

**DIZAJN NOSEĆE STRUKTURE SKENERA NA BAZI STRUKTURIRANE SVETLOSTI  
DESIGN OF SUPPORTING STRUCTURE FOR STRUCTURED LIGHT SCANNER**Nemanja Popović, Igor Budak, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – INDUSTRIJSKO INŽENJERSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu je prikazan postupak dizajna noseće strukture za uređaj 3D digitalizacije baziran na strukturiranoj svetlosti. Kako bi se izvršila verifikacija i numerička analiza nosivosti dizajna strukture, primenjena je metoda konačnih elemenata (MKE). Dobijeni rezultati MKE analize ukazuju da trenutni dizajn noseće strukture omogućava dobru nosivost.

**Ključne reči:** Dizajn, Modeliranje, 3D skener, trukturi-rano svetlo, MKE analiza

**Abstract** - This paper presents a new design of a supporting structure for a 3D digitizing method based on structured light. In order to perform the verification and numerical analysis of the load capacity of the structure design, the Finite Element Method (FEM) was applied. The results obtained using FEM analysis indicate that the current design of the supporting structure allows good load capacity.

**Keywords:** Design, Modeling, 3D scanner, Structured light, FEM analysis

**1. UVOD**

Reverzibilno inženjerstvo (eng. *reverse engineering* - RE) može da se definiše, u mašinstvu, kao proces dupliranja nekog proizvoda ili sklopa bez tehničke dokumentacije, dok u širem smislu može predstavljati analizu nekog uređaja ili sistema, način na koji on funkcioniše kao i proučavanje tehnologija koje su primenjene u kreiranju originalnog proizvoda. Reverzibilno inženjerstvo i tehnologije koje se koriste, pored mašinstva, nalazi primenu i u medicini, arhitekturi, umetnosti i u svim ostalim oblastima u kojima je potrebno izvršiti analizu i poboljšanje [1].

Inženjerske analize su nezaobilazan korak u savremenoj industriji i proizvodnji. CAE (eng. *Computer Aided Engineering*) omogućava proveru geometrijskih karakteristika delova, kao i funkcionalne karakteristike budućih proizvoda. CAE može se smatrati delom reverzibilnog inženjerstva jer se često koriste analize i simulacije određenih delova nad kojima je potrebno izvršiti poboljšanje. Najčešće primenjivana analiza jeste analiza metodom konačnih elemenata (MKE), a osnovni princip na kom se ona zasniva jeste podela 3D modela na manji broj konačnih elemenata, odnosno manjih područja u okviru datog 3D modela, gde su sva ta manja područja međusobno povezana i čine jednu celinu [1].

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Igor Budak, vanr. prof.**

**2. ULOGA I ZNAČAJ REVERZIBILNOG INŽENJERSKOG MODELIRANJA I 3D DIGITALIZACIJE**

Računarom podržano modeliranje (eng. *Computer Aided Design* - CAD) se može definisati kao primena informacionih tehnologija (IT) u procesu modeliranja. CAD sistem se sastoji od hardvera, specijalizovanog softvera (zavisan od oblasti primene) i preferiranih uređaja, koji su kod određenih aplikacija prilično specijalizovani. Jezgro CAD sistema predstavlja softver, koji omogućava primenu grafike za prikaz proizvoda, upotrebu baze podataka za čuvanje modela proizvoda i upravlja perifernim uređajima za prezentovanje proizvoda. Projektant je glavni akter u svim fazama, od identifikacije problema do faze implementacije [2].

U okviru razvoja novih proizvoda, a u cilju zadovoljenja potreba korisnika i praćenja trendova tržišta, kreiranje različitih oblika primenom klasičnih CAD alata postaje vrlo teško. Zbog toga se, od strane kompanija, često angažuju profesionalni skulptori za potrebe kreiranja željenih oblika i modela u glini, gipsu ili nekom sličnom materijalu, gde se zatim ovako dobijen fizički model digitalizuje i dalje koristi za potrebe proizvodnje npr. izrada alata za livenje. RE svoju primenu nalazi i u projektovanju ergonomski funkcionalnih proizvoda (npr. tastature, miševi računara, volan automobila, rukohvati pištolja, itd.), kao i invalidskih pomagala, ortopedske obuće gde je u ovom postupku polazni objekat ljudsko telo, odnosno neki njegov određeni deo [1].

Za razliku od "klasičnog" inženjerskog projektovanja, gde se polazi od ideje koja se dalje konceptualno razrađuje, a potom i detaljno projektuje uz pomoć CAD alata, RE počinje fizičkim objektom koji se nekim od postupaka digitalizacije prevodi u CAD model, prilagođava ili doraduje po potrebi i na kraju izrađuje CNC tehnologijom ili nekom od aditivnih tehnologija.

**2.1. 3D digitalizacija primenom skenera na bazi strukturne svetlosti**

U ovom postupku, izvor svetlosti (projektor) projektuje jednu ili više linija na objekat skeniranja (obično su to paralelne linije). U današnje vreme to su najčešće belo ili plavo projektovano LED svetlo [2]. Ukoliko je u pitanju jednolinijska šara, linija se pomera preko vidnog polja kamera (preko objekta), a kamere prikupljaju informacije o udaljenosti liniju po liniju [2]. Svako liniji odgovara jedinstvena kodna šifra. Ova šara linija postaje izobličena kada se projektuje na objekat koji se skenira. Foto osetljivi senzor (kamera), koji je postavljen na poznatoj udaljenosti od izvora svetlosti, detektuje reflektovani

signal, a upravljačka jedinica povezuje projektovane kodirane linije i signale na foto osetljivom senzoru i na osnovu trigonometrijskih odnosa projektovane i reflektovane svetlosti, izračunava se udaljenost tačaka na objektu, odnosno njihove koordinate u koordinatnom sistemu merenja.

Krajnji ishod 3D skeniranja jeste 3D model realnog objekta dobijen u softveru. Prednost ovakvog načina skeniranja jeste brzina, jer se ne skenira tačka po tačka već se skenira celokupno vidno polje istovremeno a ono se sastoji od više tačaka.

### 3. DIZAJN I RAZVOJ NOSEĆE STRUKTURE SKENERA BAZIRANOG NA STRUKTURIRANOJ SVETLOSTI

Kao osnova nove noseće strukture koristi se stativ koji se često koristi u oblasti digitalne fotografije. On ima ulogu nosača cele strukture, gde će se na njega montirati noseća struktura u okviru koje se nalaze projektor koji će projektovati svetlosne paterne/šare i dve web kamere koje će se koristiti za detekciju reflektovanog paterna. Ovakav sistem predstavlja stereo sistem skenera sa dve kamere i jednim projektorom.

Pored ovoga, ceo sistem se takođe može i koristiti po principu projektor - jedna kamera koji u osnovi čini mono sistem.

Telo pribora, koje se može videti na slici 1 modelirano je uz pomoć softverskog alata Solidworks.



Slika 1. Telo pribora

Donji deo alata je dimenzija 43mm x 43 mm i korišćena je opcija *EXTRUDE* od 2 mm. Na 10 mm udaljenosti skiciran je još jedan kvadrat dimenzija 35 mm x 35 mm gde je zatim ponovo izvršena operacija *EXTRUDE* na vrednost od 1 mm. Definisana su dva kvadrata, čiji je postupak pravljenja prethodno opisan, i operacijom *LOFT* generisana je površina koja spaja ova dva kvadrata. Krajnji rezultat je dobijeno geometrijsko telo kao zarubljena četverostrana piramida. Gornji deo, odnosno ploča, proširena je u odnosu na standardnu i sada je dimenzija 140mm x 100mm. Operacijom *EXTRUDE* napravljena je debljina ploče od 10mm pod uglom od 20°. Bilo je potrebno napraviti otvor kroz koji će prolaziti vijak kojim će se projektor fiksirati za telo pribora. Otvor je prečnika 5 mm i pozicioniran je na određenom mestu u elementu za pozicioniranje projektora (ploča) u odnosu na položaj rupe element za stezanje projektora i vezu sa telom pribora (vijak) na projektoru.

Na telo pribora, na definisanoj udaljenosti od ivica dela, modelovana su dva valjka radi lakšeg pozicioniranja elemenata za vođenje i podešavanje položaja kamere. Valjci su prečnika 10 mm i visine 16 mm.

Operacijom *FILLET* zaobljene su oštre ivice valjaka za R=2 mm (obaranje oštih ivica). Dalje je operacija

*FILLET* primenjena za zaobljivanje tela pribora za R=10 mm. Pomenuta opcija korišćena je i za obaranje ivica u donjem delu modela, s tim da je ovde ivica oborena za vrednost od 0,5 mm. Odstranjivanjem materijala u unutrašnjosti 3D modela operacijom *SHELL*, dizajnirana je školjka debljine 3 mm.

Dalje, pristupilo se modeliranju elementa za pozicioniranje projektora (Slika 2).



Slika 2. Element za pozicioniranje projektora

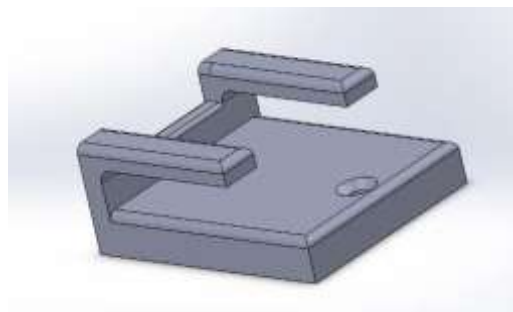
Dimenzije pravougaonika sa kojim se započeto modelira su 140mm x 250mm i korišćena je opcija *EXTRUDE* na vrednost od 10 mm, ali pod uglom od 20° orijentisanim prema unutrašnjosti. Sledeći korak jeste modeliranje drugih komponenti elementa za pozicioniranje i projektora. To je učinjeno kreiranjem dva pravougaonika dimenzija 50 mm x 20 mm i debljine 10 mm (prethodno dobijenih primenom *EXTRUDE* operacije).

Ovi pravougaonici su dimenzija 20 mm x 10 mm, a njihova visina iznosi 30 mm. Dodatne komponente elementa za pozicioniranje projektora su postavljeni na unapred definisanu poziciju kako ne bi zaklonili optiku video projektora, kao i da ne bi zaklonili otvor za cirkulaciju vazduha prilikom rada projektora. Sledeći korak predstavlja bušenje otvora kroz element za pozicioniranje projektora, a koji pri tome treba da se poklapa sa otvorom na prethodno izmodeliranom telu. Ovaj otvor je takođe prečnika 5 mm.

Potom su upuštene dve rupe prečnika 12 mm koje su pozicionirane prema valjkastim komponentama tela pribora.

Operacija *FILLET* je korišćena za završne operacije zaobljivanje temena ploče za vrednost od 15 mm, kao i za obaranje ivica za 2 mm.

Naredni deo koji je bilo potrebno modelirati jeste element za pozicioniranje i stezanje kamere (Slika 3). Njegova svrha je lakše i stabilnije pozicioniranje kamere za ostatak konstrukcije noseće strukture.



Slika 3. Element za pozicioniranje i stezanje kamere

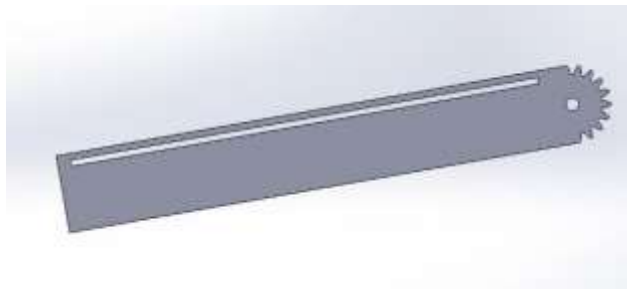
Prvi korak bilo je kreiranje pravougaonika dimenzija 60 mm x 50 mm na visinu od 10 mm. Sledeći korak bilo je modeliranje geometrijskog oblika slova "U" gde je širina

bočnih delova 10 mm, a preostale stranice 5 mm, gde visina iznosi 15 mm. Ove dimenzije elementa za pozicioniranje i stezanje kamere su definisane u skladu sa gabaritnim dimenzijama kamere koja se postavlja u ovaj element. Nakon ovog koraka je kroz gore kreirani 3D model uz pomoć operacije *CUT EXTRUDE* odstranjen deo materijala kako bi kamera mogla adekvatno da se postavi u element za pozicioniranje i stezanje kamere. Zaobljene su oštre ivice na 3 mm i na 2 mm.

Napravljen je i otvor na elementu za pozicioniranje i stezanje kamere kako bi se moglo izvršiti lakše pozicioniranje elementa za ostatak noseće konstrukcije. Otvor je prečnika 5 mm.

Operacijom *CHAMFER* napravljeno je blago upuštanje u otvor, 2 mm pod uglom od 45°, kako bi glava vijka mogla da bude poravnata sa površinom elementa za pozicioniranje i stezanje kamere kada se provuče kroz otvor. Na kraju je odstranjen još jedan deo materijala modeliranjem pravougaonog oblika dimenzija 30 mm x 5 mm kako bi moglo da se vrši nesmetano pozicioniranje i pomeranje kamere.

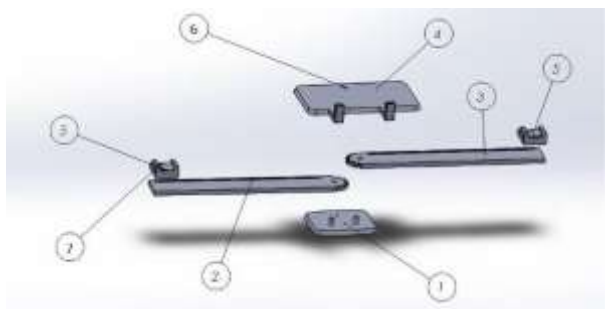
Jedini preostali deo jeste element za vođenje i podešavanje položaja kamere (Slika 4).



Slika 4. Element za vođenje i podešavanje položaja kamere

Zupčanik je definisan na osnovu baze podataka parametarskih 3D modela koja se nalazi u okviru softverskog alata *Solidworks*. Otvor na zupčaniku je 10 mm, broj zubaca je 18, moduo zupčanika je 3. Dužina produženog dela je 400 mm, dok je širina 60 mm, a debljina je 10 mm. Širina otvora u pravougaonom delu je 5 mm dok je dužina 365 mm.

Nakon završenog postupka modeliranja i dizajna, svi elementi sklopa noseće strukture su sklopljeni radi vizuelne verifikacije i međusobnog odnosa generisanih 3D modela. Dok su na slici 5 prikazani svi dizajnirani elementi sklopa noseće strukture zajedno sa tabelom 1 u kojoj su označene njihove pozicije kao i broj komada i redosled prilikom montaže.



Slika 5. Eksplozivna šema svih elemenata

Tabela 1. Naziv elemenata

Redni broj	Naziv elementa	Količina
1	Telo pribora	1
2	Element za vođenje i podešavanje položaja kamere (levi)	1
3	Element za vođenje i podešavanje položaja kamere (desni)	1
4	Element za pozicioniranje projektora (ploča)	1
5	Element za pozicioniranje i stezanje kamere	2
6	Element za stezanje projektora i vezu sa telom pribora	1
7	Element za vezu kamere i elementa za pozicioniranje i stezanje kamere	2

#### 4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA METODOM KONAČNIH ELEMENATA KOMPONENTI NOSEĆE STRUKTURE

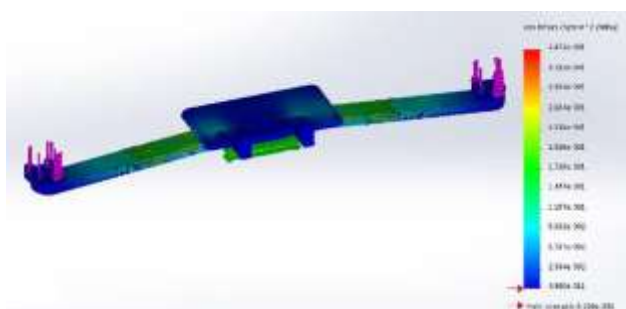
Metoda konačnih elemenata (MKE) (eng. *Finite Element Method - FEM*) predstavlja koristan alat za analizu proizvoda na različite tipove mehaničkih opterećenja, a sve sa ciljem izrade što pouzdanijih i dugotrajnijih proizvoda. Ova metoda predstavlja matematički postupak rešavanja inženjerskih problema i problema matematičke fizike, a mogu da ga koriste sve vrste inženjera, dizajneri i menadžeri [3]. Ovom metodom vrši se analiza struktura, računaju temperaturna polja, tok fluida kao i transport mase [4]. Rešenje dobijeno primenom MKE je približno jer je stvarna raspodela nepoznatih veličina unutar konačnih elemenata drugačija, odnosno dosta je kompleksnija. Ukoliko mreža konačnih elemenata ima gušću raspodelu kojom se opisuje računski domen, to je odstupanje između tačnog i približnog rešenja manje. Na kraju odrađene analize, dobija se model sa obeleženim delovima na kojima je moguće doći do deformacije ili loma materijala. U okviru softvera *SolidWorks* se dolazi do podataka za tri parametra, a to su:

- Totalna deformacija (Von Mises-ovi naponi);
- Izduženje (po X, Y, Z ili XYZ osi);
- Napon.

Na Slici 6 može se videti raspored Von Mises-ovih napona na dizajniranom rešenju noseće strukture, a to predstavlja pojavu elastičnih i plastičnih deformacija. Sila kojom se deluje na kućišta kamere je 1N po elementu (odnosno 100g, jer je to težina kamere koja se koristi). Na skali pokraj slike možemo uočiti, pored numeričkih vrednosti, i boju koja se menja u zavisnosti od intenziteta sile. Tako plava boja predstavlja mali intenzitet delovanja sile odnosno nema pojave deformiteta (kreće se oko  $2,894e-002 = 0,02894$  MPa što predstavlja veoma mali napon), dok crvena boja predstavlja velik intenzitet delovanja sile za projektovani model i materijal koji se koristi, te postoji opasnost od deformacije i loma strukture i potrebno je izvršiti reinženjering ili upotrebiti materijal adekvatnih karakteristika.

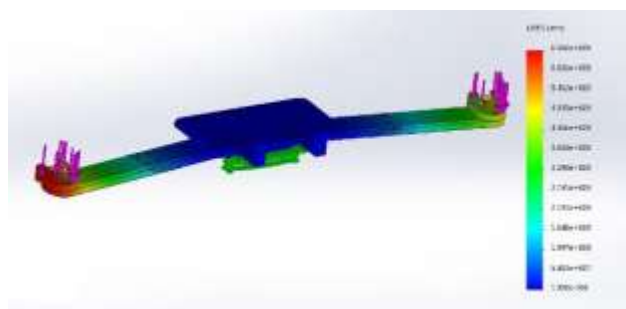
U ovom slučaju, kao što se može videti, ne postoji opasnost od plastične deformacije ili loma i projektovani

model moći će da izdrži predviđenu silu, odnosno, težinu kamere (vrednost iznosi 0,3183 MPa).



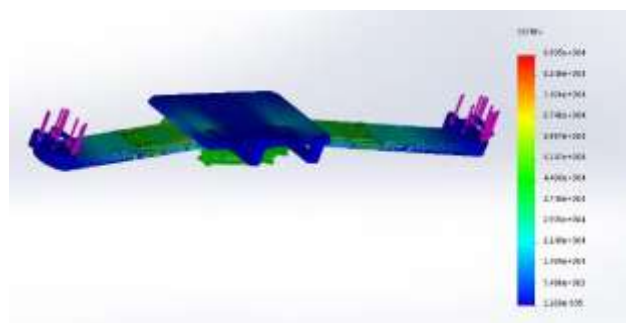
Slika 6. Prikaz Von Misesovih napona

Na Slici 7 može se videti u kom pravcu će se izdužiti model pod dejstvom sile koja na njega deluje. Sila je istog intenziteta od 1N. Možemo da zaključimo da pod dejstvom definisane sile neće doći do primetnog savijanja elemenata za vođenje i podešavanje kamere kod noseće strukture usled toga što je prostorno pomeranje u XYZ prostoru veoma malo.



Slika 7. Izduženje u mm

Na slici 8 može se uočiti da, na osnovu raspodela boja na 3D modelu kao i na osnovu numeričkih rezultata prikazanih na skali, neće doći do značajnijeg ekvivalentnog napona u nosećoj strukturi, usled male sile od 1N. Primenom ove analize je takođe potvrđeno da je tehničko rešenje noseće strukture adekvatno dizajnirano i da neće biti problema prilikom njegove eksploatacije u realnim uslovima nakon njegove izrade



Slika 8. Prikaz ekvivalentnog napona

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno predstavljena primena reverzibilnog inženjerskog dizajna, inženjerskih simulacija, kao i teorijski osvrt na tehnologiju 3D digitalizacije primenom metode bazirane na strukturiranoj svetlosti. U okviru ovog master rada je predloženo tehničko rešenje dizajna noseće

strukture koje će se aktivno koristiti i dalje razvijati nakon njegove izrade. Takođe je predstavljena primena softverskog alata *Solidworks* uz pomoć kog je modeliran svaki element noseće strukture, koji pored osnovnih dizajnerskih alata takođe omogućava i sprovođenje inženjerskih numeričkih simulacija u fazi testiranja modeliranih elemenata noseće strukture. Predloženi koncept predstavlja jedno savremeno inženjersko rešenje i pristup kada je u pitanju primena sistema 3D digitalizacije u realnim uslovima koji se danas postavljaju u industriji. Jedni od budućih pravaca istraživanja će ići u smeru izrade predstavljene noseće strukture čija realizacija, a uzimajući u obzir rastući trend primene aditivnih tehnologija danas, će biti ostvarena primenom neke od tehnologija aditivne proizvodnje.

## 6. LITERATURA

- [1] Prof. dr Miroslav Plančak, "Brza izrada prototipova, modela i alata", Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2009.
- [2] I. Budak, J.Hodolič, I. Bešić, Đ.Vukelić, P. Herbert Osanna, H. M. Durakbasa, "Koordinatne merne mašine i CAD inspekcija", Tempus projekat broj IB\_41120-2006, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2006.
- [3] *Historijski razvoj, principi i primjena metoda konačnih elemenata*, <http://am.unze.ba/mkpr/MKE%201.pdf> (pristupljeno u Oktobru 2018.)
- [4] Dhatt, Gilbert Touzot, Emmanuel Lefrancois: "Finite element method", WILEY, 2012.

### Kratka biografija:



**Nemanja Popović**, rođen je u Kikindi 1993. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Industrijskog inženjerstva - Projektovanje proizvodnih i uslužnih sistema, odbranio je 2018.god. U toku master studija bio je na razmeni u Torinu.



**Vanr. prof. dr Igor Budak**, rođen 1973. god. Diplomski i magistarske studije završio na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, doktorsku disertaciju odbranio na Mašinskom fakultetu, Univerziteta u Ljubljani. Od 2015. godine je u zvanju vanrednog profesora za užu naučnu oblast Metrologija, kvalitet, ekološko - inženjerski aspekti, alati i pribori. Autor je više naučno-stručnih knjiga, kao i većeg broja naučnih i stručnih članaka u međunarodnim i domaćim časopisima.