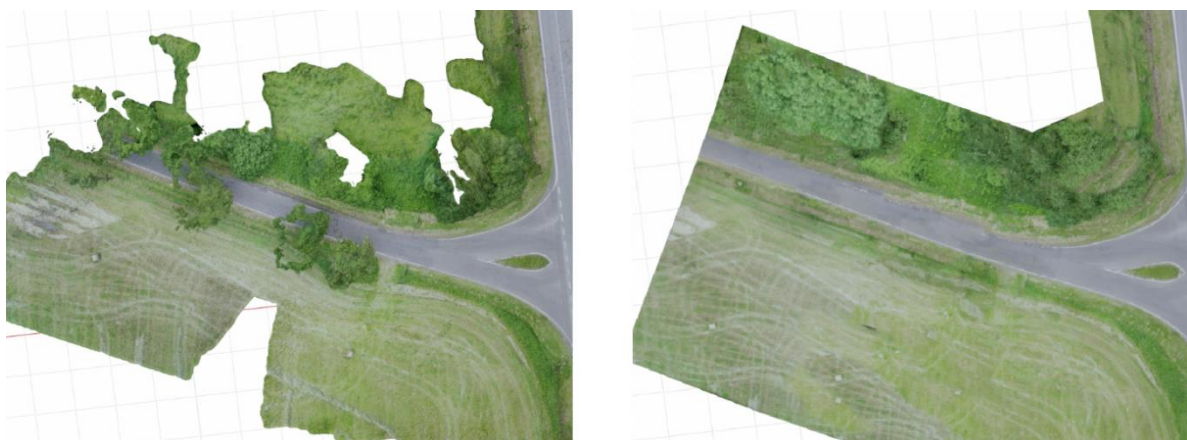
Obrázek 42: Síť trojúhelníků původního modelu (nahore) a zjednodušeného (dole)

Po přenesení textury bylo potřeba provést některé úpravy, aby byly vykresleny veškeré detaily původního modelu. K úpravě textury bylo použito ortofoto, které bylo vytvořeno v rámci pořizování fotografií pro vytvoření modelu. Díky této ortofoto textuře bylo možné dokreslit některé části, které se nesprávně promítly do nové textury. Výsledná textura je vidět na obrázku 43.



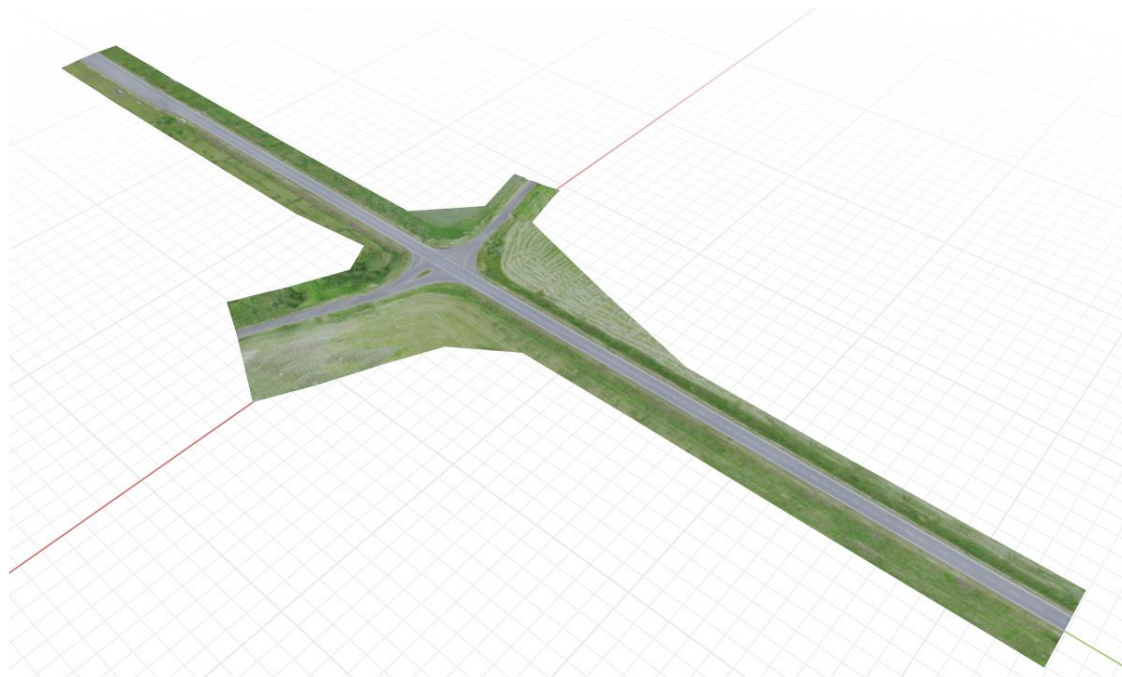
Obrázek 43: Původní mozaiková textura (vlevo) a přenesená upravená textura (vpravo)

Zvláštní pozornost bylo nutné věnovat místům, kde v původním modelu byly stromy. V tomto případě bylo potřeba novou texturu opravit v místě kmene a bylo nutné toto místo nahradit například trávou. Zároveň musela tato část hladce navazovat na okolní prostor. Problém byl hlavně v místech vozovky, která byla zakryta korunou stromů. Takové prostory nebylo možné upravit ani s pomocí ortofota, protože i na tomto snímku bylo místo zakryto stromem. Taková místa bylo nutné upravit pomocí kopírování viditelné části silnice, jak je vidět na obrázku 44. Zároveň ale musel být brán zřetel na odstín asfaltu a na krajnice. Výsledný povrch musel působit jako jeden celek.



Obrázek 44: Původní model se stromy (vlevo) a nový model s opravenou texturou (vpravo)

Celkový počet trojúhelníků byl touto metodou zredukován na 594 trojúhelníků. Jedná se o výraznou redukci a zároveň byl zachován celkový vzhled oblasti i s detaily. Vytvoření jednoduchého modelu zabralo několik desítek minut, následná úprava textury pak probíhala zhruba 1 hodinu. Výsledek této metody je znázorněn na obrázku 45.



Obrázek 45: Výsledný jednoduchý model s opravenou texturou

Jedním z nedostatků tohoto postupu byla oprava míst, ve kterých byla vozovka zakryta stromy nebo jinou vegetací. Zároveň byl pozorován problém při přenosu textury. Po přiblížení byla pozorována nedostatečná vizuální kvalita textury, jak je vidět na obrázku 46.



Obrázek 46: Detail vozovky upraveného modelu

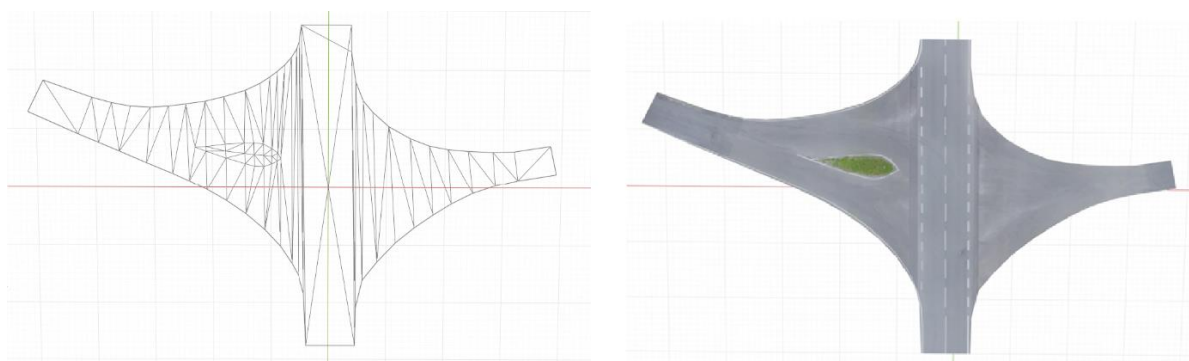
Hlavním problémem i po úspěšné rekonstrukci takového modelu je pak jeho použitelnost ve scénářích. Jelikož dochází k rekonstrukci jen určitých úseků nebo malých oblastí, tak není možné na těchto modelech provádět experimenty. Jízda by na těchto modelech trvala jen

v řádu několika sekund. Avšak takové modely dávají smysl při výuce v autoškolách, kdy je hlavním cílem výuka chování nových řidičů v oblastech křižovatky.

9.2. Využití uzlových bodů oblasti

Pro větší variabilitu použití modelů z fotogrammetrie v simulátorech bylo zkoumáno zjednodušení pouze částí původního modelu. Snahou bylo vyjmout silniční prvky z modelu a aplikovat je při tvorbě scénářů do vozidlových simulátorů prostřednictvím metody uzlových prvků, která byla popsána v kapitole používaných metod tvorby scénářů. Z původního modelu části komunikace u Toužimi byla nyní vybrána pouze křižovatka samotná bez okolní vegetace a navazující komunikace.

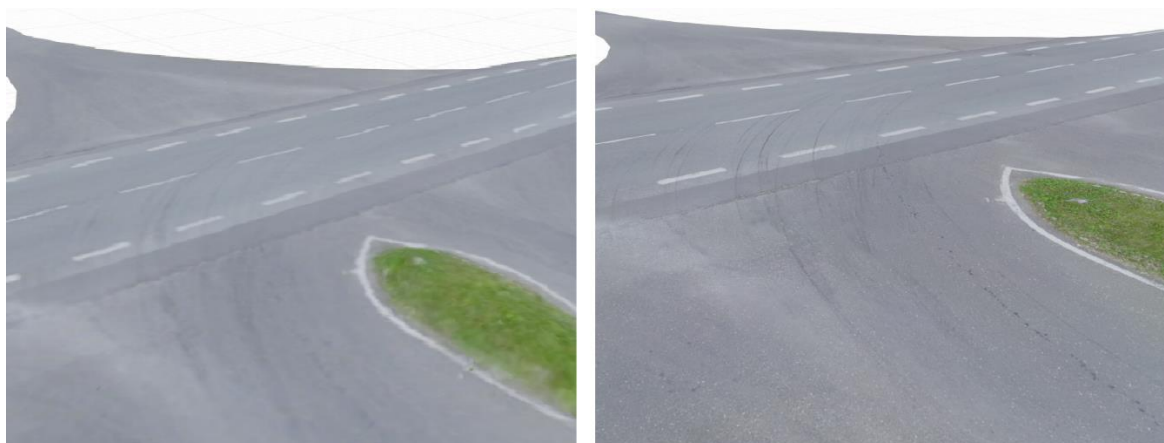
Křižovatka byla vytvořena stejným způsobem jako minulý model. Pomocí křivek byl vytvořen zjednodušený model, na který byla přenesena textura. Výsledek je vidět na obrázku 47. I v tomto případě byly pozorovány určité nedostatky ve vizuální kvalitě textury. Pro tuto část práce byla Ph. D. Zdeňkem Svatým poskytnuta fotografie samostatné křižovatky v maximálním rozlišení, která byla použita pro úpravu textury a zlepšení její vizuální kvality.



Obrázek 47: Vytvořená křižovatka reprezentovaná trojúhelníky (vlevo) a s upravenou texturou (vpravo)

Nově vytvořená křižovatka se skládá ze 102 trojúhelníků. Jednotlivá ramena křižovatky mají přesně danou šířku, aby bylo možné je dále využít při tvorbě scénáře do simulátorů. Vytvoření samostatné křižovatky včetně úpravy textury zabralo podstatně méně času než optimalizace modelu celé oblasti. Celý proces tvorby křižovatky trval několik desítek minut.

Díky poskytnuté fotografii ve vysokém rozlišení bylo také docíleno vysoké vizuální kvality křižovatky i po přiblížení. Nová textura dosahovala požadovaných 100 px/m. Na povrchu vozovky je ostře zobrazeno veškeré vodorovné dopravní značení a také jsou viditelné stopy po pneumatikách, jak je vidět na obrázku 48.



Obrázek 48: Porovnání detailu textury: původní po přenesení (vlevo) a upravená pomocí fotografie (vpravo)

Takový způsob optimalizace objektu nabízí větší variabilitu pro využití v simulátorech. Takto může být vytvořeno z fotografií několik různých typických křižovatek na základě reálných podkladů. Veškeré křižovatky následně mohou být implementovány do databáze metody uzlových prvků. Následná tvorba scénáře by probíhala propojování křižovatek.

10. Zhodnocení metody optimalizace modelů

V této diplomové práci byly úspěšně optimalizovány 3D modely z vícesnímkové fotogrammetrie pro použití ve vozidlových simulátorech. Na základě analýzy dostupných optimalizačních metod bylo zjištěno, že nejrychlejší metodou je metoda přenesení textury z high poly modelu (model s velkým počtem trojúhelníků) na low poly model (model s nízkým počtem trojúhelníků). V tomto případě bylo nutné požadovaný objekt nejdříve ručně vytvořit tak, aby svými hranicemi co nejvíce kopíroval původní objekt vytvořený fotogrammetrií. Díky UV mapování pak bylo možné přenést z původního složitějšího modelu mozaikovou texturu na zjednodušený model, čímž bylo docíleno nové textury, která odpovídá hranicím jednoduchého modelu. Vytvořený model s novou texturou splňuje požadavky na složitost a realističnost pro použití ve vozidlových simulátorech.

10.1. Nedostatky metody

Hlavním problémem této optimalizace je náročná úprava textury modelů vytvořených pomocí fotogrammetrie. Výsledná textura záleží na podmínkách, za jakých byly pořizovány fotografie pro rekonstrukci modelu a na způsobu jejich pořízení. Objekty, které jsou vloženy do scény ve vozidlových simulátorech jsou často venkovní objekty, a proto je získání jejich fotografií závislé na meteorologických podmínkách. Snímky je nutné pořídit za správného světla, aby byl objekt dostatečně a hlavně rovnoměrně osvětlen a aby na něm nebyly žádné stíny. Proto je nejlepší fotografovat objekt při zatažené obloze.

Dalším problémem je okolní terén objektu. Ideálním případem pro fotografování by byl objekt, který se nachází uprostřed otevřeného prostoru a nabízí tak dostatečný prostor pro zachycení objektu ze všech stran. Ve většině případů se ale kolem objektu nachází různé překážky v podobě stromů, plotů, pouličních lamp apod. Tyto překážky jsou pak zachyceny na fotografiích a při rekonstrukci modelu jsou nesprávně promítnuty do textury nebo v těchto místech textura naopak úplně chybí. V případě pořizování snímků vysokých objektů ze země pak nejsou zachyceny správně vyšší části objektu nebo je v těchto místech textura zkreslená.

Tyto nedostatky je nutné po přenesení textury ručně opravit. Takový proces může trvat až několik hodin v závislosti na množství nedostatků původní textury.

10.2. Výhody metody

Celý proces optimalizace modelu je v tomto případě sice časově náročný a závislý na podmínkách pořízení fotografií, ale přináší realistické modely z reálného prostředí. Upravené textury získané z modelů vytvořených fotogrammetrií zachycují veškeré detaily povrchu objektu. Jsou na nich zaznamenány i veškeré nedostatky objektu, což přispívá reálnějšímu vzhledu daného modelu.

Povrchy objektu už nejsou dokonale hladké, jednolité a sterilní. V případě modelu domu byly na texturu přeneseny nedostatky povrchu domu v podobě poškozené omítky a v případě křižovatky jsou na textuře patrné stopy po pneumatikách.

11. Metoda tvorby scénáře s využitím fotogrammetrie

V rámci této diplomové práce byl vytvořen nový postup tvorby scénáře do vozidlových simulátorů. Základem této metody je využití optimalizovaných modelů uzlových prvků oblasti (křižovatky apod.). Výsledná scéna byla vytvořena s využitím nástrojů softwaru Unity, který se využívá pro tvorbu scénářů do vozidlových simulátorů na Fakultě dopravní.

Prvním krokem metody bylo vytvoření digitálního modelu terénu na základě reálných dat. Nejdříve byla vytvořena tzv. height mapa (výšková mapa), která definuje základní výškové vlastnosti terénu. Taková data je možné získat například v online prohlížeči výškových dat Tangram Heightmapper. Terén je zde definován dle odstínu šedi, kdy bílá místa značí nejvyšší body v oblasti a tmavá naopak nejnižší. Se znalostí rozdílů těchto bodů, které jsou poskytnuty na stránkách, lze geometricky vygenerovat přesný 3D model terénu. [28]

Pro dodání optických vlastností byla použita ortofotomapa získaná ze satelitních snímků. Ortofotomapu z požadované oblasti lze například získat pomocí webových stránek Google Map Customizer. Nevýhodou této ortofotomapy je její nedostatečné rozlišení, které se pohybuje okolo 10 px/m. Model s ortofotomapou je zobrazen na obrázku 49. [29]

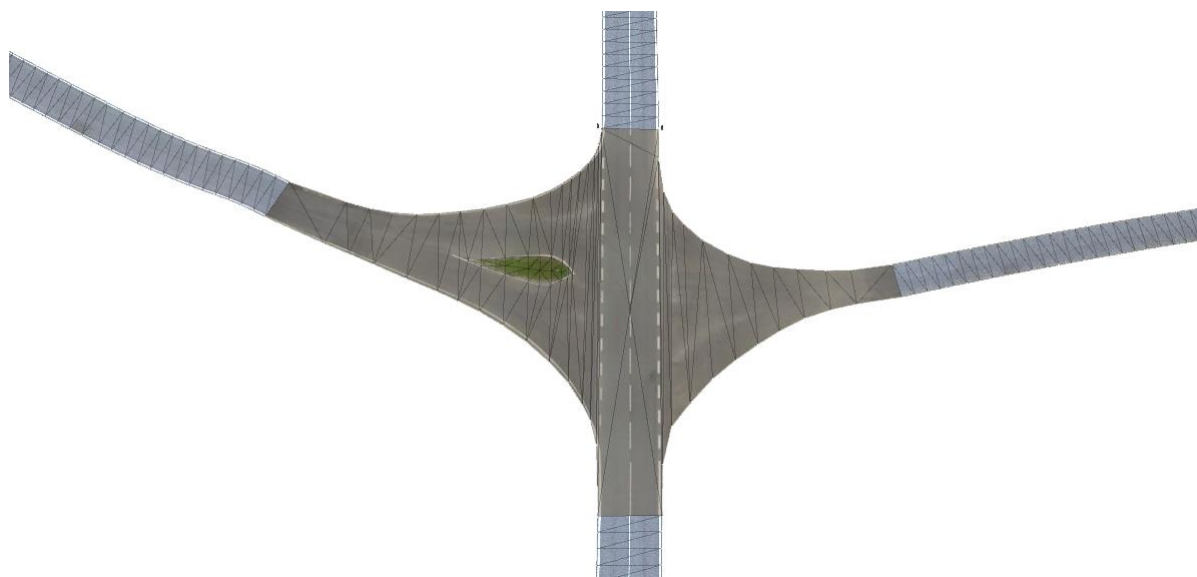


Obrázek 49: Podkladový terén

V dalším kroku byla využita metoda uzlových prvků, kdy byl do databáze nahrán model křižovatky získaný z fotogrammetrie. V tomto případě se jedná o model čtyřramenné křižovatky. Model byl nastaven tak, že výstupní ramena disponují přesnou šířkou komunikace (severní a jižní rameno má pevně definovanou šířku 8,5 m, západní rameno 6 m a východní 5 m). Model byl aplikován do vytvořeného terénu a definované výstupy byly vytaženy na základě podkladové mapy tak, aby vytvořily silniční síť, jak je vidět na obrázku 50. Samostatná silniční síť je zobrazena na obrázku 51.



Obrázek 50: Terén s vloženým modelem křižovatky



Obrázek 51: Model křižovatky s „vytaženými“ rameny

V této fázi byla ve scéně vytvořena silniční síť ve vysokém rozlišení. Problém tvořil okolní terén, který stále nebyl v dostatečné kvalitě. Blízké okolí silnice tak muselo být opraveno texturou, která má požadované rozlišení (100 px/m), jak je vidět na obrázku 52. Na obrázku 53 je znázorněn rozdíl rozlišení původní ortofotomapy a nově nanesené textury. Textura byla vybírána s ohledem na vlastnosti terénu, aby co nejvíce odpovídala podkladové ortofotomapě.



Obrázek 52: Textura trávy nanesená na blízké okolí komunikace



Obrázek 53: Ukázka rozdílného rozlišení původního terénu (vlevo) a nově nanesené textury (vpravo)

Následně byly opravovány vzdálenější oblasti, na které byly aplikovány bezešvé textury různých trav či polí podle podkladového ortofota, jak je vidět na obrázku 54. Nárok na vysoké rozlišení textur je kladen do vzdálenosti cca 50 m od komunikace. Pro vzdálenější oblasti je již dostačující ortofotomapa s rozlišením 10 px/m. Tyto oblasti jsou od probanda v dostatečné velké vzdálenosti, a proto není nutné je vizualizovat ve vysokém rozlišení.



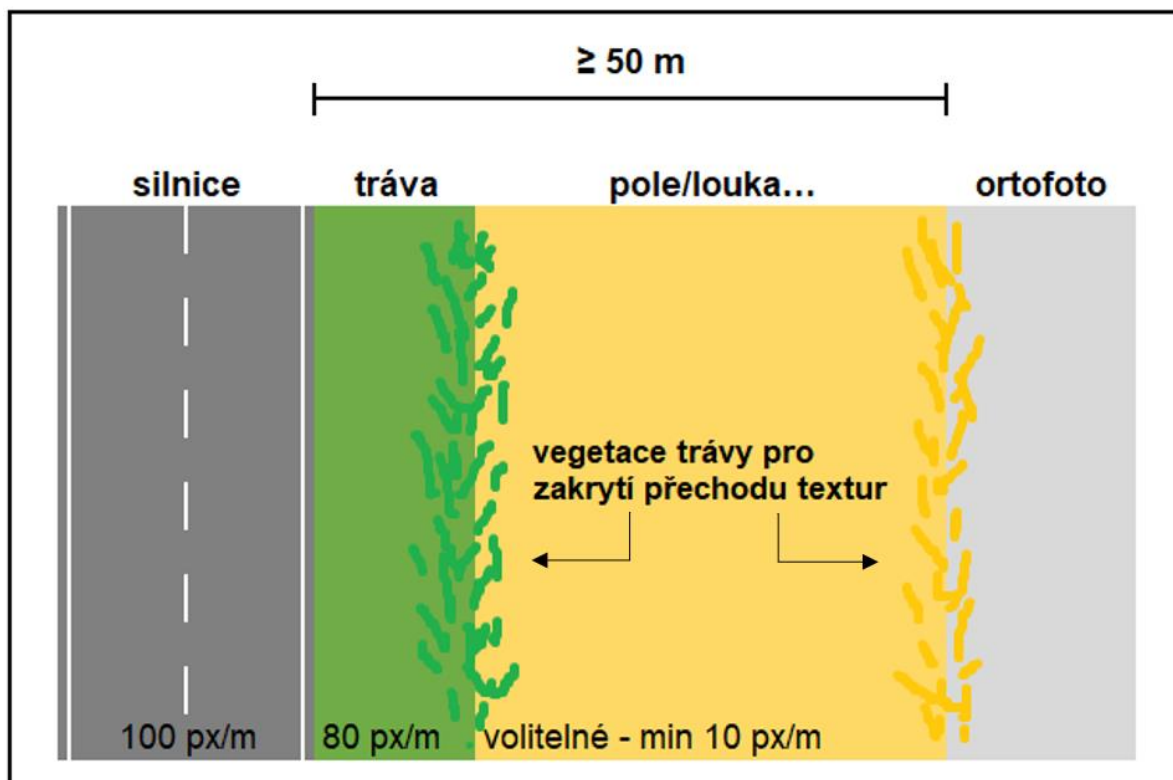
Obrázek 54: Upravená textura ve vzdálenějším okolí komunikace

Jako poslední byla do scény vkládána vegetace. Byly používány dva základní druhy vegetace. Prvním jsou trávy, které byly aplikovány na hranice dvou různých textur. S jejich pomocí bylo docíleno plynulejšího přechodu mezi těmito texturami. Druhým typem byly okolní keře a stromy. Ty byly vkládány tak, aby co nejvíce korespondovaly se skutečným stavem oblasti. Vytvořená scéna s vegetací je zachycena na obrázku 55.



Obrázek 55: Křižovatka po vložení vegetace

Na obrázku 56 je znázorněné schéma použití textur podél komunikace a jejich požadovaného rozlišení. Jsou v něm také naznačena místa aplikování vegetace pro zakrytí přechodů.



Obrázek 56: Schéma rozložení textur podél komunikace a jejich požadované rozlišení

11.1. Ověření vizuální kvality

Pro ověření vizuální kvality výsledného scénáře měl být proveden experiment se skupinou probandů, kteří by poté vyplnili dotazník týkající se dojmů z virtuálního prostředí. Z důvodu aktuálních koronavirových opatření však nebylo možné takový experiment provést.

Pro ověření byl tedy vytvořený scénář předložen odborníkům z Fakulty dopravní, ČVUT v Praze, kteří následně posoudili, zda scénář dosáhl zvýšení vizuální kvality a zároveň zda poskytuje vyšší iluzi skutečného světa.

Scénář byl konzultován s panem Janem Válkem, DiS., který se v oblasti tvorby scénářů pohybuje přes 15 let. Na Fakultě dopravní byl u vývoje všech používaných metod. Proto s ním byl konzultován scénář vytvořený v rámci této práce. Pan Válek na výsledek reagoval kladně a potvrdil výrazné zvýšení vizuální kvality scény. Porovnání vytvořené scény se skutečným stavem oblasti je zachyceno na obrázku 57.



Obrázek 57: Porovnání skutečné fotografie oblasti (nahore) a vytvořené scény v simulátoru (dole), zdroj [30]

3. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nalezení nové metody tvorby scénářů do vozidlových simulátorů s využitím vícesnímkové fotogrammetrie. Snahou bylo zvýšit vizuální kvalitu scénářů pomocí modelů, které by byly získány na základě reálných dat. Výsledkem tohoto přístupu je zvýšení iluze skutečného světa při simulacích a docílení realističtějšího vnímání probandů virtuálního prostředí. V takovém případě jejich chování více odpovídá chování v reálném provozu, a tím je docíleno objektivnějších výsledků experimentů.

Teoretická část práce se nejdříve zabývala základními pojmy počítačové grafiky a 3D modelování, aby bylo možné následně tvořit a editovat modely, které jsou používány ve vozidlových simulátorech. Poté byla prostudována oblast vozidlových simulátorů, zejména pak oblast požadavků na tvorbu scén. Vytvořená scéna musí splňovat základní požadavky z hlediska složitosti a realističnosti, aby bylo možné provést na simulátoru experimenty nebo výcviky řidičů. Všechny objekty musí být exportovány v TIN reprezentaci a nesmí být složeny z příliš velkého počtu trojúhelníků. Zároveň musí obsahovat detaily, které zvyšují vizuální kvalitu simulací.

Následně byla prostudována vícesnímková fotogrammetrie a její možnost využití ve vozidlových simulátorech. Proto byly popsány principy vícesnímkové fotogrammetrie, způsoby získávání dat a výstupy softwarů pro fotogrammetrii.

Výstupní 3D modely získané pomocí fotogrammetrie se skládají z velkého počtu trojúhelníků a není možné jejich přímé použití ve vozidlových simulátorech. Druhým problémem těchto výstupů je jejich mozaiková textura. Na těchto texturách nejsou patrné hranice a plochy objektu a taková textura by byla nesprávně vykreslena v simulátorech.

Poslední teoretická oblast se proto týkala metod optimalizace modelů a textur. Byly zde popsány základní metody pro zjednodušení trojúhelníkové sítě, které byly poté v rámci této práce otestovány, a následně byly také popsány metody pro rekonstrukci textur.

V praktické části byla nejdříve provedena analýza dostupných metod decimace (zjednodušení trojúhelníkové sítě) modelů se zaměřením na možné použití výsledných modelů ve vozidlových simulátorech. Byly prozkoumány tři základní metody zjednodušování sítě trojúhelníků.

Nejdříve byla vyzkoušena metoda automatické redukce počtu trojúhelníků. Tato metoda pomohla zredukovat počet trojúhelníků, ale nenabízela dostatečnou variabilitu při decimaci. Při této metodě není možné určit, které vrcholy mají být zachovány a které ne.

Proto byla následně vyzkoušena druhá metoda redukce, která nabízela úpravy zredukované sítě trojúhelníků. Tato metoda nabízela větší variabilitu při optimalizaci modelu, ale během optimalizace nepřepočítává nové UV souřadnice pro aplikaci textury. Z toho důvodu byl výsledný model po aplikaci textury chybně vykreslen.

Následně byla vyzkoušena metoda přenosu textury. V tomto případě musel být nejdříve vymodelován jednoduchý objekt, který reprezentoval původní složitý model z fotogrammetrie. Během následného přenosu textury byla vytvořena nová textura na základě UV souřadnic nového jednoduchého modelu. Díky tomu bylo možné z původní mozaikové textury získat texturu použitelnou pro interaktivní simulace. Následně byly vyžadovány úpravy textury, do které byly promítnuty nedostatky zrekonstruovaného modelu. K úpravám bylo využito získaných fotografií rekonstruovaného objektu. Tato metoda jako jediná umožňovala zredukování počtu trojúhelníků a tvorbu textury pro možnou aplikaci ve vozidlových simulátorech.

Dále byla praktická část rozdělena na dvě dílčí kapitoly optimalizace modelu z fotogrammetrie. Nejdříve byla provedena optimalizace samostatného 3D objektu. Pro tuto část byl využit model domu získaný pomocí fotogrammetrie, který se v surovém stavu skládal z 890 728 trojúhelníků. Po aplikaci metody byla síť zredukována a výsledný model se skládal z 604 trojúhelníků. Výhodou tohoto modelu je především fotorealistická textura, která napomáhá realističnosti scény.

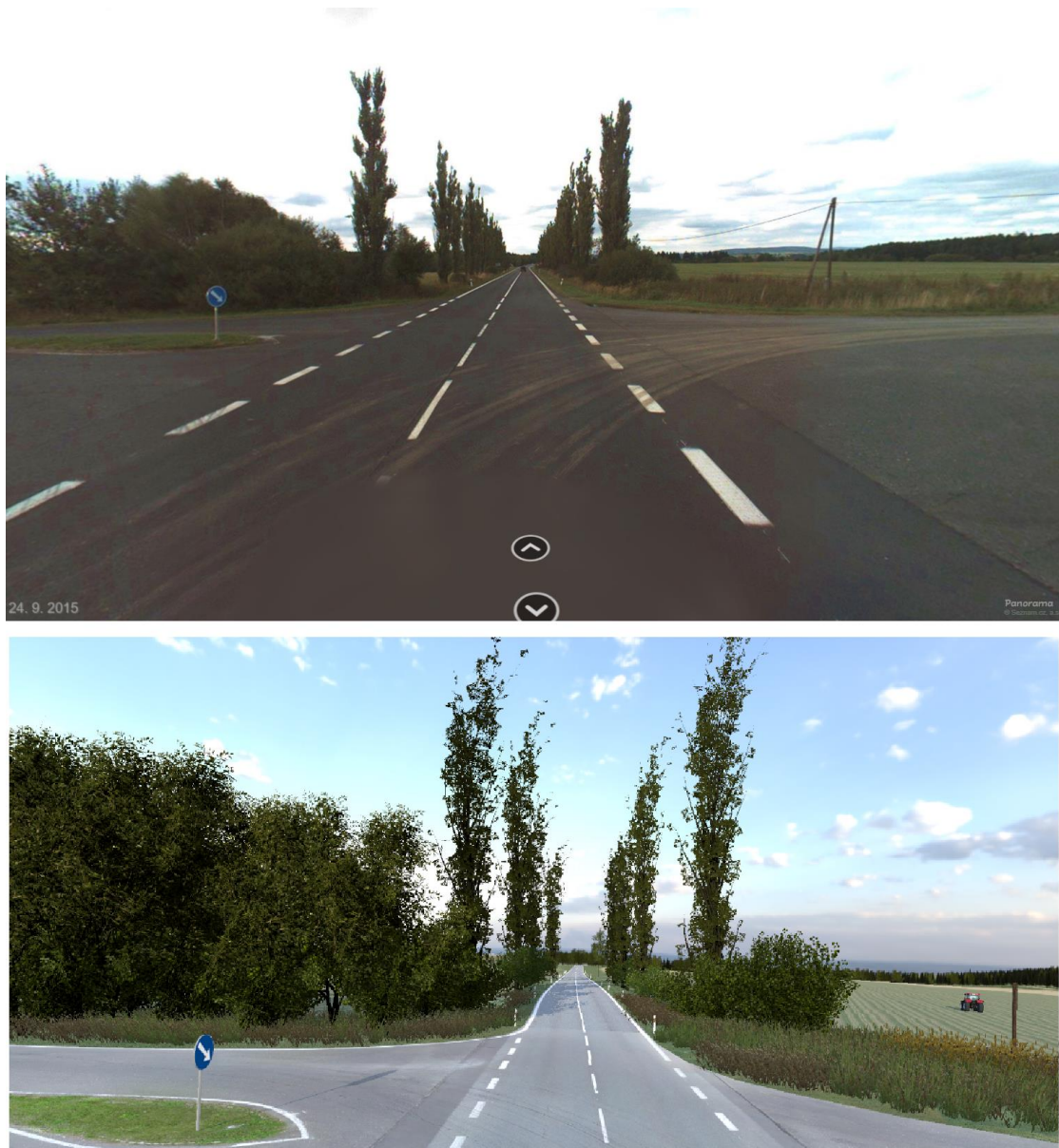
Ve druhé části byl optimalizován model oblasti křižovatky s přilehlými rameny. Nejdříve byla zredukována celá oblast včetně silnice a okolního terénu. Z původního počtu 20 947 145 trojúhelníků bylo získáno 594. Nevýhodou rekonstrukce celé oblasti bylo její následné omezené využití. Oblast pokrývá pouze část komunikace, kterou není možné navázat na další oblasti pro získání rozsáhlého scénáře. Taková rekonstrukce je vhodná pouze pro nácvik chování řidičů na křižovatkách.

Proto bylo z modelu celé oblasti dále využito pouze modelu samostatné křižovatky bez okolního terénu. Tento model se skládal ze 102 trojúhelníků a byly u něj definovány rozměry výstupních větví komunikace. Následně byla popsána metoda tvorby scénářů využívající uzlových prvků, která využívá fotogrammetrického modelu a slouží k tvorbě scén, které jsou založeny na reálném podkladu ze skutečného světa.

Tato metoda spočívá ve využití metody uzlových prvků, kdy byl jako uzlový prvek importován právě model křižovatky. V prvním kroku je vytvářen samostatný terén dané oblasti. Tvorba terénu spočívá v generování geometrického tvaru terénu na základě height mapy a následného texturování pomocí satelitní ortofotomapy. Ve druhém kroku je dotvořena silniční

síť, která je tvořena právě pomocí rekonstruovaného modelu z fotogrammetrie. Následuje část, ve které je zkvalitněno rozlišení terénu v blízkosti silniční sítě pomocí bezešvých textur. V posledním kroku je dotvořena vegetace na základě snímků pořízených z oblasti nebo ortofotomapy.

Výhodou této nové metody je snadná tvorba fotorealistických scén na základě podkladů ze skutečného světa. Díky modelům z fotogrammetrie obsahuje silniční síť veškeré grafické nedostatky, se kterými se řidiči setkávají v reálném provozu. Jedná se například o stopy pneumatik v oblasti křižovatek nebo opravované úseky asfaltu. Výsledná scéna je zobrazena na obrázku 58 v porovnání se skutečným stavem oblasti.



Obrázek 58: Skutečný stav oblasti (nahore) a vytvořená scéna (dole), zdroj [30]

Vyvinutá metoda přispívá ke zvýšení realističnosti scén a díky tomu i k objektivnějšímu chování řidičů během experimentů. Díky modelům z fotogrammetrie je odstraněna sterilita virtuálního prostředí, která je považována za jeden z největších nedostatků současných scén ve vozidlových simulátorech. Na Fakultě dopravní se již v tomto roce chystá vytvoření scén pomocí této nové metody.

12. Použité zdroje

- [1] ŽÁRA, Jiří. *Moderní počítačová grafika. 2.*, přeprac. a rozš. vyd. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0454-0.
- [2] BARBEITO, Antonio. *Three-dimensional anatomical atlas of the human body* [online]. 2016, April [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Modeling-the-real-world-with-vector-and-raster-models_fig1_316879160
- [3] DJINEVSKI, Leonid, Sonja STOJANOVA a Dimitar TRAJANOV. *Optimizing Durkins Propagation Model Based on TIN Terrain Structures* [online]. 2014, Januar [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Terrain-representation-using-DEM-data-left-and-TIN-data-right_fig1_256742190
- [4] Bc. ORLICKÝ, Adam. *Automatická tvorba silniční infrastruktury ve 3D pro vozidlové simulátory*. Praha, 2016. Diplomová. ČVUT, Fakulta dopravní. Vedoucí práce Doc. Ing. Stanislav Novotný, Ph.D.
- [5] AutoCAD. *Autodesk.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/autocad/overview?term=1-YEAR>
- [6] Rhinoceros. *Rhino3d.com* [online]. ©1993-2021 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/features/>
- [7] Blender. *Blender.org* [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.blender.org/>
- [8] Ing. NOVOTNÝ, Ph.D., Stanislav. *Interaktivní simulátory dopravních prostředků pro analýzu spolehlivosti interakce řidiče s vozidlem* [online]. In: . Praha [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2014-30-Novotny.pdf>
- [9] LABORATOŘ INTERAKTIVNÍCH VOZIDLOVÝCH SIMULÁTORŮ. *Fd.cvut.cz* [online]. [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/o-fakulte/laborator/41>
- [10] SIMULÁTOR. *Dekra.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-4-1]. Dostupné z: <https://dekra.cz/vzdelavani-a-certifikace-personalu/simulator/>
- [11] Ing. ORLICKÝ, Adam. *HMI v dopravě*. Praha.
- [12] SHAHRIZAL SUNAR, Mohd a Muhamad NAJIB BIN ZAMRI. *Advances in Computer Graphics and Virtual Environment Vol. 2.* [online]. 2008, Januar [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Traditional-Level-Of-Detail_fig19_280722116

- [13] Free Seamless Textures. *Wildtextures.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.wildtextures.com/category/options/seamless/>
- [14] Sky Box - Sunny Day. *Opengameart.org* [online]. [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://opengameart.org/content/sky-box-sunny-day>
- [15] Ing. ORLICKÝ, Adam. *Vozidlové simulátory*. Praha.
- [16] RoadCreator. *K616.fd.cvut.cz* [online]. [cit. 2021-3-7]. Dostupné z: <https://k616.fd.cvut.cz/full/roadcreator/>
- [17] PUDOVÁ, Klára. *Tvorba počítačových 3D modelů segmentů komunikací pro vozidlové simulátory*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta dopravní. Vedoucí práce Doc. Ing. Stanislav Novotný, Ph.D., Ing. Adam Orlický.
- [18] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [19] HODAČ, Jindřich. *Pozemní fotogrammetrie*. Ústí nad Labem: Centrum pro dokumentaci a digitalizaci kulturního dědictví, Filozofická fakulta Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2011. Acta Universitatis Purkynianae Facultatis philosophicae. ISBN 978-80-7414-343-4.
- [20] Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4 [online]. 2008 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- [21] Meshroom Manual. *Meshroom-manual.readthedocs.io* [online]. ©2021 [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/>
- [22] Tutorial. *Colmap.github.io* [online]. ©2021 [cit. 2021-1-7]. Dostupné z: <https://colmap.github.io/tutorial.html>
- [23] ZUZA, Mikoláš. Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. *Josefprusa.cz* [online]. 23. 03. 2018 [cit. 2021-12-7]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [24] *Mesh Simplification* [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: http://graphics.stanford.edu/courses/cs468-10-fall/LectureSlides/08_Simplification.pdf
- [25] *Mesh Simplification Mesh Simplification* [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://pages.mtu.edu/~shene/COURSES/cs3621/SLIDES/Simplification.pdf>

[26] Blender 2.92 Reference Manual. *Docs.blender.org* [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/decimate.html>

[27] JACOB, Wenzel, Marco TARINI, Danielle PANOZZO a Olga SORKINE-HORNUNG. *Instant Field-Aligned Meshes*. Asia: In ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH), 2015.

[28] *Tangram Heightmapper* [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://tangrams.github.io/heightmapper/>

[29] *Google Map Customizer* [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: http://www.chengfolio.com/google_map_customizer

[30] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>

13. Seznam obrázků

Obrázek 1: Reprezentace objektu ve vektorové podobě (vlevo) a v rastrové podobě (vpravo) zdroj [2].....	11
Obrázek 2: Terén zobrazen v TIN reprezentaci, zdroj [3]	11
Obrázek 3: 3D model (vlevo) a jeho UV mapa (vpravo)	13
Obrázek 4: Uživatelské rozhraní softwaru AutoCAD	14
Obrázek 5: Uživatelské rozhraní softwaru Rhinoceros6	14
Obrázek 6: Uživatelské rozhraní softwaru Blender.....	15
Obrázek 7: Interaktivní simulátor na Fakultě dopravní, ČVUT v Praze, zdroj [9]	16
Obrázek 8: Reprezentace objektu ve 4 úrovních LOD, zdroj [12].....	20
Obrázek 9: Bezešvá textura: samostatný obrázek kamenné zdi (vlevo) a složená textura (vpravo), zdroj [13].....	21
Obrázek 10: Samostatný skybox (vlevo) a aplikovaný skybox ve scéně (vpravo), zdroj [14]	22
Obrázek 11: Vedení osy komunikace v RoadCreator for Rhino, zdroj [16]	23
Obrázek 12: Příklad vytvořeného scénáře pomocí blokového skládání, zdroj [17]	23
Obrázek 13: Zobrazení ideálním objektivem, zdroj [19].....	28
Obrázek 14: Zobrazení reálným objektivem, zdroj [19]	28
Obrázek 15: Prvky vnitřní orientace, zdroj [19].....	29
Obrázek 16: Pozice fotoaparátu při fotografování různých objektů, zdroj [20]	32
Obrázek 17: Uživatelské rozhraní softwaru Meshroom	34
Obrázek 18: Uživatelské rozhraní softwaru Colmap, zdroj [23]	34
Obrázek 19: Uživatelské rozhraní softwaru Agisoft	35
Obrázek 20: Výsledný model vytvořený v programu Agisoft (vlevo) a jeho textura (vpravo)	36
Obrázek 21: Vytvořený model se zobrazenými body	37
Obrázek 22: Vytvořená mozaiková textura.....	37
Obrázek 23: Shlukování bodů, původní vrcholy a body: černé, nově vytvořené: zelené, zdroj [24].....	38
Obrázek 24: Odstranění vrcholy a následná úprava trojúhelníkové sítě, zdroj [25]	39
Obrázek 25: Edge collapse (vlevo) a half-edge collapse (vpravo), zdroj [25]	39
Obrázek 26: Původní model (vlevo) a po redukci meshe na 10 % z původního počtu (vpravo)	41
Obrázek 27: Model před (vlevo) a po provedení 100 iterací (vpravo).....	42
Obrázek 28: Model před (vlevo) a po úpravě s pomocí funkce "Planar" (vpravo).....	42
Obrázek 29: Ukázka sítě po nastavení koncového počtu trojúhelníků.....	44
Obrázek 30: Ukázka vložení linií, podle kterých se přepočítá síť.....	44

Obrázek 31: Výsledný model po úpravě v Instant Meshes (vlevo) a výsledný model po přidání textury (vpravo).....	45
Obrázek 32: Původní model (vlevo) a nově vytvořený jednoduchý model (vpravo).....	46
Obrázek 33: Vytvořená UV mapa domu, šedé trojúhelníky tvoří povrch domu	47
Obrázek 34: Ukázka různého nastavení "Max ray distance": nízká hodnota (vlevo) a vysoká hodnota (vpravo).....	47
Obrázek 35: Porovnání textur, původní (vlevo) a přenesená (vpravo).....	48
Obrázek 36: Přenesená textura (vlevo) a textura po úpravě (vpravo)	49
Obrázek 37: Výstupní model ze softwaru Agisoft (vlevo) a výsledný upravený model (vpravo)	49
Obrázek 38: Původní model (vlevo) a upravený zjednodušený model (vpravo)	50
Obrázek 39: Výstupní model ze softwaru Agisoft (vlevo) a zjednodušený model s upravenou texturou (vpravo).....	50
Obrázek 40: Poskytnutý model křižovatky vytvořený v softwaru Agisoft.....	52
Obrázek 41: Detail křižovatky s nepřesně zachycenými stromy	53
Obrázek 42: Síť trojúhelníků původního modelu (nahore) a zjednodušeného (dole)	53
Obrázek 43: Původní mozaiková textura (vlevo) a přenesená upravená textura (vpravo)	54
Obrázek 44: Původní model se stromy (vlevo) a nový model s opravenou texturou (vpravo)	54
Obrázek 45: Výsledný jednoduchý model s opravenou texturou	55
Obrázek 46: Detail vozovky upraveného modelu	55
Obrázek 47: Vytvořená křižovatka reprezentovaná trojúhelníky (vlevo) a s upravenou texturou (vpravo)	56
Obrázek 48: Porovnání detailu textury: původní po přenesení (vlevo) a upravená pomocí fotografie (vpravo).....	57
Obrázek 49: Podkladový terén.....	60
Obrázek 50: Terén s vloženým modelem křižovatky	61
Obrázek 51: Model křižovatky s „vytaženými“ rameny	61
Obrázek 52: Textura trávy nanesená na blízké okolí komunikace.....	62
Obrázek 53: Ukázka rozdílného rozlišení původního terénu (vlevo) a nově nanesené textury (vpravo)	62
Obrázek 54: Upravená textura ve vzdálenějším okolí komunikace.....	63
Obrázek 55: Křižovatka po vložení vegetace	63
Obrázek 56: Schéma rozložení textur podél komunikace a jejich požadované rozlišení	64
Obrázek 57: Porovnání skutečné fotografie oblasti (nahore) a vytvořené scény v simulátoru (dole), zdroj [30].....	65

Obrázek 58: Skutečný stav oblasti (nahore) a vytvořená scéna (dole), zdroj [30]..... 68

Obrázky, u kterých není uveden zdroj, byly pořízeny autorem práce.

14. Seznam příloh

Přiložené CD obsahuje:

- Model domu (zjednodušený model domu ve formátu .obj)
- Textura domu (upravená textura domu ve formátu .png)
- Model celé oblasti (zjednodušený model celé oblasti křižovatky u Toužimi ve formátu .obj)
- Textura celé oblasti (upravená textura celé oblasti křižovatky u Toužimi ve formátu .png)
- Model křižovatky (zjednodušený model samostatné křižovatky ve formátu .obj)
- Textura křižovatky (upravená textura samostatné křižovatky ve formátu .png)