

3D portretna fotografija

Šarić, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:349096>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

JELENA ŠARIĆ

3D PORTRETNA FOTOGRAFIJA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2016



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

JELENA ŠARIĆ

3D PORTRETNA FOTOGRAFIJA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
doc.dr.sc. Miroslav Mikota

Studentica:
Jelena Šarić

Zagreb, 2016

SAŽETAK

3D tiskarstvo iako se čini kao novija tehnologija zapravo postoji od ranih 80-ih godina prošlog stoljeća. Prvo spominjanje takve tehnologije jest 1980. godine pod nazivom "Additive Manufacturing" (aditivna proizvodnja). Hideo Kodama 1981. godine osmišljava dvije metode AM izrade. Izrada metode trodimenzionalnog modela s plastičnim foto - kaljenjem polimera, gdje je područje izloženosti UV kontrolirano od strane maskiranog uzorka ili skeniranjem vlakana odašiljača. Trodimenzionalni ispis se provodi različitim tehnologijama. Ispis u boji daje inženjerima i dizajnerima mogućnost jasnog uvida u tijek postupka dizajniranja, mogućnost isticanja raznih parametara, mogućnost lakog i ranog uočavanja mogućih grešaka i njihovog brzog i učinkovitog ispravljanja. Koristeći se ovim mogućnostima 3D-pisača znatno se skraćuje vrijeme izrade i povišuje razina kvalitete modela i prototipa. S obzirom da sami 3D tisak omogućava korištenje različitih materijala, njegova primjena se širi na mnoga područja istraživanja i upotrebe.

Ključne riječi: 3D, fotografija, portret, digitalna fotografija, fotogrametrija, skener, 3D ispis

ABSTRACT

Even though 3D printing seems like new technology it actually exists since the early 80's of the last century. First mentioning of this kind of technology is in 1980 under the name of Additive Manufacturing. In 1981 Hideo Kodama conceives two methods of AM production. The first method was building a three dimensional plastic model with photo-hardening polymer, with the area of exposure UV controlled, with assistance of a mask patterns or the second method by using the scanning fiber transmitter. Three dimensional printing is made possible by many technologies. Printing in colour gives the designers and engineers a clear insight in the design proces, emphasis of different parameters, easy and early detection of possible mistakes and their quick and effective correction. Using these qualities of the 3D printer, the time of making is shortened and also the quality of the model or the prototype is higher. Considering that 3D print allows the use of different materials its application expands on many areas of research and usage.

Keywords: 3D, photography, portrait, digital photography, photogrammetry, scanner, 3D print

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORETSKI DIO	3
2.1. FOTOGRAFIJA	3
2.1.1. Povijest fotografije	3
2.1.2. Digitalna fotografija	7
2.1.3. Portretna fotografija	9
2.2. 3D MJERENJA	13
2.2.1. TEHNOLOGIJE ZA 3D SNIMANJE/SKENIRANJE	14
2.3. FOTOGRAMetriJA	18
2.3.1. VERTIKALNA FOTOGRAMetriJA	20
2.3.2. HORIZONTALNA FOTOGRAMetriJA	21
2.3.3. FOTOGRAMetriJSKE TEHNIKE	21
2.3.3.1. Pojedinačne fotografije	22
2.3.3.2. Stereografski postupak	23
2.3.3.3. Snop konstrukcija	24
2.3.4. FOTOGRAMetriJSKI UREĐAJI – KAMERE	25
2.3.5. KOMPJUTERSKI PROGRAMI	27
2.4. POVIJEST RAZVOJA 3D TISKA	29
2.4.1. HIDEO KODAMA	31
2.5. VRSTE PROCESA 3D TISKA	33
2.5.1. VAT PHOTOPOLYMERISATION	33
2.5.1.1. Stereolitography (SLA)	33
2.5.1.2. Solid Ground Curing (SGC)	34
2.5.1.3. Film Transfer Imaging (FTI)	35
2.5.1.4. Continuous Liquid Interface Production (CLIP)	35

2.5.2. MATERIAL JETTING	36
2.5.2.1. Drop on Demand (DOD)	37
2.5.3. BINDER JETTING	39
2.5.4. POWDER BED FUSION	40
2.5.4.1. Selective Laser Sintering (SLS)	40
2.5.4.2. Selective Laser Melting (SLM)	41
2.5.4.3. Selective Heat Sintering (SHS)	42
2.5.4.4. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	42
2.5.4.5. Electron Beam Melting (EBM)	42
2.5.5. MATERIAL EXTRUSION	44
2.5.5.1. Fused Deposition Modelling (FDM)	44
2.5.5.2. Freeform Fabrication (FFF)	45
2.5.6. SHEET LAMINATION	47
2.5.6.1. Laminated Object Manufacturing (LOM)	47
2.5.6.2. Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	48
2.5.6.3. Selective Deposition Lamination (SDL)	48
2.5.7. DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)	50
2.5.7.1. Laser Engineered Net Shaping (LENS)	51
2.5.7.2. Directed Light Fabrication	51
2.5.7.3. Direct Metal Deposition (DMD)	52
2.5.7.4. Laser Cladding	52
3. PRAKTIČNI DIO	54
3.1. 3D PORTRET	54
4. ZAKLJUČAK	62
5. LITERATURA	63

1. UVOD

Redoslijed izrade 3D printanog objekta varira: u potpunosti izrađen virtualni dizajn objekta, stvoren u CAD („Computer Aided Design“) datoteci pomoću 3D modeliranog programa, upotrebom 3D skenera (kopiranje postojećeg objekta) i fotogrametrijom (fotografiranje s posebnim kamerama stvarni objekt iz više kuteva).

U ovom radu pobliže će se istražiti princip rada fotogrametrije. Znanost čiji temelji počivaju u samim počecima fotografije, stoga je potreban kratki pregled najbitnijih postignuća kroz povijest fotografije i opis potrebnih elemenata u portretnoj fotografiji (s obzirom na temu rada). Dalje se detaljno opisuju različite tehnologije za 3D mjerenje te je cijelo poglavlje posvećeno fotogrametriji; vertikalna i horizontalna fotogrametrija, različite tehnike i uređaji te konačno specijalizirani programi za fotogrametrijsku obradu. Nakon tih poglavlja, koja prikazuju različite načine pomoću kojih je moguć kompjuterski trodimenzionalni objekt, prelazi se na tehnologiju koja je omogućila izgradnju u stvarnom svijetu u različitim dimenzijama i od različitih materijala – 3D ispis.

3D tiskanje ili aditivna proizvodnja je proces izrade u kojem se stvaraju trodimenzionalni čvrsti objekti dobiveni iz digitalnog zapisa (datoteke). Stvaranje 3D tiskanog objekta se postiže pomoću aditivnih procesa.

Korištenje specijaliziranih programa omogućava izradu 3D modela, skoro svih postojećih objekata što uključuje i živa bića - čovjeka.

Za pripremu digitalne datoteke za ispis, softver za 3D modeliranje „reže“ konačni model u stotine ili tisuće horizontalnih slojeva. Narezana datoteka se učitava u 3D pisač i objekt se može stvoriti sloj po sloj. 3D pisač čita svaki sloj (ili 2D sliku) i stvara objekt, povezujući slojeve s gotovo nikakvim tragom prvotno postojećih slojeva. Konačni rezultat je trodimenzionalni objekt. Tim procesom, dobiveni geometrijski oblici ili skoro svaki mogući oblici proizvode se uz pomoć 3D oblikovanog modela ili od strane elektroničkih podataka.

Ne koriste svi 3D pisači istu tehnologiju iako postoji nekoliko načina za ispis svi dostupni koriste aditivnu tehnologiju. Razlikuju se uglavnom u načinu kako se slojevi grade da bi se stvorio konačni objekt. Neke metode koriste taljenje ili omekšavanje materijala za izradu slojeva. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS) i modeliranje topljenim depozitima (FDM) najčešće su tehnologije koje koriste ovaj način ispisa. Druga metoda ispisa je stvrdnjavanje sloja po sloj uz pomoć foto-reaktivne smole s UV laserom ili drugim sličnim izvorom napajanja. Najčešća tehnologija koja koristi ovu metodu naziva se stereolitografija (SLA).

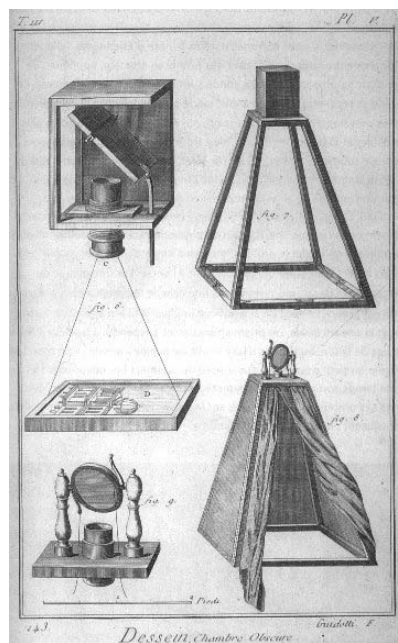
Digitalizacija i tehnološki napredak su omogućili spajanje različitih dugovječnih tehnologija u proces koji služi za izradu stvarnog 3D modela. [1]

2. TEORETSKI DIO

2.1. FOTOGRAFIJA

2.1.1. Povijest fotografije

Početke fotografije, opširnije gledajući, teže je odrediti nego što se misli. Kada svjetlo prolazi kroz mali otvor na prozoru u tamnu prostoriju, ono ocrta sliku na bijelom zidu, tu pojavu su poznavali Kinezi još prije 3000 godina pr.n.e., Aristotel u svojoj „Problematici“ raspravlja o ovom principu stvaranja slike; velika kultura koja je promicala znanosti – Arapi su taj princip koristili za promatranje pomrčine, dok se arapski znanstvenik Ibn al – Haytham („izvorni fizičar“) danas smatra izumiteljem kamere opskure (lat. camera obscura). Veliki Leonardo da Vinci 1500. godine konstruirao prenosivu kutiju koja je na prednjoj strani imala mali otvor nasuprot kojeg je bilo mutno staklo (u skladu sa razvitkom tehnologije rasla je i prozirnost i čistoća stakla) na kojem se ocrtavala slika, takva kamera obskura koristila se u doba renesanse od strane slikara koji su na što jednostavniji način htjeli prenijeti trodimenzionalnu stvarnost u dvodimenzionalne slike. [2]



Slika 1. Izgled kamere opskure

https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_obscura#/media/File:Camera_obscura.jpg

Kod kamere opskure (Slika 1.) jasna slika se dobivala sa što manjim otvorom na prenosnoj kutiji, međutim to je povlačilo problem premale svjetline slike; posljedično tome da bi slika bila svjetlija otvor se trebao povećati, rezultirajući mutnom slikom. Barbaro 1649. godine u načelu rješava ovaj problem stavljajući na veći otvor sabirnu leću („objektiv“).

Johann Schulze 1727. godine provodi razne pokuse pokušavajući trajno zadržati sliku na određenom mediju. Nanoseći na kamen kredu sa srebrenim nitratom i osvjetljavajući dio kamena koji nije bio pokriven neprozirnom šablonom, dio koji je bio pokriven ostao bi svijetao dok nepokriveni dio sa srebrenim nitratom bi potamnio. Nažalost slika se nije mogla trajno zadržati i kada bi se pomaknula šablona ostatak slike bi potamnio. Tako dobivena slika nosi naziv fonogram.

Dvojica braće Nicéphore i Claude Niépce 1793. godine zamjenjuju mutno staklo s metalnom pločom oslojenom asfaltom (koji je osjetljiv na svjetlost) te postavljaju u petrolej nakon osvjetljavanja, nadajući se da će se otopiti neosvijetljeni dijelovi asfalta. No ni ovaj način nije rezultirao trajnom slikom, ponajviše iz razloga što je premalo svjetlosti prolazilo kroz otvor kamere opskure na ploču. Nicéphore nastavlja svoje pokuse nabavljajući kameru opskuru sa sabirnom lećom, tvoreći tako prvi fotografski aparat (kamera opskura – „tijelo“ fotoaparata i sabirna leća – objektiv, zajedno stvarajući sliku na fotoosjetljivom materijalu) te 1824. godine uspijeva dobiti prvu uspješnu sliku nakon 12 sati osvjetljavanja. Najstarija sačuvana fotografija je „Pogled s prozora u Le Gras“ (franc. „Point de vue du Gras“) iz 1826. godine (Slika 2.) kada se njegovom istraživanju i usavršavanju postupka pridružuje slikar Louis Jacques M. J. E. G. Daguerre.

Daguerre 1831. godine otkriva osjetljivost na svjetlo srebrenog jodida. Metalnu ploču oslojava srebrenim jodidom za dobivanje fotoosjetljivog materijala te je stavlja u fotografski aparat, što rezultira nevidljivim zapisom, zatim tu metalnu ploču ostavlja u ormarić u kojem isparava živa, čime slika postaje vidljiva i trajna. Slike nastale na ovaj način su unikatne i stranično neispravne, ali su ujedno i kvalitetne dok je proces eksponiranja od 15 minuta omogućio snimanje

portreta, što je pomoglo da se ovakav način brzo proširi po Europi i Americi. Daguerre proces patentira 1839. godine pod nazivom dagerotipija.



Slika 2. „Pogled s prozora u Le Grasu“

[http://vignette2.wikia.nocookie.net/lfn/images/f/f8/Ni%C3%A9pce_Point_de_vue_du_Gras\(1826\).jpg/revision/latest?cb=20110608143840](http://vignette2.wikia.nocookie.net/lfn/images/f/f8/Ni%C3%A9pce_Point_de_vue_du_Gras(1826).jpg/revision/latest?cb=20110608143840)

Iste godine William Henry Fox Talbot dobiva sliku osvjetljavanjem papira oslojenim srebrenim halogenidom. Prvotno je nije uspio trajno zadržati, ali na prijedlog Hershella, naknadnim kupanjem papira u natrijevom tiosulfatu (proces fiksiranja slike), Talbot 1840. godine usavršava svoju tehniku. Osvjetljavanjem slike 10 minuta, osvijetljeni fotosloj ostavlja u kemikaliju na bazi piragola, koji djeluje kao razvijatelj te konačno stavlja u fiksir što rezultira slikom u negativu. Svijetli dijelovi su ostali zapisani kao tamni, dok su tamni dijelovi svijetli. Negativ na papiru radi prozirnim uz pomoć voska koji kontaktno kopira na fotoosjetljivi papir i ponavlja prvotni proces obrade negativa, na ovaj način dobiva sliku u tonovima koja odgovara objektu snimanja. Ovaj postupak, koji se može ponavljati bezbroj puta, naziva kalotipija i patentira 1841. godine, ali kasnije u čast njegovog imena dobiva naziv talbotipija. Postupno kroz godine talbotipija zamjenjuje dagerotipiju te se današnja fotografija razvila na ovom principu. Janez Puhar 1849. godine patentira proces u kojem je nosioc fotosloja staklo.

Taj razvoj i korištenje tzv. mokrih ploča omogućava kontrastniju i oštriju sliku u odnosu na ono što je prije bilo moguće. Godine 1880. Eastman počinje proizvoditi „suhe ploče“ koje ubrzavaju proces fotografiranja, koristeći fotoosjetljive staklene ploče koje nije bilo potrebno kemijski obraditi nakon osvjetljavanja.

H. W. Vogel otkriva 1873. godine ortosenzibilizator te time ploče postaju osjetljive na plavi i zeleni (ortokromatski) dio spektra. Celuloidni film zamjenjuje staklene ploče 1887. godine zahvaljujući Hanibal Goodwinu; dok Carl Zeiss, Ernst Abbe i Otto Scott razvijaju nove objektivne.

Na simpoziju kemičara u Parizu 1889. godine uvodi se novi naziv fotografija, zamjenjujući dotadašnji heliografija (stari naziv za postupak dobivanja slike pomoću svjetla). „Eastman Kodak“ započinje prodaju smotanih filmova koji se pri dnevnom svjetlu stavljaju u fotoaparatus 1891. godine. Pankromatski film osjetljiv na cijeli spektar patentiraju 1903. Ernst König i Benno Homolka dok braća Lumière 1904. godine patentiraju autokrom sistem za dobivanje slika u boji. Prvi fotografski aparat za perforirani film stvara Oscar Barnack 1923. godine prema kojem se 1925. godine počinje proizvoditi legendarna Leica (Slika 3). „Kodak“ 1935. godine i „Agfa“ 1936. godine patentiraju kolor dijapozitiv i negativ-pozitiv sustav, što zaključuje analogni razvoj fotografije. [3]



Slika 3. „Leica III f“ (1950.)

https://en.wikipedia.org/wiki/Leica_Camera#/media/File:LeicaIII f-600.jpg

2.1.2. Digitalna fotografija

Elektronske fotografije imaju dulju povijest nego što se misli. Vjerojatno prva fotografija u boji prenošena elektroničkim putem je fotografski portret zvijezde srebrnog ekrana Rudolpha Valentina (Slika 4.), od strane Max Hofstettera, fotografirana na setu filma „Monsieur Beaucaire“. Dana 15. srpnja 1924. godine, fotografija (podijeljena na tri dijela: zelenu, crvenu i plavu boju) je elektronski poslana iz Chicaga u New York preko telefonskih linija „Bell Telephone“ kompanije. Reprodukcijska trobojna fotografija je bila moguća pretvorbom podjela u linijske gravure. Uvođenje elektroničkog skenera je bio jedan od najvažnijih napredaka reprodukcije tehnologije.



Slika 4. Prva fotografija prenešena elektronskim putem

<http://the-print-guide.blogspot.hr/2010/05/wayback-view-1924-first-color.html>

Murray i Morse 1937. godine rade na eksperimentalnom kolor elektronskom skeneru. Uređaj je skenirao transparentnost boje na rotirajući cilindar, pretvarajući sliku u seriju linija te zatim u električni signal. Prvotno se tehnologija razvijala u Eastman Kodaku ali je zatim prodana podružnici tvrtke Time Inc - Printing Developments Incorporated. Hardy i Wurzburg 1948. godine predstavljaju široj publici plošni skener koji skenira crno-bijele fotografske

separacije, rezultirajući trima separacijama u negativu. Nemogućnost skaliranja dimenzija je jedan glavnih problema prvih skenera. [4]

Steven Sasson inženjer u tvrtki Eastman Kodak je osmislio i izgradio 1975. godine prvi elektronički fotografski aparat, koji je težio 3.6 kilograma i imao kapacitet 0.01 megapixelsa. Slika je bila crno-bijela, zapisivala se na kasetu i taj proces je trajao 23 sekunde. Ranije namjene bile su uglavnom u vojne i znanstvene, te naknadno u medicinske svrhe i novinarstvo. Do sredine 2000-ih godina analogni fotoaparati su zamijenjeni digitalnim, te su tada najskuplji mobiteli imali integriranu digitalnu kameru. Početkom 2010. godine skoro svi „pametni“ mobiteli imaju integrirane kamere poprilično visokih rezolucija. (Slika 5.) [5]



Slika 5. Prikaz rezolucija mobilnih kamera 2013. godine

<http://www.pocketmeta.com/wp-content/uploads/2013/12/Gizmag-Chart.jpg>

2.1.3. Portretna fotografija

Portret je studija karaktera neke ličnosti i prikaz njegove osobnosti, stoga je lako zaključiti da je od samih početaka fotografije jedan od zanimljivijih i tehnički teže izvedivih motiva. U ranim počecima portretne fotografije (Slika 6.) njegova problematika je potreba duge ekspozicije zbog slabe osjetljivosti fotografskog materijala na crveni spektar. Modeli (kod većina ranijih portreta lica su neutralnog izraza – prirodni položaj mišića lica) čija su lica bila u granicama svjetline smatrani su fotogeničnima. Nadar, Julia Margaret Cameron, Melandri, Annan i Felix Man su samo neka od imena vrijedna spomena kod začetaka portretne fotografije.



Slika 6. Prvi fotografski autoportret Roberta Corneliusa 1839. godine
https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Cornelius#/media/File:RobertCornelius.jpg

Postoje dvije glavne podjele portretne fotografije. Prva podjela je položaj modela prema fotografskom aparatu; razlikujemo enface (direktno okrenuti model prema objektivu aparata), poluprofil, zatim profil te tročetvrtinski portret (lice okrenuto prema fotografskom aparatu a tijelo od njega). Druga podjela ovisi o kadriranju (reзу) fotografije (modela). Rez između ramena

i lakta zove se portret lica, dok američki rez je između lakta i zgloba šake; rez iznad koljena je portret 2/3 lika i konačno portret cijelog lika.

Najveća pažnja se pridodaje glavi tj. očima modela. Preporučuje se izoštravanje na područje očiju. Oči su glavna točka portretne fotografije i pokazatelj karaktera.

Okolina i pozadina trebaju biti neutralnih boja, preporučuje se korištenje tamnije pozadine kod starijih modela a svjetlija pozadina kod mlađih modela. Iznimka kod ovog pravila je kada se pozadina koristi da dodatno objašnjava i približava smisao cjelokupne fotografije.

Granica vremena eksponiranja kod fotografiranja portreta je između 1/30 i 1/60 sekunde kod odraslih modela, te 1/125 sekunde kod djece da bi se izbjegao nastanak neoštarih fotografija. Otvor objektiva namješta se da bi se postigla jednaka oštrina oba oka, dok okolina (pozadina) gubi oštrinu.

Ne postoje zapravo striktno pravilo koje određuje koja vrsta objektiva se koristi za portretnu fotografiju. Ovisno o željenom rezultatu koristimo za to prikladni objektiv.

Objektivi se dijele na normalne, širokokutne i teleobjektive (Slika 7.).

Normalnim objektivima žarišna duljina je od 35 mm do 70 mm. Zovu se „normalnim“ jer se njihovim korištenjem ne tvore efekti geometrijskih iskrivljenja i pomak planova je minimalan, projiciraju vid ljudskog oka. „Portretni objektiv“ je objektiv žarišne duljine 50 mm, a smatra se da fotografije nastale njegovom upotrebom su realnog prikaza.

Širokokutni objektivi, kao što sami njihov naziv govori, „hvataju“ široki vidni kut. Pod njih spadaju svi objektivi koji su manje žarišne duljine od 35 mm. Njihovom upotrebom distorzira se horizontalna geometrija fotografije uz njen rub i dolazi do razdvajanja planova – bliži objekti su uvećani, a dalji su manji više nego što su to u stvarnosti. „Fish eye“ objektivi spadaju pod širokokutne leće koje hvataju od 100° do 180° okoline, njihovim korištenjem dobivaju se fotografije velikih iskrivljenja, služe se u karikaturnoj portretnoj fotografiji.

Teleobjektivi su svi objektivi žarišne duljine od 70 mm pa nadalje. Dešava se obrnuti efekt od širokokutnih; spajaju se planovi, nije primjetna geometrijska

distorzija, linije koje su paralelne ostaju prividno takve i na fotografiji. Kod teleobjektiva većih žarišnih duljina dolazi do zamućenja pozadine pa se često koriste kod portreta.



Slika 7. Prikaz DSLR objektiva s lijeva na desno Olympus 40-150 mm, 11-22 mm i 14-54 mm, te Sigma 30 mm

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/62/FourLenses.jpg/400px-FourLenses.jpg>

Kod portretiranja se koriste različiti izvori svjetlosti. Pravilnom upotrebom rasvjete mogu se dodatno naglasiti određene prednosti ili možda i mane modela, ovisno koji efekt se želi postići. Ako je svijetlo pozicionirano s lijeve strane, postiže se „zatvaranje“ slike s tonovima. Plastičnost fotografije se gubi kada svijetlo dolazi iz smjera fotoaparata. Za portrete starijih osoba koristi se uglavnom direktno (tvrdo) svijetlo, dok za mlade osobe je preporučljivo koristiti raspršeno (meko) svijetlo.

Sunčeva svjetlost je direktna, što rezultira ostrim i grubim sjenama koje znaju (ovisno o efektu koji želimo postići) biti nepoželjne, s obzirom da zna naglasiti nesavršenosti kod modela. Da bi se izbjegla ta posljedica, a i dalje se koristila prirodna svjetlost, difuznom ili raspršenom svjetlošću (što u praksi znači oblačno vrijeme ili pozicioniranje modela u sjenu) se dobiva ravnomjerno osvijetljen model. Rezultati ovog principa su portreti glatkih i dugih prelaza između svjetla i sjene. Idealna rasvjeta u vanjskim uvjetima je dva sata poslije izlaska Sunca, odnosno dva sata prije zalaska.

Karakteristike umjetnog svjetla su: intenzitet svjetlosti, temperatura i raspršenost svjetlosti – difuzno (meko) ili snop paralelnih zraka (tvrdo). U unutarnjim uvjetima udaljenost modela od glavnog svjetla treba biti od 1,5 m do 2 m.

Raspoznaju se različiti položaji svjetla u odnosu na model; podijeljeno („split lighting“), kružno („loop lighting“), Rembrandt i leptir osvjetljenje (Slika 8.). [3, 6]



Slika 8. Primjer leptir osvjetljenja – portret Marlene Dietrich

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Marlene_Dietrich_in_Shanghai_Express_\(1932\)_by_Don_English.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Marlene_Dietrich_in_Shanghai_Express_(1932)_by_Don_English.png)

Ovisno o namjeni portreta koristi se određeni pristup, postupak i postavke koje rezultiraju zadovoljavajućim fotografijama.

2.2. 3D MJERENJA

Svaka tehnologija ima svoje prednosti i mane. Poznavanje svrhe podataka i istraživanja, te njihovo korištenje u daljnjoj budućnosti, olakšava izbor prikladne tehnologije. Posebnu pozornost treba uputiti prema sljedećim mogućim problemima:

- skaliranje (rezolucija skeniranja),
- točnost podataka (gustoća),
- razina detalja,
- parametarski detalji,
- prag tolerancije i
- tehnička oprema i standardi potrebni kod obrade

Rezolucija mjerenja je gustoća koordinatnih točki u odnosu na ciljano područje, što je usko vezano sa ukupnom gustoćom točki u skupu podataka. Cjelokupna baza podataka može imati visoku gustoću točki (i visoku ukupnu rezoluciju), međutim ako npr. rezolucija ciljanog područja nije dovoljna ne može se postići funkcionalna izvedba. Ovisno o namjeni skup podataka može imati različitu rezoluciju za različita područja. Rezoluciju možemo gledati i kao dimenzije najmanje raspoznatljive značajke u skupu podataka. Preporučljivo je da se zna potrebna rezolucija mjerenja da bi se postigla potrebna preciznost.

U tehničkom smislu preciznost je bliskost između mjerenja i stvarne vrijednosti. Naravno, postupak utvrđivanja „prave vrijednosti“ je upitan iz razloga što svako mjerenje se jedino može usporediti sa nezavisnim mjerenjima koja su postignuta drugim instrumentima. Drugim riječima skup podataka može biti vrlo precizan dok istovremeno potpuno netočan. Zbog toga postoji određena razina nesigurnosti za svako mjerenje.

Faktori koji utječu na točnost unosa podataka, pa i time konačnu izvedbenu točnost su:

- sustavi za skeniranje koji se koriste – maksimalna točnost se postiže u kontroliranim uvjetima,
- okolišni čimbenici – temperatura, relativna vlaga, tlak zraka

- ciljane karakteristike objekta/površine – kut u odnosu na uređaj i površina refleksije i
- metodologija obrade – kontrola korištenih mjera i nezavisna provjera kvalitete [7]

2.2.1. TEHNOLOGIJE ZA 3D SNIMANJE/SKENIRANJE

Totalna stanica (tahimetar) – elektroničko mjerenje daljine, moderne inačice su sposobne postići iznimnu točnost (Slika 9.). Preciznost elektroničkog daljinomjera kod totalne stanice je 2 mm na 1 km duljine. Načelo mjerenja kod totalne stanice, inače znano kao EDM („Electronic Distance Measurement“), se bazira na faznoj razlici vala između emitirane svjetlosti i njene refleksije. Izvrsne su za mjerenje bitnih točaka, ali su spore i nespretne za dočaravanje postojećih uvjeta i 3D objekata. Više služe kao dodatak nego alternativa 3D skeniranju.



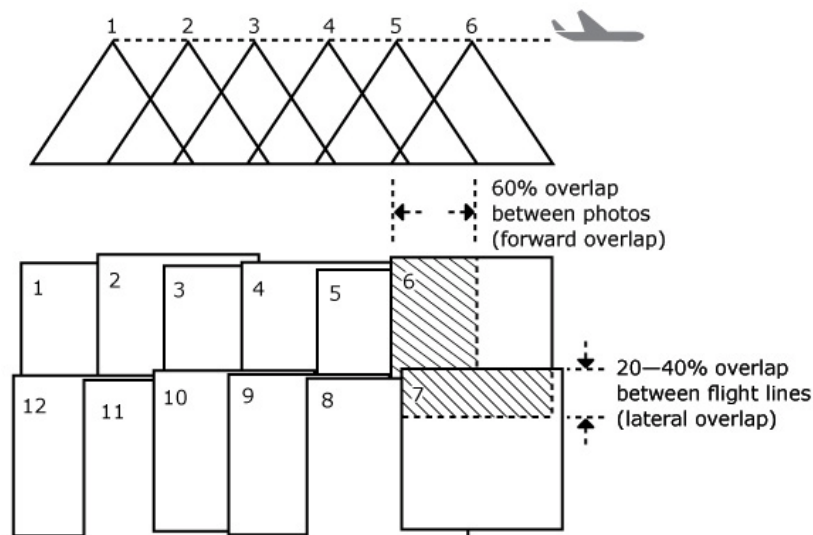
Slika 9. Primjer totalne stanice

<http://www.vpcivil.co.in/wp-content/uploads/2011/09/South-Total-Station-NTS-352R.jpg>

Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) – služi se GPS uređajima, među mnogim načinima korištenja, aplicira se za 3D skeniranje velikih površina i za „stvarno“ pozicioniranje 3D sustava za skeniranje.

Fotogrametrija (digitalna) – tehnologija bazirana na fotografiji, prvenstveno se koristila za kartografiju te za razvoj zračne fotografije, i za bliski domet pogotovo kod složenijih objekata. Fotografije visoke rezolucije koje svojim preklapanjem stvaraju 3D cjelinu (Slika 10.). Trenutno se pojavljuje veliki broj industrijskih rješenja, koja koriste digitalne fotografske aparate (namijenjene široj populaciji), da bi se rekreirali postojeći uvjeti. Točnost konačnog objekta varira ovisno o više faktora: metodologiji snimanja, kvaliteti fotoaparata i rekonstrukcijskom softveru.

Profesionalna digitalna reprodukcija ljudskog oblika pomoću fotogrametrije se sastoji od fotogrametrijske sobe ili kabine. Digitalna 3D slika se odmah postiže pomoću stotine fotografija snimljenih iz različitih kuteva. Tipično se koriste SLR fotografski aparati pozicionirani u specifično osvjetljenom prostoru. Ovakav pristup omogućava trenutačno snimanje podataka, što je iznimno korisno, jer čak i ako se model minimalno pomakne ne utječe na 3D oblik u kompjuterskom programu i konačno na 3D ispis. Nedostaci ovog postupka su što je potrebno korištenje studija gdje se odvija složen postupak postavljanja i kalibracije sustava fotografskih aparata; nije fizički prenosiv već ograničen na korištenje u samo toj prostoriji; s obzirom na to da se radi o vjerojatno stotinjak kamera, poprilično je skup pristup.



Slika 10. Prikaz potrebnog preklapanja fotografija

http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/images/photos101/images/E_T1609_image4.jpg

3D laserski skeneri – kopneni, mobilni ili antenski 3D asortiman uređaja za snimanje koji koriste laser (svijetlo) za mjerenje udaljenosti.

1. LIDAR (light detection and ranging) – izraz obično korišten za zračne skenere.
2. LADAR (laser detection and ranging) – izraz obično korišten za kopnene skenere.
3. Flash LADAR/LIDAR – emisija i otkrivanje svijetla korištenjem elektro-optičkih uređaja i svjetlosnih zraka.

Za razliku od fotogrametrije, 3D skeneri obrađuju slike unutar svog sustava. 3D skeniranje se postiže u uređaju koji je sposoban za povrat informacija, tipično laser u skeneru koji projicira poznati oblik na objekt, npr. laserska traka ili strukturirano svijetlo. Glavna prednost 3D skeniranja je što pruža veće detalje i rezoluciju nego fotogrametrija. Stoga su detalji na npr. licu ili odjeći potencijalno veći sa 3D skenerom. Skeniranje se može obavljati i u specijaliziranoj kabini ili korištenjem prijenosnog ručnog skenera (Slika 11.), nudeći jednostavno i brzo postavljanje te fleksibilnost korištenja u zatvorenom ili otvorenom prostoru. Skeneri koji koriste strukturirano svjetlo u usporedbi s laserskim skenerima nude veću brzinu i točnost. Zahtijevaju sinkronizaciju nekoliko skenera kako bi „uhvatili“ potrebne kuteve (izbjegavajući tako pojavu „sjena“ uzrokovane „linijom vida“ i binokularnim vizualnim ograničenjima).

Ovi sistemi su veoma efektni kad ih se postavi, no mogu biti komplicirani i osjetljivi kod kalibracije. Skeniranje čovjeka može biti problematično s obzirom da 3D skenerima treba sekunda ili više za bilo koji dio tijela. Živo tijelo se uvijek miče, čak ako je je pomak milimetarski, rezultat će biti dupli sloj skeniranih podataka za isto područje geometrije što uzrokuje problem kod kreiranja „mesh“-a ili STL datoteke za 3D ispis.

Sustavi za skeniranje zapisuju fizičku poziciju ciljanog predmeta (objekta) kao niz točaka („point cloud“) u xyz koordinatnom sustavu.

Nakon skeniranja su potrebni intenzivan rad i česte komplicirane prilagodbe podataka da bi se pripremila datoteka za 3D ispis. Postupak skeniranja može trajati par minuta i uglavnom ga treba ponoviti kako bi se pravilno skenirala cjelokupna forma ili objekt. [8]



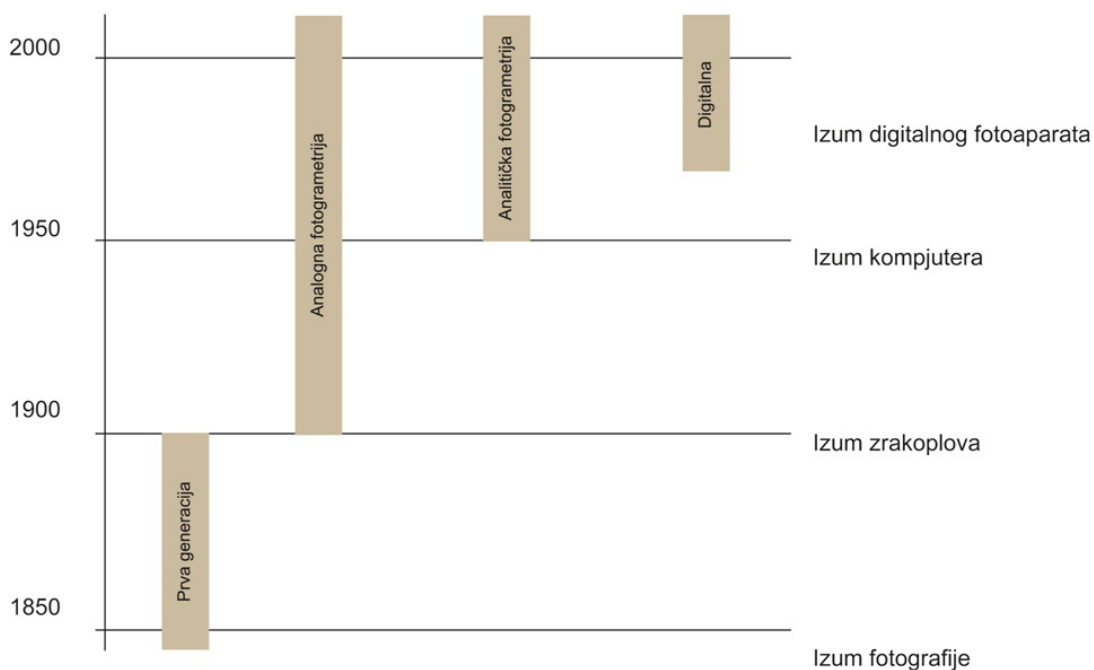
Slika 11. Primjer 3D skeniranja

<http://www.3ders.org/images2015/best-3d-scanners-2015-16.jpg>

2.3. FOTOGRAMetriJA

„Fotogrametrija je znanost dobivanja pouzdanih informacija o svojstvima površine i objekata bez fizičkog kontakta sa predmetima, te mjerenje i tumačenje tih podataka.“ [9]

Naziv fotogrametrija je izveden iz tri grčke riječi: „phos“ ili „phot“ što znači svjetlo, „gramma“ što znači slovo ili nacrtano te „metrein“ jedinica mjere. Razvoj fotogrametrije se može podijeliti na četiri faze (Slika 12.). Prva generacija se računa od izuma fotografije 1839. godine, nakon čega nastaju prve fotografije iz zračnog balona, sve do 1901. godine kada započinje druga generacija Pulfrichovim izumom stereofotogrametrije. Glavni temelji tehnike su uspostavljeni tokom Prvog i Drugog svjetskog rata te se fotogrametrija nameće kao neophodna tehnologija potrebna kod istraživanja i kartografije. Pojavom kompjutera počinje treća generacija ili analitička fotogrametrija, nedugo nakon, pojavljuju se prvi kompjuterski programi specijalizirani za fotogrametrijske izračune. Četvrta generacija ili digitalna fotogrametrija se računa od izuma digitalne kamere i te ona još traje.



Slika 12. Prikaz razvoja fotogrametrije

Autorsko djelo

Princip fotogrametrije je uvijek isti - triangulacija, dok izbor tehnologije koja se koristi varira ovisno o njenoj primjeni. U najjednostavnijem se primjeru, udaljenost između dvije točke koje leže na plohi paralelnoj s fotografskom ravninom slike, može odrediti mjerenjem njihove udaljenosti na fotografiji ako je skala (x) na slici poznata. To se postiže množenjem izmjerene udaljenosti sa $1/x$. [10]

Fotogrametrija se koristi u različitim područjima (Tablica 1.) kao što su topografska kartografija, arhitektura, inženjering, kontrola kvalitete, geologija, u arheologiji za brzu izradu nacrtu velikih ili složenih pronalazišta te u meteorologiji kao način za određivanje stvarne brzine vjetra kod tornada. Također se koristi za kombiniranje stvarnog s računalno-generiranim slikama u filmovima nakon proizvodnje; Matrix je dobar primjer upotrebe fotogrametrije u filmu (detalji su dani u DVD dodacima). Fotogrametrija se često koristi za stvaranje foto-realističnih detalja okoliša za video igre i za skeniranje objekata od kojih bi se izradili njihovi 3D modeli. Uglavnom se koriste metričke kamere - posebni digitalni fotografski aparati, ali se mogu koristiti i fotografije nastale pomoću klasičnih digitalnih fotografskih aparata. Neki programi kao „Photoscan“, „123D Catch“, „PhotoModeler Scanner“ i „Photosketch“ se koriste kako bi bila moguća brza izrada 3D modela, korištenjem metode fotogrametrije. Treba napomenuti da modele često treba dodatno obraditi sa softverima kao što su „MeshLab“, „Netfabb“ ili „MeshMixer“.

Između ostaloga pomoću fotogrametrije moguća je izrada 3D modela ljudi i životinja.

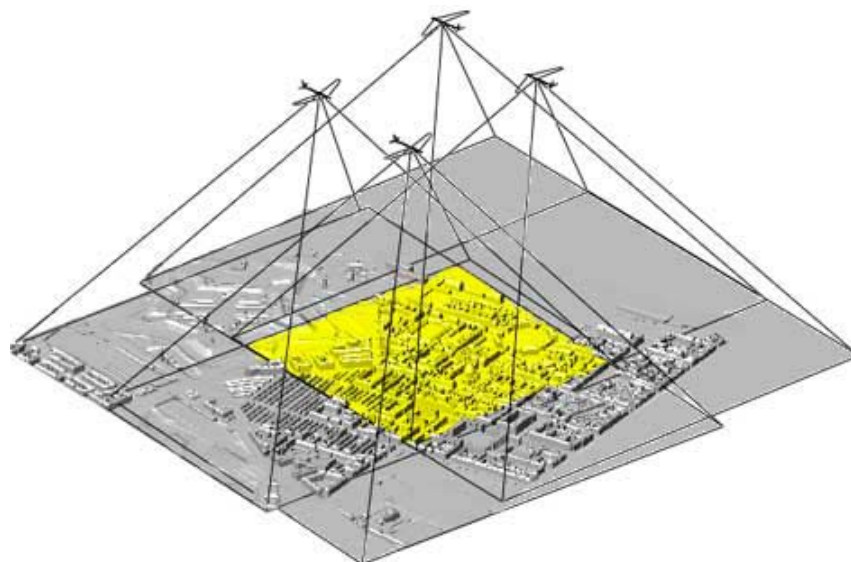
Tablica 1. Različite specijalizacije fotogrametrije

OBJEKT	SENZORNA PLATFORMA	SPECIJALIZACIJA
Planet	Satelit	Svemirska fotogrametrija
Zemljina površina	Zrakoplov Satelit	Zračna fotogrametrija
Industrijski dijelovi	Stativ	Industrijska fotogrametrija
Povijesne zgrade	Stativ	Ahitektonska fotogrametrija
Ljudsko tijelo	Stativ	Biološka stereometrija

Kod profesionalne se upotrebe razlikuju dvije vrste fotografskih sustava s metričkim svojstvima:

- zračne („aerial“) bolje znane kao kartografske kamere i
- kopnene („terrestrial“ – „close range“) kamere.

2.3.1. VERTIKALNA FOTOGRAMetriJA



Slika 13. Prikaz zračne fotogrametrije

<http://www.sharpgis.net/projects/trueortho/images/aerialphotos.jpg>

Slika 13. prikazuje tipični slučaj fotografiranja iz zrakoplova. Povećanje u fotografijama može poslužiti za početni nacrt (ideju) ili za studiju kod izgradnje. Da bi se postigla što točnija karta (prikaz), potrebna je rektifikacija (def. „U matematici izračunavanje duljine neke krivulje, odnosno njezina luka.“). [10] Rektifikacija kod snimanja iz aviona se postiže pomicanjem i nagnjanjem fotografskih aparata tako da je u paraleli sa tlom. Ako je tlo reljefno, onda su rektificirane fotografije pogrešne te se u tom slučaju koriste ortofoto fotografije – diferencijalno rektificirane fotografije geometrijski identične karti. Može se koristiti jedna ili više kamera u istom okviru kao npr. linijske kamere.

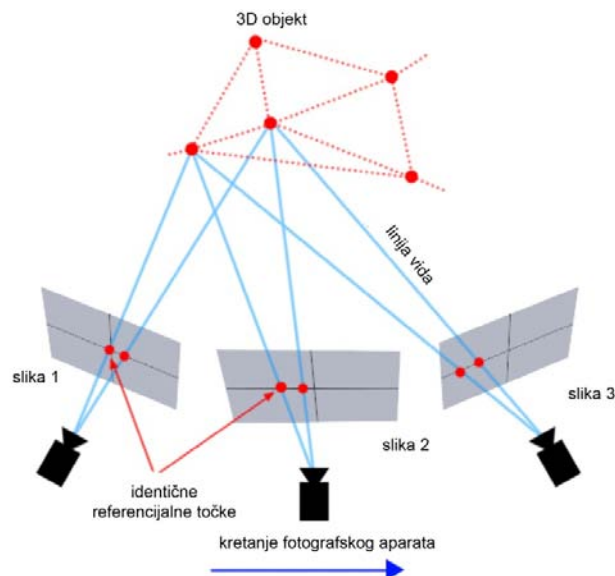
2.3.2. HORIZONTALNA FOTOGRAMetriJA

U usporedbi sa zračnom fotogrametrijom, kopnena nije ograničena na vertikalnu fotografiju sa posebnim kamerama. Metodologija kopnene fotogrametrije se drastično promijenila kroz vrijeme te su moguće razne nove primjene. Zahvaljujući novim tehnologijama i tehnikama prikupljanja podataka (kao CCD kamera i fotoskenera), obrada podataka (kompjuterski programi), strukturiranja i prezentacije (kompjuterske simulacije i animacije u specijaliziranim programima) arhiviranja, pretraživanja i analiziranja, stvoren je novi sustav metoda i obrada rezultata u fotogrametriji. Kada se radi o malim udaljenostima u fotogrametriji, onda se govori o dobivanju geometrijskih informacija, veličini i obliku bilo kojeg oblika koji je prijašnje sniman.

2.3.3. FOTOGRAMetriJSKE TEHNIKE

Fotografije su centralne perspektive, što znači da svaka zraka svjetla koja je doprla do fotosenzora je prošla kroz leću (matematički gledana kao jedna točka tzv. „perspektivni centar“) fotografskog aparata. Žarišna duljina, koja se još zove i „glavna duljina“ je udaljenost od projiciranog centra do glavne točke koja se nalazi u ravnini slike. Unutarnja geometrija je definirana žarišnom duljinom, pozicijom glavne točke i distorzijom leće. Da bi se uspostavila 3D točka, potrebno je definirati matematičko sjecište između barem dvije „linije vida“ u

prostoru ili između „linije vida“ i površine na kojoj se nalazi ta točka (Slika 14.). Linije vida su dvije lokacije od fotografije do točke objekta – nekad zvane zrakama zbog svoje optičke prirode. Snop solucija je moguća ako se objekt prikazuje na tri ili više fotografija gdje su dostupna sveukupna mjerenja u isto vrijeme. Ovakve vrste slučajeva dovode do različitih pristupa za dobivanje 3D koordinata točke ciljanog objekta.



Slika 14. Prikaz principa fotogrametrije

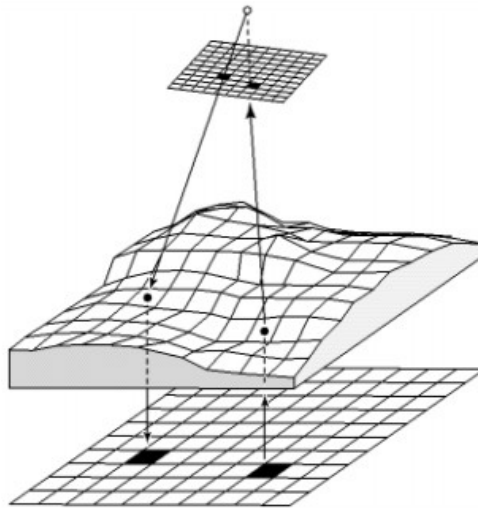
http://www.clemson.edu/restoration/wlcc/_files/photogrammetry.jpg

2.3.3.1. Pojedinačne fotografije

Jedna fotografija se može koristiti kada se zna oblik, postav i dimenzije površine predmeta u prostoru ali nas zanimaju detalji na površini predmeta (kao npr. uzorci i teksture). Ovaj pristup jedino je koristan za 2D objekte.

Kose fotografije ploha objekta pokazuju deformaciju perspektive, koju se treba ispraviti. Da bi se dobili dobri rezultati, čak samo s najjednostavnijim tehnikama, objekt mora biti ploha (npr. zid) što znači da se mapiranje radi samo u dvije dimenzije.

- Mapiranje iz jedne fotografije:
- metoda trake papira,
 - optičko ispravljanje,
 - brojčano ispravljanje,
 - „monoplotting“ (Slika 15.) i
 - digitalno ispravljanje.



Slika 15. „Monoplotting“

http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0027_DAI5/images/DAI563.png

2.3.3.2. Stereografski postupak

Ako je geometrija nepoznata, jedna fotografija nije dovoljna da bi dobili 3D objekt. U ovom slučaju su potrebne najmanje dvije fotografije koje se prema stereografskom principu mogu spojiti te dati pregled koji omogućava prostornu (stereoskopsku) impresiju objekta. Koristeći „stereo parove“ fotografija mogu se rekonstruirati proizvoljni oblici dokle god je područje interesa prikazano na obje slike. Smjer fotografskih aparata treba biti međusobno paralelan da bi se postigao što bolji rezultat. Kod ovog pristupa koriste se uglavnom metričke kamere (poznata je i kalibrirana unutarnja orijentacija) sa lećama koje imaju zanemarivo izobličenje, te bi omjer udaljenosti između dviju kamera i objekta bi trebao biti između 1:5 i 1:15.

Stereografskom restitucijom možemo dobiti:

- 3D žičane („wireframe“) i površinske modele (Slika 16.),
- listu koordinata i
- 2D nacрте.



Slika 16. Prikaz wireframea ljudskog lica
Autorsko djelo

2.3.3.3. Snop konstrukcija („Bundle restitution“)

Kod rekonstrukcije kompliciranijih objekata nije dovoljno koristiti samo jedan „stereo par“ kamera. Potreban je veći broj fotografija koje prikazuju cjelokupni objekt i potrebno je poznavati orijentaciju svih fotografija da bi se prikupili dodatni podaci te postigla što bolja i homogenija rješenja. Prednosti ovog pristupa su mnogobrojni. Mogućnost kalibracije kamera u trenutku snimanja pomaže pri povećanju točnosti kada se koriste fotografije nekalibrirane ili nepoznate kamere. Ovi pristup nije ograničen na metričke i kalibrirane kamere. Aplikacija fotogrametrije postaje puno više fleksibilnija nego prije. Više nismo prisiljeni koristiti paralelni smjer i „stereo parne“ konfiguracije jer je moguća prilagodba geometrije kod pozicije kamera. Postižu se rezultati u obliku vodoravnih, okomitih, kosih i/ili konvergentnih fotografija koristeći kombinaciju različitih fotografskih aparata i objektivna.

U ovom slučaju bitan je kut sjecišta dviju „linija“ koje se vuku iz određene točke, s obzirom na to da kut utječe na točnost konačnog rezultata. Što je manji kut

između svake nove fotografije (Slika 17.), manja je mogućnost greške, lakše je izračunati niz mjera i nepoznatih parametara. Snop konstrukcija kombinira primjenu polumetričkih i ne metričkih (komercijalnih) kamera s konvergentnim fotografijama fleksibilnih mjera u kompjuterskom programu. [11]



Slika 17. Primjer snop konstrukcije

<http://blog.craftunique.com/wp-content/uploads/2016/06/3dscanphoto.png>

2.3.4. FOTOGRAMETRIJSKI UREĐAJI

Proces fotogrametrije prepoznaje 3 glavne vrste (kamera) fotoaparata:

- metričke kamere,
- stereometrijske kamere i
- amaterske (komercijalne) kamere.

Metričkim kamerama (Slika 18.) poznaje se unutarnja geometrija koja je stabilna te objektivni imaju malu distorziju. Glavna duljina je konstantna što znači da nema izoštravanja leće kada se fotografira. Fotografski koordinatni sustav je uglavnom definiran s četiri pouzdane oznake koje se postavljaju na okvir kamere. Zračne („aerial“) metričke kamere se ugrađuju u avione vertikalno prema dolje. Polumetričke kamere su prije digitalizacije bila dosta popularne kod arhitektonske fotogrametrije jer se koristila réseau (mreža) tehnika. Réseau ploča je transparentna, s provjerenim markerima, postavlja se na žarišnoj

ravnini, taman prije filma. Na taj se način korekcija slike je olakšana i može koristiti za precizna mjerenja.



Slika 18. Metričke kamere „Phase One iXU 1000“ i „iXU-R 1000“
http://www.opli.net/media/6045/ixu1000-r_ixu1000_web.jpg

Preklopljeno polje (zona) dviju fotografija se mogu gledati u tri dimenzije simulirajući tako čovjekov stereoskopski vid. U praksi se „stereo-par“ može dobiti jednim fotografskim aparatom korištenim na dvije različite lokacije ili služeći se **stereometrijskom kamerom**. Stereometrijska kamera u principu se sastoji od dvije metričke kamere postavljene na krajevima cijevi, precizno izmjerene međusobne udaljenosti (uglavnom 40 ili 120 cm). Obe kamere imaju ista geometrijska svojstva te su prilagođene normalnim okvirima.

U slučaju nepoznate i nesigurne unutarnje geometrije fotografskog aparata govori se o **amaterskoj kameri**, što je slučaj sa svim „normalnim“ komercijalnim fotografskim aparatima. Kontrolne točke kod snimanja te jednaka udaljenost kamere od ciljanog objekta pomažu u kalibraciji fotografskog aparata. Uglavnom se koriste u slučajevima gdje visoka točnost nije toliko bitna s obzirom na to da se nikada neće postići rezultati kao kod metričkog fotografskog aparata.

Često fotogrametrijski projekt iziskuje toliko koliko je kompliciran i sam objekt. Izbor fotogrametrijskog uređaja najviše ovisi o proračunu projekta, u većini slučajeva to znači da se koriste uređaji koji su već dostupni.

Međutim, za uspješni fotogrametrijski projekt nekoliko aspekata treba uzeti u obzir, kao npr. vremenski period snimanja. Daljnji kriteriji su vremenski period procesiranja podataka, korištenje kolor fotografije, crno-bijele fotografije, točnost konačnog modela, dimenzije najmanjeg detalja objekta koji je moguće modelirati, minimalni i maksimalni broj fotografija, mobilnost i fleksibilnost korištenih fotografskih aparata i mogućnost integracije u cjelokupni proces. Cijena fotogrametrijskih uređaja i mogućnost daljnjih obrada dobivenih slikovnih podataka ostaju glavni čimbenici za odabir određenog sistema za prikupljanje fotografija fotogrametrijskog projekta. [12]

2.3.5. KOMPJUTERSKI PROGRAMI

Dobivene fotografije se učitavaju u kompjutorski program specijaliziran za fotogrametrijske primjene. Program ih iščitava u obliku trodimenzionalnih žičanih modela (wireframeova) i površinskih modela, ili u obliku liste koordinata izmjerenih točki te njihovu topologiju. Teksturirani modeli i videozapisi su isto mogući rezultati; obično se cijeli objekt rekonstruira u jednom koraku te koristi izvorne fotografije za izradu teksture.

„Autodesk 123D“ je besplatan skup programa koji koristi CAD i 3D alate za modeliranje, kreiran od strane Autodesk. Sadrži osnovne alate za crtanje, knjižnicu gotovih blokova i objekata koji služe za vježbanje.

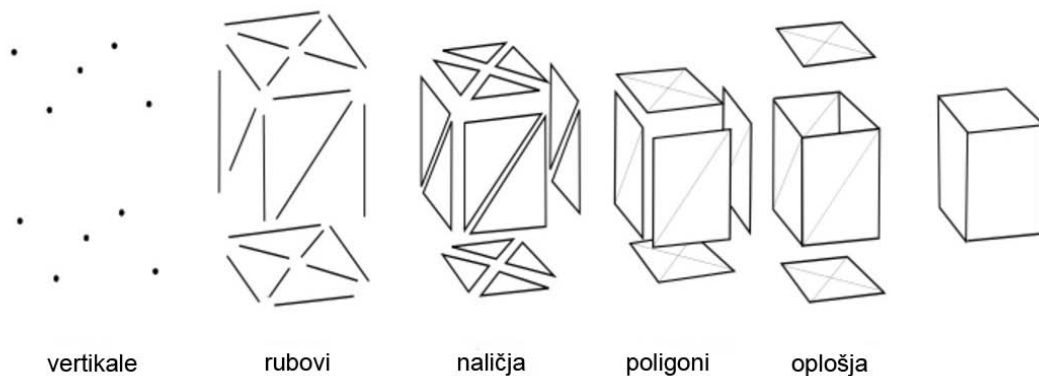
„Autodesk 123D Catch“ je program dostupan za korištenje u Microsoft Windowsu, i u obliku aplikacije za Android, IOS i Windows Phone. Koristi fotogrametrijsku tehnologiju da bi se kreirao 3D model iz većeg broja fotografija. To se postiže automatskim spajanjem fotografija koje imaju zajedničke vizualne strukture. Catch služi za stvaranje 3D modela ljudi, mjesta i predmeta.

Stvaranjem računa korisnici mogu eksportirati novo stvorene modele za daljnje manipuliranje u nekom od popularnih programa za 3D manipulaciju.

MeshMixer je Autodeskov besplatni softver koji omogućava različite funkcije manipulacije 3D mreže. Glavna upotreba mu je uređivanje 3D modela, npr. uklanjanje područja koja nisu potrebna, popunjavanje rupa, oblikovanje mreže ili za ispravak orijentacije objekta prije 3D ispisa. [13]

MeshLab je napredni softverski sustav za 3D obrađivanje. Koristi se za upravljanje, procesuiranje nestrukturiranih velikih mreža („mesh“) i pruža skup alata za uređivanje, čišćenje, popravljavanje, nadzor, prikazivanje („render“), i pretvorbu tih mreža (Slika 19.).

MeshLab je besplatan i open-source softver te se koristi kao zasebni program ili u obliku pomoćne knjižnice za druge programe. Automatski filtri za čišćenje uključuju uklanjanje duplih, ne povezanih vrhova i ploha. Podržava razne vrste filtera koji zaglađuju površinu, alate za analizu zakrivljenja i vizualizaciju. Dostupan je na većini platformi uključujući Microsoft Windows, Linux i Mac OS X. [14]



Slika 19. Elementi „mesh“ modeliranja

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/Mesh_overview.svg/720px-Mesh_overview.svg.png

2.4. POVIJEST RAZVOJA 3D TISKA

Najranije 3D tiskane tehnologije su nastale u kasnim 1980-ima, tada su se zvale brza izrada prototipa (Rapid Prototyping). Procesi su izvorno zamišljeni kao brži i racionalniji način za stvaranje prototipova te za razvoj proizvoda u industriji. Prvu prijavu patenta za AM tehnologiju podnosi Hideo Kodama u svibnju 1980. godine u Japanu, dok se realno porijeklo 3D ispisa može pratiti od 1986. godine kada je prvi patent izdan za stereolitografsku tehnologiju (SLA).

Charles Hull, suosnivač 3D Systems Corporation je izumio SLA stroj 1983. godine. 3D Systems, tvrtka koja djeluju u 3D ispis sektoru i danas predstavlja 1987. godine prvi komercijalni RP sistem SLA-1, koji je pušten u prodaju 1988. godine. Iste godine Carl Deckard, sa Sveučilišta u Texasu je razvio još jednu RP tehnologiju i patentirao kao Selective Laser Sintering. Patent je odobren 1989. godine u SAD-u i licenciran DTM Inc., kojeg kasnije kupuje 3D Systems. Scott Crump suosnivač tvrtke Stratasys Inc. 1989. godine podnosi patent za Fused Deposition Modeling proces. Princip te tehnologije se koristi danas za mnoge početničke uređaje zahvaljujući uspješnom open source RepRap modelu. Hans Langer u Njemačkoj 1989. godine osniva EOS GmbH. Nakon početne zanimacije sa SL procesima, fokus tvrtke se premješta na lasersko sinteriranje. Danas su EOS sistemi prepoznati diljem svijeta zbog njihove kvalitete, industrijskih prototipova i različitih aplikacija za 3D ispis. Zajednička suradnja s Electrolux Finland rezultira stvaranjem DMLS procesa.

U tom razdoblju stvoreni su različiti procesi, poput Ballistic Particle Manufacturing (BPM) kojeg je patentirao William Masters; Laminated Object Manufacturing kojeg je patentirao Michael Fegin; Solid Ground Curing kojeg je patentirao Itzchak Pomeranz i trodimenzionalno tiskanje 3DP koji je izvorno patentirao Emanuel Sachs. Vidljiv je rast broja različitih kompanija početkom 1990ih godina na RP području dok su danas ostale samo tri: 3D Systems, EOS i Stratasys.

Nove tehnologije koje su razvijene kroz sljedeća dva desetljeća su većinom primijenjene na industrijskoj razini ili za izradu prototipova, dok istraživanje i razvoj naprednijih tvrtki omogućava pojavu novih terminologija kao Rapid Tooling (RT), Rapid Casting i Rapid Manufacturing (RM).

Kada se govori o komercijalnim uspjesima Sanders Prototype (kasnije Solidscape) i Zcorporation su utemeljeni 1996. godine, 1997. godine Arcam, 1998. godine Object Geometries. MPC Technologies predstavlja SLM tehnologiju 2000. godine i ExOne tvrtka osnovana 2005. godine predstavlja svoju verziju EBM tehnologije. Zbog lakše podjele različitih tehnologija koje su se razvijale uvodi se zajednički naziv Additive Manufacturing (AM).

Razvoj 3D tehnologija se dešavao ne samo u Americi već i u drugim dijelovima svijeta, ali ne i toliko utjecajan na globalnom tržištu. Tijekom sredine 90-ih, ovaj sektor počinje pokazivati znakove podjele, specifično na dva područja koja su danas znatno jasnije podijeljena i definirana. Prva podjela uključivala je visokokvalitetne i skupocjene 3D printere korištene za proizvodnju kompliciranih projektiranih dijelova visoke vrijednosti. Takvi sustavi su i danas skupi iako sada puno profitabilniji i uspješniji, s obzirom na njihovu primjenu u zrakoplovnoj, automobilskoj i medicinskoj industriji. Velika se većina tih procesa vodi iza „zatvorenih“ vrata te je pod ugovorom o tajnosti. S druge su se strane razvijali troškovno učinkoviti 3D printeri koji su eventualno financijski skromnija investicija prvenstveno stvoreni za korištenje u uredu; ispis modela i funkcionalnih prototipova s ciljem unaprjeđenja i poboljšanja koncepta. Međutim i ovi sustavi su većinom korišteni za industrijske primjene, ali se može reći da su bili preteča današnjih stolnih računala.

2004. godine Dr. Bowyer smišlja koncept RepRap, otvoreni izvor korištenja i samo-replicirajući printer. Uz pomoć njegovih kolega na Bathu, Vik Oliver i Rhys Jones su razvili koncept kroz rad na prototipovima 3D printera koji su koristili depozicijski proces. U siječnju 2009. godine se na tržištu pojavljuje prvi komercijalno uspješni 3D printer temeljen na RepRap konceptu; BfB RapMan.

2012. godina je početak alternativnih 3D procesa kao npr. vrlo uspješni B9Creator (koristi DLP tehnologiju) i Form 1 (stereolitografija), oba projekta su financirana preko Kickstartera. Iste te godine mediji okreću svoju pozornost 3D tehnologiji, direktan rezultat tržišne divergencije, značajan napredak u industrijskoj razini s mogućnostima i aplikacijama te dramatično povećanje svijesti o samoj tehnologiji. [15]

2.4.1. HIDEO KODAMA

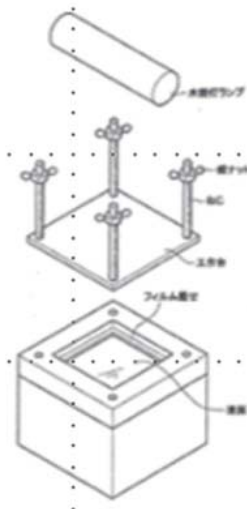
Prije više od tri desetljeća, Hideo Kodama, istraživač na Nagoya Municipal Industrial Research institutu, dolazi do ideje za 3D pisač. Veljača 1980. godine, Kodama prisustvuje izložbi u Nagoyi, gdje promatra uređaj koji stvara slova koristeći tekuću smolu te je primjenjuje na staklenu površinu. Kada se smola podvrgne svjetlu, izloženi dijelovi otvrdnu te ostaju zalijepljeni na staklu i nakon što su isprani vodom. Slova se zatim prskaju s tintom i koriste za tisak novina. Na povratku kući, Kodama dolazi na ideju stvaranja objekata s oblikom i volumenom, dodavanjem slojeva fotoosjetljive smole koja bi se u konačnici stvrdnula naknadnom obradom. U travnju te godine, Kodama je napravio dvoetažnu minijaturnu kuću veličine ljudskog dlana (Slika 20.), gomilajući 27 slojeva smole, 2 mm debljine. Ambiciozni 3D model je imao sobe, spiralno stubište i stol. Godine 1981. osmišljava dvije metode AM izrade: izrada metode trodimenzionalnog modela s plastičnim fotokaljenjem polimera gdje je područje izloženosti UV kontrolirano od strane maskiranog uzorka ili skeniranjem vlakana odašiljača.

Napisao je tezu i predstavio svoju ideju u Japanu i inozemstvu, no njegova inovativna metoda je bila ispred svog vremena rezultirajući nerazumijevanjem od strane kolega znanstvenika. Prvobitno je podnio patentnu prijavu, ali nije dovršio postupak za formalno zaprimanje patenta.

Kodamina inovacija nije u potpunosti nepriznata. Izabran je 1995. godine za primanje Rank nagrade, privatno financirane britanske nagrade za izvrsne

izume. Fond je priznao Kodamin izum kao prvu svjetsku tehnologiju za razvoj 3D pisača. Podijelio je nagradu s Charlesom Hullom. [16]

(マスクを用いた光造形)



Slika 20. Kodamin model kuće

https://www.ieice.org/eng/about_ieice/new_honorary_members_award_winners/2014/image/g_19.jpg

2.5. VRSTE PROCESA 3D TISKA

Američko društvo za ispitivanje i materijale ili ASTM grupa je 2010. godine razvila niz standarda; ASTM F42 – Aditivna proizvodnja za procese aditivne proizvodnje prema standardnoj terminologiji za tehnologiju aditivnih procesa. Procesi su podijeljeni tada na 7 kategorija:

Vat Photopolymerisation, Material Jetting, Binder Jetting, Powder Bed Fusion, Material Extrusion, Sheet Lamination i Directed Energy Deposition.

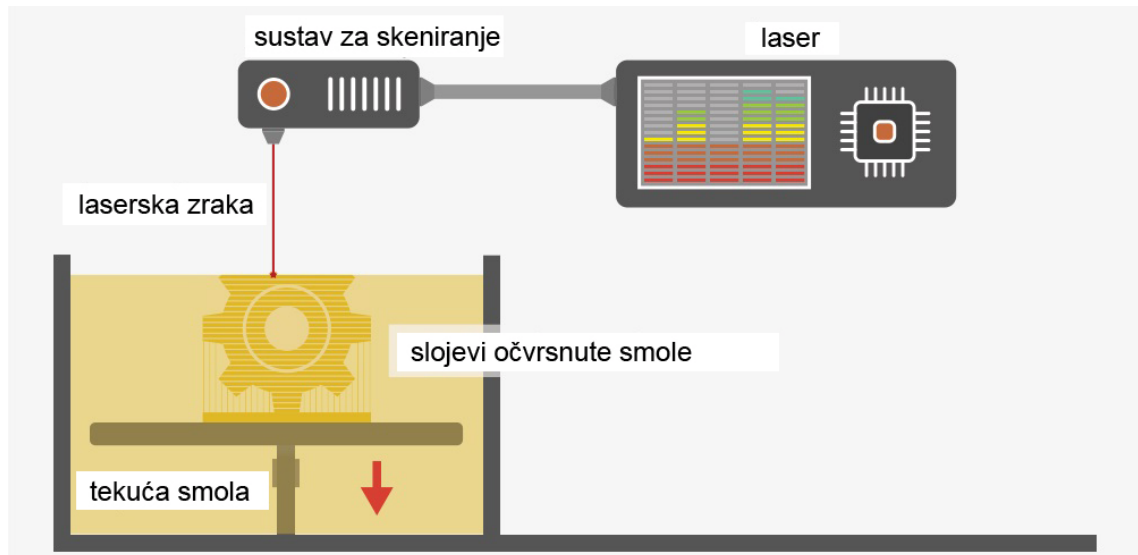
2.5.1. VAT PHOTOPOLYMERISATION

Koristi se posuda s fotopolimernom smolom u obliku tekućine, od koje se model konstruira sloj po sloj (Tablica 2.). Objekt se stvara prema dolje, pomičući platformu, nakon što se svaki novi sloj stvrdnuo. Smola se stvrdnjava pomoću procesa fotopolimerizacije ili UV svjetlom. Svjetlost je usmjerena na površinu smole uz pomoć motorno kontroliranih zrcala. Smola otvrdne samo tamo gdje dolazi u kontakt sa svjetlom. S obzirom da proces koristi tekućinu za oblikovanje predmeta, nema potrebe za strukturnu potporu u fazi stvaranja. Ako su potrebne potporne strukture često su od drugog materijala.

2.5.1.1. Stereolitography (SLA)

Najčešće korištena tehnologija u ovoj kategoriji je stereolitografija (SLA). Ova tehnologija koristi posudu tekućine ultraljubičasto osjetljive fotopolimerne smole i ultraljubičasti laser za izgradnju slojeva objekta jedan po jedan (Slika 21.). Svaki sloj, laserski snop prati poprečni presjek dijela uzorka na površini tekuće smole. Izloženost ultraljubičastoj laserskoj svjetlosti učvršćuje uzorak koji prati na smoli i pridružuje sloju ispod. Nakon što je obrazac prepoznat, stereolitografska platforma se spušta na udaljenosti jednakoj debljini jednom sloju, obično 0,05 mm do 0,15 mm. Tada oštrica ispunjena smolom prolazi preko poprečnog presjeka dijela, nanoseći svježi materijal. Na ovoj novoj tekućoj površini, novi sloj prati uzorak te se pridružuje prethodnom sloju. Ovaj postupak čini kompletni trodimenzionalni objekt. Stereolitografija zahtijeva

korištenje potpornih struktura koje služe za pričvršćivanje dijela na platformu i da drže objekt na mjestu, jer pluta u bazenu ispunjenom tekućom smolom. Potpornji su uklonjeni ručno nakon što se objekt završi. [17]



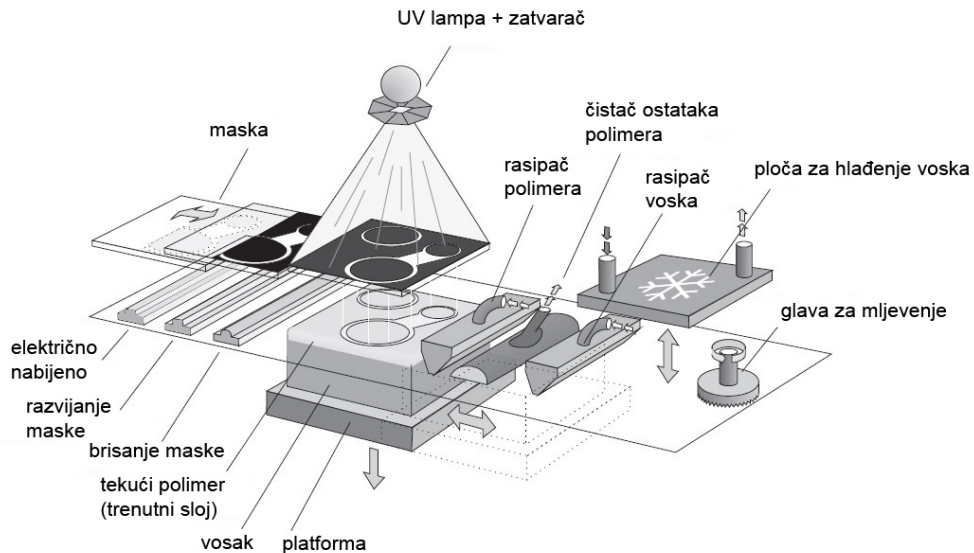
Slika 21. Prikaz procesa stereolitografije

<http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/02/stereolithography.png?d5935f>

2.5.1.2. Solid Ground Curing (SGC)

Fotopolimerna tehnologija aditivne proizvodnje koja se koristi za proizvodnju modela, prototipova, obrazaca i proizvodnih dijelova. Izvodi se kroz masku pomoću UV lampe pod visokim naponom (Slika 22.). S obzirom na to da je temelj SGC-a izlaganje svakog sloja modela pomoću svjetiljke kroz masku, vrijeme obrade za stvaranje sloja ne ovisi o kompliciranosti sloja. Cubital Ltd. iz Izraela 1986. godine SGC je razvio i komercijalizira pod imenom Solider System.

Ova metoda je nudila dobru točnost i vrlo visoku brzinu izrade, ali zbog kompleksnosti sustava i troškova poslovanja nije prihvaćena na tržištu. Tvrtka i dalje postoji, no njihovi sustavi se više ne prodaju. [18]



Slika 22. Prikaz SGC procesa

https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_Ground_Curing

2.5.1.3. Film Transfer Imaging (FTI)

Tehnologija koju je izumila tvrtka „3D Systems“, koristi materijale koji stvrdnjavaju utjecajem ultraljubičastog svjetla. Film se obloži smolom koja se zatim stvrdnjava bljeskom svjetlosti projektora. [19]

Video: <https://www.youtube.com/watch?v=11XAT5WrcjM>

2.5.1.4. Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

Koristi se za kontinuirano stvaranje monolitnih polimernih dijelova veličine do nekoliko desetaka centimetara i razlučivosti ispod 100 mikrometara.

Kontinuirana proizvodnja tekućine sučelja se postiže, propusnim za kisik, prozorom ispod ultraljubičaste slike u ravnini projekcije koji stvara „mrtvu zonu“ (dosljedno sučelje tekućine), gdje se fotopolimerizacija inhibira između prozora i polimeriziranog dijela. Ovakvim se principom složeni čvrsti dijelovi mogu izvući iz smole po stopama od stotine milimetara na sat. Ove brzine ispisa omogućuju proizvodnju dijelova u nekoliko minuta umjesto nekoliko sati. Jedna dodatna značajka CLIP-a je da gotovo i nema slojeva tako da je povećani porast u kvaliteti ispisa te „precizan i gladak“ konačni objekt. [20]

Video: <https://www.youtube.com/watch?v=UpH1zhUQY0c>

Tablica 2. Vat Photopolymerisation

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
plastika i polimeri (smola koja se stvrdnjava pod utjecajem UV svjetla)	visoki leveli točnosti i kvalitetni završni proizvod	relativno skupi, dugo traje dodatna obrada i uklanjanje od ostatka, ograničena upotreba fotoosjetljive smole	3D Systems ProX 950 (Slika 23.)
Smole: Visijet range® (3D systems)	relativno brz, tipične velike dimenzije za izradu	često potrebni materijali za potporu objekta i dodatno stvrdnjavanje da bi dijelovi bili dovoljno čvrsti za strukturalnu upotrebu	Maksimalna težina objekta 450 kg Područje izrade: 1500 mm x 750 mm x 550 mm



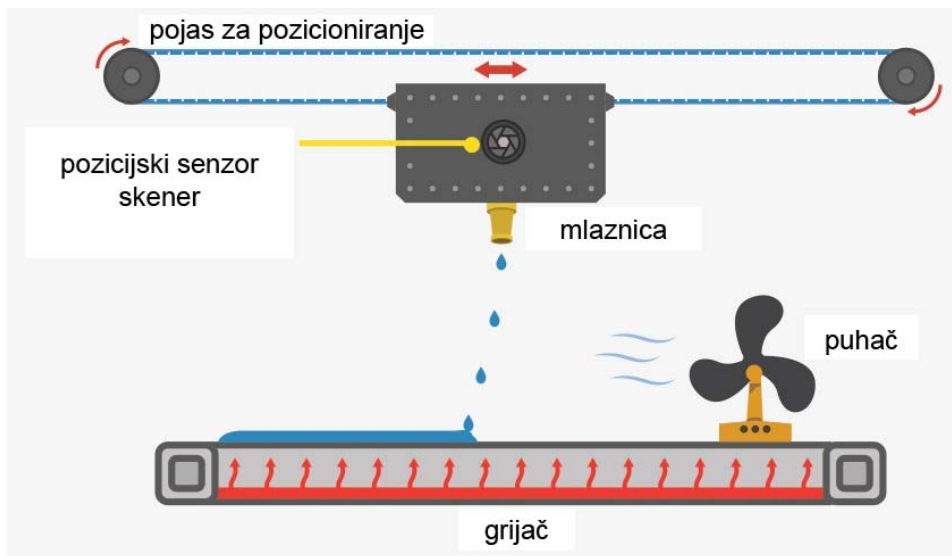
Slika 23. 3D Systems ProX 950

<http://www.3ders.org/articles/20131205-3d-systems-announces-new-micro-sla-3d-printer.html>

2.5.2. MATERIAL JETTING

Trodimenzionalno ink-jet printanje stvara objekte u sličnom postupku kao konvencionalni ink-jet pisač. Kapljice se formiraju pomoću oscilirajuće mlaznice, (Slika 24.) materijal izlazi iz mlaznice koja se zatim kreće horizontalno preko platforme. Kapljice su nabijene i pozicionirane na površinu koristeći nabijene otklon-ploče. To je kontinuirani sustav koji omogućava visoku razinu kontrole

kapljica i pozicioniranje. Materijal se ubrizgava na određenu površinu ili platformu, gdje očvrstne i gradi se sloj po sloj. Slojevi se stvrđavaju pomoću ultraljubičastog (UV) svjetla. Kapljice koje su ostale neiskorištene se recikliraju natrag u sustav. Uređaji su različite složenosti i metoda kontrole taloženje materijala. Višestruki materijali mogu se koristiti u jednom postupku i mogu se mijenjati u vrijeme faze stvaranja (Tablica 3).



Slika 24. Prikaz Material Jetting procesa

<http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/05/inkjet2.png?d5935f>

2.5.2.1. Drop on Demand (DOD)

Koristi se za ispuštanje materijala na potrebnu površinu. Kako bi se izgradio objekt koji se ispisuje, kapljice nastaju i pozicioniraju se u izgradnji površine. Dodaju se kapljice u nove slojeve sve dok nije cijeli objekt napravljen. S obzirom na to da materijal mora biti pohranjen u kapi, vrste materijala na raspolaganju za korištenje su ograničene. Polimeri i voskovi su pogodni i najčešće korišteni zbog njihove viskozne naravi i sposobnosti stvaranja kapljica. Viskoznost je glavna odrednica u procesu i postoji potreba za brzim ponovnim punjenjem spremnika što utječe na brzinu ispisa. Za razliku od kontinuiranog toka materijala, kapljice se disperziraju samo kada je to potrebno. Oslobađaju se promjenom tlaka u mlaznici utjecajem toplinskih ili piezoelektričnih pogona.

Toplinski pokretači vrlo brzo ispuštaju kapljice te koristite tanki film koji služi kao otpornik za formiranje kapljica. Piezoelektrična metoda često se smatra boljom jer omogućuje širi raspon materijala koji će se koristiti. Dizajn tipičnog DOD pisača obično uključuje rezervoar, brtveni prsten, piezo elemente i silikonski tanjur s mlaznicom koje drži zajedno ljepljivo otporno na visoke temperature.

Tablica 3. Material Jetting

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
polimeri i plastika	preciznim odlaganjem kapljica rezultira minimalnim otpadom	potrebne su potporne građevine	Objet500 Connex 3 (Slika 25.)
Polimeri: Polipropilen, HDPE, PS, PMMA, PC, ABS, HIPS, EDP	proces dozvoljava korištenje više materijala i različitih boja u jednom	visoka točnost je moguća ali su materijali ograničeni, samo polimeri i smole se mogu koristiti.	Područje izrade: 490 x 390 x 200 mm Debljina sloja: 16 mikrona Broj boja: 46

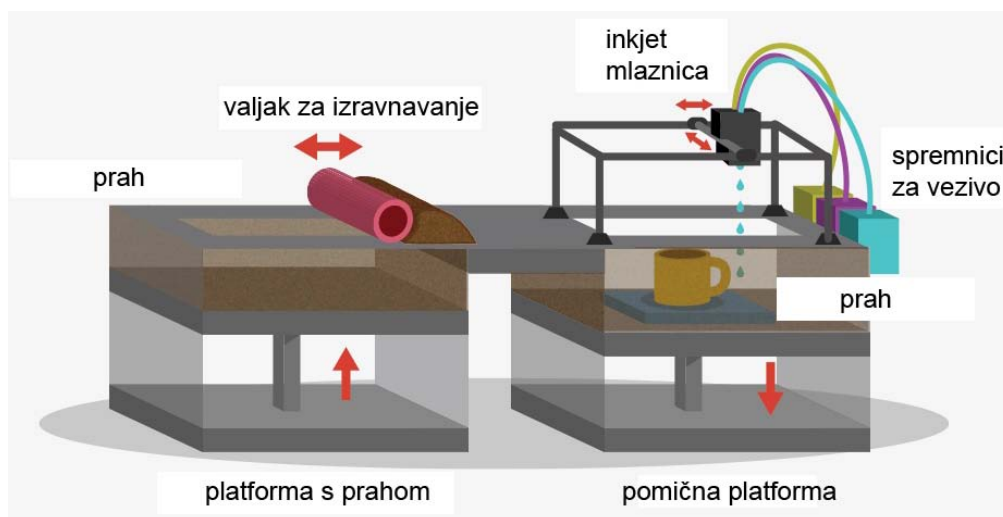


Slika 25. Objet500 Connex 3

<http://engatech.com/print-3d/polyjet-3d-printers/objet500-connex3/>

2.5.3. BINDER JETTING

Ovaj proces koristi dva materijala, prah i vezivo. Vezivno sredstvo, koje je obično u tekućem obliku, djeluje kao ljepilo između slojeva praha (Tablica 4). Ispisne glave se pomiču vodoravno duž X i Y osi stroja i izmjenično slažu slojeve praha i vezivnog materijala (Slika 26.). Nakon svakog sloja, objekt koji se ispisuje se spušta uz pomoć svoje platforme. Nevezani prah ostaje u položaju te okružuje objekt koji nastaje. Prednosti ovog procesa, uključuje činjenicu da su nepotrebni dodatni materijali za potporu jer sami slojevi praha imaju tu funkciju. Nadalje, može se koristiti raspon različitih materijala, uključujući keramiku i hranu. Daljnja jasna prednost postupka je sposobnost jednostavnog dodavanje paleta boja koja se mogu dodati u vezujuće sredstvo. Zbog metode vezanja, svojstva materijala nisu uvijek pogodna kod upotrebe za strukturalne dijelove (nisu toliko jaki) te unatoč relativno brzom ispisu, dodatna naknadna obrada može značajno produljiti vrijeme cjelokupnog procesa. Tehnologija se često naziva 3DP tehnologija i zaštićena je autorskim pravima pod tim imenom.



Slika 26. Prikaz Binder Jetting procesa

<http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/05/inkjet-binder.png?d5935f>

Tablica 4. Binder Jetting

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
metali: nehrđajući metal polimeri: ABS, PA, PC	moguće korištenje različitih boja, mogućnost korištenja različitih materija	nije uvijek prikladno za izradu strukturalnih dijelova s obzirom na to da se koristi za vezanje materijala	ExOneR2 (Slika 27.)
keramika, staklo	proces je generalno brži od drugih, korištenjem metode dvaju materijala dozvoljava veći broj raznovrsnih binder powder kombinacija s različitim mehaničkim svojstvima	dodatna obrada produljuje sveukupnu duljinu procesa.	Područje izrade: 203 x 203 x 152 mm Broj kapi: 4000 kapi veziva po mlaznici u sekundi Brzina: do 200 cm ³ /min



Slika 27. ExOneR2

<http://www.me.vt.edu/dreams/binder-jetting/>

2.5.4. POWDER BED FUSION

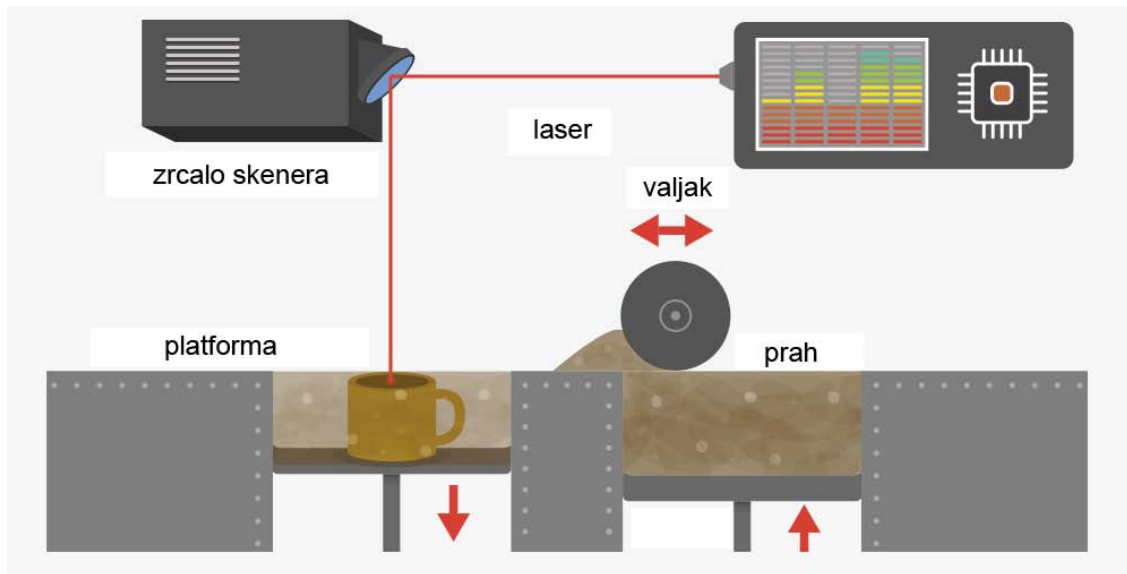
2.5.4.1. Selective Laser Sintering (SLS)

Selektivno lasersko sinterirajući stroj se sastoji od tri komponente: izvor topline (spaja materijale), metodu za kontrolu izvora topline i mehanizam za dodavanje

novih slojeva na prethodni materijal. Laser prolazi u X i Y osi, prema 3D podacima pohranjenim u stroju, preko sloja čvrsto zbijenog praha. Djeluje na površinu praškastog materijala te sinterira (spaja) čestice te tako tvori kruti spoj. Nakon što je svaki sloj završen, postupno se spušta valjak koji zaglađuje prah iznad površine sloja prije sljedećeg prolaza lasera koji prolazi nad nadolazećim slojem koji će formirati i spojiti s prethodnim. Konačno, cjelokupna platforma s praškom se odvaja iz stroja i višak praha se ukloni dobivajući finalni proizvod. SLS proces ne zahtijeva dodatnu strukturnu podršku zbog praškastog materijala koji pruža adekvatnu podršku tijekom procesa izrade. Građevna platforma se nalazi unutar temperaturno kontrolirane komore gdje je temperatura obično nekoliko stupnjeva ispod tališta materijala - smanjujući ovisnost o laseru da spaja zajedno slojeve. Komora je često ispunjen dušikom kako bi se povećala oksidacija i krajnja kvaliteta gotovog objekta. Potrebno je razdoblje hlađenja modela, osiguravajući visoku toleranciju i kvalitetu spoja. Neki strojevi prate temperaturu svakog sloja te tako prilagođavaju snagu i jačinu lasera što poboljšava kvalitetu. Međutim, zbog visokih temperatura potrebnih za lasersko sinteriranje, znatno se produljuje proces. Nadalje, poroznost je problem koji prati ovi proces od njegovih početaka i iako je bilo značajnih poboljšanja prema potpunoj gustoći dijelova, za neke aplikacije i dalje zahtijeva infiltraciju s drugim materijalom za poboljšanje mehaničkih svojstava.

2.5.4.2. Selective Laser Melting (SLM)

Selektivno lasersko taljenje u odnosu na SLS, je često brži proces, ali zahtijeva upotrebu inertnog plina. Ima veće troškove energije i obično slabu energetske učinkovitost od 10 do 20 %. Postupak koristi ili valjak ili oštricu za širenje novih slojeva praha u odnosu na prethodne slojeve (Slika 28.). Kada je nož u pitanju, često vibrira da bi se potaknula ravnomjernija raspodjela praha. Lijevak pruža svježju materijalnu opskrbu uz pomoć rezervoara koji se nalazi ispod ili sa strane platforme.



Slika 28. Prikaz SLM procesa

<http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/05/sintering.png?d5935f>

2.5.4.3. Selective Heat Sintering (SHS)

Selektivno toplinsko sinteriranje koristi termalno grijanu ispisnu glavu za spajanje praškastog materijala zajedno. Slojevi se dodaju valjkom, između procesa spajanja dva sloja plastičnog praha. Proces se koristi u izradi koncepta za prototipa i manje za strukturalne komponente. Uporaba termalne glave za ispis umjesto lasera smanjuje značajno razine toplinske i električne energije potrebne za proces.

2.5.4.4. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Izravno lasersko sinteriranje metala koristi isti postupak kao SLS, ali uz korištenje metalnog a ne plastičnog praha. Proces sinterira prah, sloj po sloj te je dostupan raznovrstan izbor tehničkih metala.

2.5.4.5. Electron Beam Melting (EBM)

U ovom procesu su slojevi kondenzirani pomoću elektronskog snopa da bi se topio metalni prah. Početna tehnologija je koristila elektromagnetske zavojnice za kontrolu snopa i vakuum pritisak. EBM nudi modele s vrlo dobrim svojstvima čvrstoće zbog ravnomjerne raspodjele temperature tijekom spajanja. Taj proces

omogućava visoku kvalitetu finalnog proizvoda te ga čini pogodnim za proizvodnju visoko standardnih dijelova koji se koriste za zrakoplovstvo i medicinsku primjenu. Proces nudi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode stvaranja implantata, uključujući proteze za kuk. U odnosu na CNC, pomoću EBM tehnologije, s titanom debljine sloja od 0.1 mm, mogu se postići bolji rezultati, u bržem vremenu i s manje troškova do 35%.

Naknadna obrada uključuje uklanjanje viška praha i daljnje čišćenje te rad na CNC-u. Jedna od prednosti i zajednički cilj naknadne obrade je povećanje gustoće i s tim strukturnu snagu dijela. Tekuća faza sinteriranja je metoda taljenje metala u prahu ili različitih vrsta praha kako bi se postigla homogenizacija i veća kontinuiranost mikrostrukture kroz materijal. Kod ove metode treba uzeti u obzir mogućnost skupljanja materijala tijekom procesa. Vrući izotaktni pritisak je još jedan način da se poveća gustoća; zapečaćena vakuum komora služi da bi se napregnuo, visokim tlakom i temperaturom, materijal. Tehnika poboljšava snagu, ali produljuje i poskupljuje sveukupni proces. [21]

Tablica 5. Powder Bed Fusion

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
bilo koji praškasti materijal	relativno jeftin, prikladan za vizualne modele i prototipove, mogućnost integracije tehnologije malih dimenzija, uređaj dimenzija prikladan za ured	relativno spor proces, nedostatak strukturnih svojstava materijala	3S Systems ProX 500 (Slika 29.)
	prah djeluje kao integrirani sustav strukturnih potpora, veliki raspon materijala za korištenje	ograničene dimenzije, troši dosta energije, završni proizvod ovisi o finoći zrna	Područje izrade: 381 x 330 x 457 mm Debljina sloja: 0.08 - 0.15 mm Brzina: 2 l /h



Slika 29. 3S Systems ProX 500

<http://www.directindustry.com/prod/3d-systems/product-19418-1502979.html>

2.5.5. MATERIAL EXTRUSION

2.5.5.1. Fused Deposition Modelling (FDM)

Istiskivanje termoplastičnog materijala lako je najčešći i najprepoznatljiviji 3D proces ispisa (Tablica 6.). Najpopularniji naziv za taj proces je tehnologija modeliranja topljenim depozitima, nastala 1988. godine tvrtka Stratasys je razvila proces i patentirala tehnologiju pod tim nazivom.

Materijal se uvlači kroz mlaznicu gdje se grije i odlaže sloj po sloj. Mlaznica se pomiče horizontalno dok se platforma pomiče vertikalno gore - dolje nakon svakog novog sloja (Slika 30.). Proces ima mnogo faktora koji utječu na konačnu kvalitetu modela te ima veliki potencijal i održivost kada su ti čimbenici uspješno kontrolirani. Dok je FDM tehnologija slična svim 3D postupcima ispisa, tako što gradi sloj po sloj, ona se razlikuje u tome što se materijal kontinuirano dodaje kroz usko grlo pod stalnim tlakom. Ovaj tlak mora biti stabilan i pri stalnoj brzini da bi se omogućili što precizniji rezultati. Slojevi materijala se često dodaju u stroj u obliku čahure te se mogu povezati uz pomoć povišene temperature ili pomoću kemijskih sredstava. Tipična debljina sloja varira od 0.178 mm – 0.356 mm. Najčešće se koriste dvije vrste plastičnih vlakana: ABS (akrilonitril-butadien stiren) i PLA (poli-mliječna kiselina), ali i mnogi drugi

materijali su dostupni kao: popunjeni dijelovima drva, vodljivi, fleksibilni itd. Prednosti procesa uključuju korištenje dostupne ABS plastike koja može proizvesti modele s dobrim strukturnim svojstvima, blizu konačnom modelu proizvodnje. U slučaju malih volumena, ovaj proces može biti ekonomičniji način nego drugi. Međutim, proces zahtijeva mnogo kontrolnih čimbenika kako bi se postigla visoka završna kvaliteta. Mlaznica koja postavlja materijal će uvijek imati polumjer, s obzirom na to da nije moguće napraviti savršeno kvadratnu mlaznicu te to utječe na konačnu kvalitetu ispisanog objekta. Točnost i brzina su niske u usporedbi s ostalim procesima i kvaliteta konačnog modela je ograničena gustoćom materijala. Kada se koristiti postupak za komponente kojima se mora postići visoka tolerancija moraju se uzeti u obzir gravitacija i napetost površine. Jedna metoda naknadne obrade, da bi se poboljšao vizualni izgled modela, je poboljšanje propusnosti materijala. Metode uključuju povećanje temperature i korištenje smole. Kao i kod većine naknadne obrade toplinskim procesima, moguće je skupljanja materijala, na to treba pripaziti ako je potrebna visoka tolerancija konačnog ispisanog objekta.

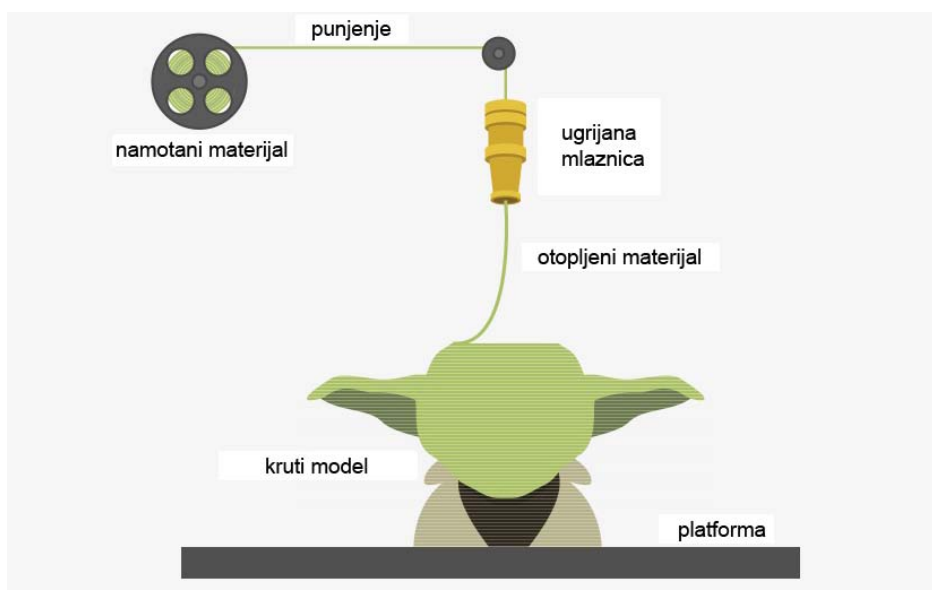
2.5.5.2. Freeform Fabrication (FFF)

3D pisači nastali od 2009. godine uglavnom koriste proces sličan FDM-u. Zbog patenata koji drži Stratasys dobiva se naziv Prostoručna proizvodnja (FFF).

Najčešće se koristi na mnogim domaćim i jeftinim hobi 3D printerima.

U FFF i FDM procesima su potrebne potpore, za bilo koje aplikacije, s visećom geometrijskom konstrukcijom. Za FDM je to topiv u vodi materijal koji omogućuje strukturnu podršku te relativno lako odstranjivanje, nakon što se ispis završi. Alternativno, nosivi materijali koji se mogu ukloniti ručnim lomljenjem su također mogući. Strukturne podrške, ili nedostatak istih, općenito su ograničenije kod FFF 3D printera. Međutim, s obzirom na poboljšanja kao dvostruke mlaznice, postaje zanemariv. Ova tehnologija stvara mnogo manje točne modele, ali se stalno poboljšava.

Proces može biti spor za neki dio geometrije i sloj za slojem prijanjanje može biti problem što rezultira u dijelovima koji nisu vodonepropusni. Naknadnom se obradom s acetonom mogu riješiti ovi problemi.



Slika 30. Prikaz procesa FFF/FDM-a

<http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/05/FFF-Extrusion.png?d5935f>

Tablica 6. Material Extrusion

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
polimeri i plastika	rasprostranjen i jeftiniji proces	radijus mlaznice ograničava i reducira kvalitetu finalnog proizvoda, slaba preciznost i spor proces naspram drugih procesa	MakerBot Replicator (Slika 31.)
Polimeri: ABS, Najlon, PC, PC, AB	moguće korištenje lako pristupne ABS plastike, koja ima dobra strukturalna svojstva	točnost ovisi o gustoći materijala, potreban je konstantan pritisak materijala da bi se povećala kvaliteta	Područje izrade: 25.2x19.9 x15.0 cm Volumen: 7,522 cm ³



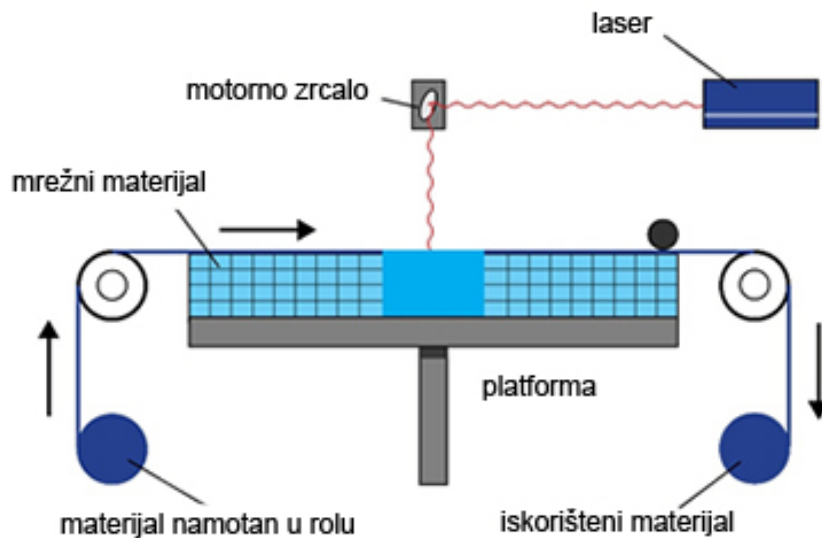
Slika 31. MakerBot Replicator

https://s3.amazonaws.com/enterprise-production-cdn/media/catalog/product/r/e/replicator_default.png

2.5.6. SHEET LAMINATION

2.5.6.1. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Laminiranje je jedno od prvih stvorenih aditivnih proizvodnih tehnika. Koriste se razni plošni materijali, najčešće papir (Slika 32.). Prednosti uključuju korištenje A4 papira, koji je lako dostupan i jeftin, kao i relativno jednostavan i jeftin proces u usporedbi s drugima (Tablica 7.). LOM koristi sloj po sloj pristup, koristeći papir kao materijal i ljepilo umjesto zavarivanja. Laminirani predmeti se često koriste za estetske i vizualne modele i nisu prikladni za strukturno korištenje. Dok je strukturna kvaliteta dijelova ograničena, dodajući ljepila i boje, naknadnim brušenjem može se poboljšati izgled.



Slika 32. Prikaz procesa laminacije

<http://www.lboro.ac.uk/media/wwwlboroacuk/external/content/research/amrg/Direct%20Energy%20Deposition%20-%20process.jpg>

2.5.6.2. Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

Proces koristi limove koji su povezani pomoću ultrazvučnog zavarivanja, nekada zahtijeva dodatnu CNC obradu metala. Za razliku od LOM tehnike, metal se ne može lako ukloniti (ručno) i nepoželjni se materijal mora se ukloniti strojnom obradom. Upotrebom metalnih traka, koje su 0.15 mm debljine i 25 mm širine, je neka vrsta uštede materijala jer ga se manje naknadno reže. Glodanje se može obavljati nakon svakog dodanog sloja ili nakon cijelog procesa. Metali koji se koriste su aluminij, bakar, inox i titan. Niska temperatura procesa omogućuje stvaranje unutarnje geometrije objekta. Jedna ključna prednost je da proces može povezati različite materijale i zahtijeva relativno malo energije s obzirom na to da se metal ne topi, već se koristi kombinacija ultrazvučne frekvencije i tlaka. Materijali se lakše vežu i pomoću deformacije metala koje omogućuju više kontakta između površine. Naknadna obrada zahtijeva uklanjanje dijelova od okolnog materijala.

2.5.6.3. „Selective Deposition Lamination“ (SDL)

3D proces ispisa koji stvara objekte koristeći standardni papir A4 formata. Svaki novi sloj papira je fiksiran za prethodni sloj koristeći vezivo, koje se aplicira u

skladu s danim podacima. Na dijelovima koje želimo 3D oblikovati primjena veziva je puno veća, dok u ostalim dijelovima je manja, koji tako služe kao potpora. Ovakav princip omogućuje relativno lakše odvajanje objekta od ostatka materijala. Ljepilo se dodaje nakon što je dodan novi sloj papira kroz 3D pisač i pozicionira se na određeni dio objekta. Platforma se zatim pomiče prema zagrijanoj ploči uz potrebni pritisak. Na ovaj se način osigurava jačina veze između dva sloja papira. Pomična platforma se zatim vraća na početnu poziciju i uz pomoć volfram-karbid oštrice označavaju se krajevi objekta. Kada je završen ovaj proces rezanja, 3D pisač polaže novi sloj ljepila te se sveukupni proces ponavlja dok se ne dobije željeni objekt. SDL proces je jedan od rijetkih 3D procesa koji omogućuje proizvodnju potpuno bojanih komponenti koristeći CMYK paletu boja. Prednost ovog procesa je korištenje najobičnijeg papira, koji ne zahtijeva dodatno obradu te se smatra i ekološkim, dok mu je nedostatak nemogućnost izrade kompleksnih geometrijskih dijelova i dimenzije konačnog objekta su ograničene na format papira. [22]

Tablica 7. Sheet Lamination

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
papir, plastika i određene vrste metalnih limova	brz i jeftin proces, lakoća upravljanja materijala dok snaga i integritet modela ovisi o ljepilu koje se koristi	završni izgled može varirati ovisno o papiru ili plastičnom materijalu, zahtijeva naknadnu obradu kako bi se postigao željeni učinak	MCor Matrix 300 plus (Slika 33.)
najčešće papir A4 dimenzija	brzo rezanje zahvaljujući tome što se samo režu konture ne cijeli poprečni presjek	ograničeni materijali za korištenje, vezivni procesi zahtijevaju više istraživanja kako bi dodatno unaprijedili proces	Područje izrade: 256 x 169 x 150 mm Debljina sloja: 0.1 mm

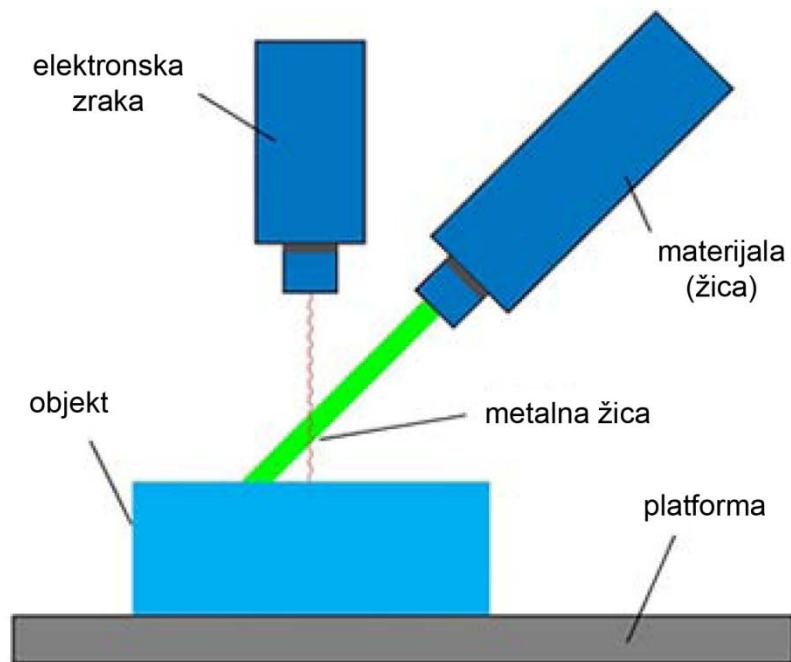


Slika 33. MCor Matrix 300 plus

<http://www.aniwaa.com/product/3d-printers/mcor-matrix-300/>

2.5.7. DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

Ovaj složeni proces obuhvaća raspon tehnika često korištenih u svrhu dodavanja materijala na postojećim dijelovima (Tablica 8.). Tipično uređaji se sastoje od mlaznice montirane na „ruku“ s mogućnošću okretanja više osi, koja odlaže rastopljeni materijal na specifičnu podlogu, te se zatim stvrdnjava (Slika 34.). Proces je sličan principu materijalne ekstruzije, razlika je u mlaznici koja nije fiksirana u određenoj točki i zahvaljujući tome može polagati materijal pod bilo kojim kutem. Materijali koji se koriste su polimeri, keramika i metal; najčešće ipak se koristi metal, u obliku praha ili žice.



Slika 34. Prikaz DED procesa

<http://www.lboro.ac.uk/media/www/lboro.ac.uk/external/content/research/amrg/vat-process.jpg>

2.5.7.1. Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Ovom se tehnikom dobivaju metalni dijelovi koristeći metalni prah koji se ubrizgava u rastaljeni bazen dobiven uz pomoć visokonaponskog lasera. Istovremeno, dok se prah taloži, on se skenira da bi se postigao željeni dizajn konačnog metalnog objekta. Uzastopni slojevi se talože, dobivajući trodimenzionalnu metalnu konstrukciju. LENS tehnologija omogućava izradu metalnih dijelova izbjegavajući klasični proces koji je inače potreban. Dramatično ubrzava proces izrade dijelova od nehrđajućeg metala, titanija i drugih metala; mehanička svojstva su slična ili bolje nego kod tradicionalne izrade. [23]

2.5.7.2. Directed Light Fabrication

Razvijen je u Los Alamos Nacionalnom laboratoriju, direktna svjetlosna izrada omogućava proizvodnju metalnih dijelova. Postiže se spajanjem čestica metalnog praha, vođene uz pomoć plina, u žarišnoj zoni laserske zrake koja je programirana za kretanje uzdužno ili po cijelom dijelu presjeka. Potpuno gusti

metal se gradi sloj po sloj, te se učvršćuje pod uvjetima brzog skrućivanja („rapid solidification“) da bi se postigao željeni oblik.

2.5.7.3. Direct Metal Deposition (DMD)

Izravno taloženje metala se koristi za izradu dijelova, popravak i obnovu potrošenih ili oštećenih komponenata te za primjenu premaza koji su otporni na koroziju. Moguće je korištenje 6 osi taloženja i više metalnih materijala odjednom. Dijelovi se proizvode izravno iz CAD podataka polaganjem metalnog praha pomoću laserskog topljenja i patentirane zatvorene petlje koja kontrolira sistem da bi se omogućila točnost dimenzija i cjelovitost materijala. [24]

2.5.7.4. Laser Cladding

Obloga laserom je postupak taloženja materijala, u obliku praha ili žice, koji se rastaljuje upotrebom lasera. Koristi se za izradu kompleksnih metalnih dijelova, poboljšanje mehaničkih svojstava, povećanje otpornosti na koroziju ili popravak istrošenih dijelova.

Prah se ubrizgava u sustav pomoću koaksijalnih ili bočnih mlaznica. Laserskom obradom metalni prah se pretvara u talinu koja se zatim postavlja na podlogu. Pomicanjem podloge omogućuje skrućivanje tako tvoreći metalnu traku. Ova tehnika je najčešća, dok neki procesi uključuju pomicanje lasera (mlaznice) preko podloge da bi se skrutio metal. Podloga je vođena CAD sustavom koji određuje gdje će se određena traka umetnuti, tvoreći traženi objekt na kraju putanje. [25]

Tablica 8. Directed Energy Deposition

MATERIJALI	PREDNOSTI	NEDOSTACI	Primjer printera
Materijali: u obliku praha ili žice	Sposobnost kontrole strukture zrna do visokog stupnja omogućujući popravke funkcionalnih dijelova visoke kvalitete	ograničeni materijali, procesi spajanja (fuzije) zahtijevaju više istraživanja kako bi se dodatno unaprijedio proces	LCF12000 (Slika 35.)
metali – kobalt, krom, titanij; polimeri; keramika			



Slika 35. LCF12000

<http://www.balliu.be/wp-content/uploads/2015/04/LCF12000.jpg>

3. PRAKTIČNI DIO

3.1. 3D PORTRET

Istraživanje fotogrametrije; njene povijesti, primjene i tehnologije, obavezni je dio pripreme za izradu fotogrametrijskog modela i konačno 3D modela. Dobra pripremljenost i organizacija potrebnih elemenata su ključni za što bolji konačni rezultat. Ovaj projekt je postignut s minimalnim financijskim troškovima tj. korišteni su već dostupni uređaji te besplatni kompjuterski programi.



Slika 36. Prikaz primjera središnje točke, mjerne trake i pomoćnih oznaka

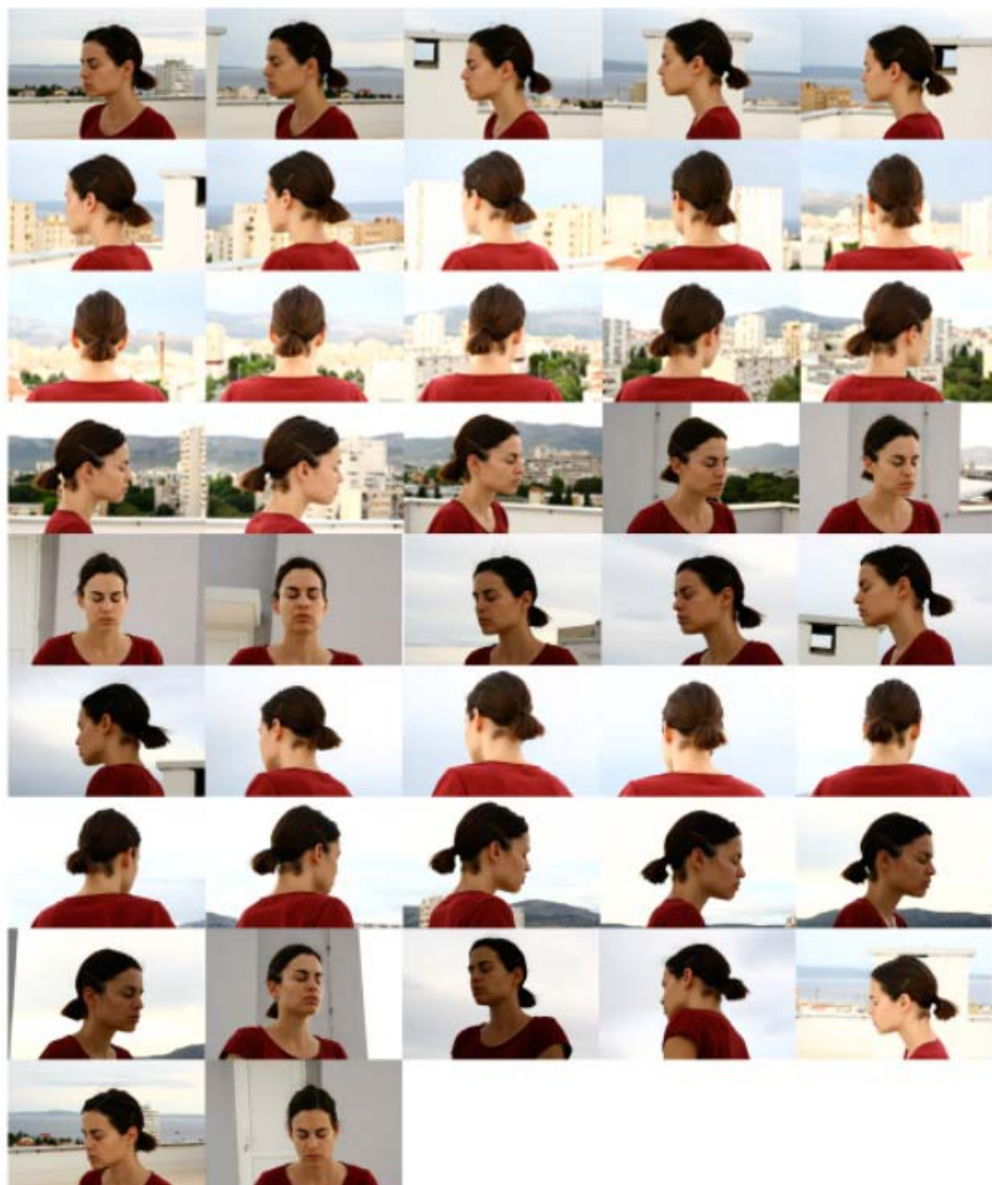
Autorsko djelo

Kod izrade 3D portreta osobe potreban je dobrovoljac koji je voljan mirno sjediti određeni vremenski period. S obzirom na korištenje samo jednog fotografskog aparata – Canon 350D sa 50 mm objektivom, potrebno je prethodno označiti središnju točku na podu koja služi pozicioniranju modela u prostoru. Mjernom trakom (Slika 36.) se zatim mjeri jednaki radijus udaljenosti od središnje točke do pozicije fotografskog aparata i označava ljepljivom trakom svakih par stupnjeva.

Preporučljivo je koristiti fiksni objektiv naspram zoom objektivu. Ako nije moguće snimanje u zatvorenoj prostoriji, kontroliranih unutarnjih uvjeta, onda treba pripaziti na par faktora kod snimanja u otvorenom prostoru. Potrebno je

suho i oblačno vrijeme – difuzna prirodna svjetlost, da bi se dobio podjednako osvijetljen model iz svih kuteva, s minimalnom brzinom vjetera. Općenita preporuka za snimanje portreta vani jest 2 sata poslije izlaska ili prije zalaska Sunca dok je udaljenost od modela 1,5 metar.

Model se pozicionira na mjesto središnje točke i pomoću ranije postavljenih ljepljivih traka lakše je pripaziti na konstantnu jednaku udaljenost. Svakih 11° do 15° stupnjeva snima se model (Slika 37.) iz normalne zatim „ptičje“ i „žablje“ perspektive rezultirajući idealnim brojem, između 40 i 70, fotografija.



Slika 37. Korištene fotografije
Autorsko djelo

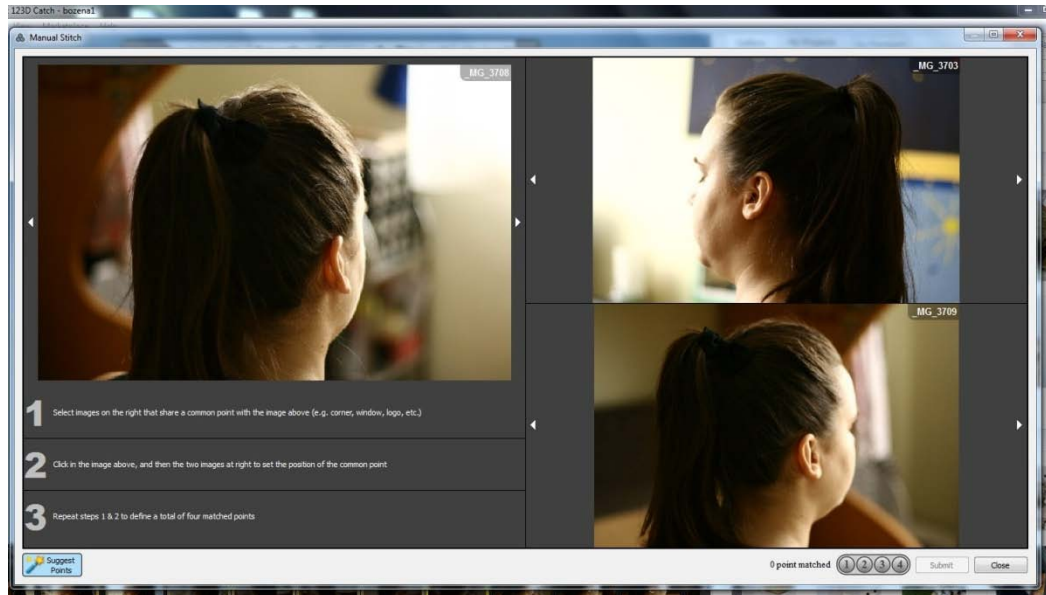
Poželjno je snimati veći broj fotografija ako slučajno kasnijom analizom se pokaže da nisu sve oštre. Neoštre fotografije se ne mogu koristiti jer one samo zbunjuju program što rezultira netočnom reprezentacijom. Nakon selekcije adekvatnih fotografija, istih vrijednosti, učitavaju se (Slika 38.) u specijalizirani program za fotogrametrijsku obradu, u ovom slučaju, Autodeskov „123D Catch“.



Slika 38. Prikaz slijeda učitavanja fotografija u fotogrametrijski program
Autorsko djelo

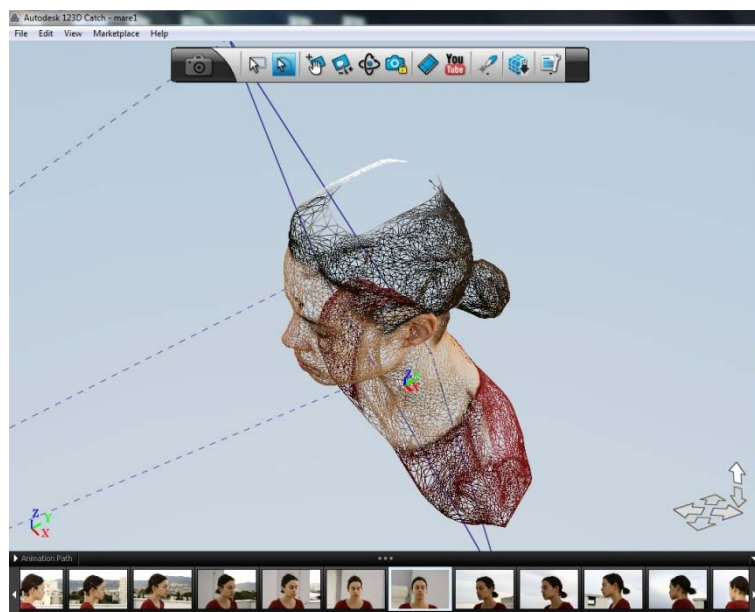
Catch koristi svoj Cloud (središnja baza koja zauzima previše prostora da bi se nalazila unutar samog programa – iz tog razloga potrebna je konstantna internet povezanost) u kojem se izabrane fotografije analiziraju i spajaju

zajedno, konstruirajući 3D prikaz (npr. Slika 41.). Nekada program ne može automatski spojiti sve fotografije, tada je njih potrebno ručno (manualno) spojiti s ostatkom prikaza. Program (Slika 39.) sam pokaže koje su to fotografije i način na koji se spajaju.

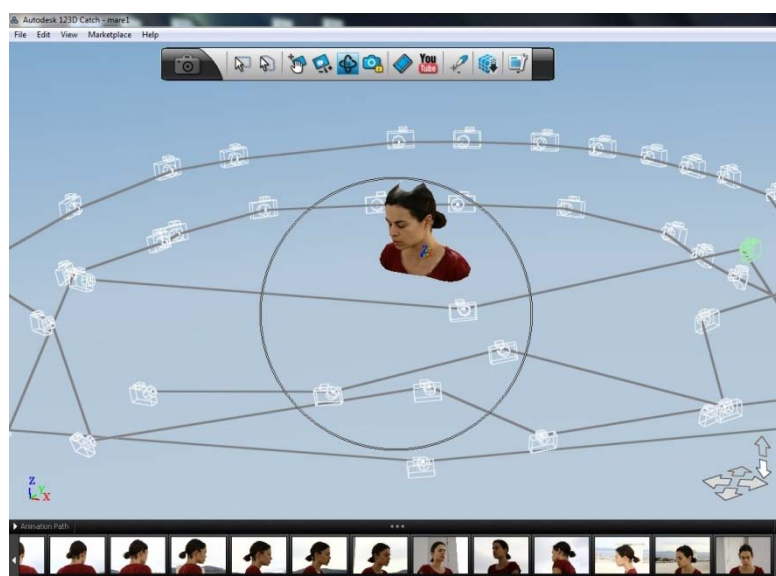


Slika 39. Prikaz ručnog spajanja fotografija u 123D Catchu
Autorsko djelo

Potrebne su po četiri iste referencijalne točke koje moraju biti prisutne na tri fotografije iz različitih kutova. U slučaju da su sve fotografije automatski spojene (Slika 40.), ako je rezultat zadovoljavajući, eksportira se datoteka u prikladnom formatu za daljnju obradu.

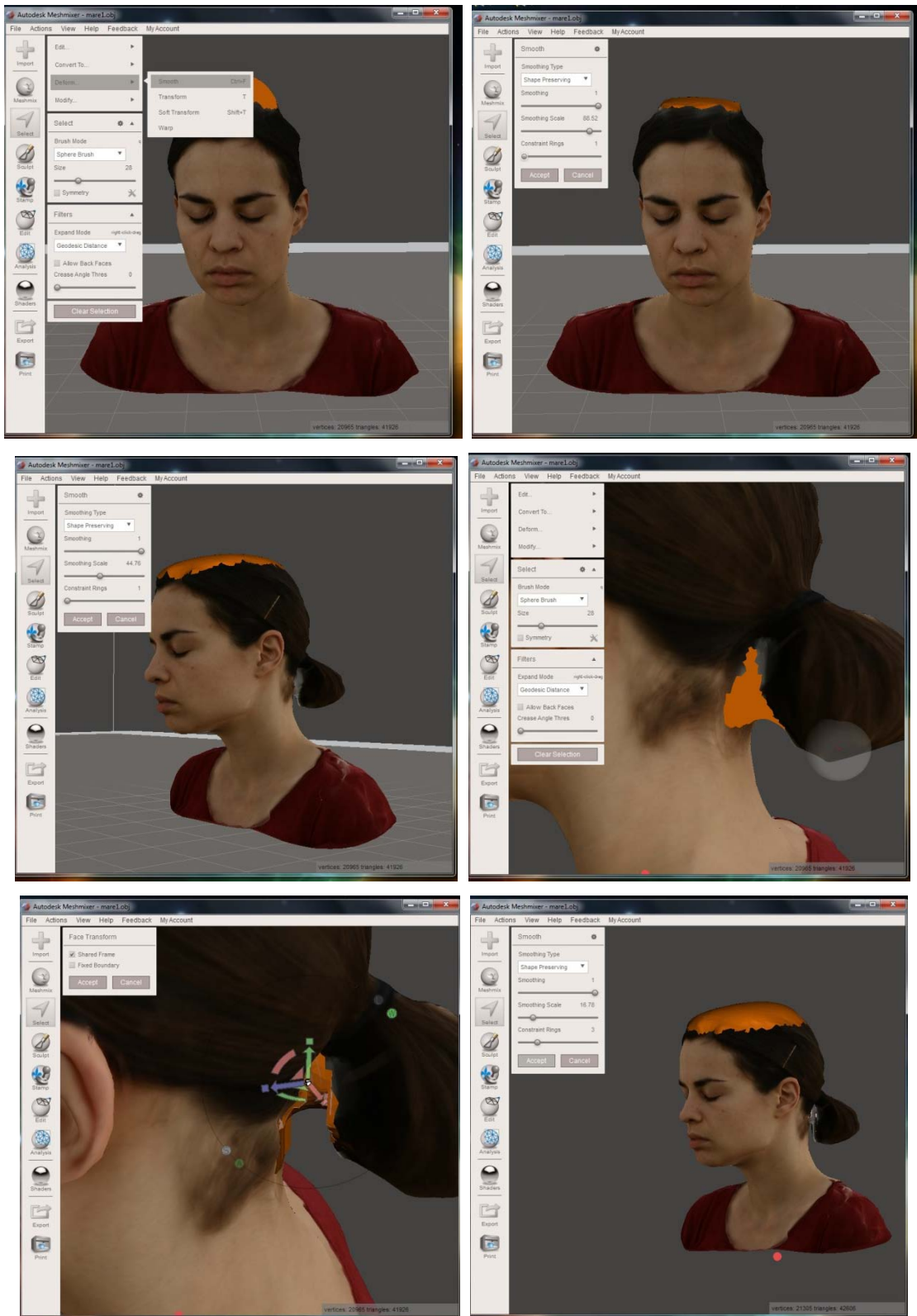


Slika 40. 3D „wireframe“ prikaz u 123D Catchu
Autorsko djelo

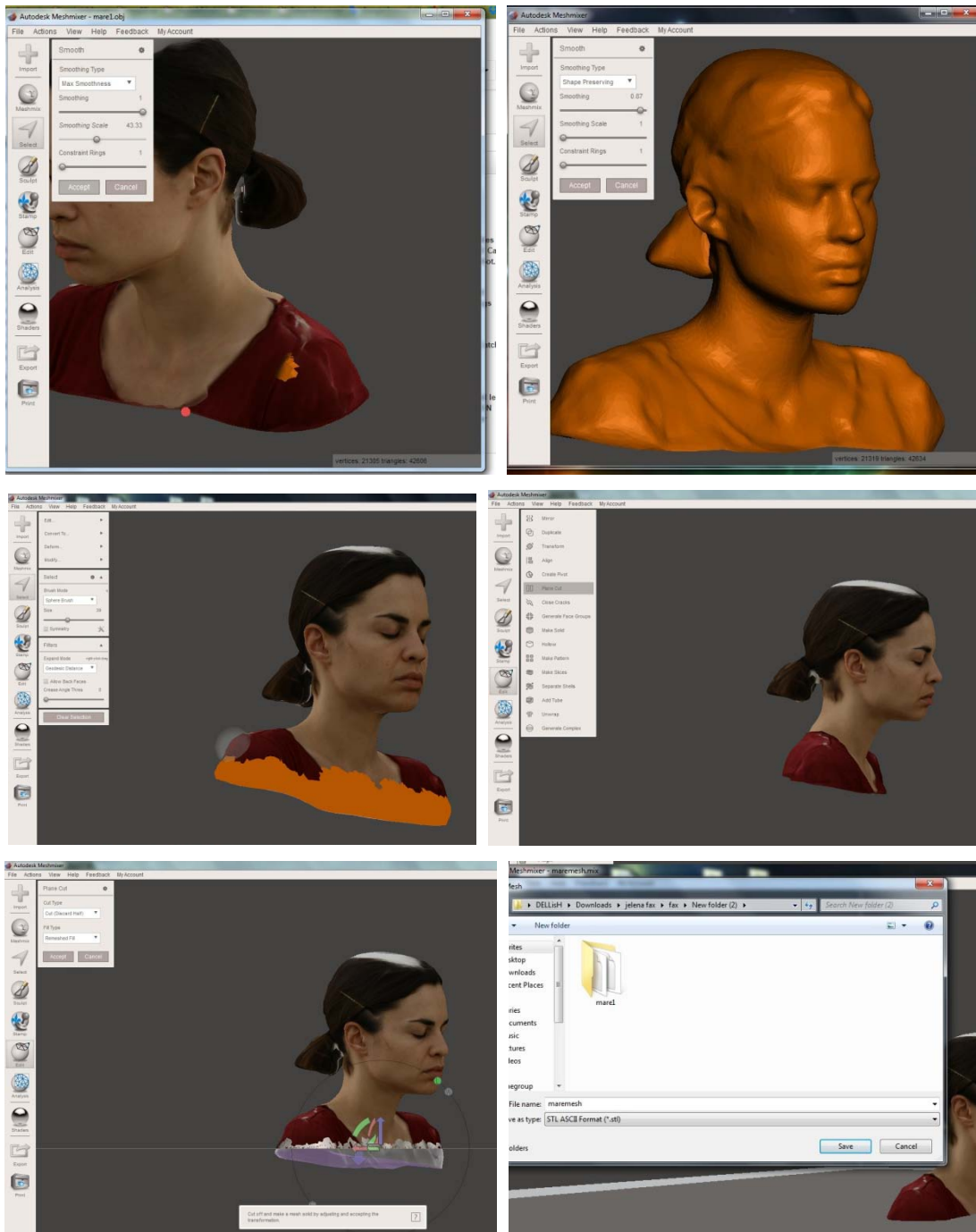


Slika 41. Prikaz pozicija fotoaparata u prostoru
Autorsko djelo

Kompjuterski programi za obradu mreža (meshova) služe, u ovom slučaju, za ispravljanje mogućih nedostataka, kao npr. ako 3D model ima rupe ili neravnine koje se trebaju izravnati (Slika 42.A).



Slika 42.A Prikaz obrade 3D modela u MeshMixeru 1
Autorsko djelo

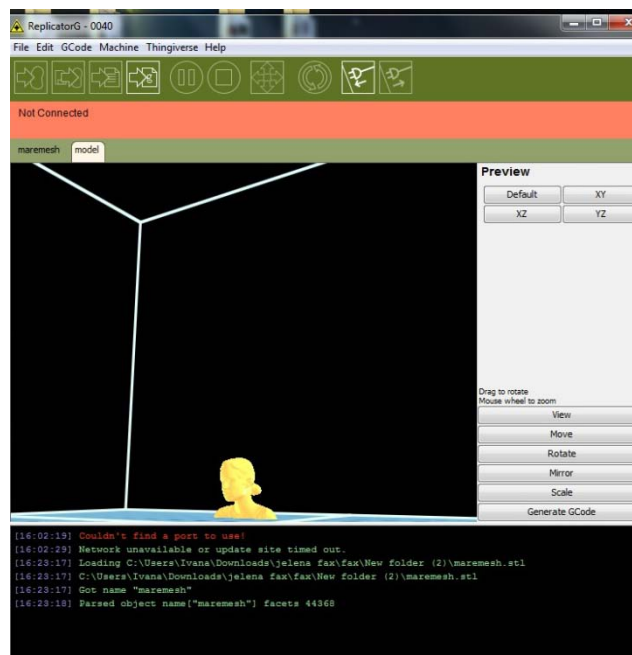


Slika 42.B Prikaz obrade 3D modela u MeshMixeru 2
Autorsko djelo

Postoji veliki raspon programa u kojima je moguća ovakva vrsta obrade i svaki je drugačiji, stoga su drugačiji i mogući rezultati (Slika 42.B) . Za ovaj projekt odabran je Autodeskov MeshMixer koji je poprilično jednostavan za korištenje, što znači da je i prikladan kod amaterskog poznavanja manipulacije meshova.

Nakon potrebne manipulacije i obrade eksportira se 3D oblik u STL format koji se koristi za 3D ispisa.

Prije 3D ispisa je potrebno u trećem kompjutorskom programu (Slika 43.) proći određene korake koji služe za konačnu konfiguraciju 3D oblika



Slika 43. Prikaz 3D modela prije 3D ispisa
Autorsko djelo

Trenutno su tehnologije ispisa najprikladnije za 3D portret Drop on Demand, Freeform Fabrication, laminacija i SDL. Ovi procesi koriste lagane materijale (prikladne kada nema kompliciranih strukturalnih dijelova) kao polimere, vosak te papir u kombinaciji s vezivom (ljepilom); neki od njih kao SDL su prvenstveno osmišljeni za ispisa u boji 3D modela ljudi. Treba napomenuti da, obrada u programu za oblikovanje meshova zavisi o konačnoj vrsti aditivnog procesa koji se koristi za 3D ispisa.

4. ZAKLJUČAK

Čovjek ima 5 glavnih osjetila. Uglavnom ih koristi uravnoteženo, međutim osjetilo vida prevladava te se s razlogom kaže da su ljudi vizualna bića. Sve što vide žele dotaknuti zbog znatiželje, ono je glavni instinkt bez kojeg se kao civilizacija ne bi nikada razvili. Osjećaj dodira s vidom pruža informacije s kojima lakše razumiju i pozicioniraju određeni objekt u prostoru.

Razvoj i napredak fotografije direktno je povezan s ljudskom znatiželjom i željom za ostavljanjem fizičkog traga, neoborivi dokaz našeg postojanja. Skupljanje, kategoriziranje i upotrebljavanje informacija su svakodnevne glavne funkcije čovjeka. Kada se spoji više vrsta tehnologija koje imaju dugu povijest upotrebe i provjerene rezultate, dobiva se uvid u nove mogućnosti napretka koje tehnologija pruža. Koristeći tehnologiju fotografije, klasični pristup portretu te nove ogranke fotogrametrije, kombinirajući ih s uzbudljivom tehnologijom 3D ispisa, primjena je beskonačna.

Iznimna postignuća u svijetu tehnologije trenutno su, među ostalom, moguća primjenom 3D snimanja/skeniranja, 3D manipulacije i 3D ispisa.

Tehnike ispisa digitalne fotografije dosad su bile ograničene materijalima kao papir ili tekstil. Sada je moguće ispisati fotografiju u tri dimenzije sa širokim rasponom različitih materijala za korištenje i pomoću raznih procesa koji daju različite rezultate. Proces 3D ispisa koji se koristi ovisi o motivu fotografije i načinu obrade 3D objekta u softveru

U opsegu ovog rada je uspješno sniman portret osobe u otvorenom prostoru. Koristeći programe za fotogrametriju portret je spojen u jednu trodimenzionalnu cjelinu. Daljnjim istraživanjem u MeshMixeru su ispravljene moguće nastale greške te je oblikovana 3D mreže portreta i pravilno pozicionirana. S tim je završena kompjuterska obrada 3D portreta koji se zatim eksportira u STL formatu te je spreman za 3D ispis.

5. LITERATURA

1. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing, 3D printing, 10.04.2016.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_obscura, *Camera obscura*, 29.03.2016.
3. Miroslav Mikota (2000). *Kreacija fotografijom*, V.D.T. PUBLISHING, Zagreb
4. Anthony Hamber and Phil Green (1999). *Digital Photography*, Pira International and British Printing Industries Federation, London
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Steven_Sasson, *Steven Sasson*, 20.04.2016.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Portrait_photography, *Portrait photography*, 29.03.2016.
7. BIM Task Group (2013). *Client Guide to 3D Scanning and Data Capture The Building Information Modelling*, dostupno na: <http://www.bimtaskgroup.org/wp-content/uploads/2013/07/Client-Guide-to-3D-Scanning-and-Data-Capture.pdf>, 22.06.2016.
8. <http://mcorctechnologies.com/zh-hans/the-pros-and-cons-of-photogrammetry-vs-3d-scanning-for-3d-printed-figurines/>, *Photogrammetry vs. 3D Scanning for 3D Printed Figurines: Pros and Cons*, 22.06.2016.
9. T. Schenk (2005). Introduction to Photogrammetry, <http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf>, 20.06.2016.
10. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=52359>, *Rektifikacija*, 20.07.2016.
11. <http://www.photogrammetry.com/>, *What is Photogrammetry?*, 10.06.2016.
12. Klaus Hanke & Pierre Grussenmeyer Corfu (2002). Architectural photogrammetry: Basic theory, Procedures, Tools,

- http://www.isprs.org/commission5/tutorial02/gruss/tut_gruss.pdf,
22.06.2016.
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_123D, *Autodesk 123D*,
20.07.2016.
 14. <http://meshlab.sourceforge.net/>, *MeshLab*, 20.7.2016.
 15. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>, *The Free Beginner's Guide*, 12.04.2016.
 16. <http://www.imaginethat-3d.com/kodama-hideo-and-photopolymer-3d-printi>, *Kodama, Hideo and Photopolymer 3D Printing*, 21.06.2016.
 17. <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>, *Types of 3D printers or 3D printing technologies overview*, 15.04.2016.
 18. https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_Ground_Curing, *Solid Ground Curing*,
16.04.2016.
 19. http://3dpwiki.org/index.php?title=Film_Transfer_Imaging, *Film Transfer Imaging*, 16.04.2016.
 20. <http://3dprinting.com/news/carbon3d-reaches-incredible-3d-printing-speeds-with-clip/>, *Carbon3D Reaches Incredible 3D Printing Speeds with CLIP!*, 16.04.2016.
 21. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>, *About Additive Manufacturing*, 15.04.2016.
 22. <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>, *What is 3D printing?*, 10.03.2016.
 23. <http://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>, *Laser Engineered Net Shaping*,
16.04.2016.
 24. <http://www.mbraun.com/images/201/POM%20Group.pdf>, *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition*, 16.04.2016.
 25. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_\(metalworking\)#Laser_cladding](https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_(metalworking)#Laser_cladding),
Laser Cladding, 16.04.2016.