

REVERSE ENGINEERING-AIDED THREE-DIMENSIONAL OPTICAL MEASURING DEVICE STEINBICHLER

REVERZIBILNO INŽENJERSTVO POTPOMOGNUTO TRODIMENZIJALNIM OPTIČKIM MJERNIM UREĐAJEM STEINBICHLER

GROS, Josip; BUDIC, Ivan & NOVOSELOVIC, Danijel

Abstract: *This paper examines methods of Reverse Engineering assisted with the threedimensional measuring device of the Steinbichler company. It also explains the working principle of the optical measuring devices which have one camera and one projector light. The paper presents a mathematical model of the camera – the projector. In the last part, a reconstruction of the part of the tool for injection molding of the plastic is made, using a 3D digitizer and SolidWorks software package.*

Key words: *3D digitizing, structured light, scanning, no contact measurement*

Sažetak: *U radu se proučava metoda reverzibilnog inženjerstva potpomognutog s trodimenzionalnim mjernim uređajem tvrtke Steinbichler. Objasnjen je princip rada optičkih mjernih uređaja koji imaju jednu kameru i jedno projektorsko svijetlo. Prikazan je i matematički model kamera - projektor. U zadnjem dijelu rada napravljene je rekonstrukcija dijela alata za injekcijsko brizganje plastike koristeći 3D digitalizator i programski paket Solidworks.*

Ključne riječi: *3D digitalizacija, strukturirano svijetlo, skeniranje, beskontaktno mjerenje*

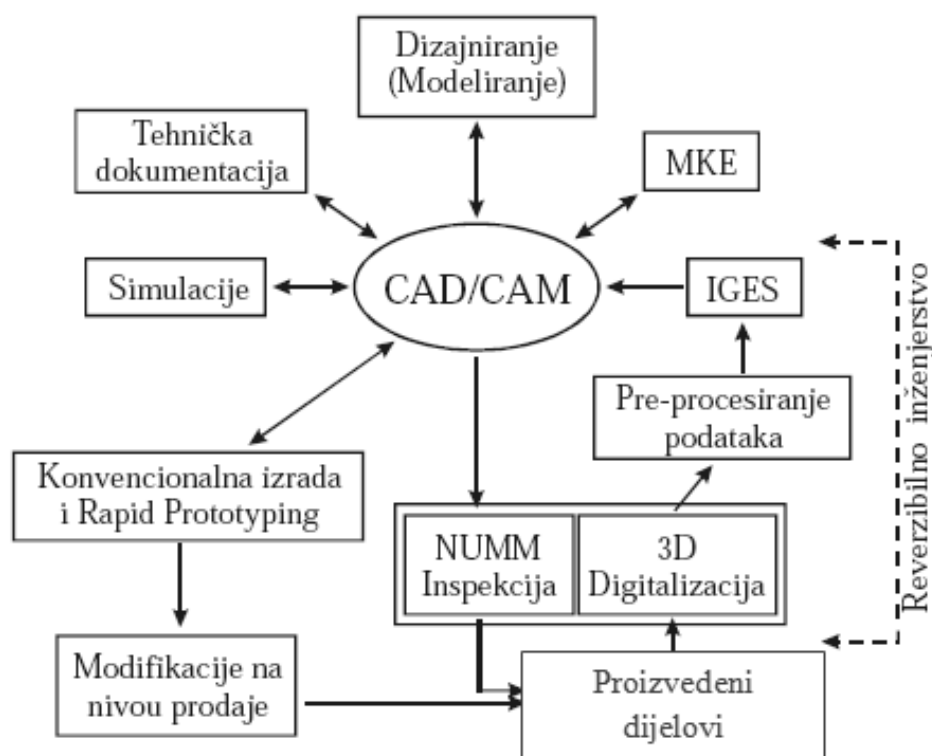


Authors' data: Josip, **Gros**, mag. ing. stroj., Veleučilište u Karlovcu, J.J. Strossmayera 9, Karlovac, jgros@vuka.hr; Ivan, **Budic**, prof.dr.sc., Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, ivan.budic@sfsb.hr; Daniel, **Novoselovic**, dr.sc., Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, daniel.novoselovic@sfsb.hr

1. Uvod

Zahtjevi globalnog tržišta za neprestanim smanjenjem vremena potrebnog za razvoj novih proizvoda, a sve u cilju podizanja konkurentnosti, učinili su da reverzibilno inženjerstvo postane nezaobilazna metoda prilikom konstrukcije novog proizvoda. [1] U početku razvoja reverzibilnog inženjerstvo se svodilo na kopiranje postojećih proizvoda. U drugoj fazi krenulo se u generiranje virtualnih modela ali bez ikakve mogućnosti za izmjenu modela. [2]

Danas reverzibilno inženjerstvo je alat za projektiranje i razvoj novih proizvoda. On uključuje generiranje virtualnog modela koji je moguće modificirati i uspoređivati s CAD modelom. Cilj je da se na novom proizvodu minimiziraju pogreške u proizvodnji.



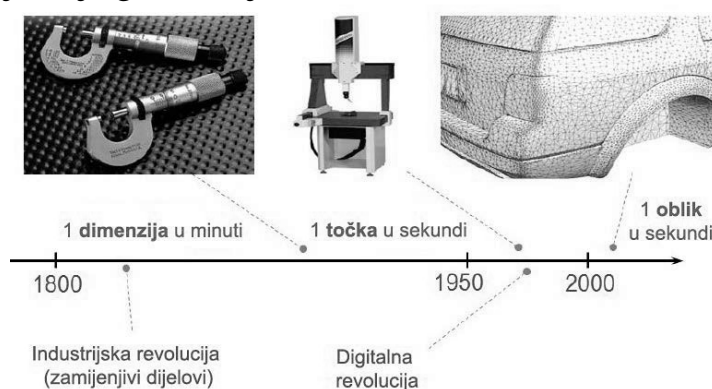
Slika 1. Reverzibilno inženjerstvo integrirano u proizvodnji [3]

Slika 1. prikazuje integraciju reverzibilnog inženjerstva u CIM sustav. Cim sustav – Computer integrated manufacturing (CIM) je proizvodnja (izrada) podržana računalom. To je potpuna integracija CAD-a i CAM-a kao i drugih poslovnih operacija (funkcija) i baza podataka. Neke komponente CIM-a su CAD (Computer Aided Design), CAP (Computer Aided Planning), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAQ (Computer Aided Quality Assurance). [4] U okviru CIM – a reverzibilno inženjerstvo je zauzelo položaj kod provjere geometrije oblika proizvoda. [5] U slučaju potrebe za izradom kopije proizvoda za koji ne postoji tehnička dokumentacija reverzibilno inženjerstvo se postavlja kao vodeća metoda konstruiranja. [6]

2. Trodimenzionalni optički mjerni uređaji

3D skener je uređaj koji analizira neki stvarni predmet ili okoliš u svrhu sakupljanja podataka o obliku i u nekim slučajevima – izgledu (npr. boja) istog. Sakupljeni podaci mogu se kasnije koristiti za stvaranje digitalnih, 3D, modela čija je primjena velika. Namjena 3D skenera je najčešće da stvori oblak točaka geometrijskog uzorka na površini predmeta. Te točke mogu se koristiti za ekstrapolirane oblika skeniranog predmeta (proces zvan rekonstrukcija). 3D skeneri vrlo su analogni kamerama, kao i kamere imaju vidno polje oblika stošca, te mogu sakupljati podatke samo o površinama koje su vidljive. Kamere prikupljaju boje na površinama predmeta unutar vidnog polja, dok skeneri prikupljaju informacije o udaljenosti površina unutar vidnog polja. U većini slučajeva jedno skeniranje neće biti dovoljno za stvaranje kompletnog modela predmeta. Potrebno je nekoliko skeniranja, nekad i stotine da bi se dobile informacije o svim stranama predmeta. Sva skeniranja na kraju se moraju dovesti u zajednički referentni sustav, ovaj proces zove se poravnavanje ili registracija, te se onda mogu spojiti kako bi tvorila cjeloviti model. [7] ¶

Neki od primjera primjene su: reverzibilni inženjering, navigacija robota, dobivanje 3D struktura, industrijska provjera dijelova, računalna grafička animacija, sport, medicina, očuvanje kulturne baštine itd. [8] Postoje dvije vrste 3D skenera, kontaktni i bez-kontaktni. Bez-kontaktni se mogu dalje podijeliti u dvije glavne kategorije, aktivni skeneri i pasivni skeneri. Unutar ovih kategorija postoje mnogovrsne tehnologije skeniranja. [9] Kontaktne skeneri „snimaju“ predmet pomoću fizičkog dodira. Koordinatni mjerni sustav (eng. CMM – Coordinate measuring machine) primjer je kontaktnog mjernog sustava. Najčešće se koristi u proizvodnji i vrlo je precizan. Nedostatak ovog sustava je potrebni fizički kontakt sa subjektom skeniranja uslijed kojeg postoji mogućnost oštećenja ili promjene subjekta. Ova činjenica je vrlo bitna pri skeniranju delikatnih predmeta i povijesnih artefakata. Drugi bitni nedostatak je što su relativno spori u odnosu na ostale mjerne metode. Ostali primjeri kontaktnog mjerenja su ručno upravljane dodirne sonde. [9] Slika 2. prikazuje povijesni razvoj mjerenja geometrije oblika.



Slika 2. Povijesni razvoj mjerenja geometrije oblika [10]

2.1. Princip rada

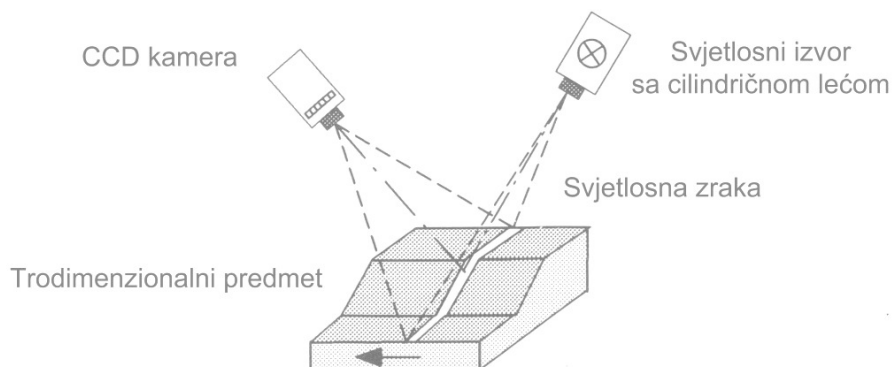
Tehnologija optičkog 3D mjerenja jedna je od najefektivnijih metoda za dobivanje trodimenzionalnih informacija nekog objekta. Pripada bez kontaktnim mjernim

metodama, čije su prednosti upravo mjerenje bez fizičkog dodira, te moguća velika brzina mjerenja što omogućuje veliki protok mjerenih objekata (npr. na pokretnoj traci). [7] U optičke metode spada i metoda strukturiranog svjetla, koja radi na idućem principu: na objekt se pomoću projektora projiciraju svjetlosne trake (linije) – jedna po jedna ili više njih istovremeno, te se trake očitavaju iz drugog smjera CCD kamerom. Veličina rešetke linija obrnuto je proporcionalna rezoluciji slike. Oblik skeniranog objekta utječe na oblik projicirane linije, te se ona lomi ovisno o obliku objekta ukoliko ne gledamo iz smjera projektora. CCD kamerom očitavaju se „izlomljene“ linije, te se ovisno o obliku linije određuje geometrija mjerenog objekta. Razmak između pregiba linija i visina obratka mogu se kroz kalibraciju dovesti u odnos sa standardnim veličinama. Metoda projiciranja svjetlosnih linija uz obradu slike automatska je metoda koja se koristi za provjeru oblika ravnih ili blago zakrivljenih ploha koje imaju difuzno reflektirajuću gornju površinu. Ova metoda ne može se primijeniti na visoko reflektirajućim ploham (ogledalo), te na ploham koje imaju slabu refleksiju (mat crne plohe).

Postoje slijedeće metode strukturiranog svjetla:

- Metoda svjetlosne zrake
- Metoda kodirane svjetlosne zrake
- Metoda faznog pomaka
- Moire metoda
- Moire metoda u stvarnom vremenu

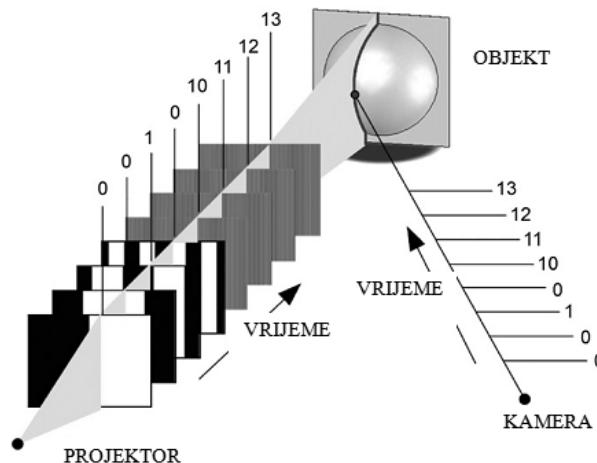
Metoda svjetlosne linije temelji se na principu svjetlosnog mikroskopa, koji se koristi za mjerenje hrapavosti i ravnosti površine. Razlike u visini površine vidljive su i mjerljive zbog distorzije svjetlosne zrake. Ova se metoda uz pomoć kamere i uređaja za obradu slike koristi za provjeru oblika predmeta. Izvorom svjetla sa cilindričnom optikom stvara se svjetlosna zavjesa koja se na predmetu ocrta kao ravna linija iz koje kamera očitava dvodimenzionalne podatke. Kako bi dobili treću dimenziju predmeta, potrebno ga je pomicati kroz svjetlosnu zavjesu. Metoda je prikazana na slici 3.



Slika 3. Metoda svjetlosne zrake [11]

Kod metoda kodirane svjetlosne linije informacije o visini dobivaju se iz višestrukog snimanja mreže linija različitih rastera, kodiranih npr. prema „Gray“ kodu. Snimke se uzimaju sekvencijalno. Prilikom snimanja mjereni predmet ne smije se pomicati. Na

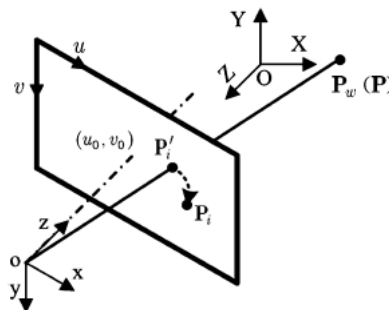
slici 4. prikazana je triangulacija sa binarno kodiranim svjetlosnim rasterom predstavlja metodu kodirane svjetlosne linije. Takav svjetlosni raster nastaje uz pomoć LCD (eng. Liquid Crystal Display) projektor. Pikseli na LCD matrici mogu se, liniju po liniju, prebacivati između „svijetlih“ i „tamnih“. LCD matricom se također mogu mijenjati oblici rastera, pri čemu se susjedni redovi piksela prebacuju zajedno. Tako ćemo na primjer od mogućih 512 na raspolaganju imati još samo 256 parova linija. Sa šire raspoređenim rasterima mogu se snimati veći predmeti, ali sa smanjenom rezolucijom. Pri snimanju metodom faznog pomaka rasteri se projiciraju međusobno fazno pomaknuti za 90 stupnjeva, te se uzimaju najmanje 4 snimka. Podaci o geometriji dobivaju se iz nijanse sive boje koja se projicira na predmetu. [11]



Slika 4. Metoda strukturirano svjetla [12]

2.2. Matematički model

Kamera i projektor temelje se na modelu iste perspektive projekcije sa radijalnim i tangencijalnim distorzijama leće do najviše 4. reda. Kao što je prikazano na slici 5., $P_w = [X \ Y \ Z]^T$, je točka u koordinatnom sustavu stvarnog prostora (0-XYZ), a ima koordinate u koordinatnom sustavu uređaja (0-xyz), izražene sa $P = [x \ y \ z]^T$. Ova transformacija krutog tijela od P_w na P može se izraziti jednadžbom 1. u kojoj su R i T rotacijske, odnosno translacijske matrice. [12]



Slika 5. Koordinatni sustav

$$P = R \cdot P_w + T \quad (1)$$

Neka je P_n projekcija točke P na normaliziranu oglednu ravninu, koja je paralelna sa oglednom ravninom i nalazi se na jediničnoj udaljenosti od središta leće O . U tom slučaju P_n možemo pisati prema jednadžbi 2.

$$P_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{z} \\ \frac{y}{z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Uzimajući u obzir utjecaj radijalnih i tangencijalnih distorzija leće na P_n , dobivamo distorziranu projekciju P_d na normaliziranoj oglednoj ravnini izvedenu u jednadžbi 3., u kojoj su $r^2 = x_n^2 + y_n^2$ i $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ je koeficijent distorzije leće.

$$P_d = f_d(P_n, K) = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = P_n + (k_1 r^2 + k_2 r^4) P_n + \begin{bmatrix} 2k_3 x_n y_n + k_4 (r^2 + 2x_n^2) \\ k_3 (r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Zadnja dva člana u jednadžbi 3 predstavljaju radijalnu i tangencijalnu distorziju leće. Tada se projekcija na oglednoj ravnini P_i može izraziti kao u jednadžbi 4. u kojoj su f_u i f_v horizontalna i vertikalna fokalna duljina, a u_0 i v_0 koordinate principijelne točke.

$$P_i = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u x_d + u_0 \\ f_v y_d + v_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Skraćeno, model kamere i projektora može se zapisati prema jednadžbi 5., u kojoj funkcija g opisuje proces oslikavanja od stvarnog koordinatnog sustava na oglednu ravninu, a $\Theta = [R \ T \ f_v \ f_h \ u_0 \ v_0 \ K]$ predstavlja parametar modela.

$$P_i = g(P_w, \theta) \quad (5)$$

3. Steinbichler optički mjerni uređaj

3.1. Digitalizator COMET 5

COMET 5 Eco, prikazan na slici 6., je sustav tvrtke Steinbichler Optotechnik koji odgovara stalno rastućim zahtjevima industrije, naročito što se tiče razvoja proizvoda i kontrole kvalitete. Odlikuju ga jedinstvene performanse i jednostavno korištenje. Temeljen na provjerenim industrijskim osnovama, COMET 5 Eco sa novom projekcijskom tehnologijom omogućava visokobrzinsko snimanje do šest puta brže, što je ključno kod mjerenja u teškim industrijskim uvjetima podložnim vibracijama. Primjenom najnovijih tehnologija PC softvera i hardvera (paralelni „processing“, 64-bitni operacijski sustav i softver aplikacije, WIN 7) omogućuje vrlo brzu obradu snimljenih podataka. Navedeno rezultira time da su sva mjerenja brza i precizna što ovaj sustav čini pogodnim za kontrolu kvalitete na pomičnim linijama.

Konstrukcija sustava je vrlo stabilna što omogućava korištenje sustava u širokom rasponu temperatura, a jaki eksterni izvor svjetla još poboljšava temperaturnu

stabilnost. Zahvaljujući visokoj fizičkoj stabilnosti senzor se može koristiti i u automatskim mjernim sustavima, odnosno može ga se postaviti na industrijske robote bez straha od utjecaja sila ubrzanja na rezultat mjerenja. Modularna konstrukcija omogućava laganu adaptaciju uređaja za razne volumene mjerenja, što ovaj uređaj čini vrlo fleksibilnim za razne zadatke mjerenja.



Slika 6. 3D digitalizator COMET 5 Eco [13]

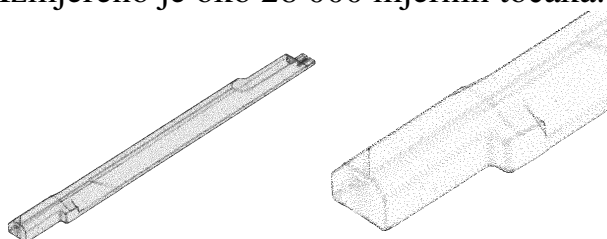
COMET 5 Eco konstruiran je za najrazličitija područja u industriji. Promjenjiva vidna polja i modularni dizajn omogućavaju digitalizaciju objekata raznih veličina sa visokom preciznošću.

Neka od područja primjene:

- Kontrola kvalitete/inspekcija (provjera stvarnog predmeta sa CAD modelom, serijska provjera u proizvodnji, mjerenja limova)
- Izrada kalupa i alata (rekonstrukcija alata, snimanje podataka za stvaranje putanja glodanja, dokumentacija stvarnih 3D podataka novih alata)
- Dizajn (skeniranje dizajnerskih modela za buduću primjenu u CAD-u)
- Brza izrada proizvoda (dobivanje 3D podataka za brzu izradu prototipova)
- Reverzibilni inženjering
- 3D skeniranje (skeniranje umjetničkih/povijesnih objekata, arheologija, medicina...)

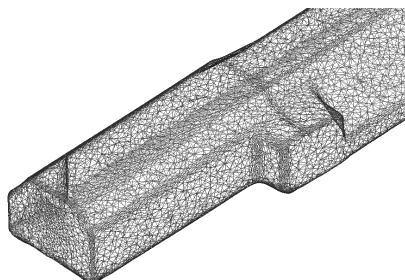
4. Usporedno mjerenje s CAD modelom

Reverzibilno inženjerstvo se pokazuje kao jaki alat za rekonstrukciju strojnih dijelova koji nemaju više svoju dokumentaciju. Slika 7. Prikazuje digitalizirani dio alata za injekcijsko brizganje plastike (trn). Zbog svoje složene geometrije i površina koje su alatničari dorađivali trebalo je digitalizirati dio i napraviti 3d model iz kojeg se može napraviti tehnička dokumentacija za izradu novog dijela. Dio je u prvoj fazi digitalizira s 3D skenerom Steinbichler Cometom 5. Nakon digitalizacije dobijemo oblak točaka (slika 7). Izmjereno je oko 28 000 mjernih točaka.



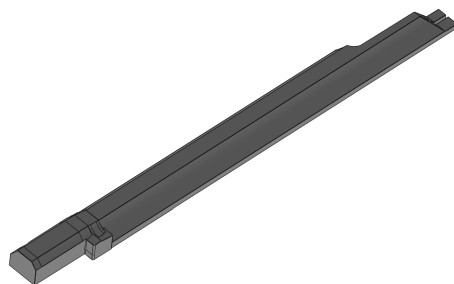
Slika 7. Digitalizirani trn

Nakon digitalizacije klizač je orijentiran po metodi 3-2-1. Sljedeći korak je bio da se izradi stl. model s kojim ćemo nakon rekonstrukcije uspoređivati rezultate. Slika 8 prikazuje dio klizača izrađenog u stl. ekstenziji.



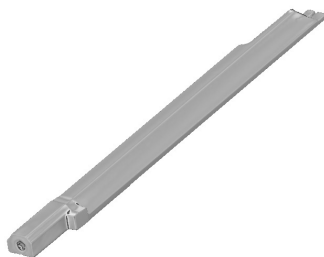
Slika 8. Dio trna u stl ekstenziji

Nakon izrade stl modela načinjeni su presjeci (slika 9.) pomoću koji je napravljena rekonstrukcija trna u programskom paketu Solidworks 2011. Vrlo je važno za kvalitetnu rekonstrukciju načiniti presjeke koje je moguće po potrebi modificirati. Pošto svaki izrađeni dio ima neko tolerancijsko područje koju mi ne možemo znati nakon digitalizacije. Važno je da prilikom rekonstrukcije strojnih dijelova osoba koja radi rekonstrukciju ima dovoljno znanja o tolerancijama dijela koji dolazi u određeni sklop. Slika 9. prikazuje konstruirani trn alata u programskom paketu Solidworks 2011. Trn je konstruiran preko površina a potom je iz površina napravljen CAD model. Prilikom konstrukcije model je provjeravan u INSPECT plus softvaru. Naručitelj je imao zahtjev da se rekonstrukcija izradi u toleranciji ± 0.05 mm od geometrije cijelog oblika trna.



Slika 9. Rekonstrukcija trna

Slika 10. prikazuje usporedbu konstruiranog trna s postojećim digitaliziranim. Može se vidjeti da je većina dijela u toleranciji koju zahtjeva Naručitelj. Oni dijelovi trna koji izlaze iz tolerancije su ustvari potrošena područja za vrijeme eksploatacije.



Slika 10. Odstupanje konstruiranog trna od stl modela

5. Zaključak

Brz razvoj novih proizvoda zahtjeva i razvoj novih metoda u pristupanju konstruiranja proizvoda. Reverzibilno inženjerstvo se postavlja kao najbolja metoda prilikom konstrukcije novog proizvoda. Geometrija oblika novih proizvoda su sve složenije i prilično komplicirana za izradu i mjerenje. Trodimenzionalni optički mjerni uređaji uvelike pomažu u razvoju proizvoda kao i u kontroli kvalitete oblika proizvoda. Optički mjerni uređaji postavljaju se i u sami proizvodni proces gdje ih odlikuje velika brzina i veliki broj mjernih rezultata u samo jednom mjerenju. Nužan uvjet koji se postavlja pred sustav normi je da kaže koliki broj izmjerenih podataka (točaka) na milimetar kvadratni je dostatno da je rezultat mjerenja dobar. Bez trodimenzionalnih optičkih sustava bilo bi nemoguće izrada konstrukcije složenih oblika. Rekonstrukcija starih proizvoda koji nemaju odgovarajuću dokumentacije više nije problem. Vrlo brzo možemo doći do odgovarajuće konstrukcije tj. do gotovog proizvoda.

8. Literatura

- [1] Motavalli, S.: *Review of Reverse Engineering Approaches, 23rd International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Vol.35, Nos.1-2, pp.25-28, Elsevier Science Ltd., 1998.
- [2] Bernardini, F., Bajaj, C., L., Chen, J., Schikore, D.: *Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans, Department of Computer Sciences, Purdue University, West Lafayette, USA, 1997.*
- [3] Budak, H.: *Reverzibilno inženjerstvo i CAD inspekcija – Skripta*, Novi Sad 2007
- [4] Udiljak, T.: *Predavanja CAM*, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb, 2006
- [5] <http://www.camr.unisa.edu.au> (10-03-2012)
- [6] Editoria, I S.: *A Methodology for Reverse Engineering*, <http://www.myb2o.com> (15-02-2012.)
- [7] Faxin, Yu.: *Three-Dimensional Model Analysis and Processing*, Kina 2010.
- [8] Tomislav, C., Mario, P.: *Simplified Light Plane Determination during Structured Light*, Zagreb, 2006.
- [9] Chen, Y.: *3D Measurement Technology by Structured Light Using*, Kina 2006.
- [10] Chader, M.: *The Value of 3rd Generation, Parametric Modeling from 3D Scan Data*. 2008.
- [11] Dutschke, W.: *Fertigungsmeßtechnik 3. Auflage*, Stuttgart, 1996.
- [12] Xiaobo, C.: *Accurate calibration for a camera – projector measurement system based on structured light projection*, Kina 2008.
- [13] <http://www.steimbichler.com> (10-03-2012)



Photo 040. Smell / Miris