

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FILOZOFSKI FAKULTET

ODSJEK ZA INFORMACIJSKE I KOMUNIKACIJSKE ZNANOSTI

KATEDRA ZA ARHIVISTIKU I DOKUMENTALISTIKU

Ak. god. 2017./2018.

Maja Šimon

3D digitalizacija zbirke foto-opreme Hrvatskog državnog arhiva

diplomski rad

Mentor: red. prof. dr. sc. Hrvoje Stančić

Zagreb, kolovoz 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. 3D DIGITALIZACIJA	5
3. PRAKTIČNE PRIMJENE 3D DIGITALIZACIJE	7
4. ALATI I METODE ZA 3D DIGITALIZACIJU	9
4.1. Lasersko skeniranje.....	9
4.2. Strukturirano svjetlo.....	10
4.3. Model iz siluete.....	10
4.4. 3D model iz stereoskopskih fotografija	11
4.5. 3D model iz videa	11
4.6. Oblik iz sjenčanja ili fotoklinometrija	12
4.7. 3D model iz teksture	12
4.8. Empirijska metoda	13
4.9. Topografska metoda.....	13
4.10. Fotogrametrija.....	14
5. FOTOGRAMetriJA ILI 3D SKENIRANJE?.....	18
6. SOFTVER ZA IZRADU 3D MODELA IZ FOTOGRAFIJA.....	19
6.1. Autodesk Memento, ReMake i ReCap	19
6.2. 3D Zephyr	21
6.3. AgiSoft PhotoScan.....	22
7. FOTOGRAMetriJSKI PROJEKTI.....	24
7.1. 3D digitalizacija skeletnih ostataka iz Dolní Věstonice	24
7.2. Podvodna fotogrametrija.....	26
8. 3D DIGITALIZACIJA IZABRANIH PRIMJERAKA IZ ZBIRKE FOTO OPREME HRVATSKOG DRŽAVNOG ARHIVA	29
8.1. Priprema za 3D digitalizaciju.....	30
8.2. Balda Rollbox	33
8.3. Flexaret Standard	36
8.4. Kodak Box 620	38
8.5. Robot II	40

8.6. Hanimex 110.....	41
8.7. Kodak Baby Brownie.....	43
8.8. Vest Pocket Autographic Kodak Special.....	44
8.9. Halina Speedo-flash.....	46
9. RECAP PHOTO ILI 3D ZEPHYR FREE.....	48
10. SKETCHFAB.....	53
11. ZAKLJUČAK.....	55
12. POPIS SLIKA.....	56
13. LITERATURA.....	58
14. SAŽETAK.....	61
15. ABSTRACT.....	61

1. UVOD

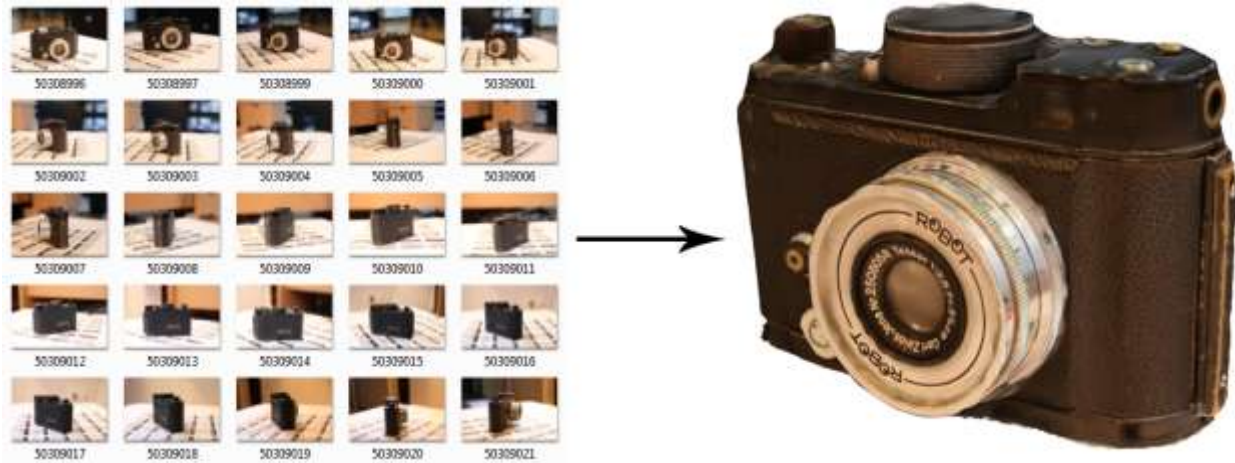
Iako se može reći da 3D digitalizacija svoje najranije korijene ima još u 19. stoljeću, tek u proteklih nekoliko desetljeća vidimo razvoj brojnih metoda za izradu 3D modela šarolikog mnoštva predmeta, od manjih kao što su glazbala, skulpture, tkanine i igračke, do većih kao što su zgrade i čitava arheološka nalazišta, na zraku ili pod vodom. Potencijal koji 3D digitalizacija ima u širokom spektru disciplina, od arheologije do izrade videoigara, je velik, a razvojem novim tehnologija postala je dostupna ne samo stručnjacima već i svima koji se žele virtualno ovjekovječiti neki predmet. Uz veliki raspon metoda kojima se može 3D digitalizirati, o kojima će biti riječ u jednom od poglavlja ovog rada, dolaze i mnoge prednosti ali i mnogi nedostaci. Uz osvrt na značaj 3D digitalizacije te različite načine na koje se ona može napraviti u ovom radu bit će riječ i o trenutno dostupnom softveru, uz fokus na metodu fotogrametrije.

3D skeneri postaju pristupačniji, no 3D digitalizacija fotogrametrijom broj svojih poklonika duguje činjenici da su od opreme potrebni samo fotoaparati i računalo. Dovoljan je čak i onaj na pametnom telefonu, a ne nedostaje ni softvera, od kojih su neki i besplatni. Dakako, različiti softver i različite postavke koje ovise o njegovim verzijama utjecat će na krajnji rezultat, no nema sumnje da se uz malo truda mogu postići rezultati koji više nego ispunjavaju svoju namjenu. Ovime će se osigurati teoretska osnova projektu o kojem ovaj rad govori.

Druga polovica ovog rada posvećena je projektu 3D digitalizacije izabranih primjeraka fotoaparata iz zbirke Hrvatskog državnog arhiva koji je samostalno osmišljen i odrađen kao istraživačko-praktični dio rada. Uz iskustvo stečeno tijekom studija te ono stečeno tijekom ovog projekta ilustrirat će se uspjesi i neuspjesi fotogrametrije uz pomoć besplatnog softvera te ih povezati sa nekim već izvedenim projektima pred kojima su stajali slični izazovi. Osam izabranih primjeraka iz zbirke odabrano je s ciljem da se na neki način "pokrije" nekoliko desetljeća razvoja fotoaparata, ali i kako bi svojom različitosti u veličini, teksturama i materijalima čim bolje pridonijeli ilustraciji mogućih poteškoća pri 3D digitalizaciji ovakve vrste predmeta.

Svakom fotoaparatu posvećeno je poglavlje u kojem će biti riječ o njegovom izgledu, snimanju, 3D modelu i problemima koji se javljaju u njegovoj izradi. Za izradu modela korišten je prvenstveno Autodesk ReCap Photo pod edukacijskom licencom, ali i besplatan 3D Zephyr Free. Kako bi se dobio uvid u rad softvera za izradu 3D modela iz fotografija, isti modeli bili su rađeni u dva dostupna softvera. Na ovaj način provedena je usporedna analiza o razlikama, prednostima i nedostacima oba programa.

Ovaj projekt pokazao se izrazito zanimljivim, ali i zahtjevnim zbog mnoštva koraka koje treba poduzeti kako bi izrada 3D modela metodom fotogrametrije bila uspješna. Uz sve potrebne pripreme kako bi se osigurali najprikladniji uvjeti za snimanje, ishodu cijelog procesa može presuditi i sam predmet koji se digitalizira jer valja uzeti u obzir sve njegove odlike – materijal, veličinu, oblik, dostupnost... Ovaj rad ilustracija je izazova koji iz ove činjenice proizlaze te služi kao vodič kako ih premostiti.



Slika 1: Fotogrametrijom iz 2D fotografija u 3D model

2. 3D DIGITALIZACIJA

U vrijeme kada se teži čim većoj dostupnosti dokumenata i raznih vrsta artefakata, postavlja se pitanje kako to postići bez ugrožavanja tih vrijednih predmeta. Također treba imati na umu opasnosti od prirodnih nepogoda. Mnogo je truda uloženo u mnoge institucije da bi se moglo početi digitalizirati knjige i druge dvodimenzionalne umjetnine, no 3D digitalizacija predstavlja izazov jer je još nije moguće potpuno automatizirati. Pored činjenice da 3D digitalizacija često predstavlja dugotrajan i vrlo temeljit proces, od velike količine predmeta u muzejima malen broj bi nekada uopće bio izabran za digitalizaciju, a da ne govorimo o mnogim velikim artefaktima kao što su arheološka ili zoološka nalazišta (Santos, 2017.). No, iako za zaštitu kulturnog naslijeđa postoje zakoni i propisi na razini Europske unije, mnogo toga bude oštećeno ili uništeno, bilo u prirodnim katastrofama ili devastacijom od strane čovjeka. Jedan od relativno nedavnih primjera su namjerno uništenje grada Palmire i arheoloških nalaza u Mosulu (Santos, 2017.). Sve to naglašava važnost pronalaska rješenja za izradu visokokvalitetnih digitaliziranih primjeraka ovakvih, i drugih, objekata.

Važno je naglasiti da sama digitalizacija ovakvih predmeta nije jedini izazov, jer treba misliti na čitav životni ciklus onoga što se digitalizira, gdje je sama digitalizacija samo početak. Pavlidis i drugi definiraju pet razina unutar tog životnog ciklusa:

1. 3D digitalizacija,
2. obrada i pohrana 3D podataka,
3. arhiviranje i upravljanje 3D podacima,
4. vizualizacija i dijeljenje 3D podataka,
5. replikacija i reprodukcija 3D podataka.

Za svaki stupanj važno je imati prava rješenja po pitanju algoritama, hardvera i softvera. Mnoštvo metoda i tehnologija postoji upravo zato što se radi o kompleksnom procesu. Tri glavna kriterija zbog kojih je to tako su varijacije u veličini i obliku, količina detalja i broj raznih materijala – metali, keramika, staklo... Nadalje, prije ostvarivanja jednog projekta za 3D digitalizaciju potrebno je uzeti u obzir veći broj parametara; cijenu, vrstu materijala, veličinu, prenosivost opreme, preciznost sustava, teksture, produktivnost odabrane metode, potrebna

razina znanja i zadovoljava li rezultat postojeće standarde (Pavlidis, 2006.). Kada se s projektom krene, sama digitalizacija teče u tri faze:

1. priprema koja uključuje izbor metode, mjesto, sigurnost,
2. digitalno snimanje, glavni dio procesa u skladu s odlukama donesenim u prvoj fazi,
3. obrada podataka u kojoj se 3D objekt modelira, procesira se geometrija, teksture itd.

Ukratko, 3D digitalizacija je proces kojim se digitalno izrađuje 3D model nekog predmeta uz očuvanje njegovog oblika i izgleda iz svih mogućih kutova. Time se razlikuje od fotografije jer ne prikazuje objekt iz samo jedne perspektive, već mapira potpunu geometriju predmeta, njegovu površinu i materijal kako bi rezultat bio čim precizniji 3D model stvarnog objekta. Što se više teži čim vjerodostojnijem 3D modelu, zahtjevnost cijelog procesa raste – istraživanja su pokazala da 3D skeniranje i kasnije obrada mogu potrajati od nekoliko sati do čak nekoliko dana, a do 85% tog vremena može biti potrošeno na fizički rad oko predmeta koji se digitalizira, uglavnom zbog veličine i kompliciranosti predmeta (Santos, 2017.).

Zbog svih spomenutih uvjeta i kriterija još ne postoji komercijalno dostupna tehnologija za 3D skeniranje velike količine predmeta, dok potreba za takvim rješenjem sve više raste – potencijal i inovativnost 3D digitalizacije sve više dopire do institucija zaduženih za čuvanje vrijedne kulturne baštine. Uz digitaliziranje i očuvanje, 3D tehnologije pružaju i nove načine prezentacije predmeta, što bi moglo potaknuti razvoj muzejskih platformi na Internetu, donijeti više pozornosti i instituciji i predmetima koje čuva, te imati i primjene u turizmu, obrazovanju, pa i u izradi videoigara (Santos, 2017.). Zamislimo mogućnosti koje se otvaraju u istraživanjima uz globalnu dostupnost 3D modela kao npr. pomoć u identifikaciji fosila ili analizi koja bi se mogla napraviti na mjestu pronalaska uz 3D skeniranje.

3. PRAKTIČNE PRIMJENE 3D DIGITALIZACIJE

Kao što već navodi Santos, 3D digitalizacija ima mnogo praktičnih primjena. Wachowiak i Karas (2009.), pišući o 3D skeniranju, detaljnije navode na koji način 3D digitalizacija može unaprijediti postojeće procese u industriji i znanosti, posebno se osvrćući na kontrolu kvalitete i povratno inženjerstvo. U radu s baštinom, 3D skeniranje u svrhu analize bilo bi se fokusiralo na zapisivanje podataka o površini i volumenu predmeta. No, u industriji se tijekom kontrole kvalitete 3D skeniranjem primjerci nekog predmeta uspoređuju sa nacrtima. Razvojem sustava za 3D digitalizaciju nastale su mogućnosti usporedbe grupa predmeta sa onim već provjerenima – usporediti se mogu neki parametri ili provjeriti čitavi modeli. Također, mogu se izrađivati i replike oštećenih predmeta, npr. skulptura kojima nedostaju dijelovi. Povratnim inženjerstvom, procesom kojim se nastoji otkriti sastav i način izrade nekog predmeta, u upravljanju baštinom se može provesti analiza materijala nekog predmeta ili izrada kalupa. U industriji, 3D digitalizacija pronalazi primjenu i u proizvodnji ambalaže, jer se ona može izraditi precizno po mjeri predmeta koji se u nju pakira (Wachowiak, Karas, 2009.).

U radu s kulturnom baštinom, u slučajevima gdje najviša kvaliteta 3D digitalizacije nije potrebna, mogu se izrađivati replike. Njihova izrada i cijena ovisi o kompleksnosti i preciznosti modela, pa je važno znati kolika kvaliteta skeniranja je dovoljna da bi proces izrade replike bio izvediv i unutar planiranih troškova (Wachowiak, Karas, 2009.). Govoreći o primjeni 3D digitalizacije i u etnografiji, Arnold i Kaminski također naglašavaju potencijal korištenja 3D modela za razne vrste analiza, ističući kako je 3D dokumentacija potpuniji zapis koji može zamijeniti original kojemu često mali broj ljudi ima pristup. Kao primjer navode londonski Victoria & Albert Museum, gdje je od zbirke koja broji preko 2 milijuna predmeta izloženo tek 60.000. Međutim, pristup je i u ovom slučaju ograničen jer posjetitelji muzeja ne mogu rukovati predmetima kako bi ih pobliže pogledali, ili pogledali stranu koja se ne vidi (dno, pozadina...). Dostupnost ovakvih modela na mreži, a posebno onih koji su fizički nedostupni, omogućava njihovo analiziranje bez obzira na vrijeme i mjesto. Također, usporedbe 3D skeniranja koja su se radila na specifičnom predmetu u pravilnim vremenskim razmacima mogu otkriti promjene u stanju tog predmeta (Arnold, Kaminski, 2013.). Restauracija se može planirati bez mogućih oštećenja na predmetu prilikom analize i mjerenja, nalazišta se mogu digitalno rekonstruirati, a npr. ako je predmet neka vrsta alata lakše ga je postaviti u kontekst njegova korištenja u virtualnom prostoru.

Predviđajući budućnost korištenja 3D tehnologija, Arnold i Kaminski ističu kako su upravo nastojanja mnogih pojedinaca iz raznih disciplina temelj cjelokupnog znanja i istraživanja u društvenim znanostima. Stvaranje znanja zajednički je trud arhivista, knjižničara, muzeologa, etnografa i drugih koji održavaju svoje zbirke, a istraživačima su dostupni izvori koji ne samo da mogu biti na mnogo jezika, već i sadržavaju vizualne i audio elemente, pokret i drugo. Može se reći da 3D tehnologija premošćuje jezične i vremenske prepreke – "Nitko od nas ovdje nije nikada vidio ove građevine. Sada ih možemo vidjeti i to će nam pomoći da razumijemo tko smo", Arnold i Kaminski citiraju jednog inuitskog starješinu koji je 2010. godine imao priliku vidjeti 3D vizualizaciju pretpovijesnih inuitskih kuća u Calgaryju, dodavši kako se zbog 3D elementa osjeća povezanim sa svojom prošlošću.

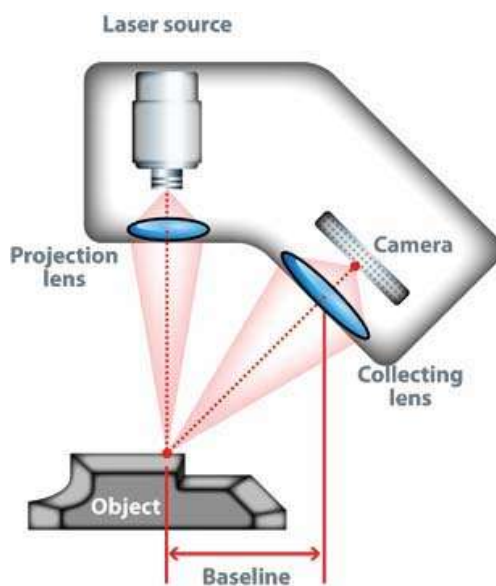
Nadalje, uz pomoć 3D digitalizacije, opis nekog predmeta popraćen je i njegovim 3D modelom, što može eliminirati velike prepreke kao što su troškovi i vrijeme za putovanja. Uz to, fizičko pretraživanje neke zbirke može biti prevelik izazov za samo jednu osobu – tome treba pomoći mogućnost pristupa na mreži i pretraživanja 3D modela prema kriterijima kao što su ne samo opis, već i oblik ili materijal (Arnold, Kaminski, 2014.). Dakako, i dalje treba imati na umu da neka ograničenja još uvijek mogu postojati, kao što su, na primjer, troškovi pretplata i dostupnost stabilne i brze internetske veze. Osim toga, 3D tehnologija još se susreće sa kritikama koje nalažu da ništa ne može zamijeniti original, ali korištenje 3D modela kako bi se zamijenili i zaštitili originali nije novost. No, ako ne postoji sustav za kontrolu dostupnosti 3D modela, problemi mogu nastati ako ih se iskoristi na nezakonite ili neprikladne načine (npr. u videoigrama upitne tematike) (Arnold, Kaminski, 2014.).

4. ALATI I METODE ZA 3D DIGITALIZACIJU

U ovome dijelu rada opisivat će se načini na koji se provodi 3D digitalizacija. Podijelivši metode ovisno o veličini predmeta ili objekta koji se digitalizira, Pavlidis i drugi navode metode za digitalizaciju predmeta i metoda za digitalizaciju spomenika.

4.1. Lasersko skeniranje

Osnova tehnike laserskog skeniranja snop je svjetlosti koji emitira laser, linearno ili u uzorku dok optički senzor očitava tu liniju ili uzorak te upotrebom triangulacije izračunava geometriju predmeta. Prilikom laserskog skeniranja nema kontakta skenera s predmetom, te se na njemu ne pravi šteta, a metoda je prikladna za komplicirane predmete. Rezultat skeniranja je oblak milijuna točaka koje ocrtavaju površinu predmeta (Laser Design, 2018.). Zbog činjenice da je svjetlo vrlo jako i fokusirano, može prijeći veće udaljenosti, a upravo preciznost koja iz toga proizlazi jedna je od glavnih prednosti ove metode. S druge strane, u korištenju ove metode treba paziti na prozirne i reflektivne površine. Također, zbog visoke cijene opreme primjenjuje se u specifičnim situacijama (Pavlidis 2006.).

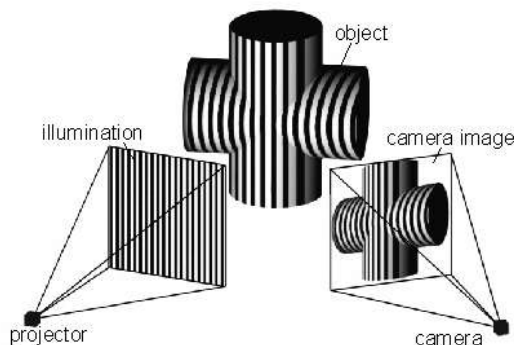


Slika 2: Lasersko skeniranje

Izvor: Digital Engineering. 3D Scanning 101. URL: <http://www.digitaleng.news/de/3d-scanning-101/> (20.7.2018.)

4.2. Strukturirano svjetlo

3D skeniranje strukturiranim svjetlom često se miješa sa laserskim skeniranjem – obje metode koriste triangulaciju kako bi se izradio model. Oprema se sastoji od projektora koji projicira pruge svjetlosti na predmet koji se skenira – na predmetu nastaju bijele i crne pruge varirajućih širina – i kamere koja iz drugog kuta snima svaku varijaciju.



Slika 3: Strukturirano svjetlo

Izvor: 3D Scanning through structured light projection. URL:

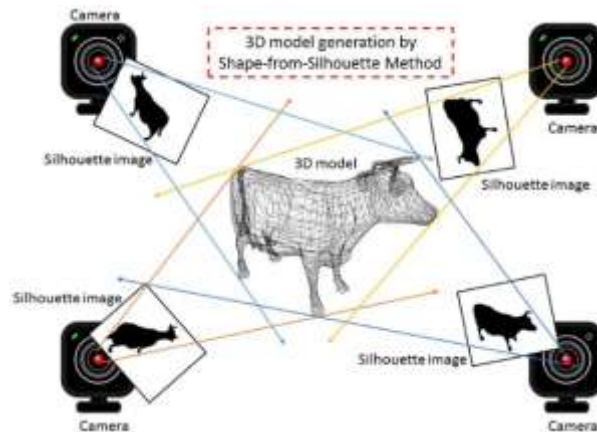
<https://www.3dnatives.com/en/structured-light-projection-3d-scanning/> (20.7.2018.)

U opremi može biti i rotirajući podij kojim se cijeli proces može automatizirati. Slično kao i kod laserskog skeniranja, problem su reflektirajuće i prozirne površine, ali to se može riješiti korištenjem bijelog praha na tim površinama. Za razliku od laserskog skeniranja, metoda strukturiranim svjetlom se najčešće koristi na manjim predmetima, npr. kulturna baština ili forenzika (3dnatives).

4.3. Model iz siluete

3D digitalizacija modeliranjem iz siluete zasniva se na procesu fotografiranja predmeta iz više kutova kako bi se iz fotografija dobila njegova geometrija. Pavlidis i drugi ističu kako ova metoda ima svoje početke u šezdesetim godinama 20. stoljeća, gdje su se u sličnom procesu fotografije silueta projicirale na glinu kako bi se izradila skulptura (Pavlidis, 2006.). Ova metoda može se automatizirati i popularna je zbog niske cijene. No, važno je unaprijed imati informacije o uvjetima u kojima se odvija fotografiranje jer faktori kao što su vrsta fotoaparata, količina svjetlosti i pozadina mogu utjecati na krajnje rezultate digitalizacije. Kao i u metodi

strukturiranim svjetlom, može se koristiti rotirajući podij za dodatnu automatizaciju cijelog procesa (Mulayim).



Slika 4: 3D model iz siluete

Izvor: Xiang, Yu; Nakamura, Shohei. 3D Model Generation of Cattle by Shape-from-Silhouette Method for ICT Agriculture. 2016.

4.4. 3D model iz stereoskopskih fotografija

U ovoj metodi 3D digitalizacije koriste se parovi fotografija iz kojih se mogu dobiti informacije o trodimenzionalnosti i dubini, simulirajući pri tome način na koji funkcioniraju oči. Primjenjuju se algoritmi koji prepoznaju geometriju predmeta kada se određeni dijelovi predmeta pronađu na obje fotografije, što znači da je kalibracija uređaja izrazito važna za postizanje preciznih rezultata. Prednosti ove metode uključuju laka prenosivost opreme, mogućnost prijenosa ne samo oblika već i teksture površine predmeta, i niska cijena. S druge strane, slično metodi 3D modela iz siluete, jedan od problema je niska rezolucija (Pavlidis, 2006.).

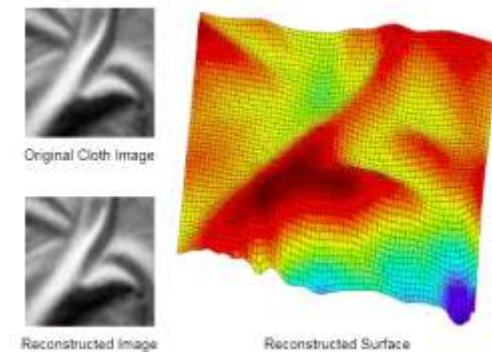
4.5. 3D model iz videa

Srodna metodi stereoskopskih fotografija, izrada 3D modela iz videa se također zasniva na snimkama predmeta iz više kutova, a ključan dio procesa je prepoznavanje zajedničkih točaka i njihovo bilježenje na virtualnom 3D modelu. Iznimno je važno da se predmet koji se digitalizira ne miče tijekom cijelog procesa i da nema pokretnih dijelova (Pavlidis, 2006.). Zbog činjenice da su danas mnogi pametni telefoni opremljeni kamerama visoke rezolucije, koja se preporuča kako bi se postigli čim bolji rezultati, ova metoda je vrlo popularna. Najbolji uvjeti su dakako dobro

osvjetljenje, da predmet digitaliziranja bude na miru te da u pozadini nema ničega što se pomiče. Također treba pripaziti na prozirne i reflektivne površine koje se teško digitaliziraju na ovakav način. Nakon snimanja video se učitava u program za generiranje 3D modela (Lievendag, 2017.).

4.6. Oblik iz sjenčanja ili fotoklinometrija

Gledajući površinu koja je u jednoj boji, ljudsko oko može spoznati smjer iz kojeg pada svjetlo (Jepson, 2010.).



Slika 5: *Shape-from-shading* (SFS)

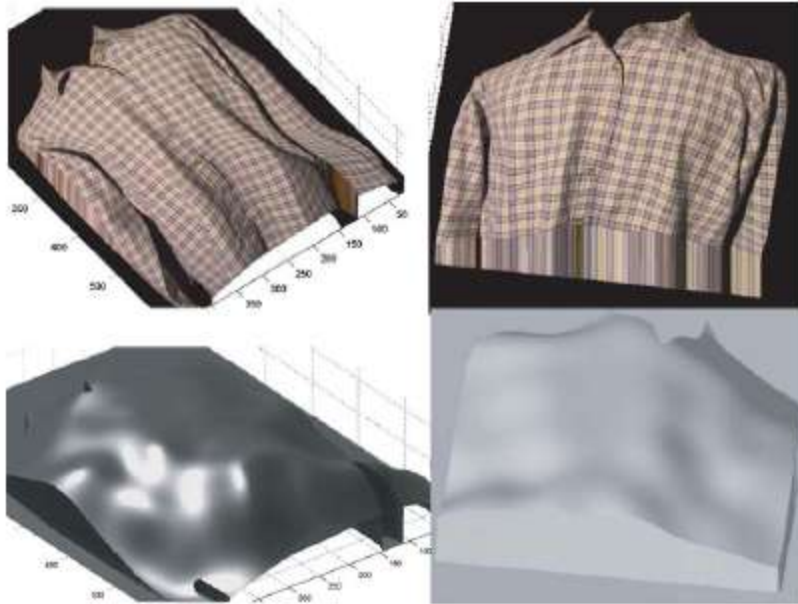
Izvor: Jepson, A. Shape from Shading. URL:

<http://www.cs.toronto.edu/~jepson/researchSFS.html> (20.7.2018)

Kao što se može vidjeti na slici 4, smjer pada svjetlosti izračunava se, a površina se rekonstruira, čime nastaje 3D model. U ovoj metodi koriste se fotografije iz jednog kuta, s varirajućim smjerovima iz kojih dolazi svjetlo. Ova metoda 3D digitalizacije također se može pohvaliti lakom prenosivošću ali zbog nepreciznosti se smatra da bi je se trebalo koristiti uz druge metode (Pavlidis, 2006.).

4.7. 3D model iz teksture

I u ovoj metodi simulira se kapacitet ljudskog vida da prepozna karakteristike jednobojne površine, ali ovaj puta se odnosi na njenu teksturu. Između ostalog, svaka tekstura može biti rezultat prostornih varijacija u boji, ili je površina hrapava na ravnomjeren način (Lobay, Forsyth, 2005.).



Slika 6: Primjer metode *shape-from-texture*

Izvor: Lobay, A.; Forsyth, D.A. Shape from Texture without Boundaries. *International Journal of Computer Vision*. 2006.

Cilj ove metode je iz fotografija odrediti malene elemente koje teksturu sačinjavaju – nazivaju se texeli – te otkriti mogućnosti njihova modificiranja kako bi se izradio model čitave površine. Ova metoda je jednostavna i ima niske troškove, ali nije precizna (Pavlidis, 2006.).

4.8. Empirijska metoda

Empirijska metoda podrazumijeva postupke ručnog mjerenja znamenitosti koja se digitalizira – udaljenosti između specifičnih točaka na površini upisuju se u koordinatni sustav. Iako je ova metoda jednostavna, precizna i nije skupa, traži mnogo vremena provedenog uz ono što se digitalizira. S druge strane, ova je metoda jedno od rijetkih rješenja ako se digitalizira predmet ili znamenitost s kompliciranim ili nedostupnim dijelovima ili površinama (Pavlidis, 2006.).

4.9. Topografska metoda

U 3D digitalizaciji većih znamenitosti može se koristiti topografska metoda – primjenom geodetskih alata, predmet digitalizacije postavlja se u koordinatni sustav, a svaka točka na njemu pretvara se u točku u sustavu. Slično empirijskoj metodi, i ovu metodu krasi

visoka preciznost i mogućnost korištenja u zahtjevnim uvjetima, uz nužnost provođenja mnogo vremena na mjerenje (Pavlidis, 2006.).

4.10. Fotogrametrija

O ovoj metodi 3D digitalizacije govorit će se i u sljedećim dijelovima ovog rada. Fotogrametrija je postupak rekonstrukcije položaja, orijentacije, oblika i veličine nekog objekta iz fotografija. Te fotografije mogu biti analogne ili digitalne, te fotografije napravljene laserskim skenerom, koje u sebi sadrže podatke o daljini za svaki element (Kraus, 2007.). Princip na kojem leži metoda fotogrametrije je triangulacija, slično drugim metodama 3D digitalizacije. Iz fotografija snimljenih iz najmanje dva kuta gledišta definiraju se linije koje povezuju točku gledišta sa specifičnim točkama na objektu. Presjekom tih linija izračunavaju se točke unutar trodimenzionalnog koordinatnog sustava, tvoreći oblak točaka (*point cloud*).

Svoj rani začetak fotogrametrija ima već u 1830-im godinama u Francuskoj, gdje su bila provedena brojna istraživanja o optici i reakcijama različitih tvari na svjetlost. U vrijeme kad je sve više rasla svijest o potrebi brzih i isplativih načina izrade zemljopisnih karata, za svrhe vojnih snaga, kolonijalizma i napretka u velikim državama kao što su Kanada i SAD, fotoaparati su prepoznati ne samo kao način bilježenja slikovnih podataka, već i onih geometrijskih. Nastavši samo nekoliko godina nakon fotoaparata, fotogrametrija je imala svoju prvu ozbiljnu primjenu u bilježenju znamenitih građevina. Među prvima koji su je primjenjivali jesu francuski časnik Laussedat koji je radio na slikama pročelja *Hotel des Invalides* u Parizu, te njemački arhitekt Meydenbauer koji je između 1858. i 1909. izgradio svoju zbirku od 16.000 metričkih fotografija znamenite arhitekture (Kraus, 2007.). Dakako, izrada geografskih karata uz pomoć fotogrametrije nije bila moguća još dugo nakon njihova rada, do izuma stereoskopije i aviona. Dok to nije postalo moguće, zgrade su poslužile kao savršeni modeli za fotogrametriju zbog svojih jasnih kontura i pravilnih, lako definiranih točaka.

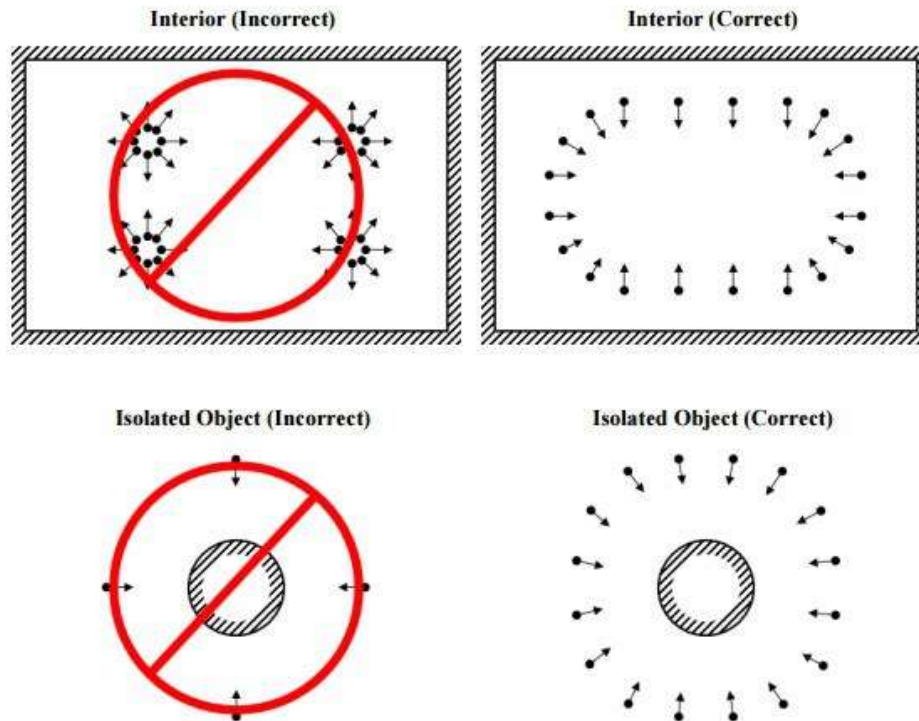
Kraus u svojoj knjizi navodi kako se fotogrametrijom mogu dobiti četiri vrste rezultata:

1. brojevi – koordinate u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu,
2. crteži – karte i planovi koji sadrže markacije i grafičke reprezentacije objekata,
3. geometrijski modeli koji se mogu upisivati u informacijske sustave,
4. slike, analogne ili digitalne – također i ortofotografije, fotomape, fotomontaže, te 3D modeli sa teksturama izvučenim iz fotografija (Kraus, 2007.).

Ovisno o načinu na koji se vrši analiza fotografija, optičkim-mehaničkim instrumentima ili računalom, fotogrametrija se dijeli na analognu fotogrametriju i analitičku fotogrametriju. Treća vrsta je digitalna fotogrametrija koja se vrši iz digitalnih fotografija, gdje se računalom simulira ljudski vid i percepcija prostora. Fotogrametrija bazirana na digitaliziranim analognim fotografijama na engleskom se može naći i pod imenom *hardcopy* fotogrametrija, a suprotno tome, fotogrametrija na osnovi digitalnih fotogrametrija se može zvati i *softcopy* fotogrametrija.

"Fotogrametriju se smatra najboljom metodom za obradu podataka iz slika, ona može dati točne, metričke i detaljne 3D informacije pri bilo kojem mjerilu" (Remondino, 2011.). Fotografije za korištenje u fotogrametriji mogu biti iz različitih izvora i biti snimljene na razne načine – iz fotoaparata, satelitskih snimaka, iz zraka... Ona se prvenstveno koristi u svim granama kartografije, ali i u 3D dokumentaciji baštine, povratnom inženjerstvu, nadzoru štete na objektima, analizama ljudskih kretanja, industrijskim mjerenjima, navigaciji, urbanom planiranju i mnogim drugim područjima (Remondino, 2011.). Kao što je već spomenuto u jednom od ranijih poglavlja ovog rada, pouzdanog softvera za 3D digitalizaciju za komercijalnu upotrebu je malo, a Remondino dodaje kako kod fotogrametrije postoji još jedna prepreka, a to je razina znanja potrebnog za uspješno korištenje ove metode, jer nestručnim korisnicima može biti vrlo zahtjevna. Ipak, uz dostupan i besplatan softver i fotoaparat postaje sve lakše pokušati fotogrametrijom digitalizirati.

Općenito govoreći, za fotogrametriju je potreban niz fotografija koje bi trebale biti oštre, ravnomjerno osvijetljene, i na njima bi se objekt trebao vidjeti iz barem tri kuta. Najčešće se savjetuje da se fotografije trebaju preklapati između 50% i 70%, kao na slici 7.



Slika 7: Fotografiranje interijera i predmeta za fotogrametriju

Izvor: TheHighTechHobbyist. Photogrammetry: 10 Tips and Tricks. URL:
<http://thehightechhobbyist.com/photogrammetry-tips-and-tricks/> (22.7.2018.)

Ne postoji pravilo o broju fotografija koje se trebaju snimiti, jer to ovisi o veličini i kompleksnosti, ali se preporuča barem jedna fotografija svakih 10 do 15 stupnjeva oko predmeta. Konačan broj može dosegnuti barem 50-80 fotografija, ali treba imati na umu da se dio može odbaciti ako ih softver pravilno ne poveže s ostalima. S druge strane, proces može biti neuspješan iz više razloga, neki od kojih su:

1. gubitak fokusa,
2. pokret – ako se digitalizira osobu, čak osmijeh ili pomicanje očiju može poremetiti proces analize i usporedbe fotografija,
3. prozirne i sjajne površine – softver za fotogrametriju pretpostavlja da su sve površine nereflektivne i neprozirne te neće razlikovati bijelu točku uzrokovanu refleksijom svjetla od stvarne bijele točke na teksturi,
4. vrlo tanki predmeti – budući da je model sačinjen od točaka, softver ne može smjestiti dovoljno točaka kako bi generirao vrlo tanke oblike,

5. objekti koji se preklapaju – ako jedan objekt zaklanja onaj koji digitaliziramo, bitne točke na njemu neće biti vidljive u dovoljno fotografija, a problem se pogoršava ako su objekti slični,
6. vrlo jednostavne teksture bez prepoznatljivih svojstava koje softver koristi za dubinu,
7. oblici koji se ponavljaju mogu uzrokovati greške u izradi modela jer će softver dvije iteracije istog oblika prepoznati samo jedan i preskočiti dio površine,
8. svjetla koja se miču ili titraju – televizori, ukrasna svjetla i monitori uzrokovat će promjene iz slike u sliku i otežati usporedbu i analizu fotografija (Blizard, 2014.).



Slika 8: Oblak točaka (engl. *point cloud*) digitalizirane vaze

Izvor: Aaslestad. Point Clouds. URL: <https://aaslestad.com/3d-scanning/point-clouds/>
(22.7.2018.)

5. FOTOGRAMetriJA ILI 3D SKENIRANJE?

U potrazi za pravilnom metodom 3D digitalizacije, dilema koja se može pojaviti je izbor između fotogrametrije i laserskog 3D skeniranja. Budući da su fotoaparati i pametni telefoni lako dostupni, a postoji i besplatan softver za fotogrametriju, postavlja se pitanje – zašto platiti nešto što može biti besplatno? Obje metode imaju svoje prednosti i nedostatke, i potrebno je sagledati što nude u aspektima preciznosti, brzine, cijene, veličine i u koju svrhu se digitalizira.

Govoreći striktno o cijenama i mogućnostima, razlike su velike; činjenica je da 3D skeniranje vidi napredak u hardveru, što znači da su potrebni veliki troškovi kako bi se išlo ukorak s najnovijim tehnologijama. S druge strane, fotogrametrija se razvija na softverskoj bazi, što znači mnogo manje troškove (ili njihov izostanak) ako se koristi besplatan softver), pored cijene fotoaparata koje nije potrebno često mijenjati. Ipak, ovisnost o opremi sa sobom povlači činjenicu da su eventualne greške prilikom 3D skeniranja predvidljive jer ovise o mogućnostima opreme. U aspektu preciznosti, lasersko 3D skeniranje ima prednost jer postiže točnost unutar četvrtine inča. Veća automatiziranost rezultira u manje ljudskih pogrešaka, dok fotogrametrija mnogo više ovisi o znanju korisnika (Lanmar Services, 2014.).

Potrebno je upitati se kolika je točnost zaista potrebna, za što će se podaci koristiti i kako će se do njih doći. Ukratko rečeno, lasersko skeniranje je bolji izbor ako je potrebna visoka preciznost na većem prostoru, a fotogrametrija je pogodnija za manje prostore i kada je fotorealizam važniji od preciznosti. Zbog toga se ona često koristi u svrhe izrade okoliša u videoigrama i filmovima, a i u arheologiji za dokumentaciju nalazišta uz manje troškove. U disciplinama poput inženjerstva i arhitekture fotorealizam nije toliko bitan koliko je bitna preciznost, te se tada koristi 3D skeniranje (Lanmar Services, 2014.).

6. SOFTVER ZA IZRADU 3D MODELA IZ FOTOGRAFIJA

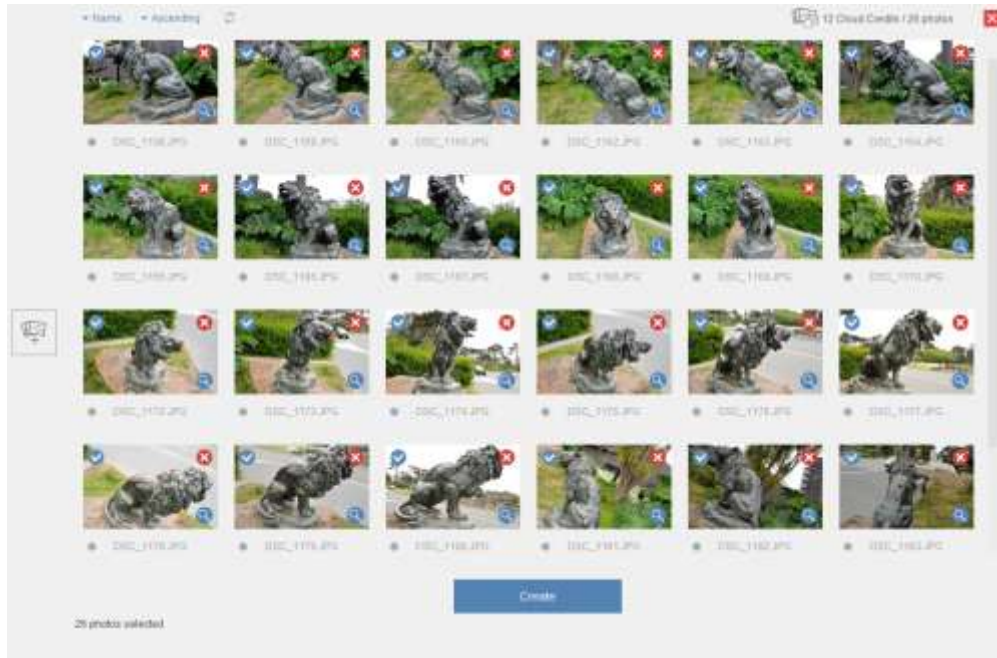
U ovom poglavlju donosi se pregled trenutno dostupnih programskih rješenja za izradu 3D modela iz fotografija.

6.1. Autodesk Memento, ReMake i ReCap

Osmišljen kako bi se omogućila izrada 3D modela i onima koji imaju malo i nikakvo iskustvo u 3D modeliranju, Autodesk Memento bio je 2015. prvi softver ove vrste dostupan široj publici, objedinjujući sve etape procesa izrade modela, za koje je inače bilo potrebno koristiti nekoliko programa. Poseban izazov predstavljala je činjenica da su 3D geometrijske mreže generirane fotogrametrijom iz stvarnosti u pravilu vrlo velike s visokim brojem poligona, za razliku od modela izrađenih u CAD programima – u postojećem softveru, koji nije bio dizajniran da to može podnijeti, obrada takvih modela je bila vrlo spora ili pak nemoguća (Develop3D, 2016.).

Tijekom svog postojanja Memento je bio u fazi beta testiranja, a finaliziran je nakon temeljitog skupljanja korisničkih dojmova. Komercijaliziran je početkom 2017. pod imenom ReMake, koji je bio dostupan uz besplatnu, edukacijsku ili profesionalnu licencu. Međutim, krajem 2017. godine i ReMake je ugašen, kao i ReCap 360, web aplikacija koja se mogla koristiti u internet pregledniku i bila je besplatna za izradu modela iz maksimalno 50 fotografija. U prosincu 2017. usluge koje su pružali ReMake i ReCap 360 postale su ReCap Photo i uključene su kao ekstenzija u paketu ReCap Pro, Autodeskovom najnovijem rješenju za fotogrametriju, ovog puta bez besplatnog pristupa (Lievendag, 2018.).

Sam paket Autodesk ReCap Pro predstavlja se kao program za kompleksne projekte laserskog skeniranja i fotogrametrije s fokusom na fotografiju iz dronova, čije datoteke pripadaju grupi Autodeskovih ekstenzija i kao takve se mogu koristiti i u drugim Autodeskovim proizvodima. (Autodesk, 2018.). Ističu se njegove primjene u industriji i građevinarstvu, dizajnu infrastrukture i vizualizacija, renovaciji zgrada i kreaciji modela za videoigre.



Slika 9: Fotografije učitane u program ReCap Photo

Sučelje za izradu 3D modela u ekstenziji ReCap Photo jednako je kao i u njenim prethodnicima. Na početku se odabiru fotografije koje će se koristiti za generiranje oblaka točaka. Potrebno je minimalno 20 fotografija u JPG formatu. Nakon upisivanja imena projekta i dono si se odluka o *auto-crop* funkciji koja iz modela reže nepotrebnu geometriju. Kao i njegovi prethodnici, ReCap Photo za izradu modela koristi *cloud*, što omogućuje njegovo korištenje bez obzira na sistemske specifikacije. Ističući mogućnosti ovog softvera, Autodesk ističe kako je dodana potpora za fotografije snimljene dronovima. Cijeli popis mogućnosti je sljedeći:

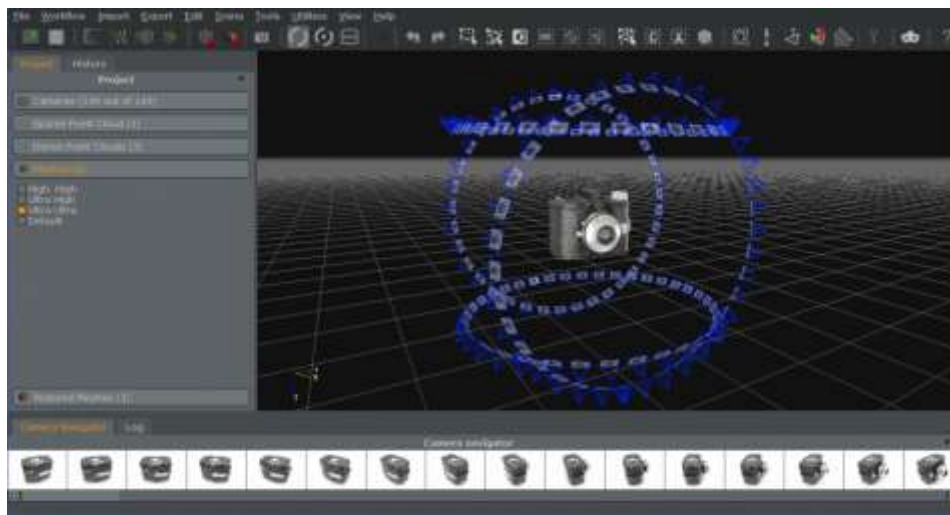
- novi *engine* može obraditi do 1.000 fotografija, četiri puta više nego prije,
- mogućnost postavljanja kontrolnih točaka u koordinatnom sustavu,
- potpora za vertikalne i nadir fotografije, snimljene dronovima iz okomice,
- pregledavanje geometrijske mreže objekta,
- pregled geolokacija i dodavanje mjerenja i bilježaka,
- dijeljenje projekta i metapodataka s drugima,
- spajanje oblaka točaka iz laserskih skenova sa onima načinjenim uz pomoć dronova (Phan, 2017.).

Valja naglasiti da iako ReCap više nije dostupan u besplatnoj verziji, može ga se instalirati uz edukacijsku licencu čiji je limit instalacija na maksimalno dva uređaja.

6.2. 3D Zephyr

Razvijen u talijanskoj tvrtci 3Dflow, 3D Zephyr jedan je od softvera za fotogrametriju. Dolazi u četiri verzije – Free, Lite, Pro i Aerial. Za razliku od Autodeskovog softvera nema troškova pretplate. Dok sve verzije nude potpunu 3D rekonstrukciju iz fotografija, znatno se razlikuju u broju fotografija koje se mogu koristiti (50, 500 ili neograničeno), podršci za grafičke kartice (od jedne naviše), te mogućnostima za eksport i uređivanje modela. Nadalje, uz Pro i Aerial mogu se postavljati kontrolne točke i koristiti laserske skenove (3D flow).

Lievendag, pišući o verzijama 3D Zephyra, ističe kako se besplatna verzija Zephyr Free može koristiti na skoro svakom računalu s operativnim sustavom Windows koje ima grafičku karticu koja podržava barem DirectX 9 ili više. Iako, nastavlja, nekome tko se često bavi fotogrametrijom preporuča bolje računalo zbog uštede vremena. S druge strane, tvrdi da čak i Zephyr Free daje bolje rezultate od tadašnjeg Autodeskovog ReMake čija besplatna verzija nudi samo jednu postavku za kvalitetu 3D modela – standardnu. Nakon učitavanja fotografija bira se postavka za 3D model – Aerial (iz zraka), Close Range (izbliza), Human Body (ljudsko tijelo) i Urban. Za kvalitetu postoje četiri opcije – Fast, Default, High i Ultra, od kojih je Ultra skrivena kako je nestručni korisnici ne bi izabirali, ne znajući koliko fotogrametrija može potrajati (Lievendag, 2017.).



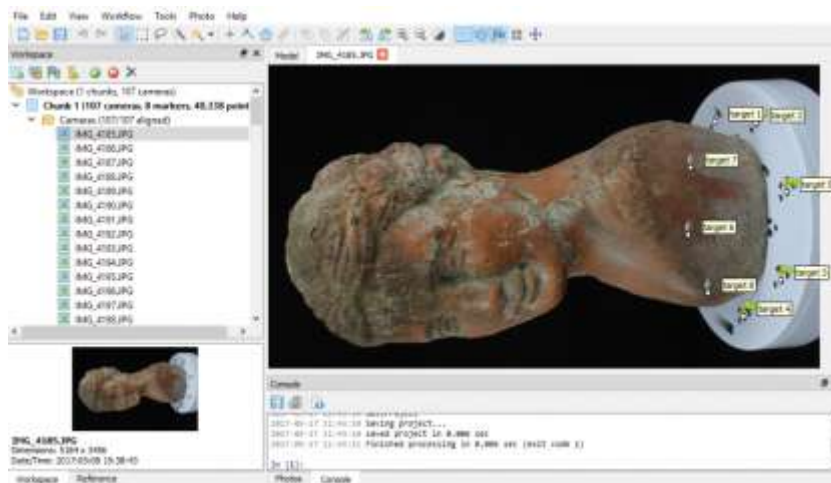
Slika 10: Korisničko sučelje programa 3D Zephyr

Pored fotografija, 3D Zephyr za fotogrametriju može koristiti i video, te sam iz njega izbaciti mutne slike. Ova opcija je vrlo pogodna kad se snimanje mora obaviti u malo vremena ili u okolini gdje postoji šansa da će se nešto pomicati u pozadini.

6.3. Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan još je jedan u nizu popularnih softvera za izradu 3D modela iz fotografija. Iako nije dostupan u besplatnoj verziji, često se spominje kao pristupačno rješenje, kao što će se moći vidjeti u poglavlju o projektima. Nadalje, za razliku od Autodeskovog ReCap-a može se koristiti ne samo na operativnom sustavu Windows već i na Mac OS i Ubuntu. U usporedbi s njegovom skupljom verzijom, Professional, verzija Standard ne sadrži mogućnosti za multispektralnu analizu, kontrolne točke te niz usluga za georeferenciranje (Agisoft, 2018).

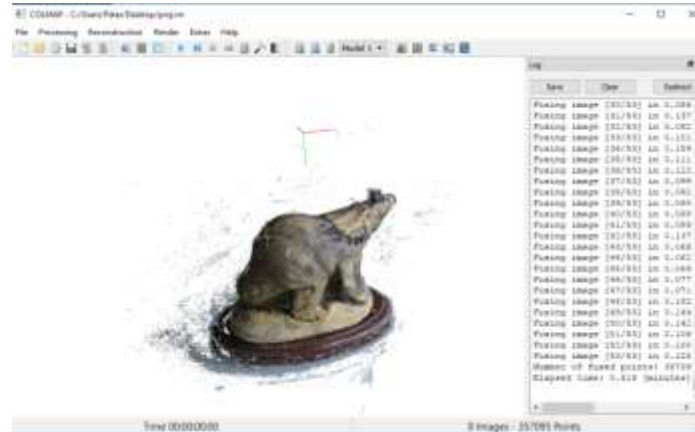
Budući da se procesiranje fotografija odrađuje na korisnikovom računalu, a ne u oblaku kao što to čini ReCap, Agisoft poput 3D Zephyra ovisi o sistemskim specifikacijama. Još jedna razlika je u činjenici da se proces u ReCap-u pokreće jednim klikom nakon kojeg se više ne mogu mijenjati postavke, u Agisoft PhotoScan moguće je detaljno prilagoditi čitav proces. Iako Agisoft PhotoScan na žalost ne sadrži različite alate za rad na modelima kao što to ima ReCap, moguće je napraviti eksport modela u drugi program te ga nakon toga importirati (Lievendag, 2017.).



Slika 11: Korisničko sučelje programa Agisoft PhotoScan

6.4. COLMAP

Za malo naprednije korisnike tu je i COLMAP, besplatni softver za izradu 3D modela iz uređenih i neuređenih fotografija, *Structure-from-Motion* metodom i *Multi-View Stereo*. Karakterizira ga sučelje koje se bazira na komandnoj liniji, a dostupan je u inačici za Windows i Mac (GitHub, 2018.).



Slika 12: Korisničko sučelje programa COLMAP

7. FOTOGRAMETRIJSKI PROJEKTI

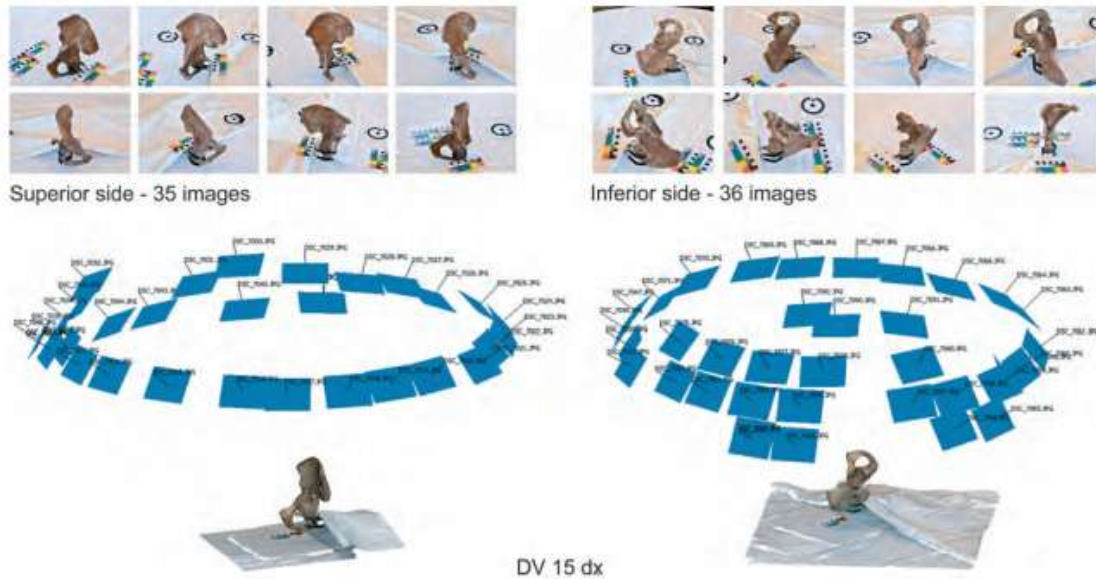
Ovaj dio rada osvrnut će se na nekoliko fotogrametrijskih projekata kako bi se ilustrirale mogućnosti i izazovi koje 3D digitalizacija fotogrametrijom može predstavljati.

7.1. 3D digitalizacija skeletnih ostataka iz Dolní Věstonice

Kao što je spomenuto ranije u ovom radu, fotogrametrija je zbog svoje pristupačnosti popularna metoda 3D digitalizacije u arheologiji. Ističući važnost jedinstvenih skeletnih ostataka kao vrijednih pronalazaka koji su neprocjenjivi za prirodoslovlje, Mikolaš Jurda i Petra Urbanova opisuju svoj projekt 3D digitalizacije putem fotogrametrije uz naglasak na izazove kao što su kontrola kvalitete, korištenje samo jednog fotoaparata i dostupan softver.

Dolní Věstonice u Češkoj nalazište je skeletnih ostataka iz doba gornjeg paleolitika čije se podrijetlo datira 27.000 godina pr. Kr. Značaj lokaliteta leži u činjenici da su na njemu uz osobne predmete pronađene i rezbarije u obliku muškaraca, žena, djece i životinja. Još od svog otkrića 1986. godine pronalasci se čuvaju u istraživačkom centru nedaleko od nalazišta. Godine 2012. odlučeno je da će se skeletni ostaci digitalizirati kako bi njihov oblik bio trajno zabilježen i kako bi postali dostupni za daljnja istraživanja. Činjenica da laboratorij uz ograničena sredstva ne može sam provesti istraživanja, a i komplikacije oko osiguranja jer su pronalasci vrlo vrijedni otežavale su izazov digitalizacije. Pored toga, provođenje dokumentacije na udaljenoj lokaciji sa sobom može donijeti probleme sa opremom, prostorom i vremenom. Iako fotogrametrija često nije prvi izbor za 3D digitalizaciju, pokazalo se da daje dobre rezultate u radu s ljudskim nalascima (Jurda, Urbanova, 2016.).

Skeletni ostaci pripadaju trima osobama, dvije muške i jednoj čiji spol još nije određen. Za potrebe ovog projekta digitalizirane su samo kosti zdjelice, koje su već mnogo puta analizirane u nadi da će se otkriti spol treće osobe i time bolje interpretirati nalazište. Kostu su tijekom dva dana fotografirane fotoaparatom Nikon D7000 montiranom na tronožac. Snimljeno je oko 30 fotografija sa obje strane predmeta.



Slika 13: Dva seta snimanja fotografija

Izvor: Jurda, M.; Urbanova, P. Three-dimensional documentation of Dolni Vestonice skeletal remains, can photogrammetry substitute laser scanning?. *Anthropologie*. 2016.

Za fotogrametriju je korišten program PhotoScan 1.0.3, na postavci za visoku preciznost, a generiranje geometrijske mreže rezultiralo je modelima sa 300.000 točaka, odnosno 900.000 točaka za cijelu zdjelicu. Iako se uspjelo izbjeći uobičajene probleme kao što su vremenski uvjeti, rokovi i nedostatak prostora, Jurda i Urbanova priznaju kako je prostorija u kojoj se odvijalo snimanje zadovoljila tek osnovne uvjete, jer nije bila moguća potpuna kontrola nad svjetlom. Iz prethodnog iskustva znalo se da su za uspjeh cijelog procesa presudne oština i ravnomjerno osvjetljenje, zbog čega fotoapararat nije korišten na automatskim postavkama nego ručnim (Jurda, Urbanova, 2016.).

Izradi konačnih 3D modela pristupilo se na dva načina. Prvi način uključivao je generiranje zasebnih modela za svaku stranu predmeta, što znači da je za svaki cjelovit predmet trebalo spojiti dva ili tri 3D modela. U drugom načinu izrade modela sve fotografije određenog predmeta procesuirane su odjednom. Autori ističu kako su ova dva pristupa rezultirala modelima koji su iziskivali različite količine obrade. Kao jedan od najvećih problema navode spajanje geometrijskih mreža koje je trebalo ponavljati nekoliko puta kako bi se došlo do najboljeg mogućeg rezultata. Nadalje, površine su bile suviše glatke, neke su imale rupe ili su im dodijeljene pogrešne boje. Uspoređujući svoj projekt sa još jednim koji je bio proveden na

identičan način, autori nisu sigurni je li problem u kompleksnosti predmeta jer bi u tom slučaju njihov drugi pristup bio još neuspješniji. "Valja istaknuti da je proces naporan i iziskuje mnogo vremena. To bi moglo biti prepreka njegovom korištenju široj publici" (Jurda, Urbanova, 2016.). U svom zaključku autori pripisuju dio problema činjenici da nisu koristili najbolje postavke u softveru koji su koristili, navodeći kako bi se na izrađene modele trebalo gledati kao kompromise između najbolje moguće kvalitete s jedne strane, i realnih mogućnosti raspoloživog hardvera s druge strane.

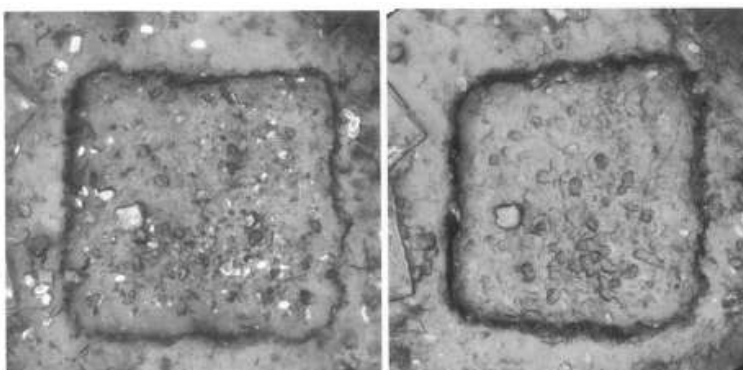
7.2. Podvodna fotogrametrija

Kao i projekt iz prethodnog poglavlja, projekti o kojima će biti riječ u ovome poglavlju također su izvedeni uz pomoć jednog fotoaparata. McCarthy i Benjamin (2014.) opisuju dva projekta između 2011. i 2013. godine u Škotskoj i Danskoj, gdje se fotogrametrija primjenjivala za 3D digitalizaciju podvodnih nalazišta. Podvodna fotogrametrija tipično se provodi korištenjem podmornica i podvodnih dronova, a u slučajevima kad čovjek snima fotografije često se radi o skupim i velikim fotoaparatom (McCarthy, Benjamin, 2014.). Zahvaljujući razvoju pristupačnih fotoaparata koji uspješno koriste prirodno svjetlo umjesto umjetnog, čak i u mračnijim uvjetima, oprema koja je potrebna za podvodnu fotogrametriju znatno se smanjuje. Pod vodom se preporučuje korištenje širokokutnog objektiva sa zaštitnim kućištem, a zbog mutnoće vode valja fotografije snimati iz manje udaljenosti nego što bi se to činilo izvan vode – ne dalje od 10 metara. Još jedan specifičan problem za podvodnu fotogrametriju su podvodne struje koje utječu na položaj snimatelja, a duljina ekspozicije mogu pogoršati situaciju. Zbog toga je važno odabrati fotoaparat s brzim auto-fokusom i zapisivanjem u memoriju, što omogućuje snimanje stotina fotografija čak i pri jakim podvodnim strujama (McCarthy, Benjamin, 2014.).

Kao što navode autori, o izazovima koje predstavljaju vidljivost i boje u podvodnim uvjetima već je mnogo napisano, ali ističu kako je dovoljno reći da se količina svjetlosti s dubinom smanjuje i da dubina vode i horizontalna udaljenost između fotoaparata i predmeta određuju boje i kontrast. Korekcija boja može se raditi nakon snimanja ali idealno bi bilo da se to može napraviti na samom fotoaparatu (McCarthy, Benjamin, 2014.).

Prvi projekt o kojem pišu McCarthy i Benjamin proveden je 2012. u Danskoj na otoku Fyn. S ciljem da se zabilježe ne samo pronalasci nego i mjesta na kojima se ronilo, ronici u

suradnji sa lokalnim muzejom digitalizirali su podmorje. Lokalitet se nalazi na prosječnim 3 metara dubine, uz vidljivost od 5 metara, a dno je uglavnom sačinjeno od pijeska sa gustim algama. Alge predstavljaju problem zbog konstantnog pomicanja. S pristupačnim fotoaparatom Panasonic Lumix DMC-TS3, fotografiranju nalazišta pristupilo se na tri načina – linearno fotografiranje uzduž osnovnih crta lokaliteta, kružno fotografiranje jaraka veličine kvadratnog metra, te također kružno fotografiranje manjih arheoloških pronalazaka kao što je jedna ručna sjekirica (McCarthy, Benjamin, 2014.). Iako je prvi pristup bio neuspješan zbog obilja morske trave, druga dva su podarila zadovoljavajuće rezultate. Za izradu 3D modela korišteni su tadašnji Autodeskov 123D Catch i Agisoft Photoscan. Za izradu modela jaraka korišteno je oko 500 fotografija, a jedan jarak sniman je dva puta, jednom tijekom odstranjivanja sloja pijeska i drugi puta kad je pijesak bio potpuno odstranjen. Oba modela imala su oko 5 milijuna poligona (McCarthy, Benjamin, 2014.).

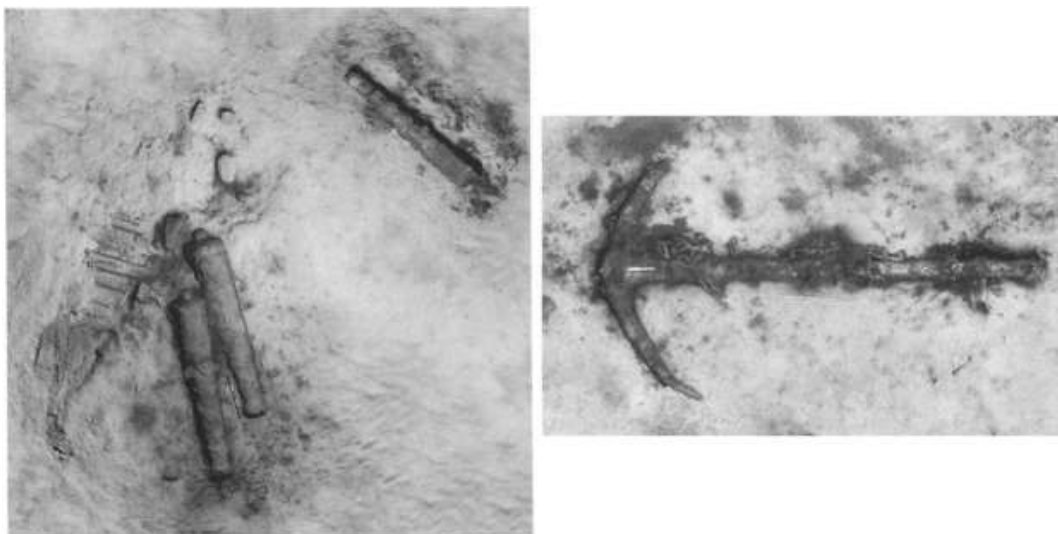


Slika 14: 3D modeli jaraka prije i poslije odstranjivanja pijeska i algi

Izvor: McCarthy, J.; Benjamin, J. Multi-image Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: An Accessible, Diver-Based Approach. *Journal of Maritime Archaeology*. 2014.

Drugi projekt 3D digitalizacije uz podvodnu fotogrametriju odvijao se u sjeverozapadnoj Škotskoj blizu sela Drumbeg. Kao i u prethodnom projektu, fotogrametrija nije bila primaran cilj, ali je napravljena jer je bilo dovoljno vremena kako bi se zabilježio lokalitet. Na dubini od 13 do 16 metara, uz dobru vidljivost od 5 do 10 metara pronađena su tri topa dugačka 2,2 i 1,9 metara, a 200 metara dalje pronađeno je sidro. Kako bi se pronalasci pripremili za fotogrametriju prvo je trebalo odstraniti sloj morske trave. Plan je bio fotografirati sve iz iste daljine kako bi razlike u bojama i svjetlini bile minimalne. Najprije su kružno fotografirani topovi, a snimalo se odozgo i čim bliže dnu. Posebna se pazilo na pokret kako se pijesak i čestice

s dna ne bi podigle i pale na površinu topova. Za kraj je fotografiran cijeli lokalitet s daljine od oko 2 metra. 3D modeli izrađeni su u programu Agisoft PhotoScan i svi su smatrani uspješnima i pogodnima za potrebe istraživača. Zanimljiva je činjenica da je za digitalizaciju sidra bio potreban samo jedan zaron iako je vidljivost bila gora nego na mjestu gdje su nađeni topovi.



Slika 15: 3D modeli topova i sidra

Izvor: McCarthy, J.; Benjamin, J. Multi-image Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: An Accessible, Diver-Based Approach. *Journal of Maritime Archaeology*. 2014.

8. 3D DIGITALIZACIJA IZABRANIH PRIMJERAKA IZ ZBIRKE FOTO OPREME HRVATSKOG DRŽAVNOG ARHIVA

Za digitalizaciju je odabrano osam primjeraka iz zbirke foto opreme. Kao što će se moći vidjeti u ovom dijelu rada, oni se razlikuju po obliku, kompleksnosti i materijalima koji ih sačinjavaju. S obzirom na činjenicu da se radi u vrijednim predmetima, te kako bi se izbjegle komplikacije oko premještanja i sukladno tome izbjegla eventualna šteta, odlučeno je da bi fotografiranje izabranih primjeraka bilo najsigurnije obaviti u prostorijama Arhiva gdje se oni i čuvaju. S metodom digitalizacije fotogrametrijom susrela sam se godinu ranije tijekom diplomskog studija, gdje sam stekla iskustvo o toj metodi te stekla svijest o tome koliki je značaj činjenice da fotogrametrija ne zahtijeva mnogo opreme te da se može provesti bez pretjeranog rukovanja predmetima koje se digitalizira. Na raspolaganju mi je bila prostorija fotografskog laboratorija, gdje mi je za potrebe snimanja ustupljen na korištenje i fotoaparat Canon EOS-1Ds Mark II. Fotografiranje se odvijalo svaka dva tjedna tijekom ožujka do lipnja 2017. godine, a cijeli je proces bio prožet poučnim eksperimentiranjem i kreativnosti kako bi se pokušali pronaći najbolji uvjeti za fotogrametriju s obzirom na raspoloživu prostoriju.

U skladu s već spomenutim potencijalima 3D digitalizacije općenito, motivacija za projekt bila mi je ideja da se ovako zanimljivi primjeri foto-opreme približe široj publici koja ih možda nema priliku vidjeti izbliza, a kamoli držati u rukama i okretati. Njihovom digitalizacijom bi se ujedno riješio problem dostupnosti i sigurnosti. Kao što su pisali (Lanmar Services, 2014.) fotogrametrija je prikladna metoda 3D digitalizacije u slučajevima kad je fotorealizam ipak malo bitniji od preciznosti. Primjerci koje sam imala priliku pokušati digitalizirati predmeti su preciznih mjera i oblika, što je već u početku bio jasan pokazatelj da proces neće biti ni približno jednostavan kao digitalizacija nečega s organskim karakteristikama. Zbog sjajnih, prozirnih i reflektivnih površina svaki od primjeraka iz zbirke predstavljao je izazov, u manjoj ili većoj mjeri, dok bi neki lako mogli poslužiti kao primjer predmeta koji se ne bi trebali digitalizirati metodom fotogrametrije. Zbog navedenog, ovaj rad može poslužiti kao ilustracija mogućih izazova na koje može naići svatko tko se okuša u fotogrametriji.

Najprije je bilo predviđeno koristiti Autodesk Memento softver za fotogrametriju, no on je ugašen prije početka ovog istraživanja te izdan pod imenom ReMake. ReMake je odabran kao softver koji će se koristiti u ovom radu. Na žalost, kasnije već iste godine i ReMake je izmijenjen te izdan kao ReCap Photo koji se nije mogao besplatno instalirati. Srećom, zbog dostupnosti

njegove edukacijske licence bilo je moguće nastaviti raditi u već otprije poznatom softveru. Za 3D digitalizaciju su odabrani sljedeći primjerci iz zbirke:

1. Fotoaparati "Rollbox" tvrtke Balda. Njemačka, oko 1935.,
2. Dvooki zrcalni fotoaparati "Flexaret Standard" tvrtke Meopta s 80 mm objektivom "Belar" (f/3.5) i kožnom futrolom. Češka, 1965.,
3. Fotoaparati "Kodak Box 620" s kožnom torbicom. SAD, između 1936. i 1939.,
4. Fotoaparati "Robot II" tvrtke Otto Berning & Co. s 38 mm "Carl Zeiss Tessar" (f/2.8) objektivom i kožnom futrolom. Njemačka, 1939.,
5. Fotoaparati "Hanimex 110 Pocket ES" s vanjskom bljeskalicom i korisničkim priručnikom. Australija, 1970-ih,
6. Fotoaparati "Kodak Baby Brownie". SAD, između 1934. i 1941.,
7. Fotoaparati "West Pocket Autographic Kodak Special" tvrtke Eastmann Kodak s 85 mm "Zeiss Kodak Anastigmat" objektivom (f/6.9). SAD, između 1915. i 1926.,
8. Instant fotoaparati "Halina Speedo-flash" tvrtke Haking. Hong Kong, oko 1970.

8.1. Priprema za 3D digitalizaciju

Oprema korištena za digitalizaciju:

- fotoaparati Canon EOS 5DS R i Canon EOS-1Ds Mark II,
- reprografska svjetla,
- stolno računalo, procesor AMD Athlon II X4 640, 8GB RAM, grafička kartica AMD Radeon HD 5670, Windows 7 Ultimate.

Kako bi se pronašao prihvatljiv način fotografiranja bilo je potrebno nekoliko pokušaja. Prvi primjerak izabran za fotografiranje bio je Balda Rollbox. Fotoaparatom postavljenim na tronožac, prvi je puta sniman na bijeloj pozadini na kojoj je rotiran za oko 15° za svaku fotografiju. Korištena su i svjetla sa dvije strane za čim bolje osvjetljenje, budući da je fotoaparati crne boje. Ovaj proces rezultirao je vrlo ostrim i čistim fotografijama, no za fotogrametriju nisu bile pogodne. Zbog nedostatka referentnih točaka u pozadini softver ne prepoznaje geometriju te ne daje zadovoljavajući rezultat.



Slika 16: 3D model bez referentnih točaka u pozadini

Za drugo snimanje, Balda Rollbox postavljen je povrh kutije koja je stajala na stolu na sredini prostorije, kako bi ga se moglo lako snimati sa svih strana. Kao i prvi put, fotoaparat je namješten na stativ. Osim sobne rasvjete nisu korištena druga svjetla. Kao što je spomenuto ranije u ovome radu, snimanje bi se trebalo odvijati u čim manje vremena zbog promjene položaja Sunca tijekom dana. Prostorija u kojoj se snimalo ima otkrivene prozore samo sa sjeverne strane. Ovo snimanje Rollboxa polučilo je bolje rezultate – sama prostorija služila je kao pozadina, te je otklonjen problem s prepoznavanjem geometrije. Auto-crop funkcija u ReCap-u uspješno reže udaljenu pozadinu iz modela. No ovaj puta problem je predstavljala nekonzistentna rasvjeta – tijekom dva sata koliko je snimanje trajalo prirodna svjetlost izvana se promijenila, a fotografije Rollboxa snimljene u smjeru prozora imale su preveliki kontrast te je njegova površina bila vrlo tamna, što je rezultiralo prazninama u 3D modelu.



Slika 17: Drugo fotografiranje Rollboxa, 3D model s rupama

Kao što se može vidjeti na slici 17, strane Rollboxa okrenute prema prozoru imaju ispravnu teksturu i dobro osvjetljenje, dok strane okrenute od prozora imaju praznine. Želeći ustanoviti je li ovaj problem nastao isključivo zbog osvjetljenja ili je moguće da nije bilo dovoljno snimljenih fotografija (ili se nisu dovoljno preklapale), Rollbox je snimljen još jednom. Ovaj puta je uspješniji 3D model izrađen od 32 fotografije (više nego prijašnji) s manje varijacija u osvjetljenju. Također, ispod Rollboxa je postavljen papir s tekstom kako bi se osiguralo da i s donje strane ima dovoljno referentnih točaka.



Slika 18: Ponovljeno drugo snimanje Rollboxa, 3D model s vidljivim kontrastom u osvjetljenju

Iako se 3D model prvog izabranog primjerka iz zbirke činio uspješnim nakon prethodnih neuspjeha, ipak je bilo potrebno imati pouzdanije rješenje što se tiče rasvjete, kako proces ne bi ovisio o vremenu ili dobu dana. Također se željelo izbjeći namještanje stolova i kutija prilikom svakog posjeta Arhivu, samo kako bi se predmet digitalizacije pravilno pozicionirao.

Treća ideja bilo je fotografiranje pod reprografskim svjetlima, koja daju osvjetljenje s četiri strane. Budući da su svjetla montirana na zid na visini od jednog metra, nije bilo mnogo prostora za kretanje s fotoaparatom u rukama, ali bilo je još manje za postavljanje stativa. Ipak, iako svjetla daju toplije osvjetljenje od onog prirodnog, na ovaj način se barem mogla postići točnija geometrija predmeta, uz manje komplikacija oko pozicioniranja predmeta digitalizacije. U nastavku ovog rada bit će predstavljeni primjerci odabrani za digitalizaciju te specifičnosti svakog od njih u kontekstu izrade 3D modela.

8.2. Balda Rollbox

Tvrtka Balda bila je njemački proizvođač fotoaparata, osnovana 1908. godine blizu Dresdena. Osnovao ju je Max Baldeweg te je u svojim počecima proizvodila blende, držače za film i brojače. Cjenovno pristupačniji nego drugi fotoaparati koji su tada bili popularni, fotoaparati Balda prodavani su i drugim tvrtkama koje bi ih prodavale pod svojim imenom. Smatra se da su iz tog razloga prodavani s raznim vrstama širokokutnih leća. Nakon 1946. godine osnivač bježi u Zapadnu Njemačku gdje je osnovao Balda-Werk Bunde, a postojeća tvrtka preimenovana je 1951 u Belca-Werk. Nekoliko godina kasnije ponovno je osnovao tvrtku Balda koja je 1970ih prestala proizvoditi fotoaparate, ali djeluje još i danas proizvodeći plastične dijelove za fotoaparate (Dresdner-Kameras, 2017.).



Slika 19: Fotoaparat Rollbox marke Balda veličine je 6 x 9 centimetara

Kao što je već spomenuto u prethodnome poglavlju, Rollbox je poslužio kao svojevrsni "pokusni kunić" kako bi se pronašlo prihvatljivo rješenje za 3D digitalizaciju fotogrametrijom u danim uvjetima. Tijelo ovog fotoaparata je većinom hrapave, nereflektivne površine zbog čega nije bilo mnogo sumnji u pravilno generiranje geometrije. No, detalji na koje valja obratiti pažnju su sjajni metalni okvir s prednje strane, sjajna plastika oko leće te tanak kožni remen s gornje strane. Također ima dva otvora prekrivena prozirnom plastikom.

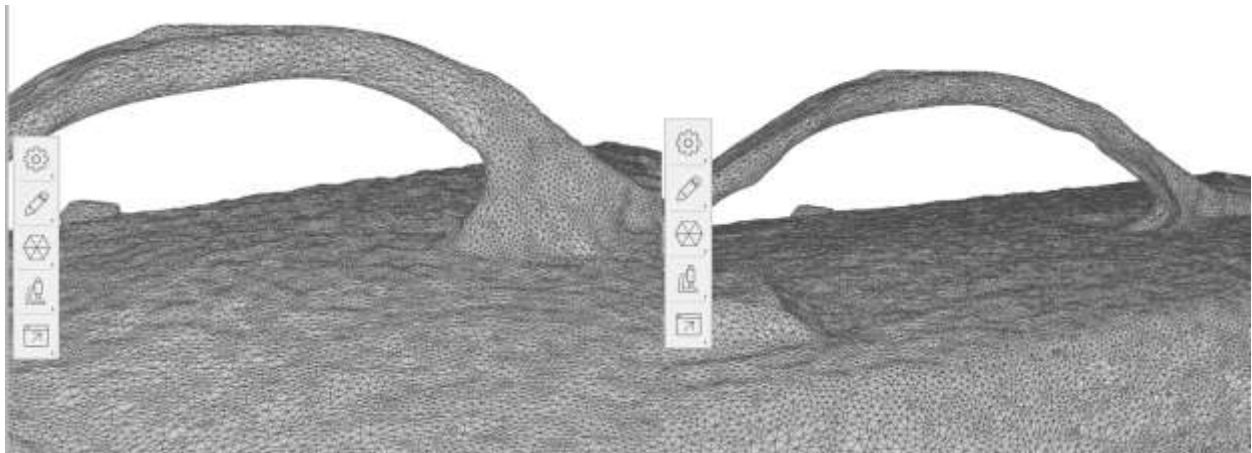


Slika 20: 3D model Balda Rollboxa

Dostupan na: <https://sketchfab.com/models/589e8e65cc0346659138ccd8f03da967>

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, korištenje reprografskih svjetala se pokazalo kao metoda koja je dala najkonzistentnije rezultate. Za izradu 3D modela na slici 20 u Autodesk ReCap Photo iskorišteno je 67 fotografija – 45 snimljeno horizontalno oko Rollboxa te 22 snimljene oko njegovog gornjeg dijela kako bi se čim točnije mogao izraditi remen na gornjoj površini. Fotografije su snimljene fotoaparatom Canon EOS-1Ds Mark II, uz ekspoziciju od 1/10 sekunde i bez bljeskalice. Uz brzinu prijenosa od 2 Mbps bilo je potrebno oko pola sata da se fotografije prenesu u Autodeskov *cloud*, nakon čega je bio potreban još jedan sat za izradu. Ovaj model ima 171.572 točke i 314.636 poligona.

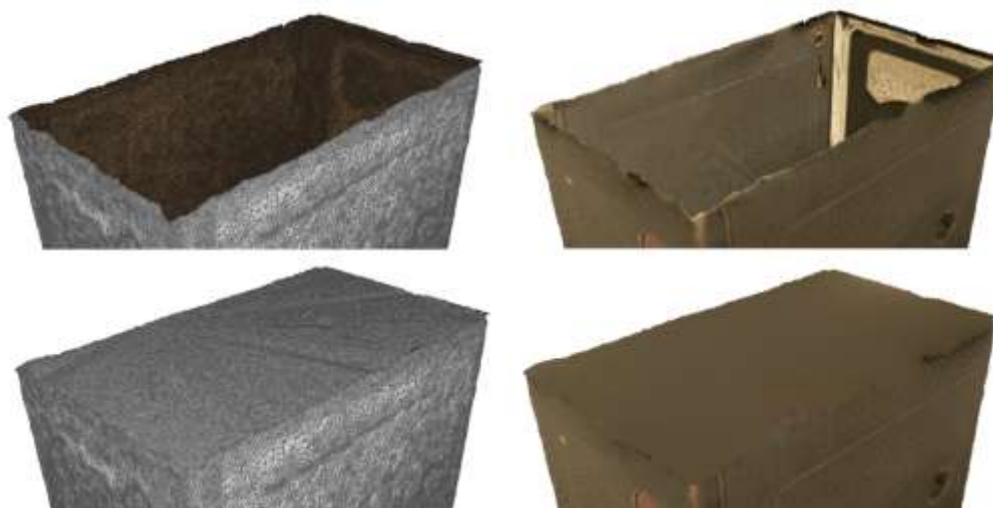
Primjećuje se kako na modelu postoje problematična područja – sjajan plastičan obruč s prednje strane ponegdje ima kvрге, kao i metalan okvir, što pripisujem reflektivnosti površine, a najočiti problem predstavlja remen na gornjoj strani koji je relativno tanak te njegova geometrija nije ispravno modelirana. Budući da ReCap Photo ima ugrađene osnovne alate za modifikaciju 3D modela, neke manje nepravilnosti mogu se lako ispraviti bez potrebe instaliranja i korištenja drugog softvera.



Slika 21: Izmjene na 3D modelu uz pomoć alata *sculpt* u programu ReCap Photo

Alat *sculpt* dio je alata kojima se mogu vršiti izmjene na površini 3D modela. Na slici 21 vidljiva je poligonalna struktura modela, prije i nakon modifikacija. Alat *Sculpt* jednostavan je za korištenje – koristi se mišem i klikom, slično alatima za crtanje, i može gurati ili povlačiti grupu točaka i poligona bez brisanja ili narušavanja veza među njima. Postavke za veličinu i intenzitet omogućuju bolju preciznost i pokrivanje manje ili veće površine 3D modela.

Još jedan problem proizlazi iz činjenice da je model fotografiran i izrađen bez fotografija s donje strane. Nakon uklanjanja suvišnih poligona nastalih iz pozadine s donje strane, ostaje 3D model kao na slici X, ali bez dna. Na slici 22 može se vidjeti šuplja struktura modela, te rezultat automatskog punjenja u ReCap Photo.



Slika 22: Ispunjavanje rupa

Alatom *Fill holes* mogu se izabrati poligoni koji graniče s rupom, te se ona ispunjava ravninom poligonalne strukture slične ostatku modela. Valja naglasiti da će softver teksturirati novonastale poligone samo bojom, i to nijansom najbližnjom teksturama oko rupe. Ovime se broj točaka na modelu penje na 192.091, and poligona na 354.812.

8.3. Flexaret Standard

Današnja Meopta osnovana je 1933. godine pod imenom Optikotechna, u gradu Prerovu u tadašnjoj Čehoslovačkoj. U počecima su proizvodili leće i električne kondenzatore ali nekoliko godina kasnije počeli su proizvoditi i povećala, dalekozore, kompozitne leće, drugu optičku opremu, ali i liniju fotoaparata Flexaret. Tijekom Drugog svjetskog rata Optikotechna je primorana proizvoditi isključivo za vojne svrhe, ali je iza rata postala jedan od najvećih proizvođača kino projektor na svijetu. Optikom se tvrtka bavi i danas (Meopta, 2018.).



Slika 23: Fotoaparat Flexaret Standard s 80mm objektivom Belar

Oblikom malo kompleksniji od Rollboxa, Flexaret Standard predstavljao je malo veći izazov zbog visine i više sjajnih površina s detaljima. Za digitalizaciju je fotografiran dva puta, fotoaparatom Canon EOS 5FS R uz vrijeme ekspozicije od 1/13 sekunde, bez bljeskalice. Prvo snimanje rezultiralo je samo polovičnim uspjehom – zbog nedovoljnog preklapanja fotografija u ReCap Photo je napravljena samo polovica 3D modela s greškama u teksturi, iako je geometrija bila točna.



Slika 24: Neuspješno modeliranje Flexareta

Fotografiranje je ponovljeno uz iste postavke fotoaparata. Drugi je model izrađen iz 34 fotografije koje su snimljene ukrug oko Flexareta, te nekoliko snimljenih izbliza zbog detalja. Nakon ispunjavanja donje strane, sastoji se od 83.619 točaka i 142.688 poligona. Kao što se

može vidjeti na sljedećoj slici, problematična područja su vrh modela gdje je tekstura mutna jer je riječ o dijelu koji se nalazio samo na rubovima fotografija, te metalni dodaci s prednje strane zbog refleksivnosti.



Slika 25: 3D model Flexaret Standarda

Dostupan na: <https://sketchfab.com/models/db4ea747d8d544e6ae1631af14fe9515>

8.4. Kodak Box 620

Kodak Box 620 maleni je fotoaparati iz 30-ih godina 20. stoljeća. Kućište od hrapave crne plastike porubljeno je sjajnom, reflektivnom plastikom, a leća je uokvirena istim materijalom. Poput Balda Rollboxa, i Kodak Box 620 ima remenić za držanje koji je vrlo tanak.



Slika 26: Kodak Box 620

Zbog navedenog, ovaj fotoaparatus predstavljao je jedan od težih izazova za fotogrametriju. Fotografiran je dva puta, a model se zbog velikih nepravilnosti izrađivao tri puta.

Oba je puta sniman istim fotoaparatom, Canon EOS 5DS R, no na različitim postavkama jer su fotografije iz prvog seta bile previše mutne, što je rezultiralo lošim modelom. Na drugom snimanju snimljeno je 59 fotografija, ovaj puta uz vrijeme ekspozicije 1/100 sekunde, a ne 1/10 kao na prvom snimanju. Set od 59 fotografija uključivao je fotografije oko cijelog Kodak Boxa, te fotografije koje su se fokusirale na gornji dio i remen sa strane. U nastojanju da saznam znači li veći broj fotografija automatski i bolji 3D model, Kodak Box 620 sam u ReCap Photo izradila dva puta – prvo iz 23 fotografije, a zatim iz 49.

Model izrađen iz 49 fotografija ima 52.628 točaka i 91.915 poligona, dok onaj izrađen iz 23 ima 44.739 točaka i 75.920 poligona.



Slika 27: Usporedba 3D modela Kodak Box 620 iz 49, i 23 fotografije

Na oba modela vidljivo je kako s prepoznavanjem hrapavog tijela fotoaparata nema puno problema, no sjajan crni okvir leće od plastike, tanak remen te gornja strana imaju mnogo nepravilnosti.

8.5. Robot II

Poznati fotoaparati Robot počeli su se prodavati 1935. godine. Iako ih je proizvodila tvrtka Otto Berning & Co. u njemačkoj Vestfaliji, za dizajn je zaslužan Heinz Kilfitt koji je u ovom fotoaparatu predstavio dvije tada izvanredne mogućnosti – dvostruku ekspoziciju i rotirajuća blenda izrađena od metala. Obje inačice, Robot I i Robot II bile su opremljene kvalitetnim lećama Zeiss ili Schneider, dok je Robot II krasio i motor na navijanje za pomicanje filma – to je omogućavalo snimanje niza fotografija u nekoliko sekundi. Smatra se da je navedeno, u kombinaciji sa čvrstim metalnim kućištem, jedan od razloga zašto je Robot II bio popularan u njemačkoj vojsci. Modificiranu inačicu s čvršćim motorom i lećom od 75mm koristila je i Luftwaffe (Camerapedia, 2012.).



Slika 28: Robot II

Izrađen od nereflektivnih i slabo reflektivnih materijala, bez mnogo detalja, Robot II jedan je od najuspješnijih 3D modela proizašlih iz ovog projekta. Fotografiran je fotoaparatom Canon EOS 5DS R u krug vodoravno te u krug oko gornje strane, bez bljeskalice s brzinom ekspozicije 1/80 sekunde. Svih 50 fotografija iskorišteno je za model, koji ima 62,986 točaka i 115,704 poligona.



Slika 29: 3D model Robot II

Dostupan na: <https://sketchfab.com/models/915fb1aa365f4542adf2e7240868a2a3>

8.6. Hanimex 110

Osnovana 1947. u Australiji, tvrtka Hanimex bila je uvoznik i izvoznik fotoaparata, leća i druge foto opreme. Fotoaparati koji su se prodavali pod brendom Hanimex bili su proizvedeni u Japanu i Zapadnoj Njemačkoj (FujiFilm, 2018.).



Slika 30: Hanimex 110

Hanimex 110 pokazao se kao jedan od najzahvalnijih 3D modela zbog svog jednostavnog oblika i površine gotovo bez ikakvih problematičnih područja. Zasebno je fotografirana i digitalizirana njegova bljeskalica koja se postavlja na njegovu bočnu stranu.

Serijski od 43 fotografije sastojala se od 27 fotografija snimljenih ukrug oko Hanimexa te 16 snimljenih oko gornje strane. Fotografije su snimljene Canonom EOS 5DS R bez bljeskalice, uz vrijeme ekspozicije 1/125 sekunde.



Slika 31: 3D model Hanimex 110 sa i bez teksture

Vanjska bljeskalica, koja se na Hanimex 110 natakne sa strane, digitalizirana je zasebno kako bi se oba modela točnije izradila, te kako bi i samo fotografiranje bilo jednostavnije. S istim postavkama fotoaparata snimljene su 23 fotografije za izradu modela bljeskalice.



Slika 32: 3D model vanjske bljeskalice Hanimex 110

Na oba modela primjećuje se visoka razina detalja, zbog čega ovaj model smatram jednim od najuspješnijim u ovom projektu. Na slici 33 može se vidjeti čitljivo ime fotoaparata

čak i na modelu bez teksture, što pokazuje da fotogrametrija može postići visoku razinu detalja na površini 3D modela.



Slika 33: Natpis "Hanimex" oblikovan u geometriji 3D modela bljeskalice



Slika 34: 3D model Hanimex 110 s bljeskalicom, ukupno 382.200 točaka, 704.566 poligona

Dostupni na: <https://sketchfab.com/models/3981432ab2694580a796ee9fb7ad97bd>,
<https://sketchfab.com/models/3d07ac22abc547208a646e4664a51ce7>

8.7. Kodak Baby Brownie

Fotoaparat Kodak Baby Brownie proizvodio se od 1934. do 1941. u SAD-u, i od 1948. do 1952. u Ujedinjenom Kraljevstvu. To je maleni fotoaparat plastičnog kućišta sa sklopivim metalnim tražilom na gornjoj strani (Camerapedia, 2015.).



Slika 35: Kodak Baby Brownie

Baby Brownie ubraja se u teže izazove za 3D digitalizaciju fotogrametrijom, prvenstveno zbog njegovog sjajnog, reflektivnog kućišta i tražila od tankog metala na gornjoj strani. U jednom su danu odrađena dva snimanja, prvi puta sa otvorenim tražilom, a zatim sa sklopljenim. Oba je puta fotografiran fotoaparatom Canon EOS-1Ds Mark II, bez bljeskalice, prvo s vremenom ekspozicije 1/6 sekundi a zatim s 1/20.



Slika 36: 3D model Kodak Baby Brownie sa sklopljenim tražilom

Ovaj model izrađen je od 28 fotografija. Kao što se može vidjeti na slici 36, geometrija Baby Brownieja na sebi ima mnogo nepravilnosti kao što su neravni rubovi i valovito tijelo samog fotoaparata zbog reflektivne plastike.

8.8. Vest Pocket Autographic Kodak Special

Kodakov Vest Pocket Autographic iz 1912. među prvim je uspješnim kompaktnim fotoaparatom na svijetu. Do 1926. prodano ih je preko dva milijuna. Ime je dobio po engleskom izrazu za džep na prsluku (*vest pocket*), jer je osmišljen da bude dovoljno malen da u njega stane (Harding, 2014.).



Slika 37: Vest Pocket Autographic Kodak Special

Otvoren kao na slici 37, Vest Pocket je bez sumnje predstavljao najveći izazov za 3D digitalizaciju fotogrametrijom. Zbog sjajnog metalnog kućišta i tankih metalnih dijelova objedinjuje svojstva predmeta za koje se fotogrametrija ne preporuča. S ciljem da se vidi što se fotogrametrijom može postići, Vest Pocket je fotografiran u poziciji sa slike 37.



Slika 38: Problematičan 3D model Vest Pocketa

Ovaj je model izrađen iz 20 fotografija snimljenih fotoaparatom Canon EOS 5DS R, s vremenom ekspozicije od 1/125 sekunde, bez bljeskalice. Kao što se može vidjeti, zbog refleksije na sjajnom crnom metalu nastale su greške u teksturiranju i prepoznavanju geometrije

– iako je tijelo fotoaparata uglavnom jasno definirano i teksturirano, nastale su rupe, na prednjoj strani je "razmazana" fotografija snimljena sa strane a metalna nožica koja omogućuje da fotoaparat uspravno stoji nije jasno definiran.

Nakon brisanja pozadine ovaj model ima 510.104 točaka i 932.360 poligona, što ga čini jednim od najkompleksnijih modela u ovom projektu. Vjerujem da bi ga se u sklopljenom stanju moglo lako digitalizirati, no za kompliciranu konstrukciju kada je rasklopljen bi se možda trebala primijeniti neka druga metoda 3D digitalizacije.

8.9. Halina Speedo-flash

Fotoaparate Halina prodavala je tvrtka Haking osnovana 1956. godine. Speedo-flash malen je i plastičan fotoaparat jednostavnog oblika i hrapavih, nereflektivnih površina, osim trećine prednjeg dijela koji je pokriven prozirnom plastikom te sjajnog metalnog obruča oko leće.



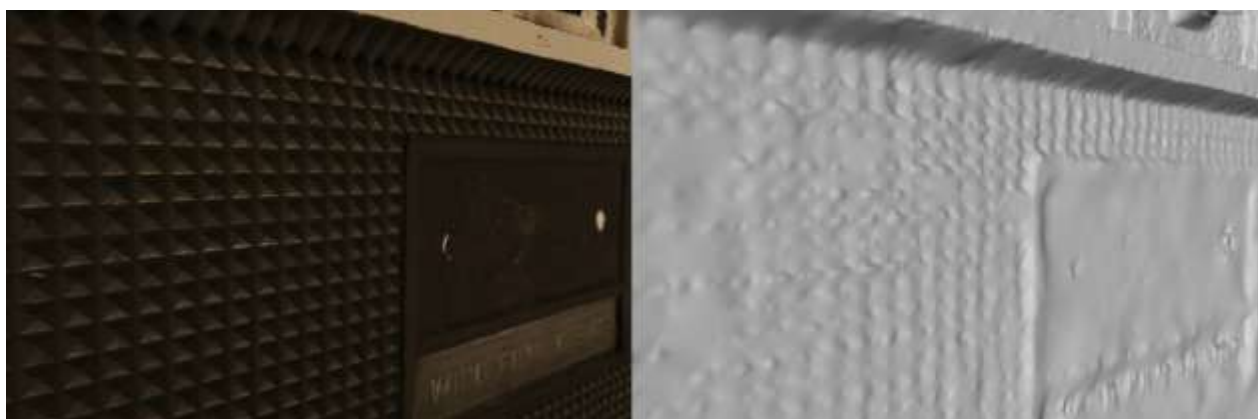
Slika 39: Halina Speedo-flash

Za Speedo-flash je bila dovoljna samo jedna serija fotografija. Snimljene su fotoaparatom Canon EOS 5DS R uz vrijeme ekspozicije od 1/200 sekunde, bez bljeskalice. Za model na slici 40 iskorišteno je svih 20 fotografija. Rekorder je u ovom projektu jer zbog mnoštva detalja na kućištu model ima 679.455 točaka i 1,267.870 poligona. Osim nepravilnosti na gornjoj strani s ovim modelom nije bilo mnogo problema, no valja napomenuti da prozirna plastika na prednjoj strani u softveru nije prepoznata, već je površina iza nje interpretirana kao stvarna površina kućišta.



Slika 40: 3D model Halina Speedo-flash i detalj sa stražnje strane kućišta

Dostupan na: <https://sketchfab.com/models/2e0de21e8cc24db2b61d4ba8628e0722>



Slika 41: Detalji na stražnjoj strani kućišta Halina Speedo-flash

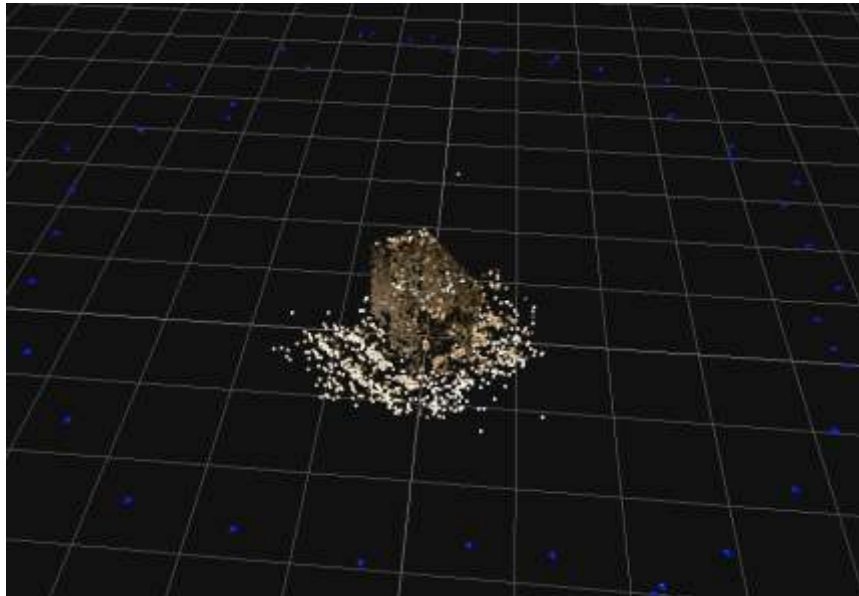
Na slici 41 vidi se visoka razina detalja koja se može postići fotogrametrijom – svaka od udubina široka i duboka je oko milimetar.

9. RECAP PHOTO ILI 3D ZEPHYR FREE

Kako bi se usporedio rad ReCap Photo i 3DZephyr Free korišteni su isti setovi fotografija u oba programa. Kao što je već spomenuto ranije, ReCap Photo korisniku nudi manje kontrole nad procesom nego 3D Zephyr. Dok ReCap Photo nudi samo dvije vrste dokumenta, *aerial* i *object* bez mogućnosti daljnjih izmjena, 3D Zephyr korisniku daje unaprijed sastavljene postavke ovisno o vrsti projekta – zračne fotografije, fotografije snimljene izbliza, ljudsko tijelo ili urban okoliš. Napredniji korisnici mogu sami odrediti postavke kao što su brzina analize fotografije, gustoća oblaka točaka, vrsta rekonstrukcije... Nakon odabira fotografija i postavki, proces izrade 3D modela podijeljen je u četiri etape:

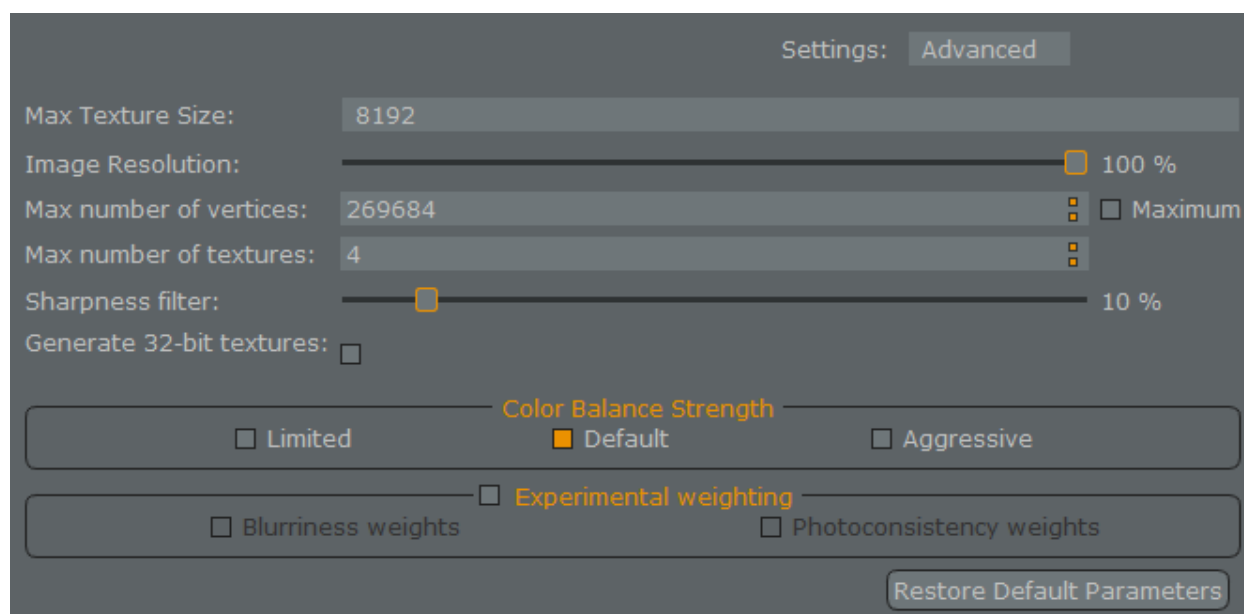
1. generiranje *sparse point cloud*,
2. generiranje *dense point cloud*,
3. izrada *mesh*,
4. izrada *textured mesh*.

3D Zephyr će prvo analizirati zadane fotografije i izračunati poziciju fotoaparata u odnosu na predmet koji se digitalizira. Rezultat ove etape je *sparse point cloud*, odnosno prorijeđeni oblak točaka, za što je potrebno oko pet minuta.



Slika 42: *Sparse point cloud* i izračunate pozicije fotoaparata u 3D Zephyr

Prije prelaska na sljedeći korak, 3D Zephyr ponovo pita za iste postavke, nakon čega generira gusti oblak točaka (*dense point cloud*). Za ovaj korak bilo je potrebno nešto više vremena, oko 20 minuta. Nakon što je gusti oblak točaka gotov može se krenuti na izradu geometrijske mreže modela, proces koji također ima postavke i treba istu količinu vremena kao prethodni korak. Rezultat ovog procesa je geometrijska mreža, ali bez teksture. Generiranje teksturirane mreže najduži je i najzahtjevniji dio procesa u 3D Zephyru, budući da, kako je spomenuto u jednom od ranijih dijelova ovog rada, sve ovisi o sistemskim specifikacijama računala na kojem se radi.



Slika 43: Postavke za izradu geometrijske mreže u programu 3D Zephyr

Na računalu¹ koje je korišteno u istraživanju je za ovaj korak bilo potrebno sat vremena, tijekom kojih je radni kapacitet procesora i RAM-a bio gotovo na maksimumu. Zbog ovoga bih preporučila korištenje boljeg računala, odrađivanje ovog koraka tijekom noći ili da se na računalu ne radi ništa drugo dok se 3D model generira.

S ciljem usporedbe modela iz ReCapa i 3D Zephyra, odlučeno je pokušati u 3D Zephyru izraditi 3D modele fotoaparata koristeći iste fotografije kao i u ReCapu. Na žalost, kod većine njih se nije moglo mnogo toga usporediti jer se u 3D Zephyru za većinu fotografija nije mogla izračunati pozicija, što je rezultiralo u djelomičnim ili polovičnim modelima s vrlo

¹ Procesor AMD Athlon II X4 640, 8GB RAM, grafička kartica AMD Radeon HD 5670, Windows 7 Ultimate

rijetkim oblacima točaka. Balda Rollbox i Robot II su se pokazali kao dovoljno uspješni modeli na kojima se može bazirati usporedba. U slučaju Robota II, iako je uspješno modeliranje samo oko 70% modela, vidljivo je kako kvaliteta modela u 3D Zephyru i pri standardnim postavkama može konkurirati onima iz ReCapa.



Slika 44: Robot II, *sparse point cloud*, *dense point cloud* i teksturirani model

Neuspjeh većine modela pripisuje se možda nedovoljnim preklapanjem fotografija koje nisu snimljene dovoljno izbliza. Također, smatram da je za 3D Zephyr bolje koristiti veći broj fotografija – modeli koje je ReCap izradio iz 20-30 fotografija imali su najmanje uspjeha u 3D Zephyru.



Slika 45: Razina detalja na Robotu II u 3D programima Zephyr Free i ReCap Photo

Na slici 45 može se vidjeti usporedba detalja na stražnjoj strani 3D modela Robota II u oba softvera. Primjećuje se bolje oštrina i detaljnost teksture nego na modelu izrađenom u ReCap Photo.



Slika 46: 3D model Balda Rollboxa u programu 3D Zephyr

Osim Robota II, u 3D Zephyru uspješno je izrađen i Balda Rollbox, na slici 46. Iako nisu povezane sve učitane fotografije, geometrija modela uspješno je prepoznata. Uz iste postavke kao i Robot II, izrađen je model s 30.391 točaka i 54.384 poligona. Kao i kod 3D modela Robota II, i kod Balda Rollboxa mogu se uočiti razlike u razini detalja na modelu, gdje je 3D Zephyr ponovno u prednosti.



Slika 47: Usporedba prednje strane modela Balda Rollboxa u 3D Zephyr i ReCap Photo

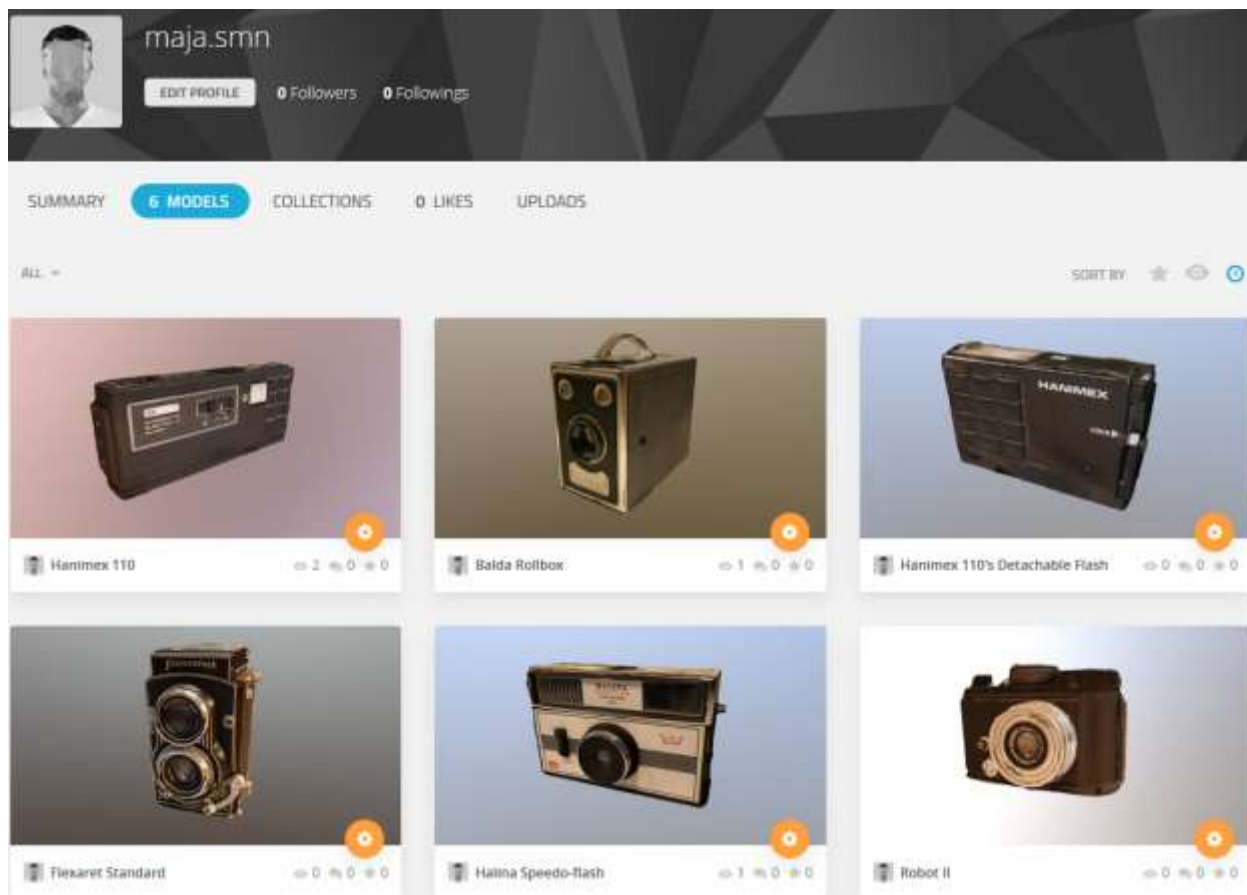
Iz dosadašnje komparativne analize može se zaključiti da, ovisno o tome kakvo računalo korisnik ima na raspolaganju, baziranost ReCap Photo na rad u oblaku može biti i prednost i nedostatak, a to isto se može reći i za 3D Zephyr koji koristi resurse računala za svoj rad. Izrada modela u ReCap Photo vrlo je jednostavna i od korisnika traži samo nekoliko klikova mišem, a nakon učitavanja fotografija cijeli se proces seli na oblak, računalo se može i ugasiti, a gotov 3D model čekat će na preuzimanje u programu. S druge strane, korisnik se odriče kontrole nad procesom i ne može utjecati ni na što osim na izrezivanje pozadine. Govoreći samo o vremenu, razlika nije velika – za svaki model u ReCap Photo bilo je potrebno oko sat i pol – pola sata za učitavanje i jedan sat za izradu modela u oblaku. 3D Zephyru potrebno je samo malo više – sve četiri etape zajedno odnose oko dva sata. ReCap Photo, s edukacijskom licencom koja je meni bila dostupna, preporučila bih korisnicima koji žele jednostavan i bezbrižan uvod u fotogrametriju. Mislim da je 3D Zephyr bolji izbor svima koji žele kontrolu nad procesom i znaju rukovati postavkama koje on nudi.

10. SKETCHFAB

Na početku ovog rada spomenuto je kako je osim pohrane i prikupljanja 3D podataka jedan od izazova i njihova prezentacija. Kako bi se zaista postigli ciljevi kao što su virtualni muzeji i slični projekti važno je korisnicima omogućiti mogućnost pogleda predmeta sa svih strana. Naravno, zbog njihove trodimenzionalne prirode nedovoljno je ponuditi samo dvodimenzionalne slike i ilustracije. Jedne od rješenja je platforma Sketchfab koja i besplatno omogućuje učitavanje i pregledavanje 3D modela.

Sketchfab je pokrenut 2012. godine kao interaktivno rješenje za prezentiranje 3D modela, nastalo iz želje da se 3D dizajnerima širom svijeta osigura mjesto gdje mogu pokazati svoj rad u punom sjaju. Danas platforma okuplja ne samo dizajnere, već i arhitekte, inženjere, škole, muzeje i mnoge druge koji na njoj mogu dijeliti, izdavati, kupovati i prodavati 3D modele i sadržaje za virtualnu i proširenu stvarnost. Sketchfab korisnicima nudi i dva modela pretplate koji, uz ostale usluge, omogućuju učitavanje velikih modela i privatnih koji nisu javno dostupni (Sketchfab, 2018.).

Platforma je jednostavna za korištenje – 3D modeli iz ReCap Photo mogu se konvertirati u format OBJ, sažeti u ZIP te se u nekoliko minuta učitati na Sketchfab. Svakom korisniku dostupan je i softver unutar platforme koji omogućava uređivanje postavki tekstura, osvjetljenja, anotacija i videa. Uspješniji modeli iz ovog projekta – Balda Rollbox, Robot II, Halina Speedo-flash, Hanimex 110 i Flexaret Standard – konvertirani su u OBJ na postavci najviše kvalitete i dostupni su na adresi <https://sketchfab.com/maja.smn>.



Slika 48: 3D modeli na platformi Sketchfab

11. ZAKLJUČAK

3D digitalizacija mlado je područje s korijenima koji sežu u 19. stoljeće, čiji potencijali mogu donijeti mnoge promjene u različitim disciplinama – od arhivistike, muzeologije i arheologije do arhitekture, industrije i video igara. Sa stajališta arhivistike i muzeologije posebno je značajna mogućnost veće dostupnosti vrijednih izložaka uz istovremenu zaštitu originala od nepotrebnog rukovanja i mogućih oštećenja. Različitim metoda za 3D digitalizaciju ne nedostaje – njihov broj ukazuje na nužnost individualnog pristupa svakom predmetu koji se digitalizira, jer odluke o odvijanju procesa ovise ne samo o njegovoj veličini, materijalu i obliku, već i o raspoloživim financijskim sredstvima i dostupnom prostoru. Načina za automatiziranu 3D digitalizaciju velikog broja predmeta još uvijek nema, a postupak je često vremenski zahtjevan i, bez stručnost znanja, vrlo težak.

Metoda fotogrametrije posebno privlači pozornost zbog toga što ne zahtijeva skupocjenu opremu ili softver, a njome se može baviti svatko s malo znanja o fotografiji. Iako se ne može pohvaliti stopostotnom preciznošću, fotogrametrija nalazi svoje mjesto među poklonicima 3D modeliranja zbog svoje dostupnosti i fotorealističnih tekstura. Projekt 3D digitalizacije odabranih primjeraka iz zbirke foto-opreme Hrvatskog državnog arhiva započet je kao eksperiment kako bi se vidjelo koliko se fotogrametrijom može postići kod zahtjevnijih materijala i oblika. Primjerci fotoaparata koji su digitalizirani u različitim su mjerama predstavljali izazov, no kada bi ih se poredalo od najlakših do najtežih, Hanimex 110, Robot II i Halina Speedo-flash zauzeli bi vrh liste, Balda Rollbox i Flexaret Standard sredinu, a Kodak Box 620, Kodak Baby Brownie i West Pocket Autographic Kodak Special zasigurno predstavljaju najveći izazov. Iako svaki od fotoaparata na sebi ima malo problematičnija područja, za posljednja tri s popisa preporučila bih korištenje neke druge metode 3D digitalizacije. Slične probleme se zasigurno može susresti pri 3D digitalizaciji sjajnih i glatkih predmeta kao što su vaze ili komplicirane skulpture. Projekt smatram poučnom lekcijom o tome što raditi, a što ne raditi prilikom 3D digitalizacije, i iz njega može nešto naučiti svatko tko se okuša u nečem sličnom.

12. POPIS SLIKA

Slika 1: Fotogrametrijom iz 2D fotografija u 3D model.....	4
Slika 2: Lasersko skeniranje	9
Slika 3: Strukturirano svjetlo	10
Slika 4: 3D model iz siluete	11
Slika 5: <i>Shape-from-shading</i> (SFS)	12
Slika 6: Primjer metode <i>shape-from-texture</i>	13
Slika 7: Fotografiranje interijera i predmeta za fotogrametriju	16
Slika 8: Oblak točaka (engl. <i>point cloud</i>) digitalizirane vaze	17
Slika 9: Fotografije učitane u program ReCap Photo	20
Slika 10: Korisničko sučelje programa 3D Zephyr.....	21
Slika 11: Korisničko sučelje programa Agisoft PhotoScan.....	22
Slika 12: Korisničko sučelje programa COLMAP	23
Slika 13: Dva seta snimanja fotografija	25
Slika 14: 3D modeli jarka prije i poslije odstranjivanja pijeska i algi	27
Slika 15: 3D modeli topova i sidra	28
Slika 16: 3D model bez referentnih točaka u pozadini	31
Slika 17: Drugo fotografiranje Rollboxa, 3D model s rupama.....	32
Slika 18: Ponovljeno drugo snimanje Rollboxa, 3D model s vidljivim kontrastom u osvjetljenju	32
Slika 19: Fotoaparat Rollbox marke Balda veličine je 6 x 9 centimetara.....	34
Slika 20: 3D model Balda Rollboxa	34
Slika 21: Izmjene na 3D modelu uz pomoć alata <i>sculpt</i> u programu ReCap Photo	35
Slika 22: Ispunjavanje rupa.....	36
Slika 23: Fotoaparat Flexaret Standard s 80mm objektivom Belar	37
Slika 24: Neuspješno modeliranje Flexareta.....	37
Slika 25: 3D model Flexaret Standarda	38
Slika 26: Kodak Box 620.....	38
Slika 27: Usporedba 3D modela Kodak Box 620 iz 49, i 23 fotografije	39
Slika 28: Robot II.....	40
Slika 29: 3D model Robot II.....	41
Slika 30: Hanimex 110.....	41
Slika 31: 3D model Hanimex 110 sa i bez tekstone	42
Slika 32: 3D model vanjske bljeskalice Hanimex 110	42
Slika 33: Natpis "Hanimex" oblikovan u geometriji 3D modela bljeskalice.....	43
Slika 34: 3D model Hanimex 110 s bljeskalicom, ukupno 382.200 točaka, 704.566 poligona ...	43
Slika 35: Kodak Baby Brownie	43
Slika 36: 3D model Kodak Baby Brownie sa sklopljenim tražilom.....	44
Slika 37: Vest Pocket Autographic Kodak Special.....	45
Slika 38: Problematičan 3D model Vest Pocketa	45

Slika 39: Halina Speedo-flash.....	46
Slika 40: 3D model Halina Speedo-flash i detalj sa stražnje strane kućišta	47
Slika 41: Detalji na stražnjoj strani kućišta Halina Speedo-flash	47
Slika 42: <i>Sparse point cloud</i> i izračunate pozicije fotoaparata u 3D Zephyr.....	48
Slika 43: Postavke za izradu geometrijske mreže u programu 3D Zephyr.....	49
Slika 44: Robot II, <i>sparse point cloud</i> , <i>dense point cloud</i> i teksturirani model.....	50
Slika 45: Razina detalja na Robotu II u 3D programima Zephyr Free i ReCap Photo.....	50
Slika 46: 3D model Balda Rollboxa u programu 3D Zephyr	51
Slika 47: Usporedba prednje strane modela Balda Rollboxa u 3D Zephyr i ReCap Photo.....	52
Slika 48: 3D modeli na platformi Sketchfab.....	54

13. LITERATURA

1. 3D Flow. Full 3DF Zephyr features comparison. URL: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-feature-comparison/>
2. 3D Scanning Technology – Hard Work That Looks Like "Magic". URL: <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>
3. 3D Scanning through structured light projection. URL: <https://www.3dnatives.com/en/structured-light-projection-3d-scanning/>
4. Aaslestad. Point Clouds. URL: <https://aaslestad.com/3d-scanning/point-clouds/>
5. Agisoft. Features. URL: <http://www.agisoft.com/features/compare/>
6. Arnold, D.; Kaminski, J.; 3D Scanning and Presentation of Ethnographic collections – Potentials and Challenges. *Journal of Museum Ethnography*. 2013.
7. Autodesk. Product Review. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/recap/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Reality-Capture/files/GUID-91810DA7-71F5-4C6C-989C-790455B7C847-htm.html?v=2018>
8. Blizard, B. The Art of Photogrammetry: How to Take Your Photos. URL: <https://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/>
9. Camerapedia. Kodak Baby Brownie. URL: http://camerapedia.wikia.com/wiki/Kodak_Baby_Brownie
10. Camerapedia. Robot. URL: <http://camerapedia.wikia.com/wiki/Robot>
11. Develop3D - Autodesk Memento. URL: <https://www.develop3d.com/features/new-methods-need-new-tools-autodesk-memento>
12. Dresdner-Kameras. URL: <http://www.dresdner-kameras.de/firmengeschichte/firmen/firmen.html>
13. FujiFilm. URL: <http://www.fujifilm.co.nz/about/profile/newzealand/>
14. GitHub. COLMAP. URL: <https://github.com/colmap/colmap>
15. Harding, C. The Vest Pocket Kodak Was The Soldier's Camera. URL: <https://blog.scienceandmediamuseum.org.uk/the-vest-pocket-kodak-was-the-soldiers-camera/>
16. Jepson, A. Shape from Shading. URL: <http://www.cs.toronto.edu/~jepson/researchSFS.html>

17. Jurda, M.; Urbanova, P. Three-dimensional documentation of Dolni Vestonice skeletal remains, can photogrammetry substitute laser scanning?. *Anthropologie*. 2016.
18. Kraus, K. Photogrammetry. 2000.
19. Laser Scanning vs. Photogrammetry. URL: <http://lanmarservices.com/2014/11/07/laser-scanning-vs-photogrammetry/>
20. Lievendag, N. 3DF Zephyr Photogrammetry Software Review. URL: <https://3dscanexpert.com/3df-zephyr-photogrammetry-software-review/>
21. Lievendag, N. Agisoft Photoscan Review. URL: <https://3dscanexpert.com/agisoft-photoscan-photogrammetry-3d-scanning-review/>
22. Lievendag, N. Autodesk ReCap Photo Review. URL: <https://3dscanexpert.com/autodesk-recap-photo-photogrammetry-3d-scanning-review/>
23. Lievendag, N. Free 3D Scanning from Video by Using Just a Smartphone. URL: <https://3dscanexpert.com/free-3d-scanning-video-smartphone/>
24. Lobay, A.; Forsyth, D.A. Shape from Texture without Boundaries. *International Journal of Computer Vision*. 2006.
25. McCarthy, J.; Benjamin, J. Multi-image Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: An Accessible, Diver-Based Approach. *Journal of Maritime Archaeology*. 2014.
26. Meopta history. URL: <https://www.meopta.com/en/brief-history/>
27. Mülâyim, A.; Yılmaz, U.; Atalay, V.; Silhouette-based 3D Model Reconstruction from Multiple Images. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2003.
28. Pavlidis, G.; Koutsoudis A.; Arnaoutoglou, F.; Tsioukas, V.; Chamzes, C. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. 2006.
29. Phan, A. Introducing ReCap Photo. URL: <http://blogs.autodesk.com/recap/introducing-recap-photo/>
30. Photogrammetry: 10 Tips and Tricks. URL: <http://thehightechhobbyist.com/photogrammetry-tips-and-tricks/>
31. Remondino, F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*. 2011.
32. Santos, P.; Ritz, M.; Fuhrmann C.; Fellner D. 3D Mass Digitization: A Milestone for Achaeological Documentation. *Virtual Archaeology Review*. 2017.

33. Sketchfab. URL: <https://sketchfab.com/about>
34. TheHighTechHobbyist. Photogrammetry: 10 Tips and Tricks. URL:
<http://thehightechhobbyist.com/photogrammetry-tips-and-tricks/>
35. Wachowiak, M.; Karas, B.; 3D Scanning and Replication for Museum and Cultural Heritage. *Journal of the American Institute for Conservation*. 2009.
36. Xiang, Yu; Nakamura, Shohei.; 3D Model Generation of Cattle by Shape-from-Silhouette Method for ICT Agriculture. 2016.

14. SAŽETAK

Cilj ovog rada je predstaviti projekt 3D digitalizacije izabranih primjeraka iz zbirke foto-opreme Hrvatskog državnog arhiva. Nakon opisa 3D digitalizacije općenito, te njene primjene u različitim znanostima, u radu se govori o različitim metodama kojima se može 3D digitalizirati, s posebnim naglaskom na fotogrametriju i dostupan softver koji je primjenjuje, uključujući i onaj koji je korišten u naslovnome projektu. Kako bi se jasnije predstavili izazovi na koje se može naići tijekom 3D digitalizacije fotogrametrijom, opisana su dva inozemna projekta u kojima je ona korištena. Druga polovica rada govori o samome projektu digitalizacije zbirke foto-opreme Hrvatskog državnog arhiva, s poglavljima posvećenima pojedinom digitaliziranom primjerku i izazovima koje predstavlja. Na kraju rada predstavljena je platforma Sketchfab gdje su 3D modeli dostupni za pregled.

KLJUČNE RIJEČI: digitalizacija, 3D digitalizacija, fotogrametrija, fotografija, fotoaparati

3D Digitisation of the Collection of Photographic Equipment from the Croatian State Archives

15. ABSTRACT

The goal of this thesis is to present the project of 3D digitisation of selected items from the collection of photographic equipment from the Croatian state archives. After a description of 3D digitisation and its uses in various sciences, the different methods of 3D digitisation are presented, with an emphasis on photogrammetry and available software that uses it, including the software used for the purpose of the project. In order to illustrate the challenges that photogrammetry may present, a description of two international projects is given. The second part of the thesis focuses on the project of 3D digitisation of the collection of photographic equipment from the Croatian state archives, with chapters dedicated to each digitised object and its challenges. In the last section of the thesis, the platform Sketchfab is presented, where the 3D models are freely available for viewing.

KEY WORDS: digitisation, 3D digitisation, photogrammetry, photography, cameras