

BESKONTAKTNE METODE 3D-DIGITALIZACIJE

REFLEKSIVNE METODE

Laseriska triangulacija i strukturna svetlost

Vanr. prof. dr Mario Šokac

Metode 3D digitalizacije

```
graph TD; A[Metode 3D digitalizacije] --> B[Pasivne]; A --> C[Aktivne]; C --> D[Kontaktne]; C --> E[Beskontaktne]; E --> F[Refleksivne]; E --> G[Transmisione]; F --> H[Optičke]; F --> I[Ne-optičke];
```

Pasivne

Aktivne

Kontaktne

Beskontaktne

Refleksivne

Transmisione

Optičke

Ne-optičke



Refleksivne metode za 3D digitalizaciju

Optičke

Ne-optičke

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

Optičke metode za 3D digitalizaciju

```
graph TD; A[Optičke metode za 3D digitalizaciju] --> B[Triangulacija]; A --> C[Interferometrija]; A --> D[Aktivna stereovizija]; A --> E[Aktivno (de)fokusiranje]; A --> F[Optički radar]; A --> G[Optički radar];
```

Triangulacija

Interferometrija

Aktivna stereovizija

Aktivno (de)fokusiranje

Optički radar

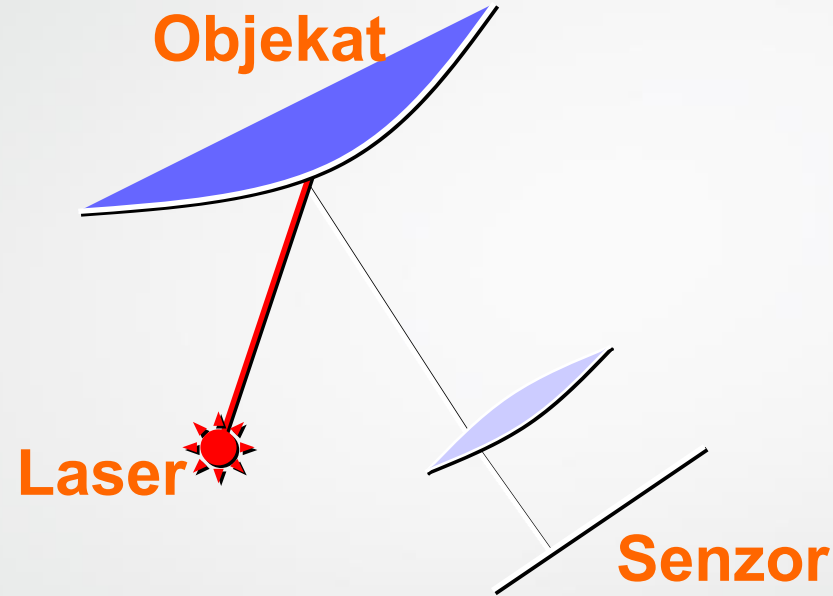
Triangulacija

Laser

Strukturirana svetlost



Laserska (tačkasta) triangulacija



- Triangulacija je metoda koja na osnovu lokacije i uglova između izvora svetlosti i foto-osetljivog senzora (CCD) određuje poziciju (osvetljene) tačke na objektu.
- Izvor svetlosti visoke energije se fokusira i projektuje pod definisanim uglom na željenu površinu.

Laser

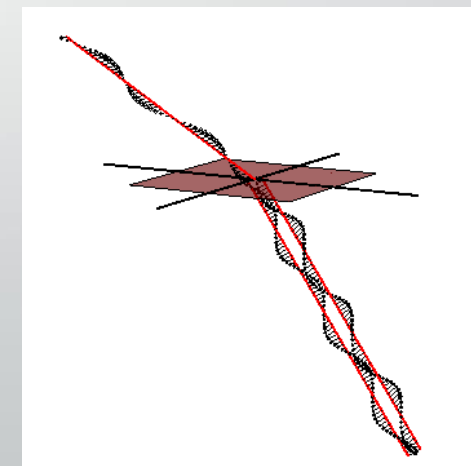
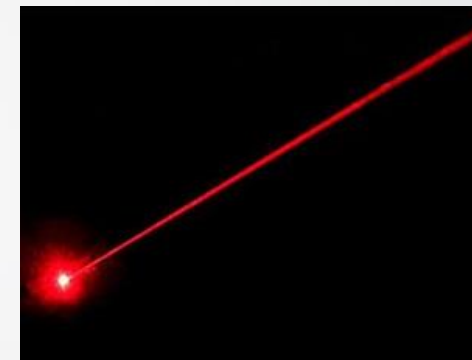
LASER je akronim od engleskog naziva Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ili u prevodu na srpski „pojačanje svetlosti pomoću stimulisane emisije zračenja“.

Laser je izvor svetlosnog [zračenja](#) koji emituje koherentan snop [fotona](#), kao izvor stabilan je po [frekvenciji](#), [talasnoj dužini](#) i snazi.

Za razliku od svetlosti koju emituju uobičajeni izvori, kao što su sijalice, laserska svetlost je uglavnom monohromatska, tj. samo jedne talasne dužine (boje) i usmerena je u uskom snopu.

Snop je koherentan, što znači da su [elektromagnetni talasi](#) međusobno u istoj fazi i šire se u istom smeru.

Otkriven je u [SAD 1960](#). godine.



Klasifikacija lasera

✓ Prema vrsti materijala od kojeg je napravljen izvor:

- Čvrstotelni laseri (engl. solid state laser)
- Gasni laseri
- Poluprovodnički laseri
- Tečni laseri
- Hemijski laseri
- laseri na bojama
- laseri na parama metala
- laser na slobodnim elektronima (engl. free electron laser).

✓ Prema režimu rada:

- Kontinualni
- Impulsni laser

✓ Prema oblasti spektra u kojoj emituje svetlost:

- Laseri u vidljivom delu spektra
- Laseri u bliskoj infracrvenoj oblasti
- Laseri u dalekoj infracrvenoj oblasti
- X laseri, zračenje u X oblasti

Osnovni elementi lasera

Sastavni delovi lasera su:

- aktivna sredina
- sistem pobude
- rezonator

Čvrstotelni laseri

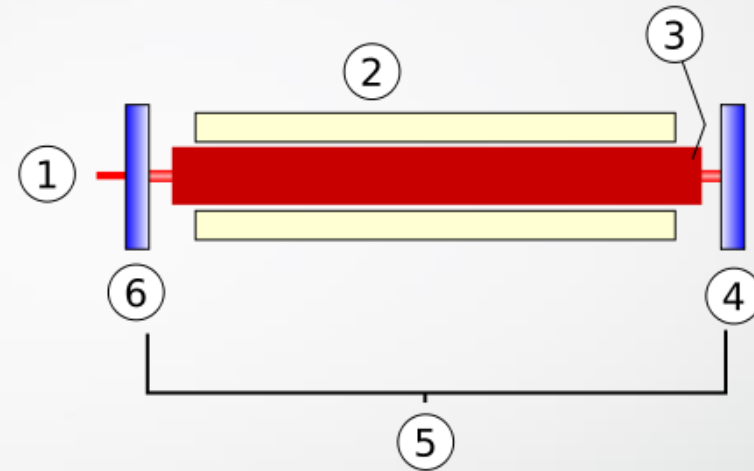
Čvrstotelni laseri imaju jezgro napravljeno od kristala ili amornog materijala, često u obliku cilindra. Ogledala mogu biti izvedena kao tanki srebrni filmovi napareni na krajeve ovog cilindra.

Pobuđivanje atoma od kojeg se sastoji jezgro se obično vrši nekim intenzivnim izvorom svetla (ksenonske bljeskalice, LED diode ili poluprovodnički laseri).

Prvi laser koji je davao vidljivu svjetlost je bio rubinski laser, koji koristi jezgro od rubina kao izvor zračenja. Rubinski laser daje crvenu svetlost talasne dužine 694.3 nm.

Danas se često koristi **Nd:YAG laser**, koji za jezgro ima itrijum aluminijum granat (YAG), dopiranog atomima neodijuma. Nd:YAG laser daje infracrveno zračenje.

Rubinski laser: 1. izlazni laserski snop, 2. optička pumpa, 3. Izvor zračenja (rubin), 4. Visoko reflektivno ogledalo, 5. Rezonator, 6. Propusno ogledalo



Gasni laseri

Gasni laseri imaju laserski medijum u gasovitom stanju, obično se sastoje od cevi ispunjene gasom ili smesom gasova pod određenim pritiskom.

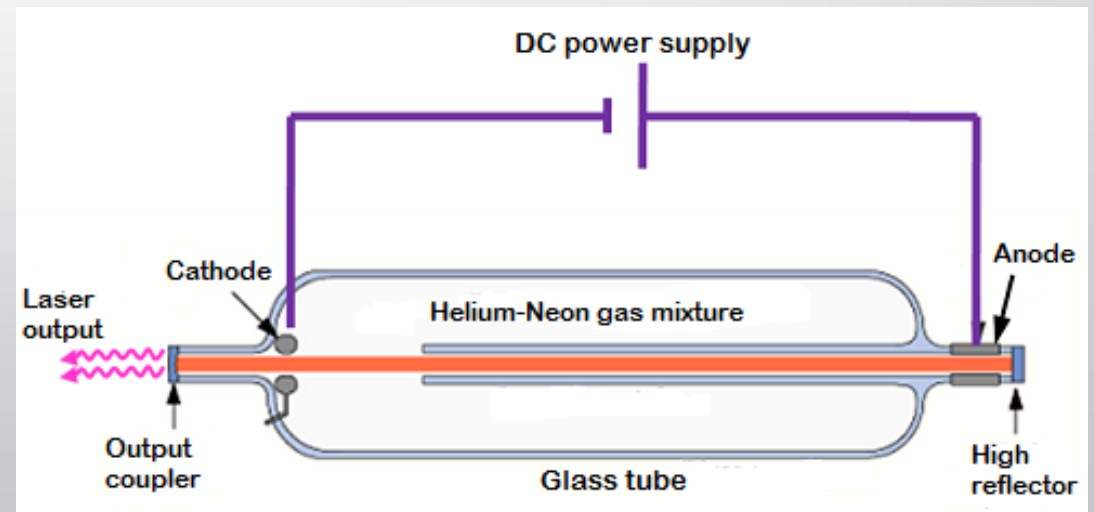
Krajevi cevi opremljeni su ogledalima kako bi se formirao rezonator.

Pobuđivanje atoma gasa se najčešće obavlja električnim pražnjenjima kroz gas unutar cevi.

Gasni laseri se često hlade strujanjem gasa kroz cev.

Najčešće korišćeni gasni laseri su:

- 1) He-Ne laser (Helijum-Neon),
- 2) argonski laser i
- 3) CO₂ laser.

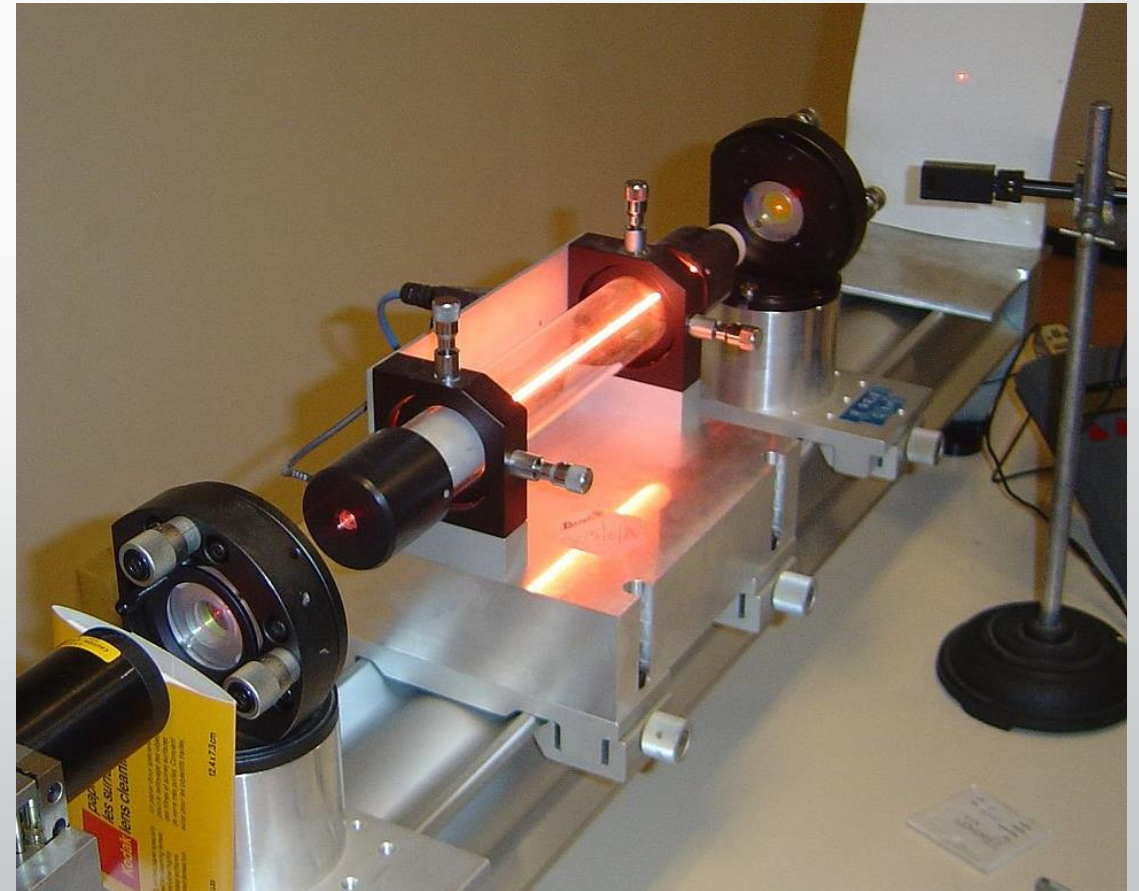


Gasni laseri - HeNe (helijum-neonski) laser

Svetleći snop u sredini slike potiče od svetlosti koja nastaje električnim pražnjenjem (kao u neonskoj lampi).

Taj snop potiče od medijuma za pojačanje laserskog zraka ali nije laserski zrak.

Laserski zrak izleće iz tog medijuma, prolazi kroz vazduh i na zaklonu (u dnu slike desno) ostavlja trag u obliku crvene tačkice.



Laseri na bojama

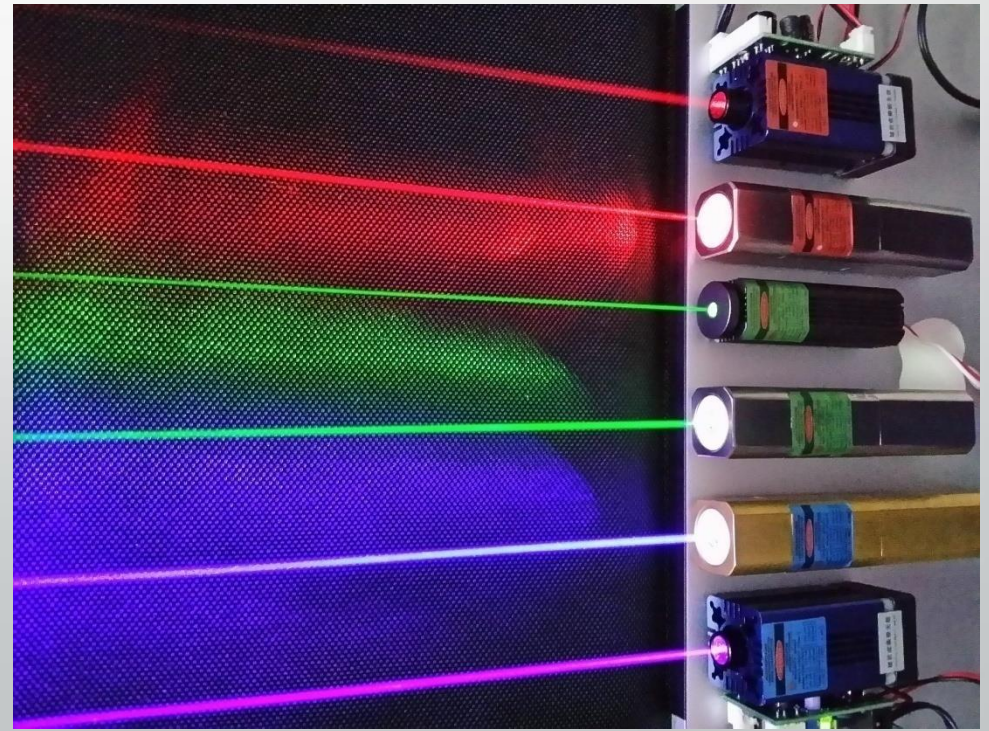
Laseri na bojama koriste određena organska jedinjenja, koja služe kao aktivni laserski medijum.

Kod ovih jedinjenja, energetske nivoima se može manipulirati:

- električnim poljem,
- magnetskim poljem,
- temperaturom ...

zbog čega je moguće podesiti laser za rad na odgovarajućoj talasnoj dužini.

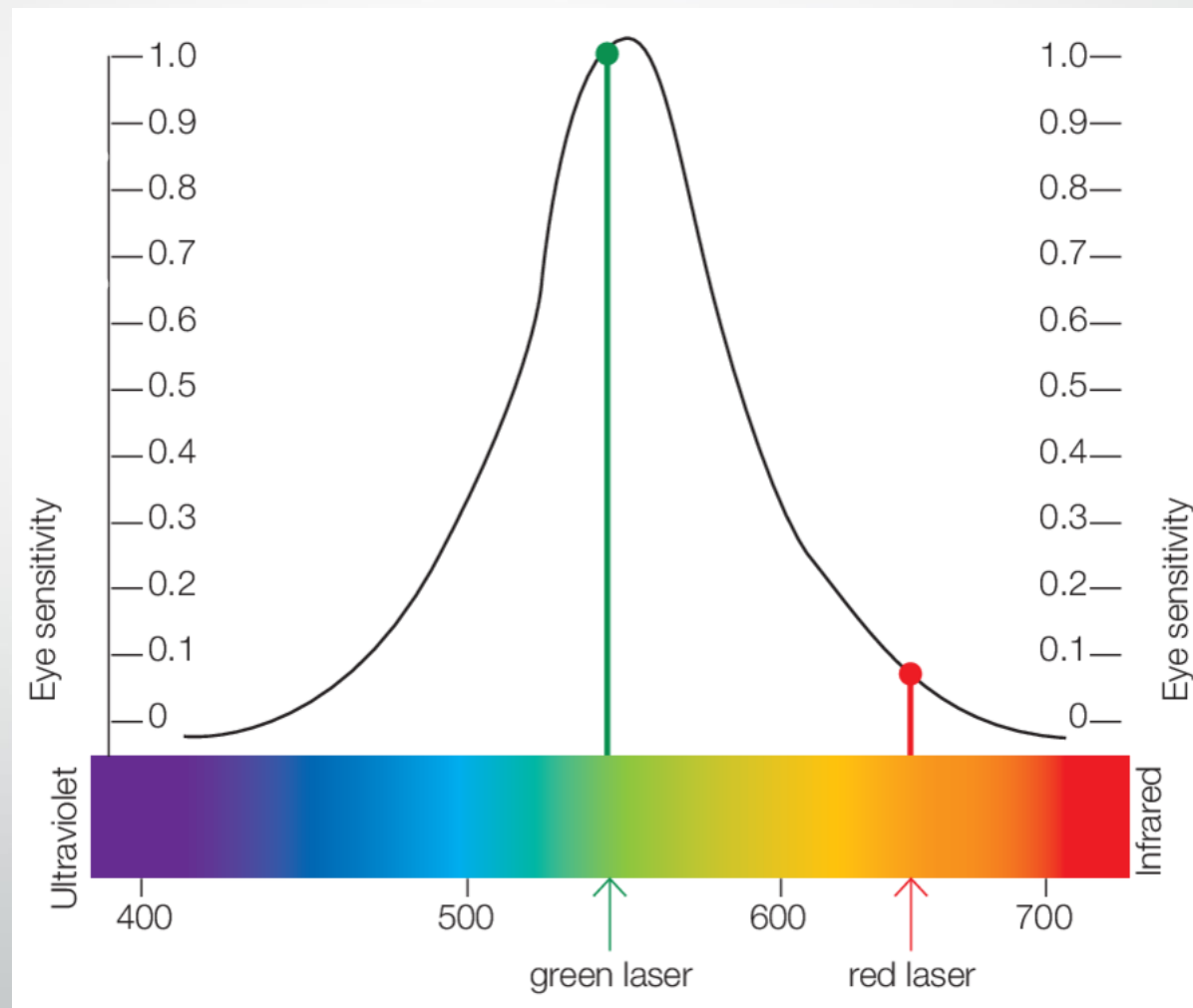
Pobuda molekula se obavlja pomoću nekog drugog lasera.



TALASNE DUŽINE SVETLOSTI

Ljudsko oko je osetljivo na svetlost u rasponu od oko 711 nm (**crveno**) do 389 nm (**ljubičasto**).

Lasersko svetlo se kreće uglavnom u rasponu od 680 nm (**crveno**) do 529 nm (**zeleno**) te je vidljivo ljudskom oku.



KLASE LASERA

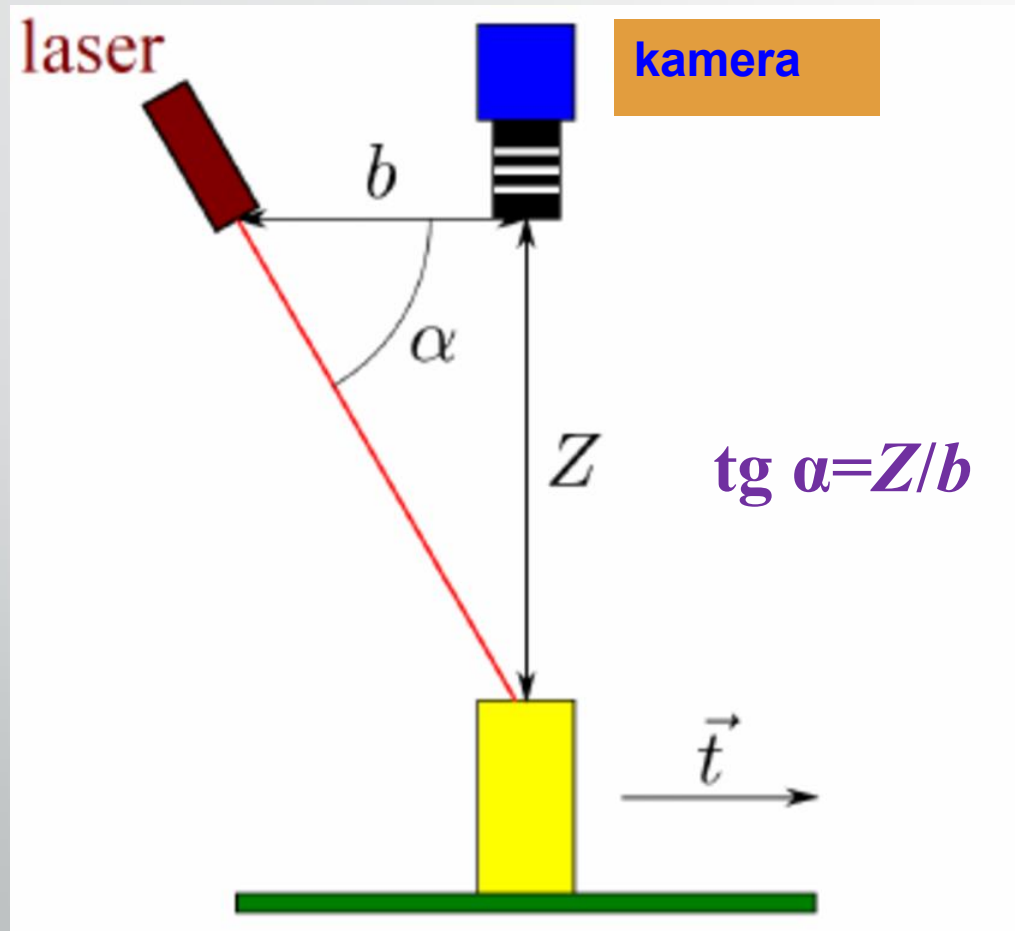
Laseri se u klase dele prema 2 standarda:

- 1) Evropski standard EN 60825-1 i
- 2) Američki standard FDA 1040.10:1.4.97

LASER CLASSES IN ACCORDANCE WITH EN 60825-1

Class	Description
1	Accessible laser radiation is harmless
1M	Accessible laser radiation is harmless without optical instruments (magnifying glass, telescopes)
2	Accessible laser radiation in the visible spectrum (400 nm to 700 nm), is harmless when exposure to it is brief
2M	Like class 2, without optical instruments (magnifying glass, telescopes)
3R	Laser radiation dangerous for the eye
3B	Laser radiation dangerous for the eye, in some cases also for the skin
4	Laser radiation very dangerous for the eye and dangerous for the skin, danger of fire and explosion

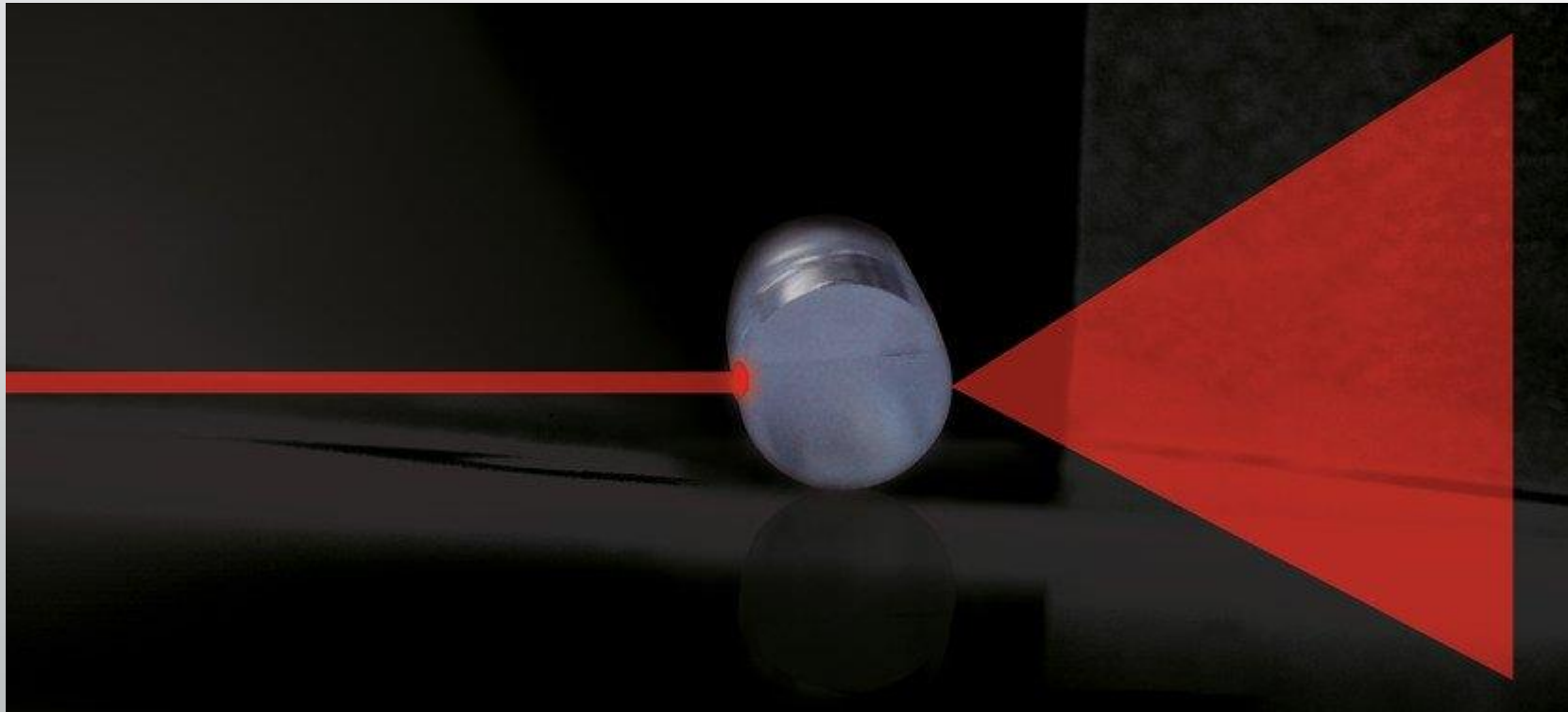
PRINCIP LASERSKE TRIANGULACIJE



- Izvor svetlosti visoke energije (laser) se fokusira i projektuje pod prethodno određenim uglom (α) na željenu površinu.
- Fotoosetljivi senzor (kamera) prikuplja refleksiju sa površine, a zatim se geometrijskom triangulacijom na osnovu poznatih veličina (b i α) izračunava pozicija tačke (Z) na površini relativno u odnosu na referentnu ravan.

Laserska linijska triangulacija

Tačkasti laserski zrak se pomoću **cilindričnog sočiva** refraktuje u lasersku liniju.



Laserska linijska triangulacija

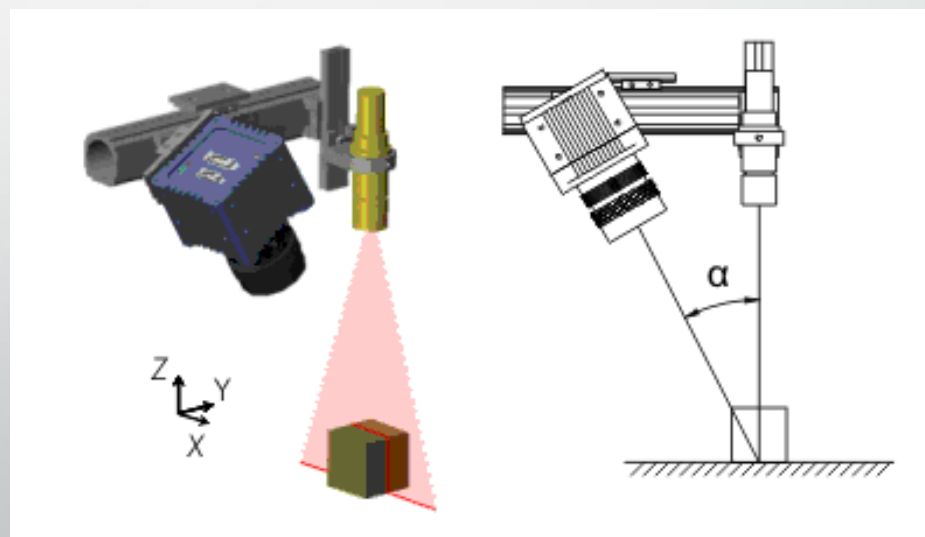
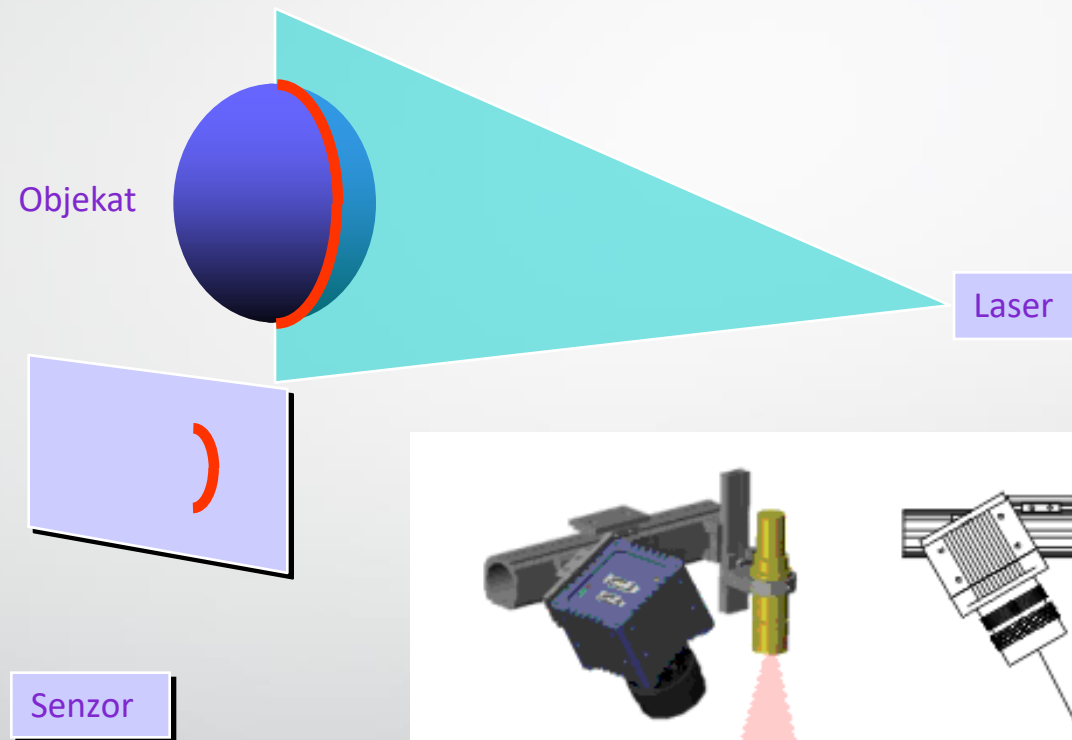


Foto-osetljivi senzori

Senzori u sistemima za optičku triangulaciju se javljaju u različitim oblicima koji se mogu svrstati u jedan od sledećih tipova:

- ✓ *nulto-dimenzionalni senzori* (tačkasti): fotodiode
- ✓ *jedno-dimenzionalni senzori* (linijski): fotodiode sa lateralnim efektom, linearni CCD niz.
- ✓ *dvo-dimenzionalni senzori*: najčešće je to 2D niz CCD senzora

Kod jedno-tačkastog svetlosnog izvora primenjuju se prve dve vrste senzora, dok kada su u pitanju jedno- i više-linijski, kao i više-tačkasti sistemi, primenjuje se treća vrsta senzora, s tim da je moguće primeniti i prve dve vrste, ali je tada neophodno skeniranje tih senzora da bi se obezbedile dodatne dimenzije.

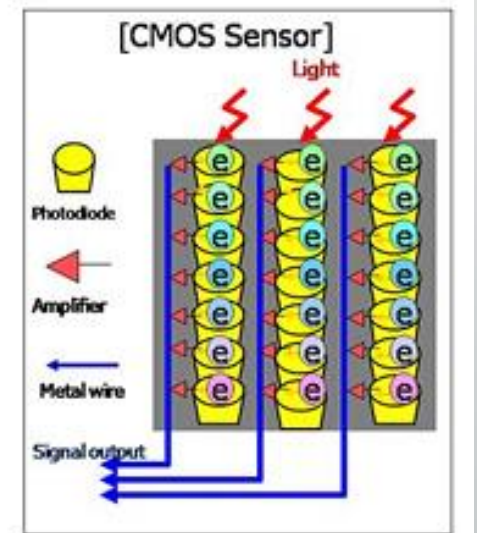
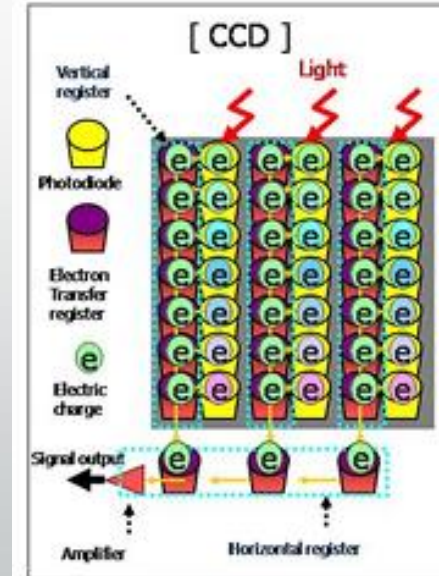
Foto-osetljivi senzori

- Kod jedno-tačkastog svetlosnog izvora primenjuju se prve dve vrste senzora:
 - 0D i
 - 1D senzori.
- Kada su u pitanju jedno- i više-linijski, kao i više-tačkasti sistemi, primenjuje se treća vrsta senzora – 2D, s tim da je moguće primeniti i prve dve vrste, ali je tada neophodno skeniranje tih senzora da bi se obezbedile dodatne dimenzije.



Foto-osetljivi senzori

- Foto osetljivi senzori koji se koriste kod laserske triangulacije, su složene elektronske komponente koje se sastoje od više nizova poluprovodničkih elemenata osetljivih na svetlost.
- Svaki element predstavlja foto detektor, piksel koji pretvara dolazne fotone u elektrone.
- **Dve vrste foto osetljivih senzora:**
 - CCD
 - CMOS



Metode skeniranja:

Metoda skeniranja je takođe bitna karakteristika sistema za triangulaciju i predstavlja stvar izbora.

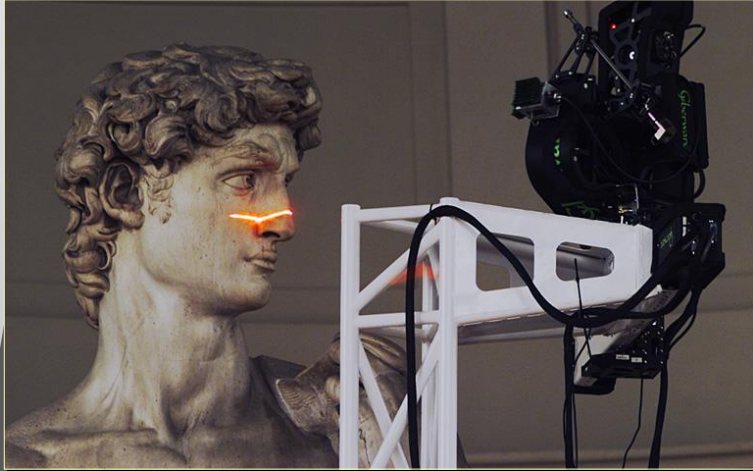
Razlikuje se nekoliko metoda, kod kojih je osnovna razlika u odnosu kretanja objekta i sistema:

- ✓ Metoda kod koje je skener (svetlosni izvor i senzor) stacionaran, dok se platforma (koja nosi objekat) kreće translatorno i rotaciono u okviru vidnog polja;
- ✓ Metoda sa stacionarnim objektom i pokretnim skenerom;
- ✓ Metoda 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).

✓ Metoda kod koje je skener stacionaran, dok je objekat pokretan



✓ Metoda sa stacionarnim objektom i pokretnim skenerom;



✓ Metoda 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).



Osnovne prednosti laserske triangulacije:

- ✓ odlično fokusiranje i sa velike udaljenosti,
- ✓ zahvaljujući jednoznačnoj talasnoj dužini laserske svetlosti, moguće je "prekriti" senzor sa pojasnim filterom za tu talasnu dužinu, čime se smanjuje osetljivost na ambijentalno osvetljenje, a time i mogućnost greške,
- ✓ kod lasera primenjivanih za triangulaciju se ne javlja problem rasipanja toplote, što je kod nekoherentnih svetlosnih izvora čest slučaj.

Nedostaci primene lasera:

- ✓ pojava takozvanih laserskih pega (randomizirana koherentna interferencija zahvaljujući hrapavosti površine),
- ✓ potreba za specijalnim zaštitnim merama kod lasera koji rade na vidljivim i ultraljubičastim talasnim dužinama,
- ✓ sporiji proces akvizicije podataka, usled toga što se primenjuje samo za jedno-tačkasto ili jedno-linijsko skeniranje (po jednom merenju se kod jedno-linijske laserske triangulacije mogu dobiti podaci za oko 512 tačaka).

Perceptronov najnoviji Helix HDR (High Dinamic Range) senzor proizvodi tanji laserski zrak i nudi veću rezoluciju merenja što je pogodno za 3D digitalizaciju kompleksnijih objekata.

Veća snaga lasera takođe omogućava primenu i **kod visoko reflektujućih metalnih površina.**



P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E

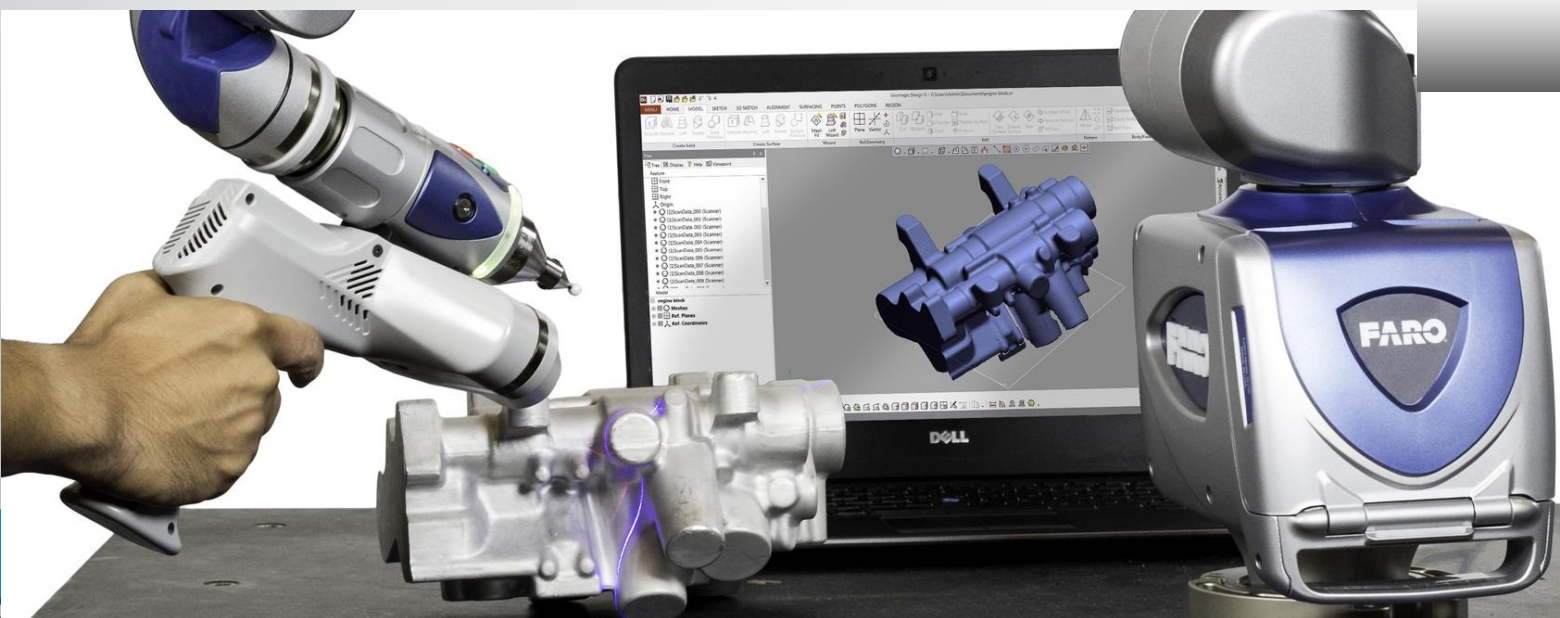
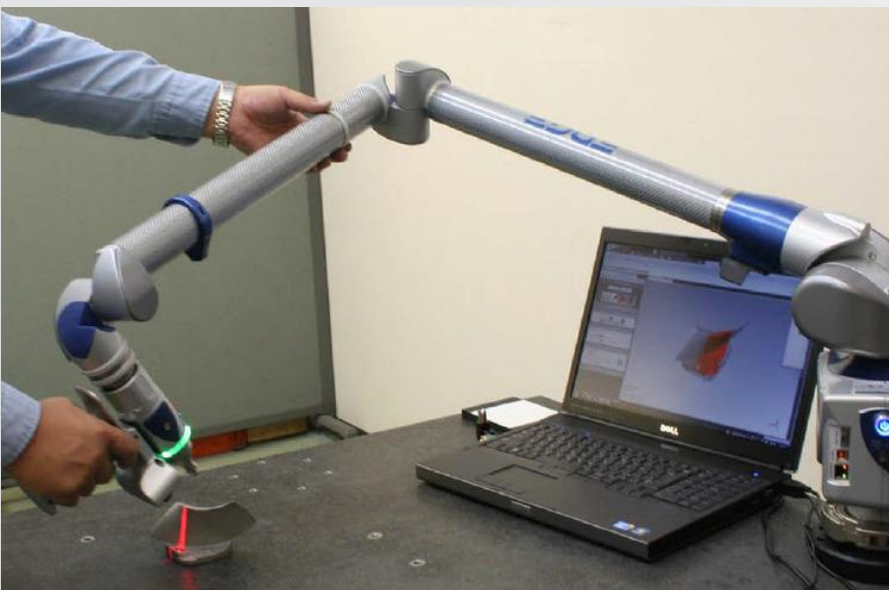


P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E

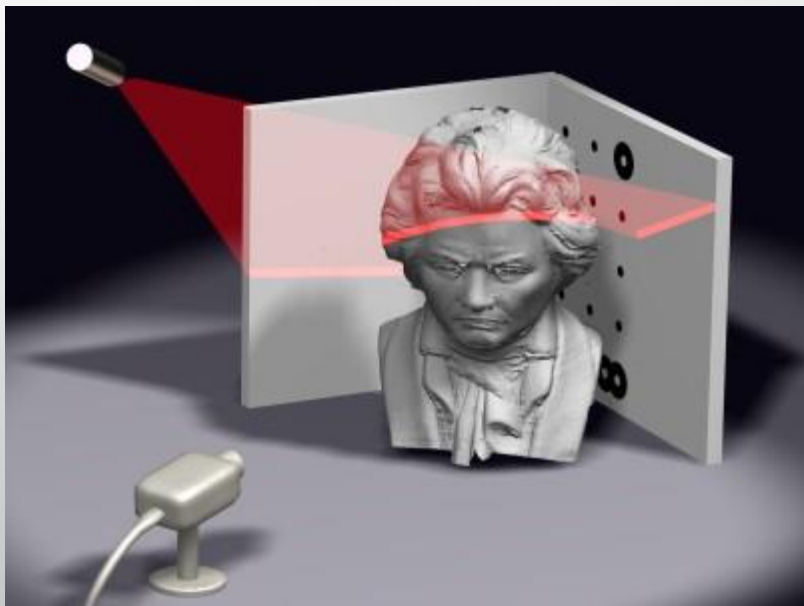
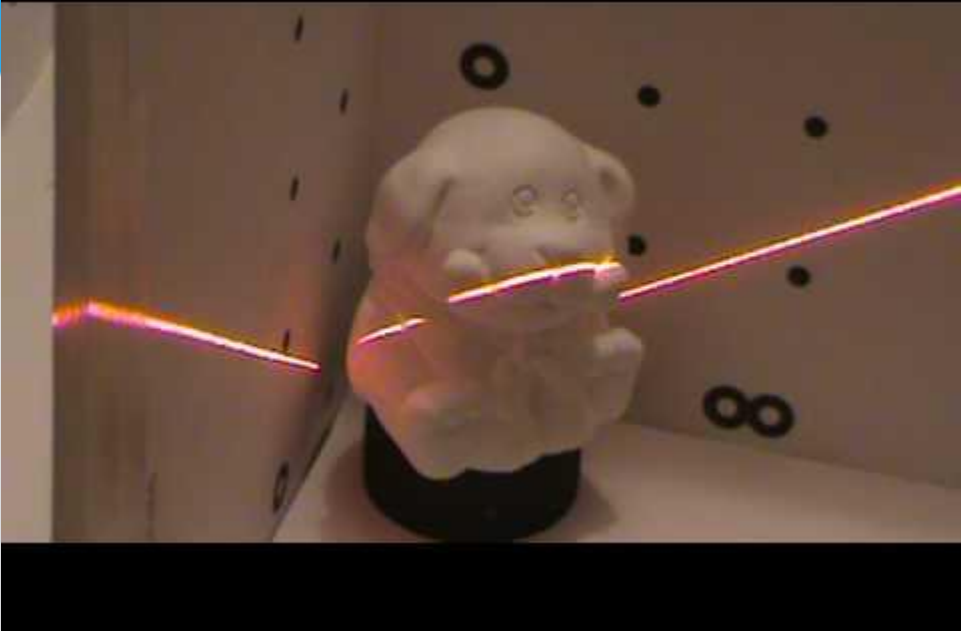


P
R
I
M
E
R
I



P
R
I
M
E
N
E

P
R
I
M
E
R
I



P
R
I
M
E
N
E

P
R
I
M
E
R
I



P
R
I
M
E
N
E

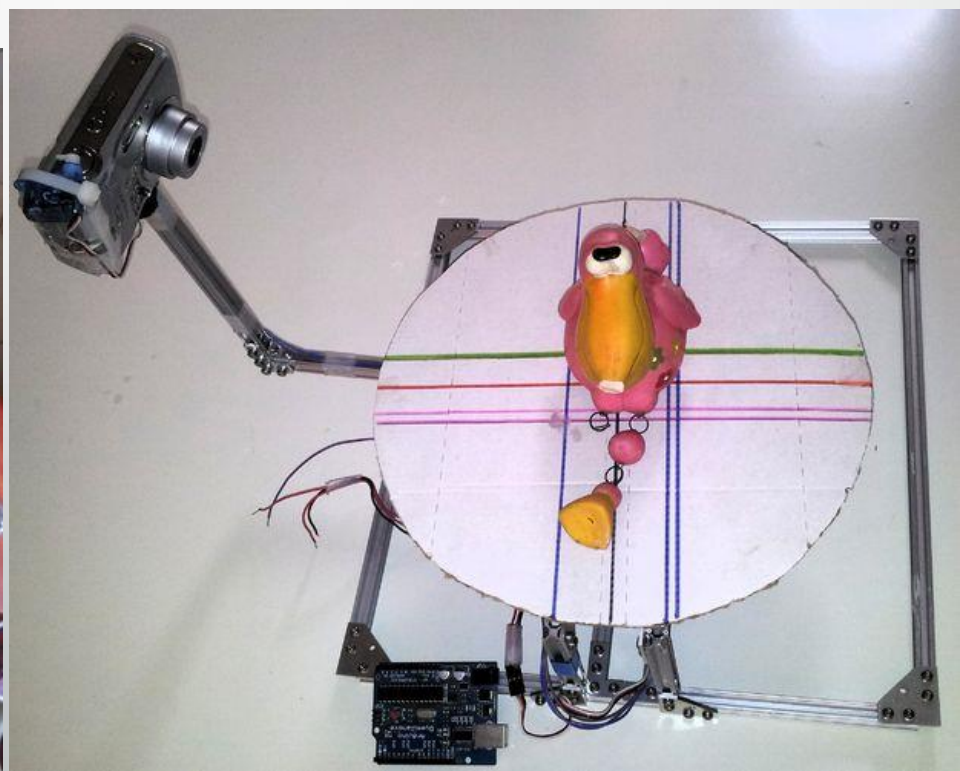
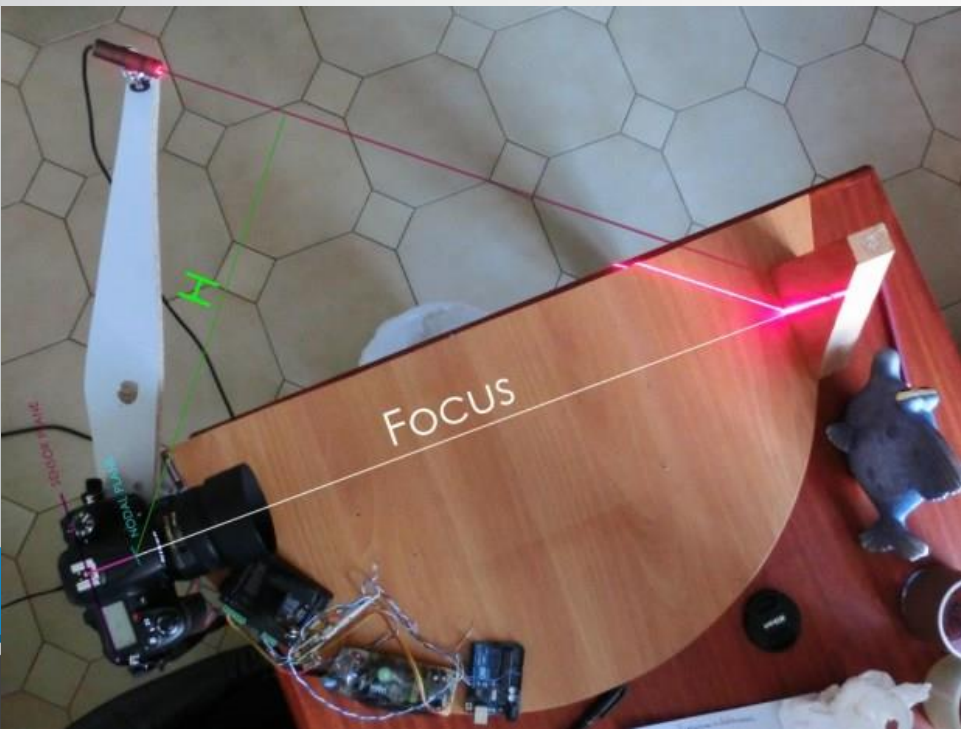
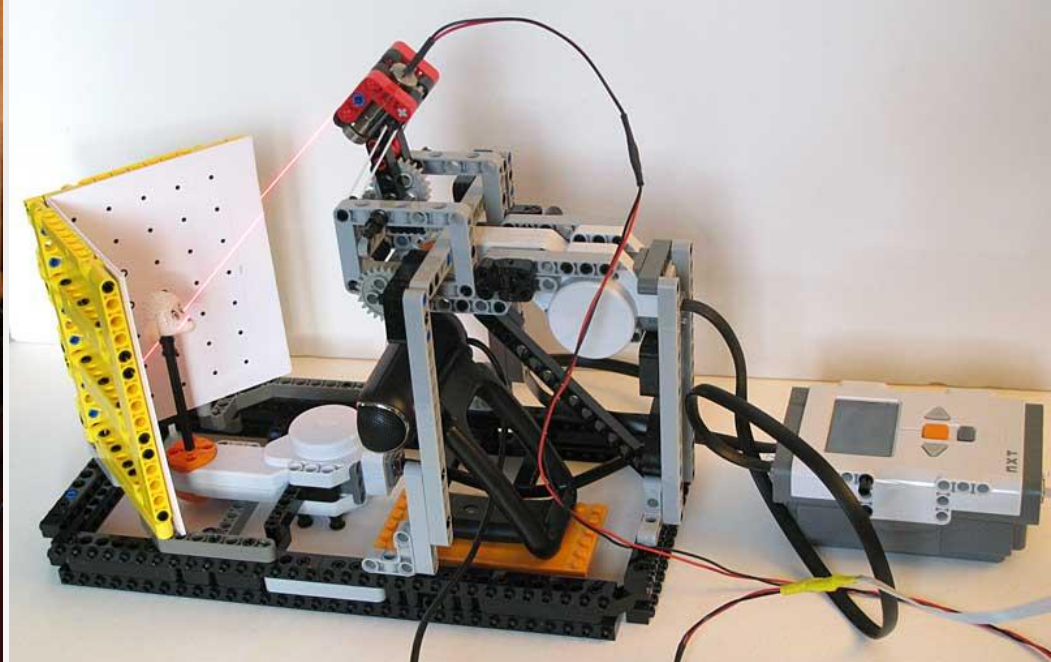
P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E



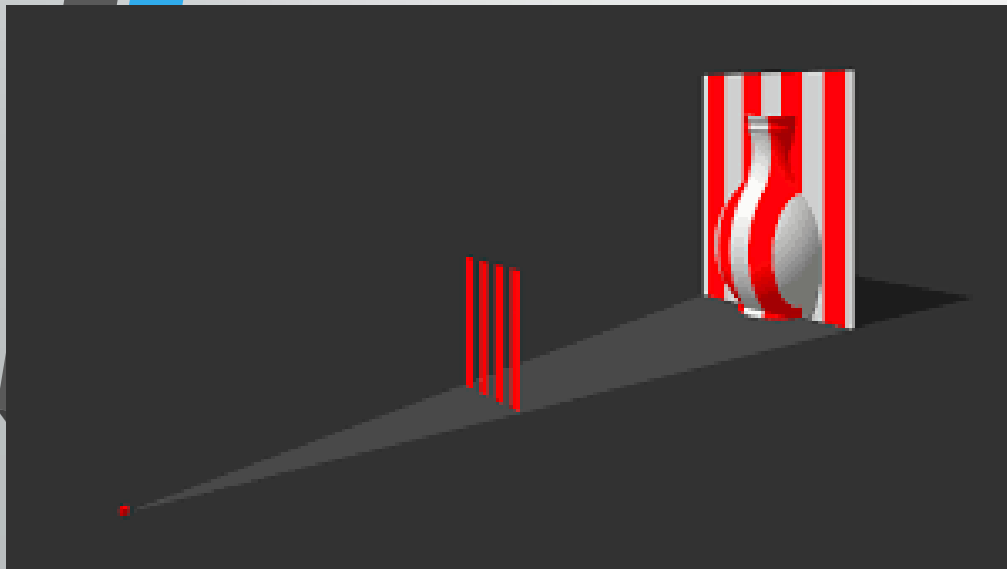
P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E

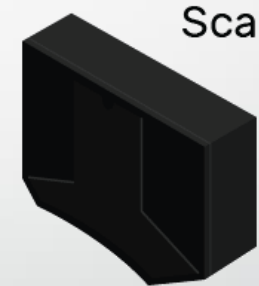


STRUKTURNO SVETLO

- Osnovni princip strukturiranog 3D skeniranja se bazira na **triangulaciji**. Projektovanjem paterna na objekat i snimanjem iz različitih uglova, na osnovu triangulacije se može izračunati dubina i geometrija površine objekta sa velikom tačnošću.



3D Scanning Software



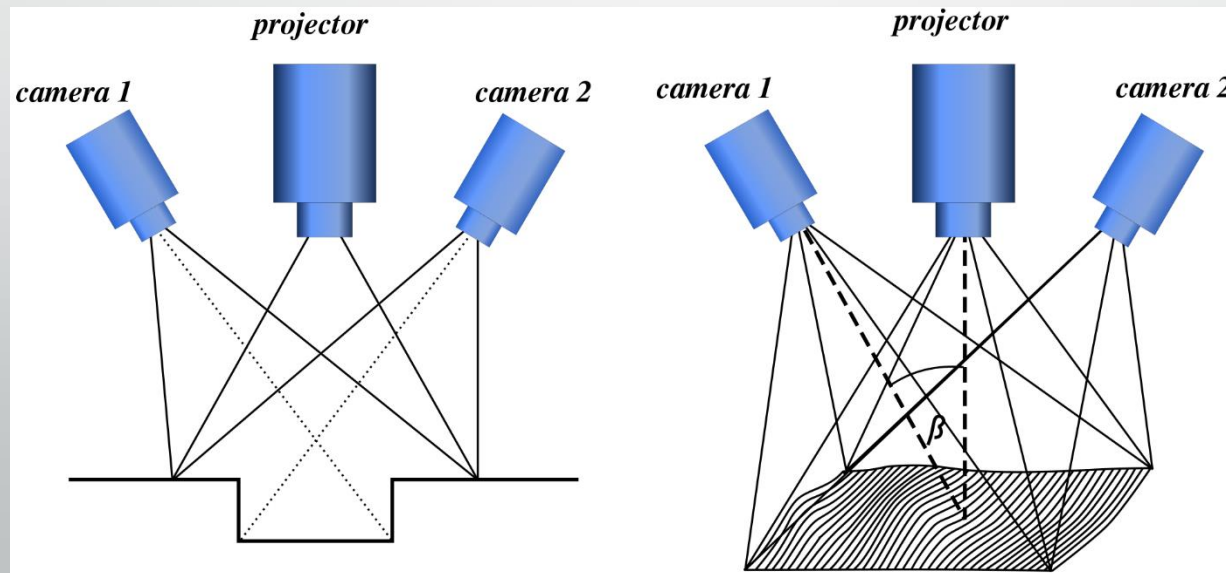
Scan Head



Scan Target

Triangulacija

- Triangulacija koristi geometrijski princip gde se lokacija tačke u prostoru određuje formiranjem trougla do te tačke sa poznatih pozicija.
- U praktičnom smislu, 3D skener projektuje kodirane paterne na predmet.
- Istovremeno, **jedna ili više kamera**, postavljenih na određenu udaljenost od projektora, “hvataju” povratne informacije u vidu svetlosti koja se odbija od površine objekta.
- Ovi podaci se zatim koriste za rekonstrukciju 3D modela objekta.
- Specijalizovani softver obrađuje snimljene slike. On upoređuje deformisani obrazac sa originalnim i izračunava 3D koordinate svake tačke na površini objekta.



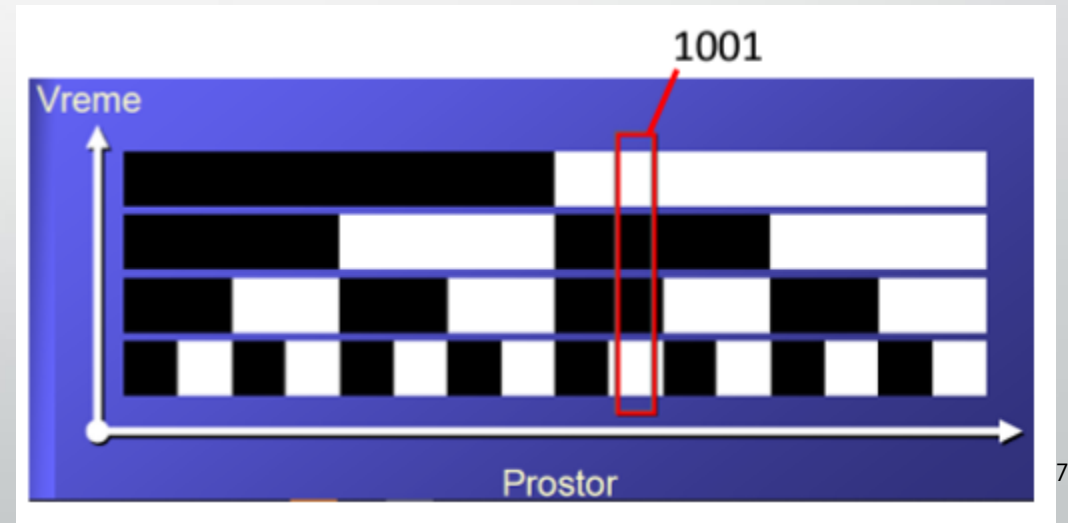
KODIRANJE LINIJA

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)

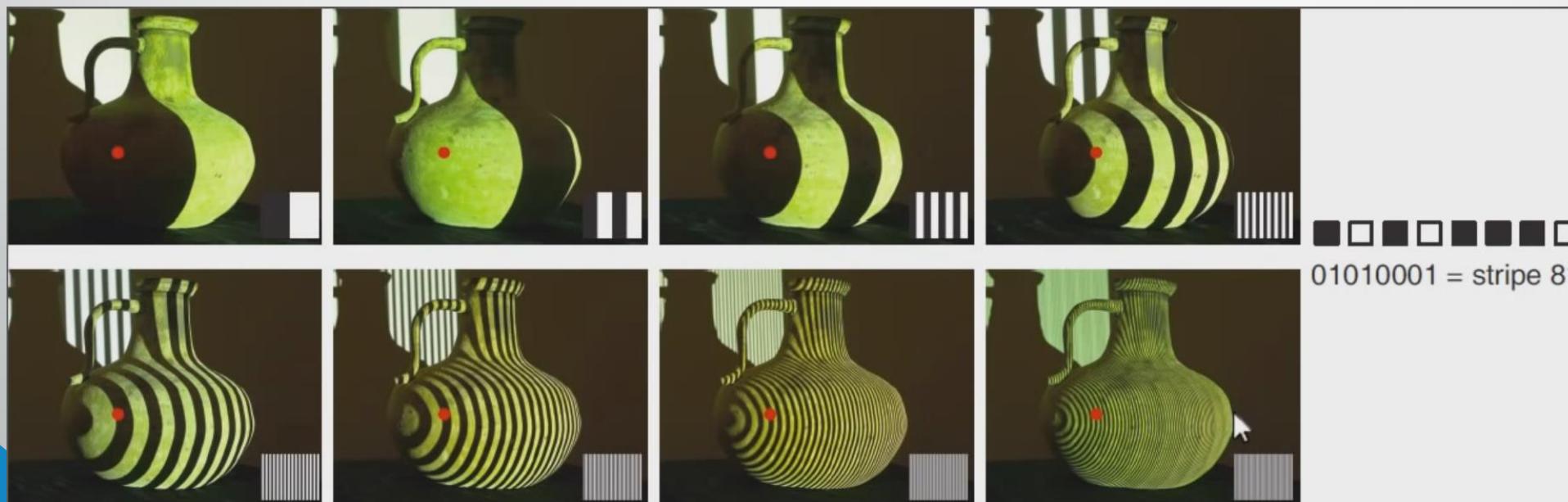
KODIRANJE LINIJA BINARNIM VREMENSKIM PATERNIMA

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



P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E



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.
- Promena u prvom paru: CRNA-CRNA; CRNA-BELA; CRNA-CRNA; CRNA-BELA se pojavljuje samo jednom u celom nizu. To važi za sve kombinacije svih parova linija. Na osnovu toga senzor „prepoznaje“ koja je koja linija.



Svetlosni paterni u boji

- DE BRUIJN-OVA SEKVENCA
- Projektor projektuje patern u boji na objekat, a kamera (foto osetljivi senzor) detektuje reflektovani niz boja.
- 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 paternna (koji predstavljaju CRVENU, ZELENU I PLAVU boju), formira niz boja u okviru kojeg su svake tri uzastopne promene boja jedinstvene.



Svetlosni paterni u boji

- de Bruijn-ova sekvenca
- Projektor projektuje patern u boji na objekat (kornjaču), a kamera detektuje reflektovani niz boja i pronalazi tačke sa površine objekta.



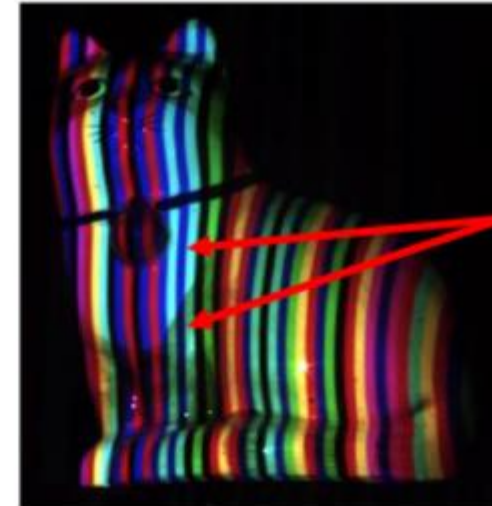
Svetlosni paterni u boji

- de Bruijn-ova sekvenca
- 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.



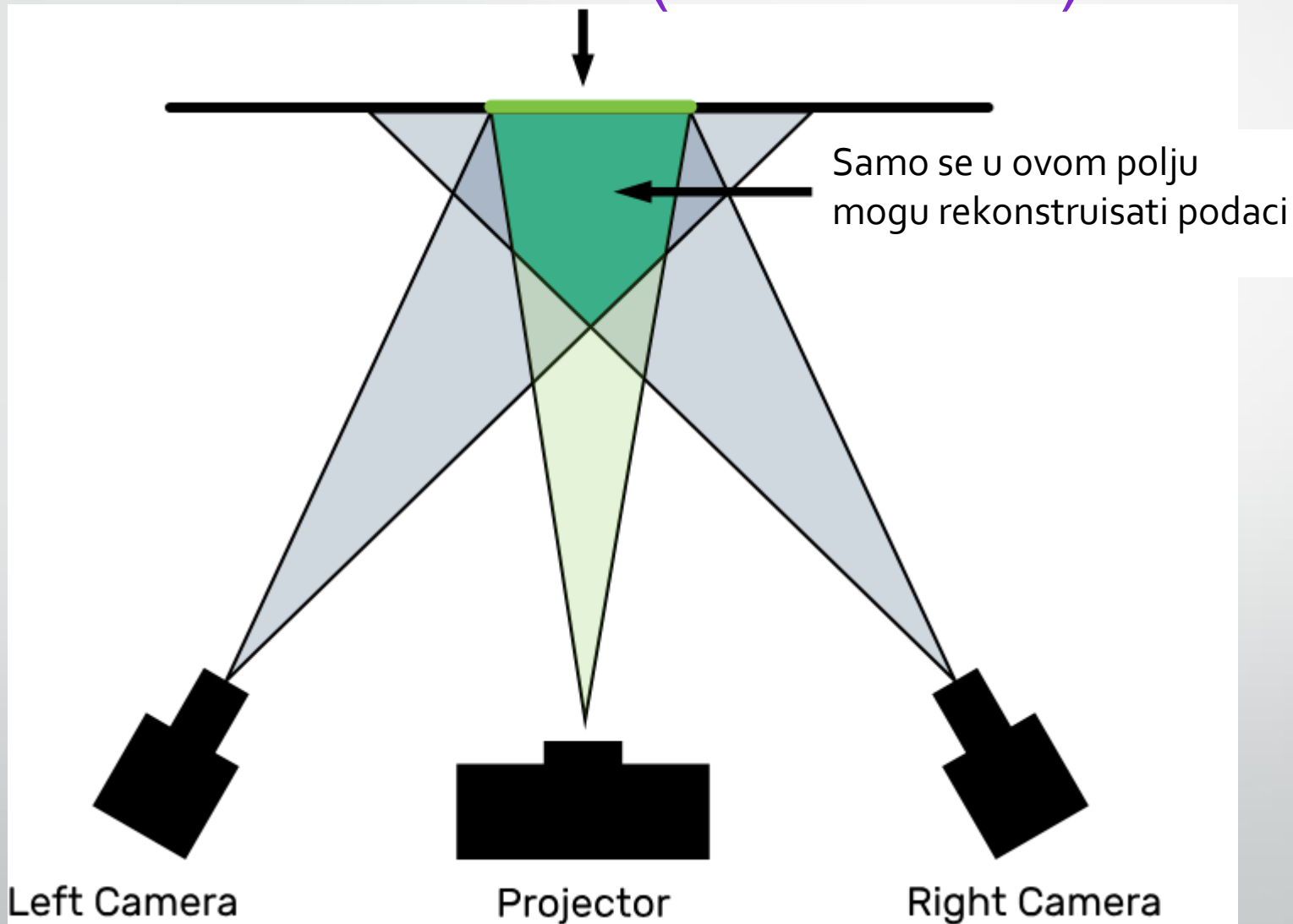
Svetlosni paterni u boji

- Nedostatak ovog načina kodiranja se ogleda u osetljivosti na boju površina objekta.
- 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.



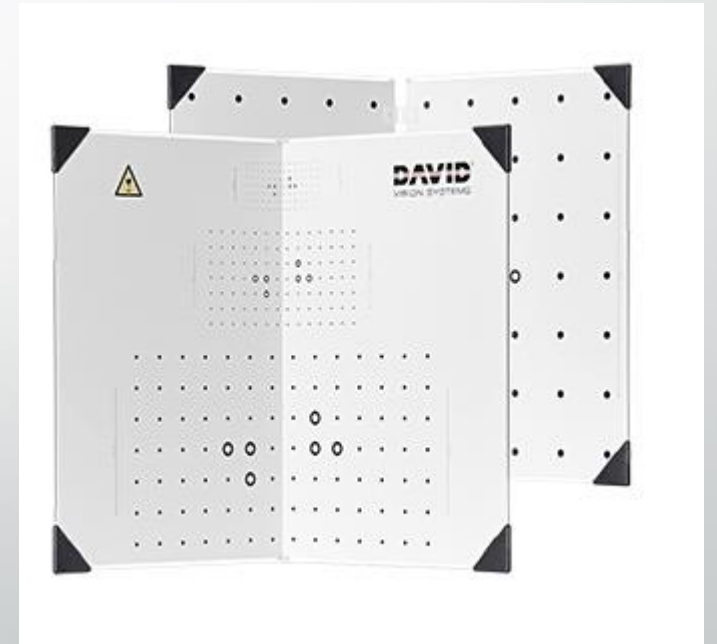
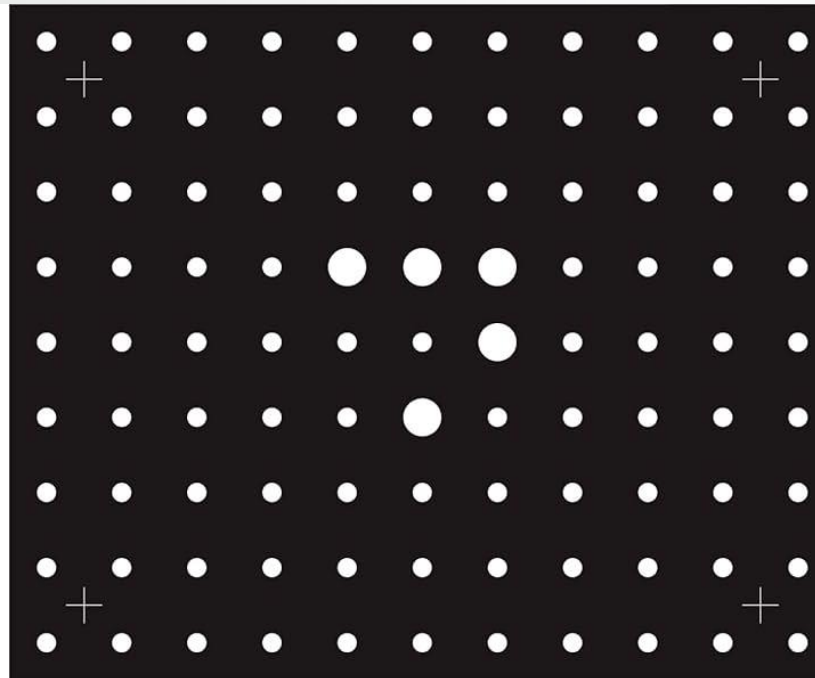
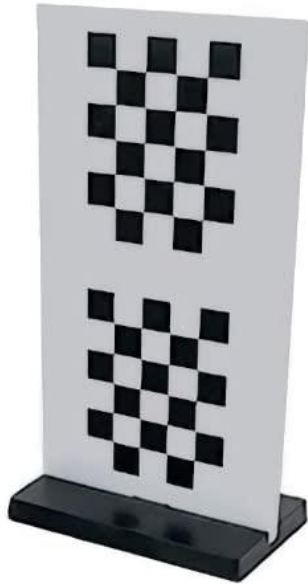
Jedna boja nije ista na svetlim i na tamnim površinama objekta, što može ugroziti tačnost kodiranja.

VIDNO POLJE (Field of view)



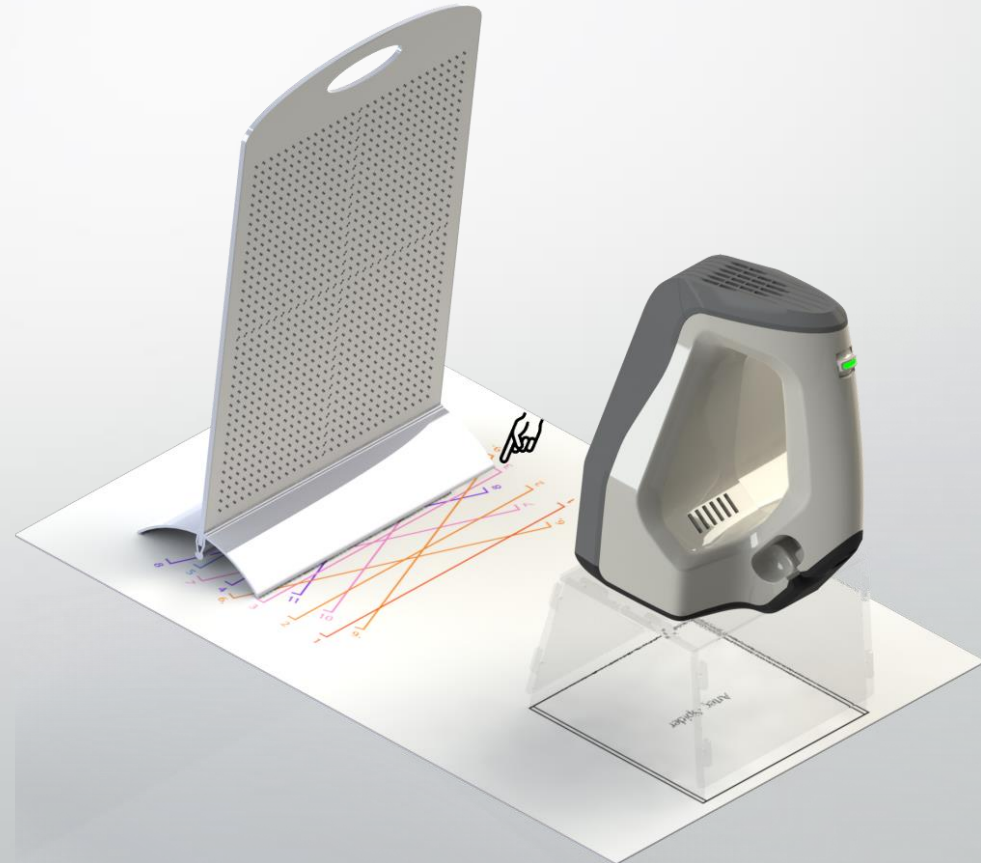
Kalibracija

Kalibracija sistema je neophodan prvi korak koji se, po pravilu, izvodi uz pomoć kalibracionog panela, koji sadrži definisanu (poznatu) strukturu geometrijskih entiteta (tačke i krugovi).



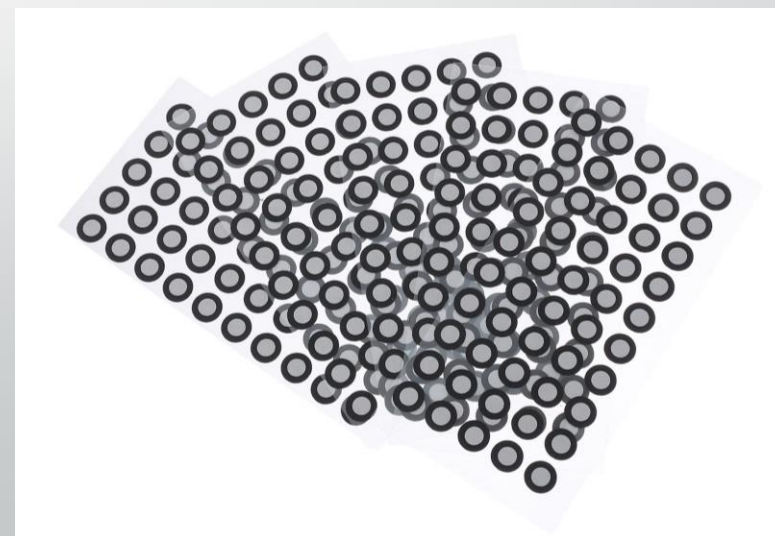
Kalibracija

Kalibracija sistema je neophodan prvi korak koji se, po pravilu, izvodi uz pomoć kalibracionog panela, koji sadrži definisanu (poznatu) strukturu geometrijskih entiteta (tačke i krugovi).



Kodirani markeri

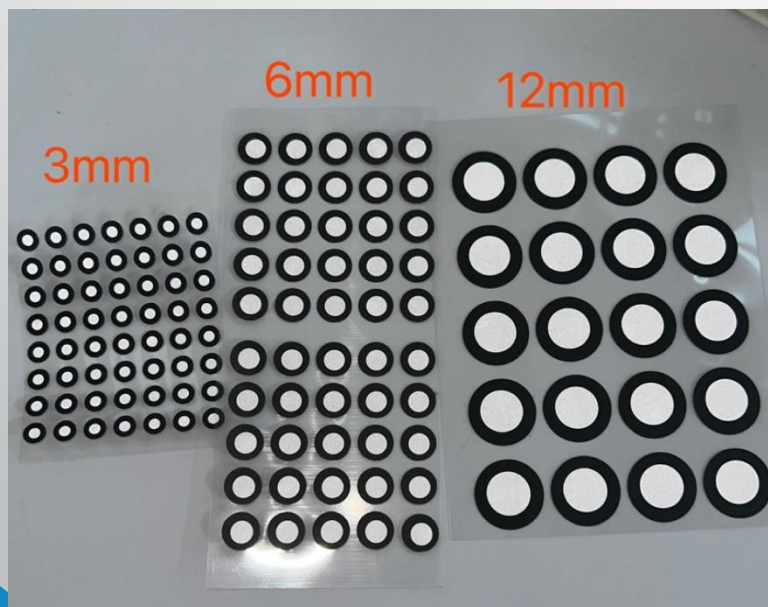
- Marker je mala nalepnica ili magnet na kojoj je odštampana slika crne ili bele tačke.
- 3D skener koristi ove objekte „visokog kontrasta“ da odredi svoju lokaciju.
- Markeri se obično primenjuju na (ili blizu) objekta koji se skenira, da bi se:
 - povećala ponovljivost 3D podataka,
 - lakše pozicionirao 3D skener u prostoru
 - Poravnavali skenirani podaci u realnom vremenu.
 - Zbog teškoća u postizanju visoke tačnosti na velikim objektima.



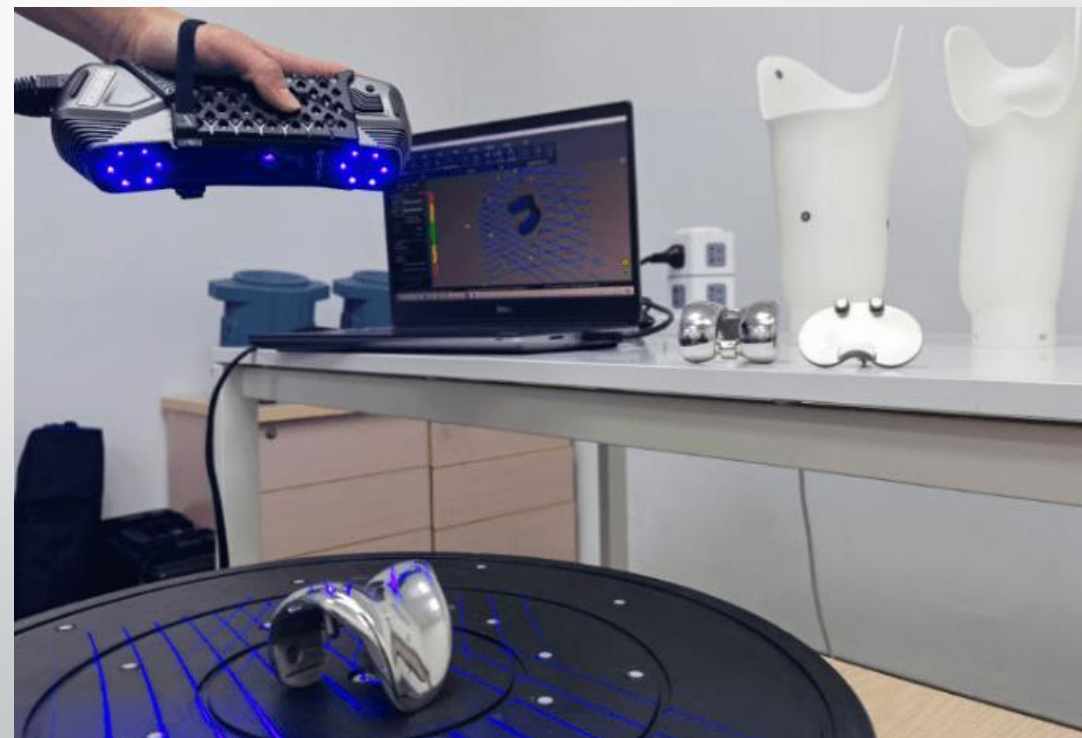
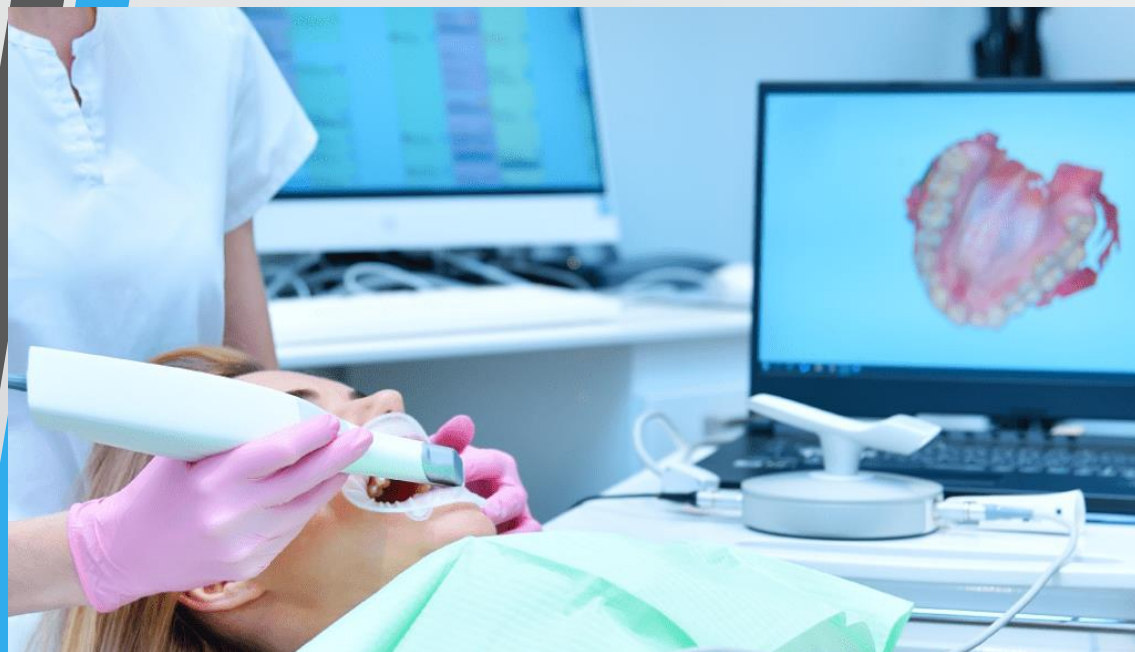
Kodirani markeri

Primena markera kod 3D skeniranja:

- U bilo kom trenutku tokom skeniranja, kamere (senzori) 3D skenera treba da vide **najmanje 3 markera u svakom trenutku**.
- Iako su 3 markera po kadru minimum, optimalan broj je 5. To je zato što u određenim okolnostima, čak i ako je marker vidljiv kameri, softver ga ne prepoznae kao takvog. Ovo može biti zbog refleksije.
- Postavljanje markera se vrši na ravne površine predmeta, a ne na oštre ivice predmeta.



P
R
I
M
E
R
I



P
R
I
M
E
N
E

P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E

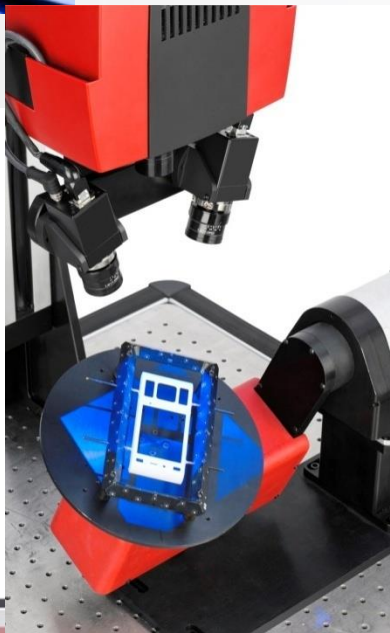


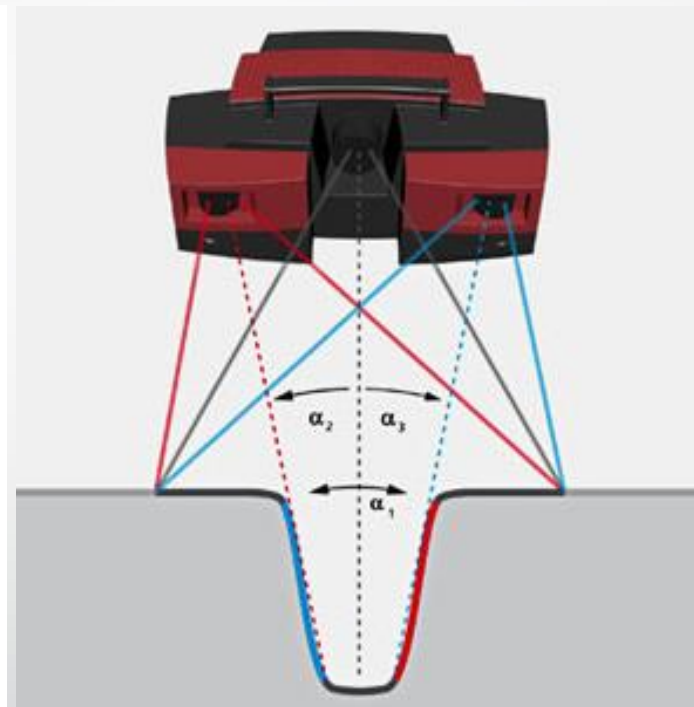
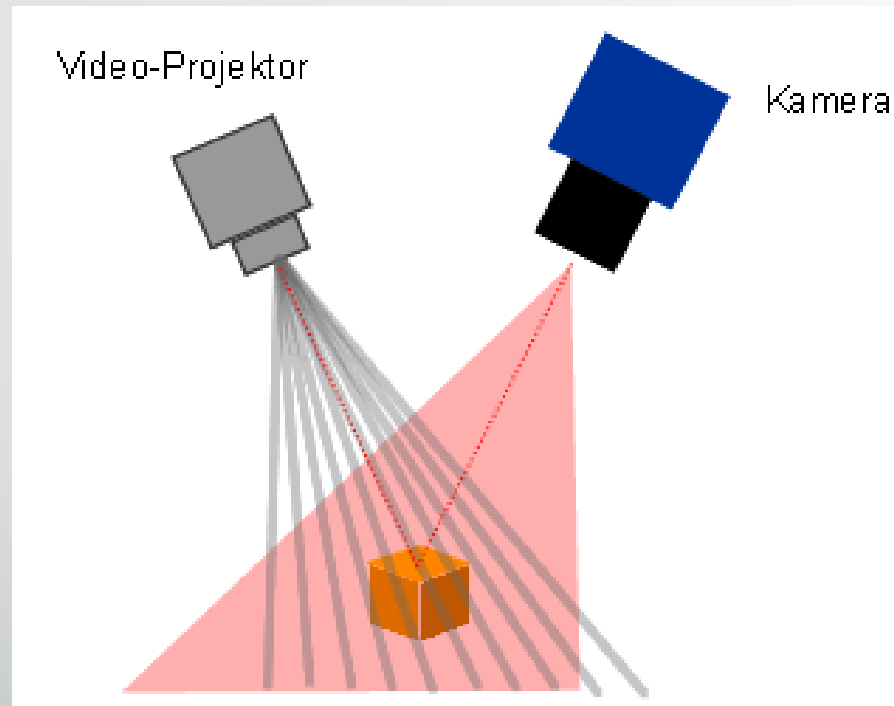
P
R
I
M
E
R
I

P
R
I
M
E
N
E











HVALA NA PAŽNJI!!