

PRIMENA 3D SKENIRANJA U PROTETICI**THE USE OF 3D SCANNING IN PROSTHETICS**Ostoja Jeftić, Slobodan Tabaković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je prikazana primena tehnologije 3D skeniranja u protetici donjih ekstremiteta, kao i geometrijska rekonstrukcija modela dobijenih pomenutom tehnologijom. Obrada dobijenih snimaka, i geometrijska rekonstrukcija modela rađene su kroz funkcionalnosti GOM Inspect softvera. Konkretno, u radu, skenirano je postojeće ležište transfemoralne (natkolene) proteze ispitanika kao i njegov patrljak, sa ciljem nastavka istraživanja primene aditivne tehnologije u izradi ležišta, čime bi se proces proizvodnje znatno ubrzao i unapredio.

Ključne reči: 3D skener, geometrijska rekonstrukcija, protetika, Metoda konačnih elemenata

Abstract – In this paper, the application of 3D scanning technology to the prosthesis of the lower extremities and geometric reconstruction of the models obtained with the aforementioned technology is presented. The processing of the obtained recordings and the geometric reconstruction of the model were done through the functionality of the GOM Inspect software. Specifically, in this work, the existing socket of the transfemoral (above knee) prosthesis was scanned as well as its residual limb, with the aim of continuing research into the application of additive technology in the construction of the socket, which would significantly speed up and improve the production process.

Keywords: 3D Scanner, Geometric Reconstruction, Prosthetics, Finite Element Analysis

1. UVOD

Proteze se obično koriste za zamenu delova tela nakon povreda (trauma), nedoknade nedostajućih delova tela od rođenja (anomalije udova), ili kao dodatak oštećenim delovima tela nakon operativnih zahvata (usled tumora, gangrene i sl.).

Za izradu kvalitetne natkolene proteze, veoma je značajno korisniku proteze obezbediti funkcionalno i udobno ležište. Odluka o tipu ležišta kod natkolenih amputacija, donosi se na osnovu nekoliko faktora: na osnovu starosti, muskuloznosti, amputacionog nivoa, aktivnosti, stanja kože, tipa prethodnog ležišta, itd.

Ručni, trenutni pristup izrade ležišta, potpuno se oslanja na subjektivnost tehničara i samim tim onemogućava standardizaciju u izradi ležišta i usporava inovativnost proizvoda i procesa.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Slobodan Tabaković, red. prof.

Takođe, tokom faze izrade ležišta, nije retkost da tehničari naprave grešku, čime se postupak ponavlja nekoliko puta, dok se ne dobije validan oblik ležišta. To za posledicu ima dva negativna aspekta. Prvi je vreme izrade, koje može biti dugo i nepredvidivo, i može da traje od dve do tri nedelje, a drugi negativan aspekt jeste psihološki uticaj na samog pacijenta, jer se od njega zahteva nekoliko dolazaka u laboratoriju [1].

Usled navedenih negativnih aspekata trenutne izrade ležišta, tema ovog rada je istraživanje potencijalne primene tehnologije 3D skeniranja i kasnije aditivne tehnologije u izradi ležišta.

Skeniranje patrljka pacijenta, traje svega nekoliko minuta, što bi umnogome pacijentu olakšalo proces. Takođe, poredeći sa trenutnim uzimanjem otiska, gde se pacijentu nanose vlažni gipsani zavoji na patrljak, tehnologija 3D skeniranja je potpuno neinvazivna, bezbolna, i nema dodira sa kožom pacijenta.

Konvencionalna ležišta se izrađuju postupkom vakuumskog laminiranja, i prema tome, ne postoji način za lokalnu kontrolu debljine sloja na određenim regijama, što je u suprotnosti sa kompleksnom fiziologijom patrljka. Tehnologije aditivne 3D štampe, omogućavaju kombinaciju dva ili više materijala različitih karakteristika i osobina u izradi, čime se doprinosi da određena regija ležišta poseduje željenu debljinu i ponašanje [1].

Za potrebe istraživanja u ovom radu, skenirano je postojeće ležište i patrljak ispitanika, osobe muškog pola, starosti 29 godina, visine 185 cm, i mase 90 kg. Protezu nosi punih 10 godina.

2. 3D SKENIRANJE

3D Skeniranje predstavlja proces kojim se objekti snimaju pomoću skenera, a zatim čuvaju u formi oblaka koordinata tačaka u odgovarajućoj ekstenziji. Zavisno od primene objekta koji se digitalizuje i potrebnih zahteva u pogledu preciznosti modela, koristi se odgovarajući tip 3D skenera. Za potrebe industrije, inspekcije delova, i reverzibilnog inženjerstva, najčešće se koriste stacionarni 3D skeneri visoke rezolucije, koji pružaju visok nivo detalja. Postoji i drugi tip skenera, odnosno, portabilni, koji omogućavaju skeniranje velikih objekata i ljudi, pa se modeli sa teksturom mogu koristiti u industriji specijalnih objekata, video igrama, forenzici, i sl. [2].

Principi 3D skeniranja imaju sve veću primenu u medicini, a svakako trenutno najsofisticiranija metoda dijagnostike je Magnetna rezonanca (MRI), koja pomoću jakog magnetnog polja, radio – frekventnih talasa i odgovarajućeg softvera, daje detaljan prikaz određenog segmenta ljudskog tela.

2.1 Postupak skeniranja postojećeg ležišta i patrljka ispitanika

Za skeniranje objekata u ovom radu, odnosno skeniranje patrljka i postojećeg ležišta ispitanika, korišćen je portabilni *Structure Sensor* skener, prikačen na telefon *Iphone 6s* (Slika 1).



Slika 1. Proces skeniranja postojećeg ležišta ispitanika *Structure Sensor* skenerom

Structure Sensor je prvi skener te vrste, koji je primenjen u ortopediji. Princip rada mu je zasnovan na infracrvenoj tehnologiji, što čini da je skeniranje ispitanika ili pacijenta potpuno neinvazivno i bezbolno. Skener se preko USB konekcije povezuje sa telefonom. Veoma je praktičan i lagan za korišćenje, pa mu masa zajedno sa telefonom ne prelazi 400 g. Skeniranje se vrši na udaljenosti od oko 40 cm od objekta, a tačnost skenera iznosi +/- 4 mm. Izlazni snimci su sačuvani u *.obj ekstenziji [3].

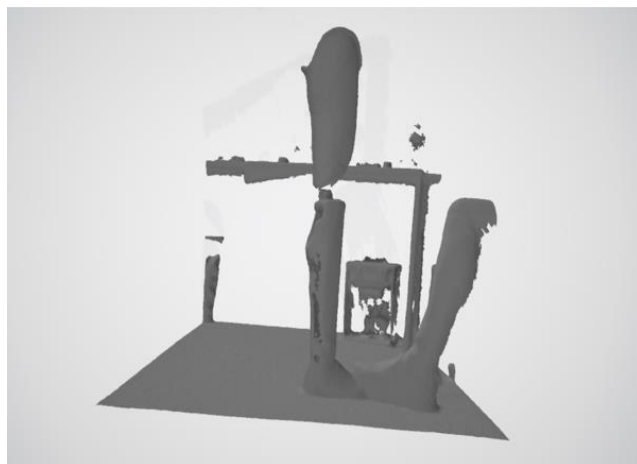
2.2 Rezultati skeniranja

Kvalitet dobijenih snimaka je zadovoljavajući, međutim, za dalja istraživanja na ovu temu, svakako bi bilo korisno da se skenirani objekat po mogućnosti što više izoluje, kako u sastav snimaka ne bi ulazili neželjeni artefakti, odnosno objekti iz prostorije. Drugi bitan faktor za dobijanje snimaka boljeg kvaliteta je ograničavanje željenog objekta crnom tkaninom ili sl., jer po zakonu refleksije, neželjeni artefakti ne bi ulazili u sastav snimaka.

Na Slici 2, uočljivi su neželjeni artefakti objekata iz prostorije, a takođe, i samo ležište sadrži greške (rupe), koje se dalje kroz proces geometrijske rekonstrukcije uklanjaju. Pored toga, skeneri veće rezolucije, umnogome bi unapredili kvalitet snimaka.

3. GEOMETRIJSKA REKONSTRUKCIJA

Geometrijska rekonstrukcija predstavlja postupak kojim se na poligonalnom (*mesh*) modelu, otklanjaju greške i/ili menja struktura površine, kako bi se model prilagodio za dalju analizu i/ili simulacije.



Slika 2. Snimak skeniranog ležišta ispitanika

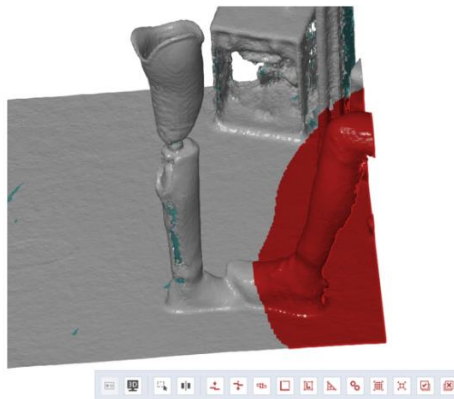
Softver korišćen za 3D rekonstrukciju u ovom radu je *GOM Inspect*. Koristi se za analizu 3D mernih podataka sa laserskih skenera, koordinatnih mernih mašina (KMM), i drugih mernih sistema. *GOM Inspect* se koristi u razvoju, kontroli kvaliteta i u proizvodnji [4].

3.1 Postupak rekonstrukcije skeniranih snimaka ispitanika

Prva etapa u procesu rekonstrukcije skeniranih snimaka postojećeg ležišta i patrljka ispitanika je konverzija snimaka iz *.obj ekstenzije u *.stl (*stereolithography*) ekstenziju. Postupak konverzije je odrađen preko *ASPOSE* sajta [5], gde su izlazni podaci u formi poligonalnog (*mesh*) modela, odnosno u .stl ekstenziji. Kod poligonalnog modela, površina je podeljena u male, ravanske, poligonalne delove, koji se nazivaju površine (*faces*). Mreža se definiše skupom površina, ivica i vrhova (temena) na tim površinama. Često su te poligonalne površine trouglovi [6].

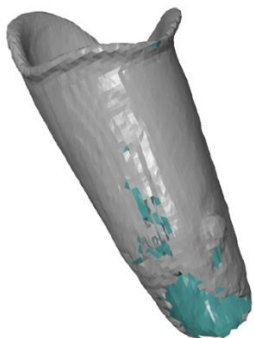
Na početku, poligonalni model postojećeg ležišta ispitanika importovan je u radno okruženje *GOM Inspect* softvera. Prilikom importovanja, u iskaućem prozoru za mernu jedinicu, potvrđeni su milimetri (mm).

Nakon importovanja, na modelu je potrebno ukloniti neželjene artefakte iz prostorije, koji su se javili tokom procesa skeniranja. Za to je iskorišćena funkcija *Select/Deselect Through Surface*, pomoću koje se selektuju željene regije za uklanjanje (regija crvene boje), Slika 3. Komandama *Delete + Ctrl* sa tastature, regija se uklanja.



Slika 3. Selektovanje željene regije za uklanjanje

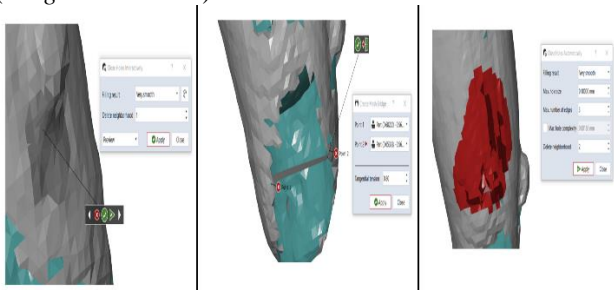
Nakon uklanjanja svih neželjenih artefakata na modelu, na Slici 4 prikazan je model postojećeg ležišta ispitanika, koji je još uvek prilično sirov, odnosno, na modelu su prisutni manji i veći otvori (greške), koje je potrebno zatvoriti.



Slika 4. Model postojećeg ležišta ispitanika očišćen od artefakata

Takođe, uočljivo je da površina ima nabore, koje je potrebno izravnati. Na modelu su kombinovane sve tri različite metode zatvaranja otvora, odnosno interaktivno zatvaranje, automatsko, i zatvaranje metodom mosta, u zavisnosti od veličine otvora i njegove pozicije.

Kod interaktivnog metoda zatvaranja (*Close Holes Interactively*), koji je najviše primenjen na modelu (Slika 5a) neophodno je selektovati regiju blizu otvora koji se zatvara. Zatim, algoritam ostavlja korisniku na raspolaganje još dva parametra da podese, odnosno, tip površine koja će biti na mestu otvora (*Filling result*), kao i broj susednih regija koje se mogu izbrisati (*Delete neighborhood*), kako se na mestu popunjavanja otvora, ne bi pojavile suviše oštre ivice zbog uklapanja nove regije. Za tip površine, u radu je birana veoma uglacana (*Very smooth*) površina, dok je broj susednih regija koje se brišu biran subjektivno, u zavisnosti od pozicije otvora. Zatvaranje otvora pomoću metode mosta (*Create Mesh Bridge*), koristi se kod velikih otvora, gde je prvobitno pogodno podeliti otvor na dva ili više manjih, pa ih kasnije zasebno zatvoriti. Metoda funkcioniše tako što se selektuju dve tačke, svaka sa zasebne strane otvora, na ivicama, koje će biti polazne tačke za novu površinu. Na Slici 5b, prikazan je metod zatvaranja otvora pomoću metode mosta, gde se još definiše i savijenost površi (*Tangential tension*).

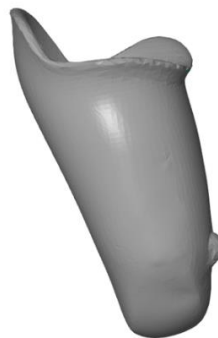


Slika 5. a) Zatvaranje otvora interaktivnom metodom; b) Zatvaranje otvora metodom mosta; c) Zatvaranje otvora automatskom metodom

Kod automatskog zatvaranja otvora, na modelu se selektuje željena regija, koju uglavnom ima veći broj manjih otvora, koje je potrebno zatvoriti. Parametri koji su ostavljeni korisniku za podešavanje su: tip površine

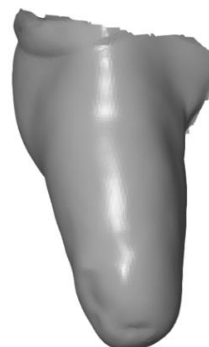
(*Filling result*), maksimalna veličina otvora (*Max. hole size*), maksimalni broj ivica (*Max. number of edges*), kao i broj susednih regija koje se mogu izbrisati (*Delete neighbourhood*). Na slici 5c, prikazan je postupak zatvaranja otvora automatskom metodom.

Nakon zatvaranja rupa na modelu, urađeno je i uglacavanje površine, pomoću funkcije *Smooth mesh*. Takođe, funkcijom *Eliminate Mesh Errors*, na modelu su uklonjene manje greške. Konačan izgled modela postojećeg ležišta ispitanika, nakon završene rekonstrukcije, prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Model rekonstruisanog postojećeg ležišta ispitanika

Identičan postupak rekonstrukcije, urađen je i za patrljak ispitanika. Na Slici 7, prikazan je dobijeni model.



Slika 7. Rekonstruisan model patrljka ispitanika

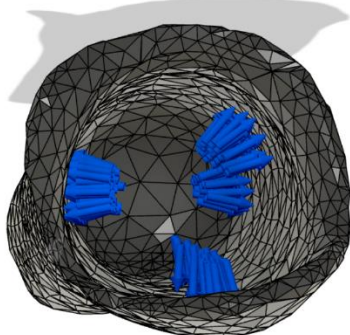
3.2 Primena numeričke analize nad rekonstruisanim ležištem

CAD softveri danas, pružaju mogućnost analize, odnosno numeričkog rešavanja diferencijalnih jednačina u inženjerskom i matematičkom modelovanju. Jedna od takvih analiza je i Metoda konačnih elemenata, koja se zasniva na podeli određenog domena na konačan broj manjih područja (poddomena), koji su povezani u čvorovima. Na bazi poznatih vrednosti napona u jednom čvoru, mogu se odrediti vrednosti napona u drugom čvoru.

U radu je prikazan kraći osvrt na primenu Metode konačnih elemenata nad rekonstruisanim ležištem. Svrha primene metode je testiranje karakteristika potencijalnih materijala koji mogu biti iskorišćeni u 3D štampi ležišta. Simulacijom, ušteden je novac, kao i vreme potrebno za štampu u realnom vremenu.

Za analizu, korišćen je softver *Autodesk Fushion 360*, pretežno namenjen za projektovanje proizvoda, baziran na *cloud* tehnologiji.

Prema [7], četiri regije na unutrašnjem zidu ležišta, koje podnose najveće opterećenje usled težine pacijenta su: regija sedalne kosti, regija ispod sedalne kosti, gluteusni kanal, i anteriorna strana ležišta, Slika 8.



Slika 8. Definisane sile prilikom analize Metodom konačnih elemenata

Prema zakonu biomehanike, čovek se polovično oslanja na svaku nogu, samim tim, polovina telesne mase ispitanika, 45 kg, podeljena je na četiri pomenute regije.

Za testiranje, izabran je materijal iz *Fushion 360* biblioteke, PEEK – *Polyetherketoneketone*, sa karbonskim vlaknima, veoma dobrih mehaničkih karakteristika.

Dobijena minimalna vrednost Faktora sigurnosti (*Safety Factor*), nakon završene analize iznosi 3,727, što znači da bi ležište izrađeno od PEEK, pri statičkom opterećenju ispitanika izdržalo, odnosno ne bi došlo do pojave loma.

Ipak, testirano ležište zahteva nastavak ispitivanja na dinamička opterećenja, kao i termičke analize u samoj izradi.

4. ZAKLJUČAK

Postupci 3D skeniranja i geometrijske rekonstrukcije opisani u ovom radu, predstavljaju polaznu osnovu za nastavak ispitivanja primene aditivne tehnologije u izradi ležišta.

Naredni korak u analizi opterećenja, trebalo bi da uključi model patrljka, dobijen na osnovu CT snimka, gde bi u sastav modela, ušle koža, kost i meko tkivo. Analizom nad interfejsom ležište/patrljak, dobio bi se verodostojniji uvid u ponašanje ležišta usled opterećenja.

Pored toga, Metoda konačnih elemenata pruža mogućnost optimizacije, čime se debljina zida ležišta može korigovati, i samim tim, uštedeti materijal i ubrzati proces izrade.

Model patrljka spomenut u radu, pruža osnovu za mogućnost testiranja površinskog modelovanja, odnosno dizajna ležišta direktno na osnovu geometrije patrljka.

5. LITERATURA

[1] Andrea Vitali, Caterina Rizzi, Daniele Regazzoni, Giorgio Colombo, 'Design and Additive Manufacturing of Lower Limb Prosthetic Socket', ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 2017

[2] <https://voxellab.rs/3d-skeniranje/> (pristupljeno u septembru 2022.)

[3] <https://www.rodin4d.com/en/structure-sensor/> (pristupljeno u septembru 2022.)

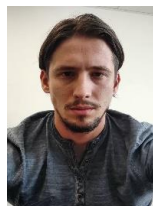
[4] <https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-inspect-pro/features-gom-software> (pristupljeno u septembru 2022.)

[5] <https://www.aspose.com/> (pristupljeno u septembru 2022.)

[6] Milica J. Tufegdžić, 'Kreiranje zapreminskog 3D modela karlične kosti čoveka u uslovima nepotpunih ulaznih volumetrijskih podataka', Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, doktorska disertacija, Niš 2017.

[7] Northwestern University, Prosthetics-Orthotics Center, Center for International Rehabilitation, 'Uzdužno-ovalno ležište, Serija protetičkih modula', 2004, *skripta*

Kratka biografija:



Ostojica Jeftić rođen je u Rumi 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Biomedicinsko inženjerstvo – modul mašinstvo odbranio je 2022. god. kontakt: ostojajeftic96@gmail.com