

PRIMENA REVERZIBILNOG INŽENJERSKOG DIZAJNA KOD IZRADE REPLIKA EKSPONATA IZ "MUZEJA AFRIČKE UMETNOSTI"**APPLICATION OF REVERSIBLE ENGINEERING DESIGN IN THE CREATION OF REPLICAS OF EXHIBIT FROM THE "MUSEUM OF AFRICAN ART"**

Emilija Stankijević, Željko Santoši, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – INDUSTRIJSKO INŽENJERSTVO

Kratak sadržaj – U okviru ovog rada je prikazana studija slučaja u okviru koje je izrađen 3D model po uzoru na predmet iz „Muzeja afričke umetnosti“ u Beogradu. 3D digitalizacija muzejskog predmeta je izvršena tehnikom fotogrametrije, upotrebom fotoaparata Canon EOS 1200D, nakon čega je dobijen površinski 3D model. Obradom istog u softveru Agisoft Metashape je pripremljen model za 3D štampu na štampaču Ultimaker S5, u njegovoj realnoj veličini i u jednobojnom filamentu, kako je namenjen za taktilnu svrhu u muzeju.

Ključne reči: Reverzibilno inženjerstvo, fotogrametrija, 3D dizajn, taktilna reprodukcija

Abstract – This paper presents a case study in which a 3D model was created based on an object from the "Museum of African Art" in Belgrade. The 3D digitization of the museum object was performed using the photogrammetry technique, using a Canon EOS 1200D camera, after which a surface 3D model was obtained. By processing it in the Agisoft Metashape software, a model was prepared for 3D printing on the Ultimaker S5 printer, in its real size and in monochrome filament, as intended for tactile purposes in the museum.

Keywords: Reverse Engineering, Photogrammetry, 3D design, Tactile Playback

1. UVOD

Izrada 3D modela po uzoru na muzejski predmet obuhvatala je nekoliko nivoa, gde je za početak izvršena 3D digitalizacija muzejskog eksponata upotrebom tehnike fotogrametrije čime je dobijen poligonalni 3D model, na osnovu kojeg je izrađena replika datog eksponata.

Prikazani metode i pristupi u radu, iz oblasti 3D digitalizacije, preprocesiranja oblaka tačaka, rekonstrukcije površina i filtriranja rezultata 3D digitalizacije su izvedeni pomoću specijalizovanih softvera.

U saradnji sa „Muzejem afričke umetnosti“ - zbirka Vede i dr Zdravka Pečara, izrađena je replika primenom 3D štampe originalne skulpture slona koja je izrađena u bronzi. Jedan od izazova u oblasti kulturnog nasleđa jeste prilagođavanje muzejskih eksponata osobama sa ograničenom vidnom sposobnošću.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Željko Santoši, docent.

Upravo zbog toga, reverzibilni inženjerski dizajn i 3D štampa, dolaze do izražaja kao vredni instrumenti u dizajniranju i izradi 3D modela muzejskih eksponata, kako bi slabovide osobe doživele izložbu i percipirale ono što ne mogu čulom vida. Na ovaj način im se omogućava da fizički ispitaju istorijske i kulturne artefakte.

2. PRIMENA REVERZIBILNOG INŽENJERSTVA

Reverzibilno inženjerstvo se može opisati kao metod dupliranja već postojećeg proizvoda bez postojećih nacрта, dokumentacije ili modela. Njega karakteriše i kreiranje 3D modela na osnovu oblaka tačaka (engl. point-cloud), 3D skeniranjem fizičkog modela [2].

Nakon procesa 3D digitalizacije i generisanja oblaka tačaka, najčešće nije odmah moguće preći na fazu rekonstrukcije površina, usled lošeg kvaliteta i strukture oblaka tačaka (šum, veliki broj tačaka itd.), te se najpre se teži eliminaciji grešaka itd.

Nakon pre-procesiranja sledi faza rekonstrukcije površina u kojoj se kreira površinski, a zatim i zapreminski (solid) model [1].

3. OSNOVNI PRINCIPI U TEHNICI FOTOGRAMTERIJE

Osnovni princip fotogrametrije je stereovizija, kod koje je za rekonstrukciju položaja karakterističnih tačaka u prostoru potrebno najmanje 2 fotografije na kojima su karakteristične tačke vidljive [4].

Cilj fotogrametrijske rekonstrukcije je da se pronađu koordinate tačaka objekta u lokalnom koordinatnom sistemu. Da bi to moglo da bude izvršeno potrebno je da se simultano odrede pozicije fotografija u tom istom koordinatnom sistemu na osnovu karakterističnih tačaka. A da bi se fotografije locirale, neophodno je koristiti homologne (karakteristične) tačke, projekcije iste tačke na različite fotografije [3].

3.1. Značajna uloga primene fotogramterije u zaštiti spomenika kulturno-istorijske baštine

U periodu dužem od stotinu godina fotogrametrija je imala i još uvek ima veoma važnu ulogu u dokumentaciji kulturno-istorijskog nasleđa. Odabirom ispravne tehnologije omogućena je zaštita, očuvanje i valorizacija arhitektonskih, arheoloških i svih drugih oblika kulturne baštine [5]. Danas se predlažu kompjuterizirane metode blisko predmetne fotogrametrije kao preventivan način za otkrivanje, merenje i praćenje vremenskog razvoja nekih strukturalnih

problema objekata. Primenom savremenih metoda digitalne fotogrametrije javljaju se nove mogućnosti primene uvođenjem bržih, jeftinijih i kompleksnijih postupaka, utemeljenih na digitalnoj tehnici [5].

4. DIGITALIZACIJA I IZRADA REPLIKE EKSPONATA

4.1. 3D digitalizacija skulpture slona

Slon, zaveden pod inv.br.433 u muzeju Afričke umetnosti u Beogradu, dimenzija: dužina 30cm, visina 20cm i širina 10cm poreklo: zapadna Afrika. Figura slona u bronzi rađena tehnikom izgubljenog voska. Slon je prikazan u stojećem stavu, realistički. Na glavi su velike oči i uši, usta i kljove sa podignutom surlom. Cilindrično telo se oslanja na jake noge i završava repom koji je potpuno prav i zaobljen na kraju [6].



Slika 1. Originalna skulptura slona, fotografisao Vladimir Popović u Muzeju afričke umetnosti [6].

Postupak dokumentovanja skulpture slona za potrebe fotogrametrijske izrade 3D modela započet je postavljanjem bronзанog modela muzejskog eksponata na okretni sto i podešavanjem parametara fotoaparata, koji je pri snimanju bio postavljen na stativ radi dobijanja tačnijih rezultata.

Zbog veličine same skulpture, kao i zbog očuvanja autentičnosti predmeta, kodirani markeri su postavljeni samo na površinu obrtnog stola na kojoj se nalazio model (slika 2), a ne i na sam model, a predmet se fotografisao i postavljanjem na poleđinu da bi se pokrile sve površine koje nisu dostupne dok je slon u stojećem položaju.



Slika 2. Skulpture slona na okretnom stolu obloženom markerima pripremljena za fotografisanje

4.2. Pre-procesiranje fotografija u softveru

Nakon završene akvizicije fotografija skulpture slona, započeta je 3D rekonstrukcija replike iste.

Dijagram toka koraka preduzetih u ovom radu, dat je na sledećoj slici 3.



Slika 3. Dijagram toka koraka pre-procesiranja fotografija u softveru

Fotografije se (u kartici *Workflow*, pod naredbom *Add Photos*), po završetku fizičkog fotografisanja, biraju, te učitavaju u softver za obradu fotografija Agisoft Metashape. Nakon učitavanja fotografija, one će biti prikazane u donjem delu radnoga prozora odnosno u *Viewport* prozoru, gde se svaka fotografija može zasebno pregledati, te po potrebi ukloniti ukoliko nije odgovarajućeg kvaliteta. Nakon potvrde, selektuju se sve fotografije potrebne za modelovanje predmeta. Najpre su birane fotografije slona u stojećem položaju i smeštene u jednu grupu, a potom u ležećem koje su smeštene u drugu grupu, a nakon kreiranja maski fotografije se spajaju u celinu kako bi rekonstrukcija bila kompletna.

Prva faza nakon učitavanja fotografija, jeste poravnanje fotografija (*Workflow/Align Photos*). Na ovom stadijumu, softver detektuje poziciju kamere za svaku fotografiju i gradi oblak tačaka koji ih povezuje [20]. Preporuka je da tačka vezanja bude nameštena na 4000, zato što veći ili manji broj tačaka može uticati na delove oblaka tačaka koji se stvara pri ovoj naredbi [17].

Ukoliko su fotografije dobro pripremljene i napravljene odnosno da su sve fotografije orijentisane i time generisane orijentacione tačke (eng. tie points), korak se na ovome završava [17]. Ovaj postupak se radi i za drugu grupu fotografija kada je predmet okrenut na gore.

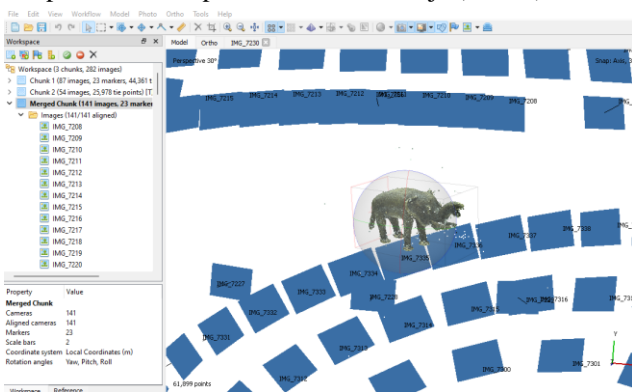
Sledi brisanje viška tačaka, kako bi se skratilo generisanje modela zbog veličine podataka koje je potrebno obraditi a nisu potrebni – kao što su okolni objekti pr. kutija u kojoj se nalaze skulpture pri fotografisanju u ležećem položaju.

Nakon brisanja viška ponovljen je postupak selekcije i brisanja kako bi se preciznije izdvojila željena regija, odnosno baza, pomoću alatke *Toolbar/Resize region* i *Rotate*, na kojoj će se vršiti dalje dizajniranje modela slona, jer sledeći korak rekonstrukcije obrađuje samo podatke unutar obima [7]. Ograničavajuću kutiju oko modela je moguće promeniti veličinom, pomeranjem i rotacijom pomoću miša.

Sledeći korak jeste generisanje poligonalnog 3D modela niske rezolucije za izradu maski. Mape dubina (engl. depth maps) izračunavaju se za preklapajuće parove fotografija uzimajući u obzir njihove relativne spoljašnje i unutrašnje parametre orijentacije. Proces kreiranja poligonalnog 3D modela niskog kvaliteta traje svega nekoliko minuta. Nakon što je računar završio procesiranje, u *Viewport*-u je moguće videti generisan poligonalni model niske rezolucije. Većina modela skulpture slona postaje prepoznatljiva. Međutim, postoji još jedan deo poligonalne mreže koja nije deo skulpture nego pripada pozadini. Ovaj korak zahteva od korisnika da ručno sa alatima koje softver pruža, selektuje delove poligonalne mreže pozadine i obriše ih. Za ovaj korak, korišćeni su isto alati za selekciju: *Circle*, *Rectangle* i *Free-form Selection*, kojima su u 3D prostoru selektovane grupe tačaka.

Kreiranje maski se vrši automatski na osnovu kreiranog modela niske rezolucije (da se ne bi moralo raditi pojedinačno za svaku fotografiju). Ovaj način kreiranja maski je brz i efikasan. Maskiranjem fotografija eliminiše se pozadina i omogućava spajanje gornje i donje grupe fotografija u jednu celinu.

Nakon ovoga se dolazi do sledećeg koraka, spajanje grupa fotografija (gornjeg i donjeg dela slona) u jednu celinu, što je izvršeno pomoću opcije *Align chunks* (namenjene poravnavanju grupa fotografija). Prva grupa fotografija slona od gore se selektuje kao referentna i poravnavanje se vrši na osnovu zajedničkih tačaka opcijom *point based*, i izborom karakterističnih tačaka *key points*. Nakon toga vrši se spajanje svih fotografija sa kreiranim oblacima niske rezolucije u jednu jedinstvenu grupu fotografija koja sadrži kompletnu geometriju predmeta. Potom je objekat postavljen u scenu opcijama *Resize/rotate*, da bi se optimizovala zapremina rekonstrukcije (slika 4).

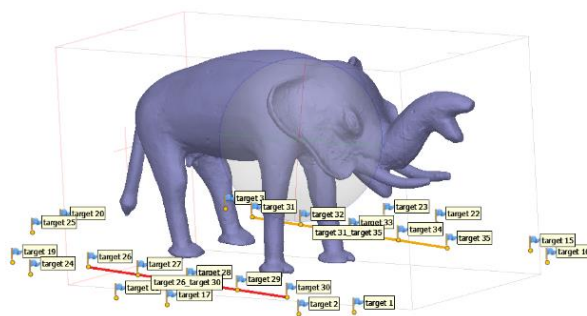


Slika 4. Spajanje gornjeg i donjeg dela u jednu celinu

Dalje se pravi kompletna geometrija modela i podešene su vrednosti za parametre u dijalogu *Workflow/Build Mesh*.

Kako bi se odredila razmera generisanog 3D modela potrebno je izvršiti dodavanje markera na fotografije. Na svim fotografijama korišćenim za ovaj projekat mogu se primetiti da na ploči obrtnog stola postoje nalepljene mete. *Agisoft Metashape*, kao i većina drugih softvera za fotogrametriju, ima mogućnost automatskog detektovanja ovih meta i postavljanja markera na njih. Međutim, u slučaju da ovakve mete nisu korišćene ili da program nije u mogućnosti da ih sam prepozna i postavi markere, potrebno je odabrati neki prepoznatljiv deo slike i na njega ručno postaviti marker [21]. Potrebno je uneti datu

distancu (od 160 mm) između dva definisan markera. Isti postupak se ponavlja sa suprotne strane. Obeleženi markeri prikazani su na slici 5.



Slika 5. Obeležene duži markera

Model je izvežen u *.stl* format kako bi se ispravio rep slona koji je ostao ne rekonstruisan. To se radi pomoću *GOM Inspect* softvera, koji ima bolje opcije za obradu poligonalne mreže nego *Agisoft Metashape*. U ovom projektu je korišćen za dodatnu obradu eksportovanog modela, tačnije zatvaranje svih rupa u poligonalnoj mreži. Ovime je dobijen zatvoren poligonalni 3D model na koji će se aplicirati tekstura.

Najpre je potrebno uvesti obrađeni 3D model nazad u scenu softvera za obradu fotografija. Nakon toga sledi korak za nanošenje teksture preko *Workflow/Build Texture*, nakon čega se model eksportuje u odgovarajući format, koji podržava apliciranu teksturu, ali pošto se ovaj 3D model izrađuje putem 3D štampe odabran je *.stl* format: *File menu/Export ModelExport/.stl*.

Naposletku, završnim korakom post-procesiranja u softveru, dobija se površinski 3D model sa apliciranom teksturom koji je prikazan na slici 6.



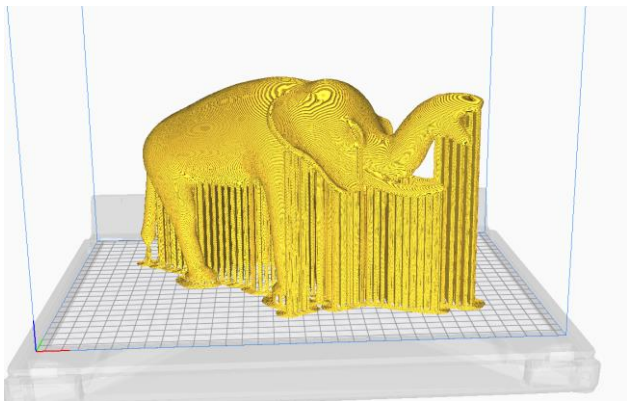
Slika 6. Prikaz digitalizovanog 3D modela slona sa teksturom, spremnog za izradu

4.3. FDM tehnologija 3D štampe

FDM (*eng.* Fused Deposition Modeling) proizvodna je tehnologija gde se zagreva polimerna žica, te ekstrudira kroz mašinu za brizganje i nanosi sloj po sloj da bi se stvorio željeni oblik proizvoda. Od svih aditivnih tehnologija trenutno je najrasprostranjenija FDM tehnologija, zbog jednostavnosti korišćenja i lake dostupnosti uređaja [8].

4.4. Izrada 3D modela

Izrada dobijenog modela eksponata slona izvršena je korišćenjem 3D štampe *Ultimaker S5*. Za izradu je korišćen softver *Ultimaker Cura*, a proces pripreme modela za 3D štampu, dat je na slici 7.



Slika 7. Priprema modela za 3D štampu

Dobijeni model teži približno 0.359 kg i štampan je skoro 36 sati. Dimenzije iznose 212.9x204.3x156.8 mm. Filament korišćen za štampu je PLA (plastika), lejer 0.15 mm, a ispuna 20%. Finalni model dat je na slici 8.



Slika 8. Krajnji 3D model skinutih suporta

Ovom prilikom izrađen je i 3D model skulpture antilope iz Muzeja afričke umetnosti, u kojem će zajedno sa modelom slona pronaći svoje mesto u muzeju, počevši od prve taktilne izložbe 19. oktobra 2023. godine. Za potrebe fotogrametrijskog snimanja i 3D digitalizacije modela je korišćena ista tehnologija i upotrebljavani su isti parametri, dok se jedina razlika ogledala u 3D štampi modela koja je izvedena na štampaču u okviru fakulteta, a sloj štampe je 0,2 mm. Antilopa, inv.br.421, dimenzija 47 cm. Poreklo: Zapadna Afrika – figura je izrađena od bronzne starom tehnikom livenja (cire perdue) – tehnika izbuljenog voska. Figura je proporcionalna i realistična.

5. ZAKLJUČAK

U ovom master radu je opisana primena tehnologija reverzibilnog inženjerstva, predstavljena je tehnika fotogrametrije upotrebom fotoaparata *Canon EOS 1200D* za 3D digitalizaciju bronzane skulpture slona, softvera *Agisoft Metashape Professional* za dizajn krajnjeg modela, kao i 3D štampača *Ultimaker S5* za izradu plastičnog modela slona u originalnoj veličini.

Uključivanje osoba sa ograničenom vidnom sposobnošću u muzejske izložbe predstavlja značajan korak ka inkluzivnom društvu. Digitalizacija i izrada modela prema predmetu iz Muzeja afričke umetnosti, prilagođenih slabovidima i slepima, omogućuje im da pristupe istorijskoj i kulturnoj baštini na inovativan način. Ovakav pristup takođe ima potencijal da promovise svest o potrebi za dizajnom i kulturnim aktivnostima koje su pristupačne svima i da ukaže na značaj inkluzivnog pristupa u oblasti kulturnog nasleđa.

6. LITERATURA

- [1] BUDAK, Igor, Reverzibilni inženjerski dizajn – preprocesiranje rezultata 3D digitalizacije, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2019.
- [2] SHARMA, Gagnesh, „Use of Reverse Engineering in Medical Applications“, *International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering (IJCSE)*, vol. 4, no. 7, 2017.
- [3] STOJAKOVIĆ, Vesna, Modelovanje na osnovu slika, 2018. Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- [4] SANTOŠI, Željko. 3D digitalizacija površi bez karakterističnih obeležja primenom blisko-predmetne fotogrametrije. 2020. PhD Thesis. University of Novi Sad (Serbia).
- [5] MULAHOVIĆ, Admir, et al. Primjena fotogrametrije i laserskog skeniranja kod zaštite spomenika kulturno historijske baštine. *Geodetski glasnik*, 2013, 44 34-57.
- [6] Iz arhive Muzeja afričke umetnosti, i iz razgovora sa kustosima i konzervatoricom Milicom Josimov.
- [7] <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000152092>, pristupljeno 1.9.2023.
- [8] JENKAČ, Mateja. Razvoj konstrukcijskih principa temeljenih na mogućnostima FDM proizvodnog procesa. 2020. PhD Thesis. University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Kratka biografija:



Emilija Stankijević rođena je u Novom Sadu 1999. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Industrijskog inženjerstva – Reverzibilno inženjerstvo i 3D štampa odbranila je 2023.god. kontakt: superemily44@gmail.com



Željko Santoši rođen je u Novom Sadu 1989. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2020. god., a od 2022. je u zvanju docenta. Oblast interesovanja su 3D digitalizacija, reverzibilni inženjerski dizajn i 3D modelovanje.