

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

**KONTAKTNE METODE 3D
DIGITALIZACIJE I FOTOGRAMetriJA
U REVERZIBILNOM INŽENJERSTVU**

METODOLOGIJA REVERZIBILNOG INŽENJERSTVA

3D digitalizacija

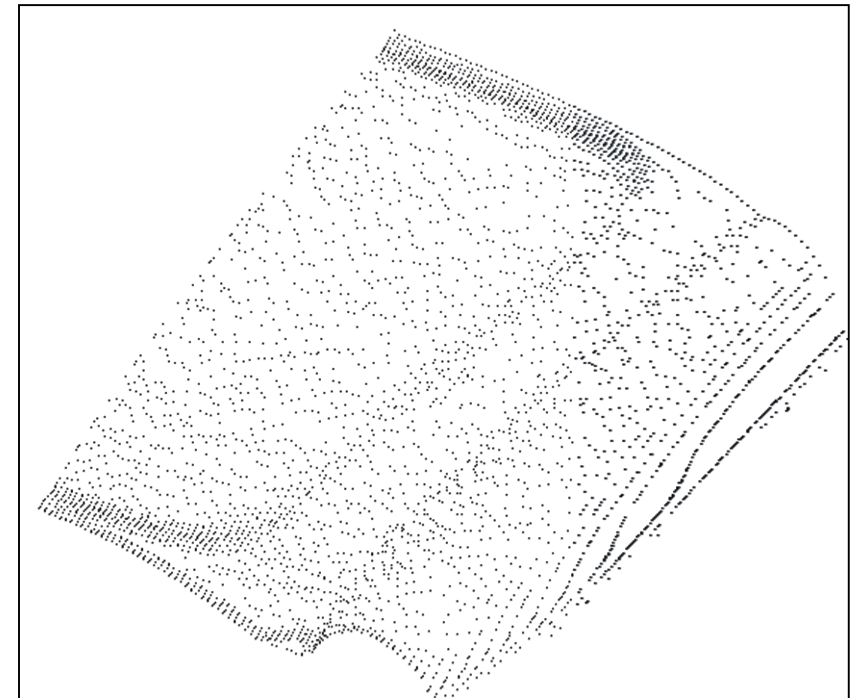
Prva faza procesa reverzibilnog inženjerstva (RE) je 3D digitalizacija (mogu se sresti i termini akvizicija podataka ili skeniranje), u okviru koje se vrši prikupljanje podataka o koordinatama tačaka sa površina objekta i njihovo prevođenje u digitalni oblik.

Rezultat 3D digitalizacije je skup tačaka, koji se često u literaturi, zbog oblika koji zauzima u prostoru, naziva - *OBLAK TAČAKA* (engl. *point cloud*). Kvalitet oblaka tačaka najčešće određuje i kvalitet rezultujućeg CAD modela.

Svaka tačka u oblaku tačaka je definisana prostornim Dekartovim koordinatama x , y i z .

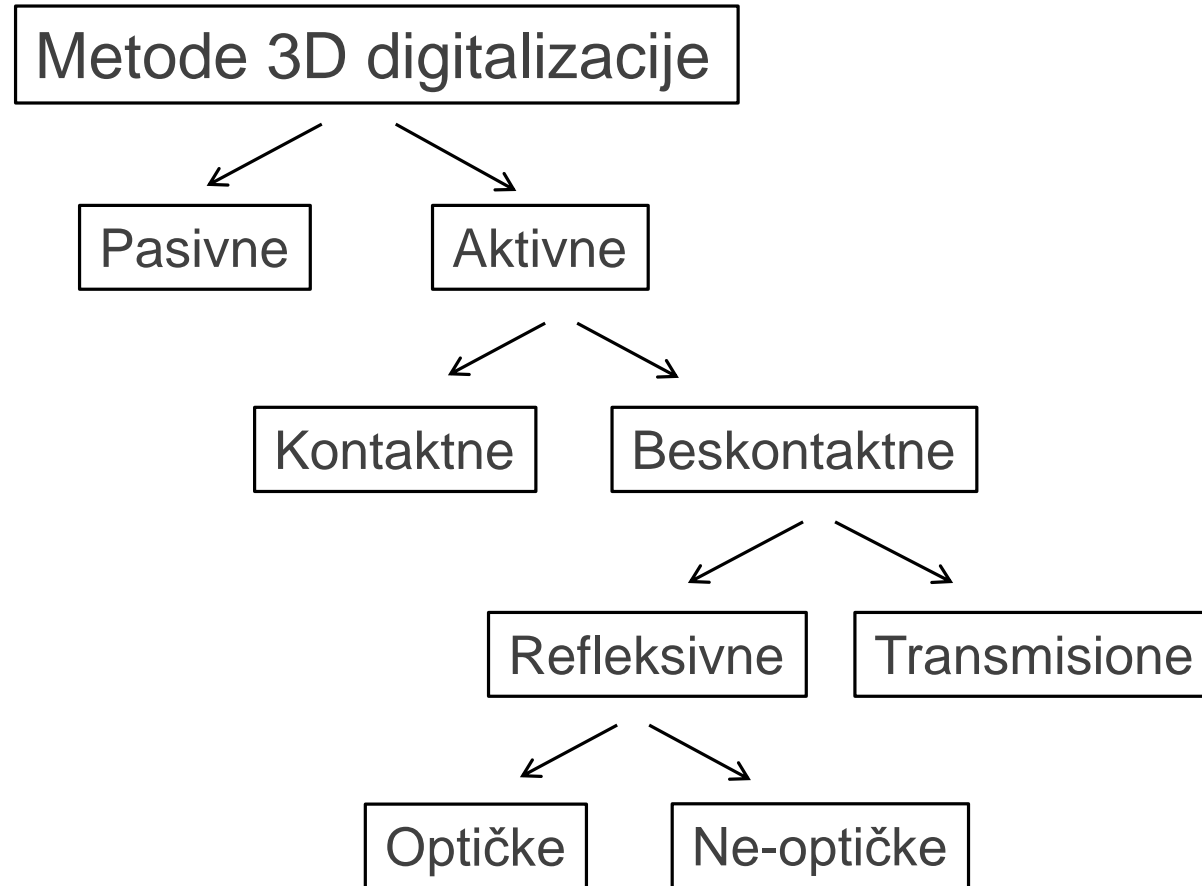
U zavisnosti od uređaja za 3D digitalizaciju i načina prikupljanja podataka tačke mogu imati i dodatne informacije, kao što su informacije o:

- **vektoru normale tačke i , j , k**
- **atributivne podatke o boji, intenzitetu itd.**



METODOLOGIJA REVERZIBILNOG INŽENJERSTVA

3D digitalizacija



Kontaktne metode 3D digitalizacije

Kontaktne metode, kao što i sam naziv sugeriše, karakteriše kontakt objekta i senzora, koji je ovde tipično merni pipak. Senzori koji se koriste mogu biti izvedeni kao kontinualni (aktivni ili pasivni), kruti ili tačka po tačka.

Kontaktne metode 3D digitalizacije

Koordinatna merna mašina

Kontinualni senzor

3D zglobne merne ruke

Kruti senzor

Merni senzor na CNC mašini

Tačka po tačka senzor



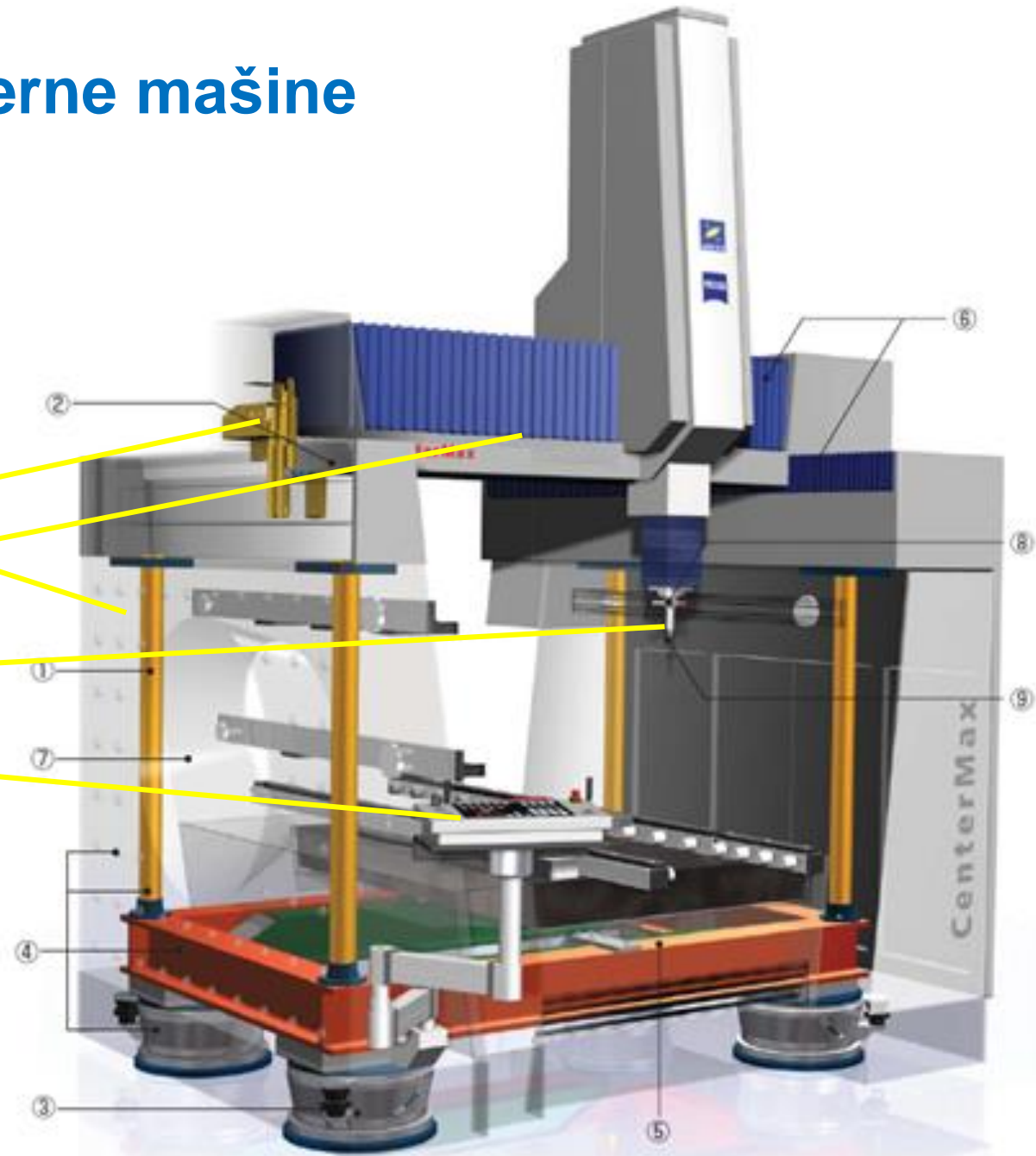
Preduslovi za kontaktnu 3D digitalizaciju

- 1. Priprema predmeta:** Pre početka 3D digitalizacije, predmet koji se želi digitalizovati mora biti pripremljen na odgovarajući način. Površina predmeta mora biti temeljno očišćena kako bi se uklonile nečistoće, masnoće, prašina ili drugi neželjeni materijali. Čista površina osigurava bolje prianjanje mernog pipka i obezbeđuje bolje rezultate 3D digitalizacije.
- 2. Fiksiranje predmeta priborom:** Stezanje i pozicioniranje predmeta vrši se da ne bi došlo do relativnog pomeranja predmeta u odnosu na koordinatni sistem uređaja za kontaktnu 3D digitalizaciju. Izbor odgovarajućeg načina stezanja zavisi od geometrije predmeta, njegove veličine, oblika i materijala od kog je izrađen. Ukoliko je predmet stabilan i ima veću težinu stezanje nije neophodno. Prilikom stezanja predmeta treba voditi računa da pribor za stezanje ne ometa kretanje mernog senzora i samim tim postupak 3D digitalizacije.
- 3. Postavljanje opreme (Merna ruka):** Merna ruka s kontaktnim senzorom postavlja se u blizini predmeta koji se digitalizuje. Softver koji upravlja mernom rukom obično je već instaliran na računaru i spreman je za upotrebu. **Kod KMM i CNC** mašina predmet se postavlja u merni/radni prostor mašine.
- 4. Kalibracija:** Pre početka 3D digitalizacije, potrebno je kalibrisati merni uređaj kako bi se osigurala tačnost 3D digitalizacije. To uključuje kalibraciju položaja mernih pipaka kod KMM i CNC mašina alatki, dok kod merne ruke se kalibriše početni položaj u zavisnosti od veličine i oblika mernog pipka.

Arhitektura Koordinatne merne mašine

✓ Hardverske komponente KMM:

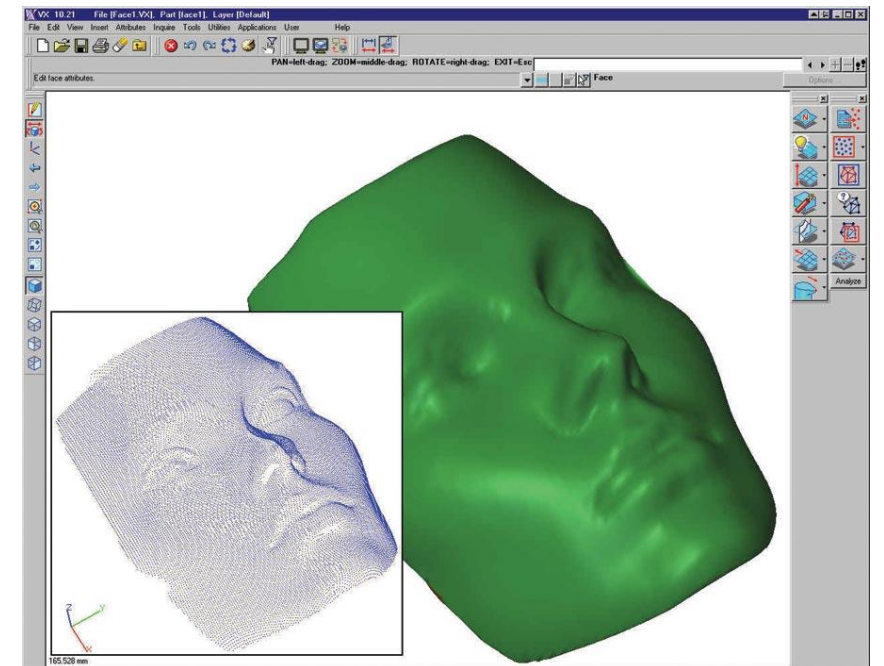
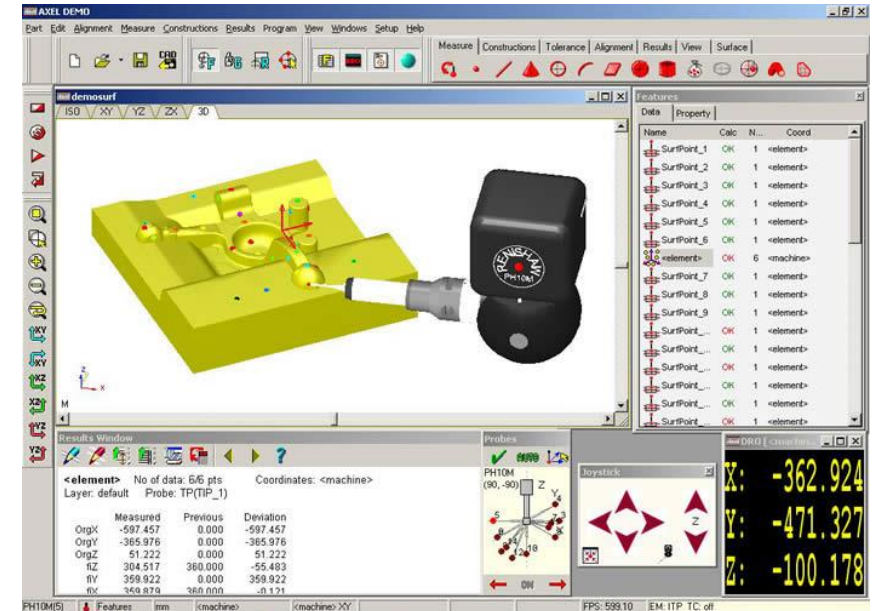
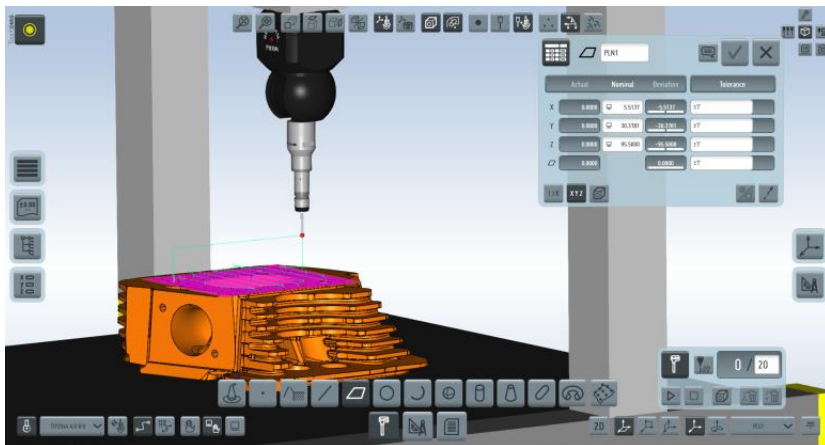
- ✓ noseća struktura,
- ✓ pogonski sistem,
- ✓ merni sistem,
- ✓ merni senzor,
- ✓ računarska podrška.



Arhitektura KMM

✓ Softverske komponente:

- ✓ softver za tolerancije dužina, uglova, oblika i položaja,
- ✓ softver za merenje i inspekciju zupčanika,
- ✓ softver za merenje i inspekciju krivih linija i površina,
- ✓ softver za statističke analize,
- ✓ softver za komunikaciju i integraciju.



Merni senzor

- ✓ Merni senzor predstavlja jedan od najvažnijih podsistema KMM.
- ✓ To je prvi element mernog lanca koji generiše merni signal srazmeran vrednosti merne veličine, odnosno detektovanoj sili.
- ✓ Merni senzor čine dva osnovna dela:
 - 1) **senzor i**
 - 2) **sistem za prihvatanje mernog pipka.**



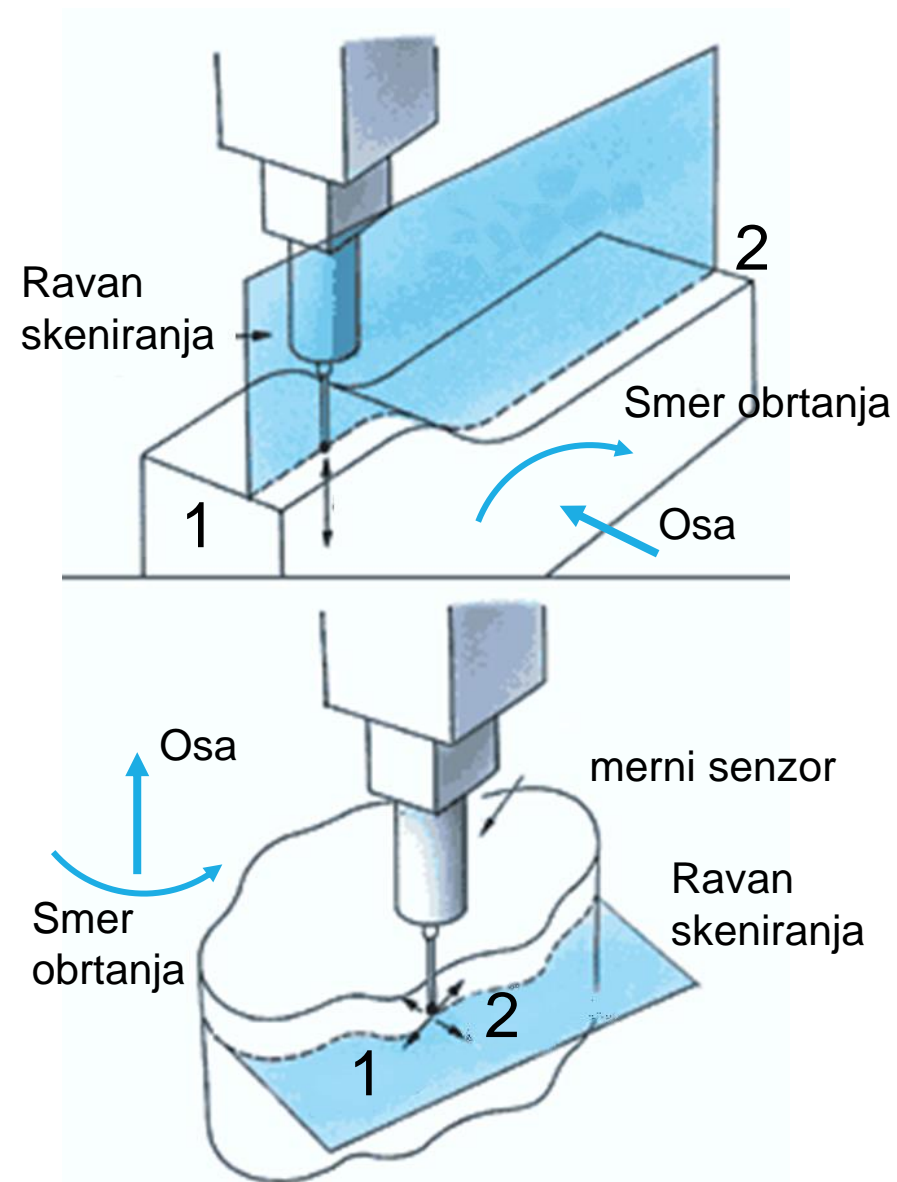
Kontaktna 3D digitalizacija na koordinatnoj mernoj mašini

KMM su visoko precizne, stacionarne mašine koje se koriste u procesima proizvodnje i kontrole kvaliteta opremljene prvenstveno kontaktnim senzorom.

Preduslov za 3D skeniranje je da KMM ima **kontinualni senzor** koji može biti aktivni ili pasivni.

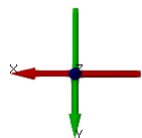
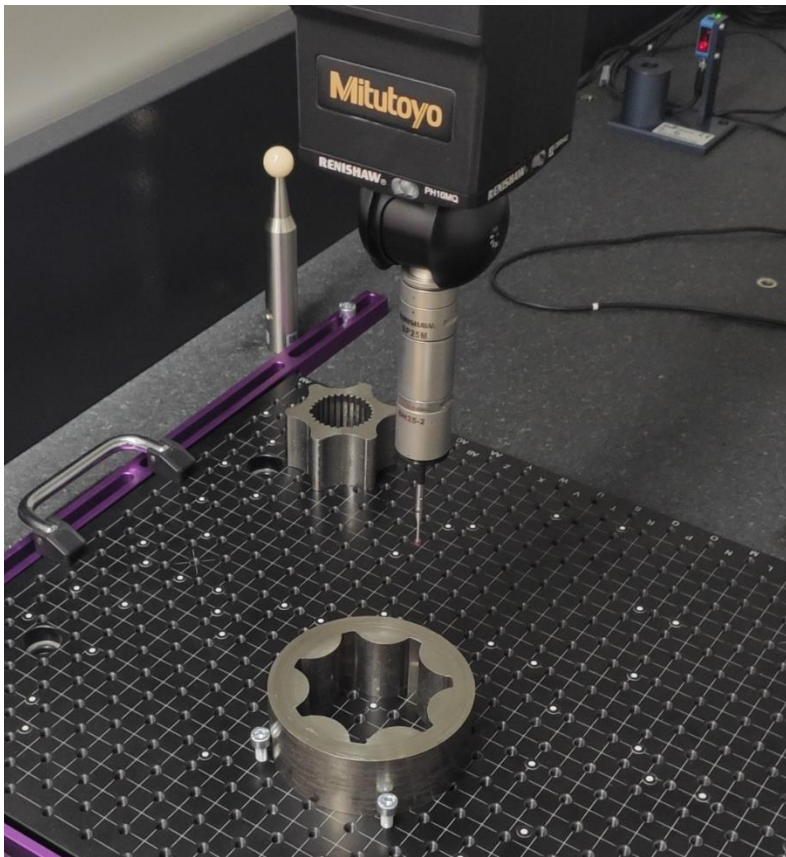
Linijsko skeniranje (3D curve)

Proces 3D digitalizacije pomoću KMM se zasniva na definisanju početne i krajnje tačke i ose koja definiše smer kretanja, odnosno način na koji će merni pipak doći iz početne (tačka 1) u krajnju tačku (tačka 2). Tokom skeniranja merni pipak je u neprekidnom kontaktu sa predmetom 3D digitalizacije i prikuplja geometrijske podatke u vidu koordinata na tačno definisanom koraku.





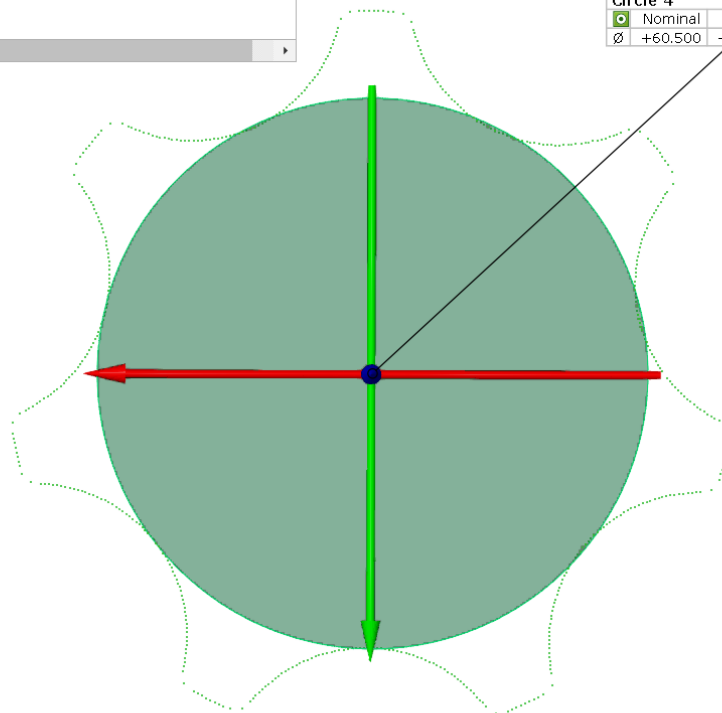
Kontaktna 3D digitalizacija na koordinatnoj mernoj mašini primer iz prakse



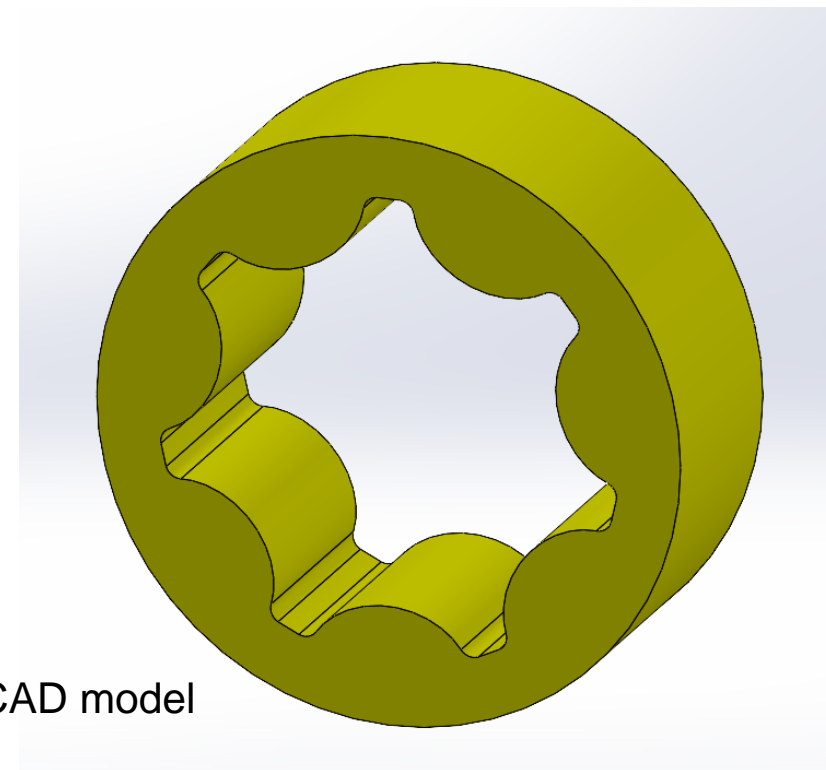
Linijsko skeniranje unutrašnje konture Gerotor pumpe visokog pritiska

Overview						
Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
+60.500	+60.862			+0.362		

Circle 4			
Nominal	Actual	Dev.	Check
∅ +60.500	+60.862	+0.362	



Oblak tačaka skenirane konture

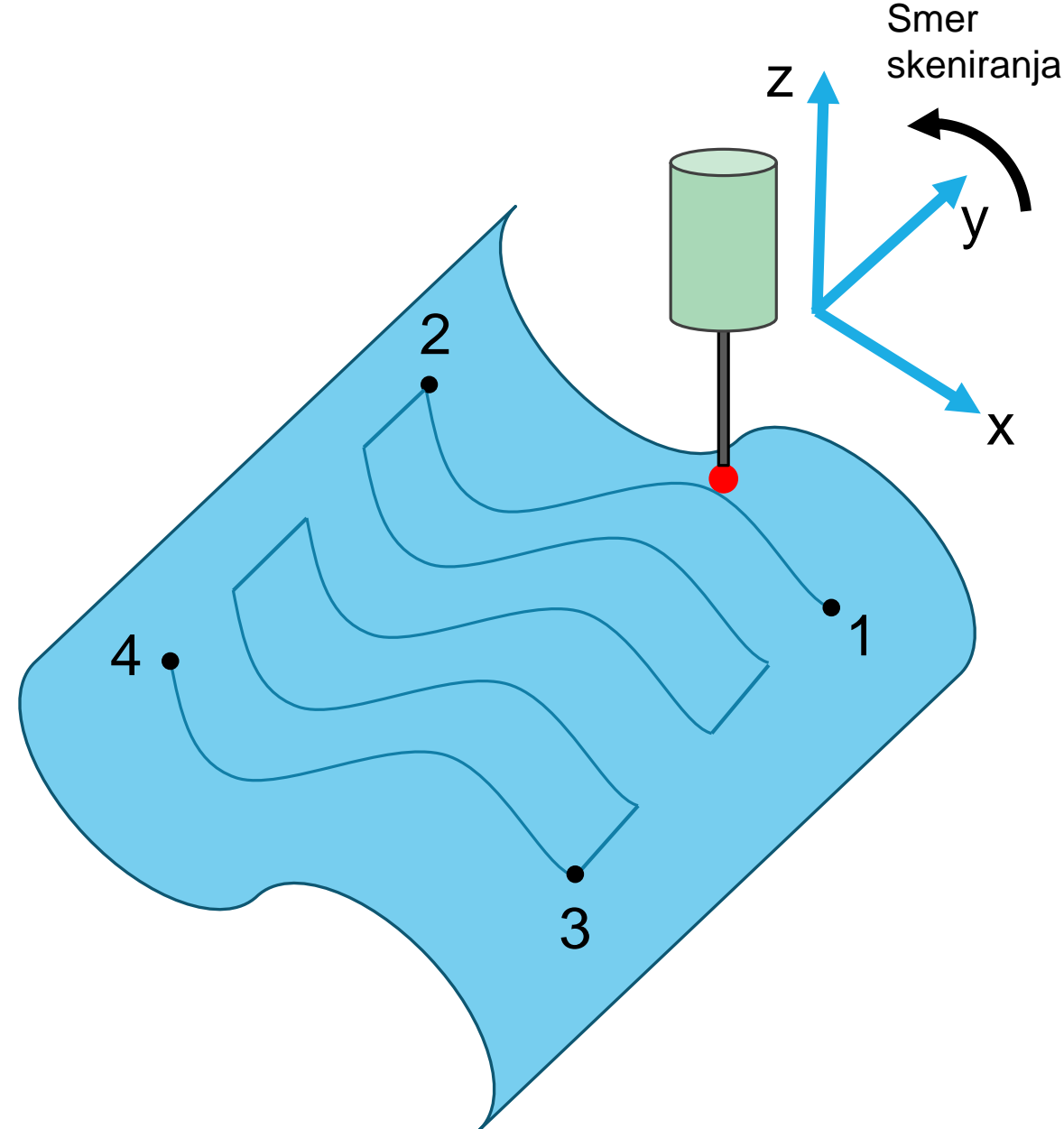
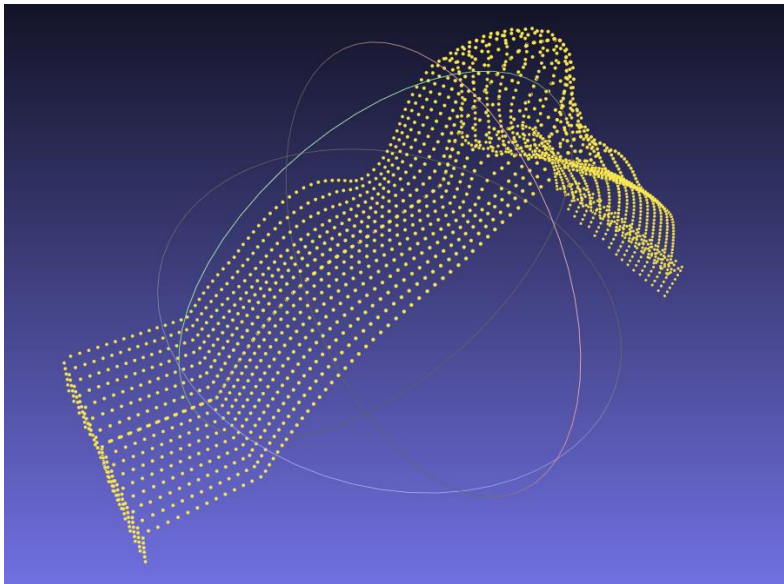


CAD model

Kontaktna 3D digitalizacija na koordinatnoj mernoj mašini

Skeniranje površine (3D grid)

Ovaj vid skeniranja zahteva definisanje četiri tačke u prostoru (u obliku pravougaonika) između kojih se definiše broj prolaza (linija) i smer skeniranja, kao i korak između dve susedne tačke.



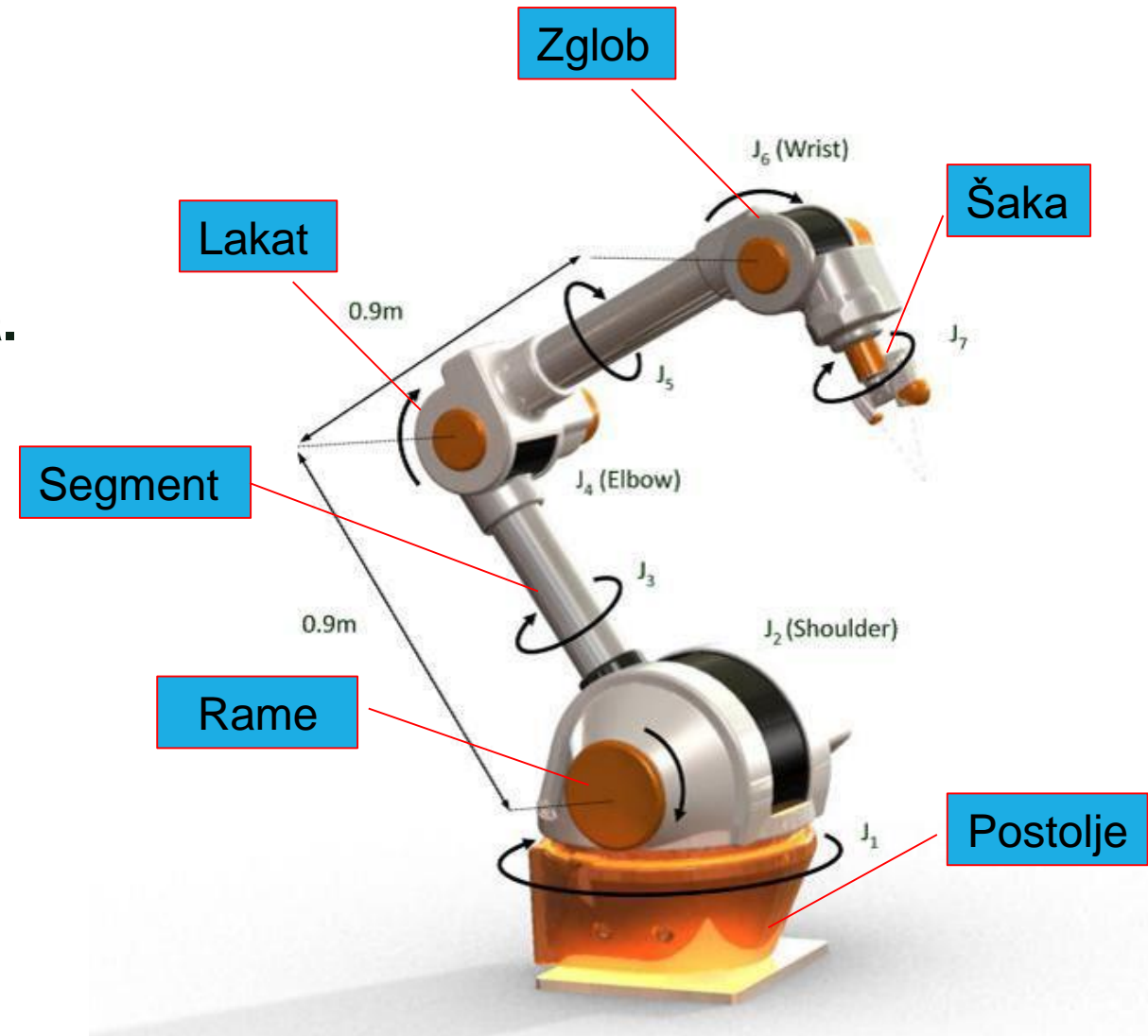
Kontaktna 3D digitalizacija zglobnim mernim rukama

Zglobna merna ruka je sistem koji meri prostorne koordinate i sastoji se od:

- postolja,
- segmenata (najčešće 3 ili 4),
- cilindričnih i/ili sfernih zglobnih veza i
- senzorskog sistema za akviziciju podataka.

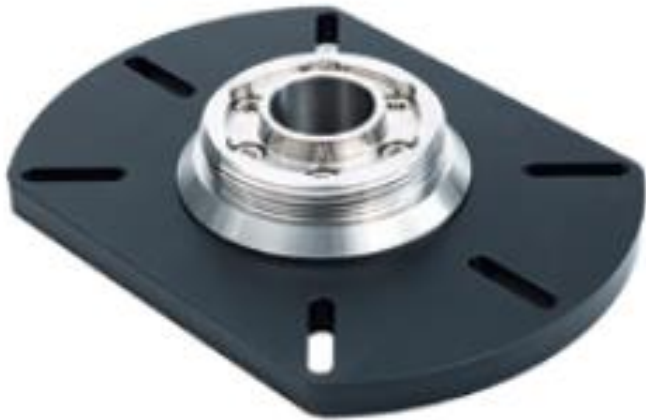
Upravljanje (navođenje) zglobnom mernom rukom je ručno, a akvizicija podataka može biti:

- ručna ili
- poluautomatska.



Postolja mernih ruku

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



Postolja sa mehaničkim pričvršćivanjem



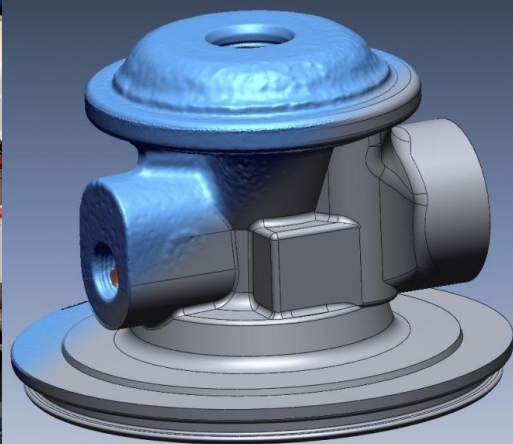
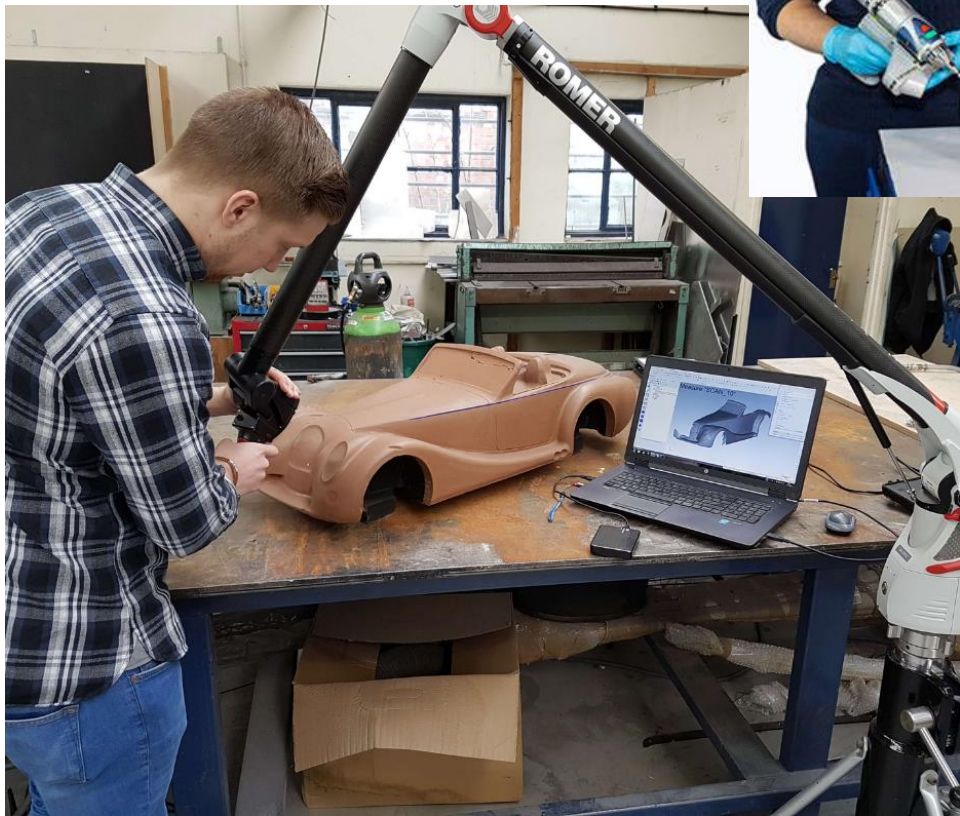
Postolja sa magnetima



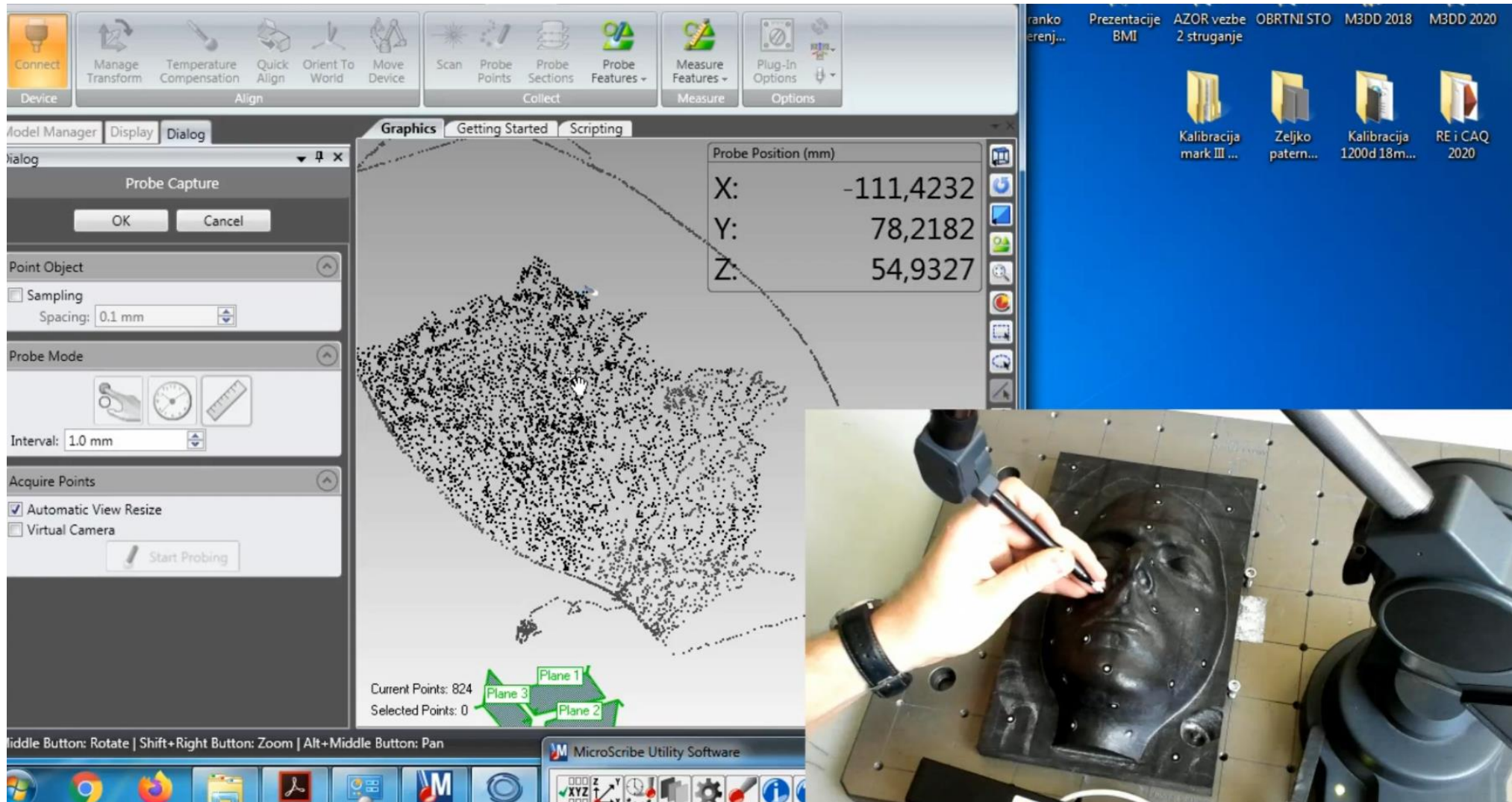
Postolja sa vakumom

Primena mernih ruku

- Reverzibilno inženjerstvo
- 3D digitalizacija

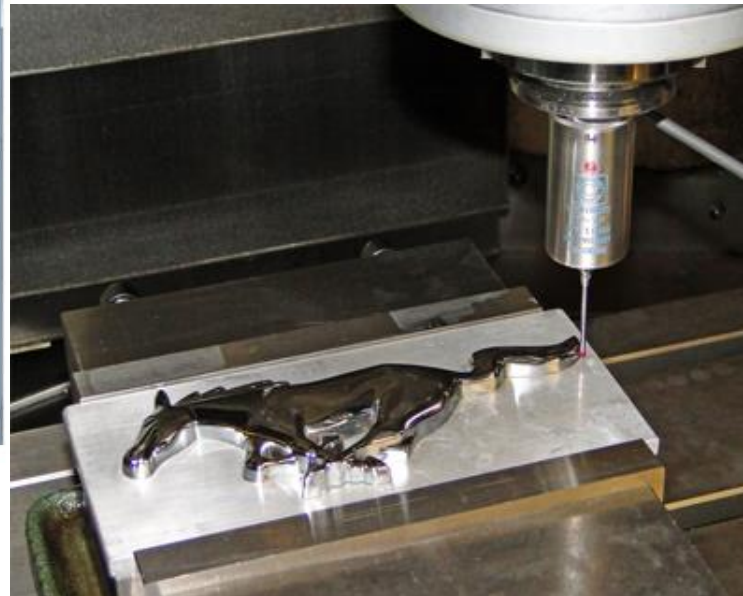
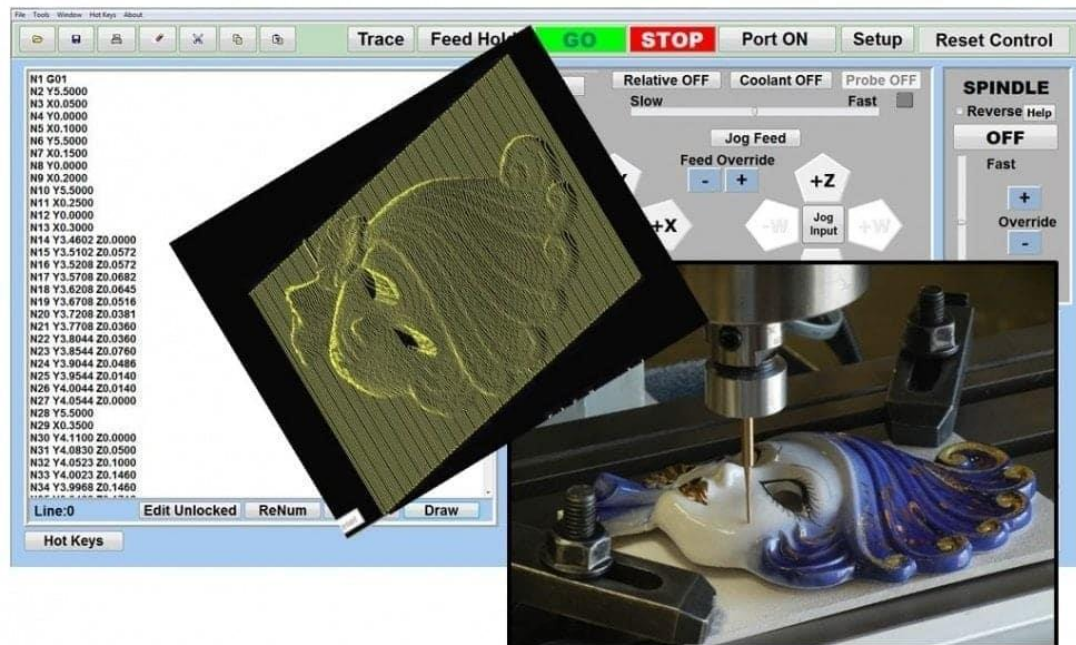


Kontaktna 3D digitalizacija zglobnim mernim rukama



Kontaktna 3D digitalizacija na CNC mašinama

Savremene CNC mašine opremljene sa mernim senzorom mogu da se koriste za kontaktnu 3D digitalizaciju predmeta.



KONTAKTNA 3D DIGITALIZACIJA

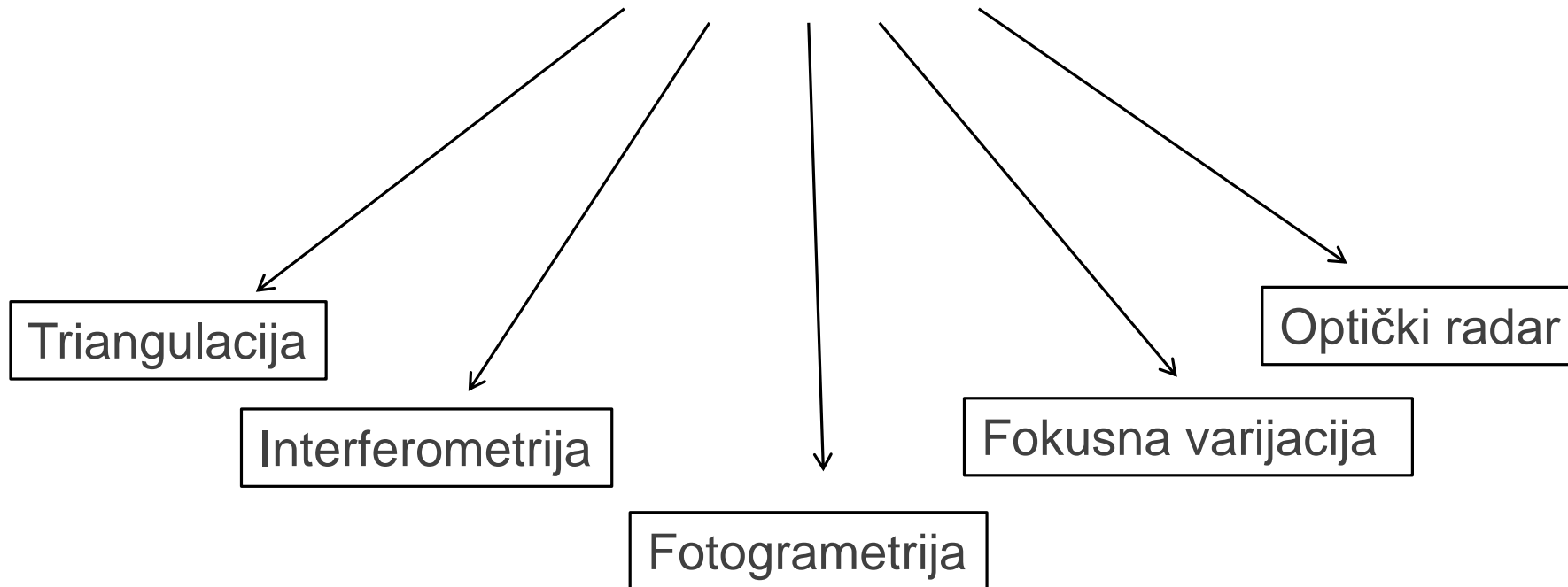
Prednosti:

- Visoka tačnost prikupljenih podataka
- 3D digitalizacija transparentnih i visokoreflektivnih površina
- Mogućnost 3D digitalizacije uskih i dubokih otvora u zavisnosti od veličine mernog pipka

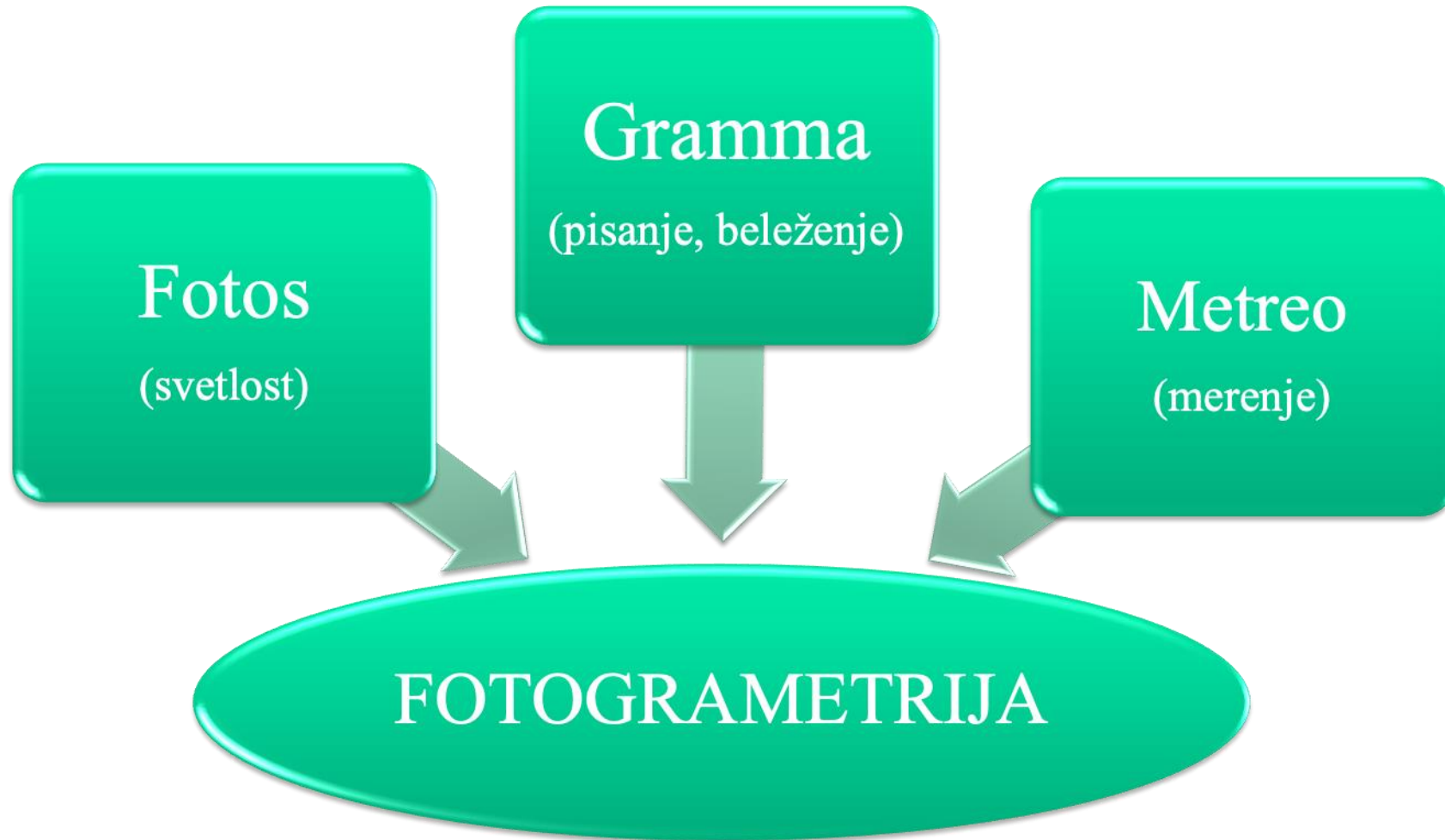
Nedostaci:

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

Optičke metode 3D digitalizacije



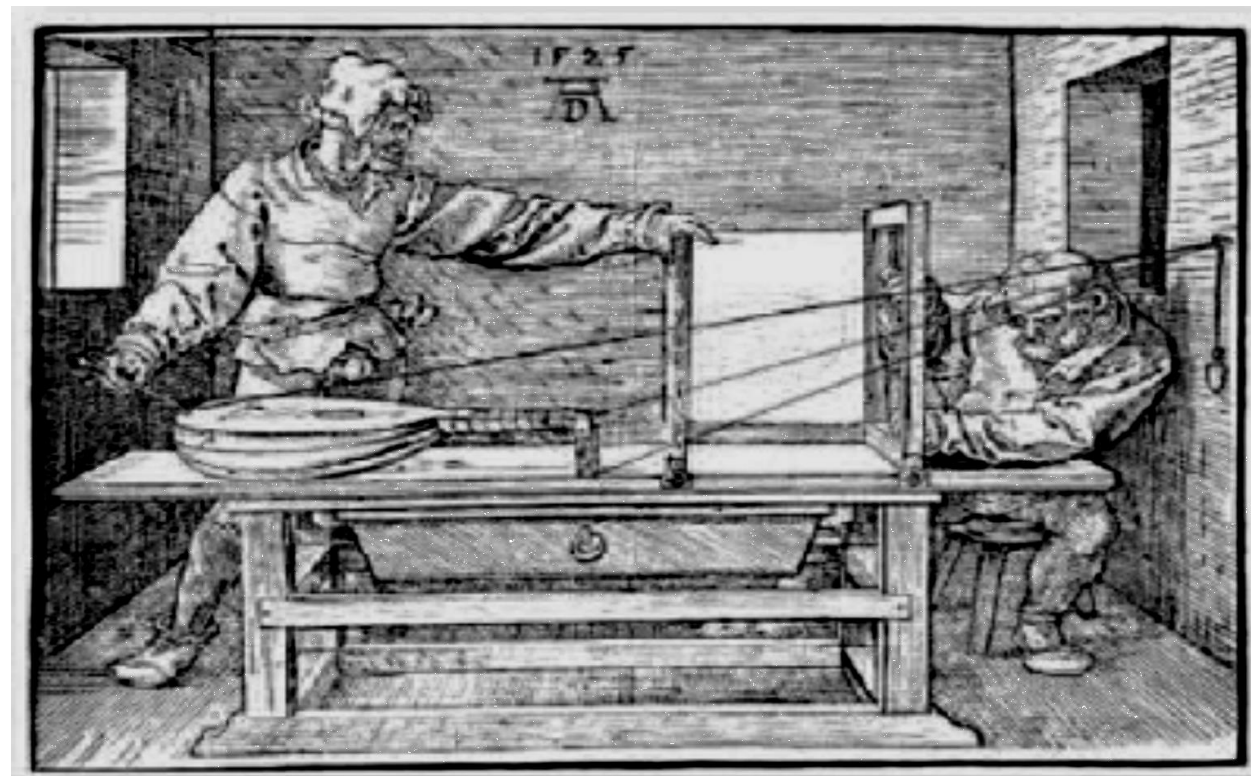
Fotogrametrija



RAZVOJ FOTOGRAMETRIJE

- **Fotogrametrija optičke projekcije (1850.-1900.)**

1849. godine, *Aimé Laussedat* (1819.-1907.) francuski istraživač, vojni inženjer i naučnik bio je prva osoba koja je koristila fotografije kreirane sa zemlje za izradu topografskih mapa, zbog čega se on smatra "ocem fotogrametrije".



Crtač i Lauta (engl. "The Draughtsman And The Lute"), Albrecht Dürer

RAZVOJ FOTOGRAMETRIJE

Analogna fotogrametrija (1900.-1960.)

Napredak fotogrametrije do druge faze, tačnije perioda analogne fotogrametrije, bila su zaslužna dva velika razvoja. Prvo, stereoskopija je postala široko rasprostranjena, a drugo, razvoj aviona od strane braće Rajt (*Wright*) 1903. godine. Ono što je obeležilo ovaj period bili su optički i mehanički instrumenti korišćeni za rekonstrukciju 3D geometrije sa preklapajućih slika, dok je glavni proizvod ove faze bila topografska karta.

Analitička fotogrametrija (1960.- danas)

Analitička fotogrametrija vezana je za razvoj matematičkih metoda kojima se dolazi do željenih rezultata.

Digitalna fotogrametrija – 1990 do danas, aktivna primena od 2003.

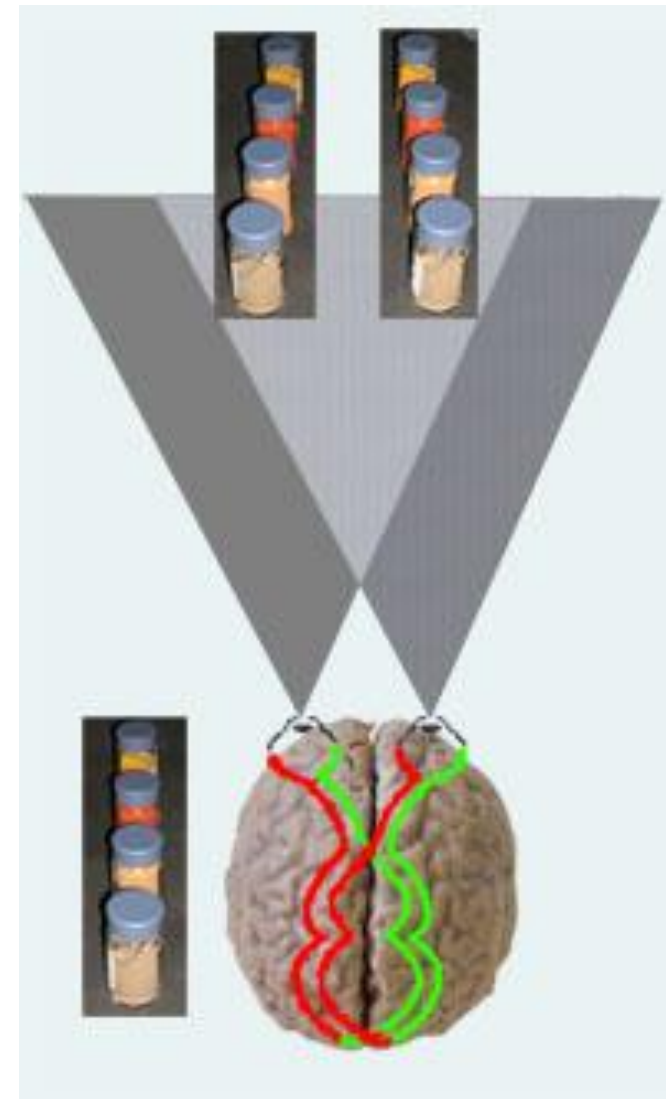
FOTOGRAMetriJA KAO METODA STEROVIZIJE

Stereovizijski princip:

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

Percepcija dubine: fenomen paralaksa: naša dva oka opažaju dva neznatno različita pogleda.

Test: stavite nekoliko predmeta (tegla) na udaljenosti od oko 1 metar. Držite glavu mirno i gledajte naizmenično desnim i levim okom u te objekte (brzo naizmenično levo i desno): objekti kao da skaču u stranu. Kada ponovo pogledamo sa oba oka, automatski se rekonstruišu u jednu celinu.



PREDUSLOVI ZA FOTOGRAMETRIJSKU 3D DIGITALIZACIJU

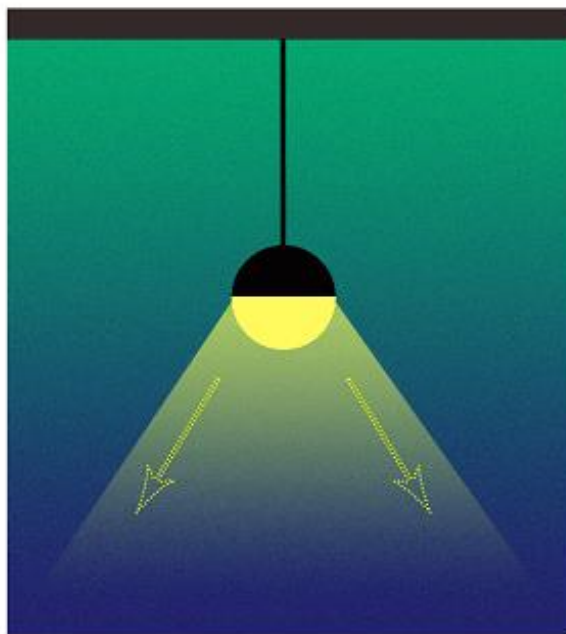
- **Obezbeđivanje visoko kvalitetnih fotografija:** Fotografije koje se koriste u fotogrametriji treba da budu visoke rezolucije i kvaliteta, sa odgovarajućim poljem dubinske oštine prema veličini predmeta, minimalnim izobličenjima (distorzijama prozrokovanim nesavršenosti objektiva) i pravilnom ekspozicijom. Sva izobličenja prouzrokovana sočivima u objektivu treba da budu ispravljena kako bi se obezbedila tačna geometrijska rekonstrukcija.
- Treba koristiti **digitalni fotoapar** sa optimalno visokom rezolucijom 5Mpix i više;
- Zbog uticaja refleksije na kvalitet fotografija i rezultate 3D digitalizacije treba **izbegavati objekte glatke površine**.
- Objekti koji nemaju izraženu vizuelnu teksturu (stohastička tekstura) nisu pogodni za 3D digitalizaciju blisko-predmetnom fotogrametrijom.

PREDUSLOVI ZA FOTOGRAMETRIJSKU 3D DIGITALIZACIJU

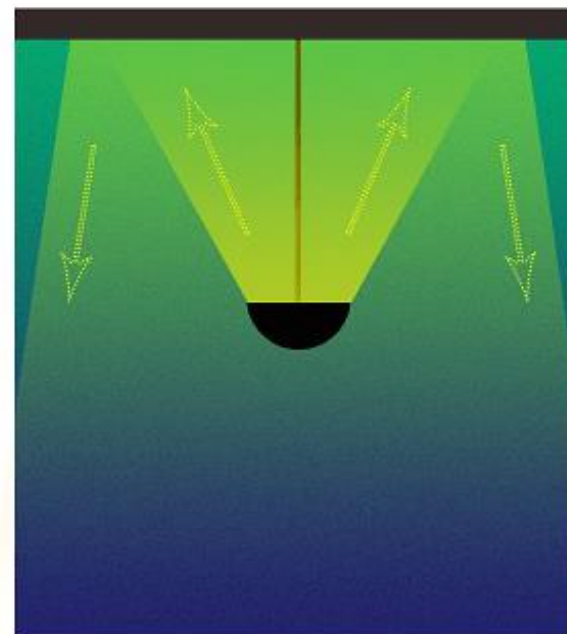
Obezbeđivanje dovoljne količine svetlosti: Svetlo je ključni faktor za snimanje kvalitetnih fotografija. Izvori osvetljenja mogu biti prirodni (sunce, zvezde, munje), ili veštački (nastaju sagorevanjem gasova, ulja, sveća i sličnih materija, ili isijavanjem iz užarenih metala, užarenih vlakana i sl.).

Pravac i smer osvetljenja može biti:

Direktno



Indirektno
(difuzno)



OSOBI NE DIREK TNOG 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
- ekonmično

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 INDIREKTOG 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 izvor svetlosti. Indirektno osvetljenje je vrsta ambijentalnog svetla.

Prednosti indirektnog osvetljenja:

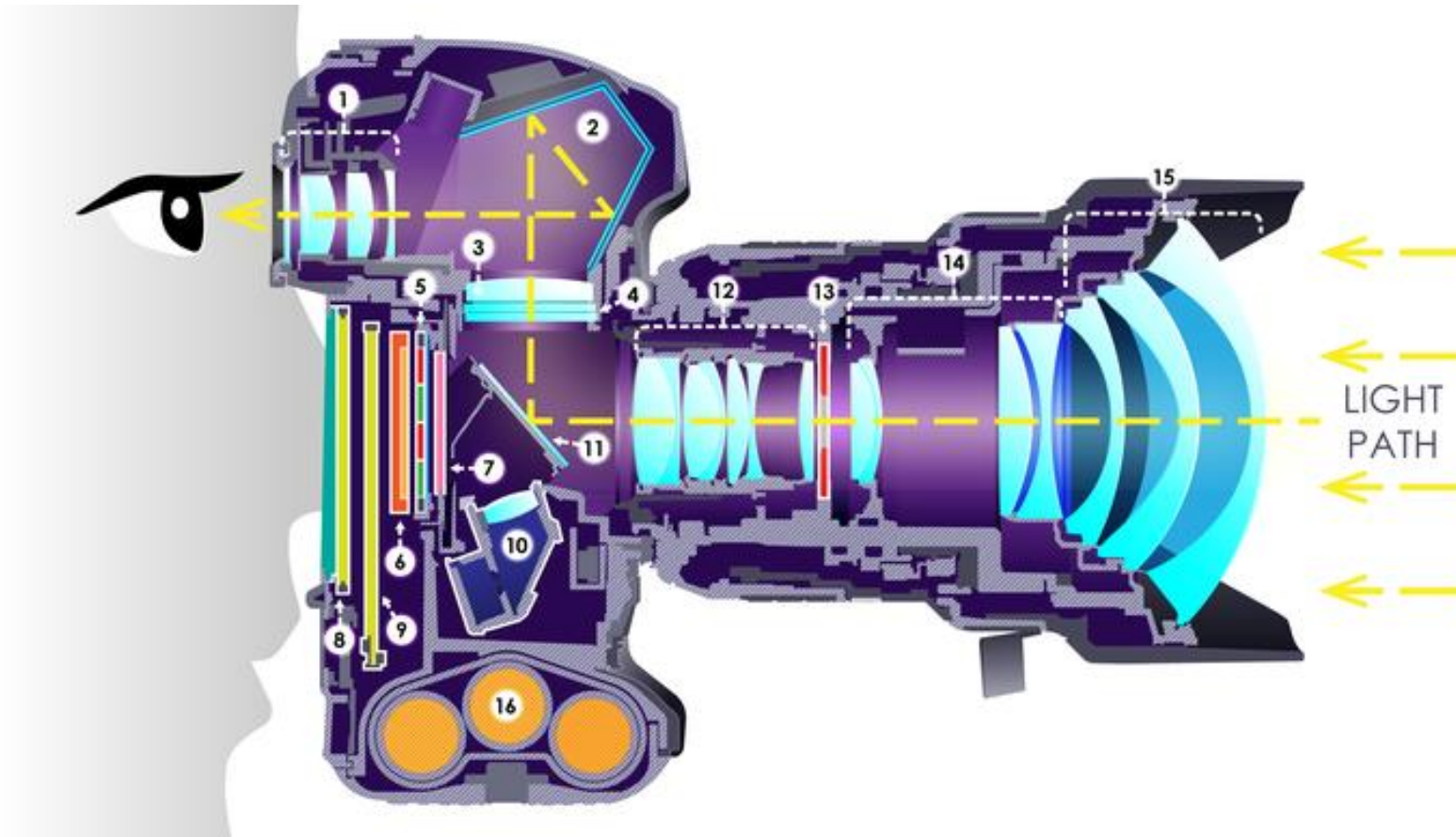
- obezbeđuje ravnomernije i difuzno osvetljenje objekta
- smanjuje senke i refleksiju
- smanjuje naprezanje očiju
- vizuelno stvara efekat dubine

Nedostaci indirektnog osvetljenja:

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

Digital Single Lens Reflex Camera (fotoapararat)

Snimanje fotografija predstavlja prvu i osnovnu fazu fotogrametriške 3D digitalizacije. Digitalni fotoapararat je uređaj za snimanje digitalinih fotografija.



1. okular
2. pentaprizma
3. fokusni ekran
4. sočivo
5. infrared i kolor filter
6. digitalni senzor
7. zatvarač
8. ekran
9. elektonika
10. autofokus sistem
11. pokretno ogledalo
12. fokusna sočiva
13. blenda
14. sočiva za podešavanje žižne daljine
15. prednja sociva objektiva
16. baterije

Vidno polje kamere (field of view)

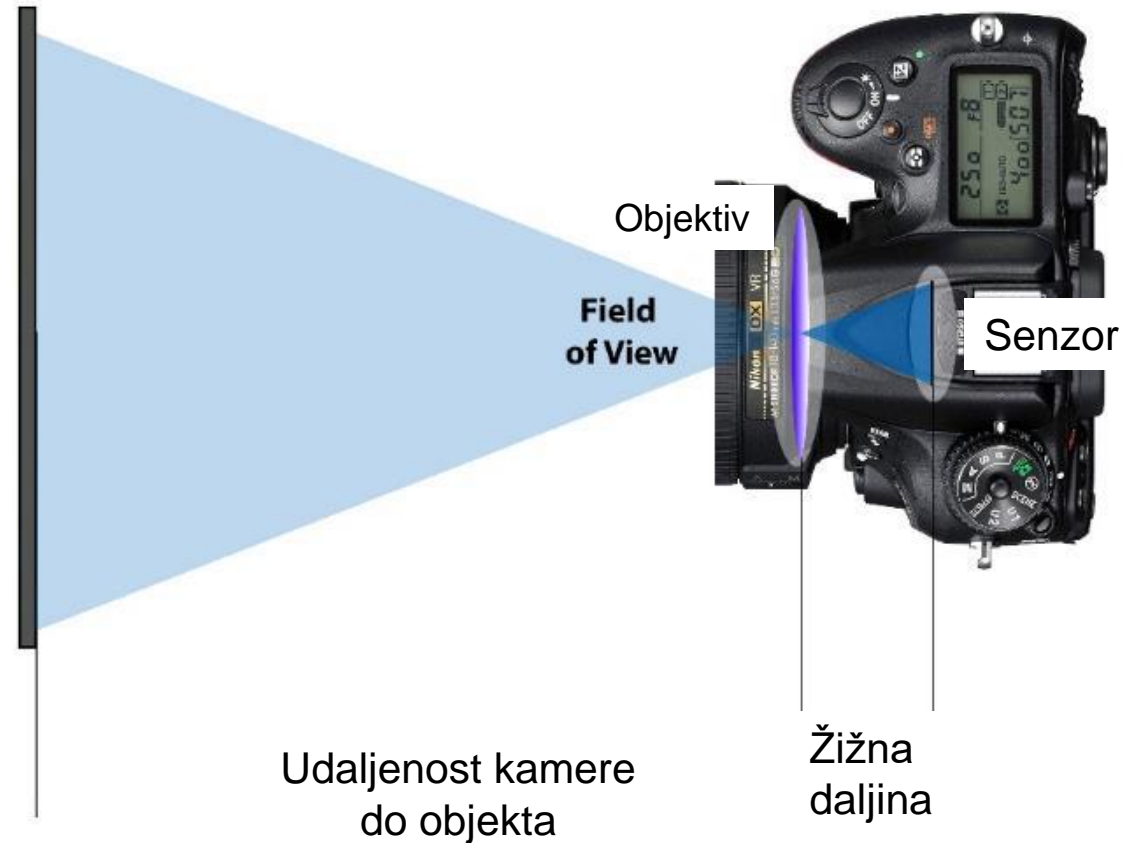
Vidno polje kamere određuje žižna daljina objektiva i veličina senzora kamere.

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 <50mm
- normalne objektivne =50mm
- zum objektivne >50mm

Objekat



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.



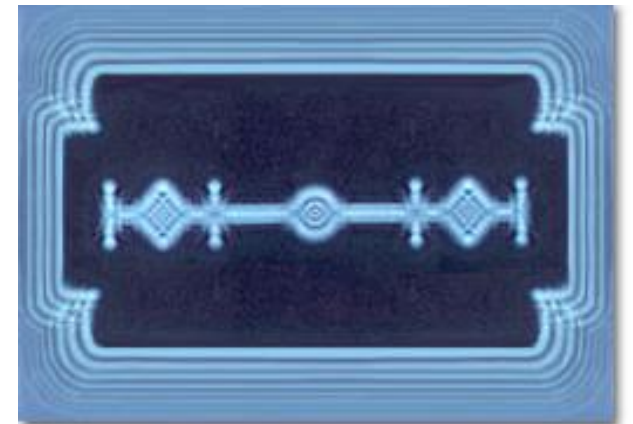
VELIK OTVOR BLENDE
(ulazi mnogo svetlosti)
f/12



SREDNJI OTVOR BLENDE
(srednja količina svetlosti)
f/18



MALI OTVOR BLENDE
(ulazi malo svetlosti)
f/22



Efekat difrakcije

BRZINA ZATVARAČA (SHUTTER SPEED)

1/300

1/15



1/500



1/250



1/125



1/60



1/30



1/15



1/8



1/4



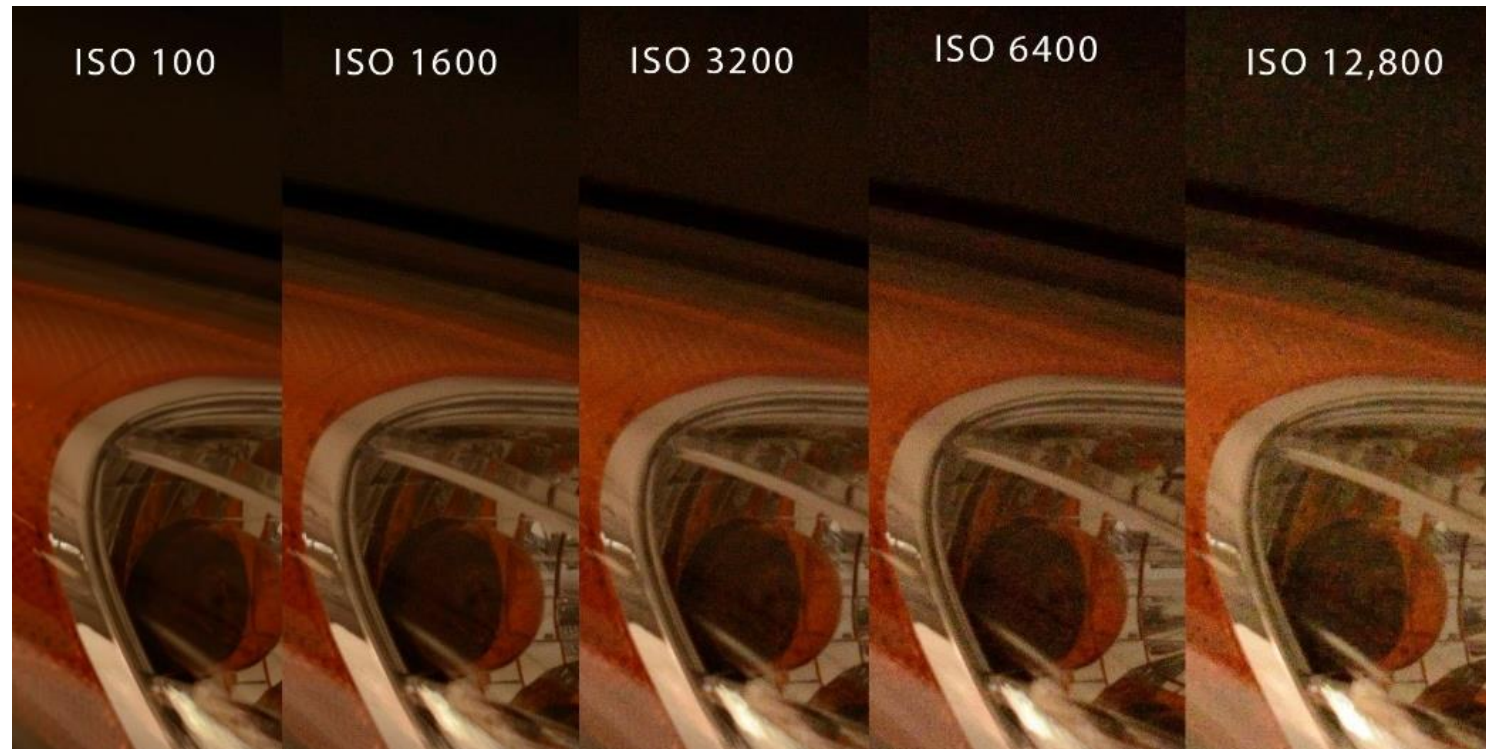
1/2

Brzina zatvarača definiše koliko dugo će senzor biti izložen svetlosti koja je prošla kroz objektiv i blendu. Ako se podese 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.

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 propratne pojave, a to je nastanak elektronskog šuma koji narušava kvalitet fotografije.

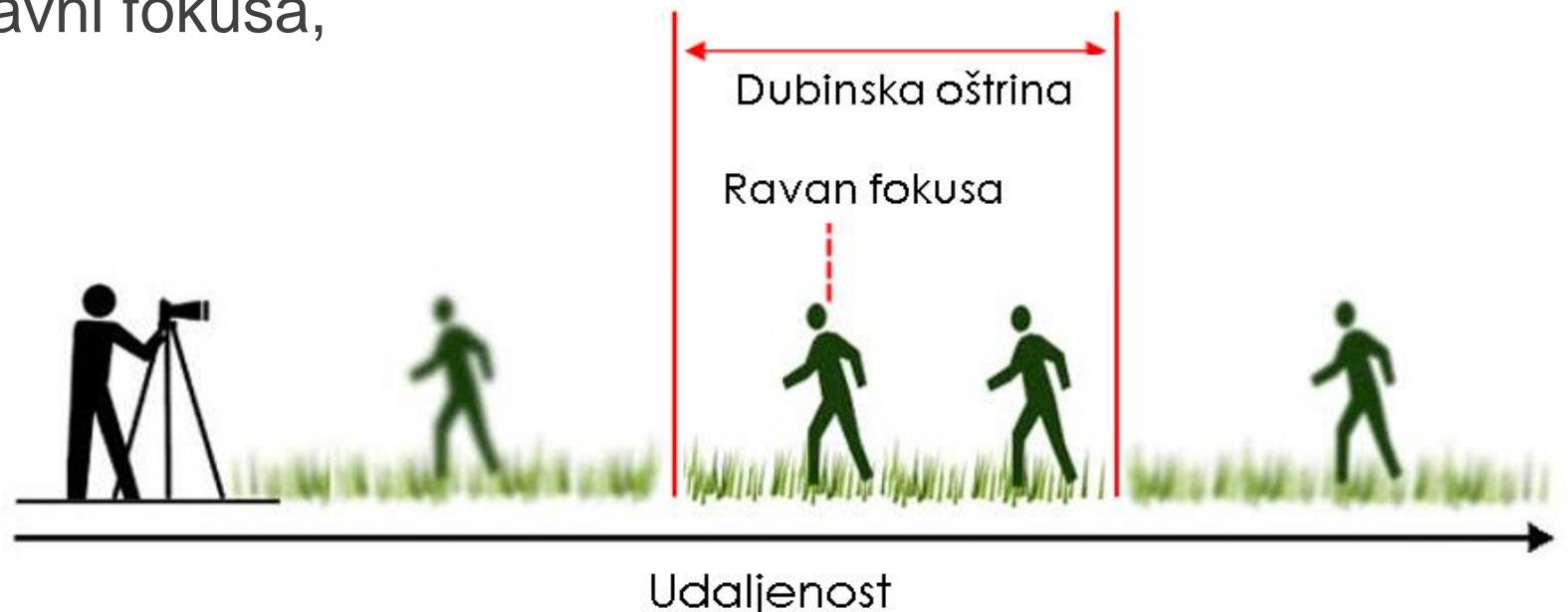


POLJE DUBINSKE OŠTRINE

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:

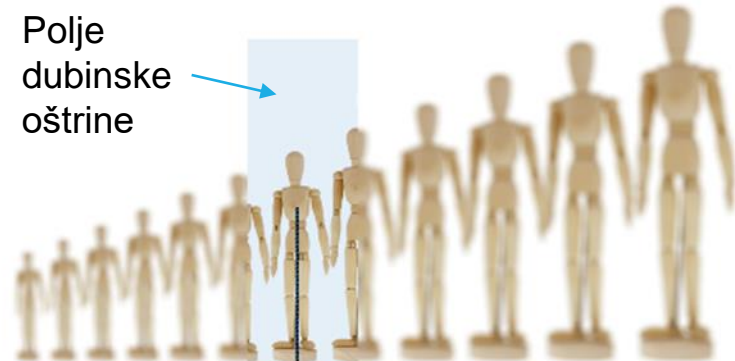
1. žižne daljine objektiva,
2. udaljenosti kamere do ravni fokusa,
3. otvora blende.



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 OŠTRINE

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.

Senzori slike

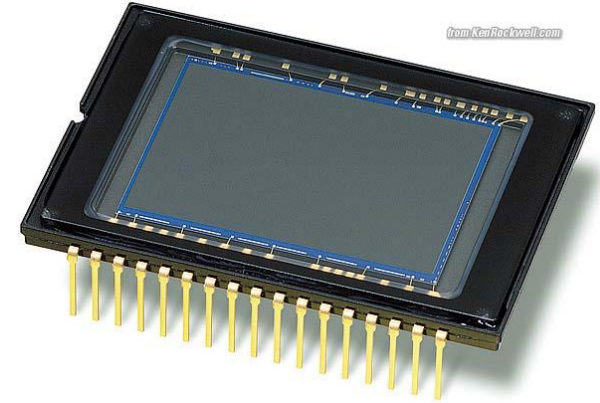
U primeni su dve vrste senzora:

- **CCD**
- **CMOS**

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) i svaka fotodioda predstavlja jedan piksel.

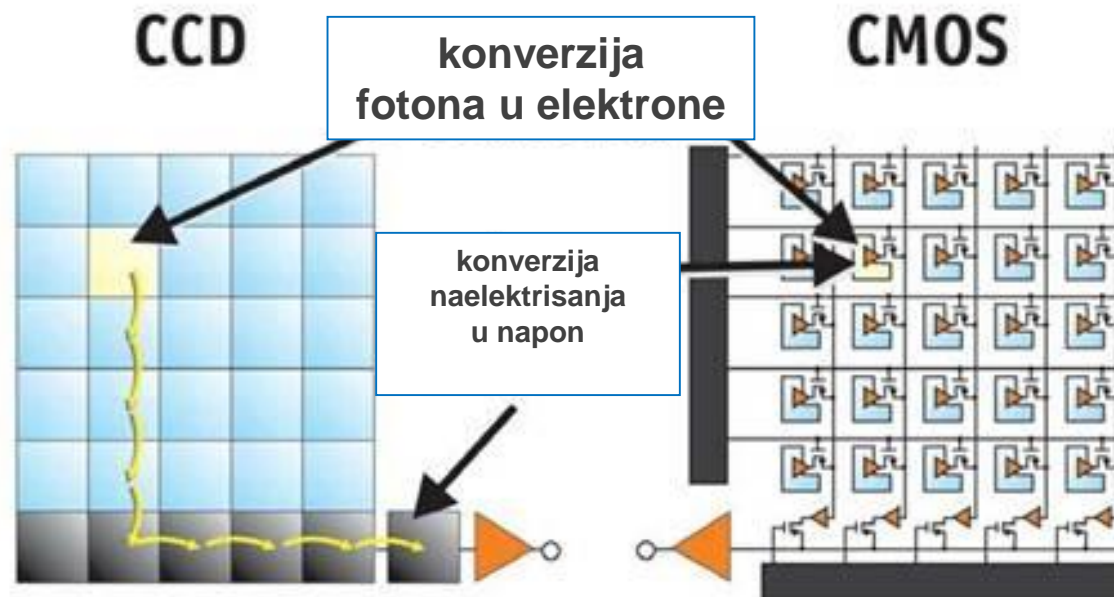
CMOS - Tehnologija komplementarnog metal-oksid-poluprovodnika je starija tehnologija koja je kasnije uvedena u oblast razvoja senzora slike.

Frank Vanlas patentirao je CMOS 1963. godine.



Senzori slike

- **Fotodioda pretvara** prikupljene **fotone** (svetlosni signal) u električni napon koji se pojačava do nivoa pogodnog za procesiranje od strane A/D konvertora.
- **A/D konvertor klasifikuje** analognu voltažu sa piksela na nivoe osvetljenja, i dodeljuje svakom nivou binarnu oznaku (digitalizacija slike).
- Fotodioda prikuplja samo količinu svetlosti, i da nema kolor filtera kojima su prekriveni, fotoapararat bi pravio samo crno-bele slike.

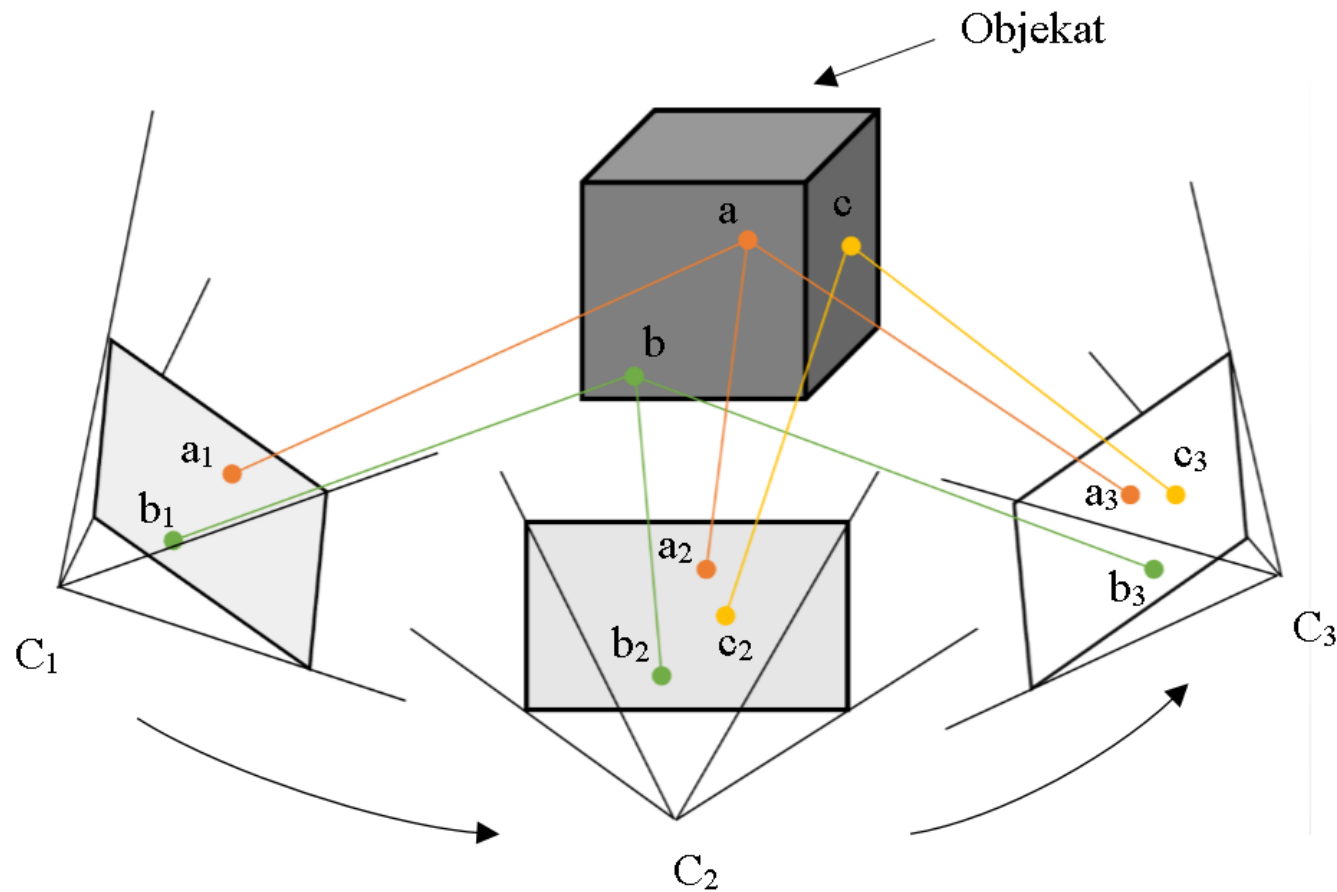




Globalni zatvarač
(global shutter)

Kotrljajući zatvarač
(rolling shutter)

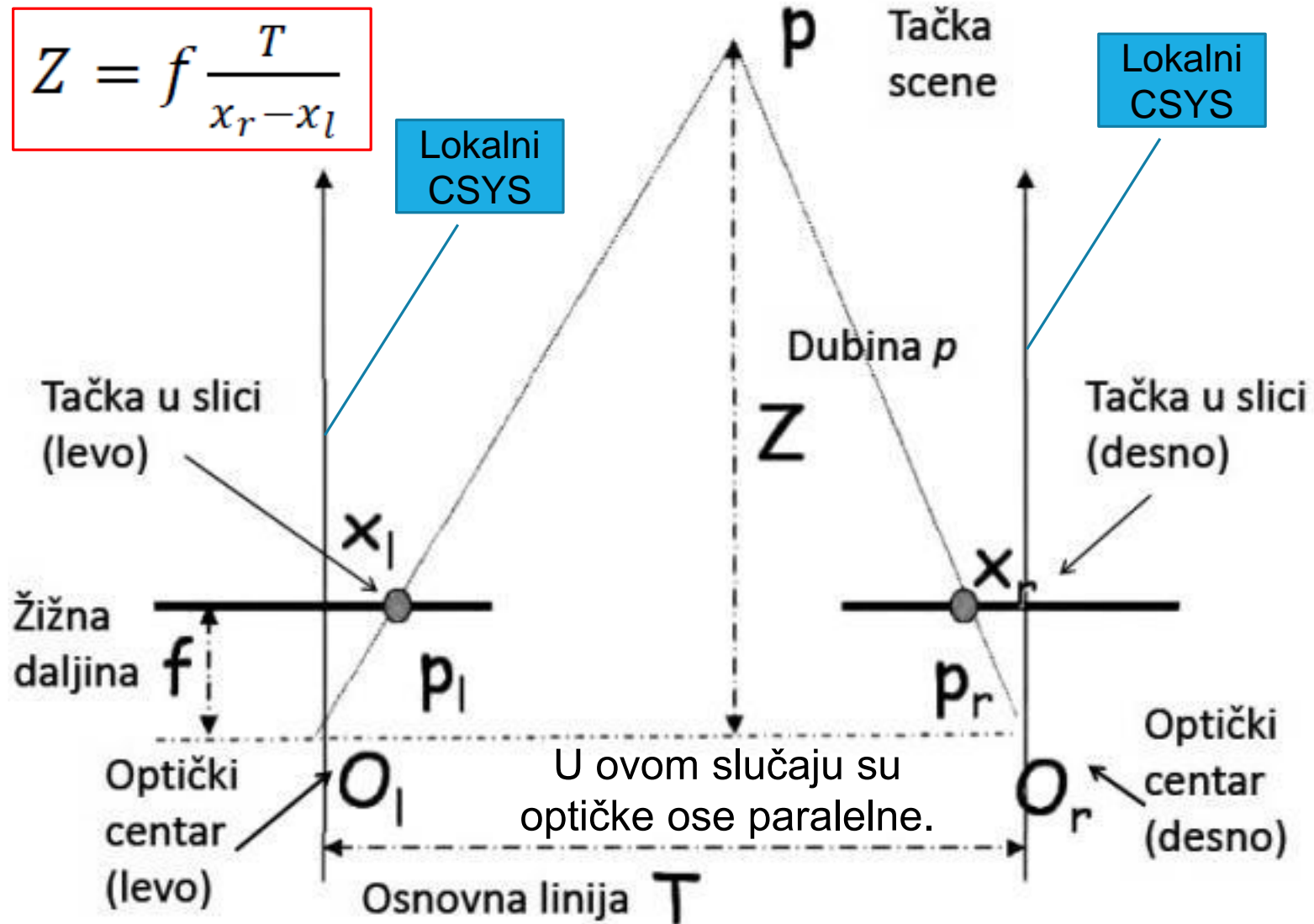
OSNOVNI PRINCIP FOTOGRAMETRIJSKE 3D DIGITALIZACIJE



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.

PRINCIP STEREOVIZIJSKE FOTOGRAMetriJE



Uticajni faktori na tačnost fotogrametrije

Fotogrametrijska piramida tačnosti



Piramida tačnosti



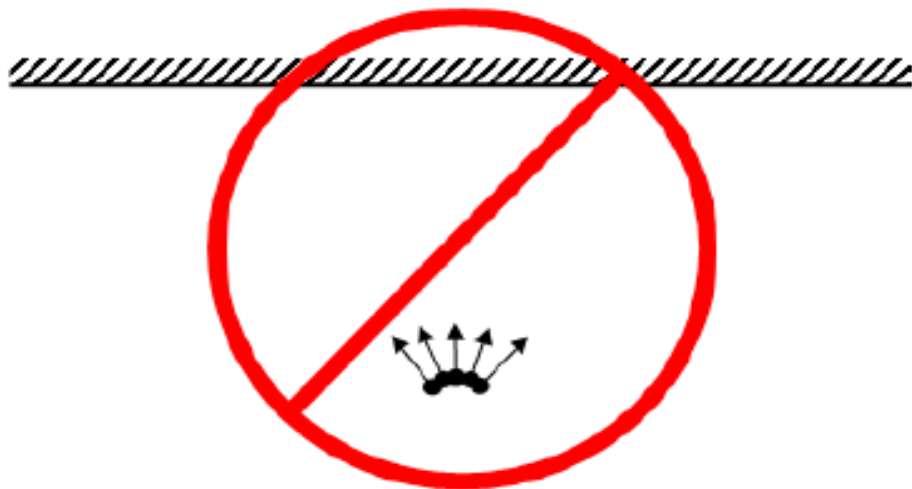
Karakteristike predmeta za fotografisanje

U osnovne karakteristike predmeta koji se digitalizuje fotogrametrijom spadaju:

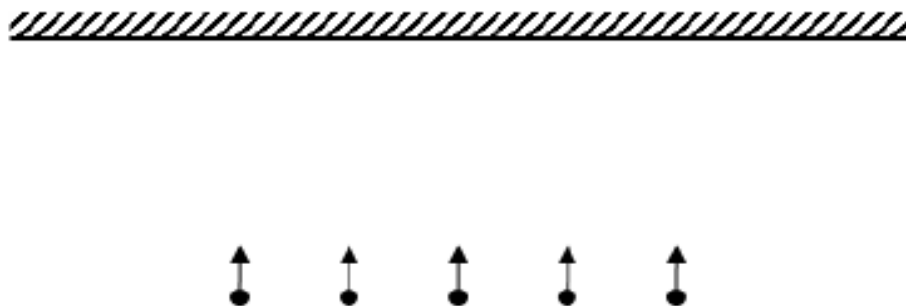
- **Oblik objekta:**
 - zapreminski ili fasadni,
- **Teksturisanost površine objekata:**
 - monotona ili dinamična,
- **Refleksivnost površine objekata:**
 - mala ili velika.

Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta

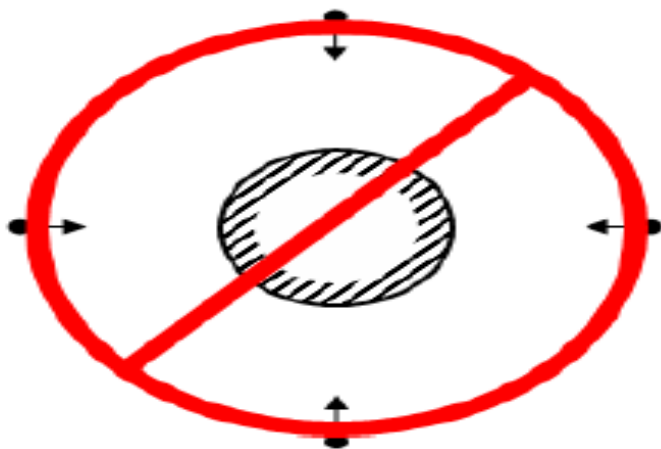
Fasadno slikanje (netačno)



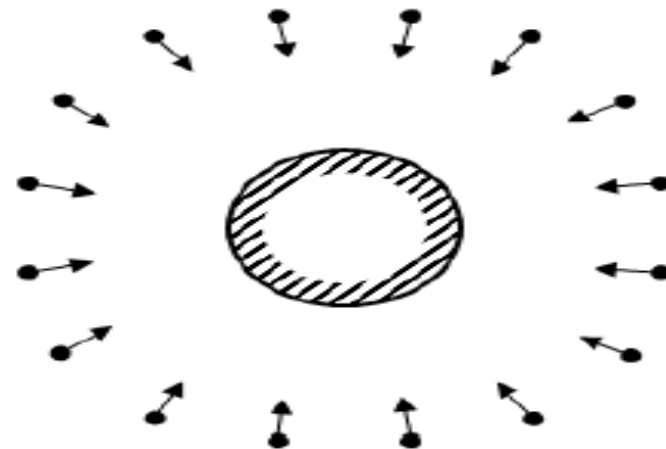
Fasadno slikanje (tačno)



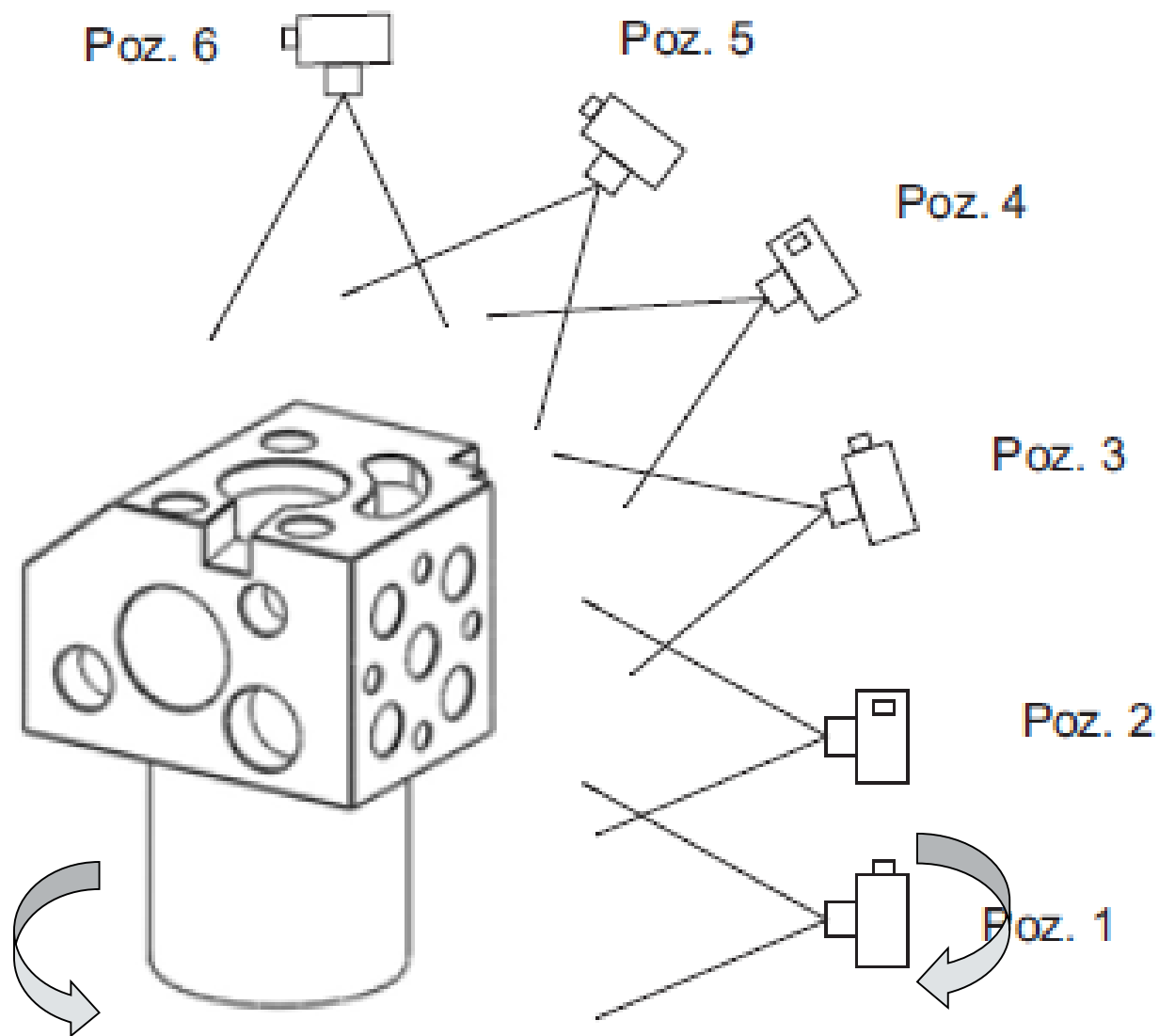
Izolovani objekat (netačno)



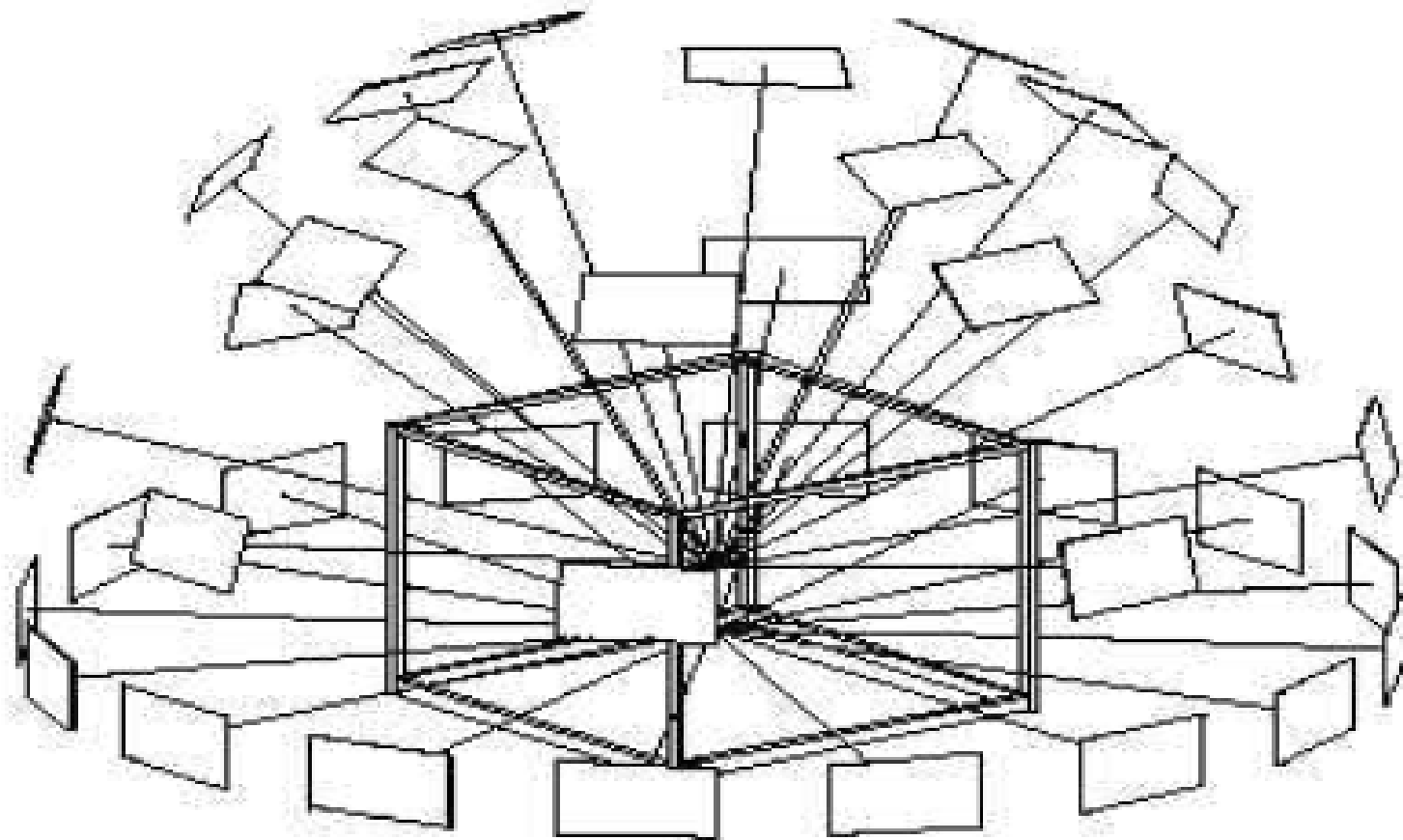
Izolovani objekat (tačno)



Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta



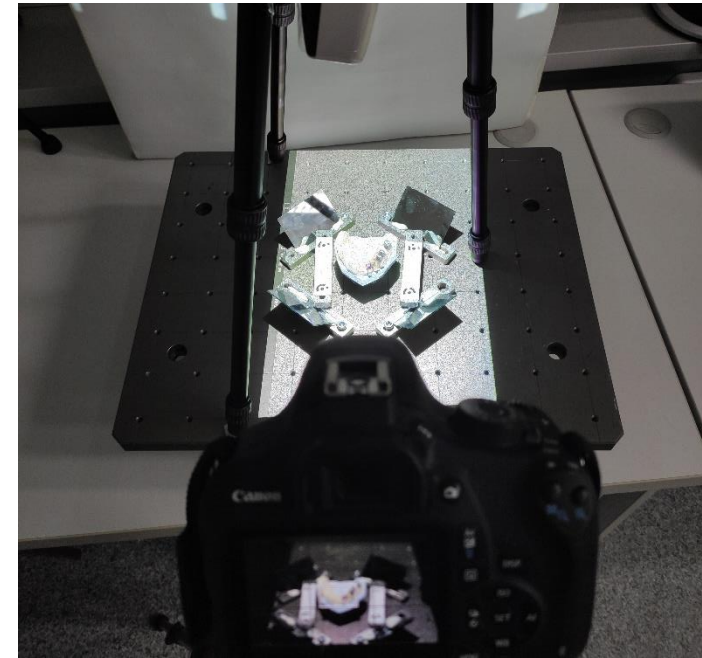
Fotografisanje u zavisnosti od oblika objekta



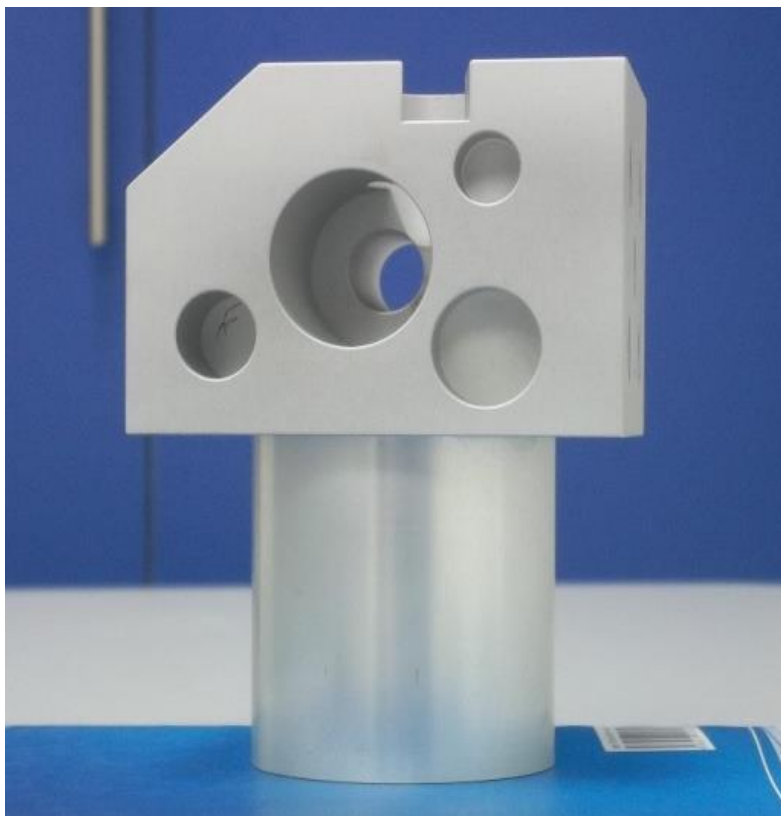
Karakteristike predmeta za fotografisanje

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

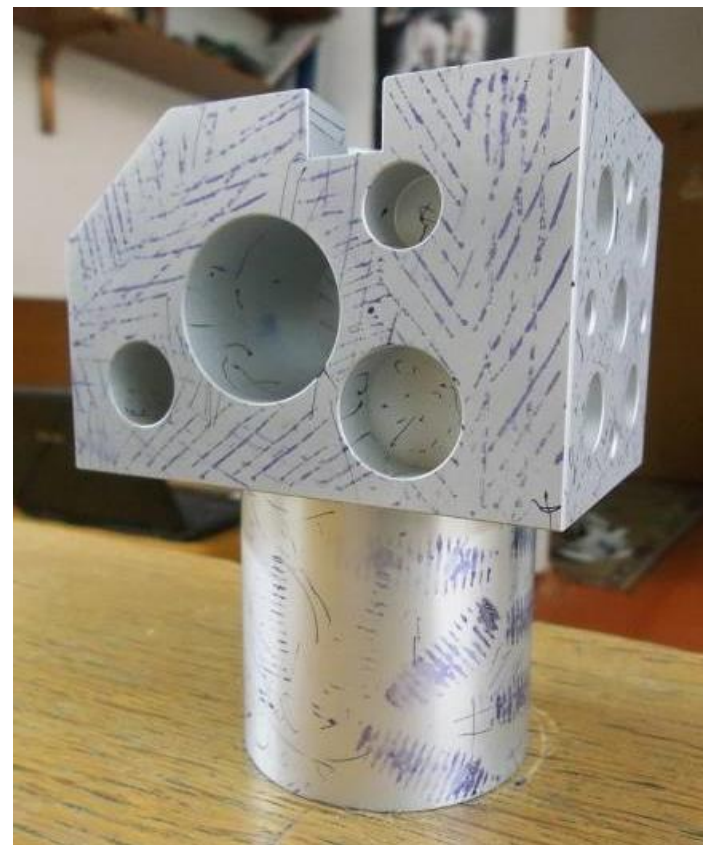
- 1) manuelno nanošenje teksture (lepljenjem, premazivanjem, spreisanjem)**
- 2) projektovanje digitalnih tekstura pomoću LCD projektora.**



Manuelno nanošenje teksture



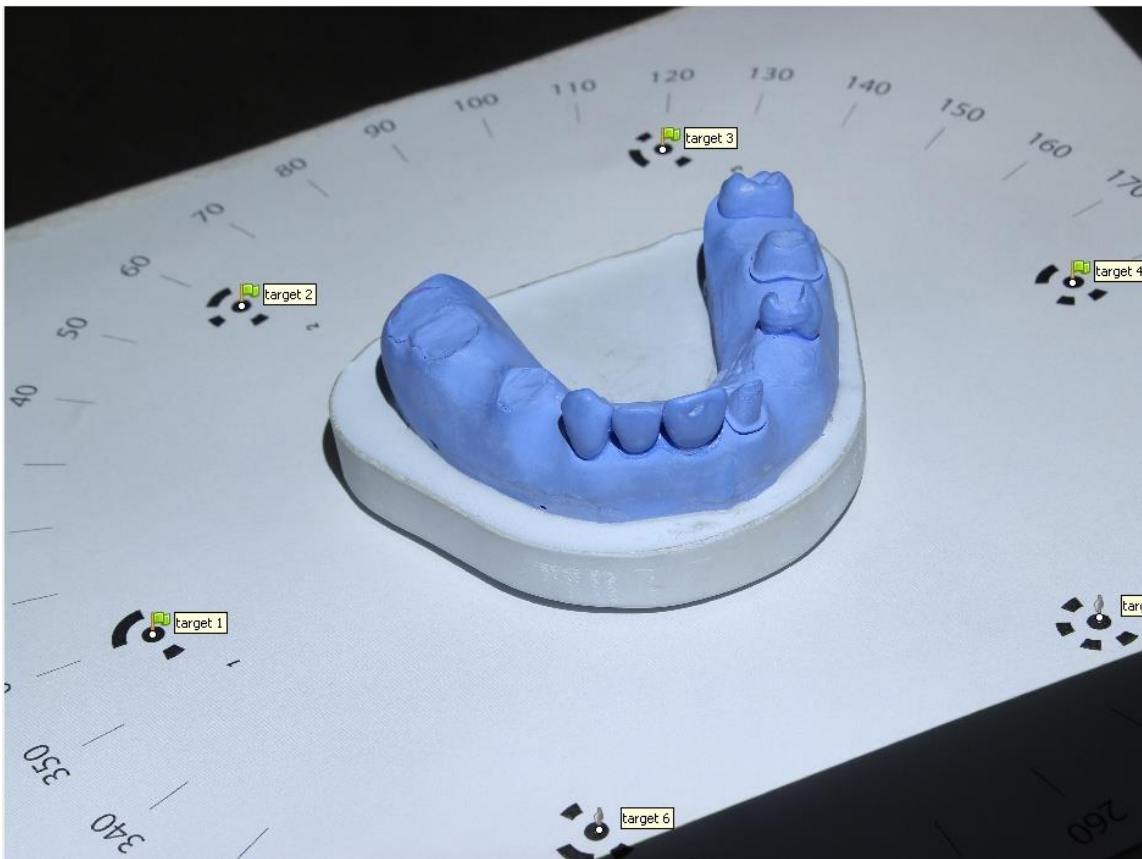
Nepovoljan predmet (visoka refleksija, nema uočljivu teksturu)



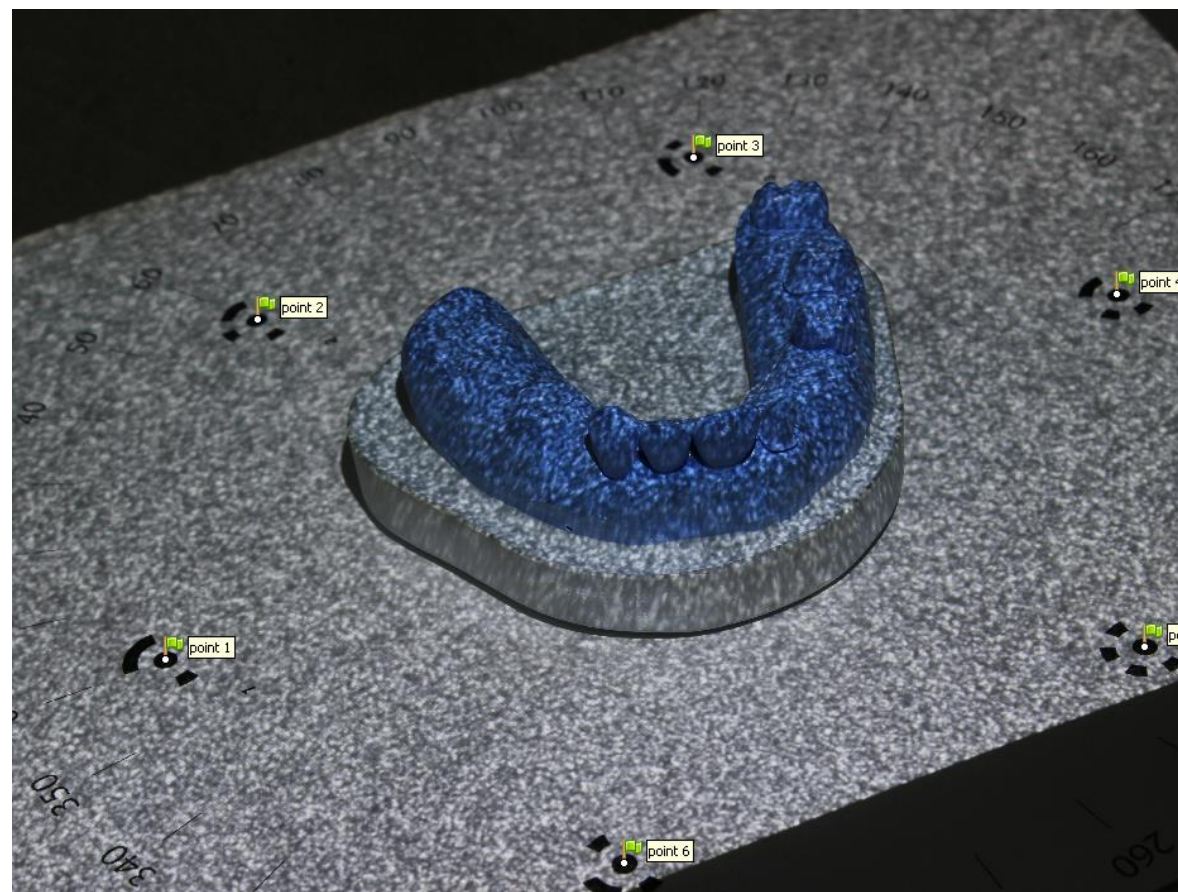
Povoljan predmet (smanjena refleksija, uočljiva tekstura)

Svetlostne teksture

Projektovana svetlosna tekstura



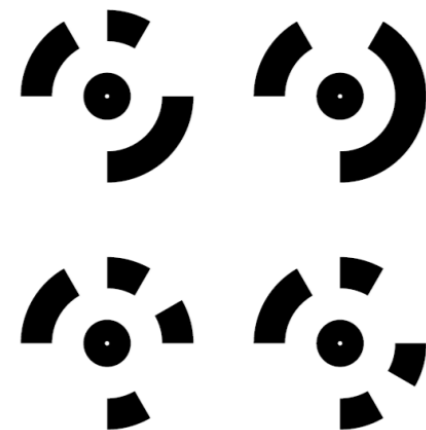
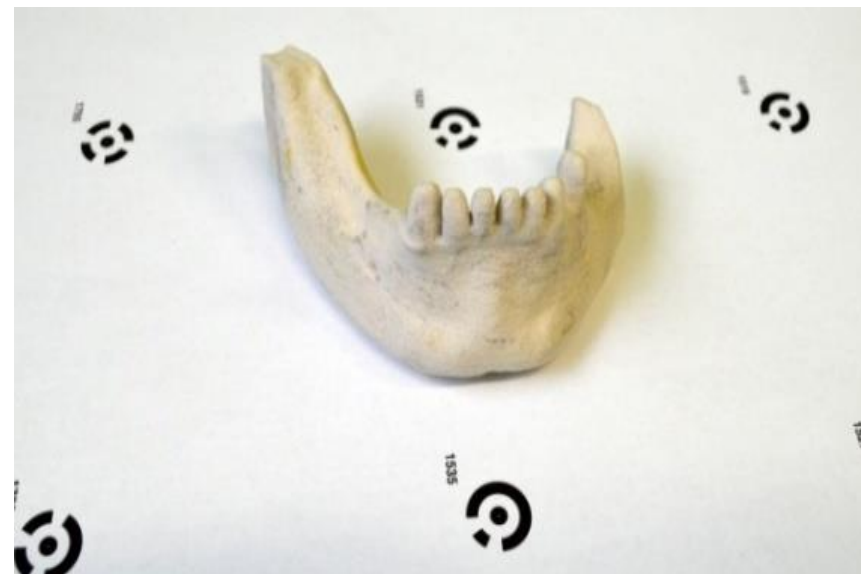
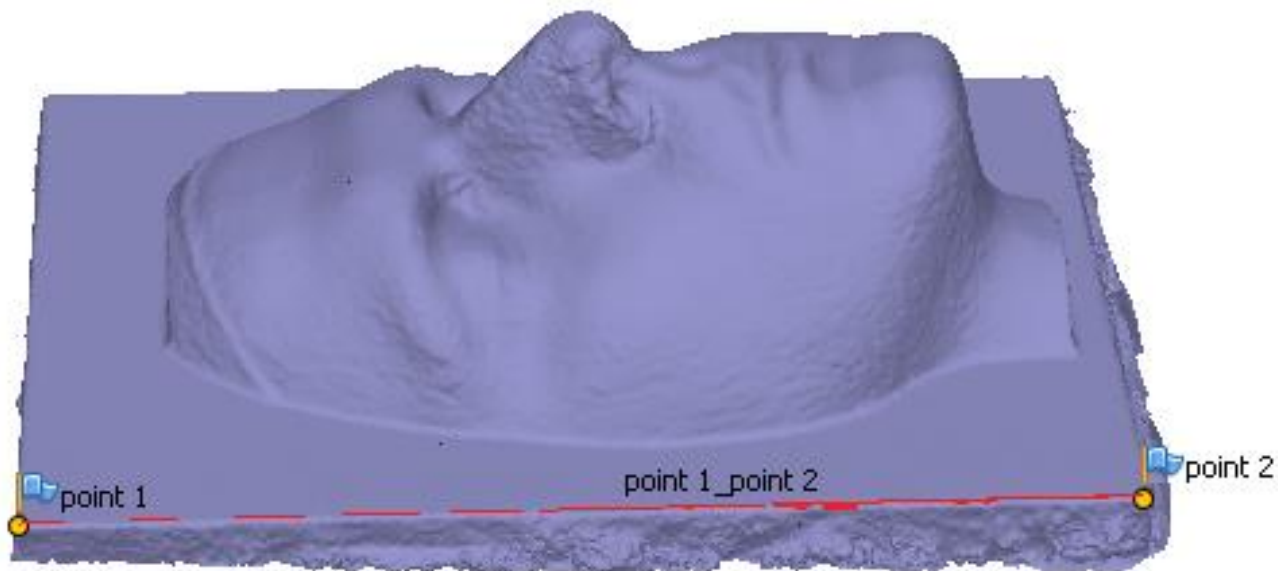
Nepovoljan predmet (nema uočljivu teksturu)



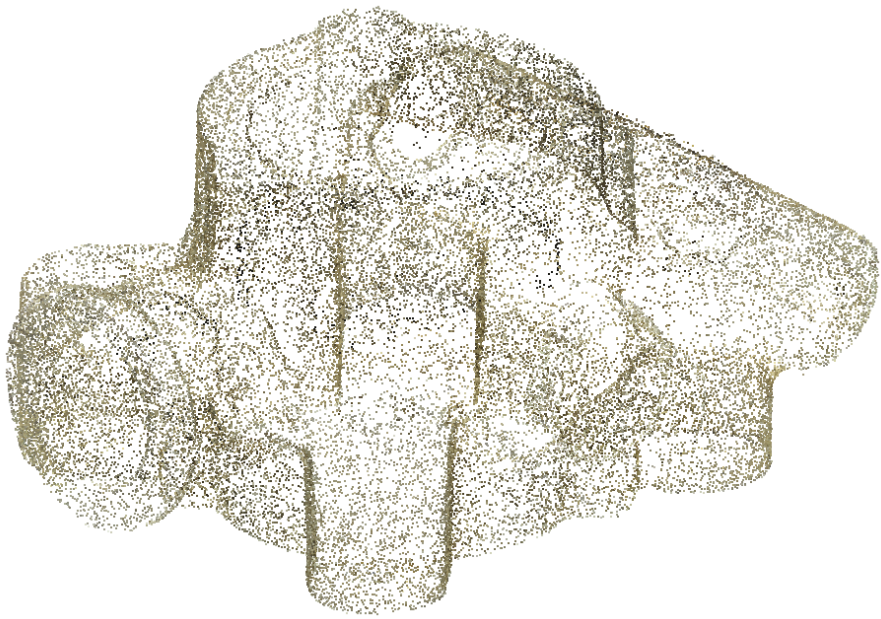
Skaliranje modela

Dva pristupa za skaliranje (Uspostavljanje razmere) 3D modela:

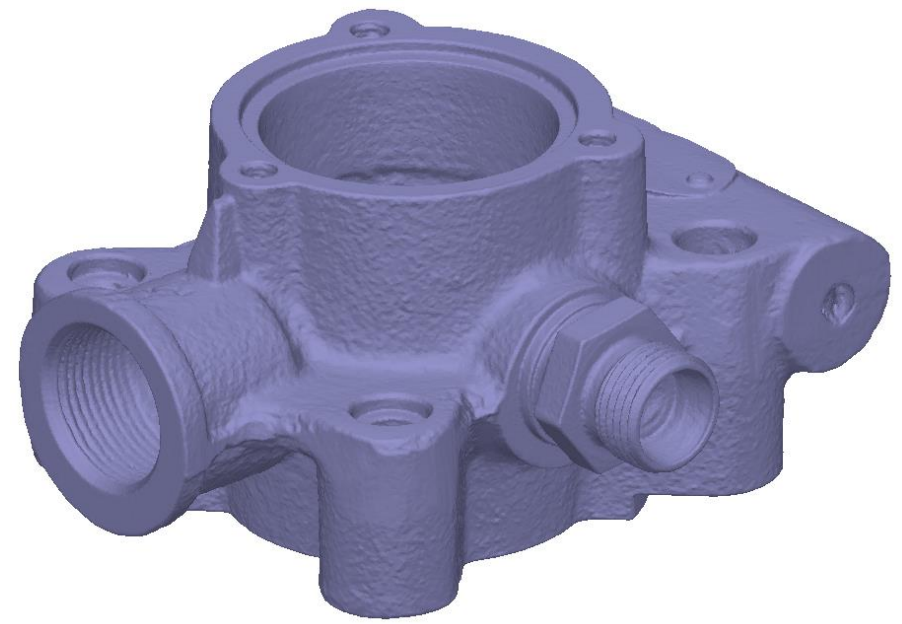
- 1) preko dimenzionisanih obeležja na predmetu i
- 2) pomoću kodiranih markera.



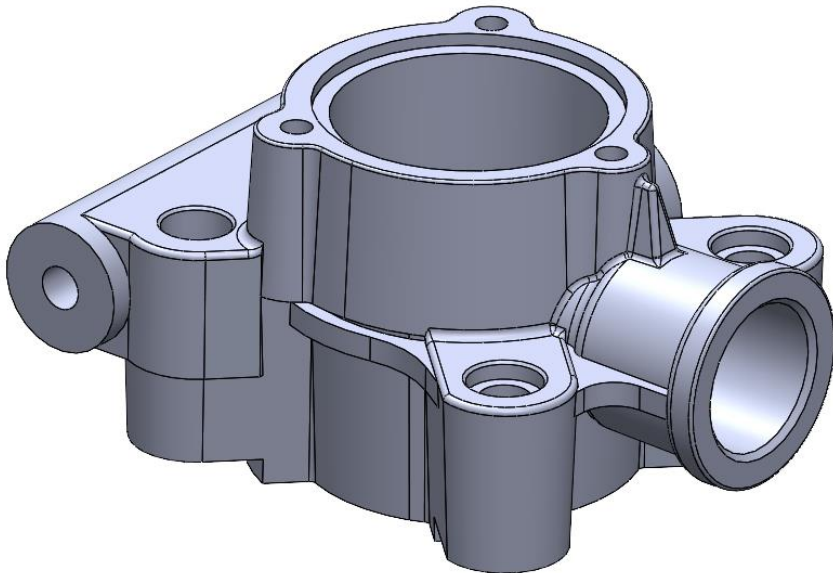
Primeri iz prakse



Oblak tačaka



Poligonalni 3D model



3D CAD model



Poligonalni 3D model sa teksturom



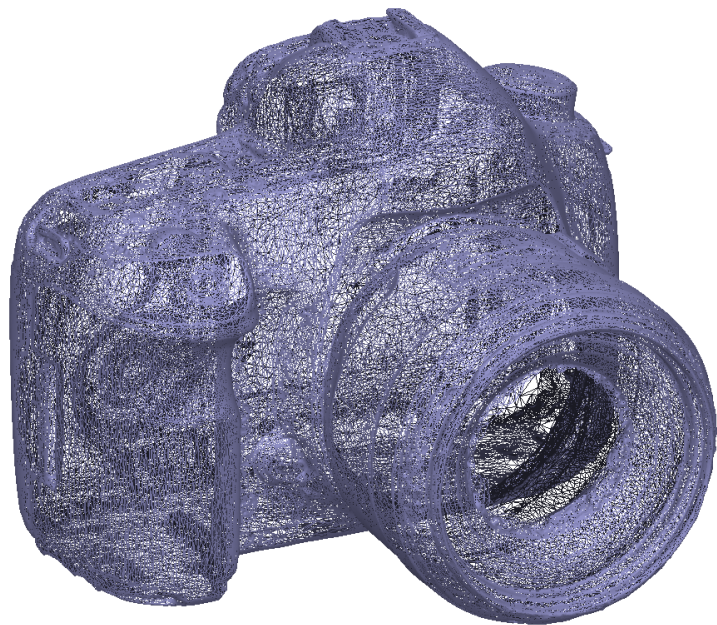
Oblak tačaka niske rezolucije



Oblak tačaka visoke rezolucije



Oblak tačaka visoke rezolucije u boji



Poligonalni 3D model žičani prikaz



Poligonalni 3D model



Poligonalni 3D model sa teksturom

