

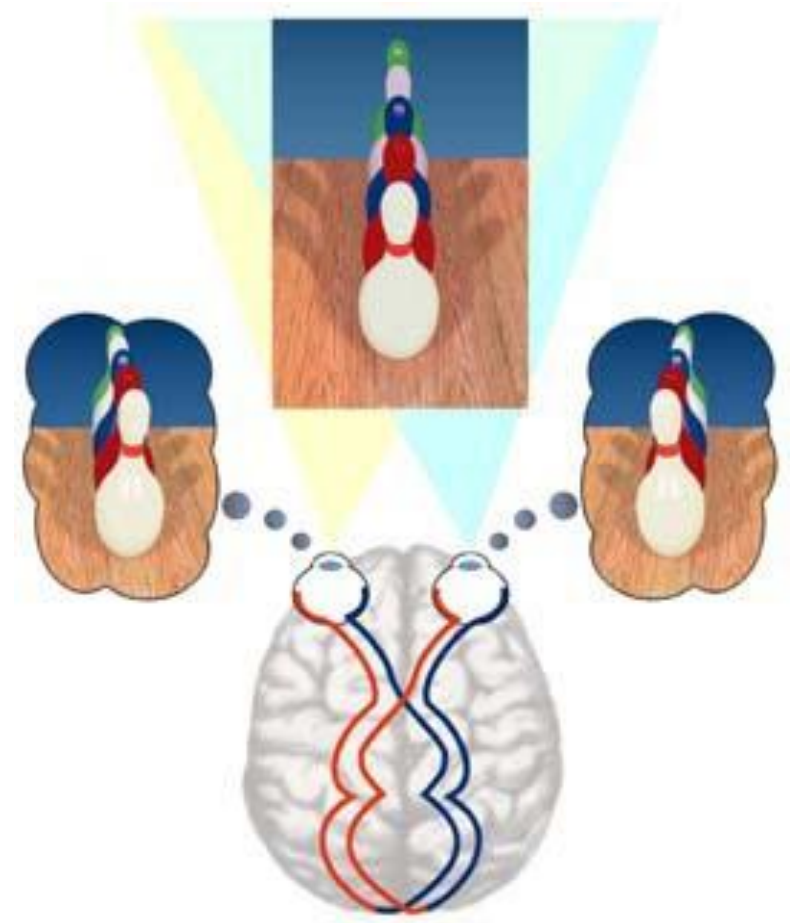
Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
MSS Proizvodno mašinstvo  
Predmet: Merni sistemi, reverzibilno inženjerstvo i CAQ

**BESKONTAKTNE METODE 3D-DIGITALIZACIJE**  
**OPTIČKE METODE**  
**Fotogrametrija**

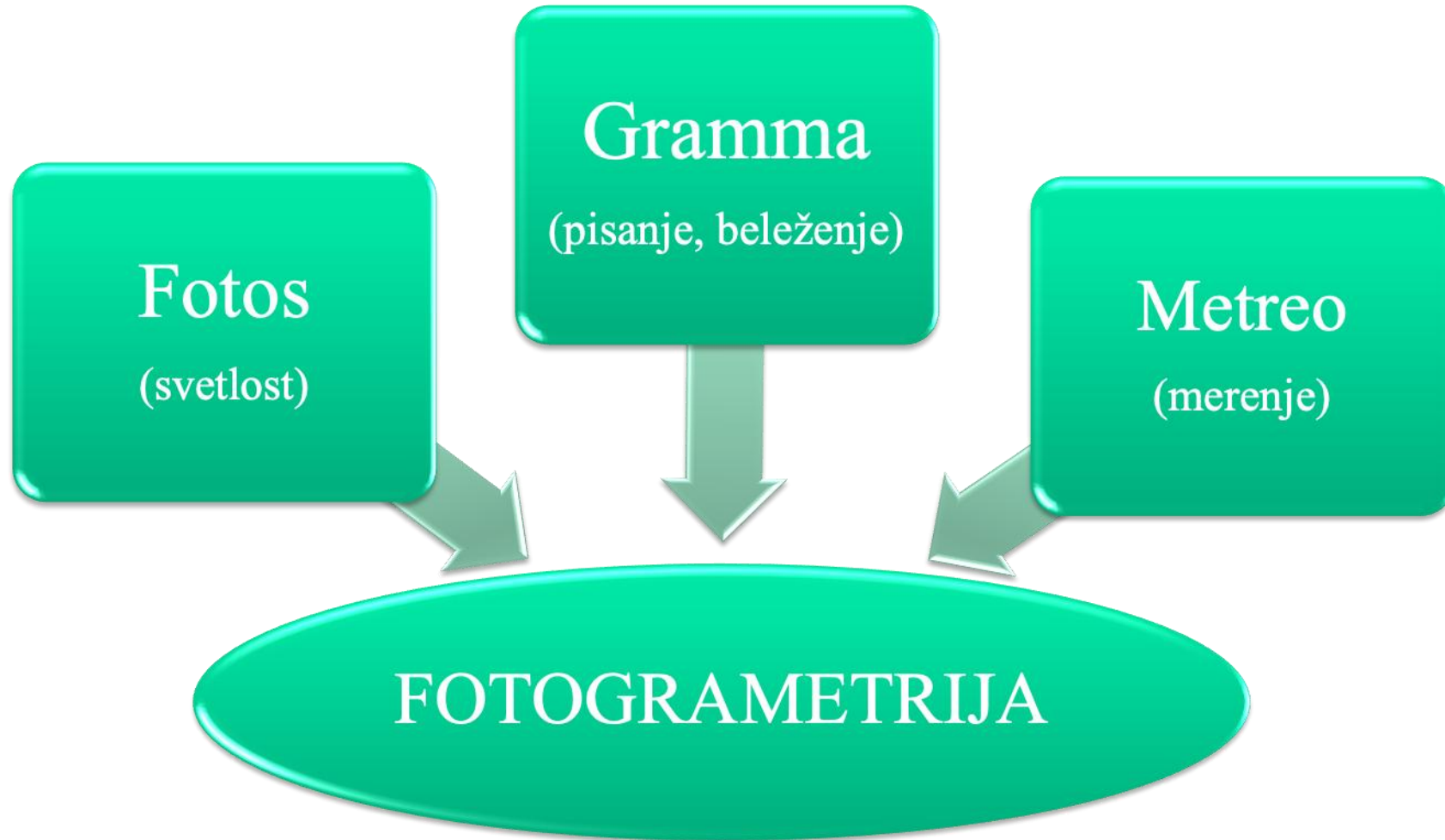
# Fotogrametrija

Stereovizijski princip:

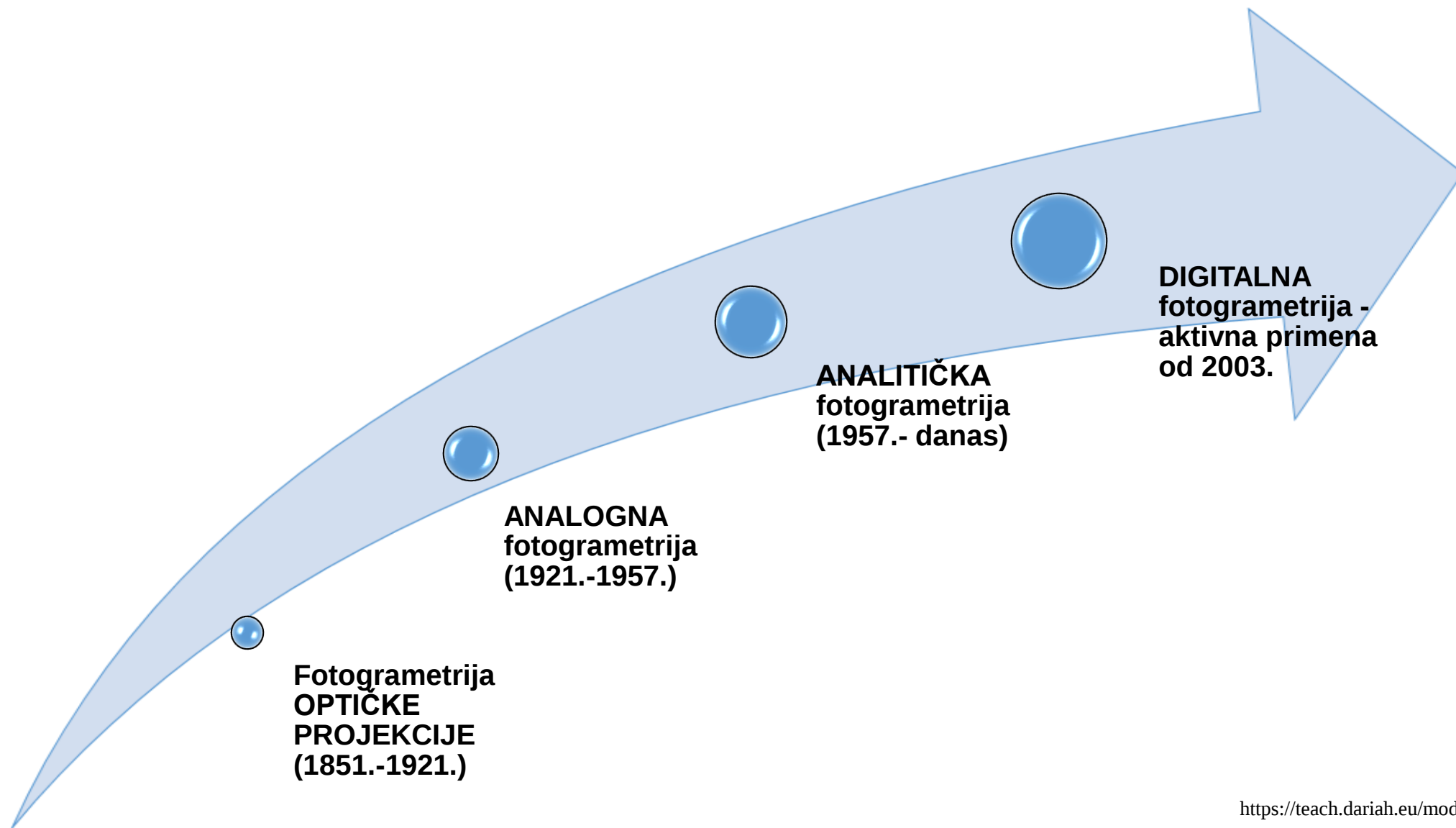
***Projektovanje dve slike istog objekta, snimljene pod različitim uglovima, omogućuje stvaranje efekta treće dimenzije, tj. dubine.***



*Prema Američkom društvu za fotogrametriju i daljinsku detekciju, fotogrametrija je: „umetnost, nauka i tehnologija dobijanja pouzdanih informacija o fizičkim objektima i okruženju kroz proces snimanja, merenja i interpretacije fotografskih slika“.*



# Razvoj fotogrametrije



# 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

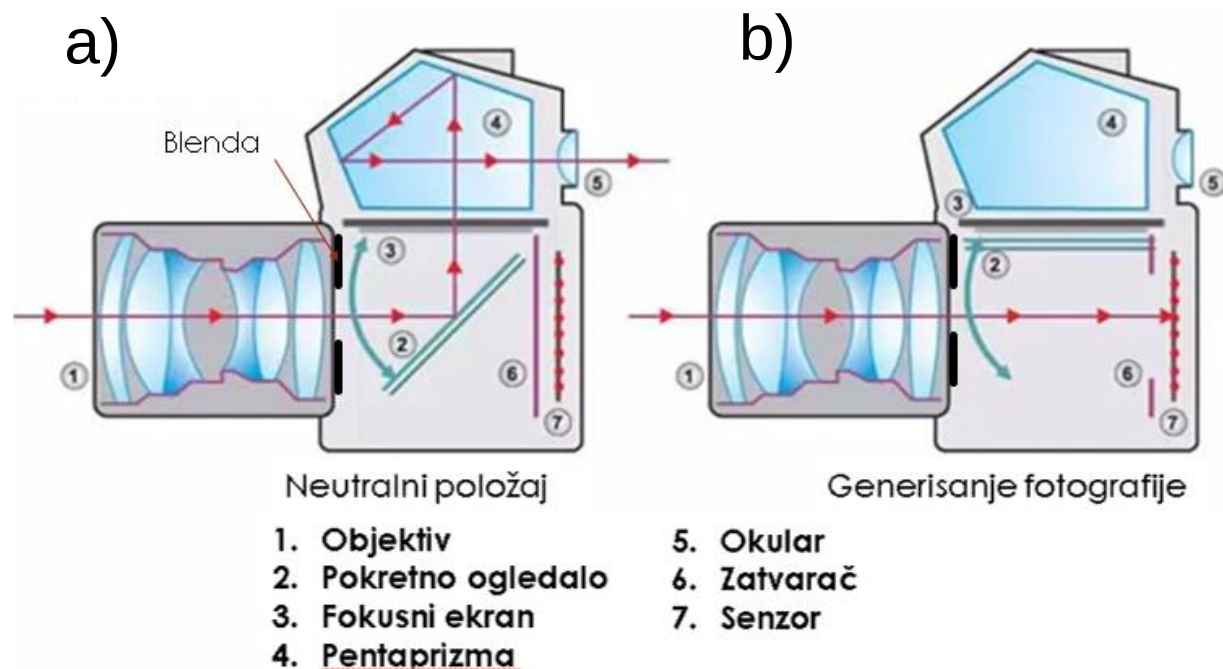


<https://www.filmtools.com/canon-eos-r5-mirrorless-digital-8k-camera.html>

# 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.

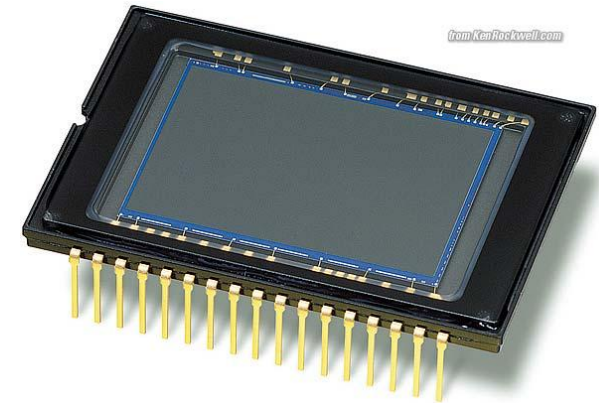
# Senzori slike

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:

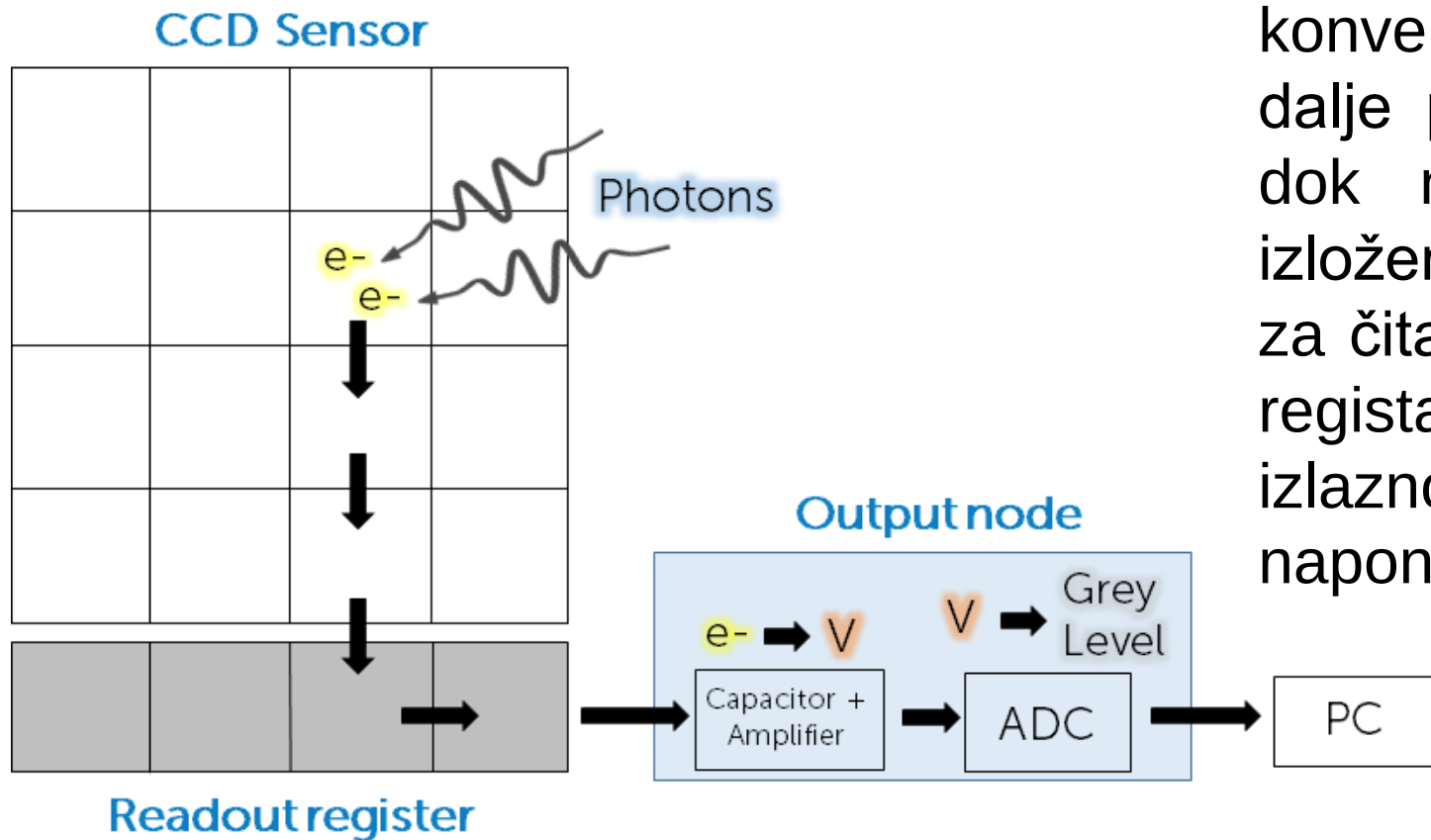
- **CCD**
- **EMCCD**
- **CMOS**
- **sCMOS**



# CCD Senzori slike

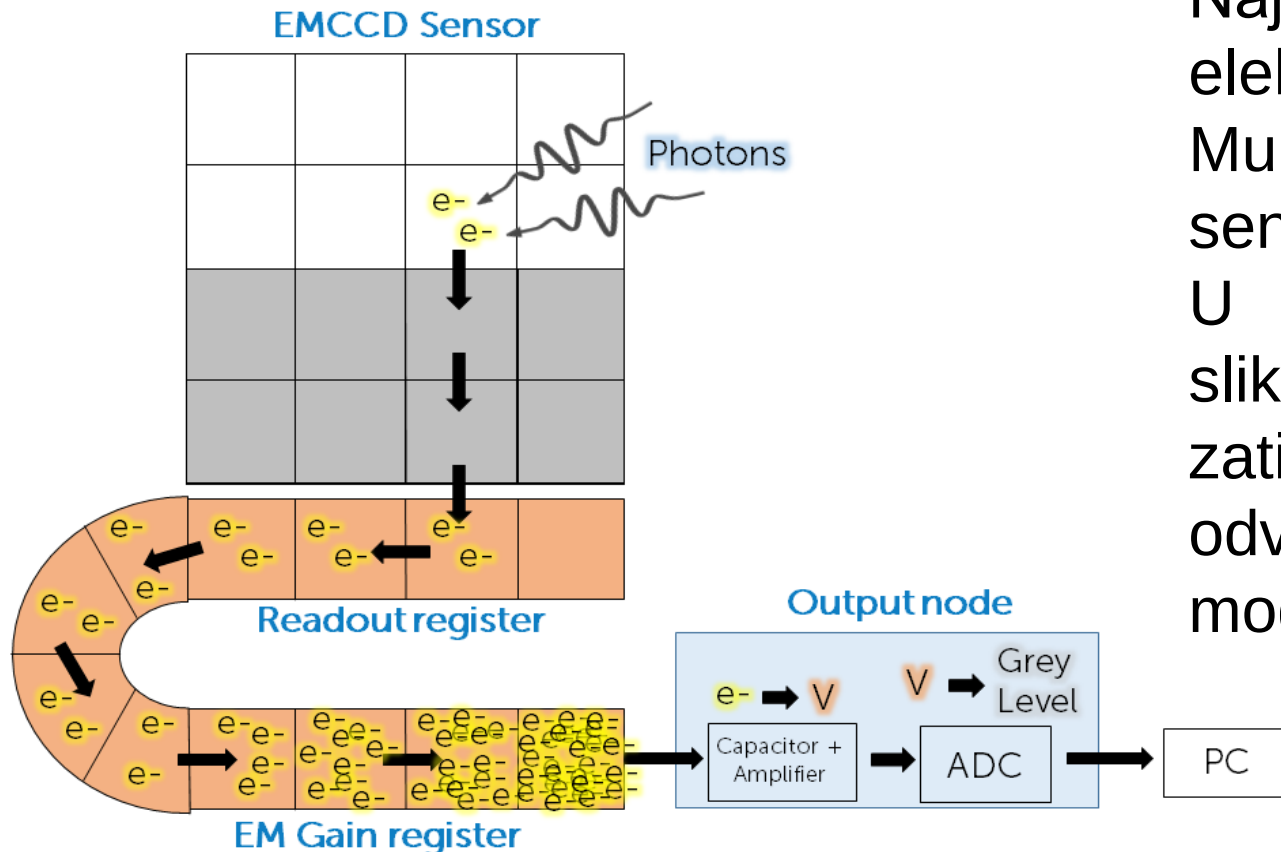
**CCD** ([engl. Charge Coupled Device](#)) je elektronski uređaj na čijoj se površini nalaze milioni fotosenzitivnih [dioda](#), poređanih u redove i kolone (poput [piksela](#) na monitoru računara).

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.

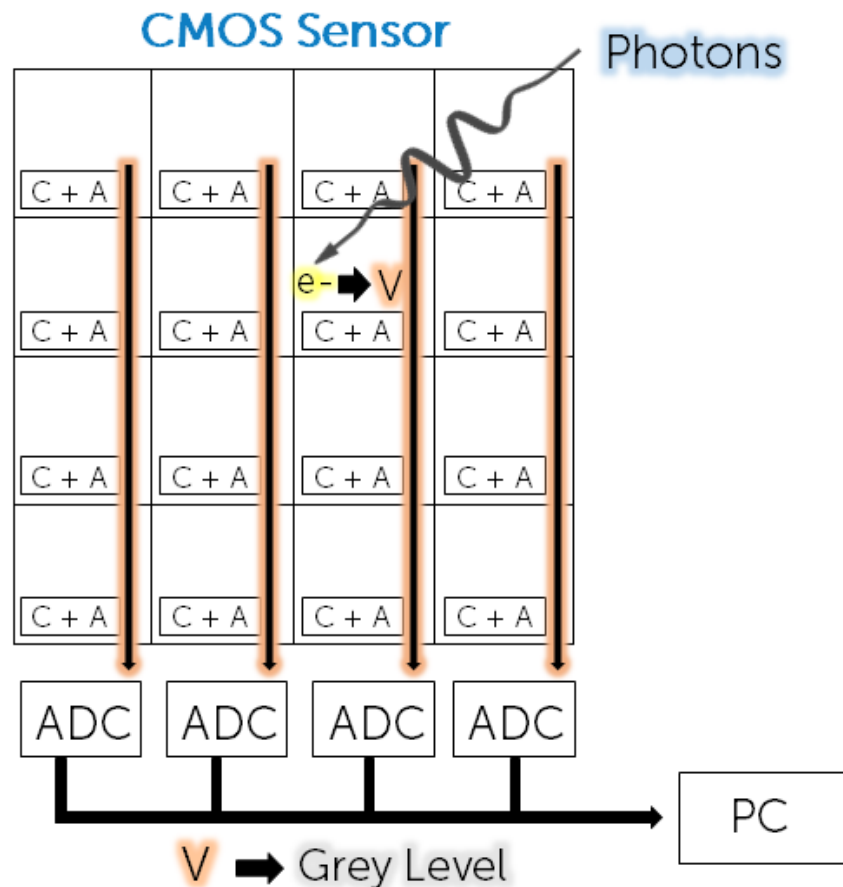


Najznačajnija inovacija jeste množenje elektrona (EM – eng. Electron Multiplication), koja omogućava CCD senzorima da povećaju signal malih fotona. U ovom slučaju, elektroni prelaze iz slikovne matrice u maskiranu matricu, a zatim u registar za čitanje. EM proces se odvija korak po korak, što znači da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

# CMOS Senzori slike

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

Frank Vanlas patentirao je CMOS 1963. godine.

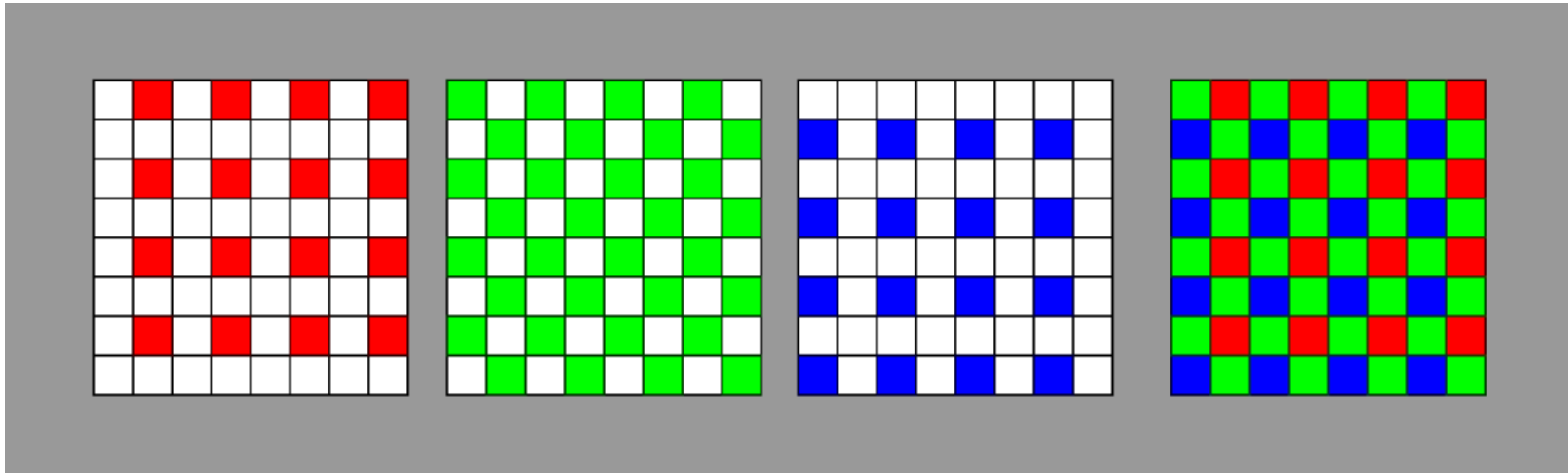


Za razliku od prethodnih tehnologija, ovde se koristi paralelizacija, što znači da senzori rade paralelno i omogućavaju velike brzine zapisa. Svaki piksel na senzoru poseduje minijaturnu elektroniku, tj. kondenzator i pojačavač.

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 ošttrini slike.



# Senzori slike

- **Bayer-ov pattern (šablon)**

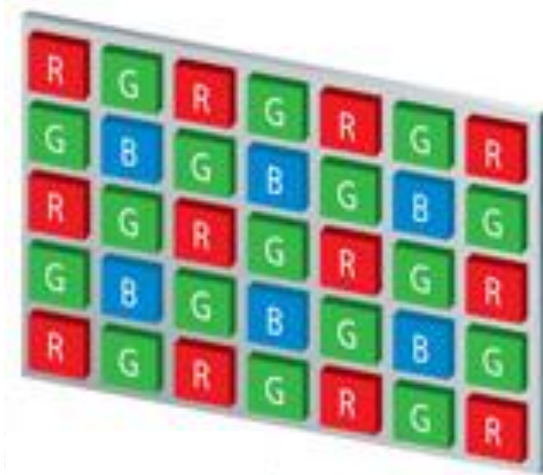
Dvostruko više zelenih filtera (u odnosu na crvene i plave) daje oštriju sliku.

50% zelena

25% plava

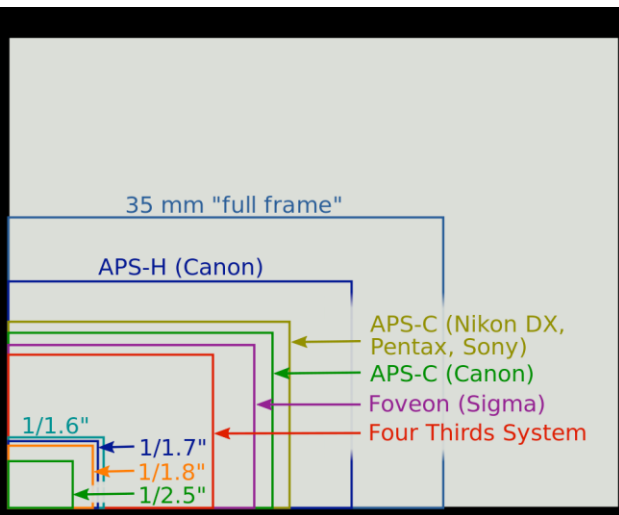
25% crvena

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



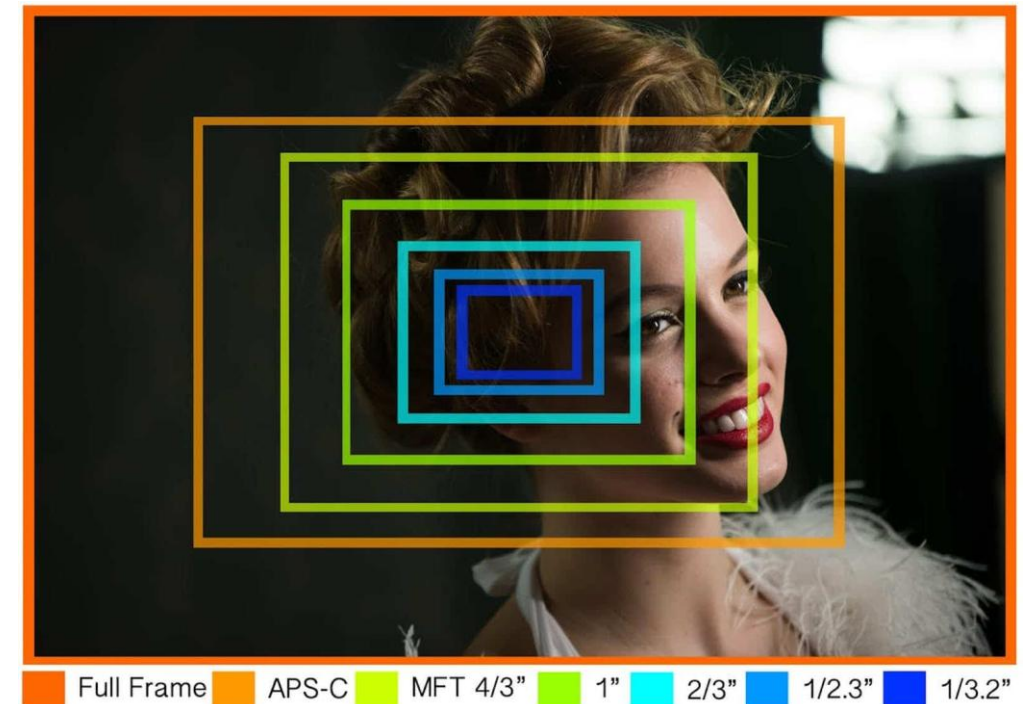
# Veličina senzora slike

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



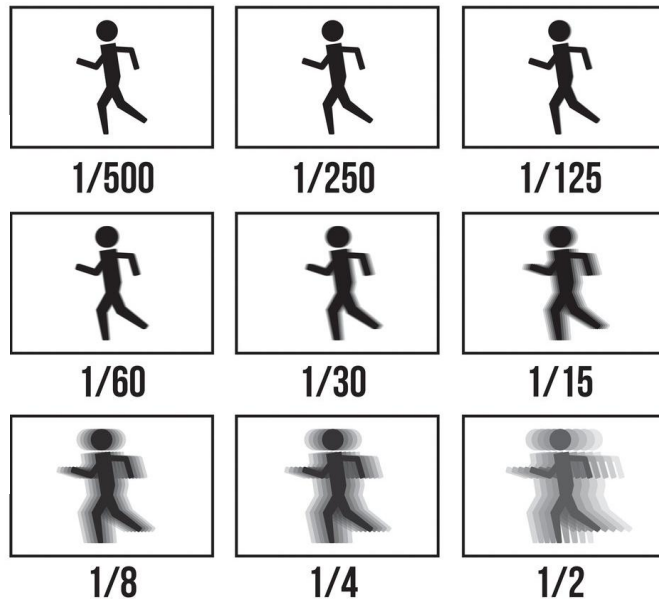
# Brzina zatvarača (SHUTTER SPEED)

1/300

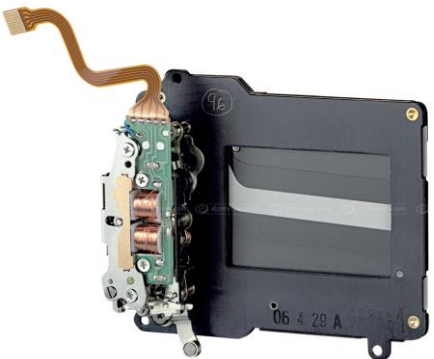
1/15



**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.

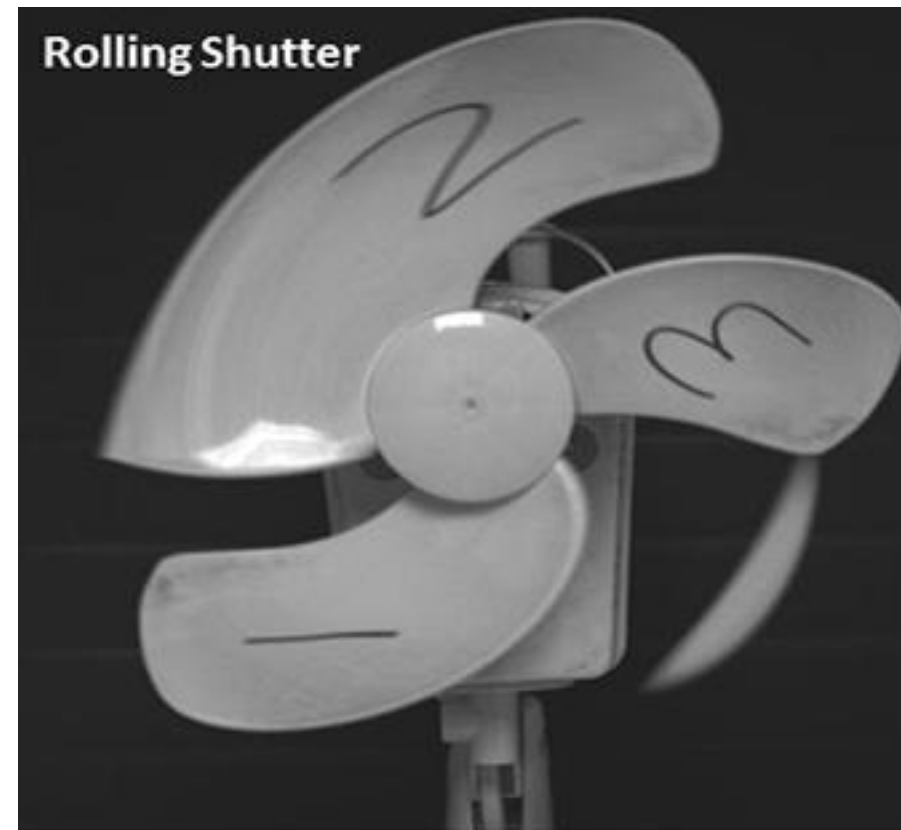


Takođe sa veoma kratkom vremenom izlaganja senzora svetlosti „brzi zatvarač“ moguće je snimiti veoma kvalitetno pokretne objekte pri dovoljnoj količini svetlosti.



# 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

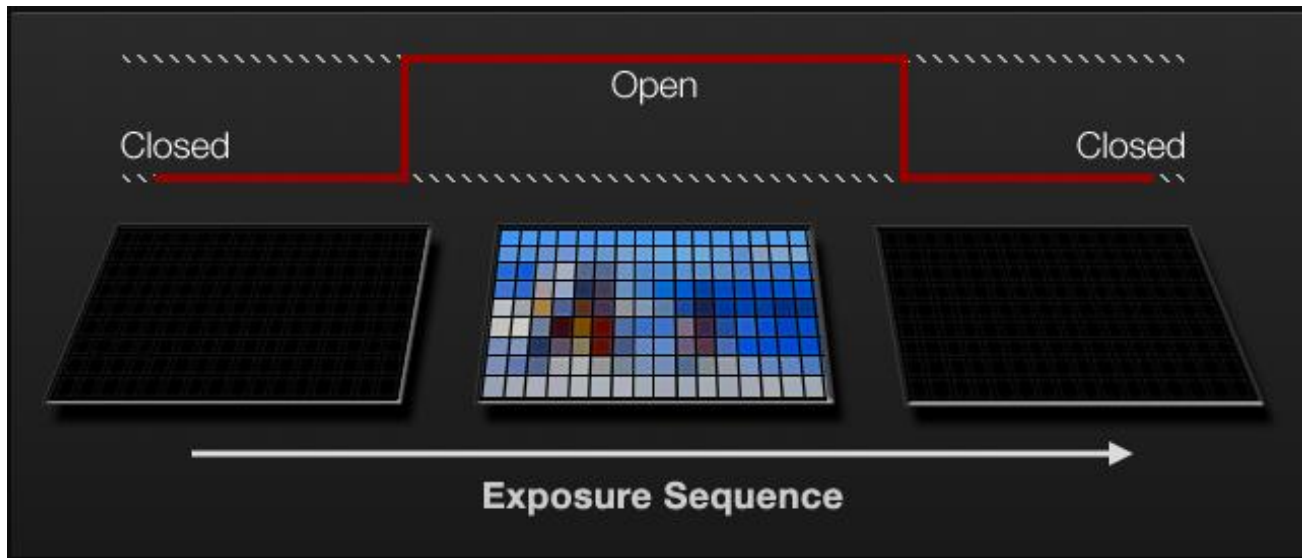


# Rolling shutter effect



# 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.



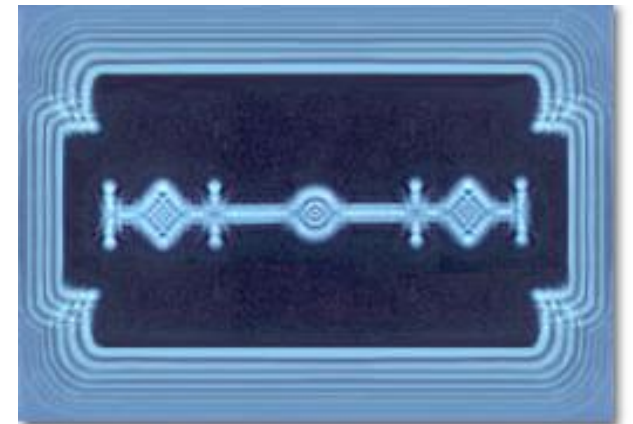
**VELIK OTVOR BLENDE**  
(ulazi mnogo svetlosti)  
 $f/2$



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



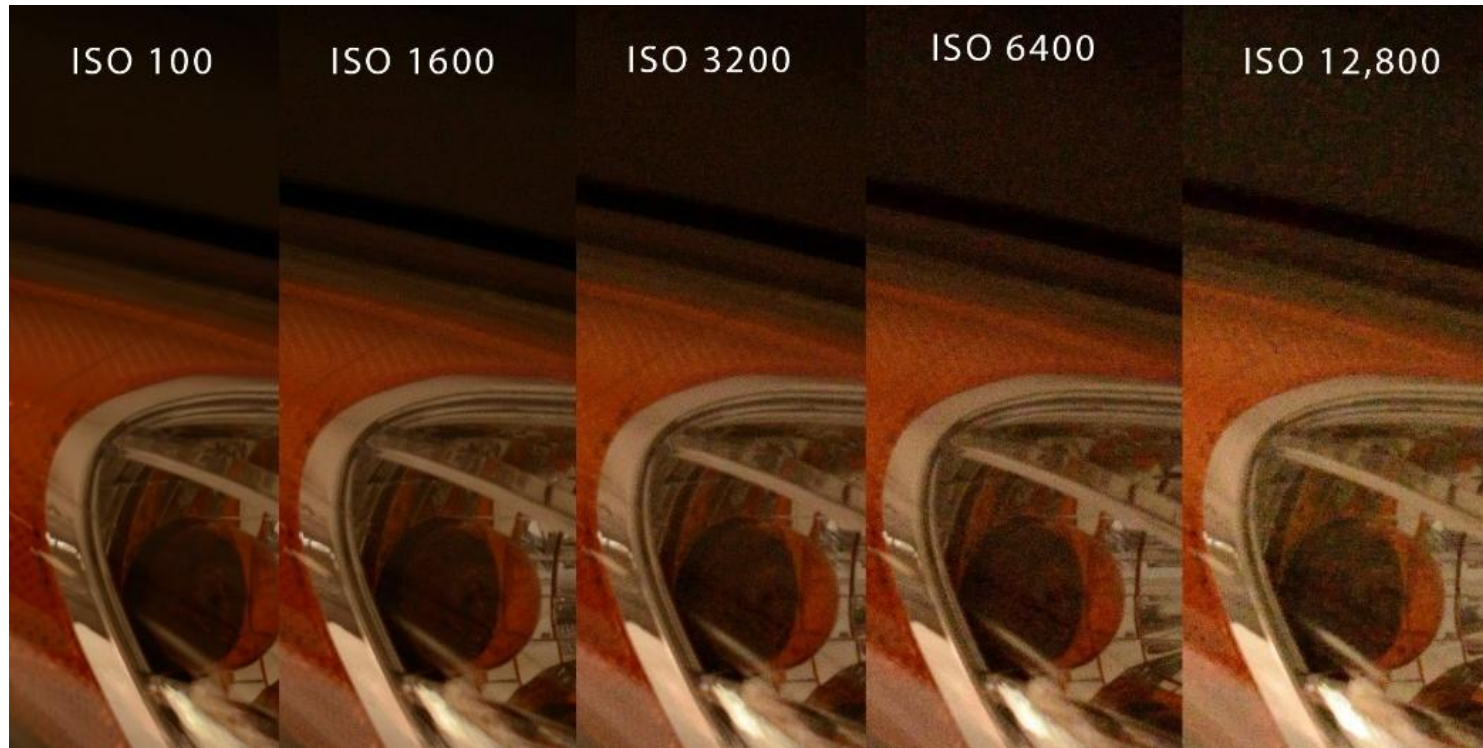
**MALI OTVOR BLENDE**  
(ulazi malo svetlosti)  
 $f/22$



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.



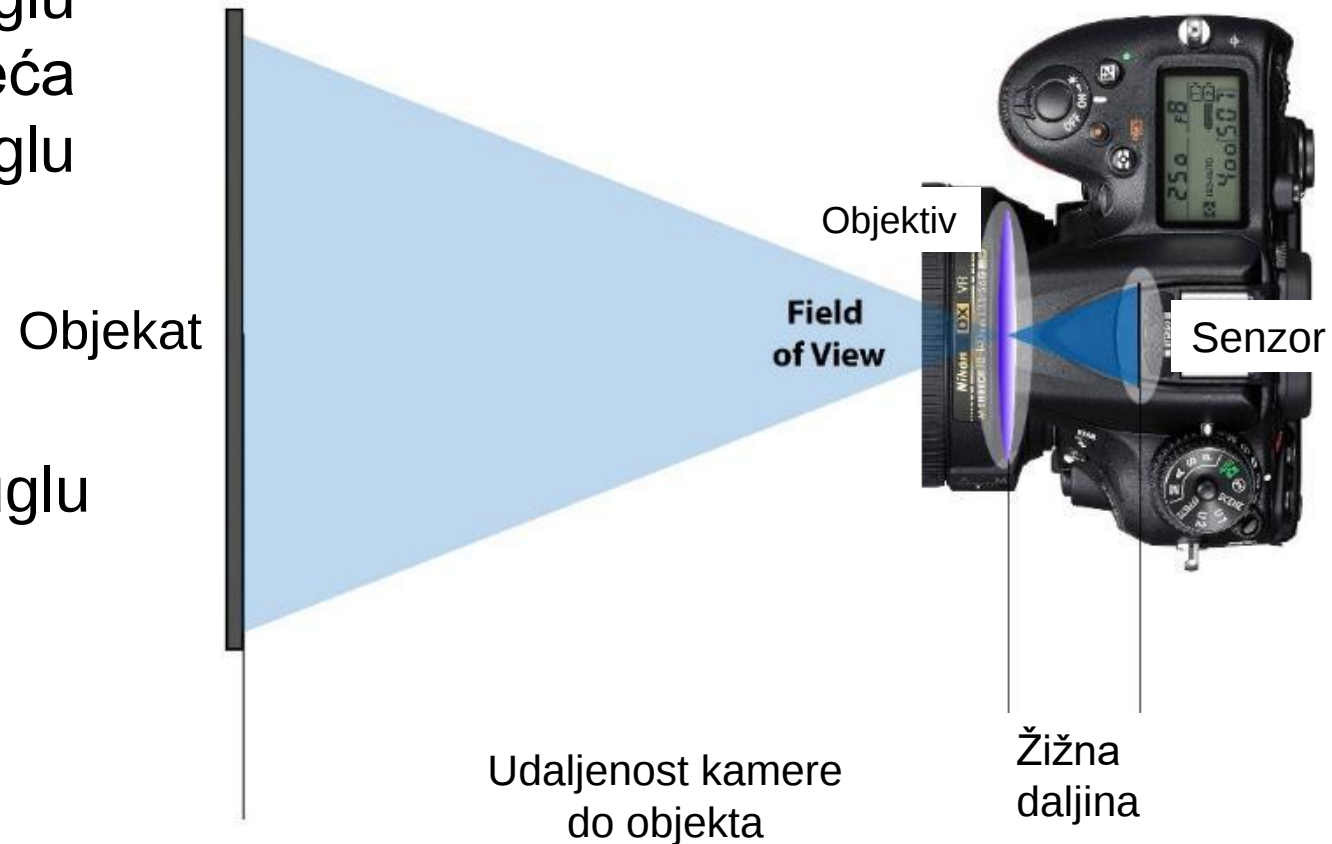
# Vidno polje kamere (field of view)

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  $>50\text{mm}$

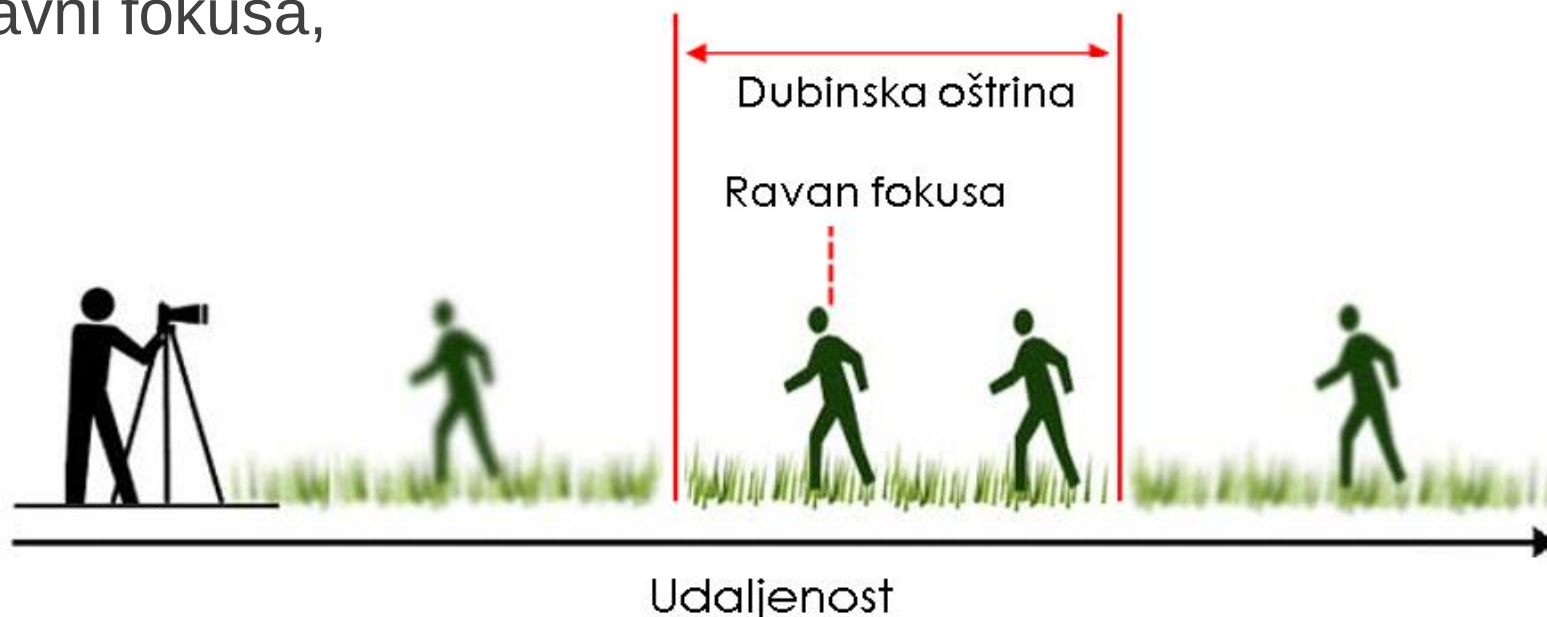


# Polje dubinske oštine (depth of field)

**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

<https://www.geodetic.com>

## Polje dubinske oštine

Kod fotogrametrijskog 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.

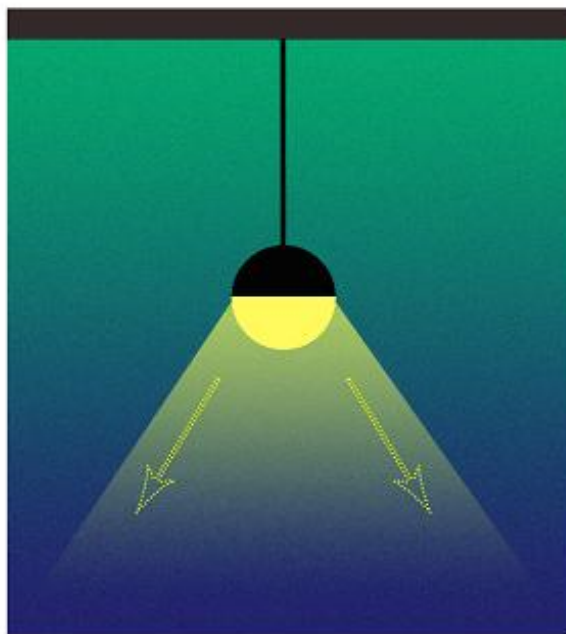
Veći otvor blende (manji F broj) implicira manjem polju dubinske oštine i obrnuto.

# Preduslovi za fotogrametrijsku 3d digitalizaciju

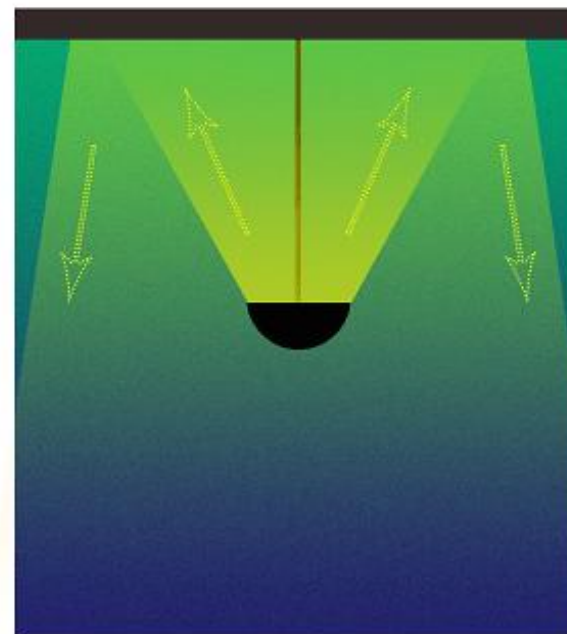
**Obezbeđivanje dovoljne količine svetlosti:** Svetlo je ključni faktor za snimanje kvalitetnih fotografija. Izvori osvetljenja mogu biti prirodni (sunce, zvezde, munje), ili veštački (nastaju sagorevanjem gasova, ulja, sveća i sličnih materija, ili isijavanjem iz užarenih metala, užarenih vlakana i sl.).

Pravac i smer osvetljenja može biti:

Direktno



Indirektno  
(difuzno)



# Osobine direktnog osvetljenja

Prednosti direktnog osvetljenja:

- Zahteva manje opreme (stalci, držači, kablovi i sl.)
- Ne „gubi“ se previše svetla, tako da svetlosni izvori ne moraju imati veću snagu.
- Dobijaju se fotografije sa jakim kontrastom
- ekonomično

Nedostaci direktnog osvetljenja:

- može da izazove refleksiju na fotografijama
- neujednačeno osvetljenje sa jakim senkama
- veći stres za ljudske oči usled dodatnog odsjaja
- Jako osvetljenje samo na određeni deo objekta

# OSOBINE INDIRECTNOG OSVETLJENJA

Indirektno osvetljenje je svetlost koja se odbija od predmeta ili površine kao što su zid, pod ili plafon. U suštini to je svako svetlo koje dolazi od objekta koji nije direktno izvor svetlosti. Indirektno osvetljenje je vrsta ambijentalnog svetla.

## **Prednosti indirektnog osvetljenja:**

- obezbeđuje ravnomernije i difuzno osvetljenje objekta
- smanjuje senke i refleksiju
- smanjuje naprezanje očiju
- vizuelno stvara efekat dubine

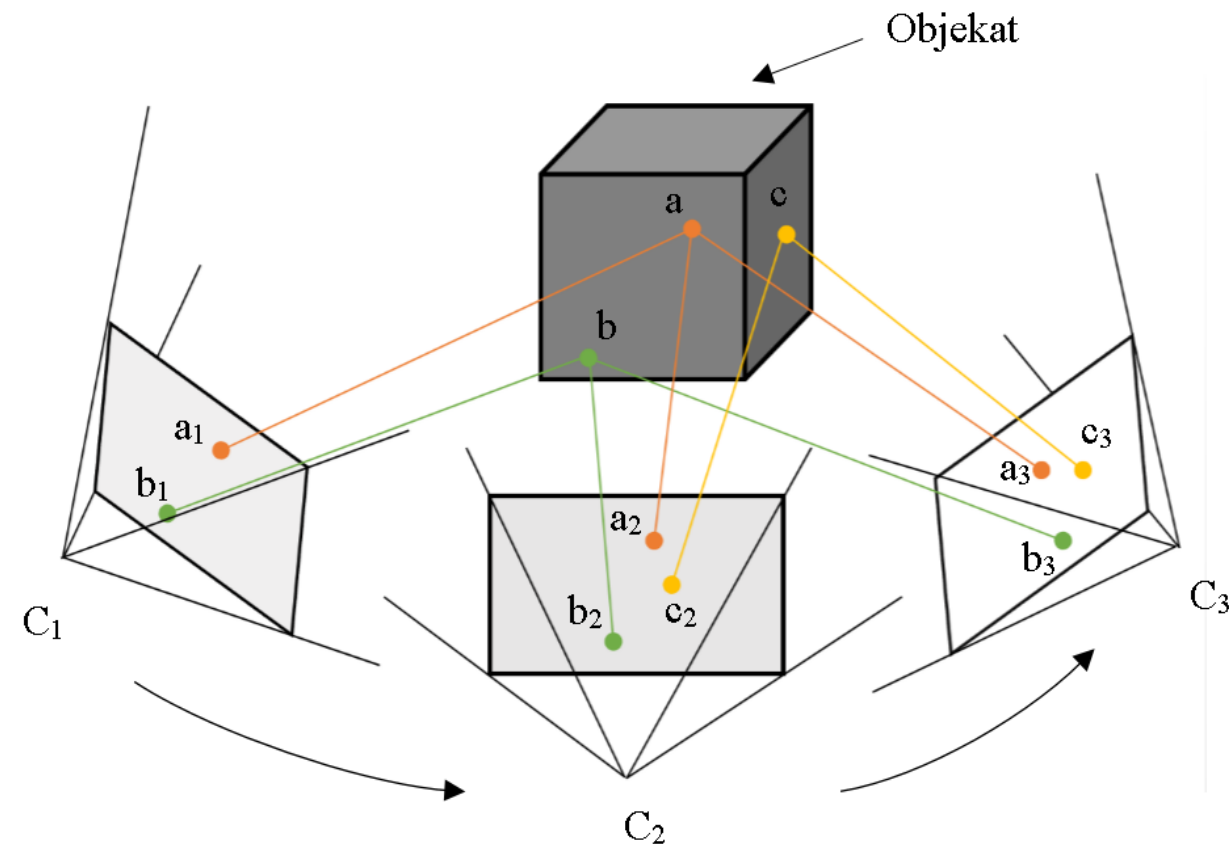
## **Nedostaci indirektnog osvetljenja:**

- nije energetski efikasano
- potrebni su jači izvori svetlosti
- redukuje kontrast na fotografijama

|                 | TRADICIONALNA FOTOGRAMETRIJA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| METODOLOGIJA    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obično se oslanja na niz slika koje se preklapaju snimljene sa poznatih pozicija i orijentacija.</li> <li>- Često uključuje upotrebu kalibrisanih kamera i preciznih tehnika merenja za izvođenje 3D koordinata.</li> <li>- Fokusira se na metrička svojstva, zahtevajući rigorozne kontrolne tačke za tačnost.</li> </ul> |
| PRIMENA         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obično se koristi u geodetskim pregledima, mapiranju i inženjeringu gde je visoka preciznost kritična.</li> <li>- Uključuje specifične tehnike kao što je stereo fotogrametrija, gde se dve slike koriste za dobijanje informacija o dubini.</li> </ul>                                                                    |
| KONTROLNE TAČKE | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zahteva zemaljske kontrolne tačke (GCP) za georeferenciranje i obezbeđivanje tačnosti.</li> <li>- Proces može biti dugotrajniji zbog potrebe za preciznom kontrolom i kalibracijom.</li> </ul>                                                                                                                             |

|                    | STRUCTURE FROM MOTION FOTOGRAMETRIJA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| METODOLOGIJA       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tehnika kompjuterskog vida koja automatski rekonstruiše 3D strukture iz 2D slika.</li> <li>- Radi tako što otkriva ključne tačke na slikama koje se preklapaju i procenjuje kretanje kamere između tih slika.</li> <li>- Može da koristi širi spektar tipova kamera, uključujući nekalibrisane potrošačke kamere.</li> </ul> |
| PRIMENA            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Često se koristi u manje formalnim kontekstima, kao što su dokumentacija o kulturnom nasleđu, arheologija, pa čak i u razvoju video igara.</li> <li>- Često proizvodi vizuelno privlačne modele, iako ne uvek tako geometrijski precizne kao tradicionalna metoda.</li> </ul>                                                |
| KONTROLNE<br>TAČKE | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Može da radi bez unapred definisanih kontrolnih tačaka, koristeći relativne pozicije izvedene iz analize slike.</li> <li>- Obično zahteva manje početnog podešavanja, ali može žrtvovati određenu preciznost u poređenju sa tradicionalnim metodama.</li> </ul>                                                              |

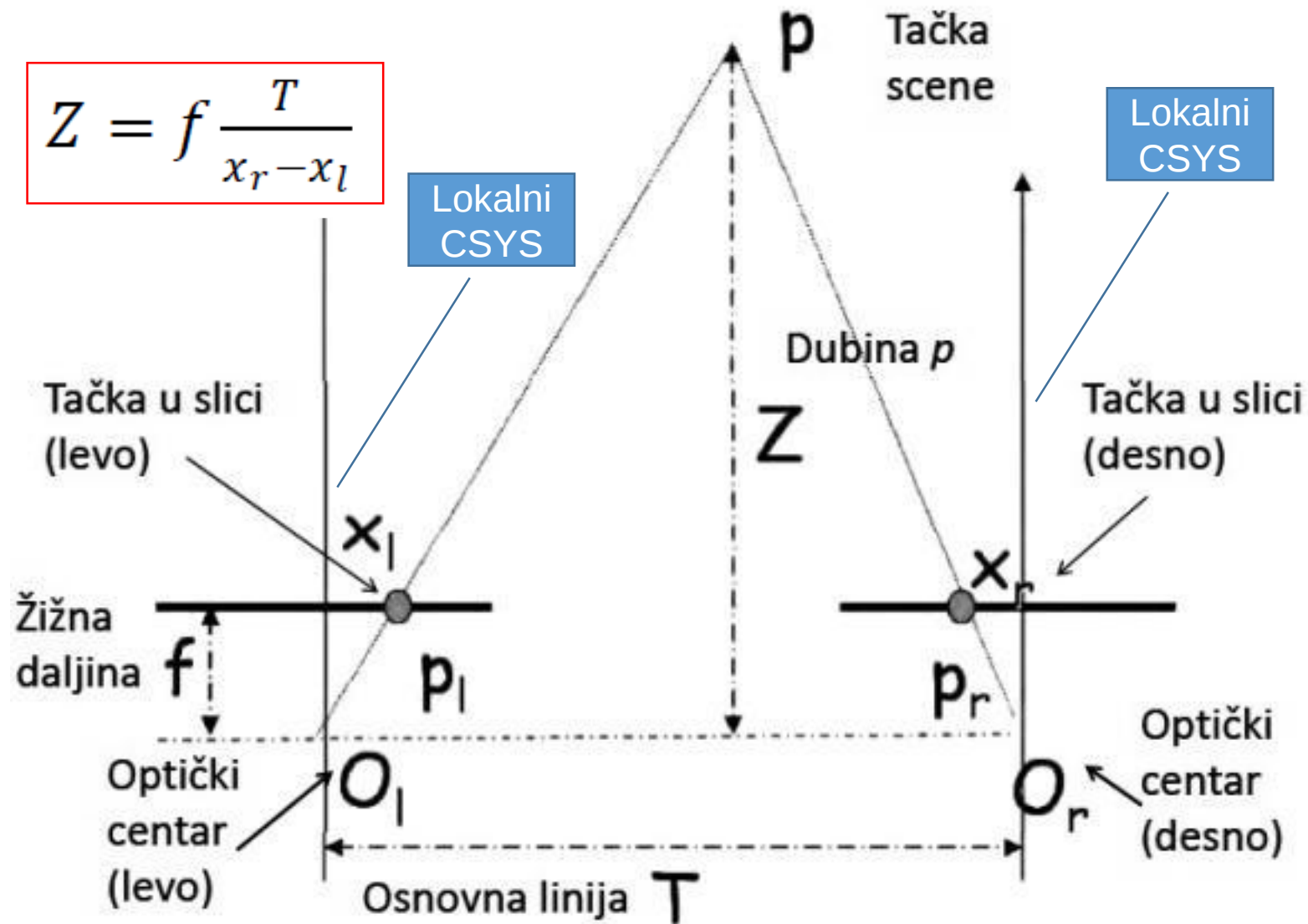
# Opšti princip fotogrametrije



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.

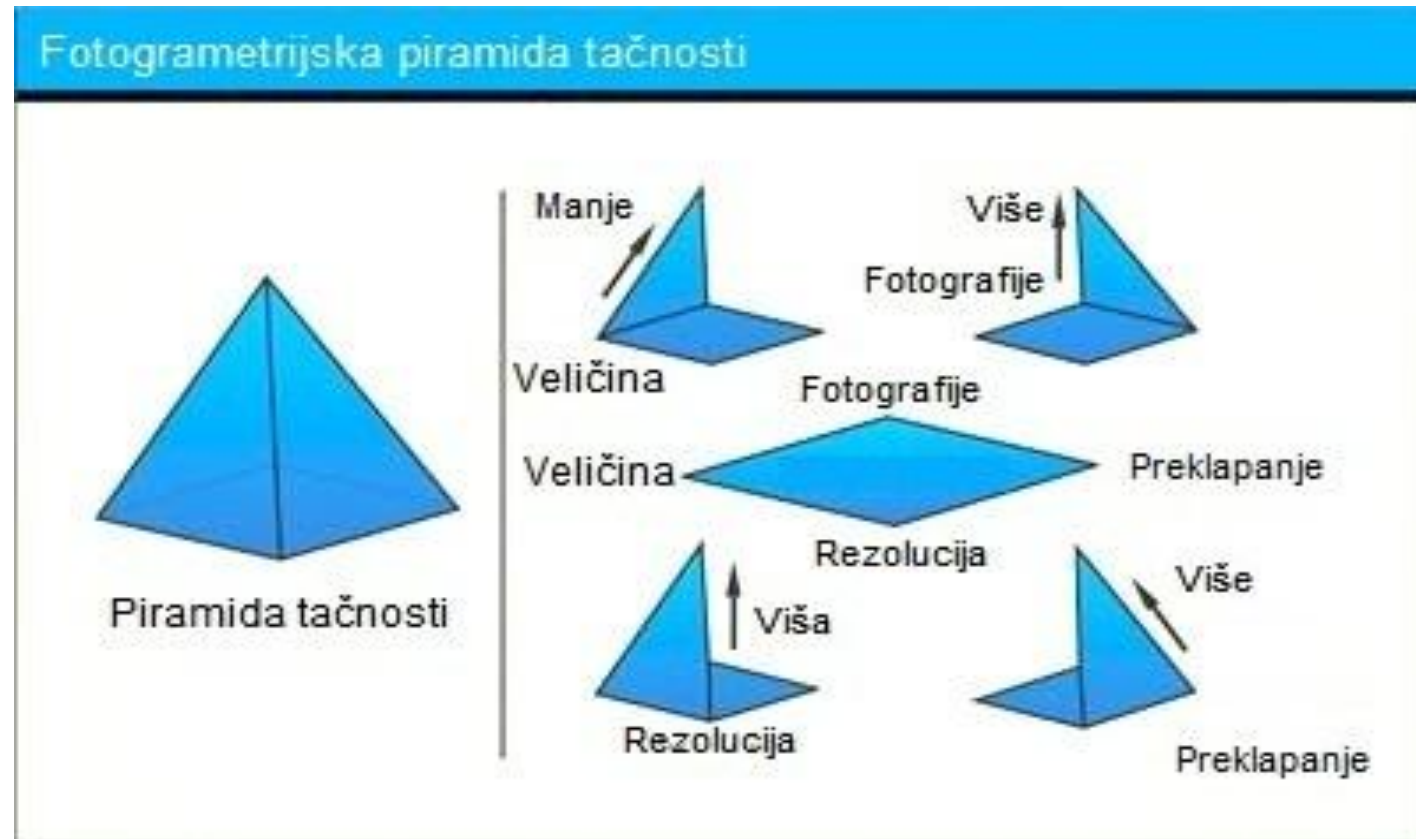
# Opšti princip fotogrametrije

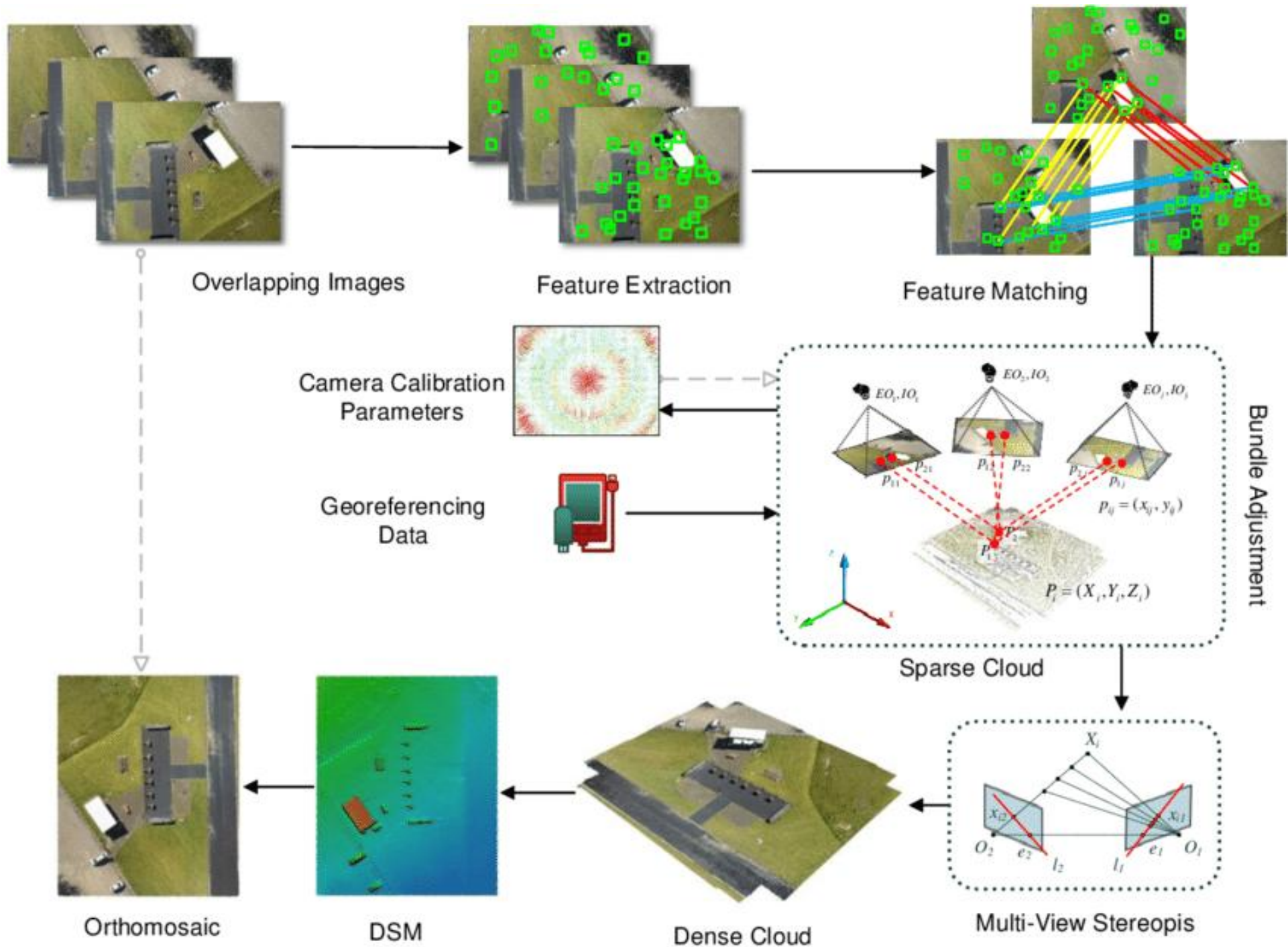


U ovom slučaju su optičke ose paralelne.

# 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





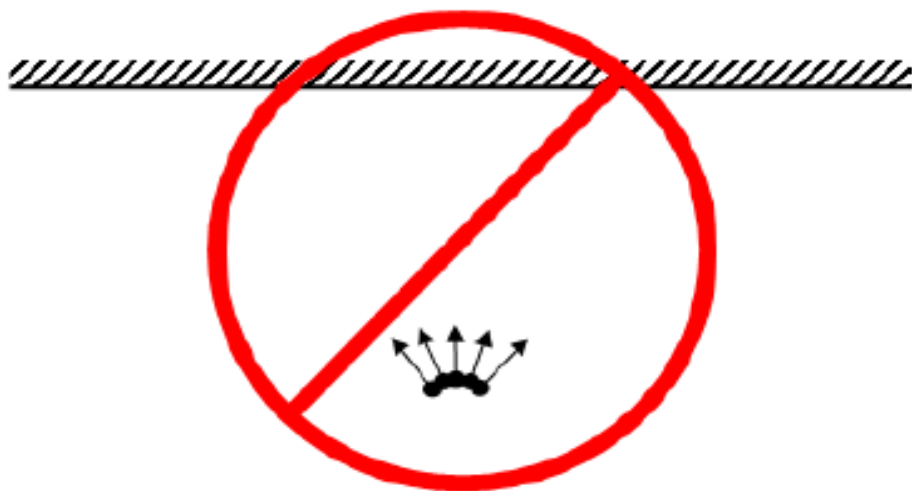
# Karakteristike predmeta za fotografisanje

U osnovne karakteristike predmeta koji se digitalizuje fotogrametrijom spadaju:

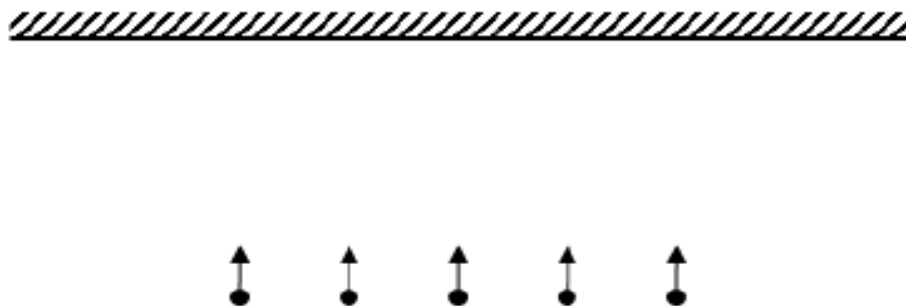
- **Oblik objekta:**
  - zapreminski ili fasadni,
- **Teksturisanost površine objekata:**
  - monotona ili dinamična,
- **Refleksivnost površine objekata:**
  - niska ili visoka.

# Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta

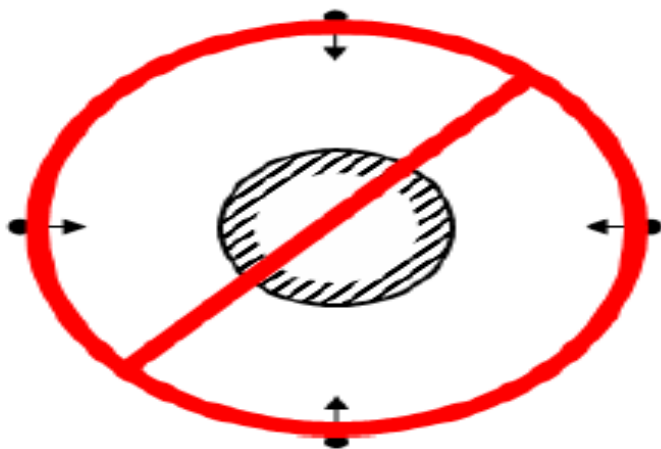
**Fasadno slikanje (netačno)**



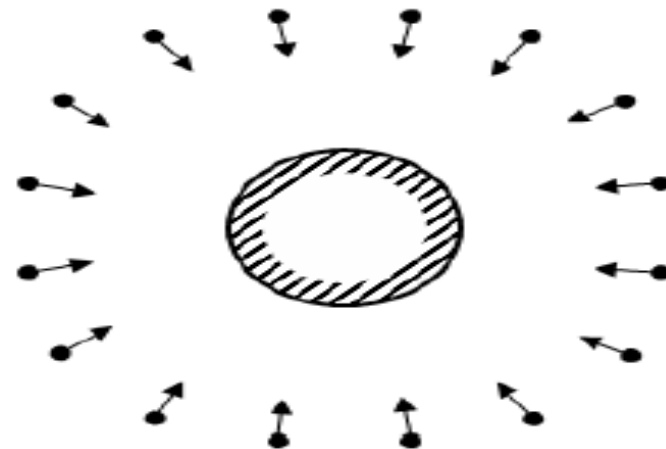
**Fasadno slikanje (tačno)**



**Izolovani objekat (netačno)**

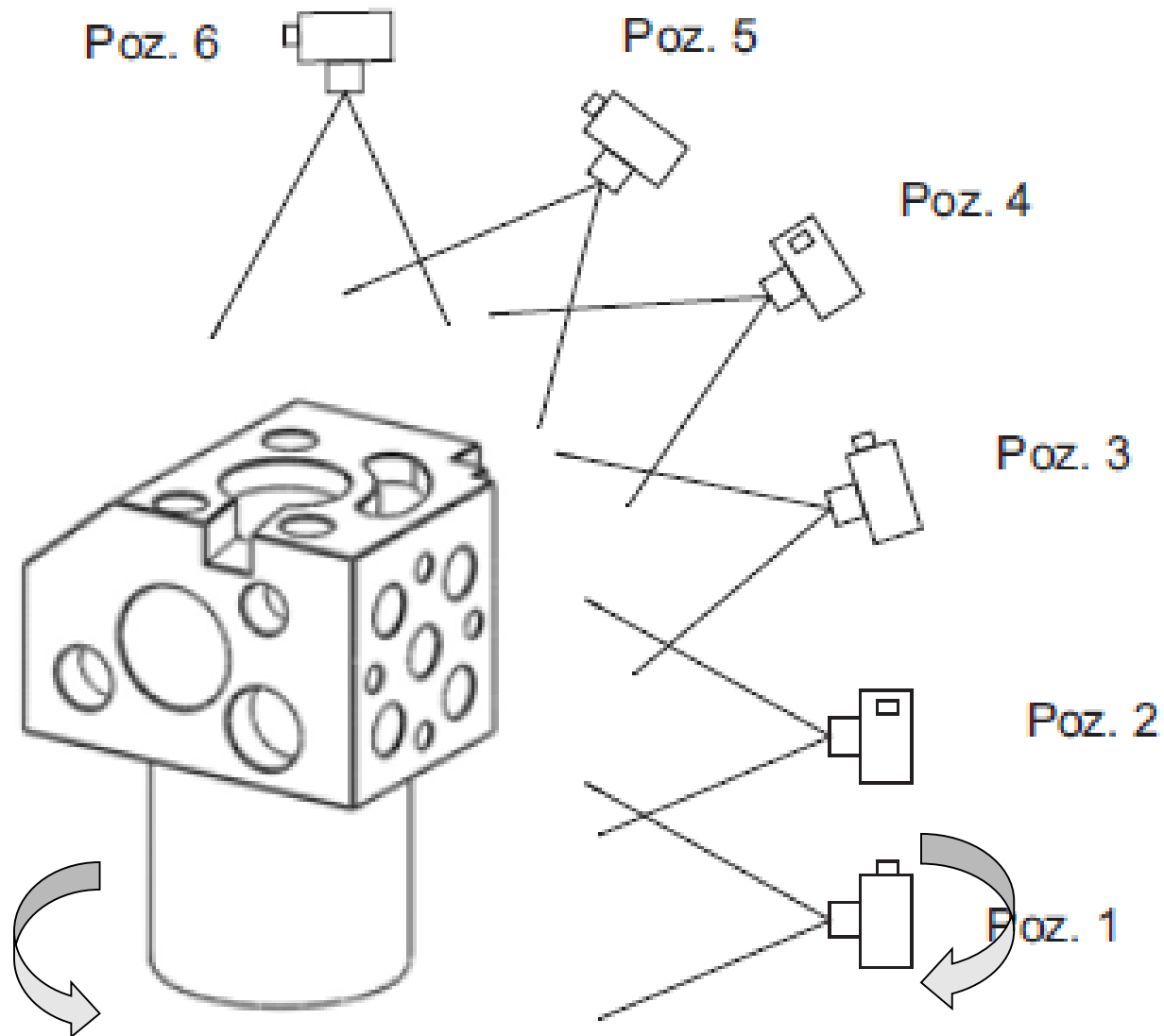


**Izolovani objekat (tačno)**



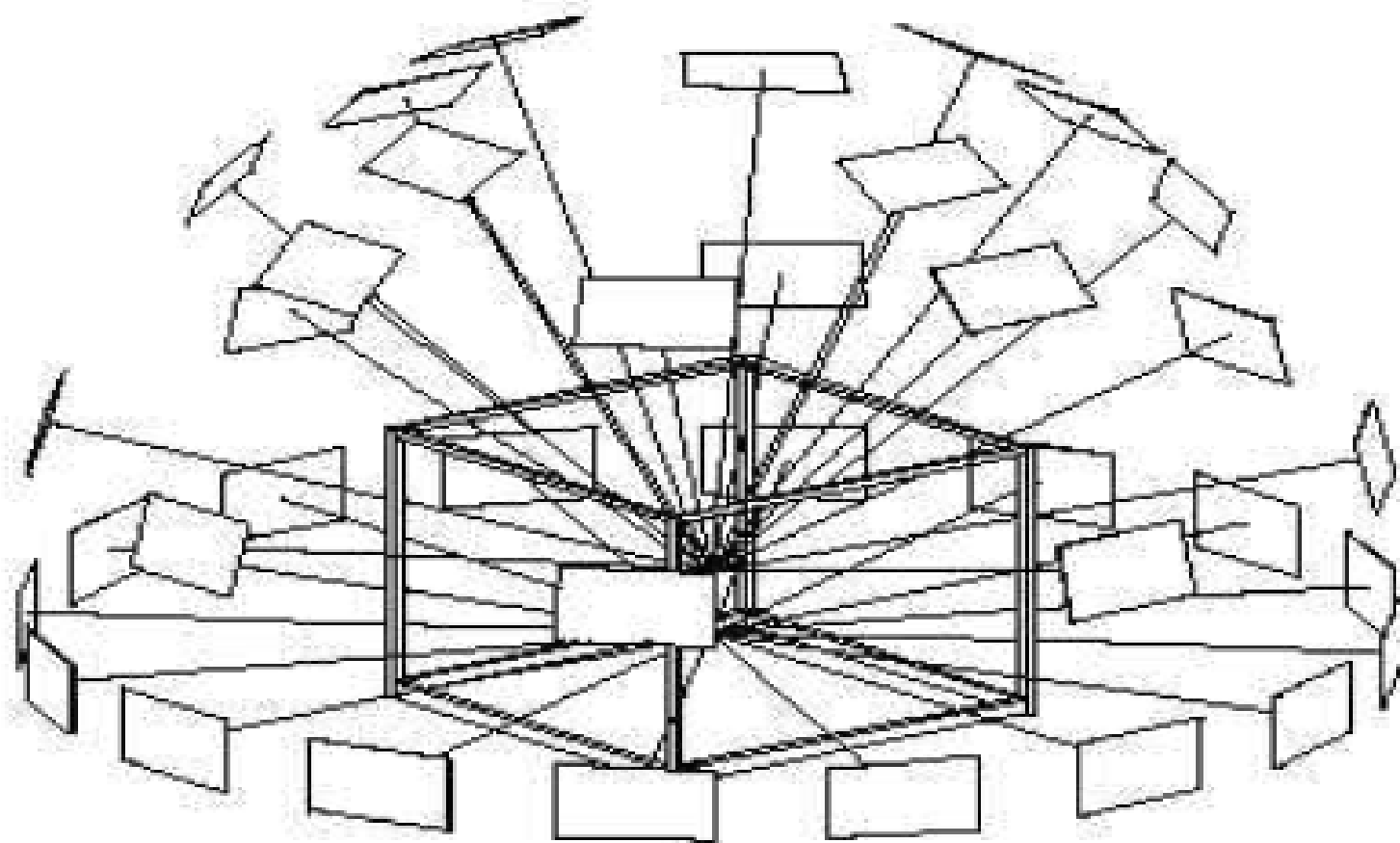
# Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta

## ZAPREMINSKI OBJEKTI



# Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta

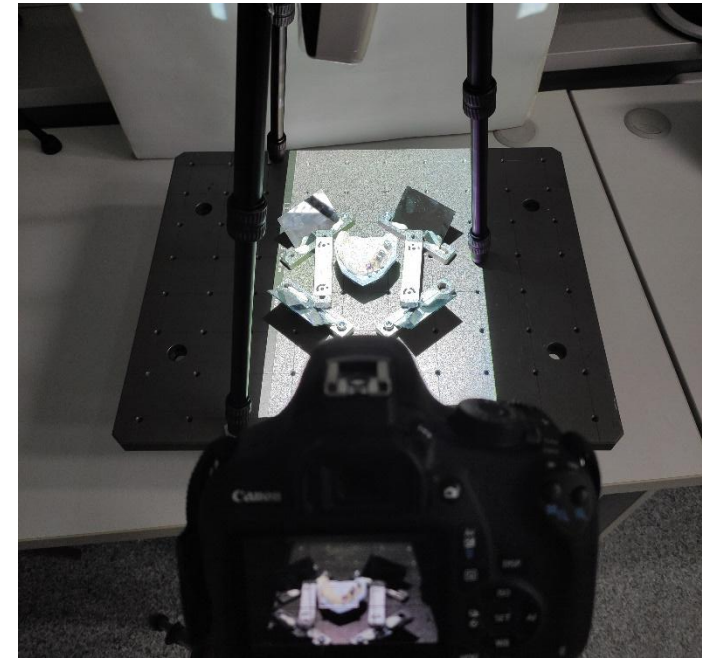
## ZAPREMINSKI OBJEKTI



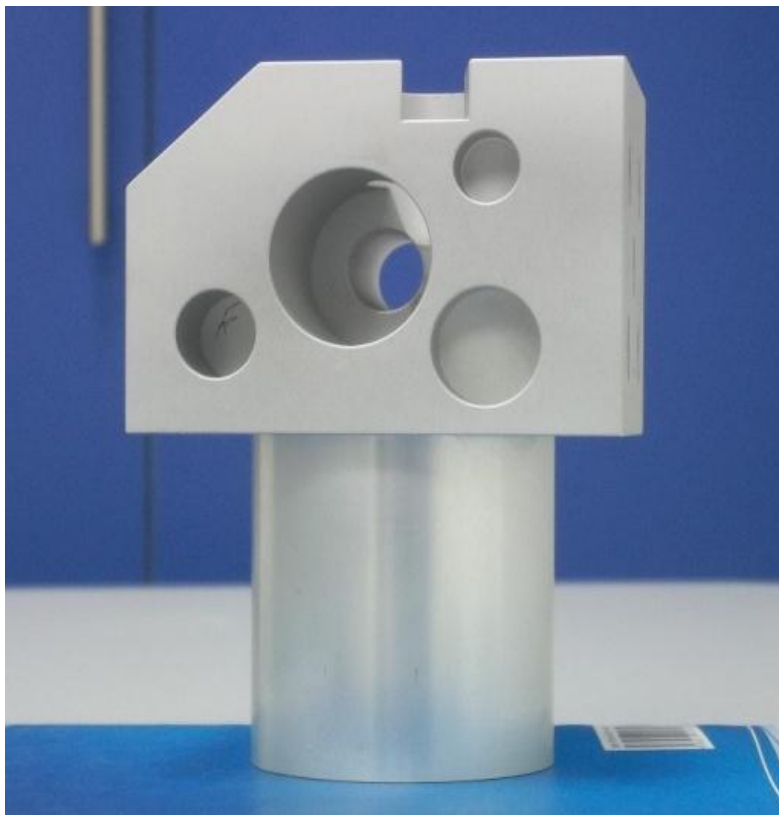
# Karakteristike predmeta za fotografisanje

U slučaju monotone teksturisiranosti površine objekata, primenjuju se dva pristupa:

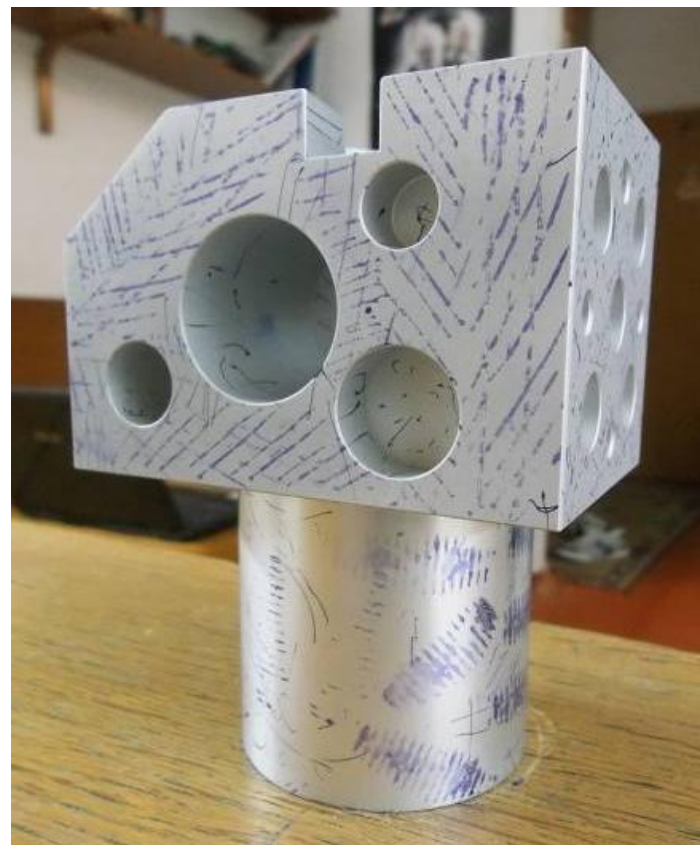
- 1) manuelno nanošenje texture (lepljenjem, premazivanjem, spreisanjem)**
- 2) projektovanje digitalnih tekstura pomoću LCD projektora.**



# Manuelno nanošenje texture

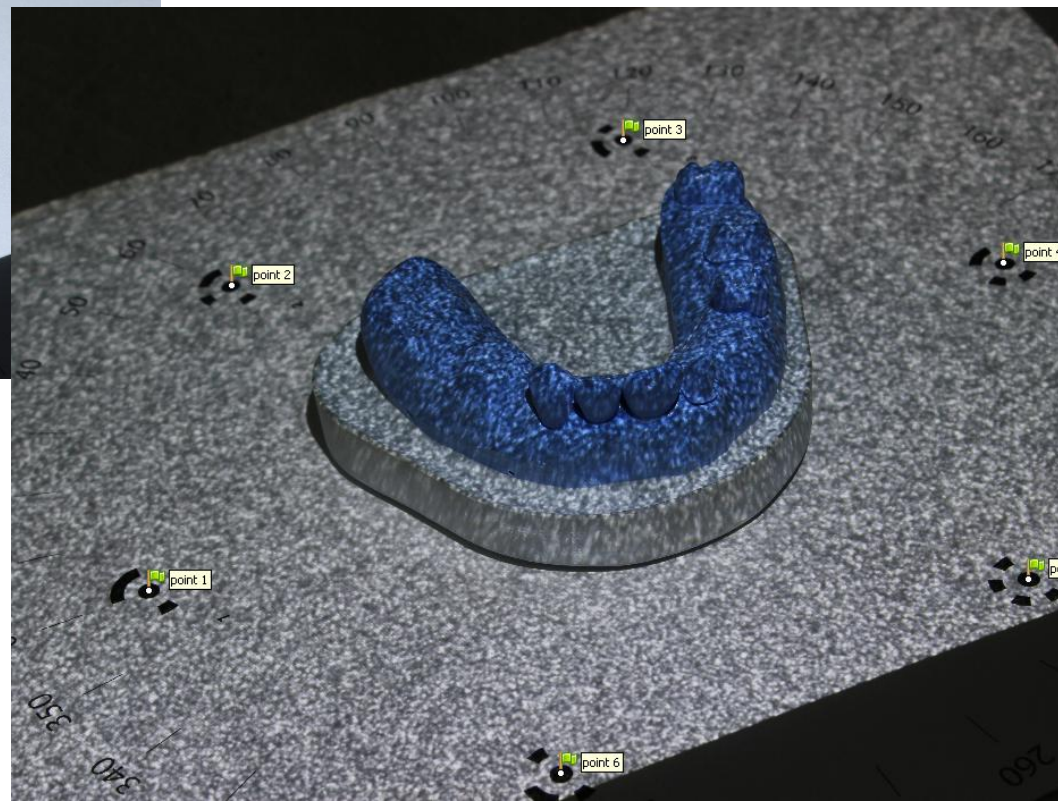
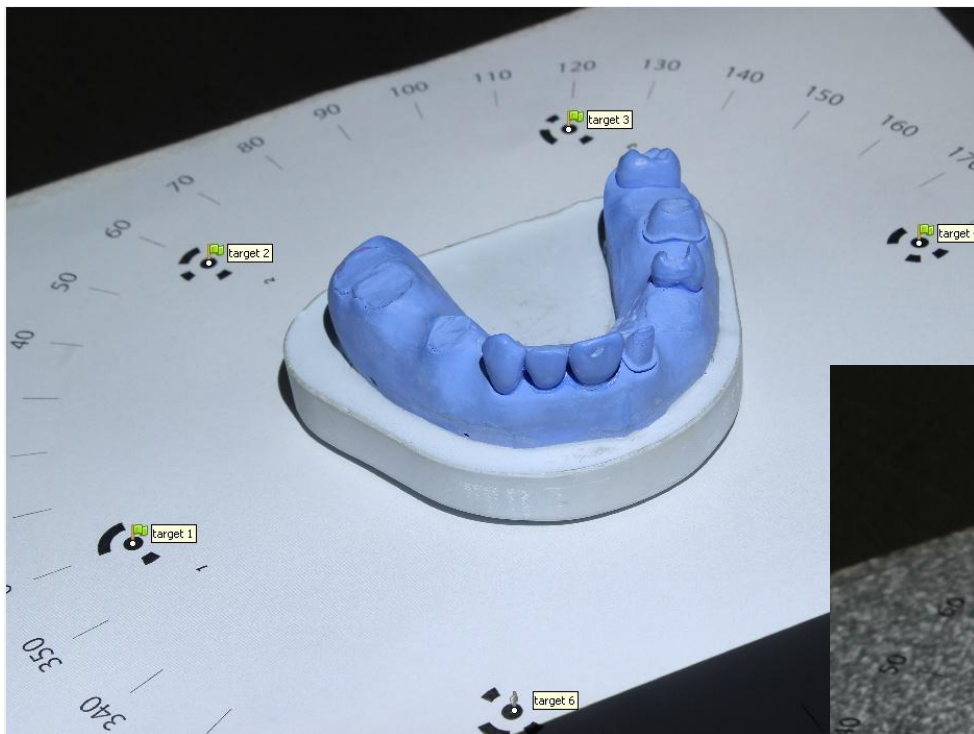


Nepovoljan predmet (visoka refleksija, nema uočljivu teksturu)



Povoljan predmet (smanjena refleksija, uočljiva tekstura)

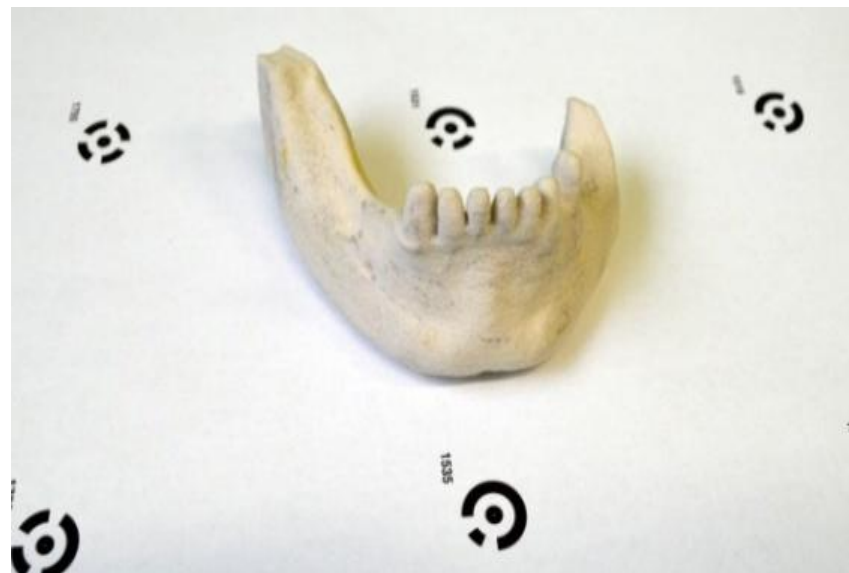
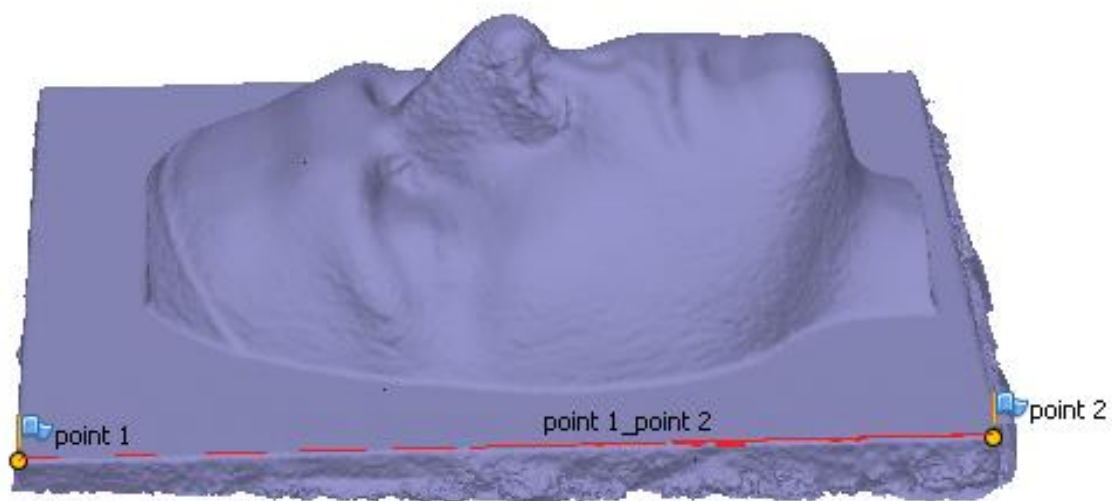
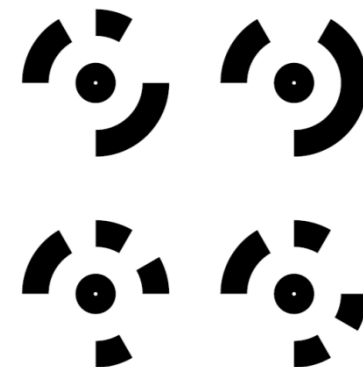
# Digitalno teksturisanje

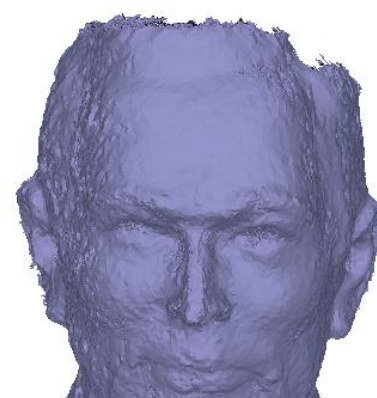
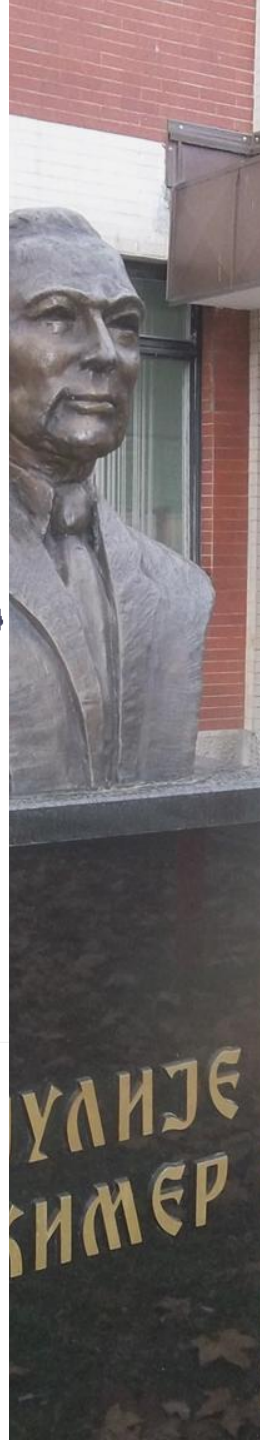
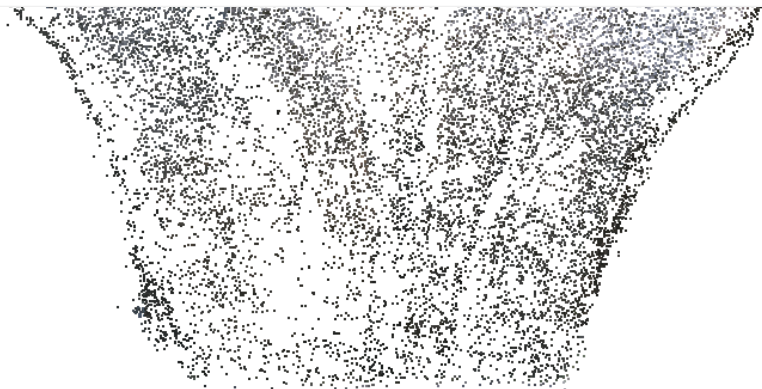
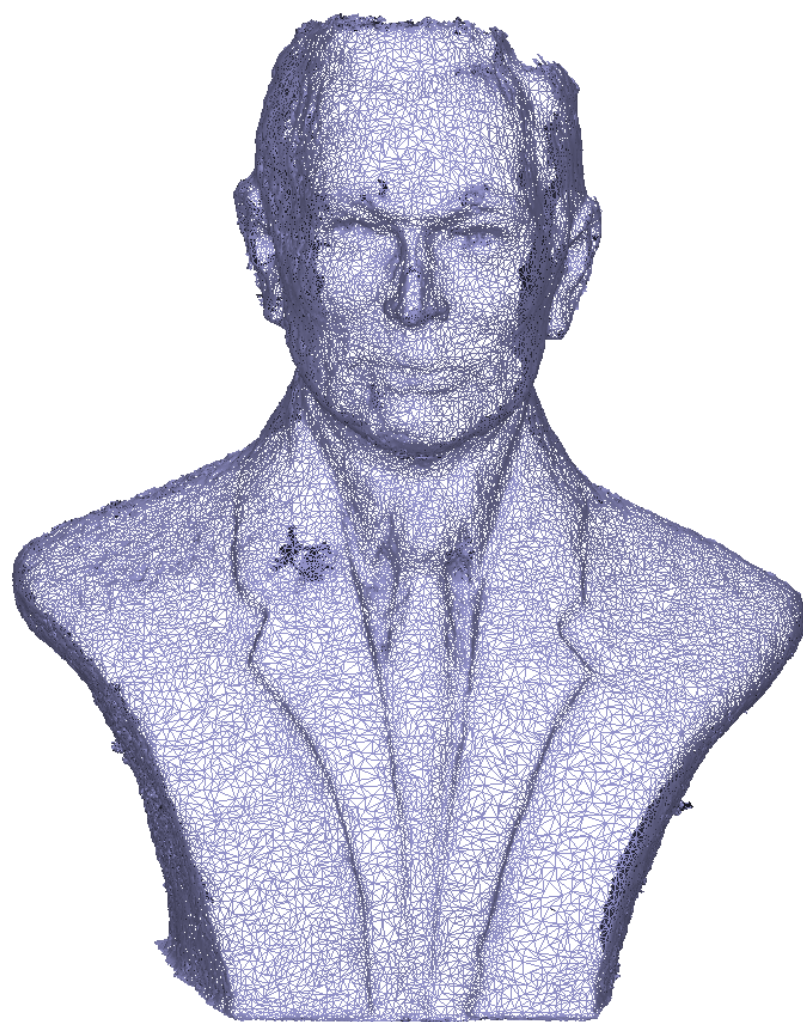


# Skaliranje modela

Dva pristupa za skaliranje (dimenzionisanje) 3D modela:

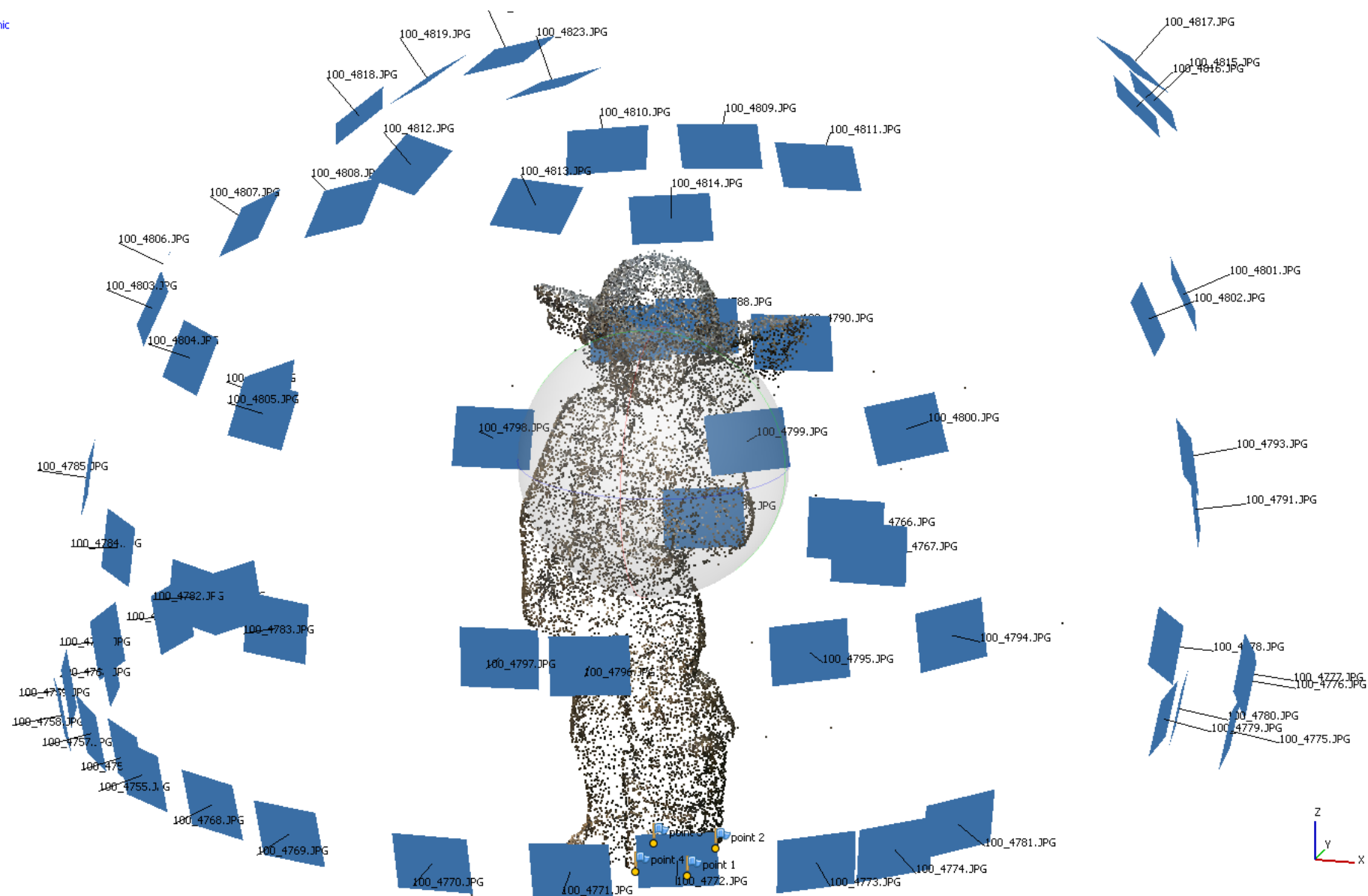
- 1) preko dimenzionisanih obeležja na predmetu i
- 2) pomoću kodiranih markera.







18,596 points





Objekat se vidi u  
realnijem izrazu, ali to nije  
tekstura vec gust oblak  
tacaka u kojem tacke  
sadrze i informaciju o boji  
piksela

