

Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka

DIZAJN I IZDRADA IMPLANATA I MEDICINSKIH MODELA

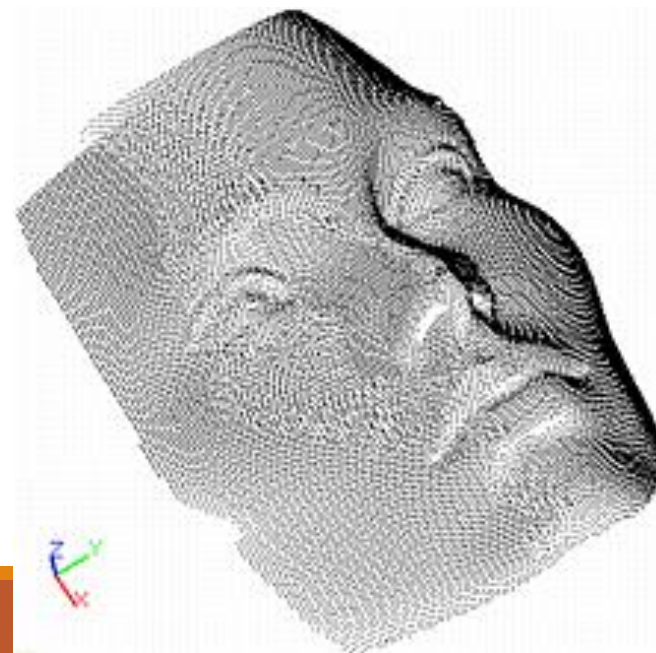
**3D DIGITALIZACIJA
U BIOMEDICINSKOM INŽENJERSTVU
KONTAKTNE METODE I FOTOGARAMETRIJA**

3D digitalizacija

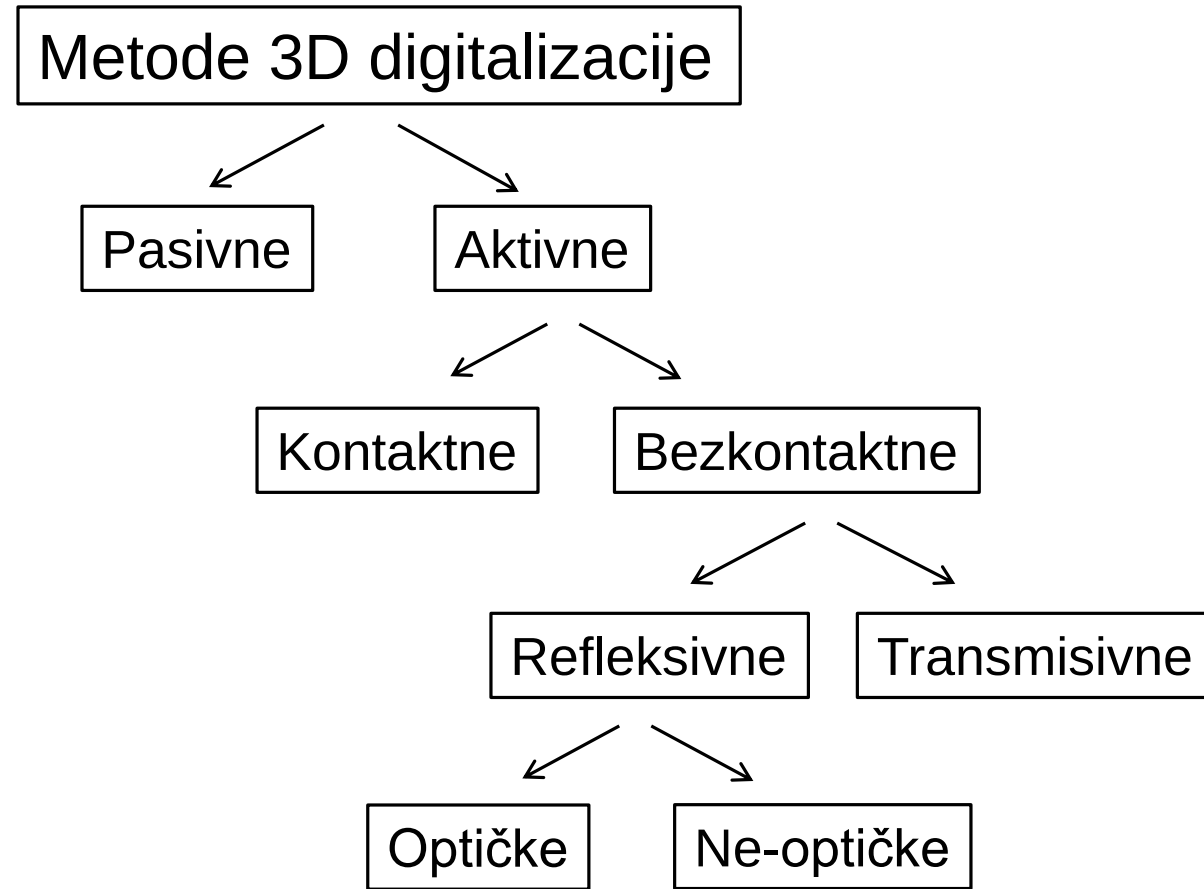
Prva faza procesa reverzibilnog inženjerstva je 3D digitalizacija, u okviru koje se vrši akvizicija podataka u vidu koordinata tačaka sa površina objekta i njihovo prevođenje u digitalni oblik, odakle i potiče termin 3D digitalizacija.

3D digitalizacija, odnosno skeniranje, kako se još naziva, je prva i nezaobilazna faza, koja se smatra ključnom u procesu reverzibilnog inženjerstva, s obzirom da, u najvećem broju slučajeva određuje kvalitet rezultujućeg 3D modela.

Rezultat 3D digitalizacije je skup tačaka, koji se često u literaturi, zbog oblika koji zauzima u prostoru, naziva - ***oblak tačaka***.



Opšta podela metoda 3D digitalizacije



Kontaktna 3D digitalizacija

Kontaktne metode, kao što i sam naziv sugeriše, karakteriše kontakt objekta i merne sonde, koja na svom kraju obično ima merni pipak.

Kontaktne metode 3D digitalizacije

Zglobne merne ruke



Koordinatne merne mašine (KMM)



Kontaktna 3D digitalizacija

Prednosti:

- Visoka tačnost prikupljenih podataka.
- 3D digitalizacija transparentnih i visokorefleksivnih površina.
- Mogućnost 3D digitalizacije pravih uskih i dubokih otvora ili rupa.

Nedostaci:

- Spora akvizicija podataka.
- Nemogućnost 3D digitalizacije deformabilnih i osetljivih površina.
- Prikupljanje samo geometrijskih podataka.

Zglobne merne ruke

Zglobne merne ruke su prenosivi uređaji za koordinatno merenje. Dizajnirane su da vrše precizna merenja pomoću **kontaktne krute merne sonde** (kontaktno merenje) kao i sa optičkim **3D skenerom** (beskontaktno merenje).

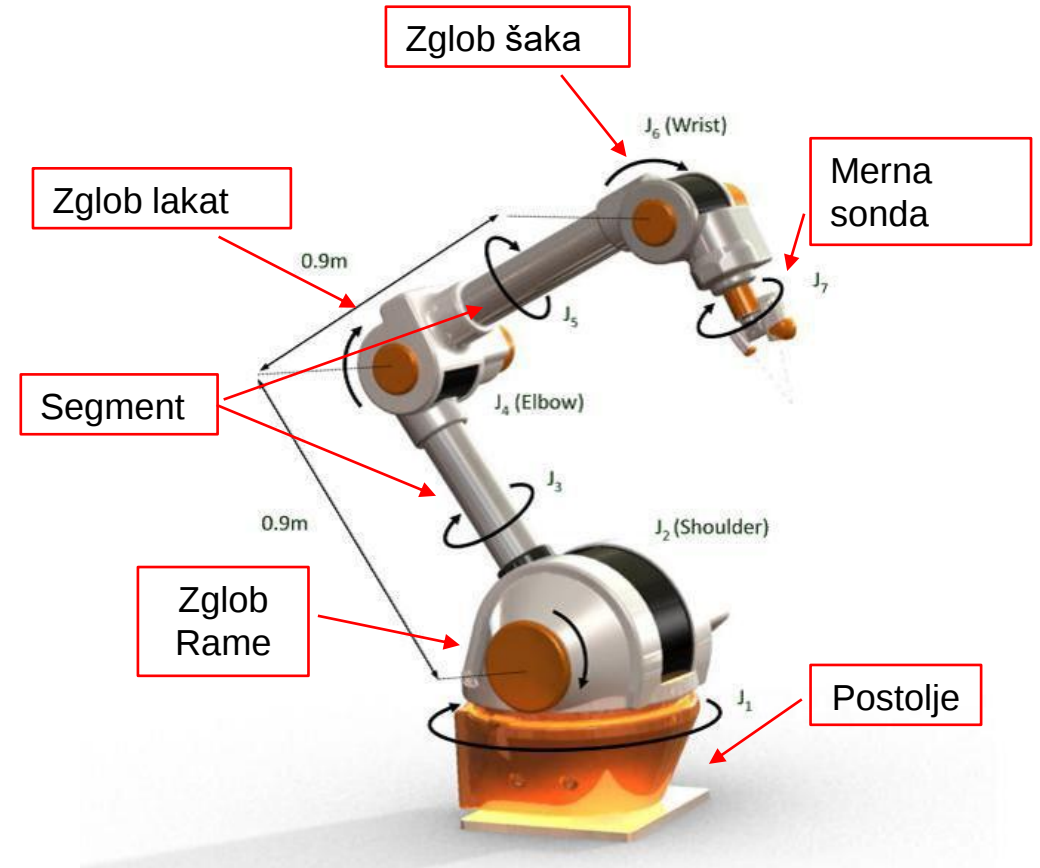
ISO 10360-12 je standard kojim su definisane zglobne merne ruke za kontaktno merenje.



Arhitektura zglobnih mernih ruku

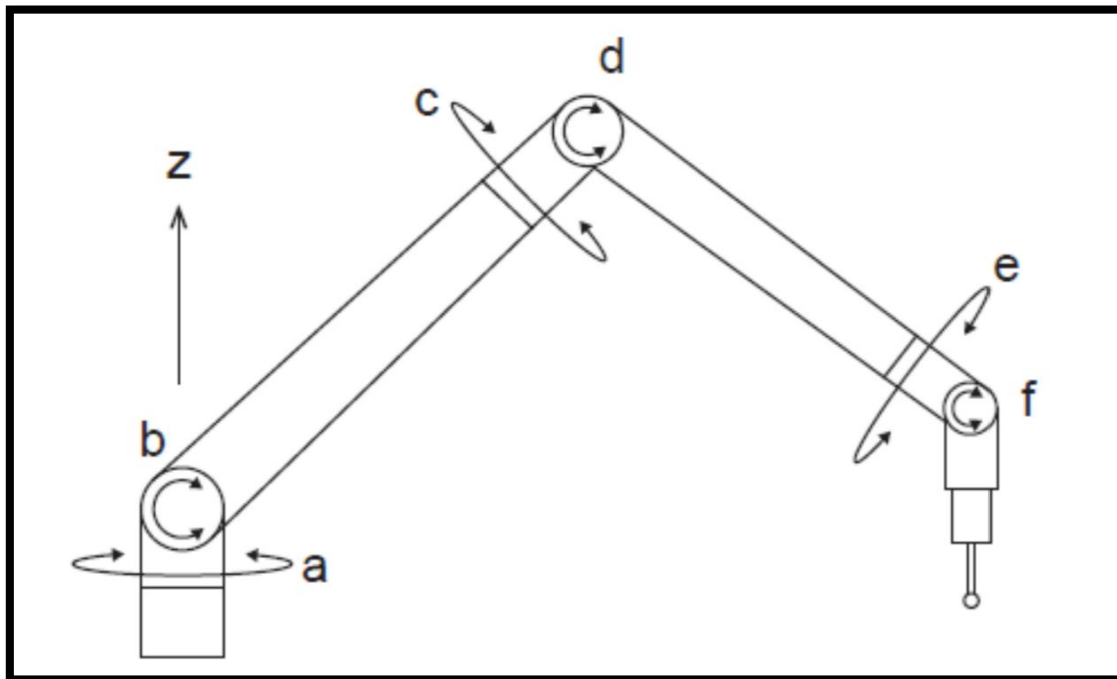
Merne ruke se sastoje od:

- otvorenog lanca **segmenata fiksne dužine**,
- **sistema merne sonde na slobodnom kraju lanca**,
- **zglobnih veza** koje međusobno povezuju segmente, sistem merne sonde i postolje kao i
- **postolja** koje pričvršćuje zglobnu mernu ruku za stacionarno okruženje.



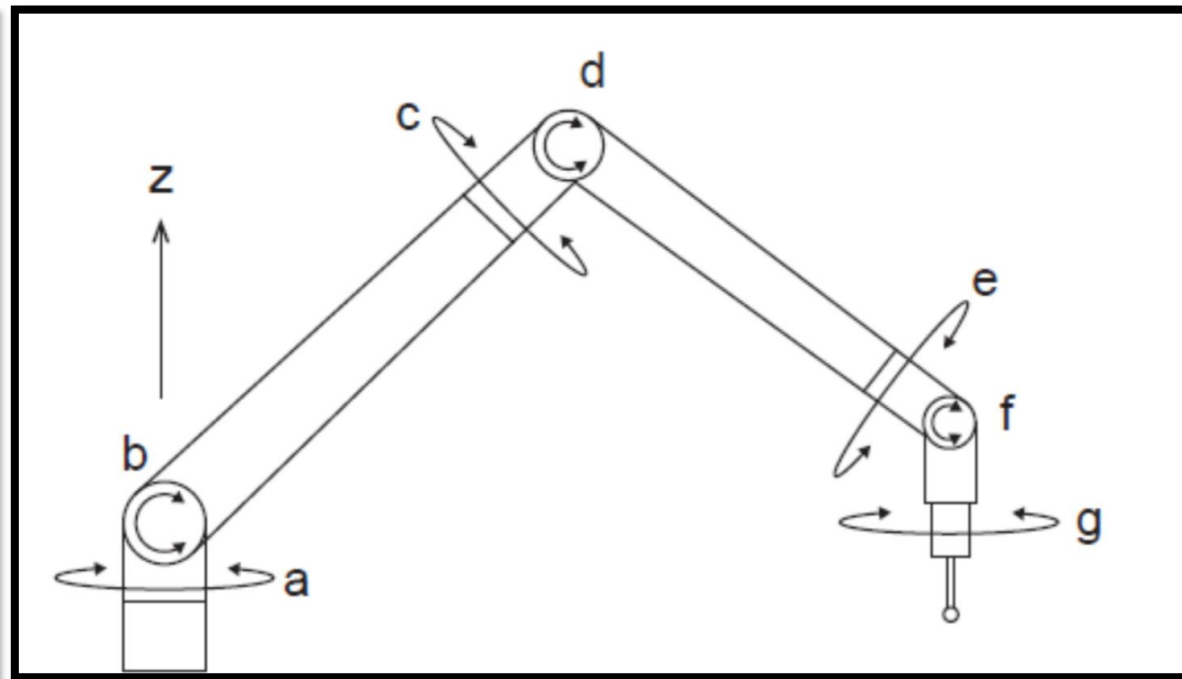
Sanders, R. V. et al. "Characteristics, accuracy and reverification of robotised articulated arm CMMs." (2010).

Arhitektura zglobnih mernih ruku



6 osa

Kontakna merna sonda

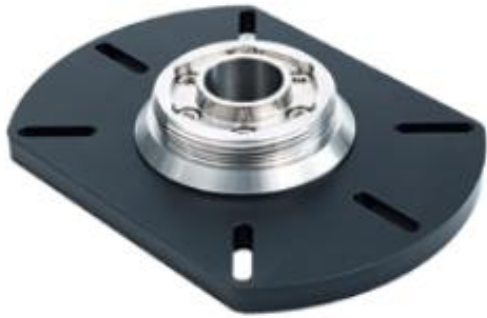


7 osa

Beskontaktni seznorski sistemi

Postolja mernih ruku

- Merne ruke prilikom merenja moraju biti pozicionirane i stegnute za podlogu, stalak ili u krajnjem slučaju za radni predmet ako to dozvoljava.
- **Veza između mernih ruku i podloge mogu biti preko:**



Postolja sa mehaničkim
pričvršćivanjem



Postolja sa magnetima



Postolja sa vakumom

Postolja mernih ruku

Stalci i tripodi su dizajnirani da čvrsto prihvate sve tipove 3D metroloških instrumenata uključujući zglobne merne ruke i na taj način obezbede tačnost 3D digitalizacije. Opremljeni su sa masivnim stubom (fiksni i/ili podešavajući), dok je mobilnost obezbeđena pomoću točkića.

Pokretni stalci



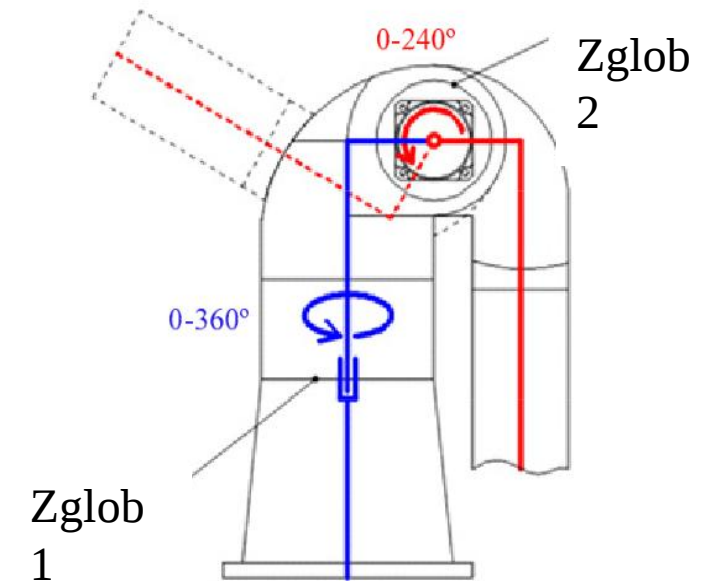
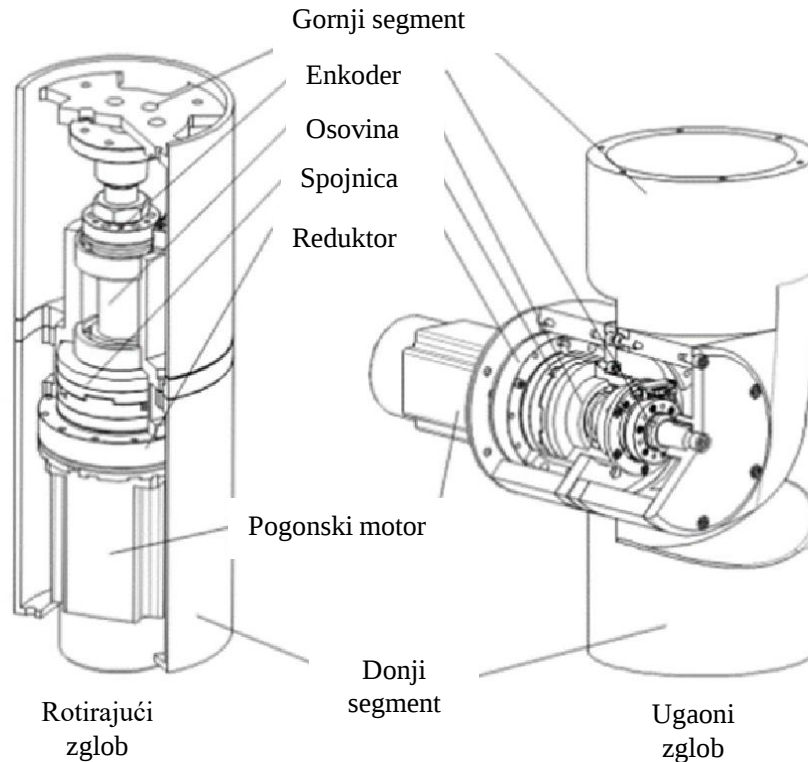
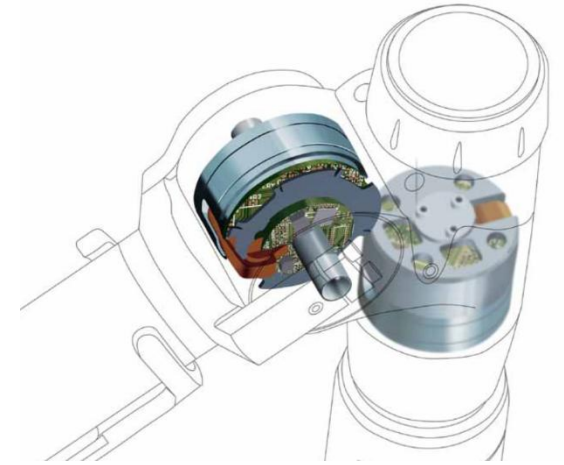
Tripodi



Zglobne veze

U zglobovima su smešteni enkoderi (davači pozicije) koji u realnom vremenu očitavaju i šalju računaru informaciju o položaju zgloba.

Izbor enkodera i njihova rezolucija je važan kriterijum za konačnu tačnost merne ruke.



Merna zapremina (prostor 3D digitalizacije)

Zglobne merne ruke se mogu značajno razlikovati u pogledu merne zapremine u okviru koju mogu da realizuju 3D digitalizaciju.

Veličina merne zapremine je u direktnoj zavisnosti od broja i dužine segmenata.

Na tržištu su danas dostupne zglobne merne ruke koje karakterišu merne zapremine prečnika od 1 m do 9 m.



Merna zapremina (prostor 3D digitalizacije)

Veličina merne zapremine zglobne merne ruke je 3D prostor oblika sfere u kojem je datim mernim senzorom moguće realizovati 3D digitalizaciju.

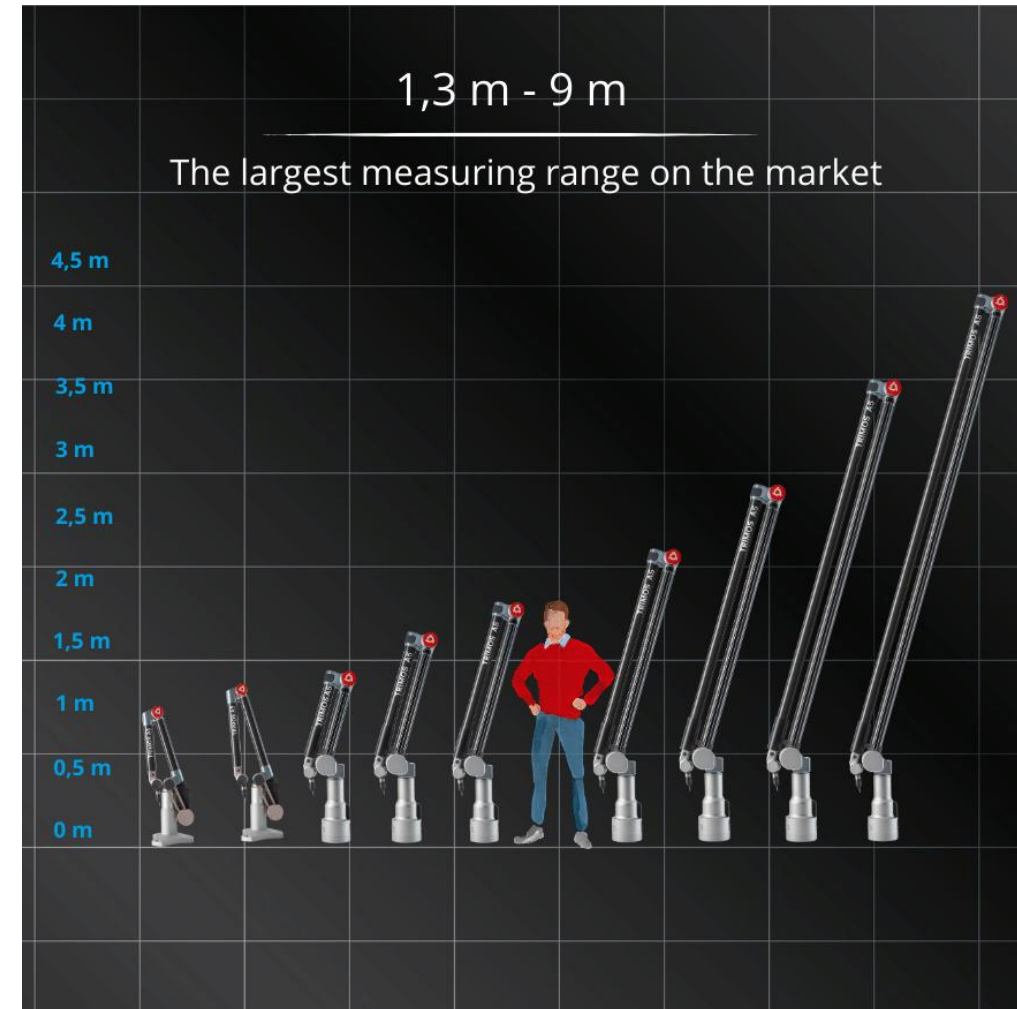
Merna zapremina se kod ovih sistema često naziva i **iskoristivom mernom zapreminom** da bi se napravila razlika u odnosu na veličinu koja se naziva **maximalni doseg** zglobne merne ruke, a koja je oko 10 do 15 % veća od prečnika iskoristive merne zapremine.



Merna zapremina (prostor 3D digitalizacije)

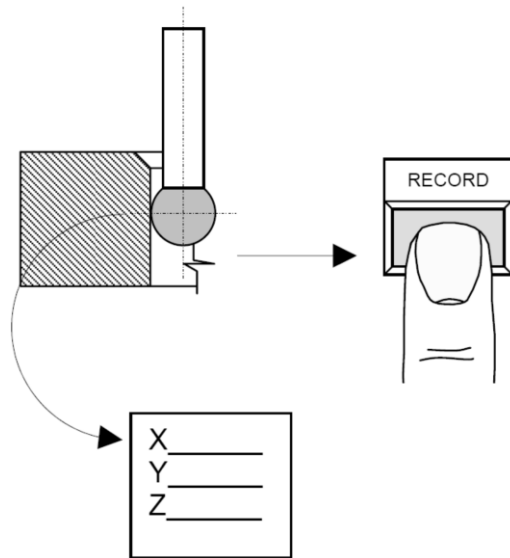
Tačnost je obično obrnuto proporcionalna veličini merne zapremine zglobne merne ruke – manja merna zapremina implicira veću mernu tačnost.

Razlog za ovo su bolje kinematske karakteristike kraćih segmenata.



Akvizicija podataka (kurta merna sonda)

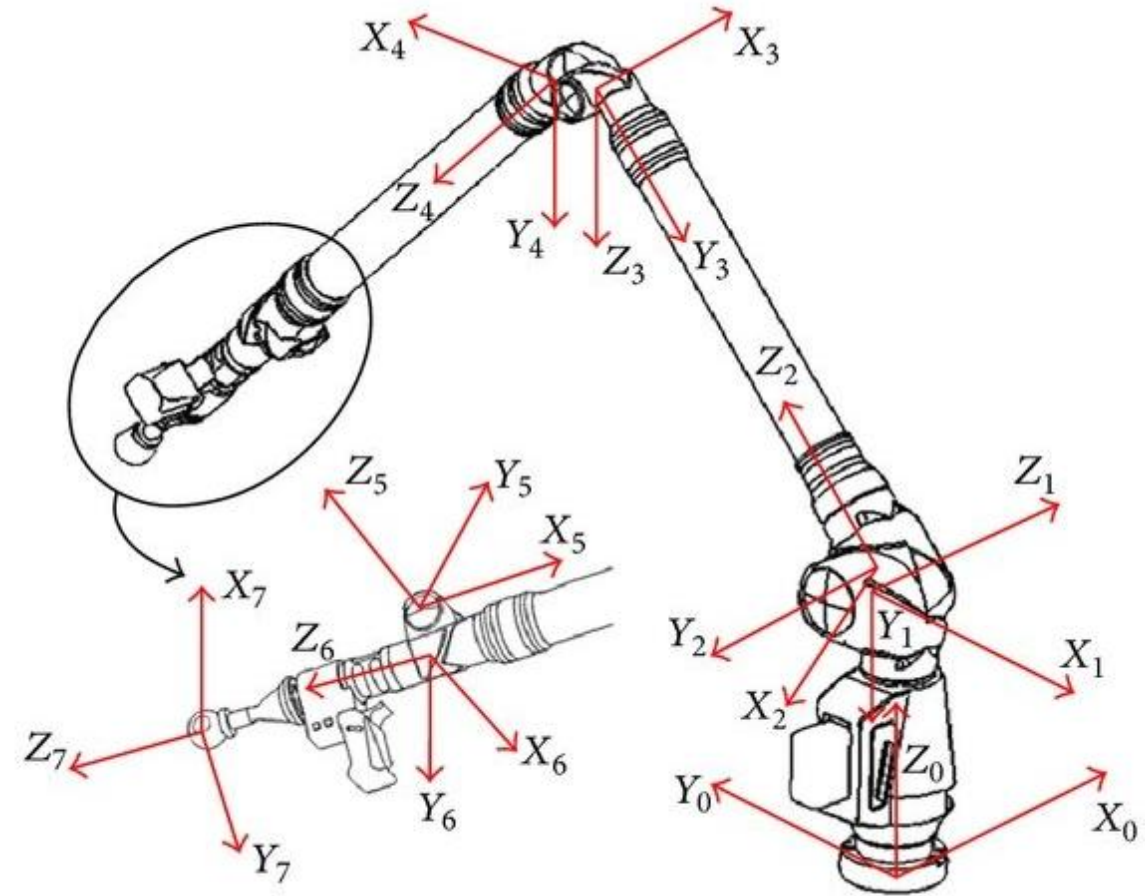
Akvizicija tačaka počinje tako što se sferni ili konusni merni pipak ručno dovodi u fizički kontakt sa površinom koja se digitalizuje, a zatim pritiskom na taster snima koordinata vrha mernog pipka ili centar sfere ukoliko se radi o sferičnom mernom pipku.



Akvizicija podataka (kurta merna sonda)

Princip merenja je zasnovan na **Denavit Hartenbergovom** metodi direktne kinematike.

Pozicija vrha mernog pipka određuje se preko (opto-elektronskih) senzora položaja koji se nalaze u zglobovima i koji daju informaciju o uglovima zakretanja segmenata, kao i na osnovu poznatih dužina segmenata.



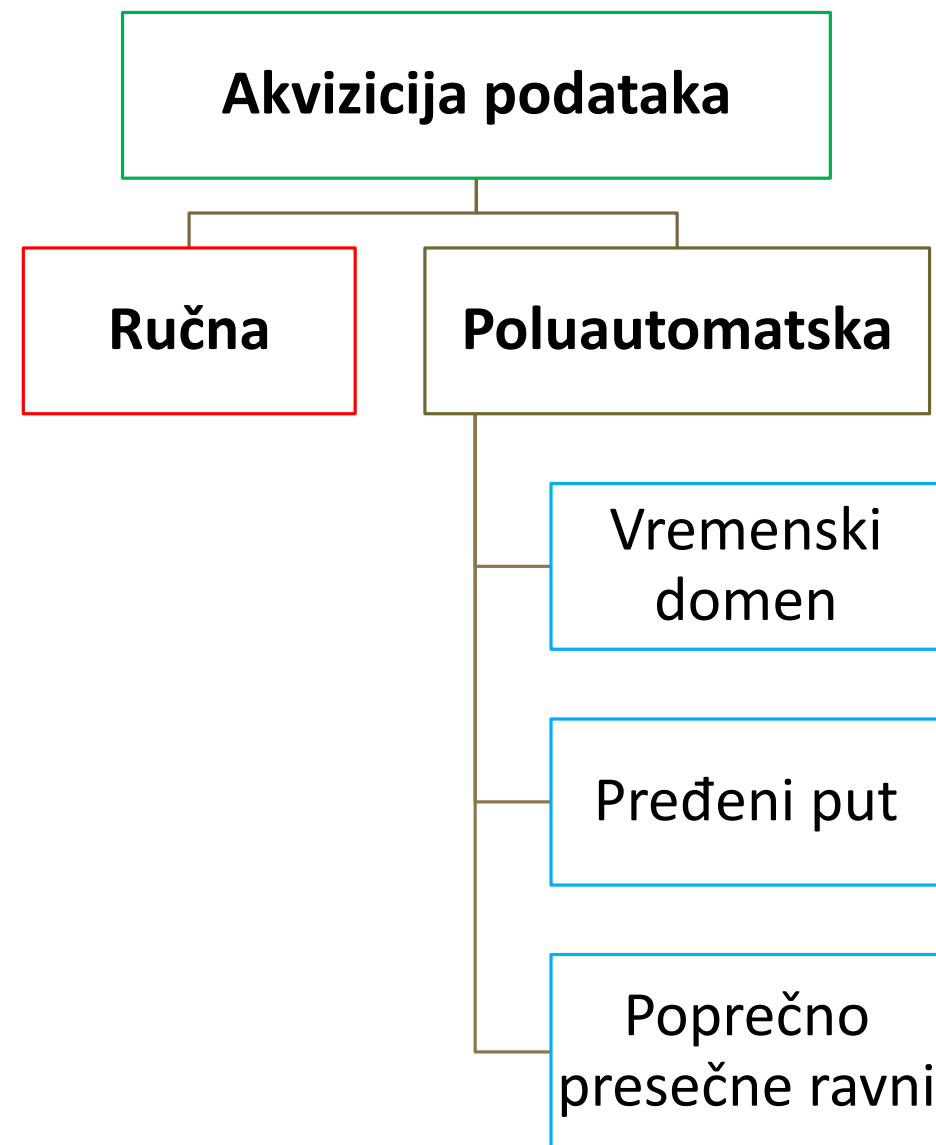
Akvizicija podataka (kruta merna sonda)

Akvizicija podataka može biti:

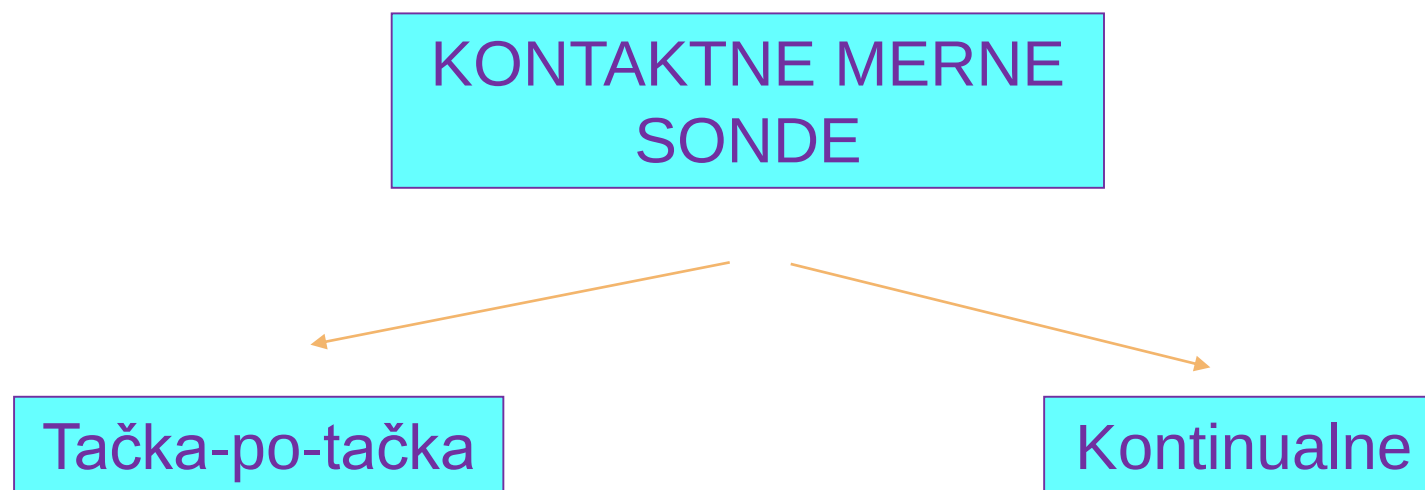
1) Ručna - operater pritiskom na taster (ili papučicu) daje signal softverskoj podršci da memoriše koordinate trenutne pozicije vrha mernog pipka.

2) poluautomatska - na osnovu manuelno zadatog signala, softverska podrška automatski prikuplja podatke u različitim režimima.

Režimi mogu biti definisani vremenskim domenom, pređenim putem ili pomoću predefinisanim poprečno presečnim ravnima, u skladu sa koordinatnim sistemom i rezolucijom.



Kontaktne merne sonde kod Koordinatnih mernih mašina



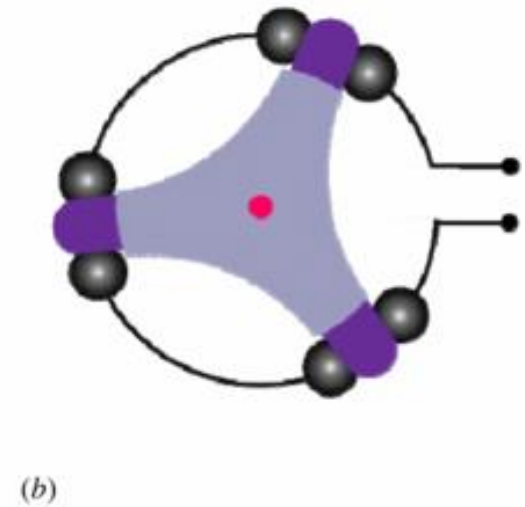
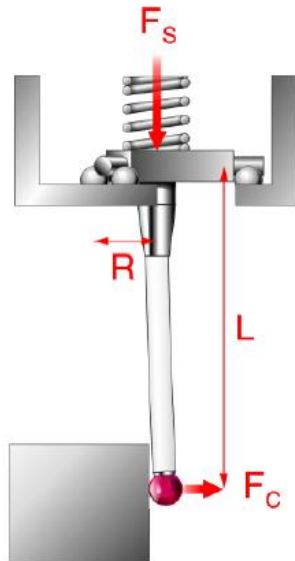
„Tačka-po-tačka“ merne sonde se nazivaju i „okidačke“ (eng. trigger probes) zato što generišu električni signal kada dođu u fizički kontakt sa mernim predmetom. Ovaj signal se koristi za zaustavljanje svih kretanja mašine i snimanje koordinata centra pipka od strane mernog sistema KMM.

Kontinualne merne sonde omogućavaju skeniranje površine i kontinualnu akviziciju tačaka.

Elektro mehanička “tačka po tačka” kontaktna merna sonda

Ova vrsta merne sonde spada u najjednostavnije.

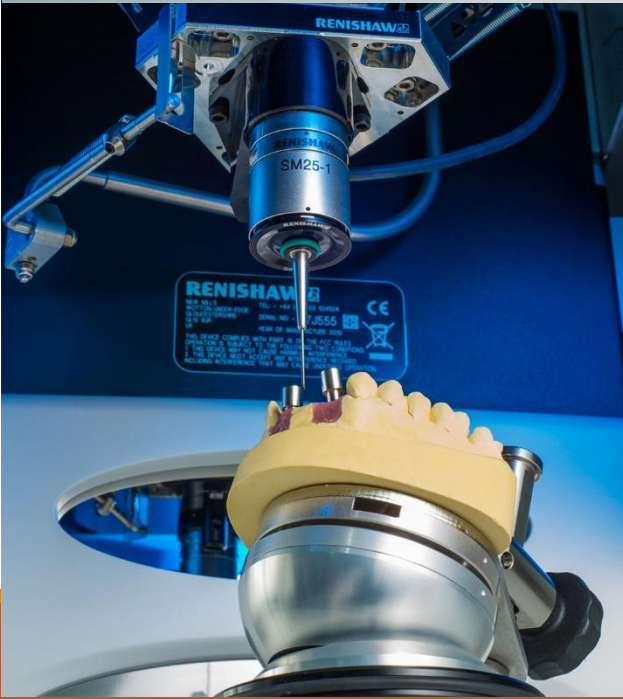
Osnovna funkcija ove merne sonde je uspostavljanje ili prekidanje elektromotorne sile u odgovarajućem strujnom kolu u trenutku dodira mernog pipka sa mernim predmetom, čak i pri silama dodira manjim od 0,01 N.





How a touch-trigger probe works

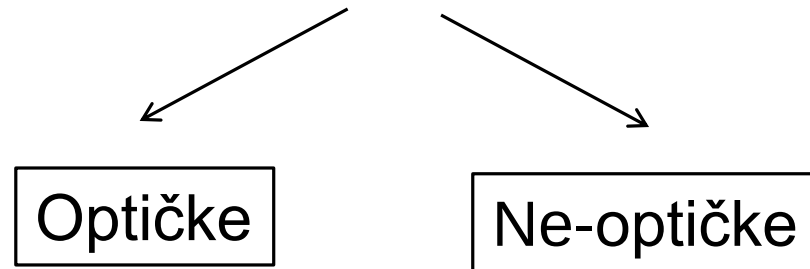
RENISHAW 



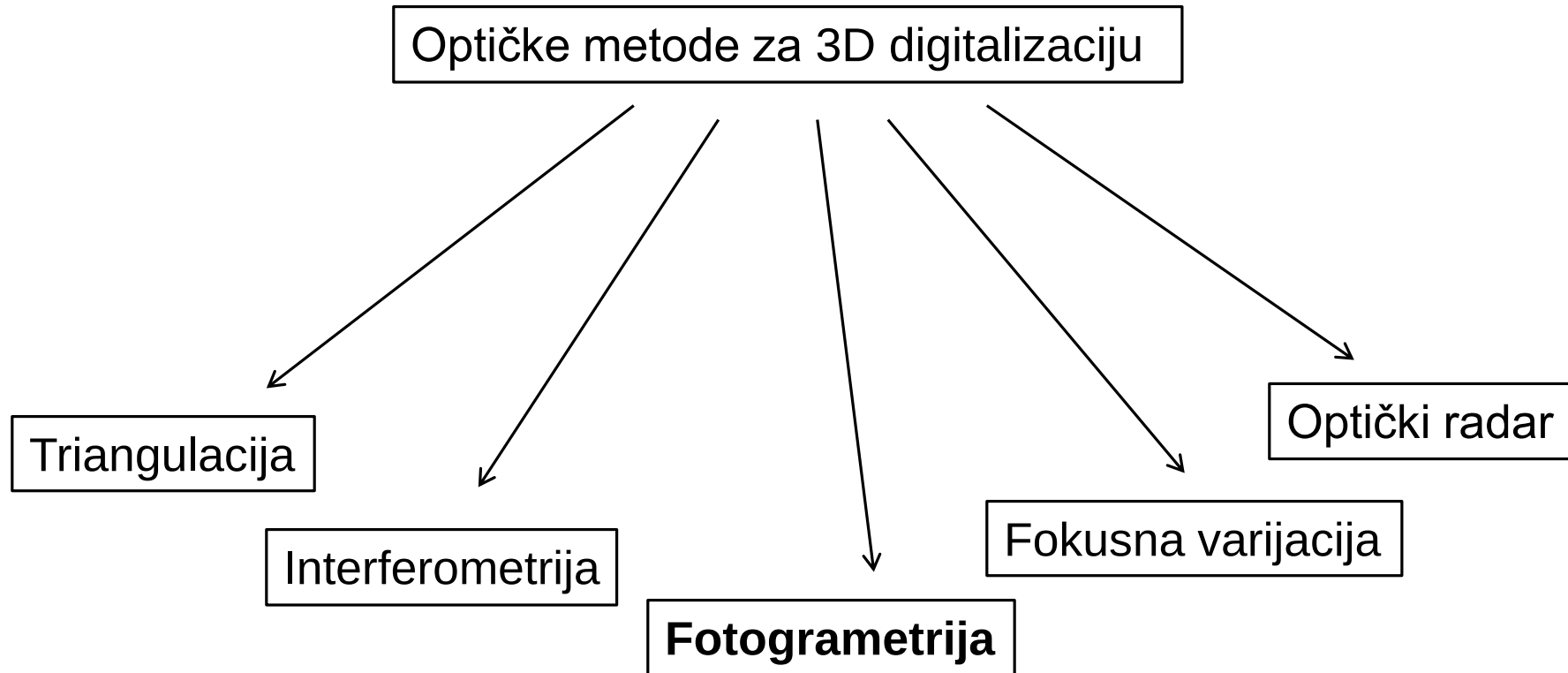


“Procera Forte”

Refleksivne metode za 3D digitalizaciju



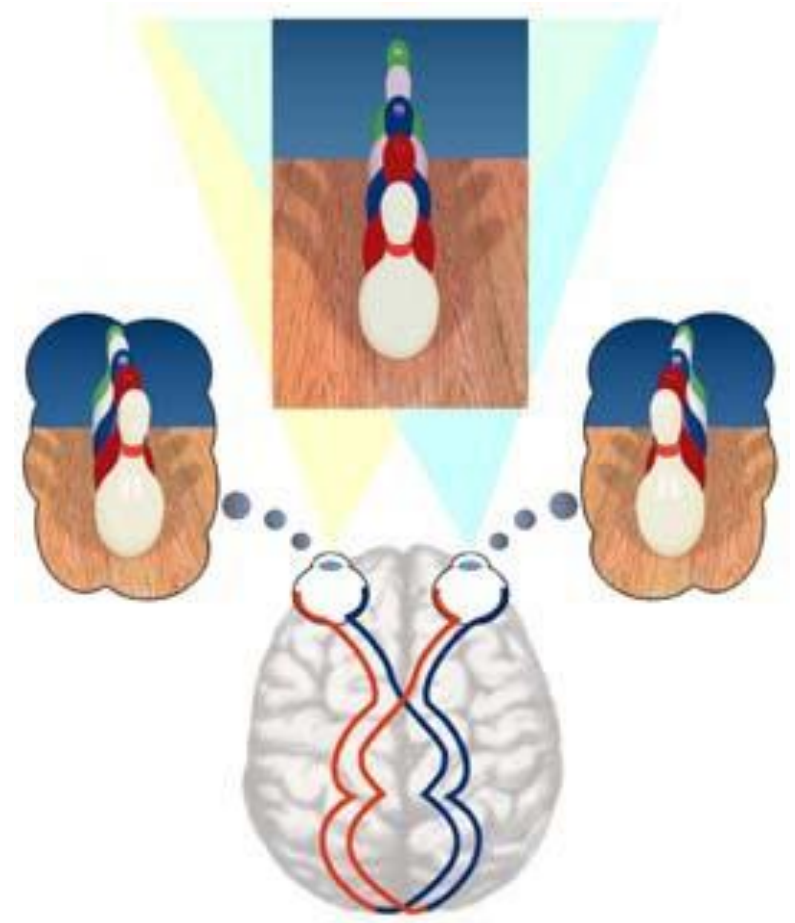
Princip: Projektovanje signala određene vrste na predmet 3D digitalizacije i detektovanje reflektovane informacije sa tog predmeta.



Fotogrametrija

Stereovizijski princip:

Projektovanje dve slike istog objekta, snimljene pod različitim uglovima, omogućuje stvaranje efekta treće dimenzije, tj. dubine.



Šta kamere mere?

- Kamere snimaju 2D slike koje se sastoje od piksela („elementi slike“).
- Kamere mere intenzitet svetlosti za svaki piksel.
- Svaka pozicija na slici (=piksel) odgovara određenom pravcu svetlosti u 3D svetu.

Svaki piksel na senzoru meri količinu svetlost koja dolazi iz određenog pravca.

Kamere za snimanje fotografija

Analogne kamere



<https://filmadvance.com/2011/09/favorite-cameras-olympus-om-10/>

Digitalne kamere



<https://nymag.com/strategist/article/best-digital-cameras-beginners-under-usd1000.html>

DSLR kamere



<https://www.laptopplaza.rs/digitalne-kamere-sr/dslr-kamere-sr/nikon-d7500-dslr-camera-with-18-140mm-lens-sr.html>

Mirror less kamere

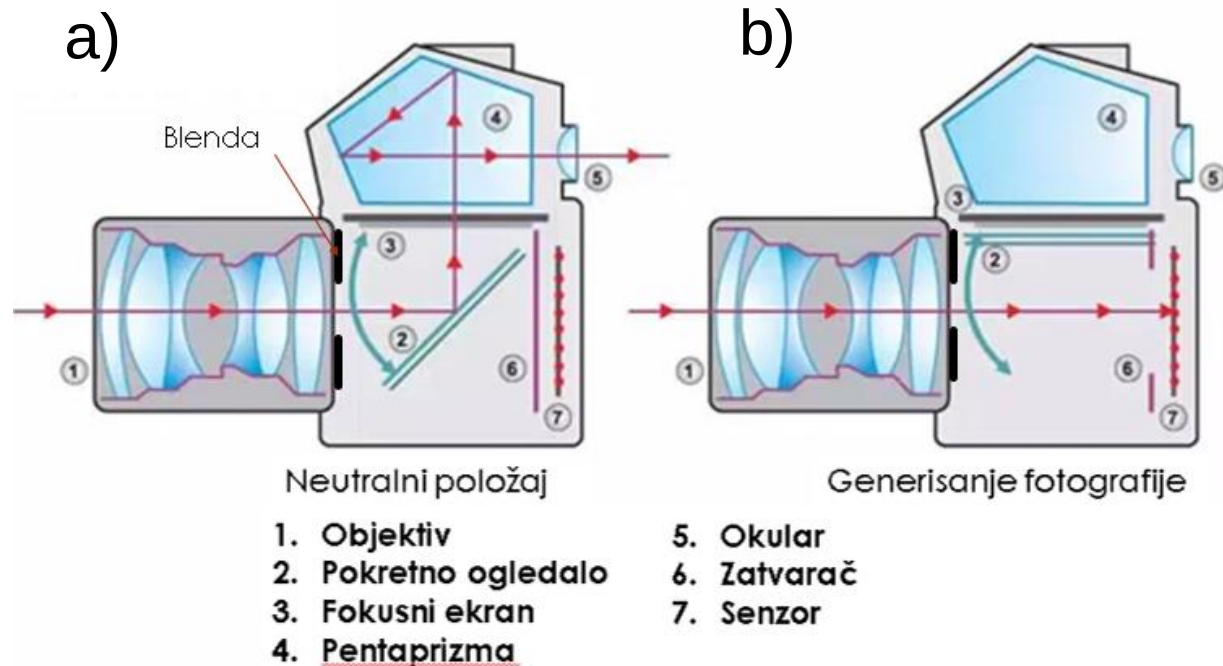


<https://www.filmtools.com/canon-eos-r5-mirrorless-digital-8k-camera.html>

Osnovni delovi Digital Single Lens Reflex kamere

Digitalna kamera je složen uređaj za generisanje digitalnih fotografija. **Princip rada DSLR kamere je sledeći:**

Kamera u položaju a) Svetlosni zrak prolazi kroz sistem sočiva (objektiv) 1. odbija se od pokretnog ogledala 2 i preko fokusnog ekrana 3 ulazi u pentaprizmu 4 i izlazi kroz okular 5. Na ovaj način operater vidi scenu koja će se fotografisati. U trenutku nastanka fotografije b) pokretno ogledalo 2 se podiže na gore, zatim dolazi do otvaranja zatvarača 6 i eksponiranja senzora 7 svetlosnim zracima.



U zavisnosti od intenziteta i talasne dužine svetlosti, senzor generiše napon na svakom svom elementarnom delu „pikselu“ stvarajući digitalni zapis koji se reprezentuje kao digitalna fotografija.

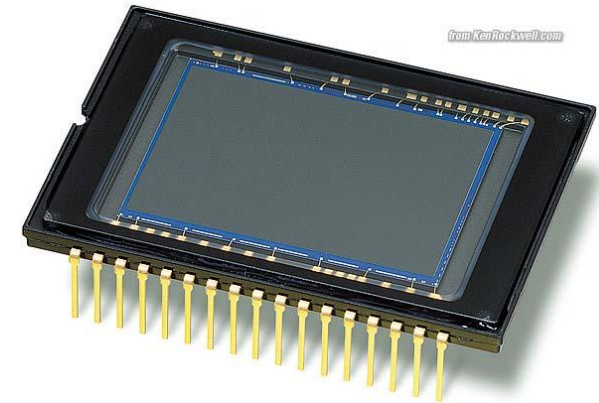
Senzori slike

Senzori u kamerama imaju ulogu pretvaranja svetlosnih informacija u električne signale koji se dalje obrađuju u cilju formiranja slike.

Srž svake kamere je senzor, i tip senzora koji se nalazi u fotoaparatu direktno utiče na kvalitet slike, stoga je neophodno opredeliti se za adekvatnu tehnologiju pre upuštanja u projekat.

U primeni su više vrste senzora:

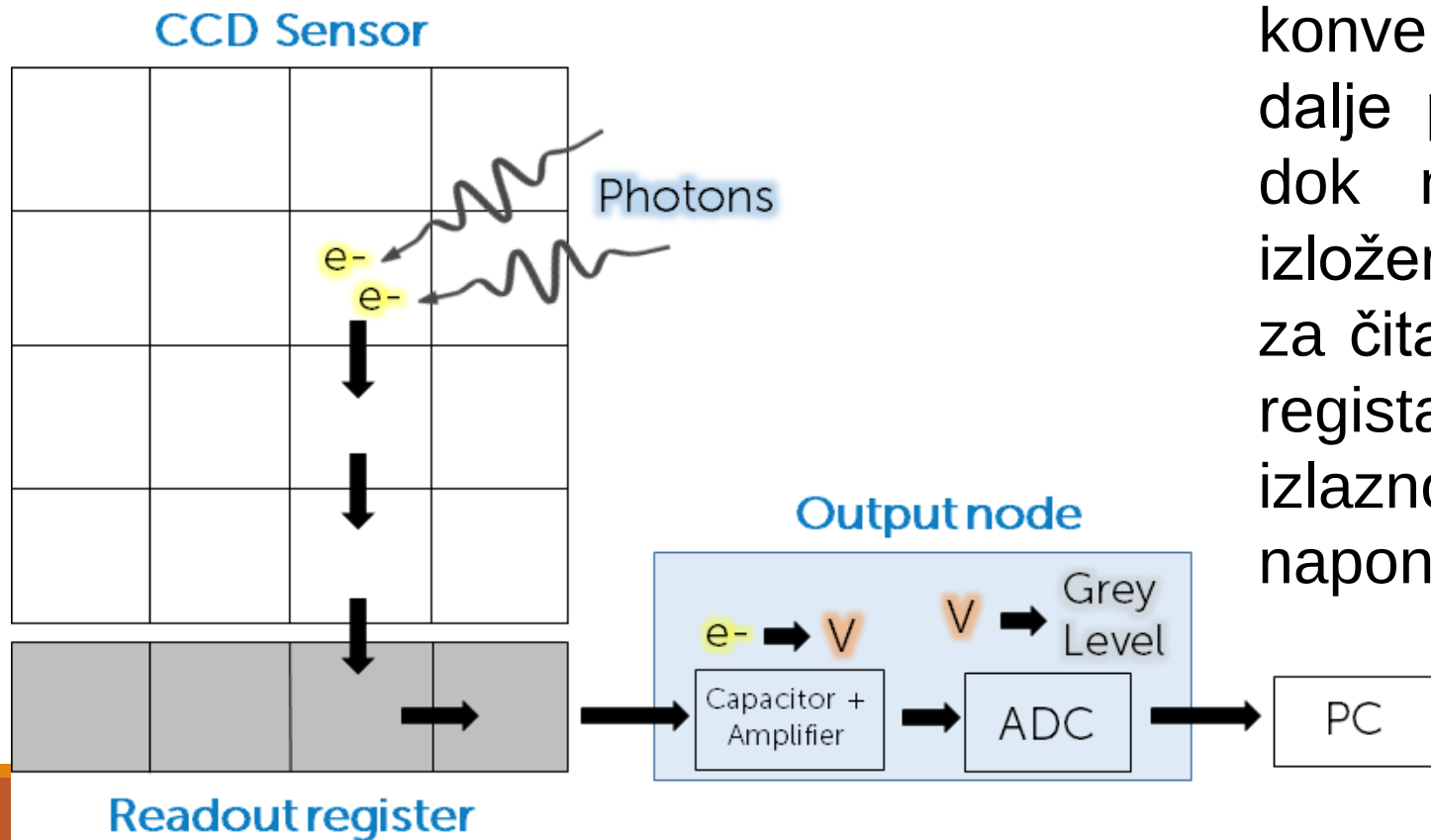
- **CCD**
- **EMCCD**
- **CMOS**
- **sCMOS**



CCD Senzori slike

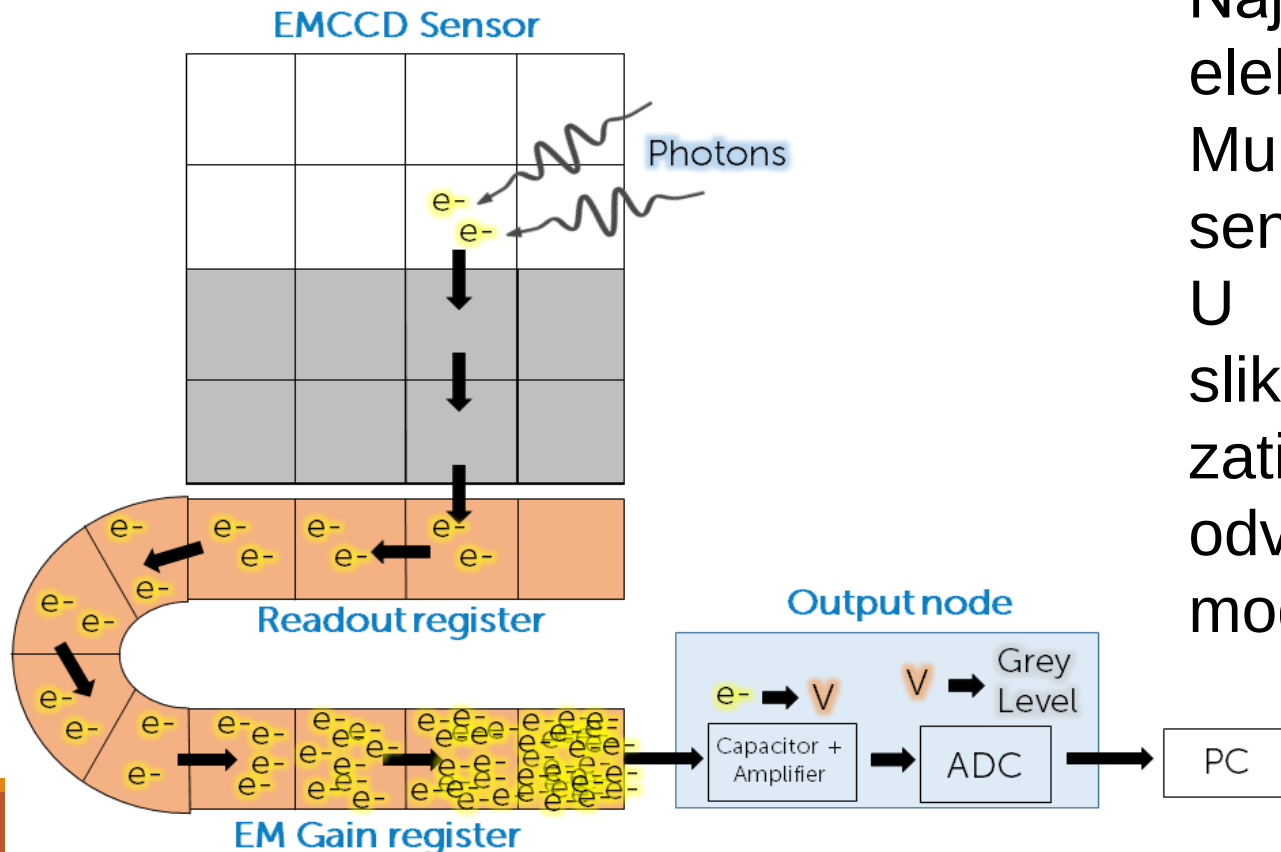
CCD ([engl. Charge Coupled Device](#)) je elektronski uređaj na čijoj se površini nalaze milioni fotosenzitivnih [dioda](#), poređanih u redove i kolone (poput [piksela](#) na monitoru računara).

Nakon izlaganja svetlu *CCD* senzor vrši konverziju fotona u fotoelektrone, koji se dalje pomeraju red po red na senzoru, dok ne stignu do oblasti koja nije izložena svetlosti, i ovo se naziva registar za čitanje. Kada se elektroni premeste u registar, pomeraju se **jedan po jedan** do izlaznog čvora, gde se pojačavaju u čitljiv napon i konvertuju u nivo sive boje.



EMCCD Senzori slike

Ova tehnologija pojavila se 2000. godine i pružala je brži i osjetljiviji senzor, pa je bilo moguće fotografisanje i u slabo osvetljenim prostorima. Kamere koje koriste ovu tehnologiju imaju pozadinsko osvetljenje što povećava kvantnu efikasnost i imaju veće piksele.

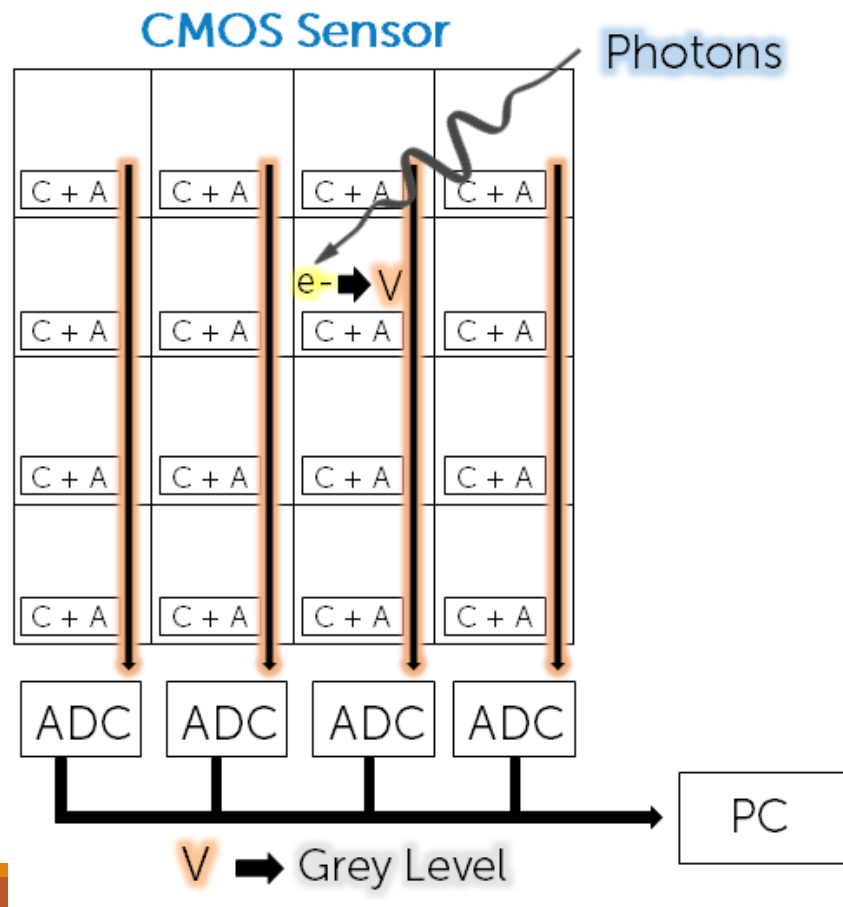


Najznačajnija inovacija jeste množenje elektrona (EM – eng. Electron Multiplication), koja omogućava CCD senzorima da povećaju signal malih fotona. U ovom slučaju, elektroni prelaze iz slikovne matrice u maskiranu matricu, a zatim u registar za čitanje. EM proces se odvija korak po korak, što znači da korisnici mogu izabrati vrednost množenja signala.

CMOS Senzori slike

CMOS - Tehnologija komplementarnog metal-oksid-poluprovodnika je starija tehnologija koja je kasnije uvedena u oblast razvoja senzora slike.

Frank Vanlas patentirao je CMOS 1963. godine.

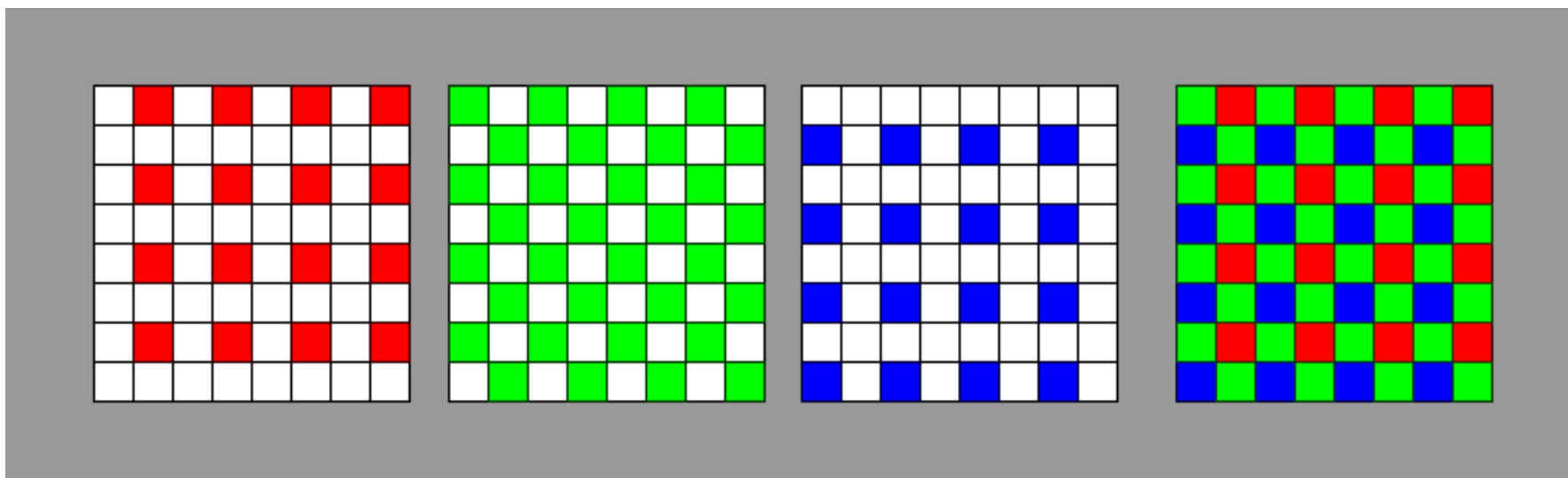


Za razliku od prethodnih tehnologija, ovde se koristi paralelizacija, što znači da senzori rade paralelno i omogućavaju velike brzine zapisa. Svaki piksel na senzoru poseduje minijaturnu elektroniku, tj. kondenzator i pojačavač.

Rezultat ove inovacije jeste mogućnost pretvaranja fotona u elektron unutar samog piksela, a potom i konverzije u čitljiv napon.

Senzori slike

- Da bi fotoapararat mogao da razlikuje boje, senzori se pokrivaju filterima različite boje – RGB (crvena, zelena, plava) ili CMY (cijan, magenta, žuta).
- Svaka fotodioda prikuplja informaciju o jednoj boji, a ostale boje se izračunavaju na osnovu vrednosti susednih piksela.
- Zbog toga se gubi na oštadini slike.



Senzori slike

- **Bayer-ov pattern (šablon)**

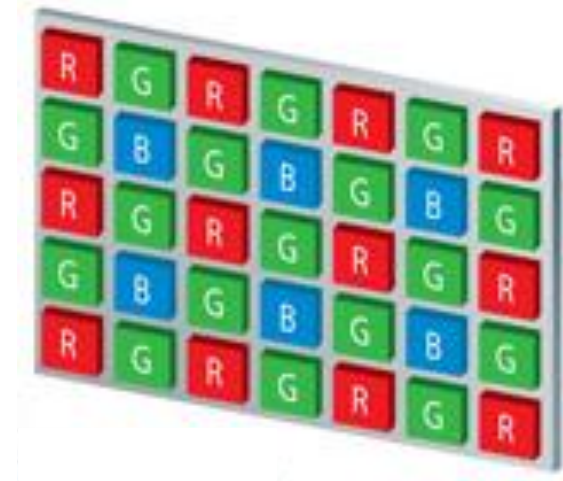
Dvostruko više zelenih filtera (u odnosu na crvene i plave) daje oštriju sliku.

50% zelena

25% plava

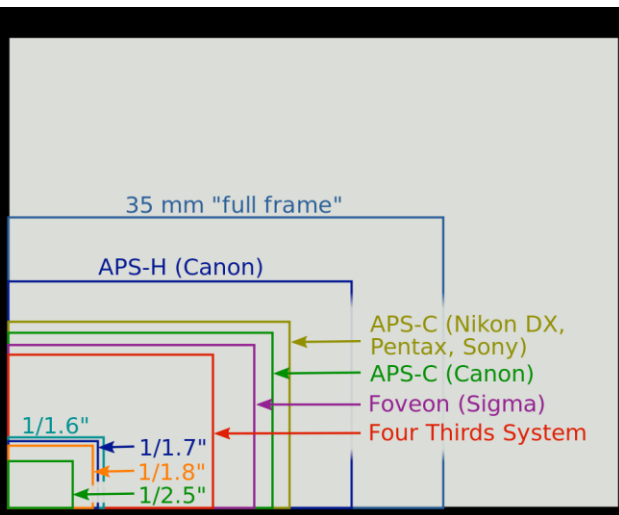
25% crvena

Ljudski vizuelni sistem je veoma osetljiv na visokofrekventne detalje u osvetljenosti.



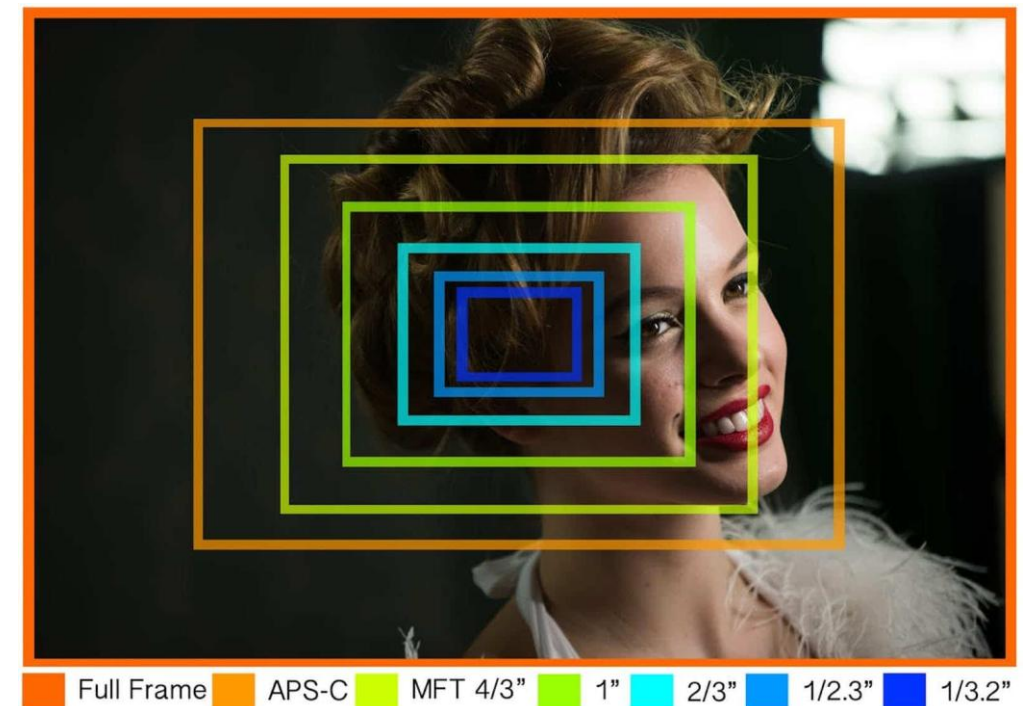
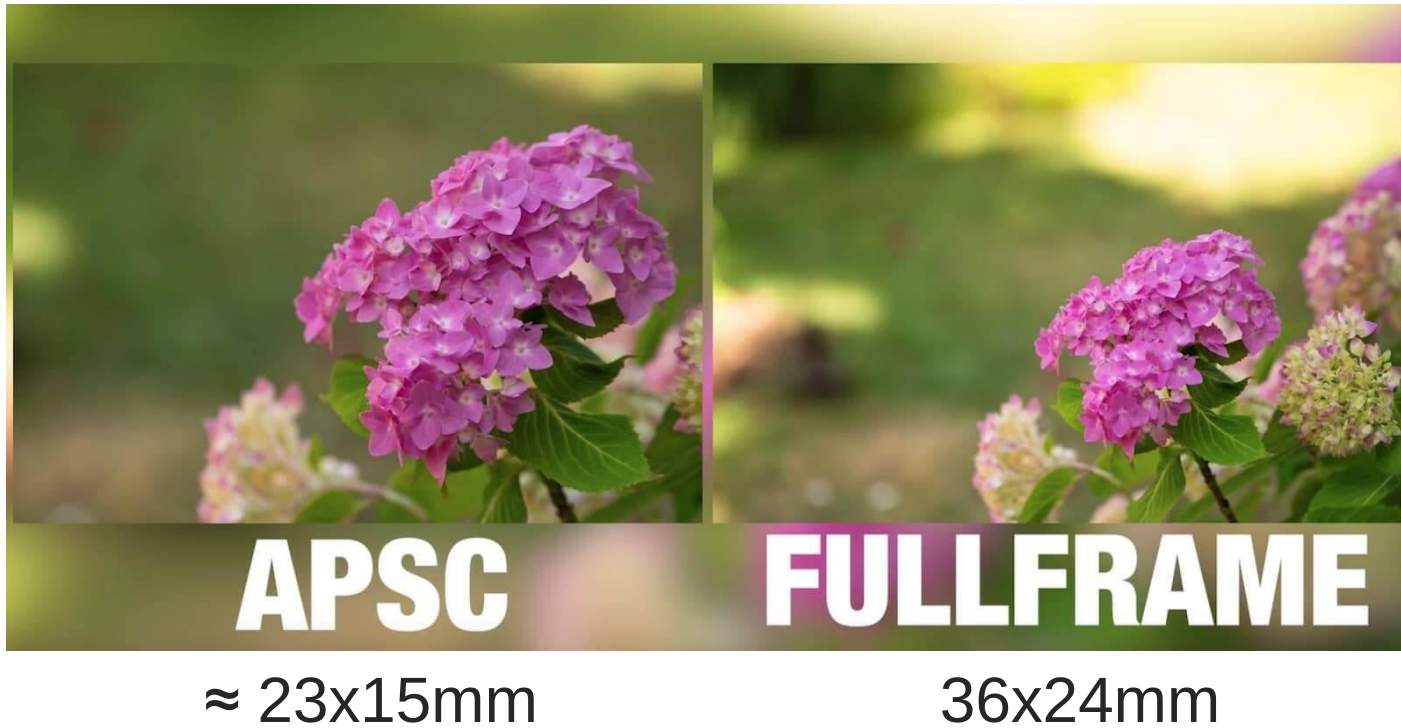
Veličina senzora slike

Veličina senzora je ključna za kvalitet slike u digitalnim kamerama jer direktno utiče na svetlosnu osetljivost, šum, dubinsku oštrinu, dinamički opseg i sposobnost za precizno snimanje detalja. Što je senzor veći, to je veća mogućnost za stvaranje visokokvalitetnih slika, naročito u uslovima slabog osvetljenja.



- Full-frame** (35mm senzor) – Najveći senzor koji se koristi u većini profesionalnih DSLR i mirrorless kamera. Pruža najlepše rezultate u svim aspektima kvaliteta slike, ali je skuplji.
- APS-C** – Manji senzor, prisutan u većini srednje klase DSLR i mirrorless kamera. Nudi odličan balans između cene i kvaliteta, ali sa nešto većim šumom pri slabom svetlu.
- Micro Four Thirds** – Još manji senzor, koji se koristi u manjim kamerama. Dobri su za kompaktnost i dug životni vek baterije, ali ima ograničenu svetlosnu osetljivost i manji dinamički opseg.

Veličina senzora slike



Brzina zatvarača (SHUTTER SPEED)

1/300

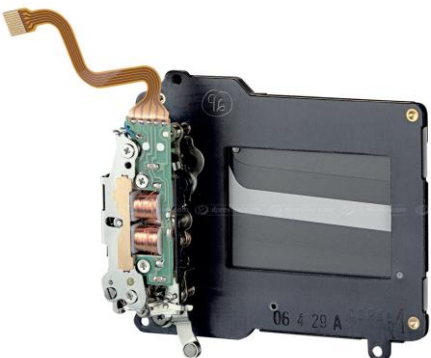
1/15



Brzina zatvarača definiše koliko dugo će senzor biti izložen svetlosti koja je prošla kroz objektiv i blendu. Ako se podesi velika vrednost izlaganja senzora svetlosti „spori zatvarač“ (zatvarač ostaje dugo otvoren) i ukoliko dođe do relativnog pomeranja kamere u odnosu na scenu fotografija koja će se snimiti biće zamućena.

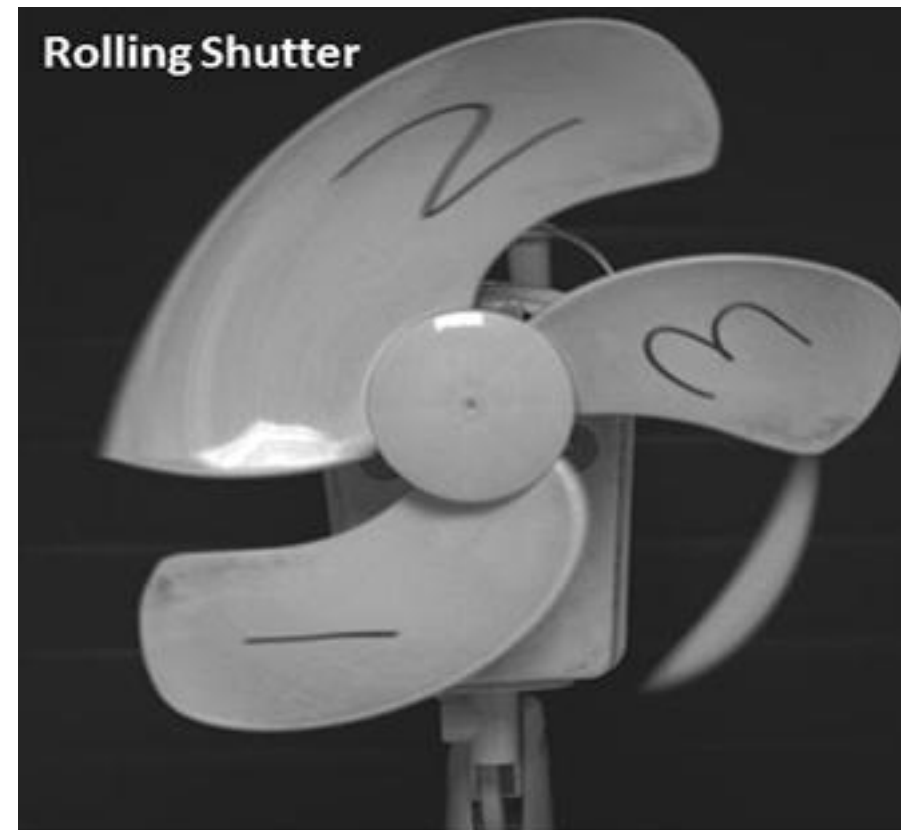
		
1/500	1/250	1/125
		
1/60	1/30	1/15
		
1/8	1/4	1/2

Takođe sa veoma kratkom vremenom izlaganja senzora svetlosti „brzi zatvarač“ moguće je snimiti veoma kvalitetno pokretne objekte pri dovoljnoj količini svetlosti.



Kotrljajući zatvarač (Rolling shutter)

- Zatvarač se “kotrlja” (pomera) preko površine senzora koji se izlaže svetlosti
- Pikseli u istoj liniji slike se snimaju u isto vreme
- Proizvodi izobličenja u slučaju brzog kretanja objekata ili kamere
- Često se nalazi u CMOS kamerama

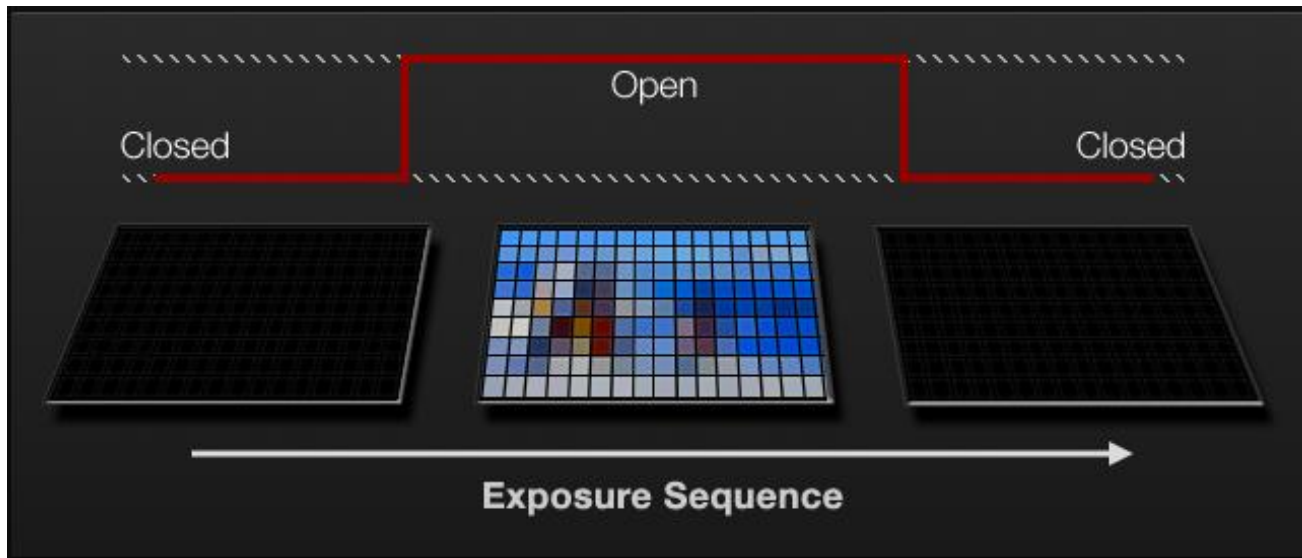


Rolling shutter effect



Globalni zatvarač (Global shutter)

- Cela slika se snima u isto vreme
- Bez izobličenja slike
- Poželjno za geometrijske rekonstrukcije
- Skuplji za proizvodnju



【Global Shutter】



【Rolling Shutter】



Blenda (APARTURE)

Blenda je otvor koji može da menja svoj prečnik, ali kada se jednom podesi treba da ostane konstantan tokom snimanja fotografija. Blenda definiše koliko će svetlosti koja prolazi kroz objektiv stići do senzora. Otvor blende obeležava se F brojem. Što je F broj veći otvor blende je manji i obrnuto. Veliki otvor blende implicira svetlijoj fotografiji i obrnuto.

Sa manjim otvorom blende prilikom fotografisanja oštarih ivica na predmetu može da se javi efekat difrakcije.



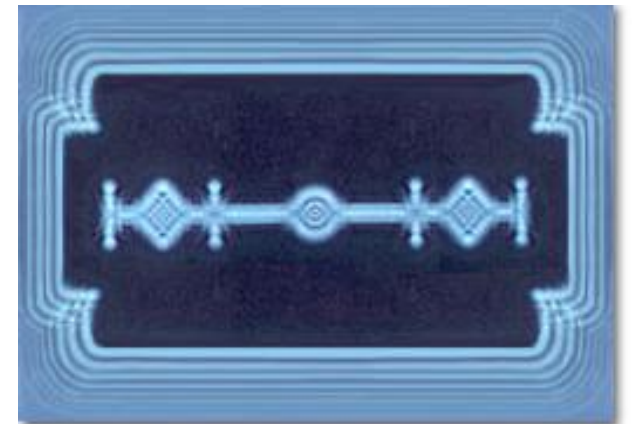
VELIK OTVOR BLENDE
(ulazi mnogo svetlosti)
 $f/2$



SREDNJI OTVOR BLENDE
(srednja količina svetlosti)
 $f/8$



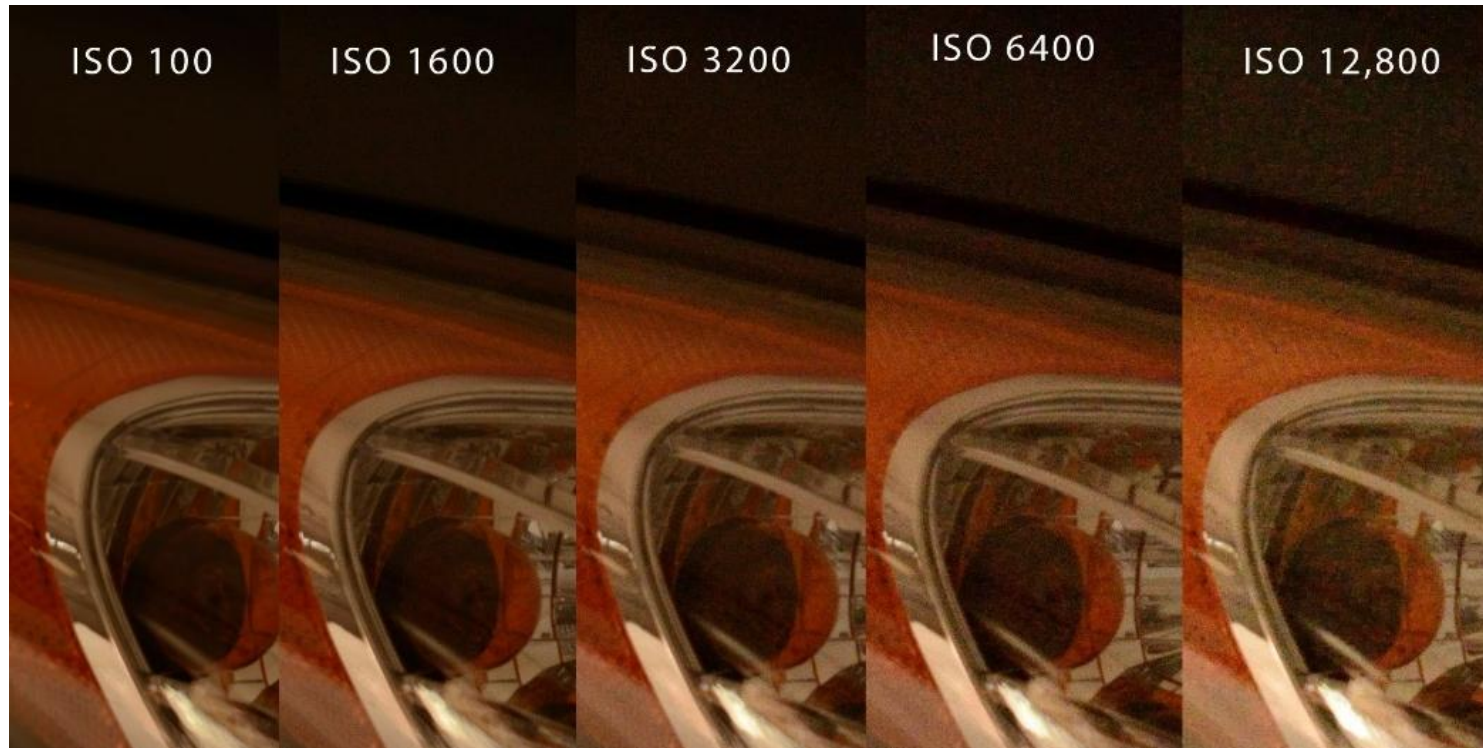
MALI OTVOR BLENDE
(ulazi malo svetlosti)
 $f/22$



Efekat difrakcije

ISO osetljivost

ISO osetljivost je standardizovana vrednost čijim se podešavanjem određuje osvetljenost fotografija. **ISO osetljivost predstavlja osetljivost senzora na svetlost.** Uz istu brzinu zatvarača i otvor blende, ali s povećanom ISO osetljivošću, dobija se svetlija fotografija i obrnuto. Povećanjem ISO osetljivosti dolazi do jedne neželjene pratne pojave, a to je nastanak elektronskog šuma koji narušava kvalitet fotografije.



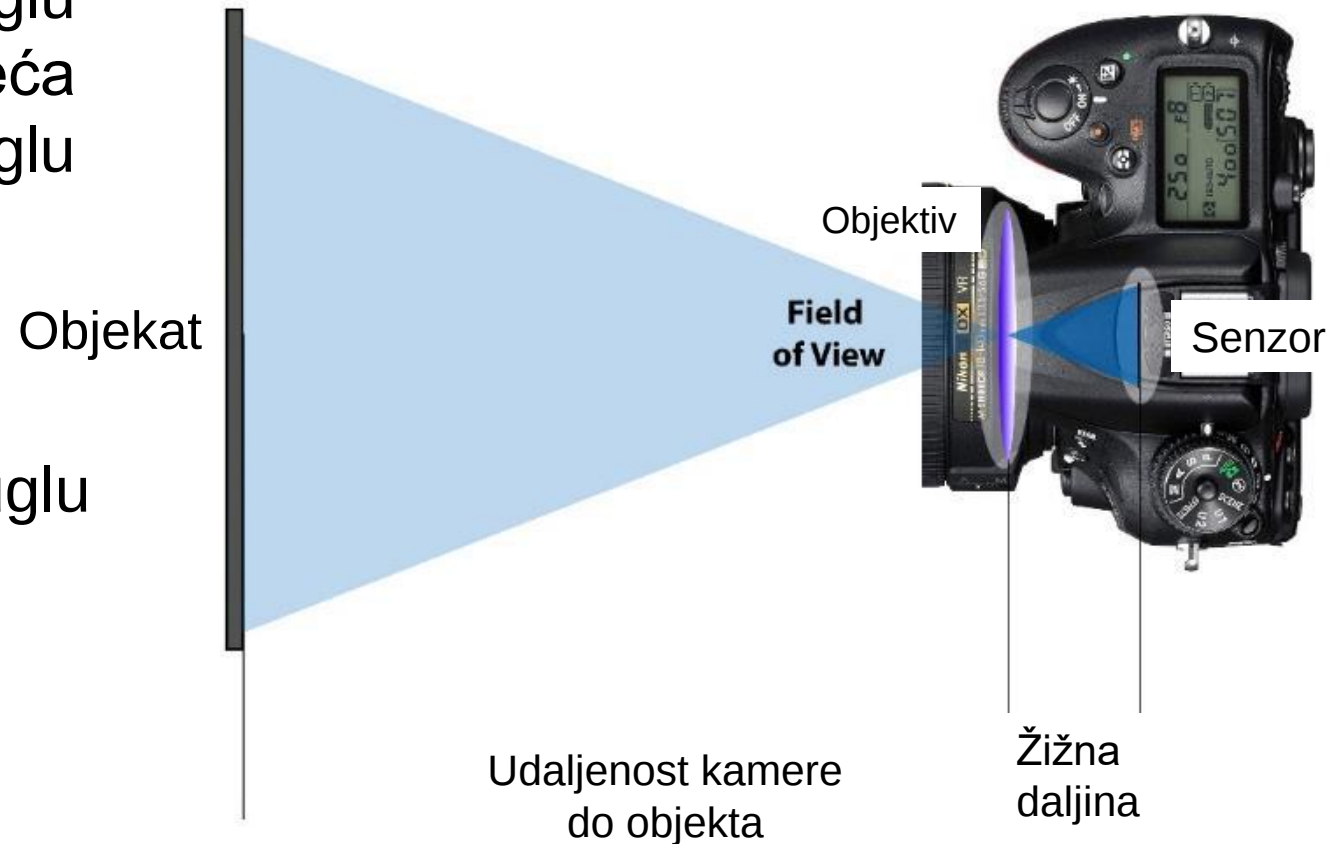
Vidno polje kamere (field of view)

Vidno polje kamere određuje žižna daljina objektiva i veličina senzora kamere.

Manja žižna daljina implicira većem uglu gledanja i većem vidnom polju, dok veća žižna daljina implicira manjem uglu gledanja i efektu “zumiranja”.

Objektivi se generalno prema uglu gledanja mogu podeliti na:

- širokougaone objektivne $< 50\text{mm}$
- normalne objektivne $= 50\text{mm}$
- zum objektivne $> 50\text{mm}$

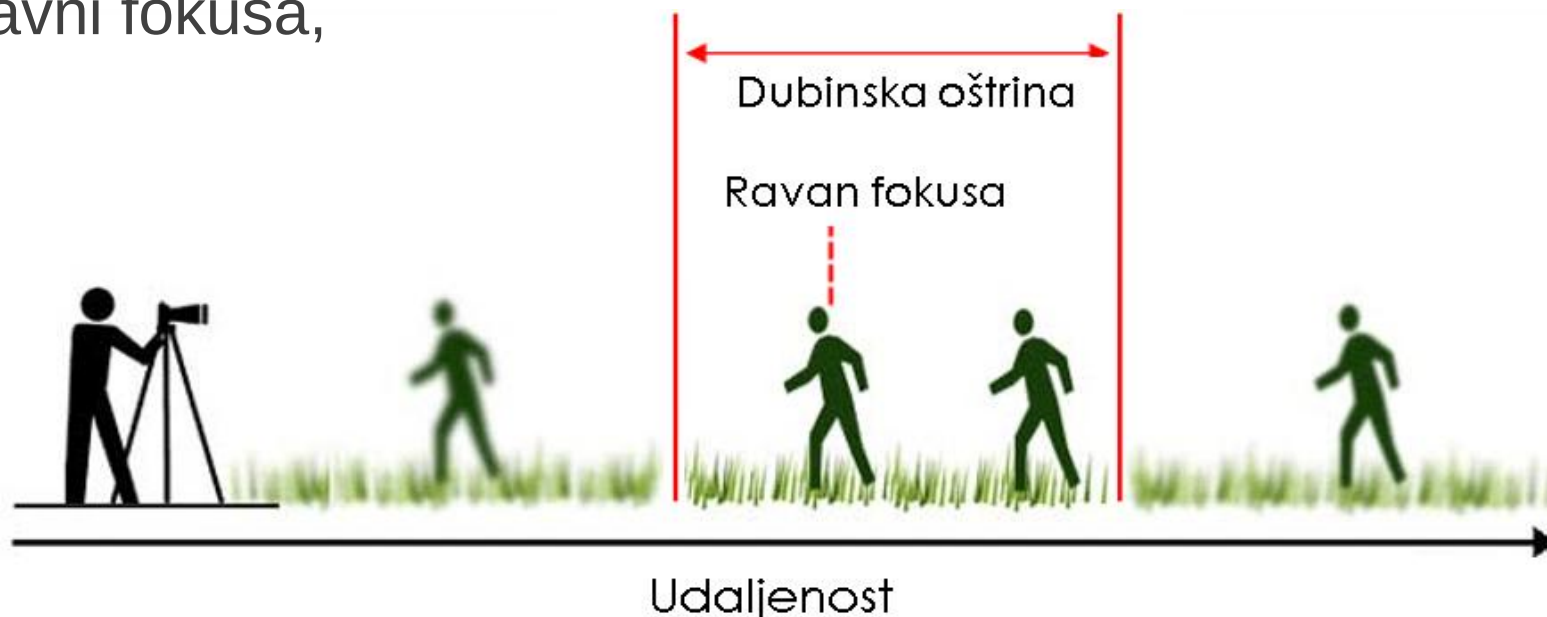


Polje dubinske oštine (depth of field)

Polje dubinske oštine je prostor ispred i iza ravni fokusa u kom se objekat nalazi sa prihvatljivom oštrinom. Za manje udaljenosti kamere i ravni fokusa polje se prostire jednako ispred i iza ravni fokusa, dok se kod većih udaljenosti polje prostire u odnosu 1/3 ispred i 2/3 iza ravni fokusa.

Veličina polja dubinske oštine zavisi od:

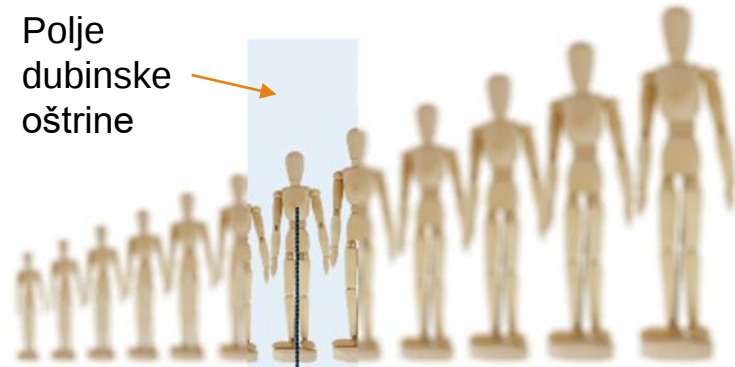
1. žižne daljine objektiva,
2. udaljenosti kamere do ravni fokusa,
3. otvora blende.



F1.4

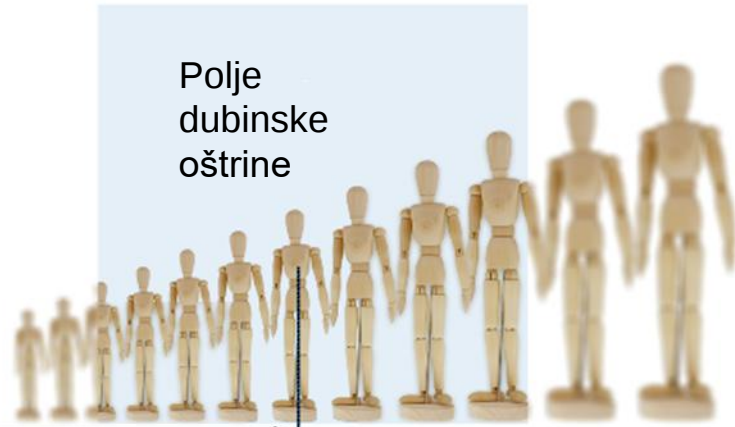
Polje
dubinske
oštine

Rastojanje do fokusne ravni

**F5.6**

Polje
dubinske
oštine

Rastojanje do fokusne ravni

**F16**

Polje
dubinske
oštine

Rastojanje do fokusne ravni



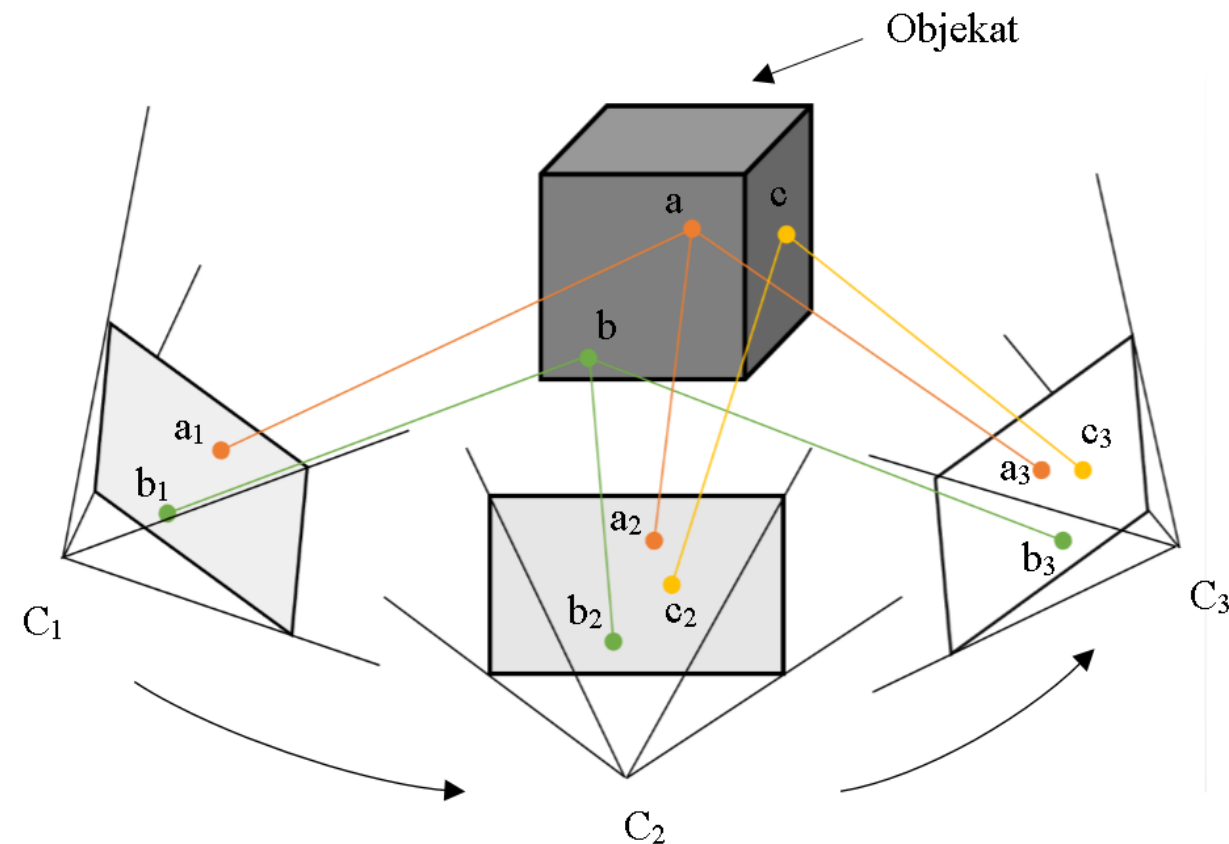
Polje dubinske oštine

Kod fotogrametsijskog snimanja fotografija, objekat 3D digitalizacije mora da se nalazi u polju dubinske oštine.

Ukoliko je objekat delimično ili potpuno van polja dubinske oštine prilikom softverske obrade fotografija doći će do greške prilikom rekonstrukcije usled netačnog detektovanja karakterističnih tačaka.

Veći otvor blende (manji F broj) implicira manjem polju dubinske oštine i obrnuto.

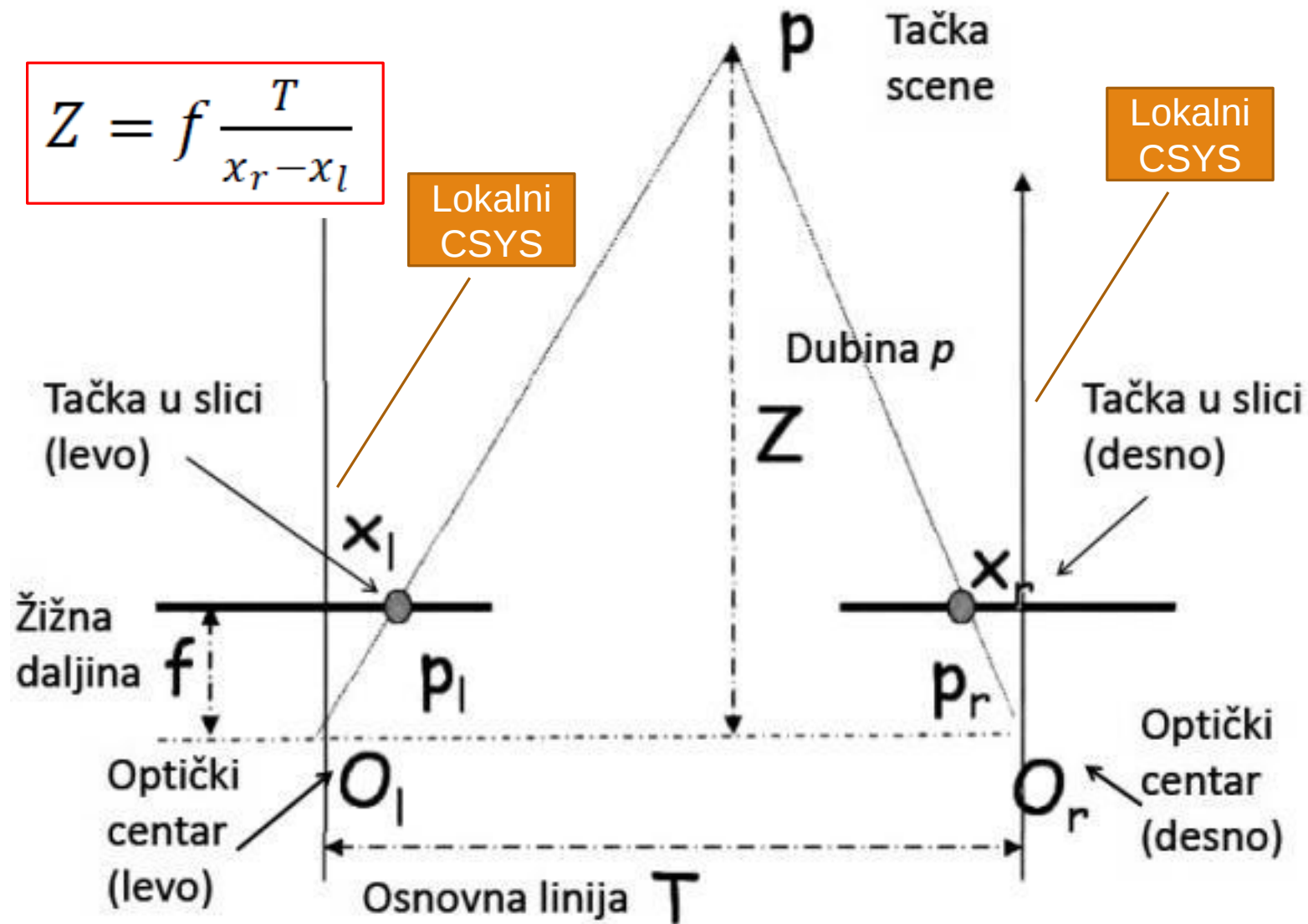
Opšti princip fotogrametrije



Za rekonstrukciju karakterističnih tačaka koje pripadaju površini nekog trodimenzionalnog objekta (tačke a, b i c) nije dovoljna samo jedna fotografija, već su potrebne najmanje dve snimljene fotografije sa dve različite pozicije, pod uslovom da se na fotografijama vide ista karakteristična obeležja-tačke koja se nalaze na objektu.

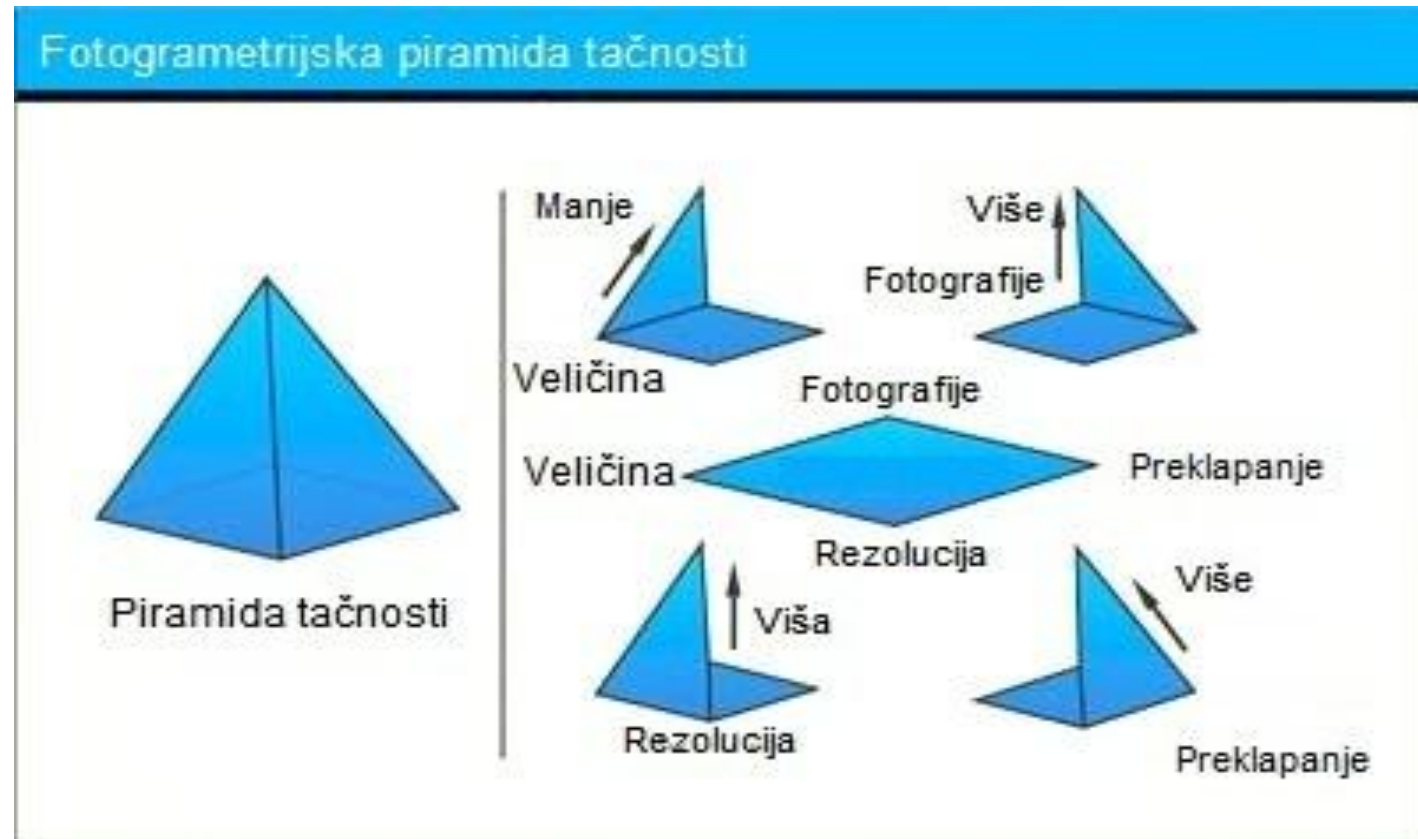
Primer: Tačka a će se rekonstruisati preko fotografije C1, C2 i C3, dok će se tačka c rekonstruisati samo pomoću fotografija C2 i C3.

Opšti princip fotogrametrije



Uticajni faktori na tačnost fotogrametrije

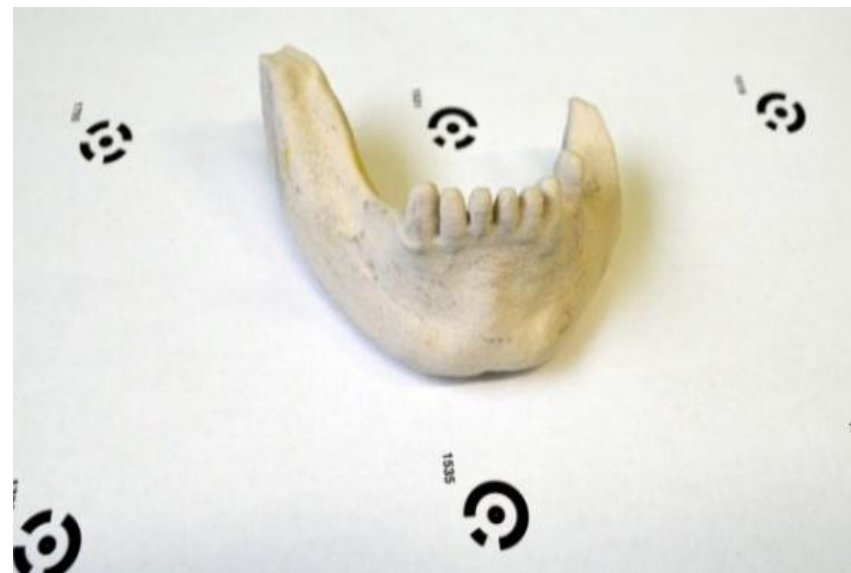
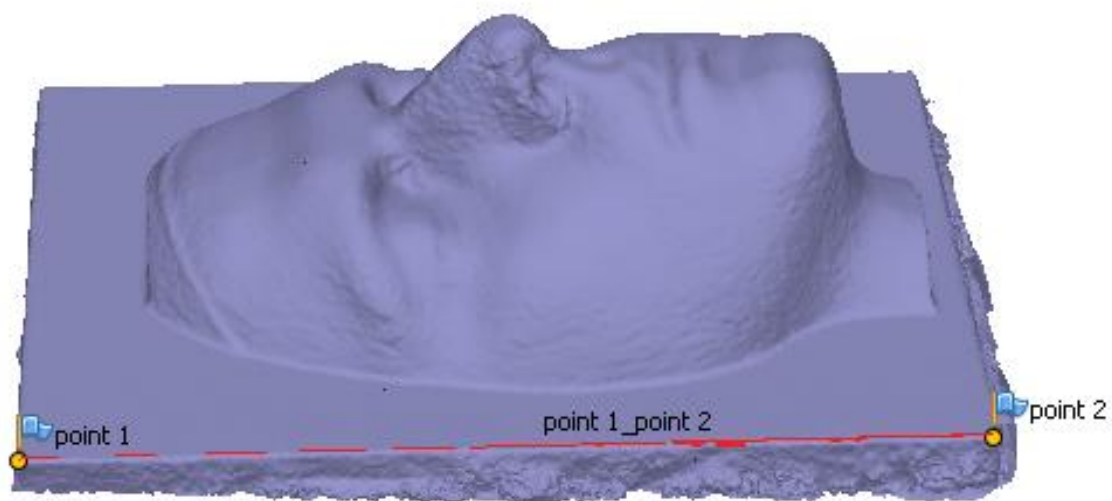
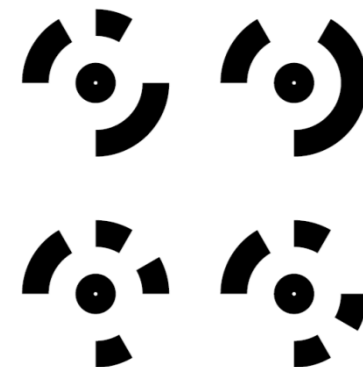
1. Veličina objekta koji se digitalizuje
2. Broj (parova) fotografija
3. Višestruka pokrivenost objekta - preklapanje fotografija
(isti delovi objekta vidljivi na 2 i više fotografija)
4. Rezolucija fotografija

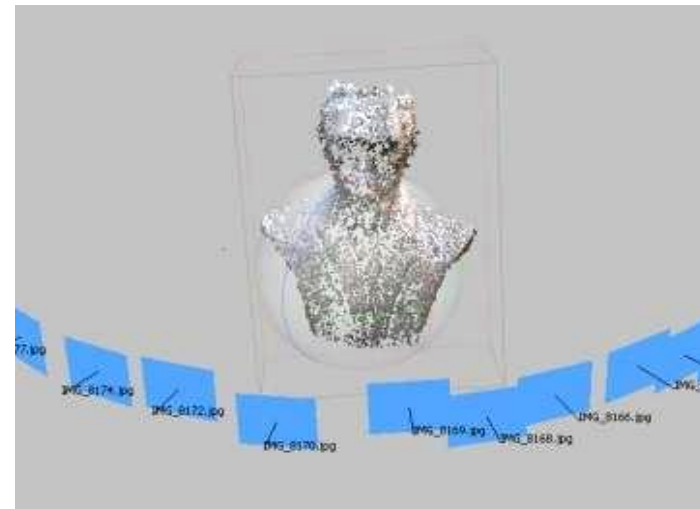
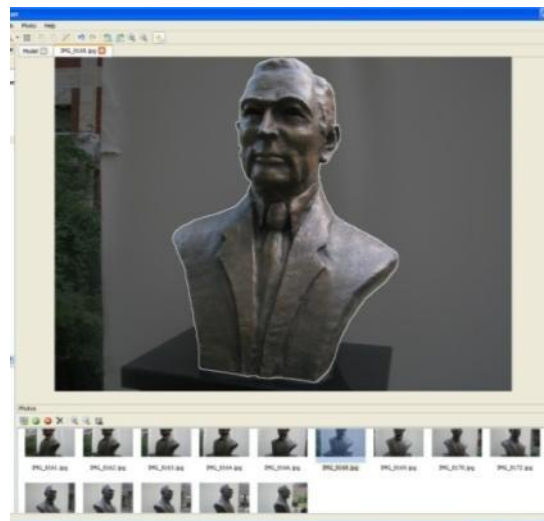


Skaliranje modela

Dva pristupa za skaliranje (dimenzionisanje) 3D modela:

- 1) preko dimenzionisanih obeležja na predmetu i
- 2) pomoću kodiranih markera.

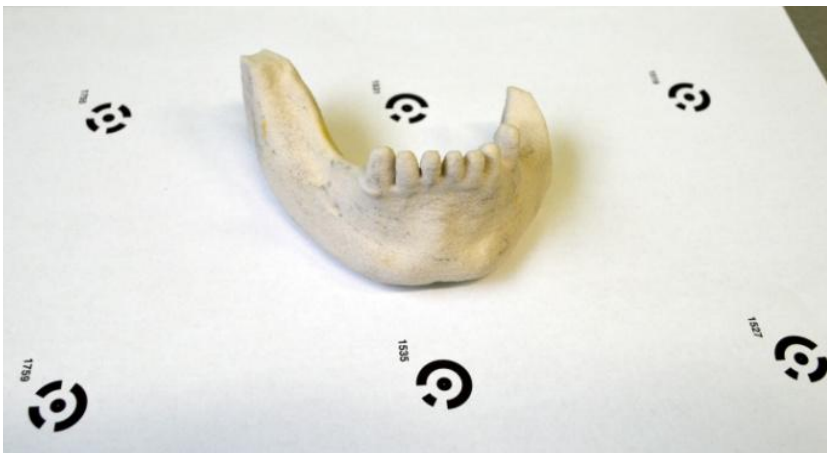




3D model sa teksturom >>>

3D model>>>

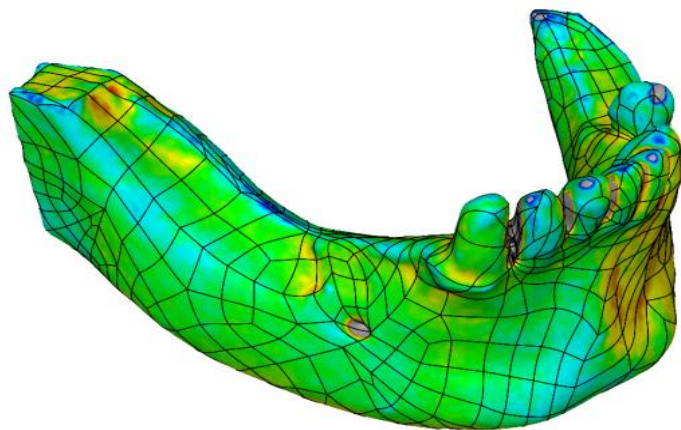




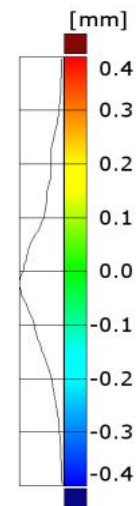
*Model ljudske vilice izrađen RP
postavljen u merni prostor*



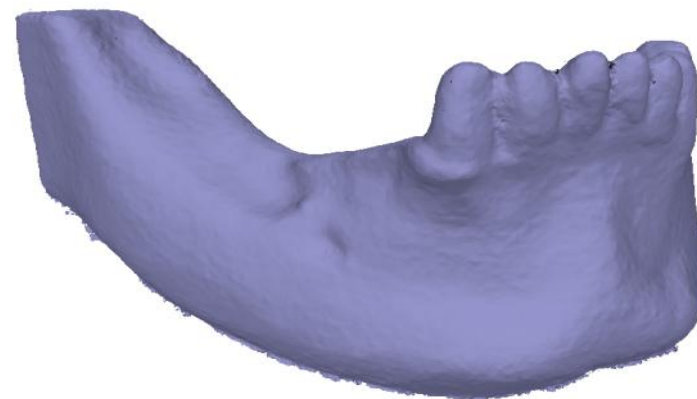
Primer dobro kreirane maske



*Analiza odstupanja CT i fotogrametrijskog
modela*



*Oblak tačaka kao rezultat poravnavanja
fotografija*



*3D model kreiran fotogrametrijskom
metodom*

