VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

UPORABA FOTOGRAMETRIJE ZA USTVARJANJE VIRTUALNIH SCENOGRAFIJ V VIDEOPRODUKCIJI

Kandidat: David Čeh

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Medijska produkcija

Mentor predavatelj: mag. Rene Maurin

Mentor v podjetju: Vanesa Mohorič, dipl. obl. tekst. in obl. (UN)

Lektor: Vojka Havlas, prof. slov.

Maribor, 2026

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani David Čeh sem avtor diplomskega dela z naslovom Uporaba fotogrametrije za ustvarjanje virtualnih scenografij v videoprodukciji, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Reneja Maurina.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, julij 2026 Podpis študenta:

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, mag. Reneju Maurinu, za vso pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Največja zahvala gre moji mami za neomajno podporo skozi celoten študij. In atiju — v spomin nanj, ki bi bil vesel tega dela.

Hvala bratu in moji punci, ker sta mi stala ob strani in verjela vame.

Hvala vsem predavateljem in zaposlenim na Višji strokovni šoli Academia Maribor za podano znanje, prijaznost in vse izkušnje, ki so me oblikovale na moji poti.

POVZETEK

V diplomski nalogi sem raziskal uporabo fotogrametrije za ustvarjanje virtualnih scenografij v videoprodukciji. Osrednji namen naloge je bil ugotoviti, ali je mogoče s prosto dostopnimi orodji in osnovno fotografsko opremo zgraditi virtualno scenografijo, ki bi prepričljivo nadomestila snemanje na realni lokaciji. Problem sem prepoznal v razkoraku med profesionalno prakso, ki se opira na drago specializirano tehnologijo in visoke proračune, ter možnostmi neodvisne produkcije, kjer so sredstva omejena, oprema skromnejša, ekipa pa majhna ali celo enočlanska.

V teoretičnem delu sem opredelil virtualno produkcijo kot sodobni produkcijski pristop, opisal njen zgodovinski razvoj in tri prevladujoče pristope, nato pa predstavil fotogrametrijo kot metodo tridimenzionalne rekonstrukcije resničnega sveta. Obravnaval sem njeno uporabo v filmski in medijski produkciji, primerjal programska orodja, ki so na voljo za fotogrametrični zajem, ter utemeljil izbiro orodja za svoj eksperiment.

V praktičnem delu sem izvedel eksperiment, pri katerem sem z digitalnim fotoaparatom fotogrametrično zajel dva objekta. Iz fotografij sem v programu RealityScan rekonstruiral tridimenzionalna modela, ju očistil in optimiziral ter v pogonu Unreal Engine 5 sestavil v virtualno scenografijo. Pred zelenim ozadjem sem posnel tudi osebo in jo s kompozitingom vstavil v sceno. Rezultat sem nato primerjal z referenčnimi posnetki realnih lokacij in vizualno prepričljivost ocenil po štirih vnaprej določenih merilih.

Ugotovil sem, da je s prosto dostopnimi orodji mogoče doseči visoko stopnjo vizualne prepričljivosti, vendar je rezultat odvisen od obsega in gostote zajema, ne pa od lastnosti glavnih materialov. V celoti zajeti objekt je dosegel višje ocene od delno zajetega. Pri slednjem je bila tekstura manj ostra, ker sem mu namenil manj časa in manj bližnjih posnetkov. Kot največja prednost se je izkazala fleksibilnost v postprodukciji, saj sem iz istega modela brez vračanja na lokacijo ustvaril različne kadre, osvetlitve in gibanja kamere. Pristop se je izkazal tudi za stroškovno dostopnega, saj sem uporabil izključno brezplačne programe in opremo, ki sem jo že imel, zahteval pa je precejšen, a enkraten vložek v učenje.

Ključne besede: *fotogrametrija, virtualna produkcija, virtualna scenografija, Unreal Engine, RealityScan, videoprodukcija.*

ABSTRACT

The use of photogrammetry for creating virtual scenography in video production

In this thesis, I explored the use of photogrammetry for creating virtual scenography in video production. The main aim was to determine whether freely available tools and basic photographic equipment could produce a virtual scenography that convincingly replaces filming on location. I identified the problem in the gap between professional practice, which relies on expensive specialised technology and large budgets, and independent production, where resources, equipment, and crew size are far more limited.

In the theoretical part, I defined virtual production as a contemporary production approach, described its historical development and three prevailing approaches, and then presented photogrammetry as a method of three-dimensional reconstruction of the real world. I examined its use in film and media production, compared the software tools available for photogrammetric capture, and justified the choice of tool for my experiment.

In the practical part, I carried out an experiment in which I used a digital camera to photogrammetrically capture two structures. From the photographs, I reconstructed two three-dimensional models in RealityScan, cleaned and optimised them, and assembled them into a virtual scenography in Unreal Engine 5. I also filmed a person in front of a green screen and composited them into the scene. I then compared the result with reference footage of the real locations and assessed the visual convincingness according to four predefined criteria.

I found that freely available tools make it possible to achieve a high level of visual believability, but the result depends on the extent and density of capture rather than on the properties of the main materials. The object captured in full achieved higher scores than the partially captured one. For the latter, the texture was less sharp because I devoted less time and fewer close-up shots to it. The greatest advantage was flexibility in post-production, as I created various shots, lighting setups, and camera movements from the same model without returning to the location. The approach also proved cost-effective, since I used exclusively free programs and equipment I already owned, although it required a considerable but one-time investment in learning.

Keywords: *photogrammetry, virtual production, virtual scenography, Unreal Engine, RealityScan, videoproduction.*

KAZALO VSEBINE

1 UVOD 8

1.1 Opis področja in opredelitev problema 8
1.2 Namen, cilji in osnovne trditve 9
1.3 Predpostavke in omejitve 10
1.4 Uporabljene raziskovalne metode 11

2 VIRTUALNA PRODUKCIJA IN FOTOGRAMETRIJA 12

2.1 Virtualna produkcija kot sodobni produkcijski pristop 12
2.2 Pristopi virtualne produkcije 15
2.3 Fotogrametrija v kontekstu virtualne produkcije 18
2.3.1 Fotogrametrija kot metoda posnemanja realnega sveta 18
2.3.2 Uporaba fotogrametrije v filmski in medijski produkciji 20
2.3.3 Primerjava programske opreme za fotogrametrijo 23

3 PROCES IZDELAVE VIRTUALNE SCENOGRAFIJE S FOTOGRAMETRIJO 27

3.1 Zasnova eksperimenta in izbira lokacij 28
3.2 Snemanje referenčnega videa na realni lokaciji 31
3.3 Postopki pridobivanja podatkov za fotogrametrijo 32
3.4 Obdelava in optimizacija 3D-modelov 35
3.5 Čiščenje in popravki modela 37
3.6 Sestava virtualne scenografije 39
3.7 Končna obdelava in vizualna integracija 41
3.8 Snemanje pred zelenim ozadjem in kompoziting 42

4 ANALIZA IN PRIMERJAVA 45

4.1 Metodološki pristop k analizi 45
4.2 Vizualna primerjava virtualne scenografije z realnim posnetkom 46
4.3 Fleksibilnost v postprodukciji 49
4.4 Produkcijska učinkovitost (čas, stroški) 51
4.5 Omejitve in prednosti v primerjavi z realno lokacijo 53

5 SKLEP 55

6 LITERATURA IN VIRI 58

7 PRILOGE 62

KAZALO SLIK

Slika 1: Primerjava tradicionalnega linearnega in vzporednega cevovoda virtualne produkcije 13
Slika 2: Posnetek s snemanja filma The Jungle Book 15
Slika 3: Potek dela fotogrametrije na osnovi SfM-MVS 19
Slika 4: Snemanje na LED-volumnu s fotogrametričnimi sredstvi 22
Slika 5: Trije pogledi na fotogrametrično rekonstrukcijo kapele Mosta 23
Slika 6: Programsko okolje RealityScan 24
Slika 7: Starejša vikend hiša 29
Slika 8: Marijin kip v notranjem dvorišču Ptujskega gradu 30
Slika 9: Snemanje referenčnega posnetka za eksperiment 32
Slika 10: Fotografiranje za fotogrametrični model na prvi lokaciji 33
Slika 11: Pogled od zgoraj na razporeditev posnetkov okrog objekta. 34
Slika 12: Obdelava surovih fotografij v programskem okolju RapidRAW 35
Slika 13: Oblak točk v programskem okolju RealityScan 37
Slika 14: Beli artefakti v programskem okolju Blender 38
Slika 15: Fotogrametrični model vikenda, umeščen v sestavljeno sceno 40
Slika 16: Barvno usklajevanje virtualnega kadra v programu DaVinci Resolve 42
Slika 17: Prikaz osebe, posnete pred zelenim zaslonom, in fotogrametrične scenografije 43
Slika 18: Postavitev osebe v sceni programa Unreal Engine 5 44
Slika 19: Neposredna primerjava realnega posnetka (levo) in virtualne upodobitve (desno) 48

KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava fotogrametrične programske opreme 25
Tabela 2: Ocene vizualne prepričljivosti primerjalnih kadrov po štirih merilih 47

1 UVOD

V diplomski nalogi se posvečam uporabi fotogrametrije za ustvarjanje virtualnih scenografij v videoprodukciji. Med študijem sem opazil, da profesionalni studii, od velikih produkcij do neodvisnih ekip, vse pogosteje posegajo po virtualni produkciji kot alternativi klasičnemu snemanju. Zanima me, ali je mogoče s prosto dostopnimi orodji doseči vizualno prepričljiv rezultat in pri tem osvojiti celoten proces od zajema realne lokacije do končne podobe v virtualni scenografiji.

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Filmske in televizijske produkcije z zahtevnimi vizualnimi okolji se danes vse pogosteje odločajo za pristope, pri katerih digitalna okolja niso omejena le na postprodukcijo, ampak so integrirana v sam proces snemanja. Filmski ustvarjalci resnične igralce in fizične rekvizite kombinirajo z računalniško ustvarjenimi prostori, pri čemer gledalec v končni podobi razlike pogosto sploh ne zazna. Ta pristop, znan kot virtualna produkcija (*virtual production*), odpira nove možnosti pri načrtovanju prizorišč, osvetlitve in atmosfere ter premešča ključne kreativne odločitve iz postprodukcije v zgodnejše faze procesa.

Ena izmed metod, ki omogočajo prenos resničnega sveta v digitalno obliko, je fotogrametrija (*photogrammetry*). S to tehniko iz množice prekrivajočih se fotografij neke lokacije ali objekta algoritemsko rekonstruiramo tridimenzionalni model, ki ohranja geometrijo in teksturo izvirnika. Takšen model je mogoče uvoziti v pogon za realnočasovno upodabljanje (*real-time rendering engine*) in ga uporabiti kot virtualno scenografijo, v kateri lahko tudi snemamo prizore, ne da bi bili fizično prisotni na izvorni lokaciji.

Večina dostopne literature in primerov iz prakse se osredotoča na velikoformatne studie, ki razpolagajo z LED-volumni (*LED volumes*), naprednimi sistemi za sledenje kameri z visokimi proračuni. Veliko manj raziskano pa ostaja vprašanje, kako te iste tehnologije delujejo v kontekstu manjše, neodvisne produkcije, kjer so sredstva omejena, oprema skromnejša, ekipa pa običajno sestavljena iz ene ali nekaj oseb. Prav v tem razkoraku med profesionalno prakso in neodvisno izvedbo prepoznavam osrednji problem svojega diplomskega dela.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomske naloge je raziskati celoten proces od fotogrametričnega zajema realne lokacije do uporabe pridobljenega 3D-modela kot virtualne scenografije v videoprodukciji. Zanima me, ali ta pristop vizualno učinkovito nadomesti snemanje na dejanski lokaciji in kakšne so njegove prednosti ter omejitve v primerjavi s tradicionalnim načinom dela. S tem želim prispevati k razumevanju, v kolikšni meri so sodobna prosto dostopna orodja uporabna za produkcijsko prakso zunaj velikih studiev.

V okviru diplomske naloge si zastavljam naslednje cilje:

- poglobljeno razumeti celoten potek dela fotogrametrije, od zajema fotografij do optimizacije modelov za realnočasovno upodabljanje (*real-time rendering*),
- ustvariti eksperimentalni video, ki primerja fotogrametrično virtualno scenografijo z realnim posnetkom iste lokacije,
- primerjati prednosti in omejitve fotogrametričnega pristopa s tradicionalnim snemanjem na lokaciji.

Na podlagi zastavljenih ciljev oblikujem tri hipoteze:

- H1: S pomočjo fotogrametrije je mogoče ustvariti virtualne scenografije, ki v videoprodukciji učinkovito vizualno nadomestijo fizične scenografije in lokacije, saj zagotavljajo prepričljiv fotorealizem in prilagodljivost produkcijskega procesa.
- H2: Fotogrametrično zajeta scenografija omogoča v postprodukciji visoko stopnjo fleksibilnosti pri spreminjanju ključnih vizualnih elementov, kot sta pozicija kamere in osvetlitev, kar je ključna prednost pred tradicionalnim pristopom, kjer so ti elementi določeni že v trenutku snemanja.
- H3: Produkcije se za virtualne scenografije odločajo predvsem zaradi večje fleksibilnosti, manjših stroškov snemanja, boljšega kreativnega nadzora in enostavnejših časovnic.

Vsako hipotezo preverim z drugačnim pristopom. Hipotezo H1 preverim z lastno strukturirano analizo, pri kateri vsak par kadrov ocenim po vnaprej določenih merilih fotorealizma in oceno pisno utemeljim z vizualno primerjavo realnih in virtualnih kadrov v primerjalnem videu ter s primerjavo s prakso profesionalnih produkcij. Hipotezo H2 preverim s praktično demonstracijo: iz istega 3D-modela ustvarim več različic kadriranja in osvetlitve, ki jih na realni lokaciji ne bi bilo mogoče posneti brez ponovnega snemanja, ter ocenim, koliko časa sem za te spremembe

potreboval v virtualnem okolju. Hipotezo H3 preverim s pregledom literature, ki pojasnjuje razloge produkcij za uporabo virtualne produkcije, in z lastnim zapisom stroškov, velikosti ekipe ter vložka, potrebnega za izvedbo eksperimenta.

1.3 Predpostavke in omejitve

Pri zasnovi eksperimenta izhajam iz predpostavke, da bodo prosto dostopna orodja, konkretno RealityScan in Unreal Engine 5, zadostovala za doseganje vizualno prepričljivih rezultatov. Predpostavljam tudi, da je moja obstoječa fotografska oprema dovolj kakovostna za zajem fotografij, primernih za fotogrametrično rekonstrukcijo, čeprav ne gre za specializirano profesionalno opremo. Računam, da bo naravna svetloba ob primernih vremenskih razmerah, zlasti ob oblačnem dnevu z difuzno svetlobo, zagotovila dovolj kakovostne pogoje za rekonstrukcijo brez dodatne umetne razsvetljave. Pri izbiri objektov izhajam iz tega, da bo manjši objekt mogoče zajeti v celoti, pri večjem objektu pa bo za namen primerjave zadostoval že delni zajem reprezentativnega dela. Poleg tega pričakujem, da bo virtualni prizor pri strukturirani primerjavi z realnim posnetkom sicer kazal opazna odstopanja, a bo kljub temu dosegel raven vizualne prepričljivosti, primerno za uporabo v videoprodukciji.

Ob tem se zavedam več omejitev, ki vplivajo na obseg in ponovljivost raziskave. Eksperiment temelji na pristopu, pri katerem fotogrametrično zajeto virtualno scenografijo sestavim v postprodukciji. Sestavljanje slike (*compositing*) z zelenim ozadjem pri tem uporabim le v delu eksperimenta, kjer v sceno vstavim posneto osebo, medtem ko večino kadrov predstavlja neposredna virtualna upodobitev scenografije. Tak pristop ne zahteva specializirane studijske infrastrukture, kar ga dela primernega za neodvisno produkcijo, hkrati pa pomeni zavestno umestitev raziskave v enega od treh pristopov virtualne produkcije, kot jih opredeljujeta Swords in Willment (2024). O tem podrobneje razpravljam v poglavju 2.2. Proračun za izvedbo je omejen, saj uporabljam izključno brezplačno programsko opremo in lastno fotografsko opremo. Fotogrametrični zajem je odvisen od vremenskih razmer in naravne svetlobe, kar omejuje ponovljivost rezultatov pod enakimi pogoji. Dodatna omejitev je skopa slovenska strokovna literatura na tem področju, zaradi česar se opiram na tuje akademske vire.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V teoretičnem delu uporabim metode deskripcije, analize in primerjave. Opišem stanje na področju virtualne produkcije in fotogrametrije, povzamem ugotovitve iz relevantne literature ter primerjam različne pristope in tehnologije med seboj. V praktičnem delu se poslužim eksperimentalne metode, in sicer izvedem fotografiranje za fotogrametrijo dveh objektov, manjšega objekta v celoti in dela večje arhitekturne strukture, nato ustvarim virtualno scenografijo ter rezultat vizualno primerjam z referenčnimi posnetki realnih lokacij. V analitičnem delu (poglavje 4) uporabim kombinacijo strukturirane lastne analize z vnaprej določenimi merili fotorealizma, neposredne vizualne primerjave in sekundarne analize literature, s katero utemeljim širše produkcijske razloge za uporabo virtualne produkcije.

2 VIRTUALNA PRODUKCIJA IN FOTOGRAMETRIJA

V tem poglavju najprej opredelim virtualno produkcijo kot sodobni produkcijski pristop in opišem njen zgodovinski razvoj ter pomembnejše tehnološke mejnike. Nato predstavim tri prevladujoče pristope virtualne produkcije in umestim delovni tok, na katerem temelji praktični del diplomske naloge. V drugem delu poglavja obravnavam fotogrametrijo, njen metodološki okvir, uporabo v filmski in medijski produkciji ter primerjavo programskih orodij, ki so na voljo za fotogrametrični zajem.

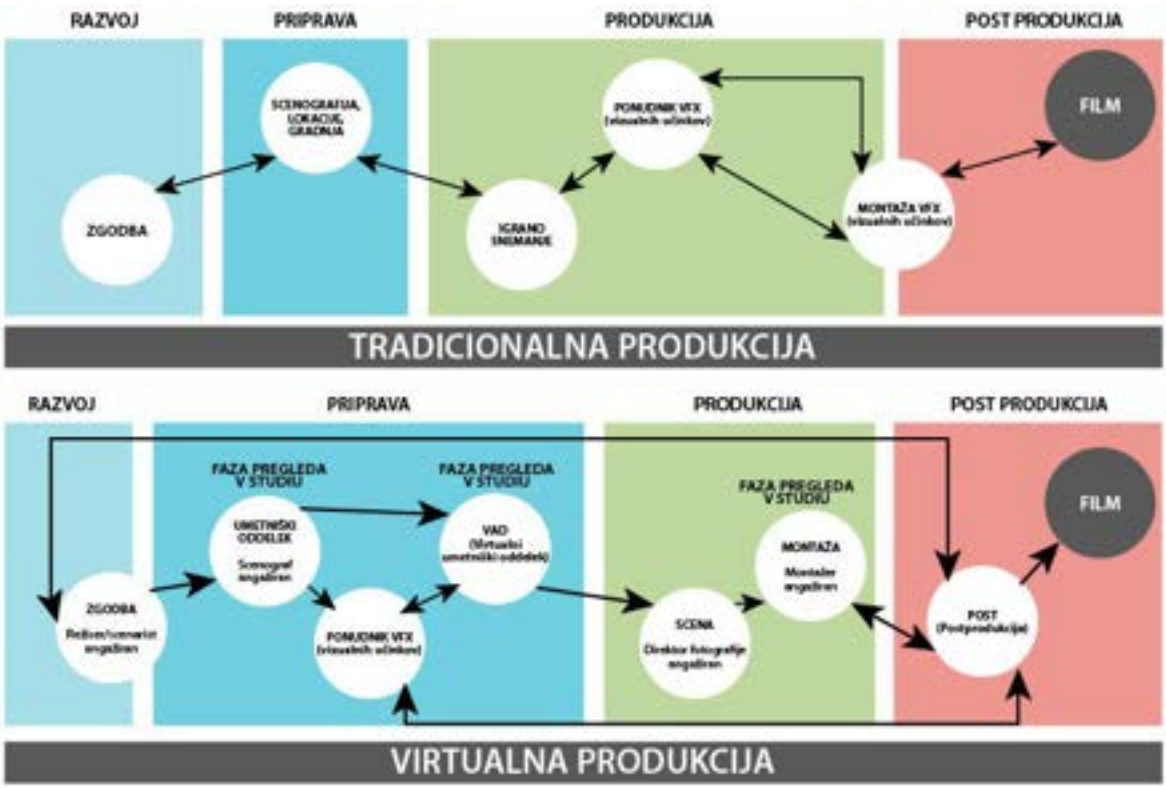
2.1 Virtualna produkcija kot sodobni produkcijski pristop

Zamisel o združevanju resničnega prizora z umetno ustvarjenim ozadjem ni nova. Njene korenine segajo v tehnike, kot so zadnja projekcija (*rear projection*), naslikana ozadja in prisilna perspektiva, ki so jih filmski ustvarjalci uporabljali že v zgodnjih desetletjih kinematografije. Skozi desetletja so se metode združevanja resničnih posnetkov z umetnimi ozadji postopno razvijale, sodobno virtualno produkcijo, ki temelji na digitalnih okoljih, sledenju kameri in realnočasovnem upodabljanju, pa lahko razumemo kot najnovejšo stopnjo tega dolgega razvoja ter napredek prav od tehnik, kot je zadnja projekcija (Swords in Willment, 2024). Kot ugotavlja Wan (2024), je film Avatar iz leta 2009 obsežno uporabil virtualne tehnologije snemanja in s tem filmski industriji pokazal potencial digitalnih orodij za filmsko produkcijo. Desetletje pozneje je z izidom serije The Mandalorian leta 2019 koncept virtualne produkcije zajel filmsko industrijo (Wan, 2024), studio Industrial Light & Magic pa je razvil sistem StageCraft, ki združuje LED zaslonske stene s tehnologijo pogona za igre na snemalnem prostoru, imenovanem volumen (*Volume*) (Gottwald, 2022), in s tem pristop populariziral v širši filmski industriji (Wan, 2024). Od takrat se virtualna produkcija hitro širi tudi med manjšimi, neodvisnimi ekipami, kar Silva Jasaui idr. (2024) opisujejo kot demokratizacijo virtualne produkcije, saj neodvisnim ustvarjalcem omogoča dostop do orodij, ki so bila prej dosegljiva le velikim produkcijam.

Teoretski okvir za razumevanje, kako gledalec digitalna okolja sploh sprejme kot prepričljiva, je že zgodaj postavil Prince (1996) s konceptom perceptualnega realizma (*perceptual realism*). Po njegovi opredelitvi je perceptualno realna tista podoba, ki strukturno ustreza gledalčevi avdiovizualni izkušnji tridimenzionalnega prostora prek gnezdene hierarhije namigov za svetlobo, barvo, teksturo, gibanje in zvok. Pomembno spoznanje je, da je lahko podoba referenčno fiktivna, torej ne prikazuje ničesar, kar v svetu zares obstaja, in je hkrati

perceptualno realistična. To razlikovanje neposredno zadeva tudi sodobno virtualno produkcijo, kjer scena pogosto sploh ni resnična, mora pa biti zgrajena tako, da se ujema z gledalčevo izkušnjo realnega sveta.

Kot pojasnjujejo Silva Jasaui idr. (2024), virtualna produkcija (*virtual production*) označuje temeljit premik v filmskem ustvarjanju, ki spaja realnočasovna digitalna okolja z živimi posnetki in s tem briše tradicionalne meje med fazami predprodukcije, produkcije in postprodukcije ter ustvarja sinergičen ustvarjalni proces. Avtorji ta pristop opisujejo kot paradigmatični premik iz tradicionalnega linearnega filmskega cevovoda v bolj integriran in vzporeden potek dela, kar ponazarja tudi Slika 1 (Silva Jasaui idr., 2024). Digitalna okolja tako niso več zgolj element postprodukcije, ampak postanejo integralni del celotnega produkcijskega procesa, sodelovanje med oddelki pa poteka istočasno in iterativno.



Slika 1: Primerjava tradicionalnega linearnega in vzporednega cevovoda virtualne produkcije

Vir: Silva Jasaui idr. (2024, str. 3), lasten prevod

Tradicionalna filmska produkcija je dolgo sledila linearnemu poteku dela. Predprodukcija, produkcija in postprodukcija so se odvijale zaporedno, vizualni učinki pa so se desetletja dodajali šele v zadnji fazi, pogosto na podlagi snemanja pred zelenim ali modrim zaslonom (*green/blue screen*), ki je bil dolga leta prevladujoča rešitev za ustvarjanje različnih okolij na zaslonu (Swords in Willment, 2024). Kot pojasnjujejo Silva Jasaui idr. (2024), tradicionalni

cevovod zaporedoma napreduje od ene stopnje do naslednje, virtualna produkcija pa uvaja večnitni in vzporedni pristop, ki poudarja pomen natančnega načrtovanja predprodukcije, da je mogoče vizualne učinke nemoteno integrirati iz končne faze nazaj v predprodukcijo in snemanje. Tudi Wan (2024) opisuje virtualno produkcijo kot prekinitev enovrstičnega linearnega procesa predprodukcije, produkcije in postprodukcije ter njegovo preoblikovanje v večnitni sodelovalni proces. Jia idr. (2025) ta prehod opisujejo kot pomemben odmik od tradicionalnih linearnih metodologij in poudarjajo, da realnočasovno upodabljanje omogoča takojšnje povratne informacije ter iterativni ustvarjalni proces, kjer ustvarjalci ne razmišljajo več v okviru izoliranih kadrov, temveč v celovitih prizorih.

Pomembno vlogo pri tem premiku igrajo pogoni za videoigre (*game engines*), zlasti Unreal Engine in Unity, ki sta z nižanjem licenčnih in vstopnih stroškov postala dostopni orodji tudi za ekipe zunaj velikih studiev (Jia idr., 2025). Konkretna izvedba tega pristopa je ILM-ov StageCraft, ki nadomešča tako klasično računalniško grafiko kot tudi tradicionalno scenografijo z mešano resničnostjo (*mixed reality*) in fotorealističnimi digitalnimi okolji, ki jih je mogoče v realnem času spreminjati (Gottwald, 2022). LED-volumni, zasnovani na tem principu, sproti reagirajo na premike kamere in dosegajo prepričljiv učinek paralakse, ob tem pa svetloba, ki jo oddajajo zasloni, neposredno osvetljuje prizorišče in igralce (Swords & Willment, 2024). To jih bistveno razlikuje od zelenega zaslona, ki igralcem ne nudi prostorskega konteksta (Swords in Willment, 2024).

Vse opisane tehnologije, od LED-zaslonov do pogonov za igre in sistemov za sledenje kameri, dosežejo svoj polni potencial šele takrat, ko imamo na voljo visokokakovostna 3D-okolja. Visokokakovostna digitalna okolja pa niso pogoj le za LED-volumne, enako so nujna pri pristopu z vstavljanjem v postprodukciji, kjer virtualna scenografija nadomesti zeleni zaslon. V obeh primerih je fotorealizem digitalnih vsebin tisti, ki določa prepričljivost končne podobe. Fotorealistični 3D-modeli resničnih lokacij, ki verno posnemajo geometrijo, teksture in prostorske razsežnosti izvirnega prizorišča, tako postajajo pomemben gradnik sodobne virtualne produkcije (Kadner, 2021b; Montgomery, 2023). Prav to vodi v uporabo fotogrametrije, ki iz posnetkov resničnih lokacij ustvari fotorealistične 3D-modele, primerne za uporabo v virtualnih produkcijskih okoljih.

2.2 Pristopi virtualne produkcije

Swords in Willment (2024) v svojem pregledu opredeljujeta tri prevladujoče pristope k virtualni produkciji v sodobni filmski in televizijski industriji, ki se med seboj razlikujejo po uporabljeni tehnologiji ter produkcijskem okviru. V tem poglavju predstavim te tri pristope po njuni opredelitvi in pojasnim, na katerega se naslanja eksperiment v diplomski nalogi.

Kot opisujeta Swords in Willment (2024), prvi pristop predstavlja snemanje pred zelenim ali modrim zaslonom (*green/blue screen*), pri čemer se digitalno ozadje in resnični posnetek sestavita ločeno od snemanja, najpogosteje v postprodukciji. V naprednejših izvedbah se temu pridružita sledenje kamere in pogon za igre, ki omogočata sprotni predogled sestavljene slike. Avtorja ta pristop ilustrirata s filmom The Jungle Book iz leta 2016, kjer je bil glavni igralec posnet pred modrim zaslonom (Slika 2), džungla pa je bila ustvarjena v računalniški grafiki in pozneje sestavljena z živim posnetkom v postprodukciji. Med ključnimi pomanjkljivostmi tega pristopa je, da igralci težko verodostojno nastopajo pred enobarvno površino brez vizualnega konteksta, odsev zelene ali modre barve na kostumih in rekvizitih pa v postprodukciji povzroča drage in časovno potratne popravke.



Slika 2: Posnetek s snemanja filma The Jungle Book

Vir: (*The Making of The Jungle Book*, b. d.)

Drugi pristop predstavlja snemanje v celoti znotraj virtualnih svetov. Filmi se v tem primeru ustvarjajo v digitalnem okolju, ki ga ekipa lahko prosto raziskuje, pri čemer se virtualni svetovi gradijo v orodjih, kot je Maya, in se nato prenesejo v pogon za igre, da postanejo primerni za

raziskovanje v navidezni resničnosti. Tipičen primer takšnega pristopa je film The Lion King iz leta 2019, pri katerem je Jon Favreau uporabil VR-snemanje za simulacijo realne kinematografije, sebe in ekipo pa je postavil v VR-očala (*VR headsets*), da so se lahko poglobili v virtualni svet (Swords in Willment, 2024).

Tretji pristop temelji na uporabi LED-zaslonov za virtualna ozadja, ki se kombinirajo s fizičnimi scenografijami in rekviziti, pred katerimi igralci nastopajo. LED-paneli so razporejeni v tako imenovani LED-volumen (*LED volume*), to je brezhiben niz visokokakovostnih LED-zaslonov, ki običajno objemajo dve ali več sten in lahko vključujejo tudi LED-zaslone kot strop, kjer pogoni za videoigre, najpogosteje Unity ali Unreal Engine, nadzorujejo virtualne scenografije. Najvidnejši primer tega pristopa je serija The Mandalorian iz leta 2019, kjer je večina dela z vizualnimi učinki zajeta že v končni podobi neposredno v kameri (*final pixel in-camera*), kar zmanjšuje obseg dela v postprodukciji. Dodatna prednost LED-volumov je, da LED-paneli lahko zagotovijo večino ali celo vso osvetlitev, potrebno za scenografijo, kar pomeni, da na odru ni potrebnih toliko fizičnih luči (Swords in Willment, 2024).

Kadner (2021b) pojasnjuje, da virtualna produkcija poleg treh glavnih pristopov zajema tudi sklop vizualizacijskih tehnik, ki dopolnjujejo produkcijski cikel in vključujejo *pitchvis, previs, techvis, stuntvis* in *postvis*. Predvizualizacijo (*previs*) v realnočasovni paradigmi razume kot začetek produkcije, saj omogoča ustvarjalcem, da predstavijo in delijo specifične vizualne ideje skupaj s sredstvi, ki jih lahko uporabljajo skozi celotno produkcijo. Tehnična vizualizacija (*techvis*) služi za določitev natančnih tehničnih zahtev praktičnih in digitalnih kadrov, vključno z izvedljivostjo zasnove kadra znotraj specifične lokacije in oceno, koliko fizičnega seta je potrebno v primerjavi z digitalnimi razširitvami. Vizualizacija akcijskih prizorov (*stuntvis*) je oblika tehnične vizualizacije, namenjena fizičnemu kaskaderskemu delu in akcijski zasnovi, kjer fizično natančna simulacija omogoča kaskaderskim ekipam vadbo in izvajanje simuliranih kadrov ob ohranjanju visoke ravni varnosti. Vizualizacija po snemanju (*postvis*) pa kombinira nedokončane kadre iz produkcije z dodatno vizualizacijo, kar VFX-ekipi posreduje vizijo filmskih ustvarjalcev, montažerju pa zagotavlja natančnejšo različico nedokončanih kadrov za sestavo končne montaže.

Sodobne produkcije se za virtualno produkcijo odločajo iz več med seboj povezanih razlogov. Med praktičnimi prednostmi LED-volumov Swords in Willment (2024) izpostavljata, da lahko ekipa snema okolja s specifično osvetlitvijo, na primer mrak ali svit, toliko časa, kolikor je potrebno, in prizor spremeni brez ponovne postavitve luči. Sama menjava okolja v dobro postavljenem volumnu je vprašanje minut, ne ur. K odločitvi za virtualno produkcijo prispeva

tudi dostopnost orodij. Jia idr. (2025) ugotavljajo, da sta Unreal Engine in Unity s svojo splošno dostopnostjo postopno odpirala delovni tok virtualne produkcije ekipam na vseh ravneh produkcijske piramide. Bodini idr. (2023) povzemajo, da so raziskovalci s prototipiranjem novih virtualnoprodukcijskih rešitev na cenovno dostopnih potrošniških napravah pokazali, da je tovrstne delovne tokove mogoče sprejeti tudi med avdiovizualnimi strokovnjaki z omejenimi proračuni in brez dostopa do specializiranega znanja.

Čeprav LED-volumen velja za najsodobnejši pristop, ostaja zaradi visokih stroškov nedostopen večini manjših produkcij, medtem ko zeleni zaslon ostaja cenovno dostopna in razširjena rešitev (Viehmann, 2020). Bugahhoos idr. (2026) so v raziskavi med manjšimi britanskimi produkcijskimi studii ugotovili, da kot glavni oviri za sprejem virtualne produkcije izstopata strošek in zaznano pomanjkanje potrebe, izrazit pa je tudi razkorak med zanimanjem in znanjem, saj velika večina anketiranih ni imela izkušenj z igralnimi pogoni, kot sta Unreal Engine in Unity. Avtorji ob tem poudarjajo, da virtualne produkcije ne opredeljuje določena strojna oprema, temveč povezovanje realnočasovnih digitalnih okolij z živim posnetkom med snemanjem, kar pomeni, da tudi skromnejše postavitve sodijo v okvir tega pristopa (Bugahhoos idr., 2026). Izbira pristopa ni samoumevna niti pri velikih produkcijah. Režiser Shawn Levy se je pri filmu Deadpool & Wolverine zavestno odločil za snemanje na resničnih lokacijah namesto na zelenem zaslonu z digitalnimi razširitvami, saj je menil, da pri obsežnih okoljih tehnologija pokaže svoje meje (Schaefer, 2023).

Eksperiment, ki ga izvedem v praktičnem delu diplomske naloge, se opira na osnovno različico prvega pristopa, torej na sestavljanje slike v postprodukciji brez realnočasovnega sledenja kamere. Namesto digitalno generiranega okolja pa kot ozadje uporabim fotogrametrično zajet 3D-model realne lokacije, kar predstavlja ključno razliko v primerjavi s konvencionalnim postopkom. Ta izbira izhaja iz praktičnih omejitev. Dostopa do LED-volumna nimam, želim pa preveriti, ali je mogoče s prosto dostopnimi orodji doseči vizualno prepričljiv rezultat. Delovni tok brez LED-volumna pri tem ni manj legitimen pristop. Kot poudarja Kadner (2021b), tehnike virtualne produkcije niso domena izključno velikoproračunskih filmov, saj se inovacije, ki jih razvijejo blockbusterji, postopno demokratizirajo in postanejo dostopne ustvarjalcem na vseh ravneh, cilj njegovega vodnika je prav inkluzivno spodbujanje uporabe realnočasovne tehnologije z minimalnimi naložbami. V naslednjem poglavju zato podrobneje opredelim fotogrametrijo kot metodo in njeno vlogo v kontekstu virtualne produkcije.

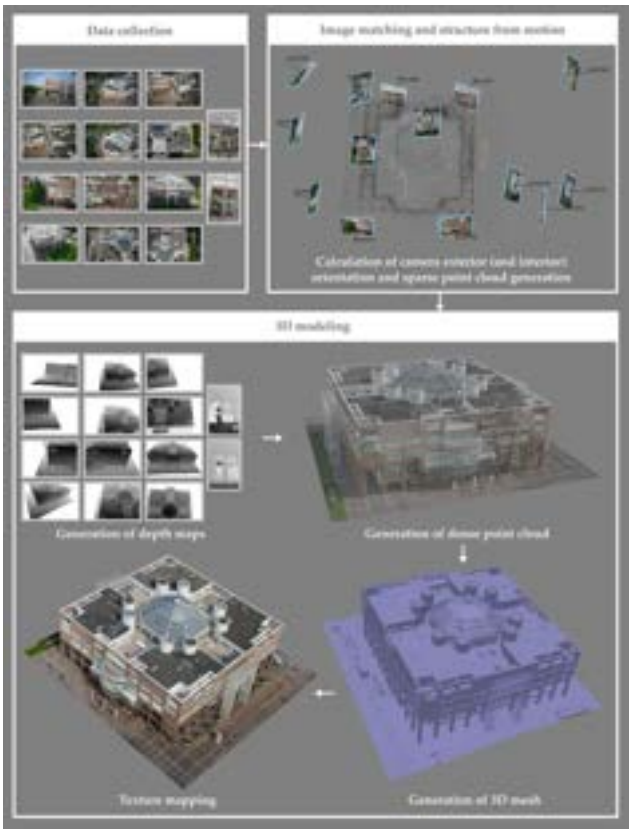
2.3 Fotogrametrija v kontekstu virtualne produkcije

V tem poglavju najprej opredelim fotogrametrijo kot metodo zajema in tridimenzionalne rekonstrukcije resničnega sveta, nato predstavim njeno uporabo v filmski in medijski produkciji ter na koncu primerjam izbrana programska orodja, ki so relevantna za eksperimentalni del diplomske naloge.

2.3.1 Fotogrametrija kot metoda posnemanja realnega sveta

Fotogrametrija je metoda tridimenzionalnega modeliranja, pri kateri iz množice prekrivajočih se fotografij določenega objekta ali lokacije algoritmično rekonstruiramo njegovo geometrijo in površinske lastnosti v obliki 3D-modela. Gre torej za slikovno podprto 3D-modeliranje (*image-based 3D modeling*), katerega temeljni cilj je iz dvodimenzionalnih fotografij pridobiti prostorsko rekonstrukcijo prizora. Geometrijo programska oprema rekonstruira na podlagi prekrivanja med posameznimi posnetki (Verykokou in Ioannidis, 2023). Za zajem praviloma zadostuje že kamera pametnega telefona ali kompaktna digitalna kamera, čeprav profesionalna zrcalnorefleksna (DSLR) ali brezzrcalna (*mirrorless*) oprema zagotavlja boljšo ostrino in manj šuma (Hitem3D, b. d.; Zmejevskis, 2023a).

Tipičen fotogrametrični potek dela (*pipeline*) temelji na dveh povezanih algoritemskih postopkih. Prvi se imenuje rekonstrukcija iz gibanja (*structure from motion*, SfM), ki na podlagi ujemanja značilnih točk med posameznimi fotografijami izračuna položaje in orientacije kamer ter grobo prostorsko razporeditev objekta v obliki redkega oblaka točk (*sparse point cloud*). V drugem koraku nastopi večpogledna stereorekonstrukcija (*multi-view stereo*, MVS), ki iz poznanih parametrov kamer izračuna gost oblak točk (*dense point cloud*) s precej več podrobnosti in iz njega generira poligonsko mrežo (*mesh*). Na koncu se na generirano geometrijo preslika tekstura, pridobljena neposredno iz izvornih fotografij, kar modelu daje fotorealističen videz. Celoten potek od zajema fotografij do teksturiranega modela prikazuje Slika 3, ta dvostopenjski pristop pa je standardni temelj sodobnih fotogrametričnih orodij (Verykokou in Ioannidis, 2023). Uporabljajo ga tako odprtokodne rešitve, kot je Meshroom, kot komercialna orodja, na primer RealityScan in Agisoft Metashape.



Slika 3: Potek dela fotogrametrije na osnovi SfM-MVS

Vir: Verykokou in Ioannidis (2023, str. 5)

Fotogrametrijo je smiselno primerjati z metodami, ki temeljijo na 3D-skenerjih, kot sta lasersko skeniranje ali tehnologija LiDAR. Slednji geometrijo zajemajo z neposrednim merjenjem razdalj, medtem ko fotogrametrija prostorske podatke sklepa posredno iz analize dvodimenzionalnih slik (Verykokou in Ioannidis, 2023). Prav slikovni pristop praviloma velja za stroškovno dostopnejšega in bolj prilagodljivega, saj za zajem zadostujeta kamera ter primeren protokol fotografiranja, je pa po drugi strani bolj občutljiv na kakovost fotografij, osvetlitvene razmere in lastnosti zajetih površin.

Poleg klasičnih 3D-skenerjev v zadnjih letih kot alternativi fotogrametriji postajata aktualni tudi nevronska sevalna polja (*neural radiance fields*, NeRF) in 3D gaussovski pegi (*3D Gaussian splatting*), ki prav tako rekonstruirata 3D-prizor iz fotografij. NeRF z nevronsko mrežo modelira, kako svetloba in barva potujeta skozi prizor iz različnih zornih kotov, medtem ko *Gaussian splatting* prizor predstavi z milijoni majhnih prostorskih Gaussovih funkcij, polprosojnih obarvanih točk, ki se zlivajo v zvezno in fotorealistično podobo (Zmejevskis, 2025). Kot ugotavljajo Croce idr. (2024), NeRF v pogojih z omejenimi vhodnimi podatki fotogrametrijo preseže pri ohranitvi materialnih lastnosti in vizualni zvestobi tekstur, je pa bolj

dovzeten za šumne artefakte, zato zagovarjajo prihodnje medsebojno dopolnjevanje obeh metod za celovitejšo prostorsko rekonstrukcijo. Prav kombinacija dostopnosti in potenciala za fotorealistično rekonstrukcijo dela fotogrametrijo primerno za ustvarjanje digitalnih dvojnikov realnih lokacij, kar je tudi osrednji predmet mojega eksperimenta.

2.3.2 Uporaba fotogrametrije v filmski in medijski produkciji

Fotogrametrija se v filmski in medijski produkciji uporablja za ustvarjanje digitalnih okolij, scenografij, rekvizitov in digitalnih dvojnikov (*digital twins*) igralcev. Postopek v praksi poteka tako, da produkcijska ekipa z nizom prekrivajočih se fotografij zajame realno lokacijo ali objekt, specializirana programska oprema pa iz teh fotografij rekonstruira 3D-model, ki ga nato vključijo v vizualne učinke ali virtualno produkcijo. V sodobnih avdiovizualnih produkcijah je fotogrametrični potek dela zato postal uveljavljeno orodje. Ustvarjalcem prihrani čas in denar v primerjavi z ročnim modeliranjem, hkrati pa zagotavlja fotorealistično natančnost, ki izhaja neposredno iz resničnih fotografij (Kadner, 2021a; Showrunner, b. d.). Fotogrametrično zajet material se v virtualnih produkcijah pogosto pojavlja tudi v obliki knjižničnih sredstev. Tipičen primer je Quixelova knjižnica Megascans, ki jo vzdržuje Epic Games. Kot opisuje Kadner (2021a), gre za digitalno skladišče tisočev 3D-modelov, od katerih je vsak nastal iz niza fotografij, zajetih in obdelanih z lastniškimi tehnikami. Knjižnica vključuje površine, vegetacijo in manjše ter srednje velike objekte, ki so standardizirani in temeljijo na resničnih fizičnih predmetih. Producenti tovrstna sredstva neposredno uvažajo v Unreal Engine za gradnjo digitalnih okolij, kar so med drugim uporabili pri filmih The Lion King in The Jungle Book (Kadner, 2021a). Praktično uporabo tovrstnih sredstev na LED-volumnu prikazuje Slika 4, posneta s snemanja, kjer fotogrametrično zajeto kamnito okolje iz knjižnice Megascans služi kot virtualno ozadje za igralca (Unreal Engine, 2019).

VFX-studii s fotogrametrijo rutinsko skenirajo celotne lokacije, posamezne stavbe ali rekvizite in jih nato vključijo v digitalna okolja. Za doseganje večje geometrijske natančnosti se fotogrametrija pogosto kombinira z laserskim skeniranjem (LiDAR), ki zagotavlja zanesljivejše meritve velikih ali kompleksnih površin. Tak hibridni pristop občutno skrajša čas gradnje digitalne scenografije v primerjavi z ročnim modeliranjem, hkrati pa rezultatom zagotavlja visoko stopnjo realizma, saj teksture in geometrija izhajajo neposredno iz resničnega sveta (Montgomery, 2023). Poleg tega fotogrametrija odpira možnosti, ki jih tradicionalno snemanje ne ponuja. Zajete 3D-modele, naj gre za okolja ali igralce, je mogoče uporabiti za kadre, ki med

snemanjem sploh niso bili posneti ali jih naknadno osvetliti iz novih smeri (Frazer, 2021), fotorealistična narava zajetega materiala pa ga dela neposredno primernega za interaktivno upodabljanje na LED-volumnih v virtualnih produkcijskih okoljih (Kadner, 2021a).

Uporabo fotogrametrije v veliki filmski produkciji dobro ilustrira film The Jungle Book iz leta 2016, v katerem je studio MPC s fotogrametričnim zajemom več kot štiridesetih lokacij v Indiji ustvaril knjižnico sredstev, dreves, skal in rastlin, ki so postala jedro digitalne rekonstrukcije indijske džungle, v kateri poteka celotna zgodba (Seymour, 2016). Podoben, a še bolj neposreden primer predstavlja serija The Mandalorian. Ekipa podjetja Industrial Light & Magic je fotogrametrično rekonstruirala opuščeno betonsko zgradbo na otoku Angel Island v zalivu San Francisca in jo nato uporabila kot digitalno scenografijo za znameniti LED-volumen (Seymour, 2020). Tovrstni pristop virtualnih scenografij je prevzela tudi serija House of the Dragon, kjer je ekipa za vizualne učinke digitalna okolja zgradila v Unreal Engine in jih prikazovala na LED-volumnu dimenzij 270 stopinj, fizičnih lokacij zunaj Leavesden Studiev pa je bilo razmeroma malo (Hogg, 2023). Skupno vsem trem primerom je, da digitalna okolja niso bila niša, ampak osrednji element produkcijskega procesa v najvidnejših svetovnih produkcijah.

Kadner (2021b) opisuje pogost primer uporabe fotogrametrije znotraj delovnega toka virtualne produkcije, in sicer virtualno ogledovanje lokacij (*VR location scouting*). Pri tem postopku član ekipe realno lokacijo zajame s fotogrametričnimi orodji, ostali člani pa tako ustvarjeni 3D-model pregledujejo v Unreal Engine, pogosto kar prek VR-očal za navidezno resničnost (*VR headset*). Namesto da bi celotna ekipa potovala na oddaljeno lokacijo, jo lahko ocenijo na daljavo in med več kandidati izberejo najprimernejšo. Pristop prihrani čas in stroške potovanj, še posebej kadar se produkcija odloča med lokacijami v različnih državah ali na težko dostopnih terenih. Podobno metodologijo interaktivnega VR-pregleda digitalnega prostora demonstrira tudi videoposnetek od Unreal Engine, kjer ekipa v realnem času ureja virtualno sceno na snemalnem odru prek VR-orodij znotraj Unreal Engine, vključno z režiserjevim iskalom, merilnim pripomočkom in orodjem za postavitev scene (Unreal Engine, 2019).



Slika 4: Snemanje na LED-volumnu s fotogrametričnimi sredstvi

Vir: Unreal Engine (2019)

Konkreten primer takšnega delovnega toka predstavlja projekt studia Dimension, ki je za potrebe virtualne produkcije zajel londonski kino Ritzy. Ekipa je lokacijo skenirala s kombinacijo tehnologije LiDAR in fotogrametrije. Lasersko skeniranje je zagotovilo geometrijsko natančen prostorski model, fotogrametrični zajem s sistemom več kamer pa je dodal visokokakovostne teksture z vsemi drobnimi podrobnostmi, od prepleskanih grafitov do naravnega staranja fasade. Pridobljene podatke so obdelali v programu RealityCapture, geometrijo poenostavili v 3ds Max, končni model pa uvozili v Unreal Engine, kjer so ga osvetlili in uporabili kot virtualno scenografijo (Dimension Studio, 2022). Projekt nazorno prikaže, da fotogrametrični delovni tok od zajema do realnočasovnega pogona ni vezan izključno na najdražjo studijsko infrastrukturo, temveč ga je mogoče integrirati v različne produkcijske kontekste, vključno z LED-volumnom.

Podoben delovni tok je dokumentiral tudi Ghersci (2023) pri projektu Mosta Chapel, kjer je ekipa studia Stargate Studios Malta fotogrametrično zajela oddaljeno kapelo na Malti s kombinacijo LiDAR skeniranja in dronske fotogrametrije ter model uvozila v Unreal Engine 5. Slika 5 prikazuje tri poglede na ta fotogrametrični model kapele (neteksturirana poligonska mreža 3D-modela (levo), fotografija zajete kapele (sredina) in žični prikaz mreže 3D-modela (desno). Projekt je bil zasnovan kot interno testiranje delovnega toka, hkrati pa demonstracija

za potencialne produkcijske naročnike. Kar kaže, da fotogrametrija danes služi tako kot produkcijsko orodje kot sredstvo za pridobivanje poslov v vizualni industriji.



Slika 5: Trije pogledi na fotogrametrično rekonstrukcijo kapele Mosta

Vir: Ghersci (2023)

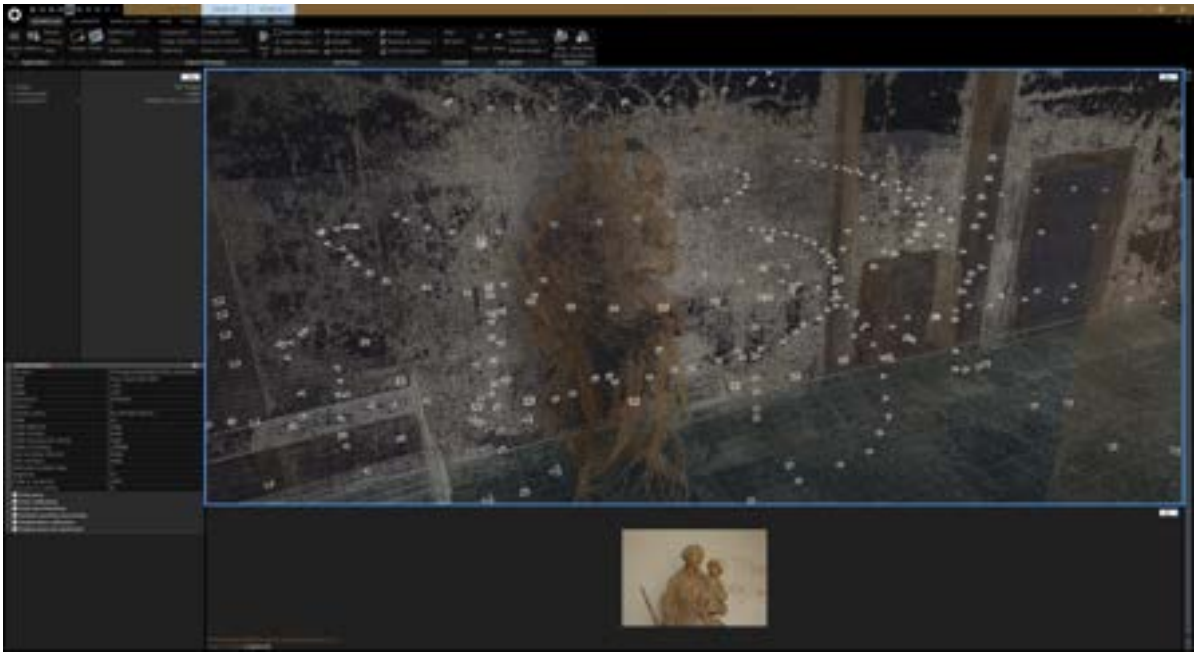
Eksperiment, ki ga izvedem v praktičnem delu diplomske naloge, sledi podobnim načelom kot opisani profesionalni delovni tokovi, le da ga izpeljem na neodvisni ravni. Za razliko od velikih produkcij, ki razpolagajo z obsežno ekipo in profesionalno opremo, eksperiment izvedem sam, s prosto dostopno programsko opremo ter lastno fotografsko opremo. S tem želim preveriti, ali je fotogrametrični pristop izvedljiv in vizualno prepričljiv tudi zunaj konteksta velikih produkcij, ki razpolagajo z obsežnimi proračuni in specializiranim kadrom. V naslednjem podpoglavju zato primerjam programska orodja, ki so na voljo za fotogrametrični zajem in utemeljim izbiro orodja za svoj eksperiment.

2.3.3 Primerjava programske opreme za fotogrametrijo

Na trgu je več fotogrametričnih programskih orodij, ki se med seboj razlikujejo po hitrosti obdelave, cenovnem modelu, podprti platformi in ciljni namembnosti. Med najpogosteje primerjana uvrščamo RealityScan (prej RealityCapture), Agisoft Metashape in 3DF Zephyr, poleg njih pa obstajajo odprtokodne rešitve, kot je Meshroom. RealityScan izstopa po hitrosti

in tesni integraciji z Unreal Engine, Metashape po obsežnosti nastavitev in podpori različnih platform, Meshroom pa po odprtokodnosti, ki ga dela privlačnega za izobraževalne in nestandardizirane delovne tokove (Anvil Labs, 2026). Obdelava v Metashapeu je praviloma počasnejša od konkurenčnih rešitev, po nekaterih primerjavah približno trikrat počasnejša od RealityScana, kar je pri velikih nizih fotografij merljiv dejavnik (Anvil Labs, 2025). Ker izbira orodja neposredno vpliva na celoten potek dela, od časa obdelave do združljivosti z realnočasovnimi pogoni, je vsako od orodij v nadaljevanju opisano podrobneje.

Agisoft Metashape velja za eno izmed najbolj uveljavljenih in vsestranskih fotogrametričnih rešitev na trgu. Program podpira več operacijskih sistemov (Windows, macOS in Linux), ponuja obsežen nabor izvoznih formatov in uporabniku omogoča natančen nadzor nad posameznimi koraki obdelave, od poravnave fotografij do generiranja tekstur (Agisoft, b. d.). Ravno ta vsestranskost ga dela priljubljenega v širšem spektru panog, od geodezije in dokumentiranja kulturne dediščine do filmske produkcije in obdelave posnetkov iz sistema več kamer za kinematografske namene (Agisoft, b. d.). Njegova omejitev je hitrost, saj je obdelava praviloma počasnejša kot pri nekaterih konkurenčnih rešitvah, kar je pri velikih nizih fotografij lahko občuten dejavnik (Anvil Labs, 2025).



Slika 6: Programsko okolje RealityScan

Vir: (Lastni vir)

RealityScan (prej RealityCapture) se od Metashapea razlikuje predvsem po hitrosti obdelave, ki je pri enakovrednih nizih fotografij dva- do petkrat krajša (AeroCartwright, 2026). Orodje je

leta 2021 prevzelo podjetje Epic Games in napovedalo njegovo integracijo v ekosistem Unreal Engine, kar mu zagotavlja tesno povezanost s tem pogonom (Epic Games, 2021). Uporabniški vmesnik programa prikazuje Slika 6. To ga dela posebej primernega za ustvarjanje sredstev (*assets*) za igre, vizualne učinke in virtualno produkcijo. Od leta 2024 je program brezplačen za posameznike in studie z letnim prihodkom pod milijon dolarjev, kar je občutno znižalo vstopni prag za neodvisne ustvarjalce (AeroCartwright, 2026). Junija 2025 je Epic Games naziv RealityCapture konsolidiral z mobilno aplikacijo pod enotnim imenom RealityScan (različica 2.0), ki predstavlja naslednjo generacijo profesionalnega namiznega orodja. Program je na voljo predvsem za operacijski sistem Windows, za Linux pa je na voljo različica, priporočena le za delovne tokove na ukazni vrstici (Epic Games, b. d.-b).

Meshroom je odprtokodna fotogrametrična rešitev, ki temelji na ogrodju AliceVision. Program je brezplačen, saj je izdan pod odprtokodno licenco, in ponuja celoten potek dela – od poravnave fotografij do rekonstrukcije 3D-modela. Njegova vozliščna zgradba uporabniku omogoča vpogled v posamezne korake postopka, izvoz vmesnih podatkov in prilagajanje delovnega toka specifičnim potrebam, kar je zlasti uporabno v raziskovalnih in izobraževalnih okoljih (Griwodz idr., 2021). Za polno delovanje se opira na izračun na grafični kartici, obdelava pa je v primerjavi s komercialnimi rešitvami praviloma počasnejša (Anvil Labs, 2026).

Tabela 1: Primerjava fotogrametrične programske opreme

	RealityScan	**Agisoft Metashape**	**Meshroom**
Hitrost obdelave	zelo visoka	zmerna	zmerna
Platforma	Windows, Linux	Windows, macOS, Linux	Windows, Linux
Cena	brezplačen*	179–3.499 USD	brezplačen
Integracija z UE5	neposredna	prek izvoza	prek izvoza
Tipična uporaba	vizualni efekti, igre, virtualna produkcija	geodezija, raziskave, virtualna produkcija	izobraževanje, raziskave, neodvisni projekti

*za posameznike in studie z letnim prihodkom pod 1 milijon USD

Vir: Lastna primerjava na podlagi Anvil Labs (2025, 2026), AeroCartwright (2026), Agisoft (b. d.), Epic Games (b. d.-a) in Griwodz idr. (2021). Cene preverjene maja 2026.

Za eksperiment v praktičnem delu diplomske naloge sem izbral RealityScan iz več razlogov. Program je brezplačen za moj namen uporabe, ponuja hitro obdelavo velikih nizov fotografij in je neposredno združljiv z Unreal Engine 5, ki ga uporabljam za sestavo virtualne scenografije. Če bi bila prioriteta geodetska natančnost ali odprtokodnost, bi bila smiselna alternativa Meshroom, vendar je za moj namen, torej hitro izdelavo vizualno prepričljive virtualne scenografije, RealityScan najprimernejša izbira. S tem zaključujem teoretični del diplomske naloge. V naslednjem poglavju sledi opis praktične izvedbe eksperimenta, od zasnove in zajema podatkov do sestave končne virtualne scenografije v Unreal Engine 5.

3 PROCES IZDELAVE VIRTUALNE SCENOGRAFIJE S FOTOGRAMETRIJO

V tem poglavju opisujem celoten praktični potek dela, ki sem ga izvedel v okviru eksperimenta. Postopek sem razdelil na zaporedne faze, od zasnove in izbire lokacij prek snemanja referenčnega videa, fotogrametričnega zajema, obdelave in čiščenja 3D-modelov do sestave virtualne scenografije v Unreal Engine 5, snemanja pred zelenim ozadjem s kompozitingom in končne vizualne integracije v primerjalnem videu. Vsak korak sem dokumentiral s podatki, nastavitvami in posnetki zaslona, da je postopek ponovljiv in preverljiv, opisujem pa ga v zaporedju dejanske izvedbe, vključno z odločitvami, ki sem jih sprejemal sproti.

3.1 Zasnova eksperimenta in izbira lokacij

Eksperiment sem zasnoval kot primerjalno študijo, ki je zajemala celoten potek dela od fotogrametričnega zajema realne lokacije do končne virtualne scenografije. Na vsaki lokaciji sem najprej z isto kamero posnel referenčni video, ki v poglavju 4 služi kot podlaga za vizualno primerjavo med realnim posnetkom in virtualno upodobitvijo. Zatem sem z nizom prekrivajočih se fotografij zajel geometrijo in površinske lastnosti objektov ter iz zajetih podatkov v programu RealityScan rekonstruiral 3D-modele. Modele sem uvozil v Unreal Engine 5, kjer sem sestavil virtualno scenografijo, nastavil osvetlitev, postavil kamero in upodobil prizor tako, da je čim bolj posnemal videz realne lokacije iz referenčnega videa. Cilj eksperimenta je bil preveriti, ali je mogoče s prosto dostopnimi orodji ustvariti rezultat, ki bi v kontekstu videoprodukcije lahko prepričljivo nadomestil snemanje na dejanski lokaciji. Celoten postopek sem izvedel na lastni delovni postaji s procesorjem AMD Ryzen 9 7950X, grafično kartico NVIDIA GeForce RTX 3090 Ti in 64 GB delovnega pomnilnika. Pri delu sem uporabil naslednje programe: RapidRAW 1.5.5 za obdelavo fotografij, RealityScan 2.1.1 za fotogrametrično rekonstrukcijo, Blender 5.1 za čiščenje modela, DaVinci Resolve 21 za montažo in kompoziting ter Unreal Engine 5.7.4 za sestavo virtualne scenografije.

Za eksperiment sem zavestno izbral dva objekta z različnima tehničnima izhodiščema, da preverim obnašanje fotogrametrije v dveh različnih kontekstih. Prvi je manjši objekt, ki sem ga lahko zajel v celoti, drugi pa del velike arhitekturne strukture. Za tako kombinacijo sem se odločil, ker je celovit fotogrametrični zajem velikega poslopja za posameznika z omejeno opremo izjemno zahteven tako tehnično kot časovno. Visoki in težko dostopni deli stavbe so brez brezpilotnega zrakoplova praktično nedosegljivi, kakovosten model celotnega objekta pa bi zahteval bistveno več časa, kot je v okviru tega eksperimenta izvedljivo. Z zajemom enega objekta v celoti in dela druge, večje strukture sem tako lahko preizkusil oba scenarija. Obseg zajema se med lokacijama razlikuje, kar podrobneje obravnavam v poglavju 4.5.

Primarno lokacijo eksperimenta predstavlja starejša vikend hiša skromnejših dimenzij, približno trinajst krat šest metrov, ki sem jo lahko zajel v celoti, vključno z vsemi štirimi stranicami in streho. Vikend ne izstopa po zgodovinskem pomenu, izbran pa je bil iz tehničnih in praktičnih razlogov. Dovolj je majhen, da omogoča celovit fotogrametrični zajem brez specializirane opreme, hkrati pa ponuja vizualno zanimive in raznolike površine, ki so dober preizkus za fotogrametrično rekonstrukcijo teksture. Lokacija je dostopna brez omejitev kadarkoli, kar omogoča izvedbo eksperimenta v kontroliranih in mirnih pogojih, lastnik objekta

pa je dal soglasje za izvedbo zajema v izobraževalne namene. Ker sem celoten objekt zajel z vseh strani, je vikend služil kot glavna virtualna scenografija, na kateri sem izvedel tudi največ kadrov. Vikend hiša je podolgovata pritlična stavba iz vidne, neometane rdeče opeke, krita z dvokapno streho iz starih opečnatih strešnikov. Prav neometana opeka je za fotogrametrijo hvaležna, saj ponuja bogato in nepravilno teksturo s številnimi drobnimi razlikami med posameznimi zidaki, kar olajša prepoznavanje značilnih točk med fotografijami. Na sprednji fasadi ima hiša dvoje lesenih vrat in dve okni z lesenimi okvirji, ki vnašajo dodatno raznolikost materialov. Stavba stoji na betonskih temeljih, obdana s travnato površino in nizkim rastjem, kar omogoča prost dostop in zajem z vseh strani (Slika 7).



Slika 7: Starejša vikend hiša

Vir: (Lastni vir)

Drugo, dopolnilno lokacijo predstavlja Ptujski grad, kjer sem zajel le omejen del notranjega dvorišča, in sicer kip Marije z delom stene in dvema stebroma pred njo. Za razliko od vikenda tu nisem zajemal celotnega objekta, temveč le zaključeno kompozicijo, ki sem jo uporabil za nekaj primerjalnih kadrov in ki ponuja zadostno geometrijsko kompleksnost za smiseln preizkus rekonstrukcije. Grajska arhitektura je s produkcijskega stališča zanimiva, saj se fotogrametrija pogosto uporablja prav v zgodovinskih in fantazijskih avdiovizualnih produkcijah za zajem realnih lokacij in arhitekture, ki jih nato vključijo v digitalne razširitve

scene (Failes, 2022), kar dopolnilnemu primeru daje neposredno relevantnost v kontekstu videoprodukcije. Zajem na javno dostopni in turistično obiskani lokaciji je hkrati prinesel praktičen izziv, saj gibanje obiskovalcev otežuje fotogrametrični zajem, ki za zanesljivo rekonstrukcijo zahteva čim bolj statičen prizor. Del ob Marijinem kipu sem izbral tudi zato, ker je bil v času zajema med manj obiskanimi. Za izvedbo zajema na območju Ptujskega gradu sem pridobil dovoljenje Pokrajinskega muzeja Ptuj–Ormož. Zajeti del predstavlja kamniti kip Marije z otrokom, postavljen tik ob svetlo ometani steni notranjega dvorišča. Pred kipom se ob robu dvorišča dviguje arkadni hodnik z masivnima kamnitima stebroma, ki na fotografiji uokvirjata prizor z leve in desne. Kip, stena in stebri ponujajo raznolike površine, od grobega klesanega kamna in gladkega ometa do drobnih podrobnosti na kipu, kar je dober preizkus za fotogrametrično rekonstrukcijo različnih materialov. Tla so tlakovana s kamnitimi ploščami, površine pa so večinoma svetle in matirane, kar je za fotogrametrijo ugodno, saj ne ustvarjajo močnih odsevov (Slika 8).



Slika 8: Marijin kip v notranjem dvorišču Ptujskega gradu

Vir: (Lastni vir)

Eksperiment sem na vikendu razširil še s snemanjem osebe pred zelenim ozadjem (*green screen*) za poznejši kompoziting v fotogrametrično scenografijo, pri čemer sem zaradi izvedbe v lastni režiji nastopil sam. Ta razširitev pokaže, da fotogrametrična virtualna scenografija ne

deluje le kot statična vizualizacija, temveč kot funkcionalno produkcijsko okolje, primerno za snemanje človeških likov. Tehnično izvedbo snemanja in kompozitinga podrobneje opisujem v poglavju 3.8.

3.2 Snemanje referenčnega videa na realni lokaciji

Na vsaki lokaciji sem pred začetkom fotogrametričnega zajema posnel referenčni video, ki v poglavju 4 služi kot podlaga za vizualno primerjavo med realnim posnetkom in virtualno upodobitvijo. Video sem posnel z isto kamero kot za fotografiranje, torej s Canonom EOS 650D z objektivom Sigma 17-50 mm f/2.8. Goriščna razdalja je bila enaka fotografiranju, torej 21 mm. Kadre sem snemal s stativa in jih zasnoval tako, da sem jih pozneje lahko poustvaril z virtualno kamero v Unreal Engine 5 (Slika 9). Tak pristop mi je omogočil, da v fazi analize neposredno sopostavim realni in virtualni prizor in ocenim vizualno prepričljivost fotogrametrične rekonstrukcije.

Tehnične specifikacije referenčnega videa so bile naslednje. Snemal sem v polni visoki ločljivosti 1920 × 1080 pri 25 sličicah na sekundo. Hitrost zaklopa sem nastavil na 1/50 s, kar sledi pravilu 180-stopinjskega zaklopnega kota (*180-degree shutter rule*), po katerem naj bo hitrost zaklopa približno dvakratnik števila sličic na sekundo, da gibanje v posnetku deluje naravno in filmsko. Zaslonko sem ohranil pri vrednosti f/11, enako kot pri fotografiranju za fotogrametrijo, da sta bila barvni in tonski karakter posnetkov med obema postopkoma čim bolj primerljiva. Video sem zajel v formatu MOV s kodekom H.264, belino pa sem fiksiral ročno, da se med posameznimi kadri ni prilagajala samodejno. Stabilizacijo objektiva sem med snemanjem na stativu izklopil, saj na stativu ni potrebna.



Slika 9: Snemanje referenčnega posnetka za eksperiment

Vir: (Lastni vir)

Referenčni video sem na vsaki lokaciji posnel tik pred fotogrametričnim zajemom, torej isti dan in pod enakimi svetlobnimi razmerami. S tem sem zagotovil, da sta osvetlitev in atmosfera na obeh posnetkih čim bolj enaki, saj bi sprememba svetlobe med snemanjem videa in fotografiranjem vnesla spremenljivko, ki bi otežila primerjavo. Morebitne razlike med realnim in virtualnim prizorom sem tako lažje pripisal lastnostim fotogrametričnega postopka, ne pa nihanjem v naravni svetlobi. Na obeh lokacijah sem snemal ob oblačnem dnevu, ki je za fotogrametrijo idealen, saj enakomerna difuzna svetloba zmanjša ostre sence in zagotavlja konsistentne teksture na zajetih fotografijah. Na vikendu sem posnel tudi kratke referenčne kadre, v katerih oseba prečka prizor oziroma stoji v njem, da sem jih pozneje lahko primerjal s kompozitom iste osebe, vstavljene v virtualno scenografijo (poglavje 3.8).

3.3 Postopki pridobivanja podatkov za fotogrametrijo

Za fotogrametrično fotografiranje sem uporabil fotoaparat Canon EOS 650D z 18-megapikselnim senzorjem APS-C in objektivom Sigma 17-50 mm f/2.8 EX DC OS HSM.

Goriščno razdaljo sem nastavil na 21 mm, kar zaradi crop faktorja 1,6 pri Canon APS-C senzorju ustreza ekvivalentu približno 34 mm polnega formata. Ta vrednost spada v razpon, ki ga Zmejevskis (2023b) v svojem članku o goriščni razdalji za fotogrametrijo opredeljuje kot priporočljivo zmerno goriščno razdaljo (24–50 mm v polnoformatnem ekvivalentu), ki minimizira distorzijo robov, hkrati pa ohranja dovolj široko vidno polje za učinkovit zajem fasad. Ker ima objektiv mehanski obroč zooma brez stopničastih nastavitev, sem ga pred zajemom fiksiral z lepilnim trakom, da se goriščna razdalja med posnetki ne bi nehote spreminjala. Dejansko goriščno razdaljo sem preveril iz EXIF metapodatkov fotografij, iz katerih RealityScan samodejno prebere tudi podatke o objektivu in s tem natančneje rekonstruira model. Zaslonko sem nastavil na f/11, da sem dosegel čim večjo globinsko ostrino in čim večji del kadra ohranil v ostrini. Vrednost ISO sem večinoma držal pri 100 in ga le v temnejših delih po potrebi dvignil do 400, hitrost zaklopa pa sem nastavil na 1/60 s, kar je dovolj hitro, da sem se izognil zamegljenosti zaradi tresenja. Vse fotografije sem zajel v formatu RAW, ki omogoča največjo prilagodljivost pri naknadni barvni in tonski obdelavi.

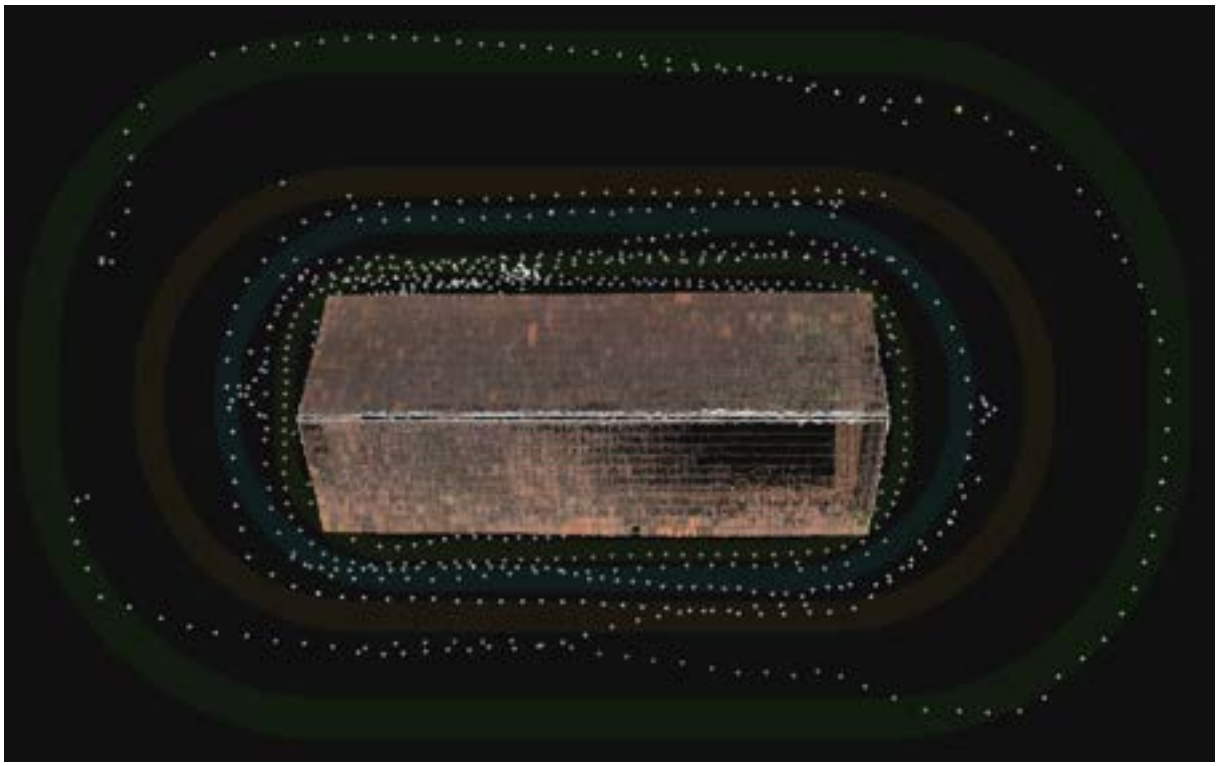


Slika 10: Fotografiranje za fotogrametrični model na prvi lokaciji

Vir: (Lastni vir)

Pri fotografiranju sem sledil pristopu, ki ga lahko ponazorimo z metaforo odstranjevanja plasti čebule (Faucher, 2021). Najprej sem z večje razdalje obkrožil objekt in posnel širše uvodne posnetke, na katerih je bil viden celoten objekt z vseh dostopnih strani. Nato sem se približal in fotografiranje zgostil. Z najmanjše razdalje, približno enega do dveh metrov, sem vsako

stranico sistematično razdelil na pasove in jih fotografiral po vrsti, najprej zgornji del od leve proti desni, nato srednjega in spodnjega, da sem enakomerno pokril celotno površino. Posamezne elemente, kot so vrata, sem zajel z dodatnimi bližnjimi posnetki od zgoraj navzdol, višje in težje dostopne dele ter dele strehe pa sem fotografiral s fotoaparatom, pritrjenim na podaljšan stativ. Med sosednjimi posnetki sem ohranjal zadostno prekrivanje, vsaj 40 do 60 odstotkov, kot priporoča Faucher (2021), kar programski opremi omogoča zanesljivo prepoznavanje skupnih značilnih točk na več fotografijah hkrati. Po fotografiranju sem vse zamegljene ali neostre posnetke izločil iz nabora, saj bi poslabšali poravnavo in končno rekonstrukcijo. Za rekonstrukcijo vikenda sem na koncu uporabil 1197 fotografij, za grad pa 607 (Slika 10 in 11).

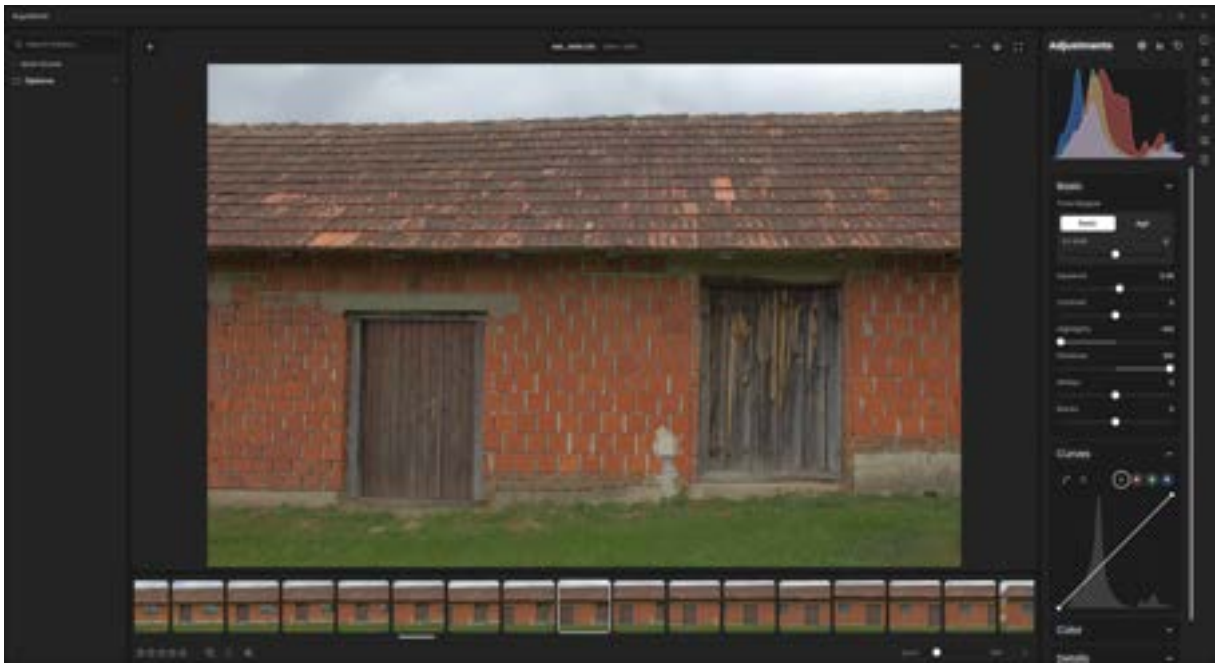


Slika 11: Pogled od zgoraj na razporeditev posnetkov okrog objekta.

Vir: (Lastni vir)

Na vsaki lokaciji sem na začetku fotografiral tudi nevtralno sivo referenčno kartico, postavljeno pod isto svetlobo kot objekt. Ta referenca mi je služila za natančno nastavitev beline v programu RapidRAW, odprtokodnem urejevalniku formata RAW, ki ga uporabljam za celotno pripravo fotografij. Na podlagi nevtralnih sivih ploskev sem določil pravilno barvno temperaturo in jo sinhroniziral na vse fotografije v nizu. S tem sem zagotovil barvno konsistentnost celotnega nabora posnetkov, kar je za kakovost končnih tekstur pomembno. Brez tega koraka bi bile barve med posameznimi fotografijami rahlo nedosledne, kar bi se na rekonstruiranem modelu

kazalo kot vidni prehodi ali barvni odtenki na teksturah. Vsako fotografijo sem tudi tonsko izravnal, dvignil sem sence (*shadows*) in znižal svetle dele (*highlights*), da sem dobil čim bolj enakomerno osvetljeno sliko brez močnih svetlobnih kontrastov, kar za fotogrametrijo priporoča tudi Faucher (2021). Rezultat je bil vizualno precej »plosk« posnetek, vendar je ravno takšen za fotogrametrijo idealen, saj programska oprema teksture generira neposredno iz fotografij, močne sence ali presvetljeni deli pa na končnem modelu povzročijo neželen vizualni učinek. Dodal sem rahlo ostrenje (*sharpening*) in zmanjšal šum (*noise reduction*), samodejnih popravkov distorzije objektiva (*lens corrections*) pa nisem vklopil, ker lahko ta funkcija negativno vpliva na poravnavo fotografij v programu RealityScan. Obdelane fotografije sem izvozil v formatu JPEG pri polni kakovosti v barvnem prostoru sRGB (Slika 12).



Slika 12: Obdelava surovih fotografij v programskem okolju RapidRAW

Vir: (Lastni vir)

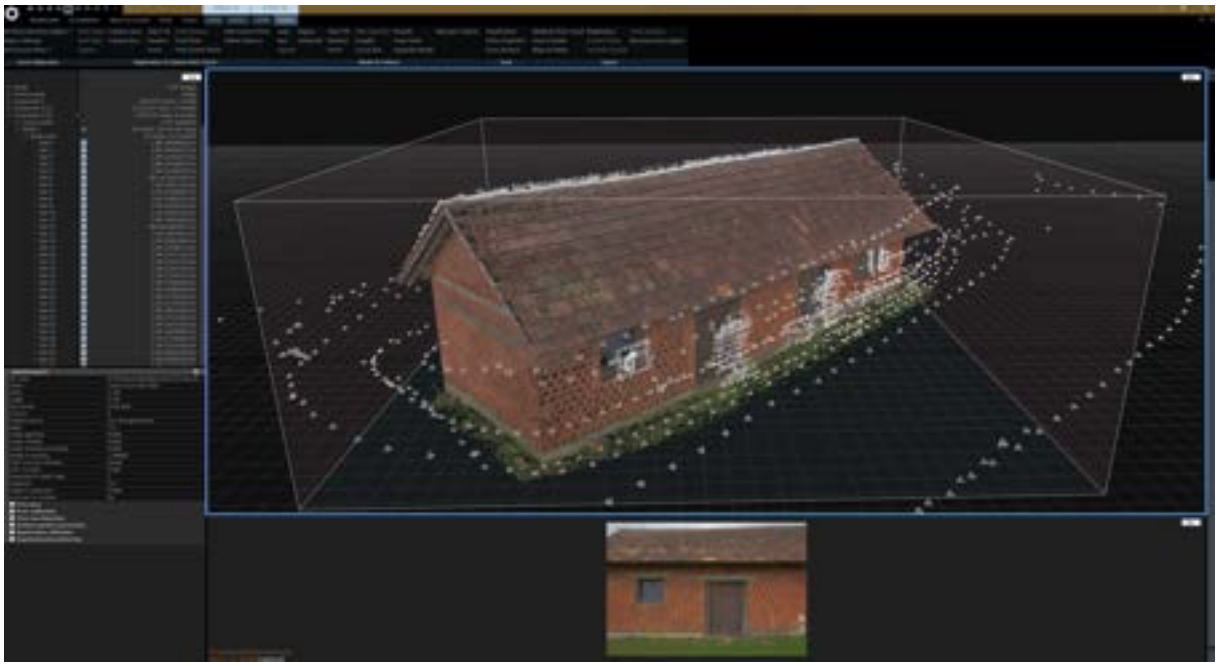
3.4 Obdelava in optimizacija 3D-modelov

Obdelane fotografije sem uvozil v namizno različico programa RealityScan in zagnal samodejno poravnavo (*alignment*). V tej fazi program izvede rekonstrukcijo iz gibanja (*structure from motion*), pri kateri na fotografijah prepozna skupne značilne točke, na podlagi njihovega ujemanja izračuna položaj in orientacijo kamere pri vsakem posnetku ter iz teh podatkov ustvari redek oblak točk (*sparse point cloud*), ki prikazuje grobo prostorsko rekonstrukcijo objekta. Po poravnavi sem pregledal poročilo o registraciji, predvsem število

poravnanih fotografij glede na skupno število vhodnih in povprečno reprojekcijsko napako, da sem se prepričal, da je poravnava uspela. Program je na obeh lokacijah poravnal skoraj vse vhodne fotografije, kar je potrdilo kakovosten zajem. V naslednjem koraku sem določil talno ravnino (*ground plane*), s katero sem model pravilno orientiral glede na mrežo. Brez te nastavitve bi bil objekt v programu postavljen postrani, kar bi otežilo kasnejše delo v Unreal Engine 5. Poleg tega sem omejil rekonstrukcijsko območje (*reconstruction region*) tako, da je tesno objemalo le zajeti objekt. Vse, kar je padlo zunaj te meje, kot so drevesa, tla in sosednji objekti, je program pri nadaljnji obdelavi ignoriral, s čimer sem prihranil čas računanja in prostor na disku.

Iz redkega oblaka točk sem nato zagnal večpogledno stereorekonstrukcijo (*multi-view stereo*), ki je ustvarila gost oblak točk in iz njega generirala poligonsko mrežo (*mesh*). Program je sprva izdelal izjemno gost visokopoligonski model, pri vikendu 337 milijonov trikotnikov in pri gradu 278 milijonov, ki je natančno popisoval geometrijo zajetega objekta, vendar je bil v takšni obliki prevelik za učinkovito upodabljanje. Model sem zato s funkcijo za poenostavljanje (*simplify tool*) postopno zmanjšal na končnih 5 milijonov trikotnikov, kar je za tehnologijo Nanite v Unreal Engine 5 povsem obvladljivo. Program je med poenostavljanjem samodejno ustvaril karto normal (*normal map*), ki drobne površinske detajle z visokopoligonskega modela prenaša na poenostavljeno geometrijo. Model tako vizualno ohranja podrobnosti, čeprav ima bistveno manj poligonov. Na koncu sem zagnal še teksturiranje, pri katerem je program barvne podatke iz izvirnih fotografij projiciral na površino 3D-modela in ustvaril fotorealistične teksture. Ker je bil vikend velik objekt, zajet z vseh strani, sem zanj uporabil sistem razdelitve tekstur UDIM, ki teksturo razdeli na več ločenih delov pri višji resoluciji, namesto da bi celoten objekt pokrila ena sama tekstura z nezadostno ostrino. Pri vikendu je tako nastalo 19 teksturnih delov, medtem ko je pri manjšem zajetem delu gradu zadostovala ena sama tekstura.

Po končani rekonstrukciji sem model vizualno pregledal in poiskal morebitne napake na geometriji, kot so luknje, popačenja ali odvečni deli. Večje odvečne dele sem odstranil že v RealityScanu, podrobnejše čiščenje modela pa sem opravil v Blenderju, kar opisujem v naslednjem podpoglavju. Model sem nato izvozil v formatu FBX skupaj z UDIM-teksturami. Pri izvozu sem koordinatni sistem nastavil na prednastavitev Maya/Arnold/Unreal, ki zagotavlja pravilno orientacijo in merilo ob uvozu v Unreal Engine 5, ter vklopil izvoz normal (*vertex normals*), da so se površinske podrobnosti iz kart normal pravilno prenesle. Razporeditev zajetih fotografij okrog objekta in nastali oblak točk prikazuje Slika 13.



Slika 13: Oblak točk v programskem okolju RealityScan

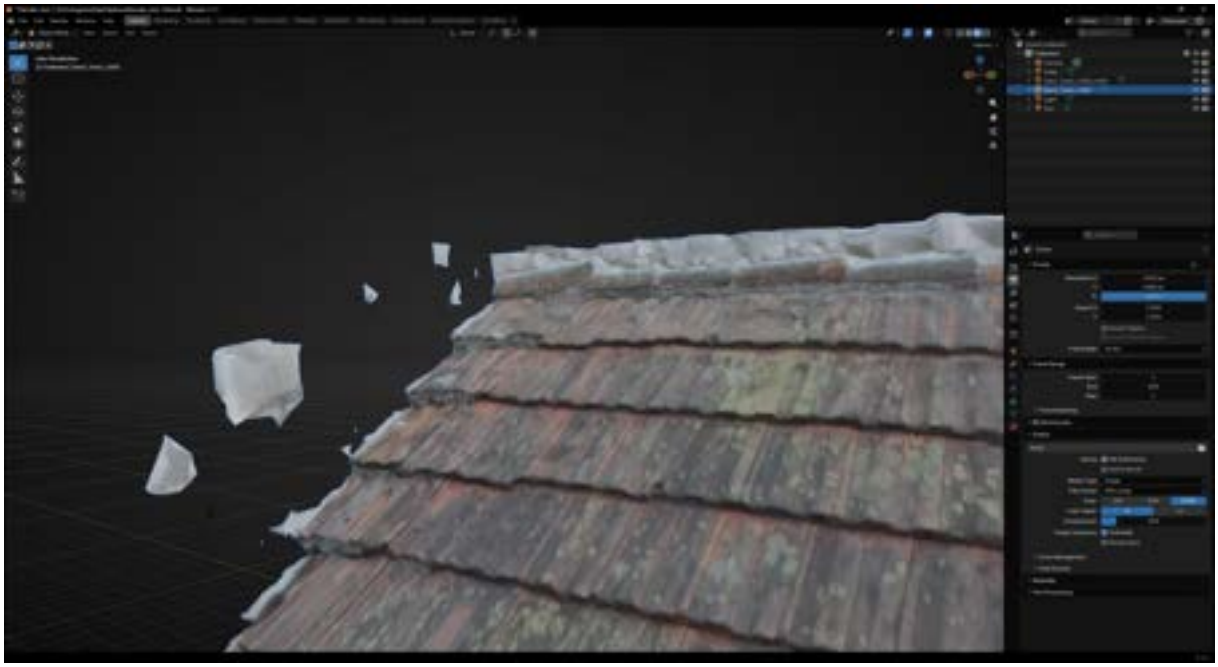
Vir: (Lastni vir)

3.5 Čiščenje in popravki modela

Preden sem model uvozil v Unreal Engine 5, sem odpravil napake, ki nastanejo pri fotogrametrični rekonstrukciji. Te so bile dveh vrst. Prve so plavajoči artefakti (*floating artifacts*), torej ločeni kosi geometrije, ki lebdijo stran od modela na mestih, kjer programska oprema ni imela dovolj podatkov za zanesljivo rekonstrukcijo. Druge so odvečne bele površine, ki so se držale samega modela, predvsem ob zgornji strešni liniji in ponekod ob straneh, kjer je program v rekonstrukcijo zajel tudi belo nebo v ozadju. Tovrstno čiščenje mreže (*mesh cleanup*) strokovni viri opisujejo kot uveljavljen vmesni korak med fotogrametrijo in realnočasovnim pogonom (Ryman, 2022).

Večino plavajočih artefaktov sem odstranil že v programu RealityScan, ki ponuja orodje za filtriranje in odstranjevanje izbranih delov mreže. Tam sem izbral in odstranil večje odvečne kose, ki niso pripadali zajetemu objektu. Model sem nato prenesel v program Blender, kjer sem opravil podrobnejše popravke. V Blenderju sem odstranil bele površine, ki so se tesno držale mreže ob strešni liniji in ob straneh ter jih v RealityScanu ni bilo mogoče natančno ločiti od objekta. Bele površine, ki jih je bilo treba odstraniti, prikazuje Slika 14. Blender mi je pri tem omogočil natančnejši ročni izbor geometrije in večji nadzor nad posameznimi deli modela.

Poseben izziv so predstavljala okna na vikendu, saj se steklo in sijajne površine pri fotogrametriji ne rekonstruirajo dobro. Zaradi odbojev in prosojnosti programska oprema na teh mestih ne dobi zanesljivih podatkov, kar se na modelu pokaže kot popačena ali nepravilna geometrija. To omejitev fotogrametrije pri prosojnih in zrcalnih materialih opisujejo tudi strokovni viri (Zmejevskis, 2023a). Steklo na oknih sem zato v Blenderju odstranil, na njegovo mesto pa sem pozneje v Unreal Engine 5 vstavil ravno ploskev z materialom, ki posnema steklo. Lastnosti tega materiala, barvo, prosojnost in odbojnost, sem nastavil tako, da se čim bolj ujemajo z videzom oken na referenčnem realnem posnetku.



Slika 14: Beli artefakti v programskem okolju Blender

Vir: (Lastni vir)

Poleg geometrije sem v Blenderju popravil tudi nekatere teksture, kjer je program ob projekciji iz fotografij ustvaril madeže ali raztegnjena območja. Pri vikendu sem moral na primer s klonirnim čopičem (*clone brush*) prekriti ostanke bele barve neba, ki so po odstranitvi odvečne geometrije ostali na teksturi strehe. Zahtevnejši poseg je terjala ena od sten gradu, ki je bila zaradi nepopolnega zajema videti grudičasta, čeprav bi morala biti ravna. Ker gre za enobarvno steno, sem grudičaste poligone odstranil, nastalo vrzel zapolnil z ravno ploskvijo in njeno UV-razporeditev preusmeril na neizkoriščen del teksture, površino pa s klonirnim čopičem po vzoru sosednje stene poenotil. Tak pristop, pri katerem fotogrametrični model pred uvozom v pogon očistim v vmesnem programu, ni značilen le za neodvisne projekte, temveč ga uporabljajo tudi v profesionalni produkciji. Studio Happy Mushroom je na primer pri seriji The Mandalorian

fotogrametrične modele iz programa RealityCapture čistil in popravljal napake projekcije, preden jih je prenesel naprej v produkcijski cevovod (Failes, 2020). Razlika je le v izbiri orodja, saj sem namesto profesionalnih programov, kot sta ZBrush in Substance Painter, uporabil brezplačni Blender, ki za obseg mojih popravkov povsem zadostuje.

3.6 Sestava virtualne scenografije

Izvoženo datoteko FBX sem uvozil v Unreal Engine 5, pri čemer sem v nastavitvah uvoza vklopil možnost gradnje Nanite geometrije (*Build Nanite*). Tehnologija Nanite pogonu omogoča učinkovito upodabljanje visokopoligonskih modelov brez ročne poenostavitve topologije (retopologije), ki je bila v starejših različicah pogona nujen vmesni korak. Brez nje bi model z več milijoni poligonov pogon občutno upočasnil. V mojem primeru je to pomenilo, da sem fotogrametrični model s 5 milijoni trikotnikov lahko uporabil neposredno, brez dodatnega ročnega preoblikovanja geometrije. Pri uvozu normal sem izbral možnost uvoza iz datoteke (*Import Normals*), da so se površinske podrobnosti iz kart normal pravilno prenesle. Ker sem pri vikendu uporabil več UDIM tekstur, je program ob uvozu ustvaril več materialnih identifikatorjev (*Material ID*), ki sem jih v urejevalniku materiala (*Material Editor*) združil v enega samega, kar je poenostavilo nadaljnje upravljanje materiala. Pri gradu, ki je imel eno samo teksturo, ta korak ni bil potreben.

Ko so vse ploskve modela uporabljale en sam *material slot*, sem zanj ustvaril nov material in vanj vnesel prvo teksturo v seriji UDIM, in sicer tisto s končnico 1001. Pred tem sem vklopil nastavitev navideznega teksturiranja (*virtual texturing*), ki pogonu omogoča, da samodejno prepozna in poveže vse preostale dele v seriji UDIM tekstur, ne da bi moral vsakega vnašati ročno. Teksture so se v barvnem prostoru pravilno prenesle, saj sem fotografije že v fazi priprave v programu RapidRAW izvozil v prostoru sRGB, ki ga Unreal Engine privzeto pričakuje. Na končnem modelu sem nato preveril, ali teksture pravilno prekrivajo geometrijo in se ujemajo z videzom izvirnega objekta.



Slika 15: Fotogrametrični model vikenda, umeščen v sestavljeno sceno

Vir: (Lastni vir)

Fotogrametrični model sem postavil v širše digitalno okolje (Slika 15). Teren sem oblikoval v samem pogonu, sceno pa dopolnil z drevjem in vegetacijo iz knjižnice Megascans, da je objekt deloval umeščen v prepričljiv prostor. Za osvetlitev scene sem uporabil sistem Lumen, ki zagotavlja globalno osvetlitev (*global illumination*) in odseve v realnem času brez predhodnega izračunavanja svetlobnih kart. Glavno svetlobo je predstavljala usmerjena svetloba (*directional light*), ki je simulirala sončno svetlobo, svetloba neba (*sky light*) pa je mehko zapolnjevala sence in dodajala ambientalno razsvetljavo prizora. Smer, intenzivnost in barvno temperaturo obeh virov sem nastavil tako, da je prizor čim bolj posnemal svetlobne razmere na lokaciji ob času snemanja referenčnega videa. Po tej prvotni nastavitvi sem isti prizor upodobil še z drugačno osvetlitvijo. Spremenil sem smer glavne svetlobe, prilagodil barvno temperaturo in intenzivnost, za nočne različice pa sem dodal točkovne svetlobe (*point light*), ki so predstavljale umetne vire svetlobe, saj usmerjena sončna svetloba ponoči ne osvetljuje prizora. S tem sem ustvaril vizualno povsem drugačno vzdušje iste scene. Namen tega koraka je bil prikazati fleksibilnost virtualnega pristopa. Medtem ko bi na realni lokaciji za drugačno osvetlitev moral čakati na drug čas dneva ali uporabiti obsežno umetno razsvetljavo, sem v virtualnem okolju isto spremembo dosegel z nastavitvami svetlobnih virov v pogonu brez ponovnega snemanja.

Virtualno kamero sem v sceni postavil na položaje, ki ustrezajo zornim kotom iz referenčnega videa. Goriščno razdaljo sem nastavil na enako vrednost kot pri realnem snemanju, da sta bila

perspektiva in vidno polje med virtualnim in realnim kadrom primerljiva. Poleg kadrov, ki so neposredno posnemali referenčni video, sem posnel tudi kadre iz zornih kotov, ki jih na realni lokaciji nisem mogel posneti, bodisi zaradi fizičnih ovir, nedostopnega terena ali omejitev stativa. S tem sem prikazal eno od prednosti virtualnega pristopa, saj kamera v digitalnem okolju ni omejena s fizičnim prostorom in jo je mogoče prosto premikati tudi na položaje, ki bi bili v resničnosti nedostopni ali nevarni. Gibanje kamere in zaporedje kadrov sem animiral z orodjem Sequencer, s katerim sem nato kadre tudi upodobil v ločljivosti 1920 × 1080 pri 25 sličicah na sekundo, enako kot referenčni video, da je bila vizualna primerjava v poglavju 4 čim bolj neposredna.

Pri grajski sceni je bila sestava preprostejša. Ker sem zajel le zaključen del notranjega dvorišča s kipom, steno in stebri, modela ni bilo treba postavljati v širše digitalno okolje ne dodajati terena ali vegetacije kot pri vikendu. Fotogrametrični model sem zato neposredno osvetlil s sistemom Lumen in nastavil virtualno kamero na zorne kote iz referenčnega videa, postopek osvetlitve in postavitve kamere pa je sicer potekal enako kot pri vikendu.

3.7 Končna obdelava in vizualna integracija

V programu DaVinci Resolve sem virtualne kadre barvno uskladil z realnimi posnetki (*color grading*). Prilagajal sem belino, kontrast, nasičenost in tonsko krivuljo, pri čemer cilj ni bil doseči popolno identičnost obeh prizorov, temveč vizualno skladnost, da gledalec ob zaporednem ogledu oba kadra dojame kot del istega prizora. Ta korak se je izkazal za enega zahtevnejših, saj se naravna svetloba na lokaciji in osvetlitveni model v pogonu ne vedeta povsem enako (Slika 16). K vizualni skladnosti je prispevalo tudi to, da sem upodobitvam iz Unreal Engine 5 dodal rahel umeten šum kamere (*camera noise*), s čimer sem zmanjšal njihovo digitalno čistost in jih približal videzu realnih posnetkov.



Slika 16: Barvno usklajevanje virtualnega kadra v programu DaVinci Resolve

Vir: (Lastni vir)

Pri usklajevanju sem naletel na nekaj razlik, ki jih z barvno obdelavo ni bilo mogoče povsem odpraviti. Perspektiva med realnim in virtualnim kadrom se kljub enaki goriščni razdalji ponekod ni popolnoma ujemala, saj je že majhen zamik položaja ali višine kamere povzročil opazno odstopanje. Prav tako so se nekatere površine v pogonu na svetlobo odzivale drugače kot v resničnosti, te razlike sem poskušal ublažiti z barvnim usklajevanjem.

Končni primerjalni video sem sestavil v programu DaVinci Resolve in ga organiziral po posameznih primerih. Vsak primer prikazuje en prizor v več zaporednih kadrih, najprej realni posnetek, nato virtualno upodobitev istega kadra, po potrebi virtualni kader s premikom kamere in na koncu sopostavitev realnega in virtualnega kadra drug ob drugem. Vsak kader je spodaj levo označen z napisom, ki pove vrsto posnetka (realni posnetek, virtualna upodobitev, kompozit) lokacijo in zaporedno številko primera. Iste številke uporabljam tudi v tabeli ocen v poglavju 4.2. Skupaj sem pripravil trinajst primerov, sedem z lokacije vikenda in šest z gradu, ter ločeno sekvenco, ki prikazuje postopek kompozitinga.

3.8 Snemanje pred zelenim ozadjem in kompoziting

Snemanje osebe pred zelenim ozadjem (*green screen*), napovedano v poglavju 3.1, sem izvedel v lastni režiji in pri njem nastopil sam. Postopek se metodološko umešča v prvi pristop virtualne produkcije po taksonomiji Swords in Willment (2024), ki temelji na zelenem zaslonu in

naknadnem sestavljanju slike v postprodukciji. Snemanje pred zelenim ozadjem ni vezano na konkretno lokacijo, saj ga je mogoče izvesti kjerkoli, vendar sem ga namenoma izvedel na vikendu in pod enako svetlobo kot fotogrametrični zajem, da sem lahko isti kader z osebo posnel tako v resnici kot pozneje poustvaril v virtualni sceni. Isti posnetek osebe sem nato vstavil tudi v grajsko sceno, s čimer sem pokazal, da je enkrat zajeti lik mogoče prenesti v poljubno fotogrametrično okolje, ne le v tisto, kjer je bil posnet (Slika 17).



Slika 17: Prikaz osebe, posnete pred zelenim zaslonom, in fotogrametrične scenografije

Vir: (Lastni vir)

Posnel sem več krajših kadrov osebe, vsakega v dolžini nekaj deset sekund. Kadri so vključevali različne položaje in gibanja, ki ustrezajo prizorom v primerjalnem videu, od mirne stoje in hoje skozi prizor do sedenja.

Kompoziting sem izvedel na dva načina, večino kadrov v programu DaVinci Resolve, dva kadra pa neposredno v Unreal Engine 5. V DaVinci Resolve sem osebo izrezal iz zelenega ozadja na strani Fusion z orodjem Delta Keyer, z masko poligona pa sem omejil območje izreza in odstranil moteče dele zunaj osebe. Izrezano osebo sem nato postavil pred upodobitev fotogrametrične scenografije. Pri dnevnih kadrih, posnetih ob oblačnem dnevu, pod osebo nisem dodajal sence, saj difuzna svetloba oblačnega dne ne ustvarja izrazitih senc in bi dodana senca delovala nenaravno. Pri temnejših kadrih, kjer oseba sedi v zatemnjenem prizoru z usmerjeno svetlobo, sem osebo barvno prilagodil temnemu okolju in pod njo ročno dodal senco,

sestavljeno iz kontaktne sence pod osebo in potemnjene kopije osebe kot padajoče sence na steni, da sem lik prostorsko sidral v prizor.

Pri dveh kadrih sem kompozit izvedel neposredno v Unreal Engine 5. Posneto osebo sem najprej v DaVinci Resolve izrezal iz zelenega ozadja in jo izvozil kot zaporedje slik PNG z alfa kanalom, torej s prosojnim ozadjem. To zaporedje sem nato v pogonu uporabil kot teksturo na ravnini (*plane*), ki sem jo postavil v fotogrametrično sceno in usmeril proti kameri. Pri tem pristopu osebo osvetli ista svetloba kot preostalo sceno. Pri nočnem kadru z eno samo svetlobo je senca osebe nastala neposredno v pogonu in padla na fotogrametrični teren, pri dnevnem kadru pa izrazite sence ni bilo, podobno kot pri dnevnih kadrih, sestavljenih v DaVinci Resolve. Postavitev vstavljene osebe v sceni znotraj urejevalnika prikazuje Slika 18.



Slika 18: Postavitev osebe v sceni programa Unreal Engine 5

Vir: (Lastni vir)

Rezultat tega koraka dopolnilno podpira hipotezo H1, saj nakazuje, da je fotogrametrična virtualna scenografija lahko dovolj prepričljiva za prikaz osebe v njej. V poglavju 4 ta dodatek obravnavam kot dopolnilni dokaz, ki ga ovrednotim ob primerjalnih kadrih, pri čemer se zavedam, da je končni rezultat odvisen tudi od izkušenosti izvajalca in uporabljene opreme.

4 ANALIZA IN PRIMERJAVA

V tem poglavju analiziram rezultate eksperimenta in jih primerjam z referenčnimi posnetki realnih lokacij. Hipotezo 1 preverjam s strukturirano lastno analizo fotorealizma, pri kateri vsak primer ocenim po vnaprej določenih merilih, ob tem pa svoje ugotovitve primerjam s prakso profesionalnih produkcij. Hipotezo 2 preverjam kot praktično demonstracijo fleksibilnosti pri kadriranju in osvetlitvi, hipotezo 3 pa utemeljujem s kombinacijo pregleda literature in lastnega zapisa časa, stroškov in produkcijskih virov. Poglavje zaključim z razpravo o omejitvah in prednostih pristopa ter s preverjanjem posameznih hipotez.

4.1 Metodološki pristop k analizi

Za oceno fotorealizma uporabljam strukturirano lastno analizo, ki temelji na vnaprej določenih merilih in pisni utemeljitvi vsake ocene. Pristop ohranja akademsko verodostojnost s tem, da metodologijo izrecno opišem in rezultatov ne posplošujem na splošno populacijo, hkrati pa metodološko sodi v okvir avtoetnografske raziskave, kjer raziskovalec sam reflektira lasten praktični projekt in svoja opažanja sistematično dokumentira. Ker sem zajem, izdelavo in oceno opravil sam, se zavedam, da analiza vsebuje element subjektivnosti, ki ga z izrecnim opisom meril skušam čim bolj omejiti.

Vsak primer ocenim po štirih merilih, in sicer osvetlitev, materiali, geometrija in celotna prepričljivost. Pri tem se opiram na ugotovitev, da geometrija in tekstura vsaka na svoj način vplivata na zaznano kakovost 3D-modela, zato ju literatura o vizualni kakovosti obravnava kot ločeni komponenti (Guo idr., 2016). Merili osvetlitve in celotne prepričljivosti omenjenima dvema dodajam zaradi narave videoprodukcije, kjer sta za prepričljivost kadra ključnega pomena. Pri vsakem merilu pisno utemeljim, kaj v virtualni upodobitvi deluje prepričljivo in kaj odstopa od referenčnega posnetka.

Ker nimam lasersko skeniranega referenčnega modela, geometrije ne ocenjujem z merjenjem milimetrskih odstopanj, temveč kvalitativno, s primerjavo oblike, proporcev in robov virtualnega kadra z referenčnim posnetkom realne lokacije. Osvetlitev ocenim glede na ujemanje smeri, mehkobe in barve svetlobe ter padanja senc, materiale glede na realističnost in ostrino tekstur ter ujemanje barv, geometrijo glede na skladnost oblike in odsotnost vidnih deformacij, celotno prepričljivost pa kot skupni vtis, ali bi kader deloval prepričljivo kot nadomestilo za resnično lokacijo. Tak pristop je skladen z naravo eksperimenta, ki ne meri

tehnične natančnosti rekonstrukcije, temveč njeno vizualno prepričljivost v kontekstu videoprodukcije.

Teoretsko izhodišče za to razčlenitev je Princov (1996) koncept perceptualnega realizma, po katerem prepričljivost digitalne podobe ne izhaja iz njene fizikalne identičnosti z resničnim svetom, ampak iz strukturne skladnosti svetlobnih, barvnih in teksturnih namigov z gledalčevo izkušnjo. Pri lastni fotogrametrični scenografiji zato ne stremim k popolnemu piksel natančnemu ujemanju z referenčnim posnetkom, ampak k temu, da virtualni kader pri gledalcu vzbudi enak občutek prostora kot realna lokacija.

Pri vrednotenju ocen je treba upoštevati tudi naravo same primerjave. V analizi sem realni in virtualni kader postavil drug ob drugega, kar je strožji preizkus, kot ga zahteva dejanska produkcijska uporaba. Ob neposredni referenci gledalec lažje opazi drobna odstopanja, na primer razliko v svetlobi ob robovih ali v barvnem tonu, ki jih pri samostojnem kadru brez primerjave ne bi zaznal. V resnični videoprodukciji virtualni kader praviloma ne stoji ob svojem realnem dvojniku, temveč je vključen med druge posnetke, kjer ga gledalec presoja samostojno. Cilj zato ni bil doseči piksel natančno istovetnost, temveč kader, ki bi v zaporedju z drugimi posnetki deloval naravno in verodostojno. Ocene, ki sledijo, je zato treba razumeti kot konzervativne, saj izhajajo iz najzahtevnejšega načina primerjave.

4.2 Vizualna primerjava virtualne scenografije z realnim posnetkom

Za preverjanje hipoteze H1 sem primerjal sedem parov kadrov, pri katerih sem za vsak prizor razpolagal z realnim posnetkom in virtualno upodobitvijo istega kadra. Pri vsakem paru sem uskladil zorni kot, goriščno razdaljo in kompozicijo, nato pa virtualni kader ocenil po štirih merilih – osvetlitev, materiali, geometrija in celotna prepričljivost, na lestvici od 1 do 5. Najnižja vrednost pomeni očitno odstopanje od realnega posnetka, najvišja pa videz, ki ga od realnega skorajda ni mogoče ločiti. Pri vsakem paru sem oceno pisno utemeljil, povzetek pa je predstavljen v Tabeli 2.

Tabela 2: Ocene vizualne prepričljivosti primerjalnih kadrov po štirih merilih

Primer	**Osvetlitev**	**Materiali**	**Geometrija**	**Prepričljivost**	**Povprečje**
Vikend 1	4	4	5	4	4,25
Vikend 2	4	4	5	4	4,25
Vikend 3	4	4,5	5	5	4,63
Grad 1	4	3	4	4	3,75
Grad 2	4	3	3	3	3,25
Grad 3	4	3	3,5	4	3,63
Grad 4	4	3	3,5	3,5	3,50
Povprečje	4,0	3,5	4,1	3,9	3,9

Vir: (Lastni vir)

Rezultati kažejo razmeroma visoko stopnjo vizualne prepričljivosti, vendar z jasno razliko med lokacijama. Pri vikendu, ki sem ga zajel v celoti in ki ga sestavljajo pretežno matne površine opeke in lesa, so se ocene gibale med 4,25 in 4,63. Pri gradu, kjer sem zajel le del prizora s kamnitim kipom, so bile ocene opazno nižje, med 3,25 in 3,75. Ta razlika ni naključna, temveč odraža obseg in kakovost zajema, kar podrobneje obravnavam v poglavju 4.5.

Med štirimi merili se je najbolje obnesla geometrija s povprečjem 4,1, tesno za njo pa osvetlitev s povprečjem 4,0. Sistem Lumen je v večini kadrov prepričljivo posnemal mehko svetlobo oblačnega dne, geometrija fotogrametričnih modelov pa je natančno sledila obliki realnih objektov, kar je bilo najbolj očitno pri statičnih kadrih vikenda. Najšibkejše merilo so bili materiali s povprečjem 3,5, kar je najbolj izstopalo pri kamnitem kipu gradu, kjer je tekstura malo izgubila ostrino. Celotna prepričljivost je v povprečju dosegla oceno 3,9. Primer takšne neposredne primerjave realnega in virtualnega kadra prikazuje Slika 19.



Slika 19: Neposredna primerjava realnega posnetka (levo) in virtualne upodobitve (desno)

Vir: (Lastni vir)

Najpomembnejša kvalitativna ugotovitev je, da je bila virtualna upodobitev najbolj prepričljiva v kadrih, kjer je bila v prizoru prisotna izključno fotogrametrija in kjer je bila kamera statična. Najvišjo oceno je dosegel bližnji statični posnetek starih lesenih vrat z opečnatim zidom, pri katerem je bila virtualna upodobitev tako rekoč skorajda neločljiva od realnega posnetka. Lesna struktura z grčami in razpokami ter luknjičasta opeka sta se rekonstruirali natančno, saj gre za matne in razgibane površine, ki jih fotogrametrija zajame najbolje. Nasprotno so najbolj odstopali deli okolja, ki niso bili del fotogrametričnega zajema, predvsem vegetacija iz knjižnice Megascans, na primer trava in drevje, ki ob neposredni primerjavi z realnim posnetkom delujejo manj prepričljivo.

Ker gre pri vseh kadrih za isti fotogrametrični model, je geometrija med posnetki enaka in se z gibanjem kamere ne spreminja. Pri bližnjih kadrih kipa pa je ob robovih mestoma opazna rahla zobčavost geometrije, ki postane vidna predvsem ob pozornem opazovanju, podobno pa se pri enem od kadrov rahlo pozna tudi rob na vratih. Te manjše nepravilnosti so vplivale na nekoliko nižje ocene geometrije pri bližnjih grajskih kadrih, medtem ko pri bolj oddaljenih kadrih in pri vikendu niso izstopale. Pri gibljivih kadrih se prepričljivost sicer ni bistveno zmanjšala, saj gibanje samo po sebi ne razkrije novih pomanjkljivosti, pomembna pa je predvsem naravnost gibanja kamere, kar obravnavam v poglavju 4.3.

Pri razlagi teh ocen je treba upoštevati, da gre za lastno strukturirano presojo enega izvajalca, zato so vrednosti subjektivne in jih ne posplošujem. Namen ocenjevanja ni bil dokazati merljivo tehnično natančnost, temveč zabeležiti, v kolikšni meri virtualni kader pri meni kot gledalcu vzbudi enak občutek prostora kot realna lokacija. Visoke ocene pri vikendu zato razumem kot pokazatelj, da je ob ustreznih pogojih, torej celovitem zajemu, matnih materialih in premišljeni osvetlitvi, mogoče doseči prepričljiv rezultat, ne pa kot dokaz, da je fotogrametrična scenografija vedno enakovredna realni lokaciji.

Posebej velja obravnavati primera Vikend 4 in Vikend 5, pri katerih sem realno posneto osebo s tehniko zelenega zaslona vstavil v fotogrametrično scenografijo vikenda. Ta dva primera ne preverjata fotorealizma scene kot takega, temveč prepričljivost kompozita, torej kako naravno se realna oseba zlije z virtualnim ozadjem, zato ju nisem vključil v tabelo ocen. V obeh primerih je bila integracija uspešna, saj so bili robovi izreza čisti, osvetlitev osebe pa skladna z osvetlitvijo scene, tako da je lik deloval umeščen v prostor in ne nalepljen nanj. K prepričljivosti je prispevalo tudi mračno vzdušje obeh prizorov, saj zatemnjena svetloba prikrije drobne nepopolnosti, ki bi v svetlejšem kadru morda izstopale. Oba primera tako nakazujeta, da fotogrametrična scenografija lahko deluje kot funkcionalno ozadje za snemanje človeških likov, vendar je končni rezultat odvisen tudi od svetlobnih pogojev in postavitve kadra. Dodatne kadre z osebo, pri katerih sem hkrati spreminjal osvetlitev ali gibanje kamere, obravnavam v poglavju 4.3, saj pretežno prikazujejo fleksibilnost virtualnega pristopa in ne primerjave z realnim posnetkom.

4.3 Fleksibilnost v postprodukciji

Fleksibilnost fotogrametrične scenografije se kaže kot zmožnost ustvarjanja variant kadra, ki jih na realni lokaciji brez ponovnega snemanja ne bi bilo mogoče zajeti. Hipotezo H2 sem preveril tako, da sem iz istih fotogrametričnih modelov ustvaril več dodatnih kadrov, pri katerih sem spreminjal osvetlitev, gibanje kamere in globinsko ostrino. Ti kadri nimajo realnega para, saj jih na lokaciji nisem posnel, temveč prav ponazarjajo, kaj je v virtualni sceni mogoče ustvariti naknadno.

Najbolj nazorno spremembo prikazuje primer Vikend 6, pri katerem sem isti prizor vikenda iz dnevne osvetlitve postopno spremenil v nočno. Spremenil sem smer in barvno temperaturo glavne svetlobe, nato pa dodal dva umetna svetlobna vira, ki osvetljujeta fasado, in v prizor vstavil osebo, ki sedi ob vratih. Tako spremembo bi na realni lokaciji dosegel le z nočnim snemanjem, umetno razsvetljavo in ustrezno opremo, v virtualni sceni pa sem jo izvedel zgolj z nastavitvami svetlobnih virov v pogonu. Podobno sem pri primeru Grad 6 grajski prizor upodobil v nočnem vzdušju z eno samo usmerjeno svetlobo, ob kateri je senca vstavljene osebe nastala neposredno v pogonu, kar je v tem primeru olajšalo delo, čeprav bi senco verjetno lahko ustvaril tudi v programu za montažo z naprednejšimi orodji.

Primer Vikend 7 prikazuje fleksibilnost pri gibanju kamere in globinski ostrini. Kader sem zasnoval kot širok prizor z gibanjem kamere v desno, ob čemer se v ospredju premika bleda

lesena ograja zunaj območja ostrine, kar ustvari občutek globine in prostora. Plitko globinsko ostrino, pri kateri je ospredje zamegljeno, glavni objekt pa oster, sem v pogonu nastavil poljubno, medtem ko bi na realni lokaciji zahtevala poseben objektiv in natančno izostritev. Primer Grad 5 to dopolnjuje z navpičnim dvigom kamere od tal navzgor, ki bi na lokaciji zahteval dodatno opremo za gladek dvig kamere, v virtualni sceni pa sem ga izvedel kot preprosto animacijo kamere.

Poleg samostojnih primerov fleksibilnosti sem gibanje kamere dodal tudi nekaterim primerjalnim kadrom. Pri primerih Vikend 1 in Vikend 3 sem poleg statične primerjave posnel še različico, v kateri se kamera počasi premakne od leve proti desni in se na koncu ustavi v istem kadru kot statični posnetek. Pri primeru Vikend 4 se kamera spusti rahlo postrani z višine do končnega kadra, pri Vikend 5 pa se spusti od zgoraj nad hišo navzdol, nato pa se kader izpelje enako kot v statični različici. Ti gibljivi uvodi pokažejo, da je isti primerjalni kader mogoče doseči tudi z gibanjem kamere, kar na realni lokaciji brez ustrezne opreme za gladko gibanje ne bi bilo izvedljivo.

Pri teh kadrih sem opazil tudi, da lahko gibanje virtualne kamere kljub tehnično gladki izvedbi mestoma deluje nekoliko nenaravno. Premik sem naredil enakomeren, podobno kot pri premiku kamere na tirnicah, vendar v virtualnem prostoru tak gib včasih ne vzbudi povsem enakega občutka kot pri pravi kameri. Tega vtisa ne pripisujem kakovosti fotogrametričnega modela, temveč naravi gibanja kamere v digitalnem okolju, kar bi bilo z več izkušnjami pri animaciji kamere mogoče izboljšati.

Opazil sem tudi, da plitka globinska ostrina in zatemnjena osvetlitev poleg kreativnega učinka opravljata praktično vlogo, saj usmerita pozornost na glavni motiv in zabrišeta manjše razlike v ostrini teksture. Zamegljeni in temnejši deli kadra ne razkrivajo drobnih podrobnosti površine, zato območja z nekoliko manj ostro teksturo v takšnih kadrih ne izstopajo. Prav zato so nočni in plitko izostreni grajski kadri pri meni kot gledalcu delovali nekoliko bolj prepričljivo od dnevnih statičnih bližnjih posnetkov istega kipa, čeprav vsi temeljijo na istem modelu.

Posebno obliko fleksibilnosti predstavlja premestitev zajetega objekta v povsem novo okolje. Vikend v resnici stoji ob vaški cesti, obdan z drugimi hišami, brez odprte zelenice ali gozda v ozadju. V virtualni sceni sem isto stavbo postavil v idealizirano okolje s travnikom in drevjem, kar na dejanski lokaciji ne bi bilo mogoče posneti. V produkcijski praksi bi tak kader lahko služil kot uvodni vzpostavitveni kader (*establishing shot*), ki gledalcu predstavi prizorišče, nadaljnje snemanje pa bi potekalo v bližnjih kadrih na realni lokaciji. Gledalec bi oba kadra

povezal v isti prostor, čeprav okolje v uvodnem kadru v resnici ne obstaja. Pri tem velja opozoriti, da je prav dodano okolje, zlasti vegetacija iz knjižnice Megascans, tisti del kadra, ki najbolj odstopa od fotorealizma same fotogrametrije, kar to prednost nekoliko omejuje.

Skupna ugotovitev je, da je spreminjanje osvetlitve, kadriranja in gibanja kamere v virtualni sceni hitro in prožno. Dodajanje nove kamere ali svetlobnega vira je tako rekoč takojšnje, za premišljeno nastavitev osvetlitve ali gibanja pa sem porabil približno deset do petnajst minut. Na realni lokaciji bi enake spremembe zahtevale ponovno snemanje, ustrezne vremenske razmere, dodatno opremo in čas, marsikatero med temi variantami, na primer nočno osvetlitev fasade ali dvig kamere nad prizor, pa na dejanski lokaciji brez večjih sredstev sploh ne bi mogel izvesti. Ti rezultati podpirajo hipotezo H2, pri čemer se zavedam, da je hitrost in kakovost teh sprememb odvisna tudi od izkušenosti izvajalca s programsko opremo.

4.4 Produkcijska učinkovitost (čas, stroški)

Produkcijsko učinkovitost sem ovrednotil po treh merilih, in sicer porabljenem času, neposrednih stroških in velikosti ekipe. Pri času je treba ločiti med aktivnim delom, ki zahteva mojo prisotnost, in samodejnimi procesi, ki jih računalnik opravi sam, medtem ko se lahko posvečam drugim opravilom. Med aktivno delo sodijo snemanje na lokaciji, priprava fotografij, čiščenje modela, sestava scene, osvetlitev in montaža, med samodejne procese pa poravnava fotografij, izračun mreže, teksturiranje in upodabljanje, ki v programih RealityScan in Unreal Engine 5 potekajo v ozadju.

Zajem na terenu je bil razmeroma hiter. Fotogrametrično fotografiranje vikenda mi je vzelo približno tri ure in pol, zajem dela gradu pa okoli ene ure, pri čemer je bila pri fotogrametriji skoraj celotna množica posnetih fotografij uporabna, saj vsaka prispeva k rekonstrukciji modela. Snemanje referenčnih videov je bilo krajše, na gradu okoli pol ure, na vikendu pa med uro in pol ter dvema urama, saj sem tam posnel tudi kadre z osebo in posnetke pred zelenim ozadjem. Pri video posnetkih je razmerje med posnetim in uporabljenim materialom nižje kot pri fotogrametriji, saj v končni montaži uporabim le nekaj izbranih kadrov.

Obdelava je potekala po več zaporednih korakih, podrobneje opisanih v poglavju 3, ki so se izmenjevali med aktivnim delom in samodejnimi procesi. Pripravo fotografij v programu RapidRAW, ki je obsegala pregled, skupno nastavitev in odstranitev neustreznih posnetkov, mi je vzela približno uro do uro in pol. V programu RealityScan je bilo aktivnega dela manj, saj sta poravnava in izračun mreže potekala samodejno v ozadju in lahko pri večjem številu

fotografij trajata tudi po več ur. Čiščenje modela v Blenderju mi je vzelo do približno dve uri. Delo v programu Unreal Engine 5, od uvoza in postavitve modela, nastavljanja osvetlitve in gradnje scene z vegetacijo in teksturami do postavitve kamer, sekvenc, kompozita in testiranja, mi je skupaj vzelo do približno petnajst ur. Sestava primerjalnega videa v programu DaVinci Resolve, vključno s kompozitingom osebe in barvnimi korekcijami, je terjala približno dve do pet ur.

Pri času je treba opozoriti še na razliko med učenjem in izvedbo. Osnove obeh ključnih programov sem poznal že pred eksperimentom, saj sem v Unreal Engine 5 že izdeloval preprostejše scene, v programu RealityCapture pa izvedel nekaj manjših fotogrametrij. Vendar je bil ta projekt po obsegu in zahtevnosti bistveno večji, zato sem se ob njem učil naprednejših in specifičnih vidikov, kot so zajem celotne stavbe, optimizacija obsežnega modela, delo z UDIM-teksturami, sestava kompleksne scene in kompoziting osebe. Skupni čas, porabljen v obeh programih, je bil zato precej daljši od časa, ki bi ga zahtevala zgolj izvedba, saj sem se sproti učil in preizkušal različne pristope. Sam glavni potek dela traja bistveno manj kot celotni čas, porabljen ob učenju, zato visoke skupne ure pripisujem predvsem osvajanju naprednejših postopkov, kar za neodvisnega ustvarjalca predstavlja precejšen, a enkraten vstopni vložek, po katerem postane delo znatno hitrejše.

Pri stroških je rezultat eksperimenta najbolj prepričljiv. Vsa uporabljena programska oprema, in sicer RapidRAW, RealityScan, Blender, DaVinci Resolve in Unreal Engine 5, je brezplačna, zato neposrednih stroškov programske opreme ni bilo. Prav tako sem vso potrebno opremo, fotoaparat, objektiv, stojalo, zeleno ozadje in računalnik, že imel, zato eksperiment ni zahteval nobenih dodatnih nakupov. Fotogrametrija in realnočasovno upodabljanje sicer zahtevata razmeroma zmogljiv računalnik z dobro grafično kartico, kar za nekoga, ki takšne opreme še nima, predstavlja vstopni strošek, vendar gre za enkraten vložek in ne za sproten izdatek posamezne produkcije.

Celoten eksperiment sem izvedel sam, brez ekipe. Ena oseba je opravila zajem, obdelavo modelov, sestavo virtualne scene, snemanje pred zelenim ozadjem in končno montažo. To je pomembna ugotovitev za hipotezo H3, saj pokaže, da je celoten produkcijski tok obvladljiv za posameznika, medtem ko bi tradicionalno snemanje na več lokacijah z različnimi osvetlitvenimi razmerami praviloma zahtevalo večjo ekipo, večkratne obiske lokacij in z njimi povezano logistiko. Pri tem se zavedam, da je takšen obseg dela za posameznika izvedljiv predvsem zaradi razmeroma majhnih projektov in da bi večja produkcija kljub temu zahtevala več ljudi in časa.

4.5 Omejitve in prednosti v primerjavi z realno lokacijo

Eksperiment je razkril več konkretnih omejitev fotogrametričnega pristopa, ki jih je vredno sistematično povzeti. Najpomembnejša ugotovitev je, da razlika v oceni med vikendom in gradom ne izhaja iz lastnosti materiala. Tako opeka in les na vikendu kot kamen na gradu so matne in razgibane površine, kakršne fotogrametrija zajame dobro, zato sam material ni vzrok za nižje ocene gradu. Razlika izhaja predvsem iz obsega in kakovosti zajema. Celovit in gost zajem vikenda je omogočil ostro in natančno teksturo, medtem ko sem kipu gradu namenil manj časa in manj bližnjih posnetkov, zato je njegova tekstura ostala svetlejša in manj ostra, čeprav je sama geometrija večinoma dobro rekonstruirana.

Pri tem je treba pošteno ločiti med omejitvijo metode in omejitvijo lastne izvedbe. Ob pregledu posnetkov ugotavljam, da sta geometrija kipa in okolica večinoma dobro rekonstruirani, saj oblika kipa, gube draperije in stena v ozadju delujejo kar prepričljivo, le ob robovih kipa je pri bližnjih kadrih opazna rahla zobčavost, vidna predvsem ob pozornem opazovanju. Glavno odstopanje se kaže na teksturi kipa, ki je v virtualni upodobitvi svetlejša, bolj enakomerna in manj ostra kot na realnem posnetku, kjer ima kamen več kontrasta, patine in drobnih površinskih podrobnosti. To odstopanje pripisujem predvsem svoji izvedbi zajema, saj sem kipu namenil manj časa in manj bližnjih posnetkov drobnih podrobnosti, poleg tega pa sem za grad uporabil eno samo teksturo, medtem ko sem pri vikendu z razdelitvijo na več teksturnih delov dosegel višjo ostrino površine. Z gostejšim zajemom kipa in višjo teksturno ločljivostjo bi bil ta del rezultata verjetno boljši. Pošteno pa moram dodati, da natančnega vzroka za manjšo ostrino teksture ne morem nedvoumno določiti, saj lahko ta izhaja iz zajema, iz nastavitev materialov in osvetlitve ali iz barvne obdelave, ki jih kot en izvajalec nisem ločeno nadzoroval. Kljub temu ostaja ključno, da so odstopanja razmeroma majhna in da geometrija modela v celoti deluje prepričljivo, kar pomeni, da ne gre za temeljno omejitev fotogrametrije, temveč za dejavnike, ki bi jih bilo mogoče izboljšati.

Iz primerjave kadrov se je pokazalo tudi, da dobro in celovito zajete površine, kot so lesena vrata vikenda, tudi ob bližnjem posnetku ohranijo bogato in ostro teksturo, kar daje kadru prepričljiv občutek podrobnosti. Tudi pri gibanju kamere je geometrija modelov ostala stabilna, saj premik ni razkril bistvenih odstopanj v obliki, kar kaže, da fotogrametrija ob ustreznem zajemu lahko daje zanesljiv prostorski rezultat. Glavna razlika med lokacijama ostaja nekoliko nižja ostrina teksture pri kipu. Plitka globinska ostrina in zatemnjena ali nočna osvetlitev sta se

pri tem izkazali kot koristni sredstvi, saj usmerita pozornost na glavni motiv in dodatno zabrišeta manjše razlike v teksturi.

Med vsemi elementi scene je od fotorealizma najbolj odstopala dodana vegetacija, predvsem trava in drevje. Čeprav tudi knjižnična sredstva, kot jih vsebuje Megascans, izhajajo iz fotogrametričnega zajema in so lahko zelo realistična, v mojem primeru vegetacija ni dosegla enake prepričljivosti kot fotogrametrično zajeti glavni objekt, kar pripisujem predvsem svoji manj izkušeni integraciji teh elementov v sceno. Med splošnimi omejitvami fotogrametrije velja omeniti, da metoda zajame statičen trenutek prizora, zato so vse gibajoče se sestavine scene, na primer vegetacija in oblaki, v resnici dodane naknadno kot del virtualne scenografije. V mojem primeru to ni bila izrazita ovira, saj je bilo nebo zaradi oblačnega vremena enakomerno svetlo in brez vidnih oblakov, travi pa sem v Unreal Engine 5 dodal rahlo gibanje. Dodatno težavo sem prepoznal pri zajemu na javno dostopni in turistično obiskani lokaciji, saj fotogrametrija za zanesljivo rekonstrukcijo zahteva čim bolj statičen prizor, mimoidoči obiskovalci pa vnašajo napake, ker vsaka fotografija ne zajame povsem enakega prizora (Zmejevskis, 2023a). Pri zajemu dela Ptujskega gradu sem moral trenutke zajema prilagajati gibanju obiskovalcev in čakati na premore, medtem ko pri vikendu te težave ni bilo, ker gre za mirno zasebno lokacijo.

Po drugi strani eksperiment potrjuje tudi konkretne prednosti fotogrametričnega pristopa. Virtualna scenografija omogoča ponovno uporabo istega modela za poljubno število kadrov brez vračanja na lokacijo, saj je po opravljenem zajemu model na voljo kadarkoli, neodvisno od vremena, sezone in odpiralnih časov. Pomembna prednost fotogrametrične scenografije je svoboda gibanja kamere, ki je na realni lokaciji pogosto ni. V virtualnem prostoru se kamera lahko giblje v vseh smereh, se dvigne nad prizor ali obkroži objekt, ne da bi jo omejevale fizične ovire ali dostopnost terena. Pri celovito zajetem vikendu je bila ta svoboda največja, saj se kamera lahko prosto giblje okrog cele stavbe in nad njo, medtem ko je bila pri delno zajetem gradu omejena na zajeti del, znotraj katerega pa sem jo še vedno lahko poljubno premikal in dvignil. Razlika v obsegu zajema tako vpliva ne le na kakovost rekonstrukcije, ampak tudi na obseg svobode gibanja kamere, kar za neodvisne ustvarjalce pomeni, da je smiselno izbrati objekte, ki ustrezajo razpoložljivi opremi.

5 SKLEP

Raziskava je pokazala, da je s prosto dostopnimi orodji mogoče zgraditi virtualno scenografijo, ki v videoprodukciji lahko nadomesti snemanje na realni lokaciji, vendar je rezultat odvisen od obsega in kakovosti zajema. Najbolj prepričljiva je bila rekonstrukcija pri manjšem vikendu, ki sem ga zajel v celoti, medtem ko je bila pri delno zajetem kipu gradu nekoliko šibkejša, predvsem zaradi manj ostre teksture. Pokazalo se je, da na razliko med lokacijama najbolj vplivata obseg in gostota zajema, saj so bili glavni materiali na obeh lokacijah matni in za fotogrametrijo ugodni. Material sicer lahko vpliva na rezultat, kar se je pokazalo pri steklenih oknih, ki sem jih moral zaradi slabe rekonstrukcije odstraniti, vendar to v primerjanih kadrih ni bil odločilni dejavnik. Najbolj je odstopala dodana vegetacija iz knjižnic, deloma zato, ker ne izhaja iz fotogrametričnega zajema, deloma pa verjetno tudi zaradi moje manjše izkušenosti pri intergraciji teh elementov v sceno.

Kot največja prednost pristopa se je izkazala fleksibilnost v postprodukciji, saj sem iz istega modela brez vračanja na lokacijo ustvaril različne kadre, osvetlitve in gibanja kamere, ki na realni lokaciji ne bi bili mogoči. Pristop se je izkazal tudi za stroškovno dostopnega, saj sem uporabil izključno brezplačno programsko opremo in opremo, ki sem jo že imel, celoten potek dela pa sem izvedel sam. Pri tem je bilo treba vložiti precej časa v učenje, kar predstavlja enkratno vstopno oviro, po kateri postane delo hitrejše.

Hipoteza 1: S pomočjo fotogrametrije je mogoče ustvariti virtualne scenografije, ki v videoprodukciji učinkovito vizualno nadomestijo fizične scenografije in lokacije, saj zagotavljajo prepričljiv fotorealizem in prilagodljivost produkcijskega procesa.

To hipotezo delno potrjujem. Res je, da je strukturirana analiza v poglavju 4.2 pokazala visoko stopnjo vizualne prepričljivosti, kar je razvidno iz ocen v Tabeli 2. Celovito zajeti vikend je dosegel visoke ocene, najbolj prepričljivi pa so bili statični kadri, v katerih je bila prisotna izključno fotogrametrija, kar potrjuje, da je ob ugodnih pogojih, torej celovitem zajemu in matnih površinah, fotorealizem dosegljiv. Tudi profesionalna praksa to podpira, saj produkcije, od filma The Jungle Book do serije The Mandalorian, uporabljajo fotogrametrijo kot fotorealistično alternativo ročnemu modeliranju. Kljub temu pa rezultat ni enak v vseh okoliščinah. Pri delno zajetem gradu, kjer je bila v kadru prav tako prisotna izključno fotogrametrija, so bile ocene opazno nižje, kar pripisujem manj celovitemu in manj gostemu zajemu, ki se je pokazal predvsem v nekoliko manj ostri teksturi, ne pa lastnostim materiala.

Ločeno od tega so pri vikendu najbolj odstopali dodani okoljski elementi, kot je vegetacija, ki pa ne izhaja iz fotogrametričnega zajema in zato sodi v vprašanje sestave scene, ne v presojo fotorealizma same metode. Hipotezo zato potrjujem v delu, ki govori o prepričljivem fotorealizmu ob ustreznih pogojih, ne pa kot brezpogojno trditev, da fotogrametrična scenografija vedno enakovredno nadomesti realno lokacijo. Drugi del hipoteze, ki govori o prilagodljivosti produkcijskega procesa, se je prav tako potrdil, saj sem isti model brez vračanja na lokacijo uporabil za nove kadre in spremembe v postprodukciji, kar podrobneje pokažem v poglavjih 4.3 in 4.4, teoretično pa izhaja iz prehoda v vzporedni produkcijski proces, opisanega v poglavju 2.1.

Hipoteza 2: Fotogrametrično zajeta scenografija omogoča v postprodukciji visoko stopnjo fleksibilnosti pri spreminjanju ključnih vizualnih elementov, kot sta pozicija kamere in osvetlitev, kar je ključna prednost pred tradicionalnim pristopom, kjer so ti elementi določeni že v trenutku snemanja.

To hipotezo potrjujem. Iz istih fotogrametričnih modelov sem ustvaril več variant kadra, pri katerih sem spreminjal osvetlitev iz dnevne v nočno, dodajal umetne svetlobne vire, premikal kamero na položaje, ki na realni lokaciji niso dosegljivi, in poljubno nastavljal globinsko ostrino. Fotogrametrična scenografija namreč omogoča naknadno osvetlitev in kadre, ki med snemanjem sploh niso bili posneti, kar na realni lokaciji ne bi bilo mogoče. Dodajanje nove kamere ali svetlobnega vira je bilo tako rekoč takojšnje, za premišljeno nastavitev pa sem porabil približno deset do petnajst minut, medtem ko bi enake spremembe na realni lokaciji zahtevale ponovno snemanje, ustrezno vreme in dodatno opremo, nekaterih pa brez večjih sredstev sploh ne bi mogel izvesti. Pri tem se zavedam, da sta hitrost in kakovost teh sprememb odvisni tudi od izkušenosti izvajalca s programsko opremo, kar pa potrjene prednosti ne zmanjšuje.

Hipoteza 3: Produkcije se za virtualne scenografije odločajo predvsem zaradi večje fleksibilnosti, manjših stroškov snemanja, boljšega kreativnega nadzora in enostavnejših časovnic.

To hipotezo delno potrjujem. Ker je trditev o širši produkcijski praksi in ne le o mojem eksperimentu, jo preverjam predvsem s pregledom literature. Swords in Willment (2024), Jia idr. (2025) in Bodini idr. (2023) dosledno navajajo iste razloge za odločitev produkcij za virtualno produkcijo, in sicer večjo fleksibilnost, boljši kreativni nadzor in prehod iz linearnega v vzporedni potek dela, ki preuredi produkcijske časovnice. Pri stroških je slika manj

enoznačna, saj se prihranki, ki jih literatura pogosto navaja, večinoma nanašajo na velike produkcije z LED-volumni, ne pa na manjše postavitve z zelenim zaslonom. Moj lastni zapis pokaže, da je v mojem primeru pristop res ekonomsko dostopen, ker sem uporabil brezplačno programsko opremo in opremo, ki sem jo že imel, vendar je za to potrebna precejšnja, čeprav enkratna, naložba v znanje. Hipotezo zato potrjujem v delu, ki govori o fleksibilnosti, kreativnem nadzoru in časovnicah, glede stroškov pa le pogojno, saj prihranki niso univerzalni, temveč odvisni od izbranega pristopa in obsega produkcije.

Možnosti za nadaljnjo raziskavo in ustvarjanje

Ena izmed možnosti za nadaljnjo raziskavo je primerjava klasične fotogrametrije z novejšimi metodami tridimenzionalne rekonstrukcije, kot sta nevronska sevalna polja (NeRF) in 3D gaussovski pegi (*3D Gaussian splatting*). Te metode prizor prav tako gradijo iz fotografij, vendar po drugačnem načelu, zato bi bila zanimiva neposredna primerjava na isti lokaciji, ki bi pokazala, katera tehnika daje boljše rezultate pri posameznih vrstah površin. Posebej smiselno bi bilo preveriti njihovo obnašanje pri objektih s sijajnimi ali polprosojnimi materiali, kjer klasična fotogrametrija pogosto odpove, in tako ugotoviti, ali bi te metode v neodvisnem kontekstu prinesle vidno izboljšavo virtualnih scenografij.

Druga smer raziskovanja je povezava fotogrametrije z brezpilotnimi zrakoplovi za celovit zajem velikih objektov. V svojem eksperimentu sem se pri večji strukturi omejil na delni zajem, ker so bili višji in težje dostopni deli z ravni tal nedosegljivi. Zračni zajem bi to omejitev odpravil in omogočil rekonstrukcijo celotne arhitekture, okrog katere bi se virtualna kamera lahko prosto gibala, kar bi razširilo nabor lokacij, primernih za uporabo kot virtualna scenografija.

Tretja smer je razširitev preizkusa na večje število objektov različnih vrst. V diplomski nalogi sem se omejil na dva objekta, manjšo stavbo in del večje arhitekture, nadaljnja raziskava pa bi lahko zajela več vrst lokacij, na primer notranje prostore, naravne motive in objekte iz različnih materialov. Tako bi bilo mogoče natančneje določiti, pri katerih vrstah objektov fotogrametrična scenografija deluje najbolje in kje so njene meje, kar bi neodvisnim ustvarjalcem olajšalo izbiro primernih lokacij za zajem.

6 LITERATURA IN VIRI

AeroCartwright. (2026, april 8). *WebODM vs Metashape vs Pix4D vs RealityCapture (2026): Full Comparison*. AeroCartwright. https://aerocartwright.com/library/pix4d-vs-metashape-vs-webodm-vs-realitycapture/

Agisoft. (b. d.). Agisoft. Pridobljeno 20. junij 2026, s https://www.agisoft.com/features/professional-edition/

Anvil Labs. (2025). *Free vs Paid Photogrammetry Tools: Key Differences | Anvil Labs*. Anvil LabsAnvil Labs. https://anvil.so/post/free-vs-paid-photogrammetry-tools-key-differences

Anvil Labs. (2026). *Top 5 Desktop Photogrammetry Tools Compared | Anvil Labs*. Anvil Labs. https://anvil.so/post/desktop-photogrammetry-tools-comparison

Bodini, A., Manohar, A., Colecchia, F., Harrison, D., & Garaj, V. (2023). Envisioning the future of virtual production in filmmaking: A remote co-design study. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(7), 19015–19039. https://doi.org/10.1007/s11042-023-16308-7

Bugahhoos, M., von Jungenfeld, R., & Epsley, B. (2026). Virtual production for the micro: Investigating obstacles and tailoring workflows for small UK production studios. *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies*, *32*(3), 860–889. https://doi.org/10.1177/13548565261438942

Croce, V., Billi, D., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2024). Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and Photogrammetry in Digital Heritage: Impact of Varying Image Conditions on 3D Reconstruction. *Remote Sensing*, *16*(2), 301. https://doi.org/10.3390/rs16020301

Dimension Studio. (2022, april 12). *Virtual Production Innovation Series Ep 5 – Scanning the Ritzy* [Video recording]. https://www.youtube.com/watch?v=GMvK4AkVizw

Epic Games. (b. d.-a). *Hardware and Software Requirements | Realityscan Documentation | Epic Developer Community*. Epic Games Developer. Pridobljeno 31. maj 2026, s https://dev.epicgames.com/documentation/realityscan/hardware-and-software-requirements

Epic Games. (b. d.-b). *RealityScan 2.0: New release brings powerful new features to a rebranded RealityCapture—RealityScan*. Pridobljeno 20. junij 2026, s

https://www.realityscan.com/news/realityscan-20-new-release-brings-powerful-new-features-to-a-rebranded-realitycapture

Epic Games. (2021). *Capturing Reality is now part of Epic Games—Epic Games*. https://www.epicgames.com/site/news/capturing-reality-is-now-part-of-epic-games?lang=en-US

Failes, I. (2020, november 11). Getting photogrammetry assets into Unreal: A guide from Happy Mushroom. *Befores & Afters*. https://beforesandafters.com/2020/11/12/getting-photogrammetry-assets-into-unreal-a-guide-from-happy-mushroom/

Failes, I. (2022, oktober 3). Period dramas: Vfx that takes us back in time. *VFX Voice*. https://vfxvoice.com/period-dramas-vfx-that-takes-us-back-in-time/

Faucher, W. (2021, december 18). *RealityCapture to UE5—Workflow Tutorial* [Video recording]. https://www.youtube.com/watch?v=WrCOhes1Zgg

Frazer, B. (2021, junij 14). Photogrammetry Is Changing How We Make Movies. *Frame.Io Insider*. https://blog.frame.io/2021/06/14/photogrammetry-future-of-filmmaking/

Ghersci, F. (2023, april 18). *Utilizing RealityCapture & UE5 to Recreate a Real-Life Location in 3D*. https://80.lv/articles/mosta-chapel-utilizing-realitycapture-ue5-to-recreate-a-real-life-location-in-3d

Gottwald, D. (2022). Total Cinema, Total Theatre, Total World: From Set as Architecture to Set as Virtual Performer. *Disegno*, *6*(1), 12–32. https://doi.org/10.21096/disegno_2022_1dg

Griwodz, C., Gasparini, S., Calvet, L., Gurdjos, P., Castan, F., Maujean, B., De Lillo, G., & Lanthony, Y. (2021). AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. *Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys '21*, 241–247. https://doi.org/10.1145/3458305.3478443

Guo, J., Vidal, V., Cheng, I., Basu, A., Baskurt, A., & Lavoue, G. (2016). Subjective and Objective Visual Quality Assessment of Textured 3D Meshes. *ACM Trans. Appl. Percept.*, *14*(2), 11:1-11:20. https://doi.org/10.1145/2996296

Hitem3D. (b. d.). *Photogrammetry in Film & Games: Tips & Workflow*. Hitem3D. Pridobljeno 10. april 2026, s https://www.hitem3d.ai/blog/en-What-is-Photogrammetry-How-It-s-Used-in-Film-VFX-and-Game-Development/

Hogg, T. (2023, februar 14). The virtual reality of house of the dragon. *VFX Voice*. https://vfxvoice.com/the-virtual-reality-of-house-of-the-dragon/

Jia, X., Berry, A., & Johnston, A. (2025). The evolutionary disruption: A paradigm shift in film and animation industry driven by real-time rendering and virtual production. *Convergence*, 13548565251356932. https://doi.org/10.1177/13548565251356932

Kadner, N. (2021a). *Photogrammetry: Stills to CG Realms*. https://theasc.com/article/photogrammetry-stills-to-cg-realms/

Kadner, N. (2021b). *The Virtual Production Field Guide, Volume 2*. Epic Games. https://cdn2.unrealengine.com/Virtual+Production+Field+Guide+Volume+2+v1.0-5b06b62cbc5f.pdf

Montgomery, P. (2023, junij 2). *Photogrammetry For VFX: A Comprehensive Guide | Visualskies*. https://visualskies.com/3d-scanning-for-film-and-tv/photogrammetry-for-vfx/

Prince, S. (1996). True Lies: Perceptual Realism, Digital Images, and Film Theory. *Film Quarterly*, *49*(3), 27–37. https://doi.org/10.2307/1213468

Ryman, P. (2022, avgust 16). *Using RealityCapture & Unreal Engine to Create a Valencian Scenery*. https://80.lv/articles/using-realitycapture-unreal-engine-to-create-a-valencian-scenery

Schaefer, S. (2023, september 19). *Shawn Levy Didn't Want To Give Deadpool 3 The Marvel Green Screen Treatment*. SlashFilm. https://www.slashfilm.com/1397978/shawn-levy-deadpool-3-marvel-green-screen-treatment/

Seymour, M. (2016). Out of the pages and into The Jungle Book—Fxguide. *Fxguid*. https://www.fxguide.com/fxfeatured/out-of-the-pages-and-into-the-jungle-book/

Seymour, M. (2020). Art of LED wall virtual production, part one: Lessons from the Mandalorian - fxguide. *Fxguide*. https://www.fxguide.com/fxfeatured/art-of-led-wall-virtual-production-part-one-lessons-from-the-mandalorian/

Showrunner. (b. d.). *Photogrammetry in Virtual Production*. Showrunner. Pridobljeno 10. april 2026, s https://showrunner.tech/virtual-production-glossary/photogrammetry

Silva Jasaui, D., Martí-Testón, A., Muñoz, A., Moriniello, F., Solanes, J. E., & Gracia, L. (2024). Virtual Production: Real-Time Rendering Pipelines for Indie Studios and the

Potential in Different Scenarios. *Applied Sciences*, *14*(6), 2530. https://doi.org/10.3390/app14062530

Swords, J., & Willment, N. (2024). The emergence of virtual production – a research agenda. *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies*, *30*(5), 1557–1574. https://doi.org/10.1177/13548565241253903

The Making of The Jungle Book. (b. d.). [Video recording]. Pridobljeno 24. junij 2026, s https://video.disney.com/watch/the-making-of-the-jungle-book-5317d5caa481475fd97b4089

Unreal Engine. (2019, november 12). *Behind the Scenes with UE4's Next-Gen Virtual Production Tools | Project Spotlight | Unreal Engine* [Unreal Engine]. https://www.youtube.com/watch?v=Hjb-AqMD-a4

Verykokou, S., & Ioannidis, C. (2023). An Overview on Image-Based and Scanner-Based 3D Modeling Technologies. *Sensors*, *23*(2), 596. https://doi.org/10.3390/s23020596

Viehmann, D. (2020, oktober 26). Is Virtual Production Killing the Greenscreen? *Medium*. https://drewviehmann.medium.com/is-virtual-production-killing-the-greenscreen-8e58e0497634

Wan, X. (2024). The Potential of Virtual Production Based on the Special Effects of Films. *SHS Web of Conferences*, *193*, 01013. https://doi.org/10.1051/shsconf/202419301013

Zmejevskis. (2025, november 13). *Gaussian Splatting vs. Photogrammetry – The Basics*. Pixpro. https://www.pix-pro.com/blog/gaussian-vs-photogrammetry

Zmejevskis, L. (2023a). *Exploring the Expectations and Limitations of Photogrammetry*. https://web.archive.org/web/20250623093249/https://www.pix-pro.com/blog/photogrammetry-limits

Zmejevskis, L. (2023b). *Lens Focal Length—Equivalency and Impact in Photogrammetry*. pix-pro. https://www.pix-pro.com/blog/focal-length

7 PRILOGE

Eksperiment_Fotogrametrija.mp4