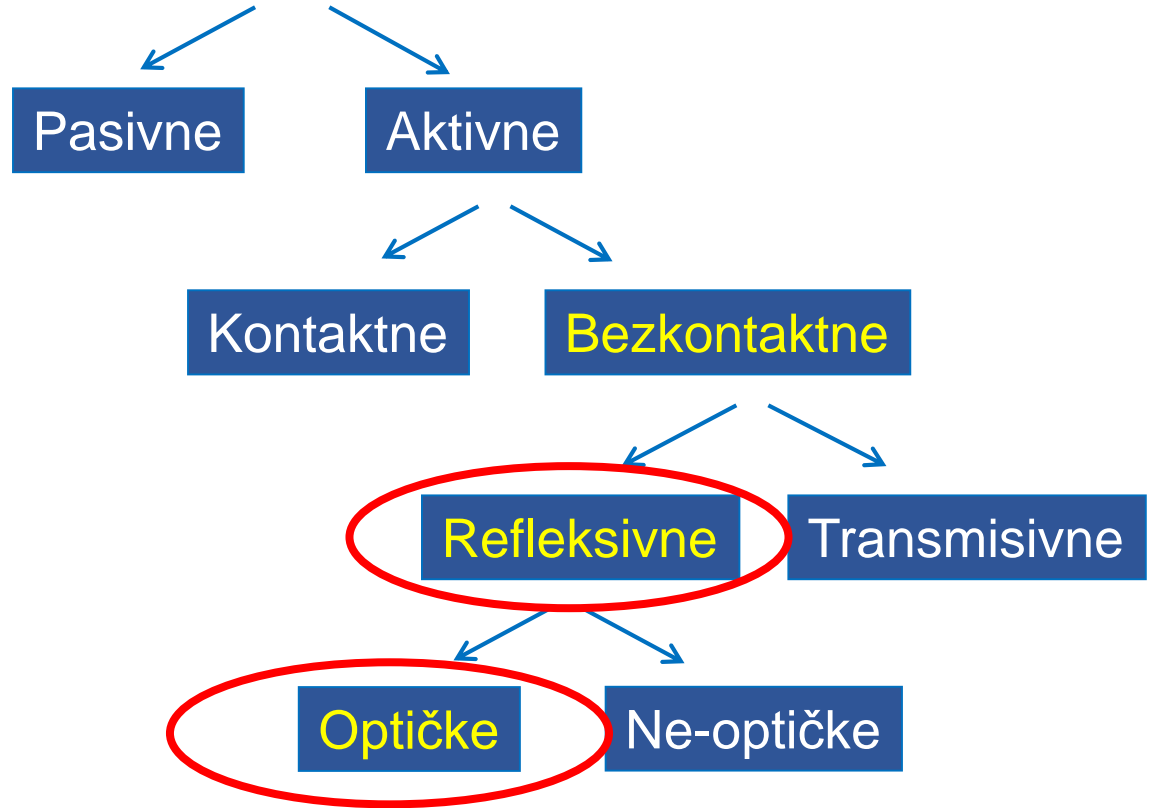


Univerzitet u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka
Proizvodno mašinstvo
Predmet: Reverzibilno inženjerstvo i CAQ

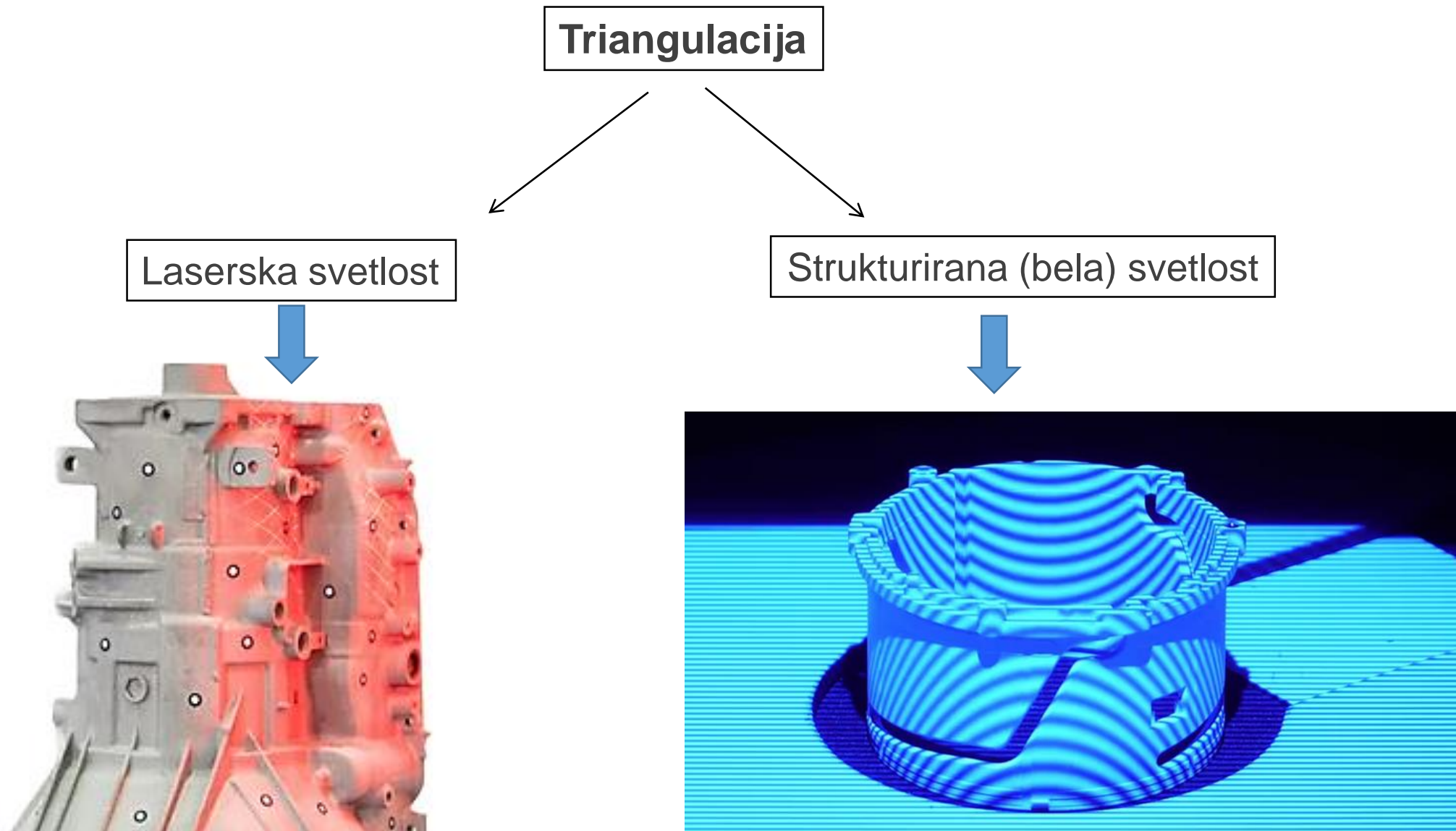
METODE 3D DIGITALIZACIJE U REVERZIBILNOM INŽENJERSTVU

(laser, strukturno svetlo, CT)

Metode 3D digitalizacije

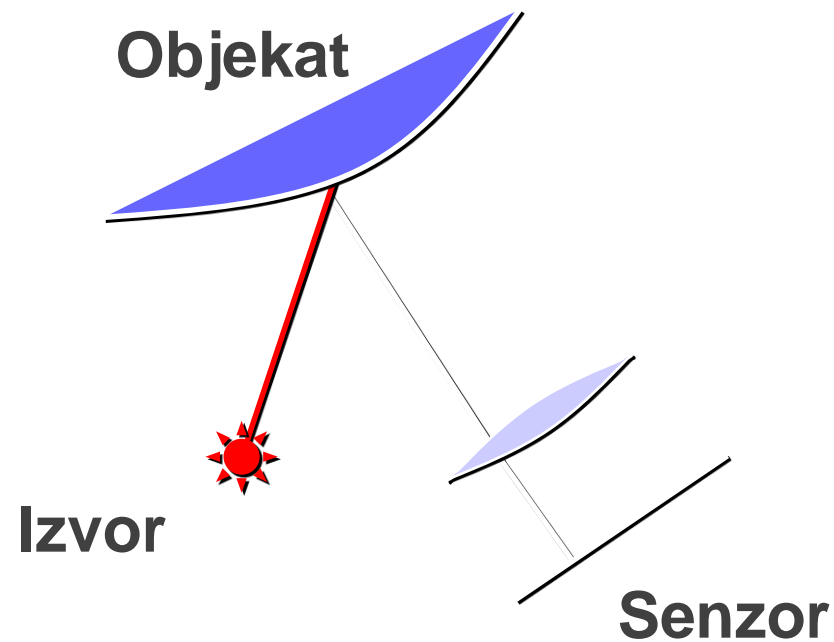


- Optičke metode su **bazirane** na principu triangulacije.



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.

Proces rekonstrukcije 3D modela kod optičkih 3D skenera

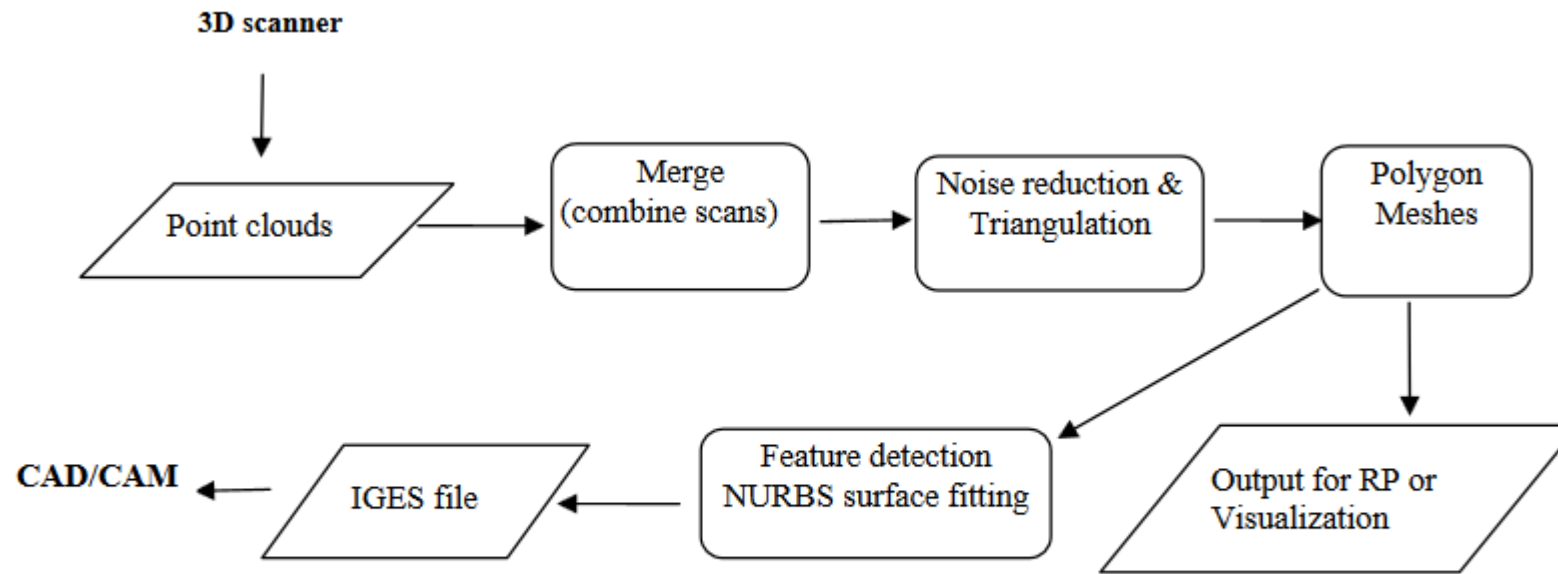


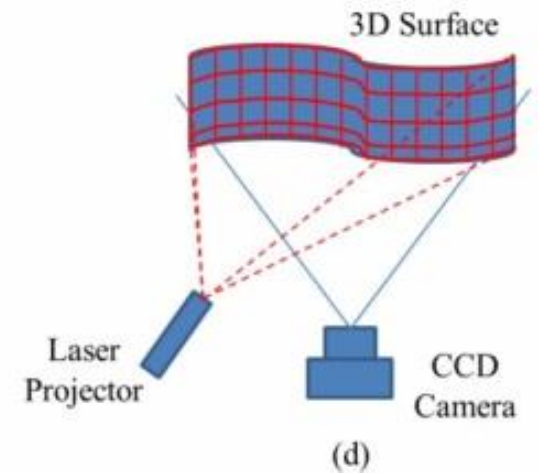
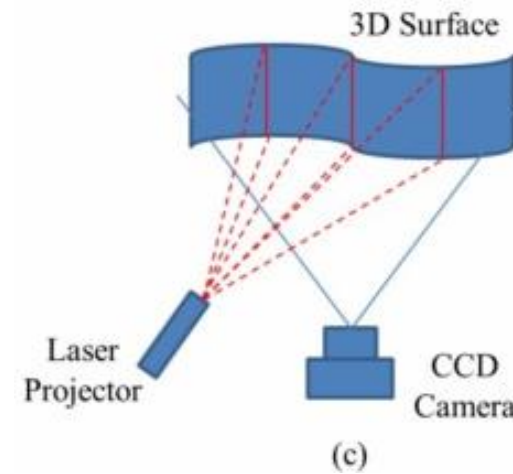
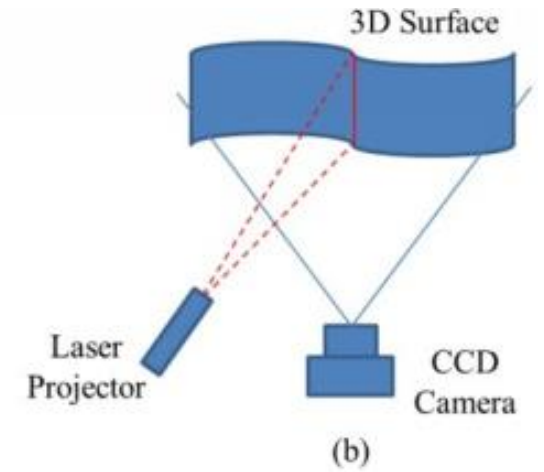
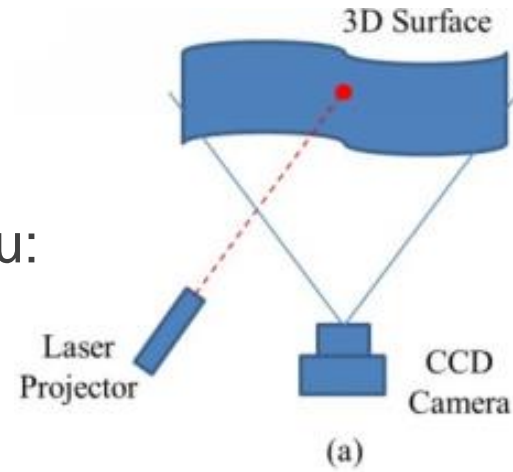
Figure 2. A general process of the optical scanner-based 3D shape reconstruction

Univerzitet u Novom Sadu
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

LASERSKA TRIANGULACIJA

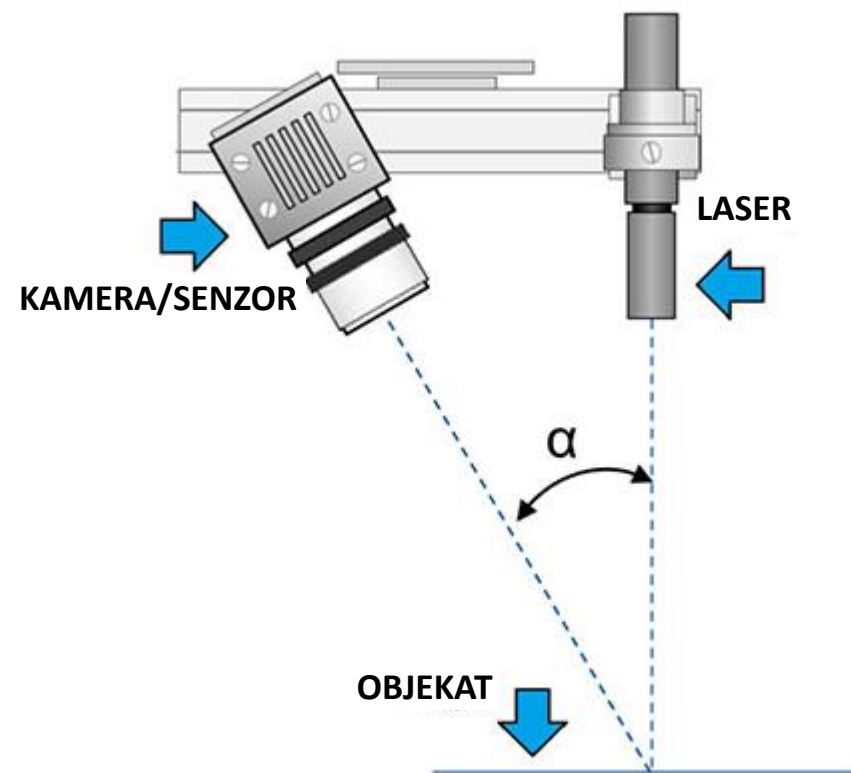
• Postoje 4 tipa laserskog 3D skeniranja, a to su:

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



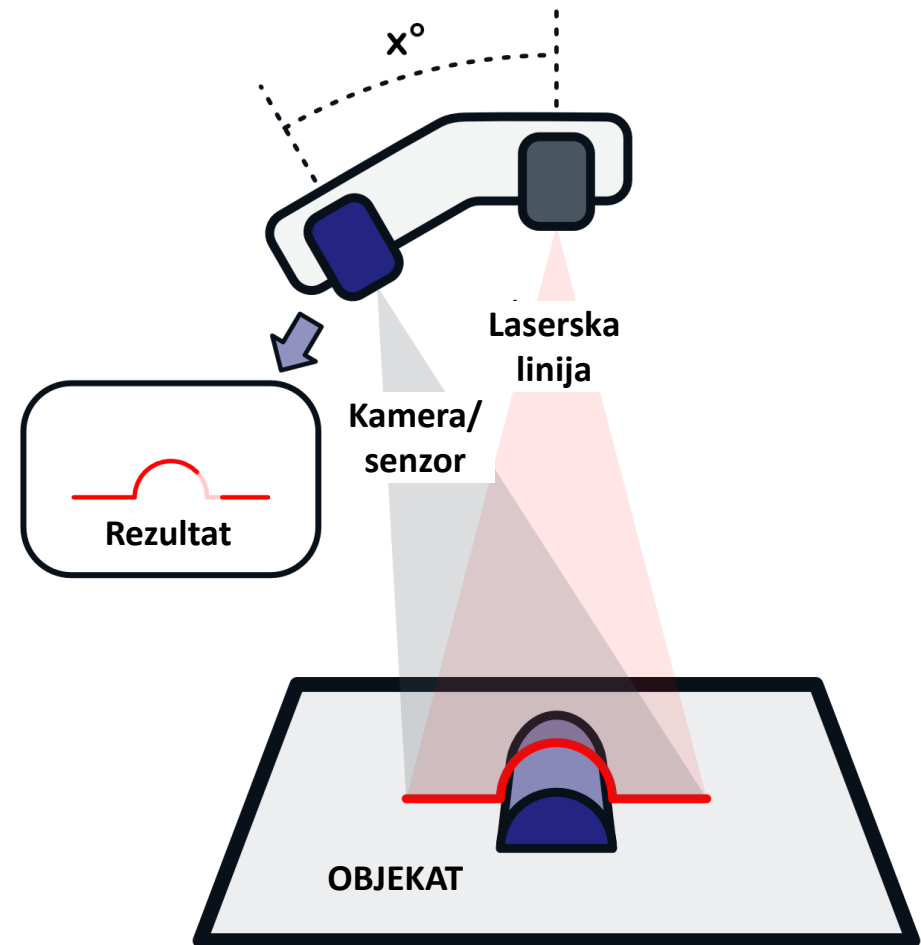
Laserska tačkasta triangulacija

- 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).



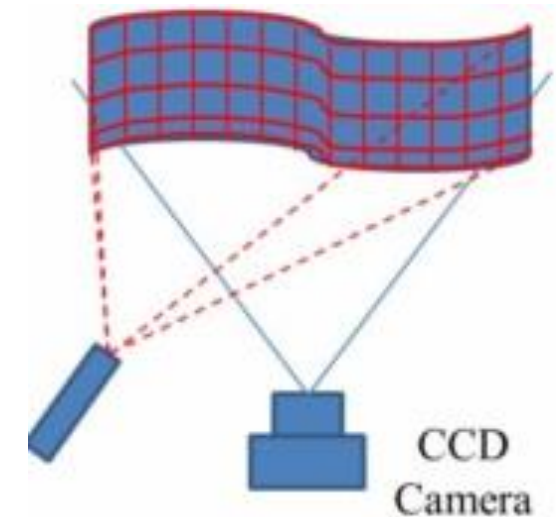
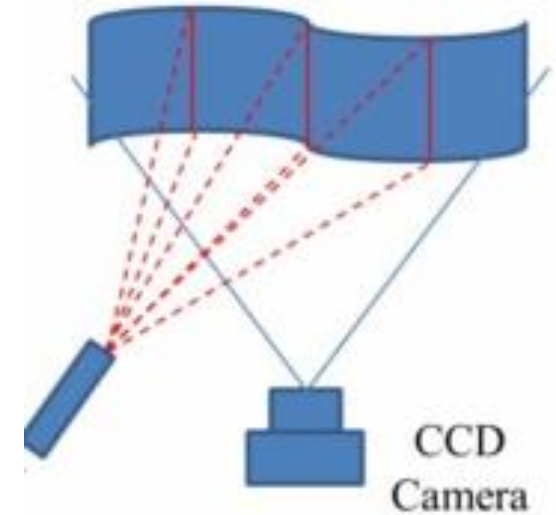
Laserska linijska triangulacija

- Poboľšani 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

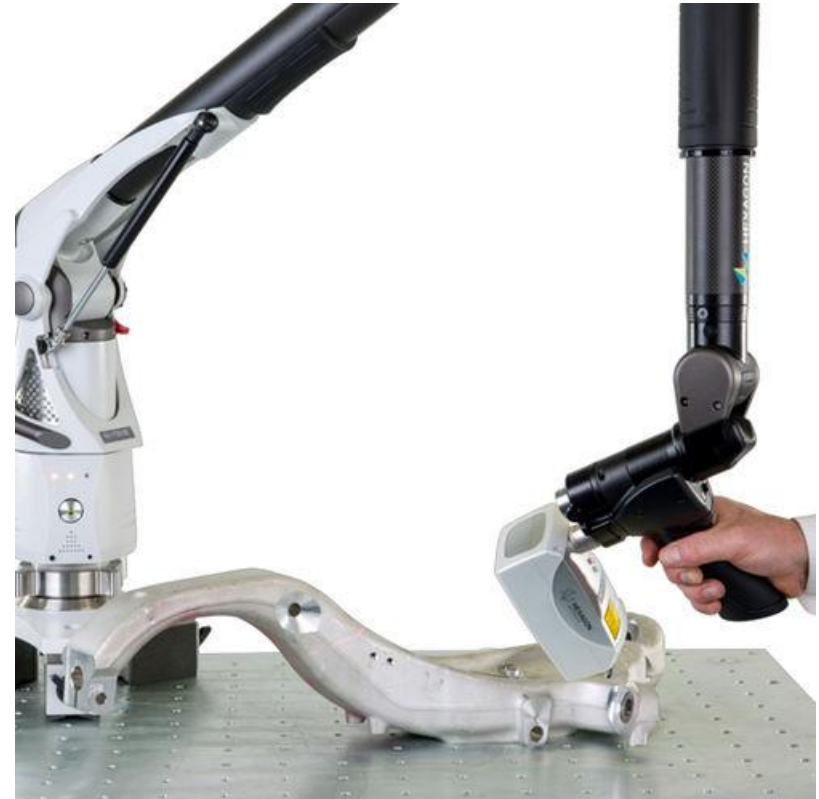
Princip 3D skeniranja je takođe bitna karakteristika sistema za triangulaciju i predstavlja stvar izbora.

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 laserske 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.



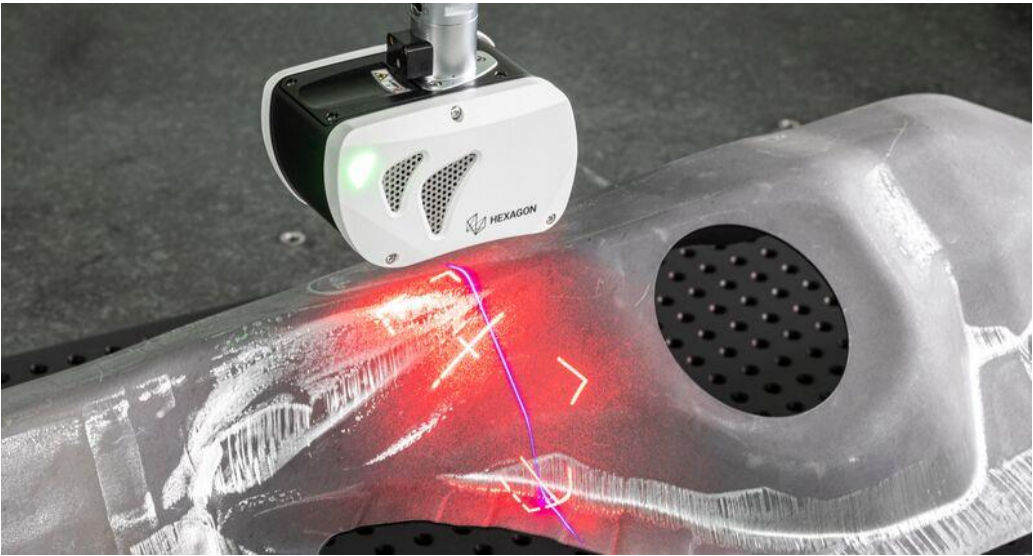
Prednosti laserske triangulacije:

- ✓ 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

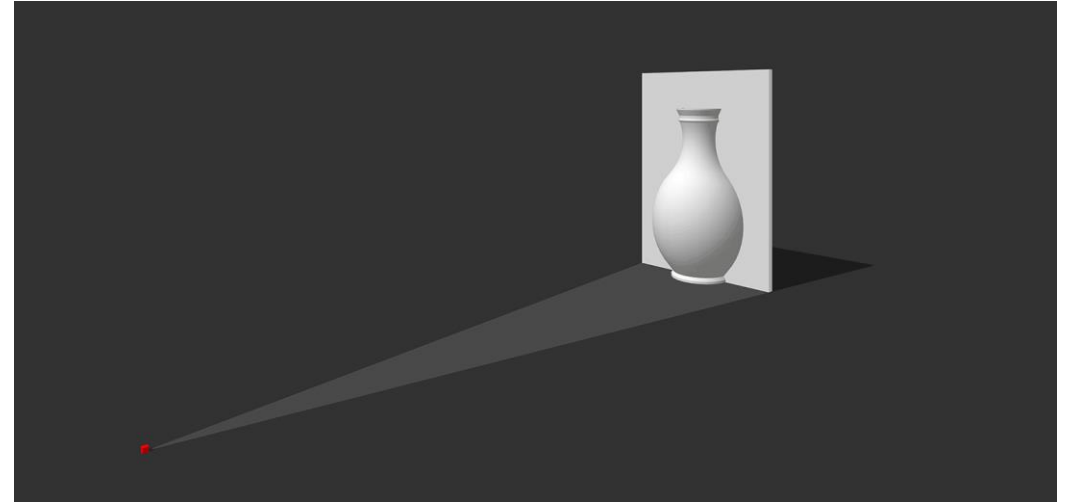


Univerzitet u Novom Sadu
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

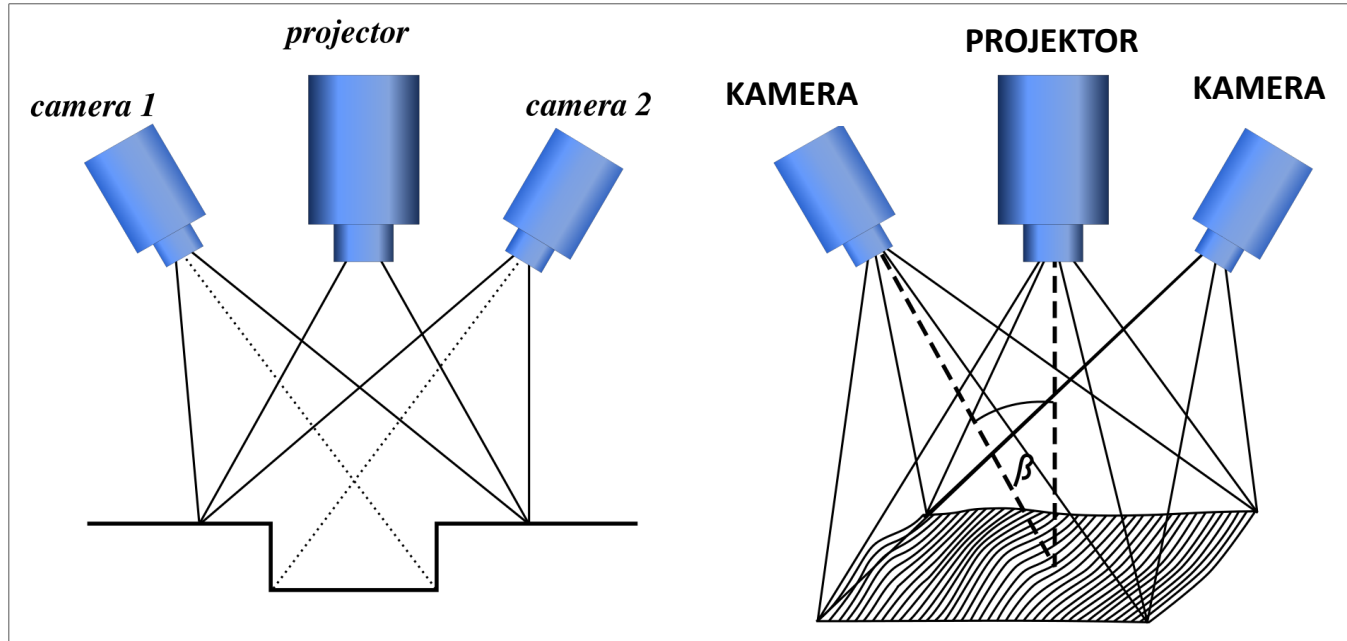
VIŠELINIJSKA TRIANGULACIJA STRUKTURIRANOM SVETLOŠĆU

Strukturirana svetlost

- 3D skeneri bazirani na strukturiranoj svetlosti predstavljaju uređaje za 3D skeniranje trodimenzionalnog oblika objekta pomoću projektovanih svetlosnih paterna (obrazaca/šara) i sistema kamera.
- Kada se svetlost projektuje na površinu objekta, obrasci postaju izobličeni/distorzirani.
- Tokom ovog procesa, kamera, **postavljena na poznatoj udaljenosti od projektora i pod poznatim uglom**, istovremeno snima niz slika distorziranih paterna na objektu.

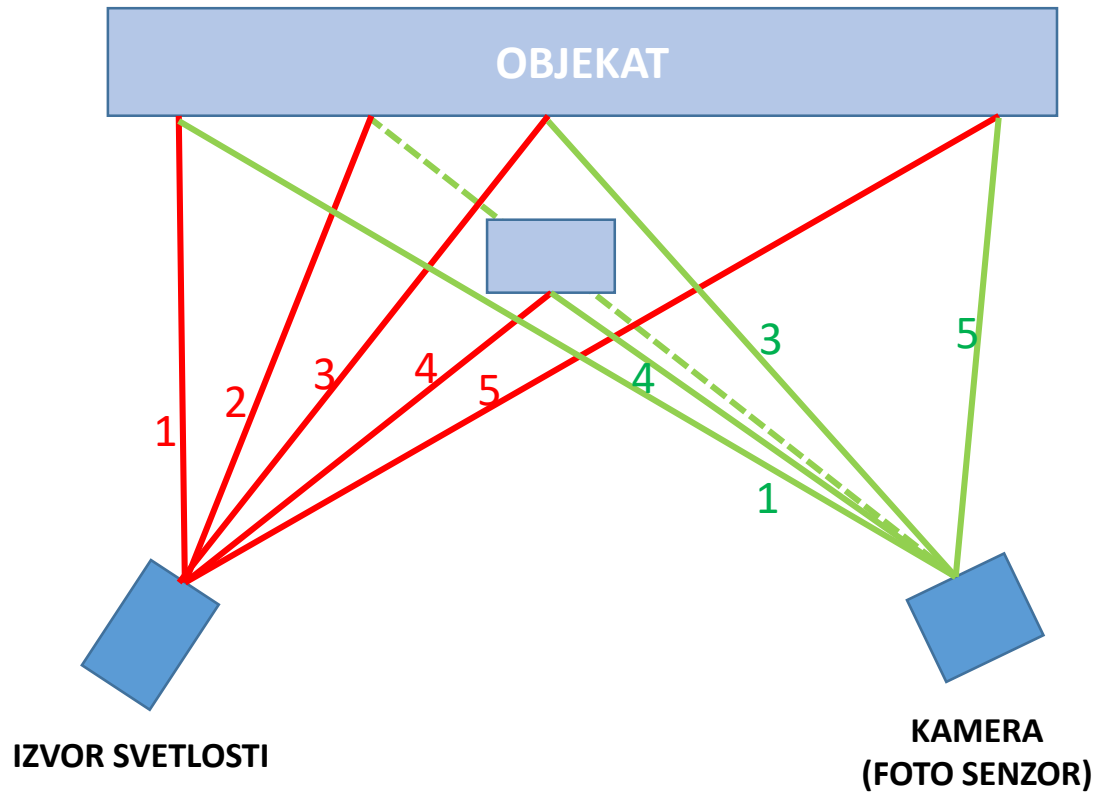


Strukturirana svetlost



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 .

PRINCIP RADA



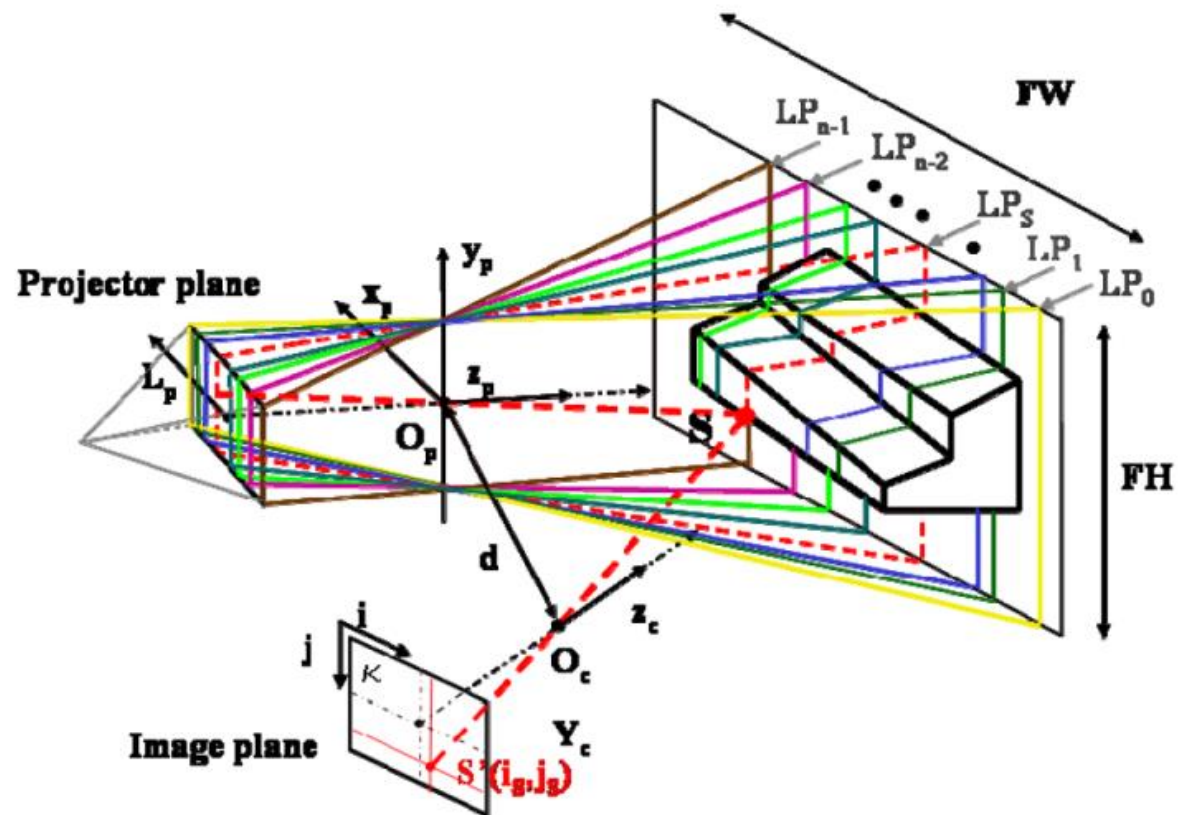
Prilikom projektovanja više identičnih svetlosnih linija na objekat, senzor ne može da „prepozna“ koja slika odgovara kojoj projektovanoj liniji.

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

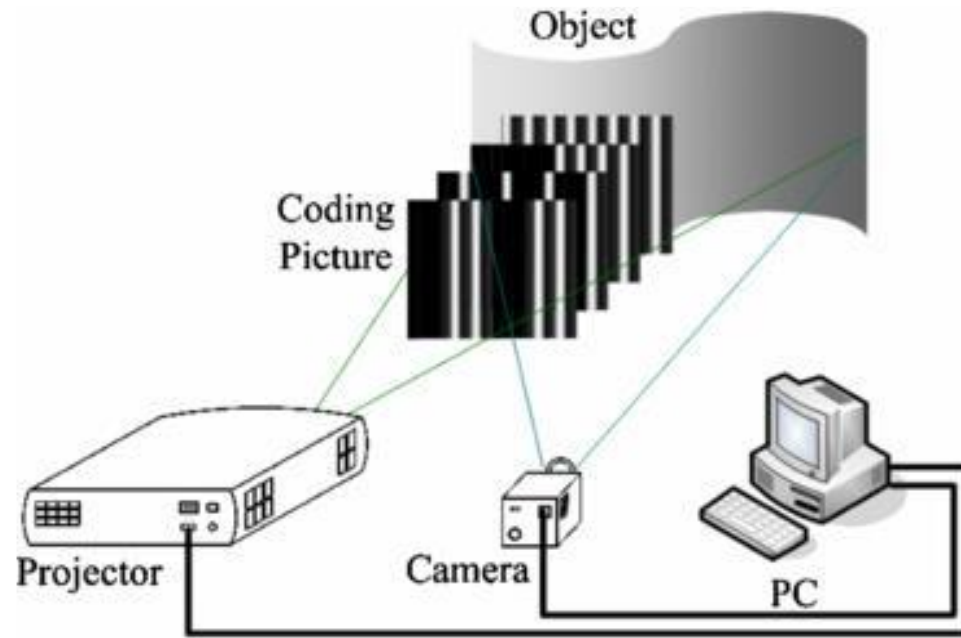
Postoji više pristupa za kodiranje linija.

Kodni sistemi, koje treba spomenuti su:

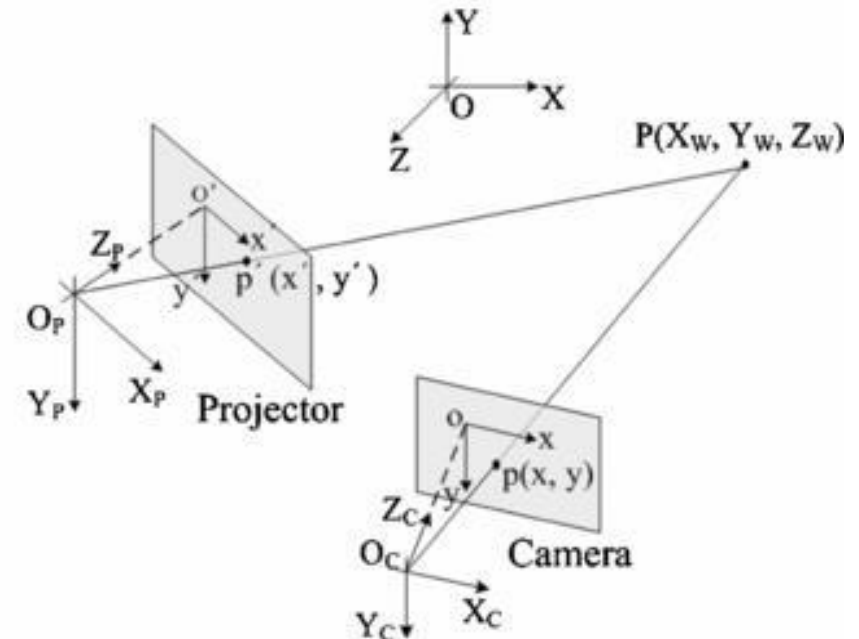
- 1) Kodiranje binarnim vremenskim paternima (šablonima)
- 2) Kodiranje graničnim linijskim kodom
- 3) Kodiranje u boji (de Bruinoovom sekvencom)

Višelinjska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA



(a)

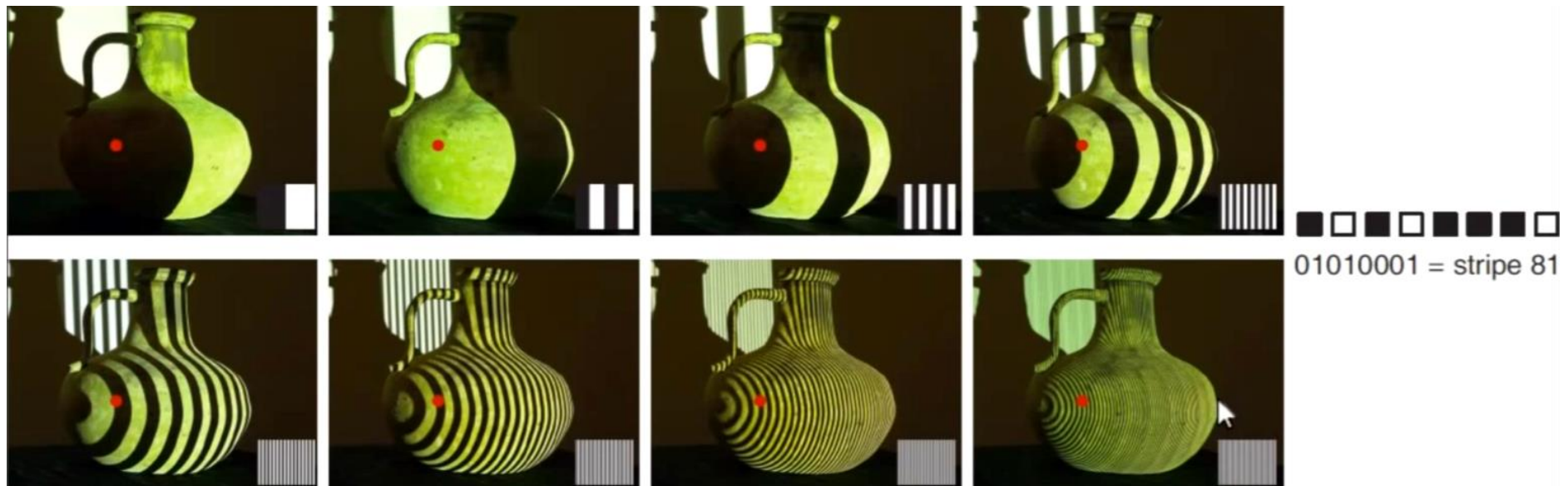


(b)

Višelinijska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

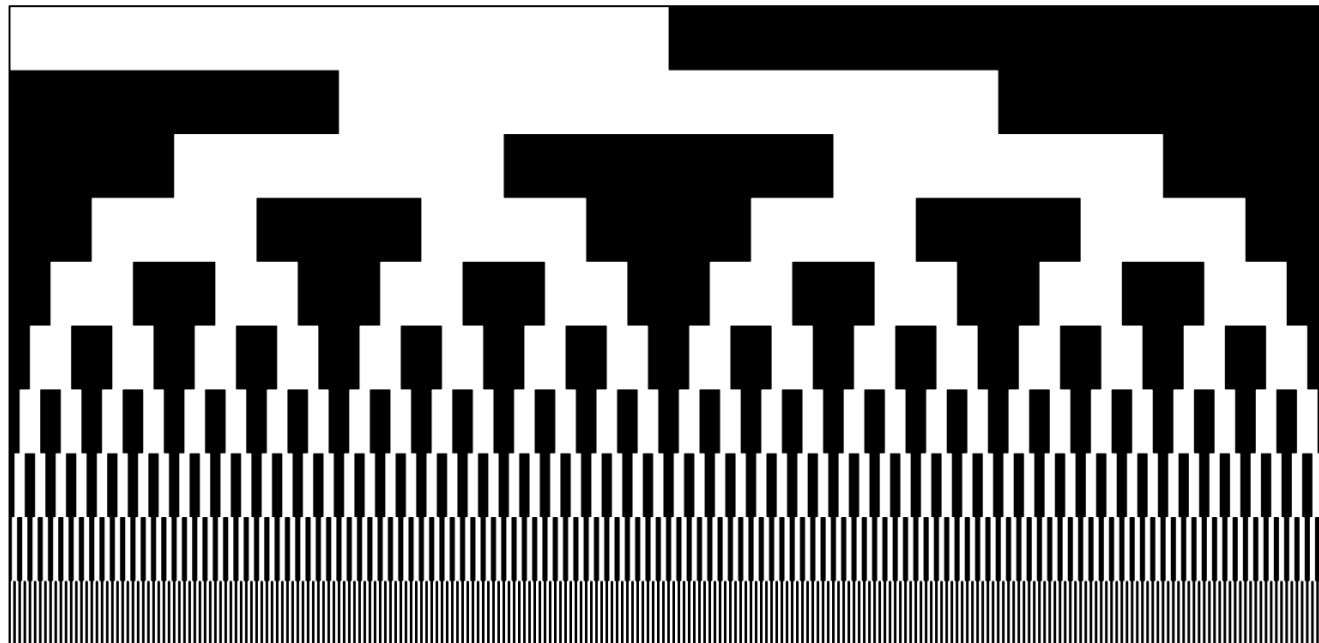
Primer na slici pokazuje kodiranje sa 8 paterna, kojima je omogućeno kodiranje 256 linija.



Višelinijska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

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

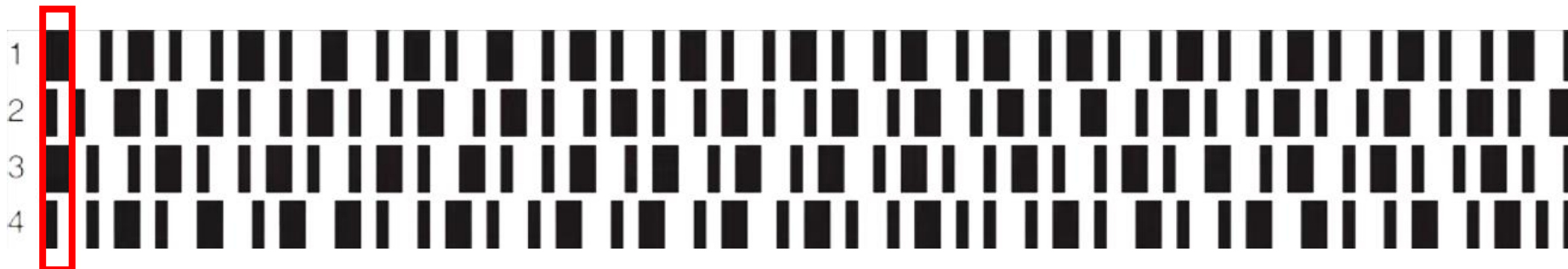


KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

- 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).

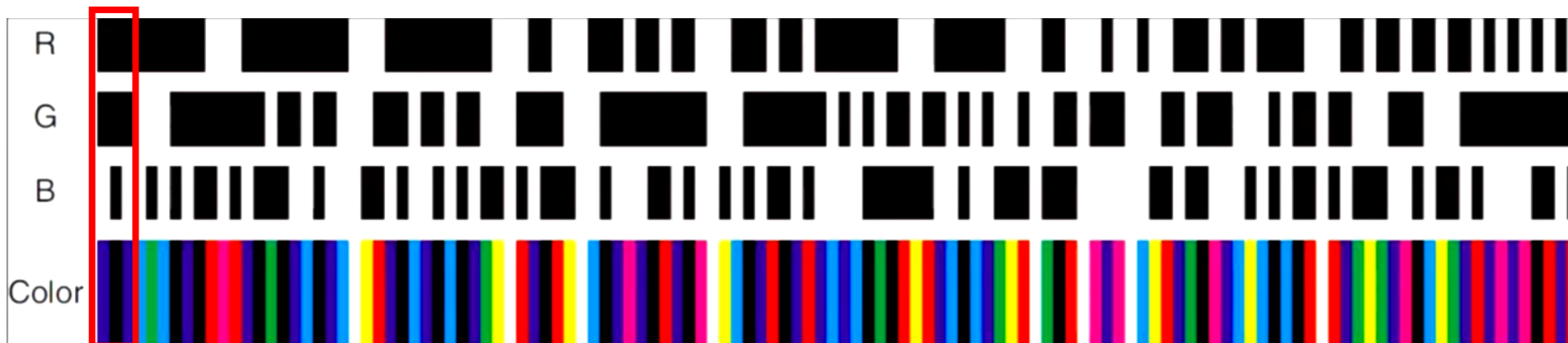
LINIJSKI GRANIČNI KOD (eng. STRIPE BOUNDARY CODE)

- 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**.

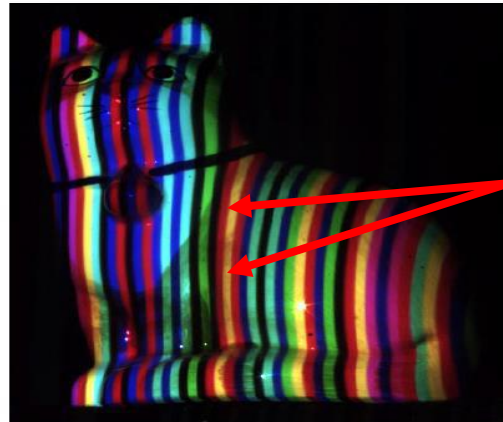


KODIRANJE LINIJA PATERNIMA U BOJI

- 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.**

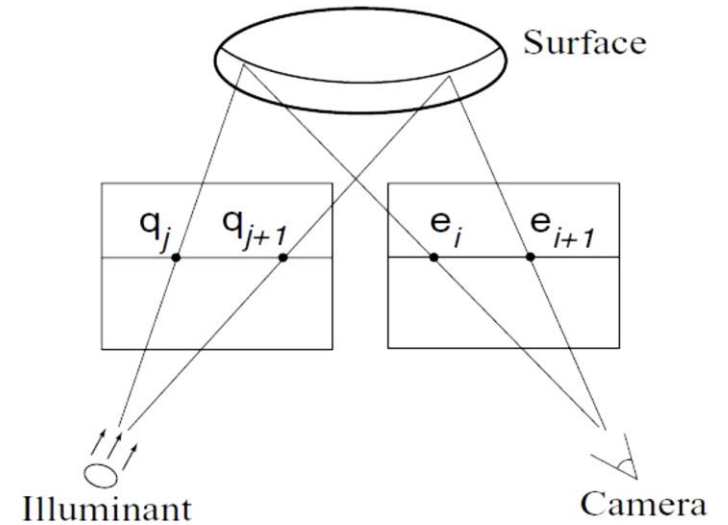


- Jedan patern u boji može da kodira i **do 512 linija**.
- Projektor projektuje patern u boji na objekat, a kamera (foto osetljivi senzor) detektuje reflektovani niz boja.
- Nedostatak ovog načina kodiranja se ogleda u osetljivosti na boju površina objekta.

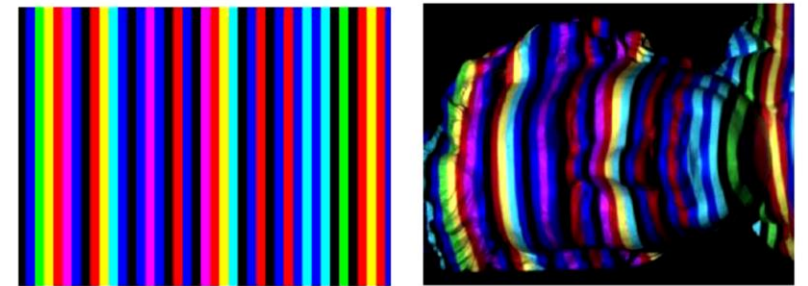


Jedna boja nije ista na svetlim i na tamnim površinama objekta, što može ugroziti tačnost kodiranja.

- 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.

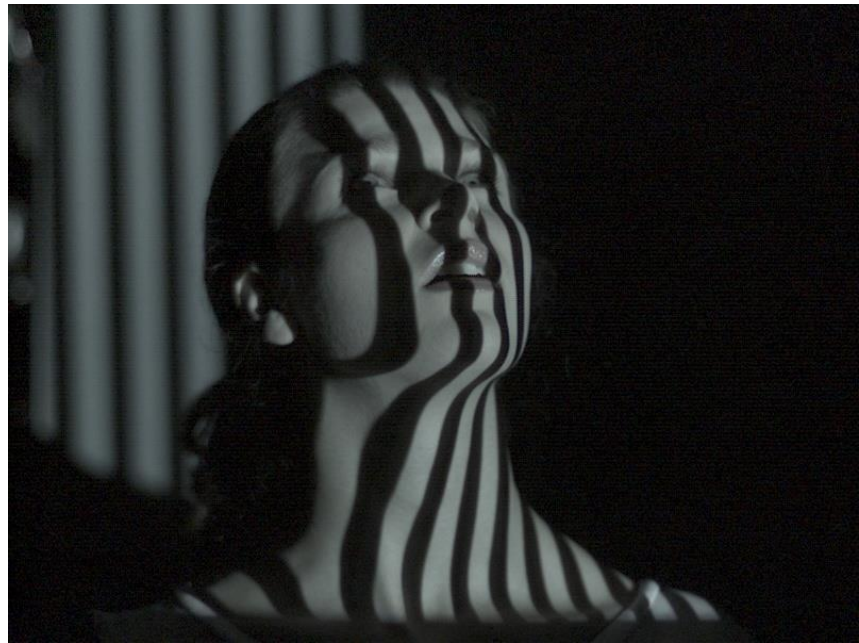
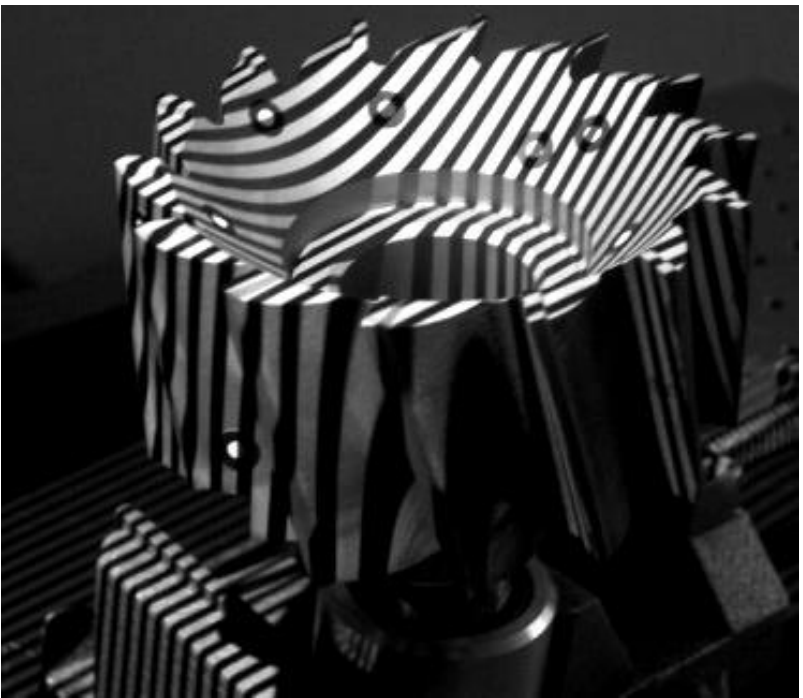


(a)





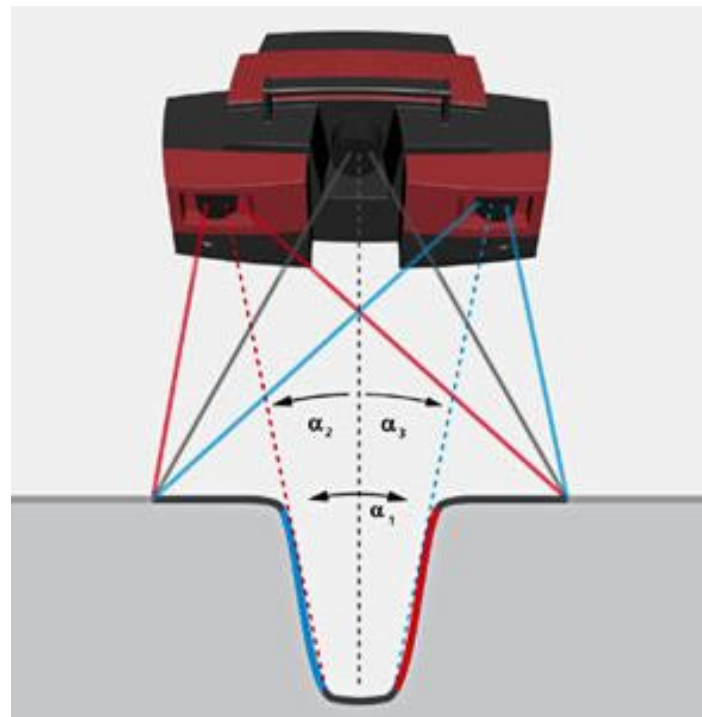
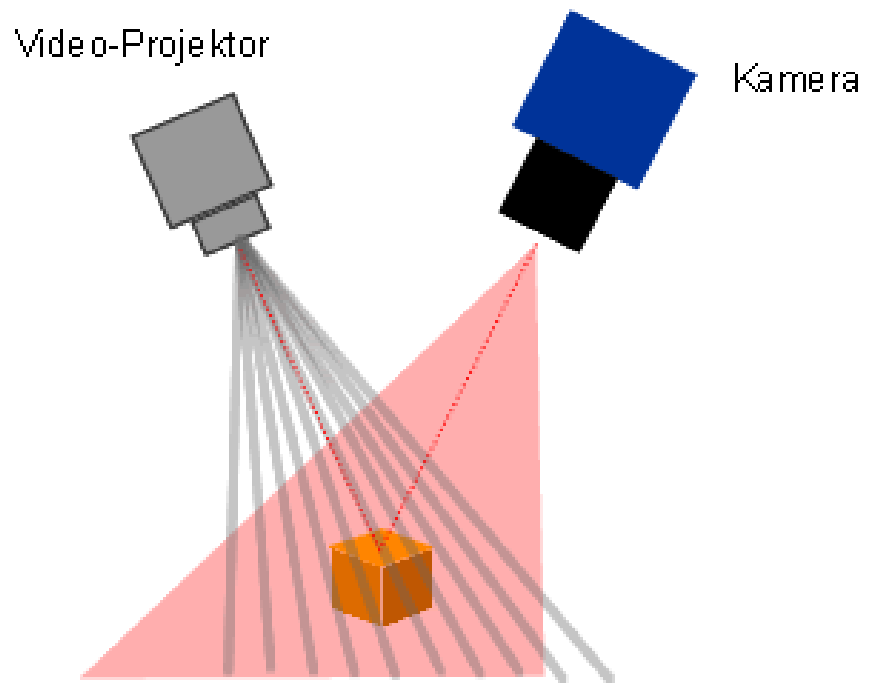
Višelinijnska triangulacija (strukturiranom svetlošću) - primeri

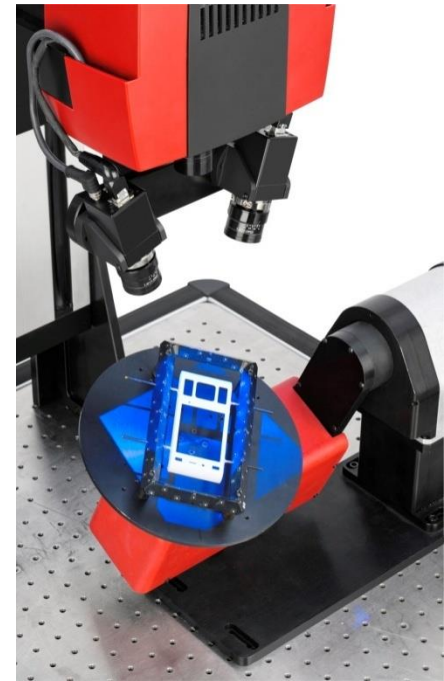
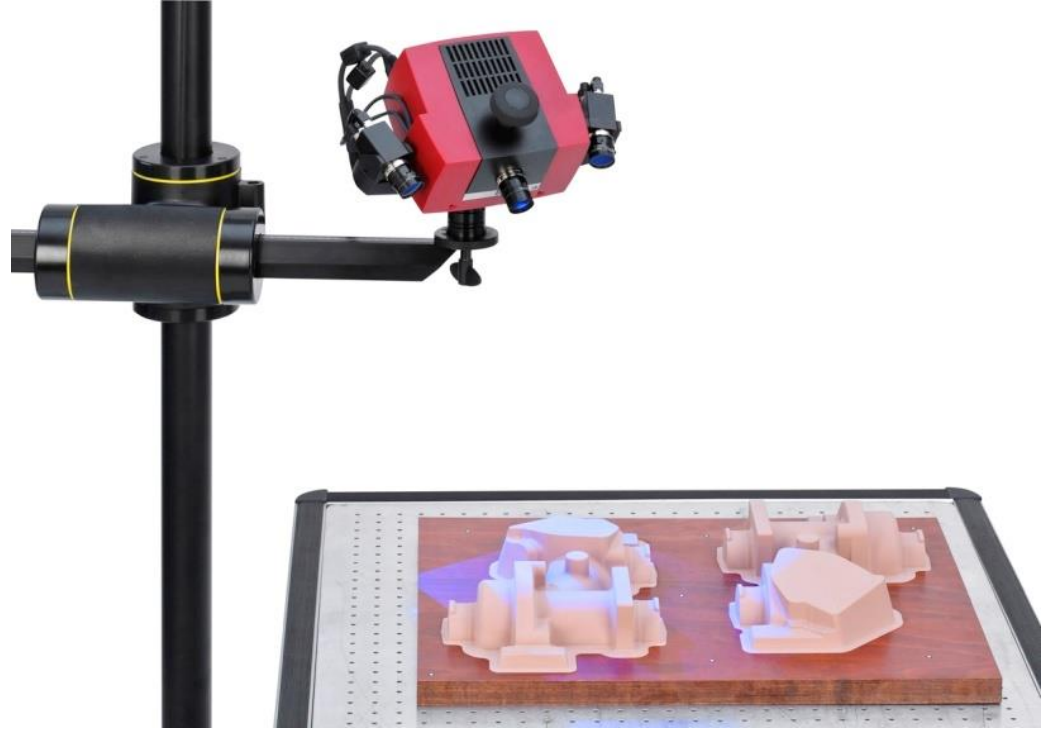
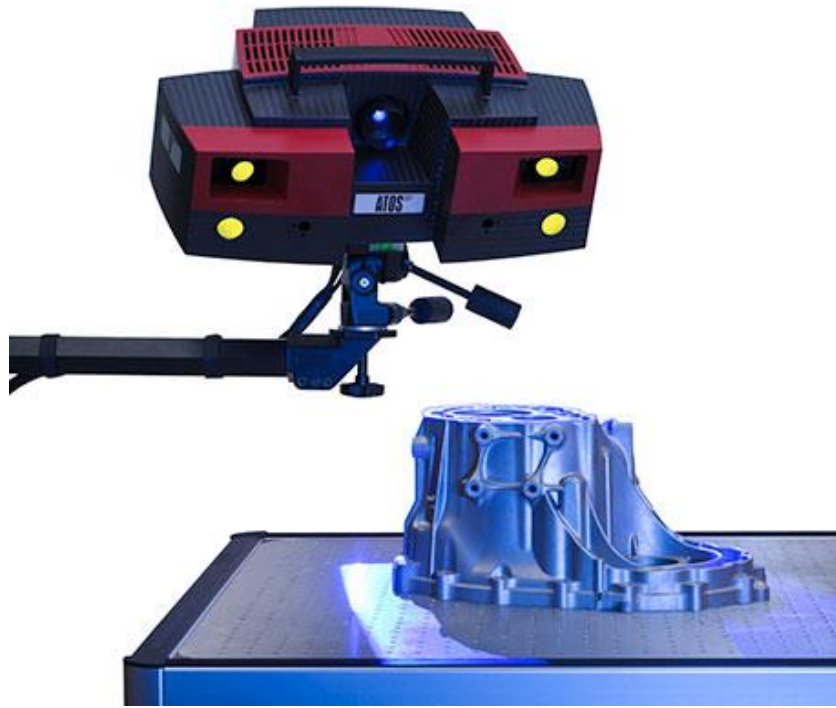




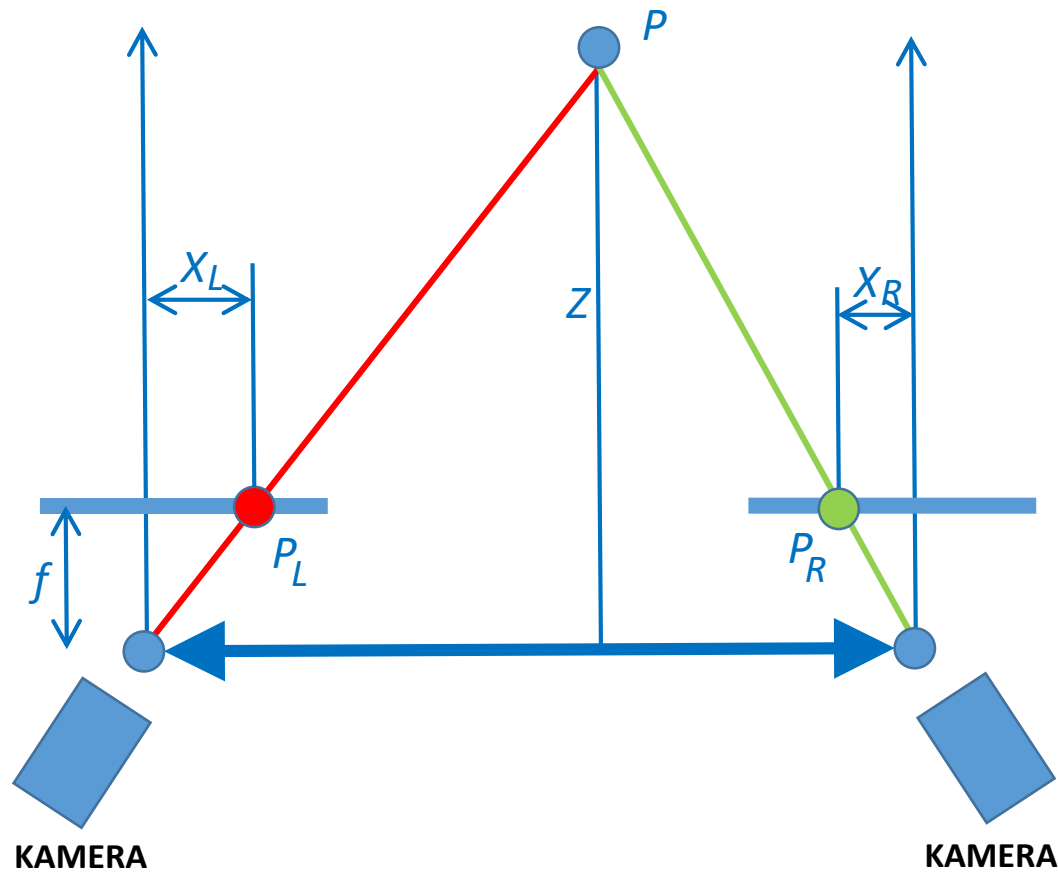
Višelinijnska triangulacija (strukturiranom svetlošću)

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

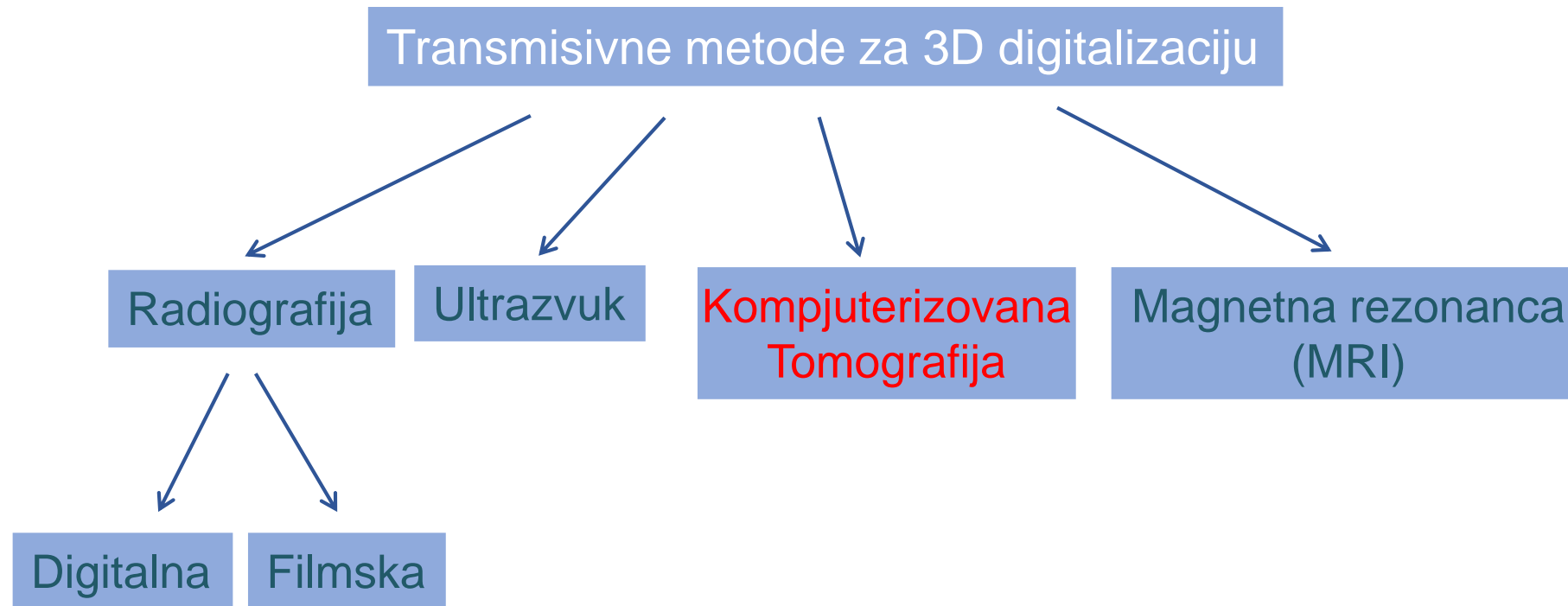
Bezkontaktne

Refleksivne

Transmisivne

Optičke

Ne-optičke



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

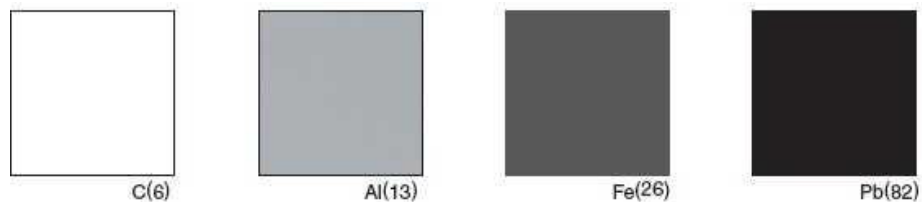
Digitalna radiografija (radiografija u realnom vremenu)

- Postavlja se radni predmet između izvora rendgenskog X-zraka i detektora i stvara se senka.
- Senku hvata rendgenska kamera da bi se stvorila rendgenska slika.
- Geometrijsko uvećanje u tom trenutku zavisi od udaljenosti od rendgenskog izvora do radnog predmeta i udaljenosti od generatora do rendgenske kamere.
- Nijansa sive boje je uglavnom povezana sa količinom prodiranja rendgenskih X-zraka.

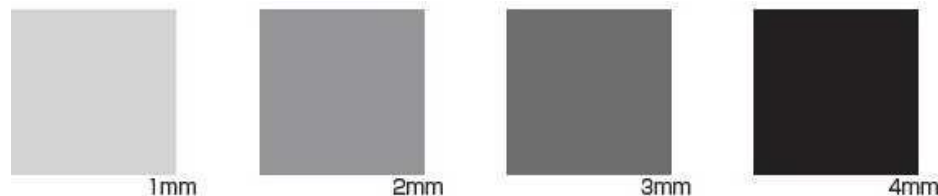


Digitalna radiografija (radiografija u realnom vremenu)

- Jačina prenosa rendgenskih zraka određena je sledećim faktorima:
- 1. Više rendgenskih zraka je blokirano kako se atomski broj i gustina objekta povećavaju.

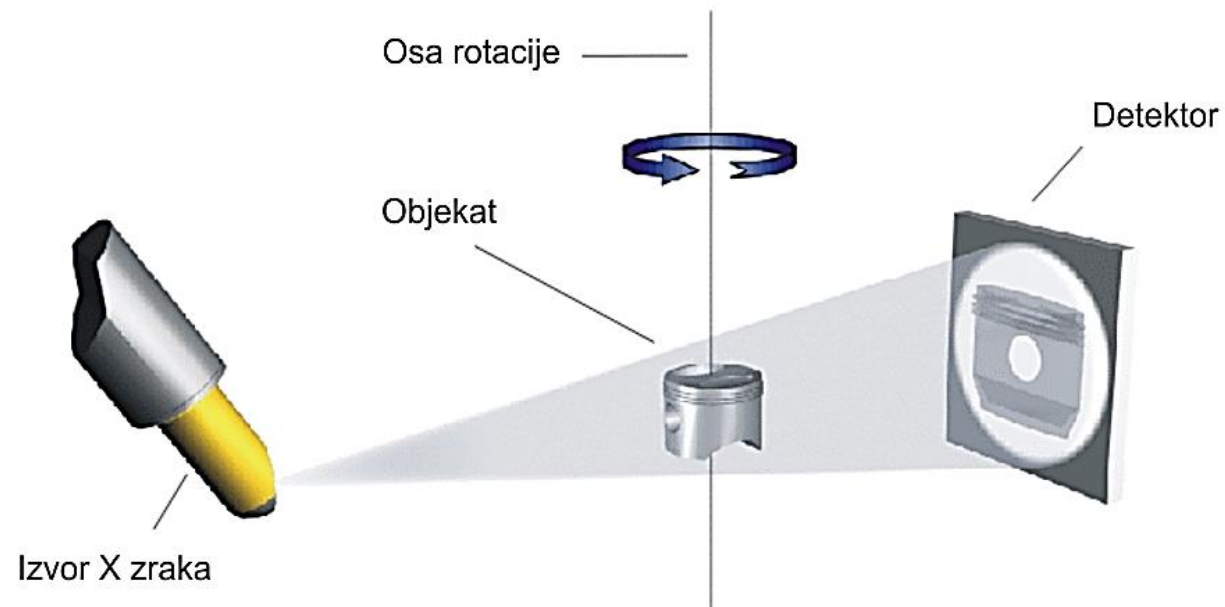


- 2. Više rendgenskih zraka je blokirano kako se debljina povećava.



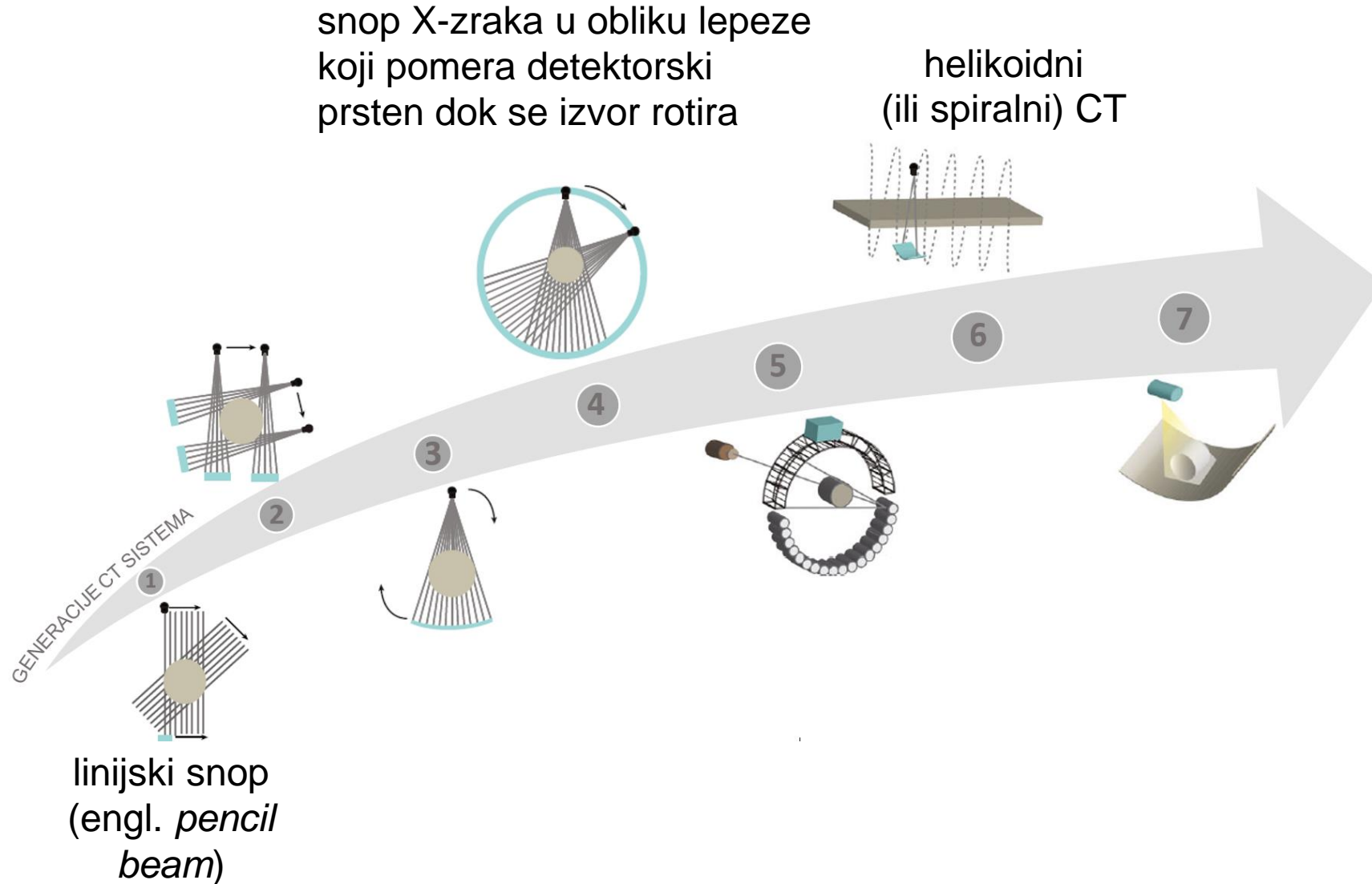
- 3. Intenzitet rendgenskog zraka se određuje naponom cevi (V) i strujom cevi (A).
 - Povećanje napona cevi skraćuje talasnu dužinu rendgenskih zraka i olakšava prenos.
 - Povećanje struje u cevi povećava dozu i intenzitet generisanih rendgenskih zraka.

Princip rada CT sistema



Princip rada Cone Beam kompjuterizovane tomografije

Istorijski razvoj CT sistema

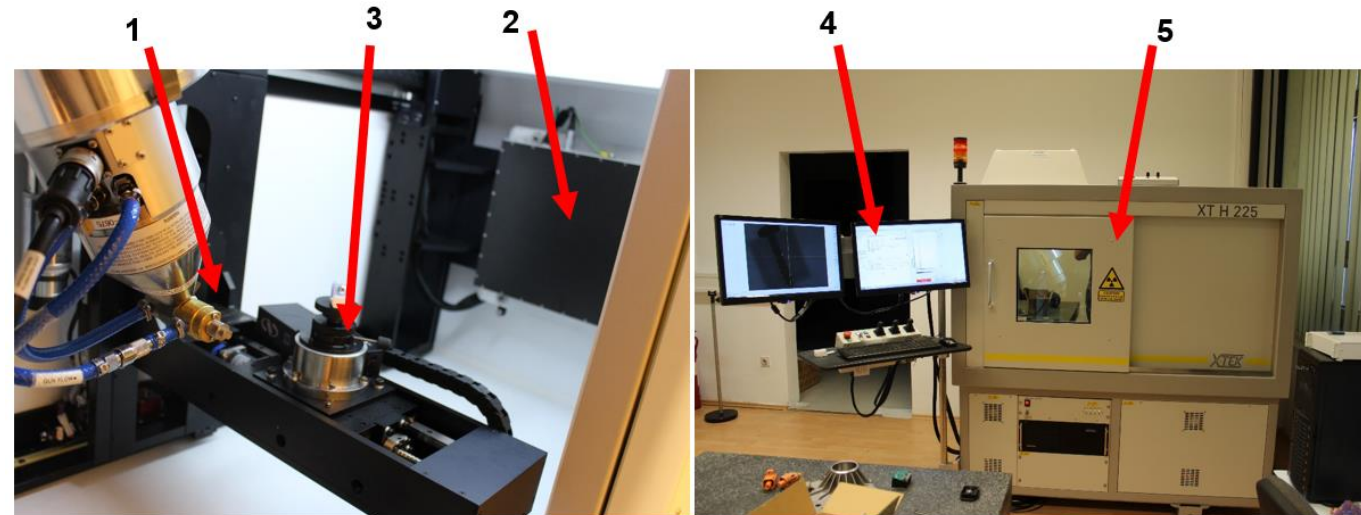


Podela CT sistema

- Postoje različiti tipovi CT sistema koji se danas primenjuju, a klasifikuju se u sledeće kategorije:
 - **Medicinski CT**
 - rendgen jedinica (koja nosi izvor i detektor X-zraka) kontinualno rotiraju oko objekta ili pacijenta (koji ostaje nepokretan)
 - generišu se tomografski snimci koji predstavljaju 2D snimke/slajsove/kriške skeniranog tela.
 - **Industrijski CT za analizu materijala**
 - fundamentalno se razlikuju od medicinskih CT sistema.
 - objekat rotira u pravcu X-zraka, a izvor X-zraka i detektor ostaju stacionarni.
 - doza zračenja nije kritična po objekat, primenjuje se veći nivo zračenja nego kod medicinskih CT skenera.
 - **CT za primenu u dimenzionalnoj metrologiji**
 - dimenzionalna merenja se izvode na digitalizovanom 3D modelu
 - akvizicija podataka (2D CT snimci) i njihova naknadna evaluacija može da se izvrši bilo gde i bilo kada.
 - kod dimenzionalne metrologije posebna pažnja se posvećuje tačnosti i ponovljivosti rezultata merenja.

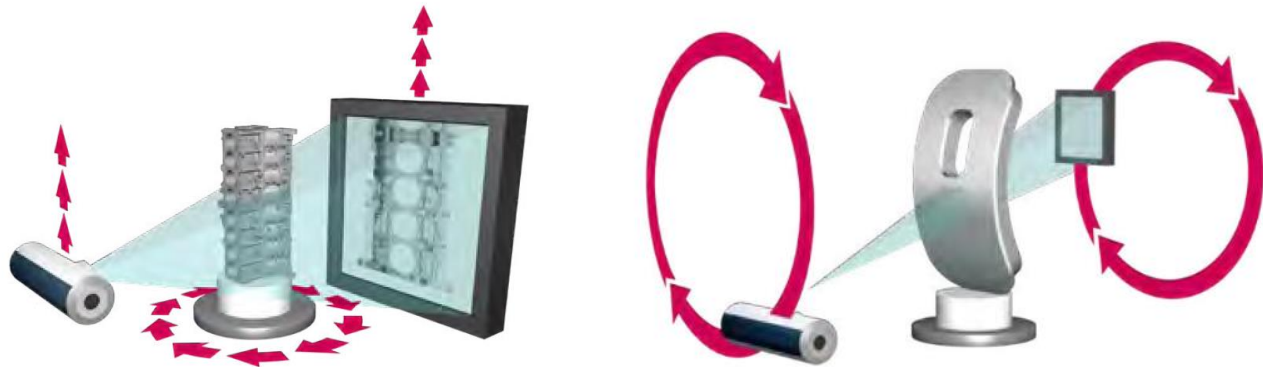
Osnovne komponente

- Većina industrijskih CT sistema se sastoji od nekoliko glavnih komponenti, a to su:
- **1. Izvor X-zraka (rendgenska cev)**
- **2. Detektor**
- **3. Manipulacioni sistem (obrtni sto)**
- **4. Računarska podrška**
- **5. Zaštita od radijacije**
- **6. Sistem za hlađenje**



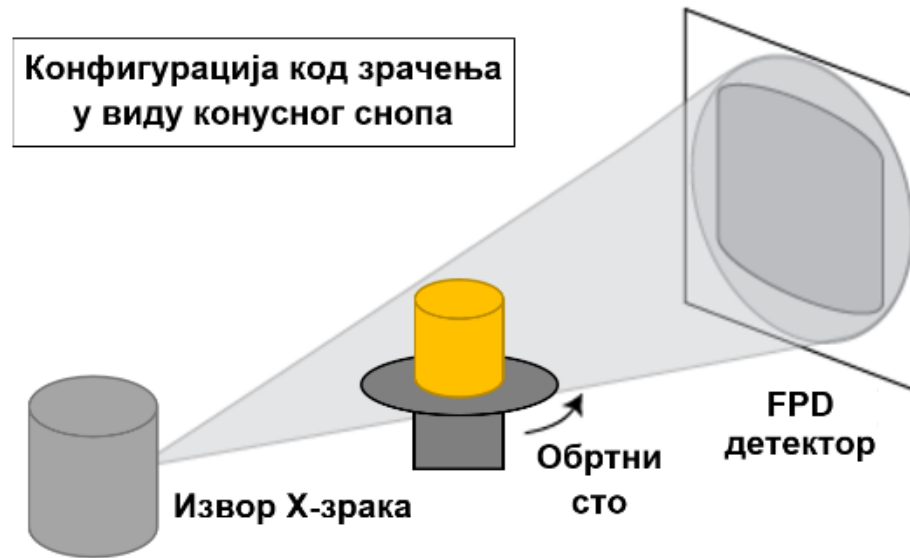
Klasifikacija CT sistema prema obliku snopa X-zraka

- **Prema obliku snopa X-zraka**, industrijski CT sistemi se uopšteno mogu podeliti na:
 - CT sistemi snopa X-zraka u obliku lepeze (engl. fan beam CT) i
 - CT sistemi konusnog snopa X-zraka (engl. cone beam CT),
- Takođe se danas koriste i različite izvedbe CT sistema baziranih na nekom od ova dva oblika snopa X-zraka, a to su:
 - Spiralno (helikoidno) CT snimanje i
 - CT laminografija.



CT sistemi konusnog snopa X-zraka

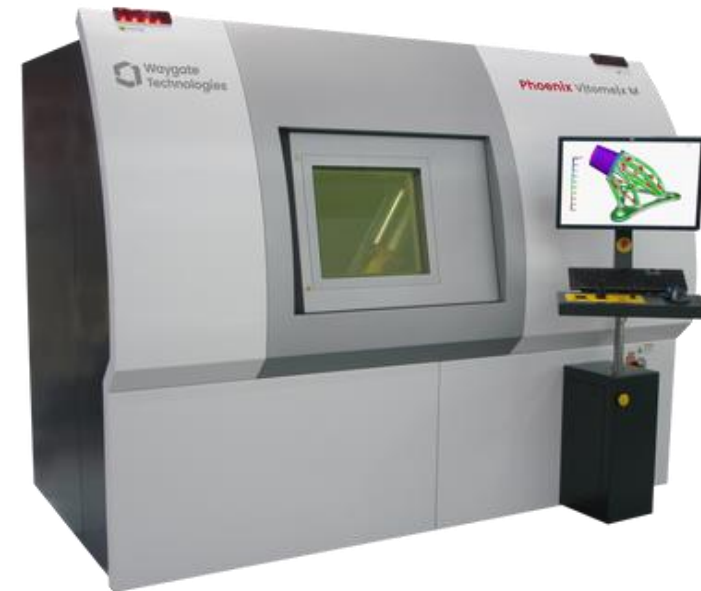
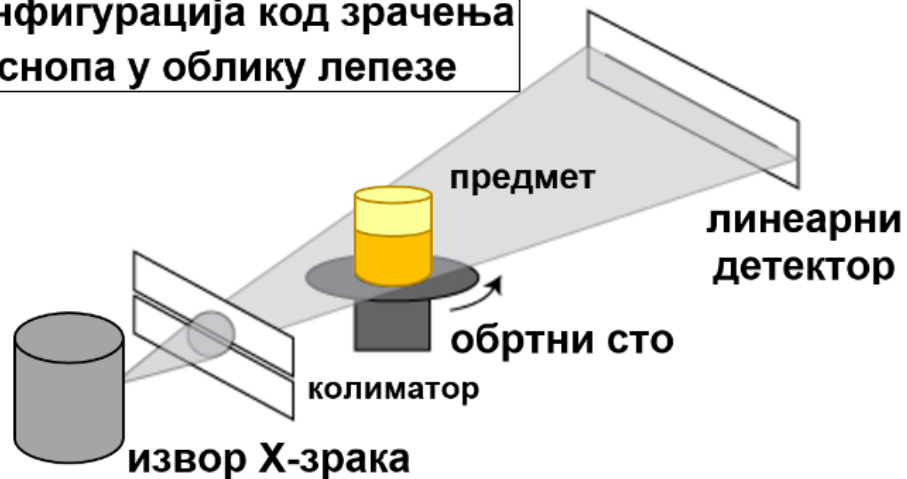
- Obezbeđuju izotropno uvećanje zone snimanja i kraće vreme snimanja (brži su).
- Omogućavaju generisanje trodimenzionalnih podataka u velikoj rezoluciji i visoke dimenzionalne tačnosti gde koriste usmereni izvor X-zraka koji proizvodi snop u obliku konusa.
- Snop X-zraka koji zatim vrši potpunu ili delimičnu rotaciju oko objekta proizvodeći niz tomograma (diskretnih slika planarnih projekcija) pomoću digitalnog detektora



CT sistemi snopa X-zraka u obliku lepeze

- Izvor rendgenskih X-zraka emituje X-zrake u vidu lepeze koji prolaze kroz objekat koji se skenira i koji se prikupljaju na detektoru.
- Prikupljanje podataka o objektu u vidu spiralne putanje.
- Sporiji od skenera sa konusnim snopom X-zraka
- Kod ovog tipa snopa X-zraka ne nastaju neke vrste artefakata, za razliku od CT sistema sa konusnim snopom X-zraka.
- Mogu da proizvedu podatke skeniranja veće tačnosti.

Конфигурација код зрачења
снопа у облику лепезе



Klasifikacija CT sistema u zavisnosti od veličine objekta:

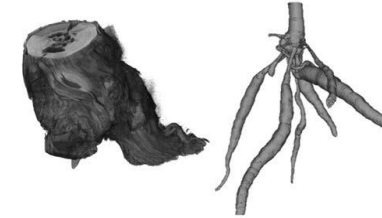
- Klasifikacija CT sistema u zavisnosti od veličine objekta se deli na:
 - XXL CT
 - Genti (rotirajući) CT sistemi
 - Makro CT
 - Dualni/dvoenergetski CT sistemi
 - 4D CT
 - Mikro (μ) CT
 - Submikronski (nano) CT
 - Nano CT baziran na SEM* tehnologiji

*skenirajuća elektronska mikroskopija (eng. *Scanning Electron Microscopy – SEM*)

- XXL CT



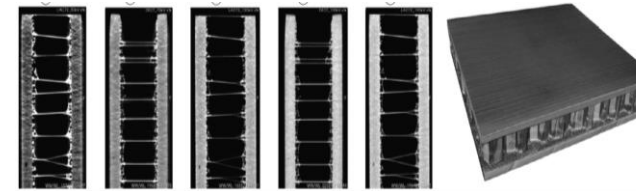
- Genti (rotirajući) CT sistemi



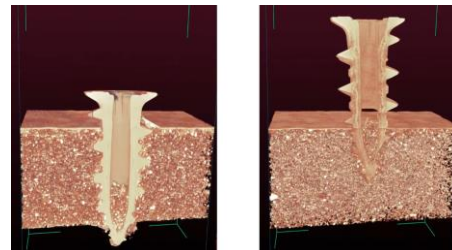
- Makro CT (uz dodatak robotske ruke ili linijske CT inekcije – engl. *inline*)



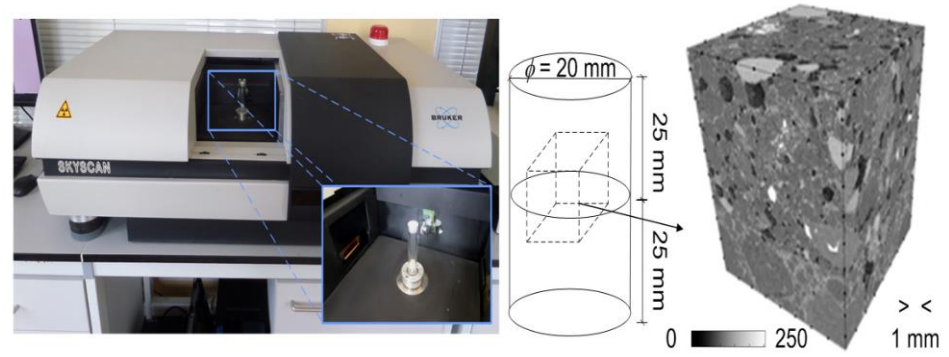
- Dualni/dvoenergetski CT sistemi



- 4D CT



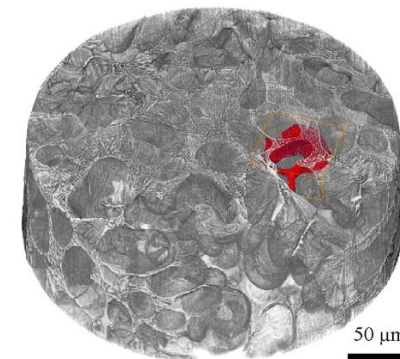
- Mikro (μ) CT



- Submikronski (nano) CT



- Nano CT baziran na SEM* tehnologiji

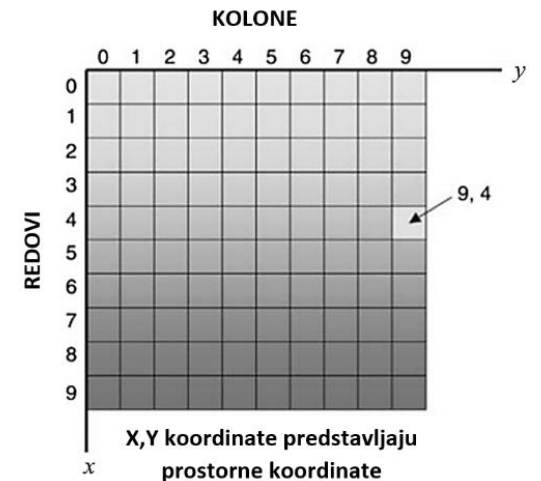


Koraci kod generisanja 3D modela primenom CT sistema:

- Kada je u pitanju postupak generisanja 3D modela primenom industrijskog CT sistema, on se sastoji iz sledećih koraka:
 - 1. Priprema** - Ovde se mogu izdvojiti različiti koraci, kao npr. priprema predmeta za snimanje (ukoliko je to potrebno), izbor adekvatnih parametara akvizicije tokom CT snimanja i kalibracija sistema.
 - 2. Akvizicija** - Ovaj korak uključuje generisanje projekcija i rekonstrukciju rezultujućih 2D CT snimaka.
 - 3. Rekonstrukcija** - Rekonstrukcija na osnovu prethodno prikupljenih 2D CT snimaka dovodi do generisanja zapreminskog 3D modela.
 - 4. Vizuelizacija i analize** - Ovaj korak uključuje sve operacije i manipulacije sa podacima, kao i za ekstrakciju informacija na osnovu rekonstruisanih CT snimaka. Vizuelizacija se može izvesti u 2D domenu (poprečni preseci) ili u 3D domenu (zapremina).

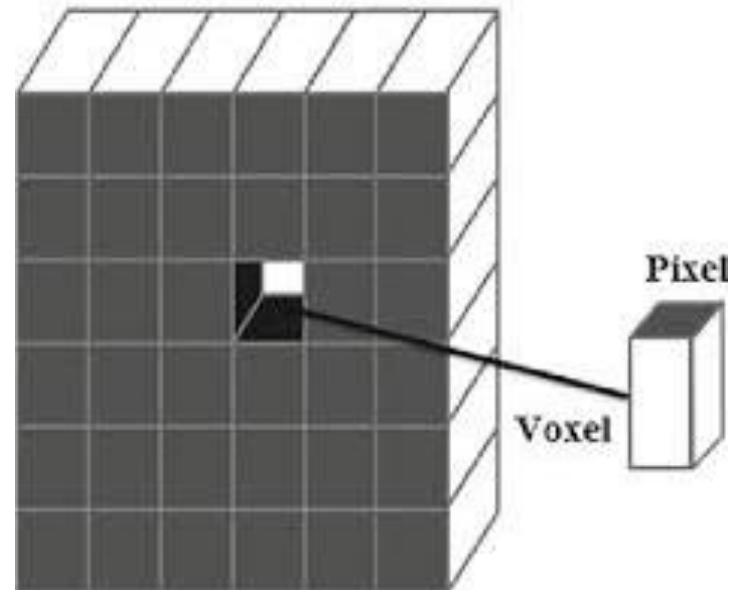
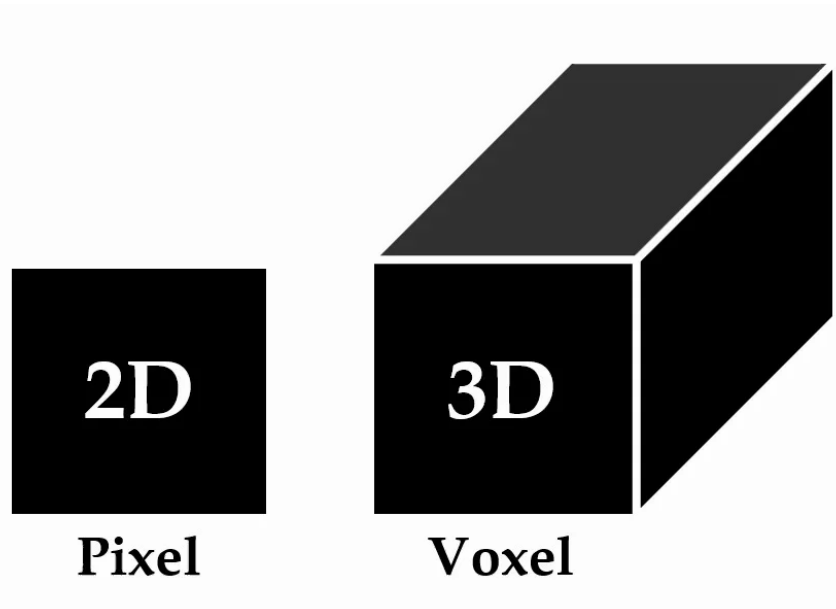
Detekcija, rekonstrukcija i vizuelizacija podataka kod CT sistema

- U toku kompletnog CT procesa, korak detekcije se sprovodi pomoću detektora, koji hvataju oslabljeni snop rendgenskih X-zraka i pretvaraju ga u električne signale, koji se zatim konvertuju u binarno kodirane informacije.
- Digitalna slika predstavlja numeričku sliku raspoređenu na takav način da se lokacija svakog broja (piksela) može identifikovati preko Dekartovog koordinatnog sistema (x, y).
- Osnovni parametri za opisivanje digitalne slike su:
 - matrica,
 - pikseli,
 - vokseli i
 - dubina bita.
- Digitalna slika je sastavljena od 2D niza brojeva koji se nazivaju matrica.
- Matrica se sastoji od kolona (M) i redova (N) koji definišu male regione koji se nazivaju elementi slike ili pikseli. Kolone i redovi opisuju dimenzije slike, a veličina slike je u bitovima.



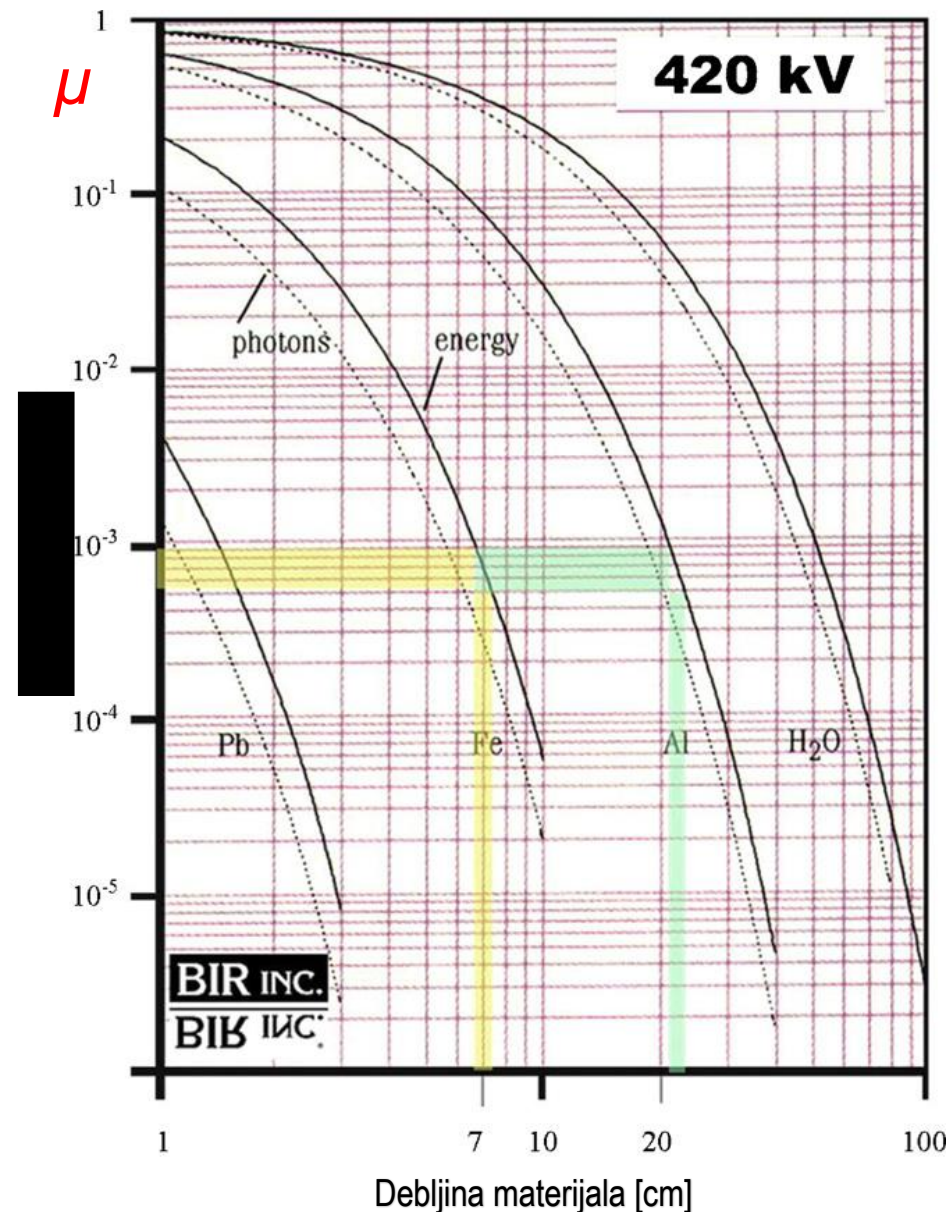
Detekcija, rekonstrukcija i vizuelizacija podataka kod CT sistema

- Pikseli su elementi slike koji čine matricu i uglavnom su kvadratnog oblika. Svaki piksel je okarakterisan brojem (diskretnom vrednošću) koji predstavlja vrednost osvetljenosti.
- Brojevi predstavljaju karakteristike materijala, npr. u radiografiji i CT, ovi brojevi su povezani sa koeficijentom slabljenja materijala.
- Vokel predstavlja 3D piksel koji sadrži informacije o zapremini materijala u objektu slike.



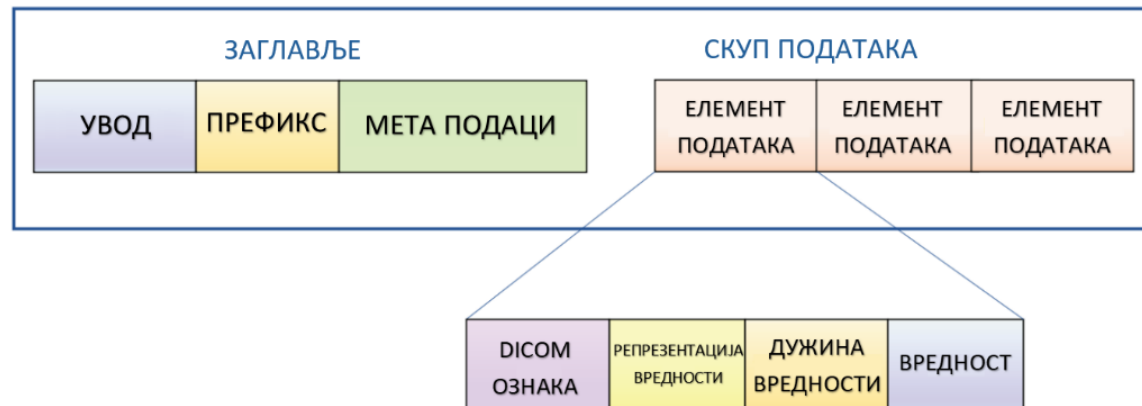
- Pri prolasku kroz materijal dela, X-zraci **atenuiraju (slabe)** usled apsorpcije ili rasejavanja.
- **Nivo atenuacije zavisi od:**
 - dužine puta koji prelaze unutar apsorbirajućeg materijala,
 - strukture materijala i njegove gustine (odnosno atenuacionog koeficijenta μ) i
 - energije X-zraka.

Atenuacioni koeficijent materijala ograničava max. debljinu materijala koja može biti probijena.



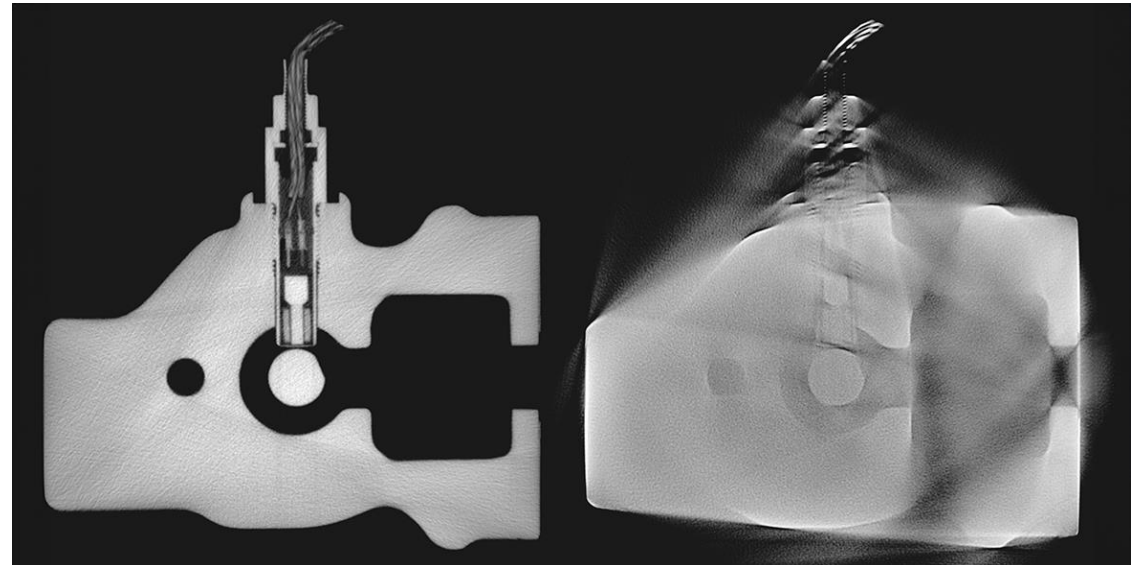
Zapis podataka kod CT sistema

- Razmena informacija u vidu CT snimaka, kao i podataka koje oni sadrže je danas od velikog značaja. Ovo pospešuje komunikaciju i saradnju jer obezbeđuje različitim korisnicima i ustanovama da nesmetano prenose podatke ili ih dele.
- U tu svrhu se danas koristi tzv. **DICOM (engl. Digital Imaging and Communications in Medicine)** format zapisa (***.dcm**) koji omogućava prenos podataka u vidu slika visokog kvaliteta.
- Ukratko rečeno, DICOM predstavlja međunarodni standard za prenos, skladištenje, preuzimanje, štampanje, obradu i prikaz informacija o slici.
- Pored ovog formata zapisa, danas se takođe koriste i drugi standardni formate za skladištenje slike, kao što su *.tif, *.jpeg i drugi formati zapisa.



Prednosti primene DICOM formata zapisa

- Omogućava komunikaciju između uređaja,
- omogućava prenos podataka i skladištenje,
- dizajniran je da obuhvati sve funkcionalne aspekte digitalne medicine u oblasti snimaka.
- **sadrži podatke o kalibraciji CT uređaja** na kojem su generisani 2D CT snimci.



Prednosti i nedostaci CT sistema

Prednosti CT-a:

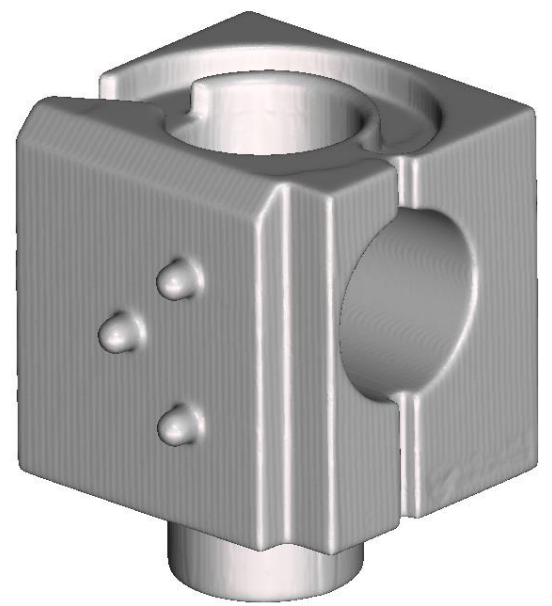
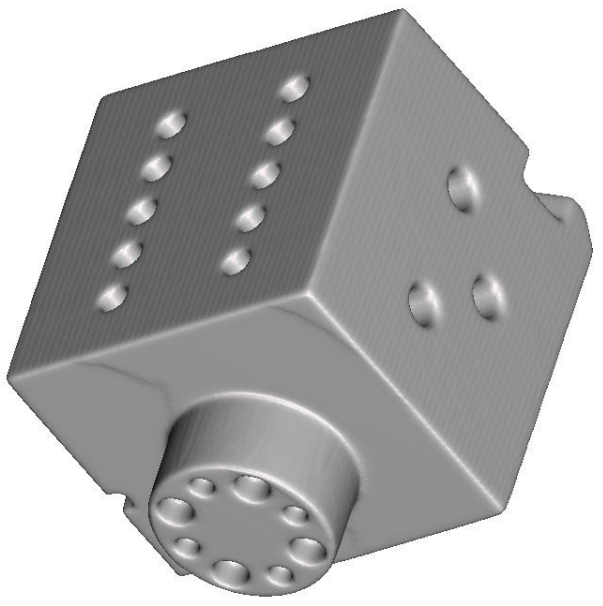
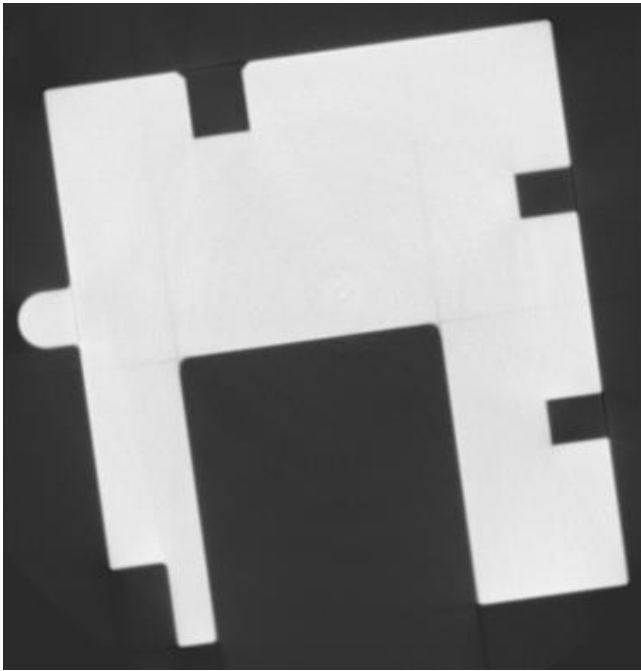
- ✓ Zahvaljujući relativno dobroj prodornosti X-zraka, kao i osetljivosti na gustinu materijala objekta, **CT omogućava nedestruktivnu karakterizaciju i unutrašnjosti objekta.**
- ✓ Zahvaljujući osobinama X-zraka, CT se podjednako dobro primenjuje na različitim materijalima (metal, plastika, organski materijali itd.), 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 eliminiše potreba za registracijom (uklapanjem) više oblaka tačaka.
- ✓ CT ne zahteva primenu pribora, a nije potrebno ni prethodno ni naknadno pomeranje objekta.
- ✓ Savremeni CT industrijski sistemi su dostigli nivo (preciznost i tačnost) da se mogu porediti sa KMM.

Prednosti i nedostaci CT sistema

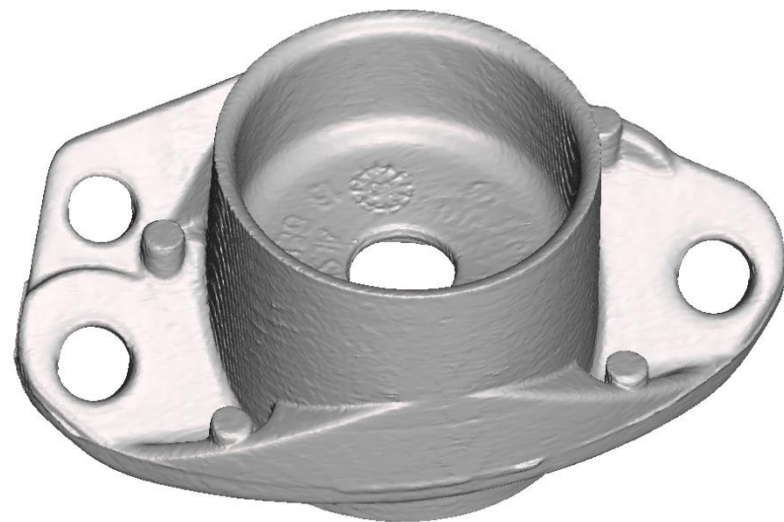
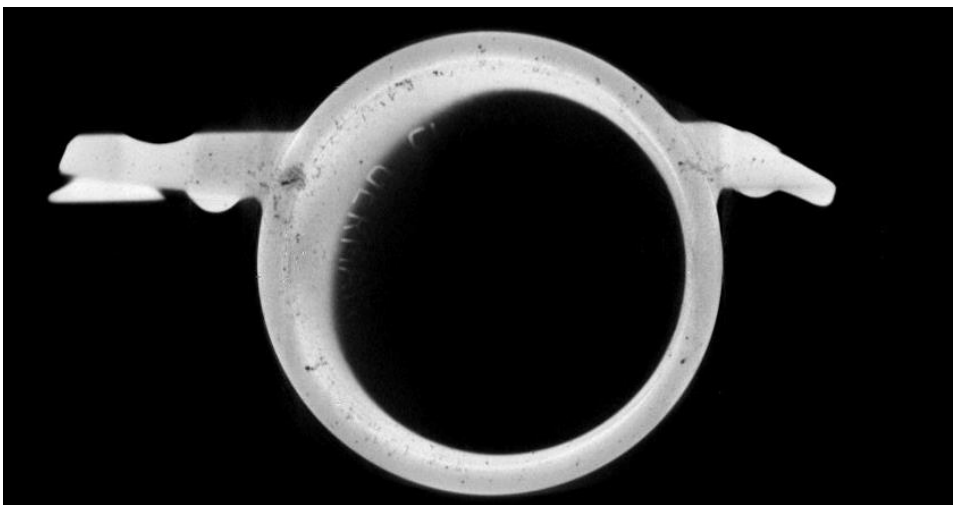
Nedostaci CT-a:

- ✓ Brojni izazovi u vidu segmentacije i rekonstrukcije podataka (od kojih u velikoj meri zavisi tačnost ovih sistema) što posledično ima veliki uticaj na kvalitet generisanih 3D modela (njihova dimenzionalna tačnost).
- ✓ **Artefakti**, kao uzroci nastanka grešaka kod rekonstrukcije, imaju takođe veliki uticaj na krajnje 3D modele.
- ✓ Ekstrakcija informacija u kompleksnim slučajevima, pogotovo kod segmentacije višematerijalnih predmeta (MMC) sa ciljem tačne rekonstrukcije svih komponenti iz kojih se ovi predmeti sastoje, a koje su od materijala izrazito različitih specifičnih gustina (npr. metal i polimer).
- ✓ Brže vreme ciklusa merenja/snimanja.
- ✓ Cena CT sistema je znatno visoka, a vreme merenja/snimanja relativno dugo.
- ✓ Potreba za boljom operativnošću operatera (proces postavljanja i snimanja predmeta na CT sistemima, i njihovu naknadnu obradu).

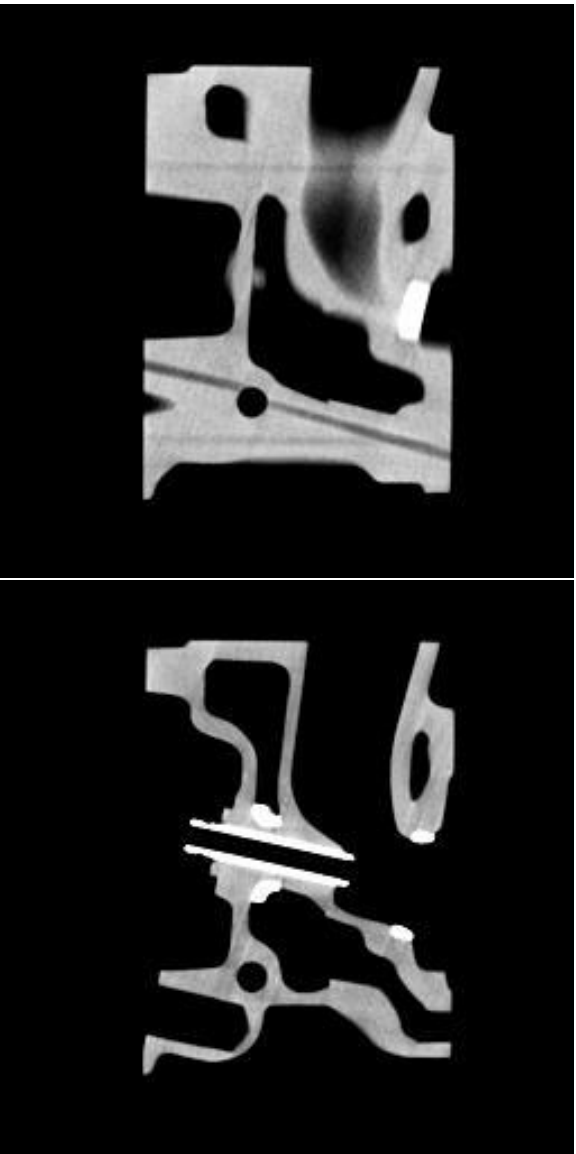
P
R
I
M
E
R
I



P
R
I
M
E
R
I



P
R
-
M
E
R
-



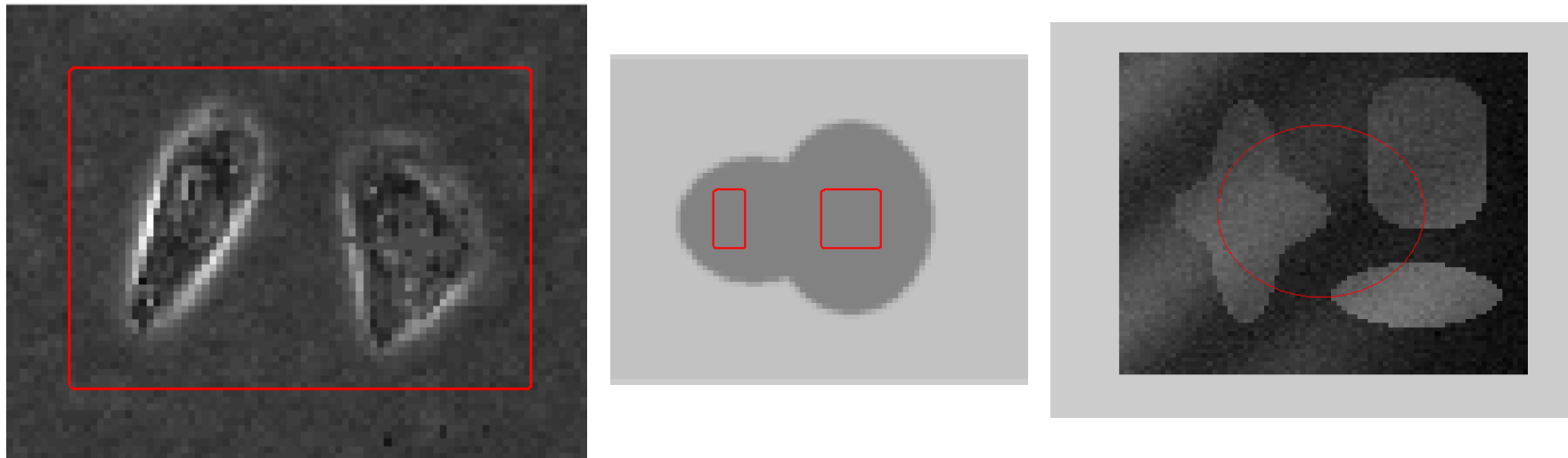
SEGMENTACIJA SLIKE I ARTEFAKTI
KOD KOMPJUTERIZOVANE TOMOGRAFIJE (CT)

Segmentacija – uvodni pojmovi

- Segmentacija - se često definiše kao proces koji deli sliku na njene sastavne delove i ekstrahuje delove (objekte) od interesa.
- To je jedan od najkritičnijih zadataka u automatskoj analizi slike, jer će rezultati segmentacije uticati na sve naredne procese analize slike, kao što su:
 - vizuelizacija i opis objekta,
 - merenje određenih karakteristika,
 - klasifikacije objekta,
 - itd.

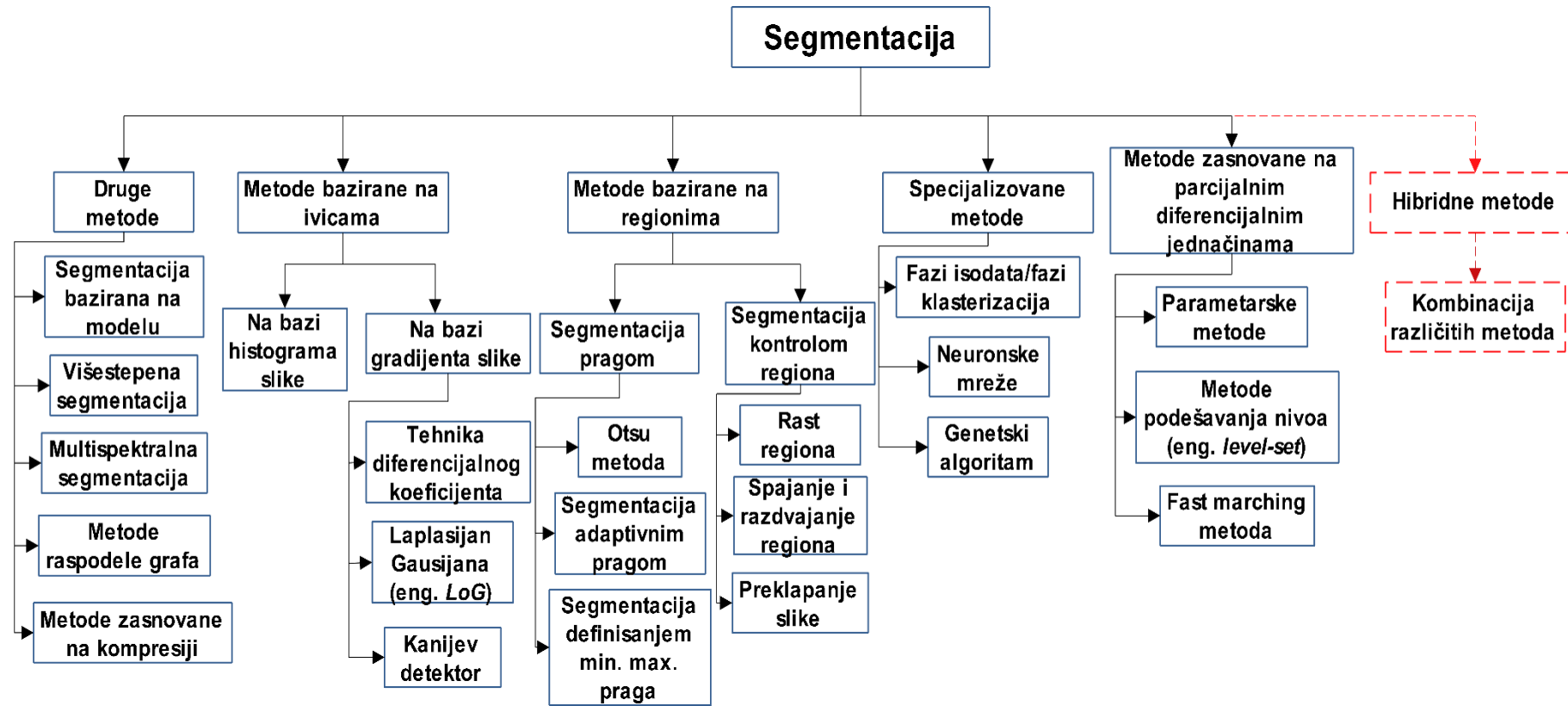
Segmentacija – uvodni pojmovi

- Kritičan parametar kod segmentacije predstavlja pažljivo definisanje granične vrednosti intenziteta piksela prisutnih na CT snimcima (engl. *threshold*).



NE POSTOJI UNIVERZALNO REŠENJE!!!

Segmentacija – podela



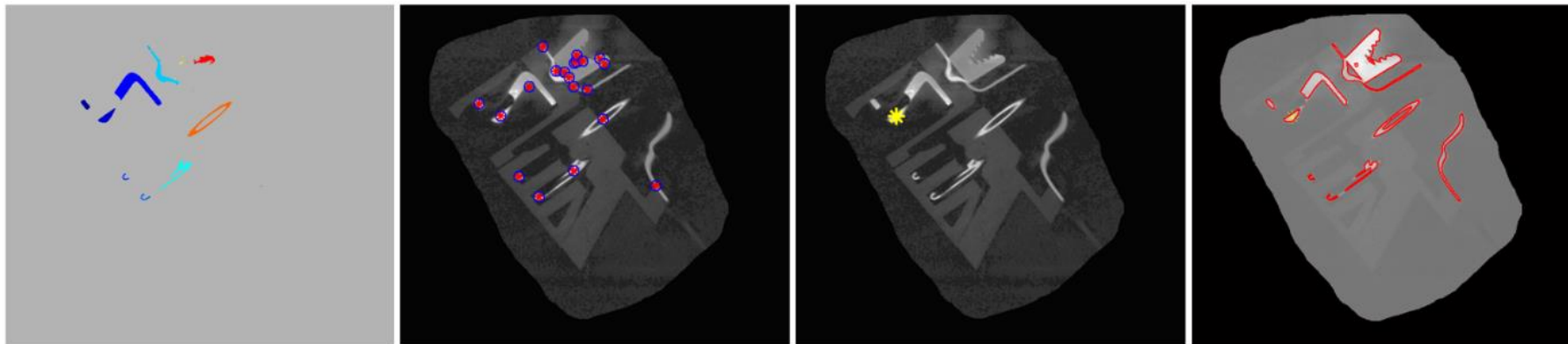
Metode bazirane na ivicama

- Metode bazirane na ivicama (engl. *Edge Based*) se zasnivaju na ekstrakciji ivica objekta prisutnog na slici. **Ivica predstavlja** skup povezanih piksela koji leže na granici između različitih regiona, gde postoje intenzivni diskontinuiteti, kao što su promena intenziteta piksela, različite nijanse boje, različita tekstura itd.
- Detekcija ivice predstavlja veliki izazov kod obrade slike (kompleksniji slučajevi segmentacije slike).
- Postoji mnogo izazova kod primene metode detekcije ivica, a neki od njih su:
 - promena osvetljenja na slici;
 - dinamična pozadina slike;
 - šum ima veliki uticaj na oblikovanje ivice;
 - lažna detekcija ivice (detektovanje ivice gde ona ne postoji);
 - dislocirana ivica (otkrivena ivica koja se pomera sa svoje tačne lokacije).



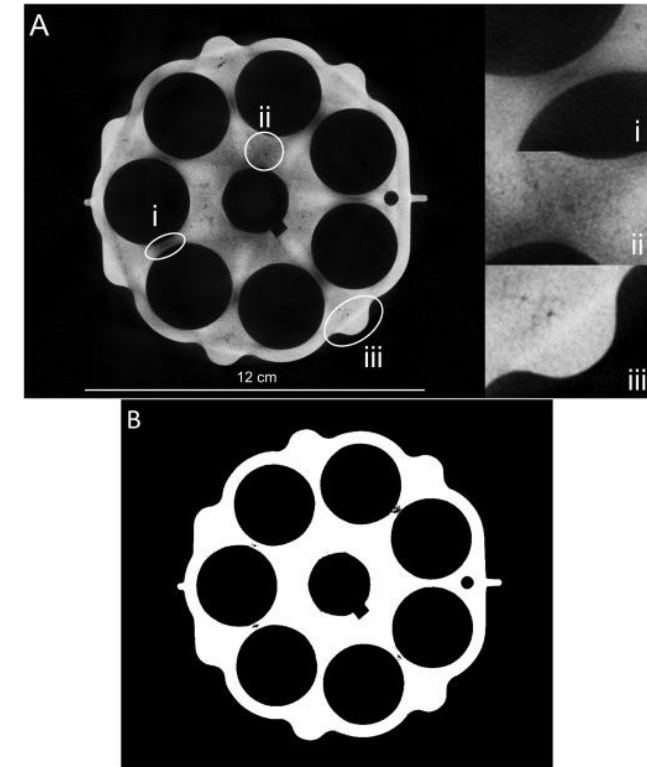
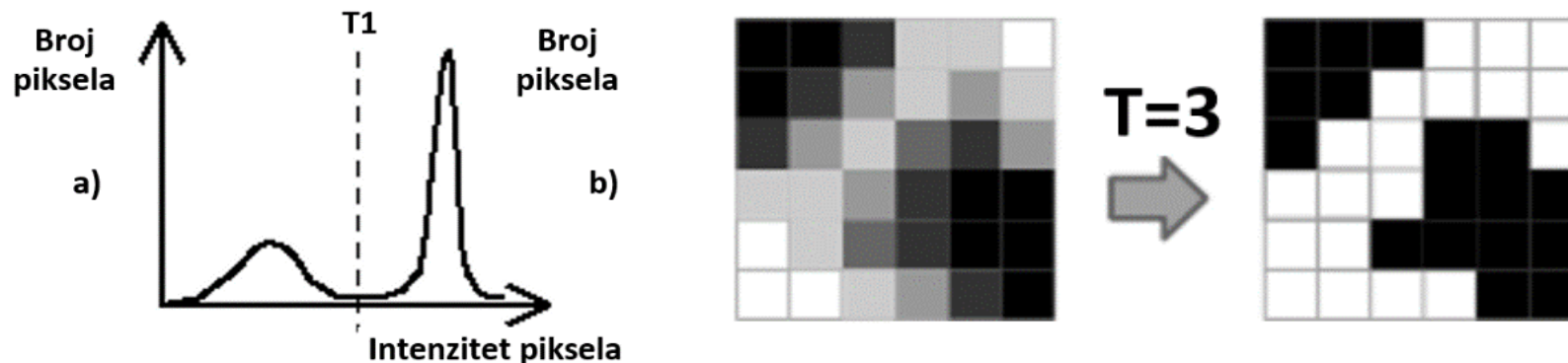
Metode bazirane na regionima

- Metode bazirane na regionima (engl. *Region Based*) zasnivaju se na kontinuitetu određenog parametra slike.
- Ove metode dele celu sliku u pod-regione na osnovu definisanih pravila. Npr. jedno od takvih pravila je da svi pikseli u jednom regionu moraju imati isti intenzitet.
- Metode bazirane na regionima se oslanjaju na vrednosti intenziteta piksela unutar klastera. Klaster se naziva region, a cilj algoritma segmentacije jeste grupisanje regiona prema njihovim funkcionalnim ulogama.
- U poređenju sa metodama detekcije ivice, algoritmi segmentacije bazirani na regionima su relativno jednostavniji i manje osetljivi na šum.
- Metode bazirane na detekciji ivica segmentiraju sliku zasnovanu na velikim promenama intenziteta piksela u blizini ivica, dok metode bazirane na regionima vrše particiju slike u regione.



Otsu metoda

- Primenom Otsu metode koristi se algoritam koji pretpostavlja da slika sadrži dve klase piksela (objekat i pozadinski pikseli), zatim se izračunava optimalni prag koji odvaja dve klase tako da je njihov kombinovani raspon minimalan ili ekvivalentan.
- Ulaz za operaciju praga tipično je slika u nijansama sive (ili RGB slika u boji). Crni pikseli odgovaraju pozadini, a beli pikseli odgovaraju objektu od interesa (ili obratno).
- U jednostavnim implementacijama **segmentacija se određuje samo jednim parametrom poznatim kao prag intenziteta piksela.**

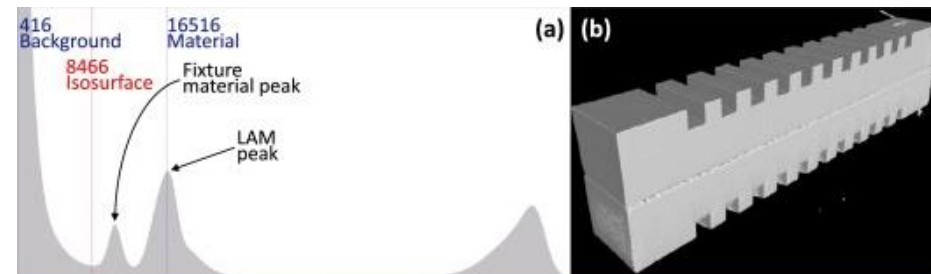


ISO 50% metoda

- ISO 50% metoda za segmentaciju je standardna tehnika određivanja praga (thresholding) koja se najčešće koristi u industrijskoj kompjuterizovanoj tomografiji (CT) za definisanje granica između materijala i pozadine.
- Ključne karakteristike metode
- **Definicija praga:** Prag se postavlja na srednju vrednost intenziteta (nivoa sive boje) između pika koji predstavlja pozadinu (vazduh) i pika koji predstavlja materijal objekta na histogramu slike.
- **Matematička osnova:** Vrednost praga se izračunava kao aritmetička sredina:

$$Threshold = \frac{I_{background} + I_{material}}{2}$$

- **Primena:** Koristi se za ekstrakciju površina, merenje dimenzija i zapreminsku analizu u metrologiji i radiologiji.
- Ova metoda je često podrazumevana metoda za segmentaciju u softverima za analizu 3D podataka kao što je VGStudio MAX.

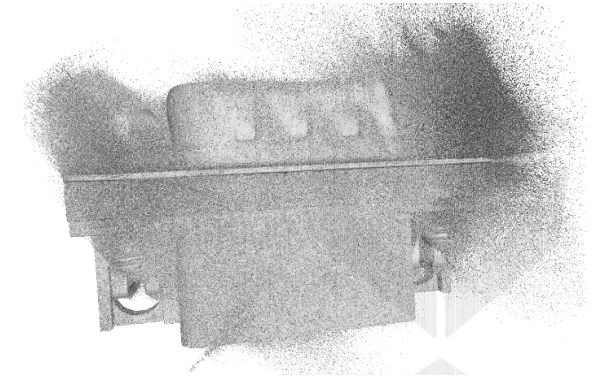
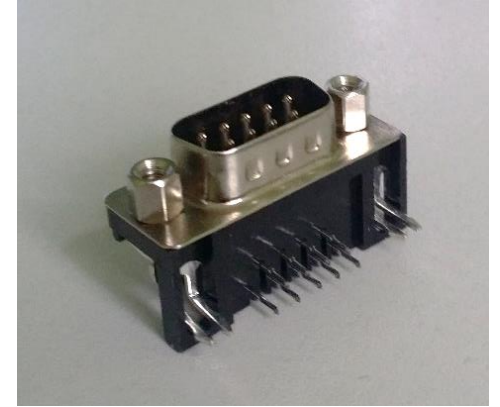
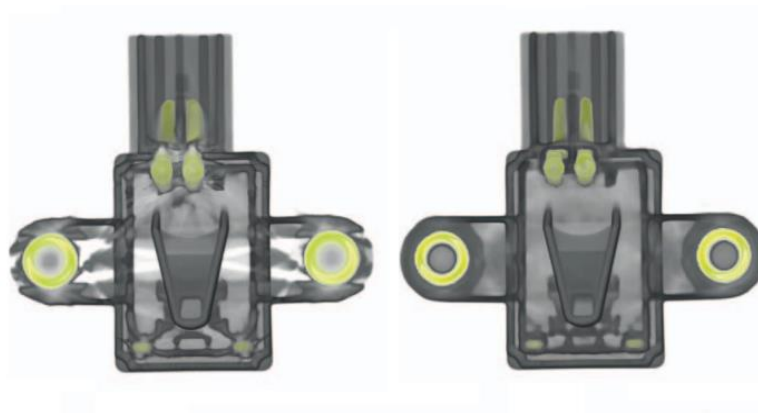
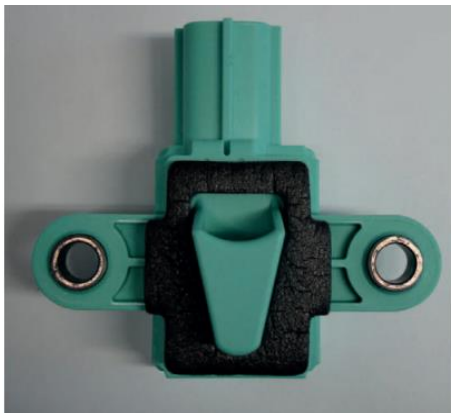


ISO 50% metoda

- **Prednosti i ograničenja**
- **Jednostavnost:** Metoda je brza i laka za automatsko izračunavanje iz histograma.
- **Preciznost:** Iako je standardna, često dovodi do blagog pomeranja granica površine, posebno kod objekata sa kompleksnom geometrijom ili šumom u podacima.
- **Osetljivost:** Rezultati zavise od kvaliteta snimka, debljine materijala i intenziteta zračenja.

ARTEFAKTI

- Jedan od većih problema sa kojim se CT sistemi danas suočavaju prilikom njihove primene jeste prisutnost artefakata na rezultatima CT snimaka.
- Artefakti predstavljaju veštačke strukture koje se nalaze u rezultatima skeniranja, a koji ne odgovaraju realnom stanju.
- Artefakti se mogu opisati kao neslaganja između stvarne vrednosti nekog fizičkog svojstva objekta i mapiranja tog fizičkog svojstva generisanog primenom CT sistema.



ARTEFAKTI

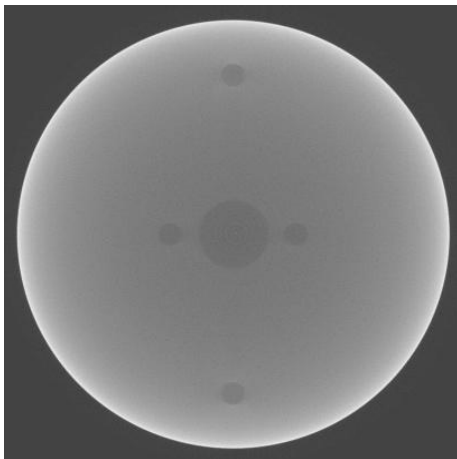
- Artefakti na rezultatima CT snimanja (CT slike) danas mogu biti uzrokovani mnogim stvarima, kao što su:
 - prirodom fizike,
 - neoptimalnim dizajnom sistema,
 - ograničenjima trenutnih i novih tehnologija,
 - karakteristikama objekata koji se snimaju i
 - neoptimalnim ili neodgovarajućim korišćenjem skenera.
- Računarske metode koje se danas koriste za redukciju i/ili eliminaciju artefakata CT slike **mogu se podeliti u dve glavne klase:**
 - ispravljanje artefakata i
 - izbegavanje artefakata.

ARTEFAKTI

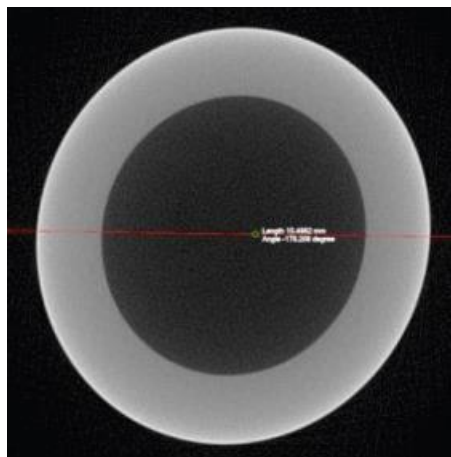
- Artefakti se danas mogu grupisati u četiri osnovna podskupa, a to su:
 1. Artefakti zasnovani na zakonima fizike
 2. Artefakti zasnovani na hardveru
 3. Artefakti zasnovani na podešavanju sistema
 4. Artefakti prisutni u oblasti medicine

Artefakti zasnovani na zakonima fizike

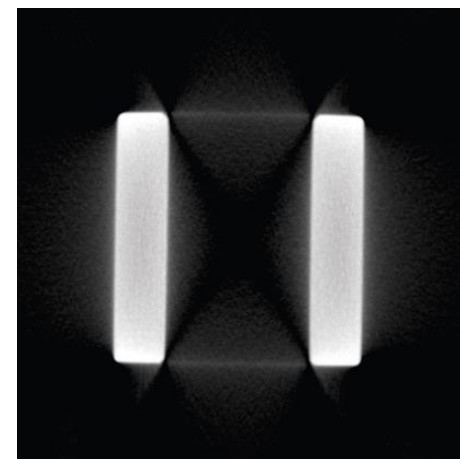
- U ovaj tip artefakata spadaju oni artefakti koji proizilaze iz fizičkih procesa uključenih u generisanje CT slike.
- Tokom prolaska rendgenskih X-zraka kroz material objekta, fotoni niže energije se češće apsorbuju i snop X-zraka postaje „tvrđi“.
- Rezultat nastanka ovih artefakata dovodi do toga da se materijali ujednačene gustine pojavljuju kao materijali različite gustine na CT slikama



Očvršćavanje snopa
X-zraka



cupping artefakati

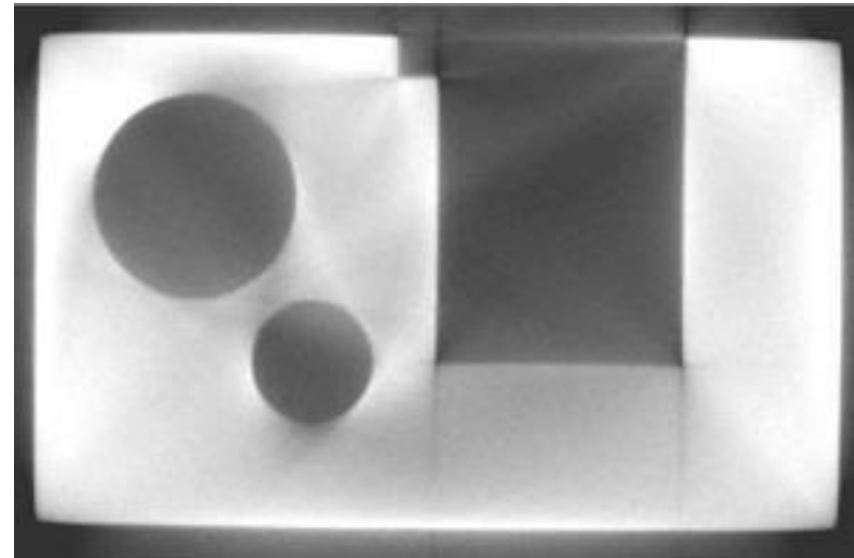
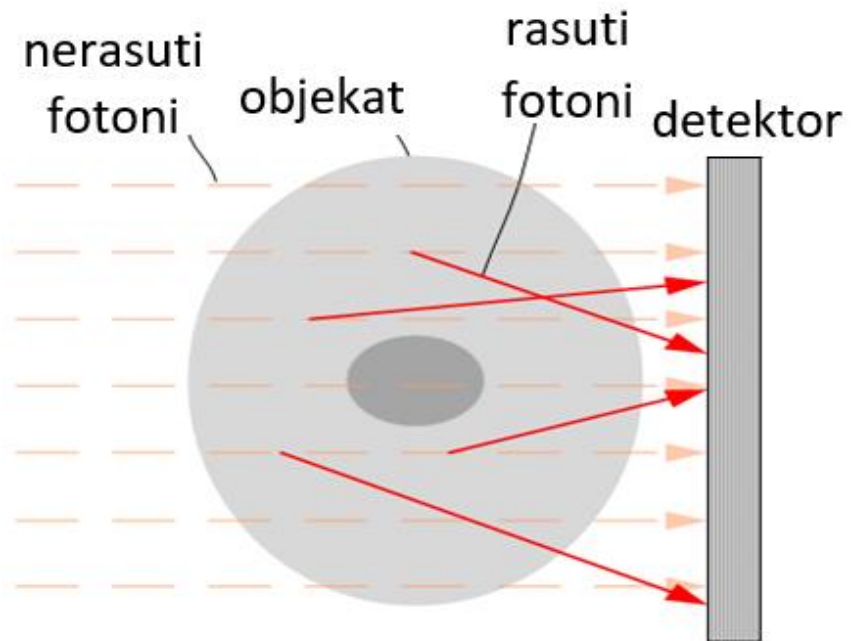


artefakati u vidu
pruga

Artefakti zasnovani na zakonima fizike

Rasipanje X-zraka

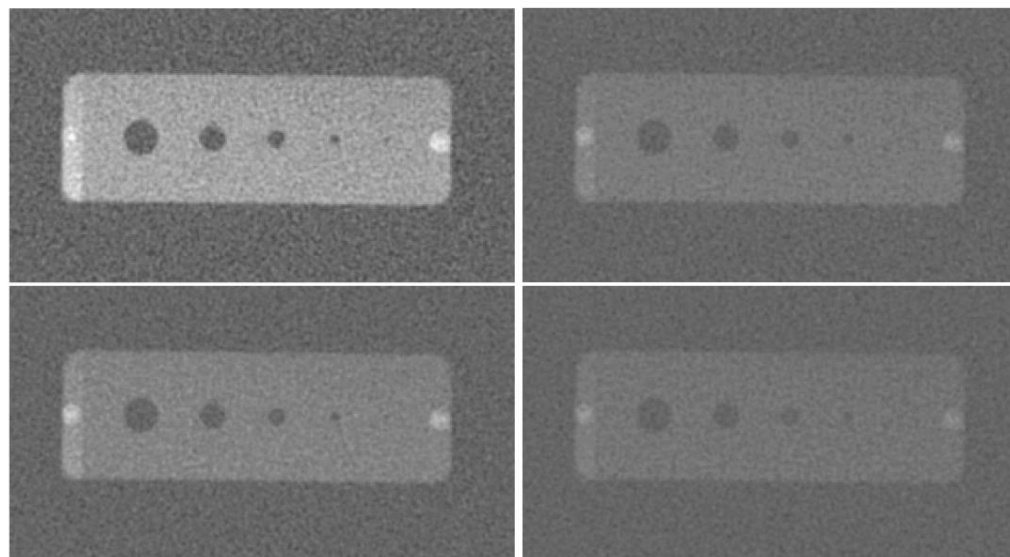
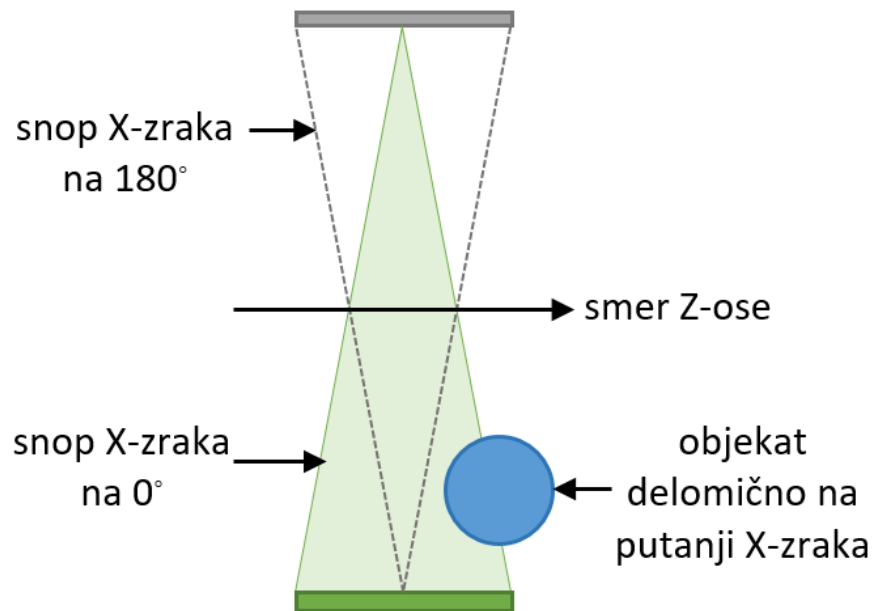
- Tokom širenja zračenja kroz material objekta, deo fotona se raspršuje i kao rezultat toga se odvaja od prvobitne putanje.
- Rasipanje X-zraka je uzrokovano interakcijama sa materijalom



Artefakti zasnovani na zakonima fizike

Artefakti delimičnog prikaza

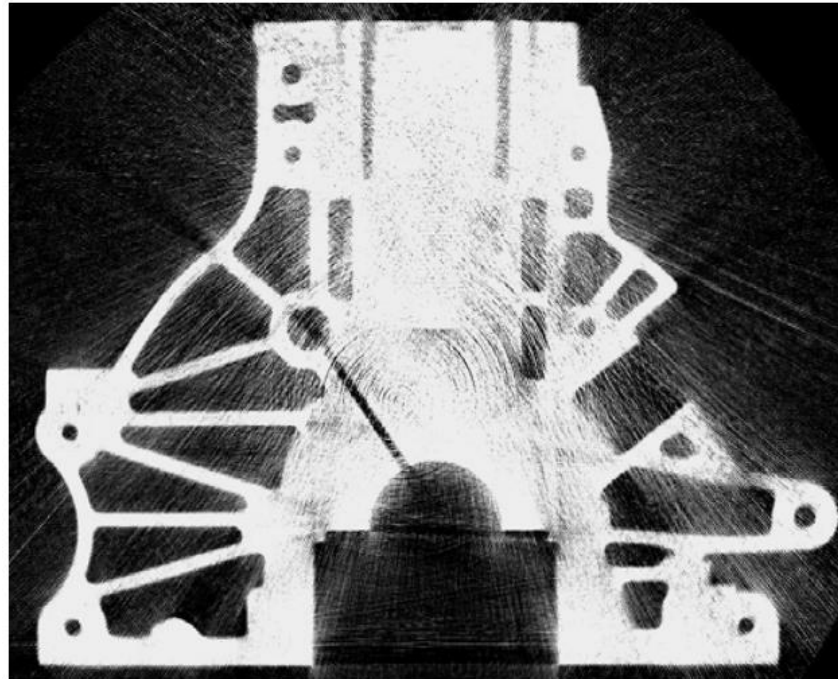
- Artefakti delimičnog prikaza zapremine objekta nastaju kada strukture visokog prigušenja ne pokrivaju ceo deo akvizicije zapremine objekta, tj. samo deo piksela detektora.
- Delimična zapremina nastaje kada objekat delimično upadne u ravan skeniranja.



Artefakti zasnovani na zakonima fizike

Artefakti fotonskog nedostatka

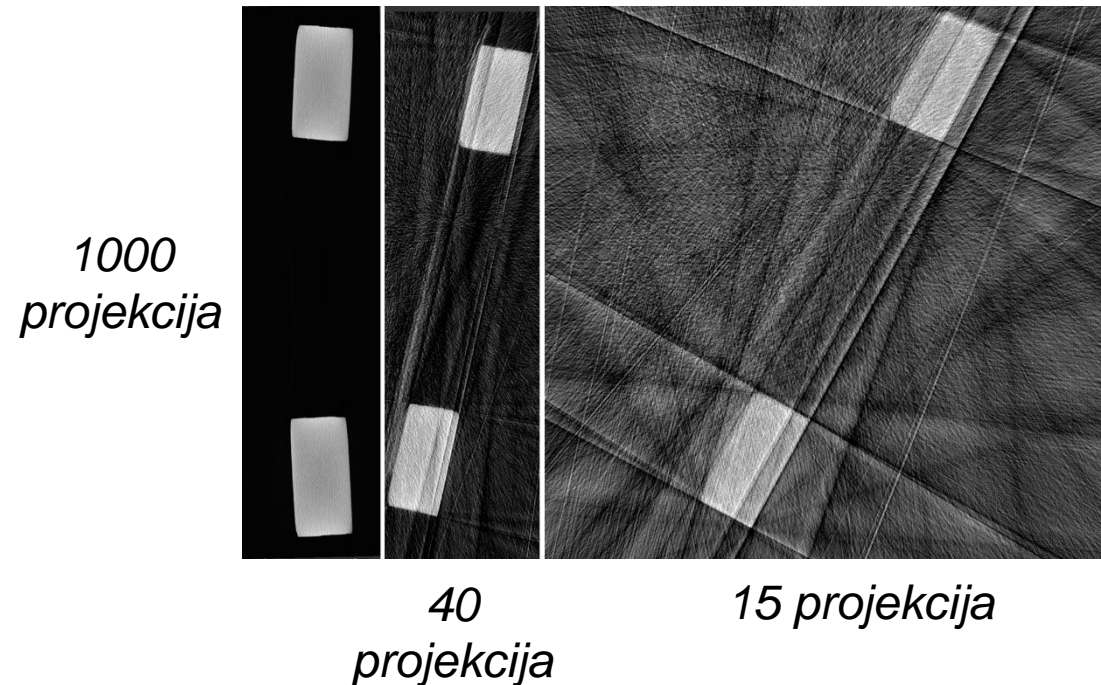
- Artefakt fotonskog nedostatka (odnosno fotonskog „gladovanja“) opisuje povećan šum na CT slici u određenim delovima slike, a koji je uzrokovan povećanim slabljenjem X-zračenja



Artefakti zasnovani na zakonima fizike

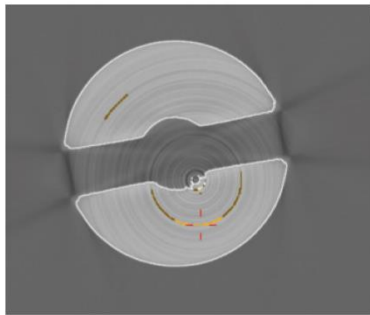
Artefakti nedovoljnog uzorkovanja (alijasing)

- Artefakt nedovoljnog uzorkovanja (ili artefakti alijasinga) kod CT sistema se odnosi na grešku u tačnosti analogno-digitalnog pretvarača tokom digitalizacije CT slike.
- Ovaj tip artefakata se pojavljuje u vidu pravilnih pruga koje se projektuju sa tvrdih ivica visokog kontrasta unutar slike.

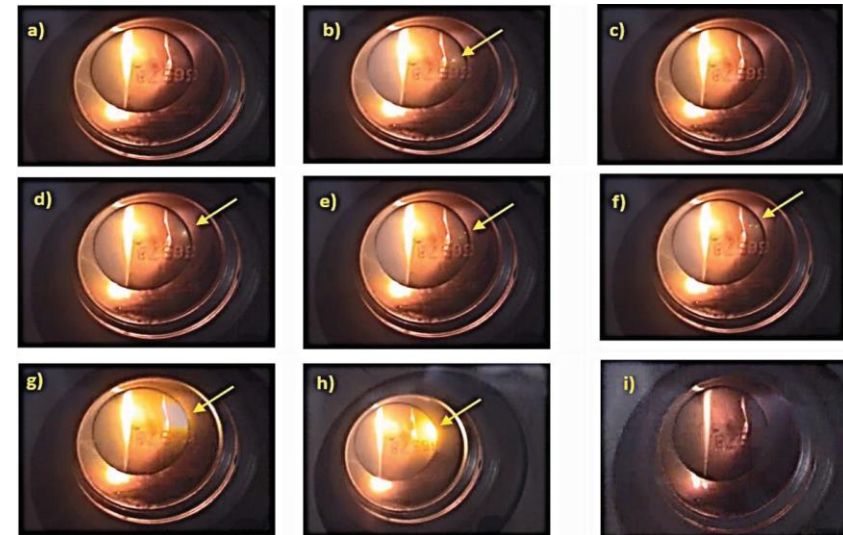
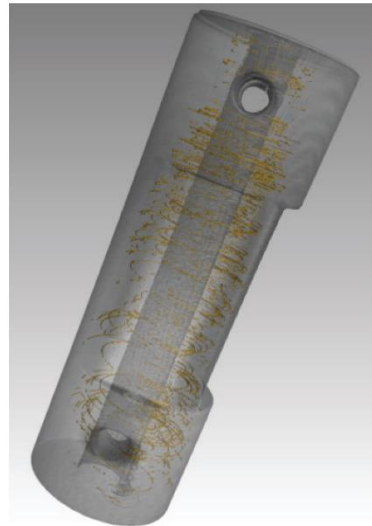


Artefakti zasnovani na hardveru

- Nastanak ovog tipa artefakata je vezan za rezultat nesavršenosti u sistemu kontrole kretanja i podešavanja Sistema (mehaničke komponente CT sistema kao što su rendgenska cev, detektor, itd.)



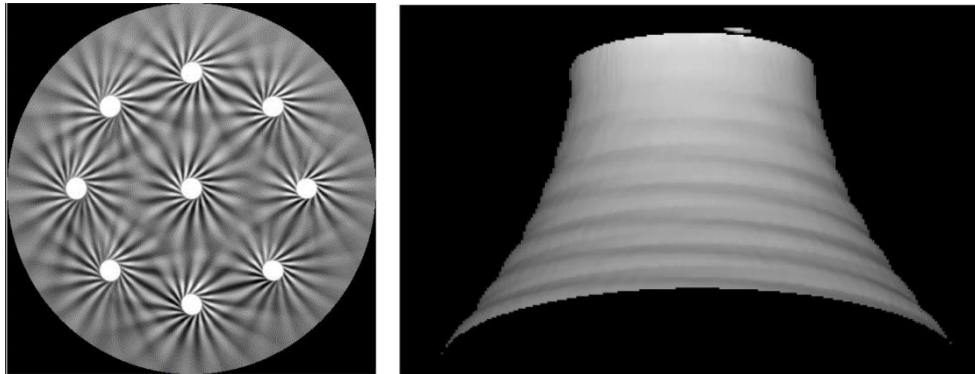
Artefakti u vidu prstenova



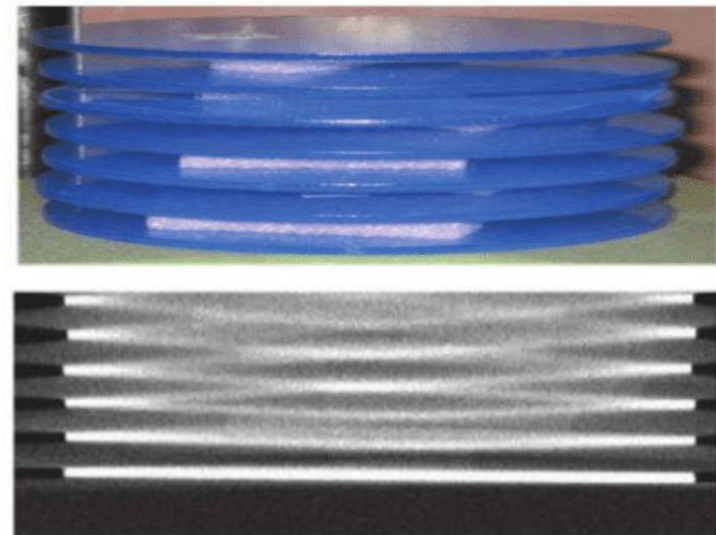
Lučenje rendgenske cevi
(pojava lučnog luka)

Artefakti zasnovani na podešavanju sistema

- Artefakti zasnovani na podešavanju sistema uglavnom nastaju tokom samog procesa podešavanja CT sistema.
- U velikom broju slučajevima, artefakti ovog tipa su uzrokovani interakcijom između poravnanja CT sistema i algoritma rekonstrukcije.



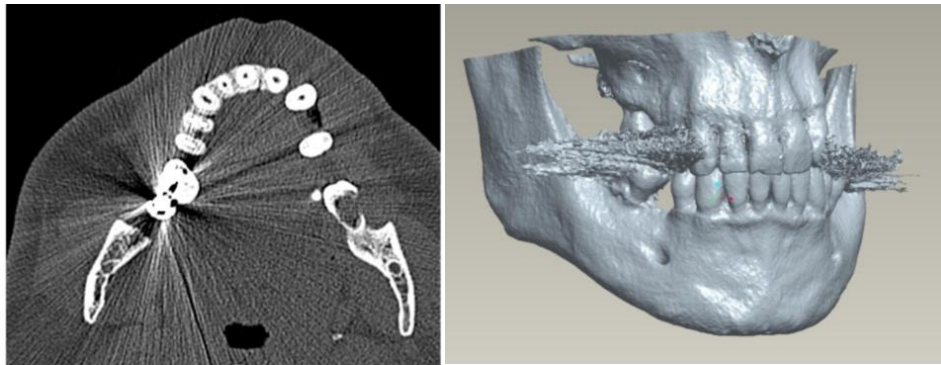
Helikoidni artefakti



Artefakti konusnog snopa

Artefakti prisutni u oblasti medicine

- Ovi tipovi artefakata su uglavnom vezani za pacijente i javljaju se u oblasti medicine.
- Rezultat nastanka ovih artefakata je u velikoj većini slučajeva rezultat pomeranja pacijenta ili usled prisutnosti stranih objekata tokom akvizicije CT snimaka.



Metalni artefakti



Artefakti nastali usled pomeranja

HVALA NA PAŽNJI!!!