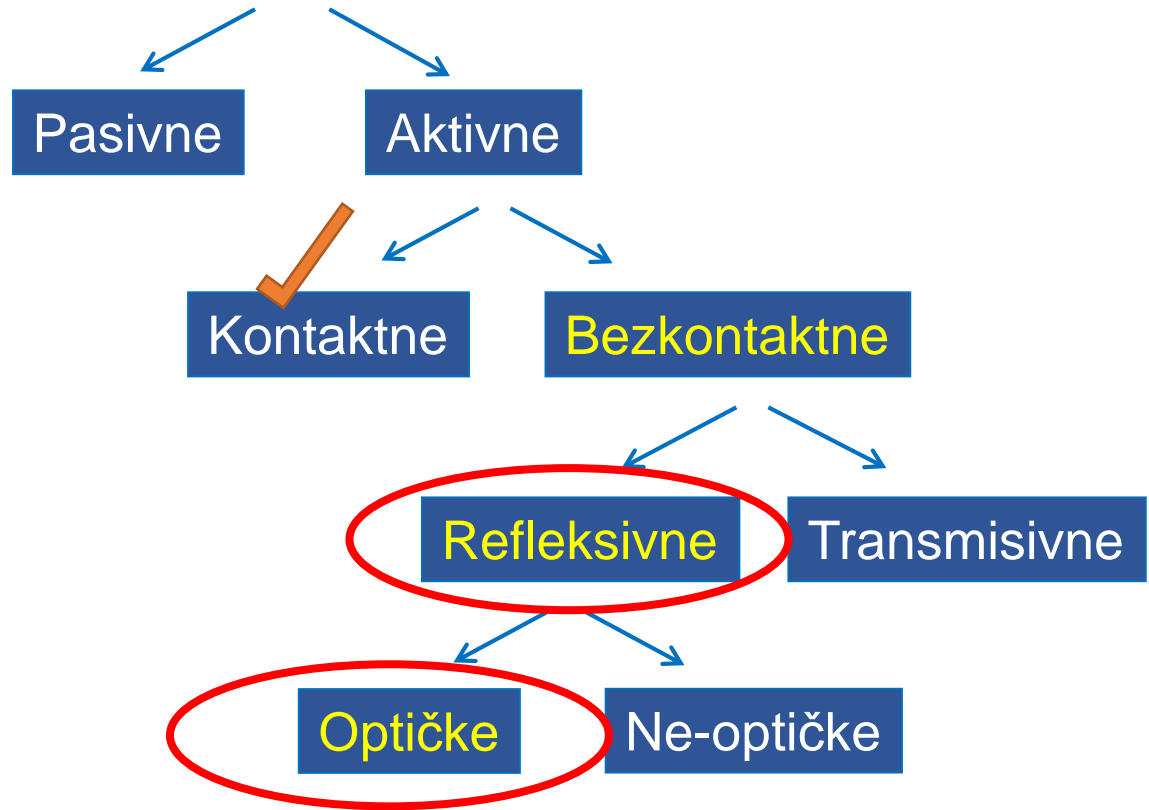


Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

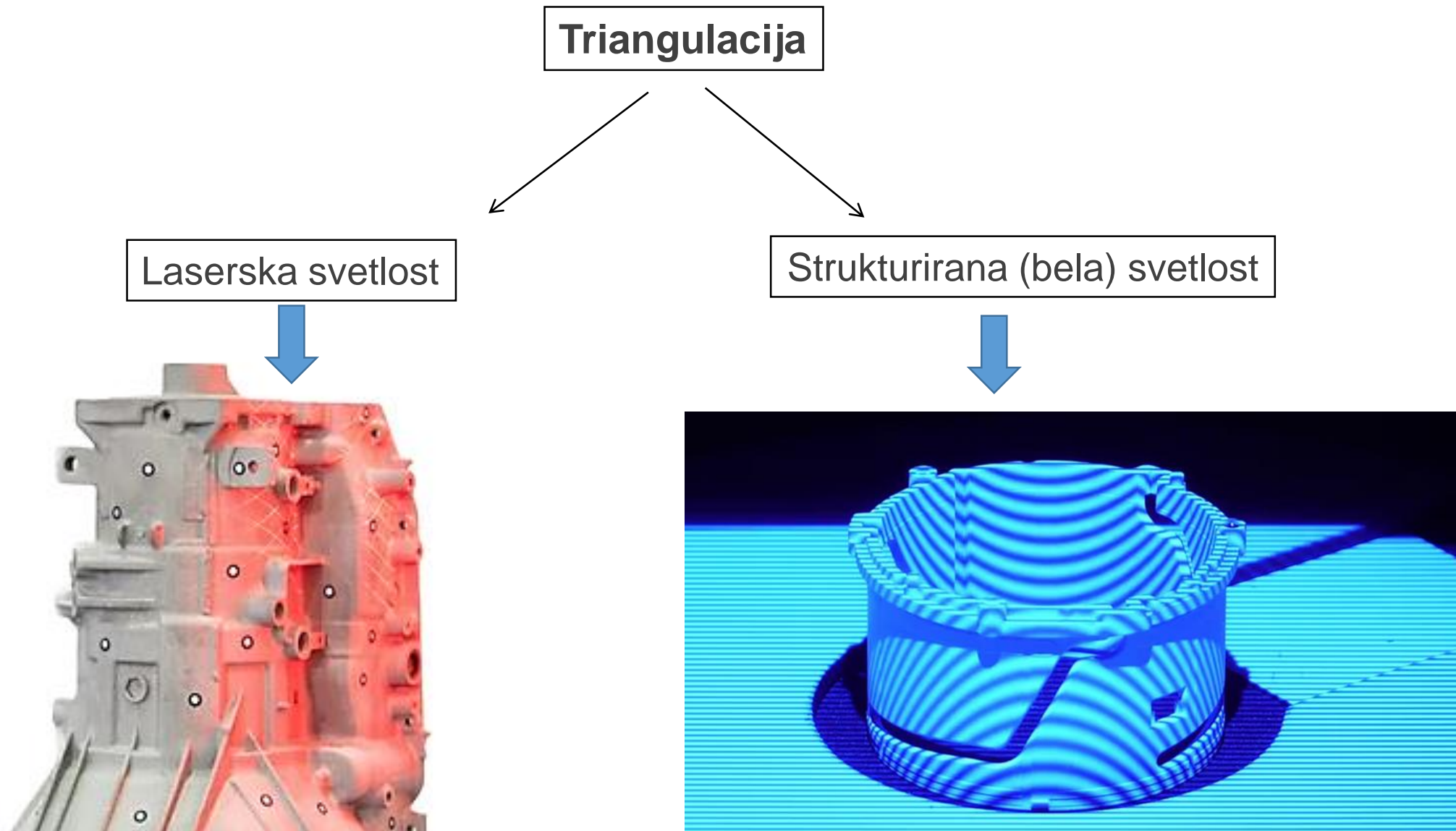
- predavanje -

**METODE 3D DIGITALIZACIJE  
U REVERZIBILNOM INŽENJERSTVU  
(laser, strukturno svetlo, CT)**

# Metode 3D digitalizacije

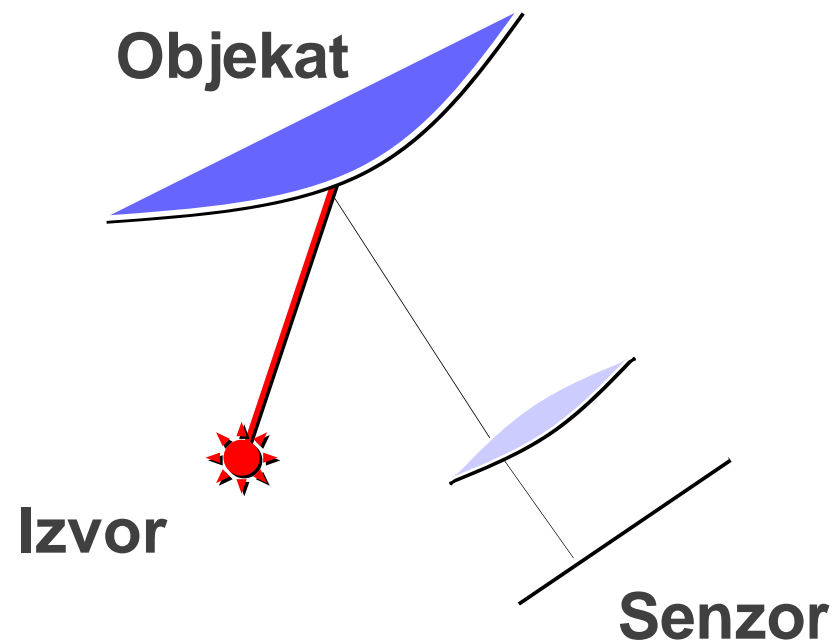


- Optičke metode su **bazirane** na principu triangulacije.



# PRINCIP TRIANGULACIJE

- **Triangulacija je** metoda koja na osnovu pozicije i uglova između izvora svetlosti i foto-osetljivog senzora (CCD) određuje poziciju i rastojanje između dve tačke.
- Merenjem ugla između dve tačke i rastojanja između dve pozicije, moгуće je izračunati rastojanje između njih pomoću trigonometrije (zasniva se na matematičkim principima i formulama).
- Izvor svetlosti visoke energije (laser, strukturalna svetlost) se fokusira i projektuje pod prethodno određenim uglom na željenu površinu.



# PRINCIP TRIANGULACIJE

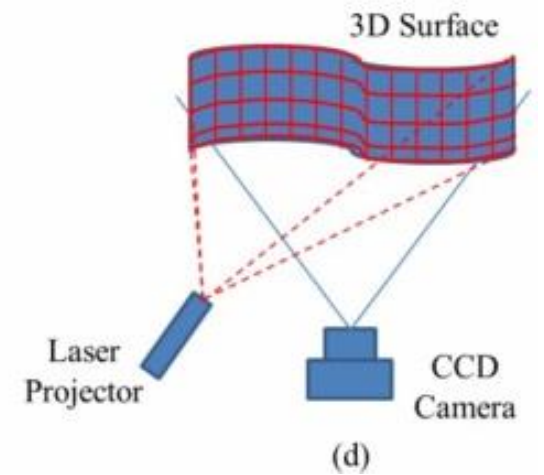
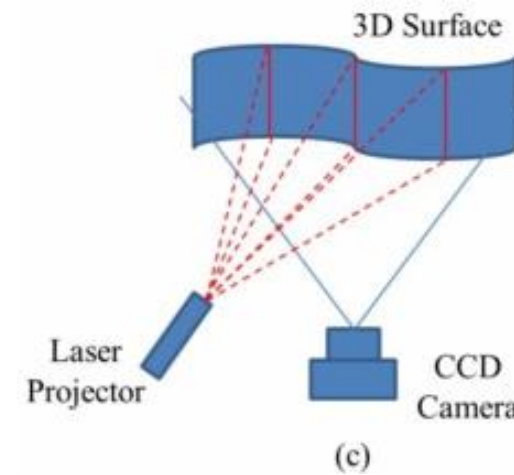
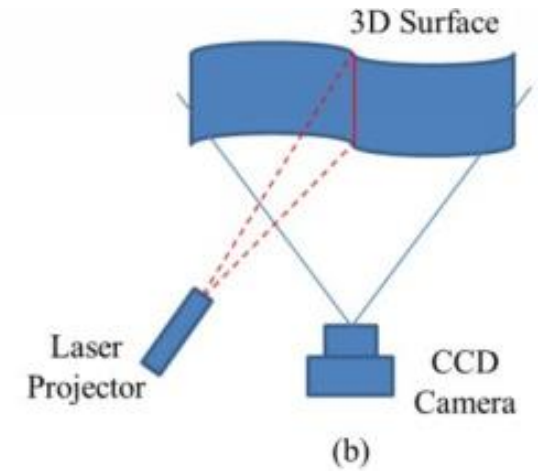
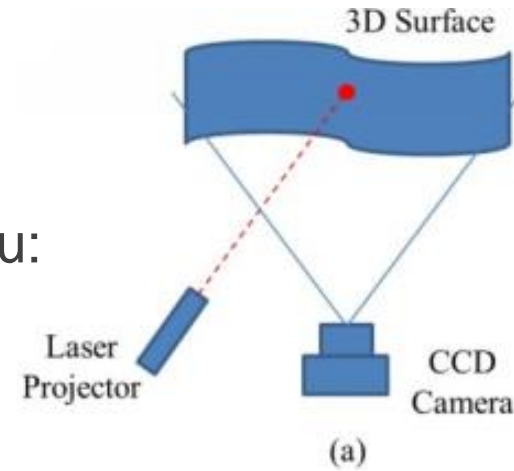
- 3D skeneri bazirani na triangulaciji su **beskontaktni**, što znači da fizički ne dodiruju objekat kako bi se on digitalizovao/3D skenirao.
- Tri glavne tehnologije skeniranja koje snimaju 3D koordinate tačaka (x,y,z) objekta u 3D prostoru koristeći triangulaciju su:
  - **Laserska triangulacija**
  - **Strukturirana svetlost**
  - **Stereo vizija**
- Svaka od ovih metoda je izgrađena drugačije, ali se oslanjaju na princip triangulacije za izračunavanje dubine ili udaljenosti do objekta.

Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

# **LASERSKA TRIANGULACIJA**

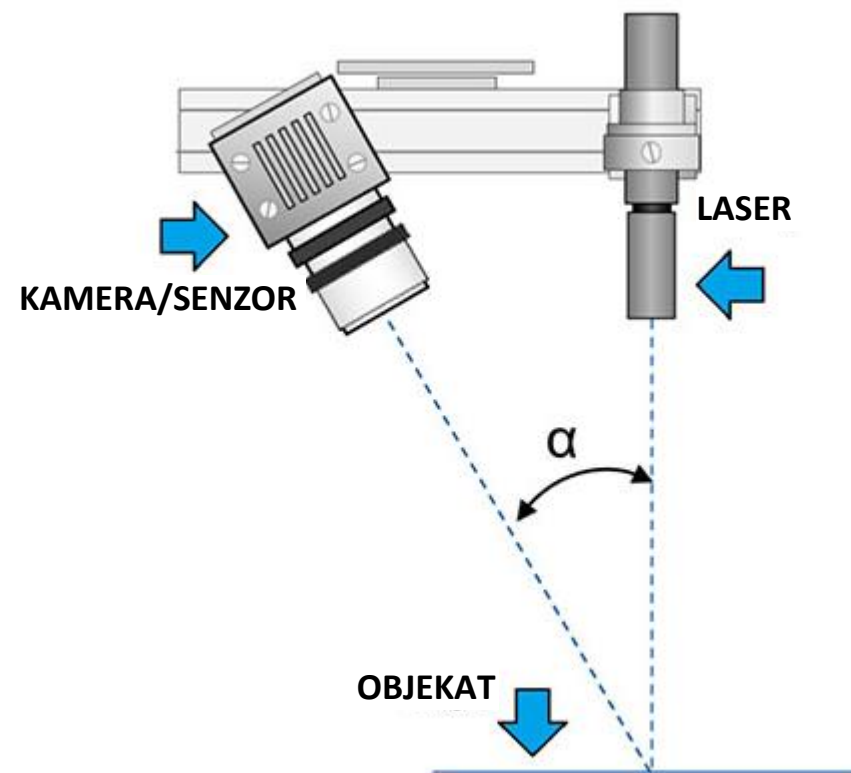
• Postoje 4 tipa laserskog 3D skeniranja, a to su:

- lasersko tačkasto skeniranje,
- lasersko linijsko skeniranje,
- lasersko multi-linijsko skeniranje i
- lasersko mrežno skeniranje



# Laserska tačkasta triangulacija

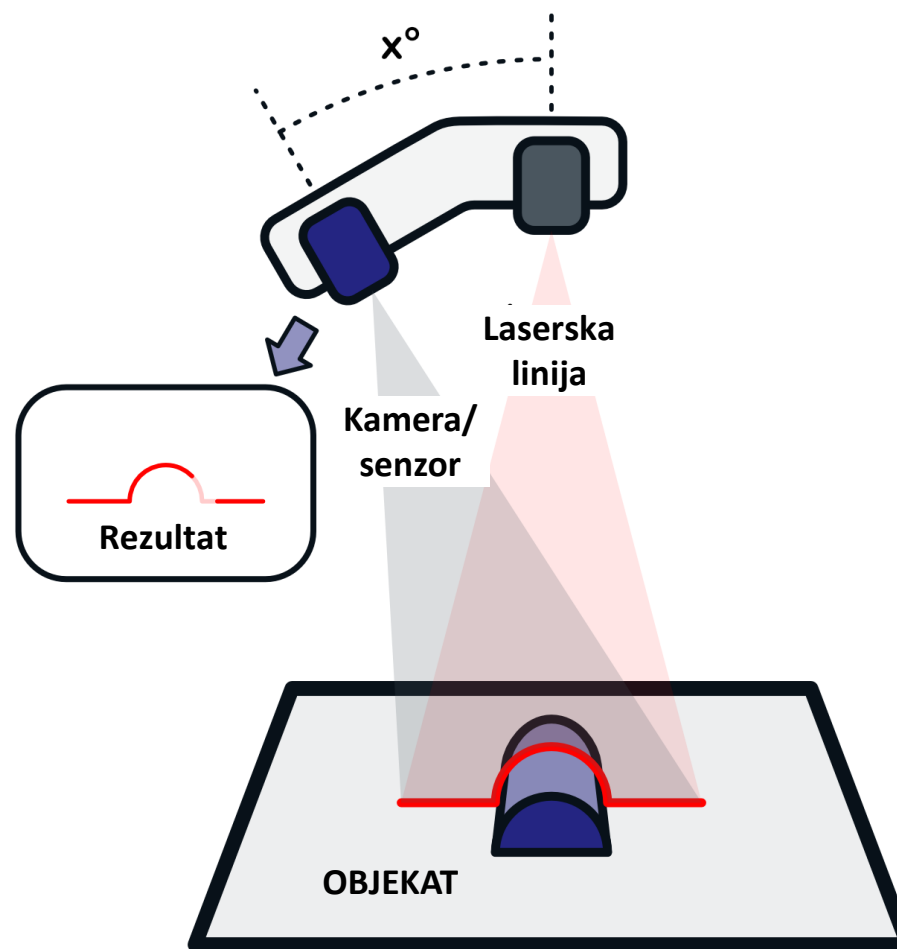
- Osnovni princip gde se projektuje **JEDNA LASERSKA TAČKA** na površinu objekta.
- Predstavlja jednostavan način za izračunavanje položaja jedne tačke u 3D prostoru.
- Ukoliko se zahteva prikupljanje koordinata više tačaka na celoj površini objekta, laserska tačkasta triangulacija **nije primenljiva** (vremenski je jako spora).





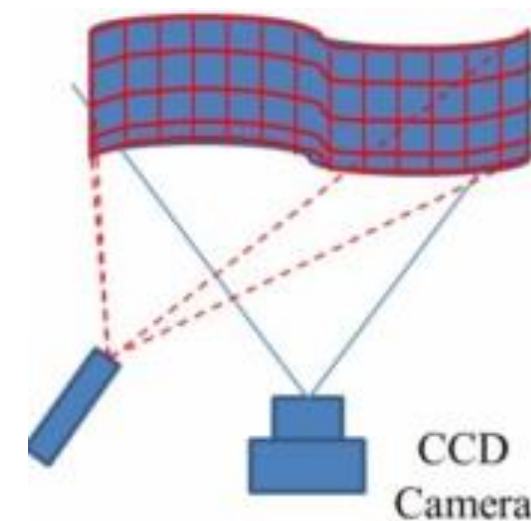
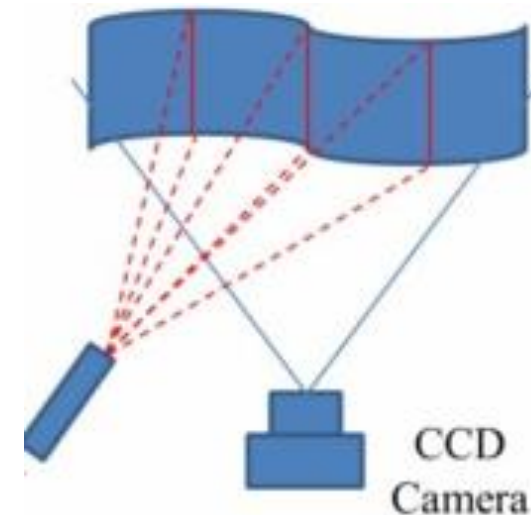
# Laserska linijska triangulacija

- Poboljšani princip gde se projektuje **JEDNA LASERSKA LINIJA** na površinu objekta.
- Predstavlja pogodniji način za izračunavanje položaja više tačke u 3D prostoru.
- Brži postupak prikupljanja informacija (tačaka) sa površine objekta u odnosu na tačkastu linijsku triangulaciju.



# Laserska multi-linijska i mrežna triangulacija

- Napredniji principi koji koriste više laserskih linija raspoređenih u paralelnoj orijentaciji, ili u vidu mreže gde se projektuje **VIŠE LASERSKIH LINIJA** na površinu objekta.
- **Veoma brz** postupak prikupljanja informacija (tačaka) sa površine objekta u odnosu na tačkastu i linijsku linijsku triangulaciju.



# Izvedbe 3D skeniranja laserskom triangulacijom

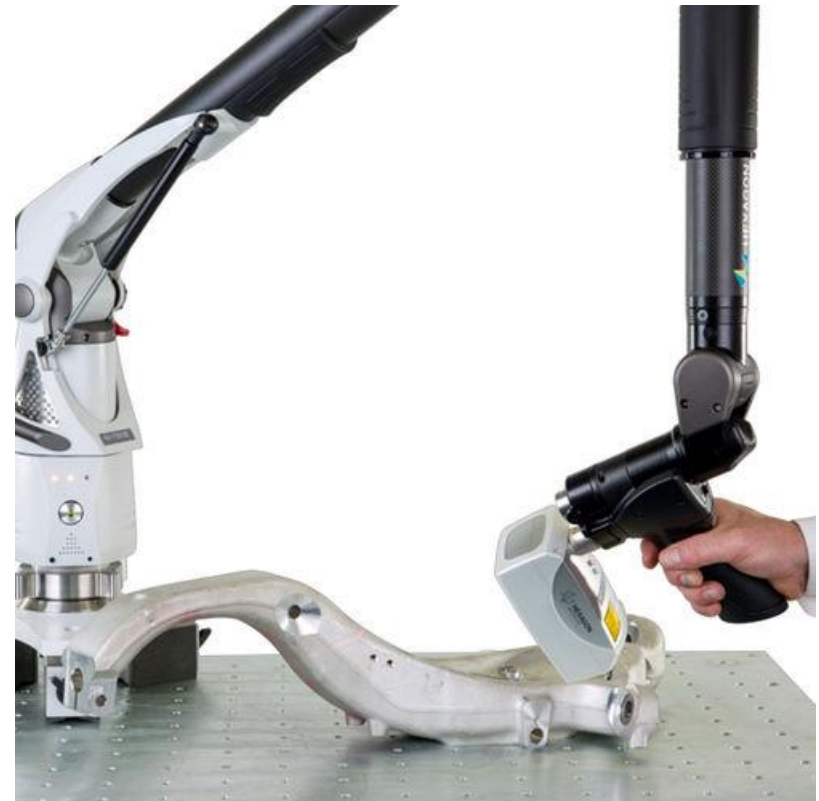
Princip 3D skeniranja je takođe bitna karakteristika sistema za triangulaciju i predstavlja stvar izbora.

Razlikuje se nekoliko različitih izvedbi, kod kojih je osnovna razlika u odnosu kretanja objekta i laserskogsistema, a one su:

- ✓ Izvedba kod koje je skener (svetlosni izvor i senzor) stacionaran, dok se platforma (koja nosi objekat) kreće translatorno i rotaciono u okviru vidnog polja;
- ✓ Izvedba sa stacionarnim objektom i pokretnim skenerom;
- ✓ Izvedba kod koje su i objekat i skener nepokretni, a rotirajuća ogledala usmeravaju svetlosni izvor i senzor preko objekta (ovde je bitno da senzor bude sinhronizovan sa svetlosnim izvorom).

# Integracija laserke triangulacije kod drugih sistema

- Zahvaljujući svojoj univerzalnosti kod primene, laserska triangulacija se danas može integrisati u različite sisteme sa ciljem poboljšanja/ubrzanja postupka 3D digitalizacije/skeniranja, a pre svega kod kontaktnih sistema kao što su:
  - Koordinatne merne mašine i
  - Merne ruke.



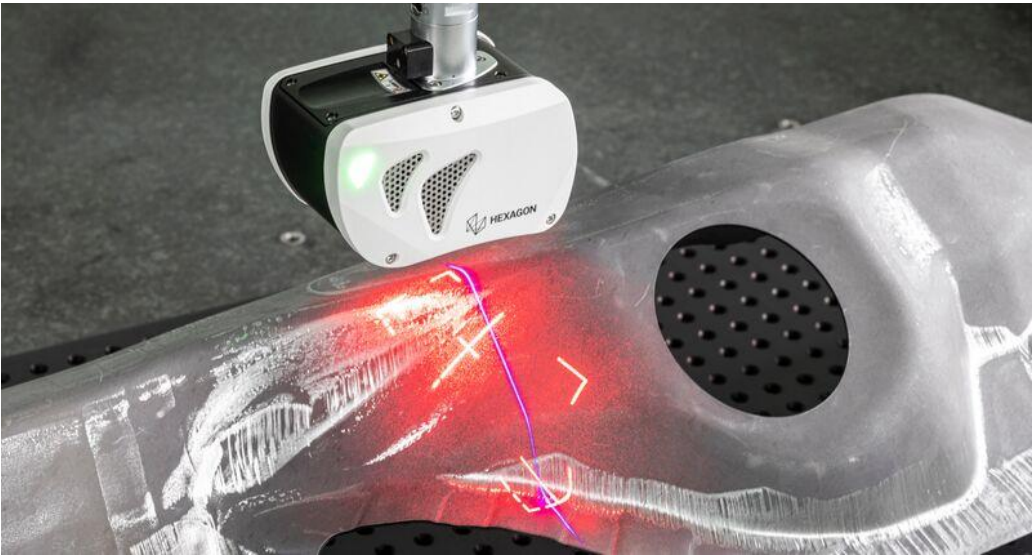
## **Prednosti laserske triangulacije:**

- ✓ Bezkontaktna metoda (odsustvo kontakta sa objektom),
- ✓ Velika brzina prikupljanja podataka prilikom 3D skeniranja,
- ✓ Može se dobiti visoka tačnost digitalizovane površine objekta,

## **Nedostaci laserske triangulacije:**

- ✓ Otežano 3D skeniranje refleksivnih površina,
- ✓ Nemogućnost skeniranja transparentnih površina,
- ✓ Osetljivost na ambijentalno osvetljenje,
- ✓ Visoka cena.

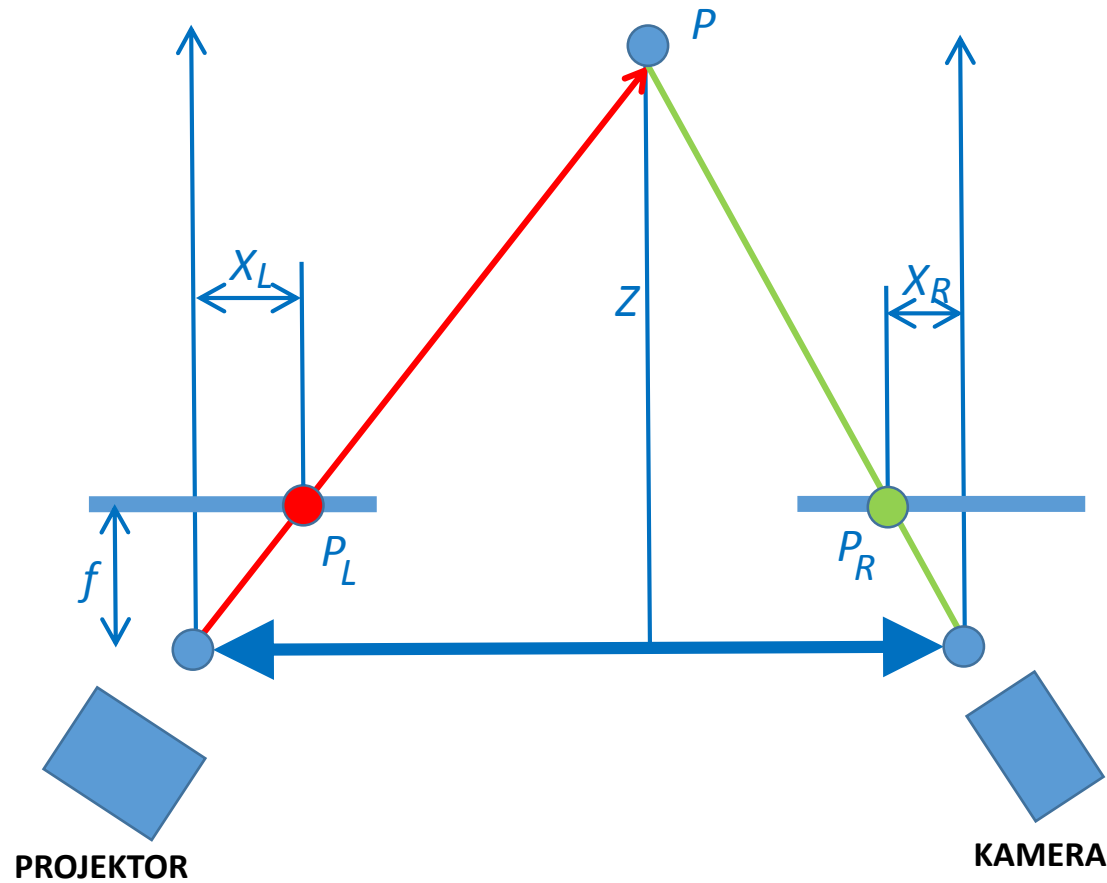
Primena u industriji



Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

# VIŠELINIJSKA TRIANGULACIJA STRUKTURIRANOM SVETLOŠĆU

# Strukturirana svetlost

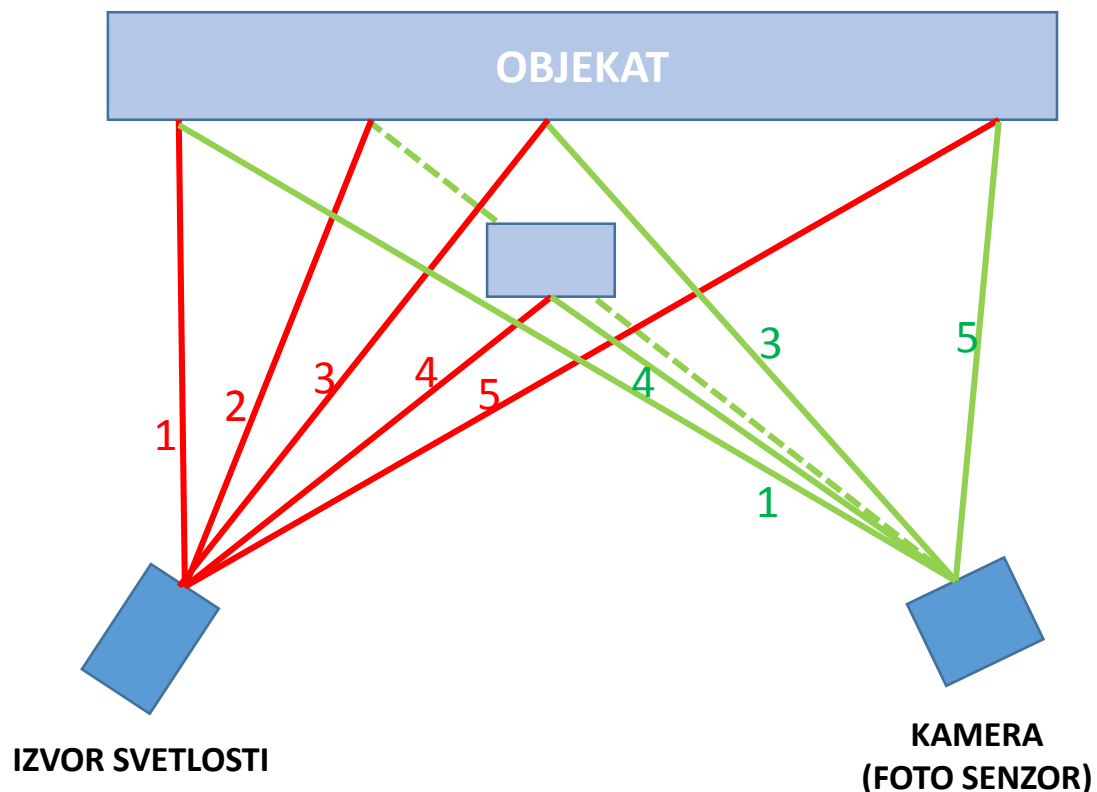


Ukoliko umesto leve kamere postavimo projektor i projektujemo tačku na objekat (tačka  $P$ ), na osnovu poznatog ugla projektovanja (možemo odrediti  $X_L$ ) i pozicije na kojoj se tačka pojavila u ravni slike ( $X_R$ ) možemo triangulacijom izračunati udaljenost tačke  $P$ , tj.  $Z$ .

Na ovom principu rade i 1-linijski laserski skeneri.



# Višelinijaska triangulacija (strukturiranom svetlošću)



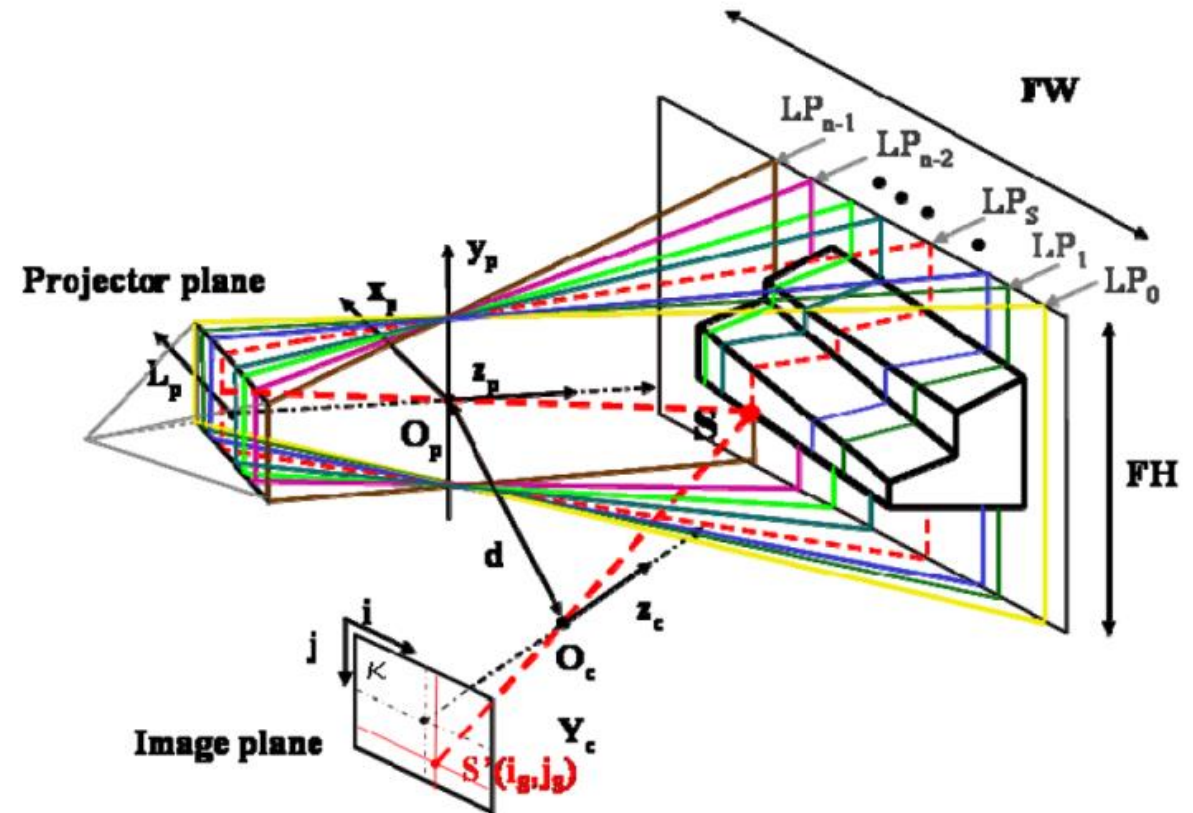
Prilikom projektovanja više identičnih svetlosnih linija na objekat, senzor ne može da „prepozna“ koja slika odgovara kojoj projektovanoj liniji.

U primeru na slici, redosled projektovanih linija je 1, 2, 3, 4 i 5, a redosled slika na senzoru je 1, 4, 3, 5 (2 nije ni detektovana na senzoru).

Da bi se mogle identifikovati linije na senzoru koje odgovaraju projektovanim linijama, potrebna je upotreba nekog sistema za kodiranje linija.

# Višelinijaska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

- Cilj je ubrzanje procesa 3D digitalizacije, projektovanjem više linija na objekat.
- Projektor projektuje više-linijske šablone na objekat, koji zajedno obrazuju jedinstveni kodni sistem.
- Foto-osetljivi senzor detektuje reflektovane signale, pri čemu kodni sistem omogućuje identifikaciju svih projektovanih linija na foto senzoru.
- Na osnovu trigonometrijskih odnosa projektovanih i reflektovanih linija, izračunava se udaljenost tačaka na objektu, odnosno njihove koordinate u koordinatnom sistemu merenja.



# Višelinijaska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

## KODIRANJE LINIJA

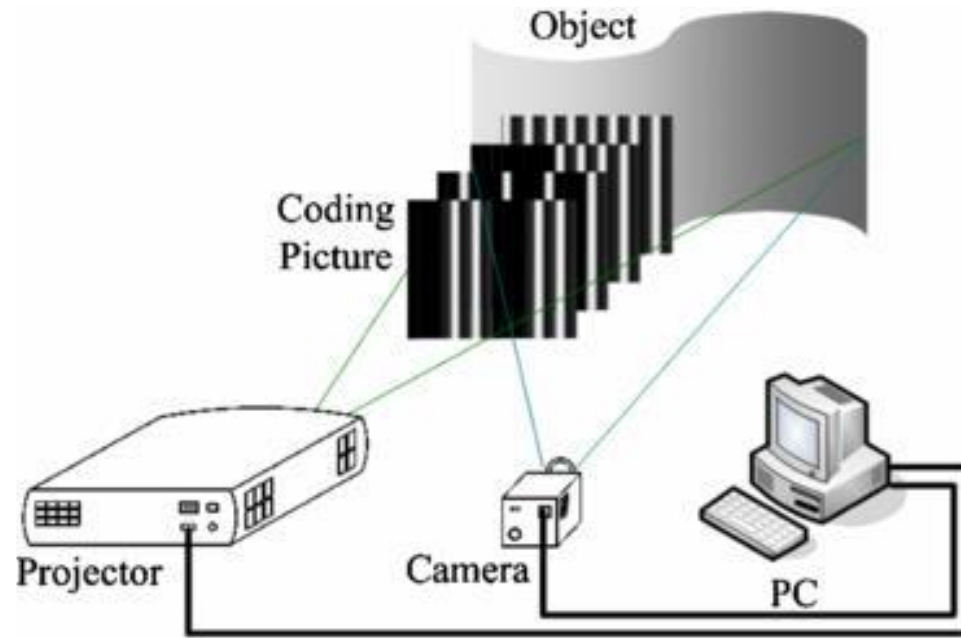
Postoji više pristupa za kodiranje linija.

### Kodni sistemi, koje treba spomenuti su:

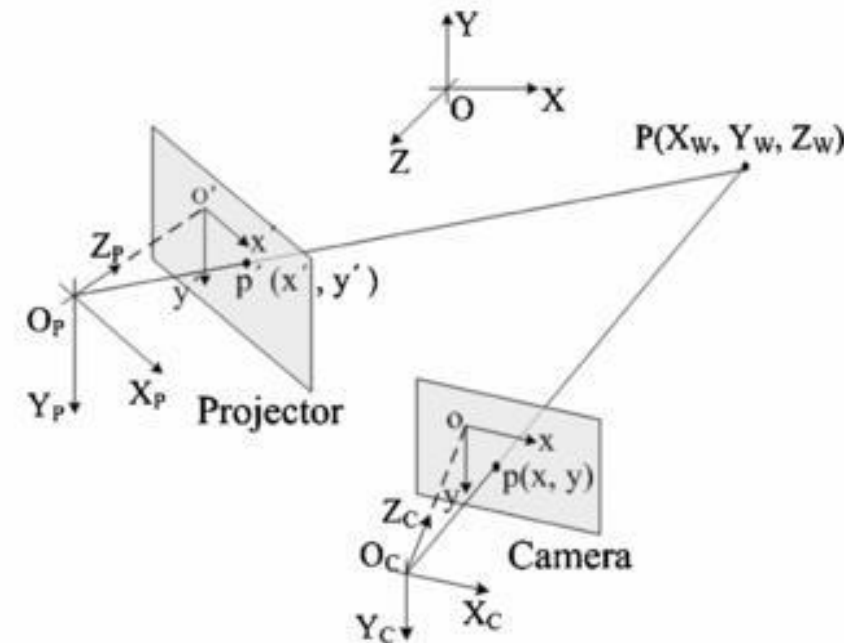
- 1) Kodiranje binarnim vremenskim paternima (šablonima)
- 2) Kodiranje graničnim linijskim kodom
- 3) Kodiranje u boji (de Bruinoovom sekvencom)

# Višelinjska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA



(a)



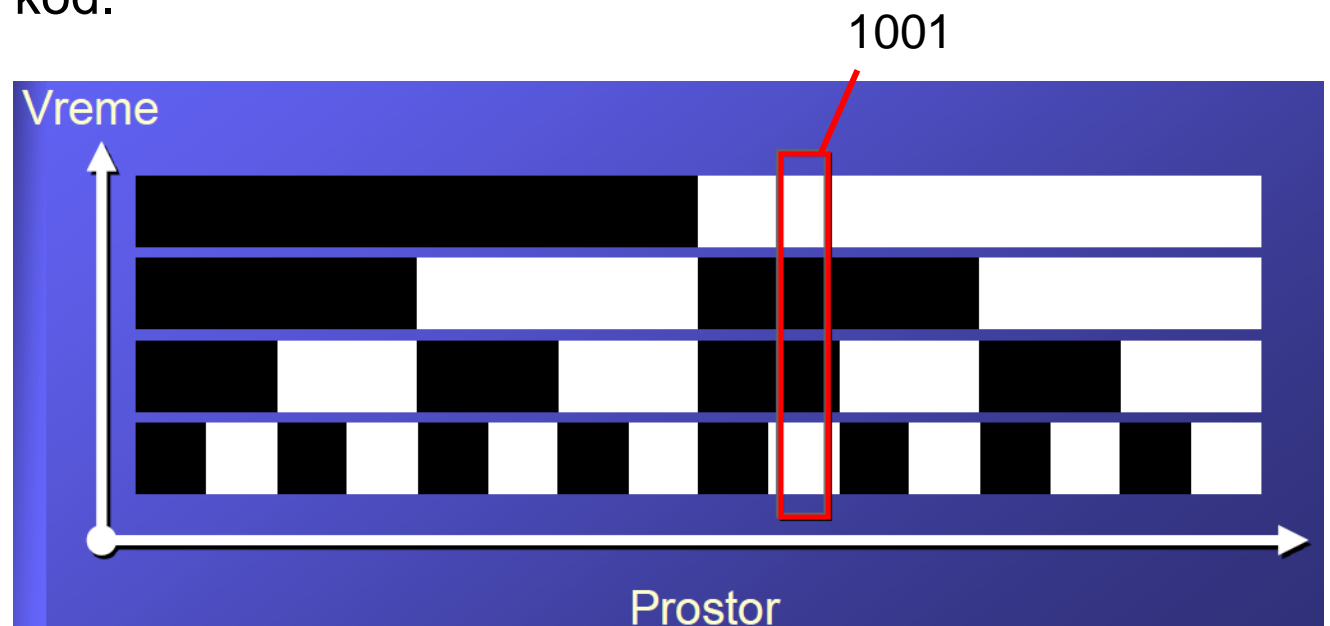
(b)

# Višelinijska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

## KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

- Projektuje se niz paterna, u okviru kojih se razlikuju širine i raspored crno belih pruga, u jednakim uzastopnim vremenskim intervalima.
- Najfiniji patern određuje broj linija koji se može detektovati.
- Svakoj liniji odgovara jednoznačan binarni kod.

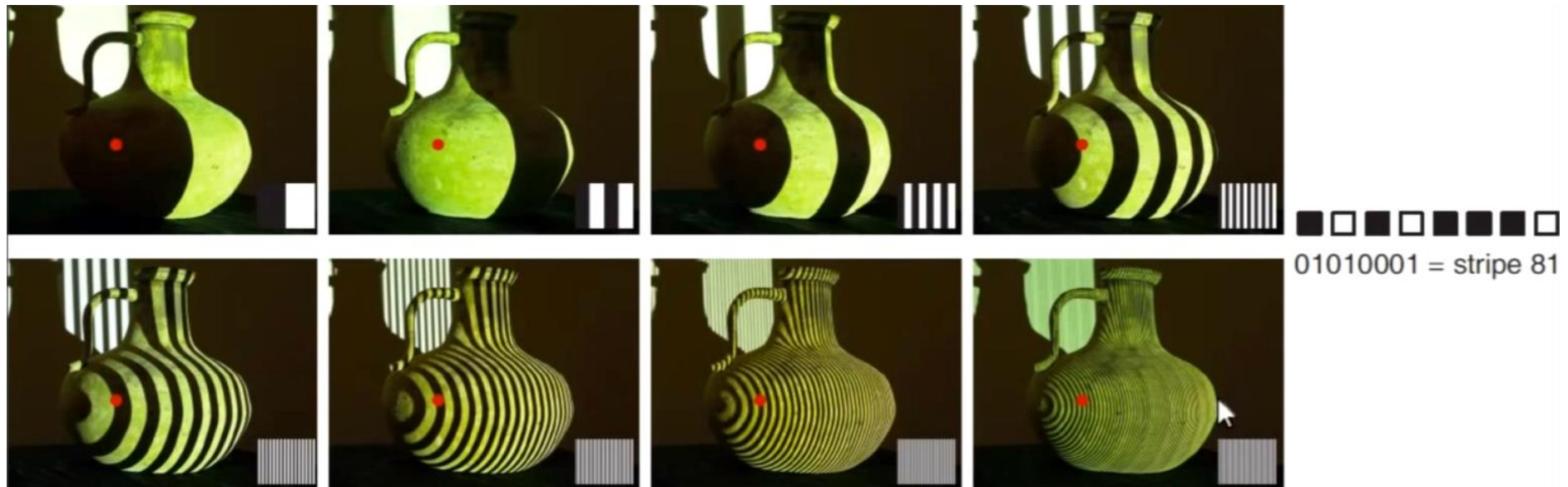
Primer na slici sadrži 4 paterna, pri čemu najfiniji sadrži 16 linija



# Višelinjska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

## KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

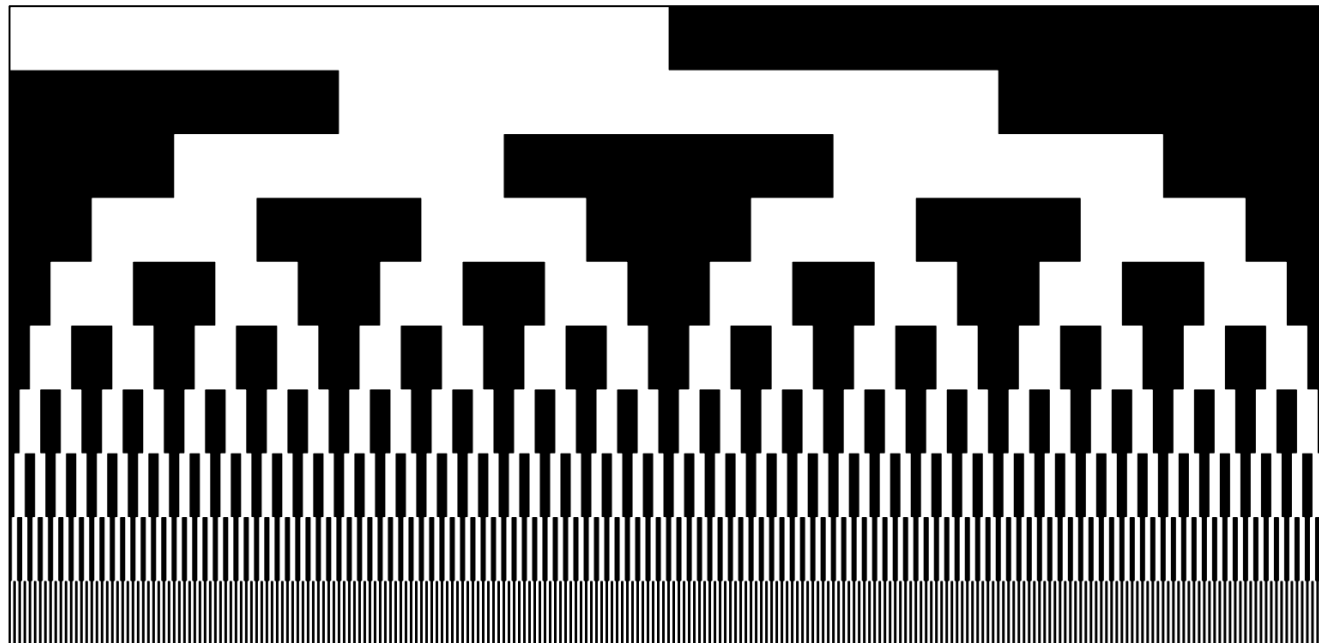
Primer na slici pokazuje kodiranje sa 8 paterna, kojima je omogućeno kodiranje 256 linija.



# Višelinijska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

## KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

Primer na slici prikazuje kodni sistem sa 10 paterna, kojima je omogućeno kodiranje 512 linija.



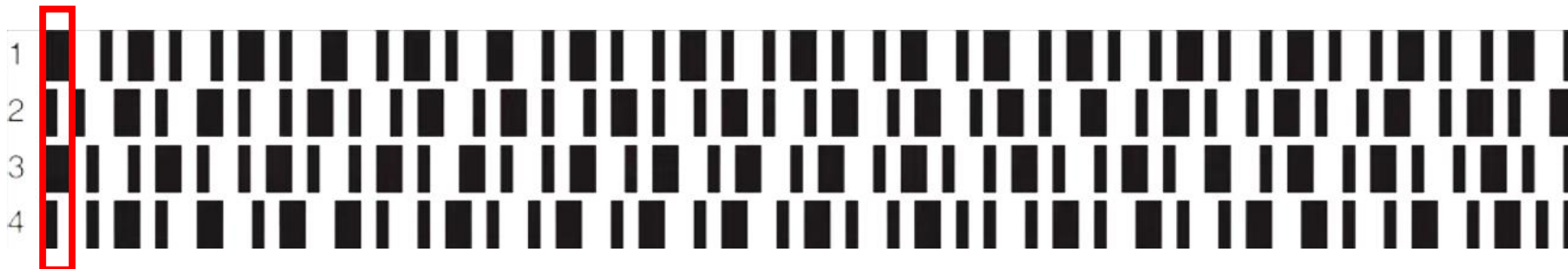
# KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

- Ključna mana vremenskog kodiranja je potreba za određenim vremenskim intervalom u kojem se projektuju svi paterni.
- Veća rezolucija nameće potrebu za većim brojem paterna, čime se produžava trajanje skeniranja.
- Prethodno čini ovu vrstu kodiranja teško upotrebljivom u slučaju 3D digitalizacije živih objekata, pre svega ljudi, jer se u tom kratkom vremenskom intervalu potrebnom za projektovanje skupa paterna najčešće dogodi pomeranje (potreba za disanjem, nemogućnost zadržavanja u istom položaju i sl.).
- Treba spomenuti i ograničenje u pogledu rezolucije koje je diktirano mogućnostima projektora (u smislu finoće projektovanih linija).



# LINIJSKI GRANIČNI KOD (eng. STRIPE BOUNDARY CODE)

- Ovaj kodni sistem je zasnovan na analizi uzastopnih parova linija, pri čemu se svaka kombinacija (kod) pojavljuje samo jednom u okviru projektovanih paterna.
- Umesto da tražimo sredinu svake od projektovanih linija, kod ovog kodnog sistema posmatramo granicu između dve uzastopne linije.
- Promena u prvom paru: CRNA-CRNA; CRNA-BELA; CRNA-CRNA; CRNA-BELA se pojavljuje samo jednom u celom nizu.
- Na osnovu toga senzor „prepoznaje“ koja je koja linija.
- U odnosu na vremenski binarni kod, ovim kodnim sistemom je sa manje paterna moguće kodirati daleko veći broj linija, odnosno 16 naspram 112.
- Time se skraćuje vreme skeniranja i povećava tačnost.



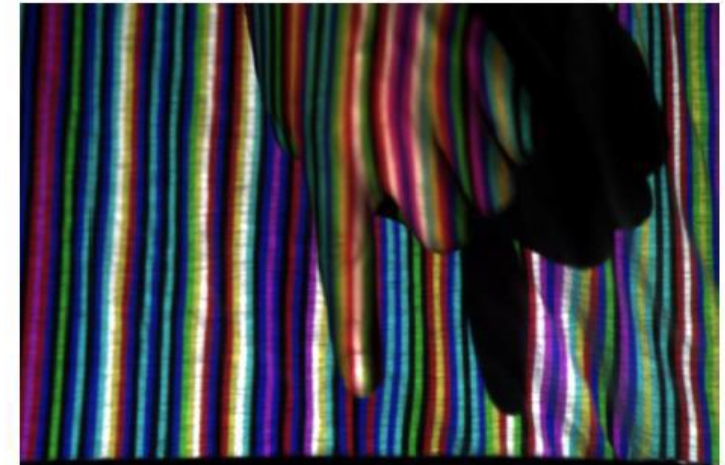
# KODIRANJE LINIJA PATTERNIMA U BOJI

- Slično kao kod prethodnog kodnog sistema i ovde se analizira promena u okviru uzastopnih linija, s tim da se ovde **posmatraju 3 linije**.
- Ovaj kodni sistem omogućava da se na bazi kombinovanja binarnih R, G i B paterna (koji predstavljaju CRVENU, ZELENU I PLAVU boju), formira niz boja u okviru kojeg su svake tri uzastopne promene boja jedinstvene.
- Ovo kodiranje je zasnovano na matematičkom modelu poznatom kao **de Bruijn-ova sekvenca**.
- U primeru na slici promena u prve 3 linije RGB paterna (CRNA-CRNA-CRNA; CRNA-CRNA-CRNA; BELA-CRNA-BELA), generiše TEGET-CRNA-TEGET kombinaciju linija u boji, koja se u čitavom nizu linija u boji (125 linija) **pojavljuje samo jedan put**.



# KODIRANJE LINIJA PATERNIMA U BOJI

- Prednost ovog načina kodiranja je u potrebi za samo jednim paternom („single-shot“ tehnika), **čime se skraćuje vreme skeniranja i olakšava 3D digitalizacija živih objekata.**

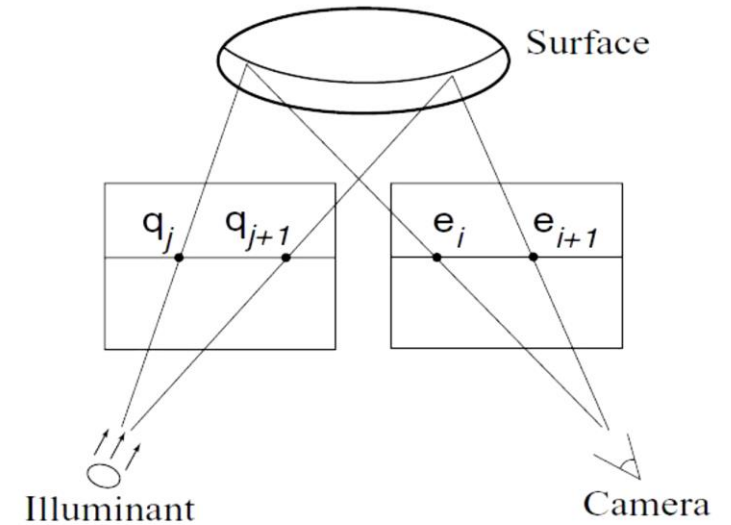


- Jedan patern u boji može da kodira i **do 512 linija**.
- Projektor projektuje patern u boji na objekat, a kamera (foto osetljivi senzor) detektuje reflektovani niz boja.
- Nedostatak ovog načina kodiranja se ogleda u osetljivosti na boju površina objekta.

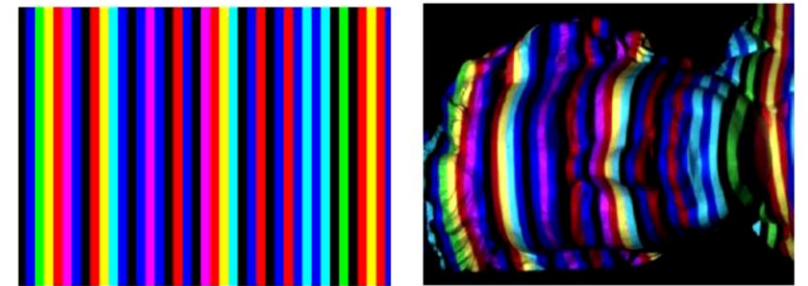


Jedna boja nije ista na svetlim i na tamnim površinama objekta, što može ugroziti tačnost kodiranja.

- Patern detektovan na senzoru (tj. kameri) nikada nije oštar i jasan kao projektovani patern.
- Razlog za to je što je površina objekata koji se skeniraju u boji, zbog čega dolazi do promene boje linije na senzoru u odnosu na boju koja je projektovana.
- U tom pogledu su binarni paterni u prednosti, jer je kod njih razlika između crnih i belih linija uvek dovoljno jasna.

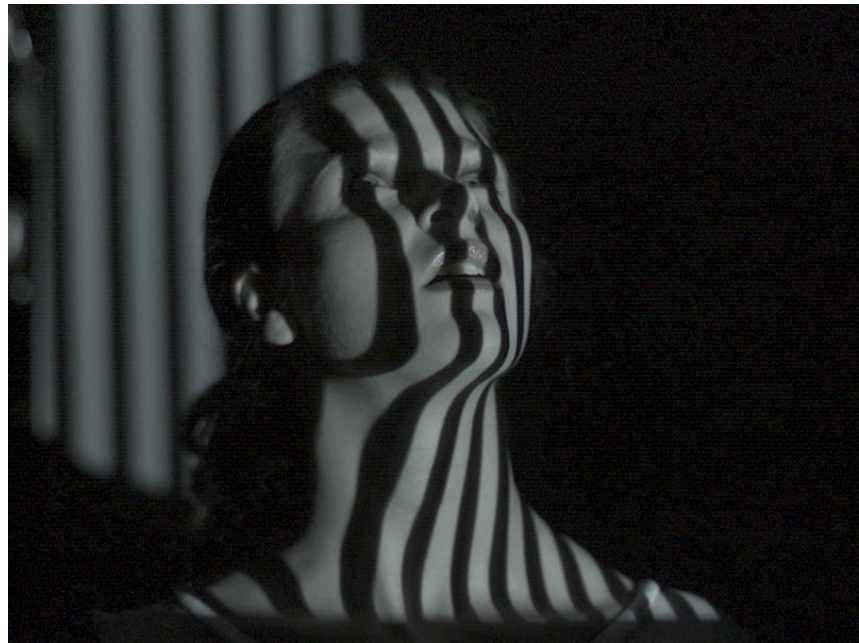
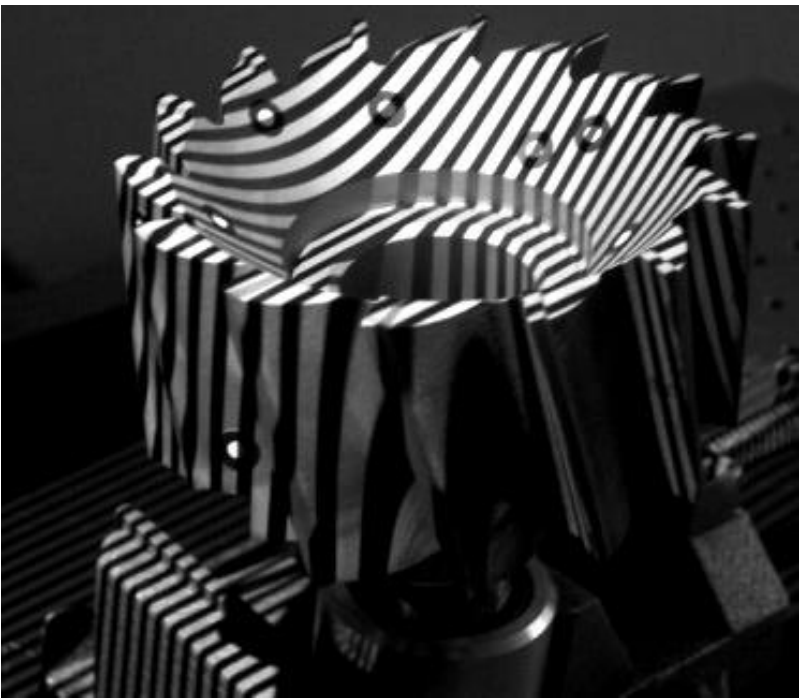


(a)





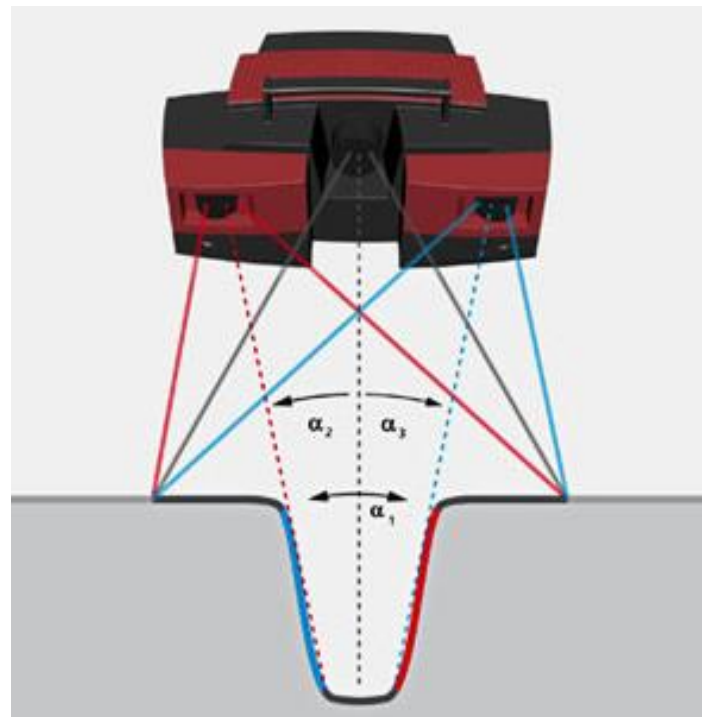
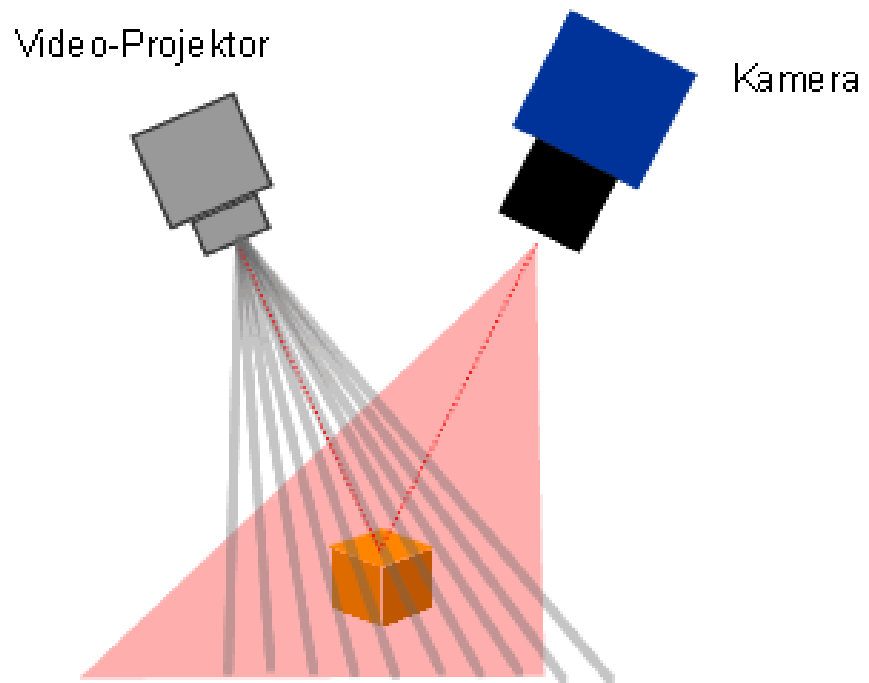
**Višelinijnska triangulacija (strukturiranom svetlošću) - primeri**



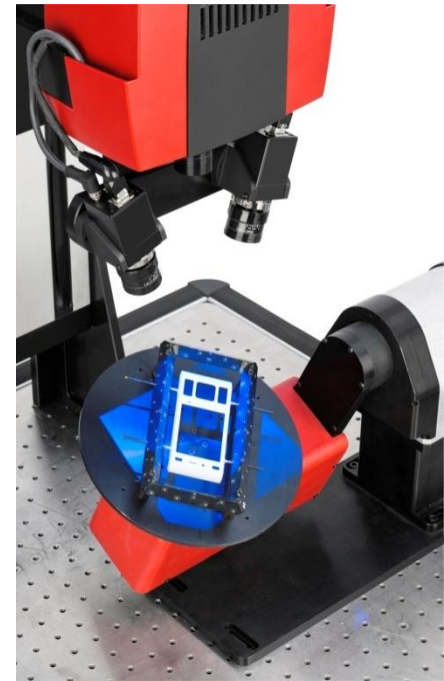
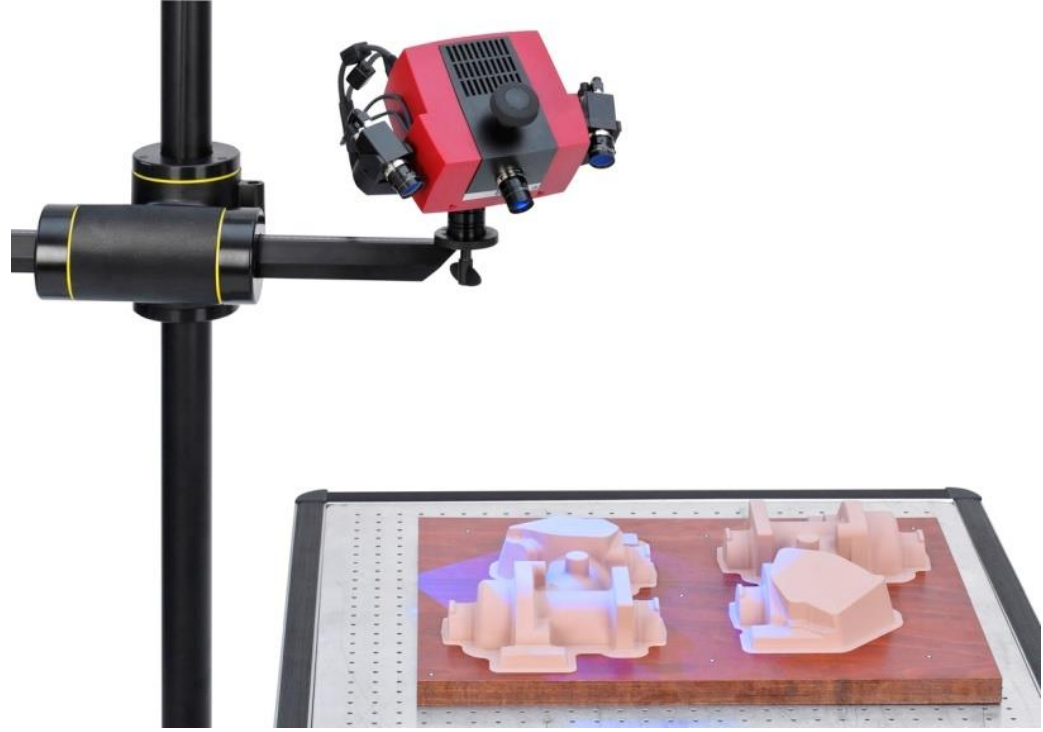
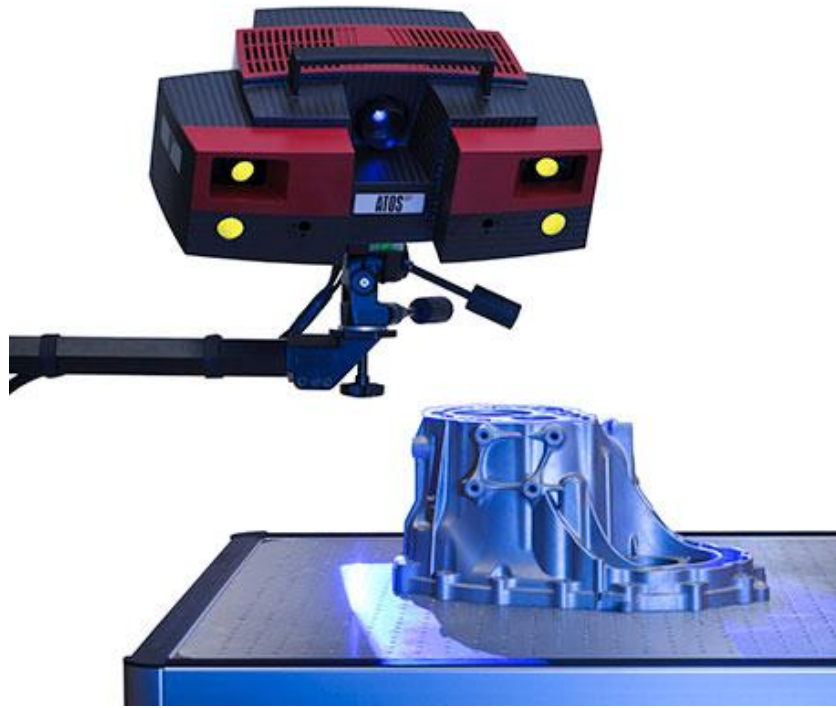


# Višelinijnska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

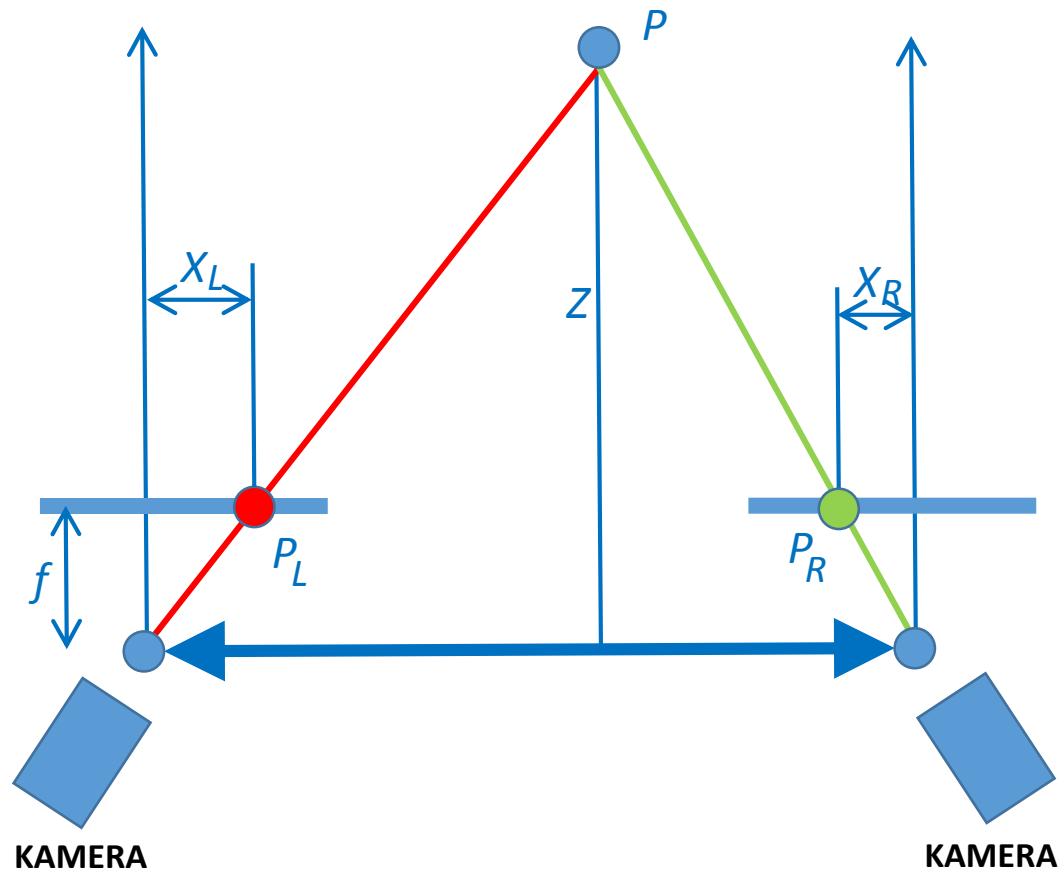
Prednosti primene dve kamere







# Aktivna stereovizija



Kod aktivne stereovizije, udaljenost tačke  $P$  možemo odrediti na bazi trigonometrijskih odnosa (tj. triangulacijom), zato što znamo gde ( $X_L$  i  $X_R$ ) se ta tačka nalazi na levoj i desnoj slici (tj. fotografiji).

Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

# KOMPJUTERIZOVANA TOMOGRAFIJA CT

# Metode 3D digitalizacije

Pasivne

Aktivne

Kontaktne

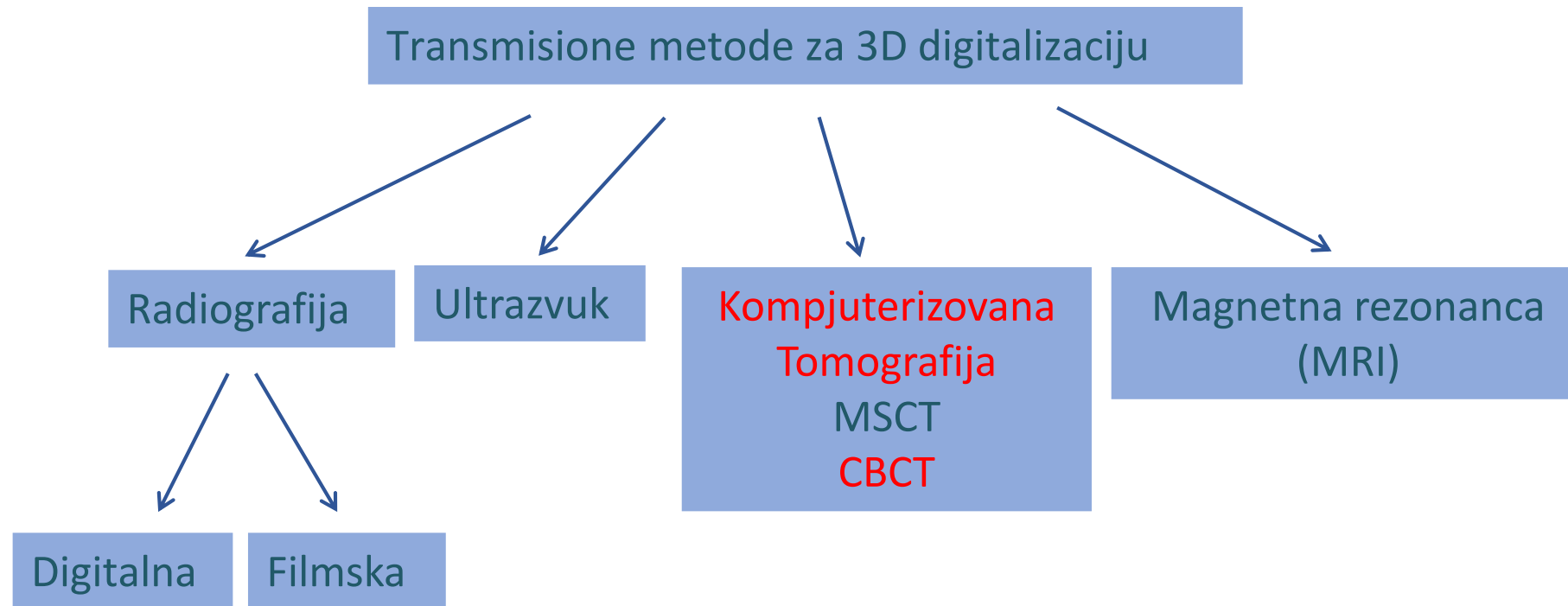
Bezkontaktne

Refleksivne

Transmisivne

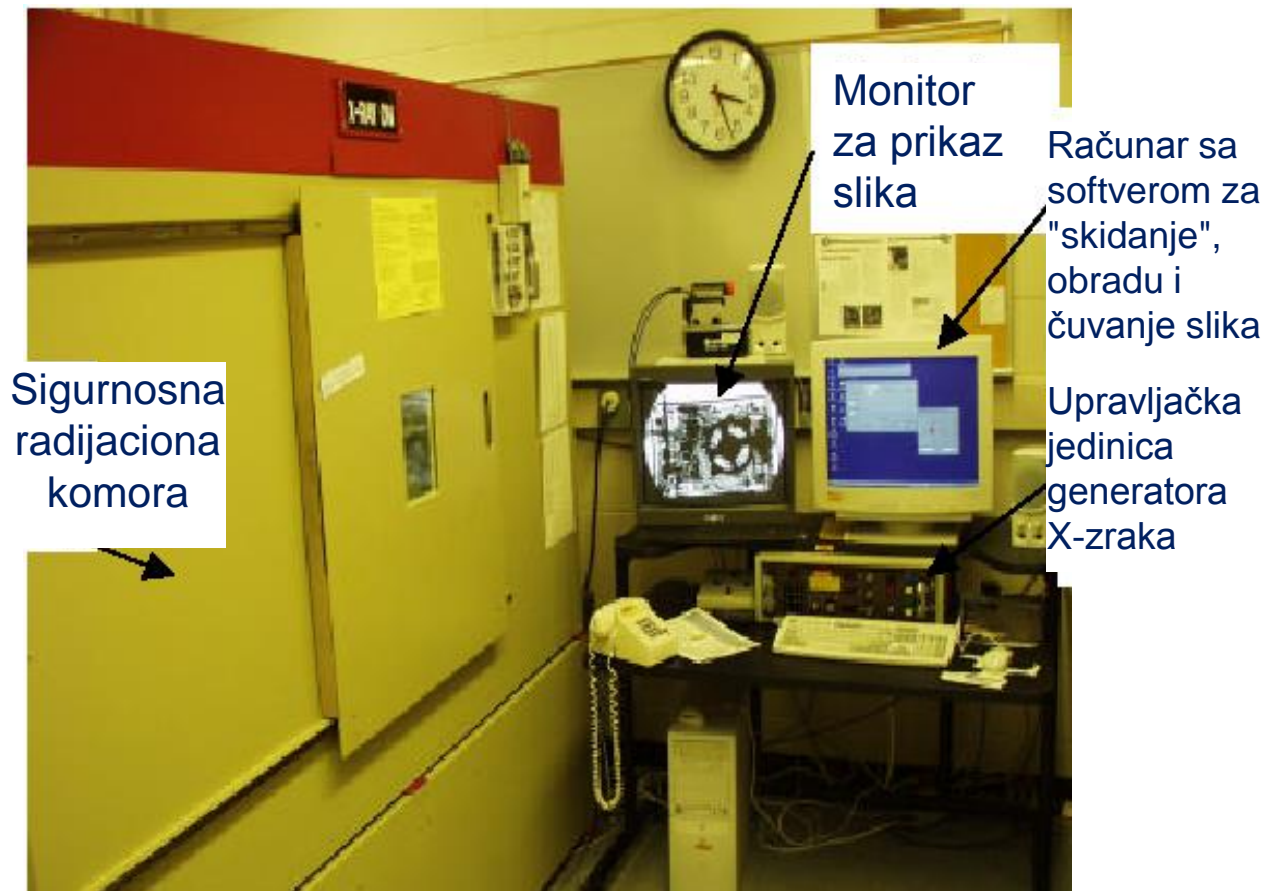
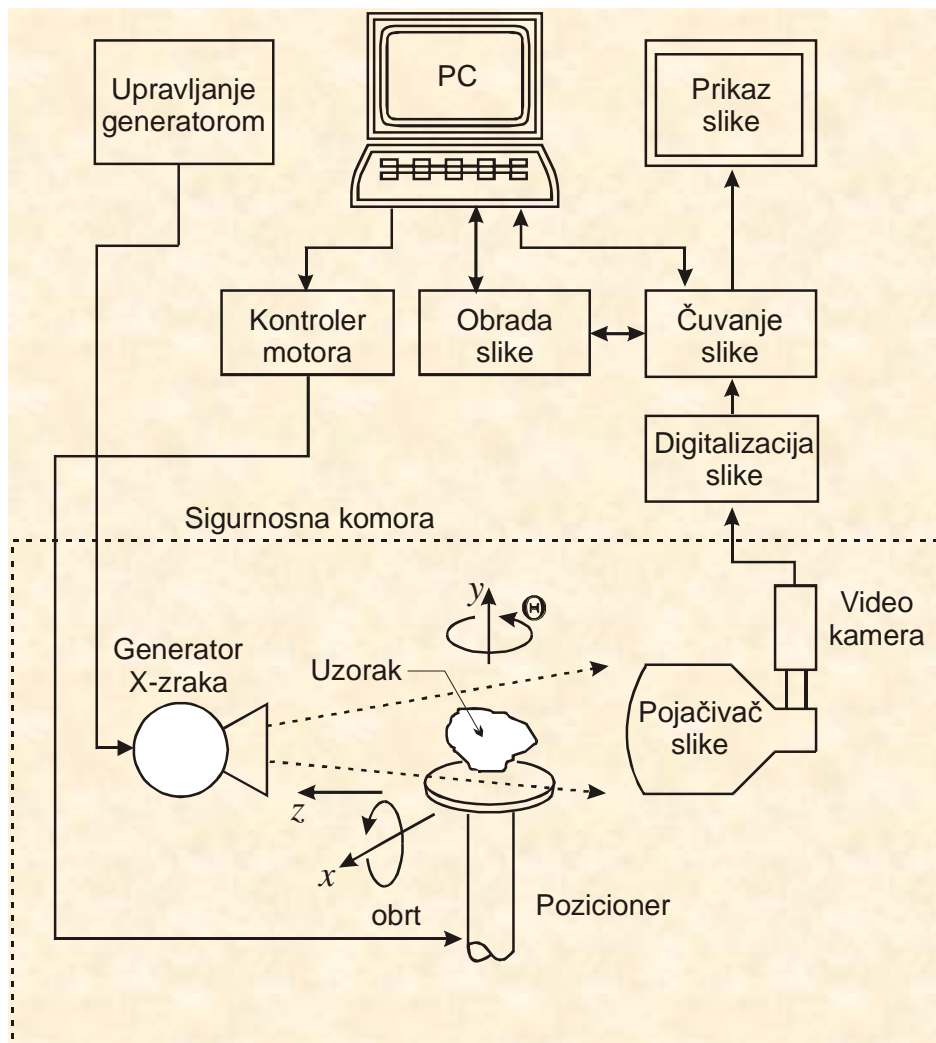
Optičke

Ne-optičke



**Transmisione metode** detektuju slabljenje signala (najčešće energetski) nakon prolaska kroz mereni objekat, odnosno mere količinu energije koju objekat nije apsorbovao.

## Digitalna radiografija (radiografija u realnom vremenu)



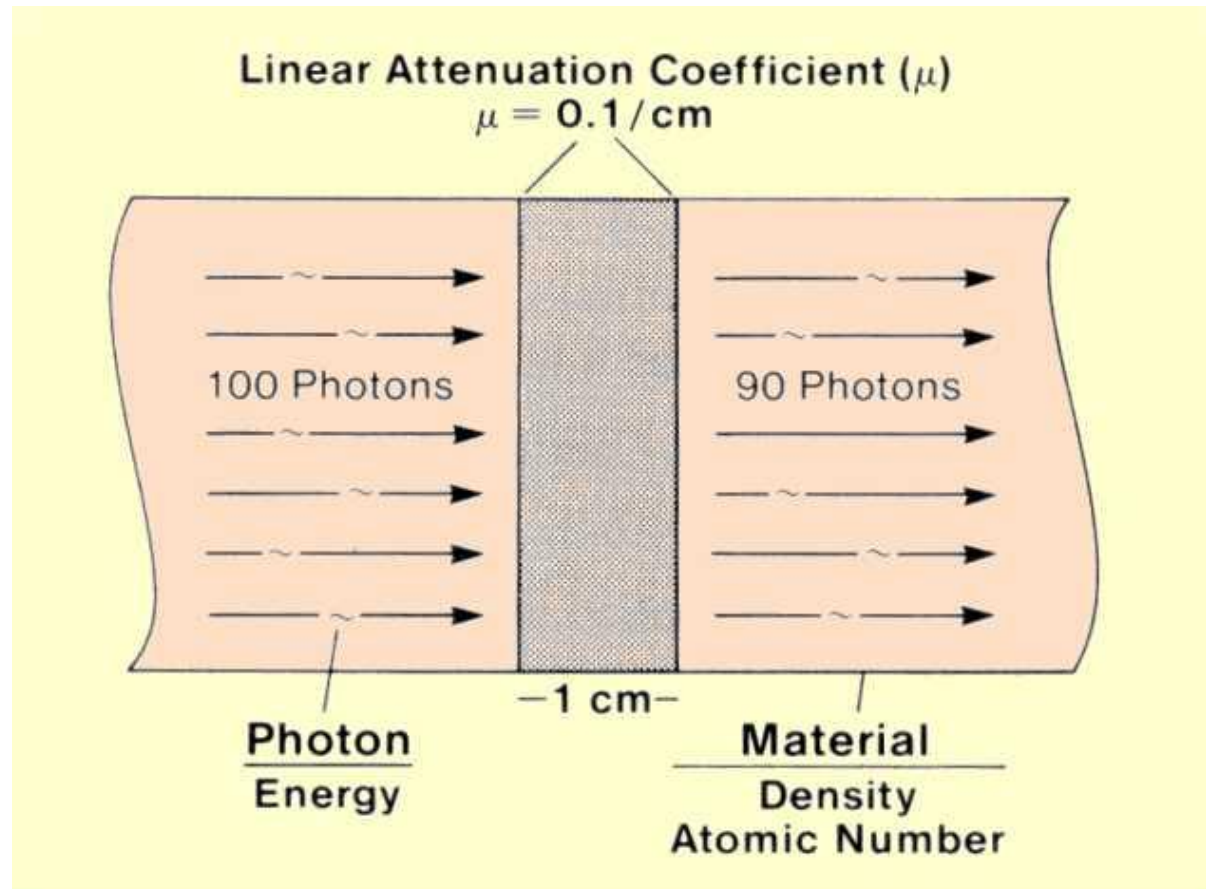
# Kompjuterizovana tomografija

Pri prolasku kroz materijal dela, X-zraci atenuiraju (slabe) usled apsorpcije ili rasejavanja;

## Nivo atenuacije zavisi od:

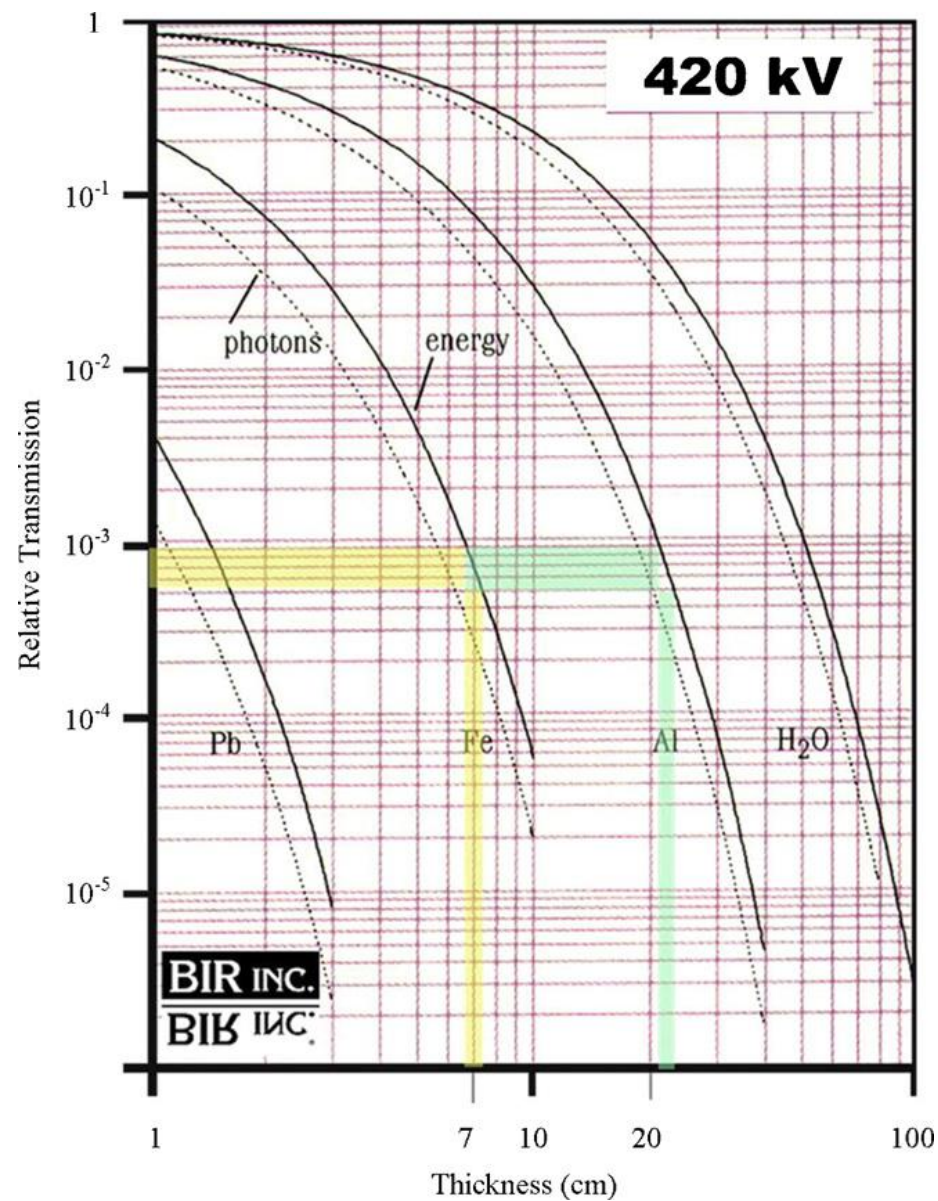
- dužine puta koji prelaze unutar apsorbirajućeg materijala,
- strukture materijala i njegove gustine (odnosno atenuacionog koeficijenta  $\mu$ ) I
- energije X-zraka.

Atenuacioni koeficijent materijala ograničava **maksimalnu debljinu materijala** koja može biti probijena.



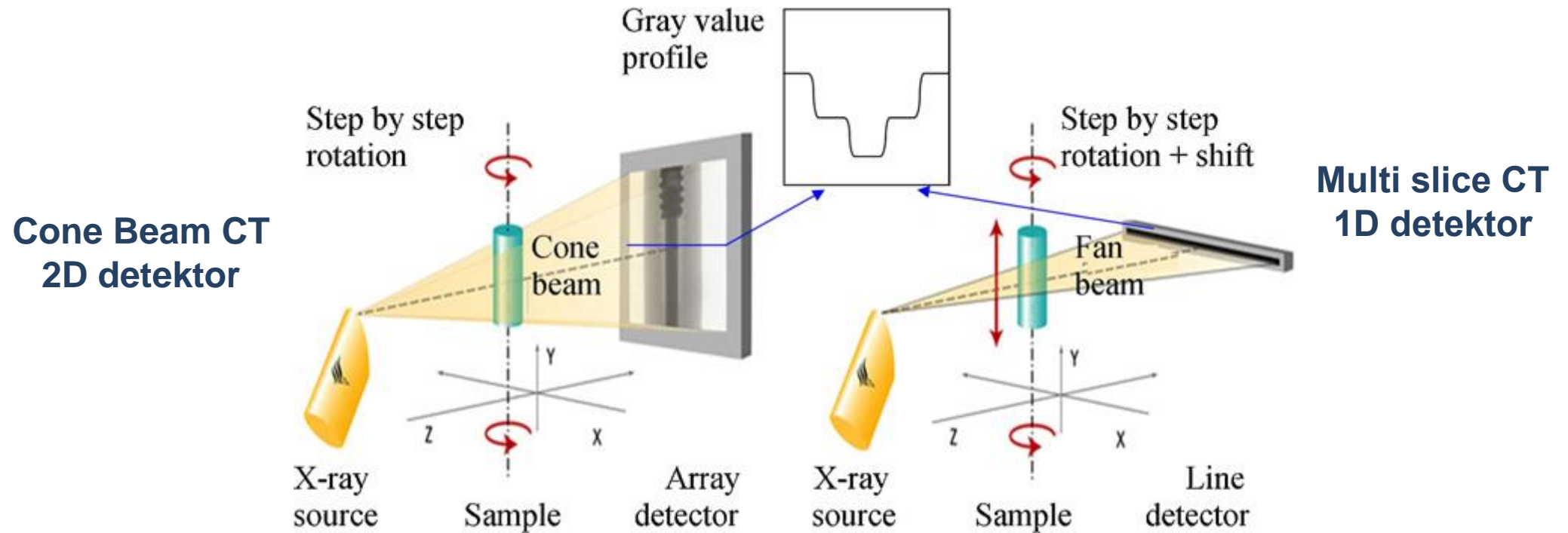


Primeri atenuacionih koeficijenata različitih materijala

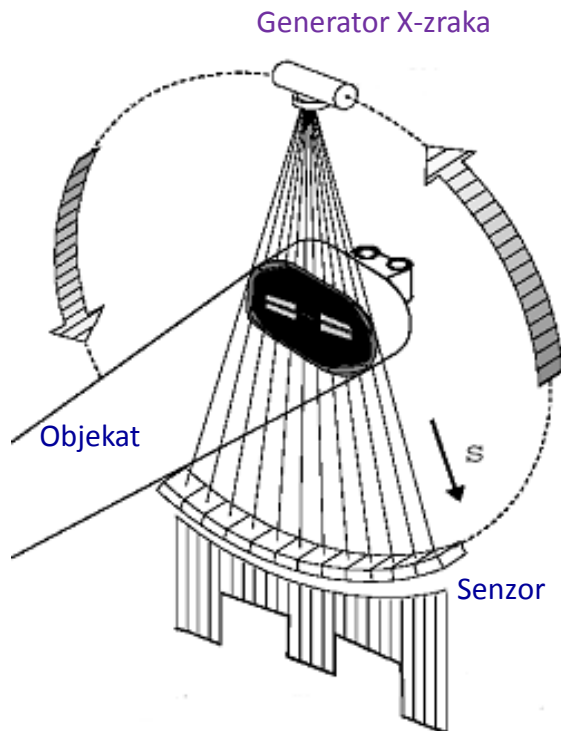
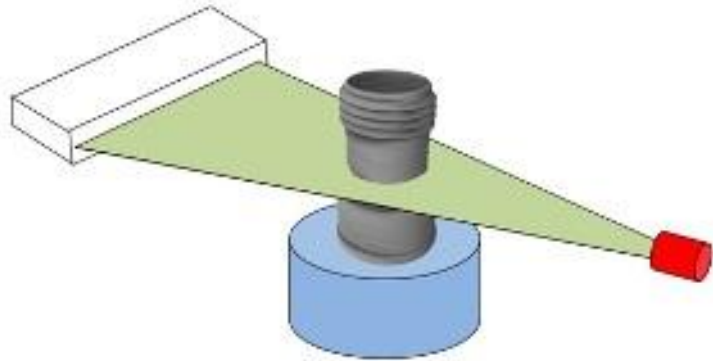


# Kompjuterizovana tomografija - vrste

1. Kompjuterizovana tomografija konusnim snopom (eng. Cone Beam CT)
2. Više-slojna kompjuterizovana tomografija (eng. Multi slice CT)

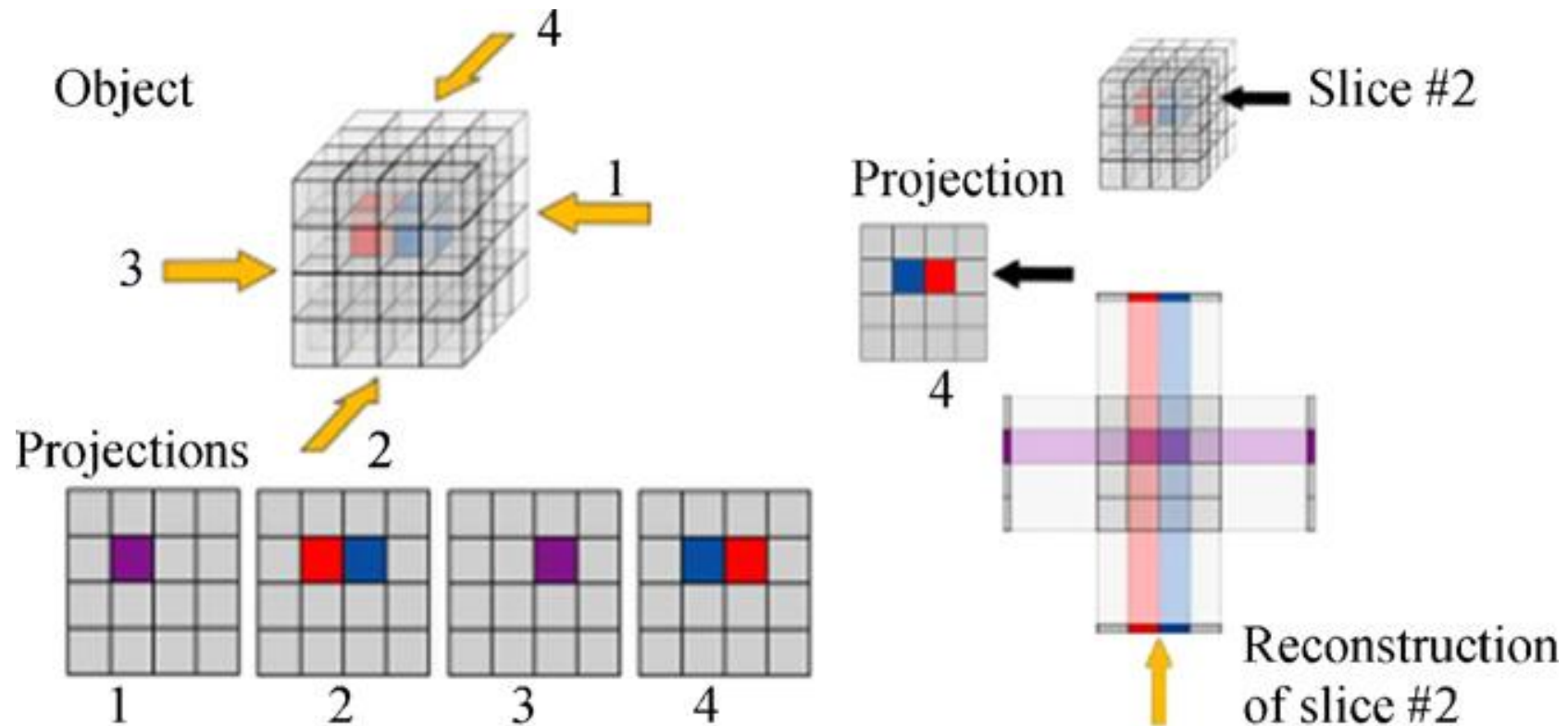


## Više-slojna kompjuterizovana tomografija (MSCT)



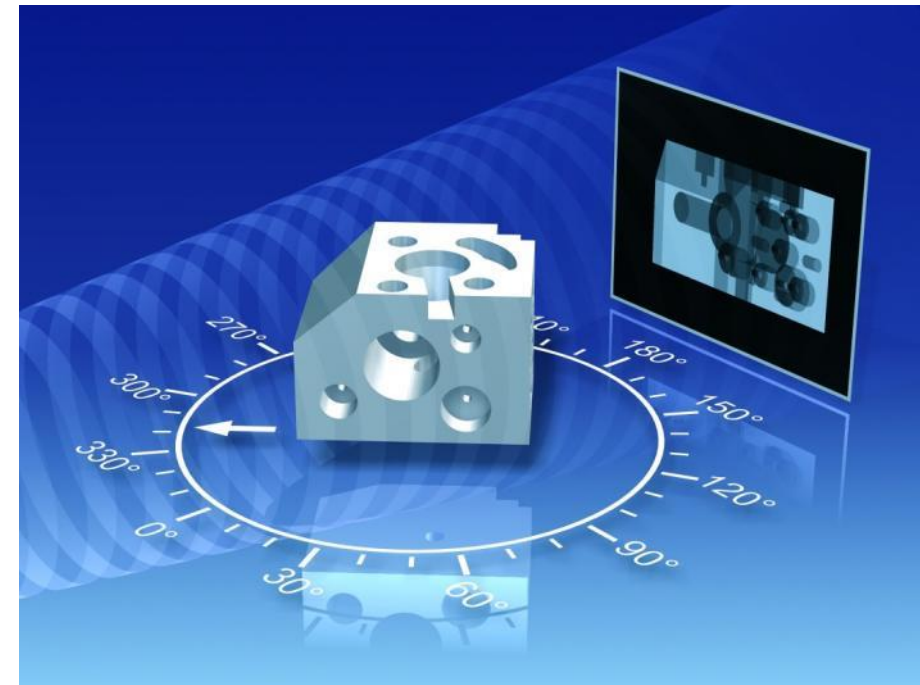
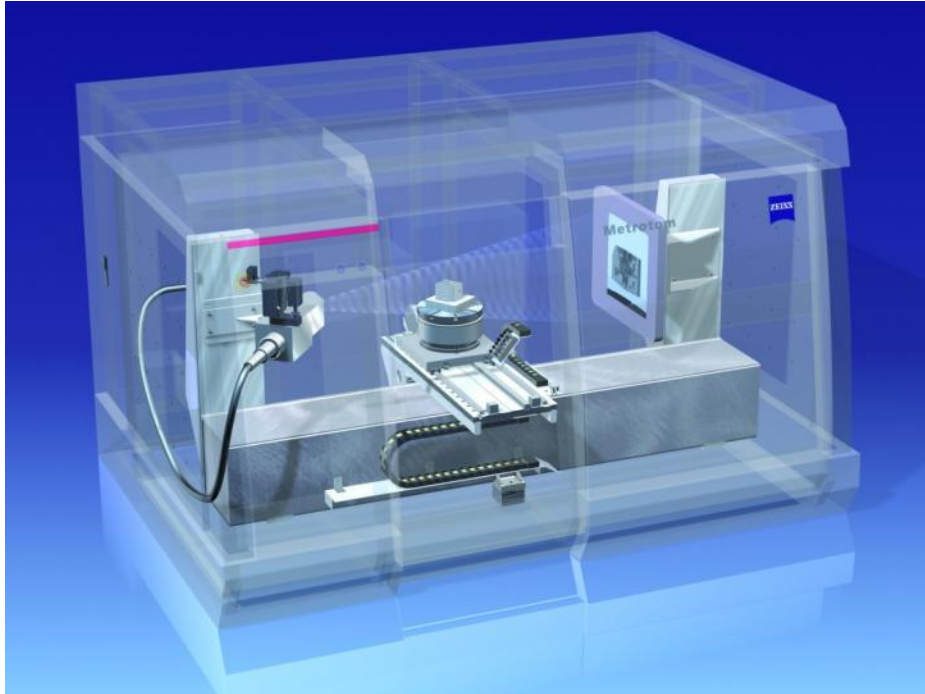
CT sistem TOSHIBA – TOSCANER 24200AV

# Kompjuterizovana tomografija konusnim snopom (eng. Cone Beam CT)



# Kompjuterizovana tomografija na bazi konusnog snopa

## Industrijski CBCT – Zeiss Metrotom

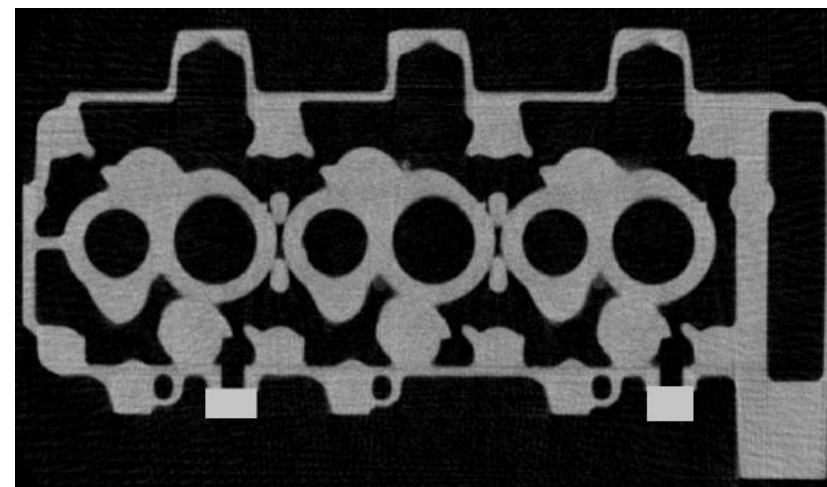


CBCT je u SAD počeo da se primenjuje od 2001. i do 2010. godine je u rad pušteno preko 3000 sistema.

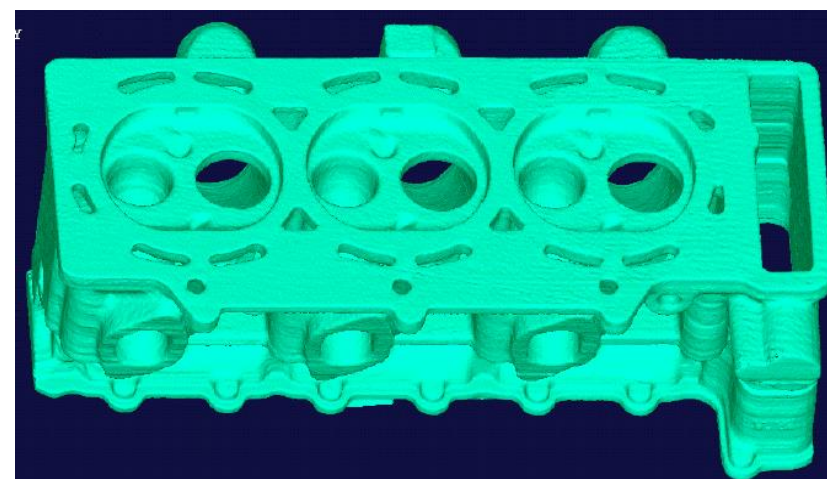
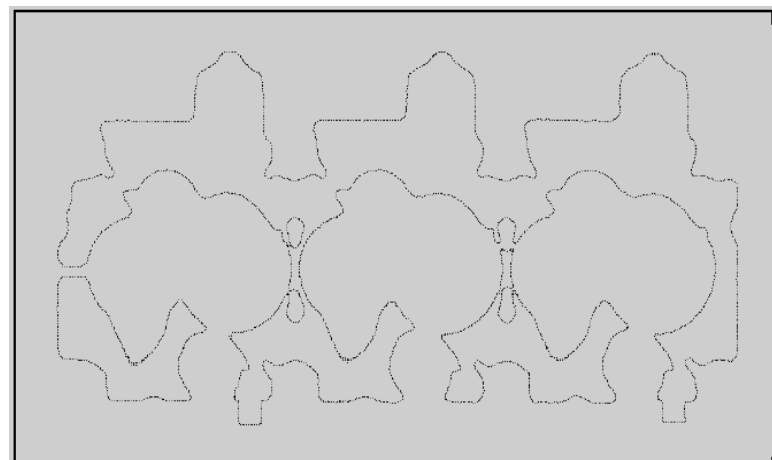


**Procedura:** Nakon što se izvrši skeniranje i dobiju se CT slojevi, vrši se rekonstrukcija kontura površina koje su ispresecane u CT slojevima, za šta se koriste softveri sa rutinama za automatizovano pronalaženje ivica, tj. **segmentaciju**.

Kao rezultat se dobijaju ivične linije objekta u vidu oblaka tačaka čijim daljim procesiranjem (u specijalizovanim softverima) se dobija CAD model.



Proces CT na primeru bloka motora

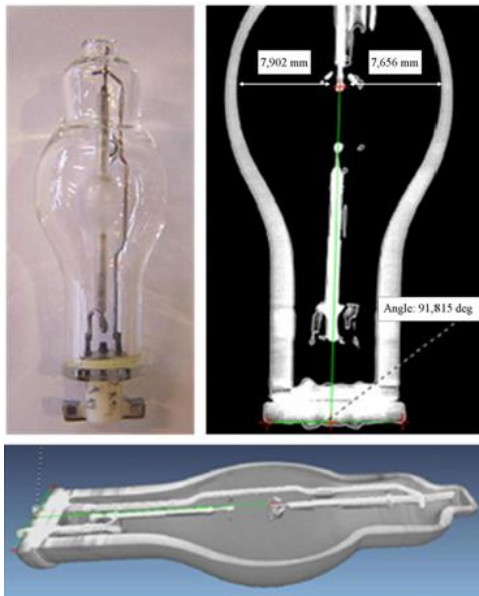


# Kompjuterizovana tomografija – karakteristike i oblasti primene

CT je jedina tehnologija pomoću koje je moguće 3D digitalizovati objekte sa nedostupnim unutrašnjim površinama:

- proizvodi proizvedeni **aditivnom proizvodnjom**;
- proizvodi od **više materijala**:
  - dvo-komponentni proizvodi od plastike i
  - plastični delovi sa umetcima od metala;

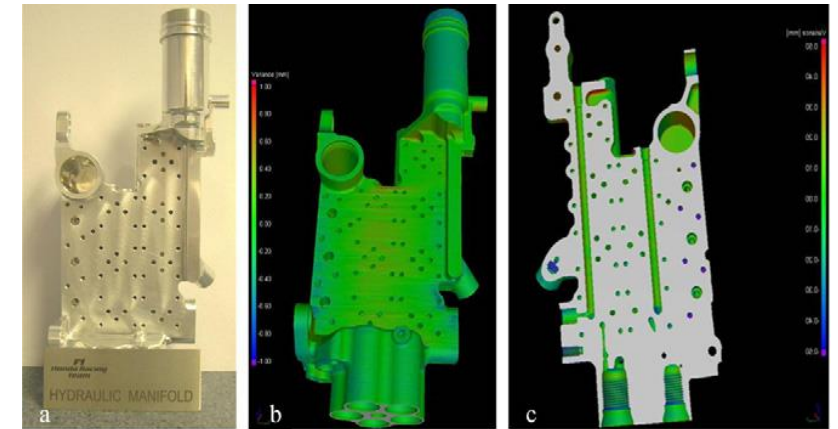
multi-material lamp bulb



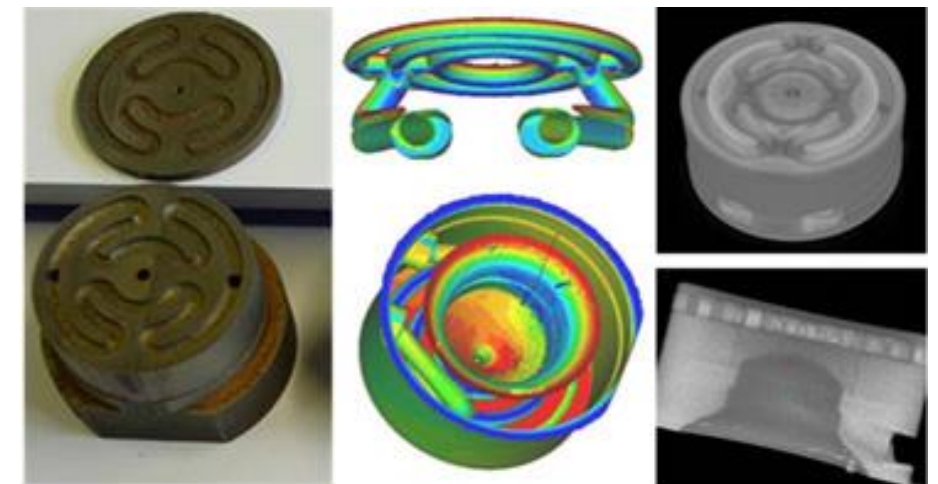
multi-material assemblies



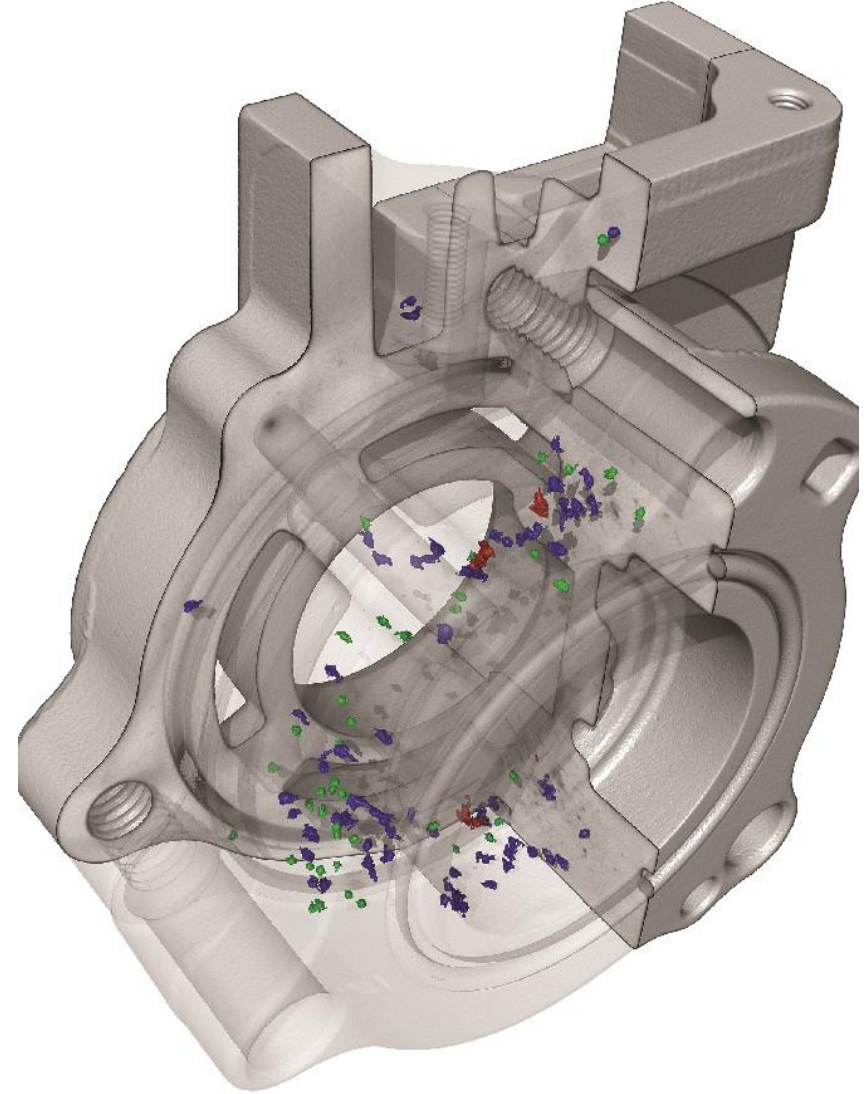
comparison of outer and inner geometry with CAD model



layered manufactured nozzle with complex internal channels



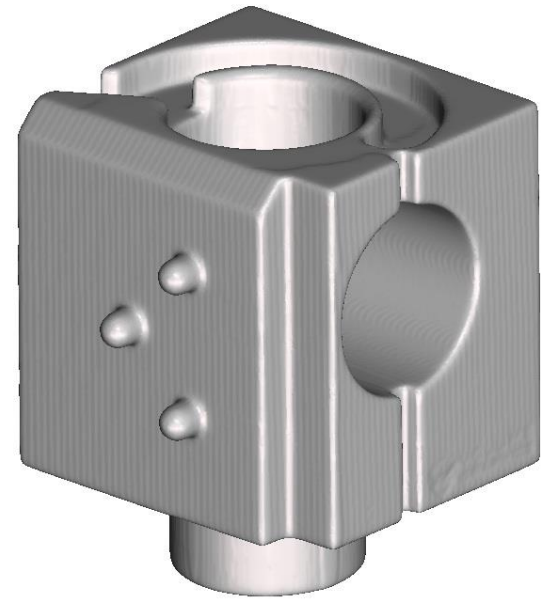
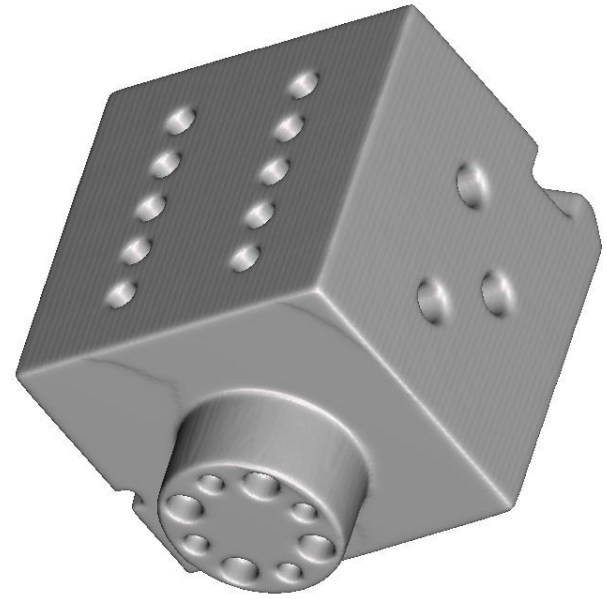
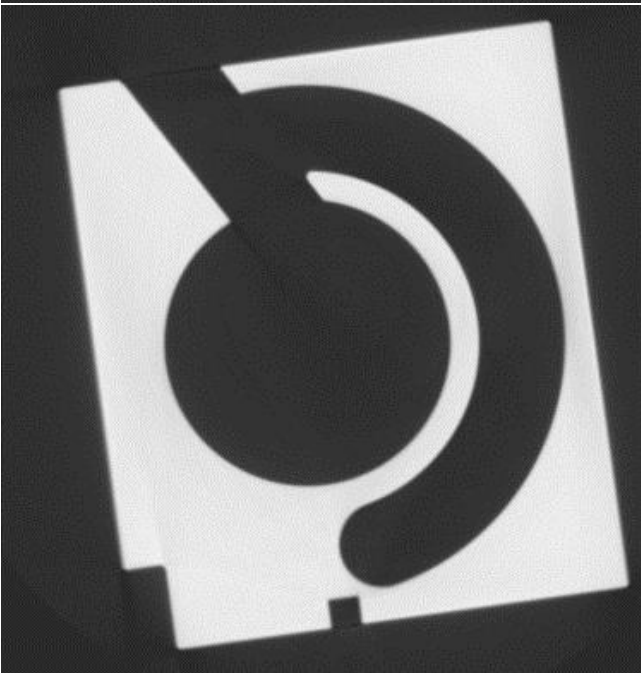
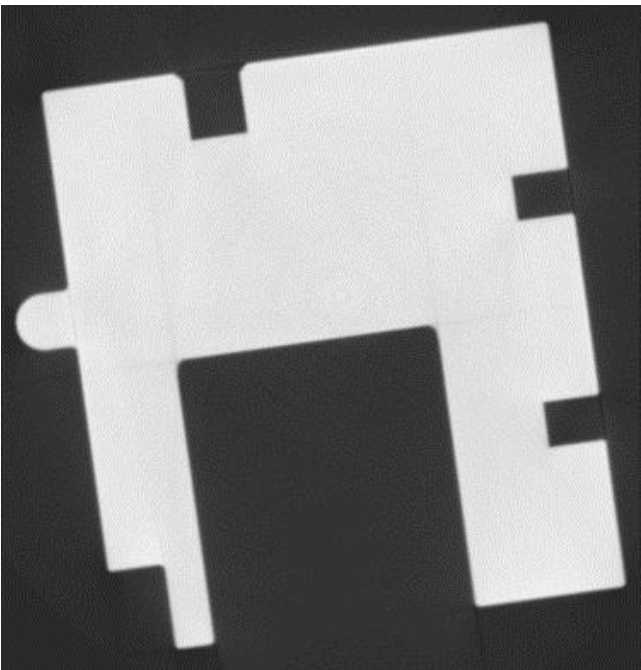
- ✓ Zahvaljujući relativno dobroj prodornosti X-zraka, kao i osetljivosti na gustinu materijala objekta, CT omogućava nedestruktivnu karakterizaciju i unutrašnjosti objekta, što ga čini vrlo pogodnim za primenu u industrijskoj inspekciji.

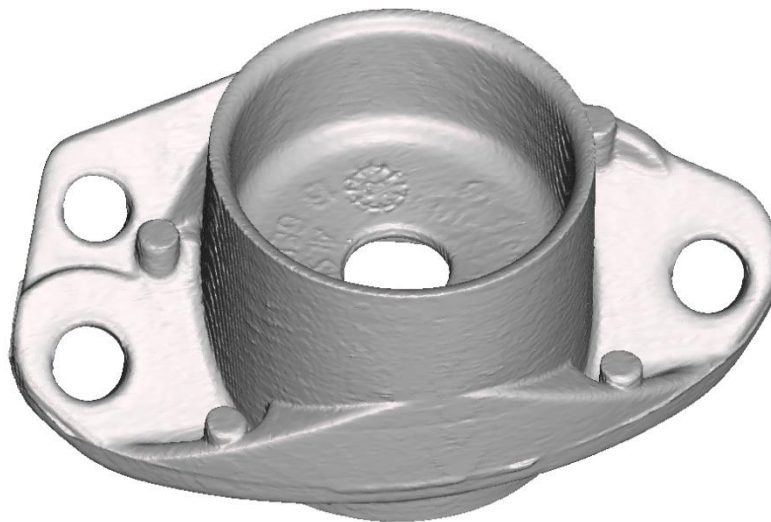
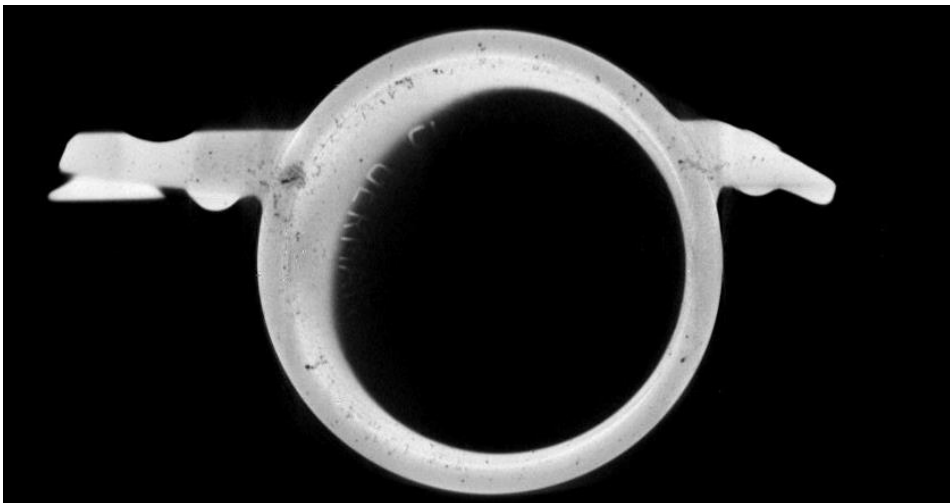




- ✓ Zahvaljujući relativno dobroj prodornosti X-zraka, kao i osetljivosti na gustinu materijala objekta, CT omogućava nedestruktivnu karakterizaciju i unutrašnjosti objekta, što ga čini vrlo pogodnim za primenu u industrijskoj inspekciji.
- ✓ Pored toga, opet zahvaljujući osobinama X-zraka, CT se podjednako dobro primenjuje i na metalnim i na plastičnim delovima, bilo glatkih ili teksturisanih površina, i to kako od solid (punih) tako i od vlaknastih materijala.
- ✓ CT je indiferentna na kvalitet obrađene površine.
- ✓ Ukupna geometrija objekta se dobija u samo jednom skenirajućem prolazu, čime se eliminise potreba za uklapanjem više oblaka tačaka.
- ✓ Dodatna prednost CT jeste u tome što ne zahteva nikakve dodatne pribore i nije potrebno ni prethodno ni naknadno pomeranje objekta.

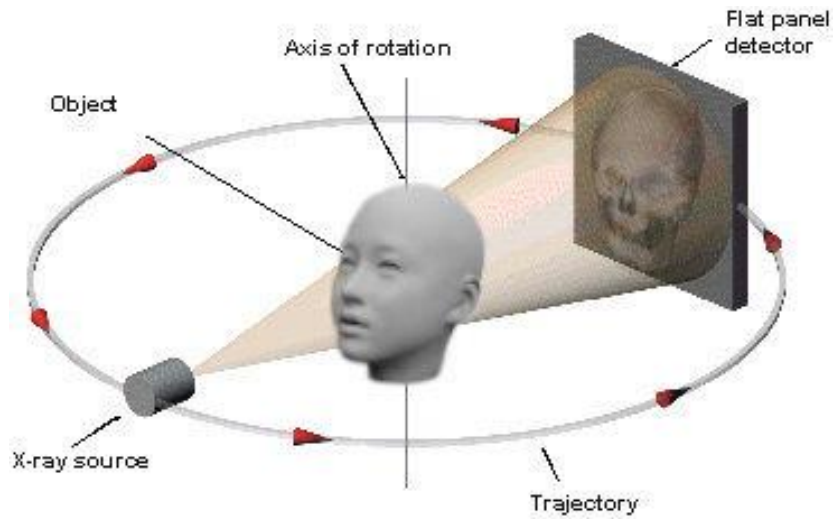
- ✓ Savremeni CT industrijski sistemi su dostigli takav nivo da mogu da obezbede merenje čija se preciznost i tačnost mogu porediti sa KMM.
- ✓ Dve osnovne karakteristike CT skenera su rezolucija slika i energija X zraka.
- ✓ Rezolucija je funkcija debljine preseka, odnosno razmaka između dve uzastopne CT slike i kod novijih industrijskih skenera ona ide i ispod 10 μm.
- ✓ Izlazna digitalna informacija sada je dostupna u nekoliko standardnih formata za razmenu (IGES, STEP, STL itd.) što u mnogome olakšava rad.
- ✓ Većina savremenih CT skenera sadrži i mogućnost integracije softvera za obradu CT informacija i kao rezultat daje kompletan 3D CAD model.







# Kompjuterizovana tomografija na bazi konusnog snopa u biomedicinskom inženjerstvu



## DOSE COMPARISON

SCANORA® 3D



AVERAGE CBCT



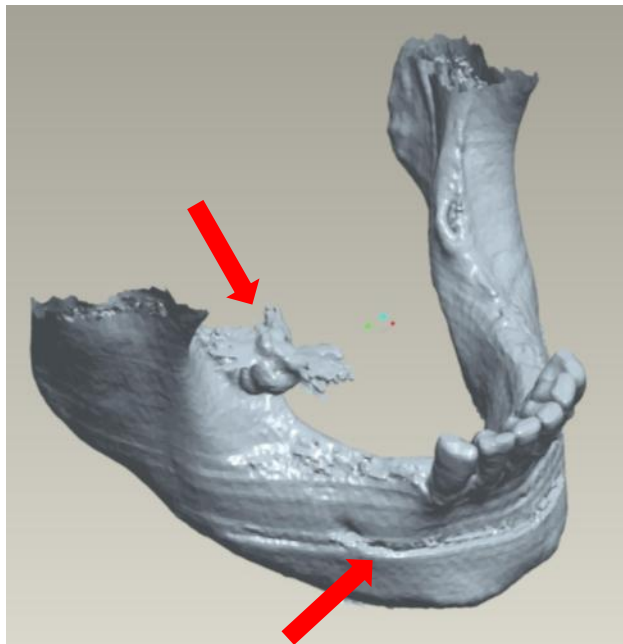
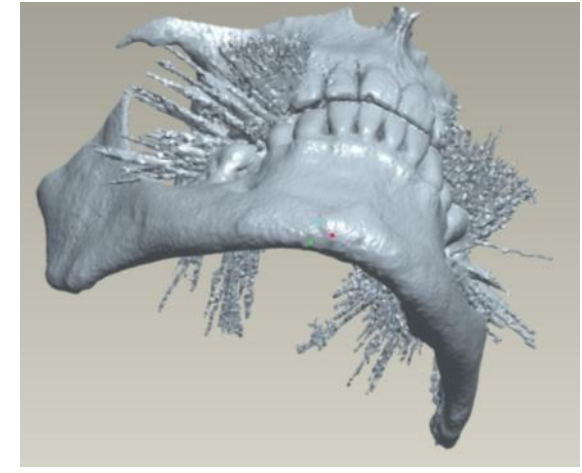
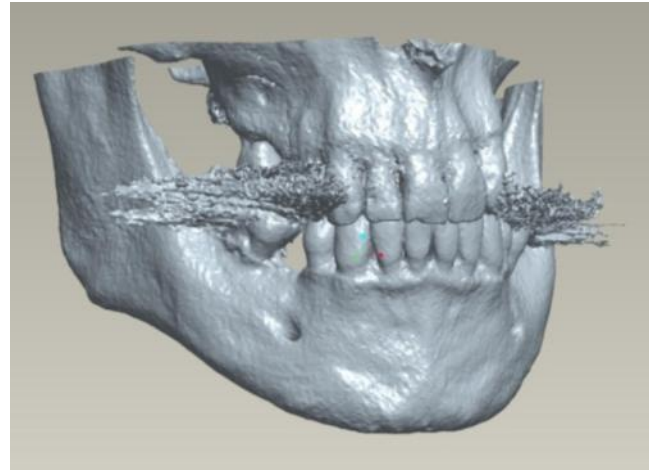
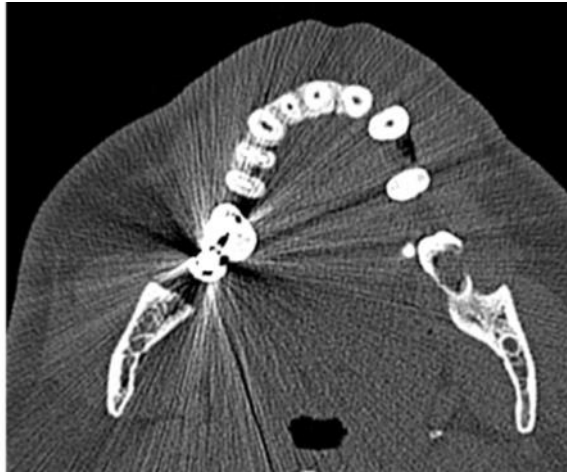
MEDICAL CT



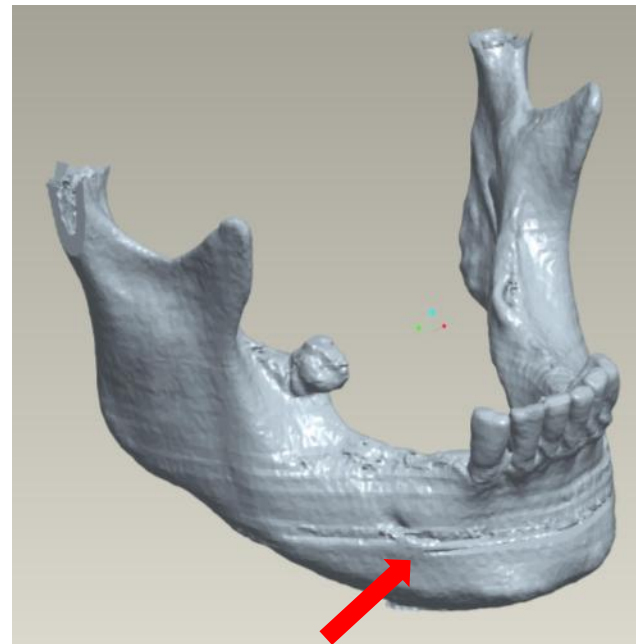
CBCT slike u DICOM formatu zapisa



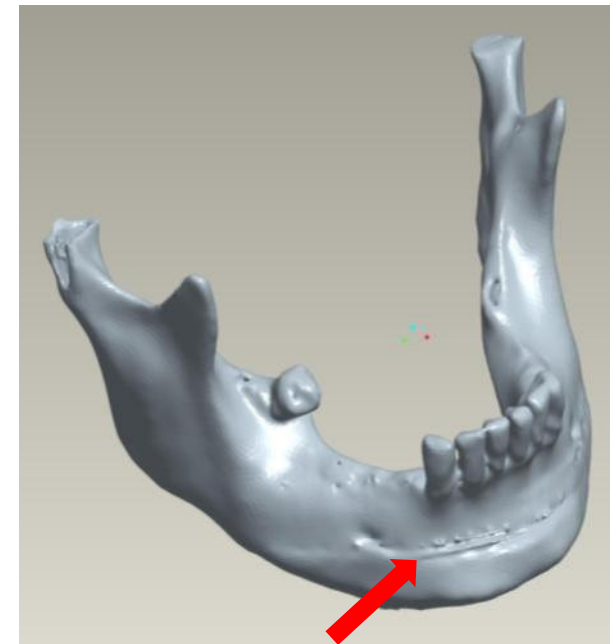
## Problem šuma kod CBCT sistema



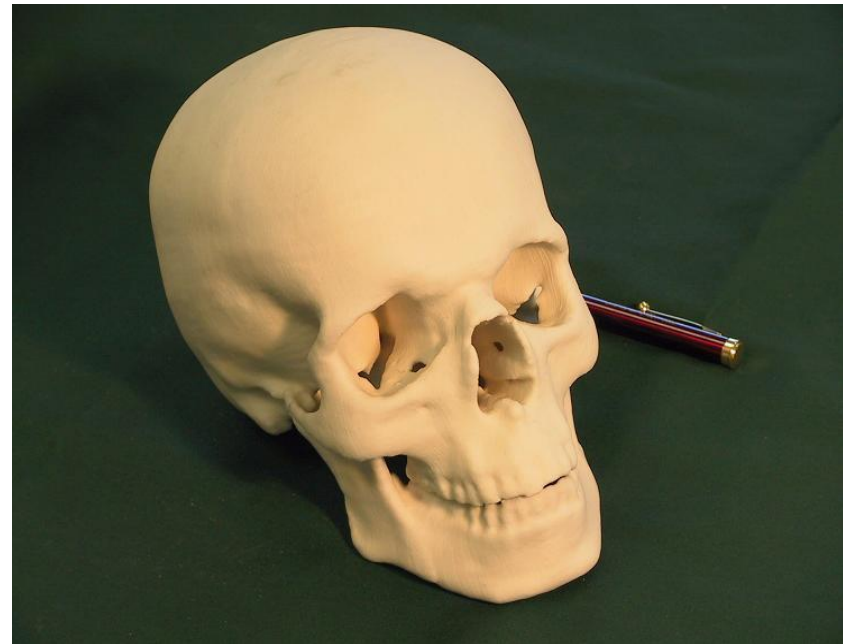
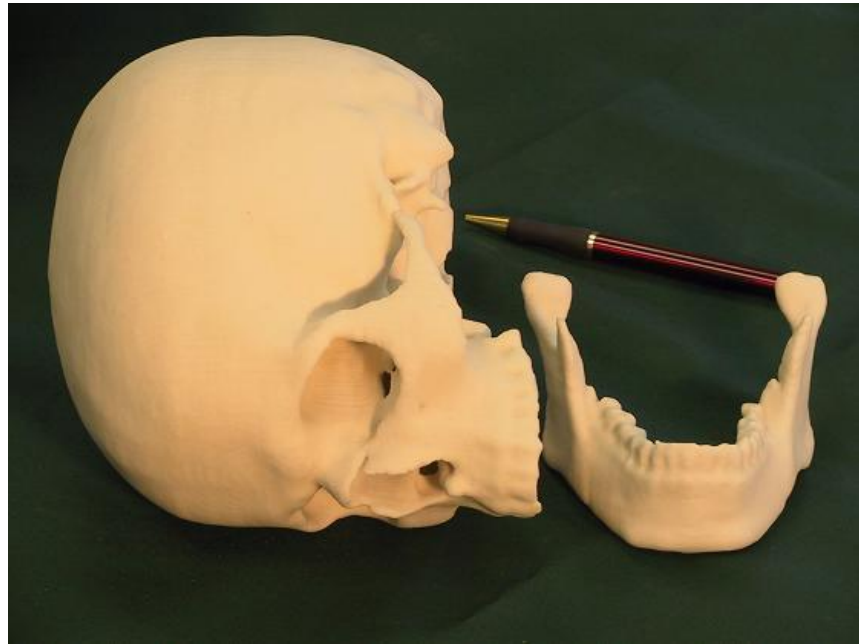
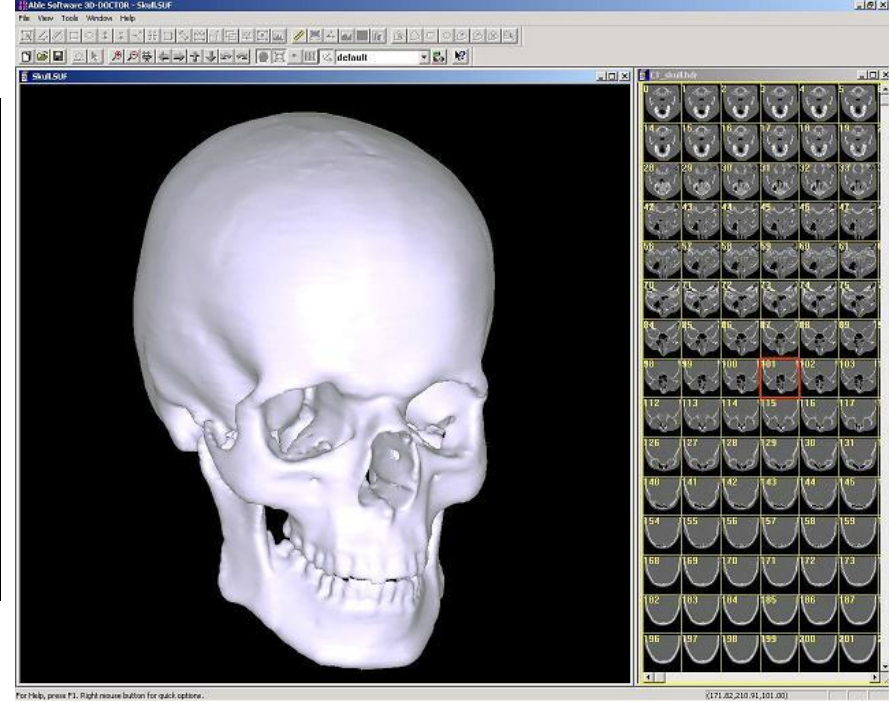
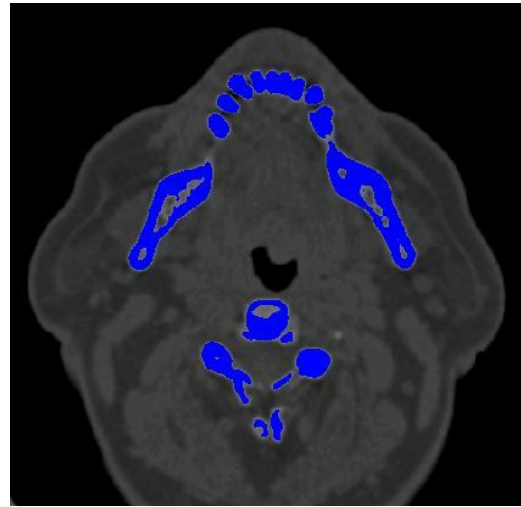
Model sa "šumom" od artefakata



Model očišćen od "šuma"



Model pripremljen za izradu





**HVALA NA PAŽNJI!!!**