

Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka

DIZAJN I IZDRADA IMPLANATA I MEDICINSKIH MODELA

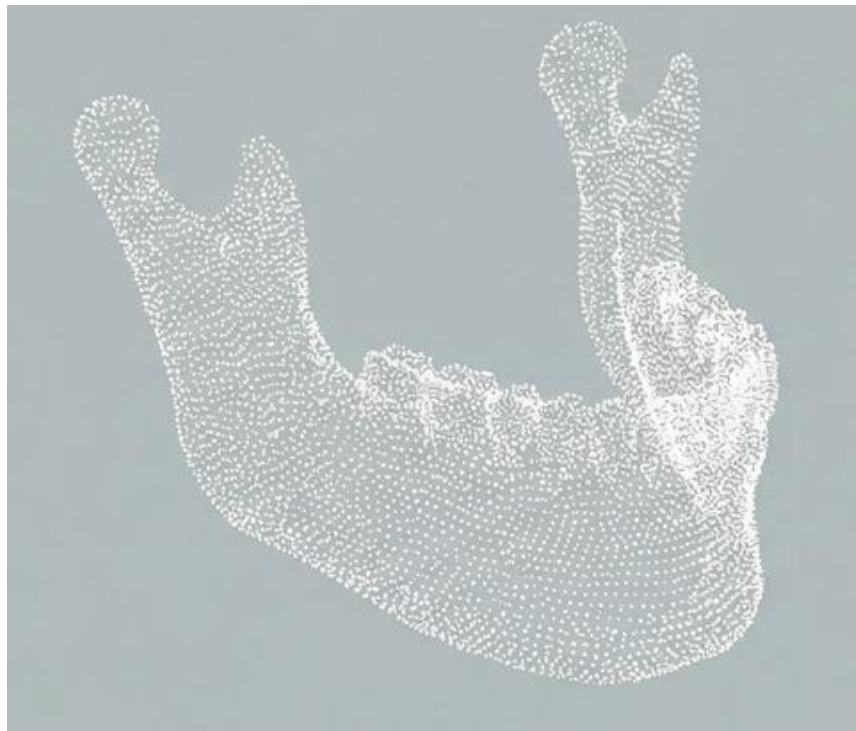
PREPROCESIRANJE REZULTATA 3D DIGITALIZACIJE

Predavanje 5

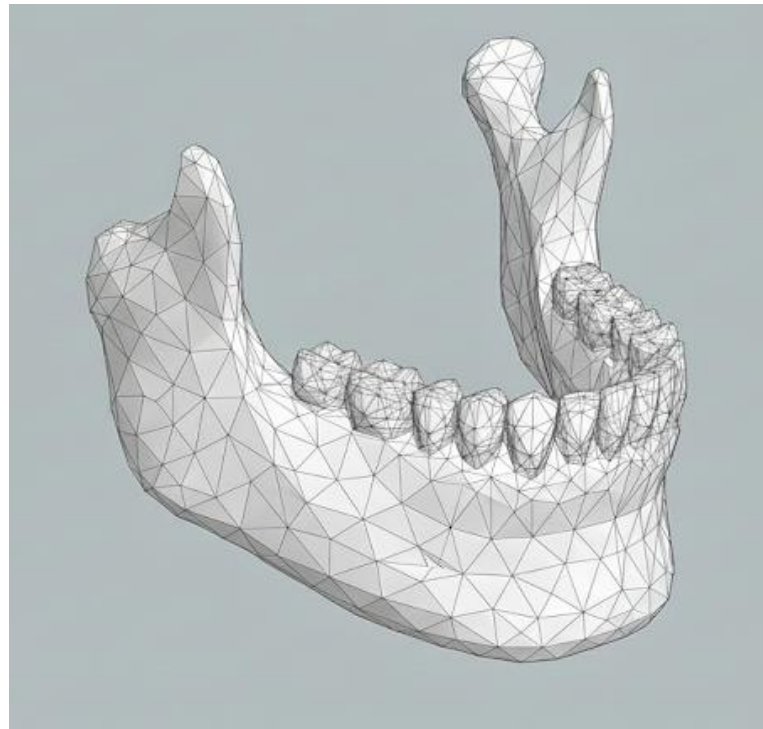
Doc. dr Željko Santoši

Uvodne napomene

Digitalno predstavljanje 3D objekata i prostora može se izvršiti preko :



oblaka tačaka



**poligonalne mreže
(površinski model)**



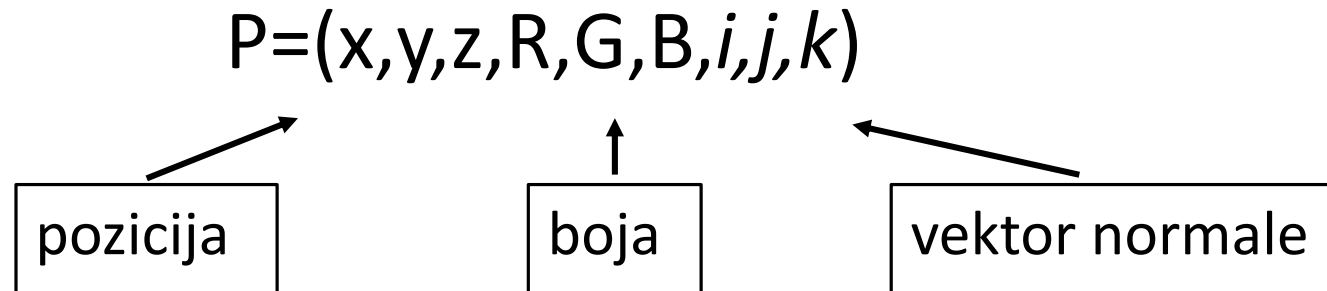
**voksela
(zapreminski model)**

Oblak tačaka

Predstavlja skup pojedinačnih tačaka definisanih u trodimenzionalnom Euklidskom prostoru, gde je svaka tačka nezavisna jedna od druge i svaka tačka je definisana preko tri koordinate koje čine poziciju tačke.

$$P=(x,y,z)$$

Pored pozicije, svaka tačka može nositi informacije o boji (RGB), intenzitetu refleksije ili normali (smeru površine).



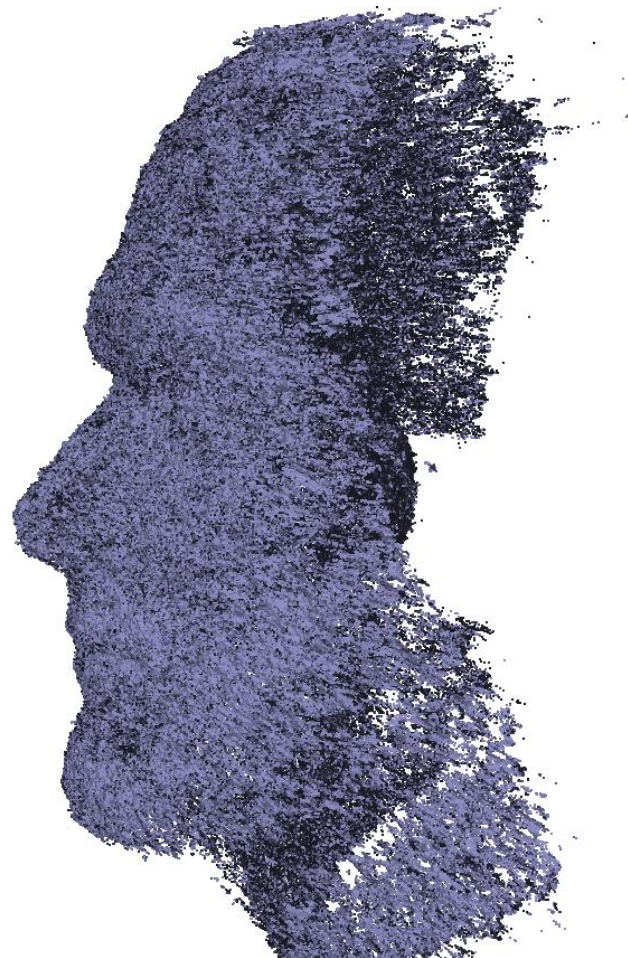
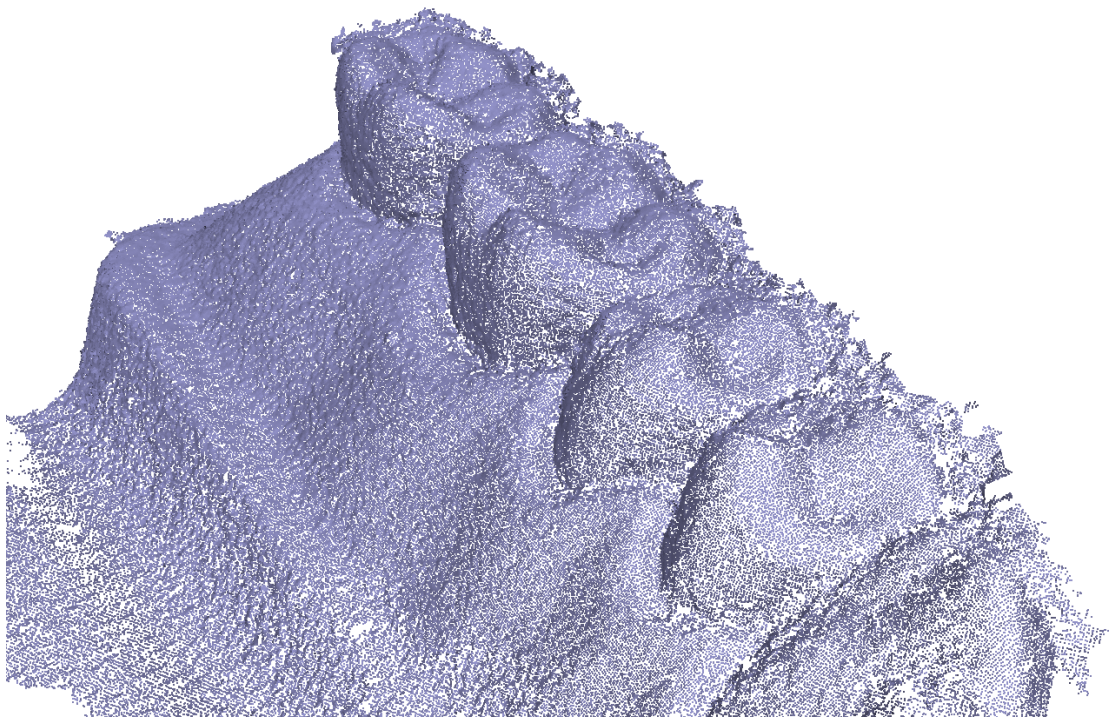
Oblak tačaka

Nakon procesa 3D digitalizacije javlja se veliki broj praktičnih problema vezanih za oblak tačaka, kao što su:

- prisustvo šuma, odnosno grešaka merenja i pikova,
- (pre)veliki broj (suvišnih) tačaka,
- neorganizovanost podataka-tačaka u oblaku tačaka,
- nepotpunost oblaka tačaka itd.

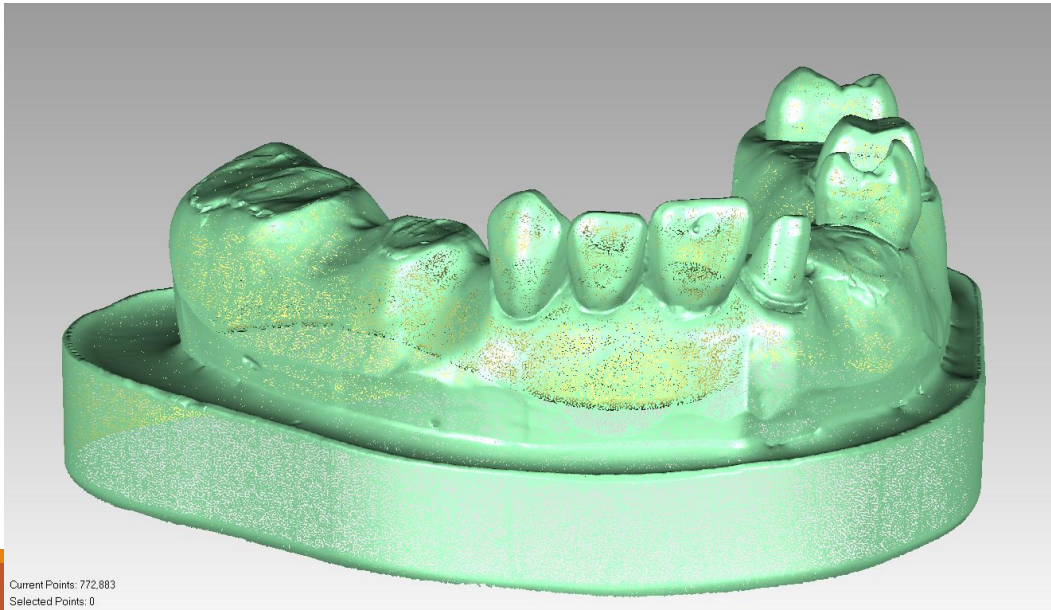
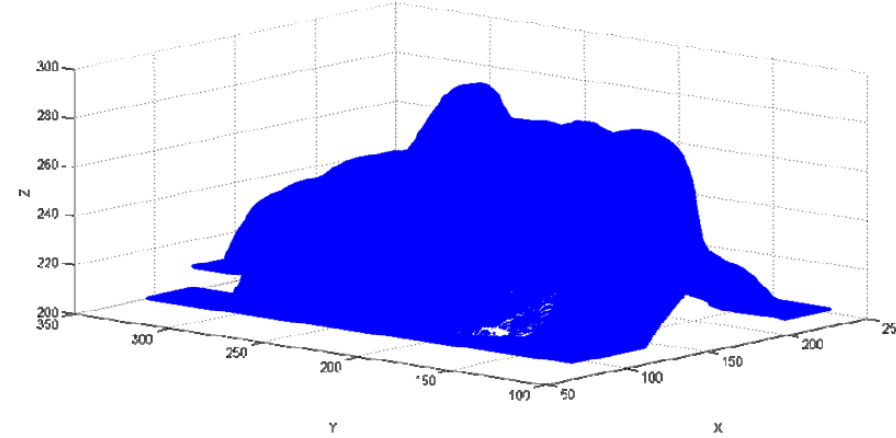
Osnovna posledica navedenih problema jeste neadekvatni 3D model, koji ne odgovara originalnom objektu, zbog čega je neophodno obezbediti kvalitetno **preprocesiranje** podataka.

Primer: prisustvo šuma, odnosno grešaka merenja i pikova

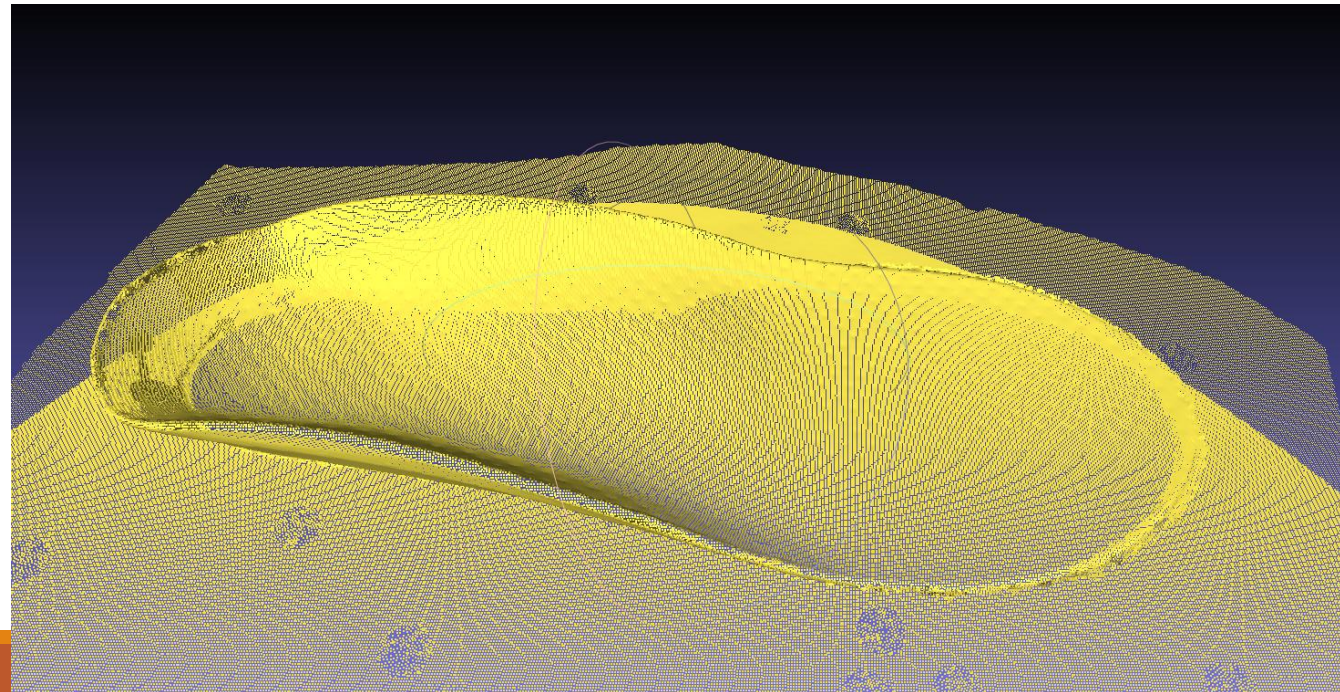


Tipične greške
merenja kod
fotogrametrijske
3D digitalizacije

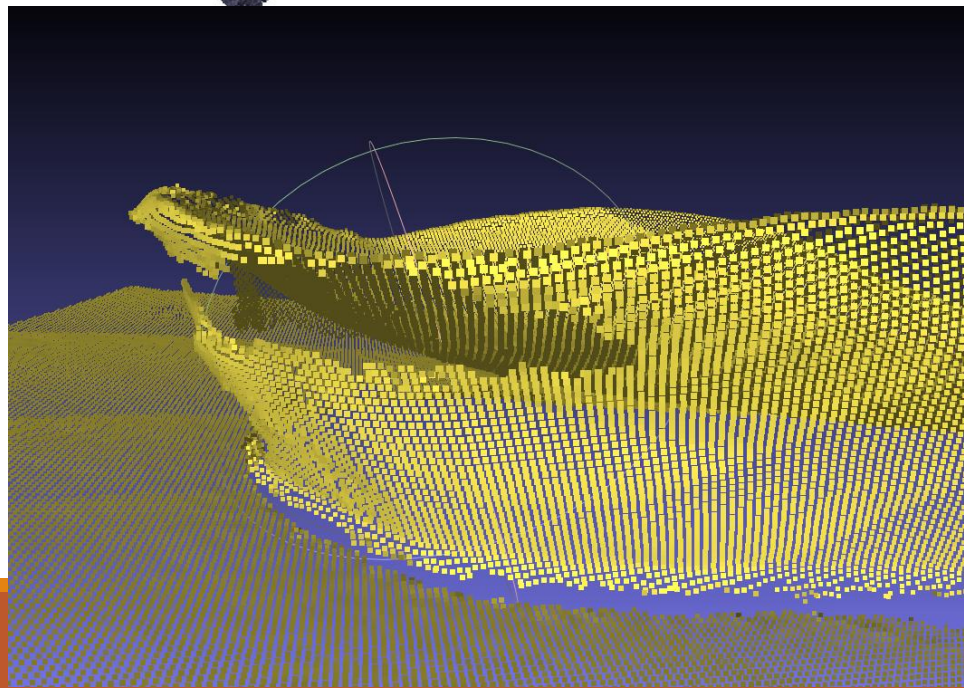
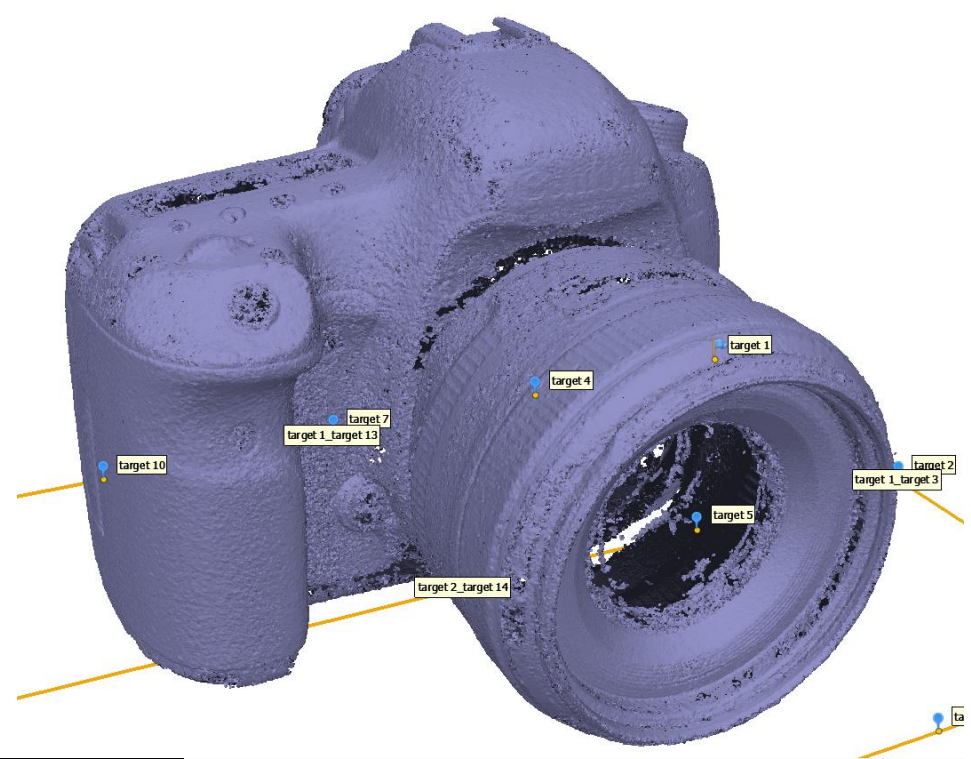
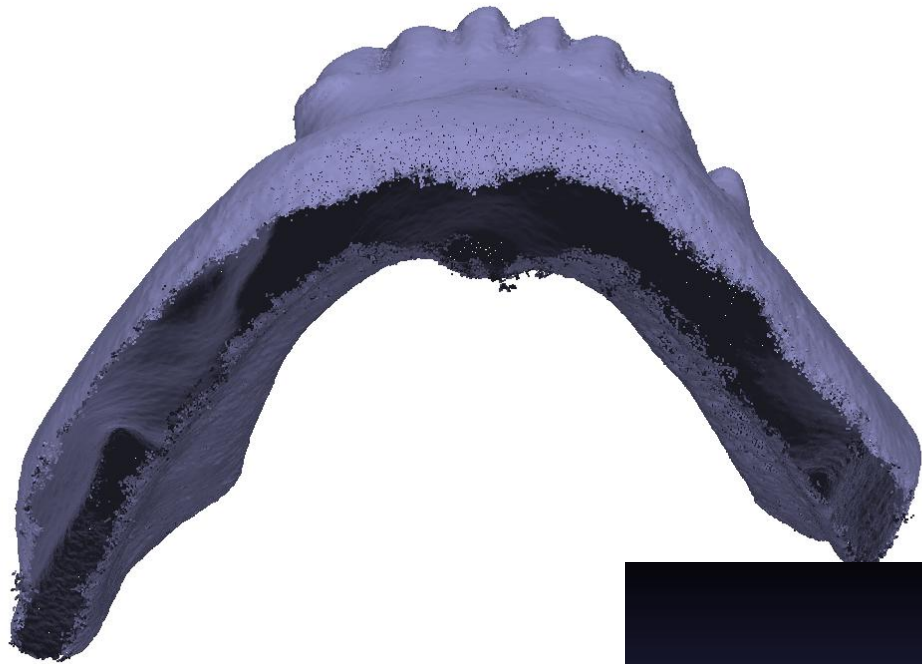
Primer: (pre)veliki broj (suvišnih) tačaka



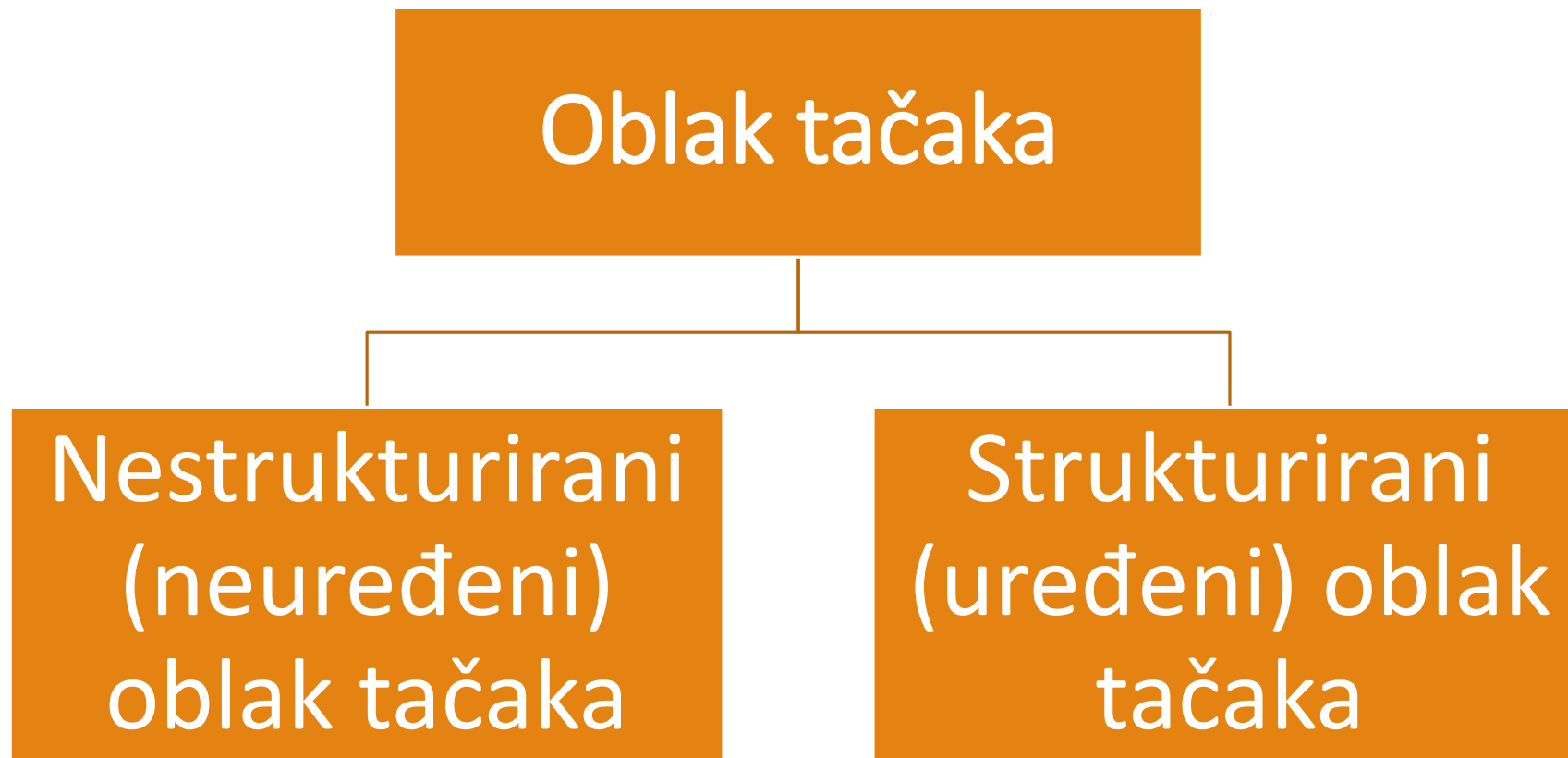
Current Points: 772.883
Selected Points: 0



Primer:nepotpunost podataka



Vrste oblaka tačka



Faze preprocesiranja oblaka tačaka

Kao osnovne faze procesa preprocesiranja oblaka tačaka, mogu se izdvojiti:

- 1) Strukturiranje oblaka tačaka;**
- 2) Filtriranje podataka u oblaku tačaka;**
- 3) Segmentacija podataka u oblaku tačaka;**
- 4) Registracija oblaka tačaka i**
- 5) Redukovanje podataka u oblaku tačaka.**

Nestrukturirani (neuređeni) oblak tačaka

Karakteristike neuređenog oblaka tačaka:

- Oblaci tačaka dobijeni metodama 3D digitalizacije su uglavnom nestrukturirani 3D podaci (sa nekoliko izuzetaka).
- Nema inteligencije između tačaka, nema pravila gde će se koja tačka nalaziti u 3D prostoru, ne postoji obrazac slaganja tačaka.
- Osim koordinata mogu da sadrže i dodatne informacije kao što su podaci o vektorima normale i boji (RGB).

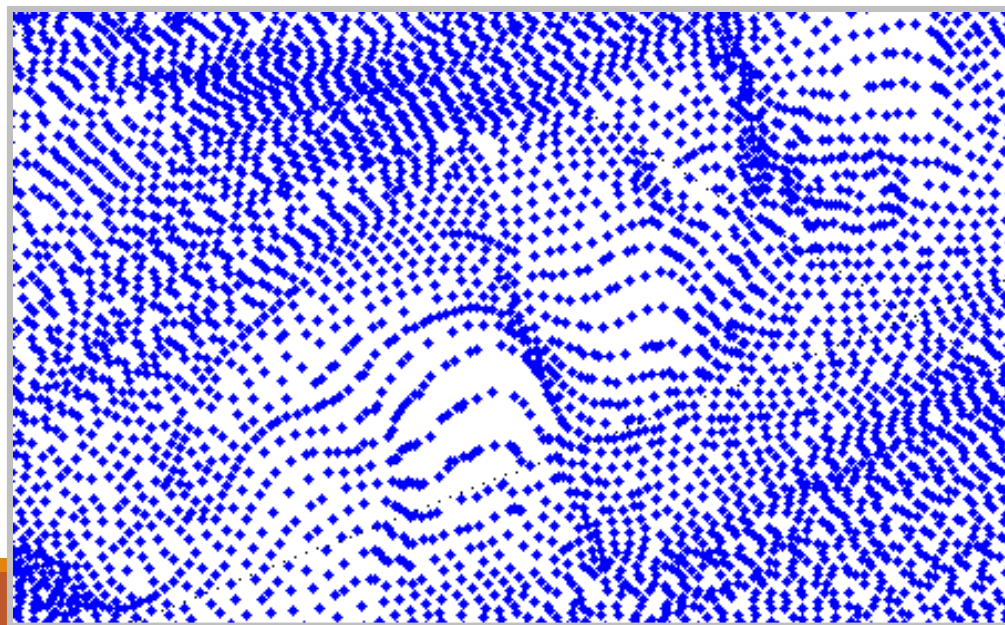
Strukturirani (uređeni) oblaka tačaka

Strukturiranost obuhvata dva nivoa uređenosti:

1. nivo: **uređenost po 1 osi** u okviru oblaka tačaka – tačke su grupisane **po skeniranim linijama** (paralelnim poprečnim presecima) i

2. nivo: **Uređenost po 2 ose** – **po i u okviru skeniranih linija** (redni broj tačke u datoteci odgovara poziciji u okviru skenirane linije).

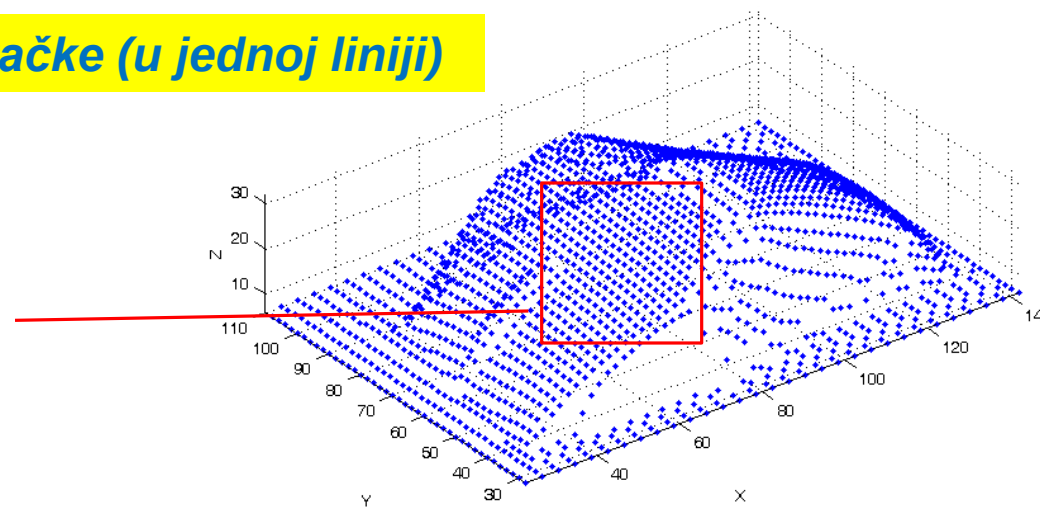
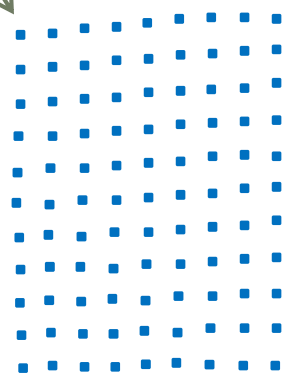
Osim koordinata mogu da sadrže i dodatne informacije kao što su podaci o vektorima normale i boji (RGB).



Strukturirani (uređeni) oblaka tačka

1. Osa – skenirane tačke (u jednoj liniji)

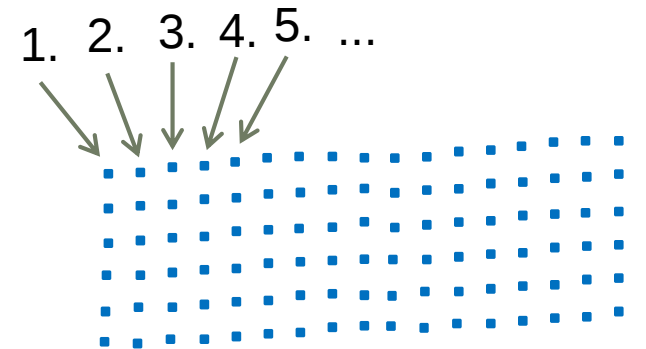
2. Osa – skenirane linije



Strukturirani (uređeni) oblaka tačka

Datoteka u TXT formatu zapisa sa uređenim oblakom tačka

	x	y	z
1.	-62.1	-100.5	22.498
2.	-19.7	-100.5	22.499
3.	-62.1	-100.4	22.498
4.	-19.7	-100.4	22.499
5.	-62.1	-100.3	22.498
...	-19.7	-100.3	22.499
	-62.1	-100.2	22.498
	-19.7	-100.2	22.499
	-62.1	-100.1	22.498
	-19.7	-100.1	22.499
	-62.1	-100	22.498
	-19.7	-100	22.499
	-62.1	-99.9	22.498
	-19.7	-99.9	22.499
	-62.1	-99.8	22.498
	-19.7	-99.8	22.499



Strukturirani (uređeni) oblaka tačaka

Datoteka u IBL formatu zapisa sa uređenim oblakom tačaka

IBL format je razvijen od strane PTC-a za potrebe Pro/SCAN-TOOLS modula.

Struktura datoteke IBL formata je složenija od prethodne, a čine je sledeće celine:

- 1) Zaglavlje datoteke,
- 2) Identifikacija sekcija
- 3) Identifikacija poprečnih-presečnih krivih i
- 4) Koordinate (x, y, z) tačaka numerisane u okviru pojedinačnih krivih.

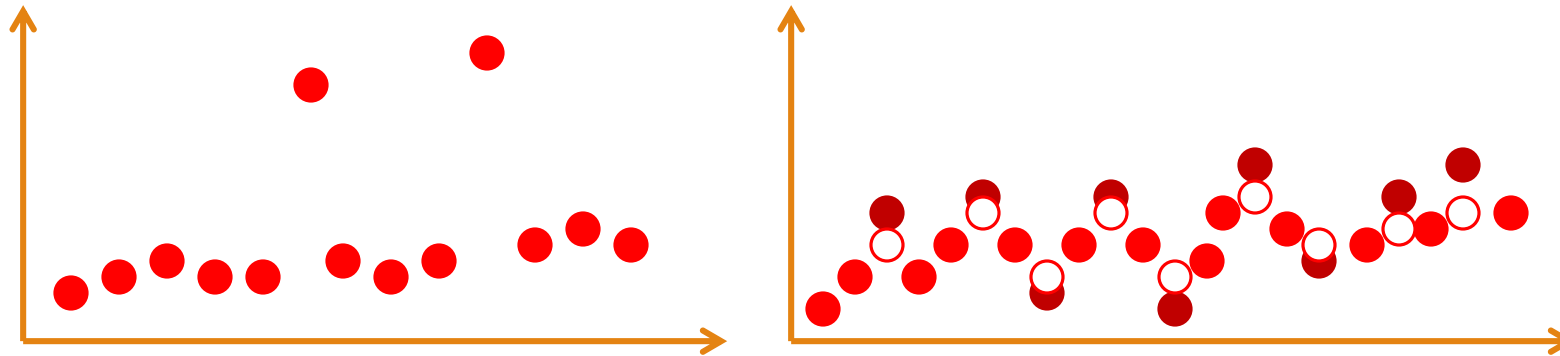
zaglavlje datoteke {
redni broj krive {

```
Open Index ArcLength  
Begin section ! 1  
Begin curve ! 1  
  
1 23. 28. 5.998  
2 24.983 28. 5.998  
3 26.967 28. 5.998  
4 28.95 28. 5.998  
5 30.933 28. 5.998  
6 32.917 28. 5.998  
7 34.9 28. 5.998  
8 36.883 28. 5.998  
9 38.867 28. 5.998  
10 40.85 28. 5.998  
11 42.833 28. 5.998  
12 44.817 28. 5.998  
13 46.8 28. 5.999  
14 48.783 28. 5.999  
15 50.767 28. 5.999  
16 52.75 28. 5.999  
17 54.733 28. 5.999
```

redni broj tačke u okviru krive { x y z

Filtriranje podataka-tačaka

Neki od češćih problema vezanih za oblak-tačaka su prisustvo impulsnog šuma i neuravnnjenost tačaka u okviru niza podataka.



Prvi korak u okviru pre-procesiranja je **filtriranje**, čije su dve osnovne funkcije:

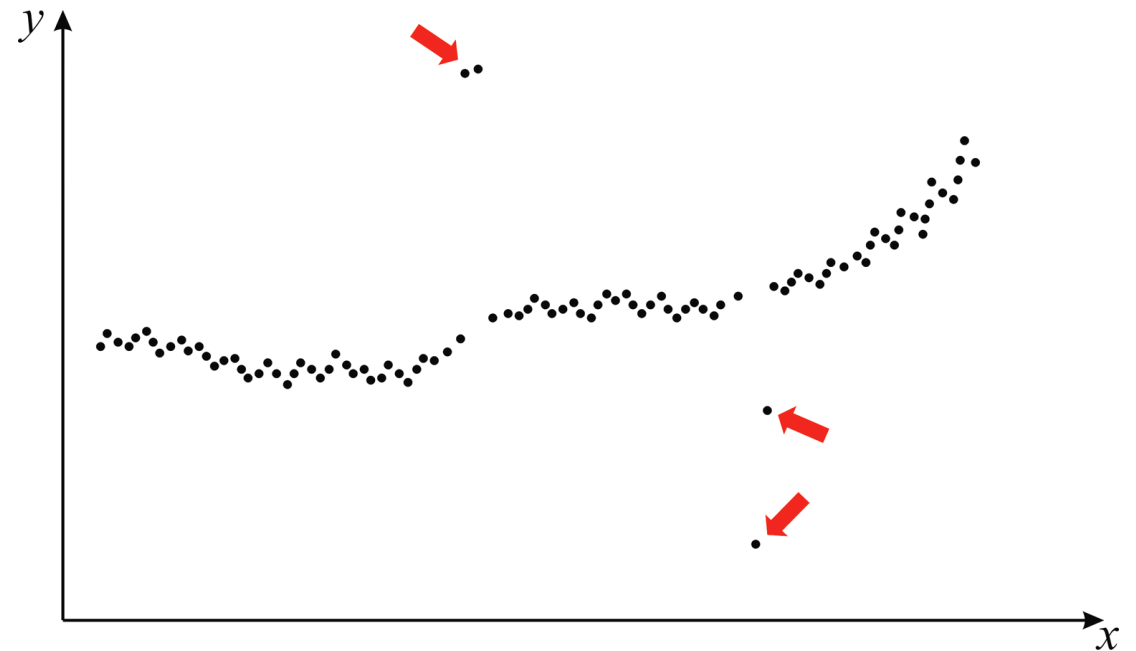
- 1) **filtriranje** (eliminisanje) impulsnog šuma i
- 2) uravnavanje (glačanje) podataka-tačaka.

Filtriranje impulsnog šuma

Cilj ove faze je eliminisanje grešaka merenja u vidu impulsnog šuma, odnosno tzv. "outlier" tačaka (tačaka-izvan-opsega).

U tu svrhu, razvijeno je više metoda, od kojih se, kao češće primenjivane u praksi, mogu izdvojiti:

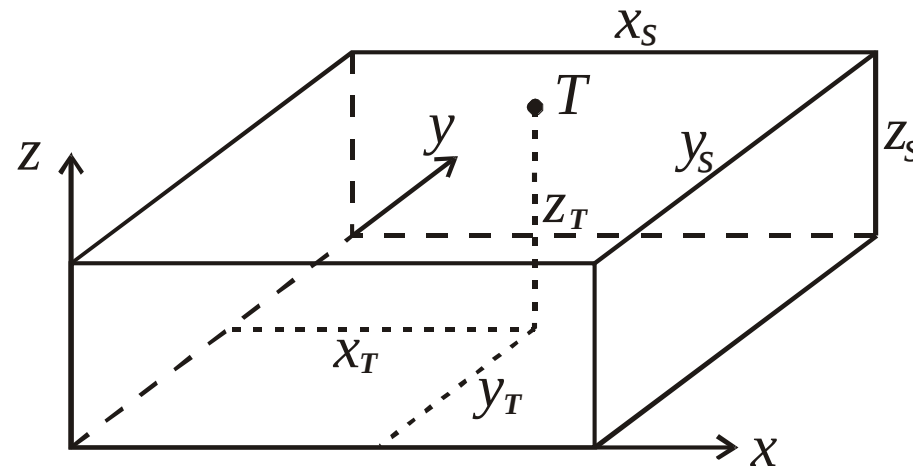
1. Metoda zapreminskog filtriranja
2. Metoda segmentiranog regiona
3. Metoda ugla
4. Metoda medijane



Metoda zapreminskog filtriranja

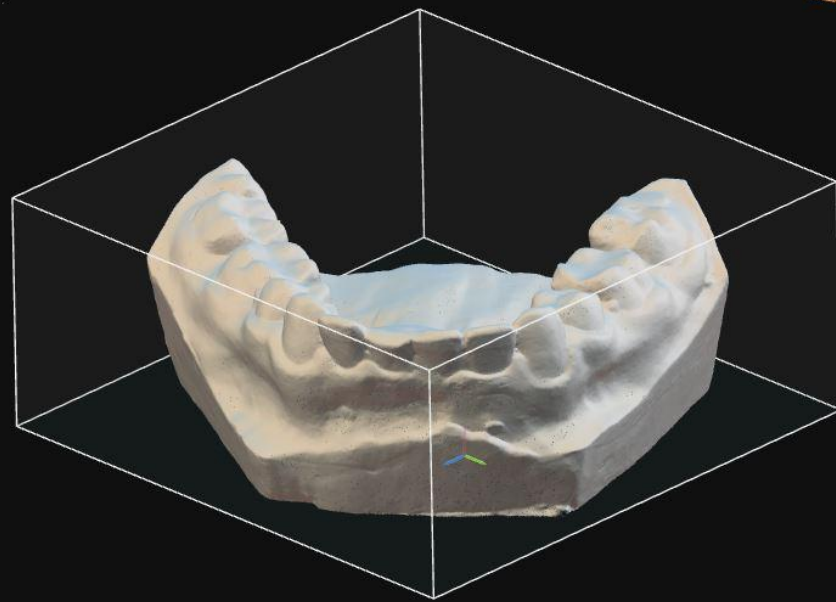
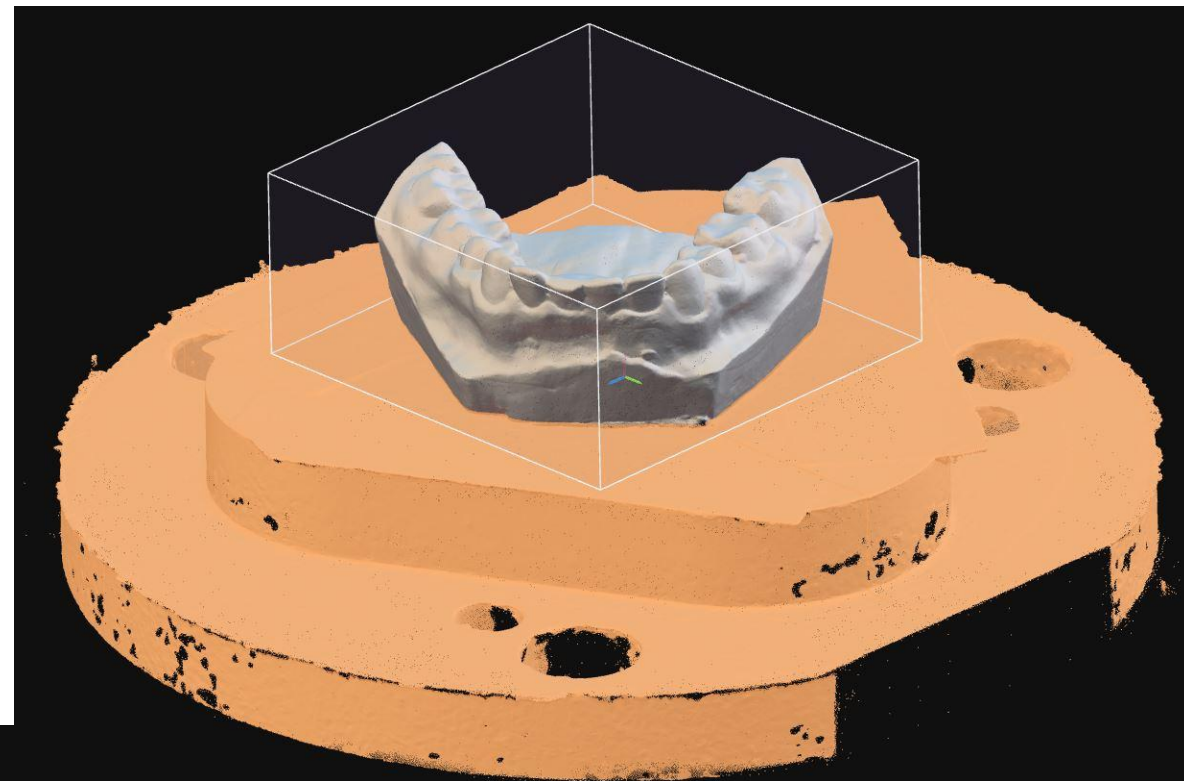
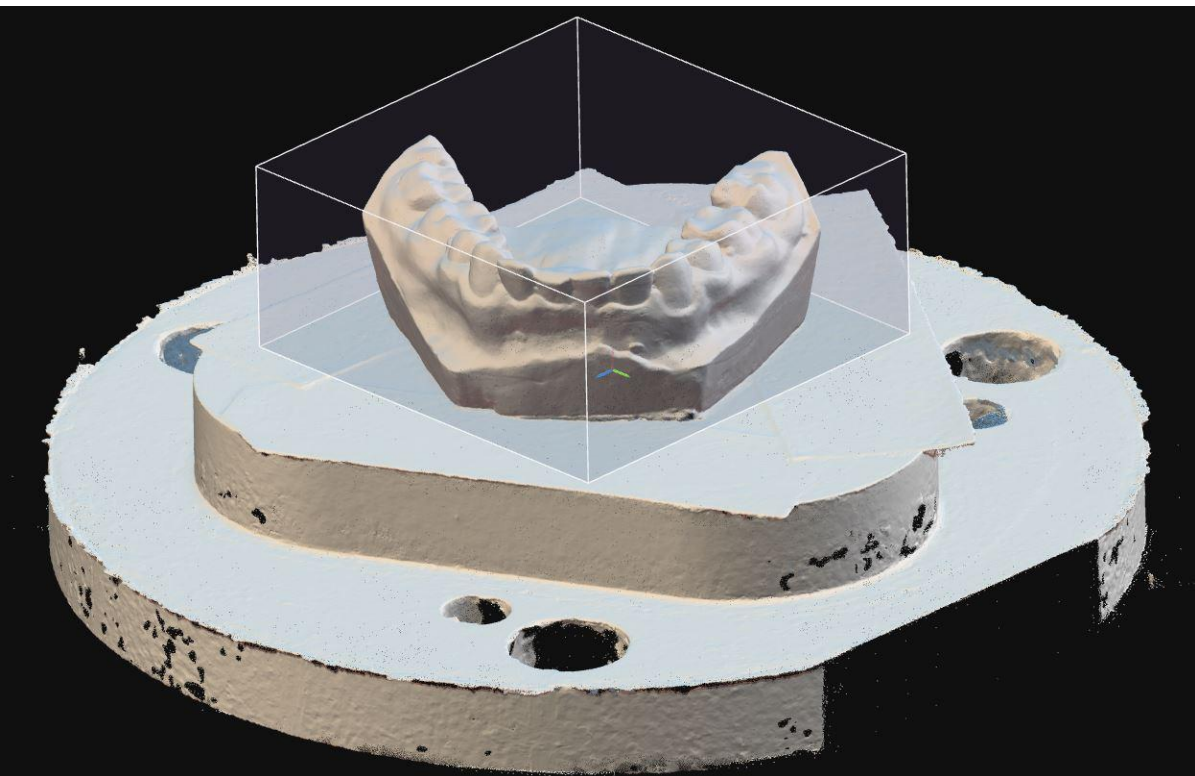
Primenom ove metode se, iz rezultata 3D digitalizacije, odstranjuju tačke koje leže izvan područja skeniranja.

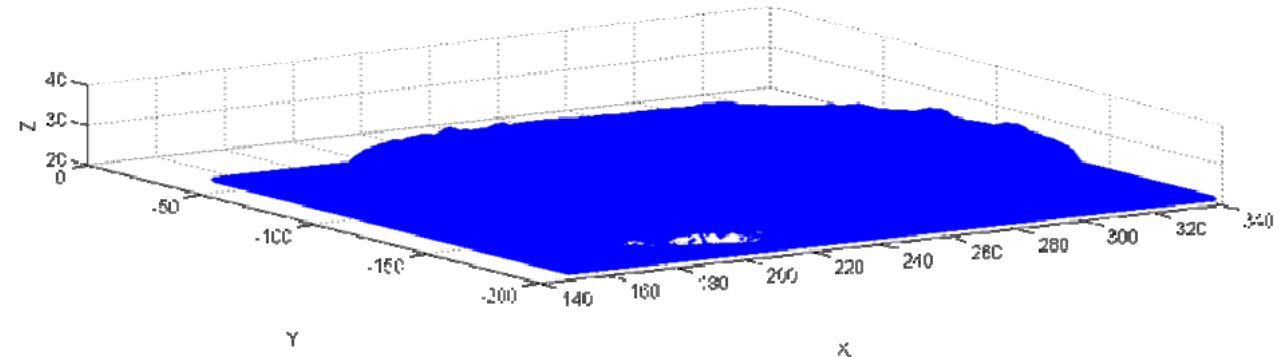
Princip metode je zasnovan na formiranju pravougaone zapremine, definisane dužinom i širinom skeniranja (x i y-ose) i visinom skeniranja, odnosno realnom visinom skeniranog objekta (z-osa).



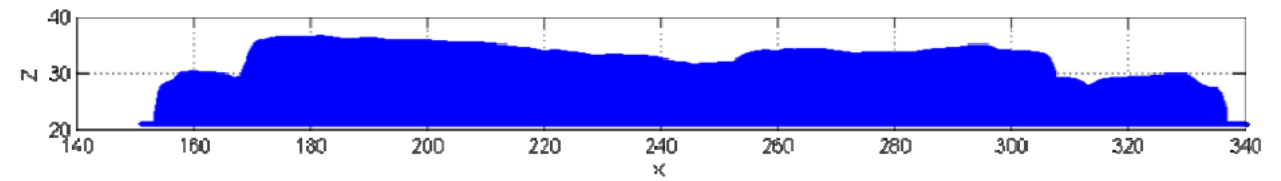
Podaci-tačke koji se nađu izvan ove zapremine smatraju se za greške merenja i eliminišu se.

Ova metoda spada u grublje i primenjuje se za eliminisanje ekstremnih grešaka, koje se mogu javiti u rezultatu 3D digitalizacije.

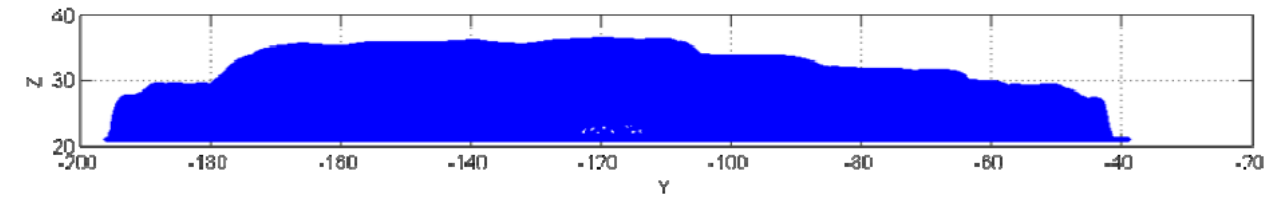




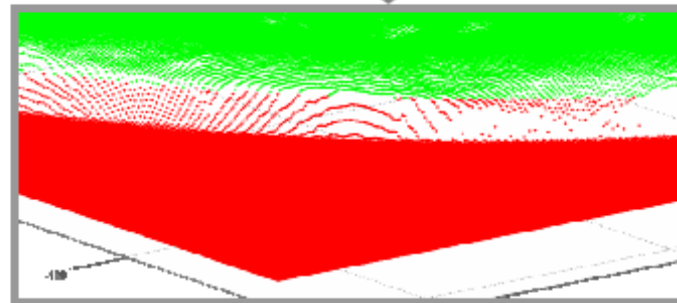
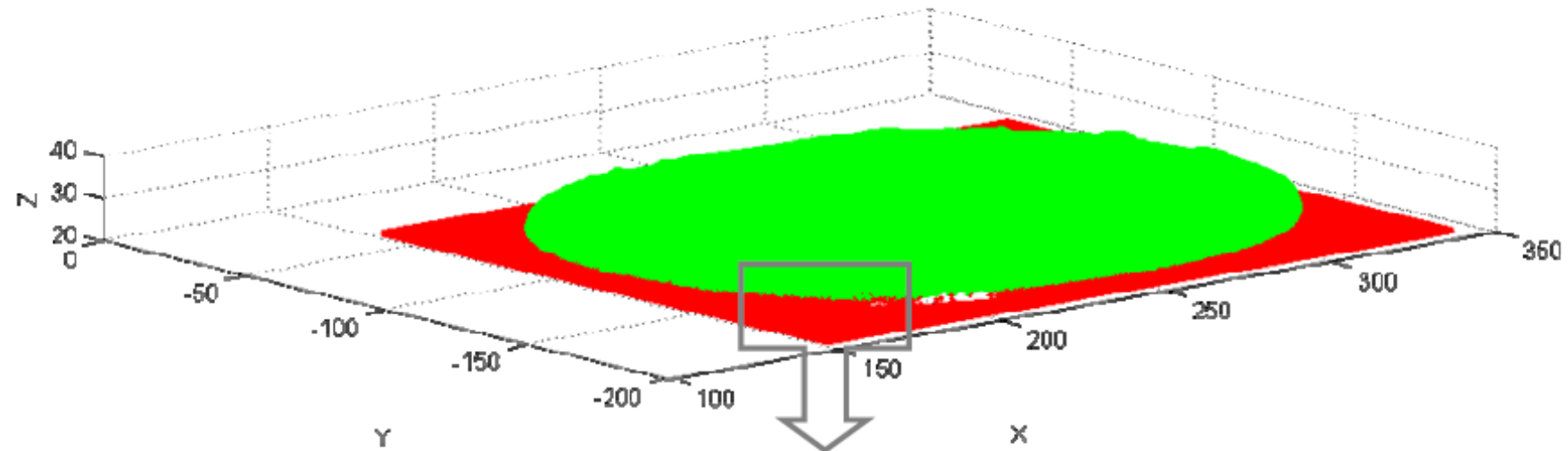
a) Isometric projection



b) Orthogonal projection in x-z plane



c) Orthogonal projection in y-z plane

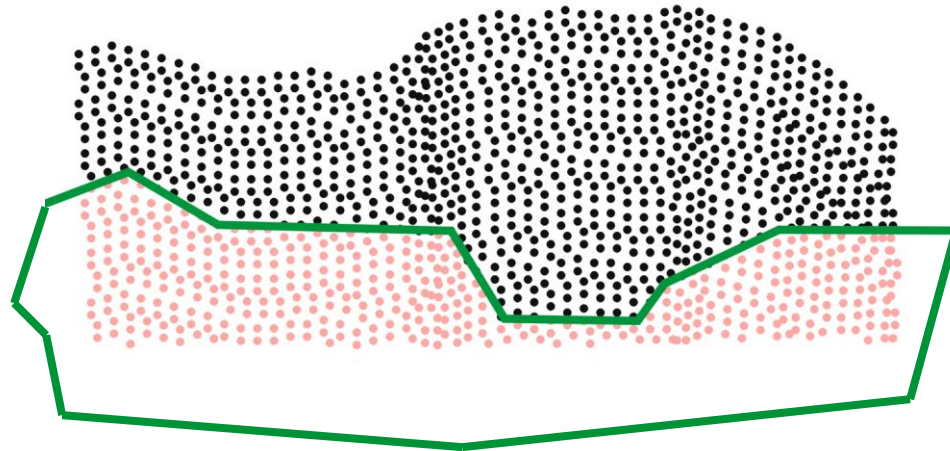


- filtered points
- retained points

Metoda segmentiranog regiona

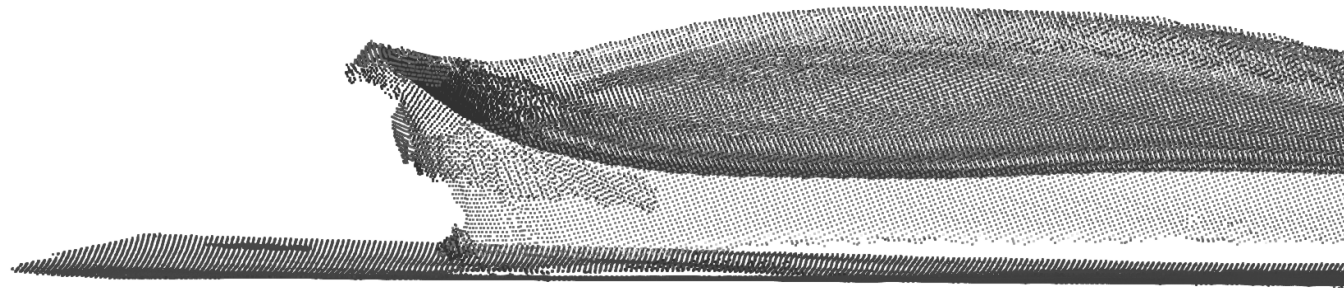
Ova metoda je “sofisticiranija” varijanta prethodne i podrazumeva odvajanje (separaciju) delova oblaka-tačaka koji predstavljaju greške merenja (ili neželjene tačke) pomoću filter linije.

Najčešće varijante filter linija su “izlomljene” linije koje čine pravolinijski segmenti.

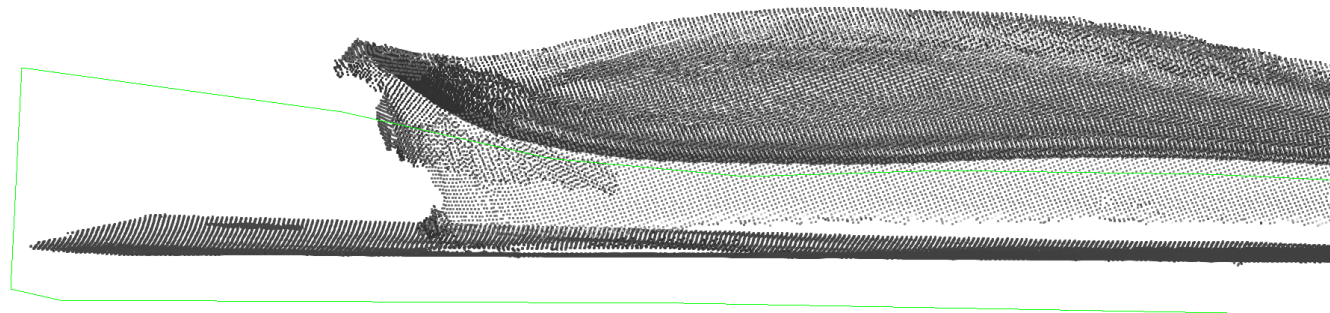


Nakon kreiranja filter linije, eliminišu se tačke koje se nalaze unutar definisang regiona.

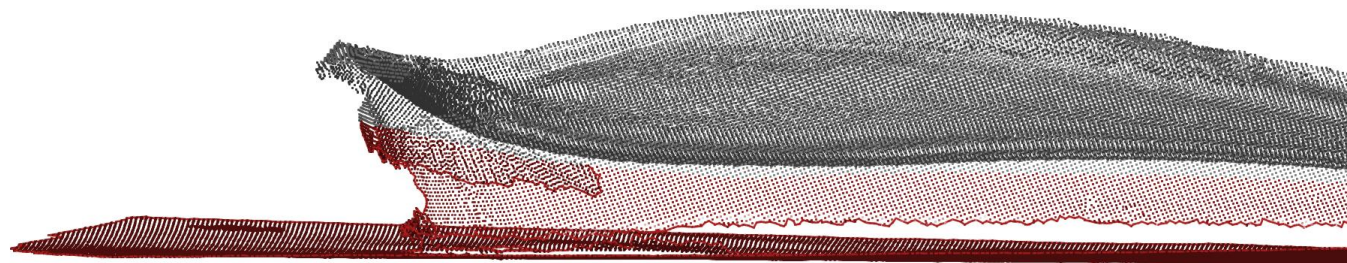
Nefiltriran oblak tačaka



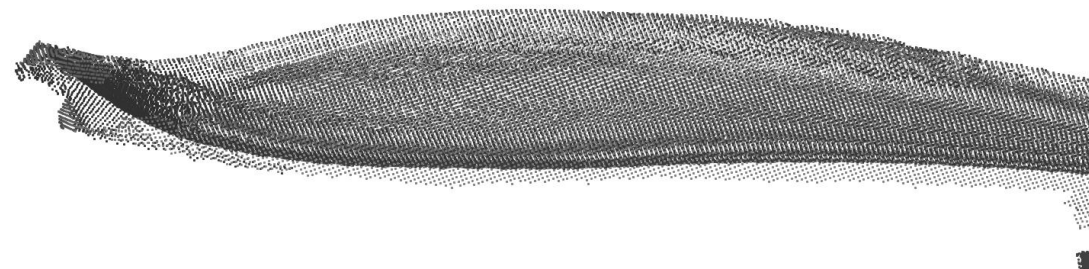
Definisana segmentirana linija

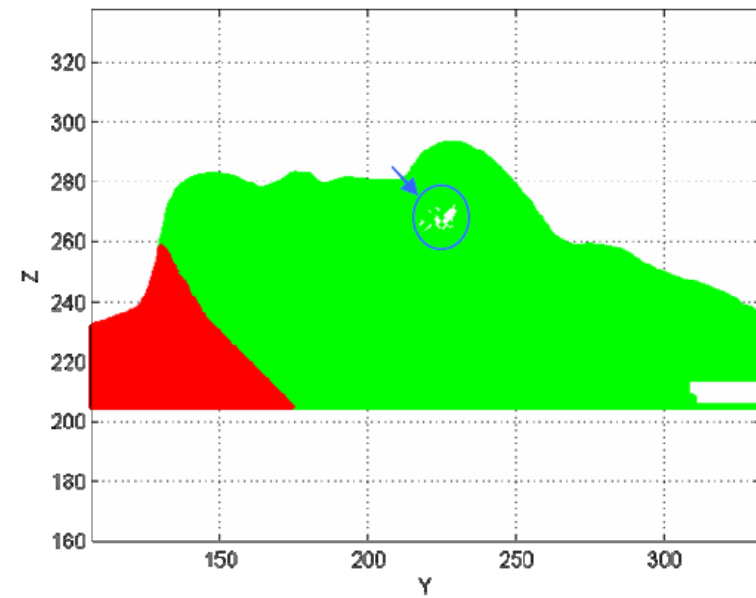
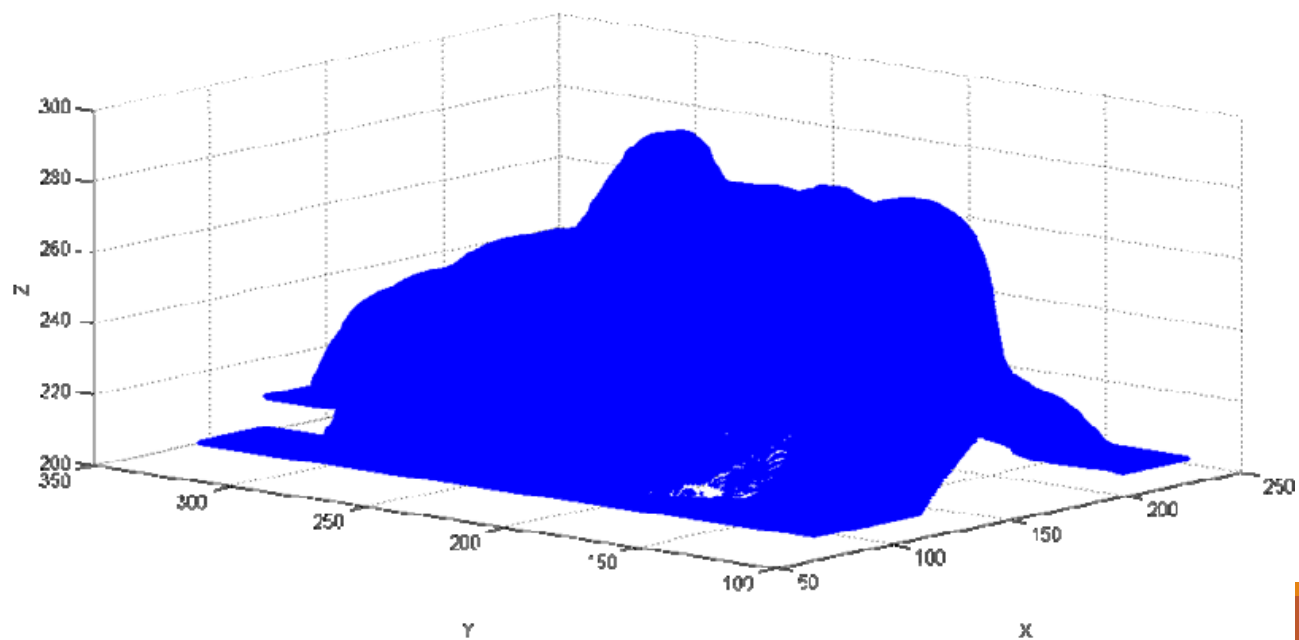


Selektovane tačke
unutar segmentirane linije

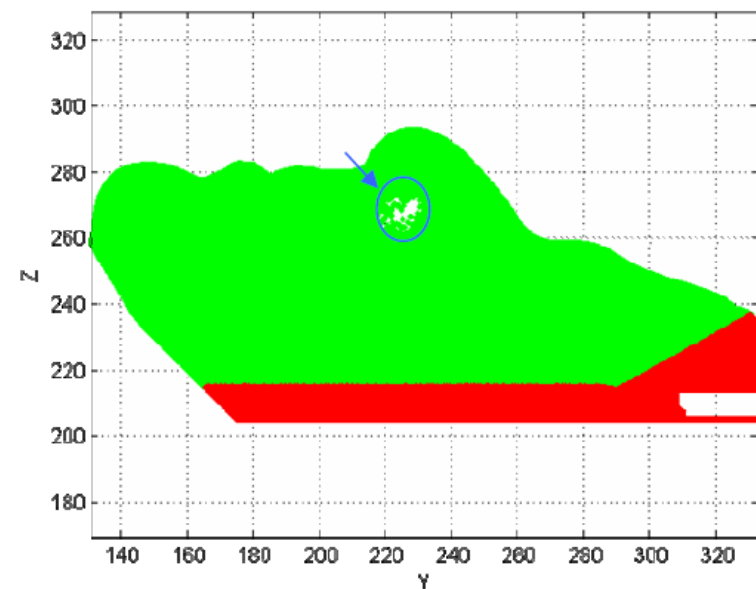


Filtriran oblak tačaka





a) 1st iteration



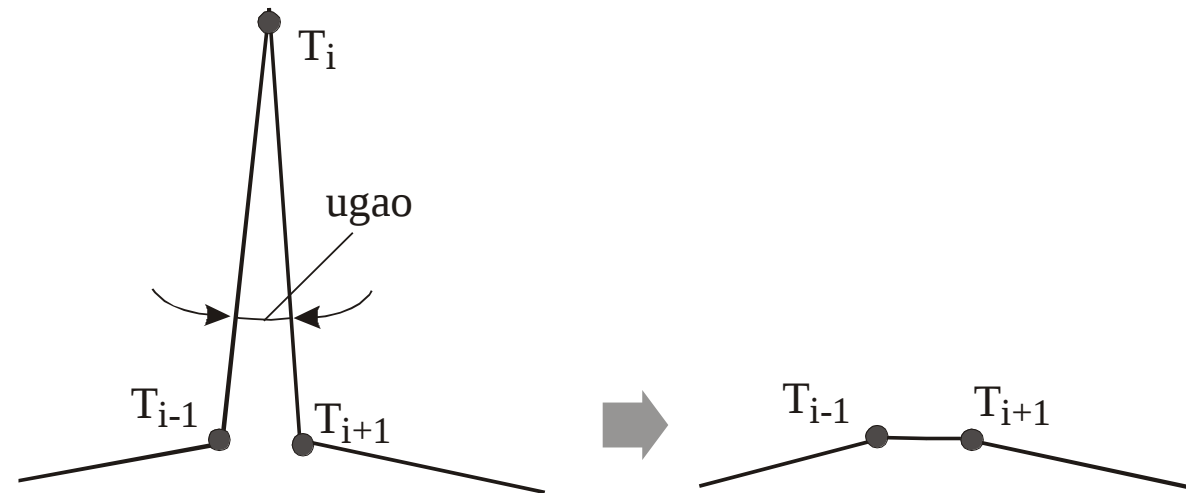
b) 2nd iteration

- filtered points
- retained points

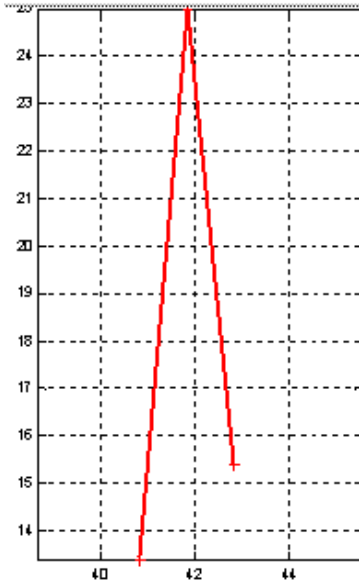
Metoda ugla

Ova metoda se primenjuje za uklanjanje tačaka-izvan-opsega iz niza tačaka u okviru sekcijskih preseka.

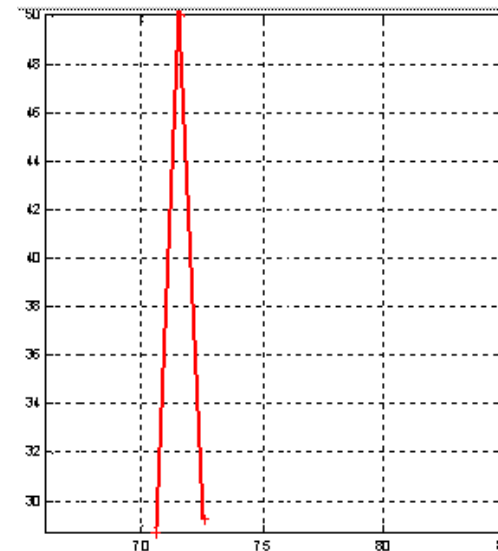
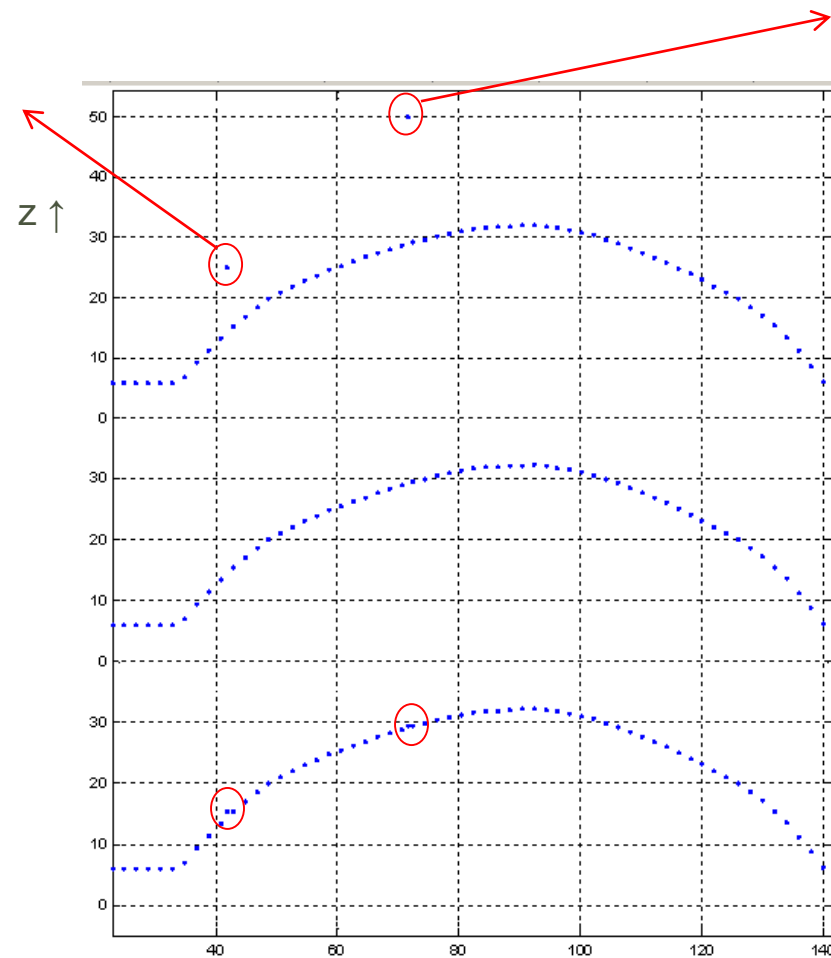
Kod odstranjivanja ovih tačaka, dve susedne tačke analiziranoj tački se povezuju pravom linijom, a kao kriterijum za odlučivanje da li se radi o tački-izvan-opsega, primenjuje se ugao koji čine posmatrana tačka (T_i) i njoj susedne dve (T_{i-1}) i (T_{i+1}).



Ukoliko je taj ugao manji od minimalno dozvoljenog, zadatog od strane korisnika (neka vrednost koja se primenjuje u praksi je oko **10-15°**) posmatrana tačka se eliminiše.



Preprocesiranje podataka Eliminisanje impulsnog šuma



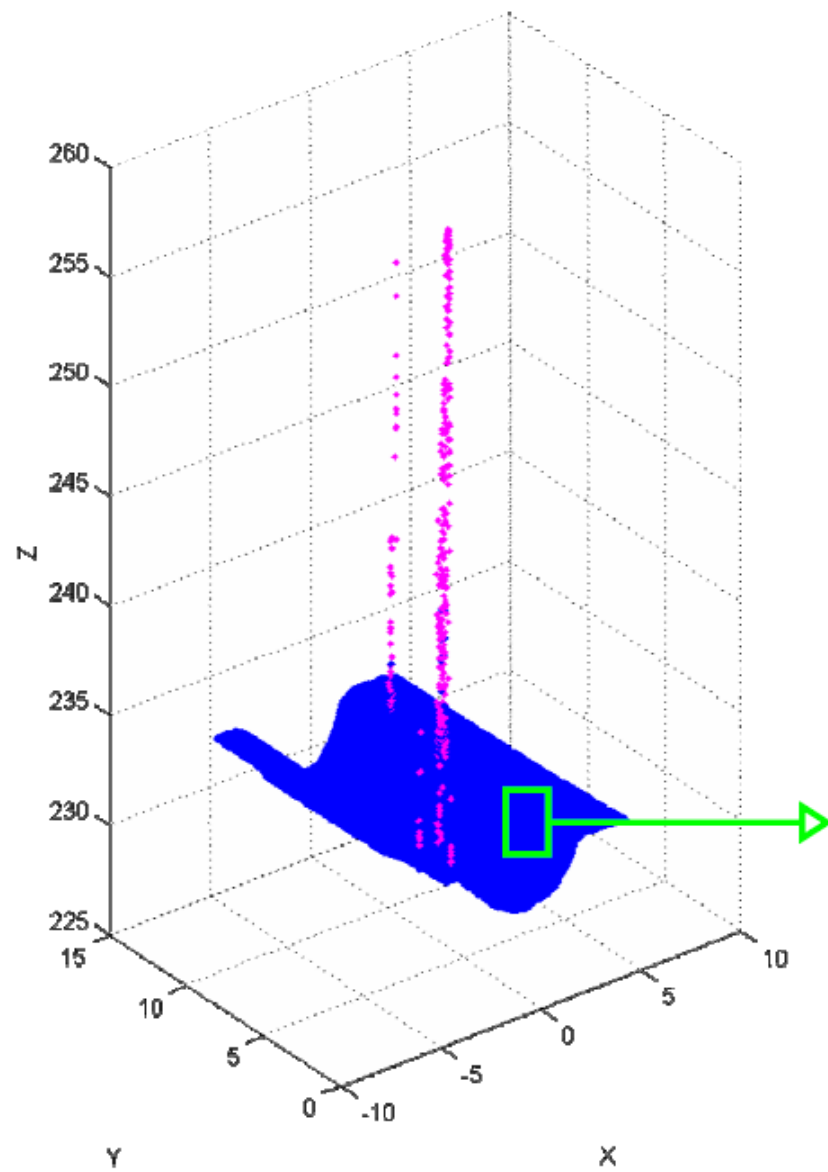
originalni podaci
(sa impulsnim
šumom)

ugaona metoda

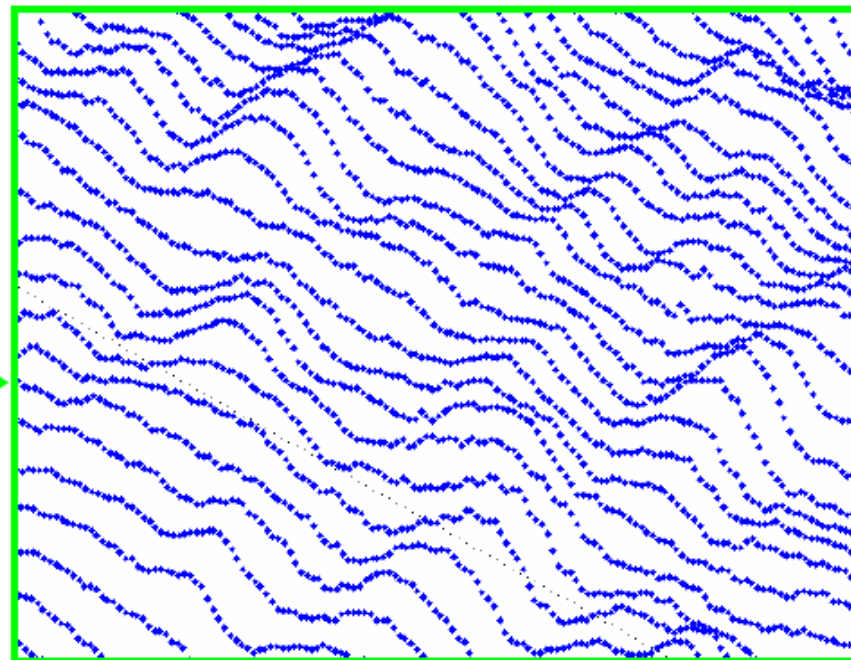
metoda medijane

X

→



- eliminisane tačke
- zadržane tačke



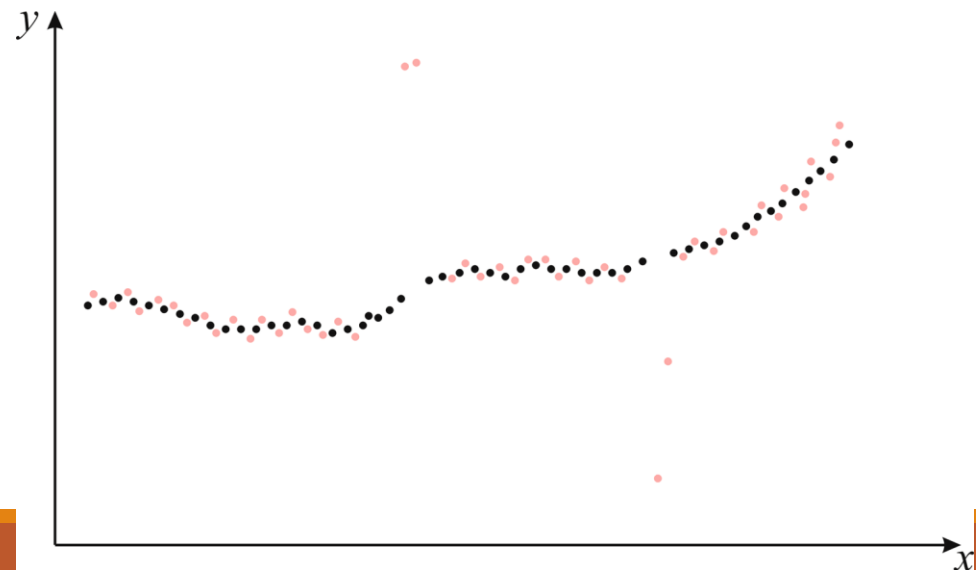
Uravnavanje podataka-tačaka

Nakon uklanjanja pikova, kvalitet rezultata 3D-digitalizacije može se dalje poboljšati operacijom uravnavanja (glačanja) niza podataka-tačaka.

Primena ove operacije eliminiše velike oscilacije tačaka i ima za rezultat mirniju raspodelu tačaka, koja kasnije obezbeđuje kreiranje kvalitetnijih sekcijskih krivih, odnosno 3D modela.

Među metodama za uravnavanje podataka-tačaka se ističu:

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



Metoda srednjih vrednosti

Jednostavna za implementaciju.

Princip je zasnovan na izračunavanju statističke srednje vrednost za specificirani niz podataka u cilju njihovog uravnavanja:

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

gde su: x_i – koordinate tačaka i n – ukupan broj tačaka.

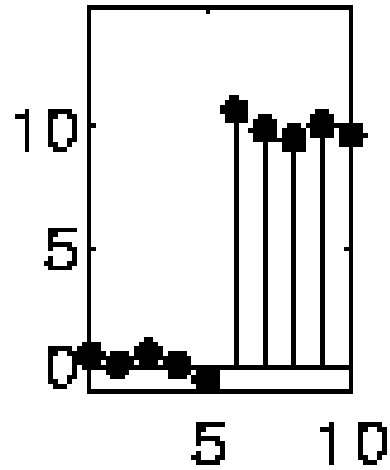
Ova vrsta filtera vrši “omekšavanje” pikova u rezultatu 3D digitalizacije pomeranjem svake od tačaka na srednju poziciju te tačke i njoj susednih (najčešće se primenjuje u varijanti sa po jednom ili dve susedne tačke).

Sličan je filteru na principu medijane.

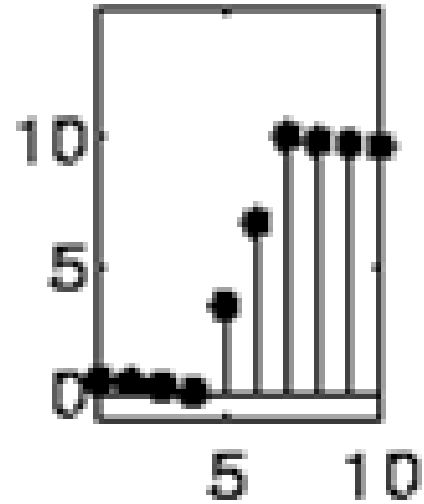
Daje dobre rezultate kod nizova podataka-tačaka sa puno šuma.

Nije dobar za primenu na nizovima podataka-tačaka sa stepenastim skokovima (ivice).

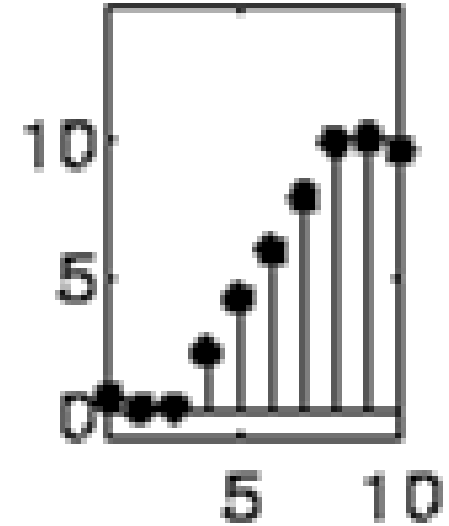
Filtriranje metodom srednjih vrednosti - efekat u slučaju stepenastih prelaza



originalni podaci



po 1 susedna tačka



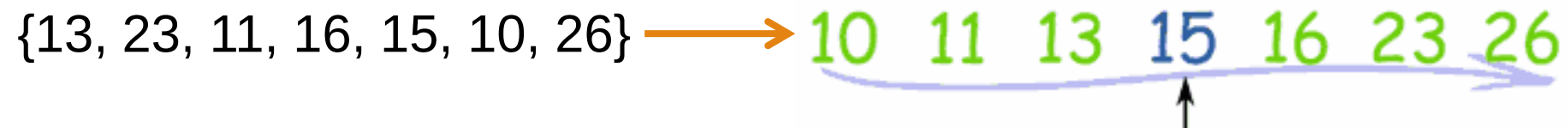
po 2 susedne tačke

Metoda medijane

Metoda zasnovana na vrednosti medijane je nelinearna tehnika koja objedinjuje funkcije za uravnavanje niza podataka i uklanjanje tačaka-izvan-opsega.

Princip ovog filtera bazira na “pomeranju” tačaka niza na pozicije koje odgovaraju statističkoj vrednosti medijane analizirane tačke i određenog broja (najčešće dve ili četiri) susednih tačaka.

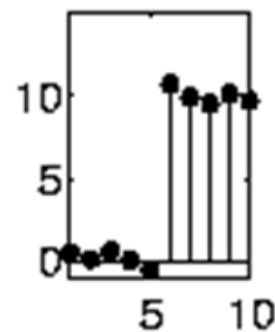
Definicija: “medijana predstavlja onu vrednost u nizu koja deli (prethodno sistematizovan po veličini) niz na dva jednaka dela”.



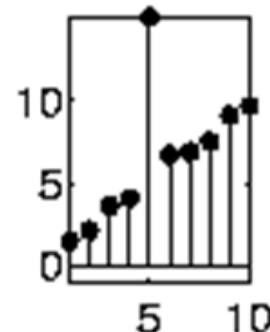
Primenu filtera na bazi medijane karakteriše tendencija očuvanja oblika.

Vrlo dobro se ponaša kada su u pitanju stepenasti oblici, što i jeste osnovna prednost u odnosu na filtriranje srednjom vrednošću.

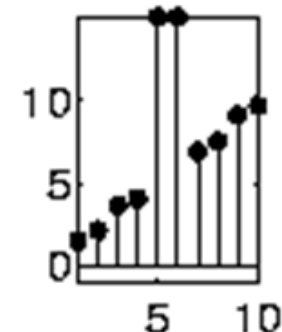
Ovaj filter je pogodan i za eliminisanje impulsnog šuma, pri čemu je bitna širina prozora filtera.



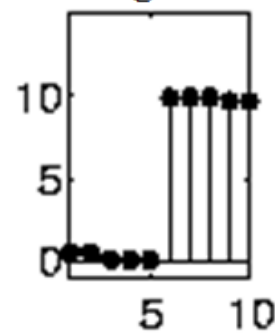
original



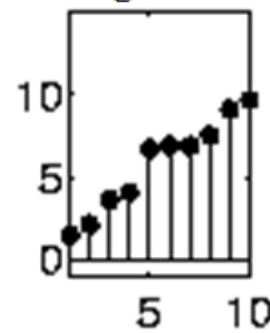
original



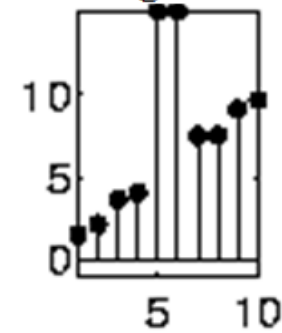
original



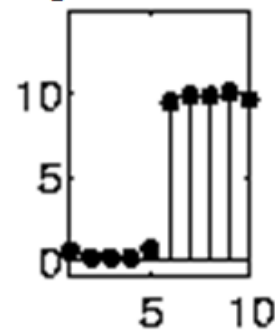
prozor = 3



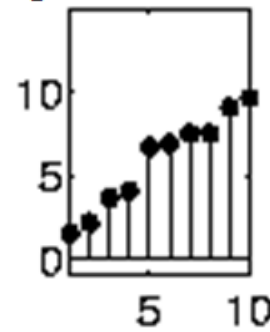
prozor = 3



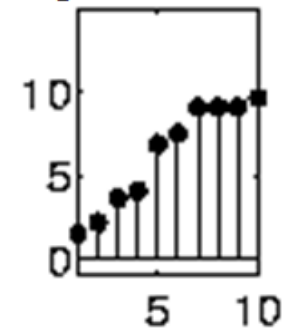
prozor = 3



prozor = 5



prozor = 5



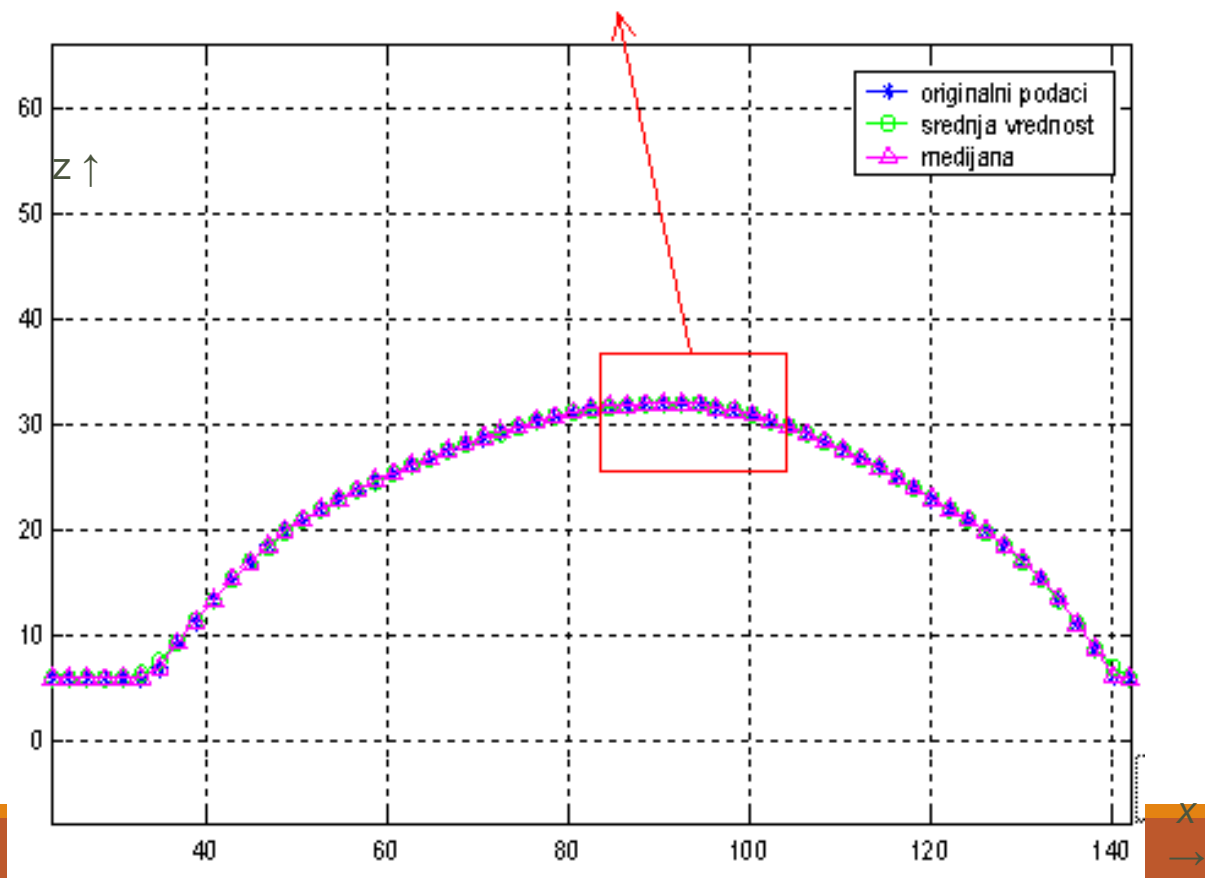
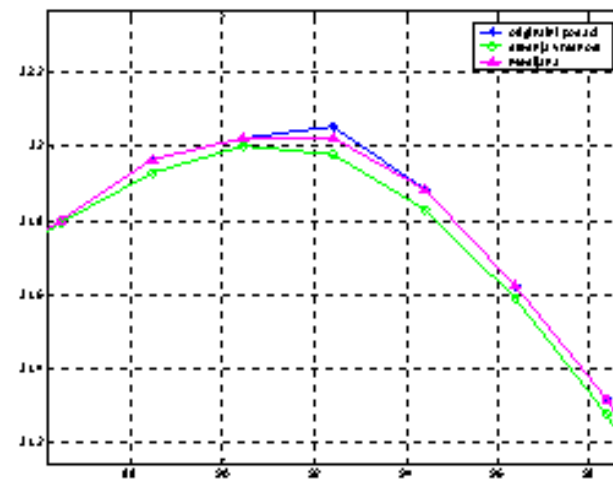
prozor = 5

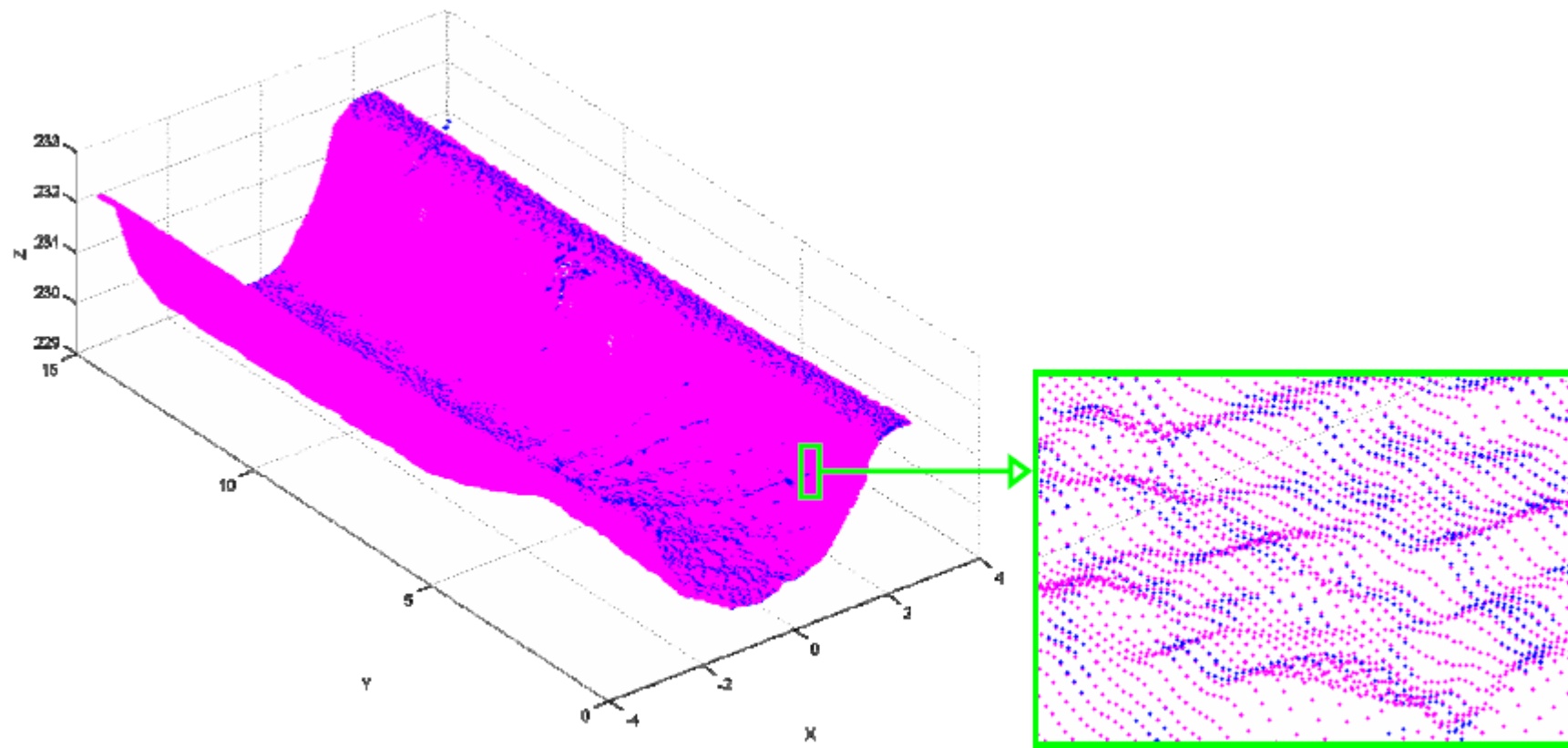
a) očuvanje ivice

b) impulsni šum i širina prozora filtera

Osobine filtera na bazi medijane

Uporedni prikaz metoda
za uravnavanje podataka
(na primeru jedne krive)





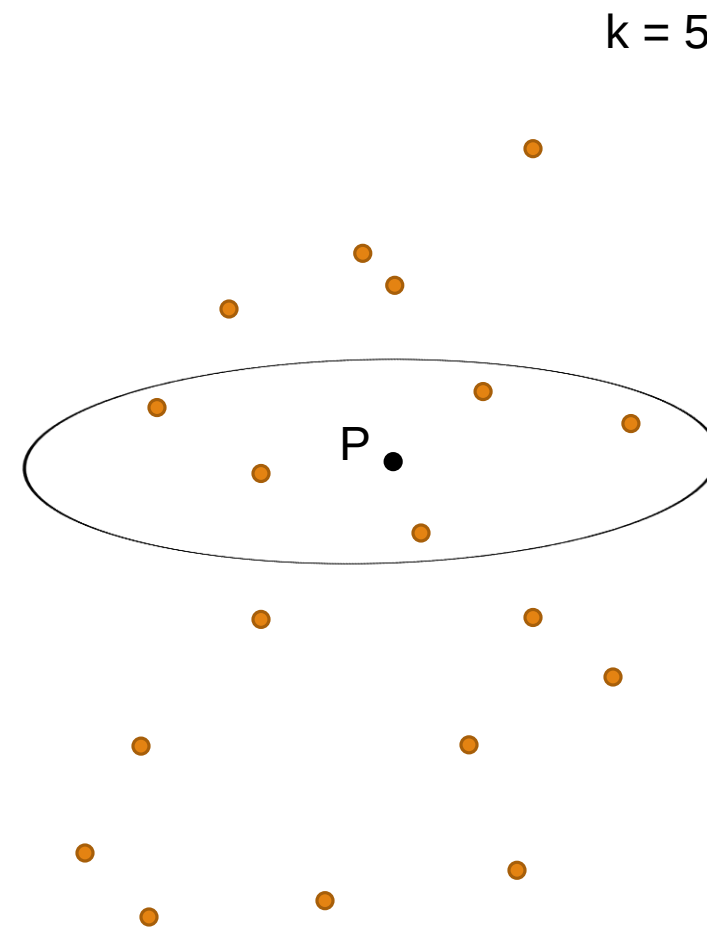
- original points
- smoothed points

Metoda određivanja normala u oblaku tačaka

Principal Component Analysis (PCA)

Korak 1: Izbor suseda (k-Nearest Neighbors)

- Za svaku tačku P u oblaku, prvo se mora definisati njeno **lokalno susedstvo**. To se radi odabirom fiksiranog broja najbližih tačaka (k) ili svih tačaka unutar određenog radijusa (r).
- Broj k je kritičan: ako je k premalo, rezultat je osetljiv na šum; ako je k preveliko, PCA će "ispeglati" fine detalje i oštre ivice.



Metoda određivanja normala u oblaku tačaka

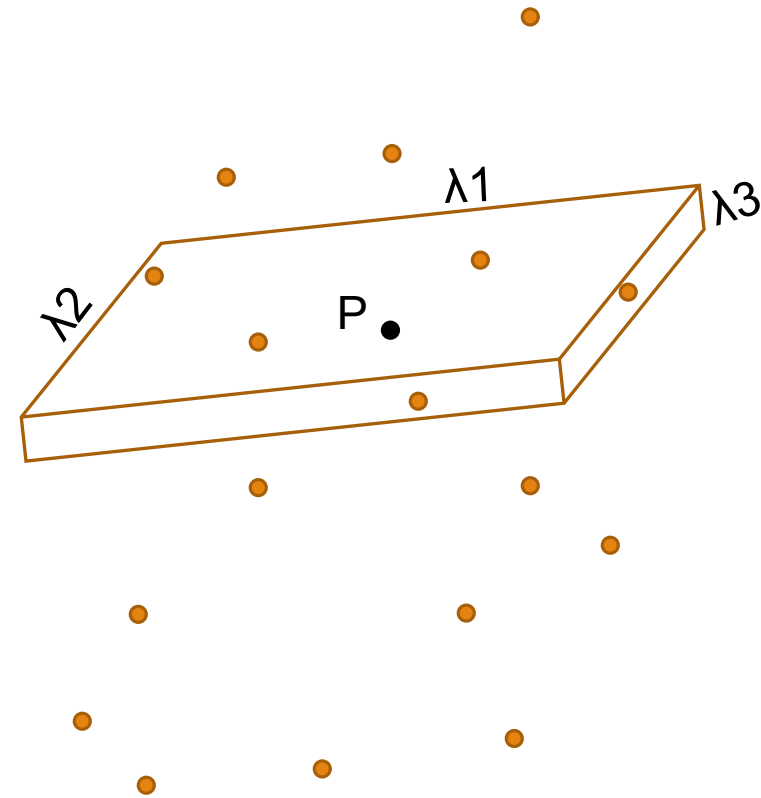
Principal Component Analysis (PCA)

Korak 2: Fitovanje ravni (PCA)

1.PCA se primenjuje na odabrano susedstvo. PCA pronalazi **glavne komponente** (pravce) u kojima podaci imaju najveću varijaciju. U 3D prostoru, PCA generiše tri ortogonalna pravca i tri pripadajuće **sopstvene vrednosti** ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$).

2.PCA se koristi za *fitovanje* najbolje ravnine (tangentne ravni) kroz odabrane k tačaka:

- 1.Prva glavna komponenta** (najveća λ_1) pokazuje pravac najvećeg prostiranja tačaka (dužina ravni).
- 2.Druga glavna komponenta** (srednja λ_2) pokazuje pravac drugog najvećeg prostiranja (širina ravni).
- 3.Treća glavna komponenta** (najmanja λ_3) pokazuje pravac **najmanjeg prostiranja**, odnosno pravac koji je okomit na ravan.



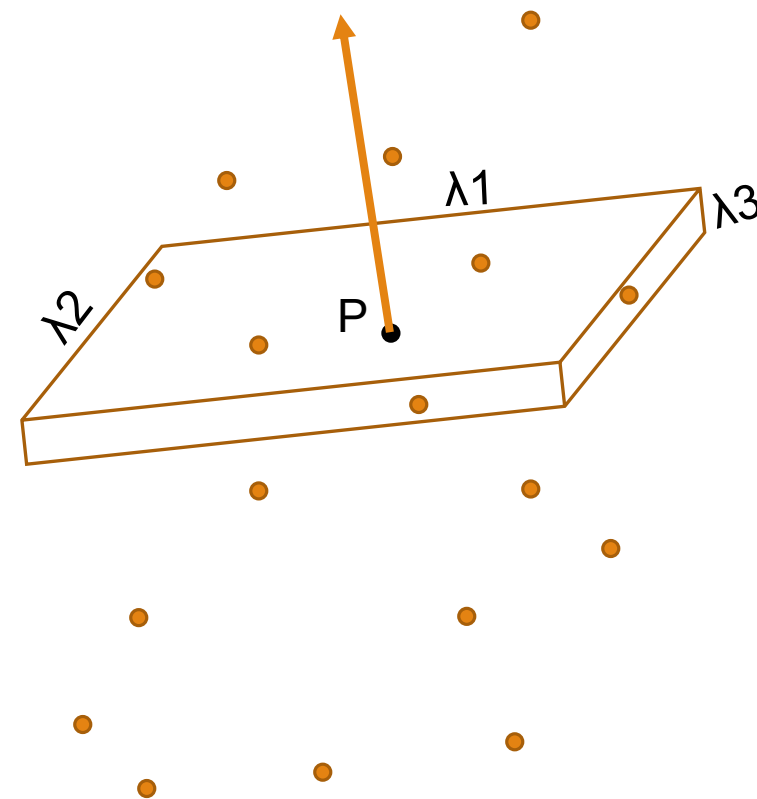
Metoda određivanja normala u oblaku tačaka

Principal Component Analysis (PCA)

Korak 3: Određivanje vektora normale

Vektor normale posmatrane tačke je upravo **sopstveni vektor** koji odgovara **najmanjoj sopstvenoj vrednosti** (λ_3).

To je pravac u kojem se tačke najmanje šire, što znači da je to pravac okomit na ravan koju tačke formiraju.



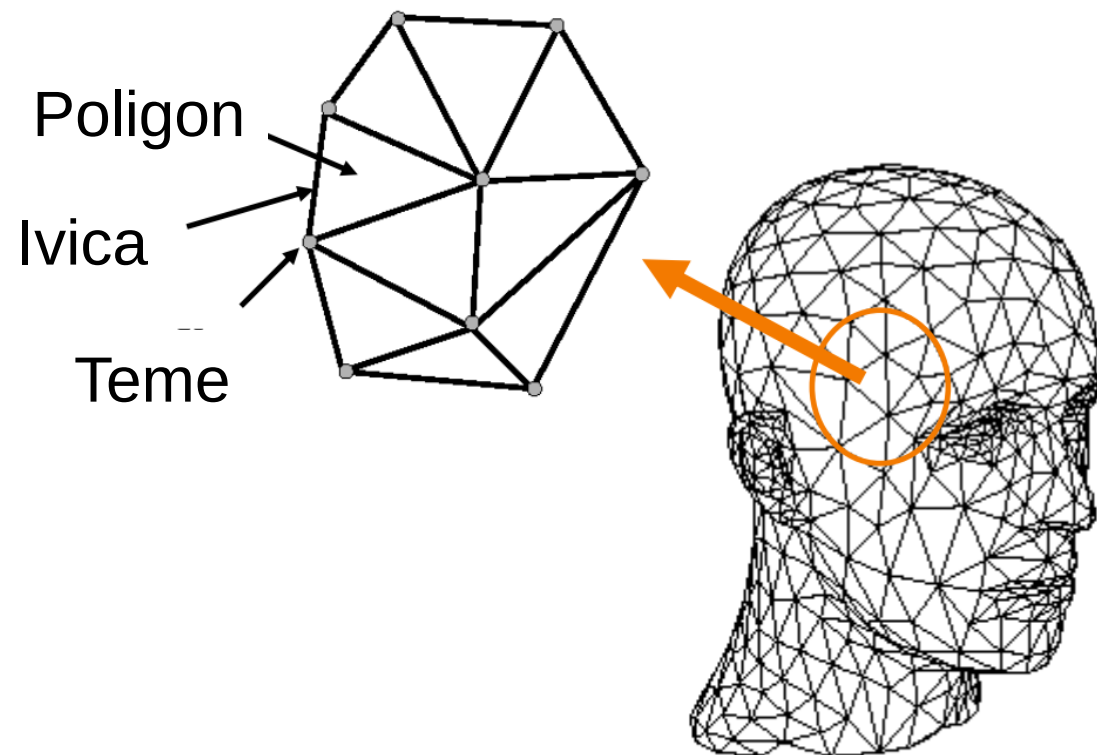
Osnovni elementi poligonalne mreže

Poligonalna mreža se sastoji od:

Temena (Vertices): To su pojedinačne tačke u 3D prostoru definisane koordinatama (x, y, z).

Ivice (Edges): Linije koje spajaju dva temena.

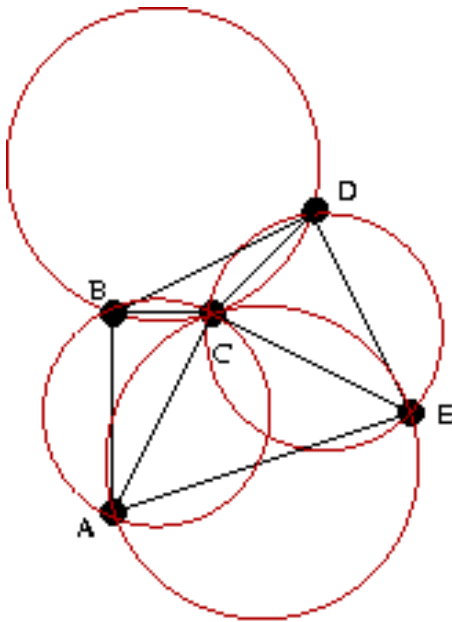
Poligona (Faces/Polygons): Zatvorene površine koje formiraju trouglovi ili četvorougli (quads), a mogu biti i poligoni sa više stranica.



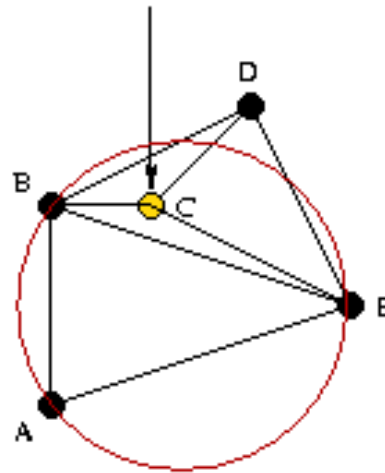
Sve ove komponente su povezane u topološku strukturu, gde svaki poligon ima svoje ivice, a ivice spajaju temena, čime se opisuje oblik objekta.

Metode kreiranja poligonalne mreže - Delunijeva triangulacija

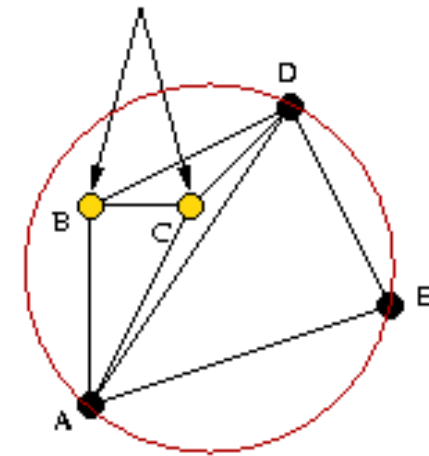
Delunijeva trijangulacija uzima n tačaka i trijangulise ih na osnovu uslova da se nijedna tačka ne sme nalaziti unutar opisanog kruga nekog od trouglova.



Delunijeva
trijangulacija



Nije Delunijeva
trijangulacija



Nije Delunijeva
trijangulacija

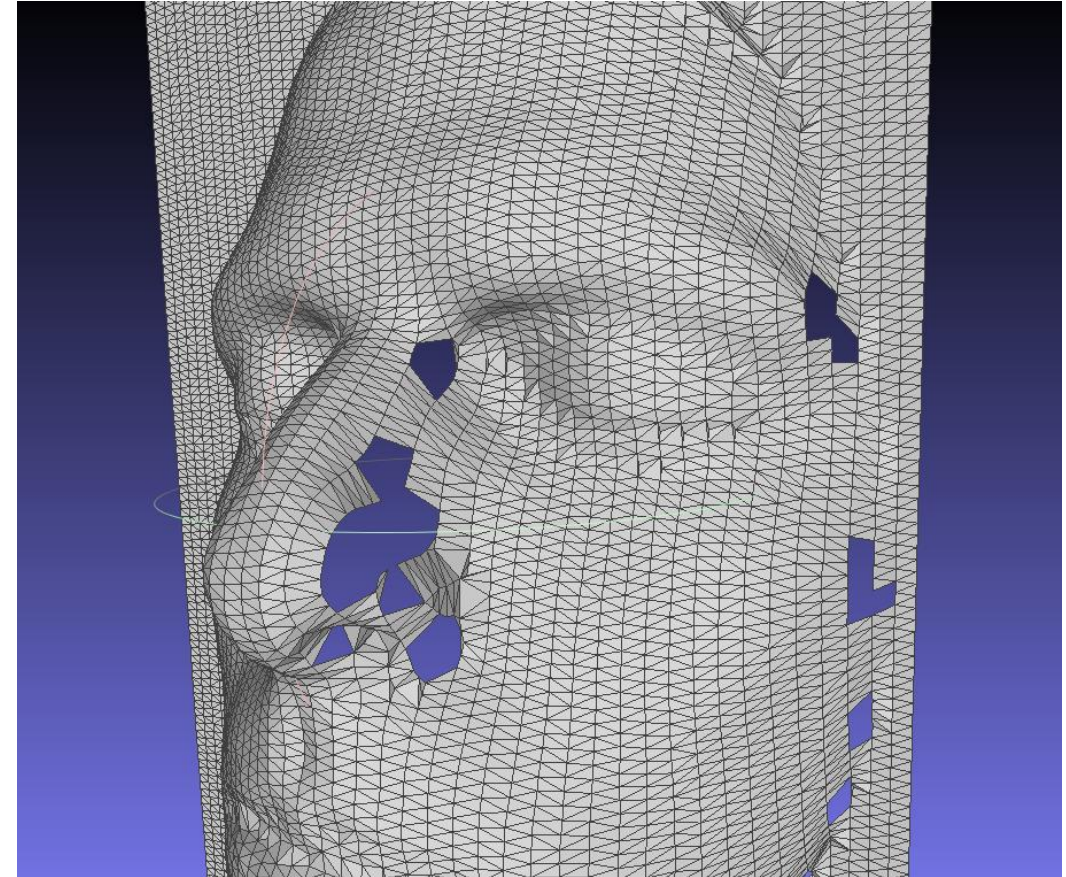
Metode kreiranja poligonalne mreže - Algoritam kotrljajuće lopte

Ball Pivoting Algorithm (BPA)

Metoda je odlična za uniformne oblake tačaka. Lopta određenog prečnika se kotrlja preko oblaka tačaka. Kada lopta dodirne tri tačke, a da pritom ne sadrži nijednu drugu tačku unutar sebe, te tri tačke formiraju trougao.

Prednosti: Brz algoritam, čuva originalne koordinate tačaka.

Mane: Ako je razmak između tačaka veći od prečnika lopte, nastaju rupe u modelu.



Metode kreiranja poligonalne mreže - Poisson Surface Reconstruction

Ovo je trenutno jedna od najmoćnijih metoda za kreiranje "vodonepropusnih" (watertight) modela.

Algoritam posmatra oblak tačaka kao uzorke neprekidne funkcije. On rešava *Poisson-ovu jednačinu* kako bi kreirao glatku površinu koja najbolje aproksimira originalne tačke.

Ključni zahtev: Zahteva da svaka tačka ima pravilno sračunat vektor normale (smer gledanja površine).

Prednosti: Izuzetno otporan na "šum" (greške u merenju) i odlično zatvara rupe gde nedostaju podaci.

Mane: Može blago "ispeglati" oštre ivice i kreira nove tačke (ne koristi uvek originalne iz oblaka).

Redukovanje podataka u rezultatu 3D digitalizacije

U opštem slučaju **složenija površina** objekta **zahteva i veći broj tačaka** za rekonstrukciju poligonalne mreže.

Sa druge strane, (pre)veliki broj podataka-tačaka može imati i negativne implikacije, poput usporavanja procesa 3D rekonstrukcije, visokih zahteva u pogledu računarskog hardvera, a u ekstremnim slučajevima proces rekonstrukcije čini nemogućim.

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 u rekonstruisanju površine.

U kontekstu toga, može se reći da se **karakteristične tačke** površina nalaze **na mestima gde krivost ima veće varijacije**.

Redukovanje podataka u rezultatu 3D digitalizacije

Osnovni zadatak procesa redukovanja rezultata 3D-digitalizacije je:

Uklanjanje suvišnog broja tačaka – poligona sa ciljem kreiranja geometrijskog 3D modela u zadovoljavajućem vremenskom periodu, koji dovoljno kvalitetno aproksimira originalni objekat.

Rezultat redukcije treba da bude **kompromis između brzine procesiranja i kvaliteta (tačnosti) dobijenih modela.**

Redukovanje podataka u rezultatu 3D digitalizacije

U praksi se primenjuje veći broj metoda za redukovanje podataka, a trenutno primenjivane metode se mogu klasifikovati u tri kategorije:

- I. metode semplovanja (oblak tačaka),**
- II. metode za redukovanje broja poligona u poligonalnom modelu i**
- III. mrežne metode.**

Metode semplovanja

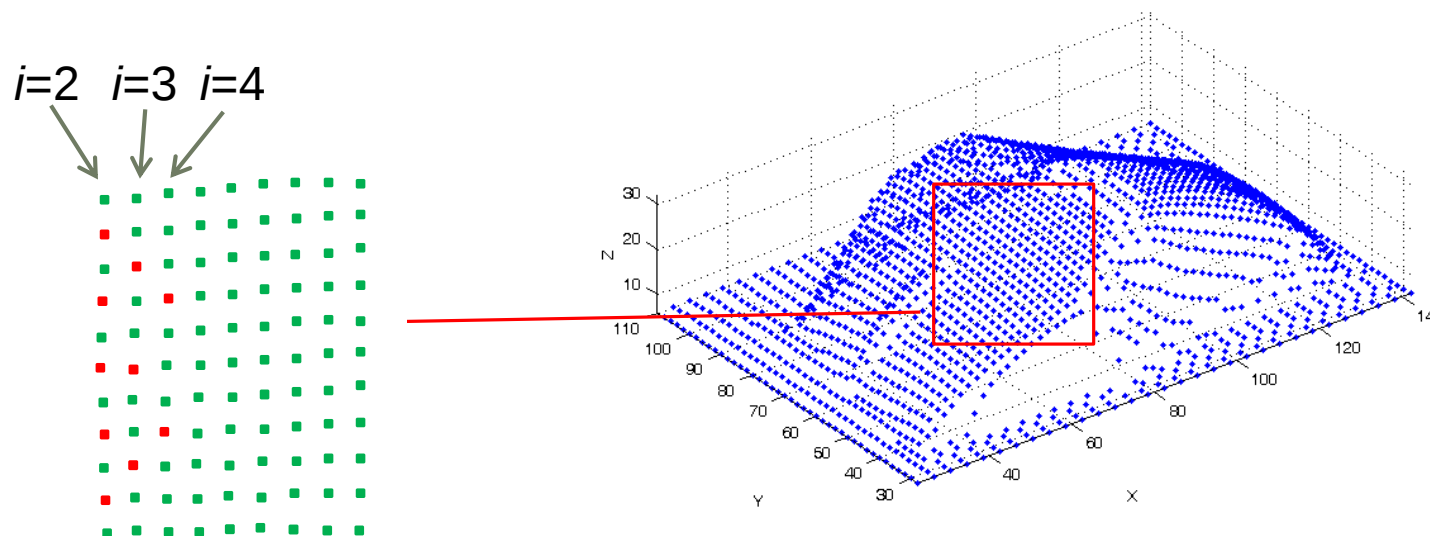
U svetu je do danas razvijen veliki broj metoda za redukovanje podataka-tačaka semplovanjem, između kojih se u literaturi najčešće pominju sledeće:

- 1) Metoda uniformnog semplovanja (ili faktorna metoda)
- 2) Metoda uniformnog 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

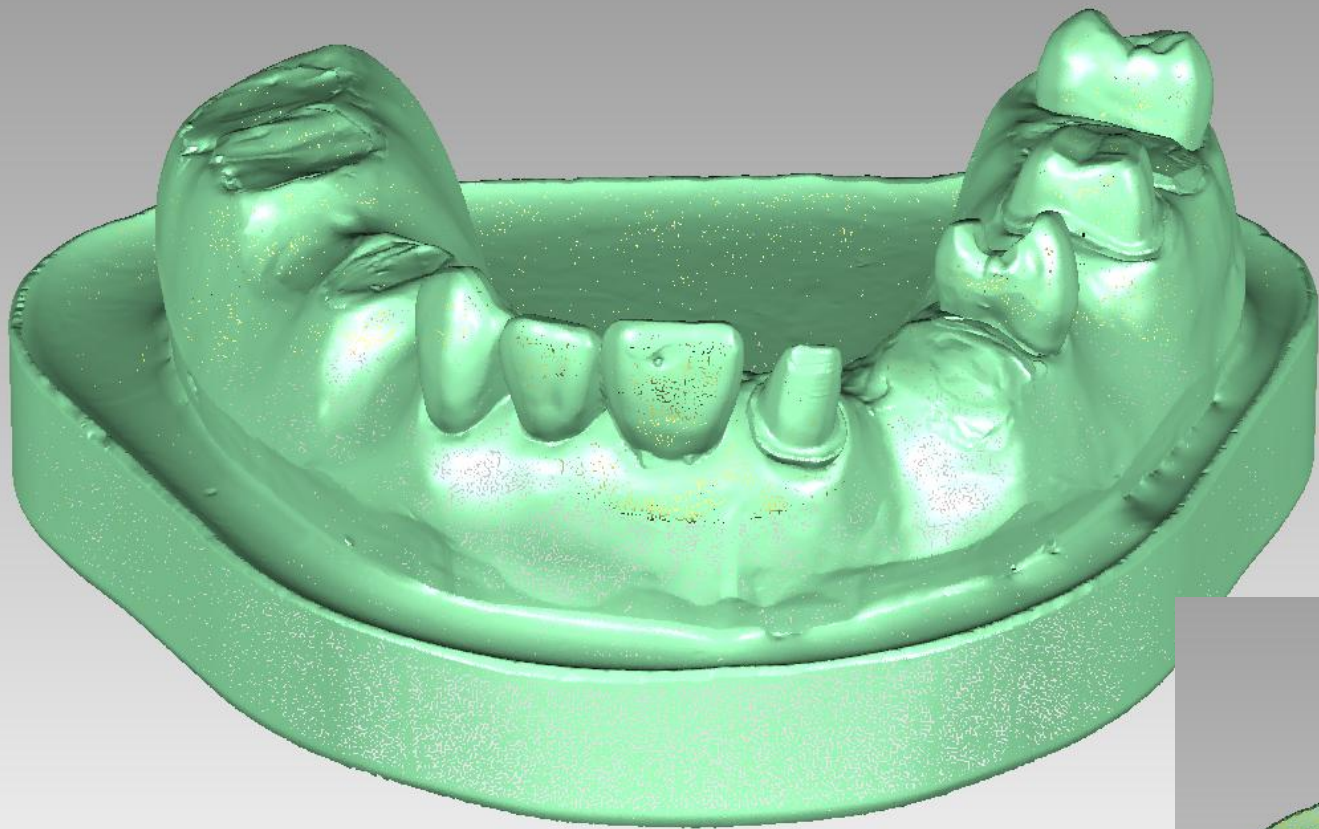
Metoda uniformnog (faktornog) semplovanja

Najjednostavnija metoda 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 sempluje (odabira) svaka i -ta tačka, gde je i faktor semplovanja.

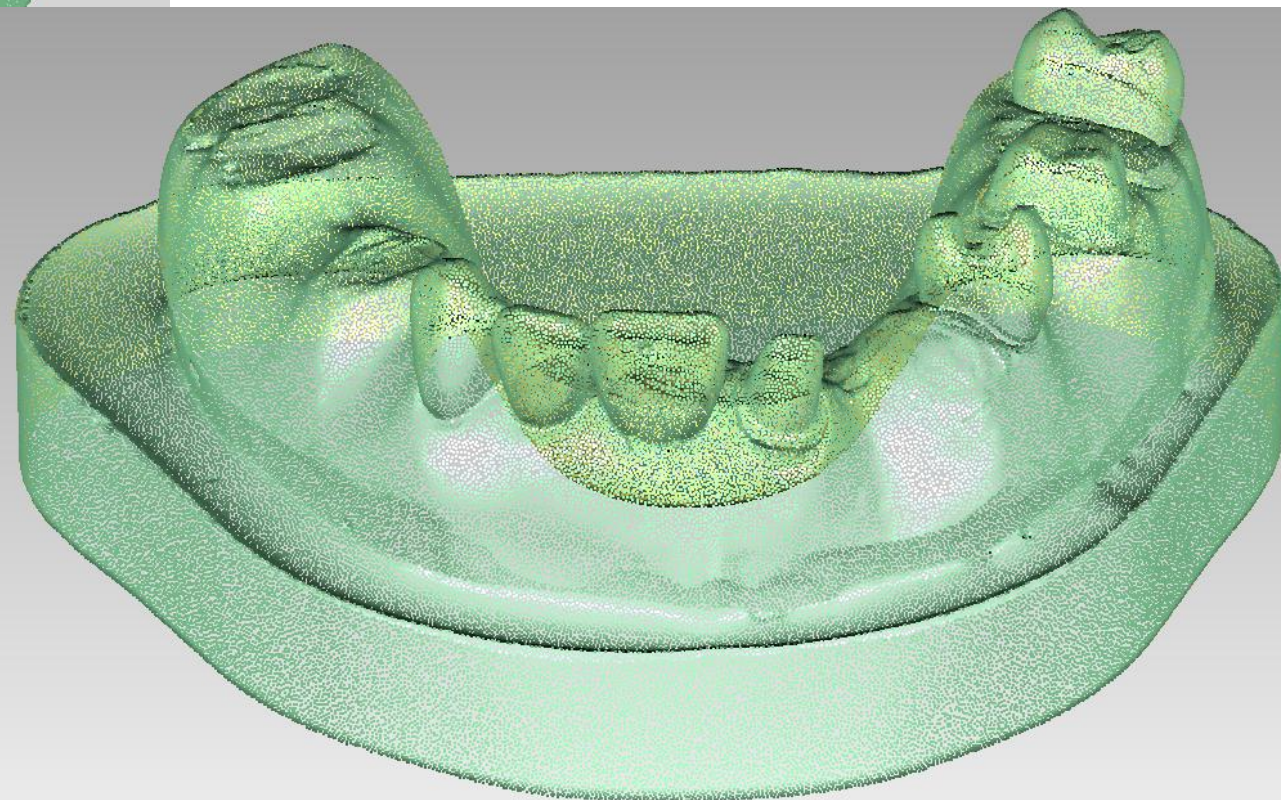


Razvojem sofisticiranijih metoda, uniformno semplovanje se sve češće primenjuje kao pred-redukcija u slučajevima objekata manje geometrijske složenosti i ogromnog broja tačaka.



Pre uniformnog smplovanja
br tačaka 772883

Posle uniformnog smplovanja
br tačaka 144576
Svaka peta tačka je izbrisana

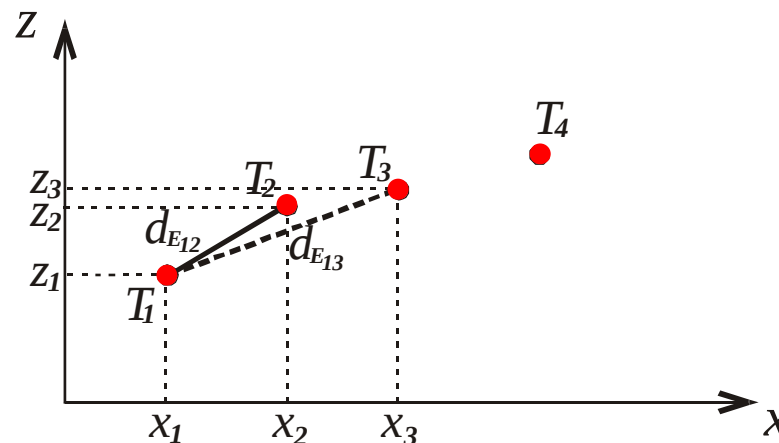
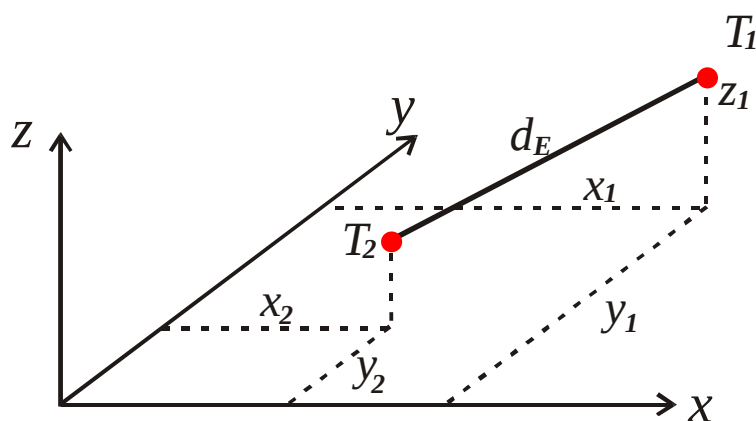


Metoda prostornog (engl. spatial ili space) semplovanja

Metoda zasnovana na dozvoljenoj prostornoj vrednosti – d , koja se poredi sa rastojanjem između susednih tačaka koje se određuje preko euklidske norme (rastojanja).

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 , se definiše kao:

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



Metode za redukovanje broja poligona u poligonalnom modelu

Postoji nekoliko različitih konceptualnih pristupa uprošćavanja poligonalne mreže. U principu, može se posmatrati smanjenje složenosti kao jedna operacija ili kao iterativni postupak.

Pozicije temena uprošćene mreže mogu se dobiti kao podskup originalnog skupa pozicije temena, kao skup ponderisanih proseka originalnih pozicija temena ili ponovnim uzorkovanjem originalne linearne površine po delovima.

U literaturi različiti pristupi su klasifikovani u:

- Algoritmi za grupisanje temena
- Inkrementalni algoritmi za redukovanje broja poligona i
- Algoritmi za ponovno uzorkovanje

Redukcija podataka primenom rešetki

Kod ovog prilaza, **tačke** u rezultatu 3D-digitalizacije **se redukuju deljenjem** (svrstavanjem) **u rešetke** (eng. grid), **a zatim se vrši semplovanje** (izbor) reprezentativnih tačaka iz svake ćelije rešetke.

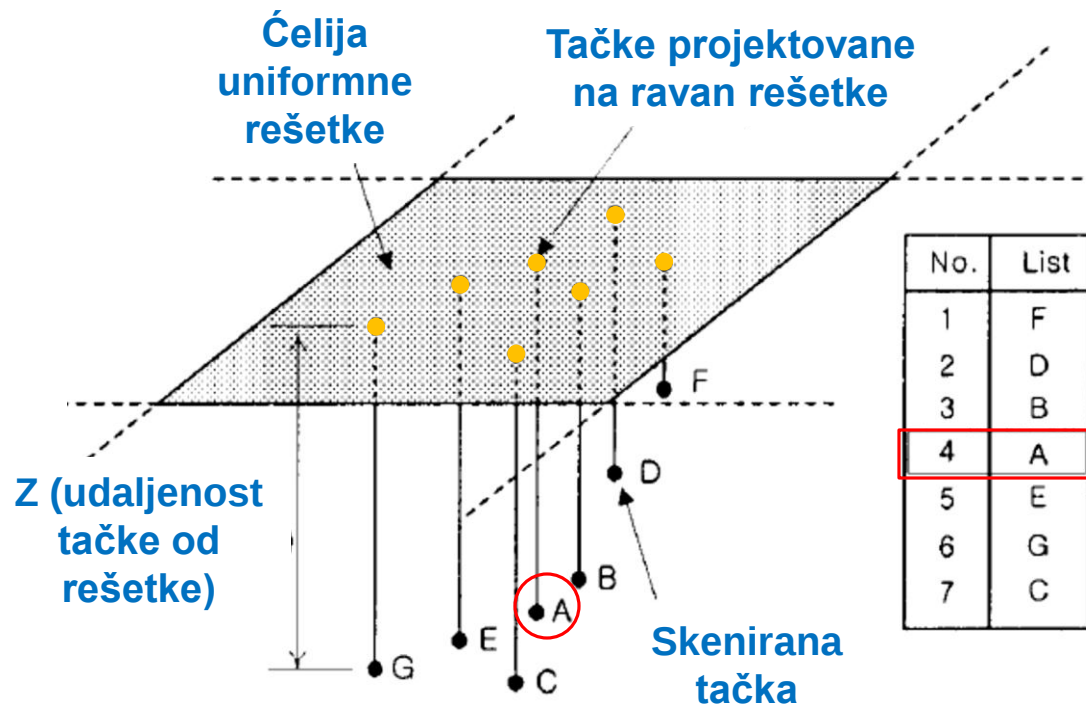
Razlikuju se dve grupe metoda za redukovanje podataka-tačaka preko rešetki:

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

Redukcija podataka primenom uniformnih rešetki

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 filtera zasnovanog na medijani: **tačke u okviru svake ćelije se sortiraju prema rastojanju od rešetkaste ravni i tačka locirana u sredini biva izabrana.**

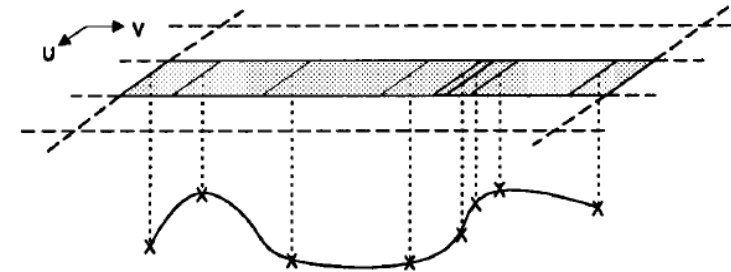
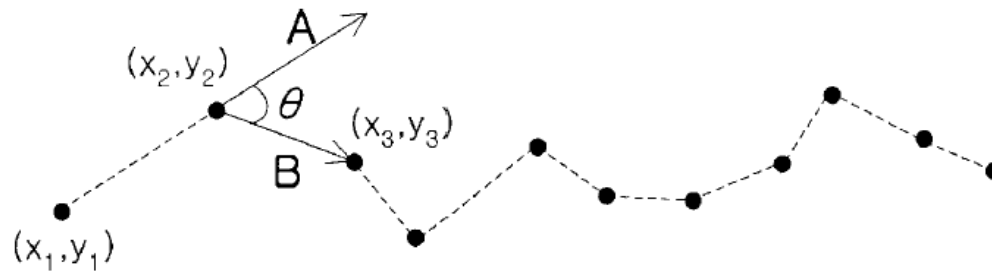


Za n broj tačaka u okviru rešetke, selektuje se $(n+1)/2$ –ta tačka ako je n neparan broj, odnosno $n/2$ –ta tačka ako je n paran broj.

Redukcija podataka primenom ne-uniformnih rešetki

Ne-uniformne rešetke u jednom pravcu:

- Tačke se selektuju na osnovu ugla koji se izračunava preko vektora kreiranih pomoću tri uzastopne tačke (ovi uglovi nose informaciju o nivou krivosti - kada je ugao mali i krivost je mala i obrnuto).

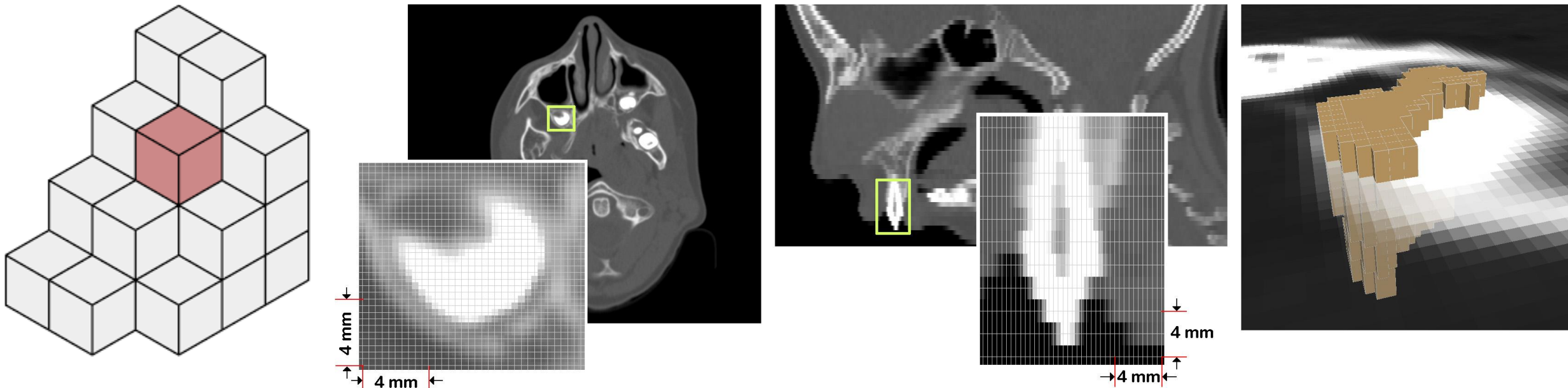


- Po u-pravcu je dimenzija rešetke fiksna i određena korakom skeniranja, dok je u v-pravcu promenljiva i određena geometrijom, tj. nivoom krivosti površine.
- Selektuju se tačke sa velikom krivošću, jer je u tim područjima oblik složen tako da se one moraju sačuvati tokom procesa redukovanja da bi se mogla reprezentovati površina objekta.
- U skladu sa tim, nakon ekstrakcije tačaka metodom ugaone devijacije, rešetka je po v-pravcu izdvojena shodno ekstrakovanim tačkama.

Voksel

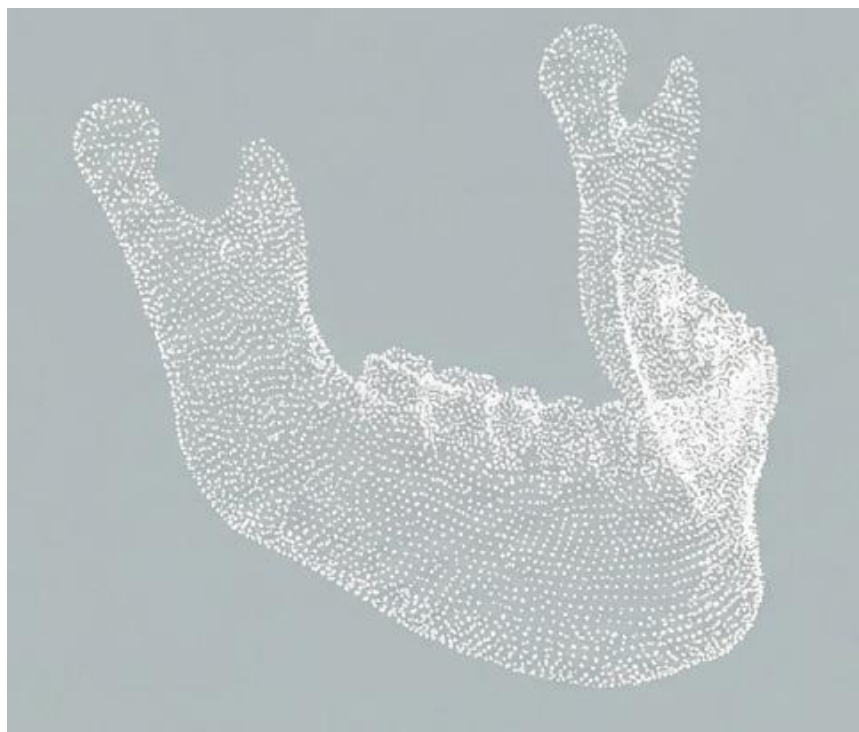
Voksel (engl. *Voxel*), skraćeno od „*volumetric pixel*“ ili „*volumetric element*“, predstavlja osnovnu jedinicu trodimenzionalnih podataka, analogno pikselu (engl. *Pixel*) koji predstavlja osnovnu jedinicu dvodimenzionalnih slika.

Vokseli su kubne forme i koriste se za modelovanje i prikaz volumetrijskih objekata u prostoru.

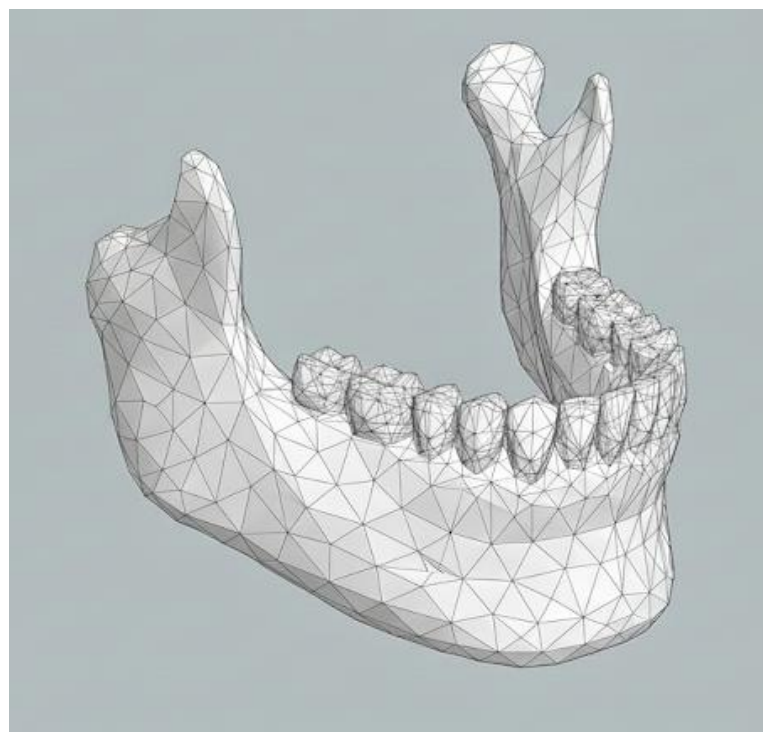


Zaključak

Digitalno predstavljanje 3D objekata i prostora može se izvršiti preko :



oblaka tačaka



**poligonalne mreže
(površinski model)**



**voksela
(zapreminski model)**