

Procjena volumena kalupa za izradu boca

Marinac, Valentin

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:938385>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 507

PROCJENA VOLUMENA KALUPA ZA IZRADU BOCA

Valentin Marinac

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 507

PROCJENA VOLUMENA KALUPA ZA IZRADU BOCA

Valentin Marinac

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 507

Pristupnik: **Valentin Marinac (0036523966)**
Studij: Računarstvo
Profil: Računarska znanost
Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Pribanić
Komentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Petković

Zadatak: **Procjena volumena kalupa za izradu boca**

Opis zadatka:

Proučiti metodologiju pasivne stereo metode za 3D rekonstrukciju oblika tijela te naučiti u tu svrhu koristiti biblioteku otvorenog koda AliceVision. Proučiti metodologiju aktivne 3D rekonstrukcije pomoću strukturiranog svjetla. Naučiti primijeniti Structure Sensor skener te popratnu biblioteku za 3D rekonstrukciju objekata. Korištenjem pasivne i aktivne metode 3D rekonstrukcije, razviti metodologiju 3D rekonstrukcije kalupa za izradu boca u cilju procjene volumena rekonstruiranog kalupa. Posebnu pozornost obratiti na robusnu 3D registraciju pojedinih rekonstruiranih pogleda kalupa. Napraviti eksperimentalnu verifikaciju razvijene metodologije.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Želim izraziti duboku zahvalnost svom mentoru, prof. dr. sc. Tomislavu Pribaniću, čiji su stručnost, vođenje i savjeti ostavili neizbrisiv trag ne samo na ovom radu, već i na mnogim generacijama studenata. Njegova predanost, znanje i podrška inspirirali su me tijekom cijelog školovanja, i zauvijek ću ga se s neizmjernim poštovanjem prisjećati.

Zahvaljujem i svome komentoru, izv. prof. dr. sc. Tomislavu Petkoviću, koji je s velikim strpljenjem i razumijevanjem pomogao da ovaj rad privedem kraju na najbolji mogući način.

Mojim roditeljima vječno ću biti zahvalan na podršci i trudu koju su mi pružali svih ovih godina.

Konačno, želim se zahvaliti svojoj baki. Njena dobrota i požrtvornost će zauvijek biti zapamćeni.

Sadržaj

Uvod	3
1. Postojeće tehnike i tehnologije	4
2. 3D rekonstrukcija površine kalupa	5
2.1. Stereo više pogleda	6
2.1.1. Inicijalizacija kamere	7
2.1.2. Ekstrakcija značajki	8
2.1.3. Uparivanje slika	8
2.1.4. Uparivanje značajki	9
2.1.5. Algoritam za dobivanje strukture iz pomaka kamera	10
2.1.6. Priprema guste scene	11
2.1.7. Procjena dubine	11
2.1.8. Dorada procjene dubine	12
2.1.9. Stvaranje 3D modela	13
2.1.10. Dorada 3D modela	14
2.1.11. Dodavanje teksture 3D modelu	14
2.2. Strukturirano svjetlo	15
2.3. Structure Sensor Pro	16
2.4. Kamera za mjerenje vremena leta	16
2.5. Mašina za mjerenje koordinata	17
3. Metodologija mjerenja volumena kalupa	18
4. Rezultati i usporedba	23
4.1. Rezultati rekonstrukcije površine	23
4.1.1. Rekonstrukcija površine stereom više pogleda	23
4.1.2. Rekonstrukcija površine strukturiranim svjetlom	24
4.1.3. Rekonstrukcija površine pomoću uređaja Structure Sensor Pro	26

4.1.4.	Rekonstrukcija površine kamerom za mjerenje vremena leta.....	27
4.1.5.	Rekonstrukcija površine mašinom za mjerenje koordinata.....	28
4.2.	Rezultati procjene volumena	29
4.3.	Diskusija/usporedba	30
	Zaključak	32
	Literatura	33
	Sažetak.....	36
	Summary.....	37

Uvod

Područje 3D skeniranja površine bavi se opisivanjem položaja ili koordinata površine nekog 3D objekta ili prostora (najčešće 3D objekta iz stvarnog svijeta) iz niza 2D slika ili videa. To je i dalje zahtjevan zadatak u kojem najbolje rezultate većinom postižu tradicionalne metode, no duboko učenje postaje sve bitnije i bitnije unutar ovog područja. Svoje važne primjene ovo područje nalazi u računalnoj grafici, virtualnoj stvarnosti, kreiranju modela za kliničke medicinske svrhe, računalnoj animaciji, kreiranju reljefnih mapa, računalnom vidu, dizajniranju i projektiranju [1]. Neke potencijalne i zanimljive primjene za ovo područje bi se mogle naći u razvoju autonomnih robota ili vozila, kojima bi ovo područje moglo pomoći poboljšati kretanje kroz okolinu i interakciju s prostorom.

U industriji često postoji potreba za preciznim mjerenjem volumena nekog objekta ili dijela objekta. Na primjer, kada se nešto proizvede u industriji to uglavnom podliježe nekima standardima kontrole kvalitete. Volumen se može mjeriti s vodom, no neki objekti nisu praktični za mjeriti pomoću vode (npr. mjerenje volumena soli), a i sam proces mjerenja pomoću vode može biti dugotrajan. U ovom radu se koristi 3D skeniranje površine i nekoliko raznih metoda snimanja objekta kako bi se dobila što preciznija 3D rekonstrukcija površine kalupa za izradu boca s ciljem procjene volumena boce koja bi nastala korištenjem tog kalupa. Sam proces stvaranja boce koristi kalupa koji ima dva dijela – jedan za svaku polovicu boce. Ako se mjerenje volumena 3D skeniranjem površine pokaže preciznim i uspješnim, proces kontrole kvalitete bi se mogao značajno olakšati i ubrzati.

U prvom poglavlju će se dati detaljniji pregled stanja postojećih tehnika i tehnologije 3D skeniranja površine. Konkretna metodologija i opis metoda i načina mjerenja 3D rekonstrukcija se nalazi u drugom poglavlju. Treće poglavlje sadrži metodu i algoritme korištene u procjeni volumena. U četvrtom poglavlju nalaze se rezultati 3D skeniranja površina različitim metodama i procjene njihovih volumena, te kratki komentar i usporedba korištenih metoda.

1. Postojeće tehnike i tehnologije

Područje 3D skeniranja površina je počelo ubrzanije rasti te alati za 3D skeniranje postaju sve rašireniji. Posljedično raste i interes za primjenjivanjem područja u komercijalne svrhe.

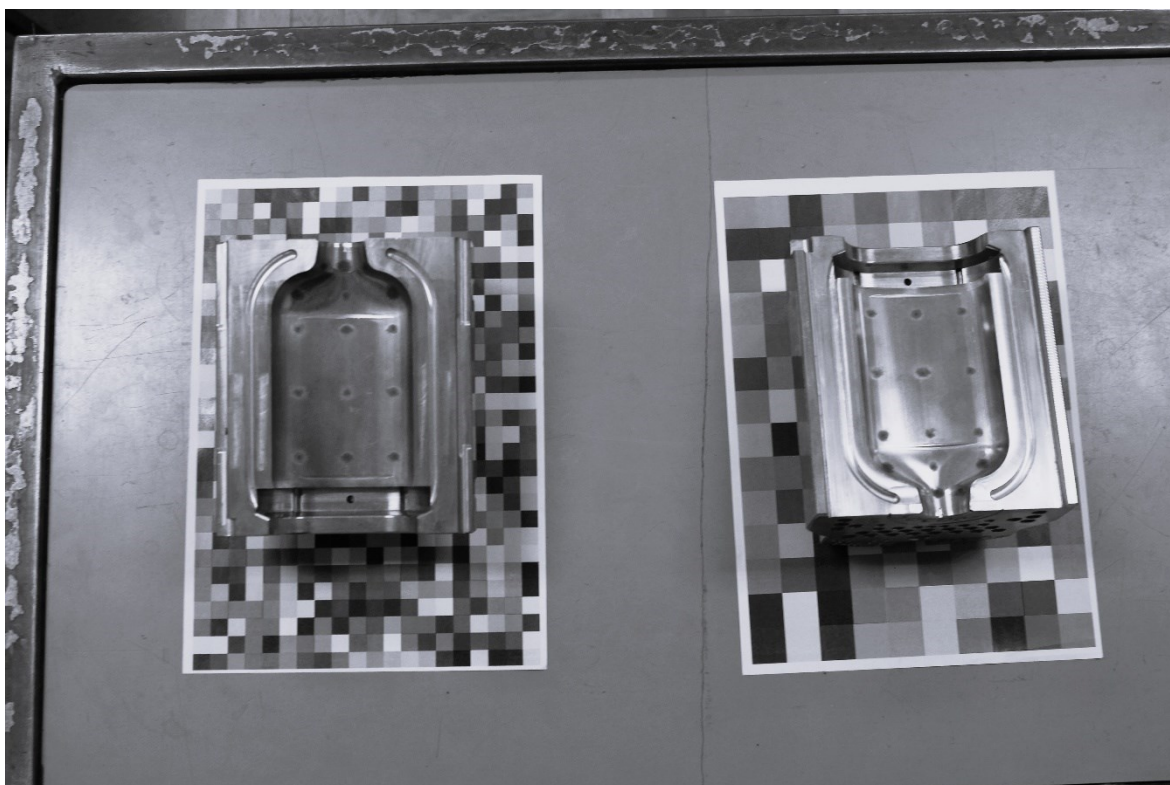
Kvaliteta rekonstrukcije uvelike ovisi o kvaliteti ulaznih podataka i algoritmu koji se koristi za njihovu obradu. Dobri senzori i kamere za snimanje stvaraju vrlo kvalitetne ulazne podatke, no imaju visoke cijene te se uvijek pokušava preko boljih algoritma rekonstrukcije iz istih ulaznih podataka dobiti što kvalitetniju obradu/rekonstrukciju.

Za 3D rekonstrukciju površine kalupa i sličnih objekata većina komercijalnih industrijskih rješenja koristi 2 kamere i projektor koji obasjava svjetlosni ili infracrveni uzorak na snimani objekt. Jedno takvo rješenje je HandySCAN [2] koji s relativno malenom spravom koja može stati u ruku daje odličnu točnost, no u današnje vrijeme postoje i mnogi drugi. Najveći nedostatak komercijalnih industrijskih rješenja je njihova cijena. Primjerice, HandySCAN košta više od dvadeset tisuća eura [3]. 3D rekonstrukcija se može provesti i pristupačnijim alatima, te se u ovom radu koristi nekoliko takvih metoda.

Najjednostavnija metoda zove se stereo više pogleda (engl. multi-view stereo) [4] te je izvedena korištenjem komercijalnog mobitela i profesionalne kamere. Korišteno je i 3D skeniranje površine strukturiranim svjetlom [5]. Ona zahtijeva barem jednu kameru te izvor svjetlosti odnosno projektor. Za ovu metodu u radu su korištene dvije kamere i jedan projektor. U radu je također korišten i Structure Sensor Pro [6], komercijalno rješenje za 3D skeniranje koje isto radi na principu strukturiranog svjetla. Kamera za mjerenje vremena leta (engl. time of flight camera – ToF camera) [7] je također korištena kako bi se napravio 3D sken površine kalupa. Konačno, korištena je i mašina za mjerenje koordinata [8] kako bi se izmjerile koordinate površine i napravljen je 3D model relevantne površine iz izmjerenih točaka.

2. 3D rekonstrukcija površine kalupa

Primjer kalupa kakvom bismo htjeli mjeriti volumen je prikazan na Slika 1. Ova dva dijela jednog kalupa nisu identična, lijevi dio je nešto manji, tj. ima utor na bočnim rubovima, dok desni ima izbočine na bočnim rubovima. Tako je napravljen da se pri procesu lijevanja stakla dva dijela kalupa mogu spojiti u jednu cjelinu. Stoga će se dalje u tekstu na lijevi dio kalupa referirati kao manji dio, a na desni dio kalupa kao veći dio.



Slika 1 - Primjer kalupa - lijevo se nalazi manji dio, a desno veći

Kako bi se mogao procijeniti volumen kalupa, potrebno je prvo dobiti 3D model njegove površine. Nakon 3D skeniranja površine dobiveni model se može koristiti za algoritamsku procjenu volumena.

2.1. Stereo više pogleda

Algoritam koji se koristi za rekonstrukciju je stereo više pogleda (engl. *Multi-view stereo*) [9]. Za postupak fotogrametrijskog 3D skeniranja površine potrebne su slike ili video objekta kojeg želimo. Uspješnost procesa skeniranja površine uvelike ovisi o kvaliteti slika kojom raspoložemo. Poželjno je da je ambijentalno svjetlo konstantno. Bitno je da je objekt stacionaran pri prikupljanju slika, jer inače ova metoda vjerojatno neće raditi. Kalup je bio sniman sa udaljenosti od oko 80 cm. Uvijek je poželjno izbaciti slike gdje se kamera previše kretale ili one koje su mutne, te su se takve slike izbacile prije obrade. Slike moraju dobro pokriti objekt iz svih kuteva po cijeloj relevantnoj površini. Konkretno u slučaju kalupa na grlo boce te donji dio se treba obratiti posebna pozornost. Oko stotinjak slika se koristi za pojedinu rekonstrukciju ovom metodom.

Mjerenja su napravljena sa dvije različite kamere. Prva kamera, koja će se dalje u radu smatrati profesionalnom kamerom, je Canon EOS 550D [10] s Canon EFS 18-55mm objektivom [11]. Druga kamera, koja će se dalje u radu smatrati kamerom komercijalno/običnog mobitela, je stražnja ugrađena kamera u iPhone SE (model A2296) [12].

Konkretna postupak rekonstrukcije koristi razvojni okvir AliceVision [13] otvorenog koda. AliceVision nudi mnogo funkcionalnosti za 3D rekonstrukciju površine i fotogrametriju. Meshroom [14] je programska potpora otvorenog koda koja pruža grafičko sučelje i razvojnu okolinu za praktičniju 3D rekonstrukciju objekata, te je baziran na razvojnom okviru AliceVision. Meshroom postupak fotogrametrijske rekonstrukcije dijeli na više manjih podzadataka zvanih čvorovi. Svaki čvor prima ulazne podatke, izvodi svoj podzadatak pozivajući se na razvojni okvir AliceVision te daju izlazne, tj. obrađene podatke. Ti se čvorovi mogu kombinirati na različite načine, ovisno o potrebi, tvoreći usmjereni graf obrade podataka. Pomoću hash-a mogu detektirati promjene u ulaznim podacima te ponovno pokrenuti obradu podataka, kao i pri promjeni parametara.

Postoji standardni predložak za postupak rekonstrukcije koji se sastoji od sljedećih koraka obrade podataka:

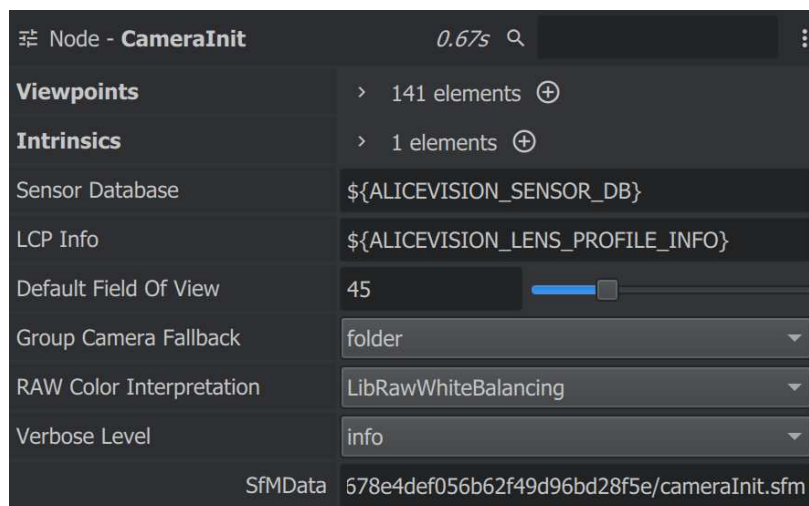
1. inicijalizacija kamere
2. ekstrakcija značajki
3. uparivanje slika

4. uparivanje značajki
5. algoritam za dobivanje strukture iz pomaka kamera
6. priprema guste scene
7. procjena dubine svakog piksela svake slike
8. dodatno procesiranje procjena dubina
9. stvaranje 3D modela od trokutaste mreže
10. dodatno procesiranje stvorenog 3D modela
11. dodavanje teksture 3D modelu

Navedeni standardni koraci korišteni su u ovom radu.

2.1.1. Inicijalizacija kamere

Ovaj korak koristi metapodatke ulaznih slika kako bi se detektiralo koja se kamera koristi i posljedično procijenilo intrinzične parametre kamere. Ako kamera postoji u bazi senzora koje Meshroom podržava onda se automatski dohvaćaju relevantni podatci iz baze. U suprotnom ti se podatci mogu ručno dodati ili procijeniti iz slika. Dodatni detalji i parametri koji se mogu podešavati i koji su korišteni u čvoru prikazani su na slici Slika 2.



Slika 2 - Parametri čvora za inicijalizaciju kamere

2.1.2. Ekstrakcija značajki

Svrha ovoga koraka je pronaći ključne točke ili regije u svakoj slici koje se zovu značajke. Algoritam će za svaku točku gdje smatra da se nalazi značajka napraviti opisnik te značajke. Ako algoritam za ekstrakciju značajki za istu točku na različitim slikama (i pod različitim osvjetljenjima, udaljenostima i pogledima na točku) daje jednak ili što sličniji opisnik, kažemo da je to dobar algoritam za ekstrakciju značajki.

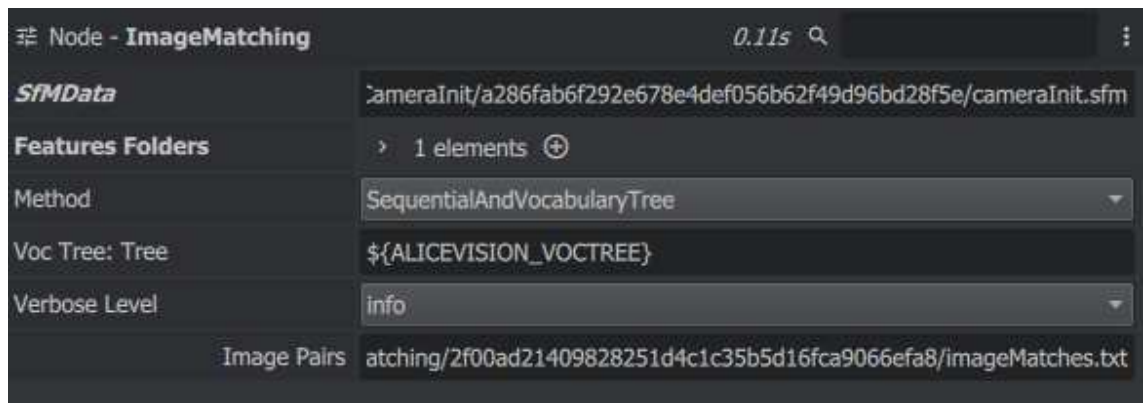
Postoje različiti algoritmi za ekstrakciju značajki, a u ovom radu se koristi DSP-SIFT [15] algoritam, što je poboljšana varijanta originalnog i često korištenog SIFT [16] algoritma. Količina i kvaliteta opisnika je ostavljena na podrazumijevanoj razini. Na slici Slika 3 je prikazan kompletan čvor i korištene postavke i parametri.



Slika 3 - Parametri čvora za ekstrakciju značajki

2.1.3. Uparivanje slika

Cilj uparivanja slika je ustanoviti koje slike prikazuju isto područje scene. U AliceVision razvojnom okviru, ovo se postiže stablom rječnika. Svaka slika dobiva svoj opisnik koji se sastoji od značajki unutar slike. Opisnici slika se uspoređuju - što su opisnici dviju slika sličniji, to više sadržaja scene slike dijele. Parametri čvora za uparivanje slika su prikazani na slici Slika 4.



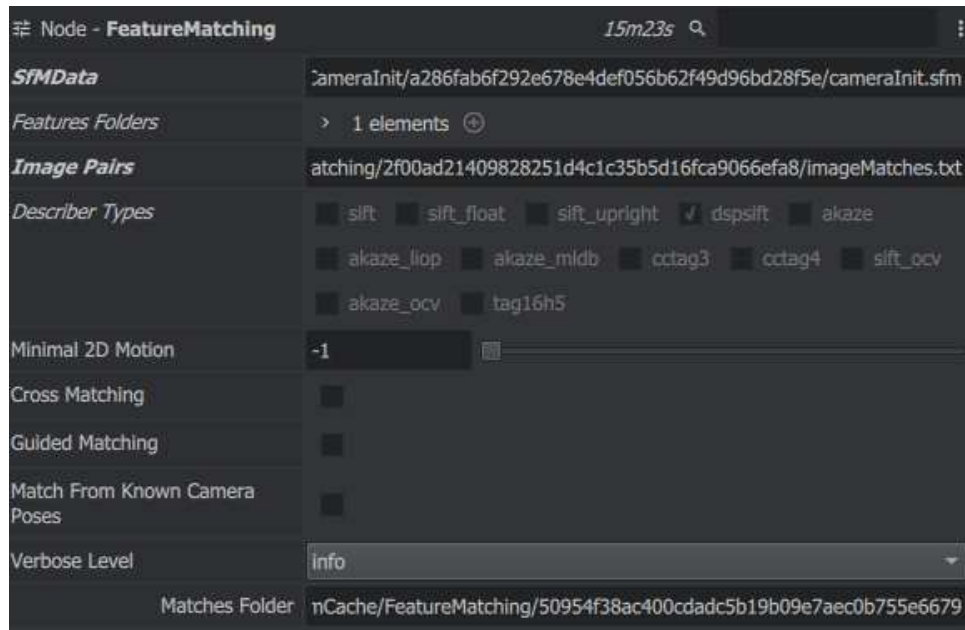
Slika 4 - Parametri čvora za uparivanje slika

Specifična metoda koja se koristi je „SequentialAndVocabularyTree“. To je poboljšanje originalne tehnike samo sa stablom rječnika [17]. Korišteni postupak skraćuje vrijeme procesiranja naspram originalne tehnike jer pretpostavlja da slike koje su slikane jedna nakon druge (ili u slično vrijeme) vjerojatno sadrže slične dijelove scene što pruža dodatnu informaciju.

2.1.4. Uparivanje značajki

Ključne točke koje smo dobili iz slika u 2. koraku se sada uparivaju. Opisnici značajki se uspoređuju i na temelju toga donosi se odluka je li ta značajka predstavlja istu točku (ili regiju) na dvije različite slike. Način na koji se opisnici uspoređuju i prag za odluku uvelike utječu na kvalitetu rekonstrukcije. Za usporedbu opisnika koriste se različite mjere udaljenosti. Uspoređivanje svakog opisnika u jednoj slici sa svim opisnicima u nekoj drugoj slici se u praksi ne radi već se koriste optimizirani algoritmi za ovaj problem, kao što je algoritam „približnog najbližeg susjeda“ ili algoritam „kaskadnog haširanja“. Naknadno, nakon provedenog opisanog uparivanja, provodi se dodatna analiza dobivenih parova koja koristi epipolarnu geometriju i RANSAC (RANdom SAMple Consensus) metodu kako bi se izbacili parovi koji nemaju smisla geometrijski.

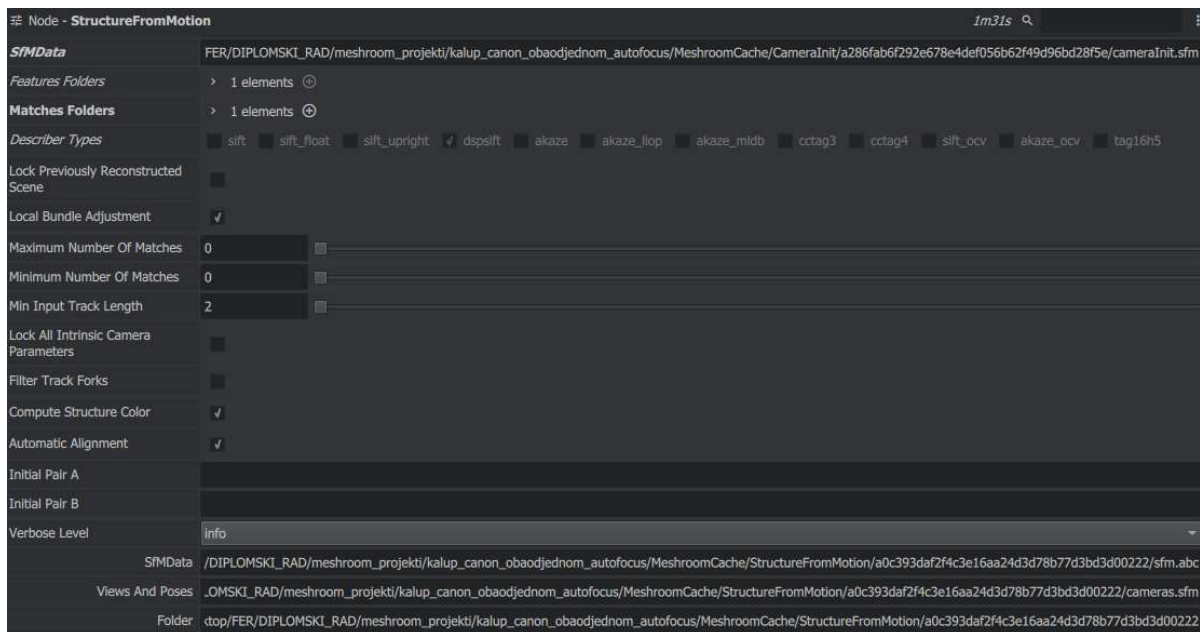
Na slici Slika 5 su prikazani parametri čvora za uparivanje značajki.



Slika 5 - Parametri čvora za uparivanje značajki

2.1.5. Algoritam za dobivanje strukture iz pomaka kamera

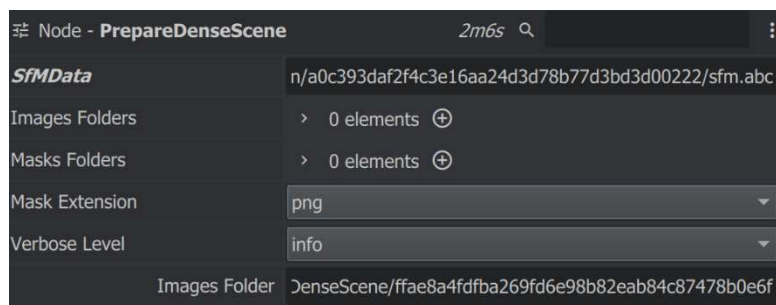
Cilj ovog koraka je razumjeti geometrijski odnos u sceni te kreirati samu strukturu scene. U ovom koraku se također ustanovljuje točna pozicija, orijentacija i unutarnji parametri svih kamera. Algoritam počinje sa rekonstrukcijom iz dva pogleda te onda iterativno dodaje i analizira nove slike scene. Spajamo točke 2D slika sa pravom 3D točkom u prostoru i iz toga možemo dobiti geometrijsku informaciju o međusobnom položaju kamera i scene/objekta u prostoru. Slika 6 prikazuje čvor za dobivanje strukture iz pomaka kamere te korištene parametre.



Slika 6 - Parametri čvora za dobivanje strukture iz pomaka kamere

2.1.6. Priprema guste scene

Ovaj čvor postoji kao priprema za daljnju obradu procjene dubine. Ovaj čvor izvozi slike bez izobličenja kako bi daljnji proces procjene dubine i dodavanje teksture mogli funkcionirati. Parametri čvora su prikazani na slici Slika 7.



Slika 7 - Parametri čvora za pripremu guste scene

2.1.7. Procjena dubine

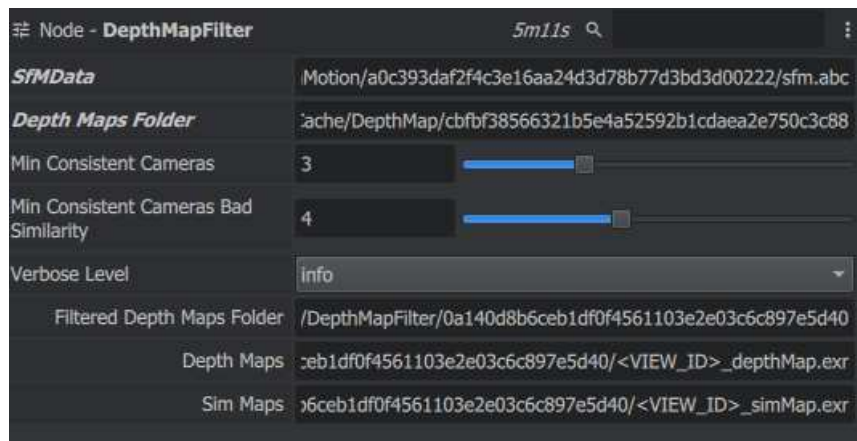
Sada za svaku ulaznu sliku kalibrirane kamere, želimo izračunati dubinu u svakom pikselu slike, tj. koliko je u stvarnosti taj piksel udaljen od senzora. AliceVision koristi polu globalnu metodu podudaranja (engl. *Semi-Global Matching*). Parametar „downscale factor“ utječe na kvalitetu slike, što je on manji, manja je i kvaliteta slike. Čvor je prikazan na slici Slika 8.



Slika 8 - Parametri čvora za procjenu dubine

2.1.8. Dorada procjene dubine

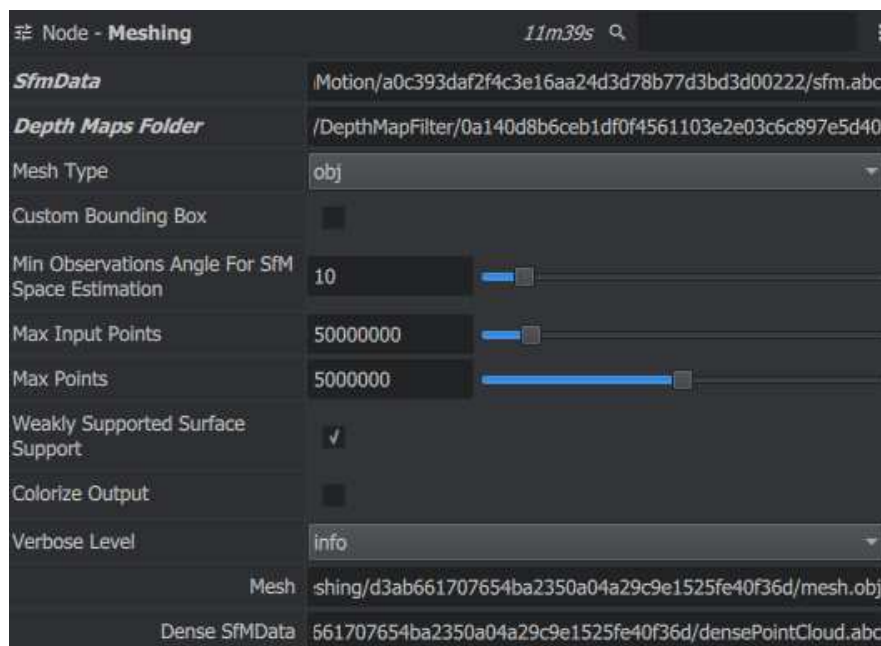
Ovaj kratki korak provjerava geometrijsku konzistentnost između procijenjenih dubina. Ako neka točka ima drastično različite vrijednosti na slikama koje su slikane jedna blizu druge, ona se izbacuje. Takve točke nazivamo nestabilnima te one mogu drastično smanjiti kvalitetu izrade 3D modela. Na slici Slika 9 su prikazani korišteni parametri i kompletan čvor.



Slika 9 - Parametri čvora za doradu procjene dubine

2.1.9. Stvaranje 3D modela

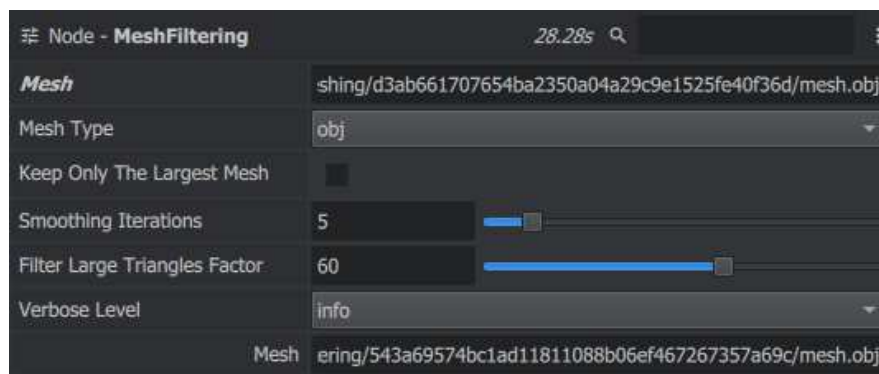
Prethodno izračunate procjene dubine svake slike ovdje se sve spajaju u jedno veliko globalno stablo te se sve procjene spajaju u ćelije stabla. Iz toga dobivamo gusti oblak točaka koji se koristi za dobivanje površine modela. Pomoću 3D Delaunay triangulacije i kompleksne strategije glasanja iz točaka se popunjava volumen modela. Pomoću Max-Flow rezanja dobiva se optimalna površina modela. Parametri čvora su prikazani na slici Slika 10. 3D model je sastavljen od točaka, a te točke su povezane u trokute koji čine stvarnu površinu modela.



Slika 10 - Parametri čvora za dobivanje 3D modela

2.1.10. Dorada 3D modela

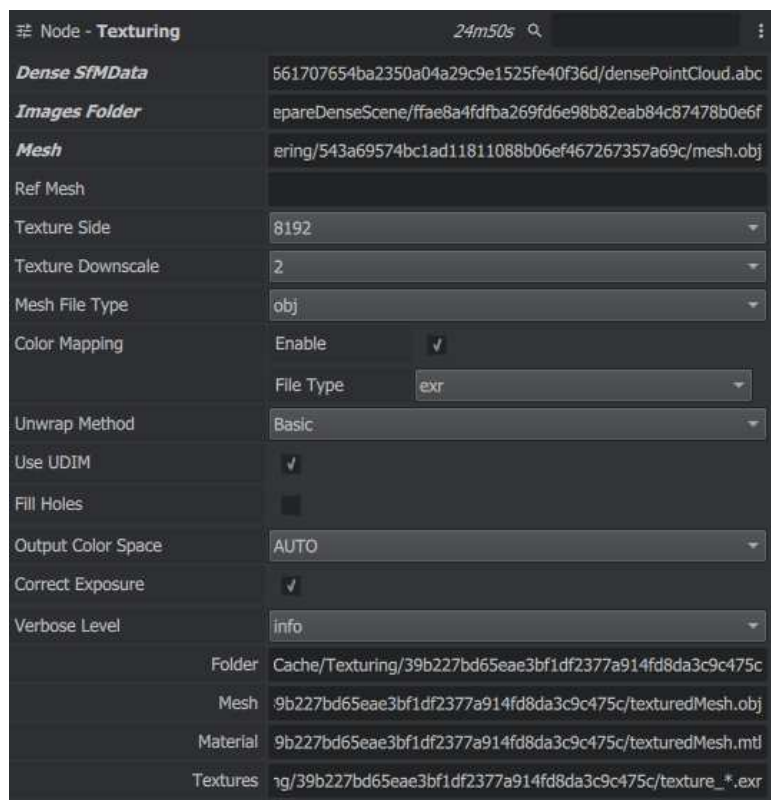
Ovdje poduzimamo nekoliko mjera kako bismo poboljšali kvalitetu 3D modela. Prvo se loše ćelije na površini filtriraju, a onda se koristi Laplaceov filtar za izgladivanje kako bi se uklonili lokalni artefakti. Parametri čvora dani su na slici Slika 11.



Slika 11 - Parametri čvora za doradu 3D modela

2.1.11. Dodavanje teksture 3D modelu

Konačni korak procesa je dodavanje teksture 3D modelu. Za svaki trokut unutar 3D modela se ustanovi koja kamera ima pogled na njega. Između svih pogleda na trokut prednost se daje onim pogledima koji su najparalelniji sa slikovnom ravninom kamere i uzima se prosjek piksela između nekoliko povoljno pozicioniranih slika kako bi se dobila konačna tekstura za taj trokut. Na slici Slika 12 su prikazani parametri čvora za dodavanje teksture kao i korištene postavke.



Slika 12 - Parametri čvora za teksturiranje 3D modela

2.2. Strukturirano svjetlo

Za postupak 3D rekonstrukcije strukturiranim svjetlom potrebna je barem jedna kamera i jedan projektor [18]. U radu su za postupak korištene dvije kamere i jedan projektor. Korištene su kamere Grasshopper 3 GS3-U3-23S6C-C [19] s objektivima Fujinon HF12.5SA-1 [20] i projektor Acer S1383WHn [21].

Projektor projicira uzorak strukturiranog svjetla, što je posebno pripremljen niz slika za tu svrhu. Strukturirano svjetlo rekonstruira površinski profil nekog predmeta temeljem distorzije projiciranog uzorka strukturiranog svjetla. Postoje različiti uzorci koji se mogu projicirati, a dijele se na jednostruke i višestruke. S jednostrukim uzorcima, rekonstrukcija se radi iz jedne slike i uzorka, dok se s višestrukim uzorcima na objekt projicira nekoliko uzoraka slijedno i objekt se slika sa svakim uzorkom pojedinačno. Prednost višestrukih uzoraka je veća kvaliteta rekonstrukcije, no predmet tijekom snimanja mora biti nepomičan.

U radu su korištene sive sinusoidalne pruge, koje spadaju pod višestruke uzorke. Tijekom snimanja, kalup je bio nepomičan, a projektor i kamera su se pomicali oko kalupa. Zbog direktnog obasjavanja kalupa svjetlom, u ovoj metodi jasno dolazi do tipičnih problema snimanja metala strukturiranim svjetlom, primjerice rasipanje točaka zbog spekularnih refleksija i inter-refleksija. Stoga, kalup se prvo snimio neobojan, tj. s metalnom površinom, a postupak je bio ponovljen i nakon bojanja kalupa bijelom bojom. Rezultati ovog postupka dani su u 4. poglavlju.

2.3. Structure Sensor Pro

Structure Sensor Pro se sastoji od dvije NIR (engl. *near infra-red*) kamere. Structure Sensor Pro za dobivanje 3D modela obasjava objekt pseudo-slučajnim uzorkom nevidljivim oku te koristi NIR kameru koja te uzorke vidi na objektu. Dakle, ovaj uređaj koristi princip strukturiranog svjetla, no koristi jednostruki uzorak strukturiranog svjetla. Structure Sensor Pro se spaja na iPad [22] te je korištena „Scanner“ [23] aplikacija. Scanner aplikacija koristi ugrađenu iPad-ovu kameru (i ostale senzore unutar iPod-a, kao npr. akcelerometar) te NIR kamere u rekonstrukcijskom procesu. Korištene su pretpostavljene postavke pri snimanju. Tijekom snimanja, kalup je bio postavljen na ravnu površinu na bijelom A4 papiru. U prostoriji za snimanje se koristilo umjetno i prirodno svjetlo. Structure Sensor Pro se pokazao kao robustan rekonstruktor metalne površine kalupa, stoga se kalup snimao samo sa metalnom površinom, a rekonstrukcija površine kalupa obojanog bijelom bojom ovom metodom nije napravljena. Dobivena 3D rekonstrukcija površine kalupa je prikazana u 4. poglavlju.

2.4. Kamera za mjerenje vremena leta

Kamere za mjerenje vremena leta sadrže izvor svjetlosti i senzor. Senzor kamere mjeri vrijeme od odašiljanja do povratka reflektiranog signala, te tako dobiva sliku dubine okoline. Zbog prevelike brzine svjetlosti, signal se ne mjeri direktno, već preko analize faze reflektiranog signala. Korištena je kamera Blaze-101 [24]. Kalup je sniman sa udaljenosti od otprilike 50 cm. U prostoriji za snimanje se koristilo umjetno i prirodno svjetlo. Budući da kamera za mjerenje vremena leta radi na principu refleksije, metalna površina kalupa opet uzrokuje tipične probleme koji se javljaju pri snimanju metalnih površina. Stoga je 3D skeniranje površine pomoću kamere za mjerenje vremena leta

napravljena na kalupu metalne površine te istom tom obojanom kalupu. Rezultati 3D rekonstrukcije površine se nalaze u 4. poglavlju.

2.5. Mašina za mjerenje koordinata

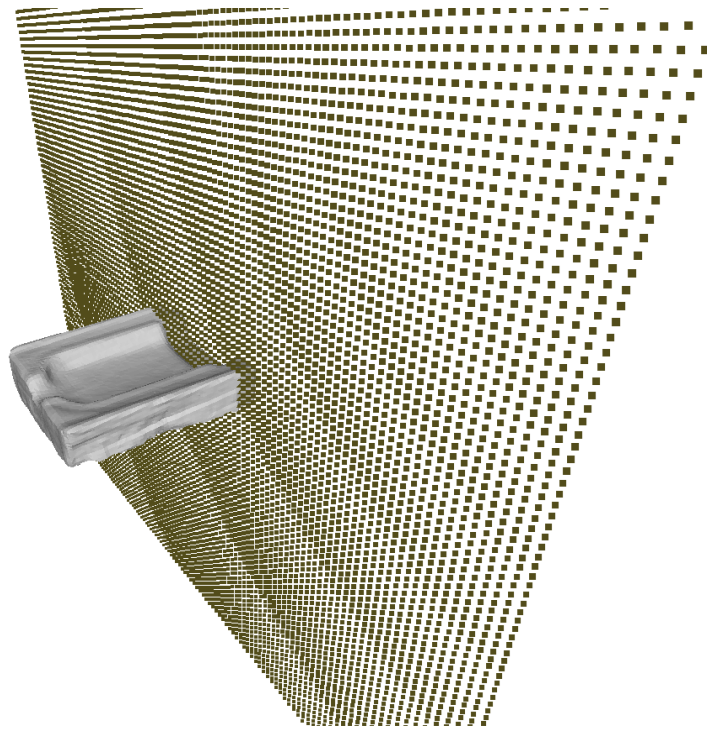
Jedna od metoda 3D rekonstrukcije površine je mašina za mjerenje koordinata. Za prikupljanje 3D koordinata točaka na površini kalupa korišten je MicroScribe G2LX [25]. Mašina za mjerenje koordinata ima ruku sa iglom te može dati preciznu informaciju o 3D koordinatama vrha igle, u referentnom koordinatnom sustavu čije se ishodište nalazi unutar mašine. Ovakve mašine nude pouzdan način za kvalitetne rekonstrukcije te se često u industriji koriste kao standard za usporedbu drugih metoda. Za ovaj postupak je bitno da mjereni objekt i mašina za mjerenje koordinata ostanu nepomični tijekom mjerenja, inače prikupljeni podatci ne odgovaraju stvarnom stanju. Kalibracija je napravljena prije početka postupka te su uzeta mjerenja točaka s četiri relevantne plohe kalupa. Budući da ova mašina za mjerenje koordinata daje samo točke u prostoru, a ne i površinu, dodatno se provodi algoritam okretanja lopte (engl. ball-pivoting) [26] nad izmjerenim točkama kako bi se formirala površina. Rekonstrukcija površine rađena nad tim točkama je dana u 4. poglavlju.

3. Metodologija mjerenja volumena kalupa

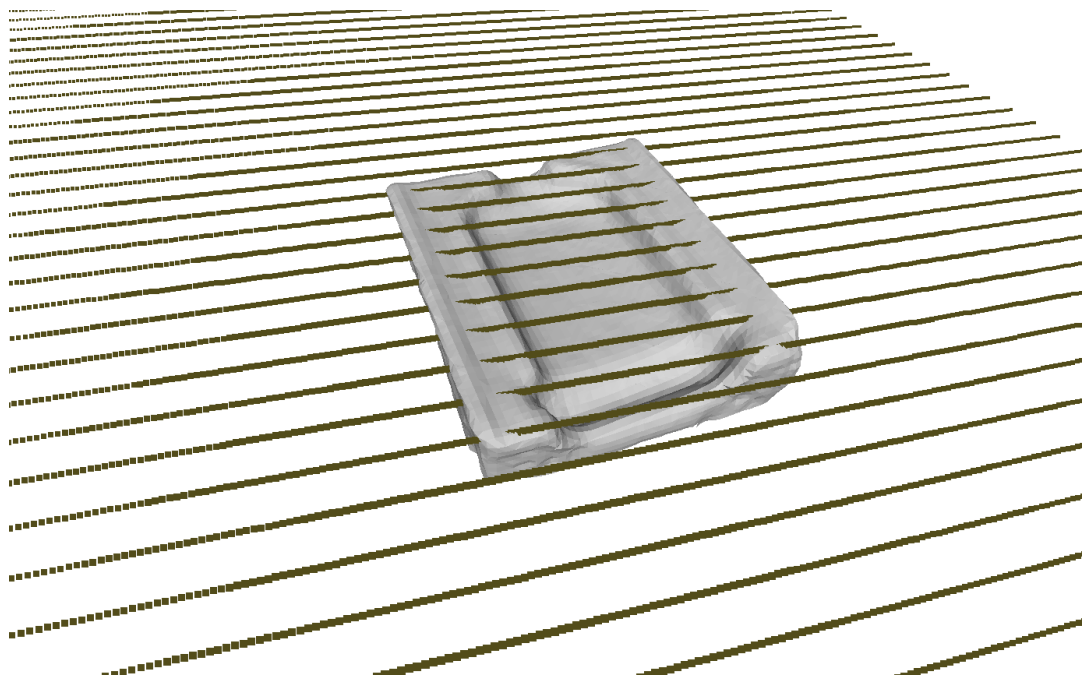
Zadatak rada je što točnije izmjeriti volumen tijela (boce) koja nastaje ovim kalupom, uključujući njene stijenke. Nakon što je dobiven rekonstruirani 3D model površine kalupa, sljedeći je korak procjena volumena. Za sljedeći dio obrade, koristi se knjižnica otvorenog koda Open3D [27] u programskom jeziku Python. Ona omogućuje baratanje i obradu 3D modela raznih formata.

Neke metode 3D skeniranja površine daju metričku rekonstrukciju površine, a neke euklidsku rekonstrukciju. I metrička i euklidska rekonstrukcija je jednako vjerna obliku i strukturi površine, no euklidska rekonstrukcija površine daje i točne duljine bridova površine u stvarnom svijetu, tj. točne mjerne jedinice, dok metrička rekonstrukcija ne daje tu informaciju. Stoga metričke rekonstrukcije površine moramo skalirati na njihove prave fizičke duljine. Rekonstrukcije površine pomoću strukturiranog svjetla, Structure Sensor Pro uređaja i kamere za mjerenje vremena leta nam daju euklidske rekonstrukcije površine te za njih ne moramo skalirati dobiveni model. Mašina za mjerenje koordinata također daje precizne 3D koordinate točaka, stoga se skaliranje ovdje isto ne primjenjuje. Najduži brid kalupa iznosi 15,9 cm, stoga se po potrebi 3D model skalira tako da najduži brid iznosi točno toliko.

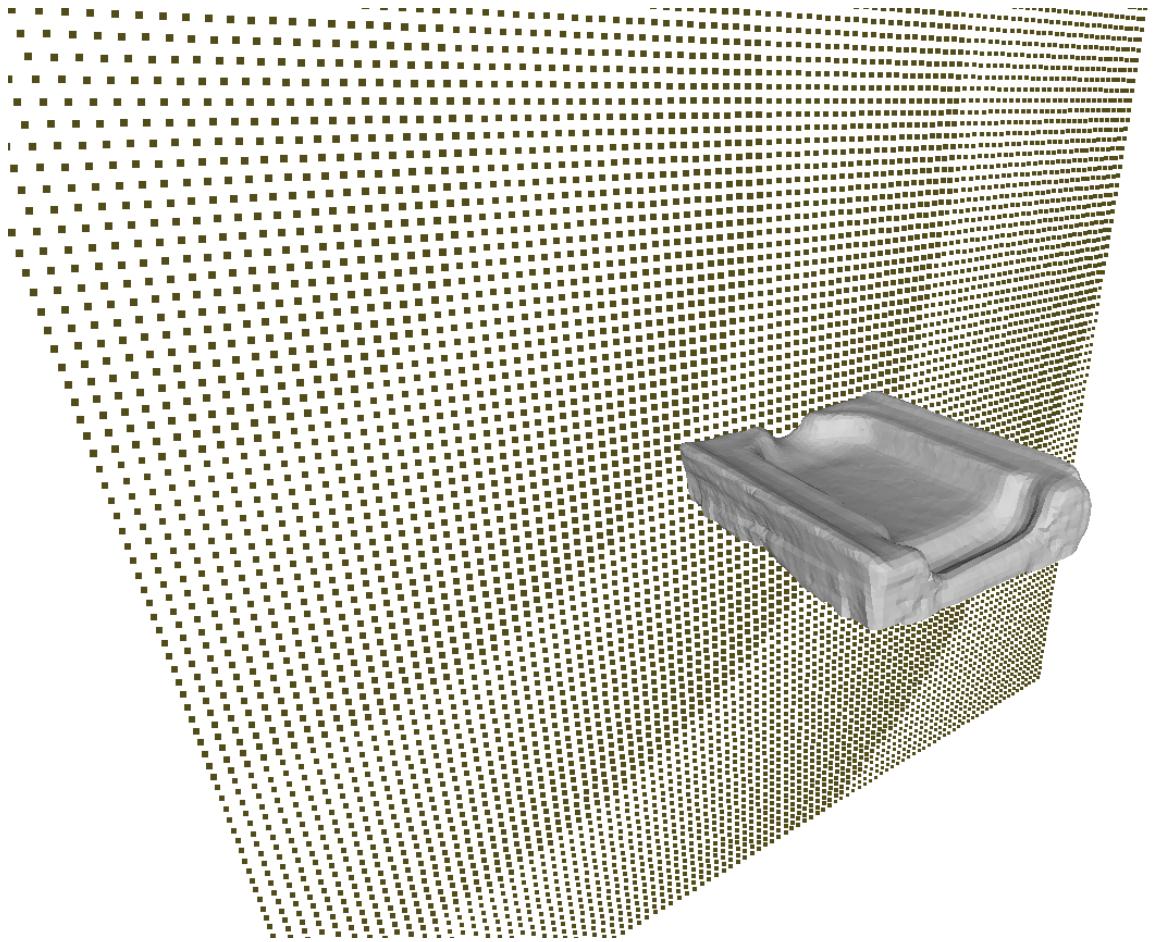
Budući da želimo izmjeriti volumen boce koji bi nastao koristeći dotični kalup, moramo odrediti prostor ili volumen koji želimo izmjeriti. Prvo se moraju definirati tri ravnine zatvaranja kojim omotavamo taj volumen koji želimo izmjeriti. Prva ravnina je ravnina dna boce (prikazana na slici Slika 13), druga je ravnina ona koja bocu dijeli na dva jednaka dijela po visini (prikazana na slici Slika 14), a treća je ravnina na vrhu boce (prikazana na slici Slika 15). U daljnjem radu ću opisane ravnine zvati prva, druga i treća, redosljedom kako su opisane. S te tri ravnine smo dobro definirali volumen koji želimo izmjeriti.



Slika 13 - Prikaz prve ravnine



Slika 14 - Prikaz druge ravnine

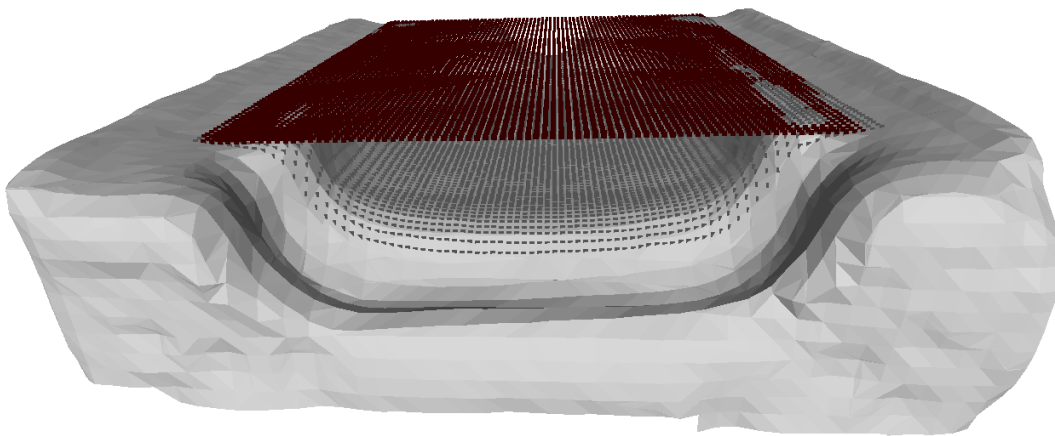


Slika 15 - Prikaz treće ravnine

Za svaku ravninu posebno, korisnik odabire točke na površini 3D modela, a zatim se metodom najmanjih kvadrata izračunaju parametri ravnine tako da je udaljenost ravnine od odabranih točaka najmanja. Tako se dobivaju početni parametri te tri ravnine. Ovi parametri služe kao inicijalno rješenje za daljnji postupak optimizacije parametara ravnina postupkom najmanjih kvadrata. Parametri ravnina se dalje optimiziraju pod sljedećim ograničenjima: prva i treća ravnina imaju istu normalu, a normala druge ravnine je okomita na normale prve i treće ravnine. Postupak traži normale koje podliježu prethodnim ograničenjima, a također minimizira udaljenost ravnina od točaka koje smo na početku postupka odabrali.

Najbitnija je treća ravnina, tj. ona koja poklapa dio kalup odozgo, jer se ta ravnina koristi za daljnju procjenu volumena. Iz te gornje ravnine se uzorkuje skup točaka u obliku rešetke unutar relevantne površine 3D modela. Svaka točka predstavlja središte 2D kvadrata. Točke su uzorkovane tako da je površina jednog kvadrata jednaka polovici prosječne površine trokuta 3D modela. Iz svake točke se zatim povlači polu-pravac prema 3D modelu

površine i dobiveno sjecište i udaljenost točke od tog sjecišta se spremaju. Smjer polu-pravca određen je normalom ravnine iz koje se uzorkuje, tj. normalom druge ravnine. Procjena volumena se zatim dobiva tako što se sumira površina svih kvadrata pomnožena s udaljenosti središta dotičnog kvadrata i njegovog pripadnog sjecišta 3D modela. Uzorkovana rešetka te pripadna sjecišta na modelu su prikazana na slici Slika 16. Točke uzorkovane rešetke nad



Slika 16 - Uzorkovana rešetka i sjecišta

modelom su prikazane crvenom, a točke sjecišta na modelu sivom bojom.

Različite metode rekonstrukcije površine daju modele drugačije kvalitete, neke od njih mogu i sadržavati rupe na površini. Zbog tih potencijalnih rupa, sjecište pravca s modelom potencijalno ne postoji. U takvim se slučajevima udaljenost sjecišta i točke uzorkovane rešetke se aproksimira najbližim postojećim susjedom.

Kako bismo mogli odrediti točnost algoritamske procjene volumena, potrebno je izmjeriti volumen kalupa. To je učinjeno mjerenjem volumena i mase vode u kalupu. Na slici Slika 17 je taj postupak prikazan. Ljepljivom trakom su zatvoreni dno i grlo boce kako voda ne bi iscurila. Volumen vode mjeren je špricama kapaciteta 60mL, a deklarirana preciznost vage je bila do 5 grama. Voda se nalijevala do vrha kalupa.



Slika 17 - Mjerenje volumena kalupa vodom

Mjerenje manjeg dijela kalupa je rezultiralo volumenom od 138 mililitara vode, a izmjerena masa vode bila je 0.137 kilograma. Izmjeren volumen većeg dijela kalupa je 137 mililitara vode, a izmjerena masa vode bila je 0.137 kilograma.

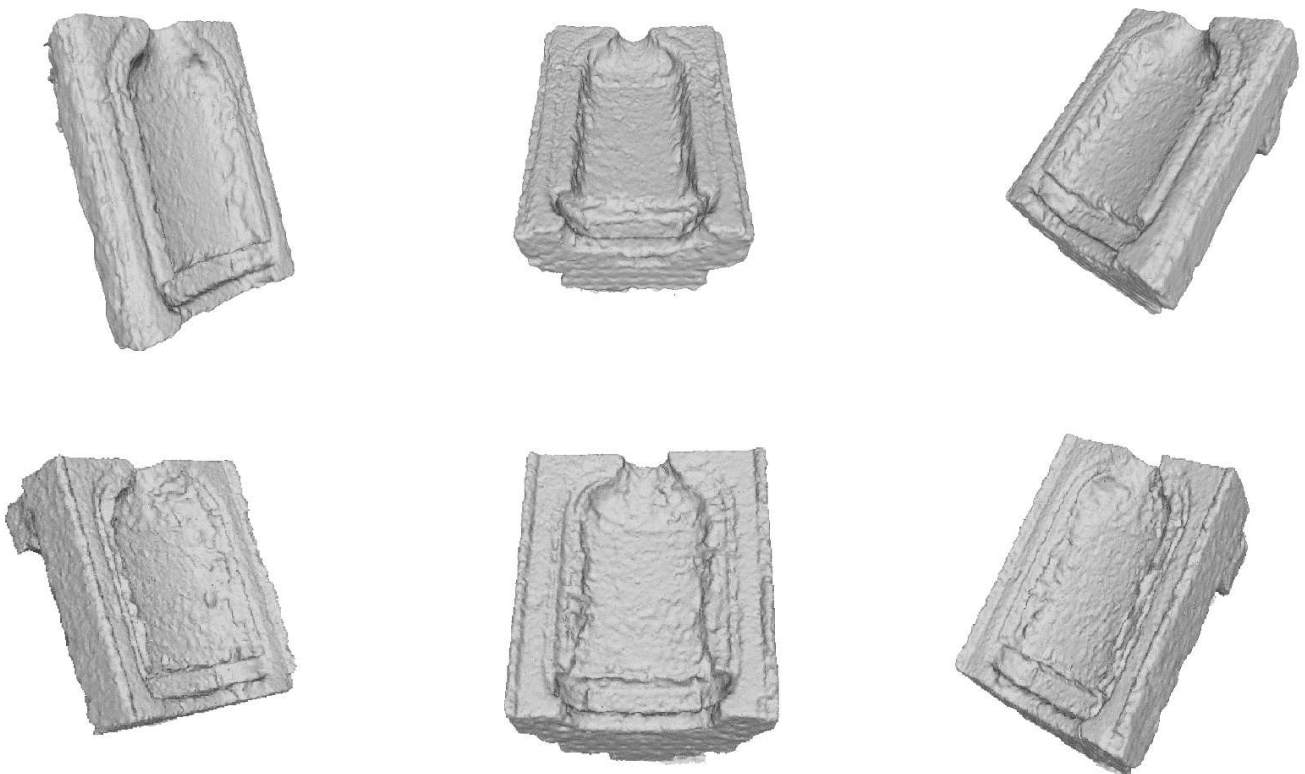
4. Rezultati i usporedba

U ovom poglavlju su dani prikazi rekonstruiranih površina kako su prethodno opisane u 2. poglavlju, procjene volumena za svaku od rekonstruiranih površina, te kratka usporedba i diskusija korištenih metoda.

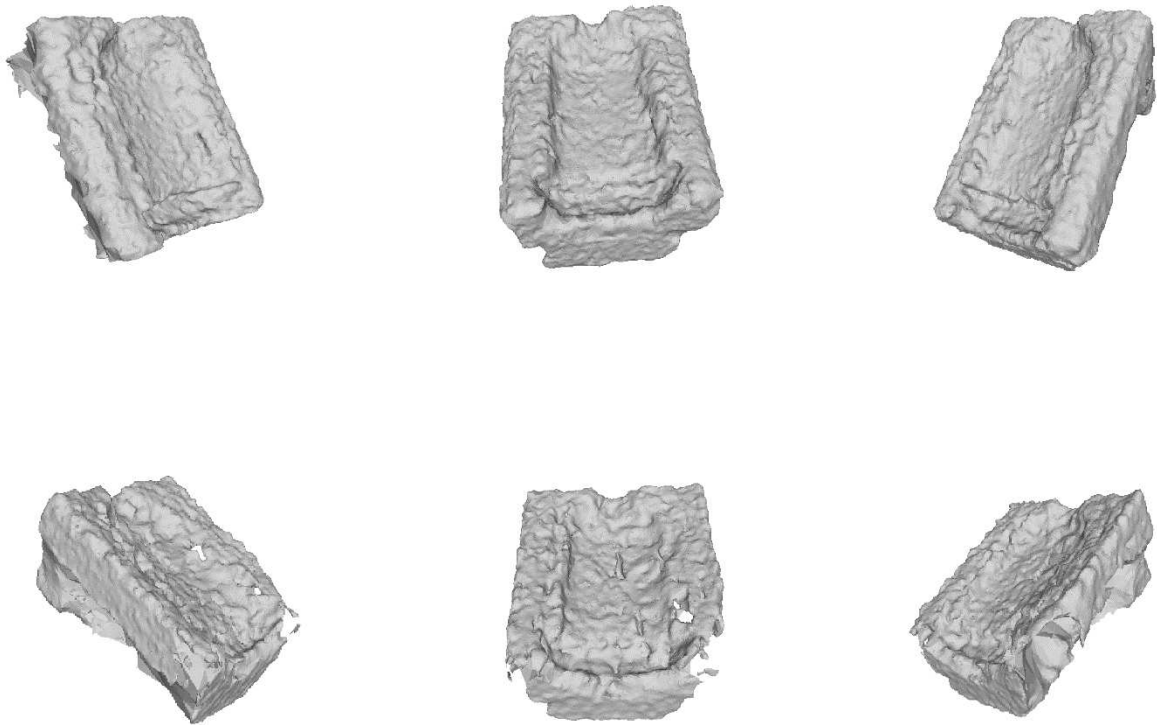
4.1. Rezultati rekonstrukcije površine

4.1.1. Rekonstrukcija površine stereom više pogleda

Rezultati 3D rekonstrukcije površine kalupa postupkom opisanim u potpoglavlju 2.1, tj. fotogrametrijskom metodom, dani su na slikama Slika 18 i Slika 19. Na slici Slika 18 je prikazana rekonstrukcija korištenjem profesionalne kamere. Rekonstrukcija korištenjem uobičajenog mobitela dana je na slici Slika 19.



Slika 18 - Rekonstrukcija površine kalupa profesionalnom kamerom fotogrametrijskom metodom

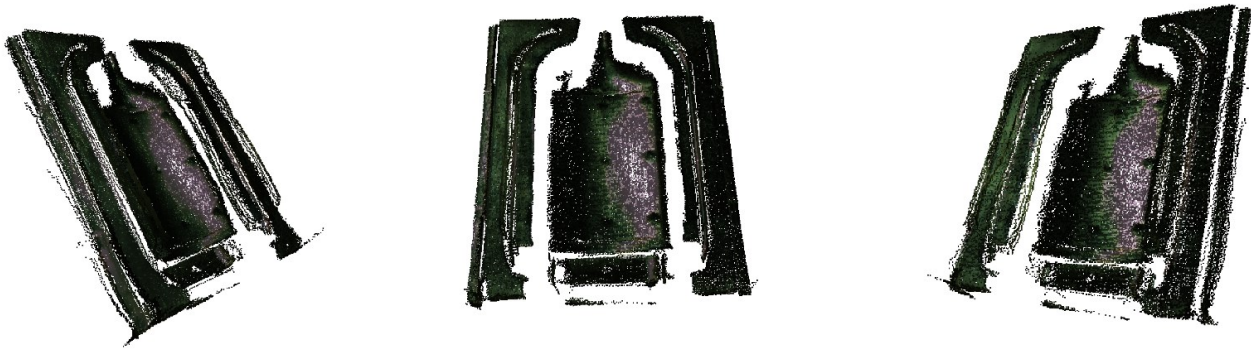


Slika 19 - Rekonstrukcija površine kalupa komercijalom kamerom fotogrametrijskom metodom

Jasno je iz slika da je preciznija i kvalitetnija rekonstrukcija rađena profesionalnom kamerom. Ravni bridovi kalupa su manje izobličeni i kalupi su potpuno rekonstruirani.

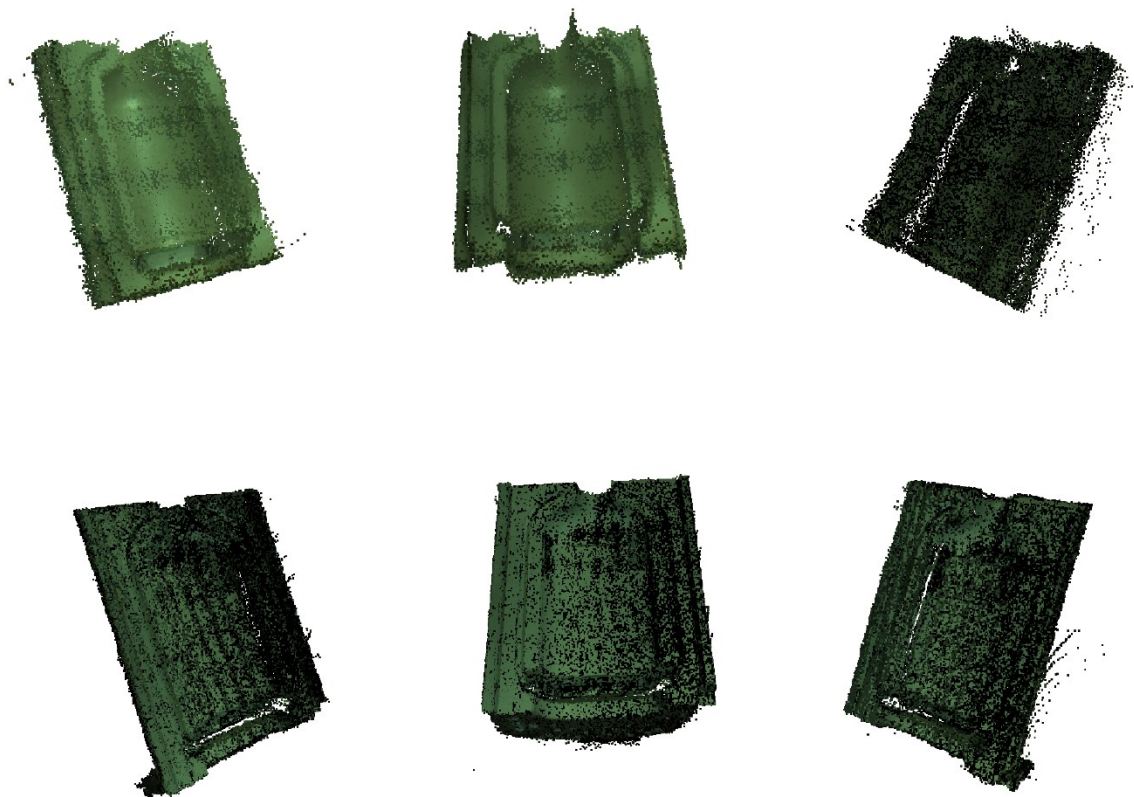
4.1.2. Rekonstrukcija površine strukturanim svjetlom

Na slici Slika 21 i Slika 20 se vidi 3D rekonstrukcija kalupa strukturanim svjetlom. Na slici Slika 21 kalup je neobojan, tj. sniman je sa metalnom površinom te se na slici vidi problem rasipanja točaka koji je tipičan pri snimanju metala. Odabrana je najbolja rekonstrukcija od dvadesetak različitih mjerenja. Postoje oblaci točaka koje lebde u zraku, a zakrivljeni dio kalupa nije uopće rekonstruiran..



Slika 21 - Rekonstrukcija metalne površine kalupa strukturiranim svjetlom

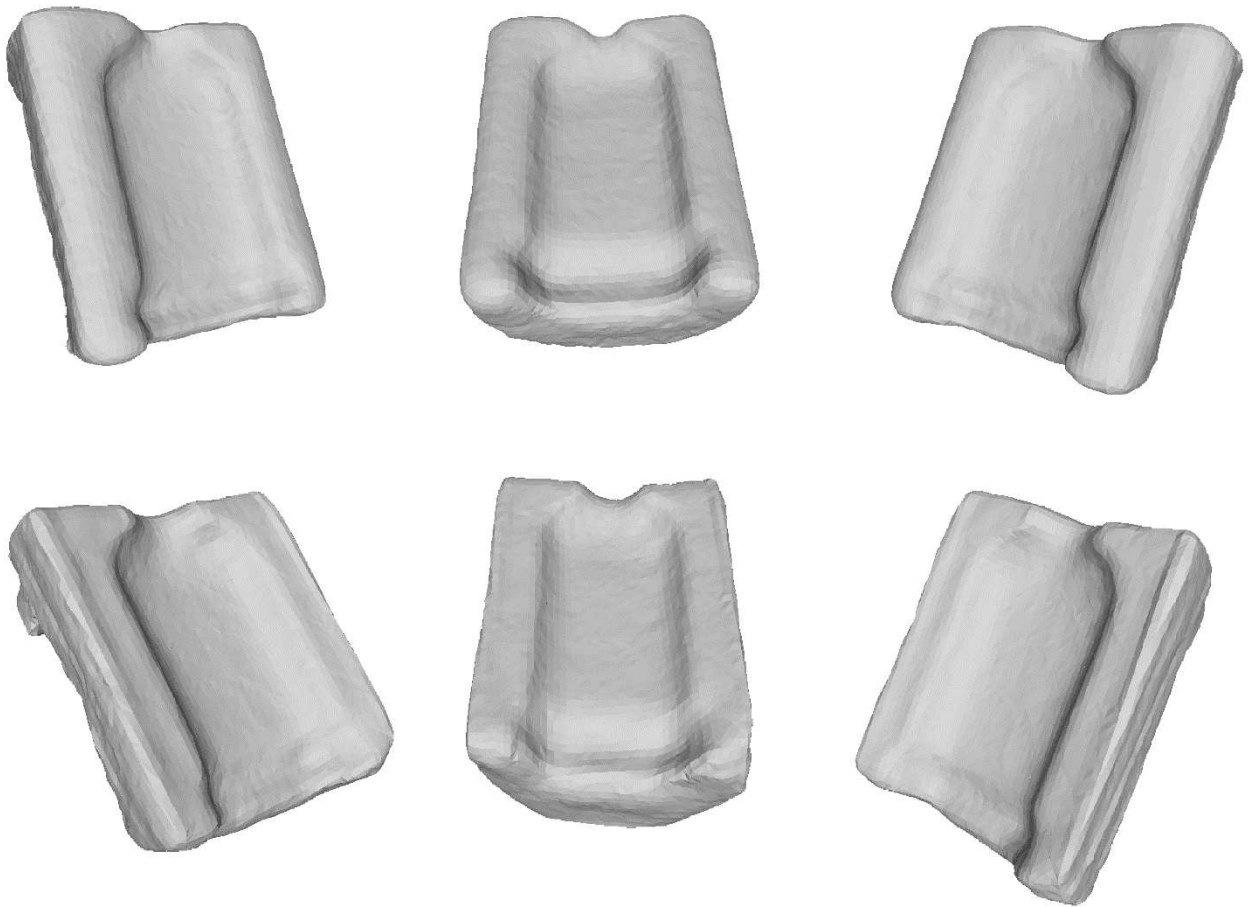
Na slici Slika 20 je prikazana rekonstrukcija površine strukturiranim svjetlom kalupa obojanog bijelom bojom. Iz slike je jasno da je ova rekonstrukcija kvalitetnija i točnija od neobojanog kalupa, zbog drugačije refleksije svjetla sa obojanog kalupa. Tijekom mjerenja su korišteni uzorci strukturiranog svjetla koji koriste tri fazna pomaka po frekvenciji bez kompenzacije gamma nelinearnosti projektor. Zbog toga se na slici mogu vidjeti horizontalne pruge uzorka.



Slika 20 - Rekonstrukcija obojane površine kalupa strukturiranim svjetlom

4.1.3. Rekonstrukcija površine pomoću uređaja Structure Sensor Pro

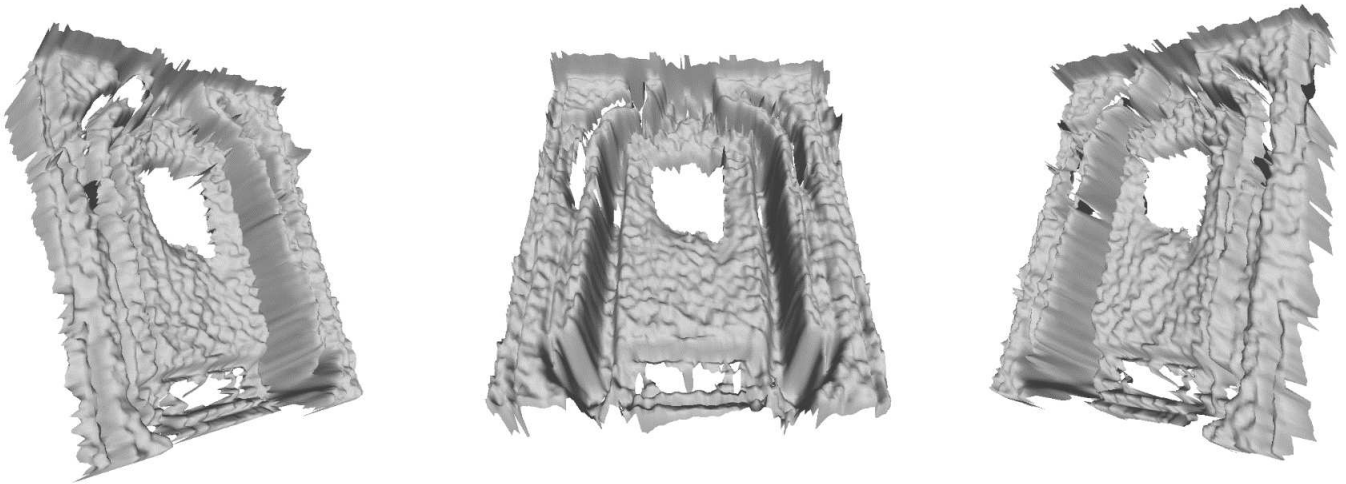
Na slici Slika 22 je prikazana dobivena 3D rekonstrukcija površine oba dijela kalupa pomoću Structure Sensor Pro uređaja. Iz slike se može vidjeti da oštri rubovi kalupa su rekonstruirani kao zaobljeni kutovi, što je tipično svojstvo rekonstrukcije strukturiranim svjetlom sa pseudo-slučajnim uzorkom.



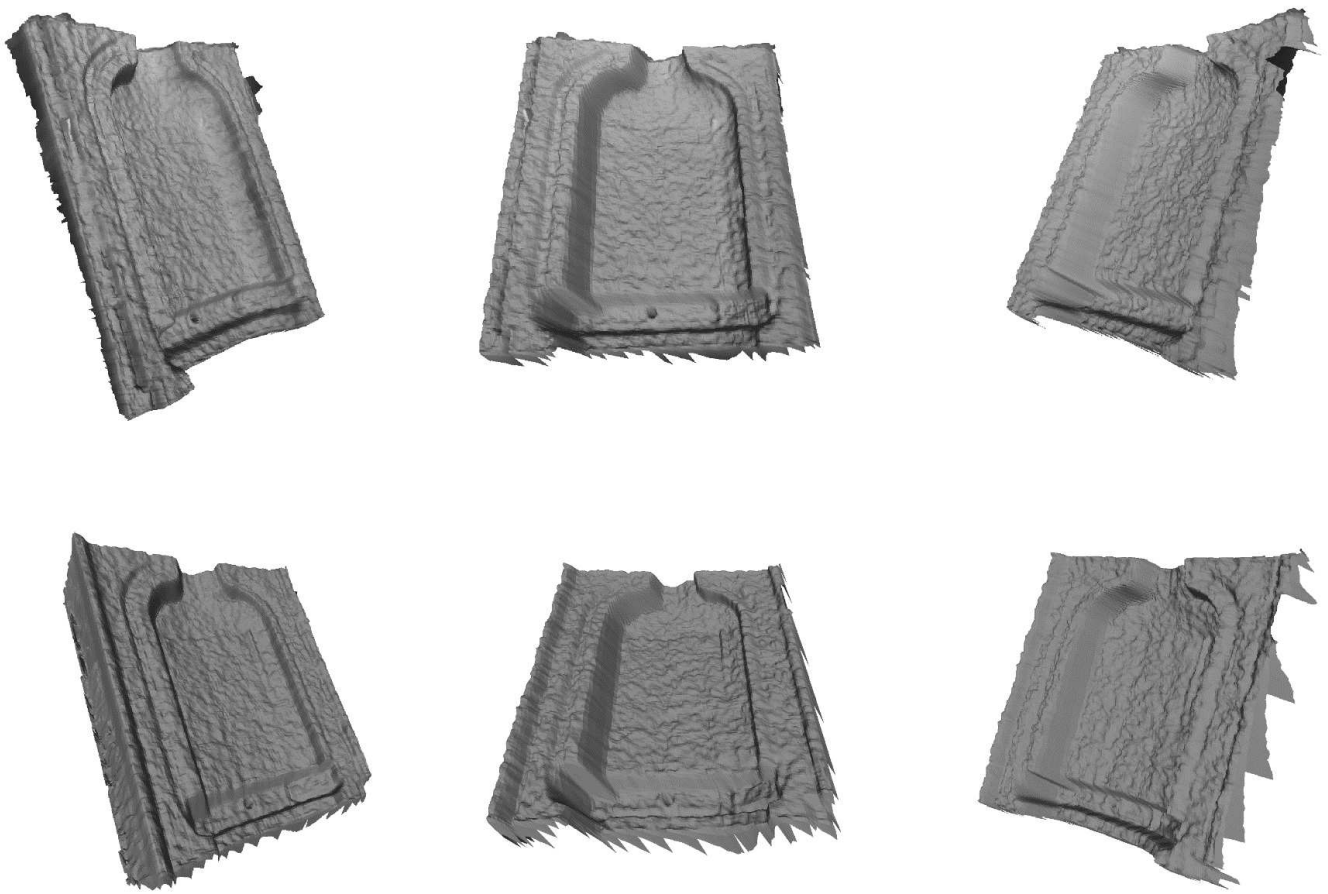
Slika 22 - Kalup rekonstruiran pomoću Structure Sensor Pro uređaja

4.1.4. Rekonstrukcija površine kamerom za mjerenje vremena leta

Na slikama Slika 23 i Slika 24 je prikazana 3D rekonstrukcija površine dobivena kamerom za mjerenje vremena leta. Slika 23 prikazuje rekonstrukciju manjeg dijela kalupa metalne površine, a Slika 24 prikazuje rekonstrukciju cijelog kalupa obojanog bijelom bojom. Iz slika je jasno da je rekonstrukcija obojanog kalupa uspješnija i kvalitetnija. Unatoč tome čak i na obojanom kalupu, postoji točka koja nije mogla biti rekonstruirana zbog refleksije svjetla.



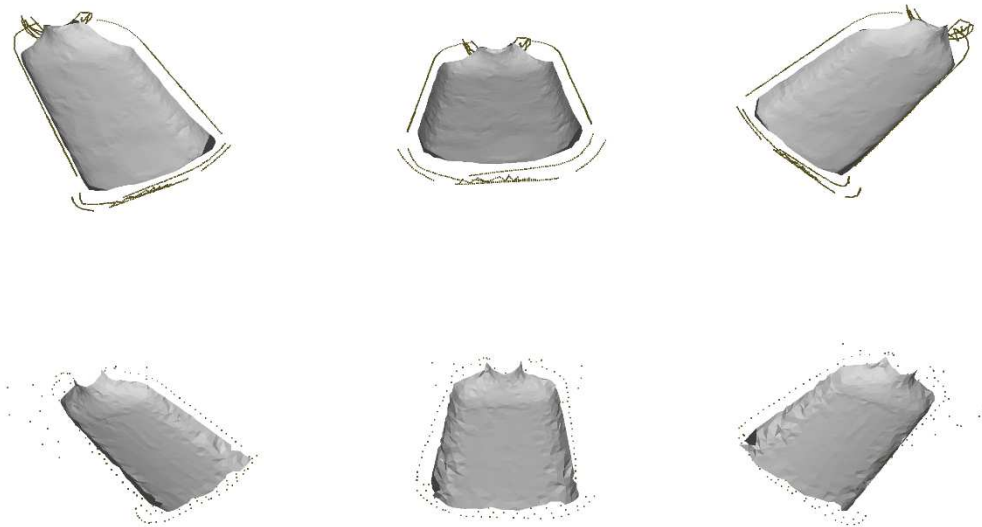
Slika 23 - Rekonstrukcija manjeg dijela kalupa metalne površine kamerom za mjerenje vremena leta



Slika 24 – Rekonstrukcija površine obojanog kalupa kamerom za mjerenje vremena leta

4.1.5. Rekonstrukcija površine mašinom za mjerenje koordinata

Na slici Slika 25 je prikazana rekonstrukcija površine točaka izmjerenih mašinom za mjerenje koordinata. Algoritam okretanja lopte primijenjen je samo na zakrivljenu plohu kalupa, no očitane točke prve, druge i treće ravnine se također mogu vidjeti te su one ključne za daljnju procjenu volumena.



Slika 25 – Rekonstrukcija površine kalupa mašinom za mjerenje koordinata

4.2. Rezultati procjene volumena

U Tablica 1 – Rezultati procjene volumena su dani rezultati procjene volumena metodom opisanom u 3. poglavlju. Procjene su dane u mililitrima. Za rekonstrukciju površine strukturiranim svjetlom je zbog vrste uzorka strukturiranog svjetla došlo do povećane deformacije površine te procjena volumena ne bi bila ni približna stvarnoj vrijednosti. Zbog toga procjena nije ni rađena.

	STEREO VIŠE POGLEDA – PROFESIONALNA KAMERA	STEREO VIŠE POGLEDA – KOMERCIJALNI MOBITEL	STRUCTURE SENSOR PRO	KAMERA ZA MJERENJE VREMENA LETA	MAŠINA ZA MJERENJE KOORDINATA
MANJI DIO	141,49	135,95	131,12	155,90	126,78
VEĆI DIO	143,41	143,07	132,37	156,34	121,72

Tablica 1 – Rezultati procjene volumena

4.3. Diskusija/usporedba

Procjena volumena rekonstrukcije površine stereom više pogleda rađena komercijalnim mobitelom je za manji dio kalupa bila skoro točna (oko 1 mL pogreške), no za veći dio je greška veća od 6mL. Kada je rekonstrukcija površine rađena profesionalnom kamerom, procijenjeni volumeni oba dijela su bili sličniji jedan drugome.

Rekonstrukcija pomoću Structure Sensor Pro je dala procjenu s oko 5mL greške te volumeni dva dijela kalupa ne variraju mnogo jedan od drugoga. Dodatna prednost korištenja ovog uređaja je jednostavnost korištenja i procesiranja prikupljenih podataka jer aplikacija stvara 3D rekonstrukciju direktno i daje nam odmah model. Snimanje objekta je brže od svih ostalih isprobanih metoda. Aplikacija također i u stvarnom vremenu prikazuje rekonstrukciju i dijelove objekta gdje treba prikupiti još mjerenja te tako dodatno pomaže procesu. Prikazana slika je mjerena na kalupu metalne površine, a dobivena rekonstrukcija se pokazala robusnom, što je još jedna od prednosti ove metode koju strukturirano svjetlo i kamera za mjerenje vremena leta nemaju. No, kako je prije bilo spomenuto, ova metoda teško može proizvesti vjerne prikaze oštih bridova kalupa.

Rekonstrukcija površine kalupa kamerom za mjerenje vremena leta nije vjerna originalnom obliku kalupa, postoje utori koji se na pravom kalupu ne nalaze. Metoda je postigla najgoru točnost od svih izmjerenih metoda, no procijenjeni volumeni ne variraju

mного jedan od drugoga što je pozitivno. Metoda se nije pokazala robusnom pri rekonstrukciji metalne površine kalupa.

Rekonstrukcija površine mašinom za mjerenje koordinata se pokazala lošijom od očekivane. Očekivano je bilo da će ova metoda dati najprecizniji rezultat. Ova metoda daje vrlo precizne koordinate točaka površine kalupa, no nepreciznost u rezultatu se može pridijeliti algoritmu kojom je površina kalupa dobivena. Nedovoljna zaobljenost površine nepovoljno utječe na točnost konačnog rezultata. Precizniji rezultat bi se vjerojatno mogao dobiti povećanjem broja točaka kojima se vrši rekonstrukcija zaobljene površine.

Točnost cijelog procesa procjene volumena ovisi o kvaliteti prikupljenih podataka i metodi rekonstrukcije površine. Šum pri prikupljanju podataka negativno utječe na točnost procjene volumena. Točnost procjene volumena također ovisi i o konkretnoj metodi korištenoj za rekonstrukciju površine. Na krajnji rezultat ovisi i odabir točaka kroz koje prolaze tri ravnine koje zatvaraju volumen dijelova kalupa, opisanih u 3. poglavlju. Veličina stranice kvadrata uzorkovane rešetke, isto opisane u 3. poglavlju, također utječe na konačni rezultat. Manja dužina stranice kvadrata znači i veću preciznost rezultata (do neke točke), ali također povećava i računalnu složenost. Proces skaliranja modela također može uvesti određenu nepreciznost u konačni izračun.

Zaključak

Zadatak ovog rada je bio usporediti razne metode 3D skeniranja površine te procijeniti volumen metalnog kalupa iz tih rekonstrukcija površina. Bile su korištene razne fotogrametrijske i druge metode za 3D skeniranje površine. Nijedna metoda nije imala grešku manju od jednog mililitra. Kamera za mjerenje vremena leta je bila najnetočnija, a metoda sterea više pogleda rađena komercijalnim mobitelom je bila najnepreciznija.

Pokazalo se da bojanje metalne površine kalupa bijelom bojom poboljšava kvalitetu rekonstrukcije površine te pomaže dobiti točniju i precizniju procjenu volumena.

Niti jedna isprobana metoda nije pokazala točnost i preciznost potrebnu da bi bila korištena za kontrolu kvalitete u industriji.

Literatura

- [1] A. H. R. P. S. R. S. Mohd Javaid, »Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications,« *Sensors International*, svez. 2, 2021..
- [2] »HandySCAN 3D,« [Mrežno]. Available: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024].
- [3] »Creaform - how to buy,« [Mrežno]. Available: <https://www.creaform3d.com/en/how-to-buy/information-request?form-template=request-v3&scanner=handyscan&cta=How%20to%20buy>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [4] A. Z. Richard Hartley, *Multiple View Geometry in Computer Visions*, Cambridge University Press, 2004..
- [5] J. Geng, »Structured-light 3D surface imaging: a tutorial,« *Advances in Optics and Photonics*, svez. 3, br. 2., pp. 128-160, 2011..
- [6] »Structure Sensor Pro,« [Mrežno]. Available: <https://structure.io/structure-sensor-pro/>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024].
- [7] G. M. C. D. M. F. D. L. M. G. M. C. Pietro Zanuttigh, *Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras*, Springer, 2016..
- [8] »Coordinate Measuring Machine History – Fifty Years of CMM History leading up to a Measuring Revolution,« [Mrežno]. Available: <https://web.archive.org/web/20130908105719/http://www.coord3-cmm.com/50-years-of-coordinate-measuring-machine-industry-developments-and-history/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [9] C. H. Yasutaka Furukawa, »Multi-View Stereo: A Tutorial,« [Mrežno]. Available: <https://dx.doi.org/10.1561/06000000052>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].

- [10] »Canon EOS 550D,« Canon, [Mrežno]. Available: https://www.canon.hr/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_550d/. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [11] »Canon EF-S 18-55mm,« Canon, [Mrežno]. Available: <https://www.canon.hr/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [12] »Iphone SE,« [Mrežno]. Available: <https://www.apple.com/iphone-se/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [13] »AliceVision,« [Mrežno]. Available: <https://alicevision.org/>. [Pokušaj pristupa June 2024].
- [14] »Meshroom,« [Mrežno]. Available: <https://alicevision.org/#meshroom>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024].
- [15] J. a. S. S. Dong, »Domain-size pooling in local descriptors: DSP-SIFT.,« *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 5097-5106, 2015.
- [16] D. Lowe, »Sift-the scale invariant feature transform,« 2004..
- [17] D. N. a. H. Stewenius, »Scalable Recognition with a Vocabulary Tree,« u *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, 2006..
- [18] T. P. M. Đ. Tomislav Petković, »Temporal phase unwrapping using orthographic projection,« *Optics and Lasers in Engineering*, svez. 90, pp. 34-47, 2017..
- [19] »Grasshopper3 USB3,« Teledyne Flir, [Mrežno]. Available: <https://www.flir.eu/products/grasshopper3-usb3/?vertical=machine+vision&segment=iis>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [20] »Fujinon HF12.5SA-1,« RMA Electronics Inc., [Mrežno]. Available: <https://www.rmaelectronics.com/fujinon-hf12-5sa-1/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].

- [21] »Product support - S1383WHne,« Acer, [Mrežno]. Available: <https://www.acer.com/us-en/support/product-support/S1383WHne>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [22] »iPad,« Apple, [Mrežno]. Available: <https://www.apple.com/ipad/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [23] »Scanner,« [Mrežno]. Available: <https://github.com/structureio/sample-scanner>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024.].
- [24] »Basler ToF Camera blaze-101,« Basler, [Mrežno]. Available: <https://www.baslerweb.com/en/shop/blaze-101/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [25] »Microscribe,« [Mrežno]. Available: <https://gomeasure3d.com/microscribe/>. [Pokušaj pristupa 15. June 2024.].
- [26] J. M. H. R. C. S. G. T. F. Bernardini, »The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction,« *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, svez. 5, br. 4, pp. 349 - 359, 1999..
- [27] »Open3D,« [Mrežno]. Available: <https://www.open3d.org/>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024.].

Sažetak

Procjena volumena kalupa za izradu boca

Valentin Marinac

U ovom radu se fotogrametrijski procjenjuje volumen metalnog kalupa za izradu staklenih boca. Za 3D rekonstrukciju površine kalupa korišteno je nekoliko različitih metoda, kamera i senzora. Radi metalne površine kalupa i problema koji to predstavlja nekim metodama 3D rekonstrukcije površine, kalup je bio obojan bijelom bojom. Bojanje kalupa je omogućilo proces 3D rekonstrukcije površine te posljedično i procjenu volumena. Volumen kalupa se aproksimirao sumom manjih volumena. Najtočnija metoda je imala više od 1 mL greške, a najnetočnija je imala više od 20 mL greške.

Ključne riječi: fotogrametrija ; 3D rekonstrukcija ; 3D skeniranje ; mjerenje volumena

Summary

On estimating bottle mould volume

Valentin Marinac

In this thesis, the volume of a metal mould for glass bottle production is estimated using photogrammetry. Several different methods, cameras and sensors were used for the 3D reconstruction of the mould's surface. Due to the metal surface of the mould and the issues the metal surface presents for some 3D surface reconstruction methods, the mould surface was painted white. Painting the mould improved the 3D surface reconstruction process and consequently enabled volume estimation. The mould's volume was approximated by summing smaller volumes. The most accurate method had an error of more than 1 mL, while the least accurate had an error of over 20 mL.

Keywords: photogrammetry ; 3D reconstruction ; 3D scanning ; volume measurement