

Univerzitet u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka

Igor Budak

**REVERZIBILNI INŽENJERSKI DIZAJN -
PREPROCESIRANJE REZULTATA
3D DIGITALIZACIJE**

Novi Sad, 2019.

Edicija: "TEHNIČKE NAUKE - MONOGRAFIJE", broj 81

Naziv monografije: "REVERZIBILNI INŽENJERSKI DIZAJN - PREPROCESIRANJE
REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE"

Autor: Igor Budak

Recenzenti: dr Duško Pavletić, redovni profesor Tehničkog fakulteta u Rijeci
dr Živana Jakovljević, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu
dr Đorđe Vukelić, vanredni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Izdavač: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr Rade Doroslovački, dekan Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Priprema i štampa: FTN - Grafički centar GRID, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad

Štampanje odobrio:

Savet za biblioteku i izdavačku delatnost Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Predsednik Saveta za biblioteku i izdavačku delatnost:

Prof. dr Milan Martinov, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Autorska prava pripadaju izdavaču

CIP-Katalogizacija u publikaciji
Библиотека Матице српске, Нови Сад

004.92:62

БУДАК, Игор

Reverzibilni inženjerski dizajn - preprocesiranje rezultata 3D digitalizacije / Igor Budak. - Novi Sad : Fakultet tehničkih nauka, 2019 (Novi Sad : Grid). - 140 str. : ilustr. ; 24 cm. - (Edicija "Tehničke nauke - monografije" ; 81)

Tiraž 50. - Bibliografija: str. 121-132.

ISBN 978-86-6022-224-6

a) Реверзibilно инжењерство -- 3Д дигитализација

COBISS.SR-ID 331441415

PREDGOVOR

Monografija *"Reverzibilni inženjerski dizajn - preprocesiranje rezultata 3D digitalizacije"* predstavlja stručno delo koje obuhvata analizu stanja i trendova razvoja u oblasti preprocesiranja rezultata 3D digitalizacije, kao i rezultate sopstvenih istraživanja u ovoj oblasti. Analiza stanja i trendova razvoja je sprovedena na bazi većeg broja literaturnih izvora, mahom naučnih radova iz istaknutih međunarodnih naučnih časopisa. Rezultati sopstvenih istraživanja autora, obuhvataju stručne i naučne rezultate, koji su ostvareni tokom dve decenije bavljenja problematikom reverzibilnog inženjerskog dizajna i posebno preprocesiranjem rezultata 3D digitalizacije, kroz postdiplomske studije, magistarsku tezu, doktorsku disertaciju i na brojnim stručnim i naučnim projektima.

Realizaciji ove monografije je doprineo veći broj mojih profesora i saradnika. Pre svih bih spomenuo mog mentora na postdiplomskim studijama prof. dr Janka Hodoliča, koji je prepoznao značaj oblasti reverzibilnog inženjerskog dizajna i podržao moj dalji stručni i naučni razvoj u njoj. Zatim mentora moje doktorske disertacije, prof. dr Mirka Sokovića sa Mašinskog fakulteta Univerziteta u Ljubljani, zahvaljujući čijoj podršci sam imao priliku da realizujem eksperimentalna istraživanja na savremenoj opremi i čija sistematičnost je pozitivno uticala na mnoge aspekte mojih istraživanja. Veliki doprinos razvoju oblasti reverzibilnog inženjerskog dizajna na Katedri za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko-inženjerske aspekte, što je doprinelo i kvalitetu ove monografije, dali su asistenti Mario Šokac i Željko Santoši. Najveći broj sopstvenih rezultata, predstavljenih u ovoj monografiji, ostvaren je u oblasti mašinskog inženjerstva. Zahvaljujući interdisciplinarnoj saradnji, značajni rezultati su postignuti i u oblastima biomedicinskog inženjerstva i zaštite kulturnog nasleđa. Poseban doprinos, koji se tiče primene reverzibilnog inženjerskog dizajna u oblasti biomedicinskog inženjerstva, dali su profesori Medicinskog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu, dr Tatjana Puškar, dr Siniša Mirković, dr Aleksandar Kiralj i drugi. Sa druge strane, zahvaljujući saradnji sa profesorima dr Ratkom Obradovićem i dr

Vesnom Stojaković sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, ostvareni su značajni rezultati primene reverzibilnog inženjerskog dizajna u oblasti zaštite kulturnog nasleđa.

Zahvalnost dugujem i članovima Katedre za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko-inženjerske aspekte, pre svega sadašnjim, ali i onima koji su bili njeni članovi u prethodnom periodu, kao i kolegama sa Departmana za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, koji su podržavali moj rad u oblasti reverzibilnog inženjerskog dizajna, a kroz to i realizaciju ove monografije.

Posebna zahvalnost ide recenzentima monografije, dr Živani Jakovljević, vanrednom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Dušku Pavletiću, redovnom profesoru Tehničkog fakulteta Univerziteta u Rijeci i dr Đorđu Vukeliću, vanrednom profesoru Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Njihovi saveti i korekcije su značajno doprineli finalnom kvalitetu monografije.

Najveću zahvalnost dugujem mojim najdražima - Mii, Ianu i Heleni, na neprekidnoj inspiraciji i bezuslovnoj podršci.

Igor Budak

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. REVERZIBILNI INŽENJERSKI DIZAJN	5
2.1 Definicije osnovnih pojmova i termina	6
2.2 Interpretacije pojma RE u proizvodnom inženjerstvu	8
2.3 Uloga i značaj RE u integrisanom projektovanju i proizvodnji	11
2.3.1 Integracija RE sa drugim savremenim tehnikama i tehnologijama za razvoj i izradu proizvoda.....	12
2.4 Oblasti primene RE dizajna	16
3. METODOLOGIJE REVERZIBILNOG INŽENJERSKOG DIZAJNA ...	19
3.1 3D digitalizacija.....	21
3.1.1 Metode 3D digitalizacije	22
3.1.1.1 Kontaktne metode.....	23
3.1.1.2 Beskontaktne metode	35
3.2 Pre-procesiranje oblaka tačaka	42
3.3 Rekonstrukcija površina.....	42
3.3.1 Rekonstrukcija površinskih modela primenom presečnih-sekcijskih krivih.....	45
3.3.2 Rekonstrukcija površinskih modela primenom poligonalne aproksimacije	51

4. PRE-PROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE	53
4.1 Filtriranje rezultata 3D digitalizacije	54
4.1.1 Filtriranje tačkaka-izvan-opsega u rezultatu 3D digitalizacije.....	56
4.1.1.1 Metoda zapreminskog filtriranja	56
4.1.1.2 Metoda filtriranja segmentiranom linijom	57
4.1.1.3 Metoda ugla	58
4.1.1.4 Metoda kontrolnih granica.....	58
4.1.1.5 Metoda medijane	60
4.1.2 Uravnavanje podataka-tačkaka u rezultatu 3D digitalizacije.....	60
4.1.2.1 Metoda srednjih vrednosti.....	60
4.1.2.2 Metoda medijane	61
4.2 Redukovanje podataka-tačkaka u rezultatu 3D digitalizacije	63
4.2.1 Metode redukovanja podataka semplovanjem.....	64
4.2.1.1 Metoda uniformnog (faktornog) semplovanja	65
4.2.1.2 Metoda prostornog semplovanja.....	65
4.2.1.3 Metoda devijacije visine tetive	67
4.2.1.4 Metoda redukcije na osnovu visine.....	69
4.2.1.5 Metoda pravosti	71
4.2.1.6 Metoda redukcije na osnovu krivosti u tačkama	73
4.2.1.7 Metoda redukcije zasnovana na verovatnoći.....	74
4.2.1.8 Metoda promene tangentnosti	74
4.2.2 Metode za redukciju podataka-tačkaka kod poligonalnih i mrežnih modela	74
4.2.2.1 Metode poligonalne triangulacije	75
4.2.2.2 Metoda "nivoi-detalja"	76
4.2.3 Redukcija podataka-tačkaka primenom rešetki	79
4.2.3.1 Metode sa uniformnim rešetkama.....	79
4.2.3.2 Metode sa ne-uniformnim rešetkama	80

5. METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U PRE-PROCESIRANJU REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE	87
5.1 Primena veštačkih neuronskih mreža i genetskih algoritama u pre-procesiranju rezultata 3D digitalizacije	87
5.2 Primena fazi logike u pre-procesiranju rezultata 3D digitalizacije	89
5.3 Sistem za redukciju podataka-tačaka zasnovan na fazi logici.....	91
6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE	101
6.1 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije stakla sportskih naočara	101
6.2 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije ljudskog lica	107
6.3 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije umetničke plakete....	111
6.4 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije zuba remenastog prenosnika	116
LITERATURA	121

1. UVOD

Zahtevi globalizovanog tržišta za stalnim skraćanjem vremena, potrebnog za razvoj novih proizvoda a sve u cilju postizanja konkurentnosti, učinili su da reverzibilno inženjerstvo (engl. *Reverse Engineering - RE*) postane vrlo popularna tehnologija koja se brzo razvija i koja u mnogim inženjerskim područjima postaje nezamenljiv alat. Kada je reč o modelovanju i/ili dizajniranju u oblasti mašinskog inženjerstva, RE dizajn postaje sve značajniji alat. Od početne, primitivnije, primene RE koja je podrazumevala kopiranje postojećih proizvoda, preko omogućavanja generisanja needitabilnog digitalnog 3D modela, RE dizajn se razvio u metodu za razvoj proizvoda koja uključuje generisanje CAD modela i različite nivoe njegovih modifikacija, sve sa ciljem postizanja željenog dizajna i funkcije proizvoda [1-5]. Prednosti primene RE u procesu razvoja proizvoda najuočljivije su u slučajevima proizvoda sa složenom geometrijom [6-8].

U okviru zahteva savremenih tržišta, koji podrazumevaju često i brzo redizajniranje proizvoda, sve važniju ulogu imaju estetski i ergonomski aspekti koji impliciraju geometrijski sve složenije, odnosno slobodnije i prirodnije forme i oblike, bilo da se radi o ambalaži, dečjim igračkama, kućnoj i kancelarijskoj tehnici ili o automobilima. Ovakve oblike je najčešće teško, a u nekim slučajevima i gotovo nemoguće, modelirati konvencionalnim CAD alatima, već se isti dobijaju umetničkim (vajarskim) modeliranjem fizičkih modela (postoje različite tehnike – glina, gips, polimerni materijali, drvo itd.), koji se zatim primenom RE dizajna prevode u digitalne modele. Pored navedenog, primena RE u procesu redizajna postojećih, bilo sopstvenih, bilo proizvoda konkurentskih firmi, može značajno da ubrza i poboljša taj proces. U slučaju potrebe za izradom kopija, odnosno reprodukcijom, delova i proizvoda za koje ne postoji odgovarajuća tehnička dokumentacija, RE pristup praktično nema alternativu [1,3,5,8-11].

Kao osnovne faze RE modeliranja mogu se navesti [1,9,12]:

- 3D digitalizacija,
- pre-procesiranje podataka-tačaka i
- rekonstrukcija površina (generisanje CAD modela).

Savremeni sistemi za 3D digitalizaciju, koji se primenjuju u reverzibilnom inženjerskom dizajnu, odlikuju se sve većom brzinom skeniranja, ali i mogućnošću generisanja velikog broja tačaka u jedinici vremena. Tako, na primer, aktuelni laserski 3D skeneri generišu i više desetina hiljada tačaka u sekundi, a sistemi za 3D digitalizaciju zasnovani na strukturiranoj svetlosti generišu i više stotina hiljada tačaka u sekundi [13-15]. To, u opštem slučaju, doprinosi podizanju kvaliteta i efikasnosti procesa RE-modeliranja. Međutim, u praksi, ovakav ogroman broj tačaka, generisan u fazi 3D digitalizacije, može predstavljati ozbiljan problem kasnije u fazi generisanja CAD modela. Takođe, proces 3D digitalizacije je neretko povezan i sa pojavom grešaka merenja, što zbog same prirode mernih sistema, što zbog karakteristika objekata koji se digitalizuju, odnosno subjektivnih grešaka rukovaoca, što takođe ima za posledicu velike izazove u procesu rekonstrukcije površina, odnosno generisanja CAD modela [3,12,16,17].

Kao osnovne posledice prisustva tačaka-grešaka, kao i prevelikog broja tačaka u rezultatu 3D digitalizacije, mogu se navesti: otežan rad u softverima za generisanje površinskih i zapreminskih (solid) modela, odnosno veliko odstupanje geometrije rezultujućeg 3D modela u odnosu na polazni fizički objekat. Otežan rad, u ovom slučaju, podrazumeva usporenost procesa generisanja površinskih 3D modela, a u ekstremnijim slučajevima i nemogućnost generisanja 3D modela, čak i uz primenu računarskih konfiguracija vrhunskih performansi [13,16,18-21].

Trend primene 3D modela ili delova 3D modela dobijenih primenom RE, poslednjih godina inače u velikom porastu, je takav da proizvodne firme radije koriste usluge drugih specijalizovanih firmi za 3D digitalizaciju i razvoj ovakvih 3D modela. Razloge ovakvog trenda treba tražiti u potrebi za specijalizovanim radnim jedinicama unutar firmi koje, sa jedne strane, podrazumevaju velika ulaganja u specijalizovani hardver i softver, a sa druge strane, neophodnost visokokvalifikovane radne snage za čije formiranje su potrebne godine i čija cena rada je vrlo visoka. Ovde se, pre svega, misli na mikro i mala, a neretko i srednja (proizvodna) preduzeća koja su i najzaslužnija za ekspanziju primene RE dizajna. To

obuhvata razvoj i proizvodnju alata za brizganje plastike, livenje, presovanje, štancovanje i sl., primenjivane u proizvodnji robe široke potrošnje poput ambalaže (bočice za napitke, parfeme, kutije itd.), dečjih igračkaka, suvenira, ali i u specifičnim oblastima poput proizvodnje i/ili reprodukcije umetničkih skulptura i kipova, odnosno delova sa naglašenim ergonomskim funkcijama (od escajga, preko ručki i sedišta, do obuće i kaciga) i medicinskih pomagala i implanata [2,5,6,21-25].

Uzimajući u obzir prethodno, faza pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije, odnosno menadžment oblakom tačaka (kako se sve češće naziva), koja obuhvata procese filtriranja, uravnavanja i redukcije podataka-tačaka, postaje nezaobilazna u gotovo svakom RE-sistemu. U prilog prethodnoj tvrdnji govori i činjenica da je, poslednjih dvadesetak godina, pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije česta tema naučno-istraživačkih radova, gde redukcija broja tačaka zauzima centralno mesto [13,16-20,26,27]. Kao rezultat toga do sada je razvijen veliki broj sistema za pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije, baziranih na različitim prilazima koji su, pre svega, zavisni od metodologije RE, odnosno sistema za 3D digitalizaciju kojima su namenjeni. To se odnosi na sva tri segmenta pre-procesiranja: filtriranje, uravnavanje i redukovanje, pri čemu ipak treba napomenuti da je redukovanje u većoj meri zavisno od metodologije RE i tipa 3D digitalizacije. Drugim rečima, većina prilaza za filtriranje i uravnavanje mogu se uspešno primenjivati u sistemima za RE baziranim na različitim metodologijama, dok je to u slučaju redukcije redak slučaj.

U mnoštvu razvijenih prilaza za redukovanje podataka-tačaka, mogu se identifikovati tri dominantne grupe prilaza za pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije [3,12,20]:

- 1) metode semplovanja tačaka,
- 2) metode redukcije poligona i
- 3) metode na bazi rešetki (mreža).

Detaljniji opis navedenih metoda je dat u 4. poglavlju.

Redukcija tačaka u slučaju RE metodologije zasnovane na poprečnim presecima (engl. *cross-sectional*), dominantno je zasnovana na metodama semplovanja, među kojima se, kao najprimenjivnije, ističu: faktorna, prostorna, tetivna, ugaona i visinska metoda. Sve ove metode su zasnovane na različitim parametrima, na bazi kojih "donose" odluku o redukciji tačaka. Osnovni pokazatelj kvaliteta (efikasnosti i efektivnosti)

primene metoda je odnos rezultujućeg odstupanja (poprečno-presečnih krivih, odnosno površinskog modela) i nivoa (procenta) redukcije tačaka. U skladu sa tim, tema mnogih dosadašnjih istraživačkih pokušaja u ovoj oblasti se može predstaviti pitanjem: *Kako povećati nivo redukcije, uz istovremeno smanjenje greške, odnosno nivoa odstupanja?*

Ova monografija, najpre kroz analizu stanja u oblasti, zatim kroz prikaz mogućnosti metoda za pre-procesiranje podataka-tačaka za potrebe RE dizajna i konačno kroz praktične primere, daje doprinos dolasku do odgovora na prethodno pitanje.

Time se omogućavaju praktični doprinosi primeni RE dizajna kroz:

- poboljšanje kvaliteta procesa redukcije tačaka;
- podizanje korisničke orijentisanosti funkcije za redukciju podataka (kroz smanjenje nivoa potrebe za specifičnijim poznavanjem matematičkih modela metoda);
- stvaranja osnova za razvoj integrisanih sistema za pre-procesiranje podataka-tačaka;
- povećanje efikasnosti procesa RE modeliranja (veći komfor rada kod sistema sa slabijim računarskim konfiguracijama);
- pre-procesirani, redukovani oblaci tačaka pružaju mogućnost generisanja RE modela i u univerzalnijim (često i pristupačnijim) CAD softverima, što može biti značajno mikro i malim proizvodnim preduzećima.

Monografija je strukturirana kroz 6 poglavlja, dok je u poslednjem 7. poglavlju dat spisak korišćenih literaturnih izvora. Nakon uvodnog poglavlja, sledi poglavlje koje sadrži definicije pojmova u vezi sa RE dizajnom, kao i analizu oblasti primene RE dizajniranja. Metodologija RE dizajniranja je tema trećeg poglavlja. Naredno, četvrto poglavlje je posvećeno analizi faze pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije, sa akcentom na metode redukcije podataka-tačaka, kao najsofisticiranijeg dela ove faze. Sledi poglavlje u okviru kojeg je analizirana primena metoda veštačke inteligencije u oblasti pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije. Šesto poglavlje sadrži primere praktične primene prethodno predstavljenih metoda za pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije. U poslednjem delu monografije je dat spisak korišćenih literaturnih izvora.

2. REVERZIBILNI INŽENJERSKI DIZAJN

Zahtevi globalizovanog tržišta za skraćanjem vremena potrebnog za razvoj novih proizvoda, pre svega u cilju ostvarenja konkurentnosti, učinili su da RE dizajn postane vrlo popularna tehnika dizajna koja se brzo razvija i koja u mnogim inženjerskim područjima postaje nezamenljiv alat. Reverzibilni inženjerski dizajn se tako danas vrlo često primenjuje u mašinskom i industrijskom inženjerstvu, biomedicinskom inženjerstvu, građevinarstvu i arhitekturi, geodeziji i geomatici, vojnoj industriji, poljoprivrednom inženjerstvu, elektrotehnici i elektronici, a zabeleženi su i prvi pokušaji primene u oblasti astronomije [4,6,28,29]. Osim u inženjerskim oblastima, RE dizajn je u poslednje vreme sve češće primenjivan i u različitim neinženjerskim oblastima, poput kinematografije (uključujući i animirane filmove) i produkcije video igara, zatim u kriminalistici (kod rekonstrukcije mesta zločina), zaštiti i restauraciji objekata kulturnog nasleđa [11,30].

U oblasti projektovanja u mašinskom inženjerstvu, RE dizajn nesporno postaje važan segment sa sve široom ulogom. U početku se RE svodilo na kopirnu izradu postojećih proizvoda, odnosno modela. Sledeći korak je bila mogućnost generisanja digitalnog 3D modela, ali bez mogućnosti bilo kakvih izmena [1,31,32]. Danas RE, pre svega, predstavlja dizajnerski alat, odnosno tehniku za razvoj i modeliranje proizvoda koja uključuje generisanje digitalnog, odnosno virtuelnog 3D modela i različite nivoe njegove modifikacije, sve sa ciljem postizanja željenih oblika i funkcija proizvoda. Prednosti primene RE u procesu razvoja proizvoda posebno se ispoljavaju u slučaju proizvoda sa složenom geometrijom površina.

U okviru zahteva savremenog tržišta, koji podrazumevaju brzo i često redizajniranje proizvoda, sve važniju ulogu imaju estetski i ergonomski aspekti. Ovi aspekti impliciraju sve složenije oblike proizvoda, bilo da se radi o ambalaži, dečjim igračkama, obući ili o automobilima. Takve, složene oblike je najčešće teško, a u nekim slučajevima i gotovo

nemoguće modelovati alatima koje nude konvencionalni CAD sistemi. Proces dolaska do CAD modela, u slučaju pomenutih složenih oblika, po pravilu započinje umetničkim modelovanjem (vajanjem) fizičkih modela (u glini, gipsu, drvetu itd.), koji se zatim primenom tehnike RE prevode u funkcionalne CAD modele. Pored navedenog, primena RE u procesu redizajna postojećih, bilo sopstvenih, bilo proizvoda konkurentskih firmi, može značajno da ubrza i poboljša taj proces. U slučaju potrebe za izradom kopija, odnosno reprodukcijom delova i proizvoda za koje ne postoji odgovarajuća tehnička dokumentacija, tehnika RE praktično nema alternativu [4,5].

2.1 Definicije osnovnih pojmova i termina

Reverzibilno inženjerstvo je relativno mlada inženjerska tehnika i do pre petnaestak godina predstavljalo je pojam koji se nije često sretao u literaturi, a u praksi se vrlo malo koristio. Pojam RE se danas, kao što je napomenuto u prethodnom delu, može sresti u različitim inženjerskim i neinženjerskim oblastima gde svaka od njih nosi svoje specifičnosti. Ipak, bilo o kojoj oblasti da je reč, RE se može definisati kao "*proces analiziranja određenog sistema sa dva osnovna cilja* [33]:

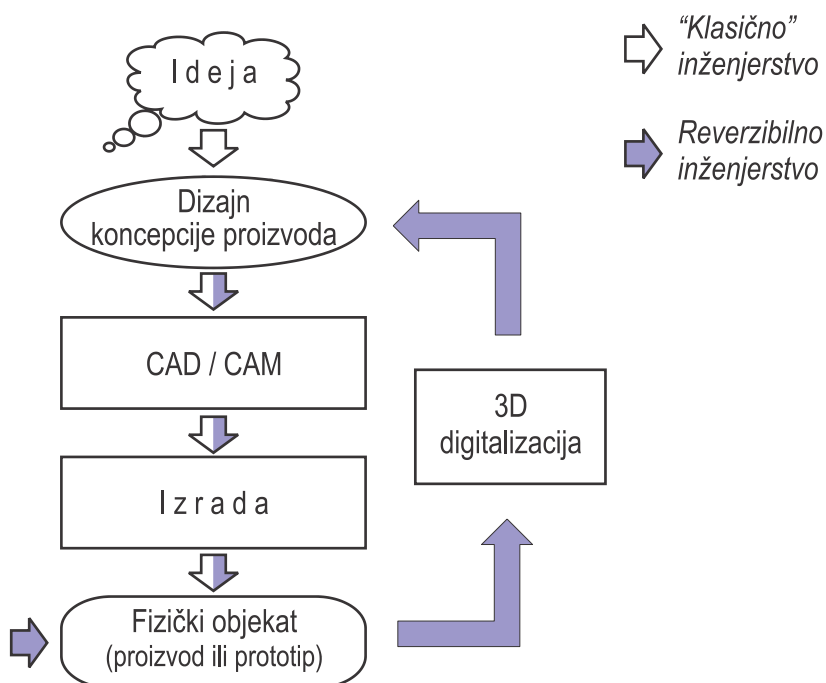
- 1) *identifikacije komponenata sistema i njihovih međusobnih odnosa i veza i*
- 2) *kreiranja predstave (prikaza) sistema u drugoj formi ili na višem nivou apstrakcije".*

Drugim rečima, pojam RE u najopštijem slučaju obuhvata svaku aktivnost koja se čini u cilju utvrđivanja načina na koji određeni proizvod funkcioniše ili proučavanja ideja i tehnologija koje su primenjene u razvoju originalnog proizvoda [34]. Za detaljnije definisanje RE neophodno je lociranje RE u konkretnu oblast primene.

U okviru mašinskog inženjerstva RE se, u užem smislu, može definisati kao proces reprodukcije postojećeg proizvoda, odnosno dela ili sklopa, bez pomoći tehničke dokumentacije ili digitalnog 3D modela. U širem smislu, RE se može posmatrati kao sistemski prilaz za analiziranje postojećeg uređaja ili sistema i može se primeniti kako za analizu procesa projektovanja dela/sistema, tako i kao početni korak u procesu redizajniranja, a u cilju analize mehanizama na osnovu kojih uređaj funkcioniše. U kontekstu prethodnog, tehnika RE se može primeniti i za proučavanje unutrašnjih delova mašinskog uređaja, odnosno

upoređivanja aktuelnog uređaja sa sprovedenim analizama u cilju dobijanja predloga za poboljšanje [34].

RE se može definisati i kroz poređenje sa konvencionalnim (klasičnim) inženjerskim pristupom, tj. inženjerstvom "u napred" kako se još naziva [3,35]. Klasično inženjersko projektovanje podrazumeva razradu apstrakcije, odnosno ideje, kroz konceptualno, a zatim i detaljno CAD modelovanje nakon čega sledi izrada. Nasuprot tome, polazna tačka RE dizajna je fizički objekat, koji se zatim prevodi u virtualni domen, eventualno prilagođava ili unapređuje u funkcionalni CAD model i na kraju izrađuje (slika 2.1).



Slika 2.1: "Klasično" nasuprot reverzibilnom inženjerstvu [3,12,36]

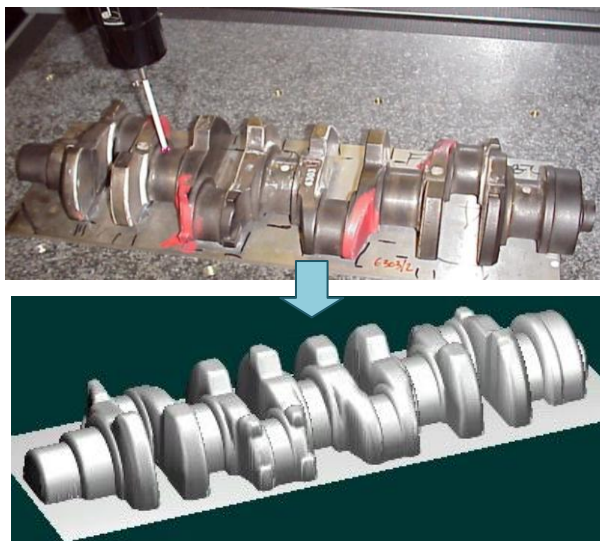
Kada je reč o primeni termina *reverzibilno inženjerstvo*, u literaturi se mogu naći različiti termini, pre svih *reverzni inženjering* i *reinženjering*, a osim njih i *rekonstrukcija površina*, *restrukturiranje*, *obnavljanje dizajna* (engl. *design recovery*), *re-dokumentovanje* i slično, pod kojima se, manje-više, podrazumeva isti proces [33].

Tehnika RE se vremenom razvila u nekoliko pravaca, usled čega su se pojavili i određeni izvedeni pojmovi i složenice. Njihova pojava se, pored jasnijeg iskazivanja karakteristika tehnike RE, može dovesti u vezu i sa etapama razvoja tehnike RE [4,5,26,37-39]:

- ❑ *RE zasnovano-na-obeležjima* (engl. *Feature-Based-RE*) koji sugeriše da se radi o RE orijentisanom ka pronalaženju *obeležja*, pod kojima se ovde podrazumevaju osnovni geometrijski entiteti (otvori, oborene ivice, žlebovi, sfere itd.).
- ❑ *Računarom podržano RE* (engl. *Computer Aided Reverse Engineering - CARE*) nema neku posebnu odrednicu, a često se primenjivao pre nekoliko godina, mada se još uvek može naći u literaturi, sa počecima ulaska računarskih tehnologija u oblast RE.
- ❑ *RE-CAD* (engl. *Reverse Engineering - Computer Aided Design*) označava deo procesa RE do generisanja CAD modela.
- ❑ *RE dizajn* predstavlja skraćenu verziju prethodne složenice.
- ❑ *Integrirano RE* je pojam koji se pojavio sa primenom tehnike RE, kao jednog od važnijih alata za dizajn, u integriranim CIM (engl. *Computer Integrated Manufacturing*) sistemima.
- ❑ *Inteligentno RE* podrazumeva integraciju RE i tehnologija veštačke inteligencije, poput neuronskih mreža, fazi (engl. *fuzzy*) logike ili genetskih algoritama.

2.2 Interpretacije pojma RE u proizvodnom inženjerstvu

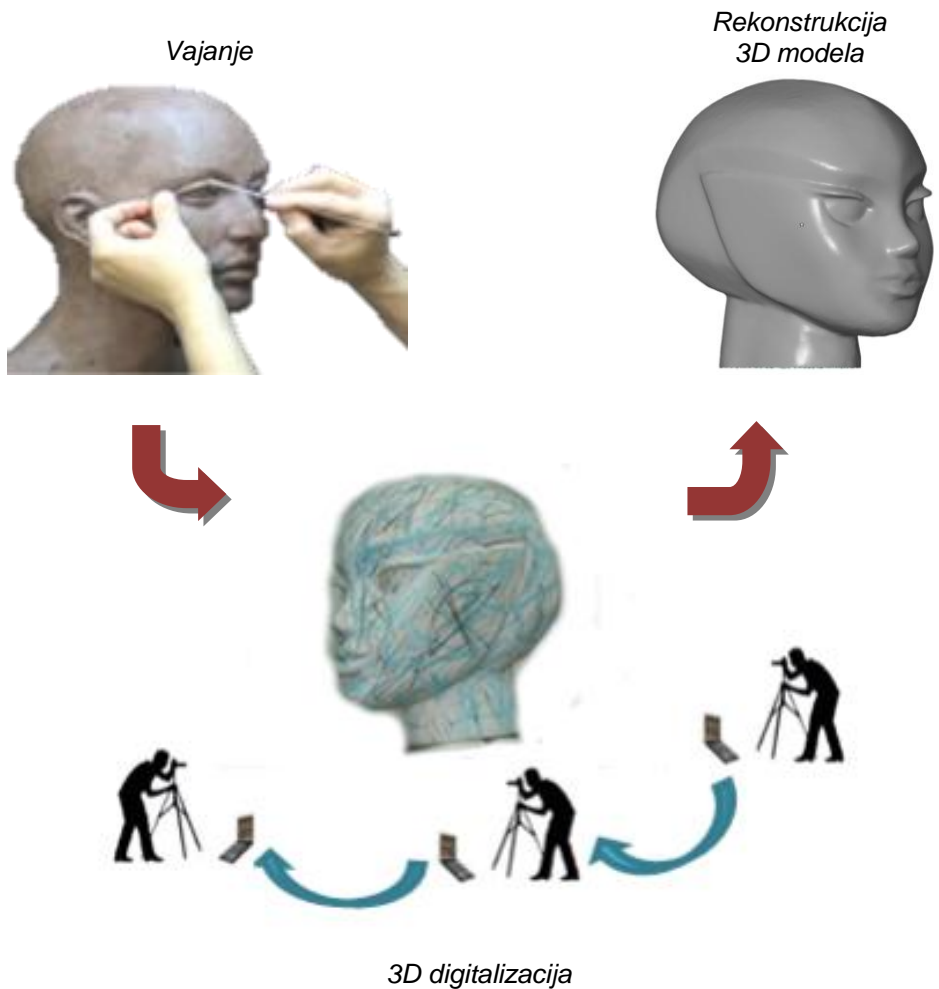
Izvorna interpretacija pojma RE u okviru mašinskog inženjerstva je zasnovana na inicijalnoj primeni RE, odnosno kopiranju postojećeg dela/sklopa bez pomoći crteža, dokumentacije ili digitalnog 3D modela. Ova interpretacija je, uglavnom, u vezi sa izradom rezervnih delova (slika 2.2). Izvorna interpretacija obuhvata i proces redizajna postojećih proizvoda [1,3,4].



Slika 2.2: Ilustracija izvorne interpretacije RE [3,12]

U okviru procesa razvoja novih proizvoda, uzimajući u obzir aktuelne dizajnerske trendove koji impliciraju proizvode sve složenijih oblika, odnosno slobodnijih geometrijskih formi, kreiranje CAD modela postaje sve veći izazov. Saznanje o mogućnosti transformacije fizičkih objekata u digitalne 3D modele, uslovlila je angažovanje profesionalnih vajara od strane dizajnerskih i projektantskih firmi. Vajari kreiraju željene oblike u glini, gipsu ili nekom drugom pogodnom materijalu, a zatim se ovako dobijeni modeli tehnikom RE rekonstruišu u funkcionalne CAD modele primenljive u CAx proizvodnim tehnologijama, kao i za elektronsko slanje udaljenim klijentima (slika 2.3). Ova vrsta RE dizajna je poznata i pod nazivom *kolaborativni dizajn* [40,41], odnosno *RE za dizajn koncepcije oblika* [42].

Prethodno opisana primena tehnike RE obuhvata i projektovanje ergonomski funkcionalnih proizvoda, pre svega invalidskih pomagala i ortopedske obuće, ali i proizvoda široke potrošnje sa naglašenim ergonomskim aspektima, poput kompjuterskih tastatura i miševa, sedišta, kacige itd. Kod ove vrste RE modeliranja je, za razliku od prethodnog estetski diktiranog RE projektovanja gde je polazni objekat izvajani model, polazni objekat ljudsko telo, odnosno njegov određeni deo, slika 2.4.



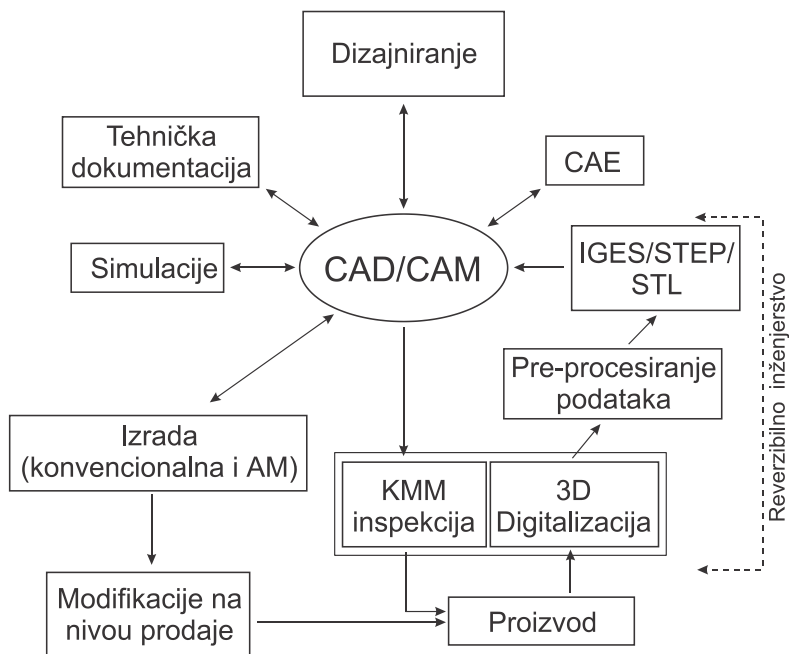
Slika 2.3: Primena RE kod izvajanih modela - kolaborativno projektovanje [25]



Slika 2.4: RE projektovanje proizvoda sa ergonomskim zahtevima [43]

2.3 Uloga i značaj RE u integrisanom projektovanju i proizvodnji

U okviru razvoja integrisanih CIM-sistema, a posebno sa integracijom CAD/CAM sistema i CNC upravljanih mernih sistema, reverzibilno inženjerstvo se profilisalo u jednu od krucijalnih tehnika u sistemima za projektovanje i izradu proizvoda [4,38]. Mesto i uloga RE u integrisanom procesu projektovanja i proizvodnje, mogu se sagledati sa šematskog prikaza na slici 2.5.



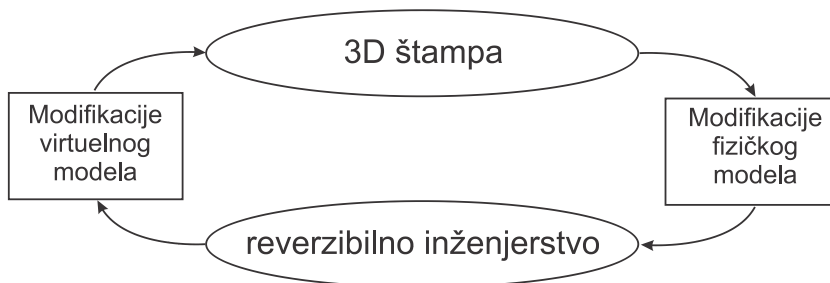
Slika 2.5: Mesto i uloga RE u integrisanoj proizvodnji [12,44]

2.3.1 Integracija RE sa drugim savremenim tehnikama i tehnologijama za razvoj i izradu proizvoda

Reverzibilno inženjerstvo se vrlo često kombinuje sa drugim, naprednim tehnologijama, odnosno integriše se u sisteme koji objedinjavaju više naprednijih tehnika i tehnologija. Ovo se pre svega odnosi na *brzu izradu prototipa* (engl. *rapid prototyping* - RP), odnosno tehnologije *aditivne proizvodnje* (engl. *aditive manufacturing* - AM) ili 3D štampe, *brze proizvodnje* (engl. *rapid manufacturing* - RM) i *brze izrade alata* (engl. *rapid tooling* - RT) [24,45-47].

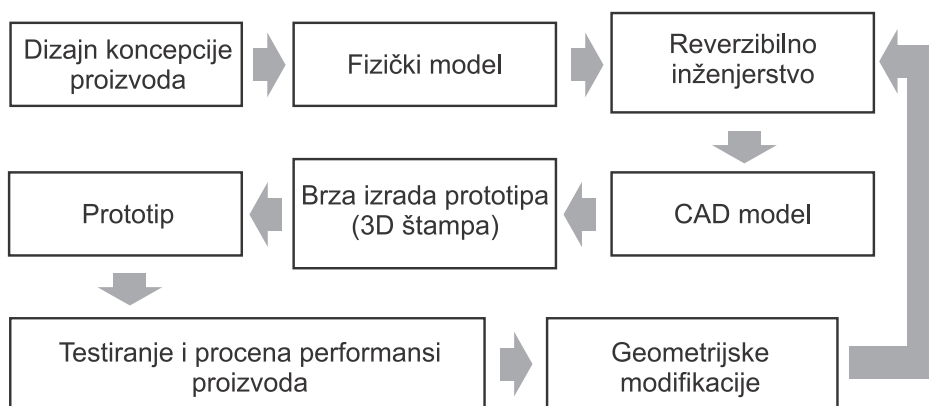
U okviru savremene integracije procesa dizajniranja i proizvodnje, značajna pažnja se posvećuje integraciji tehnike RE dizajna i tehnologija 3D štampe, odnosno AM. Iako su se RE i AM razvijale praktično nezavisno jedna u odnosu na drugu, evidentan je porast interesovanja za njihovu integraciju [43,45,46]. Razlog za to treba tražiti u potrebi za prevazilaženjem nedostataka virtuelnog 3D modela i fizičkih objekata. Dok RE ima za cilj generisanje virtuelnog 3D modela na osnovu postojećeg fizičkog objekta, cilj RP je da na bazi virtuelnog 3D modela kreira njegovu fizičku interpretaciju i to brzo, direktno i dovoljno tačno, uz

minimalan uticaj čoveka. Slika 2.6 predstavlja šematski prikaz jednog RE/RP (re)dizajn ciklusa koji ilustruje benefite RE-AM(RP) integracije u slučaju dizajna kompleksne 3D geometrije. Princip jednog integrisanog RE-AM sistema za razvoj proizvoda dat je na slici 2.7.



Slika 2.6: (Re)dizajn ciklus integrisanog RE/AM sistema [12]

Integrisani RE-AM sistemi se mogu uspešno primenjivati u većini situacija karakterističnim za primenu RE sistema. Jedan od prvih karakterističnih primera RE-AM(RP) integracije je razvoj *3D faksa*. U okviru 3D faks sistema, RE virtuelni 3D model se putem interneta šalje udaljenim saradnicima, kupcima itd., kod kojih se isti primenom RP transformiše u fizički model [40,48]. Danas je ovaj koncept značajno unapređen i u skladu je sa paradigmom naredne generacije proizvodnje u okviru *Industry 4.0* koncepta [7].

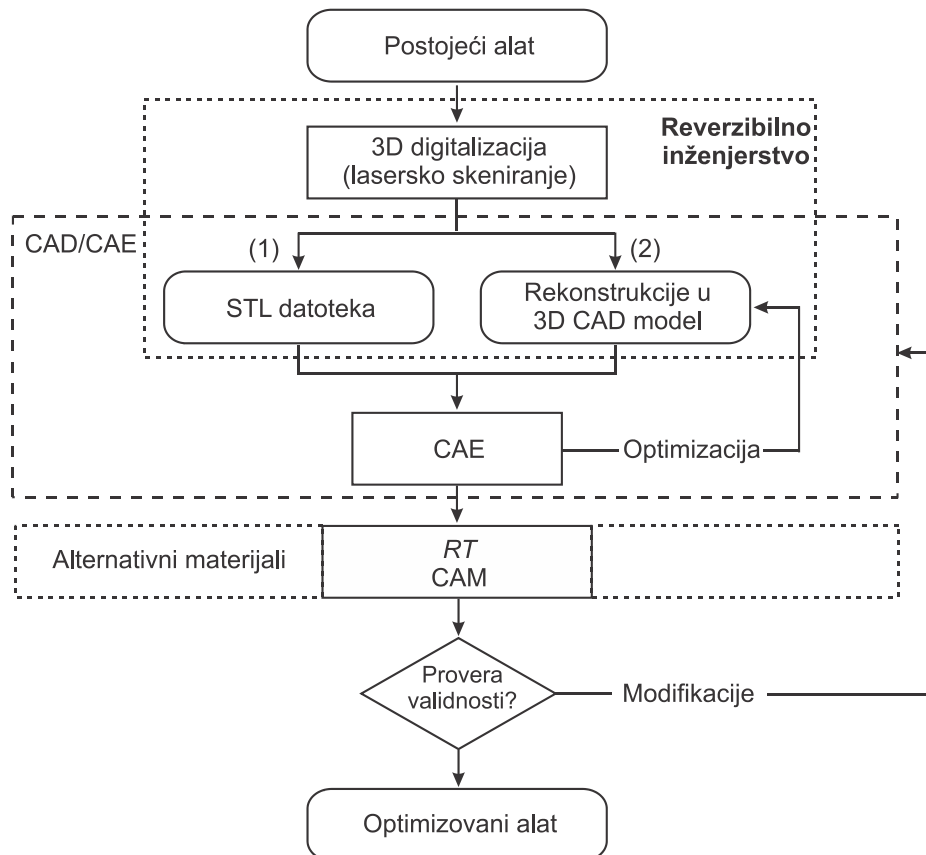


Slika 2.7: Integrisani RE-AM(RP) sistem za razvoj proizvoda [48]

Razvoj alata, bilo da se radi o alatima za livenje metala ili injekciono livenje polimera, nosi najveći deo troškova za proizvođače, kako u pogledu vremena tako i u pogledu materijalnih troškova. Brze promene na tržištu podižu zahteve za fleksibilnijim proizvodnim mogućnostima. Kao odgovor na ove rastuće zahteve i *just-in-time (JiT)* isporuke, razvile su se inovativne metode čiji je cilj, pre svega, skraćenje, a po mogućnosti i eliminisanje, dugotrajnih razvojnih ciklusa povezanih sa proizvodnjom novih alata. Jedna od njih je i *brza izrada alata*, po mnogo čemu revolucionarna metoda za proizvodnju alata, koja isključuje dugotrajnu obradu, značajno skraćuje vreme potrebno za izlazak proizvoda na tržište uz bolji odnos cena/performance [45,49].

Stanley i Yancey su u [50] predstavili jedan od prvih sistema za brzu proizvodnju alata, u kome su tri, na prvi pogled nezavisne tehnologije RE, RP i RT, sinergički međusobno povezane. Startna pozicija je CAD model potrebnog dela, a ukoliko takav model nije dostupan, primenjuje se RE dizajn (na bazi 3D digitalizacije pomoću CT-a). Zatim se projektuje alat, modelovanjem dva uparena kalupna bloka čija centralna šupljina odgovara obliku dela. Sledi matematička simulacija procesa livenja, da bi se predvideli faktori skupljanja, odredile pozicije otvora i ulaznih kanala i podesili parametri livenja. Tehnologija RP, na bazi stereolitografije, se zatim primenjuje radi izrade polimernih modela kalupa u prirodnoj veličini, koje se dalje koriste kao livački modeli za izradu alata. Ovaj sistem se uspešno primenjivao kod izrade alata za injekciono livenje plastike, kalupno livenje, livenje u pesku i livenje u kokilama.

Ferreira i Alves su u [51] predstavili sistem koji integriše RE i RT, namenjen livarskoj industriji (slika 2.8). Ovakve i slične integracije su doprinele stvaranju mogućnosti za razvoj agilne proizvodnje (engl. *Agile Manufacturing*) čija je osnovna karakteristika mogućnost brzog odgovora na promene u zahtevima, kako u pogledu obima tako i u pogledu raznovrsnosti proizvoda [52].



Slika 2.8: RE/RT integrisani sistem za livenje metala/plastike [51]

Oblak proizvodnja ili *Cloud bazirana proizvodnja* (engl. *Cloud Manufacturing - CM*), koja predstavlja ekstenziju paradigme *oblak računarstva* (engl. *Cloud Computing*) u proizvodnom sektoru, predstavlja *ključnu omogućavajuću tehnologiju* (engl. *Key Enabling Technology - KET*) u *Industry 4.0* okviru. Prednosti primene CM-a se ogledaju u mogućnosti povezivanja putem interneta sa brojnim digitalnim i fizičkim proizvodnim resursima i proizvodnim sposobnostima, koji se mogu deliti i/ili nuditi na zahtev različitim povezanim korisnicima u skladu sa uslužnom orijentisanom arhitekturom. To predstavlja evoluciju načina ponude proizvodnih usluga, omogućavajući globalni pristup preko oblaka pametnim uređajima, softveru, računarskim resursima i velikim količinama podataka dobijenih sa senzorskih sistema. Potporu primene CM-a predstavljaju senzorski sistemi za prikupljanje podataka sa fizičkih

sistema i pametno procesiranje podataka, radi obezbeđivanja uslužne podrške različitim zadacima u okviru proizvodnog lanca [8].

Imajući u vidu prethodno (pre svega primenu senzora i procesiranje velikih količina podataka) jasno je da CM okvir predstavlja dobru osnovu za primenu RE-a. U [8] je predstavljena CM arhitektura za potrebe holističke ocene kvaliteta, u okviru koje je inspekcija geometrijskih karakteristika bazirana na tehnici RE i laserskom skeniranju (slika 2.9).

2.4 Oblasti primene RE dizajna

Kada je reč o dizajniranju u oblasti mašinskog inženjerstva, RE dizajniranje proizvoda se u praksi sprovodi iz jednog od sledećih razloga [2-4,12,53,54]:

- ❑ dizajn novih ili redizajn postojećih proizvoda, posebno kada se radi o složenim površinama, kao što je to na primer slučaj kod proizvoda sa naglašenim ergonomskim aspektima;
- ❑ originalni proizvođač više ne proizvodi, ne želi ili nije sposoban da proizvede određeni proizvod, odnosno zahteva visoke cene za proizvodnju pojedinačnih delova;
- ❑ neadekvatna, nepotpuna ili izgubljena tehnička dokumentacija o proizvodu;
- ❑ originalni CAD model nije pogodan za modifikacije ili primenu aktuelnih proizvodnih metoda;
- ❑ ažuriranja zastarelih materijala ili zastarelih proizvodnih procesa sa modernijom opremom i jeftinijim tehnologijama;
- ❑ potreba za redizajniranjem proizvoda radi otklanjanja loših karakteristika proizvoda (na primer pojačano habanje može biti indikator gde proizvod treba poboljšati), odnosno pojačanja dobrih karakteristika proizvoda baziranih na iskustvu iz dugoročnog korišćenja tj. primene;
- ❑ analiziranja dobrih i loših karakteristika konkurentskog proizvoda i istraživanja novih prilaza za poboljšanje performansi i karakteristika proizvoda;
- ❑ osvajanja metoda za testiranje (ispitivanje) proizvoda u cilju razumevanja konkurentskih proizvoda i razvoja boljih proizvoda.

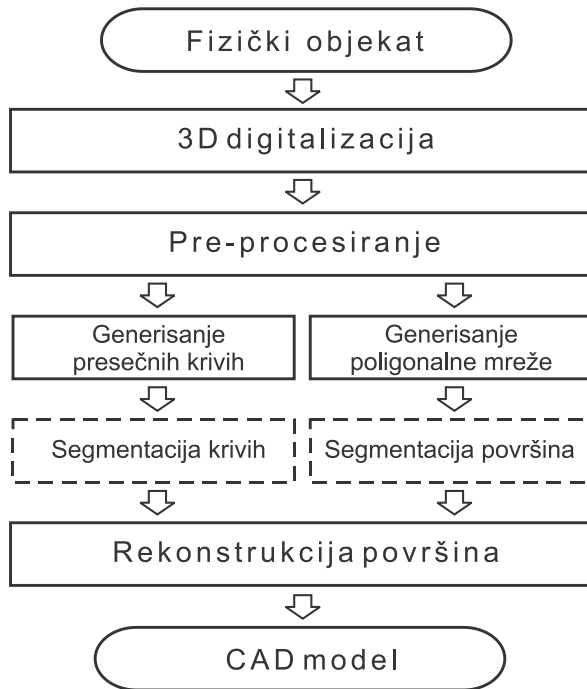
Osim prethodno navedenog, RE se u kombinaciji sa tehnologijama 3D štampe primenjuje i kod [3,11,12,25,30,43,45,49]:

- ❑ vizuelizacije i projektovanja sklopova;
- ❑ realizacije modifikacija zahtevanih na nivou prodaje (od strane kupca) direktno na virtuelnom 3D modelu;
- ❑ estetskoj, rekonstruktivnoj i ortopedskoj hirurgiji, kreiranju protetičkih i ortopedskih pomagala (kreiranje implanata i pomagala u skladu sa specifičnim personalnim potrebama), medicinska vizuelizacija (fizički model pomaže lekarima da bolje razumeju i vizuelizuju problem radi pronalaženja rešenja, kao i da ih lakše objasne pacijentima);
- ❑ kreiranje virtuelnih 3D modela za potrebe video igara i filmske industrije;
- ❑ realizacije 3D fax mašina;
- ❑ izrade uniformnih tekstura na kompleksnim geometrijama (3D štampa sa mogućnošću izrade makro-teksture na složenim površinama).

3. METODOLOGIJE REVERZIBILNOG INŽENJERSKOG DIZAJNA

Metoda reverzibilnog inženjerskog dizajna se tokom više od dve decenije intenzivno razvijala, kako sa hardverskog, tako i sa softverskog aspekta. Tokom tog perioda se pojavio veliki broj sistema, sa različitim metodološkim osnovama. U mnoštvu tih različitih sistema za RE dizajn, mogu se ipak identifikovati dve dominantne metodološke osnove (slika 3.1) [3,4,12,18,32,53]:

- 1) RE dizajn na bazi poprečnih preseka (engl. *cross-sectional*) i
- 2) RE dizajn na bazi poligonalne aproksimacije.
- 3) RE dizajn na bazi poprečnih preseka podrazumeva generisanje površinskog modela na osnovu niza paralelnih presečnih (sekcijskih) krivih, kreiranih u određenoj rezoluciji, zavisnoj od nivoa složenosti digitalizovane površine [32,55, 56].
- 4) Kod RE dizajna zasnovanog na poligonalnoj aproksimaciji se vrši poligonizacija oblaka tačaka, generisanjem poligonalne mreže (najčešće trouglova) koja se zatim transformiše, primenom različitih algoritama, kao što su Katmul/Klarkov algoritam (engl. *Catmull/Clark*), Voronoijevi (engl. *Voronoi*) dijagrami, Delunijeva (engl. *Delaunay*) triangulacija itd., u površinski 3D model [57-60].
- 5) Ulaz u oba prilaza (slika 3.1) je fizički objekat, koji u zavisnosti od cilja primene RE može biti postojeći proizvod, izvajani model u glini, gipsu, drvetu i sl., ili prototip dobijen nekom od tehnika za brzu izradu prototipa, odnosno 3D štampe. Sa druge strane, izlaz - bez obzira o kojoj metodologiji da se radi - treba da bude funkcionalni CAD model primenljiv u ostalim CAx tehnologijama.



Slika 3.1: Osnovne faze dve dominantne metodologije RE dizajna [3,12]

Kao ključne faze RE dizajna na bazi poprečnih preseka, mogu se izdvojiti [1,3,12]:

- 1) 3D digitalizacija,
- 2) pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije,
- 3) generisanje poprečnih presečnih krivih i
- 4) rekonstrukcija površina.

U slučaju RE dizajna na bazi poligonalne aproksimacije, mogu se identifikovati sledeće ključne faze [3,12,57-60]:

- 1) 3D digitalizacija,
- 2) pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije,
- 3) generisanje poligonalne mreže i
- 4) rekonstrukcija površina.

Pored navedenih, ključnih faza, u obe grupe prilaza se mogu sresti i faze *registracije* i *segmentacije*. U okviru prve, koja sledi nakon procesa 3D digitalizacije, se vrši integracija delova rezultata 3D digitalizacije, odnosno *oblaka tačaka* kako se često naziva izlaz iz procesa 3D digitalizacije. Faza registracije je tipična za slučajeve 3D digitalizacije iz više stezanja (u pribore). Segmentacija predstavlja proces u okviru kojeg se izrazito kompleksni i veliki oblaci tačaka dele na način koji obezbeđuje efikasnije pre-procesiranje i/ili rekonstrukciju površina [18,61].

Navedene faze u pomenuta dva osnovna RE prilaza (slika 3.1) treba shvatiti uslovno, kako po pitanju same strukture faza, tako i po pitanju njihovih granica (gde koja faza počinje, a gde se završava). Naime, navedene faze - često kompleksne i u okviru različitih RE sistema izgrađene iz više podfaza - se neretko preklapaju. Pored toga, umesto prikazanog sekvencijalnog procesa, za postizanje dobrog i kvalitetnog rezultata često je neophodno nekoliko iteracija, kako u okviru pojedinačnih faza, tako i na nivou ukupnog sistema. Može se primetiti i da navedeni prilazi imaju nekoliko zajedničkih faza, pri čemu je važno naglasiti da je njihova struktura u okviru individualnih prilaza različita, jer svaku od metodologija karakterišu specifičnosti koje su implicirane prisustvom određenih podfaza.

3.1 3D digitalizacija

U okviru faze 3D digitalizacije vrši se akvizicija podataka o prostornoj poziciji tačaka, u koordinatnom obliku, sa površina fizičkog objekta, kao i njihovo prevođenje u digitalni oblik. Drugim rečima, realizuje se merenje pozicije geometrijskih entiteta objekata u 3D prostoru. 3D digitalizacija je prva i nezaobilazna faza procesa RE dizajna. Ova faza se smatra krucijalnom u procesu RE dizajna, s obzirom da u najvećem broju slučajeva kvalitet rezultata 3D digitalizacije implicira kvalitet rezultujućeg CAD modela [1,4,19,62-64].

Rezultat 3D digitalizacije je skup tačaka definisanih, najčešće, u vidu Dekartovih koordinata, koji se danas često u literaturi, zbog oblika koji zauzima u prostoru, naziva *oblak tačaka* (engl. *point-cloud*).

Kada se radi o primeni termina *digitalizacija*, treba napomenuti da se isti često upotrebljava za opis različitih procesa, u zavisnosti od oblasti primene. U oblasti mašinskog inženjerstva pojam *digitalizacija* se u

početku odnosio na proces prikupljanja diskretnih podataka o položaju u prostoru tačaka na površini, primenom kontaktnih senzora [65,66]. Uvođenjem novih tehnologija za akviziciju podataka, sa mogućnošću kontinualne akvizicije podataka o nizu tačaka, uveden je u primenu i pojam *skeniranje*, koji je počeo paralelno da se koristi za opis istog procesa [67]. Razvoj novih metoda za akviziciju podataka, za čiji opis pojam skeniranje nije adekvatan (npr. strukturirana svetlost, stereovizija, CT itd.), uslovio je da pojam *3D digitalizacija* postane opšte prihvaćen na globalnom nivou [3,40].

3.1.1 Metode 3D digitalizacije

Razvoj senzorskih, računarskih i softverskih sistema, implicirao je razvoj velikog broja metoda 3D digitalizacije, koje se između sebe značajno razlikuju u pogledu tehnologija na kojima su zasnovane. U zavisnosti od nivoa interakcije sa objektom 3D digitalizacije, sve metode se mogu svrstati u jednu od dve osnovne klase [3,40,65]:

- 1) *pasivne metode 3D digitalizacije* i
- 2) *aktivne metode 3D digitalizacije*.

Pasivne metode su karakterisane odsustvom (intenzivnije) interakcije sa objektom. Ove metode su, uglavnom, predmet istraživanja u oblasti računarske vizualizacije (gde se ekstrakcija oblika vrši na osnovu jedne ili više digitalnih slika), a u poslednje vreme i u oblastima agronomije, geomatike i astronomije (gde su predmet rekonstrukcije veliki i udaljeni objekti).

Poznate su sledeće pasivne metode [1,40,41,60]:

- *određivanja oblika na osnovu osenčenosti* (na bazi pojedinačnih slika),
- *određivanje oblika preko silueta*,
- *pasivna stereovizija* (na bazi više parova slika) i
- *određivanje dubine fokusiranjem/defokusiranjem*.

Prednost pasivnih metoda je u potrebi za vrlo malo specijalizovanog hardvera. Dostignuti nivo kvaliteta 3D digitalizacije ovim metodama, pre svega u pogledu rezolucije podataka i merne tačnosti, ne zadovoljava standarde u oblasti industrijske proizvodnje. Ipak, uzimajući u obzir da

su u određenim okolnostima ove metode jedina opcija, može se očekivati njihov dalji razvoj u bliskoj budućnosti.

Kod aktivnih metoda je, nasuprot pasivnim, prisutan određeni oblik (intenzivnije) interakcije sa objektom 3D digitalizacije. Na osnovu vrste interakcije, koja može biti u vidu kontakta sa objektom ili neke vrste energetskog zračenja, aktivne metode se dele u dve osnovne grupe [1,14,40,65,66]:

- 1) *kontaktne metode* i
- 2) *beskontaktne metode*.

Slika 3.2 daje taksonomski prikaz prethodno navedene podele metoda 3D digitalizacije.

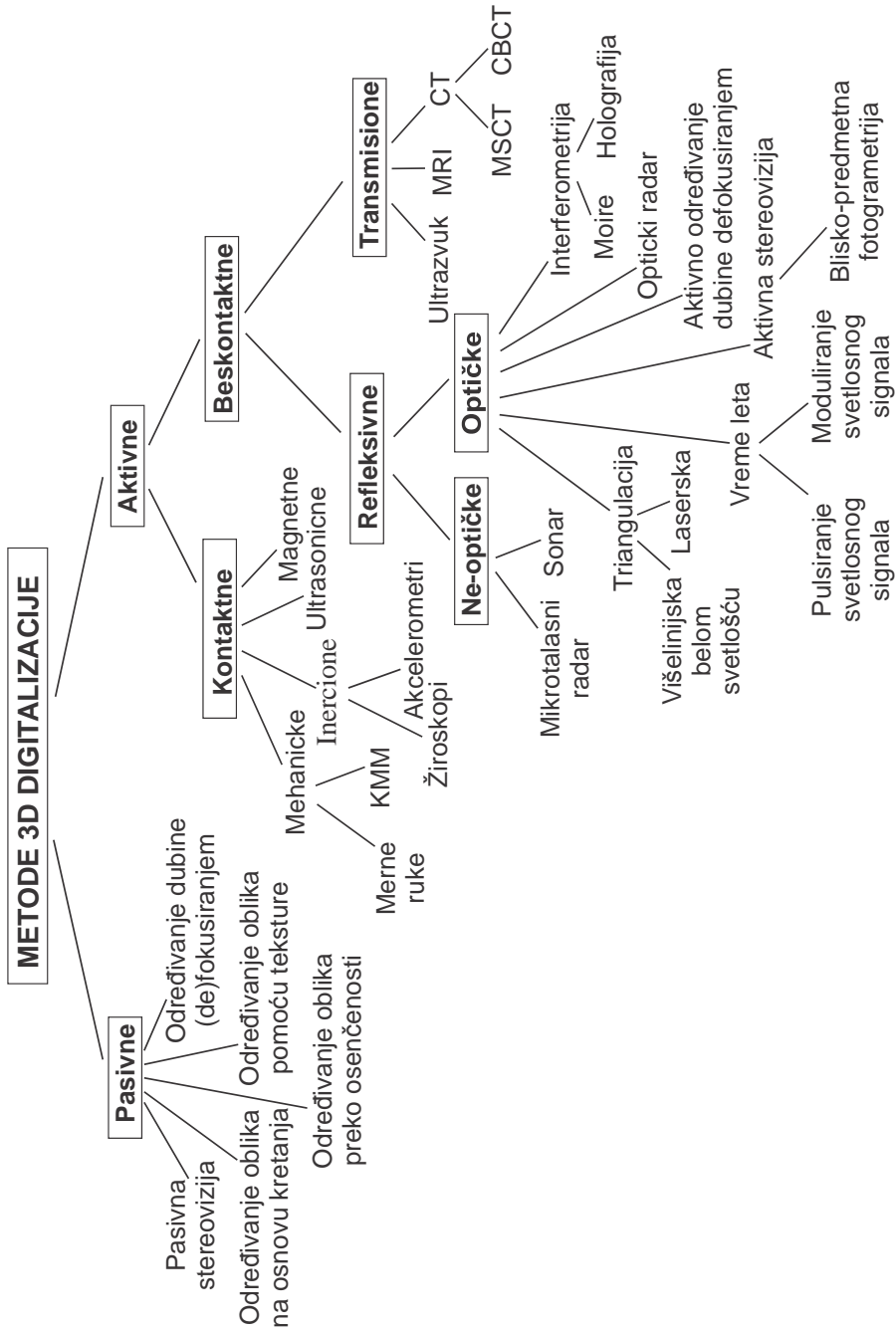
3.1.1.1 Kontaktne metode

Sam naziv ove grupe metoda sugeriše da se 3D digitalizacija ostvaruje putem kontakta senzora i objekta. Kontaktni merni senzori generišu koordinate tačkaka sa površine koja se digitalizuje na osnovu pozicije mernog senzora u mernom prostoru, odnosno uglova nagiba i dužina segmenata u prostoru u datom trenutku.

Kontaktni merni senzori se primenjuju na koordinatnim mernim mašinama (KMM), 3D mernim rukama (engl. *articulated measuring arm*), robotskim rukama, a do skora je čest slučaj bio i njihovo montiranje u nosače alata CNC mašina alatki [3,40,67].

3D merne ruke

3D merne ruke su sa razvojem kvalitetnijih zglobnih veza (pre svega cilindričnih ali i sfernih) za povezivanje segmenata, kao i računarske podrške za očitavanje pozicije senzora, prerasle u moderne uređaje za 3D digitalizaciju. Razvoj ove vrste uređaja je, zahvaljujući njihovoj fleksibilnosti i mobilnosti, procese merenja, tradicionalno vezane za laboratorijske uslove, izmestio izvan ovih okvira.



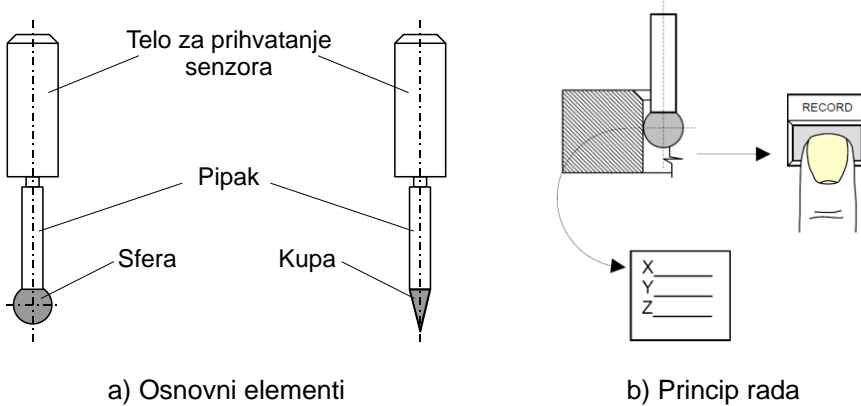
Slika 3.2: Taksilogija metoda 3D digitalizacije [1,3,12,40,68]

Konstrukciju ovih uređaja čine segmenti (najčešće 3 ili 4) koji su povezani cilindričnim i/ili sfernim zglobnim vezama. Time se omogućuje da kontaktni senzor (koji ujedno predstavlja i krajnji segment) zauzme gotovo bilo koji položaj u prostoru i priđe i teško pristupačnim delovima objekata. Nekoliko primera konstrukcija 3D mernih ruku je dato na slici 3.3 [63,68].



Slika 3.3: Primeri konstrukcija 3D-mernih ruku

Kontaktni merni senzor kod ove vrste uređaja je tipično krutog tipa, često sa konusnim vrhom, umesto sfere, u cilju eliminisanja efekta “sferne greške” koja predstavlja najveću slabost 3D mernih ruku u pogledu tačnosti, slika 3.4 a).



Slika 3.4: Kruti kontaktni senzor [69]

Upravljanje 3D mernim rukama, odnosno dovođenje senzora u mernu poziciju je manuelno, što je i osnovna razlika u odnosu na primenu kontaktnih mernih senzora na robotskim rukama kod kojih je po pravilu upravljanje numeričko. Akvizicija podataka, takođe, po pravilu nije automatizovana. Drugim rečima, operater pritiskom na taster (ili papučicu) daje signal softverskoj podršci da memoriše koordinate trenutne pozicije senzora (slika 3.4 b). Princip merenja je zasnovan na trigonometrijskom izračunavanju pozicije mernog senzora preko (opto-elektronskih) senzora položaja u zglobovima, koji daju informaciju o uglovima zakretanja segmenata, koja se zatim transformiše u x , y i z koordinate.

U prednosti ove vrste uređaja za 3D digitalizaciju mogu se ubrojati: mobilnost, primenljivost u različitim okruženjima (od pogona do otvorenih prostora), kao i mogućnost jednostavne 3D digitalizacije većih objekata (iz nekoliko referentnih mernih pozicija).

Nedostaci su: manja tačnost (usled prisustva pomenute „sferne greške“, odnosno nedostatka informacije o vektoru normale u tački kontakta senzora i objekta) i sporija akvizicija podataka [63].

Koordinatne merne mašine

Koordinatne merne mašine (KMM) se razvijaju već više od četiri decenije i danas spadaju u najpouzdanije sisteme za 3D digitalizaciju. KMM, u osnovi, obuhvataju sledeće tehnološke elemente [67,70]:

- 1) visoko precizna noseća struktura,
- 2) računarski sistem (obrada podataka i upravljački sistem),
- 3) softverska podrška i
- 4) senzori.

Noseća struktura KMM predstavlja fizičku interpretaciju kartezijskog (Dekartovog) referentnog sistema, gde svaka od pokretnih osa KMM odgovara jednoj od osa referentnog sistema (x, y ili z). Svaka od osa se može pomerati relativno u odnosu na preostale dve pri čemu je, zahvaljujući mernim sistemima KMM, u svakom trenutku poznata njihova pozicija u okviru referentnog sistema.

Arhitekturu noseće strukture KMM diktira veći broj parametara, pri čemu se kao najvažniji mogu izdvojiti: merni prostor i pristupačnost mernom predmetu. U najčešće tipove noseće strukture KMM (prema ISO 10360-1) spadaju:

- konzolna vertikalna KMM (slika 3.5a),
- KMM sa pokretnim portalom (slika 3.5b),
- KMM sa nepokretnim portalom (slika 3.5c),
- konzolna horizontalna KMM (slika 3.5d) i
- mosna KMM (slika 3.5e).

Obrada podataka i upravljački sistem predstavljaju centralni deo KMM koji omogućava: automatsko kretanje pokretnih delova KMM prema zadatim putanjama, programiranje potrebnih aktivnosti na KMM, kao i dobijanje rezultata merenja u željenom formatu.

Funkcija KMM je akvizicija podataka o merenim veličinama, najčešće u obliku Dekartovih koordinata. Uređaji koji omogućavaju dobijanje takvih informacija sa mernih predmeta su senzori. Kada je reč o kontaktnoj 3D digitalizaciji, na KMM se primenjuju taktilni merni senzori i to pre svega senzori koje karakteriše mogućnost kontinualne akvizicije merenih informacija, odnosno skeniranja površina [63,67,69,70,71].



a) konzolna vertikalna KMM



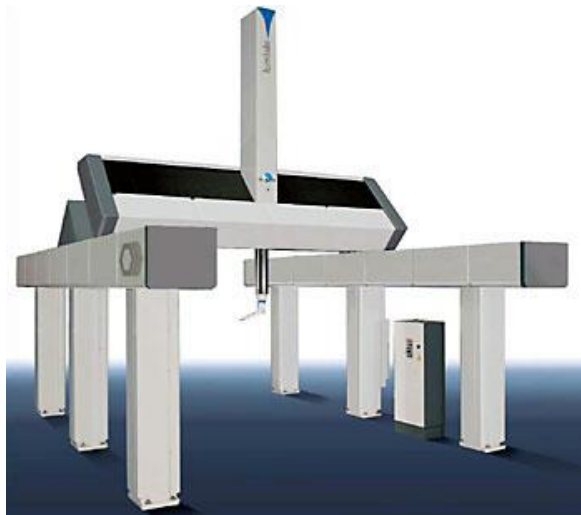
b) KMM sa pokretnim portalom



c) KMM sa nepokretnim portalom



d) konzolna horizontalna KMM



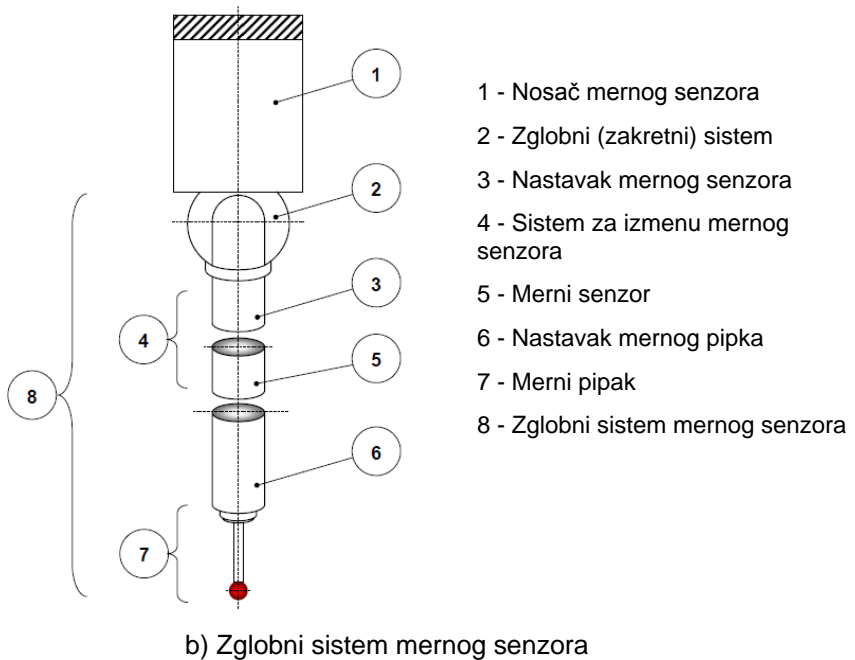
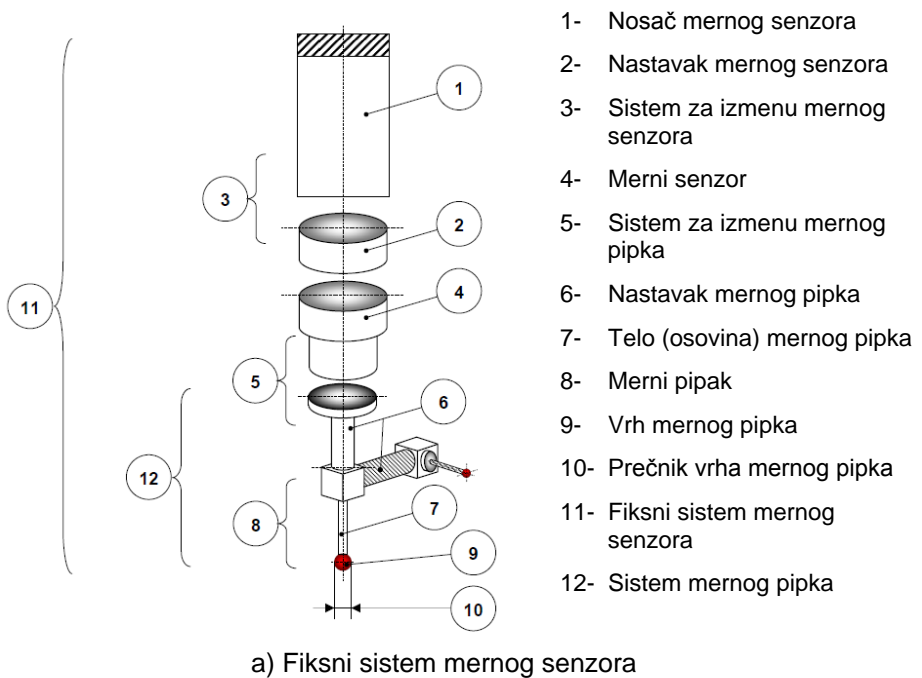
e) mosna KMM

Slika 3.5: Najčešći tipovi noseće strukture KMM

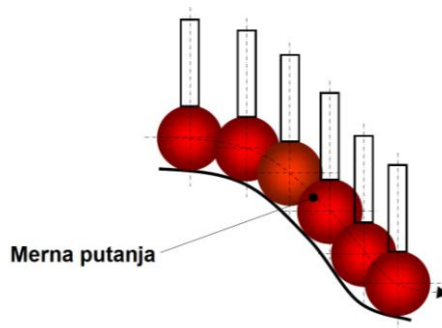
Kod taktilnih senzora, vrh mernog pipka je najčešće sfernog oblika, izrađuje se od materijala otpornih na habanje, uz ekstremno nisku grešku oblika. Kod taktilnog merenja, merni pipak ostvaruje fizički kontakt sa merenim delom sa ciljem detektovanja pozicije u prostoru dodirnutе tačke.

Svrha noseće strukture KMM je da dovede senzor u odgovarajuću poziciju, u odnosu na merni predmet, sa ciljem omogućavanja realizacije kontakta senzora i mernog predmeta u potrebnim tačkama. Senzor se, zbog toga, postavlja u specijalni mehanizam - nosač senzora, koji predstavlja istovremeno i mehanički i električni interfejs. Veza između nosača senzora i senzora može biti fiksna ili zglobna (slika 3.6).

Dok kod tačka-po-tačka merenju, senzor dolazi u kontakt sa delom koji se meri samo u pojedinačnim tačkama, kod kontinualnog merenja senzor se zadržava u kontaktu sa delom prateći njegov geometrijski profil prema prethodno definisanoj mernoj putanji (slika 3.7) [63,67,69,70,71].



Slika 3.6: Karakteristični elementi taktilnih mernih senzora [69]



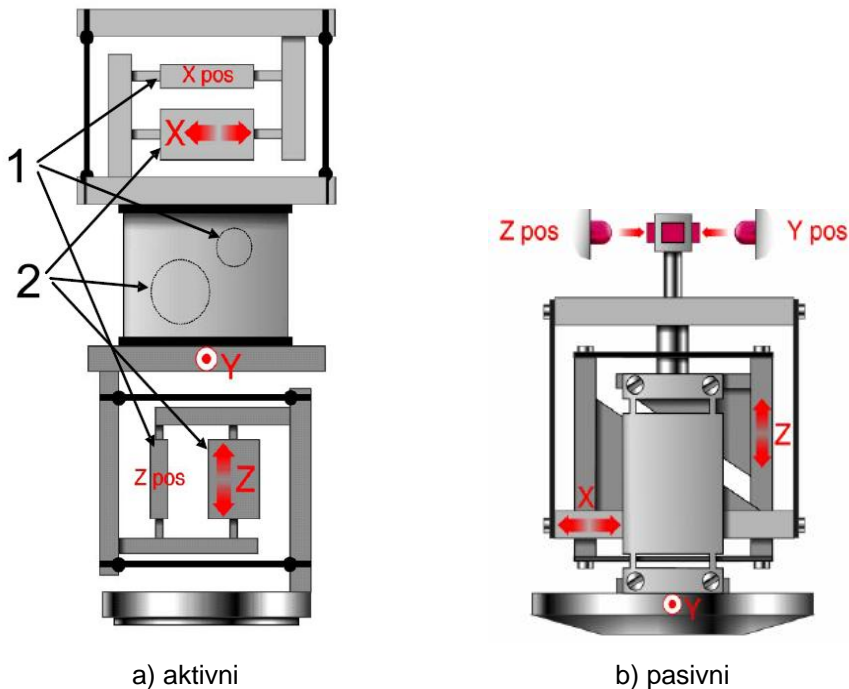
Slika 3.7: Merna sekvenca kod kontinualnog merenja [69]

Kontinualni taktilni senzori (poznati i kao skenirajući senzori) su dugo vremena predstavljali najsofisticiraniju vrstu senzora primenjivanu na KMM. Ova vrsta uređaja se može podeliti u dve kategorije [69,71]:

- 1) aktivne i
- 2) pasivne.

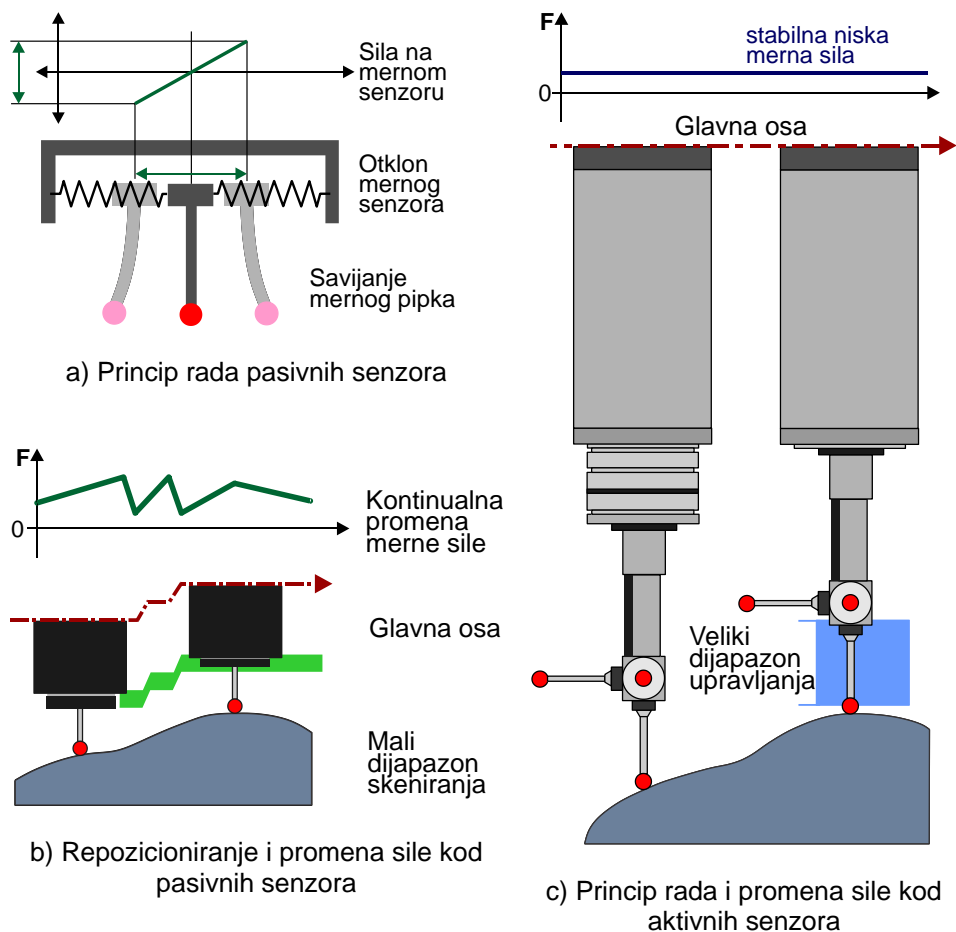
Aktivni senzor praktično predstavlja KMM unutar KMM. Ovi uređaji koriste aktivno generisanje sile, tj. za vreme merenja po putanji skeniranja, senzor sam upravlja silom kontakta sa delom zahvaljujući nezavisnim mernim (1) i pogonskim (2) sistemima u svakoj osi (slika 3.8a). Na taj način se izbegavaju uticaji izazvani deformacijama pipka pri merenju. Savremeni senzori ove vrste su opremljeni i sistemom automatskog uravnoteženja mase sa ciljem kompenzacije razlika u masi mernih pipaka. Aktivni senzori se uvek postavljaju u $-Z$ pravcu [69,71].

Pasivni senzori su jednostavniji mehanizmi koji rade na principu detekcije otklona mernog pipka na bazi pasivnog opružnog mehanizma. Merenje tačaka se ostvaruje kretanjem osa KMM koji uzrokuju pomeranje mernog pipka iz položaja mirovanja. Najčešće primenjivana konstrukcija pasivnog opružnog mehanizma je zasnovana na tri para opruga, postavljenih u vidu paralelograma, koja dozvoljava pomeranje relevantnoj mernoj osi, koje se detektuje od strane pretvarača signala. Napretkom upravljačkog sistema KMM, pasivni kontinualni senzori su počeli da zamenjuju aktivne zbog svoje cene. Pasivni senzor je moguće pričvrstiti na zglobni držač, tako da je moguće postići bilo koji položaj u prostoru uz izuzetnu ponovljivost. Ova vrsta senzora se može koristiti i za merenje diskretnih tačaka [69,71].



Slika 3.8: Senzori za kontinualnu akviziciju tačaka [69,71]

Opruge kod pasivnih senzora imaju ulogu da zadrže pipak u neutralnom položaju, dok se otklon mernog pipka (koji se javlja kao posledica promene oblika konture površine koja se skenira) meri pomoću mernih traka (slika 3.9a). Osnovna slabost pasivnih senzora se ogleda u potrebi za čestim repozicioniranjem senzora, što je diktirano porastom sile u oprugama (slika 3.9b). Naprezanje opruga, koje raste sa povećanjem promena oblika kontura površina koje se skeniraju, utiče na manju tačnost očitavanja sa mernih traka. Pored toga, u ovim slučajevima sila mernog pipka na površinu koja se skenira se povećava, što može biti dodatni problem (i izvor greške) u slučaju mekših materijala. Jedini način da se opruge rasterete jeste repozicioniranje mernog senzora, što omogućava održavanje nivoa napregnutosti opruge u granicama koje obezbeđuju zadovoljavajuću tačnost merenja [71].

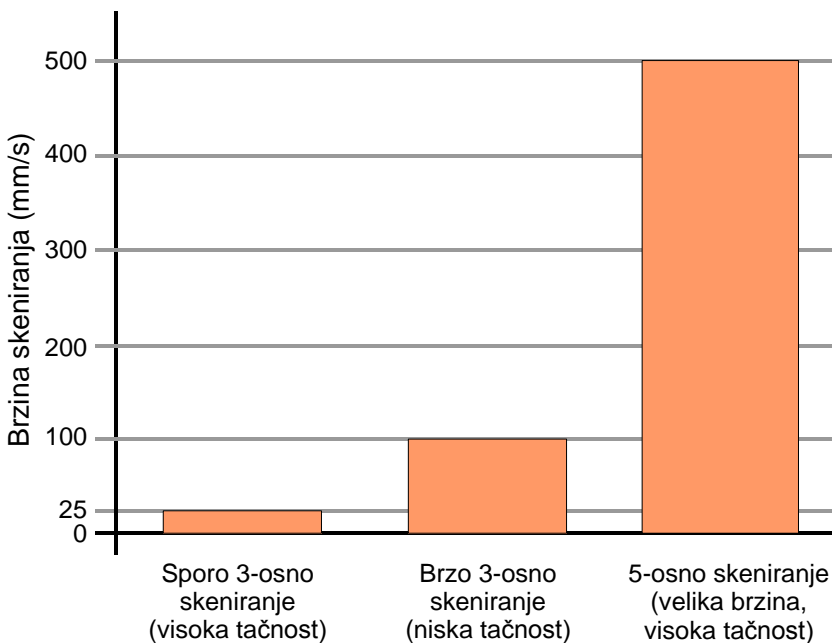


Slika 3.9: Karakteristike pasivnih i aktivnih kontinualnih senzora [71]

Kod aktivnih senzora se umesto opruga i mernih traka koriste softverski upravljani elektromagneti i regulatori sile koji održavaju stabilnom vrednost sile na mernom pipku nezavisno od njegove pozicije. Za razliku od opruga kod kojih se sile ne može podešavati, kod aktivnog sistema se prati otklon mernog pipka u realnom vremenu i u skladu sa tim podešava merna sile. To omogućava značajno veći dijapazon pomeranja mernog pipka bez potrebe za repozicioniranjem mernog senzora i bez promene sile primenjene na površinu koja se digitalizuje, a rezultat su veća tačnost merenja i veća brzina skeniranja (slika 3.9c) [69,71].

Softverska podrška predstavlja sofisticiranu komponentu KMM koja danas umnogome određuje primenu KMM.

Kada je reč o 3D digitalizaciji u okvirima savremene mašinske proizvodnje, KMM imaju prednost u slučajevima kada se traži visoka tačnost prikupljenih podataka, a kada brzina nije u prvom planu. Ipak, novije generacije senzora za kontinualnu akviziciju na KMM (kao što je tehnologija Renishaw-ovog 5-osnog merenja [15]) su uspele da pomire velike brzine skeniranja sa visokom tačnošću (slika 3.10).



Slika 3.10: Brzina skeniranja kontinualnih senzora za KMM [15]

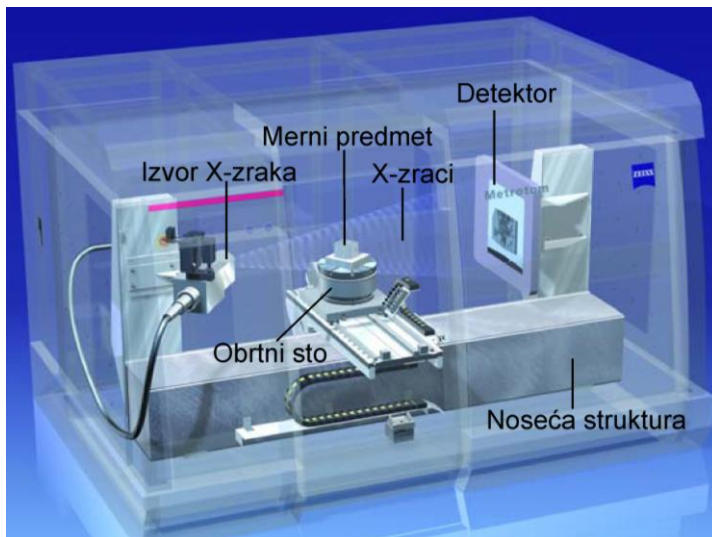
Kao osnovni nedostaci primene KMM za potrebe 3D digitalizacije mogu se izdvojiti: teško pristupačna mesta i unutrašnje površine se ne mogu digitalizovati, potreba za priborom i složenije pozicioniranje i stezanje delova na mašini, dobijeni podaci se moraju kompenzovati otklonima senzora, kvalitet dobijenih podataka u značajnoj meri zavisi od kvaliteta obrađene površine, visoka cena investicije [63,70].

3.1.1.2 Beskontaktne metode

Beskontaktne metode se mogu podeliti na dve kompleksne grupe:

- 1) transmisivne metode i
- 2) reflektivne metode.

Transmisivne metode su, u najkraćem, bazirane na projekciji određene vrste energetskih signala (najčešće X-zraka) na objekat koji se digitalizuje i detektovanju količine energije koja je prošla kroz objekat, odnosno količine energije koju objekat nije apsorbovao. Tipičan predstavnik ove grupe metoda je kompjuterizovana tomografija (engl. *Computer Tomography - CT*). CT karakteriše visoka tačnost, velika brzina akvizicije podataka, kao i činjenica da predstavlja jednu od retkih ne-destruktivnih test metoda (engl. *Non-Destructive Test Method*) za 3D digitalizaciju unutrašnjih "nevidljivih" površina, sa mogućnošću primene na ljudskom telu i industrijskim proizvodima. Zbog toga je CT danas, i pored određenih nedostataka koji se ogledaju u visokoj ceni, tačnosti uslovljenoj vrstom materijala i potrebi za zaštitnim merama od X-zraka, jedna od perspektivnijih metoda 3D digitalizacije u okviru savremenih proizvodnih aktivnosti. Danas su u mašinskoj industriji najčešće zastupljeni CT uređaji sa konusnim snopom X-zraka. Osnovni elementi ove vrste sistema su prikazani na slici slika 3.11 [64,69,72].



Slika 3.11: Šematski prikaz CT-a sa konusnim snopom X-zraka [69]

Refleksivne metode su, u opštem smislu, zasnovane na projekciji određene vrste energetskog zračenja na objekat i detektovanju reflektovane energije sa objekta. Ova grupa beskontaktnih metoda je vrlo kompleksna i obuhvata dve velike podgrupe [13,30,40,68]:

- 1) ne-optičke metode i
- 2) optičke metode.

Ne-optičke metode – Tipični predstavnici ove podgrupe refleksivnih metoda su *ultrazvučna metoda* i *mikrotalasni radar*. Princip se zasniva na određivanju daljine tačaka na objektu putem merenja vremena potrebnog impulsu zvuka, odnosno mikrotalasne energije da dođe do objekta i da se vrati. Ova vrsta uređaja se odlikuje relativno pristupačnom cenom, ali i nižom tačnošću, zbog čega se i ne primenjuju u većoj meri u industrijskoj praksi [40,73].

Optičke metode karakteriše prisustvo svetlosnog izvora, odnosno projektovanje određene vrste svetlosnog signala, na objekat što prati detektovanje reflektovanog signala. Do sada je razvijen veći broj optičkih metoda 3D digitalizacije [1,14,40,64,73]:

- triangulacija,
- interferometrija,
- aktivna stereovizija,
- aktivno određivanje dubine (de)fokusiranjem i
- optički radar.

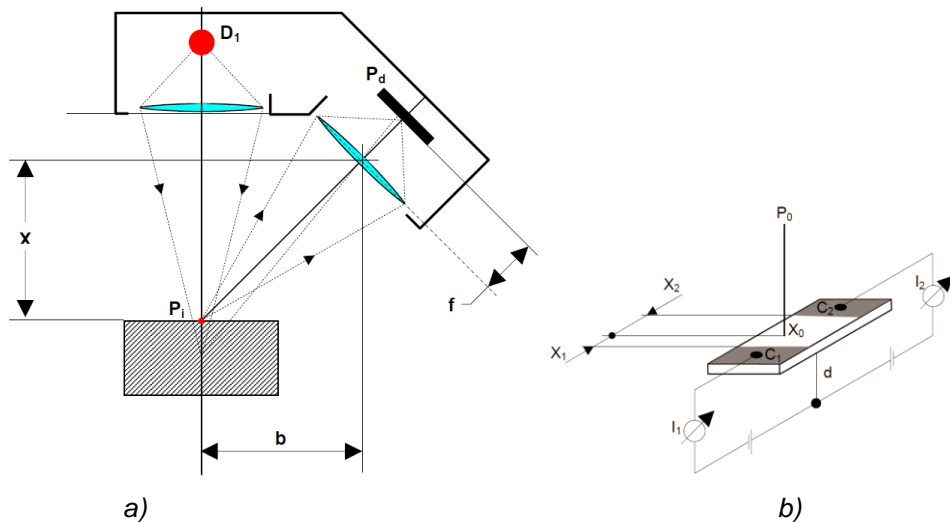
Karakteriše ih velika brzina akvizicije, relativno visoka tačnost (koja je ipak još uvek uglavnom niža od KMM), mala potreba za dodatnim priborom za pozicioniranje i stezanje, kao i mogućnost 3D digitalizacije delova od mekših materijala. Nedostaci obuhvataju: osetljivost na refleksivne karakteristike površine i ograničenost primene na optički vidljive delove površina.

Optička triangulacija

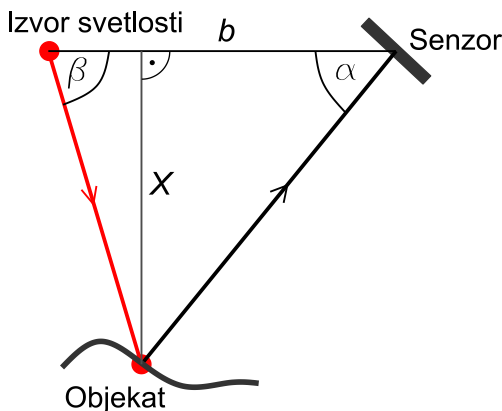
Optička triangulacija je jedna od najčešće primenjivanih metoda 3D digitalizacije. Iako su sistemi ove vrste u primeni više od dve decenije, njihova brzina i tačnost su drastično poboljšani poslednjih godina zahvaljujući razvoju hardverskih komponenti i softverske podrške.

Osnovni princip rada triangulacionih senzora za 3D digitalizaciju je prikazan na slici 3.12a. Laserski zrak, generisan diodom D_1 , se projektuje na površinu mernog predmeta u tačku P_1 . Reflektovani svetlosni signal pada na fotoosetljivi senzor P_d . Pri tome je krajnji cilj da se odredi, sa najboljom mogućom tačnošću, rastojanje X . Nakon što reflektovani signal padne na fotoosetljivi senzor (P_0 pogodi fotodiodu u X_0) dolazi do generisanja električne struje u senzoru (slika 3.12b). Električna struja teče kroz elektrode C_1 i C_2 i zatvara kolo kroz d . Suma električnih struja I_1 i I_2 je funkcija rastojanja X_1 i X_2 . U teorijskom smislu, to je linearna funkcija, ali u realnosti to nije slučaj zbog nepotpune homogenosti fotodioda. Analogni signal sa fotodiode se zatim pojačava i filtrira, a prečišćava se i uticaj intenziteta signala P_0 , koji takođe utiče na vrednosti električnih struja I_1 i I_2 . Nakon analogno/digitalne konverzije kod svakog pojedinačnog senzora se kompenzuje linearna greška [69].

Osnovni geometrijski princip triangulacije je predstavljen jednačinom (3.1) uz ilustraciju na slici 3.13.



Slika 3.12: Princip rada triangulacionih senzora za 3D digitalizaciju [69]



Slika 3.13: Geometrijski princip triangulacije

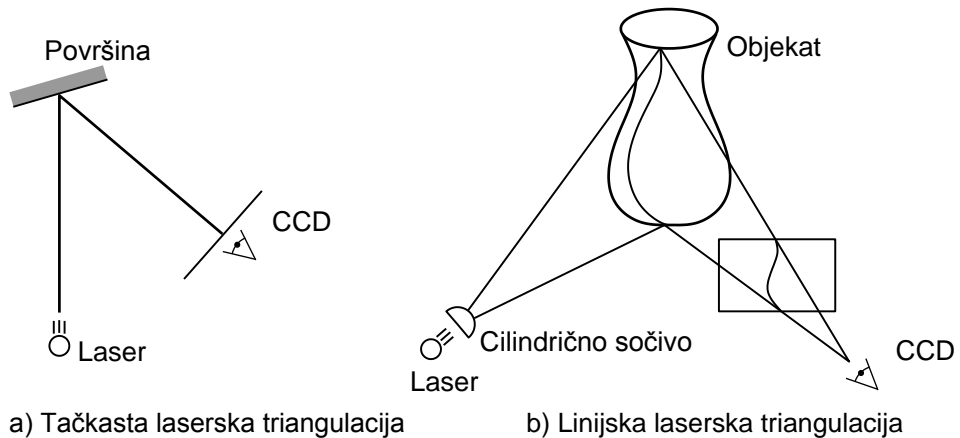
$$X = b \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3.1)$$

Danas se u industrijskoj primeni može naći veliki broj različitih skenera koji rade na principu optičke triangulacije. Osnovni parametri koji bliže definišu ovu vrstu uređaja su: struktura i tip svetlosnog izvora, vrsta senzora i metoda skeniranja [13,14,40,74].

Svetlosni izvor može imati nekoliko formi, pri čemu je laserska tačkasta forma ona iz koje su se razvile sve ostale. Projektovanjem snopa laserske svetlosti na neku površinu, dolazi do formiranja tačke koja omogućava dobijanje jedne merne vrednosti. Lokacija centra reflektovanog svetlosnog impulsa koji se detektuje na fotoosetljivom senzoru, korespondira sa linijom posmatranja koja preseca liniju projektovanja svetlosti u tačno jednoj tački (slika 3.14a). To omogućava dobijanje informacije o "dubini", odnosno udaljenosti tačke na površini na koju je pao svetlosni signal, u skladu sa geometrijskim principom prikazanim na slici 3.13.

Danas se najčešće primenjuju linijski laserski triangulacioni skeneri. Kod ove vrste skenera se laserski snop transformiše u svetlosnu površinu (ravan) propuštanjem kroz cilindrično sočivo (slika 3.13b). Fotoosetljivi senzor (CCD ili CMOS senzori) prihvata reflektovani svetlosni signal u vidu linije (koja predstavlja niz tačaka), za koju se izračunava "profil dubine", odnosno informacija o udaljenosti tačaka koje čine tu liniju (slika 3.14b). U poslednje vreme se pojavljuju i izvedbe sa više-linijskom

strukturu svetlosnog izvora, a sve u cilju povećanja brzine 3D digitalizacije. Pri tome treba napomenuti da je prednost primene tačkastih i jedno-linijskih laserskih izvora, kada su u pitanju senzori sa sočivima, u tome što svi preseki svetlosnog signala sa objektom uvek leže u istoj ravni [40,65,75,76].



Slika 3.14: Princip laserske triangulacije [40]

Svetlosni izvori prema tipu mogu biti koherentni ili nekoherentni. Tipični predstavnik koherentnih svetlosnih izvora je laser¹⁾, dok se od nekoherentnih primenjuje bela svetlost. Shodno tome, kod triangulacije se razlikuju dve osnovne metode [3,41]:

- 1) Triangulacija belom svetlošću i
- 2) Laserska triangulacija.

Senzori u sistemima za optičku triangulaciju se javljaju u različitim oblicima koji se mogu svrstati u jedan od sledećih tipova [65]:

- *nulto-dimenzionalni senzori* (tačkasti) - fotodiode,
- *jedno-dimenzionalni senzori* (linijski) - fotodiode sa lateralnim efektom (linearni CCD²⁾ ili CMOS³⁾ niz) i
- *dvo-dimenzionalni (površinski) senzori* - najčešće je to 2D niz CCD ili CMOS senzora.

¹ LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Ration.

² CCD - Charge-Coupled Device.

³ CMOS - Complementary metal-oxide-semiconductor.

Kod tačkastog svetlosnog izvora primenjuju se prve dve vrste senzora, dok kada su u pitanju jedno- i više-linijski, kao i više-tačkasti sistemi, primenjuje se treća vrsta senzora [40,65].

Metoda skeniranja je takođe bitna karakteristika sistema za triangulaciju. Kod većine današnjih skenera ove vrste, laser i fotoosetljivi senzor su kruto povezani i pomeraju se kao celina. Njihovo nezavisno pomeranje bi impliciralo probleme u vezi sa fokusiranjem i rezolucijom. U praksi se primenjuje nekoliko metoda, kod kojih je osnovna razlika u odnosu kretanja objekta i sistema [3,40,76]:

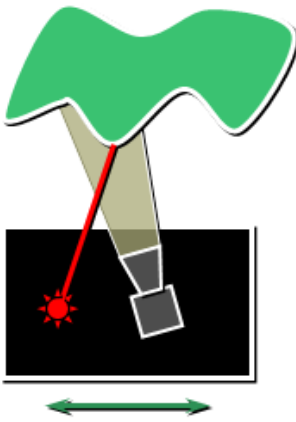
- stacionarni objekat i translatorno pokretan skener (slika 3.15a);
- stacionarni skener i translatorno pokretni objekat (slika 3.15b);
- skener stacionaran, objekat rotaciono pokretan u okviru vidnog polja (slika 3.15c);
- objekat i skener nepokretni, a rotirajuća ogledala usmeravaju svetlosni snop i reflektovani signal, pri čemu je važno da senzor bude sinhronizovan sa svetlosnim izvorom (slika 3.15d).

Lasersku triangulaciju krasi sledeće karakteristike [3,40,63]:

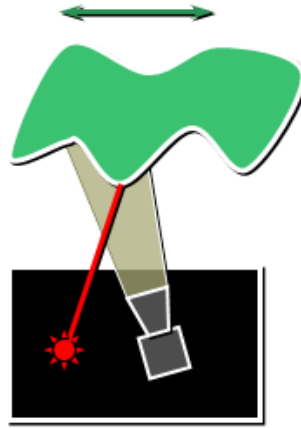
- + odlično fokusiranje i sa velike udaljenosti,
- + zahvaljujući jednoznačnoj talasnoj dužini laserske svetlosti, moguće je "prekriti" senzor sa pojasnim filterom za tu talasnu dužinu, čime se smanjuje osetljivost na ambijentalno osvetljenje, a time i mogućnost greške,
- + kod lasera primenjivanih za triangulaciju se ne javlja problem rasipanja toplote, što je kod nekoherentnih svetlosnih izvora čest slučaj.

Kao nedostaci ove metode, mogli bi se navesti sledeći [3,40,63]:

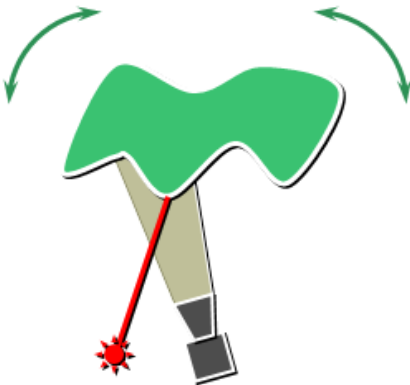
- pojava takozvanih laserskih pega (randomizirana koherentna interferencija zahvaljujući hrapavosti površine),
- potreba za specijalnim zaštitnim merama kod lasera koji rade na vidljivim i ultraljubičastim talasnim dužinama,
- sporiji proces akvizicije podataka u slučaju jedno-tačkastog ili jedno-linijskog skeniranja.



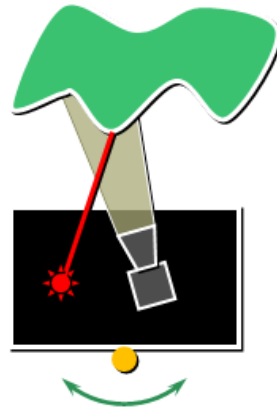
a) stacionarni objekat i translatorno pokretan skener



b) stacionarni skener i translatorno pokretni objekat



c) stacionarni skener i rotaciono pokretan objekat



d) objekat i skener stacionarni, a rotirajuća ogledala usmeravaju svetlosni snop i reflektovani signal

Slika 3.15: Metode skeniranja kod optičke triangulacije

3.2 Pre-procesiranje oblaka tačaka

Rezultat procesa 3D digitalizacije, odnosno oblak tačaka, najčešće ne poseduje kvalitet i strukturu koji ga čine direktno primenjivim u fazi rekonstrukcije površina. Ovo se, pre svega, odnosi na prisustvo grešaka merenja, šuma, kao i (pre)velikog broja podataka-tačaka. Takođe, česti problemi su neorganizovanost i nepotpunost oblaka tačaka. Rekonstrukcija površina na bazi takvih, sirovih, oblaka tačaka najčešće ima za rezultat CAD model lošijeg kvaliteta, koji sadrži velika odstupanja [16,55,56,77].

Prema nekim istraživanjima, čak 90 % vremena procesa RE dizajna otpada na fazu generisanja površinskog modela [20]. U tom smislu bi automatizacija procesa u ovoj fazi značajno doprinela povećanju produktivnost procesa RE dizajna. Međutim, prvi preduslov za ostvarenje toga jeste dobro pripremljen oblak tačaka, odnosno sprovođenje kvalitetnog pre-procesiranja.

S obzirom da centralno mesto u ovoj monografiji zauzima upravo problem pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije, ova faza RE dizajna je detaljnije predstavljena u četvrtom poglavlju.

3.3 Rekonstrukcija površina

Cilj faze rekonstrukcije površina jeste kreiranje površinskog (engl. *surface*), a zatim i zapreminskog, odnosno solid modela, na osnovu pre-procesiranog rezultata 3D digitalizacije. Do danas je razvijen veći broj prilaza za rekonstrukciju površina, koji se mogu klasifikovati na osnovu različitih parametara.

Klasifikacija na osnovu *strukturiranosti podataka-tačaka* obuhvata:

- *Neuređeni oblaci tačaka*: ovakvi oblaci tačaka ne sadrže nikakve dodatne informacije o ulaznim podacima-tačkama osim njihove pozicije u prostoru. Algoritmi za rekonstrukciju površina namenjeni ovakvim ulaznim podacima ne koriste bilo kakve pretpostavke o geometriji objekta već, pre generisanja poligonalnog modela, strukturiraju tačke prema njihovoj koherentnosti. Ovi algoritmi zahtevaju dobru distribuiranost tačaka u okviru ulaznog oblaka tačaka pa u slučaju neuniformne distribuiranosti znaju često i da zakažu [3,4,5,9,78].

- *Strukturirani oblaci tačkaka*: Algoritmi razvijeni za rekonstrukciju površina na osnovu uređenih oblaka tačkaka koriste i dodatne informacije koje su dostupne (sadržane) u oblacima tačkaka, kao što su sekcije, skenirane linije itd. Na taj način se mogu efikasnije rekonstruisati kompleksniji objekti [3,5,9].

Dalje, klasifikaciju je moguće izvršiti i na osnovu *prostornih karakteristika* na:

- *Površinski orijentisani pristupi*: ne razlikuju otvorene i zatvorene površine i najveći broj do sada razvijenih algoritama za rekonstrukciju površina spada u ovu grupu [9].
- *Zapreminski orijentisani pristupi*: pre svega su namenjeni zatvorenim površinama i u principu su zasnovani na Delunijevoj tetraedrizaciji datog oblaka tačkaka [3,9].

Prema *tipu predstavljanja površina*, pristupi za rekonstrukciju površina se klasifikuju na:

- *Parametarsko predstavljanje*: Ove metode rekonstruišu površine preko većeg broja delova (tzv. zakrpa - engl. *patches*) koji su definisani parametarskim jednačinama. Više ovakvih povezanih zakrpa mogu formirati kontinualnu površinu. Primeri parametarskog predstavljanja površina uključuju B-splajnove, Bezijeove krive i Kunsove površi [3,5,9,79].
- *Implicitno predstavljanje*: Ove metode pokušavaju da pronađu glatku funkciju koja prolazi kroz sve pozicije u kojima implicitna funkcija teži ka nekoj specificiranoj vrednosti (najčešće nuli) [9].
- *Simplicijalno predstavljanje*: Kod ovog pristupa, površina je skup jednostavnih (simplicijalnih) entiteta, uključujući tačke, ivice i trouglove. Ova grupa obuhvata i alfa oblike (engl. *Alpha shapes*) i Krustov (engl. *Crusts*) algoritam [9,80].

Bilo koji od prethodnih tipova predstavljanja da je u pitanju, moguće je generisanje aproksimiranih ili interpoliranih površina:

- *Aproksimirane površine* ne sadrže uvek sve tačke iz polaznog oblaka tačkaka, već tačke koje su najbliže moguće originalnim tačkama. U ovaj pristup se mogu uključiti i: 1) rekonstrukcija površina zasnovana na zakrivljavanju (engl. *warping-based reconstruction*), koja podrazumeva deformisanje inicijalne površine na takav način da predstavlja dobru aproksimaciju polaznog skupa tačkaka, kao i 2)

implicitni algoritmi za fitovanje (podešavanje) površina, koji fituju funkcije polinomne po delovima (engl. *piecewise polynomial functions*) u odnosu na dati skup podataka-tačaka [9, 44,55,81].

- *Interpolirane površine* se primenjuju u slučajevima kada su zahtevani visoka preciznost i tačnost 3D modela. U ovom slučaju se koriste svi ulazni podaci-tačke, a neophodno je njihovo tačno povezivanje [9,82].

Moguća je i klasifikacija pristupa prema *polaznim pretpostavkama* na osnovu kojih se rekonstruišu površine:

- *Metode koje pretpostavljaju fiksni topološki tip*: Ove metode uglavnom pretpostavljaju da je topološki tip površine *apriori* poznat (npr. ravan, cilindar ili sfera itd.) [9,37,83].
- *Metode koje koriste informacije o strukturi ili orijentaciji*: Prve rekonstruišu površine na bazi informacija o strukturi podataka-tačaka (npr. u slučaju višestrukih skenova, koriste se informacije o odnosu susednih podataka-tačaka u okviru pojedinačnih skenova), dok druge primenjuju znanje o orijentaciji površina koje je sadržano u podacima-tačkama (npr. ako su podaci dobijeni iz zapreminskih podataka, gradijent⁴ ovih podataka može obezbediti informacije o orijentaciji korisne za potrebe rekonstrukcije površina) [3,9].

U reverzibilnom inženjerskom dizajnu, generisanje površina je najčešće zasnovano na jednom od sledeća dva pristupa [3,5,32]:

- 1) aproksimacija na osnovu krivih (engl. *curved surface approximation*) i
- 2) poligonalna aproksimacija (engl. *polygonal surface approximation*).

U skladu sa tim se i u ovoj fazi RE dizajna, u opštem smislu, može govoriti o dva prilaza:

- 1) generisanje površinskih modela primenom presečnih-sekcijskih krivih (engl. *cross-sectional*) i
- 2) generisanje površinskih modela primenom poligonalne aproksimacije.

⁴ U vektorskoj analizi, gradijent skalarnog polja je vektorsko polje koje ima pravac najvećeg porasta skalarnog polja, odnosno, čiji je intenzitet najveća promena u polju.

3.3.1 Rekonstrukcija površinskih modela primenom presečnih-sekcijskih krivih

Rekonstrukcija površinskih modela primenom presečnih-sekcijskih krivih se već duži niz godina široko primenjuje u mašinskom inženjerstvu i podrazumeva generisanje površinskog modela na osnovu niza sekcijskih krivih, prethodno kreiranih u određenoj rezoluciji, najčešće u okviru paralelnih ravni ili ravnima upravnim na trajektoriju. Rezolucija je uslovljena složenošću površine objekta koji se rekonstruiše.

Metode aproksimacije površina preko krivih se, u opštem slučaju, mogu podeliti u tri grupe [3,32]:

- 1) algebarske,
- 2) parametarske i
- 3) dualne.

Kod *algebarskih* površina, aproksimacija se sprovodi primenom polinoma u sledećem obliku:

$$f(x,y,z) = 0 \tag{3.2}$$

Ovakav, implicitni oblik opisa površina je u velikoj meri zastupljen u CAD sistemima, i to pre svega u onima za solid modeliranje, zahvaljujući dobrom opisu površina poput ravni, cilindra, sfere i konusa, kao i ostalih površina drugog reda. Međutim, kada se radi o složenim površinama (engl. *free-form*) ovakav oblik opisa nije dao dobre rezultate [79].

Većina CAD sistema, u alatima za modeliranje složenih površina, primenjuje *parametarski* oblik opisa. Jedan od najčešće primenjivanih parametarskih oblika u praksi je B-Splajn forma, koja praktično predstavlja standard za opis složenih krivih i površina u aktuelnim CAD sistemima. Razlog za ovo treba tražiti u brojnim prednostima B-Splajn opisa krivih. Kontrolne tačke utiču na oblik krive na predvidljiv i prirodan način, zatim imaju manja odstupanja, osno su nezavisne, a mogu imati i više vrednosti. Posebna prednost B-Splajn forme je mogućnost lokalne kontrole oblika krive, kao i mogućnost dodavanja kontrolnih tačaka bez podizanja stepena krive [55,77,79].

B-Splajn kriva je niz osnovnih funkcija koje kombinuju efekte $n+1$ kontrolne tačke. Parametarski oblik B-Splajn krive ima sledeći oblik:

$$r(t) = \sum_{i=0}^n p_i B_i^k(t) \quad (t_k \leq t \leq t_{n+1}) \quad (3.3)$$

gde su:

- t – parametar,
- p_i - kontrolne tačke (De Burovog kontrolnog poligona),
- $B_i^k(t)$ - osnovne B-Splajn funkcije.

Broj kontrolnih tačaka jednak je broju stepeni slobode, odnosno dimenziji

B-Splajn baze ($N=n+1$) stepena k , definisane nad vektorom čvorova t :

$$t = (t_i)_0^{n+k+1} \quad (3.4)$$

Stepen polinoma se posebno kontroliše preko parametra k , koji je uglavnom nezavisan od broja kontrolnih tačaka. S obzirom da je za definisanje B-Splajn baze potreban vektor čvorova, sledi da je B-Splajn kriva stepena k jednoznačno određena sa:

- nizom kontrolnih tačaka d_i ($i=0, \dots, n$) i
- vektorom čvorova $t = (t_i)_0^{n+k+1}$.

Domen B-Splajn krive se svodi na interval $[t_k, t_{n+1}]$, a u slučaju B-Splajn krive prvih i poslednjih $k+1$ čvorova usvaja se:

$$t_0 = t_1 = \dots = t_k \quad \text{i}$$

$$t_{n+1} = t_{n+2} = \dots = t_{n+k+1}.$$

U skladu sa tim, na levoj granici domena se dobija sledeće:

$$\text{za } t = t_0 = t_1 = \dots = t_k \quad \rightarrow \begin{cases} B_0^k(t) = 1 \\ B_j^k(t) = 0, \quad j = 1, \dots, n \end{cases}$$

odakle sledi:

$$r(t) = d_0, \text{ za } t = t_0 = t_1 = \dots = t_k$$

što praktično znači da kriva, odnosno njen prvi segment, polazi iz tačke p_0 . Analogno se dokazuje da kriva, odnosno njen poslednji segment, završava u tački p_n . Ovde se pod segmentom podrazumeva deo krive definisan nad intervalom parametra $[t_j, t_{j+1}]$ za neko $j=k, \dots, n$.

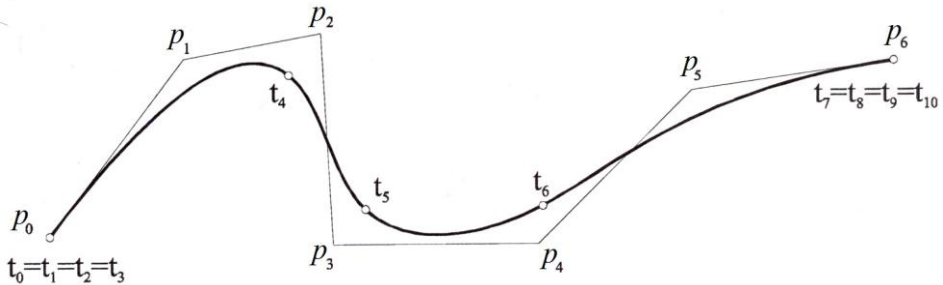
Sledeća važna karakteristika B-Splajn krivih jeste da pojedinačni segmenti:

$$r(t) = \sum_{i=j-k}^j p_i B_i^k(t) \quad (t_j \leq t \leq t_{j+1}) \quad (3.5)$$

leže u konveksnoj ljusci onih kontrolnih tačaka koje učestvuju u njegovoj definiciji, dakle u ovom slučaju tačaka:

$$p_{j-k}, \dots, p_j \quad \text{za} \quad t \in [t_j, t_{j+1}] .$$

Grafička interpretacija prethodne analize je data na slici 3.16 na primeru kubne B-Splajn krive sa svojim kontrolnim tačkama i geometrijskim čvorovima.



Slika 3.16: Kubna B-Splajn kriva [79]

Opisani, neracionalni oblik B-Splajn krive je pogodan za modeliranje složene (neanalitičke) geometrije, ali ne i za modeliranje analitičke geometrije (prava, kružnica, konusni preseki). Zbog toga se CAD sistemi baziraju najčešće na *racionalnim B-Splajn segmentima* oblika:

$$r(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i p_i B_i^k(t)}{\sum_{i=0}^n w_i B_i^k(t)} \quad (3.6)$$

gde su:

- w_i – težinski koeficijenti (brojčane vrednosti),
- p_i - kontrolne tačke i
- $B_i^k(t)$ - funkcije B-Splajn polinomske baze stepena k .

Racionalni B-Splajn segment, pored navedenih dobrih svojstava neracionalne varijante, karakteriše i mogućnost jedinstvenog opisa standardnih analitičkih oblika - prave, kružnice, konusnih preseka, ravni i površina drugog reda. Takođe, preko racionalnog B-Splajn moguće je uvesti dodatne stepene slobode (preko težinskih koeficijenata) što se može iskoristiti za modeliranje velikog broja različitih oblika.

B-Splajn površina je definisana tenzorskim proizvodom dve *B-Splajn* baze:

$$r(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m p_{ij} B_i^k(u) B_j^l(v) \quad (3.7)$$

gde su:

- p_{ij} , $i = 0, \dots, n$; $j = 0, \dots, m$ tačke kontrolnog poliedra,
- k i l stepeni površine u u i v pravcu, respektivno,
- $B_i^k(u)$, $i = 0, \dots, n$ *B-Splajn* baza u u pravcu, stepena k , definisana nad vektorom čvorova $u = (u_r)_0^{n+k+1}$;
- $B_j^l(v)$, $j = 0, \dots, m$ *B-Splajn* baza u v pravcu, stepena l , definisana nad vektorom čvorova $v = (v_s)_0^{m+l+1}$.

Važno je primetiti da je moguće definisati *B-Splajn površinu* i u slučaju različitih stepena po u - i v - pravcima.

Racionalne B-Splajn površine nastaju jednostavnim proširenjem koncepta racionalnih B-Splajn krivih (3.6) na skupove tačaka sa dva stepena slobode, primenom tenzorskog proizvoda B-Splajn baza:

$$r(t) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} p_{ij} B_i^k(u) B_j^l(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} B_i^k(u) B_j^l(v)} \quad (3.8)$$

gde oznake imaju isto značenje kao u (3.7), a jedini novi element je:

- w_{ij} , $i = 0, \dots, n$; $j = 0, \dots, m$ - težinski koeficijenti (brojačane vrednosti) pridruženi kontrolnim tačkama.

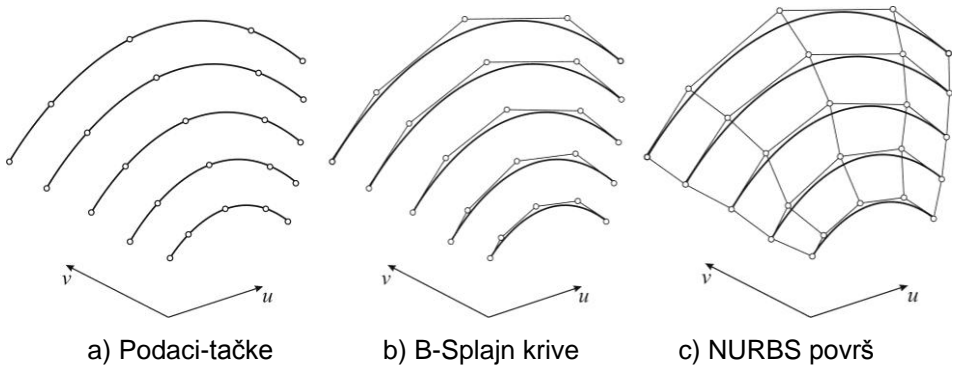
Kao i u slučaju racionalnih B-Splajn krivih i racionalne B-Splajn površine nude dodatne stepene slobode. Osim toga, spomenuti težinski koeficijenti u kombinaciji sa odgovarajućim kontrolnim tačkama i vektorima čvorova omogućavaju racionalnu predstavu svih površina drugog reda – cilindar, sfera, kupa itd.

Ovaj oblik opisa površina je usvojen u većini aktuelnih CAD-sistema, pri čemu se u literaturi [4,5,79] koristi naziv *NURBS* što predstavlja akronim od **Non Uniform Rational B-Spline**. Prefiks *Non Uniform* potiče od neuniformnih vektora čvorova.

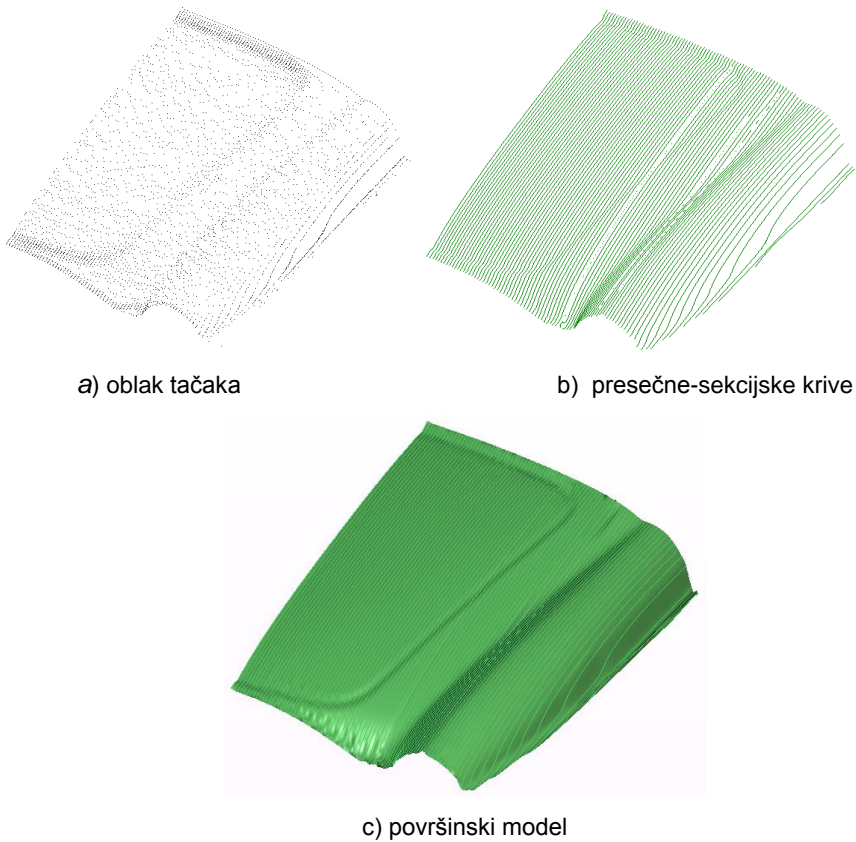
Prva faza procesa rekonstrukcije površinskog modela, primenom presečnih-sekcijskih krivih, jeste generisanje B-Splajn krivih na bazi preprocesiranih podataka-tačaka u presečnim sekcijama (slika 3.17 a i b). U ovom slučaju su sekcije paralelne sa pravcem u -ose. U sledećoj fazi se vrši generisanje *NURBS*-a interpolacijom⁵ tačaka iz prethodno generisanih B-Splajn krivih, u pravcu upravnom na sekcijske ravni (slika 3.17 c), odnosno u ovom slučaju u pravcu v -ose. Za opis ovog procesa se u CAD sistemima, kao i u literaturi, često koriste termini *blending*, odnosno *skinning* [3,44,77].

Ilustracija ovog procesa na primeru jednog realnog proizvoda je data na slici 3.18.

⁵ Imajući u vidu nivo složenosti objekata koji su predmet primene RE tehnike, većina CAD-sistema koji se primenjuje u ovoj oblasti, budući da priroda *NURBS*-a to dozvoljava, primenjuje metodu aproksimacije umesto interpolacije. Time se uvodi određeno odstupanje rezultujuće površine u odnosu na polazni oblak tačaka, ali se i omogućuje sprovođenje rekonstrukcije površina i u vrlo kompleksnim slučajevima, gde interpolacija ne daje nikakav rezultat.



Slika 3.17: Rekonstrukcija površine primenom presečnih-sekcijskih krivih

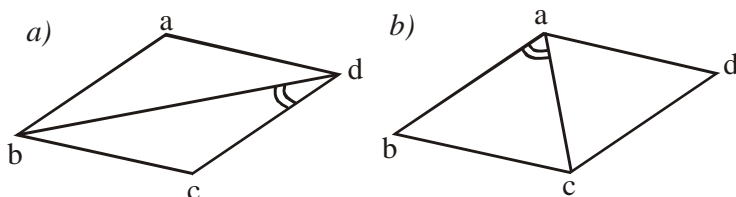


Slika 3.18: Primer procesa generisanja površinskog modela primenom presečnih-sekcijskih krivih [12]

3.3.2 Rekonstrukcija površinskih modela primenom poligonalne aproksimacije

Poligonalni pristup rekonstrukcije površinskih modela se, u najkraćem, zasniva na generisanju NURBS površinskog modela aproksimativnim transformisanjem poligonizovanog modela generisanog na bazi oblaka tačaka.

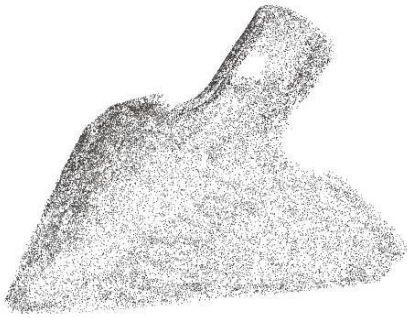
Prva faza ovog procesa podrazumeva generisanje poliedarske strukture čiju površinu čini poligonalna (najčešće trougaone strukture) mreža čija temena su aproksimativno generisana na bazi pre-procesiranih podataka-tačaka. Mreža trouglova se formira povezivanjem tačaka iz jedne polilinije sa tačkama iz druge polilinije i to primenom *ugaonog kriterijuma*, prikazanog na slici 3.19. Za dati slučaj, gde je $\angle bdc$ manji od $\angle bac$ preferira se triangulacija na slici *b*) [84].



Slika 3.19: Ugaoni kriterijum kod triangularne poligonizacije

Generisana poliedarska struktura se zatim, primenom algoritama za transformaciju, prevodi u NURBS površinski model, slika 3.20.

Oblast transformacija poligonizovanih površina u B-Splajn površine, se razvija već više od trideset godina i do sada je razvijen veći broj algoritama za ovu vrstu transformacija. Tu pre svega treba spomenuti: *alfa-oblike*, Katmul/Klarkov (engl. *Catmull/Clark*) algoritam, Delunijevu triangulaciju, Voronoijeve dijagrame, algoritam kotrljanja lopte (engl. *ball-pivoting*) i A zakrpe (engl. *A-patches*), koji su detaljnije opisani u [31,40,57-59,65,81].



a) oblak-tačaka



b) poligonalni (triangulirani) model



c) Površinski (NURBS) model

Slika 3.20: Poligonalni prilaz u generisanju CAD modela

4. PRE-PROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE

Nepravilnosti koje se javljaju u rezultatima 3D digitalizacije mogu se značajno razlikovati u zavisnosti od primenjene opreme za 3D digitalizaciju, procedure merenja, geometrijske složenosti objekta, cilja procesa RE dizajna, odnosno primenjene metodologije RE dizajna. U tom smislu se, u različitim sistemima za RE dizajn, može sresti veći broj procedura koje se primenjuju sa ciljem što bolje pripreme oblaka tačaka za fazu rekonstrukcije površina. Ove procedure se u literaturi najčešće obuhvataju fazom **pre-procesiranja**, mada se mogu sresti i neki drugi termini pre svih procesiranje tačaka (engl. *point-processing*) i procesiranje podataka (engl. *data-processing*) [3,12,19,20,56]. U opštem slučaju, može se uzeti da pre-procesiranje počinje sa završetkom 3D digitalizacije, a završava sa početkom rekonstrukcije površinskog modela.

U okviru spomenutog, većeg broja procedura za pripremu podataka-tačaka, odnosno podfaza pre-procesiranja, u gotovo svim sistemima se mogu sresti [3,4,5,12,18-20,56,61]:

- eliminacija grešaka,
- uravnavanje,
- registracija,
- segmentacija i
- redukovanje podataka-tačaka.

pri čemu se eliminacija grešaka i uravnavanje podataka često obuhvata pojmom *filtriranje podataka-tačaka*.

U zavisnosti od vrste, namene i specifičnih zahteva sistema za RE dizajn, mogu se sresti i druge podfaze, pre svih *re-orijentacija koordinatnih sistema*. Kod sistema zasnovanih na metodologiji poprečnih preseka su to: *analiza pravosti, regresiona analiza, regeneracija podataka-tačaka* [19,55,85], *uređivanje podataka-tačaka* [18,20], *ekstrakcije podataka po poprečnim presecima* [3,12,18,56,86,87]. Sa druge strane, kod poligonalnih RE prilaza, mogu se sresti podfaze poput: *izbora trouglova za triangulaciju, selekcije ivica-entiteta, optimizaciju poligonizovanih mreža* [57-59,81,84].

Treba napomenuti da postoji i problem različitog poimanja faze pre-procesiranja. To se pre svega odnosi na granice ove faze, odnosno obuhvatanje podfaza. Drugim rečima, neke od pomenutih pod-faza, pre svih segmentacija, se u nekim RE-sistemima mogu naći izvan faze pre-procesiranja [55,56].

Filtriranju i redukovanju oblaka tačaka, kao dominantnim i najčešće prisutnim problemima u okviru faze preprocesiranja, u nastavku će se posvetiti dodatna pažnja.

4.1 Filtriranje rezultata 3D digitalizacije

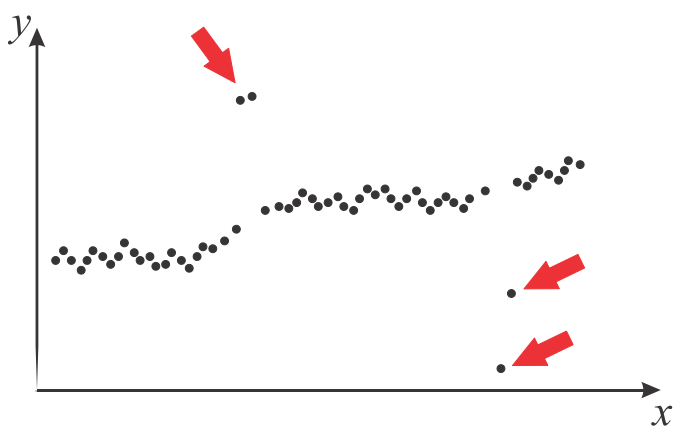
S obzirom na to da je svako realno merenje praćeno greškama [88], prisustvo šuma, odnosno grešaka koje se javljaju tokom 3D digitalizacije, predstavlja neizbežnu prepreku koja može značajno da degradira tačnost rekonstrukcije površine objekta [77], bilo da je u pitanju generisanje krive, bilo površine. Greške merenja se mogu podeliti na *slučajne* i *sistematske*. Slučajne greške su posledica određenih poremećaja u sistemu merenja i njihova pojava se ne može objasniti određenim pravilima. Za razliku od njih, sistematske greške se dešavaju po nekim pravilima, njihov uzrok se gotovo uvek može otkriti [88], a mogu se posmatrati kao posledica primenjene tehnologije za 3D digitalizaciju (kalibrisanost, osetljivost senzora...), osobina objekta (hrapavost površine, odsjaj (refleksija), tvrdoća materijala...), uslova okoline (temperatura, vlažnost, buka, vibracije...) ili operatera [89].

Slučajne greške kod 3D digitalizacije se ogledaju u takozvanim *tačkama-izvan-opsega* (engl. *outliers*), dok su sistematske greške uzrok pojave *pikova* (engl. *spikes*) (slika 4.1) koji predstavljaju izvor problema neuglačanosti generisanih krivih i površina [56].

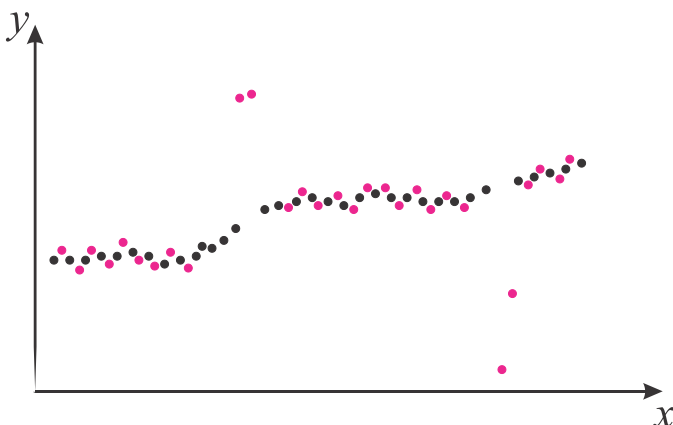
Navedene pojave spadaju u neke od najčešćih problema vezanih za rezultat 3D digitalizacije. U tom smislu, prvi korak u okviru pre-procesiranja rezultata 3D-digitalizacije je *filtriranje*, čije su dve osnovne funkcije [3,12,19]:

- 1) *eliminisanje tačaka-izvan-opsega* i
- 2) *uravnavanje (glačanje) podataka-tačaka*.

U nastavku je dat pregled najčešće primenjivanih metoda filtriranja podataka-tačaka u praksi, podeljenih prema nameni.



a) sirovi podaci-tačke



b) filtrirani podaci-tačke

Slika 4.1: Greške u rezultatu 3D digitalizacije [3]

4.1.1 Filtriranje tačkaka-izvan-opsega u rezultatu 3D digitalizacije

Cilj ove faze je eliminisanje grešaka merenja u vidu tačkaka-izvan-opsega, odnosno impulsnog šuma. U tu svrhu, razvijeno je više metoda, od kojih se, kao češće primenjivane u praksi, mogu izdvojiti [3,20,56]:

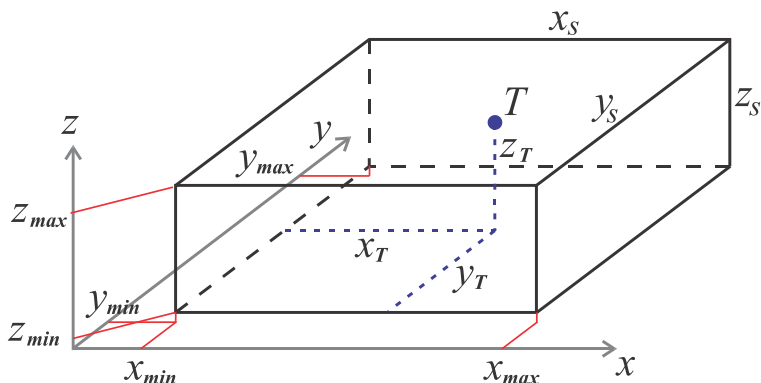
- 1) metoda zapreminskog filtriranja,
- 2) metoda filtriranja linijom,
- 3) metoda ugla,
- 4) metoda filtriranja preko kontrolnih granica (statističke ocene) i
- 5) metoda medijane.

4.1.1.1 Metoda zapreminskog filtriranja

Princip metode je zasnovan na formiranju pravougaone zapremine, definisane dužinom i širinom skeniranja (x i y -ose) i visinom skeniranja, odnosno realnom visinom skeniranog objekta (z -osa), kao što je prikazano na slici 4.2. Podaci-tačke koji se nađu izvan ove zapremine smatraju se za greške merenja i eliminišu se [56]. Ova metoda spada u grublje i primenjuje se za eliminisanje ekstremnijih grešaka koje se mogu javiti u rezultatu 3D digitalizacije, kao i za uklanjanje delova oblaka tačkaka koji pripadaju priboru i/ili mernom stolu.

Metoda se može, u matematičkom obliku, predstaviti relacijama (4.1), gde su (x_T , y_T , z_T) koordinate tačke T , čije zadržavanje u oblaku tačkaka se razmatra:

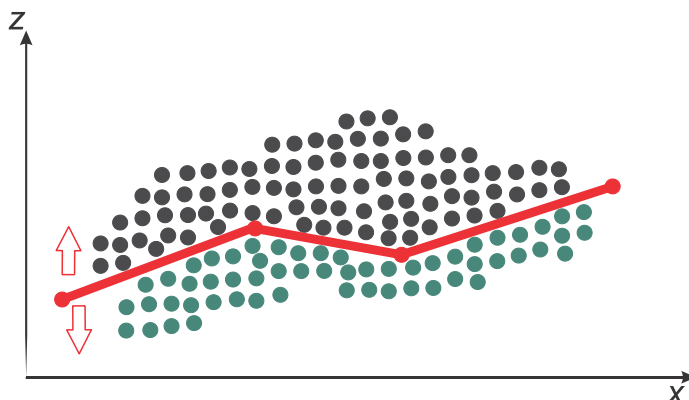
$$\begin{aligned}x_{\min} &\leq x_T \leq x_{\max} \\y_{\min} &\leq y_T \leq y_{\max} \\z_{\min} &\leq z_T \leq z_{\max}\end{aligned}\tag{4.1}$$



Slika 4.2: Princip metode zapreminskog filtriranja

4.1.1.2 Metoda filtriranja segmentiranom linijom

Metoda filtriranja segmentiranom linijom je sofisticiranija varijanta prethodne i podrazumeva izdvajanje (separaciju) delova oblaka-tačaka koji predstavljaju greške merenja (ili neželjene tačke) pomoću segmentirane linije. Najčešće varijante ovih filter linija su "izlomljene" linije koje čine pravolinijski segmenti definisani koordinatama početne i krajnje tačke u izabranoj ravni x-y, x-z ili y-z. Moguće su i varijante sa kreiranjem "izlomljene" filter linije u nekoj proizvoljnoj ravni, što mora biti podržano mogućnošću transformacija koordinatnog sistema. Nakon kreiranja filter linije, eliminišu se tačke sa željene strane, kao što je ilustrovano na slici 4.3 [3].



Slika 4.3: Princip metode filtriranja segmentiranom linijom

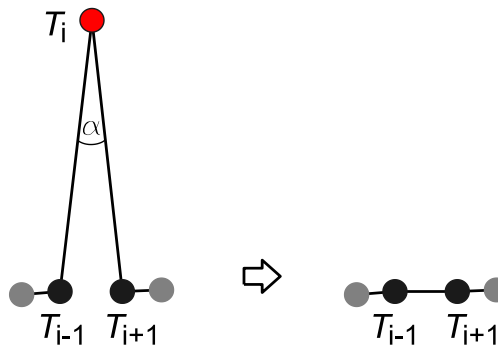
4.1.1.3 Metoda ugla

Ova metoda se, za razliku od prethodne dve koje su namenjene filtriranju prostornih oblaka-tačaka, primenjuje za uklanjanje tačaka-izvan-opsega iz niza tačaka u okviru sekcijskih preseka. Dakle, ova metoda zahteva strukturiranost oblaka tačaka. Kod filtriranja tačaka metodom ugla, dve susedne tačke analiziranoj tački se povezuju pravom linijom, a kao kriterijum za odlučivanje da li se radi o tački-izvan-opsega, primenjuje se ugao α koji čine posmatrana tačka (T_i) i njoj susedne dve (T_{i-1}) i (T_{i+1}), kao što je prikazano na slici 4.4. Ukoliko je taj ugao manji od minimalno dozvoljenog, zadanog od strane korisnika α_{\max} (vrednost koja se primenjuje u praksi se kreće oko $10-15^\circ$) posmatrana tačka se eliminiše, u skladu sa relacijama (4.2) [20,90]:

$$\alpha \leq \alpha_{\max} \Rightarrow T_i \notin A \quad (4.2)$$

gde su: $\alpha = \angle(T_{i-1}, T_i, T_{i+1})$

A - skup analiziranih tačaka u okviru sekcijskog preseka.



Slika 4.4: Princip metode filtriranja na osnovu veličine ugla [90]

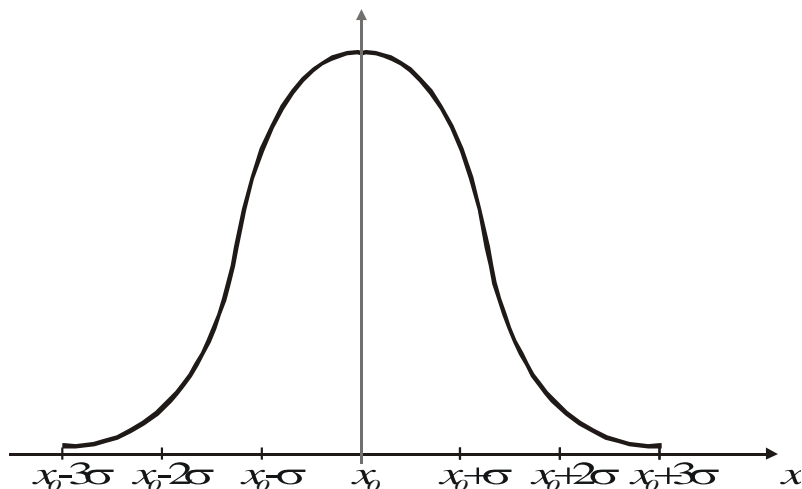
4.1.1.4 Metoda kontrolnih granica

Metoda filtriranja šuma preko kontrolnih granica ili statističke ocene, kako se još naziva, je zasnovana na određivanju intervala poverenja u okviru kojeg se, sa određenom verovatnoćom, može očekivati da će se

nalaziti posmatrana karakteristika osnovnog skupa [91]. Drugim rečima, ako se raspodela empirijski dobijenih rezultata prilagodi opštoj krivoj normalne raspodele, moguće je izračunati površinu ispod krive normalne raspodele, odnosno Gausove krive (slika 4.5), za bilo koje granice. Dakle, moguće je izračunati količinu empirijski dobijenih podataka koji leže unutar ili izvan zadatih (kontrolnih) granica. Tada se udaljenost bilo koje vrednosti slučajno promenljive X do srednje vrednosti x_0 može izraziti preko višestruke standardne devijacije σ [92]:

$$X - x_0 = t \cdot \sigma \quad (4.3)$$

U praktičnom radu, interval poverenja se utvrđuje na bazi 95 % i 99 %, odnosno za $t = 2$ i $t = 3$, što znači da je dopuštena mogućnost greške 5 %, odnosno 1 % [91]. Procedura podrazumeva izračunavanje srednje vrednosti i standardne devijacije prethodno selektovanih podataka po poprečnim presecima, nakon čega se definišu granice, odnosno parametar t , u okviru kojih je potrebno da se nađe tačka iz skeniranog niza. Nakon toga se vrši ocenjivanje da li se tačka nalazi unutar zadatih kontrolnih granica. Ukoliko to nije slučaj, tačka se eliminiše iz niza [3,12]. Ova metoda se može uspešno primenjivati u slučajevima skeniranih krivih bez velikih promena krivosti.



Slika 4.5: Gausova kriva

4.1.1.5 Metoda medijane

Metoda zasnovana na vrednosti medijane je vrlo popularna, nelinearna tehnika koja se koristi za uklanjanje impulsnog šuma [77,90]. Međutim, s obzirom da je ova metoda prevashodno namenjena uravnavanju podataka, ista je detaljnije predstavljena u odeljku koji sledi.

4.1.2 Uravnavanje podataka-tačaka u rezultatu 3D digitalizacije

Nakon filtriranja podataka tačaka u vidu impulsnog šuma, kvalitet rezultata 3D digitalizacije može se dalje poboljšati uravnavanjem. Primena ovog procesa eliminiše velike oscilacije tačaka i ima za rezultat raspodelu tačaka, koja kasnije obezbeđuje kreiranje glatkijih krivih, a posledično i glatkijih površina [20].

Postoji više metoda za uravnavanje podataka-tačaka, među kojima značajniju primenu imaju:

- 1) metoda srednjih vrednosti i
- 2) metoda medijane.

4.1.2.1 Metoda srednjih vrednosti

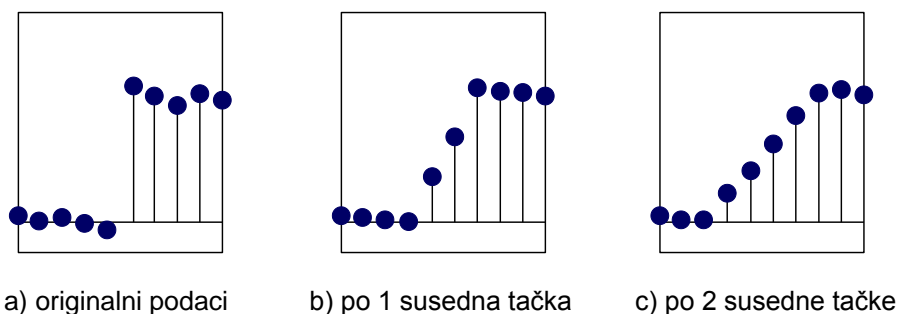
Metoda srednjih vrednosti je jednostavna i laka za implementaciju. Princip ove metode je zasnovan na izračunavanju *statističke srednje vrednosti* za specificirani niz podataka-tačaka u cilju njihovog uravnavanja [20,91]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.4)$$

gde su:

- x_i – koordinate tačaka i
- n – ukupan broj tačaka.

Ova vrsta filtera vrši “omekšavanje” pikova u rezultatu 3D digitalizacije pomeranjem svake od tačaka na srednju poziciju te tačke i njoj susednih tačaka. Najčešće se primenjuje u varijanti sa po jednom ili dve susedne tačke. Sličan je filteru na principu medijane, daje dobre rezultate kod nizova podataka-tačaka sa puno šuma [90], ali nije dobar za primenu na nizovima podataka-tačaka sa stepenastim skokovima (ivice), slika 4.6 [20,77].



Slika 4.6: Uravnavanje metodom srednjih vrednosti

4.1.2.2 Metoda medijane

Metoda zasnovana na vrednosti medijane je nelinearna tehnika koja objedinjuje funkcije za uravnavanje niza podataka i uklanjanje tačaka koje predstavljaju greške merenja [77,90]. Princip ovog filtera je baziran na pomeranju tačaka niza na pozicije koje odgovaraju statističkoj vrednosti medijane analizirane tačke i određenog broja (najčešće dve ili četiri) susednih tačaka. Kao definicija medijane, od nekoliko različitih koje se mogu naći u literaturi, može se iskoristiti sledeća: “*medijana predstavlja onu vrednost u nizu koja deli niz na dva jednaka dela, pri čemu je potrebno prethodno sistematizovati podatke po veličini*” [91].

Princip ovog filtera, u matematičkom obliku, se može iskazati sledećom jednačom (4.5):

$$y(i) = Med[x(i - N), x(i + N)] \quad (4.5)$$

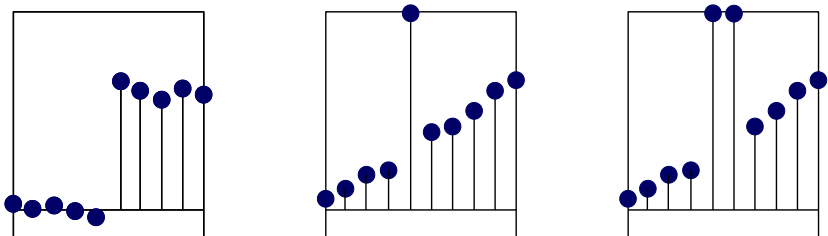
gde su:

$x(i)$ - ulazni podaci,

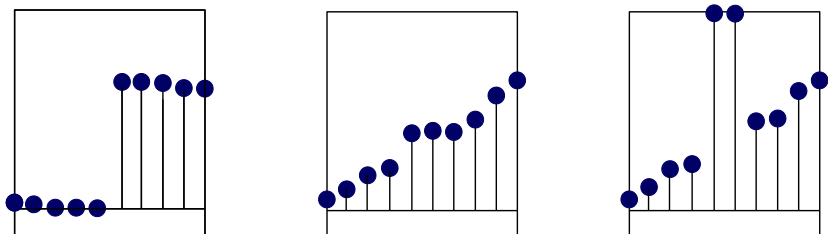
$y(i)$ - izlaz,

N - polovina širine *prozora filtera*.

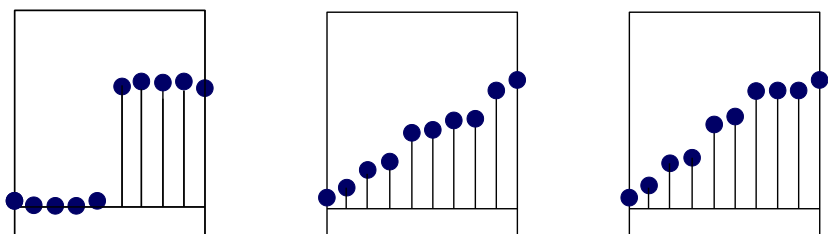
Prozor filtera predstavlja broj tačaka koji se uzima u obzir sa jedne strane analizirane tačke [77]. Proces filtriranja se izvršava nad celokupnim nizom sa prozorom širine $2N + 1$.



a) polazni podaci-tačke



b) rezultat filtriranja prozorom širine 3 ($N=1$)



c) rezultat filtriranja prozorom širine 5 ($N=2$)

očuvanje ivice

uravnavanje niza sa impulsnim šumom

Slika 4.7: Osobine filtera na bazi medijane

Primena filtera na bazi medijane ima tendenciju očuvanja oblika, pri čemu se vrlo dobro ponaša kada su u pitanju stepenasti oblici, što i jeste osnovna prednost u odnosu na filtriranje srednjom vrednošću (slika 4.7 a). Ovaj filter je, kao što je napomenuto, pogodan i za eliminisanje impulsnog šuma, pri čemu je bitna širina prozora filtera, slika 4.7 b i c [77,90].

4.2 Redukovanje podataka-tačaka u rezultatu 3D digitalizacije

U opštem slučaju, geometrijski složenija površina objekta zahteva veći broj tačaka za rekonstrukciju. Međutim, (pre)veliki broj podataka-tačaka može imati i negativne implikacije, poput usporavanja procesa RE, visokih zahteva u pogledu računarskog hardvera, a u ekstremnim slučajevima proces rekonstrukcije može učiniti neizvodljivim. Drugim rečima, CAD sistemi, u opštem slučaju, usled ograničenih memorijskih i procesorskih resursa, često nisu sposobni da procesuiraju (u prihvatljivom vremenu trajanja) ogromnu količinu podataka-tačaka prikupljenih u procesu 3D digitalizacije sa skenirane površine objekta. Problem procesiranja velike količine skeniranih podataka je i jedna od osnovnih prepreka za automatizaciju procesa RE, pored neophodnosti ručne 3D digitalizacije kod delova kompleksne geometrije. Imajući u vidu prethodno, kao i razvoj novih sistema za 3D digitalizaciju koji generišu ogroman broj tačaka u kratkom vremenu (kod nekih optičkih sistema gde vrednosti idu i do milion tačaka u sekundi [93]) veliki broj istraživanja [4,13,16,17,19,21,44,56, 84,87,94,95] je već godinama fokusiran na razvoj metodologija za smanjenje, odnosno redukciju podataka-tačaka u rezultatu 3D digitalizacije.

Redukcija podataka-tačaka (engl. *data-reduction*) može značajno da utiče na kvalitet rekonstruisanog modela, pre svega u pozitivnom smislu, ali može imati i negativne implikacije. U opštem slučaju, za rekonstrukciju složenije površine sa većim stepenom krivosti je potreban veći broj tačaka, dok je kod jednostavnijih površina moguće zanemariti određene podatke-tačke i pri tome ipak postići zadovoljavajuću tačnost rekonstruisane površine. U kontekstu toga, može se reći da se karakteristične tačke površina nalaze na mestima gde krivost ima veće varijacije [56,77]. Upravo je to i osnovni zadatak procesa redukovanja rezultata 3D digitalizacije - *ekstrakcija karakterističnih tačaka na osnovu*

kjih je moguće rekonstruisati krive odnosno površine, sa ciljem kreiranja geometrijskog modela u zadovoljavajućem vremenskom periodu, koji dovoljno kvalitetno aproksimira originalni objekat [56]. Drugim rečima, rezultat redukcije treba da bude kompromis između brzine procesiranja i kvaliteta, (tačnosti) dobijenih 3D modela.

U praksi se primenjuje veći broj metoda za redukovanje podataka i u skladu sa porastom značaja ovog procesa sve se više poklanja pažnja usavršavanju postojećih i razvoju novih.

Trenutno primenjivane metode za redukovanje podataka-tačaka u rezultatu 3D digitalizacije, mogu se klasifikovati u tri kategorije [20,56,13]:

1. metode semplovanja,
2. metode za redukovanje broja poligona u poligonalnom modelu i
3. mrežne metode.

4.2.1 Metode redukovanja podataka semplovanjem

Metode ove vrste spadaju u češće primenjivane u slučajevima RE projektovanja zasnovanog na metodologiji presečnih-sekcijskih krivih [19]. U svetu je do danas razvijen veliki broj metoda za redukovanje podataka-tačaka semplovanjem tačaka, između kojih se u literaturi najčešće pominju sledeće [44,19,20,56,96]:

- 1) Metoda uniformnog semplovanja (ili faktorna metoda);
- 2) Metoda prostornog semplovanja;
- 3) Metoda devijacije visine tetive;
- 4) Metoda redukcije podataka na osnovu visine;
- 5) Metoda redukcije na osnovu nivoa pravosti;
- 6) Metoda redukcije tačaka na osnovu krivosti u tačkama;
- 7) Metoda redukcije zasnovana na toleranciji promene tangentnosti;
- 8) Metoda redukcije na osnovu verovatnoće.

Navedene metode su detaljnije predstavljene u nastavku poglavlja.

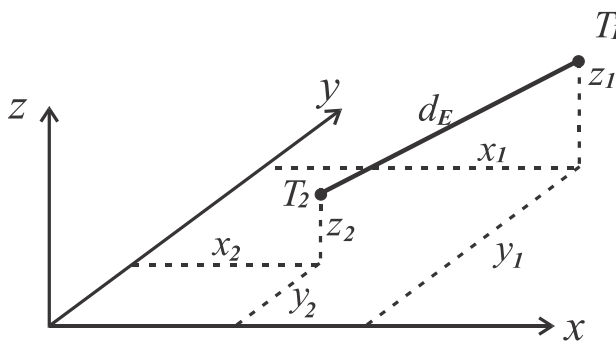
4.2.1.1 Metoda uniformnog (faktornog) semplovanja

Metoda uniformnog (faktornog) semplovanja spada u najjednostavnije metode, primenom koje se redukuje broj tačaka u nizu podataka na osnovu *faktora semplovanja* ili *redukcionog faktora*, kako se još naziva, zbog čega je ova metoda poznata i kao *faktorna metoda*. Primenom ove metode iz oblaka tačaka se semplojuje (odabira) svaka i -ta tačka, gde je i faktor semplovanja, ali je potrebno da tačke u okviru skeniranih podataka budu strukturirane, odnosno uređene po skeniranim linijama u okviru poprečnih preseka [20,56]. Razvojem sofisticiranijih metoda, uniformno semplovanje se često primenjuje kao pred-redukcija u slučajevima objekata manje geometrijske složenosti i izrazito velikog broja tačaka.

4.2.1.2 Metoda prostornog semplovanja

Metoda prostornog (engl. *spatial*) semplovanja je zasnovana na parametru koji se naziva *prostorno rastojanje* (d_E), a koji se određuje preko *euklidskog rastojanja* (engl. *Euclidian distance*). Euklidsko rastojanje (d_E) između dve tačke: $T_1=(x_1,y_1,z_1)$ i $T_2=(x_2,y_2,z_2)$, u trodimenzionalnom prostoru R^3 (slika 4.8), se definiše kao [97]:

$$d_E = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4.6)$$



Slika 4.8: Euklidsko rastojanje između dve tačke u trodimenzionalnom prostoru

Za razliku od prethodne dve metode, princip redukcije je zasnovan na jednom uslovu iskazanom sledećom relacijom:

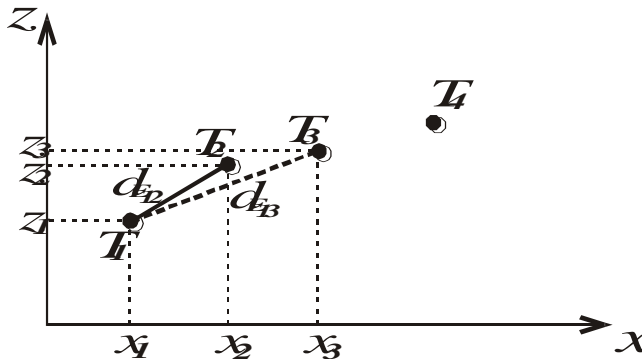
$$d_{E_i, i+1} \leq d_{E_A} \quad (4.7)$$

gde su:

$d_{E_i, i+1}$ - prostorno rastojanje između i -te i $i+1$ tačke i

d_{E_A} – zadato dozvoljeno prostorno rastojanje.

Procedura redukcije tačaka se sastoji u sledećem: prva skenirana tačka skenirane krive se selektuje kao referentna tačka i izračunava se euklidsko rastojanje između referentne tačke i sledeće tačke u nizu (u prvom koraku $d_{E_{1,2}}$) koja je ujedno i analizirana tačka (za koju se razmatra eventualna eliminacija). Ukoliko je ispunjen uslov iz relacije (4.7) vrši se eliminacija analizirane tačke, a procedura se nastavlja sa sledećom tačkom i tako dalje sve dok prostorno rastojanje između referentne i analizirane tačke zadovoljava uslov iz relacije (4.7). U slučaju da uslov iz relacije (4.7) nije zadovoljen, analizirana tačka se zadržava u skeniranom nizu i proglašava za referentnu tačku kod donošenja odluke u sledećem koraku, kao što je prikazano na slici 4.9 [56].

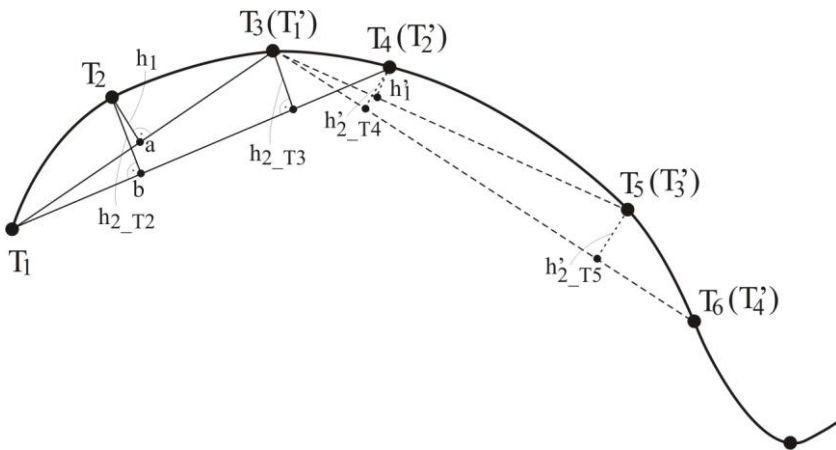


Slika 4.9: Princip prostorne metode

4.2.1.3 Metoda devijacije visine tetive

Metoda devijacije visine tetive predstavlja vrlo popularnu metodu, koja je razvijena od strane D. F. Rogersa i J. A. Adamsa [56]. Ova metoda je poznata i pod nazivom metoda devijacije visine tetive zbog parametara na bazi kojih se vrši redukcija.

Princip metode tetive je matematički opisan relacijama u nastavku, uz podršku ilustracije na slici 4.10.



Slika 4.10: Princip redukovanja podataka metodom devijacije visine tetive [56]

$$h_1 = \left| \overrightarrow{T_2 T_1} \right| \sin(\angle T_2 T_1 T_3) \quad (4.8)$$

$$h_{2_T2} = \left| \overrightarrow{T_2 T_1} \right| \sin(\angle T_2 T_1 T_4) \quad (4.9)$$

$$h_{2_T3} = \left| \overrightarrow{T_3 T_1} \right| \sin(\angle T_3 T_1 T_4) \quad (4.10)$$

$$h_1 \leq h_r \quad (4.11)$$

$$h_{2_T2} < h_{2_T3} \quad (4.12)$$

gde su:

h_1 – visina tetive (najkraće rastojanje) u analiziranoj tački (T_2) u odnosu na duž koja povezuje tačke T_1 i T_3 ,

h_{2_T2} -visina tetive u analiziranoj tački (T_2) u odnosu na duž koja povezuje tačke T_1 i T_4 ,

h_{2_T3} -visina tetive u tački koja sledi iza analizirane tačke (T_3) u odnosu na duž koja povezuje tačke T_1 i T_4 ,

h_r – zadata (maksimalno dozvoljena) visina tetive za donošenje odluke

$\overline{T_2T_1}$ - intenzitet vektora koji povezuje tačke T_2 i T_1 ,

$\overline{T_3T_1}$ - intenzitet vektora koji povezuje tačke T_3 i T_1 ,

$\angle T_2T_1T_3$ - ugao između tačaka T_2 , T_1 i T_3 ,

$\angle T_2T_1T_4$ - ugao između tačaka T_2 , T_1 i T_4 i

$\angle T_3T_1T_4$ - ugao između tačaka T_3 , T_1 i T_4 .

Princip odlučivanja o redukciji je dvostepeni, odnosno baziran je na osnovnom i dodatnom uslovu, koji su iskazani relacijama (4.11) i (4.12).

Procedura metode se sastoji u sledećem: Označi se prva skenirana tačka (T_1) kao referentna tačka skeniranog niza. Nakon toga se povezuju referentna tačka i treća skenirana tačka (T_3) pravom linijom i izračunava se visina h_1 . Ukoliko je vrednost h_1 veća od zadate (maksimalno dozvoljene) visine, odnosno $h_1 > h_r$ druga skenirana tačka T_2 se zadržava u skeniranom nizu i selektuje se kao referentna tačka za sledeći ciklus odlučivanja.

Ukoliko je, pak, ispunjen uslov iz relacije (4.11), kreira se nova tetiva koja povezuje referentnu tačku (T_1) i četvrtu skeniranu tačku (T_4) i izračunavaju se visine h_{2_T2} i h_{2_T3} . Ukoliko je ispunjen dodatni uslov redukcije iskazan relacijom (4.12), vrši se redukcija, odnosno eliminisanje tačke T_2 iz skeniranog niza, a tačka T_3 se selektuje kao referentna tačka za sledeći ciklus odlučivanja. U slučaju da dodatni

uslov nije ispunjen tačka T_2 se zadržava u nizu i selektuje se za referentnu tačku u sledećem ciklusu odlučivanja. Opisana procedura za redukovanje podataka se ponavlja dok se ne analiziraju sve tačke u skeniranom nizu [20,56].

4.2.1.4 Metoda redukcije na osnovu visine

Kriterijum za odlučivanje o važnosti tačke za rekonstrukciju površine, kod metode redukovanja na osnovu visine (engl. *height decision*) je zasnovan na razlici "visina" dveju susednih skeniranih tačaka. Vrednost *maksimalno dozvoljene visine* T - parametra za odlučivanje definiše se na osnovu ukupne visine skeniranog objekta - H . U cilju izbegavanja gubljenja rezolucije preporuka je da se maksimalna vrednost visine za odlučivanje kreće oko 0,15 % od ukupne visine objekta [56].

$$T=0,0015 \cdot H \quad (4.13)$$

U okviru procedure redukcije, prva skenirana tačka S_0 se proglašava za prvu referentnu tačku P_0 skenirane krive. Tačka za koju je tokom ciklusa ispitivanja donešena odluka da se zadržava, postaje referentna tačka narednog ciklusa. Ako je $P_n(x_n, z_n)$ referentna tačka ispitivane krive koja sadrži m skeniranih tačaka, a $S_r(x_r, z_r)$ r -ta tačka koja sledi tačku P_n na skeniranoj krivoj, tada je razlika u visini ove dve tačke, po x -osi, jednaka:

$$h_r = x_n - x_r \quad (4.14)$$

Na osnovu relacija između h_r i T , primenjuje se sledeći redukциони kriterijum, pri čemu se prva tačka S_1 i krajnja tačka S_m svake skenirane krive zadržavaju u cilju održanja graničnih podataka skeniranog modela [56]:

- Ukoliko se u opsegu odlučivanja nalazi samo jedna tačka (slika 4.11a) ta tačka se zadržava.
- Ukoliko u opsegu odlučivanja ima više tačaka, skenirana tačka koja je najbliža gornjoj graničnoj odluci, treba da se zadrži, a ostale se eliminišu (slika 4.11 b).
- U slučaju da u opsegu odlučivanja nema nijedne tačke, to implicira da je promena krivosti u tom opsegu (području) vrlo

ograničena i ne zahteva kontrolnu tačku za rekonstrukciju površine.

- Ukoliko u dva uzastopna opsega nema nijedne tačke, primenjuje se metoda interpolacije na trenutnu referentnu tačku i tačku najbližu granici odlučivanja, u cilju generisanja nove tačke. Ova tačka se označava kao nova referentna tačka P_{n+1} za sledeći ciklus ispitivanja (slika 4.11 c):

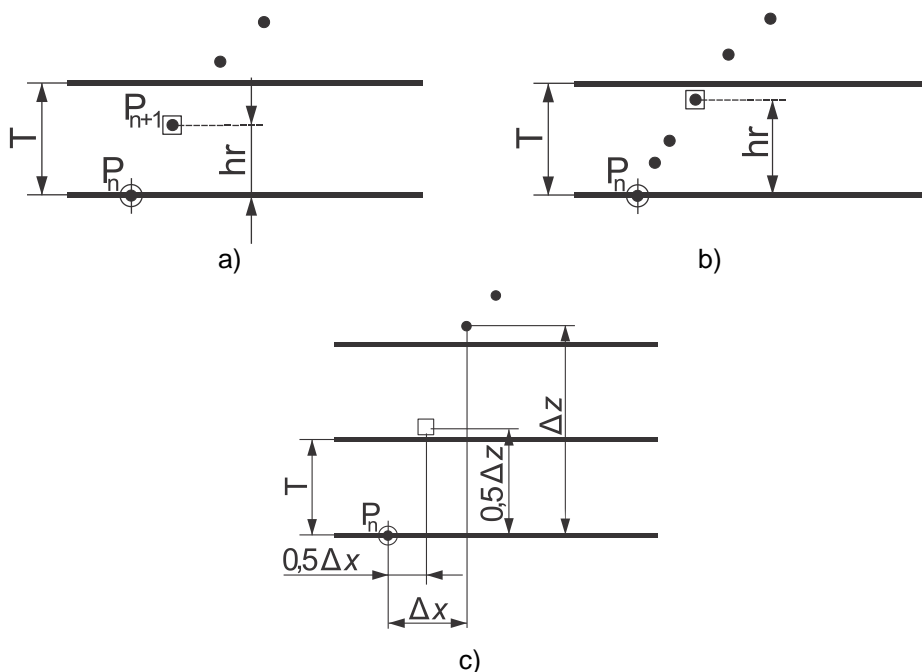
$$P_{n+1}(x_{n+1}, z_{n+1}) = (x_n + 0,5\Delta x, z_n + 0,5\Delta z) \quad (4.15)$$

$$\Delta x = x_r - x_n \quad (4.16)$$

$$\Delta z = z_r - z_n \quad (4.17)$$

gde su Δz i Δx rastojanja između referentne tačke i ispitivane tačke po z-osi, odnosno x-osi, respektivno.

- U sledećem ciklusu, novoizabrana kontrolna tačka P_{n+1} se koristi kao referentna tačka za izračunavanje razlike u visini.



Slika 4.11: Princip metode za redukovanje na osnovu visine [56]

4.2.1.5 Metoda pravosti

Metoda redukovanja na osnovu nivoa pravosti je zasnovana na kriterijumu koji podrazumeva da se analizirana tačka eliminiše ukoliko ista sa dve susedne tačke formira "pravu" liniju, pri čemu korisnik pre procesa eliminacije zadaje željeni *nivo pravosti* u skladu sa potrebnim nivoom tačnosti u rekonstruisanju površine [77].

Matematički opis metode je dat relacijama (4.18) do (4.24), uz grafičku interpretaciju datu na slici 4.12.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_3 - z_2}{|x_3 - x_2|} \right) \quad (4.18)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{z_1 - z_2}{|x_1 - x_2|} \right) \quad (4.19)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z_1 - z_a}{|x_1 - x_a|} \right) \quad (4.20)$$

$$\Phi = |\theta_1 + \theta_2| \quad (4.21)$$

$$\Psi = |\theta + \theta_1| \quad (4.22)$$

$$\Phi \leq \Phi_A \quad (4.23)$$

$$\Psi \leq \Psi_A \quad (4.24)$$

gde su:

$T_{i-1}(x_1, y_1, z_1)$ - tačka koja prethodi analiziranoj tački,

$T_i(x_2, y_2, z_2)$ - tačka koja se analizira,

$T_{i+1}(x_3, y_3, z_3)$ - tačka koja sledi tačku koja se analizira,

T_a - pre-eliminirana tačka,

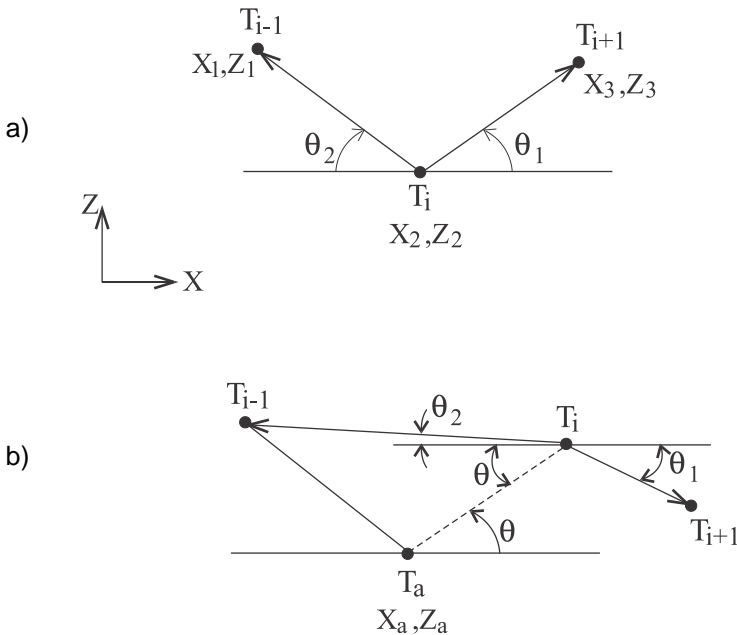
Φ - osnovni parametar (ugao) procesa odlučivanja o redukciji,

Ψ - dodatni parametar (ugao) procesa odlučivanja o redukciji,

Φ_A - zadata (maksimalna) vrednost osnovnog parametra procesa odlučivanja o redukciji i

Ψ_A - zadata (maksimalna) vrednost dodatnog parametra procesa odlučivanja o redukciji.

Princip odlučivanja o redukciji je dvostepen, odnosno baziran je na osnovnom i dodatnom uslovu, koji su iskazani relacijama (4.23) i (4.24). Ukoliko je Φ veće od zadanog nivoa pravosti Φ_A , tada T_i predstavlja karakterističnu tačku skenirane krive i zadržava se u nizu (slika 6.2 a).

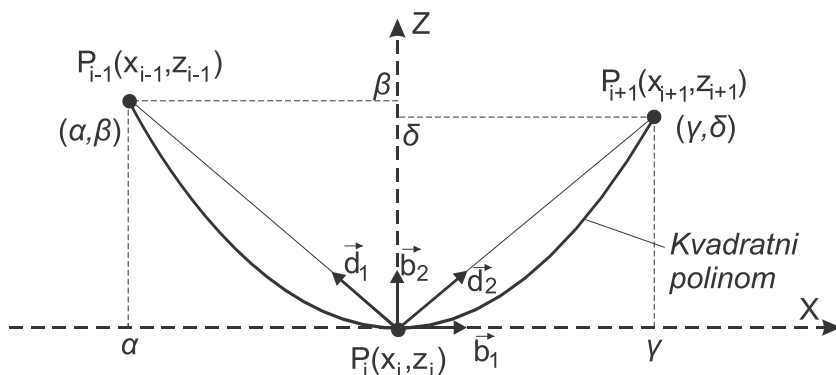


Slika 4.12: Princip redukovanja tačaka metodom pravosti [77]

Ukoliko je Φ manje od zadatog nivoa pravosti ili jednako zatom nivou pravosti, vrši se preliminarna eliminacija tačke T_i i proverava se dodatni uslov na bazi parametra Ψ . Tačka T_i u tom slučaju postaje tačka T_a (slika 6.2 b), izračunava se parametar Ψ i ukoliko je isti manji ili jednak vrednosti Ψ_A tačka T_i se definitivno eliminiše. U suprotnom, ukoliko je Ψ veće od zadatog nivoa pravosti Ψ_A , tačka T_i se ipak zadržava kao jedna od karakterističnih tačaka [77].

4.2.1.6 Metoda redukcije na osnovu krivosti u tačkama

Metoda redukcije na osnovu krivosti u tačkama bazira se na izračunavanju krivosti u svakoj tački za konačan niz podataka-tačaka u ravanskom preseku. Za niz tačaka u ravanskom preseku $P=\{(x_i, z_i), i=0, \dots, n\}$, krivost u tački P_i se aproksimira izračunavanjem kvadratnog polinoma za interpolaciju tri uzastopne tačke P_{i-1} , P_i i P_{i+1} (slika 4.13). Najpre se pozicionira pomoćni koordinatni sistem za date tri tačke sa koordinatnim početkom u tački P_i , a zatim se izračunavaju vektori razlika \vec{d}_1 i \vec{d}_2 kao i osnovni jedinični vektori \vec{b}_1 i \vec{b}_2 . Nakon toga se definiše kvadratni polinom na bazi relativnih koordinata tačaka $P_{i-1}(\alpha, \beta)$, $P_i(0,0)$ i $P_{i+1}(y, \delta)$ i izračunava se krivost u tački P_i . Odluka o redukciji se donosi poređenjem dobijene vrednosti sa dozvoljenom krivošću k_{min} .



Slika 4.13: Izračunavanje krivosti u susednim tačkama [97]

Postoje varijacije ove metode sa dodatnim parametrom - *maksimalno dozvoljenim rastojanjem* između dve tačke, koji se može uvesti u cilju upravljanja količinom redukovanih tačaka [97]. Varijacija ove metode, koja uzima u obzir krivost površine i u pravcu x-ose i u pravcu y-ose, je prikazana u [105].

4.2.1.7 Metoda redukcije zasnovana na verovatnoći

Metoda redukcije zasnovana na verovatnoći je bazirana na slučajnom izboru tačaka za eliminisanje (ili zadržavanje), a na osnovu nivoa verovatnoće zadatog od strane korisnika. Primena ove metode je pogodna u slučajevima kada je potrebno eliminisati veliki broj tačaka u područjima koje karakteriše manja promena krivosti [94].

4.2.1.8 Metoda promene tangentnosti

Redukcija metodom promene tangentnosti je zasnovana na parametru koji se naziva *ugao-filtera*, a koji se definiše kao tolerancija promene tangentnosti. Izračunavaju se interpolirane spline krive kroz tačke svake skenirane krive, a zatim se analizira diskontinuitet tangentnosti n -te tačke T_n , u odnosu na tačku za poređenje T_c . Ukoliko je diskontinuitet manji od specificiranog ugla-filtera, tačke T_n i T_c se smatraju poravnatim, dok se u suprotnom tačke u nizu između T_{c+1} i T_{n-2} brišu, a T_n se postavlja za novu tačku za poređenje T_c [94].

4.2.2 Metode za redukciju podataka-tačaka kod poligonalnih i mrežnih modela

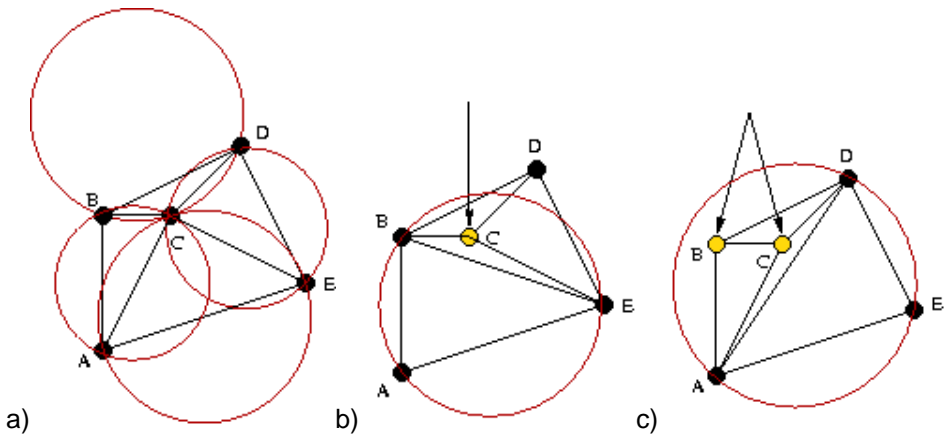
Redukcija podataka-tačaka kod poligonalne metodologije reverzibilnog inženjerskog dizajna je zasnovana na redukovanju broja poligona u okviru poligonalnog 3D modela. Do sada je razvijen veći broj metoda za redukciju broja poligona od kojih je većina, manje-više, zasnovana na istom principu koji se u najkraćem može opisati na sledeći način: *ravniji delovi površina opisuju se većim poligonima, dok je za opis površina sa većom krivošću neophodan veći broj manjih poligona* [20,53]. Redukcija podataka-tačaka se u ovoj oblasti može podeliti u dve kategorije [53,98]:

- 1) metode poligonalne triangulacije i

2) metode *nivoa-detajla* (engl. *Level-of-Detail - LOD*).

4.2.2.1 Metode poligonalne triangulacije

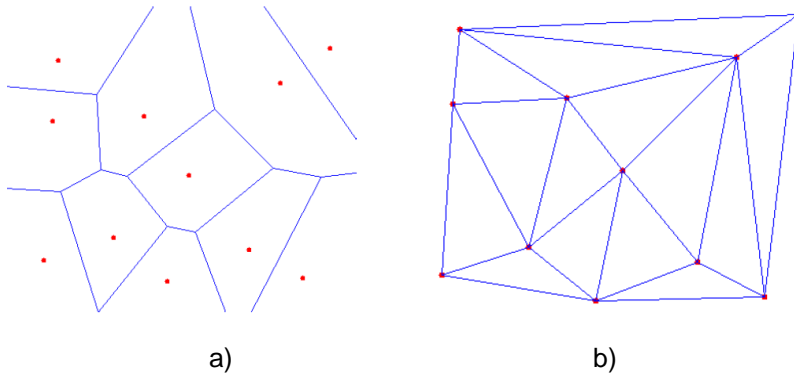
Kod poligonalne triangulacije redukovanje podataka podrazumeva smanjenje broja trouglova u zavisnosti od složenosti površine objekta. Ovde pre svega treba spomenuti *Delunijevu triangulaciju* (engl. *Delaunay*) koja je, u svojoj izvornoj interpretaciji, bazirana na konstruisanju kružnice kroz tri proizvoljne tačke i eliminaciji svih tačaka koje se nadju unutar te kružnice (slika 4.14). Drugim rečima rezultat ove metode je skup tačaka koje karakterišu „prazne“ kružnice opisane kroz bilo koje tri tačke (slika 4.14) [59,84].



Slika 4.14: Delunijeva triangulacija (a) i triangulacije koje nisu po Deluniju (b i c)

Delunijeva triangulacija za dati skup podataka-tačaka je dualna odgovarajućem Voronijevom dijagramu, kao što je prikazano na slici 4.15. U Voronijevom dijagramu, svaki region se sastoji od dela ravni koji je najbliži tom čvoru. Povezivanjem čvorova Voronijevih ćelija, koje imaju zajedničke granice, formira se Delunijeva trougaona struktura [9].

Delunijevu triangulaciju karakteriše retka pojava trouglova sa oštrim uglovima [84]. Ova metoda je vrlo popularna i široko primenjivana, tako da danas egzistira veći broj njenih varijacija.



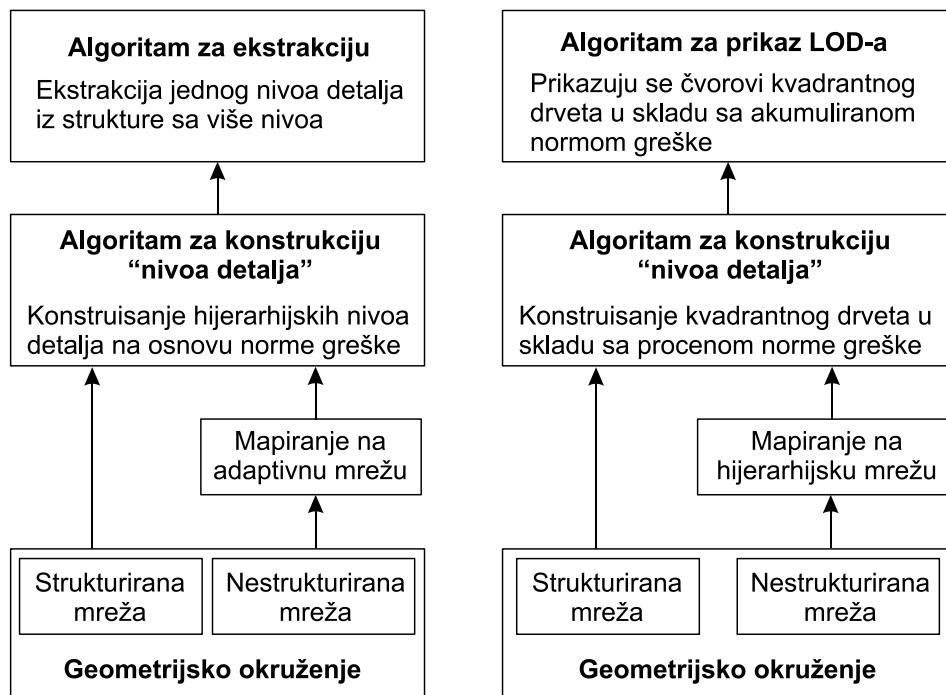
Slika 4.15: Voronoijev dijagram (a) i Delunijeva triangulacija (b) [9]

4.2.2.2 Metoda "nivoi-detalja"

Metoda *nivoa-detalja* je još jedan prilaz redukcije podataka-tačaka putem smanjenja broja poligona. LOD prilaz je baziran na višeslojnom modelu, koji se konstruiše unapred, odnosno *a priori*. Time se omogućava pristup svakom sloju detalja u realnom vremenu, u skladu sa zahtevima primene. Pored toga, moguće je postići i tranziciju između slojeva u realnom vremenu, a višeslojna konstrukcija zadovoljava uslov da geometrijsko i topološko ponašanje bude očuvano. Zahvaljujući tome, kritični detalji su očuvani čak i u slučaju nižih nivoa rezolucije. Iz navedenih razloga višeslojna struktura, koja predstavlja objekat na drugom nivou apstrakcije, se pokazala superiornom u odnosu na konvencionalne modele za druge CAD/CAM aplikacije kao što su digitalno kopiranje ili detekcija kolizije [86,98].

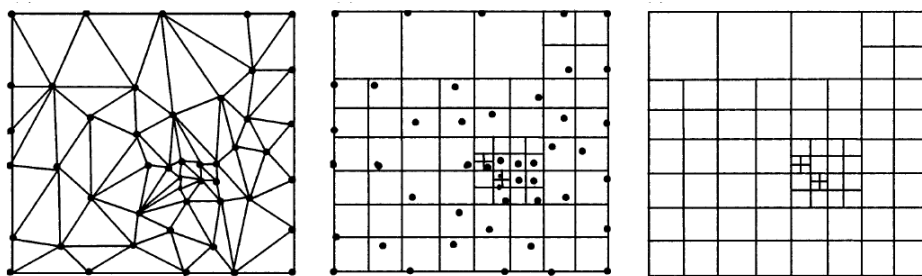
LOD metoda, šematski prikazana na slici 4.16, sastoji se iz dve osnovne faze [86,98]:

- 1) konstrukcija hijerarhijske LOD strukture i
- 2) ekstrakcija jednog nivoa detalja i sprovođenje redukcije.



Slika 4.16: Šematski prikaz LOD metode [86,98]

LOD tehnika se primenjuje za diskretan prikaz sa najvećom primenom kod mrežnih predstavljanja. LOD prikaz može biti sastavljen od *strukturiranih* ili *nestrukturiranih* mreža. Jednostavan prikaz hijerarhijskih mreža, kao što je kvadrantno drvo, vodi ka brzom konstrukciji i jednostavnijoj manipulaciji 3D modelom. Sa druge strane, nestrukturirane mreže mogu da aproksimiraju originalni geometrijski model sa manjom greškom, uz korišćenje istog broja elemenata kao hijerarhijske mreže. Kako su nestrukturirane mreže komplikovanije za implementaciju primenom LOD tehnike, najveći deo istraživanja vezanih za LOD tehniku usmeren je na strukturirane mreže [86,98]. Primer mapiranja nestrukturirane mreže u strukturiranu, prikazan je na slici 4.17.



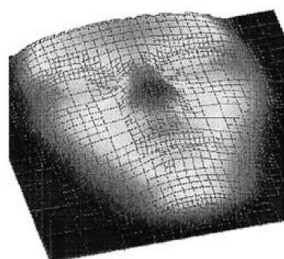
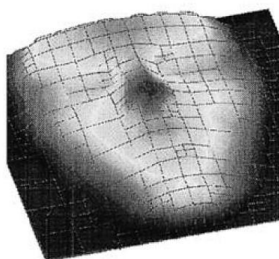
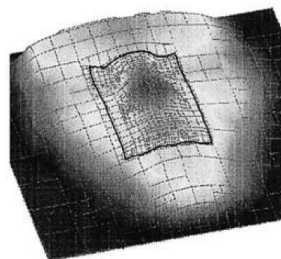
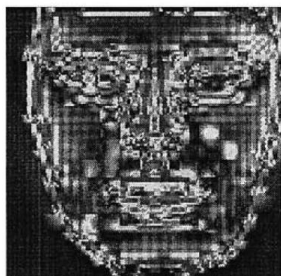
a) Nestrukturirana mreža

b) Mapiranje

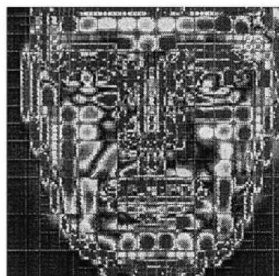
c) Strukturirana mreža

Slika 4.17: Mapiranje nestrukturiranih mreža [98]

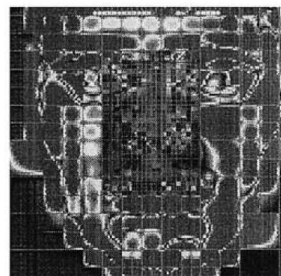
Prednost predstavljanja 3D modela u LOD formi je u tome što se manipulacija može primeniti direktno i efikasno na adekvatnom nivou – sloju (slika 4.18). U skladu sa tim, hijerarhijski LOD za mreže omogućava interaktivnu rekonstrukciju i modeliranje [86,98].

visok nivo
(1135 elemenata)nizak nivo
(382 elementa)kombinovani nivo
(988 elemenata)

Greška - visok nivo



Greška - nizak nivo



Greška - kombinovani nivo

Slika 4.18: LOD struktura sa korespondentnim mapama grešaka [98]

4.2.3 Redukcija podataka-tačaka primenom rešetki

Kod redukcije primenom rešetki, tačke u rezultatu 3D digitalizacije se redukuju deljenjem (svrstavanjem) u rešetke (engl. *grid*), a zatim se vrši semplovanje tj. izbor reprezentativnih tačaka iz svake od ćelija rešetke [19,20]. Razlikuju se dve grupe metoda za redukovanje podataka-tačaka preko rešetki:

- 1) sa *uniformnim* rešetkama i
- 2) *neuniformnim* rešetkama.

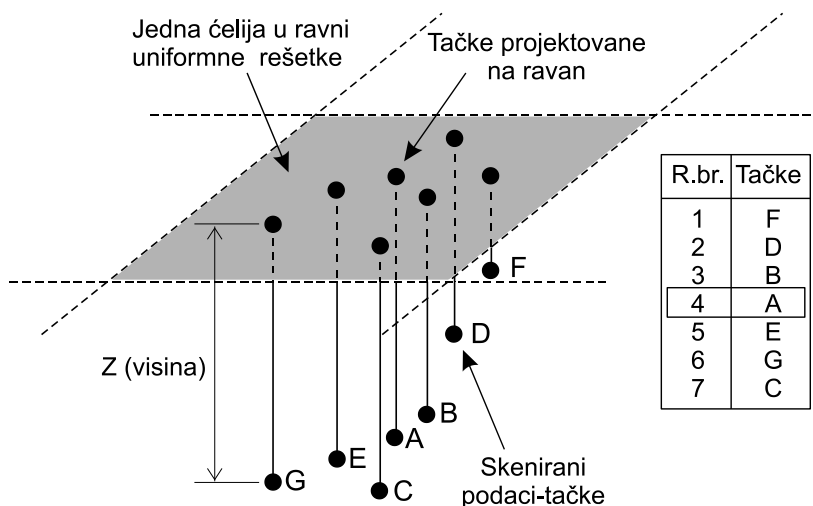
4.2.3.1 Metode sa *uniformnim* rešetkama

Kod ove grupe metoda karakteristična je primena rešetkaste ravni sa uniformnom podelom i to upravno na pravac skeniranja. Martin i ostali su u [99] primenili metodu sa uniformnom rešetkom kod koje se preko niza rešetki upravnih na pravac skeniranja (z-osa) vrši ekstrakcija podataka iz oblaka tačaka. S obzirom na to da su, kod optičke triangulacije, vrednosti z-koordinata podložnije greškama, jer se determinišu procesuiranjem zraka očitano na CCD senzoru, filter na bazi medijane se primenjuje sa rešetkom. Nivo redukcije podataka se određuje veličinom ćelija rešetke, odnosno njenom gustinom, pri čemu manja dimenzija ćelija implicira niži nivo redukcije, odnosno više semplovanih podataka-tačaka iz oblaka tačaka.

Procedura se sastoji u projektovanju tačaka na rešetkastu ravan i pridruživanju pripadajućih tačaka svakoj ćeliji rešetke. Zatim se iz svake ćelije izabere jedna tačka, na bazi pravila filtera zasnovanog na medijani: *tačke u okviru svake ćelije se sortiraju prema rastojanju od rešetkaste ravni i tačka locirana u sredini biva izabrana* (slika 4.19). Za n tačaka u okviru rešetke, selektuje se $(n+1)/2$ –ta tačka ako je n neparan broj, odnosno $n/2$ –ta ili $(n+2)/2$ –ta tačka ako je n paran broj [19].

Zahvaljujući integraciji filtera na bazi medijane, metoda uniformnih rešetki se pokazala vrlo efikasnom kod eliminacije tačaka koje predstavljaju greške merenja. Takođe, dobra strana ove metode je očuvanje originalnosti podataka, jer se kod nje radi o izboru tačaka, a ne o promeni pozicije. Uniformna metoda je posebno korisna u slučajevima kada se zahteva brza redukcija podataka kod objekata sa relativno

jednostavnim površinama i daje bolje rezultate ako je skenirana površina upravna na pravac skeniranja. Loša strana primene uniformnih rešetki se ogleda u mogućnosti da se neki bitni elementi objekta, kao što su na primer ivice, mogu izgubiti, jer nije obezbeđena analiza oblika objekta [19,20].



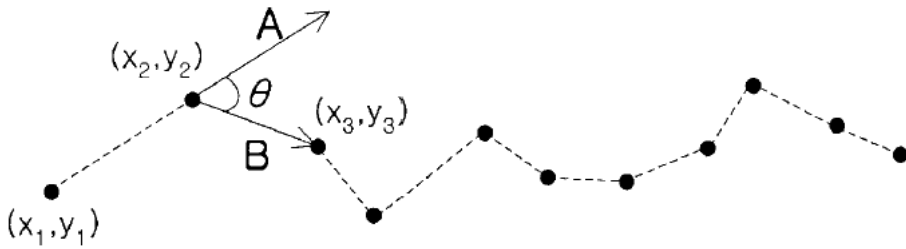
Slika 4.19: Princip metode sa uniformnim rešetkama [19]

4.2.3.2 Metode sa neuniformnim rešetkama

U metodama zasnovanim na neuniformnim rešetkama karakteristična je promenljivost veličine ćelija rešetki, koja je u direktnoj zavisnosti od nivoa složenosti površine objekta. Lee i ostali su u [19] predstavili dve vrste neuniformnih rešetki, koje se razlikuju u mogućnosti promene veličine mreža po jednom ili oba pravca, a koje se primenjuju u zavisnosti od karakteristika podataka dobijenih merenjem:

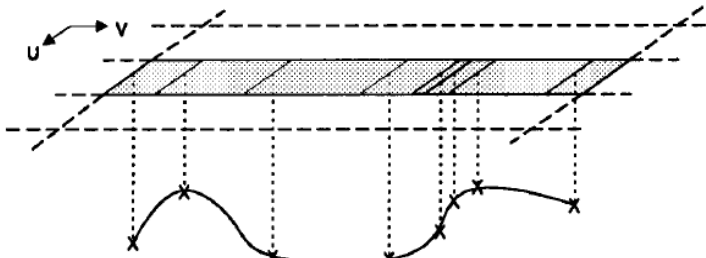
1) Ne-uniformne rešetke u jednom pravcu

U slučaju ove metode tačke se sempluju iz oblaka tačaka primenom metode ugao devijacije (slika 4.20), koja podrazumeva da se tačke selektuju na osnovu ugla θ koji se izračunava pomoću vektora kreiranih preko tri uzastopne tačke. Ovaj ugao nosi informaciju o nivou krivosti - manji ugao implicira manju krivost i obrnuto.

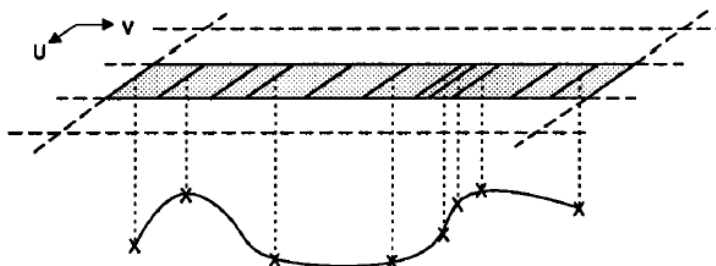


Slika 4.20: Metoda ugaone devijacije kod neuniformnih rešetki u jednom pravcu [19]

Dimenzija rešetke po u -osi je fiksna i određena rezolucijom skeniranja (rastojanje između presečnih sekcija, odnosno skeniranih krivih), dok je po v -osi promenljiva i određena geometrijom, odnosno krivošću površine objekta. Semploju se tačke u delovima sa velikom krivošću, odnosno u područjima složenije geometrije, čime se obezbeđuje kvalitetnija rekonstrukcija površina. U skladu sa tim, nakon ekstrakcije tačaka metodom ugaone devijacije, deli se rešetka po v -pravcu na bazi selektovanih tačaka (slika 4.21). Tokom procesa deljenja rešetke, u slučaju da je ćelija rešetke veća od maksimalne dimenzije, primenjuje se filter na bazi medijane za tačke svake ćelije. Ovo rezultira izborom reprezentativne tačke za svaku ćeliju, kao i u slučaju metoda sa uniformnom rešetkom. Konačno izabrane tačke ovom metodom, obuhvataju tačke selektovane primenom filtera na bazi medijane za svaku ćeliju rešetke, kao i tačke semplovane na bazi ugaone devijacije (slika 4.22). Ova metoda redukuje podatke-tačke efikasnije i preciznije, uz bolje očuvanje oblika objekta, u odnosu na uniformnu metodu [19].



Slika 4.21: Formiranje neuniformne rešetke u jednom pravcu po v -osi [19]



Slika 4.22: Generisanje neuniformne rešetke u jednom pravcu [19]

2) Neuniformne rešetke u oba pravca

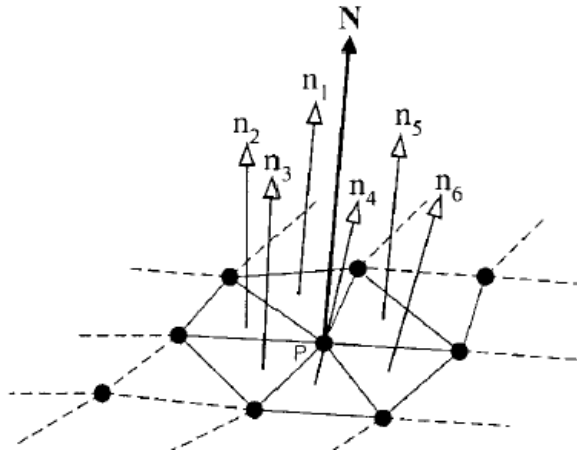
Metoda neuniformne rešetke u oba pravca omogućava redukciju podataka-tačaka na osnovu prethodno generisanih vektora-normala u pojedinačnim tačkama. Najpre se vrši trougaona poligonizacija, a zatim se generišu vektori-normala u tačkama preko vektora-normala susednih trouglova. Za primer dat na slici 4.23, tačka P ima šest susednih trouglova i vrednost normale N se može izračunati preko sledeće relacije:

$$N = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6}{|n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6|} \quad (4.25)$$

Izračunavanjem vektora-normala za sve tačke, generiše se ravan rešetke. Dimenzije rešetke određuje korisnik, u zavisnosti od nameravanog nivoa redukovanja podataka za dati oblik površine objekta. Ukoliko je potrebna značajnija redukcija, veličina rešetke se povećava i obrnuto. Projektovanjem tačaka na ravan rešetke, tačke koje odgovaraju svakoj ćeliji se grupišu i određuje se prosečna vrednost na bazi vrednosti normala tih tačaka.

Kao kriterijum za pod-deljenje ćelija rešetke, primenjuje se standardna devijacija od vrednosti normala u tačkama. Nivo standardne devijacije se određuje uzimajući u obzir oblik dela i željeni nivo redukcije. Ukoliko je, na primer, standardna devijacija u ćeliji velika, to je znak da je geometrija površine objekta koja odgovara tom delu rešetke složena i da

je potrebno dalje deljenje ćelije u cilju semplovanja više tačaka. Ovakav proces deljenja mreže je poznat pod nazivom *kvadrantno drvo* (eng. *quadtree*), koje se široko primenjivalo u obradi slika i kompjuterskoj grafici tokom '70-tih godina prošlog veka (slika 4.24) [19].

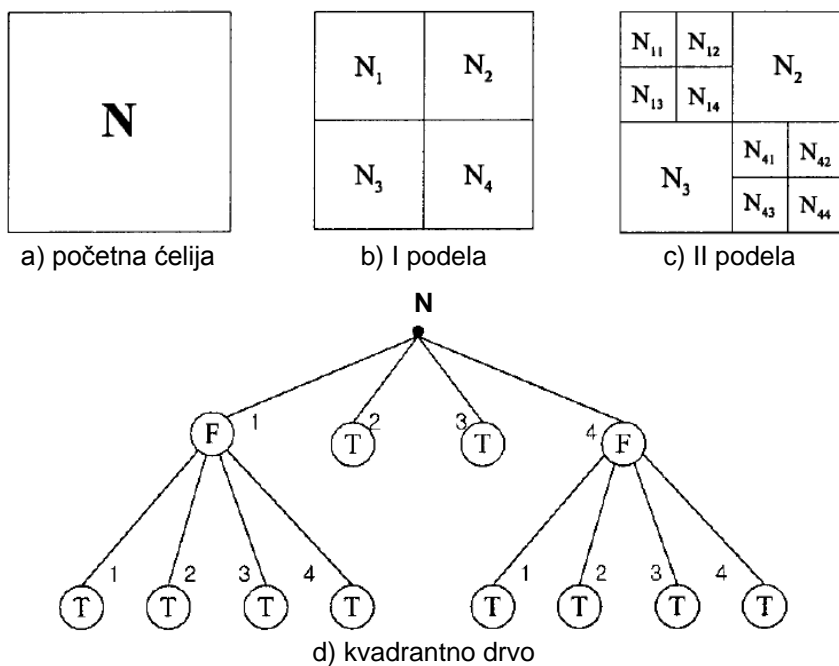


Slika 4.23: Izračunavanje vrednosti normale kod metode neuniformne rešetke u oba pravca [18]

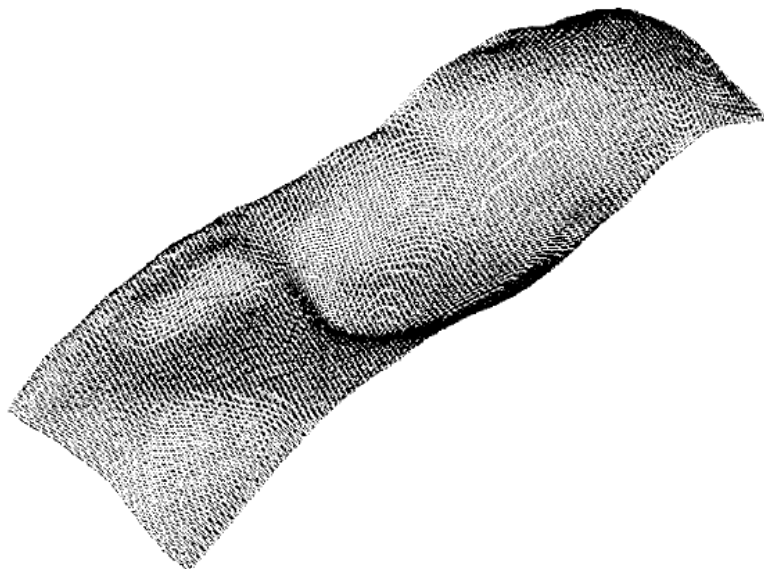
Ukoliko je standardna devijacija mreže veća od zadate vrednosti, ćelija se deli na četiri dela. Ovakav proces se nastavlja sve dok standardna devijacija mreže ne bude manja od zadate vrednosti ili rešetka dostigne granični, zadati minimum. Minimalna dimenzija rešetke zavisi od kompleksnosti oblika dela.

Nakon završetka formiranja rešetke, selektuje se reprezentativna tačka skupa tačaka koje pripadaju svakoj pojedinačnoj ćeliji i to primenom filtera na bazi medijane. Ova vrsta rešetki omogućava, u poređenju sa prethodnom, ekstrakciju većeg broja tačaka i samim tim bolje opisuje oblik površine dela [18-20].

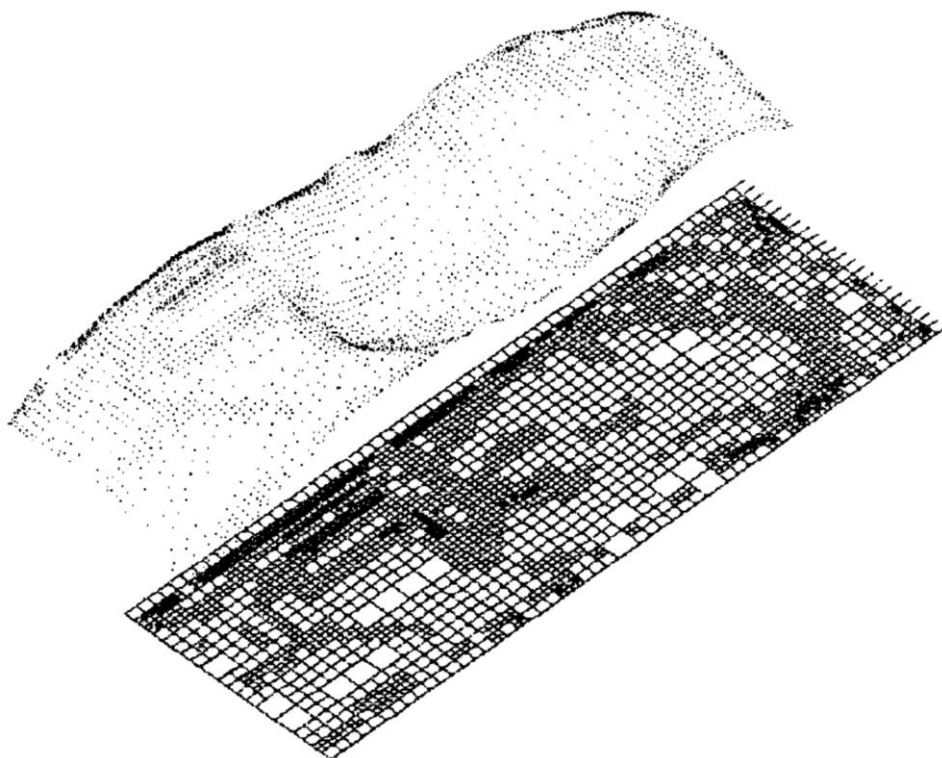
Na slikama 4.25 i 4.26 prikazan je primer redukcije rezultata 3D digitalizacije, neuniformnom rešetkom u oba pravca.



Slika 4.24: Deljenje metodom kvadrantnog drveta [19]



Slika 4.25: Redukcija oblaka tačaka metodom neuniformne rešetke u oba pravca - polazni oblak tačaka [19]



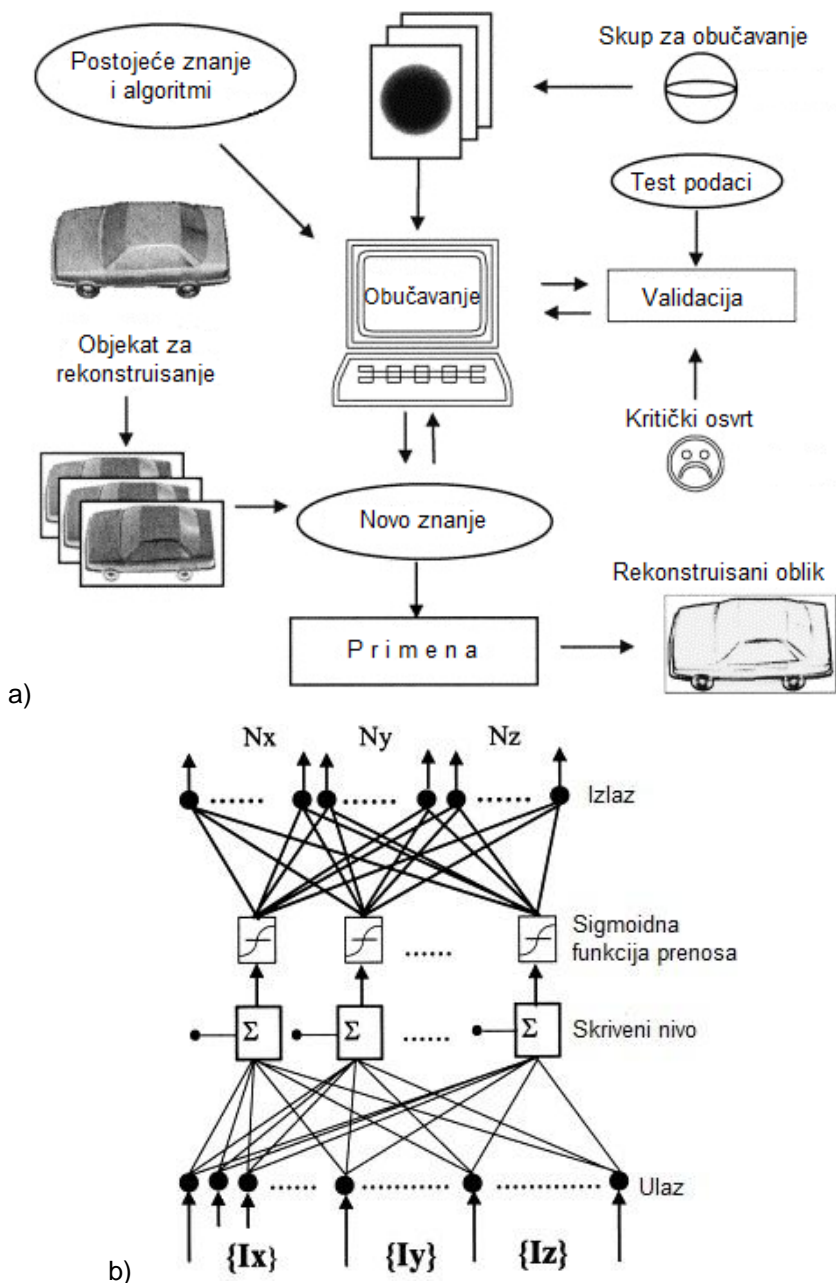
Slika 4.26: Redukcija oblaka tačkaka metodom ne-uniformne rešetke u oba pravca - rezultujući oblak tačkaka sa primenjenom rešetkom [19]

5. METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U PRE-PROCESIRANJU REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE

Kao što je to slučaj u drugim inženjerskim oblastima i u oblasti reverzibilnog inženjerskog dizajna su prisutni pokušaji implementacije metoda veštačke inteligencije, poput *veštačkih neuronskih mreža*, *genetskih algoritama* i *fazi logike*. Metode veštačke inteligencije su, do sada, implementirane u različitim fazama procesa RE, pri čemu je ipak najčešća njihova primena u fazi pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije, a posebno u procesu redukcije podataka-tačaka, što je i logično imajući u vidu kompleksnost ovog procesa.

5.1 Primena veštačkih neuronskih mreža i genetskih algoritama u pre-procesiranju rezultata 3D digitalizacije

Jedan od prvih pokušaja primene veštačkih neuronskih mreža u oblasti pre-procesiranja rezultata 3D digitalizacije je sistem koji su u [39] predstavili Peng i Loftus. Ovaj sistem za reverzibilni inženjerski dizajn je zasnovan na obradi fotografija primenom veštačkih neuronskih mreža (slika 5.1a). Procedura uključuje, takozvano obučavanje veštačke neuronske mreže na poznatim oblicima u cilju stvaranja baze znanja na osnovu koje sistem prepoznaje nove oblike. Primenjen je algoritam za obučavanje neuronske mreže na bazi povratnog širenja, zasnovan na Levenberg-Marquartovoj (engl. *Levenberg–Marquardt*) aproksimaciji Njutnove metode (slika 5.1b).



Slika 5.1 Sistem za reverzibilni inženjerski dizajn zasnovan na obradi fotografija primenom veštačkih neuronskih mreža [39]

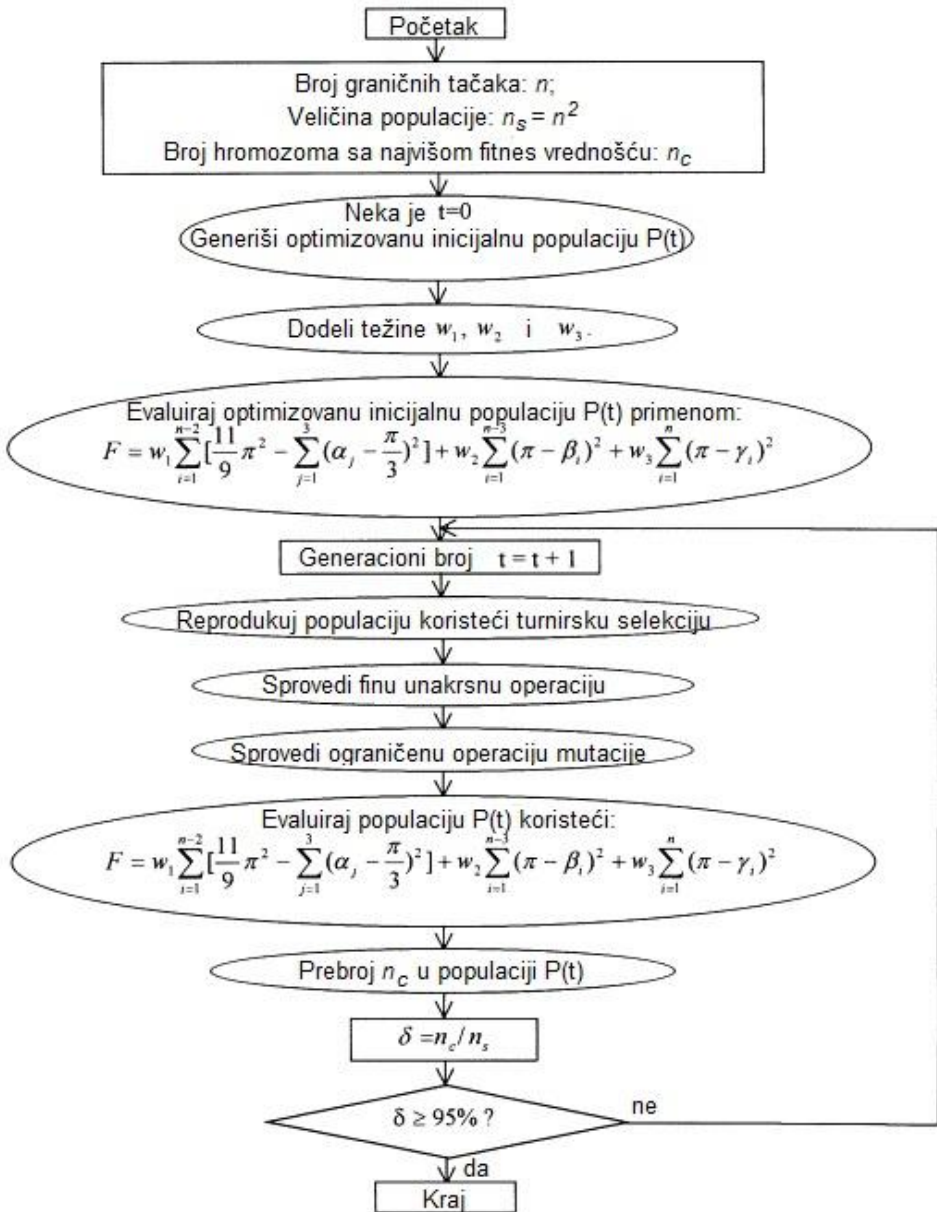
Ubrzo nakon prethodnog pokušaja, Jun i ostali su [100] razvili sistem u kojem su veštačke neuronske mreže primenjene za prepoznavanje obeležja (engl. *feature recognition*) kod prizmatičnih delova.

Kad je reč o primeni genetskih algoritama u oblasti pre-procesiranja oblaka tačaka, treba spomenuti pokušaj prezentovan u [101], u kojem su autori Chen i Wang primenili genetski algoritam za optimizaciju re-triangulacije rezultata 3D digitalizacije (slika 5.2). Radi se o metodi za redukovanje podataka-tačaka, dobijenih laserskim skeniranjem, koja generiše optimizovanu STL datoteku. Redukovanje se vrši smanjivanjem broja trouglova u STL modelu preko vektora-normala trouglova. Nakon uklanjanja trouglova, re-triangulacija se sprovodi kao i u drugim metodama za redukovanje.

Od ostalih pokušaja vredni pomena su pokušaji opisani u [26] i [102]. U prvom slučaju su autori Percoco i Spina predstavili primenu genetskih algoritama u procesu redukovanja podataka kod poligonalnih modela. Drugi slučaj predstavlja prilaz zasnovan na primeni genetskih algoritama u cilju simplifikacije mešovanih modela.

5.2 Primena fazi logike u pre-procesiranju rezultata 3D digitalizacije

Fazi logika je iskorišćena u okviru više različitih pristupa za pre-procesiranje podataka-tačaka. Jedan od najranijih primera iz ove oblasti je prilaz koji su razvili Philippe J.M. i drugi [103], a koji je zasnovan na primeni fazi logike za predeterminisanje topologije površine na bazi oblaka tačaka. Primena ovog prilaza omogućava predefinisane glavne regiona površine, sa ciljem deljenja oblaka tačaka u posebne celine koje korespondiraju tim regionima. Takođe, ovaj prilaz omogućava lokalnu optimizaciju površine na osnovu zadatih uslova tangentnosti i krivosti. Ipak, kao glavna prednost ovog prilaza ističe se to da je, za zadati nivo tačnosti, kompleksnost površine niža u odnosu na onu koja se dobija primenom tradicionalne metode, uz napomenu da je matematički model relativno sličan tradicionalnim algoritmima za modeliranje površina.



Slika 5.2. Dijagram toka genetskog algoritma u postupku re-triangulacije [101]

Chang M. i Lin P. P. su u [104] predstavili sistem i metodologiju za on-line merenje kompleksnih površina primenom skenirajućeg kontaktnog senzora instaliranog na CNC mašini. Da bi se unapredili stabilnost merenja i kontinualnost, umesto klasičnog PID upravljanja, implementirano je upravljanje na bazi fazi logike. Glavna prednost ovako koncipiranog sistema je u tome što broj izmerenih tačaka varira u skladu sa promenom krivosti površine. Sistem je sposoban za kontinualnu detekciju granica na mernom predmetu i omogućava 3D digitalizaciju relativno velikih i kompleksnih površina.

Sledeći primer je metodologija redukcije podataka-tačaka na bazi fazi klasterovanja, koju su razvili Wu J. i drugi [16]. Ova metodologija predstavlja efektanu nadogradnju čisto geometrijskog pristupa za redukciju podataka-tačaka, kroz uvođenje hibridne heuristike. Metodologija uključuje deskripcije fazi imperativnih atributa i fazi geometrijskih atributa uzoraka, a njena primena rezultuje koncentrisanjem podataka-tačaka u regionima sa višim nivoom krivosti i u ivičnim zonama površina. Na taj način ova metodologija omogućava prilično dobro očuvanje geometrijskih detalja, što može biti od značaja u fazi mašinske obrade delova. Metoda se primenjuje direktno na oblaku tačaka ne zahtevajući nikakve među korake u smislu generisanja površinskih modela.

U [3] je predstavljen sistem za pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije, u okviru kojeg je primenjena fazi logika za unapređenje procesa redukcije podataka-tačaka. Ovaj pristup je detaljnije prikazan u sledećem potpoglavlju.

5.3 Sistem za redukciju podataka-tačaka zasnovan na fazi logici

U ovom potpoglavlju je detaljnije predstavljen deo sistema za preprocesiranje podataka-tačaka pod nazivom *SiPreF* [3], odnosno njegov modul za redukciju podataka-tačaka razvijen na bazi implementacije fazi logike u metode za redukciju semplovanjem.

SiPreF je koncipiran na modularnom principu (slika 5.3), a čine ga:

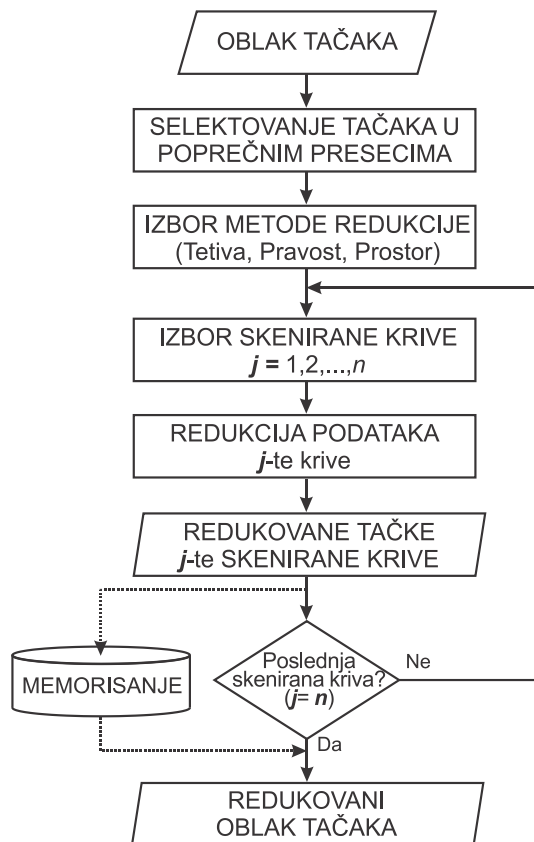
- 1) Modul za 3D filtriranje tačaka (grešaka);

- 2) Modul za ekstrakciju podataka-tačaka po presečnim sekcijama;
- 3) Modul za filtriranje i uravnavanje podataka-tačaka u presečnim sekcijama;
- 4) Modul za redukovanje podataka-tačaka na bazi fazi logike;
- 5) Modul za generisanje izlaznog formata.



Slika 5.3: Modularna struktura SiPreF sistema [3,9]

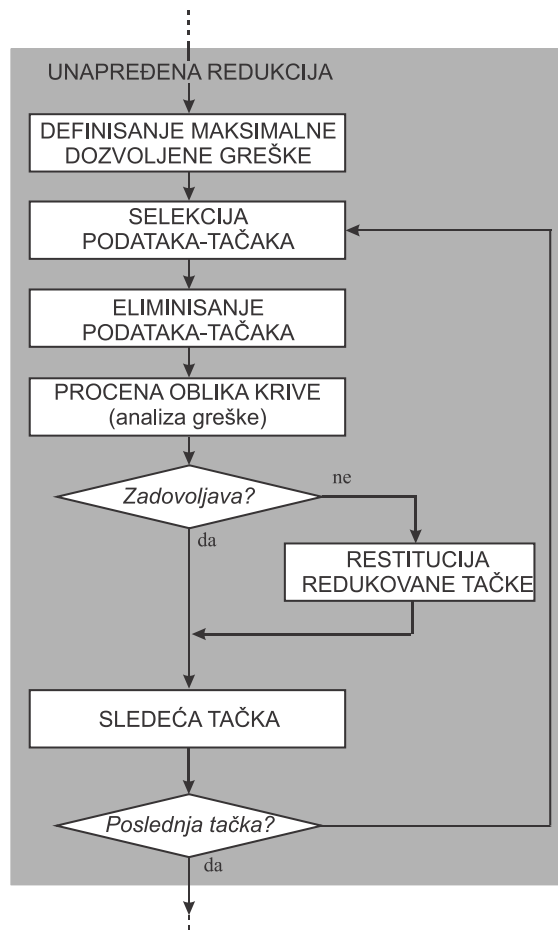
Modul za redukovanje podataka-tačaka na bazi fazi logike predstavlja najsofisticiraniji deo SiPreF sistema. Dijagram toka procesa ovog modula prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4: Dijagram toka procesa modula za redukovanje podataka-tačaka [3,9]

U modul su integrisane tri metode za redukciju podataka-tačaka (metoda visine tetive, metoda pravosti i prostorna metoda) koje su predstavljene u prethodnom poglavlju. Pomenute metode su unapređene implementacijom fazi logike u procedure za odlučivanje o redukciji podataka-tačaka. U cilju prevazilaženja problema u vezi sa specifičnošću ulaznih parametara koje zadaje korisnik (čime se doprinosi pojednostavljenju njihove primene), a na bazi kojih metode realizuju proces zaključivanja i donošenja odluka, uveden je novi,

sintetički, parametar nazvan *koeficijent redukcije (KR)*, kao i njegova maksimalno dozvoljena vrednost – *maksimalno dozvoljeni koeficijent redukcije (MDKR)*. Parametar *KR* je kod svake od triju metoda izveden na bazi parametara karakterističnih za dotičnu metodu, kao i dodatnog ulaznog parametra *maksimalne greške redukcije (MGR)*, odnosno njegovog maksimalno dozvoljenog nivoa *MDGR*, uvedenog sa ciljem kontrole maksimalne greške koja se može javiti nakon redukcije.



Slika 5.5: Procedura za analizu MDGR [3,66]

U nastavku je predstavljen prilaz na primeru metode pravosti [3].

Metoda pravosti za redukovanje tačaka je bazirana na dva parametra: Φ i Ψ . Navedeni parametri su, uz parametar *MGR*, iskorišćeni i kao ulazne veličine kod implementacije fazi logike u proces zaključivanja ove metode, s tim što je umesto pojedinačnih parametara Φ i Ψ korišćen zbir ova dva parametra. Ovakav pristup je ovde omogućen činjenicom da je za oba parametra referentna vrednost sa kojom se porede identična – *definisani nivo pravosti (DNP)*. To omogućava da se jednostavnim definisanjem graničnih uslova na ulazu u fazi modul $\Phi \leq DNP$ i $\Psi \leq DNP$, u fazi pravilima primeni zbir $(\Phi + \Psi)$ kao jedan parametar, koji je radi jednostavnijeg opisa u daljem tekstu zamenjen oznakom Ω .

Procedura fazi redukcije, u ovom slučaju, se sastoji u sledećem (slika 5.6):

- zadaje se *MDGR*, na bazi kojeg se automatski izračunava *MDKR*;
- selektuje se set tačaka za izračunavanje parametara (niz od četiri uzastopne tačke);
- izračunavaju se parametri Φ i Ψ , odnosno zbir $\Omega = \Phi + \Psi$;
- vrši se preliminarna redukcija druge tačke u selektovanom nizu u cilju izračunavanja parametra *MGR*;
- na bazi izračunatih parametara i definisanih fazi pravila izračunava se *KR*;
- poređenjem izračunate vrednosti *KR* sa zadatom vrednosti *MDKR* donosi se odluka o konačnoj redukciji, odnosno zadržavanju tačke;
- u slučaju da je sprovedena redukcija druge tačke u nizu, novi set tačaka za analizu čine 1., 3. i 4. tačka iz prethodnog seta i sledeća tačka u skeniranom nizu, dok u slučaju ne sprovođenja redukcije novi set tačaka čine 2., 3. i 4. tačka iz prethodnog seta i sledeća tačka u skeniranom nizu;
- nakon izbora poslednje tačke u skeniranom nizu i sprovođenja procedure redukcije u prvom prolazu, vrši se „promena smer“ selektovanja seta tačaka, odnosno poslednja tačka skeniranog

niza u prethodnom prolazu, postaje prva tačka u sledećem, čime je obezbeđen ravnomerniji proces redukcije;

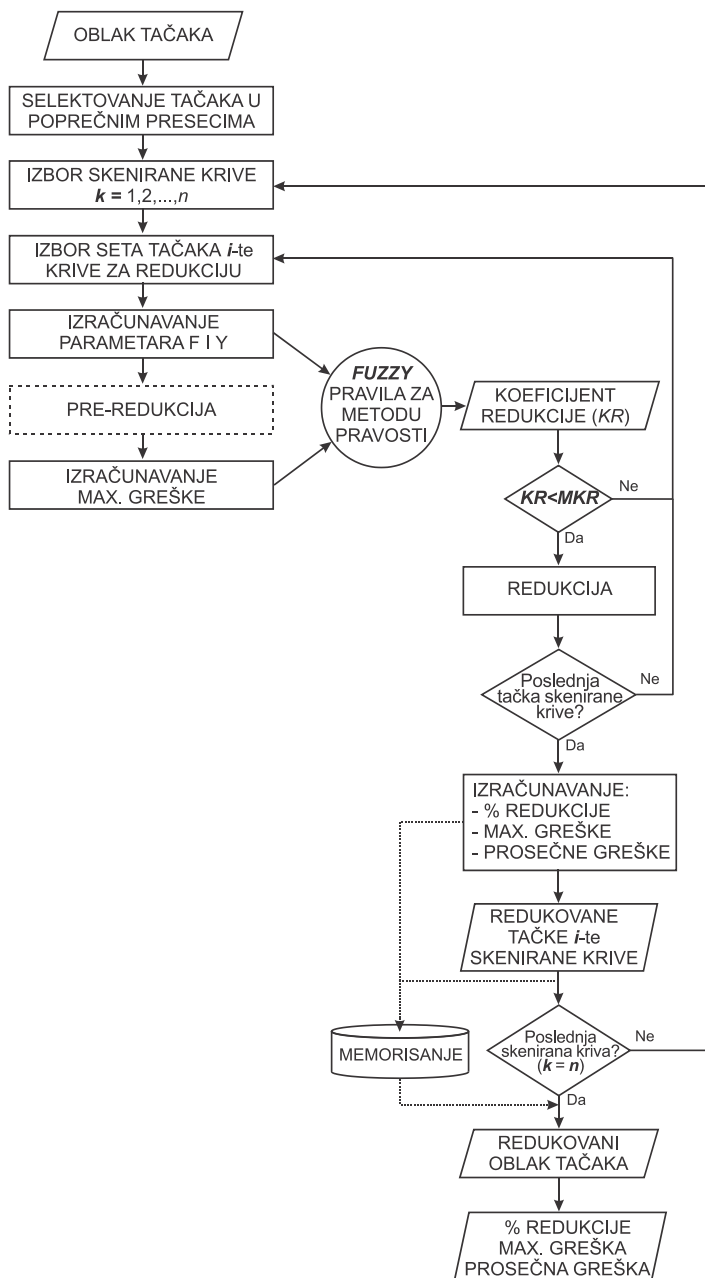
- proces se sprovodi/ponavlja na (redukovanom) skeniranom nizu tačaka dokle god se bar jedna tačka u jednom prolazu redukuje.

Struktura fazi logičkog sistema, sa osnovne tri celine – ulaz, baza znanja i izlaz, je prikazana na slici 5.7. Ulaz čine dve promenljive stanja – Ω i MGR , čije realne vrednosti su procesom fazifikacije transformisane u fazi skupove sa odgovarajućim oblastima razmatranja, pri čemu su fazi skupovi ulaznih veličina definisani odgovarajućim funkcijama pripadnosti. Kod ulazne promenljive Ω je, u skladu sa prethodno opisanim karakterom promenljivih Φ i Ψ i praktičnih iskustava u vezi sa njihovim vrednostima, definisana oblast razmatranja od 0° do $2 \cdot 90^\circ$ odnosno 0° do 180° . Segmentacija oblasti razmatranja ulazne promenljive Ω je izvršena na tri fazi skupa sa pripadajućim lingvističkim pojmovima u skladu sa vrednošću ugla: *oštar*, *prav* i *tup* (slika 5.8a).

Oblast razmatranja druge ulazne promenljive stanja MGR definisana je u skladu sa iskustvom iz prakse (realnim aspektima primene) i segmentirana (slika 5.8a) na tri fazi skupa (*neznatna*, *srednja* i *značajna*), a na bazi vrednosti parametra $MDGR = 0,05$ [mm].

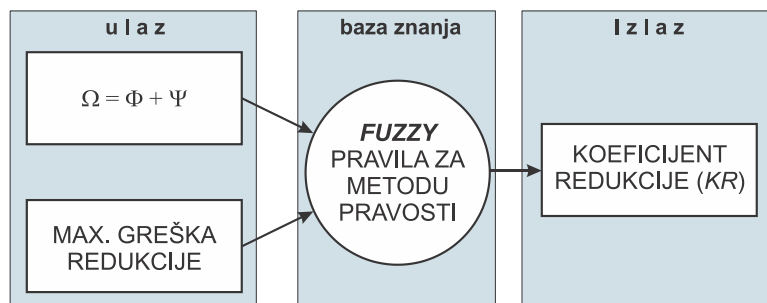
Izlaz iz ovog fazi logičkog sistema je promenljiva KR (bezdimezionna veličina) za koju je definisan, u cilju jednostavnije primene, izlazni prostor razmatranja od 0 do 100 (slika 5.8c) u okviru kojeg se mora kretati i parametar $MDKR$. Radi bolje kontrole vrednosti izlazne promenljive KR , segmentacija oblasti razmatranja je izvršena u finijoj rezoluciji, na devet fazi skupova sa odgovarajućim lingvističkim pojmovima - *minoran*, *jako-nizak*, *nizak*, *srednje-nizak*, *srednji*, *srednje-visok*, *visok*, *jako visok* i *ogroman*). Bazu znanja čini ukupno devet upravljačkih fazi pravila navedenih u tabeli 5.1.

5. METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U PRE-PROCESIRANJU
REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



Slika 5.6: Algoritamski prikaz procesa redukcije metodom pravosti na bazi fazi logike [3,13]

Mehanizam fazi (aproksimativnog) zaključivanja je baziran na *Mamdani* metodi, koja za formiranje fazi implikacione funkcije koristi operacije *minimuma*, odnosno *preseka* [106].

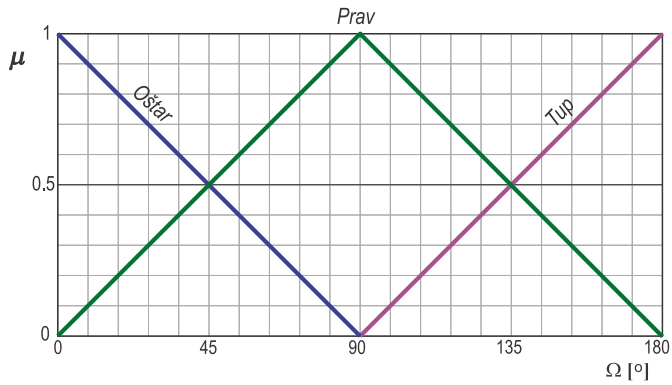


Slika 5.7: Struktura fazi logičkog sistema za redukciju metodom pravosti [3]

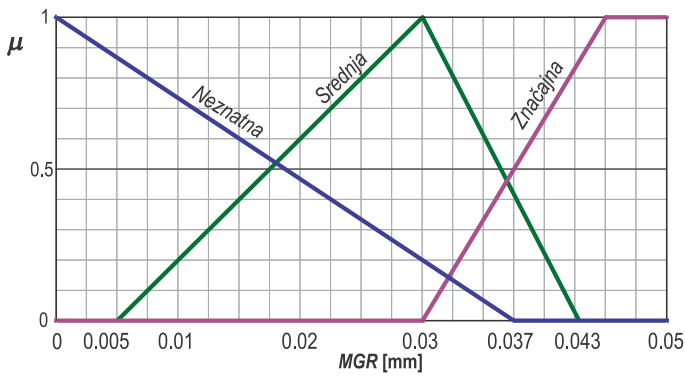
Tabela 5.1: Upravljačka fazi pravila fazi logičkog sistema za redukovanje podataka metodom pravosti [3]

1. If (Ω is <i>Oštar</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Neznatna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Ogroman</i>)
2. If (Ω is <i>Prav</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Neznatna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Jako visok</i>)
3. If (Ω is <i>Tup</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Neznatna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Visok</i>)
4. If (Ω is <i>Oštar</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Srednja</i>) then (<i>KR</i> is <i>Srednje visok</i>)
5. If (Ω is <i>Prav</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Srednja</i>) then (<i>KR</i> is <i>Srednji</i>)
6. If (Ω is <i>Tup</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Srednja</i>) then (<i>KR</i> is <i>Srednje nizak</i>)
7. If (Ω is <i>Oštar</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Značajna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Nizak</i>)
8. If (Ω is <i>Prav</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Značajna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Jako nizak</i>)
9. If (Ω is <i>Tup</i>) and (<i>MGR</i> is <i>Značajna</i>) then (<i>KR</i> is <i>Minoran</i>)

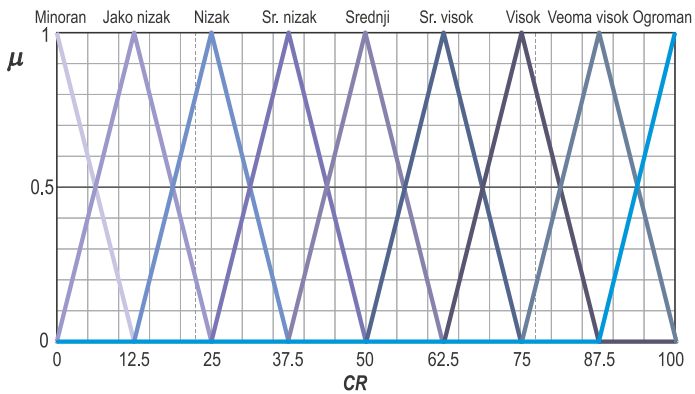
5. METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U PRE-PROCESIRANJU
 REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



a) Funkcija pripadnosti ulazne promenljive stanja Ω



b) Funkcija pripadnosti ulazne promenljive stanja MGR



c) Funkcija pripadnosti izlazne promenljivu KR

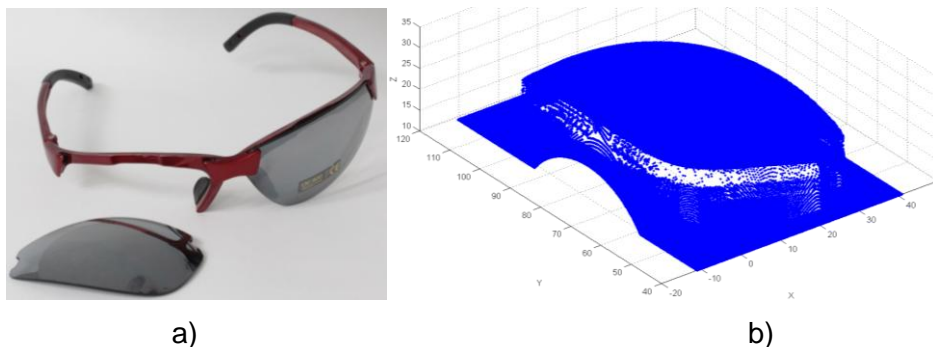
Slika 5.8: Grafički oblici funkcija pripadnosti promenljivih stanja [3,13]

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE

U okviru ovog poglavlja su predstavljeni karakteristični primeri praktične primene alata za preprocesiranje oblaka tačaka, koji su analizirani u prethodnim poglavljima.

6.1 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije stakla sportskih naočara

Staklo sportskih naočara (slika 6.1) ne karakteriše preterano složena geometrija, ali je rezultat 3D digitalizacije (slika 6.2) prilično kompleksan što je uslovljeno složenošću postupka stezanja dela usled njegove prostorne zakrivljenosti. Rezultat 3D digitalizacije, ostvaren kotaktnom metodom na sistemu *Renishaw Cyclon II*, sadrži ukupno 412.111 tačaka od kojih veliki broj predstavljaju tačke-greške koje pripadaju priboru i mernom stolu [3,9].

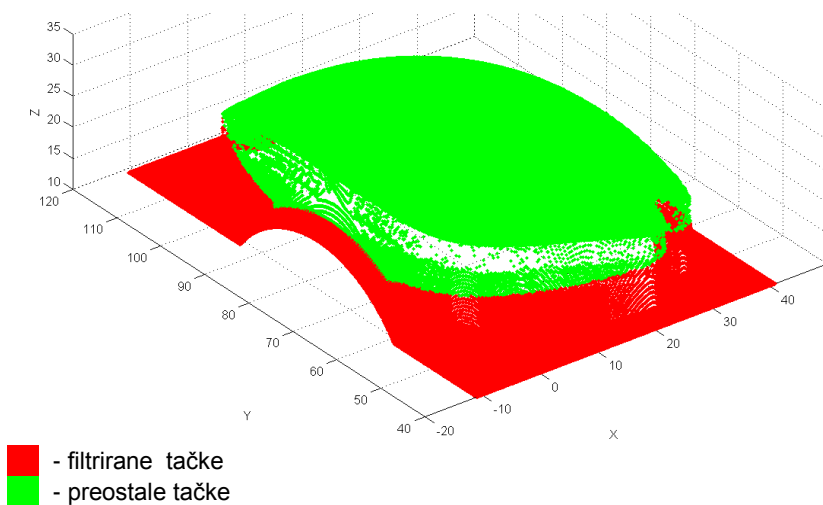


Slika 6.1: Sportske naočare i staklo (a) i rezultat 3D-digitalizacije (b) [3,9,13]

Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije je obuhvatilo: filtriranje i redukciju podataka-tačaka. Filtriranje je uključilo primenu metoda zapreminskog filtriranja, filtriranje segmentiranom linijom i brisanje pojedinačnih tačaka. Primenjeni parametri za realizaciju zapreminskog filtriranja su navedeni u tabeli 6.1, a rezultat je 175.315 filtriranih tačaka, odnosno 236.796 preostalih tačaka. Grafički prikaz rezultata je dat na slici 6.2 [3,9].

Tabela 6.1: Parametri zapreminskog filtera [3]

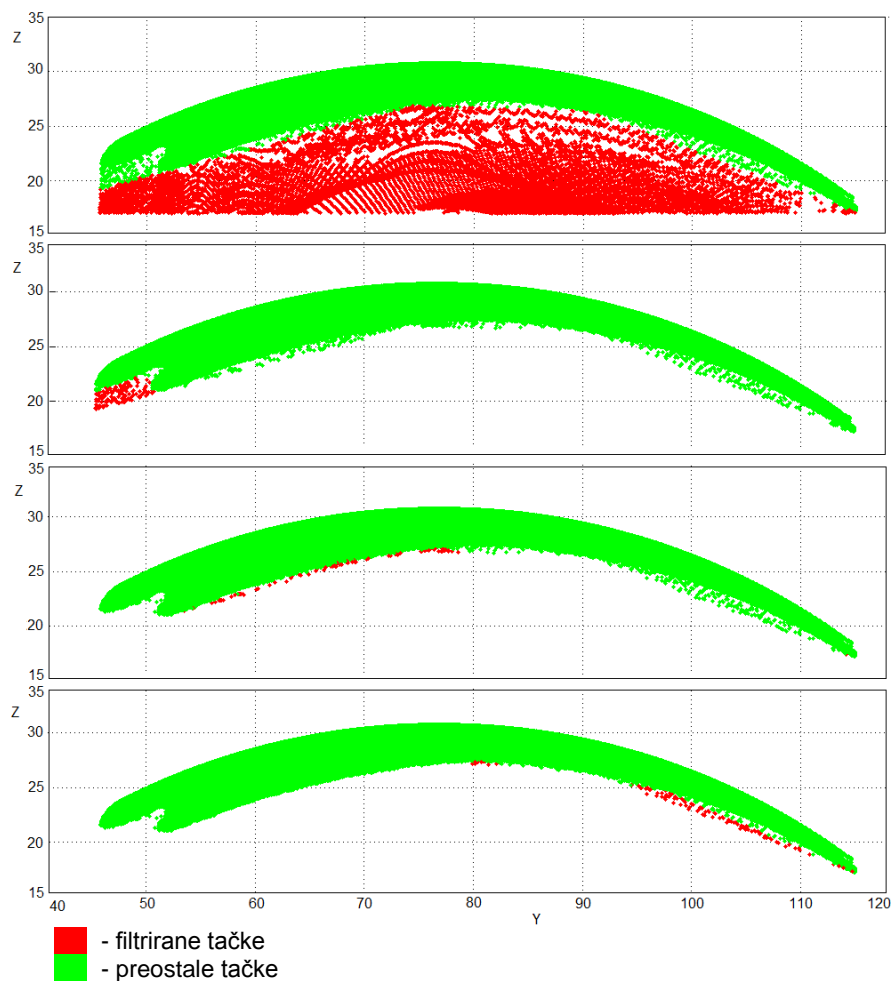
X min = -8,5	Y min = 43	Z min = 17
X max = 36	Y max = 116	Z max = 35



Slika 6.2: Rezultat zapreminskog filtriranja [3,13]

Metoda filtriranja segmentiranom linijom je primenjena kroz četiri iteracije, pri čemu su sve iteracije sprovedene u y-z ravni. Parametri, odnosno broj segmenata, koordinate tačaka koje definišu oblik filter linije i brojčane vrednosti rezultata filtriranja, za sve četiri iteracije, su date u tabeli 6.2. Grafički prikaz rezultata je dat na slici 6.3.

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE
REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



Slika 6.3: Iteracioni rezultati filtriranja segmentiranom linijom [3]

Geometrijski oblik i prostorna orijentacija objekta su usloveli potrebu za ručnim brisanjem zaostalih tačaka-grešaka. Ukupno ih je obrisano 367, a rezultat je 224.416 preostalih tačaka.

Tabela 6.2: Parametri i rezultati filtriranja segmentiranom linijom [3]

Iteracija	Broj segmenata	Koordinate segmentnih tačaka				Broj filtriranih tačaka	Broj preostalih tačaka
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄		
I	3	Y ₁ =53,2	Y ₂ =73,6	Y ₃ =90	Y ₄ =114,4	11489	225.307
		Z ₁ =21,38	Z ₂ =26,85	Z ₃ =26,46	Z ₄ =17,04		
II	2	Y ₁ =45,3	Y ₂ =49,5	Y ₃ =50,6	/	143	225.164
		Z ₁ =20,94	Z ₂ =22,39	Z ₃ =20,85	/		
III	3	Y ₁ =53,5	Y ₂ =66,8	Y ₃ =76,4	Y ₄ =11,45	214	224.950
		Z ₁ =21,64	Z ₂ =25,78	Z ₃ =27,29	Z ₄ =17,21		
IV	3	Y ₁ =51,6	Y ₂ =80,2	Y ₃ =97,2	Y ₄ =11,42	167	224.783
		Z ₁ =21,06	Z ₂ =27,48	Z ₃ =24,71	Z ₄ =17,31		

Brisanje podataka-tačaka na krajevima skeniranih krivih je primenjeno zbog veće verovatnoće za prisustvo grešaka na obodu objekta, kao posledice prelaza senzora (mernog pipka) sa objekta na pribor, odnosno merni sto. Strukturiranost oblaka tačaka po X i Y osama je omogućila primenu ove metode u okviru dve iteracije:

- 1) *Iteracija 1:* po Y osi, brisanje po 3 tačke na oba kraja kod svih 429 poprečnih krivih u tom pravcu. Obrisano je ukupno 2.586 tačaka, a ostalo je 221.830 tačaka.
- 2) *Iteracija 2:* po X osi, brisanje po 2 tačke na oba kraja kod svih 687 poprečnih krivih u tom pravcu. Obrisano je ukupno 2.748 tačaka, a ostale su 219.082 tačke.

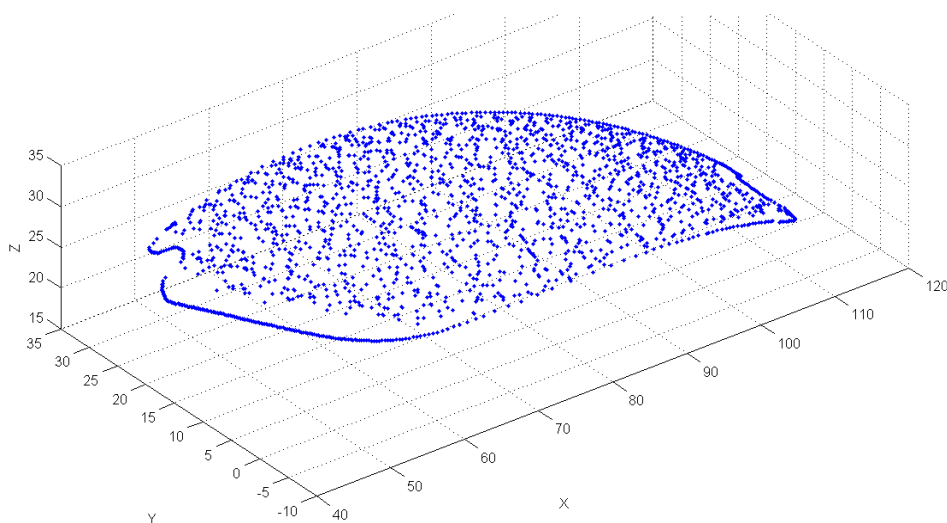
U sledećem koraku je, imajući u vidu relativno niži stepen složenosti geometrije objekta, izvršena i promena rezolucije poprečnih preseka - sa 0,1 na 0,2 [mm] po Y osi (X-Z ravan je izabrana za referentnu). Na ovaj način je broj poprečnih preseka smanjen sa 429 na 214, što je uslovalo i smanjenje broja tačaka sa 219.082 na 109.528.

Ovako pripremljen oblak tačaka je spreman za primenu neke od metoda za redukciju podataka-tačaka. Izabrana je metoda fazi-tetive sa vrednošću parametra MDG=0,03 [mm]. Rezultati redukcije su dati u tabeli 6.3 i na slici 6.4.

Tabela 6.3: Rezultati redukcije metodom fazi-tetive [3,9]

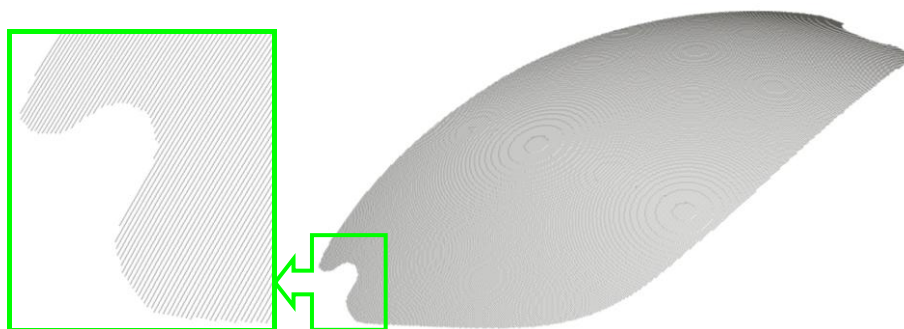
MDG [mm]	MG [mm]	PG [mm]	N_U	N_r	NR [%]	N_o
0,03	0,02835	0,00265	109.528	107.466	97,82	2.062

MDG - maksimalna dozvoljena greška; MG - maksimalna greška; PG - prosečna greška; N_U - ukupan broj tačaka; N_r - redukovani broj tačaka, NR - nivo redukcije; N_o - preostali broj tačaka.

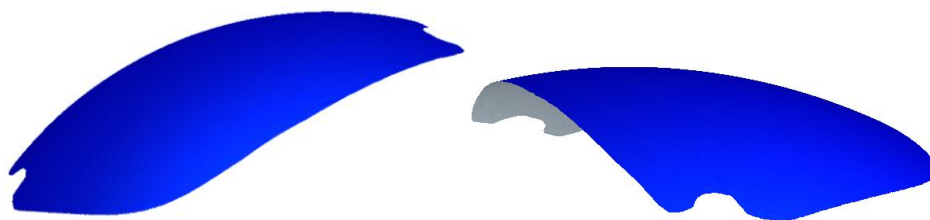


Slika 6.4: Grafički prikaz rezultata redukcije [3,9,13]

Generisane poprečne krive i rekonstruisani površinski model su prikazani na slici 6.5. Provera tačnosti rekonstruisanog modela je izvršena poređenjem geometrija površinskih modela rekonstruisanih na bazi oblaka tačaka pre i nakon redukcije. Rezultat poređenja geometrija dvaju površinskih modela, sa definisanom tolerancijom od 0,03 [mm] (slika 6.6), potvrđuje visok nivo podudarnosti, kao i da je odstupanje u granicama definisane vrednosti parametra redukcije MDG=0,03 [mm].

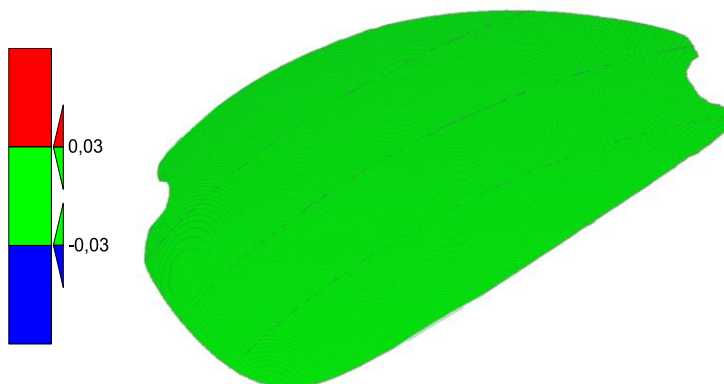


a) Generisane poprečne krive



b) Rekonstruisani površinski model

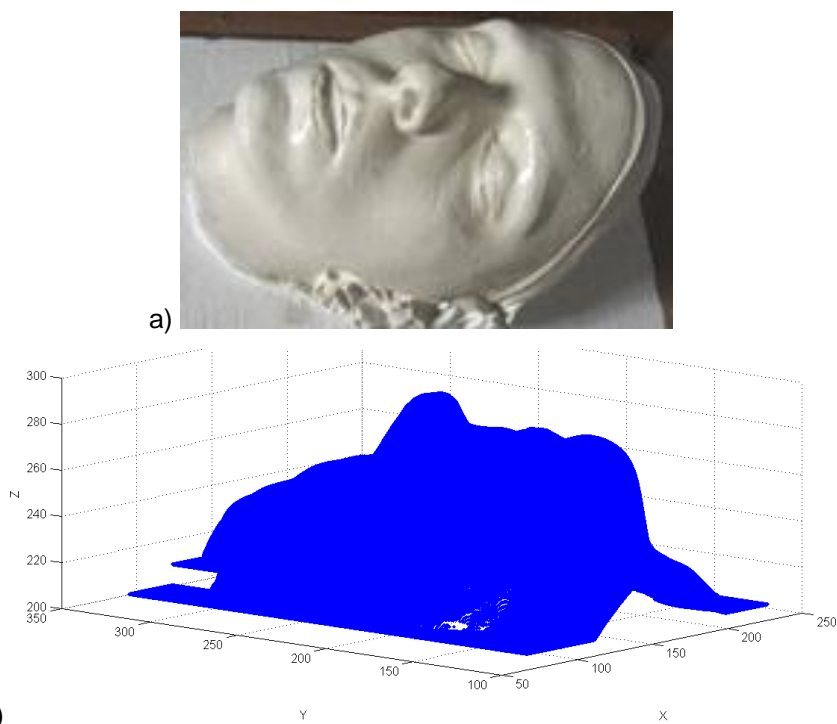
Slika 6.5: Generisane poprečne krive i površinski model [3,13]



Slika 6.6: Rezultat poređenja površinskih modela [3]

6.2 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije ljudskog lica

Primena prilaza predstavljenog u potpoglavlju 5.3 je ilustrovana na modelu ljudskog lica kreiranog na bazi uzetog otiska (slika 6.7a). Rezultat 3D-digitalizacije, realizovan kontaktnim skeniranjem na sistemu *Renishaw Cyclon II*, je prikazan na slici 6.7b. Oblak tačaka pripremljen za redukciju sadržao je 564.612 tačaka u 979 poprečnih preseka [3].



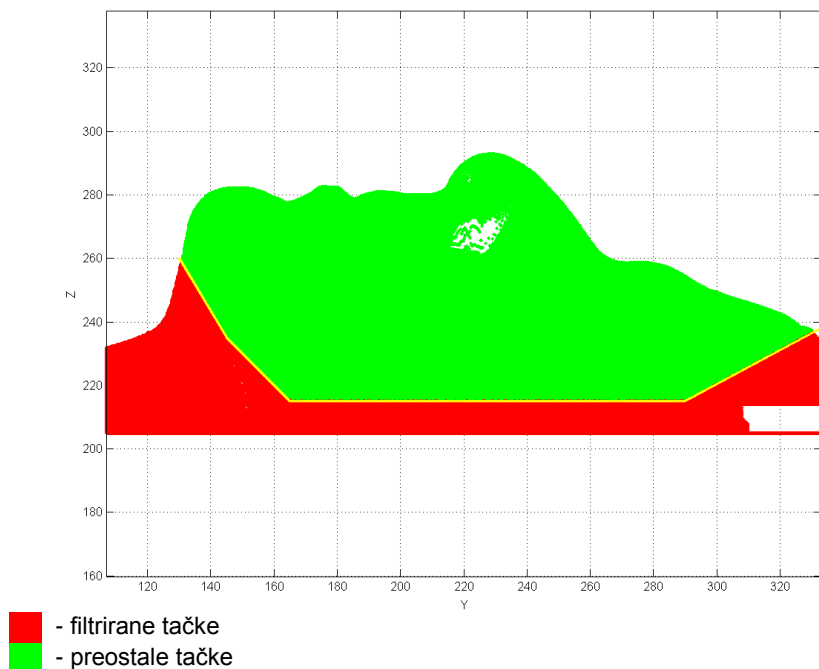
Slika 6.7: Fizički model (a) i rezultat 3D digitalizacije (b) ljudskog lica [3,13]

Uzimajući u obzir geometriju modela i pozicije nepotrebnih tačaka izabrano je filtriranje segmentiranom linijom. Primenjena je jedna iteracija u y - z ravni. Parametri i rezultati filtriranja su dati u tabeli 6.4, a grafički prikaz rezultata je dat na slici 6.8. Redukcija je izvršena metodom fazi-pravosti sa vrednošću parametra $MDG=0,04$ [mm].

Rezultati redukcije su dati u tabeli 6.5 i na slici 6.9. Rekonstruisani površinski model, kreiran na osnovu prethodno generisanih presečnih krivih (slika 6.10), je prikazan na slici 6.11 [3,13].

Tabela 6.4: Parametri i rezultati filtriranja segmentiranom linijom [13]

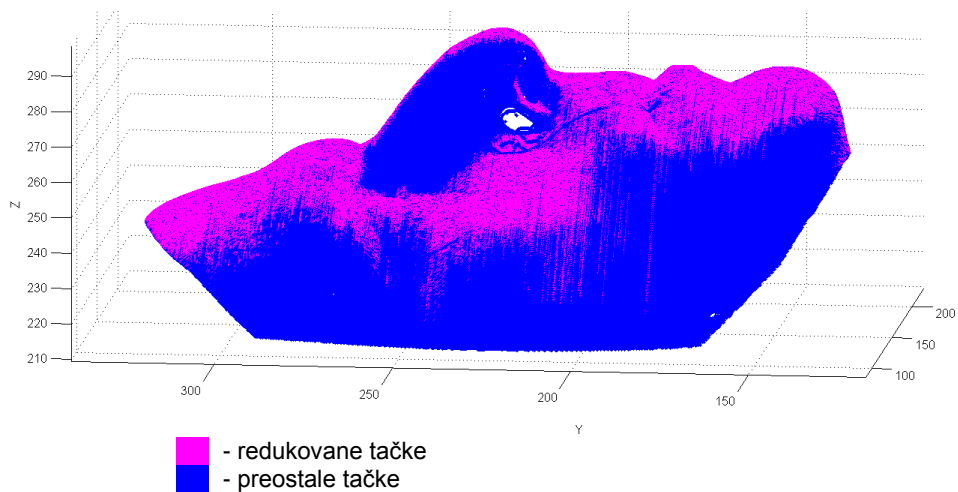
Broj segmenata	Koordinate segmentnih tačaka					Broj filtriranih tačaka	Broj preostalih tačaka
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₄		
4	Y ₂ =130	Y ₃ =145	Y ₁ =165	Y ₂ =290	Y ₄ =333	351.292	564.612
	Z ₂ =260	Z ₃ =235	Z ₁ =215	Z ₂ =215	Z ₄ =238		



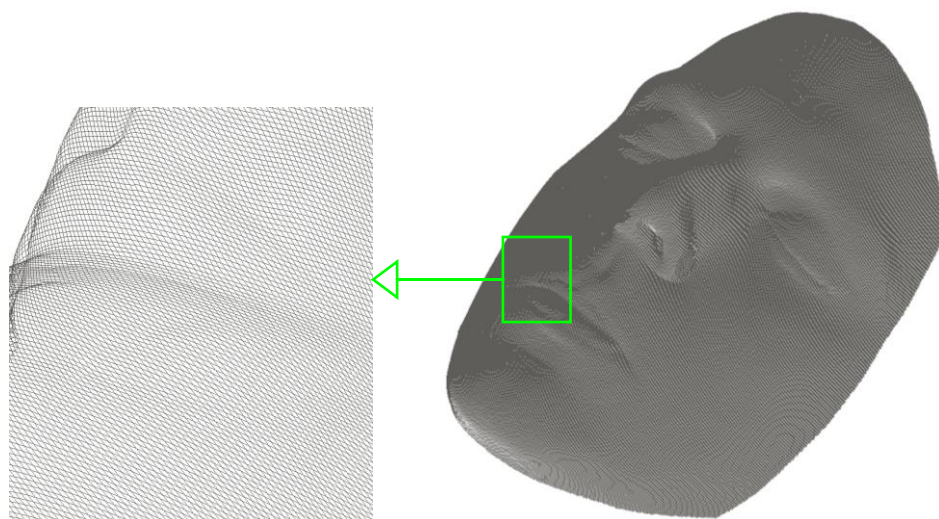
Slika 6.8: Rezultat filtriranja segmentiranom linijom [13]

Tabela 6.5: Rezultati redukcije fazi-prostornom metodom [3,13]

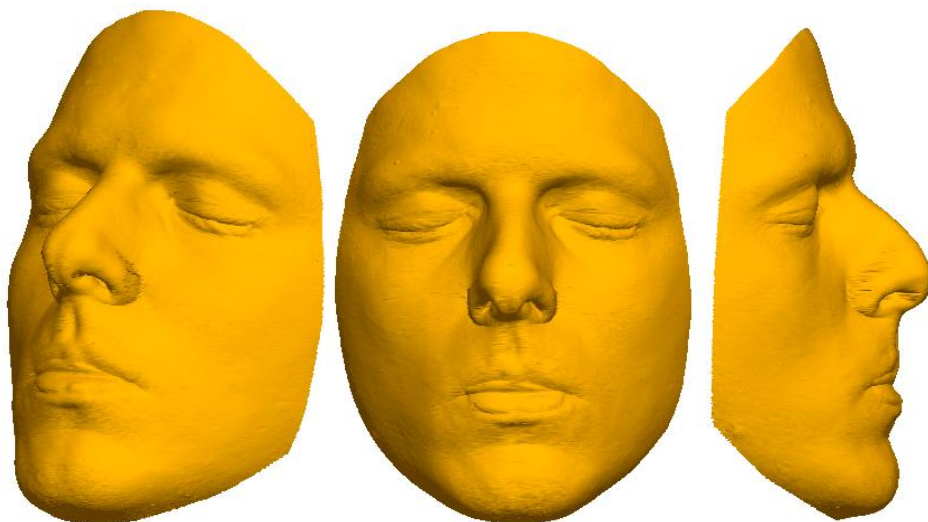
MDG [mm]	MG [mm]	PG [mm]	N_U	N_r	NR [%]	N_o
0,04	0,03993	0,00491	564.612	288.801	53,29	275.811



Slika 6.9: Rezultat redukcije fazi-prostornom metodom [3,13]

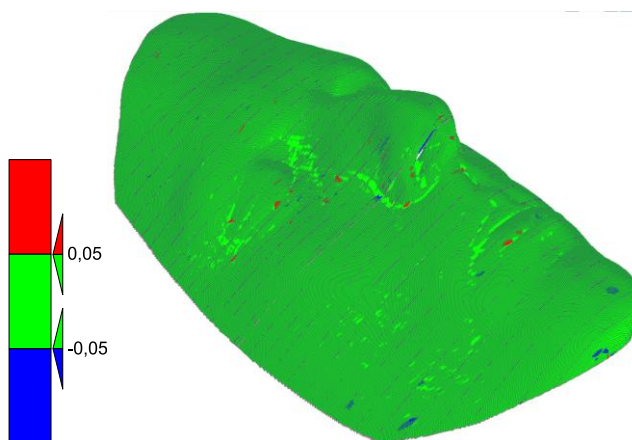


Slika 6.10: Generisane presečne krive [3]



Slika 6.11: Rekonstruisani površinski model [3,13]

Tačnost rekonstruisanog modela je proverena poređenjem njegove geometrije sa geometrijom površinskog modela rekonstruisanog na bazi neredukovanog oblaka tačaka. Rezultat je, za definisanu toleranciju od 0,05 mm, prikazan na slici 6.12.



Slika 6.12: Rezultat poređenja površinskih modela [3]

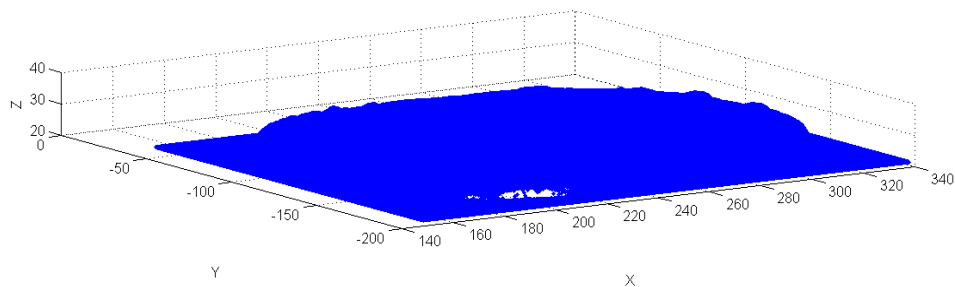
6.3 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije umetničke plakete

Ovaj primer obuhvata pre-procesiranje oblaka tačaka dobijenog 3D digitalizacijom umetničke plakete na kojoj je prikazan portret kompozitora G. Tartinija (slika 6.13).



Slika 6.13: Umetnička gravura portreta kompozitora G. Tartinija [3,9]

Plaketu, sa aspekta 3D digitalizacije, karakterišu složenija geometrija, ali i jednostavnije stezanje u pribor što je uslovljeno ravnošću donje površine. Rezultat 3D digitalizacije sadrži 2.970.761 tačku (slika 6.14), pri čemu veliki broj tačaka pripada ravni mernog stola (nije korišćen nikakav pribor za stezanje) i neophodno ih je odstraniti pre rekonstrukcije površina [3,9].

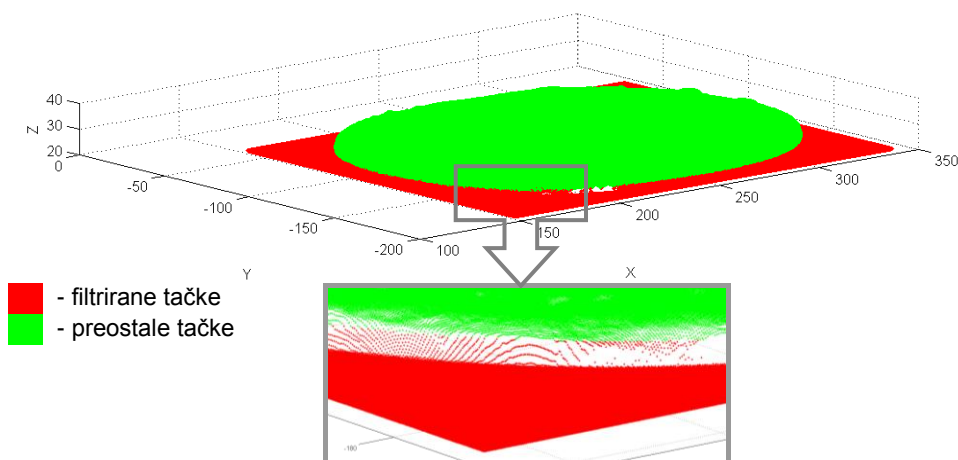


Slika 6.14: Rezultat 3D digitalizacije [3,9]

Kao prvi korak u okviru pre-procesiranja primenjen je zapreminski filter. Parametri su dati su u tabeli 6.6, a rezultat je 704.865 filtriranih tačaka, odnosno 2.265.896 preostalih tačaka (slika 6.15). U cilju eliminisanja problematičnih tačaka u bočnim oblastima objekta, zaostalih nakon primene zapreminskog filtera, sprovedeno je i brisanje tačaka na krajevima skeniranih linija. Obrisano je po 10 tačaka na oba kraja svih 1.524 poprečnih preseka po Y osi, odnosno ukupno 30.480 tačaka (slika 6.16). Rezultat je 2.235.416 preostalih tačaka. Uzimajući u obzir dimenzije objekta, složenost geometrije, broj tačaka i poprečnih preseka, u cilju povećanja efikasnosti procesa rekonstrukcije površinskog modela izvršena je i promena rezolucije sa 0,1 na 0,2 mm. Time je broj poprečnih preseka smanjen sa 1.524 na 763, a ukupan broj tačaka sa 2.235.416 na 1.117.774 [3,9].

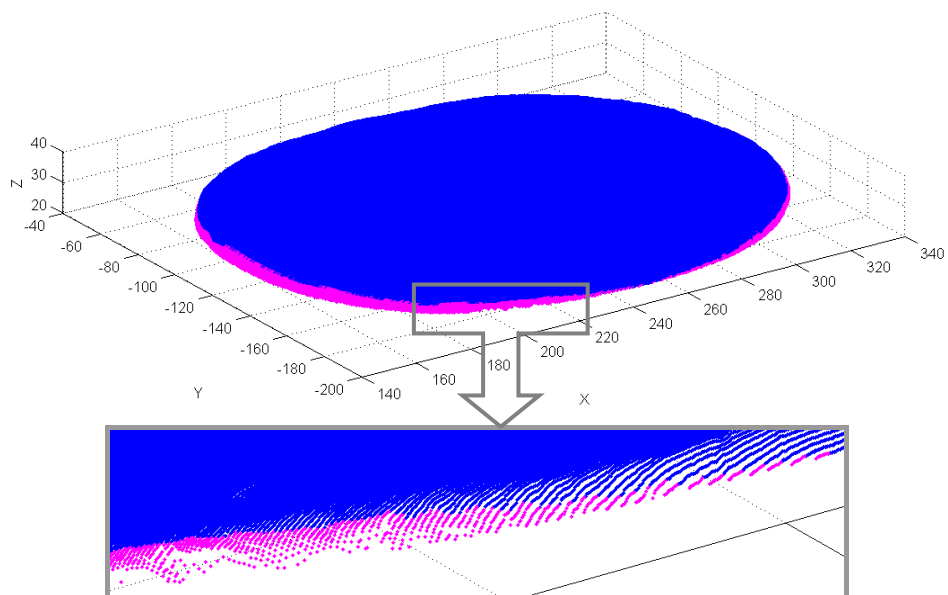
Tabela 6.6: Parametri zapreminskog filtera [3]

X min = 155,0	Y min = -195,0	Z min = 24,1
X max = 335,0	Y max = -55,0	Z max = 37,0



Slika 6.15: Rezultat zapreminskog filtriranja [3]

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE
 REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



- eliminisane tačke
- zadržane tačke

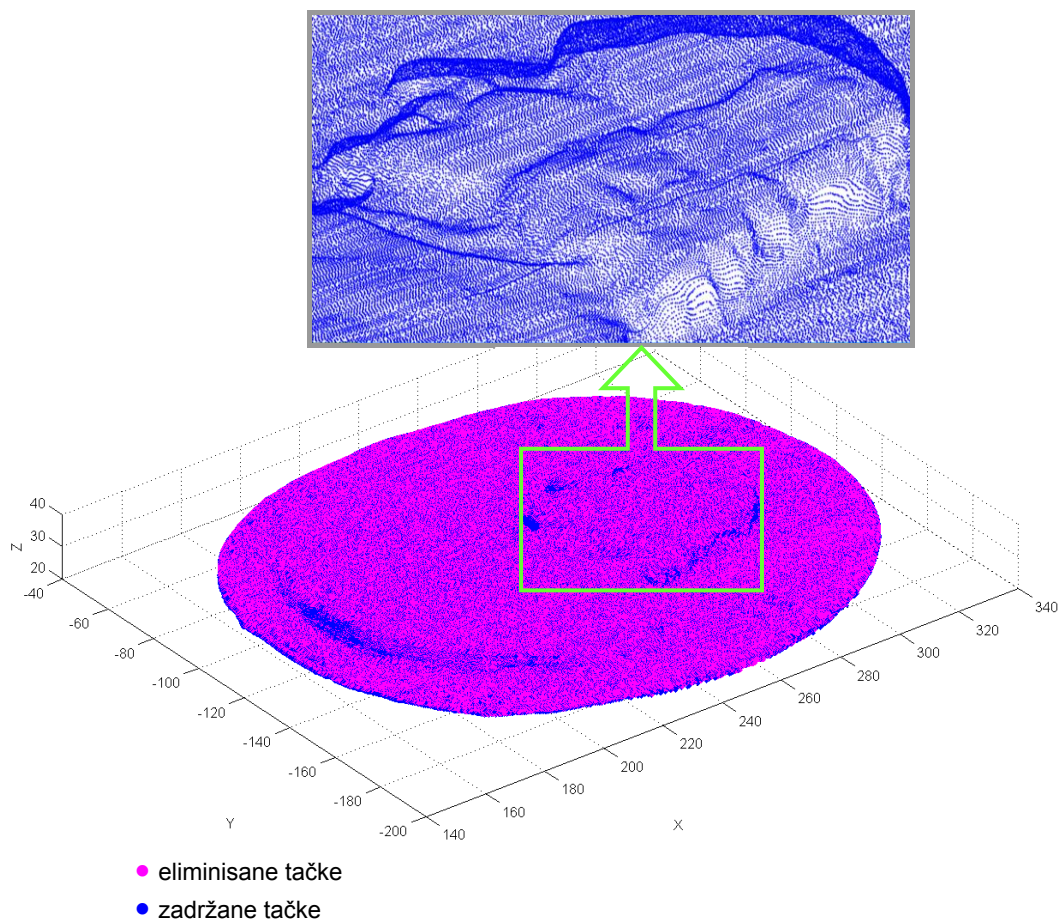
Slika 6.16: Rezultat brisanja tačaka na krajevima poprečnih preseka [3]

Redukcija je realizovana primenom fazi-prostorne metode. Parametri i rezultati redukcije su dati u tabeli 6.7 i prikazani na slici 6.17 [3].

Tabela 6.7: Parametri i rezultati redukcije [3]

MDG [mm]	MG [mm]	PG [mm]	N_U	N_r	NR [%]	N_O
0,03	0,0291158	0,0030631	1.117.774	869.398	77,86	248.376

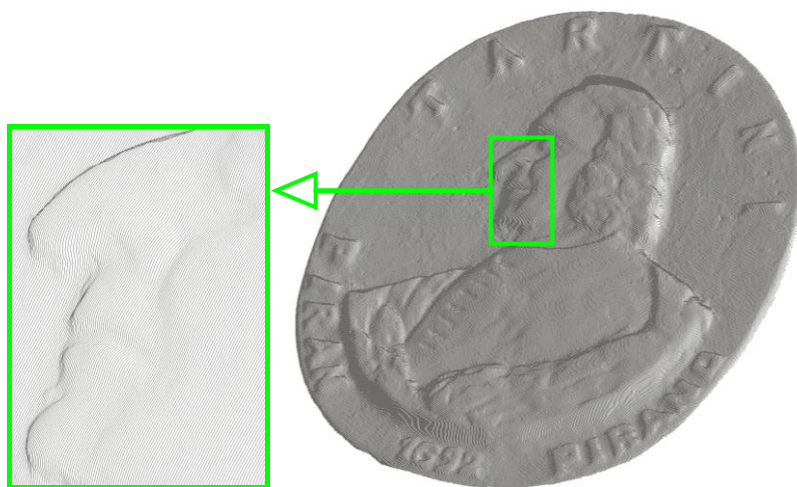
6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



Slika 6.17: Rezultat redukcije sa uveličanim detaljem [3]

Generisane poprečne krive i rezultujući površinski model prikazani su na slici 6.18. Zadovoljavajuća tačnost je potvrđena komparativnom analizom geometrija površinskih modela rekonstruisanih na bazi redukovanog i neredukovanog oblaka tačaka (slika 6.19), za definisanu toleranciju od 0,03 mm [3].

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE
REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE

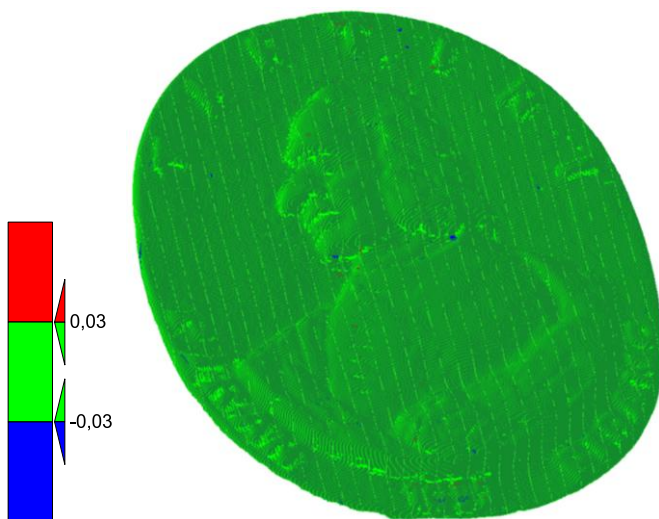


a)



b)

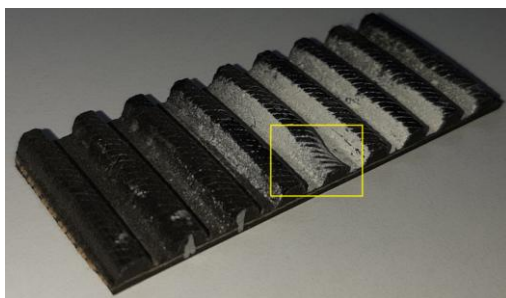
Slika 6.18: Generisane presečne krive (a) i površinski modeli (b) [3,9]



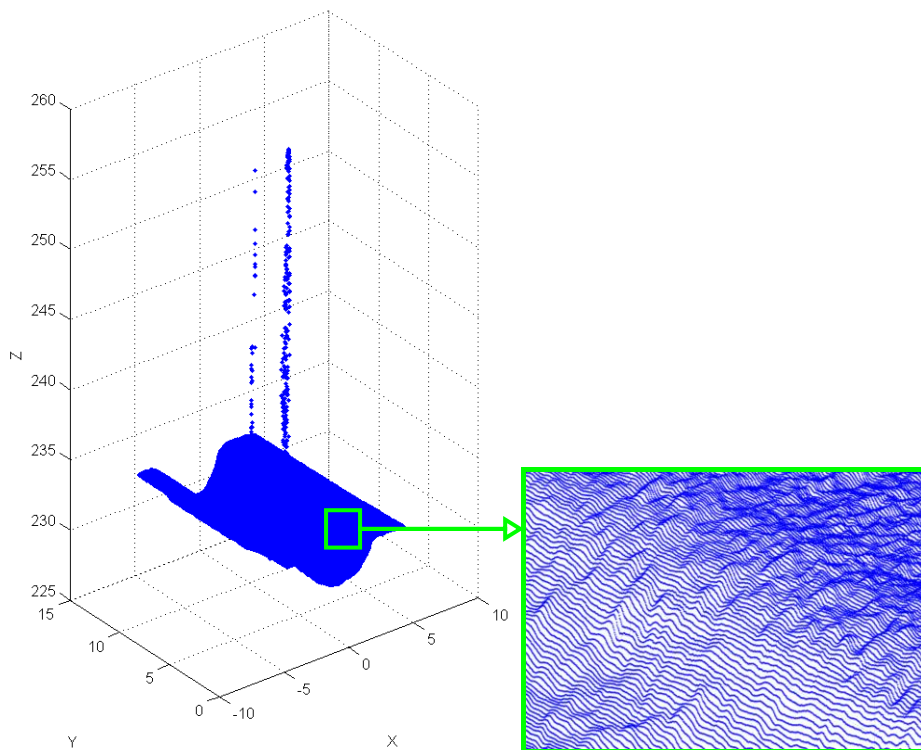
Slika 6.19: Rezultati poređenja geometrije generisanih površinskih modela [3]

6.4 Pre-procesiranje rezultata 3D digitalizacije zuba remenastog prenosnika

Sledeći primer prikazuje pre-procesiranje zuba remenastog prenosnika, tačnije deo zuba koji sadrži grešku nastalu u proizvodnji (slika 6.20), koji je skeniran metodom laserske linijske triangulacije. Specifičnost objekta su vrlo male dimenzije i vrlo fina rezolucija skeniranja od 5 μm (slika 6.21). Rezultat 3D digitalizacije sadrži ukupno 1.482.000 tačaka [3,13].



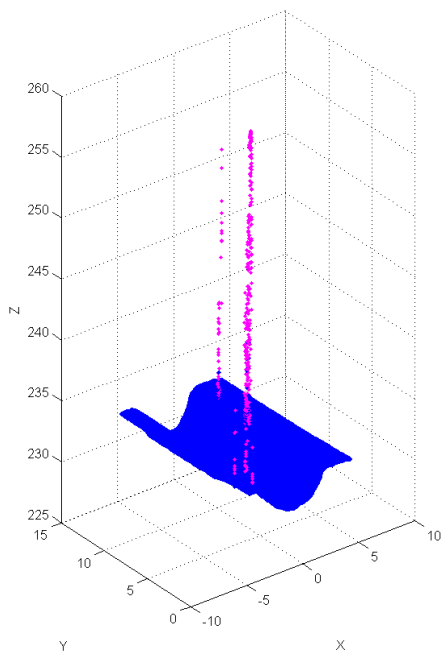
Slika 6.20: Remenasti prenosnik sa označenim zubom [3,13]



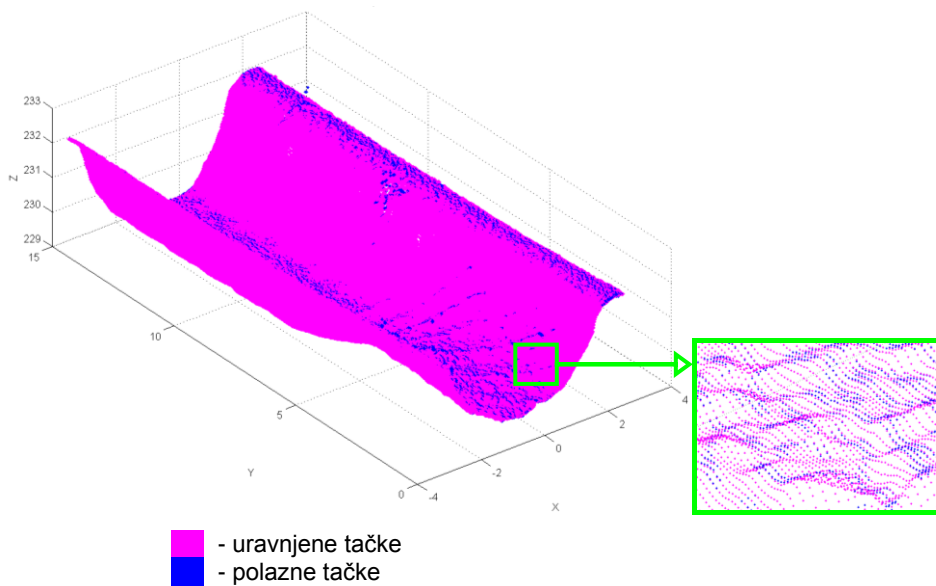
Slika 6.21: Rezultat 3D digitalizacije [3,13]

Prisustvo velikog broja tačaka-grešaka je "preporučilo" primenu filtriranja metodom ugla. Rezultat je 489 filtriranih, odnosno 1.481.511 preostalih tačaka (slika 6.22). Uveličani detalj na slici 6.21 jasno ukazuje na određeni nivo hrapavosti oblaka tačaka, koji je posledica primene praškastog nanosa radi neutralisanja efekta apsorpcije svetlosti od strane materijala od kojeg je izrađen remenasti prenosnik. Zbog toga je u sledećem koraku primenjena metoda medijane za uravnavanje podataka-tačaka. Rezultat je prikazan na slici 6.23 [3,13].

6. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE METODA ZA PRE-PROCESIRANJE
REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE



Slika 6.22: Rezultat filtriranja metodom ugla [3,13]

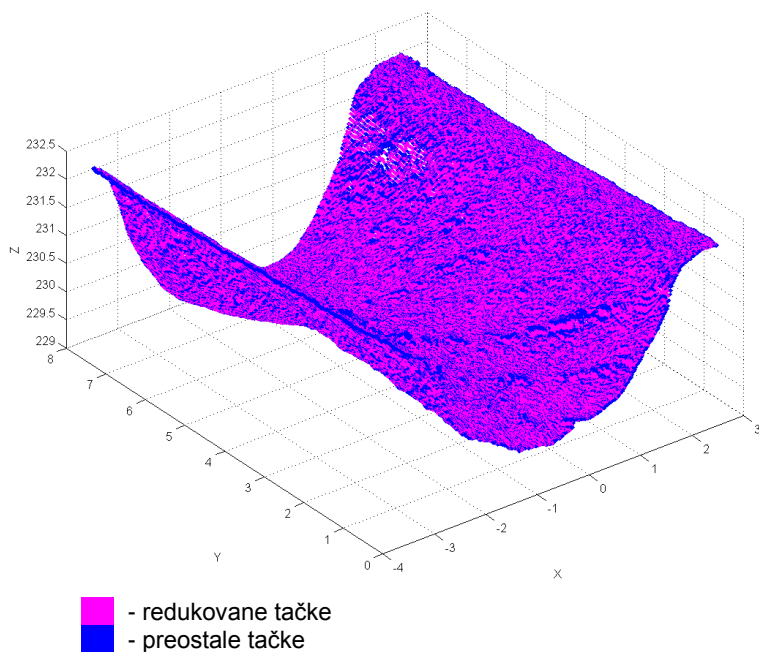


Slika 6.23: Rezultat uravnavanja metodom medijane [3,13]

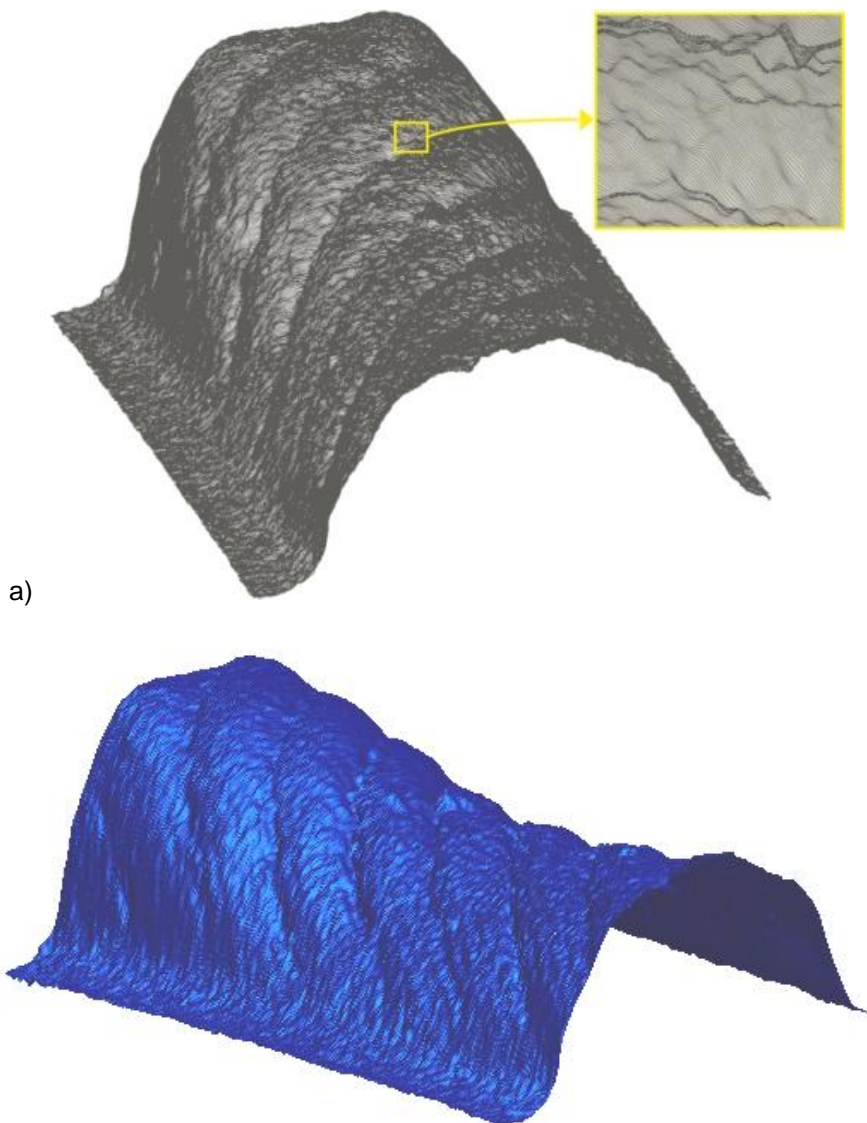
U cilju efikasnije rekonstrukcije površinskog modela, izvršena je promena rezolucije - sa 5 na 10 μm , čime je broj poprečnih preseka smanjen sa 3.000 na 1.500, što je uslovilo i smanjenje broja tačaka na 494.332. Takođe, u cilju efikasnije analize redukcije i postupka rekonstrukcije površina, iz prethodnog rezultata je izdvojen prednji segment sa 263.791 tačkom u 801 poprečnom preseku. Nakon toga je realizovana redukcija metodom fazi-tetive sa vrednošću parametra $\text{MDG}=0,01$ mm. Rezultati redukcije su dati u tabeli 6.8 i na slici 6.24. Generisane poprečne krive i rekonstruisani površinski model su prikazani na slici 6.25 [3,13].

Tabela 6.8: Rezultati redukcije metodom fazi-tetive [3]

MDG [mm]	MG [mm]	PG [mm]	N_U	N_r	NR [%]	N_o
0,01	0,00968	0,00159	263.791	173.297	65,69	90.494



Slika 6.24: Grafički prikaz rezultata redukcije metodom fazi-tetive [3,13]



a)

b)

Slika 6.26: Generisane poprečne krive (a) i rekonstruisani površinski model (b) [3,13]

LITERATURA

- [1] Várady, T., Martin, R.R., Cox, J.: Reverse engineering of geometric models-an introduction, *Computer-Aided Design*, 1997, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, ISSN: 0010-4485.
- [2] Sokovic, M., Kopac, J.: RE (Reverse Engineering) as necessary phase by rapid product development, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, Vol. 175, No 1-3, pp. 398–403, ISSN: 0924-0136.
- [3] Budak, I.: Development of the system for intelligent pre-processing of 3D-digitization results from free-form surfaces, Doctoral dissertation, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, 2009.
- [4] Vinesh, R., Kiran, F.J.: Reverse engineering: an industrial perspective, Springer series in advanced manufacturing, Springer-Verlag London Limited, 2010, ISBN: 978-1-84996-660-3.
- [5] Wang, W.: Reverse Engineering: technology of reinvention, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [6] Budak, I., Mirkovic, S., Sokac, M., Santosi, Z., Puskar, T., Vukelic, D.: An approach to modelling of personalized bone grafts based on advanced technologies, *International Journal of Simulation Modelling*, 2016, Vol. 15, No 4, pp. 637-648, ISSN 1726-4529.
- [7] Baumann, F.W., Roller, D.: Additive Manufacturing, Cloud-Based 3D Printing and Associated Services—Overview, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2017, Vol. 1, No. 15, ISSN 2504-4494.

-
- [8] Caggiano, A., Segreto, T., Teti, R.: Cloud Manufacturing On-demand Services for Holistic Quality Assurance of Manufactured Components, *Procedia CIRP*, 2018, Vol. 67, pp.144–149, ISSN: 2212-8271.
- [9] Budak, I., Sokovic, M., Kopac, J., Hodolic, J.: Point Data Pre-Processing Based on Fuzzy Logic for Reverse Engineering Modelling, *Strojniski vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 2009, Vol. 55, No 12, pp. 755-765, ISSN 0039-2480.
- [9] Remondino, F.: From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem, *International Archives of the Photogrammetry, Proceedings of the ISPRS working group V/6, Volume XXXIV, Part 5/W10, International Workshop on "Visualization and Animation of Reality-based 3D Models"*, 24-28 February 2003, Engadin, Switzerland.
- [10] Duhovnik, J., Kusar, J., Tomazevic, R., Starbek, M.: Development Process with Regard to Customer Requirements, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, SAGE Publications, 2006, Vol. 14, No. 1, pp. 67-82, ISSN: 1063-293X.
- [11] Santosi, Z., Sokac, M., Korolija-Crkvenjakov, D., Kosec, B., Sokovic, M., Budak, I.: Reconstruction of 3D models of cast sculptures using close range photogrammetry, *Metalurgija*, 2015, Vol. 54, No 4, pp. 695-698, ISSN 0543-5846.
- [12] Budak, I.: Razvoj eksperimentalnog sistema za reverzibilno inženjersko modeliranje složenih površina, *Magistarska teza*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
- [13] Budak, I., Vukelic, D., Bracun, D., Hodolic, J., Sokovic, M.: Pre-Processing of Point-Data from Contact and Optical 3D Digitization Sensors, *Sensors*, 2012, Vol. 12, No 1, pp. 1100-1126, ISSN 1424-8220.
- [14] Trifkovic, B., Budak, I., Todorovic, A., Vukelic, D., Lazic, V., Puskar, T.: Comparative analysis on measuring performances of dental intraoral and extraoral optical 3D digitization systems, *Measurement*, 2014, Vol. 47, No 1, pp. 45-53, ISSN 0263-2241.
- [15] High performance 5-axis measurement, Part no. H-1000-0050-02-A, Renishaw PLC, 2018.

-
- [16] Wu, J., Wang, Q., Huang, Y., Li, Y.: A Hybrid Fuzzy Heuristic for Point Data Reduction in Reverse Engineering, First International Congress on Image and Signal Processing CISP 2008, Sanya, Hainan, China, May, 2008, pp. 1283-1288, ISBN 9781424430482.
- [17] Wang, Z., Yang, C., Ju, Z., Li, Z., Su, CY.: Preprocessing and Transmission for 3D Point Cloud Data, Intelligent Robotics and Applications, Proceedings of the 10th International Conference ICIRA 2017, Part I, Wuhan, China, August 16–18, 2017, pp. 438-449, Springer, ISBN 978-3-319-65288-7.
- [18] Woo, H., Kang, E., Semyung, Wang, Kwan, H., Lee: A new segmentation method for point cloud data, The International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, Vol. 42, No. 2, pp 167-178, ISSN 0890-6955
- [19] Lee, K.H., Woo, H., Suk, T.: Data Reduction Methods for Reverse Engineering, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, Vol.17, No. 10, pp. 735-743, Springer-Verlag London Limited, ISSN 0268-3768.
- [20] Lee, K.H., Woo, H., Suk, T.: Point Data Reduction Using 3D Grids, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, Vol.18, No.3, pp. 201-210, Springer-Verlag London Limited, ISSN 0268-3768.
- [21] Miknis, M., Davies, R., Plassmann, P., Ware, A.: Efficient Point Cloud Pre-processing using The Point Cloud Library, International Journal of Image Processing (IJIP), 2016, Vol. 10, No. 2, pp. 63-72, ISSN 1985-2304.
- [22] Taylan, A., Blaine, L., Yen, Y.C.: Manufacturing of Dies and Molds, CIRP Annals, 2001, Vol. 50, No.2, pp. 404-422, ISSN 0007-8506.
- [23] Vukašinović, N., Kolšek, T., Duhovnik J.: Case Study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production, Journal of Engineering Design, 2007, Vol. 18, No. 5, pp. 475–488, ISSN 0954-4828.
- [24] Li, L., Li, C., Tang, Y., Du, Y.: An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, Vol 48, pp.39-50, ISSN 0736-5845.

- [25] Santosi, Z., Budak, I., Sokac, M.: Reverse engineering modeling as a tool of digital sculpting, 6. International Scientific Conference moNGeometrija, Novi Sad: Serbian Society for Geometry and Graphics (SUGIG) and Faculty of Technical Sciences, 6-9 June, 2018, pp. 359-362, ISBN 978-86-6022-055-6.
- [26] Percoco G., Spina R.: A Genetic Algorithm Approach for the Reduction of Point Clouds of Scanned Complex Shaped Parts, Annals of DAAAM for 2001 and Proceeding of 12th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Precision Engineering", 24-27th October 2001, Jena, Germany, Published by DAAAM International, Vienna, pp. 355-356, ISBN 3-901509-19-4.
- [27] Budak I., Hodolič J., Gatalo R.: Development of a System for Reverse Engineering Based Design of Complex Shapes with Emphasis on Data-Point Preprocessing, Proceedings of the 11th International CIRP Life Cycle Engineering Seminar "Product Life Cycle – Quality Management Issues", June 20-22, 2004, Belgrade, Serbia, ISBN 8690319735.
- [28] Taylor, S.: NASA is 3D scanning on Mars and 3D printing on Earth, 3D Printing Industry (3DPI), APRIL 29TH 2014.
<https://3dprintingindustry.com/news/nasa-3d-scanning-mars-3d-printing-earth-26531/>
- [29] Stojakovic, V., Budak, I., Obradovic, R., Korolija Crkvenjakov, D., Santosi, Z.: Parametric modeling applied to the virtual reconstruction of the damaged sculpture of St John Nepomuk in Petrovaradin, 35. eCAADe - Educational and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Rim: eCAADe and Sapienza University of Rome., 20-22 September, 2017, pp. 389-399, ISBN 978-94-91207-13-6.
- [30] Sansoni, G., Trebeschi, M. and Docchio, F.: State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation, Sensors, 2009, Vol. 9, No. 1, pp. 568-601, ISSN 1424-8220.
- [31] Bernardini F., Bajaj C. L., Chen J., Schikore D. R.: Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans, International Journal of Computational Geometry and Applications, 1999, Vol. 09, No. 04n05, pp. 327-369, ISSN 0218-1959.

- [32] Motavalli S.: Review of Reverse Engineering Approaches, Computers and Industrial Engineering, 1998, Vol. 35, No. 1-2, pp. 25-28, ISSN:0360-8352.
- [33] Merriam-Webster Dictionary: Reverse Engineering, 2019.
<https://www.merriam-webster.com/dictionary/>
- [34] Bruneau, M., Durupt, A., Roucoules, L., Pernot, J.-P., Rowson, H.: Methodology of reverse engineering for large assemblies products from heterogeneous data, Proceedings of TMCE 2014, May 19-23, 2014, Budapest, Hungary, pp.1-12, ISBN 978-94-6186-177-1.
- [35] Šaletić, S.: Razvoj integralnog automatizovanog sistema za reinženjering složenih geometrijskih oblika primjenom tehnike 3D laserskog skeniranja, Magistarska teza, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2002.
- [36] Scanning systems for Reverse Engineering, Renishaw plc., New Mills, United Kingdom, 1999.
<http://www.renishaw.com>
- [37] Thompson, W.B., Owen, J.C., de St. Germain, H.J., Stark, S.R., Henderson, T.C.: Feature-Based Reverse Engineering of Mechanical Parts, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 1 February 1999.
- [38] Intelligent Integrated Reverse Engineering, Research Projects, Centre for Advanced Manufacturing Research, University of South Australia, 2001.
- [39] Peng, Q., Loftus, M.: Using image processing based on neural networks in reverse engineering, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, Vol. 41, No. 5, pp. 625-640, ISSN: 0890-6955
- [40] Curlless, B. L.: New Methods for Surface Reconstruction from Range Images, Doctoral Dissertation, Stanford University, 1997.
- [41] Curlless, B.: Range Acquisition – Part II: Optical Methods, Stanford University, Stanford, California, USA, 1997.
- [42] Vergeest, J.S.M., Horváth, I., Kuczogi, G., Opiyo, E.Z., Wieggers, T.: Reverse Engineering For Shape Synthesis In Industrial Engineering, 26th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Vol. 1 , 1999.

- [43] Sokac, M., Budak, I., Santosi, Z., Kadvany, K., Puskar, T., Vukelic, D.: Emergence of new technologies in the designing and fabrication of patient-specific removable partial dentures (RPDs): A case study, 8. International Conference on Information Society and Technology – ICIST, Kopaonik: Society for Information Systems and Computer Networks, 11-14 March, 2018, pp. 94-99, ISBN 978-86-8552-516-2.
- [44] Yau, H-T.: Reverse Engineering of Engine Intake Ports by Digitization and Surface Approximation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, Vol. 37, No. 6, pp. 855-871, ISSN: 0890-6955.
- [45] Plančak, M.: Brza izrada prototipova, modela i alata – Rapid Prototyping and Rapid Tooling, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009, ISBN 978-86-7892-232-9.
- [46] Jevremovic, D., Puskar, T., Budak, I., Vukelic, D., Kojic, V., Eggbeer, D., Williams, R.: An RE/RM approach to the design and manufacture of removable partial dentures with a biocompatibility analysis of the F75 Co-Cr SLM alloy, Materiali in Tehnologije, 2012, Vol. 46, No 2, pp. 123-129, ISSN 1580-2949.
- [47] Das, S., Mazumder, P., Doloi, B., Bhattacharyya, B.: Fabricating tool for ultrasonic machining using reverse engineering, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, Vol. 31, No. 3, pp. 296-305, ISSN 0951-192X.
- [48] Robinson, D.W.: Integration of Rapid Prototyping and Reverse Engineering for Complex 3D Shape Design, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [49] Drstvenšek, I.: Layered Technologies, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2004, ISBN 9788643506165.
- [50] Stanley, J.H., Yancey, R.N.: CT-assisted Agile Manufacturing, Proceedings of SPIE's Symposium on NDE Technoques for Aging Infrastructure and Manufacturing, Scottsdale, Arizona, 1996.
- [51] Ferreira, J.C., Alves, N.F.: Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology, Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol. 142, pp. 374–382, ISSN 0924-0136.

-
- [52] Onuh, S., Bennett, N., Hughes, V.: Reverse engineering and rapid tooling as enablers of agile manufacturing, *International Journal of Agile Systems and Management*, 2006, Vol. 1, No. 1, ISSN 1741-9174.
- [53] Lee, S.-H.: Application of Reverse Engineering for Automotive Parts, Pusan-Kyungnam Automotive Techno Center, 2002.
- [54] Pramhas, G., Carl-Hohenbalken, G.: Volume Repatriation for Technical and Medical Structures, *Annals of DAAAM for 2001 and Proceeding of 12th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Precision Engineering"*, 24-27th October 2001, Jena, Germany, pp. 389-390, ISBN 3-901509-19-4.
- [55] Huang, M.-C., Tai, C.-C.: The Pre-Processing of Data Points for Curve Fitting in Reverse Engineering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2000, Vol. 16, No. 9, pp. 635-642, ISSN 0268-3768.
- [56] Chang, D.-Y., Chang, Y.-M.: A Freeform Surface Modelling System Based on Laser Scan Data for Reverse Engineering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, Vol. 20, No. 1, pp. 9-19, ISSN 0268-3768.
- [57] Amenta, N., Bern, M., Kamvyselis, M.: A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm, *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques Siggraph '98*, 1998, pp. 415-421, ISBN:0-89791-999-8
- [58] Kneisl, G.: 3D-Digitizing and Surface Reconstruction, Institute for Applied and Technical Physics, Vienna University of Technology, Vienna, 2000.
- [59] Choi, S., Amenta, N.: Delaunay triangulation programs on surface data, *Proceedings of the 13th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms SODA '02*, San Francisco, California — January 06 - 08, 2002, pages 135-136, ISBN 0-89871-513-X.
- [60] Curless, B.: Active Vision Techniques, Lecture notes, University of Washington, Washington, USA, 2002.
- [61] Liu S., Ma W.: Seed-Growing Segmentation of 3-D Surfaces from CT-Contour Data, *Computer-Aided Design*, 1999, Vol. 31, No. 8, pp. 517–536, ISSN 0010-4485.

- [62] Curless, B.: From Range Scans to 3D Models, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 2000, Vol. 33, No. 4, pp. 38-41, ISSN 0097-8930.
- [63] Budak, I., Hodolič, J., Bešić, I., Vukelić, Đ., Osanna, H., Durakbasa, N.: Koordinatne merne mašine i CAD inspekcija, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2009, ISBN 978-86-7892-195-7.
- [64] Budak, I., Trifkovic, B., Puskar, T., Vukelic, D., Vucaj-Cirilovic, V., Hodolic, J., Todorovic, A.: Comparative analysis of 3D digitization systems in the field of dental prosthetics, Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, 2013, Vol. 20, No. 2, pp. 291-296, ISSN 1330-3651.
- [65] Rusinkiewicz, S. M.: Real-Time Acquisition and Rendering of Large 3D-Models, Doctoral Dissertation, Stanford University, 2001.
- [66] Budak I., Soković M., Barišić B.: Accuracy improvement of point data reduction with sampling-based methods by Fuzzy logic-based decision-making, Measurement, 2011, Vol. 44, No. 6, pp. 1188-1200, ISSN 0263-2241.
- [67] Majstorović, V., Hodolič, J.: Numerički upravljane merne mašine, Edicija NUMA FTS, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1998, ISBN 86-499-0091-7.
- [68] Budak I., Hodolič J., Gatalo R.: Prilog analizi sistema za 3D digitalizaciju, Zbornik radova 29. Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije sa međunarodnim učešćem, 19-20. septembar, 2002, Beograd.
- [69] Educational articles 1-4, International Association of Co-ordinate Measuring Machine Manufacturers, www.iacmm.org, 2007.
- [70] Hocken, R.J., Pereira, P.H.: Coordinate Measuring Machines and Systems, 2nd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012, ISBN 978-1-57444-652-4.
- [71] Active vs Passive Scanning for Multi-Point Measurement, Carl Zeiss Industrial Metrology, LLC, 2015.
www.zeiss.com/metrology

- [72] Kruth, J.P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., Weckenmann, A. Computed tomography for dimensional metrology, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, Vol. 60, No. 2, pp. 821–842, ISSN 0007-8506.
- [73] Geng, J.: Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, *Advances in Optics and Photonics*, 2011, Vol. 3, No. 2, pp. 128–160, ISSN 1943-8206.
- [74] Dudas, I., Varga, G., Banyai, K.: Grinding Wheel Profile measurement by CCD Camera, *Annals of DAAAM for 2001 and Proceeding of 12th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Precision Engineering"*, 24-27th October 2001, Jena, Germany, pp. 117-118, ISBN 3-901509-19-4.
- [75] Bračun, D., Jezeršek, M., Diaci, J.: Triangulation model taking into account light sheet curvature, *Measurement Science and Technology*, 2006, Vol. 17, No. 8, pp. 2191–2196, ISSN 0957-0233.
- [76] Bračun, D., Gruden, V., Možina, J.: A method for surface quality assessment of die-castings based on laser triangulation, *Measurement Science and Technology*, 2008, Vol. 19, No. 4, pp. 1-8, ISSN 0957-0233.
- [77] Wang, G.-J., Wang, C.-C., Chuang, S.H.F.: Reverse Engineering of Sculptured Surfaces by Four-Axis Non-Contacting Scanning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, Vol. 15, No. 11, pp. 800-809, ISSN 0268-3768.
- [78] Hoppe, H.: Surface reconstruction from unorganized points; PhD Thesis, Dept. of Computer Science and Engineering, University of Washington, June 1994.
- [79] Jokanović, S.: Geometrijsko modeliranje, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2006, ISBN 99938-39-12-4.
- [80] Seo, J., Lee, H.-C., Park, S.: Reconstruction of a Composite Surface by Reverse Engineering Techniques, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, Vol. 17, No. 9, pp. 639-643, ISSN 0268-3768.

- [81] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Halstead, M., Jin, H., McDonald, J., Schweitzer, J., Stuetzle, W.: Piecewise Smooth Surface Reconstruction, Conference Proceedings ACM SIGGRAPH 94, Orlando, Florida, USA, July 24-29, 1994, pp. 295-302, ISBN 0-89791-668-9.
- [82] Thompson, W. B., de St. Germain, H. J., Henderson, T. C., Owen, J. C.: Constructing High-Precision Geometric Models from Sensed Position Data, Proceedings of ARPA Image Understanding Workshop, 12-15 February 1996, Palm Springs, California, USA, ISBN 9781558604018.
- [83] Silvère, G., Puech, W., Bénéière, R., Subsol, G.: CAD-driven Pattern Recognition in Reverse Engineered Models, Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - VISIGRAPP 2019, 25-27 February 2019, Prague, Czech Republic, Vol. 1, pp. 244-254, ISBN 978-989-758-354-4.
- [84] Hur, S.-M., Kim, H.-C., Lee, S.-H.: STL File Generation with Data Reduction by the Delaunay Triangulation Method in Reverse Engineering, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, Vol. 19, No. 9, pp. 669-678, ISSN 0268-3768.
- [85] Gao, J., Chen, X., Zheng, D., Yilmaz, O., Gindy, N.: Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application, Advances in Engineering Software, 2006, Vol. 37, No. 9, pp. 592–600, ISSN 0965-9978.
- [86] Fischer, A., Park, S.: 3D Scanning and Level of Detail Modelling for Design and Manufacturing, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1998, Vol. 47, No. 1, pp. 91-94, ISSN 0007-8506.
- [87] Liu, Z., Wang, L., Lu, B.: Integrating cross-sectional imaging based reverse engineering with rapid prototyping, Computers in Industry, 2006, Vol. 57, No. 2, pp. 131–140, ISSN 0166-3615.
- [88] Stević, M.: Povećanje tačnosti merenja numerički upravljanih mernih mašina, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
- [89] Hoffman, J.: Handbuch der Meßtechnik, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 3. edition, 2007, ISBN 978-3446407503.

-
- [90] EvalViewer, Alias Systems Corp., 210 King Street East, Toronto, Canada, 2003.
- [91] Hadživuković, S.: Statistički metodi, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 1991.
- [92] Stankov, J., Iskrin, B., Vasić, S.: Kontrola kvaliteta u proizvodnji, Univerzitet u Novom sadu, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 1990.
- [93] Kus, A.: Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications, Sensors, 2009, Vol. 9, No. 3, pp. 1967-1979, ISSN 1424-8220.
- [94] Carbone, V., Carocci, M., Savio, E., Sansoni, G. De Chiffre, L.: Combination of a Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, Vol. 17, No. 4, pp. 263-271, ISSN 0268-3768.
- [95] Liu, D., Chen, J., Shangguan, J.: A study on data reduction in Reverse Engineering, Proceedings of the International Technology and Innovation Conference 2006, 6-7 November 2006, Hangzhou, China, pp. 852 -855, ISBN: 0-86341-696-9.
- [96] Budak I., Hodolič J., Soković M.: Development of a programme system for data-point pre-processing in Reverse Engineering, Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 162, pp. 730-735, ISSN 0924-0136.
- [97] Bonny, J-M., Renou, J-P.: Euclidian distance-weighted smoothing for quantitative MRI: application to intervoxel anisotropy index mapping with DTI, Journal of Magnetic Resonance, 2002, Vol.159, No.2, pp. 183-189, ISSN 1090-7807.
- [97] Lee, K.H., Woo, H.: Use of Reverse Engineering Method for Rapid Product Development, Computers and Industrial Engineering, 1998, Vol. 35, No 1-2, pp. 21-24, ISSN 0360-8352.
- [98] Fischer, A.: Multi-Level of Detail Models for Reverse Engineering in Remote CAD Systems, Engineering with Computers, 2002, Vol. 18, No. 1, pp.50–58, ISSN 0177-0667.

- [99] Martin, R.R., Stroud, I.A., Marshall, A.D.: Data reduction for reverse engineering, RECCAD, Deliverable Document 1, Data Reduction Methods for Reverse Engineering 743, COPERUNICUS project, No. 1068, Computer and Automation Institute of Hungarian Academy of Science, January 1996.
- [100] Jun, Y., Raja, V., Park, S.: Geometric Feature Recognition for Reverse Engineering using Neural Networks, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, Vol.17, No. 6, pp. 462-470, ISSN 0268-3768.
- [101] Chen, Y.H., Wang, Y.Z.: Genetic algorithms for optimized re-triangulation in the context of reverse engineering, *Computer-Aided Design*, 1999, Vol. 31, No. 4, pp. 261–271, ISSN 0010-4485
- [102] Xiaodong, T., Yuexian, W., Xionghui, Z., Xueyu, R.: Mesh Simplification Based on Super-Face and Genetic Algorithm in Reverse Engineering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, Vol. 20, No. 4, pp. 303–312, ISSN 0268-3768.
- [103] Philippe, J.M., Bernard, A., Ris, G.: Fuzzy logic applied to surface modeling from point clouds, *Proceedings of SPIE, Vol. 3520, Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection IV*, 1998, pp. 182-193.
- [104] Chang, M., Lin, P.P.: On-line free form surface measurement via a fuzzy-logic controlled scanning probe, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, Vol. 39, No. 4, pp. 537–552, ISSN 0890-6955
- [105] Galetto, M., Vezzetti, E.: Reverse engineering of free-form surfaces: A methodology for threshold definition in selective sampling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, Vol. 46, No. 10, pp. 1079-1086, ISSN 0890-6955.
- [106] Kukulj, D.: *Sistemi zasnovani na računarskoj inteligenciji, Edicija: Tehničke nauke - Monografije, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka*, 2007, ISBN 978-86-7892-068-4.