



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Název:	Prezentace historických památek za pomoci virtuální reality
Student:	Igor Žmajlo
Vedoucí:	Ing. Jan Buriánek
Studijní program:	Informatika
Studijní obor:	Webové a softwarové inženýrství
Katedra:	Katedra softwarového inženýrství
Platnost zadání:	Do konce letního semestru 2019/20

Pokyny pro vypracování

Virtuální realita (VR) umožňuje zprostředkovat věrohodné zážitky ve všech oblastech vzdělávání i zábavy. Cílem práce je navrhnout a ověřit praktický systém, který pomůže popularizovat historické památky za pomoci prostředků VR. V práci se zaměřte na reálný postup při vytváření a konverzi 3D modelů památek z dostupných podkladových materiálů. Popište celý postup výroby a ověřte jej na reálném projektu, vč. interakce s uživatelem. Do virtuálního světa zasadte i animované postavy.

- 1) Prostudujte a popište stávající systémy pro vytváření vzdělávacích programů ve VR.
- 2) Vyberte si některý z nalezených postupů pro výrobu prezentace historických památek ve VR a použijte jej pro demonstraci funkce systému. Zaměřte se na animované postavy uvnitř VR.
- 3) Do virtuálního světa umístěte interakce s virtuálním prostředím.
- 4) Celou prohlídku optimalizujte, aby probíhalo vykreslování ve VR plynule.
- 5) Celý postup výroby zdokumentujte, včetně popisu vstupních a výstupních formátů.

Seznam odborné literatury

Dodá vedoucí práce.

Ing. Michal Valenta, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. RNDr. Ing. Marcel Jiřina, Ph.D.
děkan

V Praze dne 4. února 2019



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Prezentace historických památek za pomocí virtuální reality

Igor Žmajlo

Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Buriánek

14. května 2019

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Buriánkovi za odborné rady, usměrnění mé práce a zajímavé zkušenosti z oboru, které mě dále motivují k realizaci kreativních projektů.

Zároveň děkuji Ing. Radko Sáblíkovi, Ing. Jaroslavu Zápotockému a všem studentům Smíchovské střední průmyslové školy, kteří stáli za vznikem podkladů nutných k vývoji této virtualizace.

Dále děkuji Mgr. Jiřímu Hofmanovi a Mgr. Šimonu Krbcí za odbornou konzultaci a poskytnutí historických podkladů k pevnosti Terezín.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou, a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla, a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 14. května 2019

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2019 Igor Žmajlo. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Žmajlo, Igor. *Prezentace historických památek za pomoci virtuální reality*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2019.

Abstrakt

Práce pojednává o principech a možnostech virtualizace historických památek. Podrobně popisuje analýzu možných postupů, jejich rozdílné požadavky a dále postup realizace konkrétního řešení.

Výsledná VR aplikace obsahuje věrohodně zpracované prostředí české pevnosti Tereziín dle původních podkladů, včetně animovaných postav v dobovém oblečení. Virtualizace vychází z 3D modelů poskytnutých studenty Smíchovské střední průmyslové školy a zahrnuje postup jejich opravy a optimalizace pro použití ve virtuální realitě.

Výstupem práce je replikovatelný postup virtualizace historického prostředí, který díky spolupráci studentů, historiků a správců památky může proběhnout jen s minimálními finančními náklady.

Přínosem nově navrženého postupu je snažší adopce VR technologií a popularizace historické tematiky.

Klíčová slova virtuální realita, virtualizace, 3D grafika, 3D animace, historické památky, Unity

Abstract

This work is about the principles and possibilities of virtualizing historical monuments. In detail it covers each of the possible procedures, their different requirements and further demonstrates one such procedure on a specific solution.

The resulting VR application contains authentic environment of the Czech fortress, Terezín. It is based on the original maps and features animated characters wearing period clothes. The virtualization uses 3D models provided by the students of the Secondary technical school in Prague. The work also covers the procedure of correcting provided models and their optimization for use in virtual reality.

The result of this work is a repeatable procedure of virtualizing historical environments that can in cooperation between students, historians and monument administrators be repeated with minimal financial requirements.

The further benefit of the proposed procedure is an easier adoption of VR technologies and popularization of history.

Keywords virtual reality, virtualization, 3D graphics, 3D animations, historical monuments, Unity

Obsah

Úvod	1
1 Cíl práce	3
2 Současný stav a možnosti virtualizace historie	5
2.1 360° videa	5
2.2 Fotogrammetrie	7
2.3 3D modelování	8
3 Výběr postupu řešení	9
4 Problematika realizace VR prohlídky	11
4.1 Nevolnost ve VR	11
4.2 Nároky vykreslování VR grafiky	12
4.3 Dualita očí	12
4.4 Obnovovací frekvence	13
4.5 Vyplňování mezi snímky	13
4.6 Postavy	15
5 Realizace projektu	17
5.1 Předpříprava 3D modelů budov	17
5.2 Zdroje	24
5.3 Speciální povrchy	25
5.4 Postavy	29
5.5 Interakce	38
5.6 Optimalizace vykreslování	39
6 Výsledky práce	41
6.1 Plynulost	41
6.2 Snímky	42

6.3	Nadstavby	47
6.4	Závěr	49
Literatura		51
A	Seznam použitých zkratk	55
B	Seznam použitých pojmů	57
C	Obsah přiloženého datového nosiče	59

Seznam obrázků

2.1	2 unikátní pohledy ve 360° videu - Zdroj:[1]	6
2.2	Fotogrammetrie objektu - Zdroj:[2]	7
5.1	Polygony budovy nejsou vykresleny z opačné strany	18
5.2	Budova ze vzdáleného pohledu při 3D modelování	19
5.3	Drobná mezera mezi oknem a parapetem	19
5.4	Polygony ve stejné ploše	20
5.5	Mírně rozdílný pohled	20
5.6	Dva způsoby triangulace	21
5.7	Dveře s 625 polygony	22
5.8	Identické dveře s 159 poly	22
5.9	Srovnání shaderů cihel	25
5.10	Opakování textury trávy	26
5.11	Míchání stejné textury trávy	26
5.12	Visuálně programovaný anti-tile PBR shader	27
5.13	Návaznost jednotlivých terénů	28
5.14	Stejná oblast ihned po uložení scény	28
5.15	Lineární míchání textur	28
5.16	Míchání heightmapami	28
5.17	Postava vypracovaná pomocí blend shapů	30
5.18	Nastavení exportu 3D modelu postavy z programu DAZ Studio	31
5.19	Oblečená postava bez animačního rigu	32
5.20	Instrukce automatizovaného rigování modelu	33
5.21	Náhled animace v aplikaci Mixamo	34
5.22	Náhled přidanych kostí očí postavy	35
5.23	První náhled postavy v Enginu a využití pluginu oční dynamiky	36
5.24	Přechod animací postav během interakce	36
5.25	Výstup DAZ Studia	37
5.26	Pokrytí texturou z 3D.sk	37
5.27	Stejný model, různé textury - hněv, mračení a úsměv	38

5.28 Část 2D miniatur	39
5.29 Kostel z dálky	39
5.30 Původní scéna	40
5.31 Objekty skutečně použité během vykreslování snímku	40
6.1 Původní scéna	42
6.2 Centrum města	43
6.3 Pohled na celou virtualizaci	44
6.4 Voják	45
6.5 Kostel z pohledu první osoby	46
6.6 Původní scéna	48
6.7 Stejný pohled s předpočítaným osvětlením	48

Úvod

Po několika neúspěšných startech se dnes technologie virtuální reality úspěšně rozšířila do povědomí veřejnosti. Bez technických omezení minulé doby lze pohodlně a věrohodně prožít virtuální zážitek s různými účely.

Jedna z oblastí, kde virtuální a rozšířená realita exceluje, je podpora ve vzdělávání. Naučný zážitek ve virtuální realitě je přirozeně zábavný a zároveň intenzivnější než některé běžné formy výuky. Z těchto důvodů se dnes výuka ve virtuální realitě aplikuje na spoustu oborů. Jednou z těchto oblastí je výuka historických událostí.

Ve virtuální realitě lze památky zachovávat a přitom umožnit návštěvníkům hlouběji objevovat jejich minulost, význam a krásu. Tato práce se zaměřuje na jeden konkrétní způsob realizace.

Jedním z přínosů popsané realizace je unikátní postup vývoje virtualizace historického prostředí, sjednocující práci studentů střední a vysoké školy. Výsledné zážitky mohou realisticky zobrazit různě rozehlé památky, včetně animovaných postav a důležitých událostí. Aplikace tak plní svůj účel popularizování historie skrze moderní technologie.

Zároveň je práce přínosem pro památkovou turistiku. Zábavná součást virtualizací může posloužit jako nová motivace při lákání návštěvníků. Vedle doplňku fyzické návštěvy skutečné lokality lze takové zážitky poskytnout kdekoli na světě, i lidem s problémy s fyzickým pohybem.

V prvotní analýze se řeší, jakými způsoby lze takové projekty realizovat a jaké jsou výhody a nedostatky jednotlivých variant. Dále navazuje rozsáhlý popis realizace ukázkové VR aplikace znázorňující terezínskou pevnost na svém počátku - 19. století. Závěrem jsou popsány dosažené výsledky aplikace a další možnosti rozvoje technické části realizace.

Cíl práce

Cílem práce je navrhnout a prakticky ověřit postup pro tvorbu virtualizací, který pomůže popularizovat historické památky za pomoci prostředků virtuální reality. Výsledný systém bude obsahovat věrohodně zpracované, historicky významné prostředí, ve kterém může koncový uživatel, návštěvník, prohlédnout a zažít dějiny.

Zpracované 3D modely budov musí být historicky přesné, dle dochovaných plánů. Virtuální prohlídka bude obsahovat živé, věrohodné postavy zobrazeny v dobovém oblečení, které doplní historická místa událostmi. Postavy budou interagovat s prostředím a budou si vědomy návštěvníkovy přítomnosti v dané ukázce.

Pro úplné využití zařízení virtuální reality bude ukázka disponovat interakcemi dostupnými pro návštěvníka, aby tak dějiny sám zažil a ovlivnil. Zároveň bude aplikace optimalizována pro vykreslování grafiky ve virtuální realitě tak, aby byl zážitek plynulý a bez grafických chyb a nedostatků.

Současný stav a možnosti virtualizace historie

Virtualizace historických památek a událostí ve virtuální realitě není zcela novou tematikou. Existují stovky komerčních i nekomerčních příkladů realizace takového konceptu. Základní dělení těchto projektů je dle způsobu grafické realizace. Zvolená varianta radikálně mění nejen příslušný postup vývoje, ale i způsob nasazení výsledného produktu a rozsah zážitku.

2.0.1 Dynamicky vykreslená nebo předpřipravená grafika

Princip počítačové grafiky je zpracování instrukcí pro zhotovení snímku, který se zobrazí koncovému uživateli. Základní distinkcí je, kdy probíhá zpracování těchto instrukcí. Zpracují-li se předem, lze koncovému uživateli předat pouze výsledek tohoto procesu. Jde o předpřipravenou grafiku. Alternativou je předání samotných dat a instrukcí k sestavení snímku, které dynamicky zpracuje až počítač uživatele.

Předpřipravená grafika slouží převážně u filmů a podobných médií, kde není žádoucí, aby uživatel příliš měnil vizi autora. Dynamicky vykreslená grafika pak slouží pro případy, kde vize grafiky je do jisté míry i na uživateli, jako například u počítačových her.

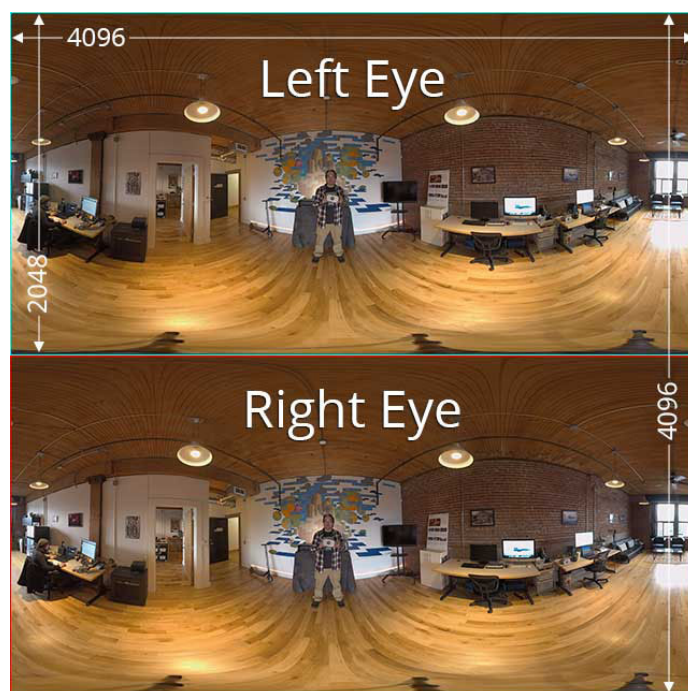
Jedním z cílů projektu je vytvořit interaktivní VR aplikaci. Čistě předpřipravené zpracování tak nestačí pro interaktivní řešení VR prohlídky.

2.1 360° videa

Zdánlivě nejjednodušší varianta postupu předpřipravené grafiky je záznam historických oblastí, nebo hraných rekonstrukcí událostí klasickým 360° videem. Takový postup dosáhne svého cíle a jeho výsledky budou po grafické stránce nejrealističtější. Technickou překážkou realizace je samotný záznam. Na rozdíl od klasického videa vyžaduje 360° video nezbytně velmi vysoké

2. SOUČASNÝ STAV A MOŽNOSTI VIRTUALIZACE HISTORIE

rozlišení, protože záznam pokrývá všechny možné směry pohledu. Dnes běžný formát 360° videa z důvodu nutnosti unikátního obrazu pro každé oko má rozlišení 4096 x 4096. Obrazy jednotlivých očí se ukládají v záznamu nad sebou. [1]



Obrázek 2.1: 2 unikátní pohledy ve 360° videu - Zdroj:[1]

Dle specifikací pro Oculus Video[3] může bitrate výsledného, komprimovaného videa dosáhnout až 450 MB na 1 minutu záznamu.

Virtualizace pomocí 360° videa je ale zároveň tou nejomezenější variantou v oblasti interakcí. Návštěvník nemůže kromě omezeného sledování nebo přepínání mezi scénami dělat nic dalšího. Nutnost postupného přepínání záznamů je zároveň další důvod proč je realizace videem nevhodná pro větší lokality.

Součástí zadání této práce je implementace interakcí do virtuálního prostředí, proto nelze postup nahrávání videa aplikovat pro tuto práci.

Předpřipravené řešení neumožňuje volný pohyb v zobrazené scéně. To může přispět ke způsobení nevolnosti cílového zákazníka. Lze sice otáčet hlavou a pohled se přizpůsobí rotací, ale kromě otáčení se vždy návštěvník i hýbe. Ať už nechtěně v drobném množství, nebo záměrně, pokud se například skrčí. Takový dynamický posun prostorem nelze ve videu *zatím*[4] zaznamenat.

Nahrávání videa dále vyžaduje existenci památky v dnešní době a neumožní zobrazení stavu památky nebo události v minulosti, nebo i budoucnosti.

Tímto požadavkem se vyřazuje možnost realizace spousty památek, o jejichž existenci sice víme, ale do dnešní doby se nedochovaly.

Příklady virtualizací historie pomocí 360° videí je nespočet. Obecně se kvůli omezené interakci zaměřují na jediné místo a okamžik v historii. Kvalitní reprezentací konceptu je 360° video historické rekonstrukce vikingské bitvy realizované National Geographic.[5]

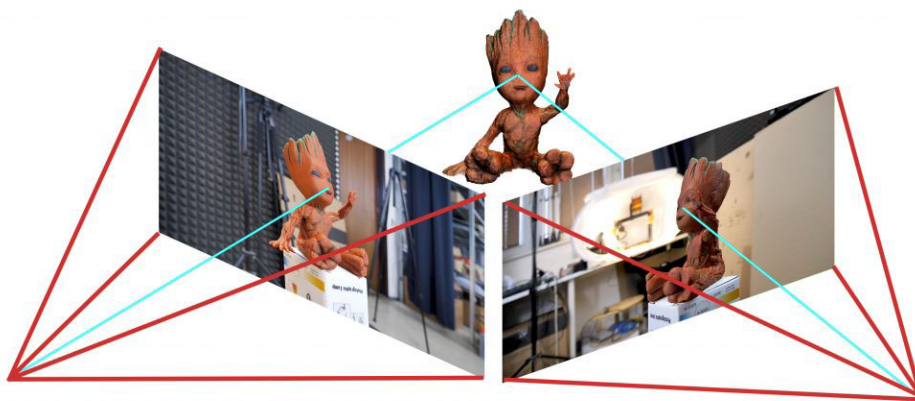
Události se účastnilo více než 600 dobrovolníků.

2.2 Fotogrammetrie

Druhou variantou realizace je kombinace fotogrammetrie a ruční práce s 3D grafikou pro vytvoření kombinovaného pohledu skutečných objektů ve virtuální realitě, doplněné o neskutečné prvky, například okolí památky a jiné detaily. Tato varianta umožňuje plnou míru interakce se světem, ale zároveň je nutné realizovat komplexní proces - fotogrammetrie. [6]

Fotogrammetrie je proces rekonstrukce skutečného objektu v digitální 3D podobě. V kontextu historických památek lze proces použít pro rekonstrukci objektů ve virtuální realitě. Postup vychází z pořízení velkého množství kvalitních fotografií, které dále slouží jako podklady pro vytvoření 3D modelu a zároveň textury povrchu.

Proces může dosáhnout realisticky vypadajících výsledků, ale vyžaduje určité podmínky. Jednou z nich je neměnné osvětlení. Pokud se osvětlení během procesu skenování změní, v automatizovaném procesu vzniknou artefakty. Stejně body v různých snímcích se nemusí přiřadit.



Obrázek 2.2: Fotogrammetrie objektu - Zdroj:[2]

Dále, pokud objekt není nasvícen uniformně, ze všech směrů, může dojít ke ztrátě vizuální kvality. Ve výsledné aplikaci nemusí souhlasit osvětlení modelu vykreslovacího programu s obrazem získaným ze skutečnosti.

Fotogrammetrie nemůže pomoci pro řešení objektů, které jsou příliš lesklé, průhledné nebo odrazivé. Barvová data by se na stejném povrchu v různých snímcích lišila a to by vedlo ke stejným artefaktům zmíněným výše.

Snímaný objekt se také nesmí během procesu fotogrammetrie pohybovat. Pokud se povrch mezi jednotlivými snímky změní, nelze jej rozumně navázat. Častým problémem je výskyt vegetace. Hýbe se s větrem, zároveň sama sebe zakrývá a působí na sebe vlastními stíny, které nezaručí uniformní osvětlení.

Podobně jako v minulé variantě tento systém vyžaduje přítomnost památky v dnešním světě a nepočítá se změnou stavu objektu napříč časem.

Příkladem realizace fotogrammetrické virtualizace historického prostředí je VR prohlídka hrobky egyptské královny Nefertari. [7]

Virtualizace vznikla z více než 3000 fotek pořízených na místě a výsledný 3D model se musel redukovat z 6.4 miliard vertexů generovaných automatizovaným procesem fotogrammetrie.

2.3 3D modelování

Třetí variantou realizace je vytvoření všech grafických podkladů ručně od základu dle zachovalých plánů, nákresů nebo referenčních fotek. Jde o standardní postup používaný například při vývoji her s imaginárním obsahem, kdy reference ve skutečném světě neexistuje.

Tento postup vyžaduje spoustu manuálního úsilí. Proces není automatizovaný a jeho výsledky jsou silně variabilní. Nejčastěji vzniká pouze skoro realistické úrovně grafického provedení.

Hlavní výhodou této varianty postupu je nezávislost na skutečném stavu. Zobrazená památka dnes nemusí ani fyzicky existovat a z referenčních podkladů lze získat její věrohodnou 3D reprezentaci. Proces dále není omezen nástroji a měřítkem. Hodí se tak lépe pro virtualizaci velmi rozsáhlých prostředí v kombinaci s detailním pohledem z první osoby.

V minulosti byla tímto způsobem realizována virtualizace koncentračního tábora Auschwitz II - Birkenau. [8] (také ve spolupráci se Smíchovskou střední průmyslovou školou) Výsledky této virtualizace koncentračních táborů vyprávějí o nevyužití principů popsané v této práci.

Z komerčního světa pak existuje například virtualizace města Bruggy v 16. století [9] z pohledu dobového námořníka nebo virtualizace prvního letu bratrů Wrightů.[10]

Výběr postupu řešení

Pro demonstraci postupu popularizace historické památky za pomoci virtuální reality byla vybrána česká pevnost Terezín v době krátce po jejím dokončení, počátkem 19. století. Pevnost byla založena císařem Josefem II. koncem 18. století. Nese jméno císařovy matky Marie Terezie. Jejím účelem bylo bránit cesty často používané nepřátelským vojskem.

Přesto-že za dobu své existence pevnost neprošla válečným konfliktem, není v ideálním stavu. Velké škody napáchaly povodně roku 2002. Několik budov muselo projít důkladnými rekonstrukcemi z až havarijních stavů. Další velké změny proběhly z důvodů přestavby komunikací.

Pevnost je tvořena 67 ha opevnění ve třech vrstvách a obsahuje několik desítek unikátních budov. Vršky hradeb jsou pokryté trávou a napříč celou oblastí se vyskytuje spousta stromů.

Realizace vycházející z principů fotogrammetrie by byla silně problematická. Plošný rozsah pevnosti není slučitelný s procesem fotogrammetrie v menším měřítku. Bylo by nutné používat specializované zařízení - drony, nutné pro rekonstrukci rozsáhlých objektů. Pevnost dále obsahuje velké množství pohyblivé vegetace, která by narušila kvalitu výsledných modelů.

Ve spolupráci se Smíchovskou střední průmyslovou školou byl proto vybrán postup vycházející z klasického 3D modelování. Město Terezín studentům poskytlo velké množství podkladů ve formě skenovaných původních plánů a zachovalých kreseb. 31 studentů pod vedením odborného konzultanta Ing. Jaroslava Zápotockého použilo v rámci své maturitní práce poskytnuté materiály jako referenci pro 3D modelování významných budov a částí opevnění.

Následujícím postupem bylo zpracování jejich výstupů do použitelné podoby, doplnění chybějících částí, vytvoření animovaných postav a aranžování celé scény v herním enginu Unity, verze 2018.3.0f2.

Výslednou aplikaci město Terezín použije pro své vzdělávací účely na zařízení HTC Vive Pro a počítači s grafickou kartou Nvidia GTX 1080. Tento hardware je specifikací nefunkčního požadavku plynulosti vykreslování aplikace.

Problematika realizace VR prohlídky

Implementace virtuálních prohlídek vycházejících z dynamicky vykreslených 3D modelů má několik úskalí, které je nutné překonat k dosažení kvalitního zážitku.

4.1 Nevolnost ve VR

Návštěvníci ve virtuální realitě mohou cítit nevolnost, způsobenou nesouhrou klamání našich smyslů. Jedno z nejběžnějších vysvětlení je lidský obranný mechanismus vůči otravě jedem. Smysly vidění a části středního ucha spolupracují na rozpoznávání prostoru. Pokud oko vidí, že se člověk hýbe, musí ucho cítit to samé. Pokud dojde k nesouhře, jeden ze systémů nefunguje správně. Přírodním vysvětlením je otrava toxinem a na to lidské tělo reaguje obrannými metodami.[11]

- Odrazení od dalšího pohybu
- Vyloučením toxinů skrze pocení nebo zvracení
- Způsobení nevolnosti pro odrazení dalšího opakování

Dalších možných důvodů nevolností je více. Jedním z nich je nedostatečná obnovovací frekvence zobrazeného obsahu. Lidské oko nesehná pomocí jednotlivých snímků. Naším analogickým principem přijímáme světlo - obraz kontinuálně. Existuje ale časový úsek, při kterém změnu v obrazu již nestihne náš mozek zaznamenat. S obnovovací frekvencí na této úrovni časových intervalů lidské oko nerozpozná skutečný, kontinuální obraz od uměle vytvořeného obrazu na bázi snímků. Jeden z výzkumů této problematiky udává požadavek až 500 Hz[12] obnovovací frekvence.

Při současných technologiích nejsou dostupné VR brýle ani blízko takové obnovovací frekvenci. Většina VR zařízení v době psaní této práce používá obnovovací frekvenci 90 Hz. S nižší frekvencí klesá věrohodnost obrazu, což způsobuje další nevolnost.

4.2 Nároky vykreslování VR grafiky

Oproti klasickému vykreslování 3D grafiky na 2D monitory má VR hned několik komplikací, které značně zvyšují náročnost na plynulé vykreslování. 90 Hz obnovovací frekvence VR je o 50 % vyšší, než na-kolik se posledních několik desítek let vývoje počítačových komponentů mířilo pro běžné uživatele. V případě srovnání s herními konzolemi jde dokonce o trojnásobnou hodnotu. 90 Hz obnovovací frekvence je tak první překážkou k vytvoření ideálního zážitku.

Dalším problémem je rozlišení vykresleného obrazu. Zvolená VR platforma, která bude použita v Muzeu města Terezín, je HTC Vive Pro, se základním rozlišením 1600 x 1440 pro každé oko. Při 90 Hz obnovovací frekvenci jde o 395,5 megapixelů za vteřinu. Pro srovnání, obraz v 1920 x 1080 rozlišení při 60 Hz je 118,7 megapixelů.

Existují metody, jak rozlišení efektivně upravovat. Nej kvalitnější takovou technikou je Foveated Rendering.[13] Jde o lokalizaci oblasti, na kterou momentálně uživatel VR headsetu hledí okem. Následně lze tuto oblast vykreslit v nativním rozlišení a zároveň vykreslit vše ostatní v rozlišení sníženém.

Implementovat takovou technologii je komplikované a proces vyžaduje specializované senzory nebo kamery uvnitř headsetu, které snímají pohyb očí. Lidské oko se pohybuje velmi rychle, takže prodleva mezi úspěšným zachycením pozice duhovky a vykreslením snímku s variabilními oblastmi rozlišení musí být velmi malá. To je hlavní problém a důvod, proč tato technologie zatím není ve všech komerčně dostupných VR headsetech. Vybraná VR platforma v městě Terezín tuto funkci také nepodporuje, proto se technologie nevyškytne v aplikaci vytvořené v rámci této práce.

4.3 Dualita očí

Jedním ze základních prvků rozpoznání hloubky v trojrozměrném prostoru jsou rozdílné pohledy získané z jednotlivých lidských očí. Skutečný 3D efekt tak vyžaduje dva rozdílné pohledy pro každé oko. Jednotlivé rozdíly náš mozek zpracovává do poznání hloubkové vzdálenosti. Proto musí VR brýle vykreslovat 2 odlišné obrazy pro každé oko zvlášť. To ale znamená, že každý snímek se ve VR vykreslí dvakrát. Jde o zásadní problém který se musí optimalizovat. Mitigace tohoto problému je dále popsána v sekci 5.6 - Optimalizace vykreslování.

4.4 Obnovovací frekvence

Při 90 Hz obnovovací frekvence připadá na vykreslení jednoho snímku 11.1 ms času. V případě, že by vykreslení snímku trvalo například 12 ms, ve VR headsetu se snímek zobrazí až při dalším obnovovacím cyklu - po dalších 11 ms. Vykreslení snímku se tak zvedlo z původních 12 ms na 22 ms. V případě, že taková variace mezi 11 ms a 22 ms doby trvání vykreslení snímku probíhá velmi často, uživatel pocítí neplynulé vykreslování grafiky. To je problematické z důvodu kvality zážitku, a z důvodu zamezení potenciální nevolnosti.

Existují principy, které ovlivňují proces zobrazování vykreslených snímků za účelem zvýšení plynulosti obrazu. Moderní LCD monitory využívají technologii variabilních, obnovovacích frekvencí snímků, nejčastěji varianty FreeSync. To zamezí nutnosti vyčkání na další obnovovací cyklus. V případě popsaném v minulém odstavci se tak 12 ms snímek zobrazí po 12 ms, místo 22 ms.

Tato technologie ale není využitelná ve VR headsetech.

VR headsety používají tzv. *low persistence* displeje. Takové displeje zobrazí svůj snímek pouze na krátkou chvíli, s velmi intenzivním jasem. Zbytek času je displej vypnutý. (nebo se zobrazí čistě černý snímek) Člověk vzniklé blikání nevidí a výhodou je zamezení tzv. *motion blur*. Mitigace *motion blur* efektu je velmi důležitá pro dosažení věrohodného obrazu. Podrobně je vysvětleno ve videu eVRydayVR.[14]

Variabilní obnovovací frekvence ale vyžaduje *high persistence* displej. Jas je v takových displejích kontinuální, protože snímek je zobrazen identicky během celého obnovovacího cyklu. Různé doby viditelnosti snímku na *low persistence* displeji by způsobovaly nepříjemné problikávání jasu.

4.5 Vyplňování mezi snímky

Z těchto důvodů nelze změnit čas, kdy se snímky zobrazují. Co ale jde změnit je jaký snímek se zobrazí.

Konzistentní posloupnost zobrazování snímků lze dosáhnout opakováním zobrazení minulého snímku. Pokud se bude předpokládat poloviční obnovovací frekvence - 45 Hz, je dvojnásobný čas na vykreslení snímku. Zobrazením identického mezisnímku podruhé je sice vykreslování znatelně pomalejší, ale stále konzistentní. Obvykle je lepší konzistence než náhodné míchání návazností snímků. Ze stejného důvodu herní konzole jako Playstation a Xbox uzamkávají vykreslovací frekvenci na 30 Hz. Přesto že by se dokázaly kolísavě pohybovat mezi 30 až 40 Hz dle náročnosti konkrétní scény. Zobrazením stejného snímku dvakrát po sobě dojde ke konzistenci na 60 Hz monitorech a televizích.

VR software může podobný princip využít a dále i rozšířit. V případě, že se nestíhá další snímek pro dosažení plné obnovovací frekvence, vezme se snímek minulý a dle nových, aktuálních informací z hardwaru o pozici hráče, se minulý snímek deformuje a použije jako nový. Nový, falešný snímek se tak

liší od minulého a přesto-že je jeho původní obsah identický, vypadá více jako skutečný snímek, který nebyl včas vykreslen.

Různí výrobci používají stejný princip v různých úrovních zásahu do vykreslování. Jedna z prvních implementací zásahu do vykreslování byla napsána Johnem Carmackem[15], Timewarp.

4.5.1 Timewarp [16]

V tomto prvním pokusu nešlo nutně o snižování obnovovací frekvence, nýbrž o snížení latence mezi momentem, kdy se získají pozicové informace hardwaru, a momentem, kdy se z těchto informací vykreslí snímek. Během těchto 11 ms se hlava člověka posune a vykreslený snímek se distorcí přizpůsobí poziční změně. Tato implementace ale pomáhá pouze s rotační změnou, nikoliv poziční. Obdobné implementace této latenční mitigace jsou použity ve všech komerčních VR headsetech.

4.5.2 Asynchronous Timewarp [16]

Asynchronous Timewarp (ATW) z minulého snímku připravuje nový mezisnímek, který se použije, když dochází k nedostatečné obnovovací frekvenci. Paralelně dopočítaný mezisnímek je připraven vždy dopředu, ještě předtím, než jde poznat zda se hlavní snímek stihne vykreslit včas nebo ne. Úprava snímku také vychází pouze z rotační změny.

Poprvé se tato implementace objevila v Samsung Gear VR zařízeních v roce 2014, v počítačem poháněných VR zařízeních až v roce 2016. Ve SteamVR prostředí se této technice říká Asynchronous Reprojection.

4.5.3 Asynchronous Spacewarp [16]

Asynchronous Spacewarp (ASW) navazuje na stejný princip, ale nově řeší při extrapolaci mezisnímků i poziční změny hráče, nejen rotační. ASW vychází pouze z výsledného obrazu, nemá přesné informace o vykreslené scéně. Při extrapolaci tak dochází k vizuálním artefaktům. Oproti Timewarp principům neběží Spacewarp kontinuálně na pozadí a počítá se pouze tehdy, kdy je nutný. Oculus se svojí implementací přišel v prosinci 2016, Valve pro SteamVR až listopadu 2018.

4.5.4 Asynchronous Spacewarp 2.0 [16]

Společnost Oculus nyní přichází s 2. verzí ASW, ve které kromě barvových dat vychází při aproximaci obrazu i z hloubkové mapy (depth buffer) scény. To v jejich procesu pomáhá řešit vzniklé artefakty, ale zároveň je nutná podpora ze strany vývojáře VR aplikace, který musí poskytnout depth buffer. Enginy Unity a Unreal podporu nativně obsahují ve svých Oculus SDK nástrojích.

4.6 Postavy

Zdaleka nejsložitější implementační úkol virtualizace historie jsou lidské postavy. Historie by se nestala bez lidí, proto nesmí v takových ukázkách chybět. Oživí se tím celá vize minulosti a jsou tak možné další interakce s virtuálním prostředím.

Vytvářet věrohodné 3D modely obličeje je velmi obtížná záležitost, které jsou schopni jen ti nejschopnější 3D modeláři. Dostupnějším přístupem je použití dat ze skutečného světa. Výše zmíněný proces fotogrammetrie lze uplatnit i při sbírání dat obličeje.

Podrobný postup byl skvěle popsán v přednášce na GDC 2019.[17] Z předvedeného postupu vyplývá, že realizace takového procesu v malém měřítku dnes není finančně náročná na provoz a poskytuje realistické výsledky. V rámci této práce byl sestaven ještě jednodušší postup, který nevyžaduje desítky skutečných lidí ke skenování.

4.6.1 Animace těla

Součástí tvorby postavy je zcela nutné animování. Klasickým přístupem k animování postav při větších projektech je motion capture.

Motion capture je proces zachycení pohybu člověka pro pozdější aplikaci v grafickém prostředí. Lze ho provést několika způsoby vycházející z fyzicky měřených dat specializovanými přístroji nebo rozpoznáváním nahraného videa herece. Kvůli náročnosti procesu se motion capture obecných, nekonkrétních animací provádí obvykle nárazově a z nahraných animací se vytvoří databáze, která je dále používána v průběhu vývoje grafické aplikace.

4.6.2 Animační databáze

Jednou z takových animačních databází, které jsou volně dostupné pro použití v interaktivních aplikacích[18], je projekt Mixamo společnosti Adobe. Jde dnes bohužel o opuštěný projekt, který nabízí desítky dostupných kvalitních animací cílené pro použití v interaktivních médiích. Takové animace nejsou specifické konkrétnímu projektu. Mohou realizovat obvyklé nutné lidské animace, jako jsou neutrální stavy, chůze, běhání, boj atd.

Součástí projektu Mixamo je také automatizovaný nástroj, který k libovolnému 3D modelu humanoidu připraví animační kostru - tzv. rig. Jde sice o automatizovanou aproximaci, ale tento nástroj velmi zásadně urychlí čas výroby jednotlivých postav.

4.6.3 Inverzní kinematika

Realizace postav ve virtuálním prostředí se silně liší od budov a jiných 3D modelů. Postavy se totiž musí dynamicky pohybovat a reagovat na své prostředí. Takový systém postav vyžaduje velkou sbírku použitelných animací, obličejové

mimiky a zároveň určitou míru dynamičnosti a přizpůsobení virtuální scéně v podobě inverzní kinematiky.

Inverzní kinematika je princip dynamického animování postav, nebo jen vybraných končetin. Známe-li polohu cílového bodu, zpětně se dopočítává, jak musí být jednotlivé klouby orientovány, aby se cílového bodu končetinou dosáhlo. Pokud se animuje ruka a je známa pozice objektu, který má ruka uchopit, od dané pozice se musí zpětně dopočítat jednotlivé úhly kloubů ruky, aby ruka navazovala mezi ramenem a objektem. Navíc musí tyto úhly splňovat realistické podmínky omezení kloubů, např. aby se nezlomil loket.

Původně tato problematika vznikla v oblasti robotiky[19], ale našla uplatnění i ve vývoji her, konkrétně v případech, kdy nelze dopředu nahrát přesnou animaci.

Engine Unity vlastní řešení této problematiky nenabízí. Existuje ale několik komerčních řešení, která se dají dokoupit a použít. Jejich funkcionalita je záměrně univerzální a proto není nutné vybírat různá řešení pro jednotlivé projekty.

Realizace projektu

Následující postup je podobným způsobem aplikovatelný na virtualizace dalších historických památek. Vychází ze spolupráce studentů střední a vysoké školy. Modelování 3D modelů je dnes velmi jednoduchá a dostupná záležitost. Studenti před zapojením do projektu prošli alespoň 1 rokem výuky 3D modelování. Rozsah jednotlivých grafických příspěvků dle specifikací maturitního projektu je nejméně 60 hodin práce. V závislosti na rozsahu zadání může 1 student během školního roku pohodlně připravit 1 až 3 modely budov.

5.1 Předpříprava 3D modelů budov

Poskytnuté 3D modely ve většině případů splnily požadavek podobnosti vzhledem k původním plánům a nákresům, ale při modelování pro interaktivní grafiku, a zejména pro virtuální realitu, je nutné splnit několik funkčních i vizuálních požadavků. Jednotliví studenti se v míře odchýlení od splnění těchto kritérií značně lišili.

Než bude model pro VR aplikaci použit, musí proběhnout kontrola a korekce. Ve většině případů se doba korekce pohybovala mezi 10 % až 30 % času, kolik by trvalo model vytvořit znovu od základu. Korekcí prošel každý 3D model.

V některých případech kdy byly kritické modely nepoužitelné úplně, musely být vymodelovány znovu. Konkrétně, *Kostel Vzkříšení Páně*, vysoká dominantanta pevnosti.

5.1.1 Funkční kritéria 3D modelů

Funkční kritéria jsou taková, jejichž nesplnění znamená nesprávné nebo neúplné vykreslení 3D modelu.

5.1.1.1 Backface culling

Nejčastější chyba vychází z nepochopení principu backface culling. Jde o optimalizační techniku, díky které se polygony 3D modelu vykreslují pouze z jedné, obvykle vnější strany. Oproti oboustranné alternativě je tento způsob vykreslování rychlejší a jde o nutné zrychlení vykreslování i ve VR aplikacích.

Urychlení vykreslování ale není vysokou prioritou předpřipravené grafiky. 3D modelovací programy jako Blender nebo Cinema4D, které byly převážně použity studenty při práci na těchto modelech, backface culling standardně nezapínají.

Backface culling rozhoduje o vykreslení polygonu dle normál v příslušných vertexech. Různými modelovacími nástroji se může stát, že směry normál jednotlivých polygonů nenavazují a vznikají tak v modelech nevykreslené díry.

Použitý modelovací program Cinema4D sice obsahuje automatizovaný nástroj na zarovnání normál, ale nástroj neposkytoval konzistentní a funkční výsledky. Všechny normálové nesrovnalosti na všech modelech byly opraveny převážně ručně.

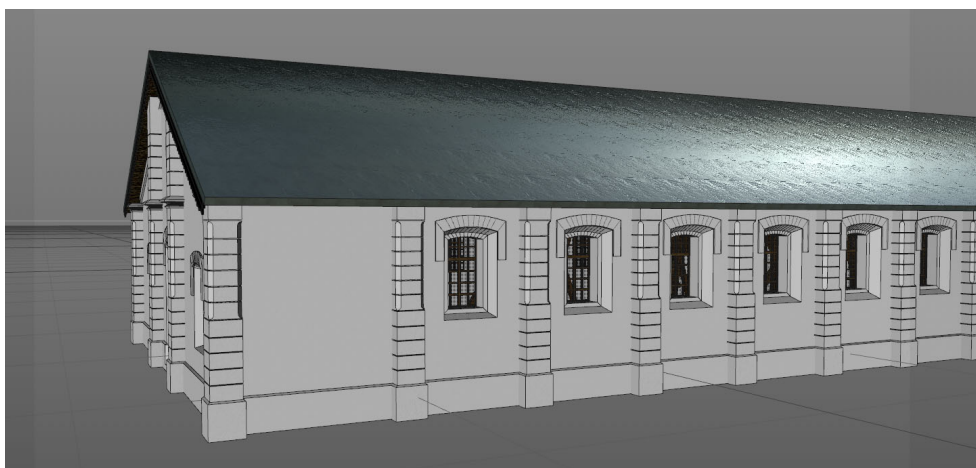


Obrázek 5.1: Polygony budovy nejsou vykresleny z opačné strany

5.1.1.2 Díry a nenávaznost geometrie

Další díry přítomné na poskytnutých 3D modelech vznikly nepozorností. 3D modelování rozsáhlých budov probíhalo na klasickém monitoru, většinou při vzdáleném náhledu. Drobné díry v modelech tak nebyly vidět. Až při použití modelů v engine, kde se dá scéna procházet ve skutečném měřítku, navíc ve virtuální realitě, se tyto díry projeví viditelnou vizuální chybou.

Každý model musel být důkladně prohledán a často i zpětně opravován po odhalení dalších chyb až ve výsledném produktu.



Obrázek 5.2: Budova ze vzdáleného pohledu při 3D modelování



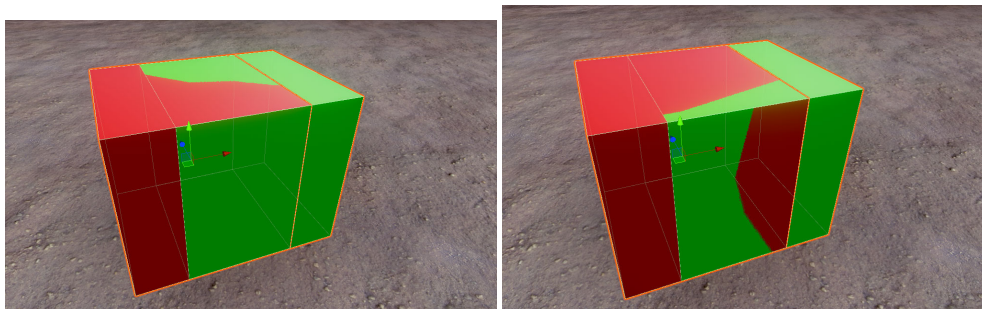
Obrázek 5.3: Drobná mezera mezi oknem a parapetem

5.1.1.3 Sjednocování objektů

V 3D modelování se často vychází z primitivních tvarů, které se až postupnými úpravami stanou vyžadovaným objektem. V případě rozsáhlých budov se taková primitiva vyskytují ve velkém počtu. Při sjednocování jednotlivých modelů program Cinema4D neumí sjednotit jednotlivé aplikace materiálů. Vzniklý, jediný objekt pak může mít i tisíce materiálů a to se podepíše na exportu. Jediná, špatně aplikovaná budova, mohla nabýt až několik stovek MB velikostí po více než 30-minutovém exportu. Modely se tak musí ručně sjednocovat a poté je nutné znovu provést materiálovou aplikaci na všechny jednotlivé polygonové sekce modelu.

5.1.1.4 Z-fighting

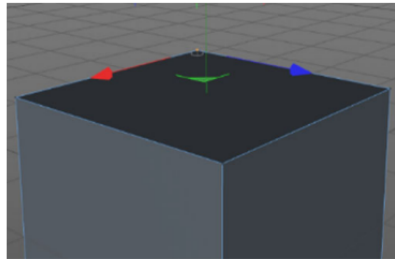
Další funkčně významná chyba 3D modelů vzniká křížením více polygonů nad jednou plochou. Z důvodu nedostatečné přesnosti Z-bufferu vykreslovaného enginu se vykreslují náhodné fragmenty jednotlivých polygonů. Fragmenty se navíc mění s každou unikátní pozicí a rotací kamery, což způsobuje nepříjemný a silně viditelný grafický artefakt. Všechny případy této chyby musely být nalezeny a opraveny.



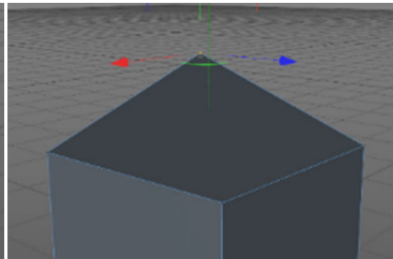
Obrázek 5.4: Polygony ve stejné ploše Obrázek 5.5: Mírně rozdílný pohled

5.1.1.5 Nejednoznačnost geometrie

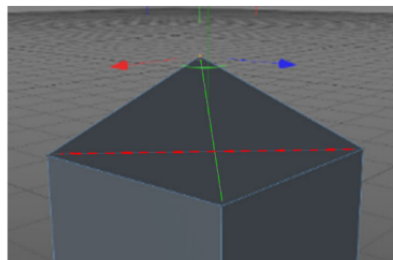
Polygony se skládají z nespécifikovaného množství vertexů. Pokud tyto vertexy nejsou v jedné rovině, lze je vykreslit více způsoby. Procesem triangulace se před vykreslováním grafiky polygon rozdělí na jednotlivé trojúhelníky. Pokud triangulace neproběhne předem v modelovacím programu, stává se, že jednotlivé programy provedou triangulaci různě. Model pak vypadá jinak v 3D modelovacím programu než v herním enginu.



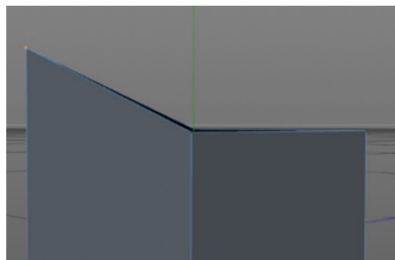
3D model kostky



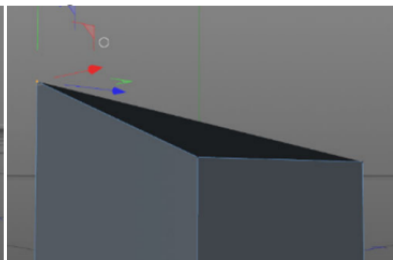
Posun vertexu mimo jednu rovinu



Dva způsoby triangulace



Vykreslení dle červené hrany



Vykreslení dle zelené hrany

Obrázek 5.6: Dva způsoby triangulace

5.1.2 Optimalizační kritéria 3D modelů

5.1.2.1 Plýtvání geometrií

Klasickým konfliktem 3D modelářů a lidí zodpovědných za optimalizaci interaktivní aplikace je polygoniální rozpočet jednotlivých modelů. Protože práce pocházela z rukou více autorů, jednotlivé modely se silně lišily v detailnosti a úspornosti. V některých případech poskytnuté 3D modely obsahovaly až miliony polygonů. Nejpoužívanějšími nástroji pro tento problém v Cinemě4D se ukázaly:

Optimize

Sjednotí vertexy které jsou si bližší než specifikovaná vzdálenost.

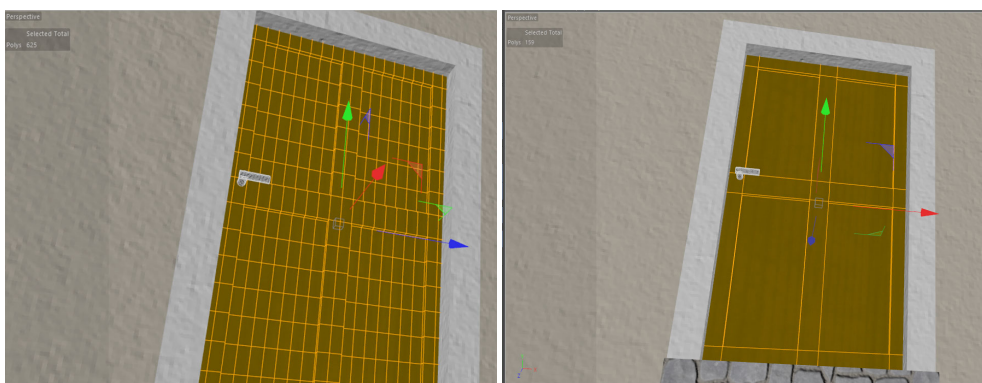
Polygonal Reduction

Využívá komplexnější proces redukce a snaží se zachovat původní tvar.

Stejný postup i nástroje byly použity pro generování vzdálených, méně detailních verzí budov do systému level of detail - LOD.

5.1.2.2 Zbytečná geometrie

Neintruzivní způsob optimalizace počtu polygonů je odstranění geometrie, která nemá nutný důvod existence. Odstranění takové geometrie modelu nijak neovlivní kvalitu jeho vykreslení. Cinema4D automatizovanou implementací nemá. Nástroj Blender může výskyty zbytečné geometrie odstranit modifikátorem *Decimate*, pokud je nastavený na *planar* režim.



Obrázek 5.7: Dveře s 625 polygony Obrázek 5.8: Identické dveře s 159 poly

5.1.2.3 Počet unikátních materiálů

3D modely se vykreslují po částech tvořené aplikacemi jednotlivých materiálů. Vykreslení takové části se říká draw call. Mezi jednotlivými draw cally je

drobná prodleva přepnutí kontextu. Každý další aplikovaný materiál na 3D modelu znamená nový draw call. Poskytnuté modely nerecyklovaly stejné materiály na úkor desítek unikátních, ale přitom zdánlivě stejných materiálů. Skoro každý poskytnutý 3D model musel projít novou aplikací materiálů, při které bylo použito co nejméně unikátních materiálů.

5.1.3 Visuální kritéria 3D modelů

Při zpracování materiálů budov došlo k možnosti výběru postupu. Visuálním požadavkem k modelům bylo použití alespoň jedné z těchto 3 metod UV mapování. Většinou nebyla realizována ani jedna z možností.

5.1.3.1 Unikátní materiály

3D modely se skládají z více povrchů. V případě budov šlo o omýtku, cihly, dřevo, sklo, atd. Jednou variantou je provést UV mapování s unikátní plochou pro každý polygon modelu. Tento princip je důležitý například pro postavy, kdy nelze povrch kůže jednoduše opakovat. V případě použití této techniky pro něco většího, jako je například budova, bude rozlišení textury veliké a stále nedostačující. Z důvodu předpokladu unikátních barevných hodnot pro každý polygon rozsáhlé budovy. Výhodou je ale vykreslení celého modelu během jediného draw call.

5.1.3.2 Opakování textury

Alternativou je nemít unikátní UV mapování. Místo toho mít unikátní materiály pro každý ze zmíněných povrchů a opakuující se UV mapování, kde se jednotlivé polygony stejného povrchu překřičují. Pro vykreslení omýtky, cihly, dřeva a skla jediné budovy je tak potřeba 4 draw cally. Jde o pomalejší způsob vykreslování, ale s výhodou vyššího rozlišení povrchů, díky opakování jednotlivých textur vzniklé překřičujícím se UV mapování.

Tento postup byl zvolen pro svou rychlost při zpracovávání desítek modelů jediným řešitelem. Použitý program Cinema4D pro aplikované materiály automatizovaně vygeneroval opakuující se UV mapování kubickou projekcí.

Engine Unity se automaticky snaží optimalizovat tuto metodu tím, že v jednom draw callu vykreslí více modelů se stejným materiálem. Tomuto procesu se říká *batching* a Unity ji aplikuje na všechny *statické* objekty. Proto byly všechny budovy ve scéně označeny jako *static*.

5.1.3.3 Unikátní materiály s opakováním textur

Existuje třetí varianta, která spojuje výhody obou variant. Pokud se UV mapování dělá ručně, lze jednotlivé plochy překřičit nad sekcemi textury tak, aby se opakovaly. Dojde tak k vykreslení textury ve vyšším rozlišení díky opakování a zároveň jsou všechny povrchy v jedné, nepříliš rozlehle textuře.

Takový princip ale vyžaduje aby jednotlivé polygony nebyly plochou větší než jednotlivé segmenty opakované textury. Nutná segmentace polygonů tak u rozsáhlých budov může negovat rychlostní benefity menšího počtu draw callů.

5.2 Zdroje

V průběhu práce na poskytnutých modelech studenti nemuseli řešit textury modelů. Početné množství nezkušených řešitelů z řad studentů by použilo různé textury pro údajně stejné povrchy. Synchronizace povrchů proběhla až v době kompletace scény v herním enginu pomocí vlastních, předdefinovaných materiálů.

Zdrojem sbírek textur a map bylo několik webových portálů nabízející kvalitní PBR materiály pod licencí CC0, jmenovitě **cc0textures.com** a **texturehaven.com**.

Dále byly soubory upraveny rastrovým editorem dle specifických požadavků projektu. Například šlo o barevné sladění textur cihel získaných z těchto webů a jejich barvy ve skutečném světě.

5.3 Speciální povrchy

Při realizaci se vyskytlo několik speciálních povrchů, které vyžadovaly vlastní shader.

5.3.1 Cihly

Napříč celou pevností se vyskytuje distinktní povrch rudých cihel, které tvoří většinu hradeb. Jejich dnešní podoba je povětšinou zchátralá, ale v době počátku 19. století, které má virtualizace zobrazit, byly ještě nové. Významnost povrchu si zasloužila kvalitní zpracování. Ale v kontextu rozsáhlé, otevřené scény pevnosti se předpokládalo, že nebude výkonový rozpočet pro shader využívající tessellaci pro 3D dynamickou rekonstrukci cihel. Úspornější alternativou efektu je parallax displacement mapping. Bohužel standardní povrchový shader engine Unity sice obdobu takového efektu umožňuje, ale pouze v omezeném množství. Při vyšších hodnotách způsobuje vizuální artefakty. Proto byl vytvořen vlastní shader. V základu dle návodu uživatele nuFF3[20], který díky nástroji na vizuální programování shaderu - Shaderforge[21], dosáhl lepších výsledků efektu Parallax displacement mapping.

Výsledný efekt je tak sice vizuálně lepší, ale zároveň výpočetně náročnější. Pro použití ve velké scéně byl shader rozšířen o kontrolu vzdálenosti kamery od povrchu. Nad určitou vzdálenost se efekt paralaxy omezí, aby došlo k úspoře výkonu. Dále byl shader rozšířen o míchání normal map pro potlačení tiling artefaktu. (viditelné opakování textury)



Parallax efekt 3D cihel



Stejné cihly v pohledu shora



Cihly z větší vzdálenosti

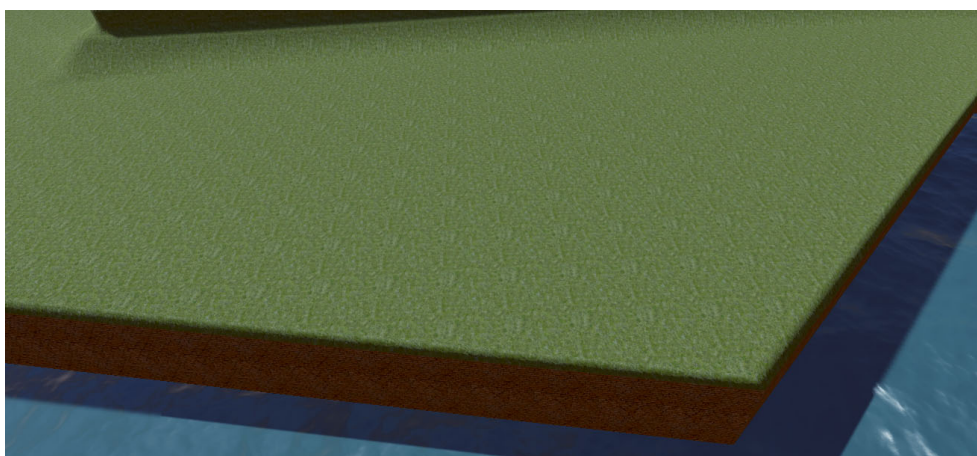


Unity standard shader

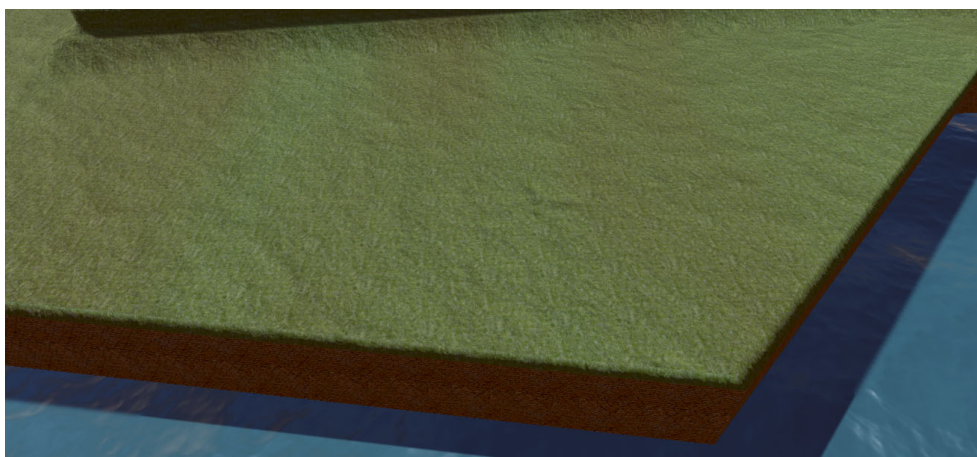
Obrázek 5.9: Srovnání shaderů cihel

5.3.2 Mitigace viditelnosti opakování textur

Přesto-že byly skoro vždy použity navazující - seamless textury, brzy se ukázalo, že obrovská plocha pevnosti zřetelně poukazuje na četné opakování identických textur, jako je tráva. Pro mitigaci nedostatku byl sestaven další, vlastní shader, který vykreslený povrch trávy na větším měřítku promíchával s náhodným, barevným šumem. Tato mitigace byla nutná pouze pro modely opevnění a větších budov. Mitigace viditelného opakování funguje díky zřetelně většímu měřítku opakování přidaného šumu. Tzn. jde o míchání dvou vizuálních artefaktů přes sebe v takovém měřítku, kdy do sebe nezapadají a navzájem se ruší.

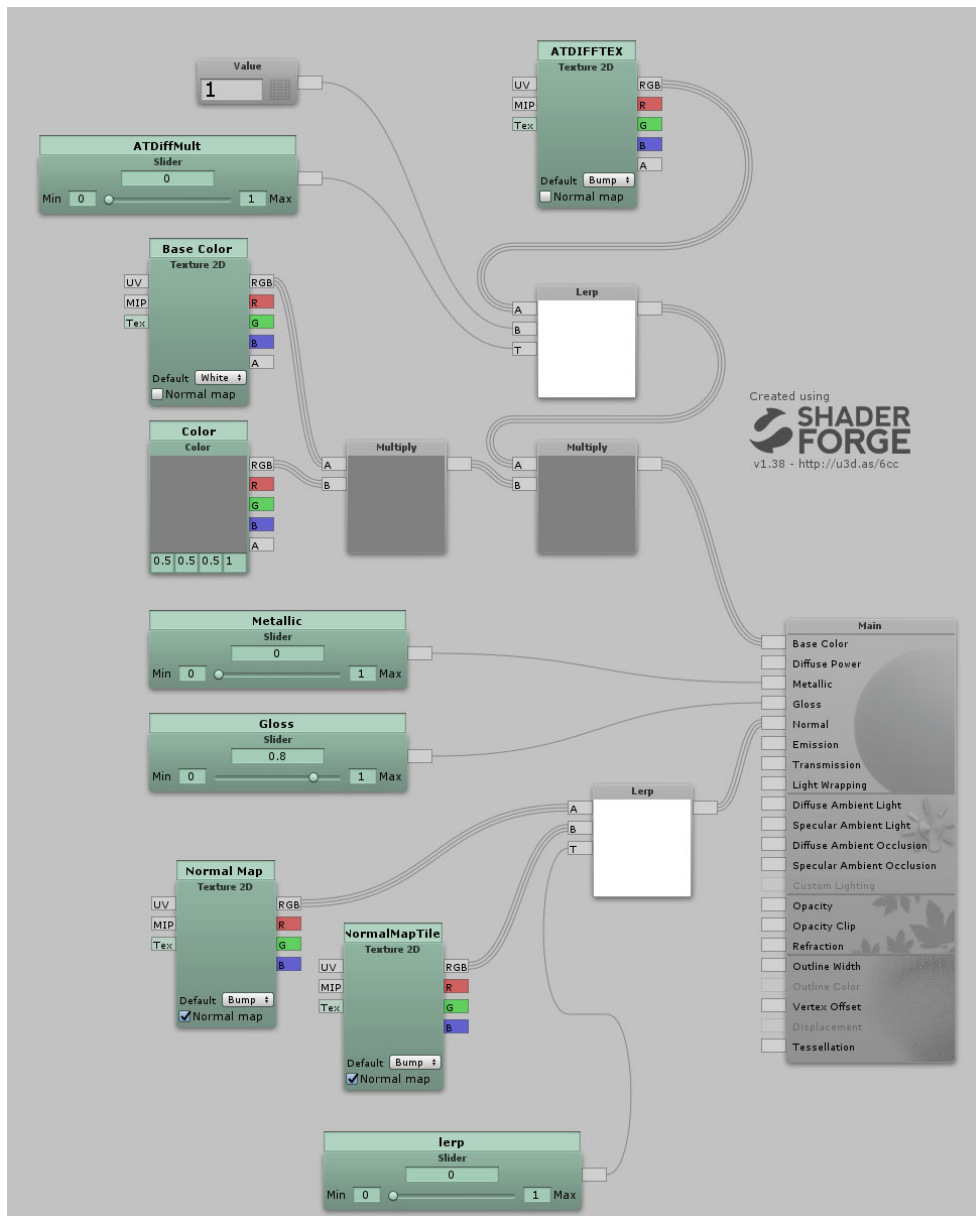


Obrázek 5.10: Opakování textury trávy



Obrázek 5.11: Míchání stejné textury trávy

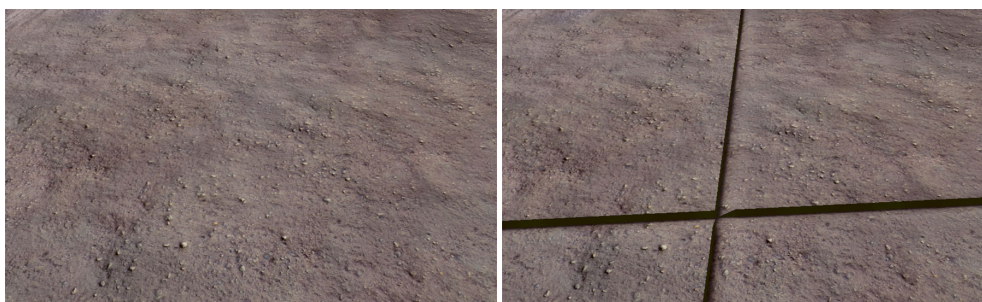
5.3. Speciální povrchy



Obrázek 5.12: Visuálně programovaný anti-tile PBR shader

5.3.3 Terén

Engine Unity má vlastní systém terénu, který byl až do nedávna silně zastaralý. Až s příchodem verze enginu 2018.3 se objevily nutné nástroje, jako je například návaznost více terénů. V případě implementace VR prohlídky pevnosti Terezín, se plocha celého okolí skládá z 9 terénů ve 3 x 3 mřížce. Bohužel se v použité verzi Unity vyskytuje chyba, která způsobuje, že po uložení scény jednotlivé segmenty terénů ztrácí návaznost. Chyba již byla nahlášena a nevyskytuje se v novějších verzích Unity.

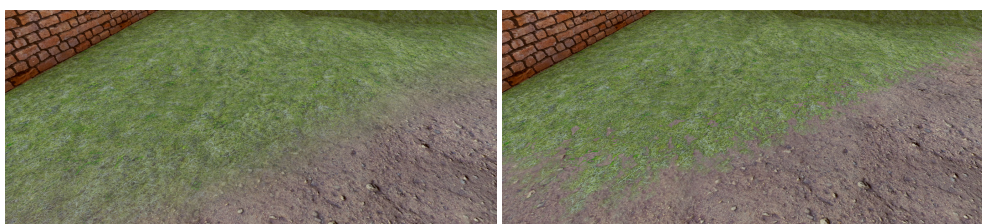


Obrázek 5.13: Návaznost jednotlivých terénů

Obrázek 5.14: Stejná oblast ihned po uložení scény

Dalším nedostatkem systému terénu je zpracování povrchových materiálů. Míchání textur terénu v Unity funguje lineárním zvyšováním průhlednosti až do ztracena a úplného přechodu na další texturu. To je použitelné jen pro povrchy, jako je například písek.

Daleko častěji je ale nutné míchat materiály pevným přechodem, například mezi kamenem a hlínou. Kámen by neměl ztrácet průhlednost. Proto byl použit Unity plugin MicroSplat. Plugin k lineárnímu míchání zároveň přičítá heightmapy povrchů. Výsledkem je následující srovnání.



Obrázek 5.15: Lineární míchání textur

Obrázek 5.16: Míchání heightmapami

Určitá míra lineárního přechodu je sice stále viditelná, ale v daleko menším množství.

Plugin MicroSplat zároveň ve svém rozšíření umožňuje automatizovaně bojovat s vizuálním artefaktem opakování textur na terénu podobným způsobem, jako je implementováno výše pro běžné povrchy.

5.4 Postavy

Realizace postav vychází z nabídky programu DAZ Studio, který disponuje několika univerzálními rigy postav, které lze editovat a exportovat ven pro další použití. Pro použití těchto modelů v interaktivních aplikacích, jako jsou počítačové hry, VR aplikace včetně, je nutné zakoupit pro konkrétní rig licenci v ceně 100 \$. V porovnání s alternativami, např. samotný software iClone 7, nabízející obdobné nástroje pro tvorbu 3D postav, začíná na 200 \$.

Co ale dělá tuto variantu řešení nejlepší, je balíček[22] 200 blend shapů pro poslední lidský rig Daz Studia, *Genesis 8*. Balíček je zdarma i pro komerční využití a obsahuje vše nutné k velmi jednoduché a rychlé tvorbě postav různých fyzických proporcí obou pohlaví, včetně obličejových emocí a animací mluvení.

„Nejlepším způsobem jak animovat emoce a různé mimické exprese je podle názoru studia blend shape animace.”[23] Tvrdí Anastasia Lenina po rozhovoru s odborníkem, Jiřím Bartoňkem ze společnosti Warhorse Studios, ve své bakalářské práci zaměřené na mimiku animovaných postav.

Rig postavy z DAZ Studia má plnou vlastní animační kostru, která je nekompatibilní s výše zmíněnou animační bankou Mixamo. Animační rig, který nabízí Mixamo, zase neumožňuje animaci částí obličeje pomocí kostí. Ale to jde na animační rig ručně přidat. Zachová se tak kompatibilita animací a dále lze využít plugin *Realistic Eye Movements*[24], zdarma dostupný na Unity Asset Store, který řeší dynamické animování očí, očních víček a hlavy.

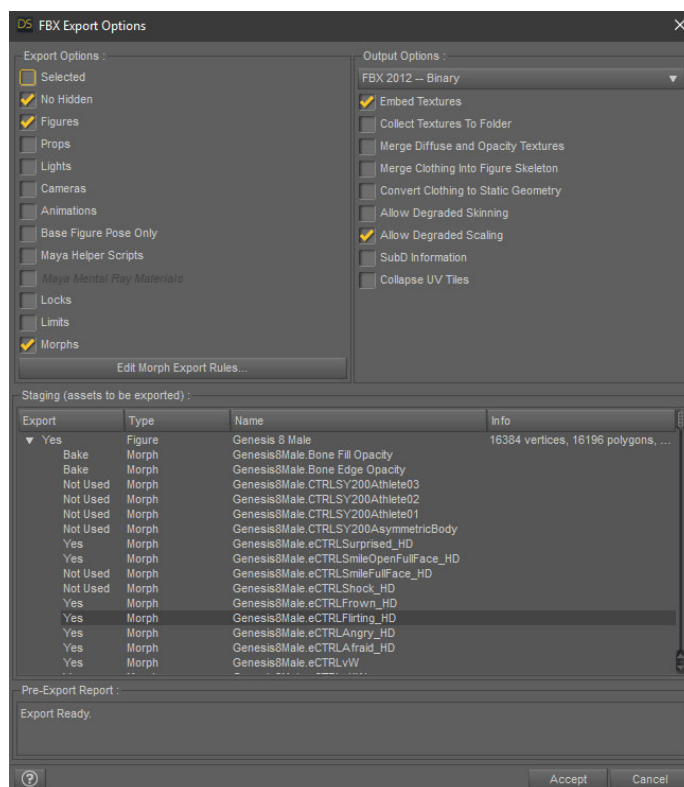
Z důvodů těchto návazností nezávislých součástí vznikla potřeba pro sestavení unikátního, výrobního procesu postavy od základního tvarování až po výsledné dynamické interakce.

Výsledkem tohoto procesu je plně animačně funkční, interaktivní postava včetně vlastního oblečení, animační databáze, obličejových emocí, dynamické oční mimiky a v několika texturových variacích, za méně než 150 \$ jednorázové platby a naměřené 4 hodiny práce pro vznik unikátního 3D modelu, který lze dále používat v různých variacích.

2. Export ve formátu .FBX

Po úspěšném modelování postavy je nutné vybrat, které blendshapy se zkombinují v neměnnou geometrii modelu a které blendshapy zůstanou dynamicky editovatelné pro další animování. V nabídce *Edit Morph Export Rules...* lze nastavit jednotlivé blendshapy do režimu *bake* pro označení neměnného zabezpečení geometrie, nebo *Yes* pro označení, že má dojít k exportu.

V případě této virtualizace bylo vybráno 25 specifických blendshapů pro další animování v herním engine, většina pro tvarování úst při mluvení. Výstupní formát .FBX dokáže tyto blendshapy exportovat, na rozdíl například od formátu .OBJ. Seznam vybraných blendshapů je na datovém nosiči přiloženém k této práci. Výsledné postavy nyní můžou zobrazit emoce a základně mluvit.



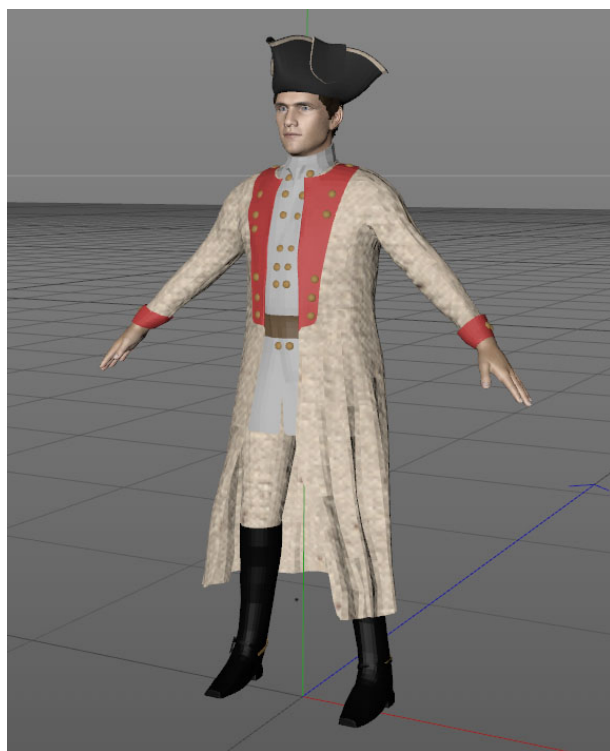
Obrázek 5.18: Nastavení exportu 3D modelu postavy z programu DAZ Studio

3. Zpracování výstupního modelu do univerzální podoby

Po exportu modelu je nutné ho zpracovat před vložením do systému Mixamo. Mixamo totiž nemůže navázat na již existující animační rig postavy a vyžaduje nulovou přítomnost cizích kostí na modelu. Proto musí v tomto kroku být odstraněny všechny stopy animačních kostí a k nim vázané kůže (tzv. skinning) na modelu.

Pokud tak nebylo učiněno v kroku 1, lze naposledy v tomto kroku postavu obléci a přidat vlasy. Zároveň lze odstranit polygony povrchu těla postavy, které nejsou vidět skrze oblečení. Lze odstranit pouze polygony. Pokud by se odstranily vertexy, naruší se tím fungování exportovaných blendshapů.

Dříve zmíněný princip LOD lze aplikovat i na postavy. Geometrii modelu postavy lze v tomto bodě destruktivně redukovat s účelem jeho použití na větší vzdálenosti. Ztracené blendshapy mimiky tak nevadí, protože by stejně nebyly vidět a neměly by být použity na větší vzdálenost. Jednotlivé modely stačí ponechat ve stejné pozici, kde se kříží. Systém Mixamo vytvoří společný animační rig pro všechny jednotlivé objekty modelu.



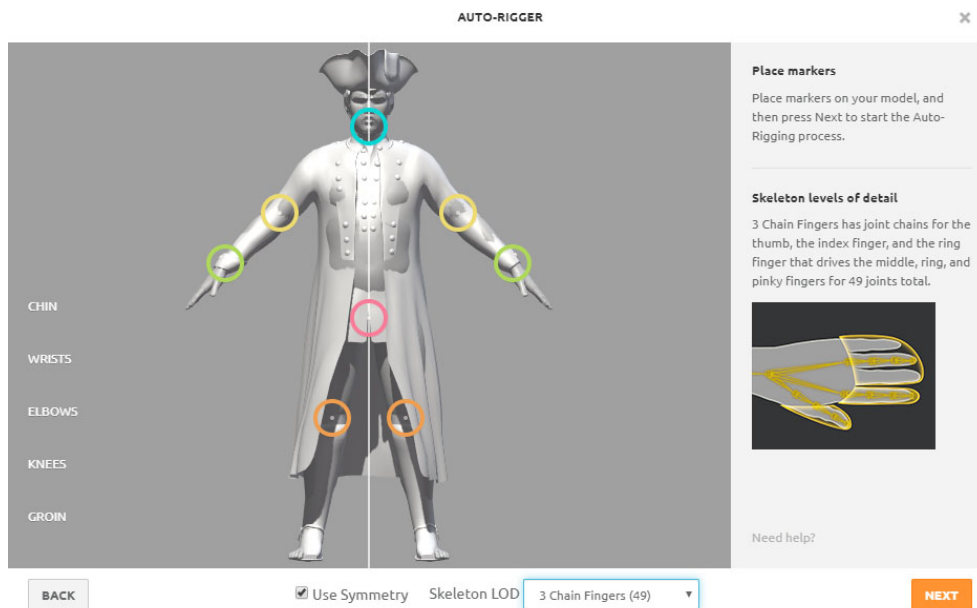
Obrázek 5.19: Oblečená postava bez animačního rigu

4. Druhý export v .FBX

Dalším krokem je druhý export vizuálně finálního modelu. **Pozor**, program Cinema4D má problém s exportem formátu .FBX. Systém Mixamo může hlásit, že v modelu je již existující kostra, přesto že není. Program Blender stejný problém nemá. Lze jej, nebo jiný 3D modelovací program použít pro opravu modelu importem ze Cinema4D a následným exportem, opět v .FBX.

5. Automatizované rigování systémem Mixamo

Systém Mixamo po nahrání 3D modelu provede své uživatele jednoduchým návodem, jak model zpracovat. Dle instrukcí uživatel označí specifické body na těle 3D modelu a po chvíli načítání je připraven model s animačním rigem. Při jedné z instrukcí lze vybrat, kolika kostmi budou tvořeny prsty rukou. Nižší počet kostí může snížit náročnost vykreslování.



Obrázek 5.20: Instrukce automatizovaného rigování modelu

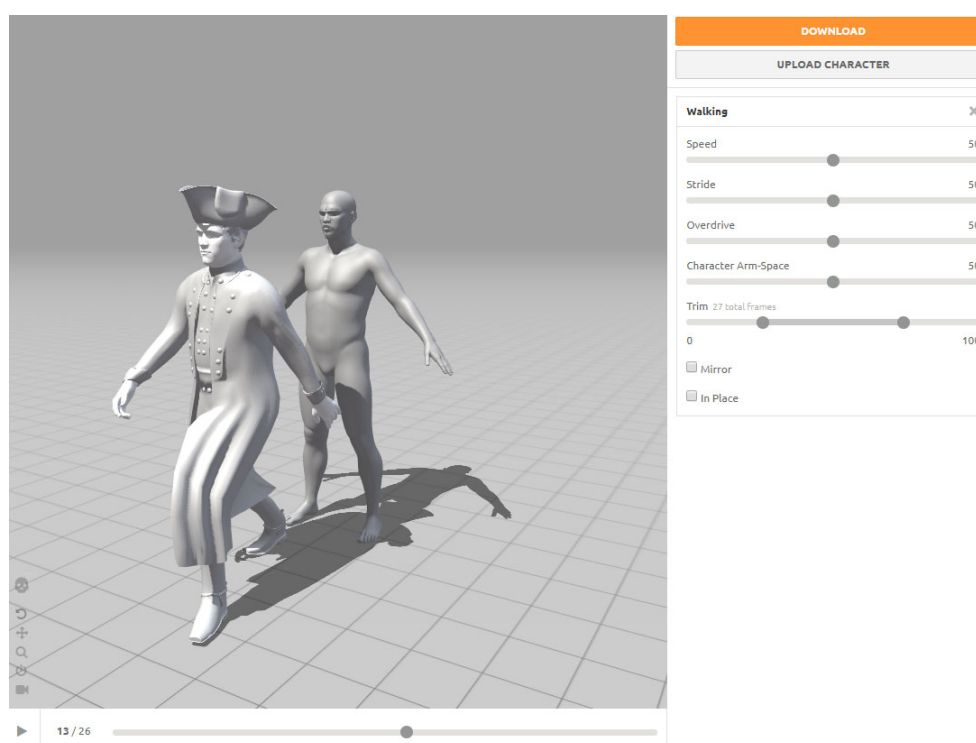
5. REALIZACE PROJEKTU

6. Animace

Následně lze v systému Mixamo vybrat a získat animace, které chceme na své postavě používat. Systém umožňuje vyhledávání ve své nabídce a drobné úpravy jak v průběhu animací, tak v jejich délce a návaznosti, pomocí posuvných měřítek na pravé straně.

Viditelný statický objekt původní postavy je reference blendshapů, jeho přítomnost v náhledu nevadí.

Následně lze získat buď 3D model s animačním rigem, nebo jednotlivé animace, které tento rig může použít. Soubory animací se dále importují přímo do enginu Unity.

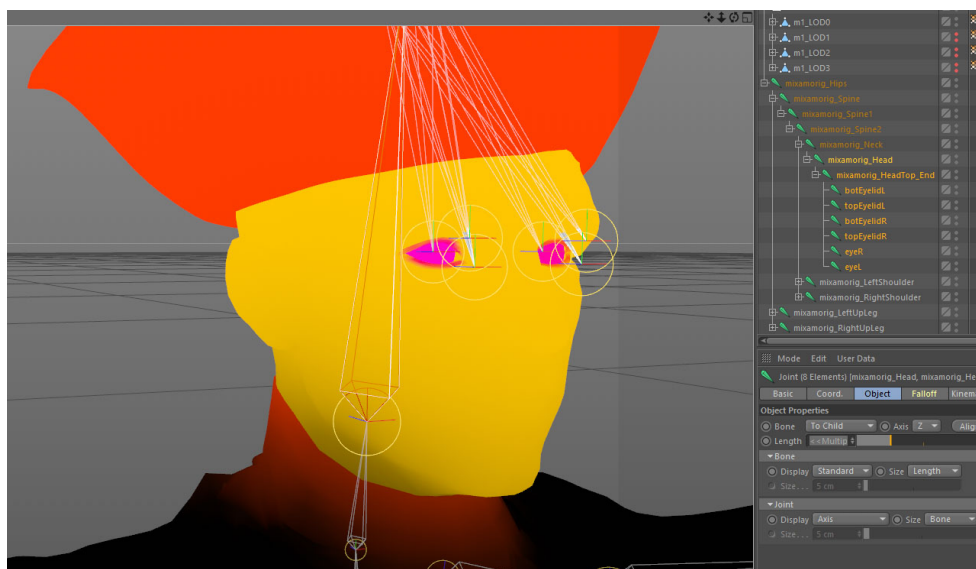


Obrázek 5.21: Náhled animace v aplikaci Mixamo

7. Zpracování modelu ze systému Mixamo

Proces rigování je automatizovaný. Nabízí pouze skoro perfektní výsledky. Může se stát, že váha kostí jedné nohy chybně přesáhne do váhy kostí druhé nohy. Jednotlivé kosti je dobré zkontrolovat a tyto nepřesnosti napravit. Podobné problémy způsobuje dlouhé oblečení postav.

Zároveň, systém Mixamo nepočítá s použitím oční animace pomocí kostí. Je nutné k existujícímu rigu Mixama přidat 6 vlastních kostí. 1 pro každé, celé oko v hlavě postavy. 1 pro vrchní část jednotlivých očních víček a 1 pro spodní část očních víček. Výsledný model se opět exportuje ve formátu .FBX.

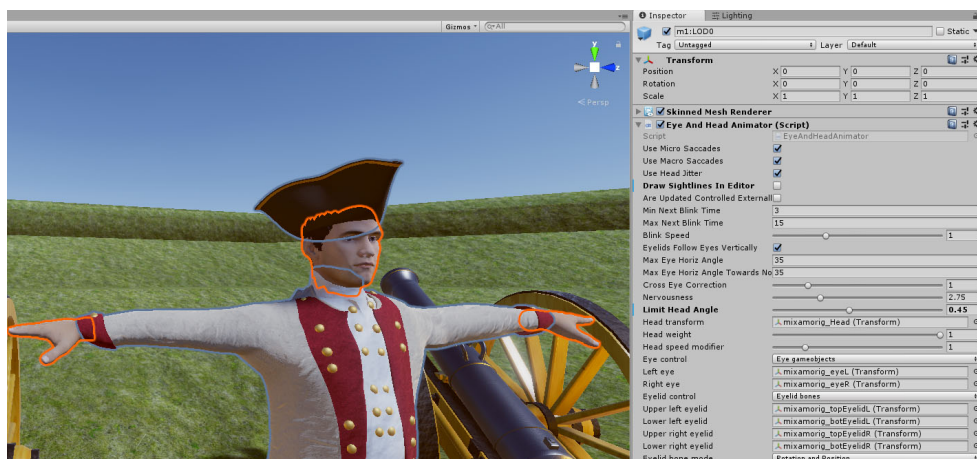


Obrázek 5.22: Náhled přidanych kostí očí postavy

5. REALIZACE PROJEKTU

8. Import do engine Unity

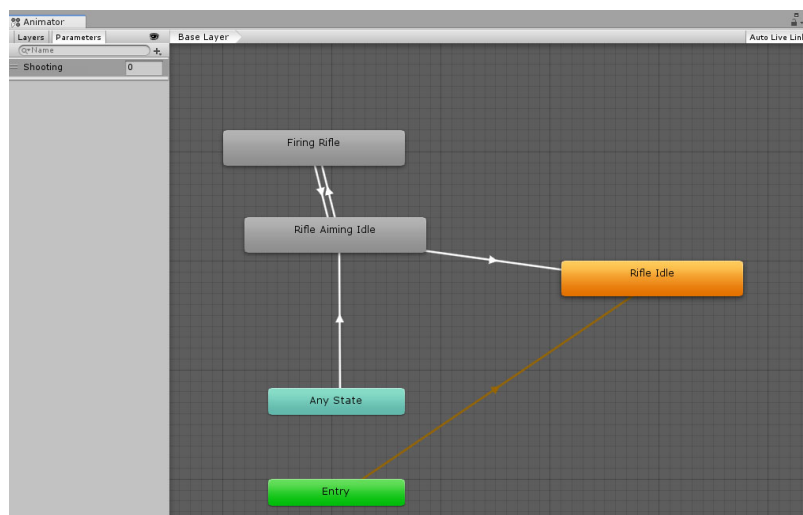
Výsledný model je kompletní a připravený pro import do engine Unity. Po vložení do scény lze na postavu aplikovat výše zmíněný plugin, který řeší dynamické chování očí. Dosazením kostí očí a víček do pluginu je postačující na funkční pozorování a mrkání postavy.



Obrázek 5.23: První náhled postavy v Engine a využití pluginu oční dynamiky

9. Animátor postav

Pomocí animátor systému v engine Unity lze na importované postavě přehrávat animace získané systémem Mixamo. Postup realizace animátoru závisí na konkrétnímu účelu postavy.



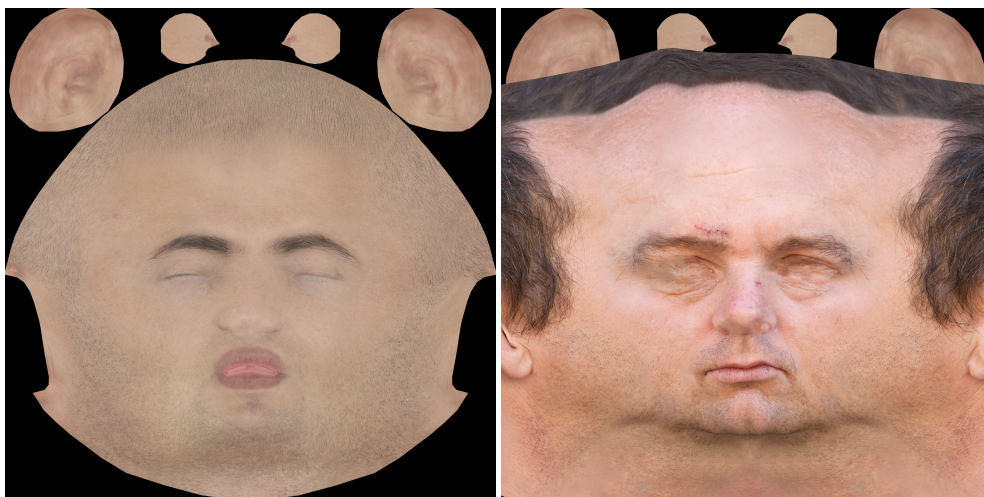
Obrázek 5.24: Přejchod animací postav během interakce

10. Textura obličeje

Pro dosažení většího množství unikátních postav efektivní rychlostí práce, lze obličejové textury v modelu poskytnuté DAZ Studiem nahradit. Pro účely projektu byl nakoupen balík focených obličejových textur na webu 3D.sk.

Tyto textury nesesděly přesně s UV mapováním DAZ Studia, ale to se dá vyřešit zkroucením a deformováním textury v rastrovém editoru.

Další způsob přidání variací je úprava měřítek ve výškové nebo současně v obou bočních osách. Zásah takovým způsobem nesmí být viditelně veliký. V případě zmenšení nebo zvětšení do 5% ve zmíněných osách, můžou vzniknout variace *plnějších* nebo *protáhlejších* těl a obličejů.



Obrázek 5.25: Výstup DAZ Studia Obrázek 5.26: Pokrytí texturou z 3D.sk

11. Inverzní kinematika

V případě, že to konkrétní použití vyžaduje, je posledním krokem nasazení systému inverzní kinematiky na importovanou postavu. Animace míření zbraní nebyla přizpůsobena řešenímu projektu. Proto musela být pozice vzdálenější ruky dynamicky dopočítána inverzní kinematikou, aby seděla na dlouhé, dobové pušce. V případě této práce byl použit systém FinalIK. Po aplikování komponentu *Full body biped IK* na objekt postavy systém automaticky doplní reference na jednotlivé kosti a je připraven k ovlivnění animací specifikovanými objekty.



Obrázek 5.27: Stejný model, různé textury - hněv, mračení a úsměv

5.4.1 Ovladač postav

Chování postav v enginu je nutné naprogramovat dle specifikací konkrétní virtualizace a tematiky. V případě projektu virtualizace Terezínu byly nutné vojenské postavy stojící v řadě, pouze čekající na povel. V případě nutnosti lze využít navigační systém enginu Unity, který umožní postavám dynamické hledání cest napříč celou scénou na základě předpočítaných oblastí.

5.5 Interakce

Interakce obsažené ve výsledné aplikaci se týkají animovaných postav a neživých věcí.

V jedné z lokalit řada vojáků stojí připravena k palbě. Vojáci čekají na povel návštěvníka. Ten zvedne ruku nad hlavu, vojáci zamíří a připraví se k palbě. Poté návštěvník pustí ruku k zemi a vojáci na tento povel jednotně spustí palbu.

Další interakcí s postavami je například salutování. Pokud postava není zrovna zaneprázdněna jiným úkolem a uživatel jí zasalutuje, postava zasalutuje zpět.

Implementace těchto interakcí je jednoduché srovnávání pozic rukou a hlavy návštěvníka. Pokud je vzdálenost ruky a hlavy malá, znamená to, že hráč salutuje. Jestli je pozice ruky nad pozicí hlavy, znamená to, že hráč dává povel k palbě.

Nedostatkem animování pouze pomocí animační databanky je nedostatek animací pro specifické úkony. V případě této ukázky nebyla k dispozici animace přebíjení pušky z 19. století.

Postavy zároveň interagují zpětně s uživatelem. Pokud nejsou zaneprázdněné, tak uživatele pozorují, otáčejí k němu hlavu a dívají se po něm očima. Zároveň mají na uživatele náhodnou šanci promluvit. Animované mluvení vychází pouze z náhodného míchání blendshapů jednotlivých stavů úst. Nejde o nahrávanou animaci věrohodného mluvení. Systém ale postačí pro vysvětlování základních instrukcí hráči přímo virtuálními postavami a lze ho doplnit o skutečné, mluvené slovo. Existují také systémy, které aproximují animaci úst z nahraného vstupního zvuku.

Příkladem implementované nelidské interakce s prostředím je možnost vystřelit si z dobového kanónu a pušky.

5.6 Optimalizace vykreslování

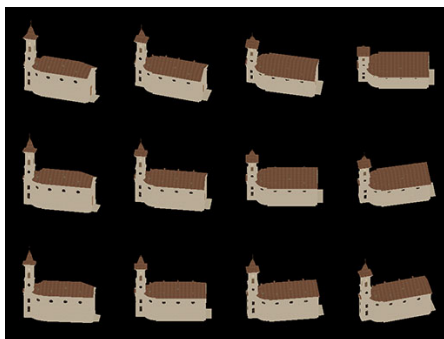
Všechny optimalizační techniky popsané v této kapitole jsou použity v ukázkové aplikaci virtualizace tereziánské pevnosti.

5.6.1 LOD

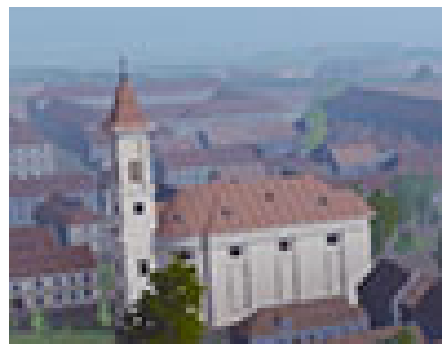
Běžným systémem optimalizace 3D modelů v interaktivní grafice je *LOD*. Systém Level of Detail předpokládá několik variant jednotlivých 3D modelů a celků, mezi kterými se dynamicky přepíná v závislosti na vzdálenosti uživatele nebo kamery od daného objektu. Vzdálené budovy nejsou dobře viditelné, obzvláště ve VR, z důvodu nedostatečného rozlišení dnešních VR headsetů. Je zbytečné modely vykreslovat v plném detailu a proto mohou být nahrazen méně komplexní kulisou.

5.6.2 Impostor

Pokračováním ve stejném duchu je systém takzvaných impostorů. Impostor systém k jednotlivým modelům a celkům předpřipraví vykreslené snímky z více úhlů pohledu. Místo 3D modelu se pak vykreslí pouze jednoduchá 2D plocha s texturou připomínající původní model.



Obrázek 5.28: Část 2D miniatur



Obrázek 5.29: Kostel z dálky

5.6.3 Single-pass rendering

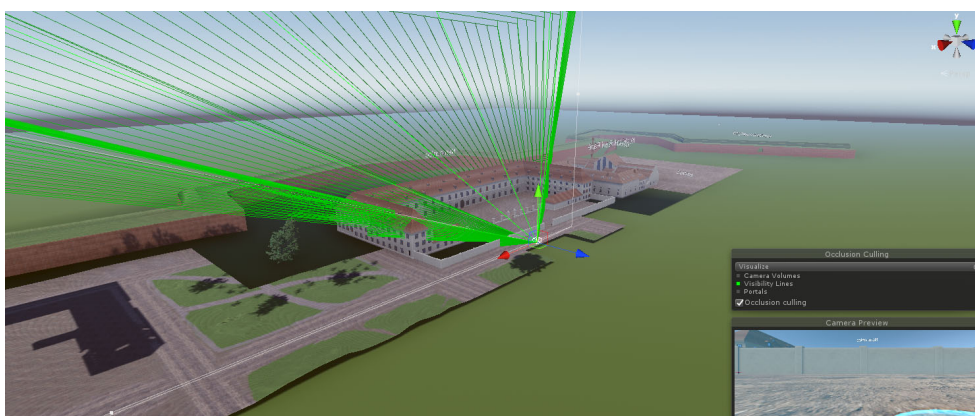
Engine Unity dále umožňuje v nastavení zapnout tzv. *single-pass rendering*. Při single-pass vykreslování pracuje engine s obrazy jednotlivých očí jako s jedním obrazem dvojnásobné šířky. Výhodou takového principu je sdílení výsledků výpočtu, které by se jinak prováděly identicky pro oba původní pohledy. Dle dokumentace Unity[25] jde o procesy, jako jsou culling nebo vykreslování stínů. Dále dochází k méně přepínání kontextů mezi vykreslováním jednotlivých objektů, protože GPU vykresluje objekty rovnou pro obě oči.

5.6.4 Occlusion culling

Další optimalizační technikou je předpočítané occlusion culling. Jde o proces, při kterém se z vykreslování snímku odstraní modely kompletně zakryté jinými modely blíže kameře. Implementace této techniky v Unity vyžaduje manuální nastavování parametrů. Předvýpočet je zdlouhavý pro rozsáhlé scény.



Obrázek 5.30: Původní scéna



Obrázek 5.31: Objekty skutečně použité během vykreslování snímku

Výsledky práce

6.1 Plynulost

Jedním z požadavků v zadání práce je plynulost běhu aplikace. Při testování byl použit VR Headset - *Samsung Odyssey+* s obnovovací frekvencí 90 Hz a počítač s grafickou kartou Nvidia GTX 1080ti a procesorem Ryzen R7 - 1700. Měření fps proběhlo nástrojem *fpsVR*.

VR aplikaci lze považovat za plynulou ve dvou úrovních.

1. vykreslování v nativní obnovovací frekvenci VR brýlí
2. vykreslování při obnovovací frekvenci ASW

První varianta plynulosti je preferovaným cílem.

Nativní obnovovací frekvence vyžaduje méně než 11.1 ms času pro vykreslení snímku. Softwarová mezivrstva SteamVR, která zprostředkovává propojení VR aplikace a VR brýlí, může aplikacím měnit dynamicky rozlišení. Přestože má zařízení rozlišení panelů 1440 x 1600 pro každé oko, SteamVR prostředí při manuálně nastaveném 100 % rozlišení vykresluje 1427 x 1778 pixelů pro každé oko.

Testování bylo provedeno v nejnáročnější scénérii celé aplikace - pohled z výšky ve středu virtuálního města. Jedna z optimalizačních technik, occlusion culling, při takovém pohledu nemůže plně fungovat, protože každý model scenerie je alespoň zčásti viditelný.

Při 100 % rozlišení aplikace udržela bez potíží stabilních 90 fps.

Aplikace dále udržela stále stabilních 90 fps až do zvýšení rozlišení na 180 % - 1915 x 2385. Zároveň lze rozlišení zvýšit až na 300 %, 2472 x 3080, při 45 fps vykreslovacím režimu s použitím Asynchronous Spacewarp.

Dále byla aplikace testována na notebooku s úspornou verzí GTX 1080 grafické karty. Úsporné verze grafických karet nejsou stejně výkonné jako jejich normální verze, protože musí vyvažovat svou spotřebu v poměru s výkonem.

6. VÝSLEDKY PRÁCE



Obrázek 6.1: Původní scéna

I přesto mobilní GTX 1080 udržela 90 fps obnovovací frekvenci jen s občasnými úpadky na 85 fps při 100 % vykreslovacím rozlišení.

Méně výkonné grafické karty by při vykreslování aplikace použily buď z části, nebo úplně vyhlazovací techniky, jako je *ASW*. Přesto-že testovaný hardware je výkonný, nejde o ty úplně nejvýkonnější a nejdražší možnosti na trhu. Zároveň aplikace dle těchto výsledků plynule funguje na cílené, počítačové sestavě ve městě Terezín.

Aplikace tedy splňuje požadavek plynulosti.

6.2 Snímky



Obrázek 6.2: Centrum města



Obrázek 6.3: Pohled na celou virtualizaci



Obrázek 6.4: Voják



Obrázek 6.5: Kostel z pohledu první osoby

6.3 Nadstavby

V průběhu vývoje se vyskytly možnosti vylepšení realizace, které byly zváženy a prozkoumány, ale ve výsledné implementaci aplikovány nebyly. Využití těchto nadstaveb ale může být nezbytně nutné nebo přínosné v případných dalších virtualizacích.

6.3.1 Sub-surface scattering

Povrch kůže postavy vyskytující se v ukázkové aplikaci je vykreslen s využitím standardního, univerzálního shaderu Unity. Pro zvýšení věrohodnosti zážitku lze pro vykreslení kůže použít komplexnější shader využívající efektu Sub-surface scattering.

Efekt simuluje chování světla pod povrchem objektu.[26] Engine Unity efekt nabízí v nové HDRP verzi projektů, ale to je v době psaní této práce oficiálně nekompatibilní s vykreslováním do virtuální reality.

Existují komerční řešení efektu, kterými se dá oficiální implementace nahradit. Cenou se pohybují v řádu několika desítek dolarů.

6.3.2 Lightmap baking

Simulace osvětlení v dynamicky vykreslované grafice prioritizuje rychlost před kvalitou. Kvalita se ale bez přílišného vlivu na rychlost vykreslování dá získat zapékáním (předpočítáním) osvětlení do map osvětlení - *lightmapy*. Lepší kvality tak lze dosáhnout, protože lightmapy kromě přesnějšího, klasického stínování zároveň řeší i globální illuminaci a ambient occlusion.

Kromě zvýšení kvality lze také dosáhnout další výkonnostní úspory. Pokud jde čistě o statické objekty, jako jsou budovy, lze vycházet pouze z těchto neměnných lightmap a vynechat přitom úplně dynamické vykreslování stínů. Takové statické osvětlení je nezbytné v extrémních případech optimalizace, jako jsou např. mobilní zařízení.

Problematiké je generovat lightmapy pro rozsáhlý terén. V případě implementované lokality jde o kombinaci 9 terénů, proto realizace statického osvětlení nebyla v případě této scenérie ideální. Ale technika může přinést velkou úsporu při menších scénách nebo obzvláště v interiérech.

Unity nabízí vlastní varianty implementace. První z nich počítá výpočetně velmi rozsáhlé kalkulace na procesoru počítače. Takový princip sice funguje bez chyb, ale je extrémně pomalý[27] a trvá řádově i hodiny pro jedinou, komplexní budovu. V případě celé scény je doba trvání výpočtu zdánlivě neměřitelná. Unity zároveň neobsahuje žádnou variantu segmentování výpočtů do menších částí.

Nově engine Unity obsahuje vlastní implementaci předpočítávání osvětlení pomocí grafické karty. Grafická karta je k řešení této problematiky mnohem lépe přizpůsobena a funguje daleko rychleji. Bohužel ale jde zatím o nesta-

6. VÝSLEDKY PRÁCE

bilní implementaci, která nebyla funkční pro rozsáhlou scénu. Problém nebyl s časem, nýbrž se selháním celého systému a následným přechodem na funkční, ale pomalý původní systém běžící na procesoru.



Obrázek 6.6: Původní scéna



Obrázek 6.7: Stejný pohled s předpočítaným osvětlením

6.4 Závěr

Cílem práce byla analýza možných způsobů vytváření vzdělávacího obsahu pro VR a ověření konkrétní implementace obsahující věrohodné prostředí, animované postavy a interakce.

V práci byly analyzovány běžné formy tvorby grafických podkladů a prostředí pro aplikace ve virtuální realitě. Byly zhodnoceny jejich jednotlivé výhody a nedostatky. Následně byl vybrán způsob realizace pro konkrétní, ukázkovou VR aplikaci zaměřenou na prezentaci historické památky. Aplikace se zároveň dále snaží virtualizaci oživit dobovými postavami a interakcemi.

Největší výzvou se ukázaly intriky propojování jednotlivých funkcionalit programů a doplňků. K sestavení takového postupu není jasná nebo jinde popsaná cesta úspěchu a muselo se objevovat, zkoušet a hledat. Některé jednotlivé části postupu by šly sjednotit ve specializovaných programech, ale pouze za předpokladu silné finanční podpory a odborné znalosti konkrétního vývojářského prostředí.

Postup navržený v této práci je jednoduše dělitelný a jednotliví přispěvatelé nemusí mít znalosti v několika oblastech vývoje, aby dokázali pomoci při realizaci větších projektů. Z těchto důvodů je aplikovaný postup možné dále použít při spolupráci více škol a entit se společným cílem tvorby edukativního, nebo i zábavného obsahu.

Přesto že nalézt a rozebrat jednotlivé postupy byl komplexní úkol, velikost vybrané scény projektu se ukázala jako nejvíce problematická podmínka realizace. Velké množství vstupních modelů znamená více práce s materiály, spoustu generování optimalizovaných verzí modelů, delší aranžování scény a v neposlední řadě tak došlo i ke znemožnění některých postupů, jako zapékání světelných map nad celou scénou. Zároveň velikost scény vyžaduje řešení optimalizace už od samého začátku realizace. V případě menší plochy by se dalo vytvořit kvalitní nebo i lépe vypadající obsah s téměř nulovou optimalizací.

V budoucnu může být dosaženo lepších výsledků, pokud se práce jednotlivých oblastí rozloží mezi více řešitelů. Jednotlivé části realizace na sobě nejsou příliš závislé a takový rozklad může fungovat bez přílišné synchronizace a organizace práce.

Virtualizace vybraného prostředí pokračuje mimo rozsah této práce a výsledná podoba aplikace bude k vidění ve městě Terezín, kde dále plní svůj účel popularizace této památky. Konkrétně s cílovou skupinou studentů základních a středních škol z okolních měst.

Literatura

- [1] Rowell, M.: VR Video Formats Explained. 1 2019. Dostupné z: <https://360labs.net/blog/vr-video-formats-explained>
- [2] Photogrammetry – 3D scanning with just your phone/camera. 3 2018. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/photogrammetry-3d-scanning-just-phone-camera/>
- [3] Oculus: Publishing to Oculus Video. 1 2019. Dostupné z: <https://creator.oculus.com/distribute/oculus-video/>
- [4] Melnick, K.: HTC's '6DOF Lite' Mode Adds Volumetric Depth To 360 Video. 3 2019. Dostupné z: <https://vrscout.com/news/htc-dof-lite-adds-depth-360-video/>
- [5] Geographic, N.: 360 Video: Viking and Slav Reenactors Face Off in an Epic Battle. 1 2017. Dostupné z: <https://news.nationalgeographic.com/2017/02/viking-warriors-battle-reenactment-360-vr/>
- [6] Tricart, C.: *Virtual Reality Filmmaking: Techniques & Best Practices for VR Filmmakers*. Taylor & Francis, 2017, ISBN 9781315280394. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=FN5CDwAAQBAJ>
- [7] Hayden, S.: Photorealistic VR Tour 'Nefertari: Journey to Eternity' Takes You Deep into a 3,000 Year-old Egyptian Tomb. 6 2018. Dostupné z: <https://www.roadtovr.com/photorealistic-vr-tour-nefertari-journey-eternity-takes-deep-3000-year-old-egyptian-tomb/>
- [8] Matej, O.: VR prohlídka koncentračního tábora Aauschwitz-Birkenau. 2018, bakalářská práce.
- [9] Historium: Go back in time and step into medieval Bruges with virtual reality. 1 2017. Dostupné z: <http://historiumvr.com/>

- [10] cgostudios: The Wright Brothers First Flight. 1 2017. Dostupné z: <http://cgostudios.com/wrightbrothers/>
- [11] Jason Jerald, P.: *The VR Book*. ACM Books, 2016, ISBN 978-1-97000-112-9.
- [12] Davis, J.; Hsieh, Y.-H.; Lee, H.-C.: Humans perceive flicker artifacts at 500 Hz. *Scientific Reports*, ročník 5, Feb 2015: s. 7861 EP –, article. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep07861>
- [13] HEANEY, D.: Editorial: Foveated Rendering Is Essential To Consumer VR's 2nd Generation. 3 2019. Dostupné z: <https://uploadvr.com/foveated-rendering-matters/>
- [14] eVRydayVR: New features of the Oculus Rift. 1 2014. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=HoLHHUdi_LE&feature=youtu.be&t=5m43s
- [15] Carmack, J.: Latency Mitigation Strategies. 7 2014. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20140719085135/http://altdev.co/2013/02/22/latency-mitigation-strategies/>
- [16] HEANEY, D.: VR Timewarp, Spacewarp, Reprojection, And Motion Smoothing Explained. 1 2019. Dostupné z: <https://uploadvr.com/reprojection-explained/>
- [17] Heiniger, M.: Low Cost Facial Scanning Using Photogrammetry in 'State of Decay 2'. 3 2019. Dostupné z: <https://schedule.gdconf.com/session/low-cost-facial-scanning-using-photogrammetry-in-state-of-decay-2/863963>
- [18] JMathews: Licensing, Royalties, Ownership, EULA and TOS Q&A. 3 2018. Dostupné z: <https://forums.adobe.com/thread/1992542>
- [19] Paul, R.: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control : the Computer Control of Robot Manipulators*. MIT Press series in artificial intelligence, MIT Press, 1981, ISBN 9780262160827. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=UzZ3LAYqvRkC>
- [20] nuFF3: Relief Mapping with correct silhouettes. 8 2016. Dostupné z: <http://neatcorporation.com/forums/viewtopic.php?t=1975>
- [21] roguesleipnir: Shader Forge 1.38 working for Unity 2018.3. 12 2018. Dostupné z: <https://github.com/roguesleipnir/ShaderForge>
- [22] SY 200 Morphs for Genesis 8 Head and Body. 5 2018. Dostupné z: <https://sharecg.com/v/91888/browse/21/DAZ-Studio/SY-200-Morphs-for-Genesis-8-Head-and-Body>

- [23] Lenina, A.: Snímání obličeje pro 3D charakterovou animaci. 2018, bakalářská práce.
- [24] Realistic Eye Movements. 5 2018. Dostupné z: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/realistic-eye-movements-29168>
- [25] Unity: Single Pass Stereo rendering. 5 2019. Dostupné z: <https://docs.unity3d.com/Manual/SinglePassStereoRendering.html>
- [26] Lammers, K.: *Unity Shaders and Effects Cookbook*. Packt Publishing, 2013, ISBN 9781849695091. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=0513h2YE1-UC>
- [27] Tuttle, J.: GPU Lightmapping. 8 2018. Dostupné z: <https://medium.com/@JasonTuttle/gpu-lightmapping-c1d706599212>

Seznam použitých zkratk

VR Virtual reality - virtuální realita

FPS Frames per second - snímky za vteřinu

ATW Asynchronous timewarp

SDK Software development kit

GDC Game Developers Conference

LOD Level of detail

GPU Graphics processing unit

PBR Physically based rendering - konkrétní způsob vykreslování povrchů 3D modelů s pomocí specifických map

Seznam použitých pojmů

- bitrate** rychlostní jednotka datového přenosu
- textura** data barevné složky povrchu, obvykle uloženo ve formě obrazového souboru
- mapa** data jiná než-li barvová, použité při vykreslování povrchů nebo jiných grafických operací, obvykle uložena ve formě obrazového souboru
- heightmapa** příklad mapy, v jednotlivých pixelech drží hodnotu výšky povrchu
- depth buffer** snímek s hodnotou vzdáleností vykresleného povrchu od pozice kamery, místo barevných dat v pixelu
- vertex** datový kontejner, často reprezentován bodem v prostoru
- polygon** víceúhelník definován vertexy umístěnými v prostoru
- motion blur** efekt simulující rozmazání za nebo v okolí rychle se pohybujících objektů
- engine** univerzální část nebo nástroj poskytující opakovaně základní funkcionalitu pro různé programy
- Unity** nejrozšířenější herní engine
- Unity Asset Store** internetový obchod pro nákup a prodej doplňujícího digitálního obsahu k hernímu enginu Unity
- Cinema4D** program určený mimo jiné pro vytváření 3D modelů
- Blender** program určený mimo jiné pro vytváření 3D modelů
- rig** distinkce a návaznost jednotlivých částí většího celku využita pro animování

B. SEZNAM POUŽITÝCH POJMŮ

fragmenty funkčně podobné *pixelům*, ale jde o nefinální *pixely*, se kterými se ještě pracuje v průběhu vykreslování snímku

triangulace rozdělení polygonu na trojúhelníky

draw call vykreslení části nebo celého 3D modelu do snímku

materiál kolekce proměnných hodnot reprezentující povrch, které jsou předány shaderu

shader program zpracovaný grafickou kartou

UV mapování způsob pokrytí 3D modelu 2D povrchem

tiling viditelné opakování stejných částí povrchu

blendshape princip dynamické deformace 3D modelu dle předpřipravené předlohy

zapékání jednorázová předpříprava data pro pozdější, opakované použití

Obsah přiloženého datového nosiče

	readme.txt	popis obsahu
	TerezinVR.zip	archiv se spustitelnou formou implementace
	src	zdrojové soubory implementace
	text	
	thesis.pdf	text práce ve formátu PDF
	tex.....	zdrojová forma práce ve formátu L ^A T _E X