

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

OPTIČKE METODE 3D DIGITALIZACIJE

OPTIČKI RADARI

Refleksivne metode 3D digitalizacije

```
graph TD; A[Refleksivne metode 3D digitalizacije] --> B[Optičke]; A --> C[Ne-optičke];
```

Optičke

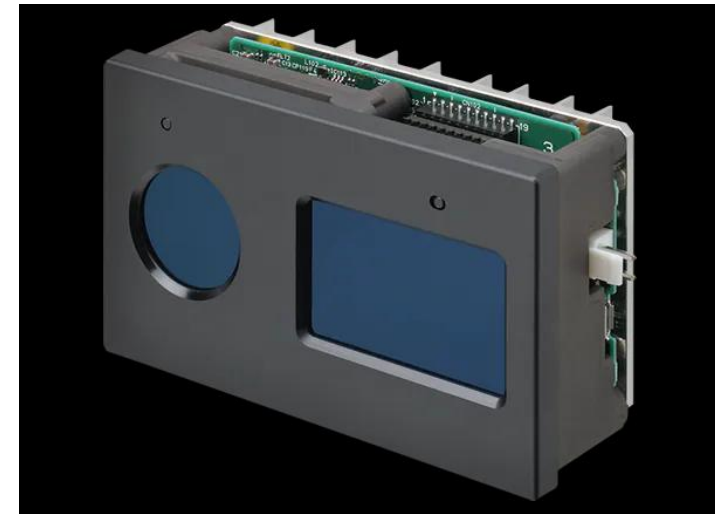
Ne-optičke

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

Optički radar

Na principu
**direktnog proračuna
vremena**
(LIDAR)

Indirektno na
principu modulacije
(ToF senzor - kamere)



Optički radar - princip direktnog proračuna vremena

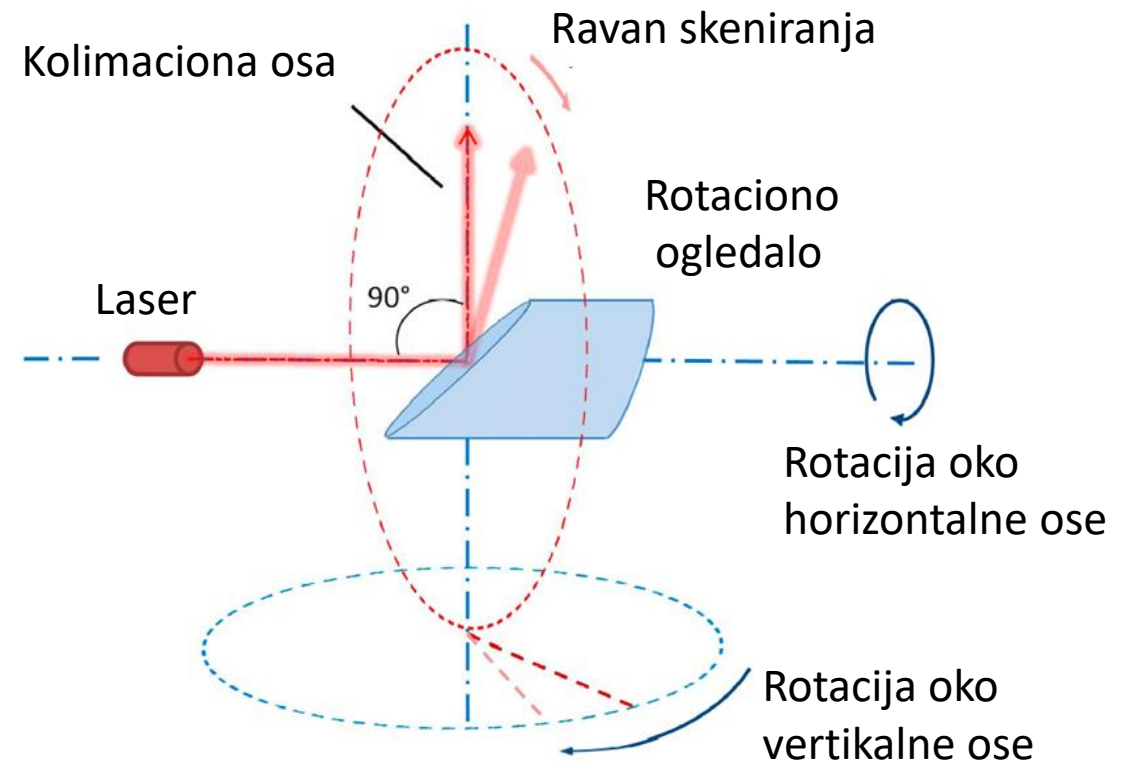
Radarama ove vrste 3D digitalizacija se realizuje određivanjem udaljenosti tačaka na objektu, na bazi vremena potrebnog da poslati **impuls laserske svetlosti** stigne do tačke na objektu i da se vrati do senzora.

Daljina r se izračunava iz sledeće jednakosti:

$$r = c \cdot t / 2$$

gde su:

- t izmereno vreme i
- c brzina svetlosti u vazduhu (300000 km/s).



Optički radar – LiDAR istorijski razvoj

LiDAR je skraćenica od **L**ight **D**etection and **R**anging, što znači detekcija i merenje udaljenosti pomoću lasera.

Najranije poznato pominjanje principa koji stoji iza LiDARA datira još od starih Grka.

Prema legendi, Arhimed je koristio niz ogledala da koncentriše sunčevu svetlost i zapali neprijateljske brodove tokom opsade Sirakuze (južna Sicilija) 212. p.n.e od strane Rimljana.



Optički radar – LiDAR istorijski razvoj

Pronalazak lasera 1960. godine napravio je revoluciju u polju određivanja razdaljine, jer je omogućio preciznija i tačnija merenja na većim udaljenostima.

Godine 1962. tim istraživača kompanije Hughes Aircraft razvio je prvi Lidar sistem sposoban da izmeri rastojanje između sistema i ciljanog objekta. Sistem je koristio rubin laser, koji je emitovao impulse svetlosti koje je ciljni objekat reflektovao nazad u sistem.

Merenjem vremena potrebnog da svetlosni impulsi putuju do cilja i nazad, LiDAR sistem je mogao da izračuna rastojanje do objekta.



<https://hobarts.com/pages/how-the-laser-was-invented-the-history-of-laser-cutters>

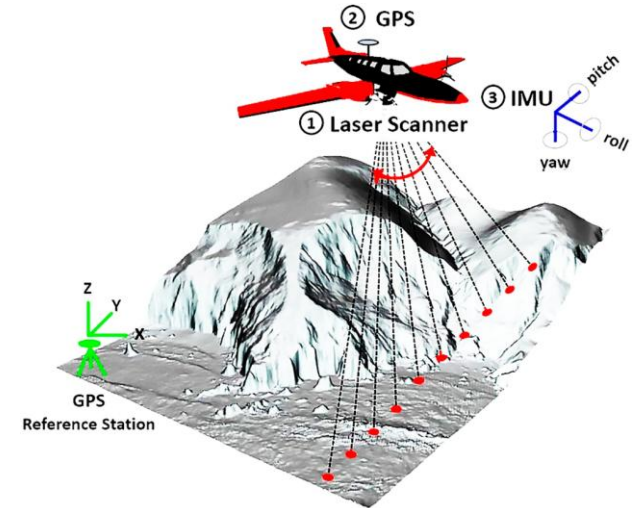
Optički radar – LiDAR istorijski razvoj

Jedan od najznačajnijih događaja u istoriji LiDAR-a bio je razvoj vazdušnih LiDAR sistema krajem osamdesetih.

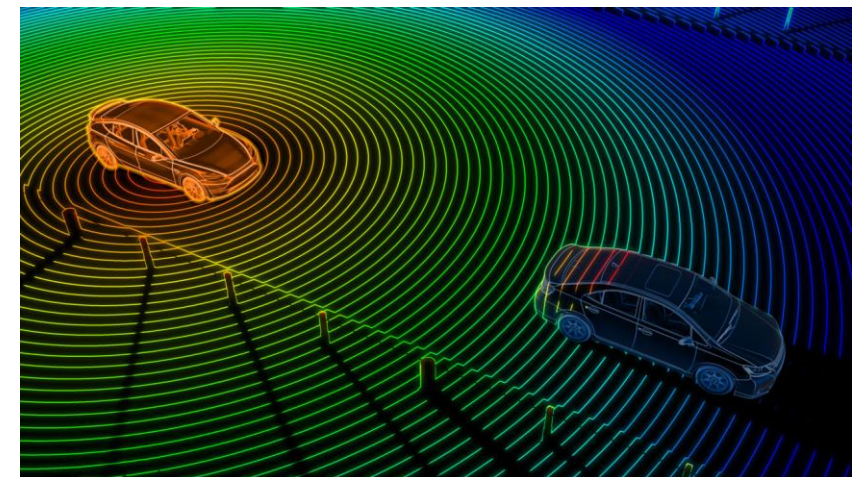
Vazdušni LiDAR sistemi koriste lasere postavljene na avione za skeniranje tla ispod. Ovo omogućava kreiranje veoma preciznih i detaljnih mapa velikih područja.

Vazdušni LiDAR se sada široko koristi za topografsko mapiranje, upravljanje šumama i urbanističko planiranje.

Početak 2000-ih, LiDAR tehnologija je korišćena u **razvoju autonomnih vozila**. Tehnologija je omogućila vozilima da kreiraju detaljne 3D mape svog okruženja, koje se mogu koristiti za navigaciju i izbegavanje prepreka.

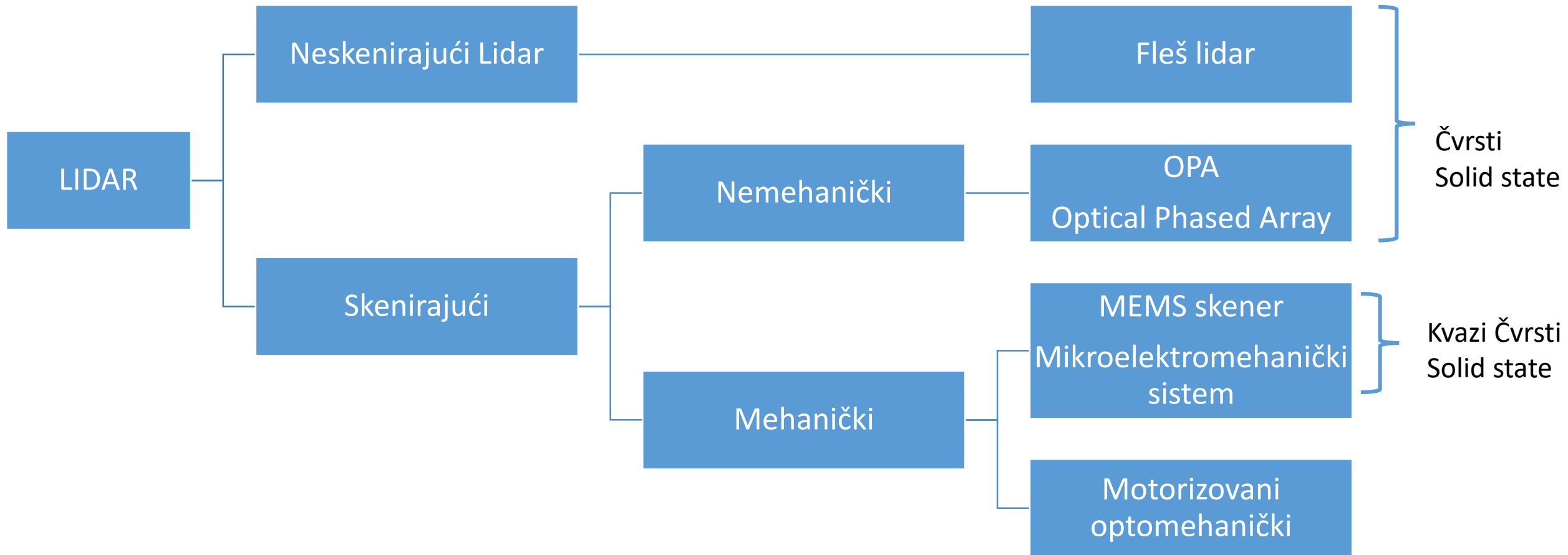


Höfle, B. & Rutzinger, M. (2011). Topographic airborne LiDAR in geomorphology: a technological perspective. *Z. Geomorphol.*, 55, 1-29.



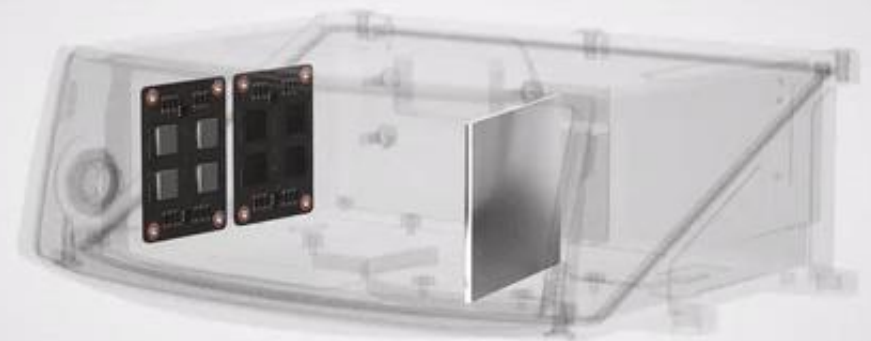
<https://www.ttp.com/insights/lidar-how-to-build-the-perfect-beam-steering-unit/>

Optički radar – LiDAR podela



LiDAR senzori - Motorizovani optomehantički

“**Mehanički**” Lidar senzori su najčešći tip Lidar senzora koji se koriste u SLAM aplikacijama. Sastoje se od laserskog emitera (izvora laserske svetlosti), detektora i motorizovane rotirajuće platforme, što omogućava senzoru da skenira okolinu usmeravajući laserske impulse kroz široko vidno polje.



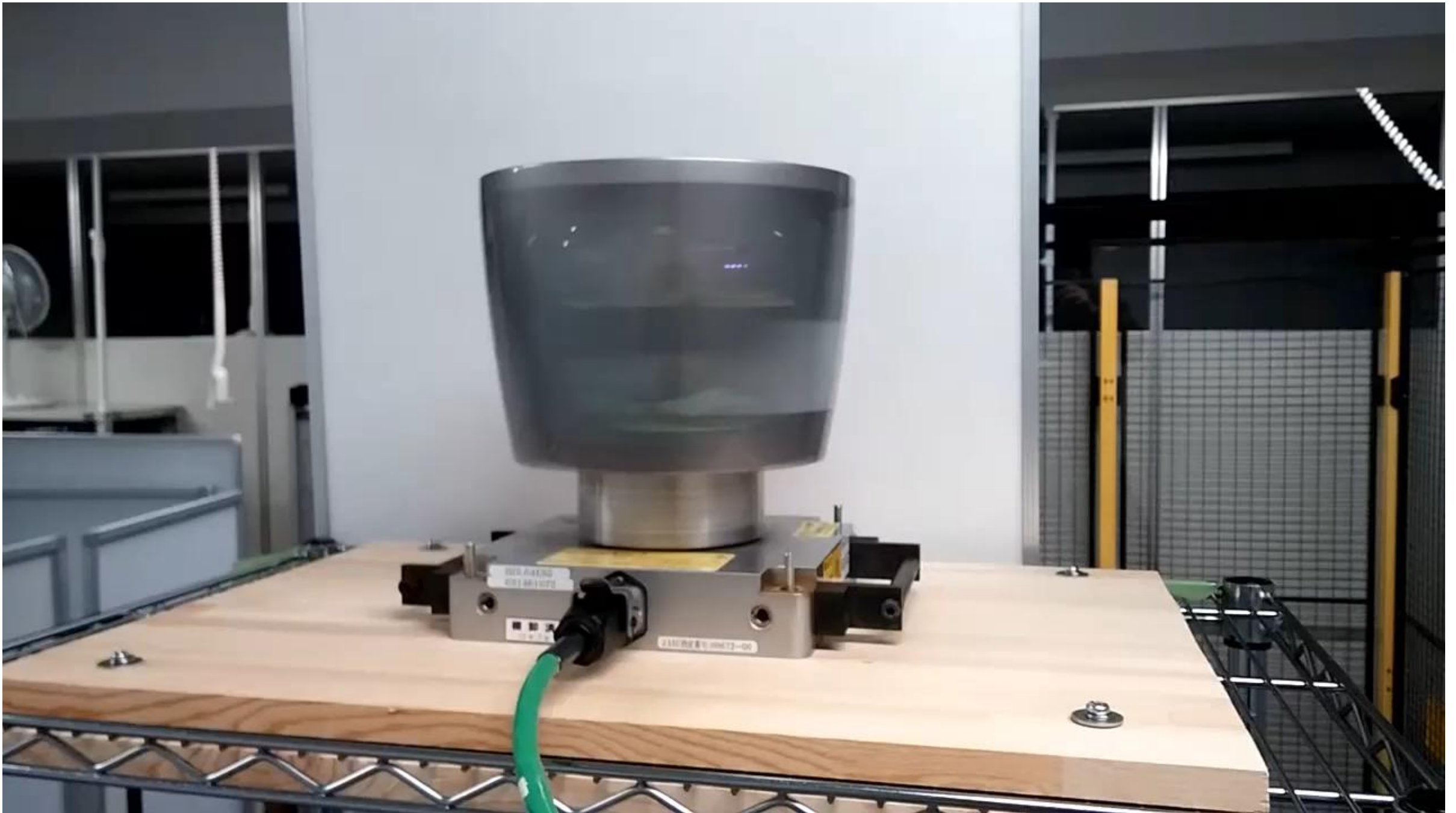
LiDAR senzori - Motorizovani optomehanički

Mehanički Lidar senzori mogu da obezbede oblake tačaka visoke rezolucije sa dometom do 200 metara, u zavisnosti od specifičnog modela senzora i konfiguracije.

Velodyne HDL-64E je primer mehaničkog skenirajućeg Lidar senzora koji se obično koristi u autonomnim vozilima i robotskim aplikacijama. Njegov skup podataka sadrži 64 laserska zraka za skeniranje, horizontalno vidno polje od 360 stepeni i vertikalno vidno polje od 26,9 stepeni, sa maksimalnim dometom od 120 metara i ugaonom rezolucijom od 0,08 stepeni.

Visoka rezolucija i široko vidno polje čine ga pogodnim za različite SLAM aplikacije koje zahtevaju detaljne podatke o životnoj sredini.





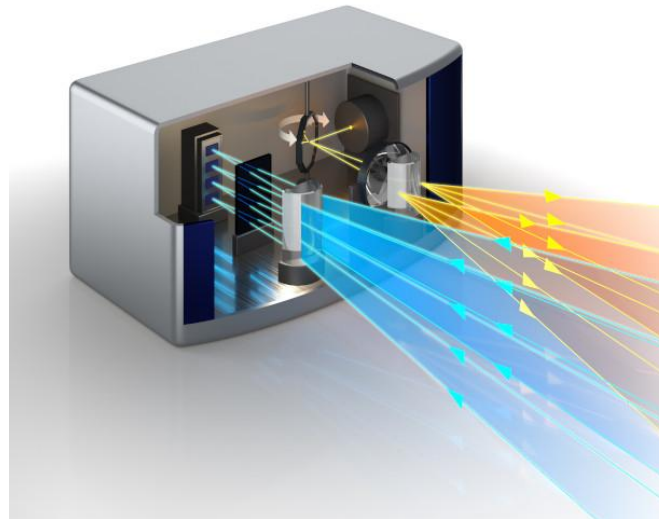
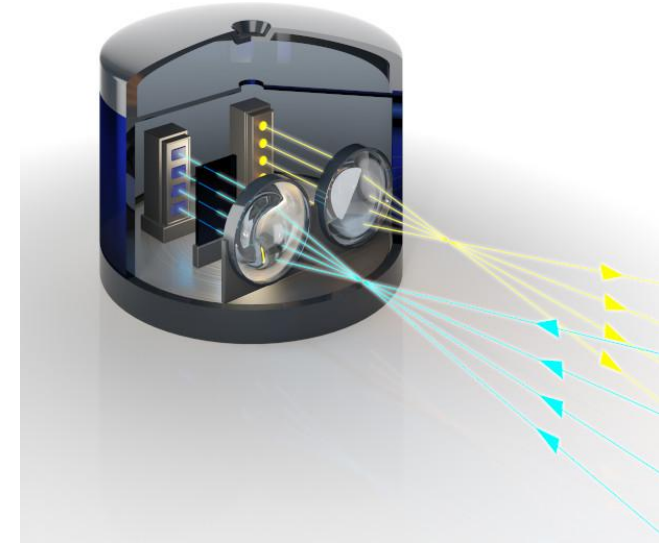
Optički radar – LiDAR senzori

Čvrsti **Solid-state Lidar senzori** predstavljaju noviju generaciju Lidar tehnologije koja se ne oslanja na pokretne delove za skeniranje okruženja.

Solid-state Lidar senzori koriste metode elektronskog usmeravanja snopa, kao što su:

- optičko fazno polje (Optical Phased Array - OPA) ili
- mikroelektromehanički sistemi (MEMS) ogledala, za usmeravanje laserskih impulsa kroz vidno polje.

Ovi senzori nude nekoliko prednosti u odnosu na mehaničke Lidar senzore, uključujući veću izdržljivost, manju potrošnju energije i smanjene dimenzije i težinu.



Optički radar – LiDAR senzori

InnovizOne je primer solid-state Lidar senzora dizajniranog za automobilske i robotičke primene.

Karakteristike senzora :

- domet do 250 metara,
- horizontalno vidno polje od 73 stepena
- vertikalno vidno polje od 20 stepeni
- uglavnom rezolucijom od 0,1 stepen



Optički radar – LiDAR senzori - Fleš

Fleš Lidar koristi niz laserskih izvora visoke gustine da emituje lasersku svetlost i brzo pokrije oblast koristeći prijemnik visoke osetljivosti za konstruisanje trodimenzionalne slike.

Radi kao blic kamera, šireći laserski zrak da osvetli scenu.

Nema pokretnih delova.

Za razliku od skenirajućeg LiDAR-a, ne konstruiše se oblak tačaka tačku po tačku, već generiše ceo 3D oblak tačaka u jednom bljesku.



Optički radar – LiDAR upotreba

Prema načinu snimanja, razlikuju se dve vrste LiDAR skenera:

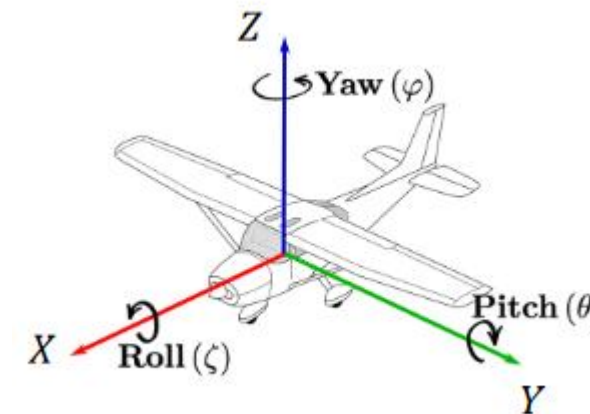
- **fiksni** sistemi i
- **mobilni** sistemi.

Dok se mobilni sistemi mogu podeliti na:

- Sisteme za snimanje sa zemlje (MLS, eng. Mobile LiDAR Scanning) ili
- Sisteme za snimanje iz vazduha (ALS, eng. Airborne LiDAR Scanning).

Mobilni sistemi koriste pored laserskog skenera i:

- **Globalni navigacioni satelitski sistem** (Global Navigation Satellite System – GNSS)
- **Inercijalnu mernu jedinicu** (Inertial Measurement Unit – IMU) koja koristi žiroskope i uređaje za merenje ubrzanja.
- **Digitalnu kameru** za prikupljanje fotografija koje se koriste za izradu digitalnih ortofoto planova.
- **Upravljačka jedinica** za skladištenje podataka 3D digitalizacije.



Optički radar – LiDAR – SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

Lidar SLAM dobija na popularnosti poslednjih godina, zahvaljujući svojoj svestranosti i primenama u različitim domenima uključujući:

- autonomna vozila,
- mobilnu robotiku i
- mapiranje zatvorenih prostorija.

Lidar SLAM, ili simultana lokalizacija i mapiranje, je proces koji omogućava robotima ili autonomnim sistemima da naprave mapu nepoznatog okruženja dok istovremeno određuju svoju poziciju unutar te mape.

Lidar SLAM sistemi mogu da kreiraju detaljne 3D oblake tačaka koji predstavljaju okruženje (3D svet) i koriste ove informacije za procenu položaja i orijentacije robota na mapi.

Optički radar – LiDAR – SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

SLAM algoritmi se obično sastoje od dve glavne komponente:

- koraka predviđanja i
- koraka korekcije.

Korak predviđanja, takođe poznat kao ažuriranje kretanja ili odometrije, procenjuje novu poziciju robota na **osnovu njegove prethodne pozicije** i informacija o kretanju koje su dali senzori.

Korak korekcije, takođe poznat kao posmatranje ili ažuriranje senzora, precizira predviđenu poziciju koristeći merenja iz okruženja, kao što su rastojanja do orijentira koje detektuje Lidar senzor.



Optički radar – LiDAR – Primena forenzika

Mape, modeli i drugi podaci koje prikuplja LiDAR tehnologija takođe se mogu koristiti na sudu kao neutralni zapisi zasnovani na podacima koji pomažu u određivanju uzroka ili posledica nesreće.

LiDAR sistemi mogu da prikupe ogromne količine vizuelnih detalja u jednom prolazu pre nego što lekari uopšte stignu, omogućavajući hitnim službama da se odmah fokusiraju na spasavanje života umesto na procenu situacije.

Sanitarne ekipe koji rade na uklanjanju posledica nesreće takođe mogu imati koristi od ovakvih modela.



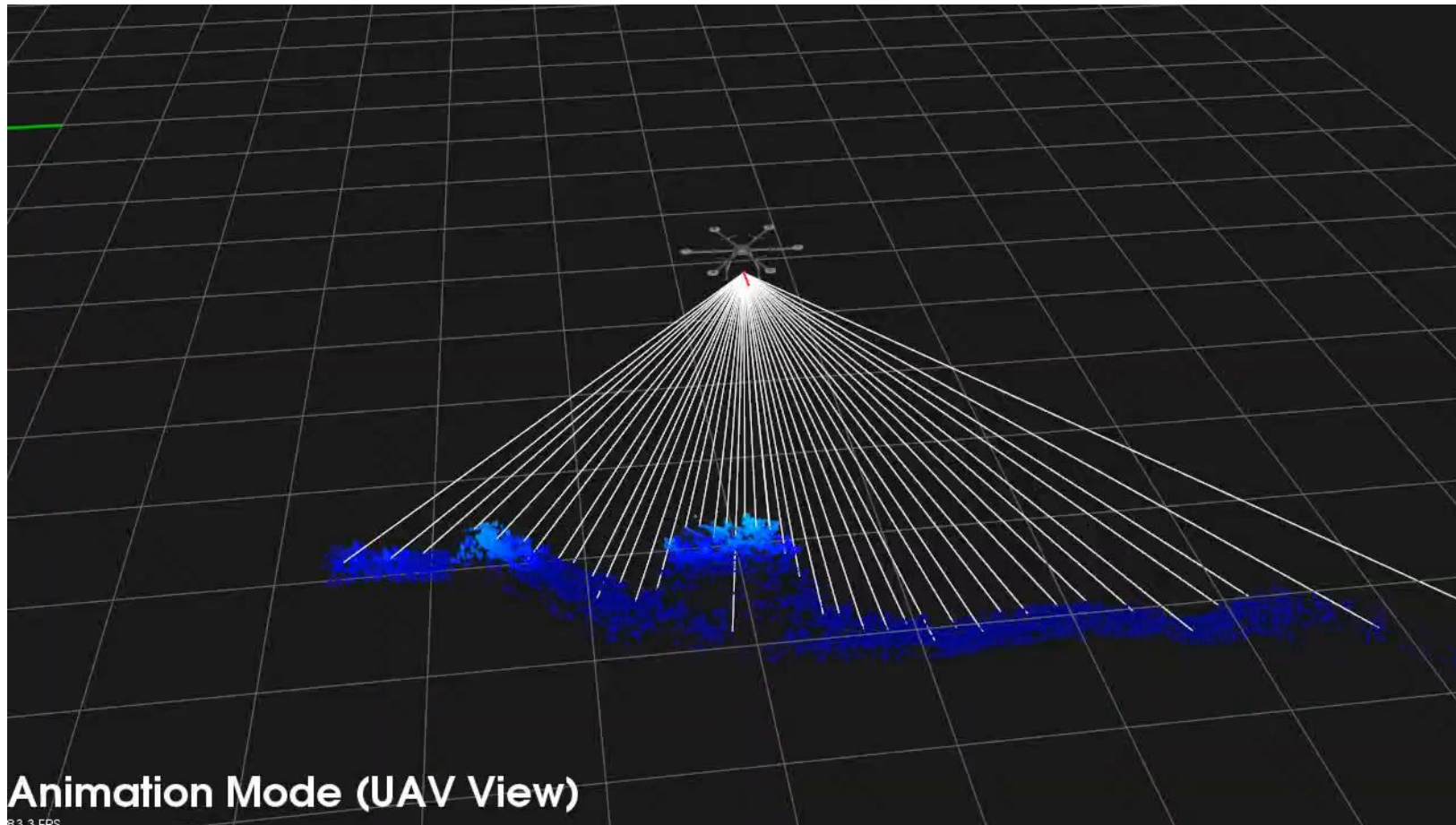


TRAFFIC CRASH RECONSTRUCTION

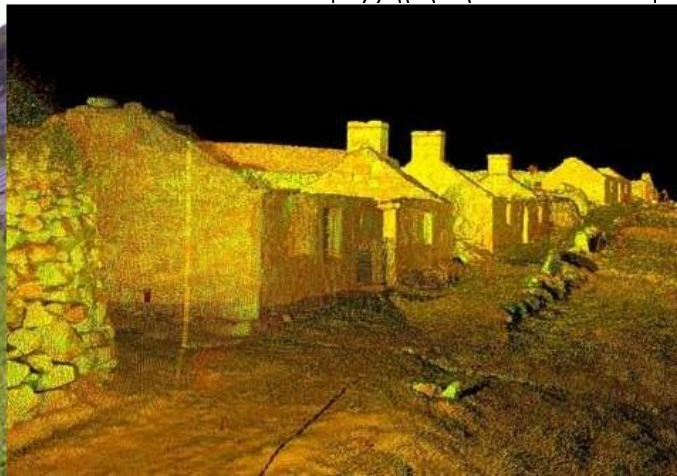
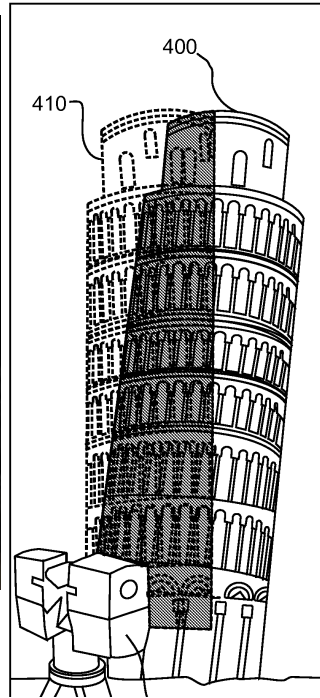
NOAR
TECHNOLOGIES
NAVIGATE. CONNECT. INSPIRE.

Optički radar – LiDAR – Primena poljoprivreda

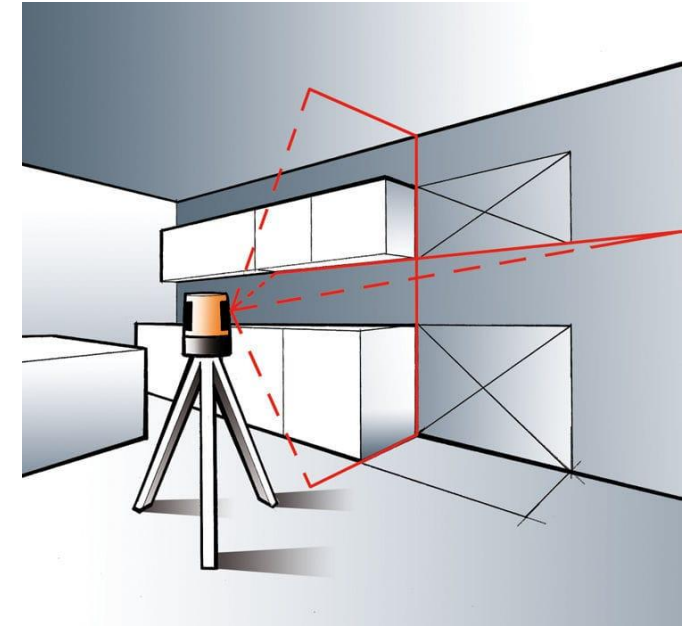
LiDAR tehnologija može pomoći u praćenju svega na farmi. Bilo da se radi o identifikaciji područja koja daju više useva, merenju poplavnih voda kako bi se odredio položaj nasipa ili praćenju lutajućeg stada goveda. Određene LiDAR postavke mogu čak otkriti pojedinačne insekte na farmi.



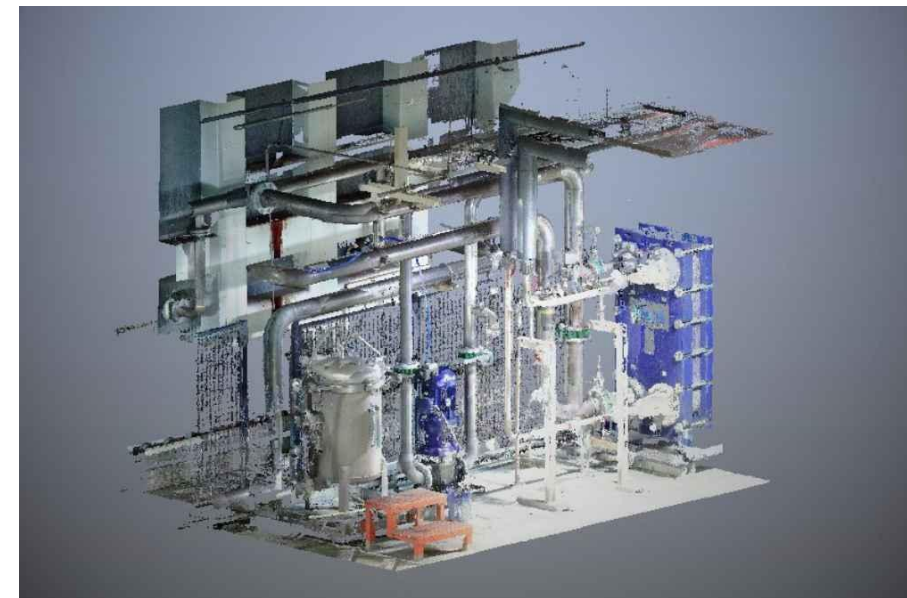
Optički radar – LiDAR – Primena kod zaštite kulturnog nasleđa



Optički radar – LiDAR – Primena arhitektura i građevina



Optički radar – LiDAR – Primena Industrija



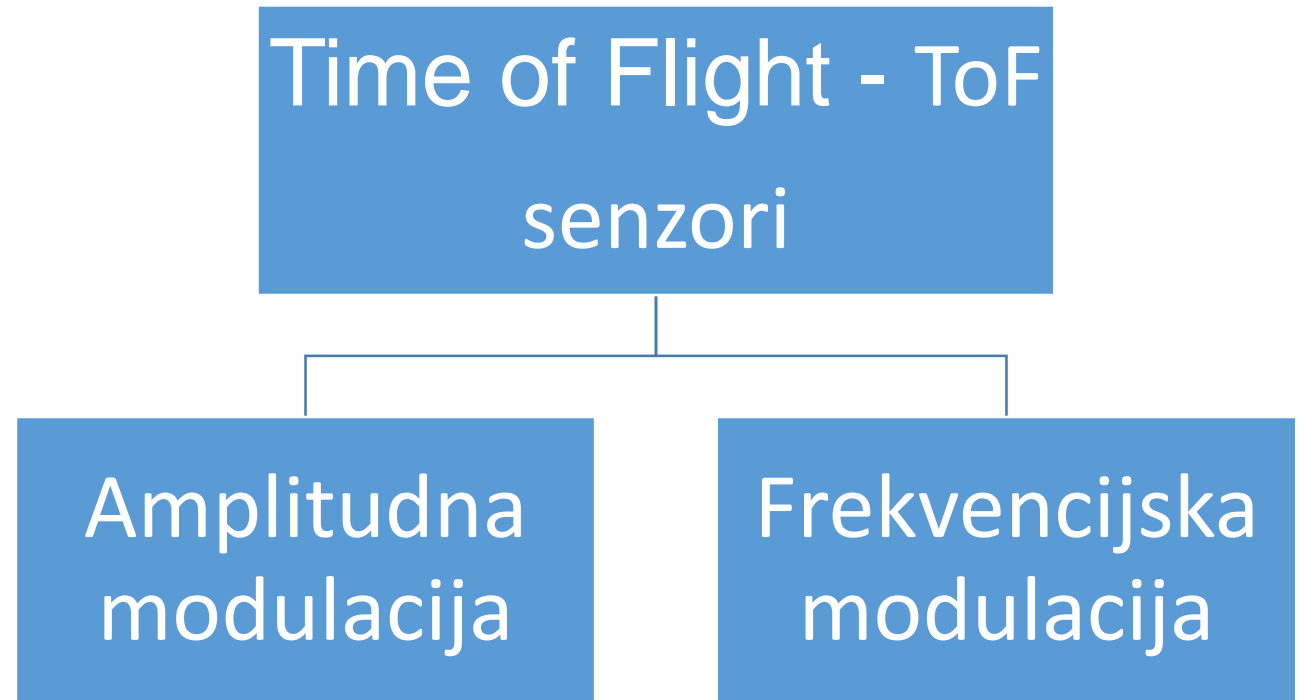
Optički radar - princip indirektnog proračuna vremena

Izvor svetlosti neprestano radi, ali se jačina snopa modulira tokom vremena.

Nakon što se odbije od objekta i vrati do senzora, reflektovana svetlost i dalje ima sinusoidnu promenu, ali fazno pomerenu u odnosu na emitovanu svetlost.

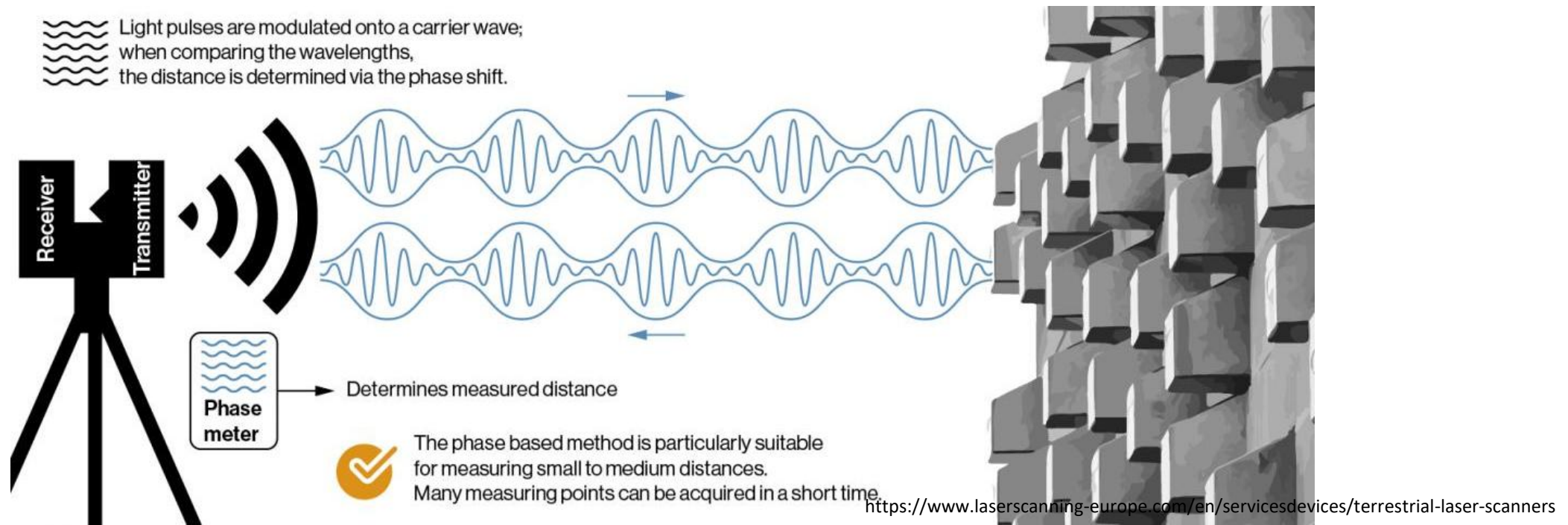
Najčešći izvori svetlosti su:

- infracrvena (infrared) svetlost,
- vidljiva bela svetlost.



Optički radar Time of Flight senzori na principu amplitudne modulacije (AMCW — Amplitude Modulated Continuous Wave)

Izvor svetlosti neprestano radi, ali se jačina snopa sinusoidno modulira tokom vremena. Nakon što se odbije od objekta i vrati do senzora, reflektovana svetlost i dalje ima sinusoidnu promenu jačine u vremenu, ali fazno pomeren u odnosu na emitovanu svetlost.



Optički radar na principu amplitudne modulacije

Merenjem fazne razlike emitovane i reflektovane svetlosti moguće je izračunati udaljenost tačke r na objektu preko sledeće jednakosti:

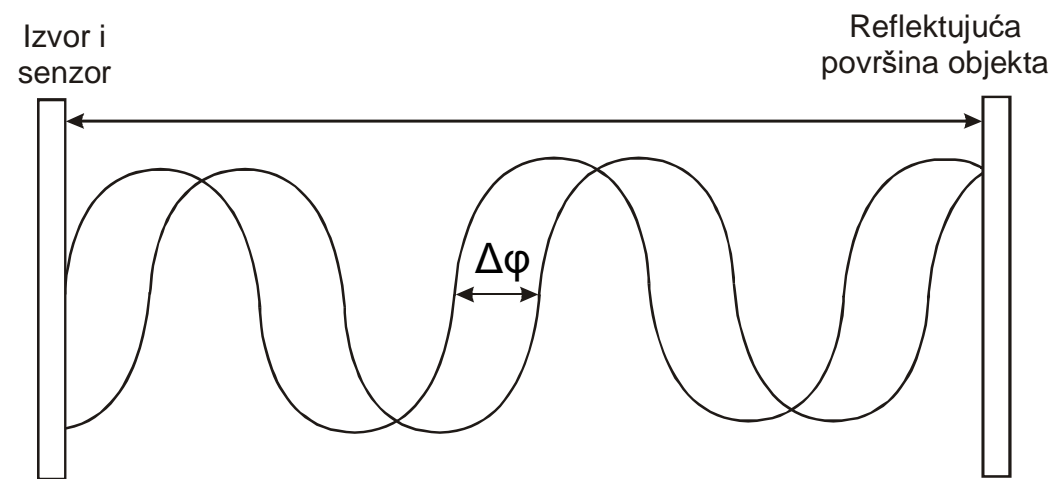
$$r = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_{AM}}$$

gde su:

c – brzina svetlosti

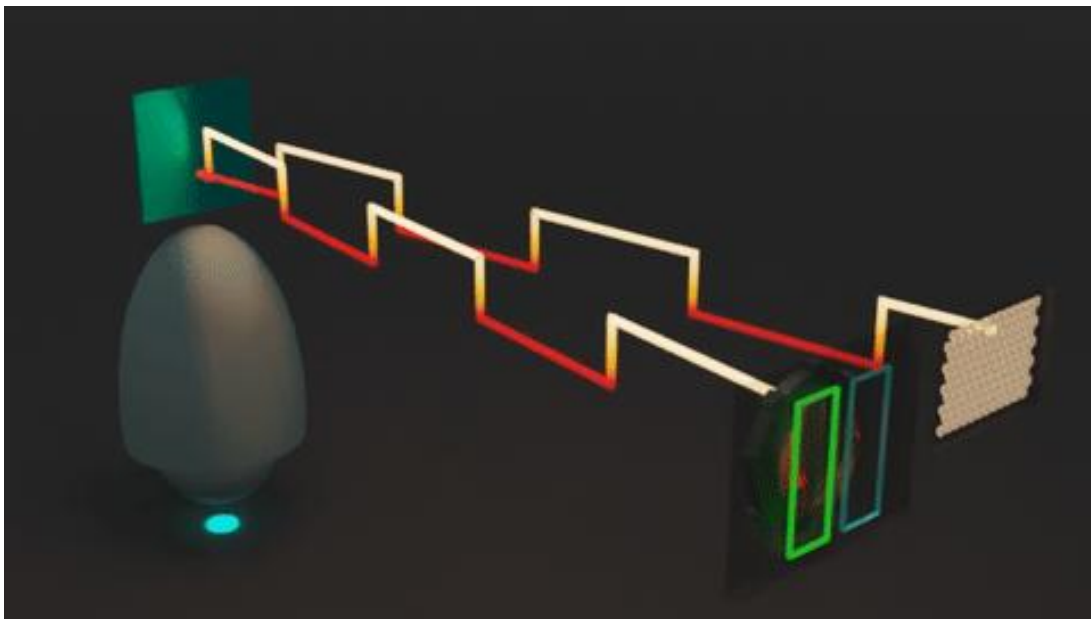
$\Delta\varphi$ – fazna razlika emitovane i reflektovane svetlosti i

f_{AM} – konstantna frekvencija talasa.



Optički radar na principu amplitudne modulacije – indirektni ToF kamera

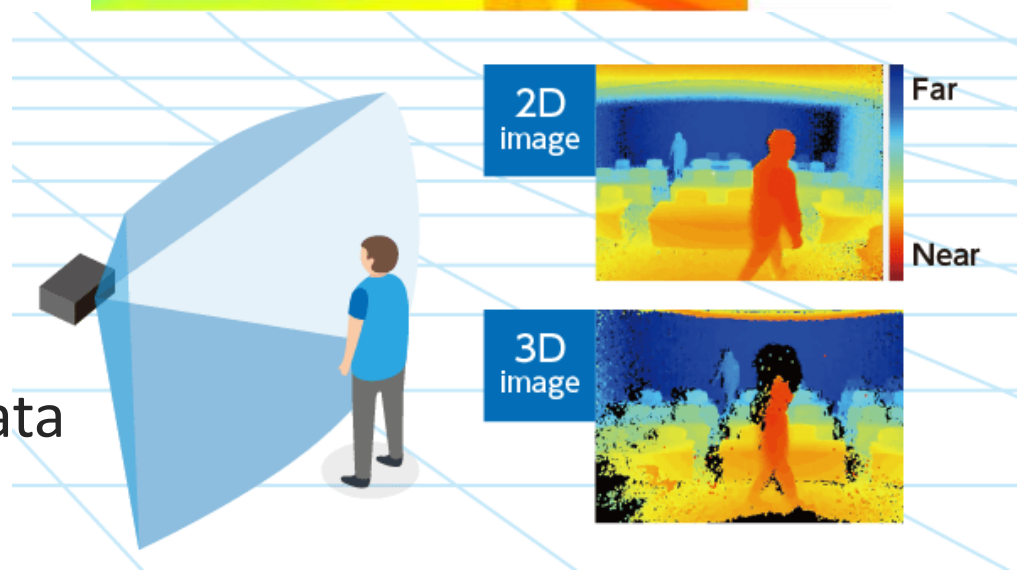
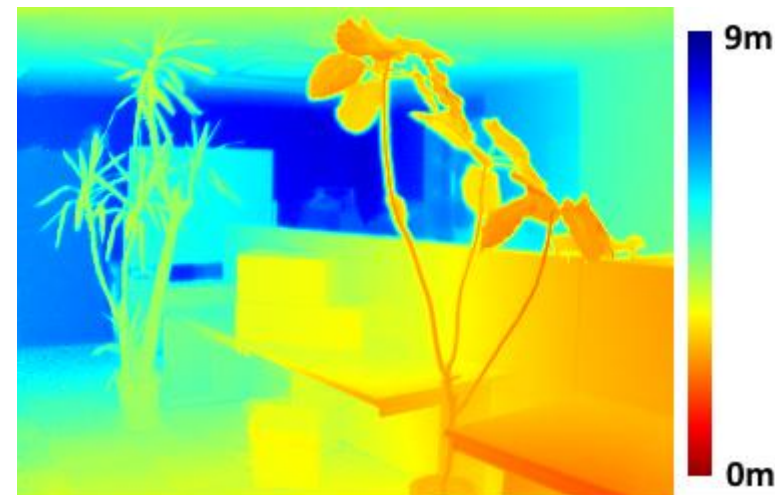
Fazni skeneri su ograničeni u pogledu dometa, tj. udaljenosti objekta koji se 3D digitalizuje.



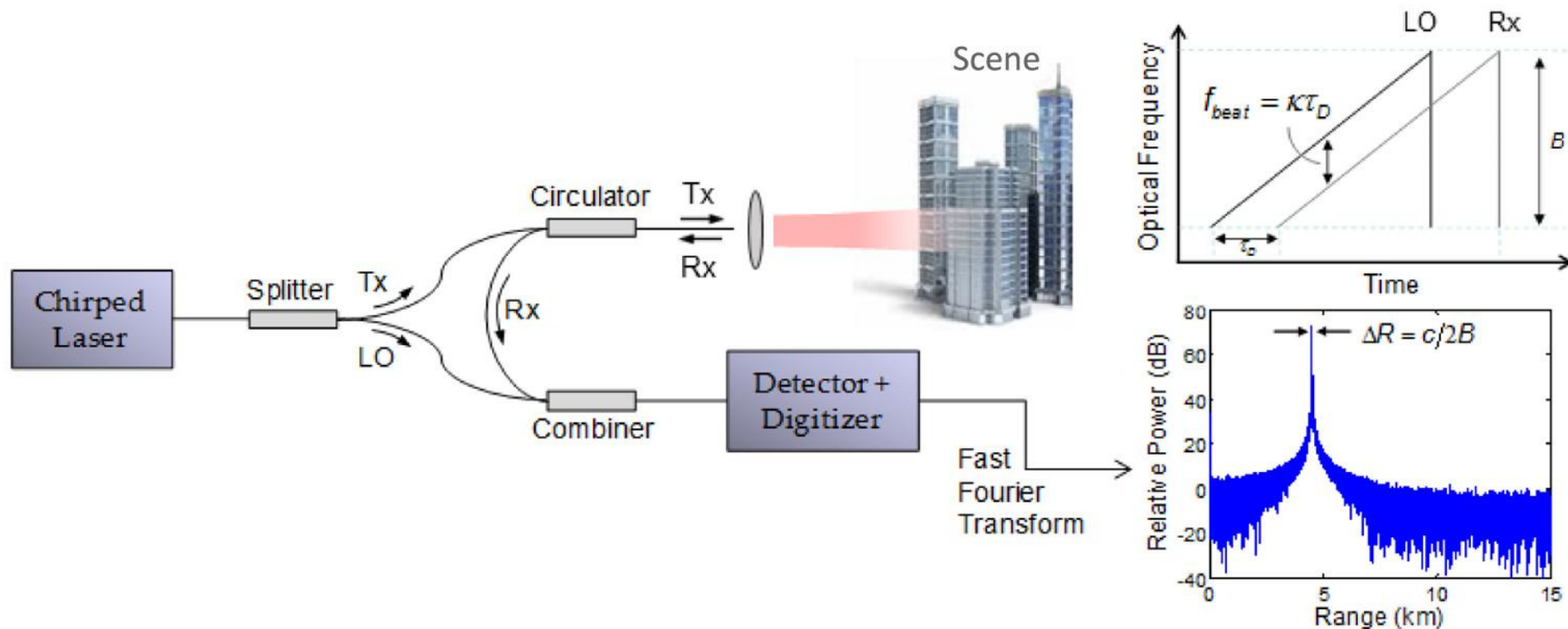
Prednosti amplitudne modulacije su:

- veoma velika brzina skeniranja,
- veća tačnost i rezolucija nego LIDAR.

Metoda je posebno pogodna za 3D digitalizaciju objekata složene geometrije na malim i srednjim udaljenostima.



Optički radar na principu frekvencijske modulacije



Svetlost lasera sa frekvencijskom modulacijom se deli na dva dela; jedan deo (Tx) se prenosi do cilja dok se drugi deo (LO) zadržava lokalno i ne putuje do cilja. Lasersko svetlo koje se vraća sa mete (Rx) interferometrijski se rekombinuje sa LO i detektuje. Slika (gore desno), prikazuje LO (crno) i Rx (sivo) optičke frekvencije kao funkcije vremena. Pošto je Rx putovao do cilja i nazad, on je jednostavno vremenski odložena replika LO talasnog oblika.

Optički radar na principu frekvencijske modulacije

Vremensko kašnjenje, τD , je povezano sa ciljnim opsegom (udaljenošću) R preko relacije:

$$\tau D = 2R/c$$

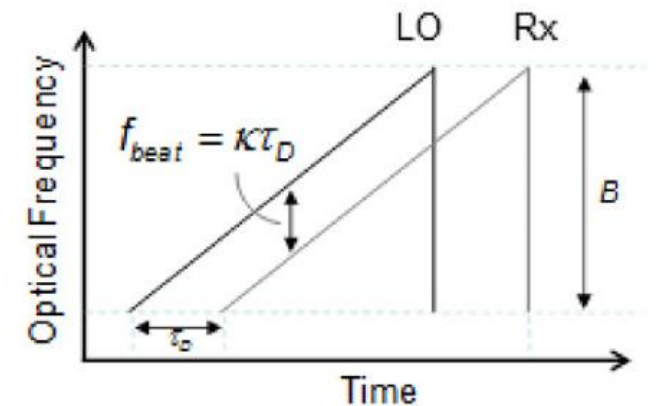
gde je c brzina svetlosti.

Detektor meri heterodinski otkucaj (frekvencija razlike) između dva optička polja. Frekvencija heterodina otkucaja je data sa

$$f_{beat} = \kappa \tau D$$

gde je κ brzina promene frekvencije.

Heterodinski otkucaj se javlja kada se dva signala sa različitim frekvencijama kombinuju, što rezultira novim signalom čija frekvencija je razlika između originalnih frekvencija.



Karakteristike optičkih radara

Lidar i ToF (Time-of-Flight senzori) uređaji za 3D digitalizaciju se prvenstveno razlikuju po preciznosti i dometu.

Lidar optički radari zasnovani na direktnom proračunu vremena nudi preciznost **do 1 mm** i ističe se u aplikacijama dugog dometa kao što su autonomna vozila, mapiranje terena, 3D digitalizacija većih objekata.

Indirektni ToF senzori (kamere) su kompaktniji, pogodni za zadatke kratkog do srednjeg dometa i troše manje energije, a takođe mogu da generišu mapu dubina.

Univerzitet u Novom Sadu
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
Animacija u inženjerstvu
Predmet: Metode 3D digitalizacije

BESKONTAKTNE METODE 3D-DIGITALIZACIJE REFLEKSIVNE METODE

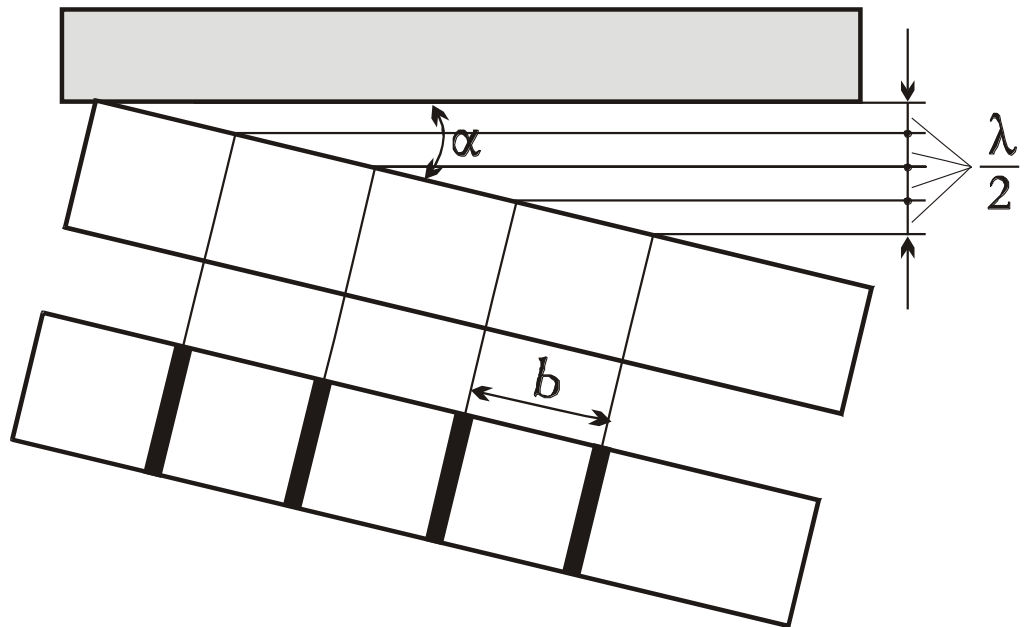
Interferometrija i fokusna varijacija

Interferometrija

Princip se zasniva na analizi interferentnih pruga (šablona) čiji oblik je posledica vrste neravnina na površini koja se digitalizuje.

U slučaju kada je vazdušni sloj u obliku klina, javljaju se interferentne svetle i tamne pruge.

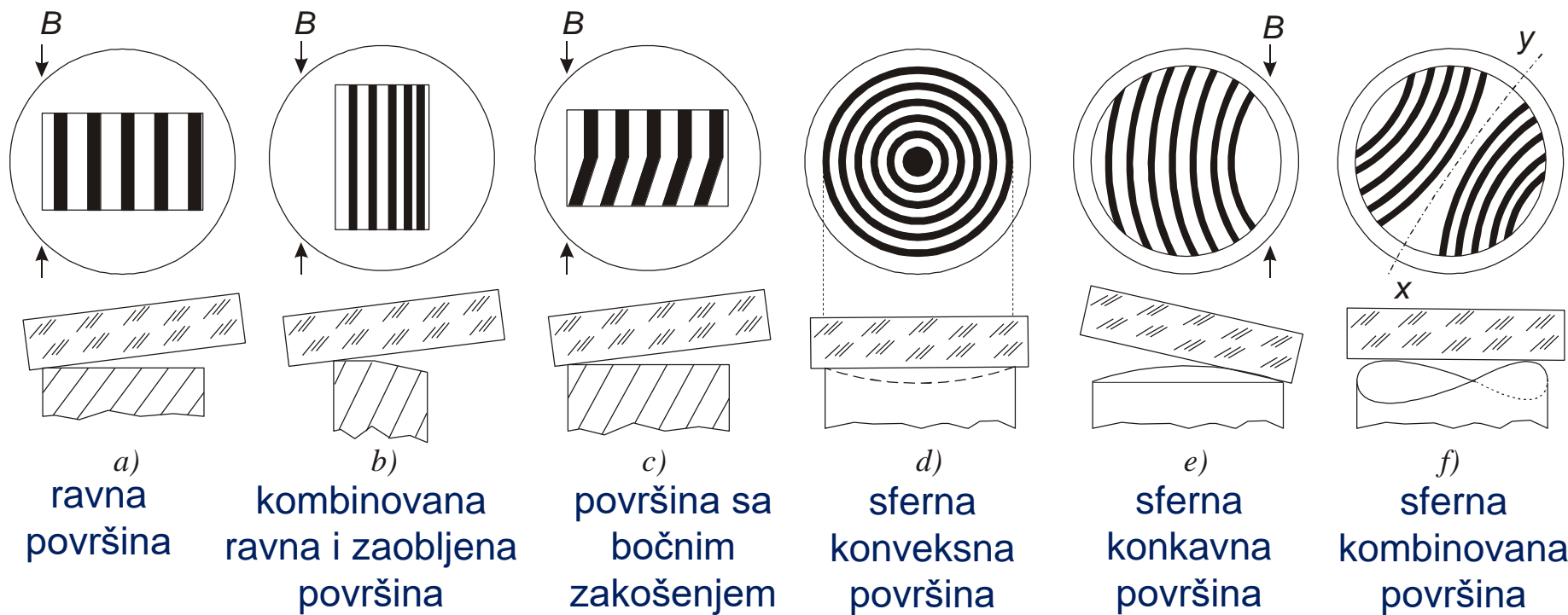
Primenom monohromatske svetlosti dobiće se jasne crne i bele pruge, dok bi se primenom dnevne svetlosti dobile pruge u vidu spektralnih boja.



$$b = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

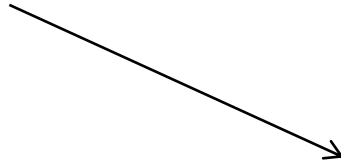
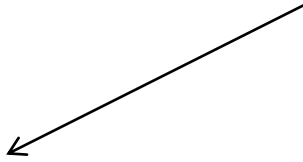
- b - širina trake
- λ - talasna dužina
- α - ugao klina

Oblik i raspored interferentnih pruga u zavisnosti od oblika ispitivane površine





Interferometrija



Holografska

Moire-ova

Holografaska interferometrija

- ✓ Naziv **holografija** potiče od grčkih reči ὅλος (hólos; "celo") i γραφή (graphḗ; "pisati" ili "crtati");
- ✓ Mada se ne zna tačan podatak, može se reći da se holografaska interferometrija pojavila i počela da se razvija 60-tih godina XX veka, sa razvojem lasera;
- ✓ Holografaska interferometrija se razvila na osnovama klasične interferometrije i njen pronalazak je omogućio primenu interferometrije (do tada ograničenu na transparentne objekte kao što su gasovi, tečnosti, ogledala, sočiva i sl.) i na proučavanje procesa u medijima koji nisu optički uniformni, kao i kod objekata sa difuznom refleksijom;
- ✓ **Osnovna razlika između klasične i holografске interferometrije** je u tome što kod klasične interferometrije dolazi do interferencije talasa koji su u jednom vremenskom trenutku prešli različite putanje, dok **kod holografске interferometrije dolazi do interferencije talasa koji su u različitim vremenskim trenucima prešli identične putanje.**

Moiré-ova interferometrija

Iako se Moiré-ove tehnike primenjuju već dugi niz godina, tek od skora je sagledan njihov ukupni potencijal.

Moiré-ova interferometrija se razvila iz konvencionalne holografske interferometrije i mnogi je smatraju vrstom holografske interferometrije.

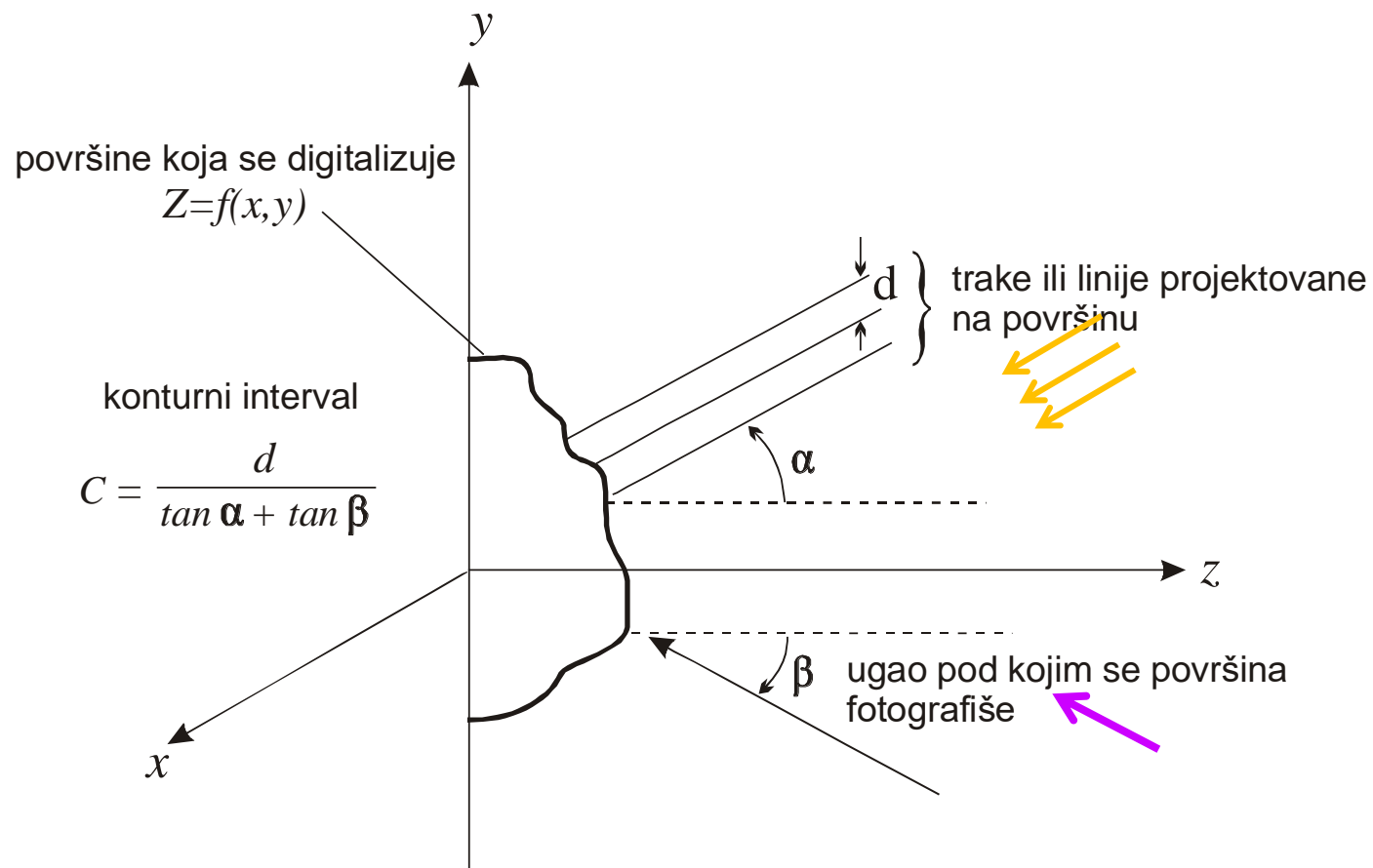
Moiré-ova interferometrija se primenjuje za digitalizaciju kontura površina na bilo kojoj talasnoj dužini većoj od $10\ \mu\text{m}$, ali se pun efekat dobija na talasnim dužinama većim od $100\ \mu\text{m}$.

Primena mikroskopa omogućava postizanje prostorne rezulucije od $1\ \mu\text{m}$, sa osetljivošću koraka od $10\ \text{nm}$.

Osnovni princip moiré-ove interferometrije:

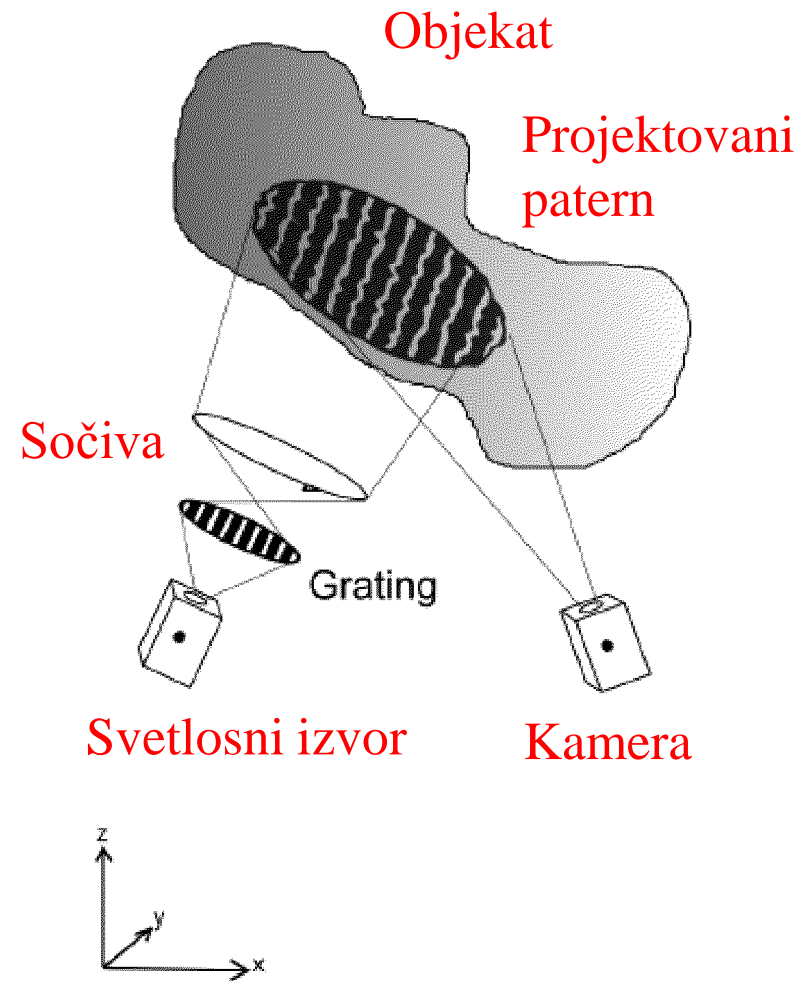
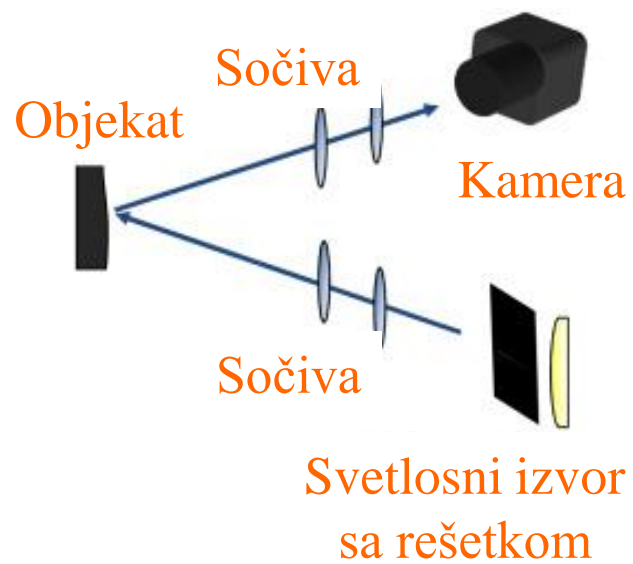
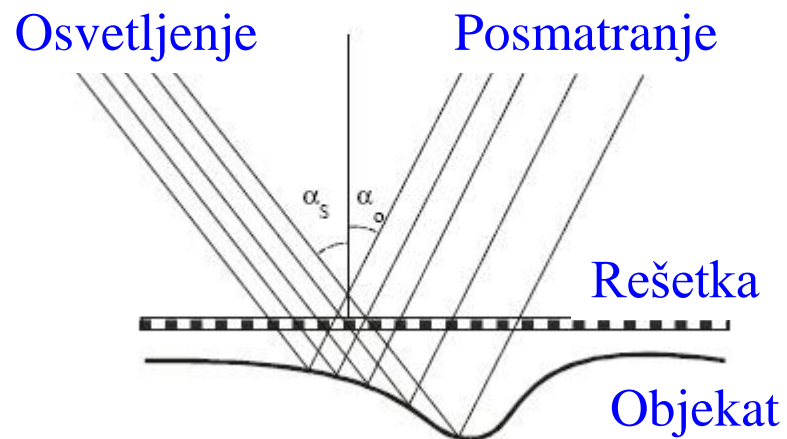
Ako se paralelne ekvidistantne (na istom rastojanju) ravni ili trake projektuju na neravnu površinu i ako se površina posmatra pod uglom koji je različit od ugla pod kojim su projektovane trake, videće se krive pruge.

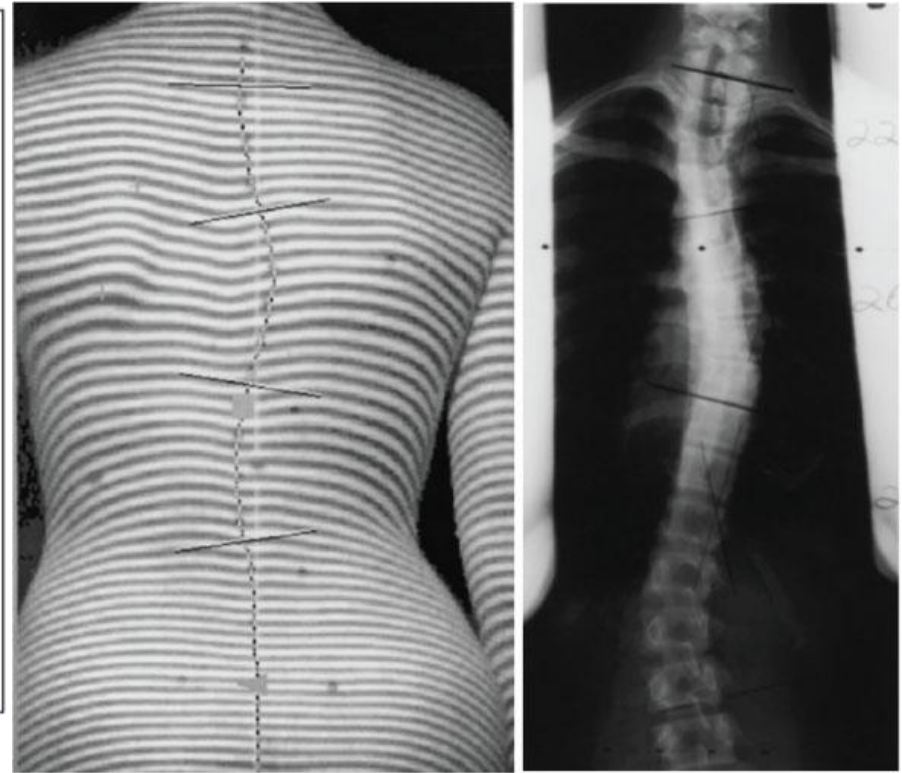
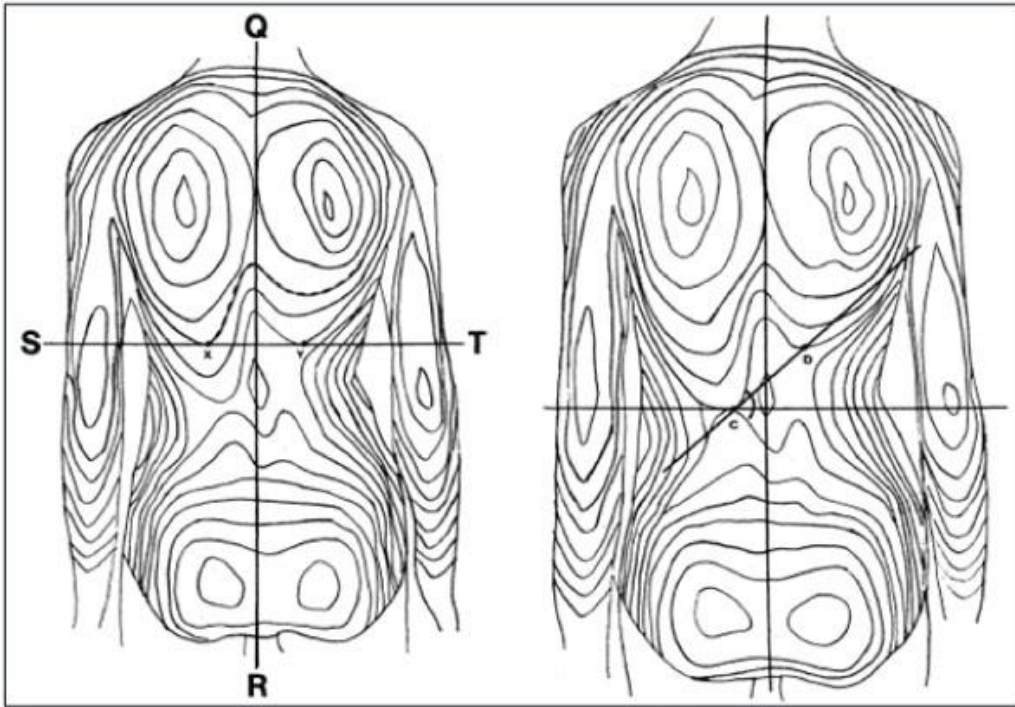
Fotografisanjem ove površine dobija se takozvani *moiré-ov šablon* koji se poredi sa ravno-linijskim šablonom i procesiranjem razlika se dobija digitalizovana kontura objekta.



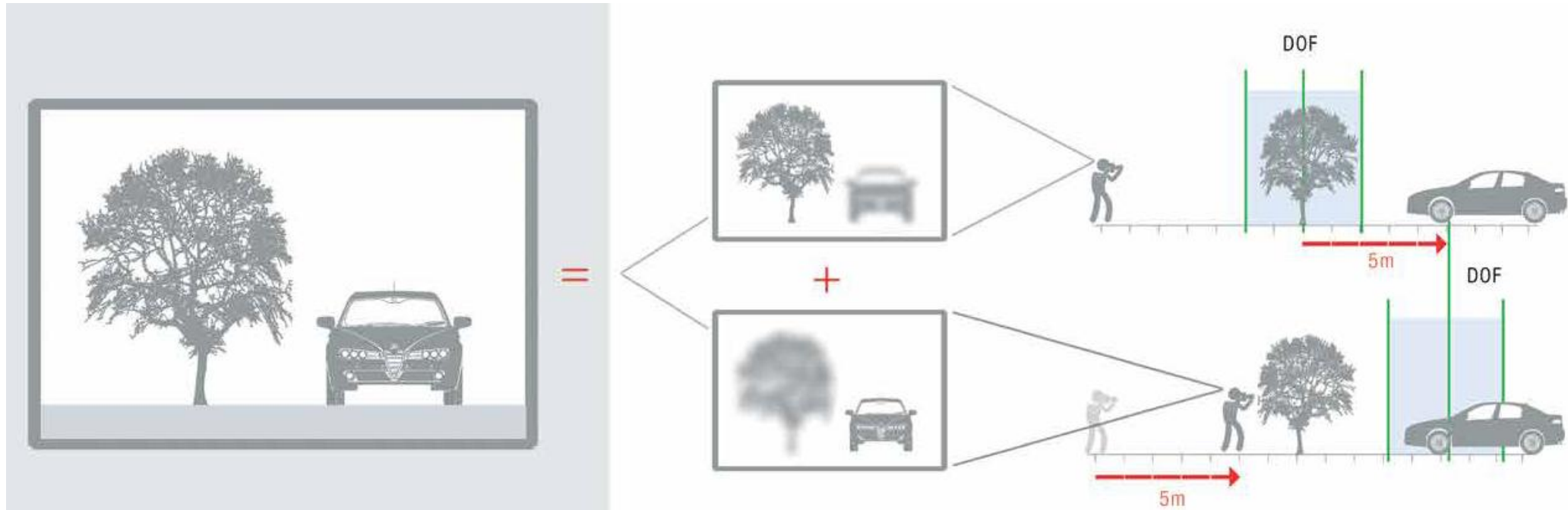
Basic Principle of the Sampling Moiré Method and Its Applications

Shien RI, Qinghua WANG, Hiroshi TSUDA @ AIST





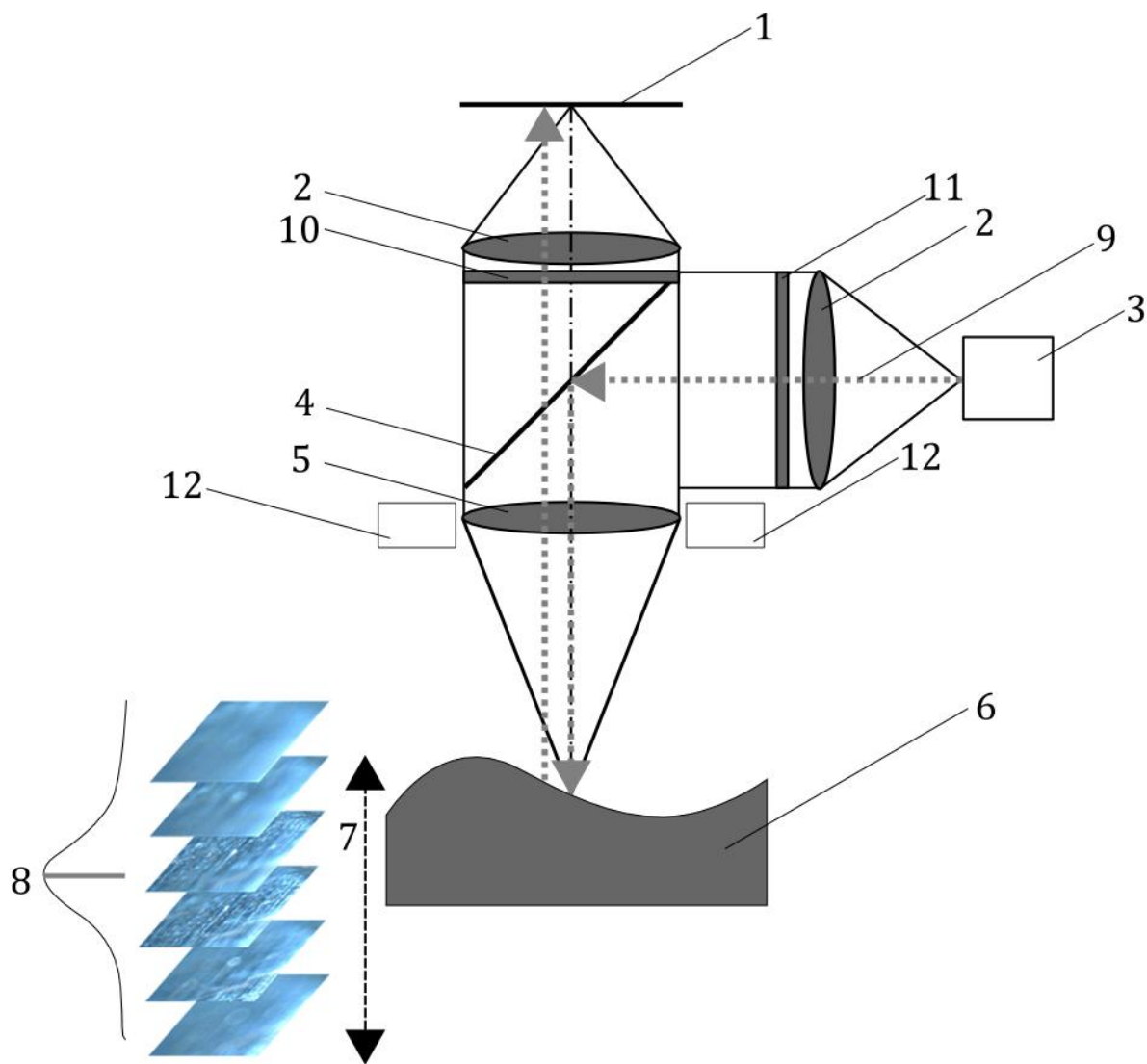
Fokusna varijacija



Metoda fokusne varijacije kombinuje malo polje dubinske oštine fokusa optičkog uređaja i sistema sa vertikalnim skeniranjem za pružanje topografskih i informacija o boji iz varijacije (promene) fokusa.

Glavna komponenta sistema je precizna optika koja sadrži različite sisteme sočiva koji mogu biti opremljeni različitim objektivima i uvećanjima, omogućavajući merenja sa različitom rezolucijom.

Fokusna varijacija

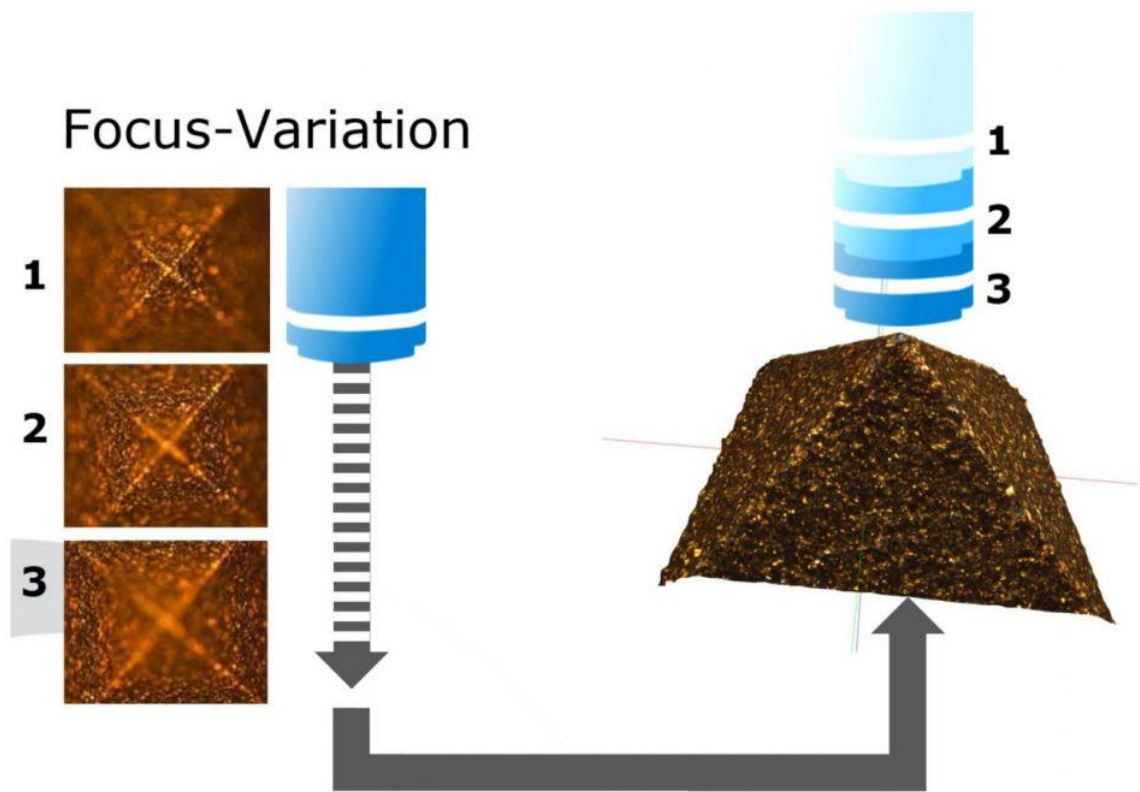


Princip: na senzoru za akviziciju slike koji je pomeren iz ravni fokusa će se dobiti nejasna slika čija veličina zavisi od udaljenosti objekta.

Osnovni elementi Sistema za fokusnu varijaciju

1. sensor
2. sočivo
3. izvor svetlosti
4. polupropusno ogledalo
5. objektiv
6. uzorak
7. vertikalna rezolucija
8. fokusna kriva
9. svetlosni zrak
10. filter
11. polarizator
12. ring light

Fokusna varijacija

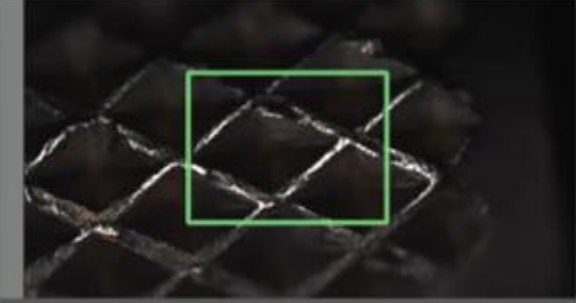




Nikon EPI 10X

COLOR CORRECTION
default

4.01 x 3.68 mm



Single ROI

Absolute Position	Relative Position
X: 5.9333 mm	X: 23.6470 mm
Y: -4.4092 mm	Y: 0.2223 mm
Z: -28.5406 mm	Z: -0.0254 mm

X-Y Ctrl

Z Ctrl

Move To

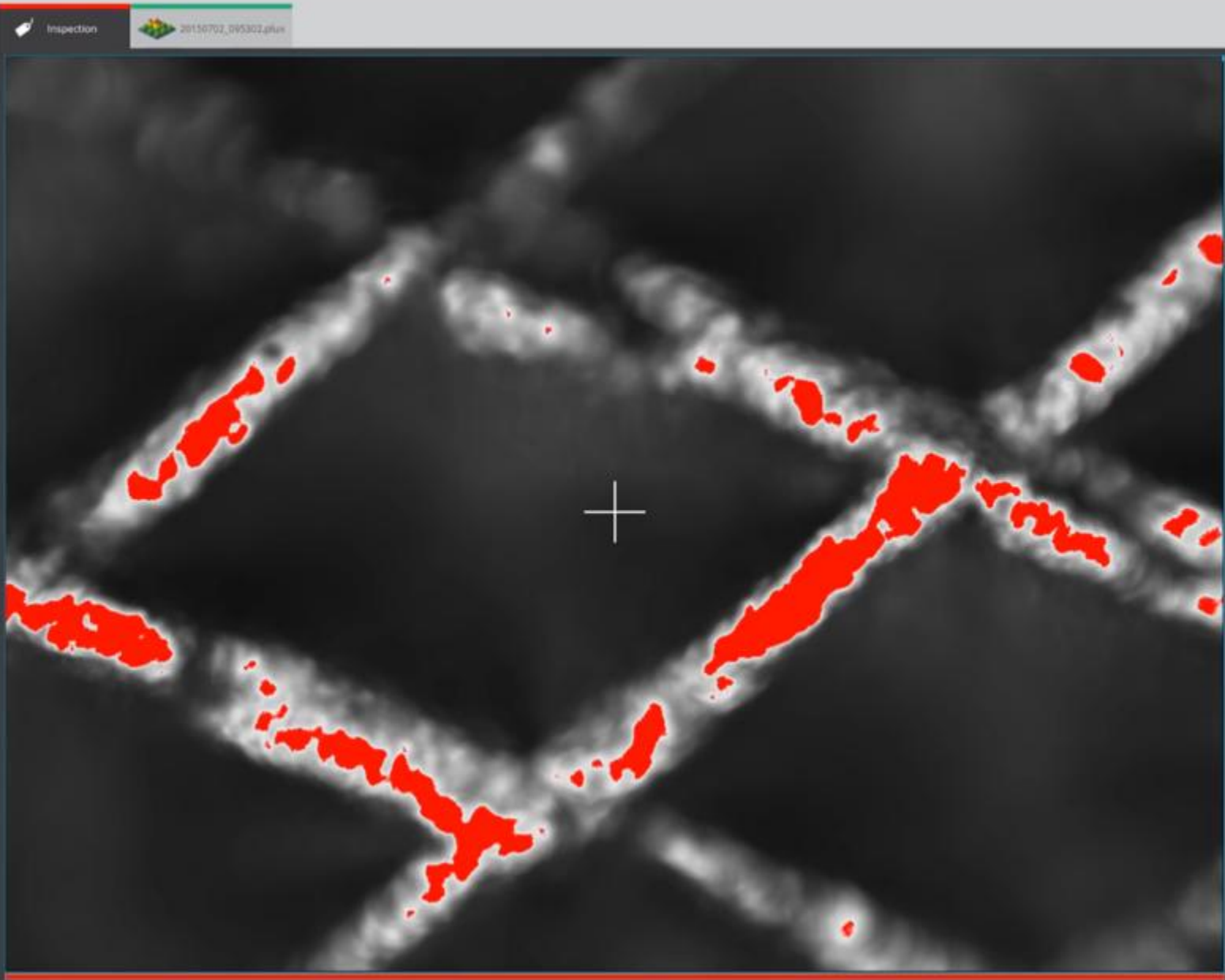
X:

Y:

Z:

LIGHT CONTROL

LED: 2.00%



Focus Variations.ome

MEASUREMENT | Basic

3D

OBJECTIVE

Nikon EPI 10X

AREA

1754.40 x 1320.96 μm^2

1300 x 1024 px

Resolution

Z-SCAN | Absolute (L1)

Z-Top: -28541 μm

Z-Bottom: -29000 μm

Range: 459 μm

Speed: 2x

AUTOFOCUS

Autofocus before measurement

LIGHT SETTINGS

LED: 2.00%

THRESHOLD

Sensitivity

Sensitivity: 2.00

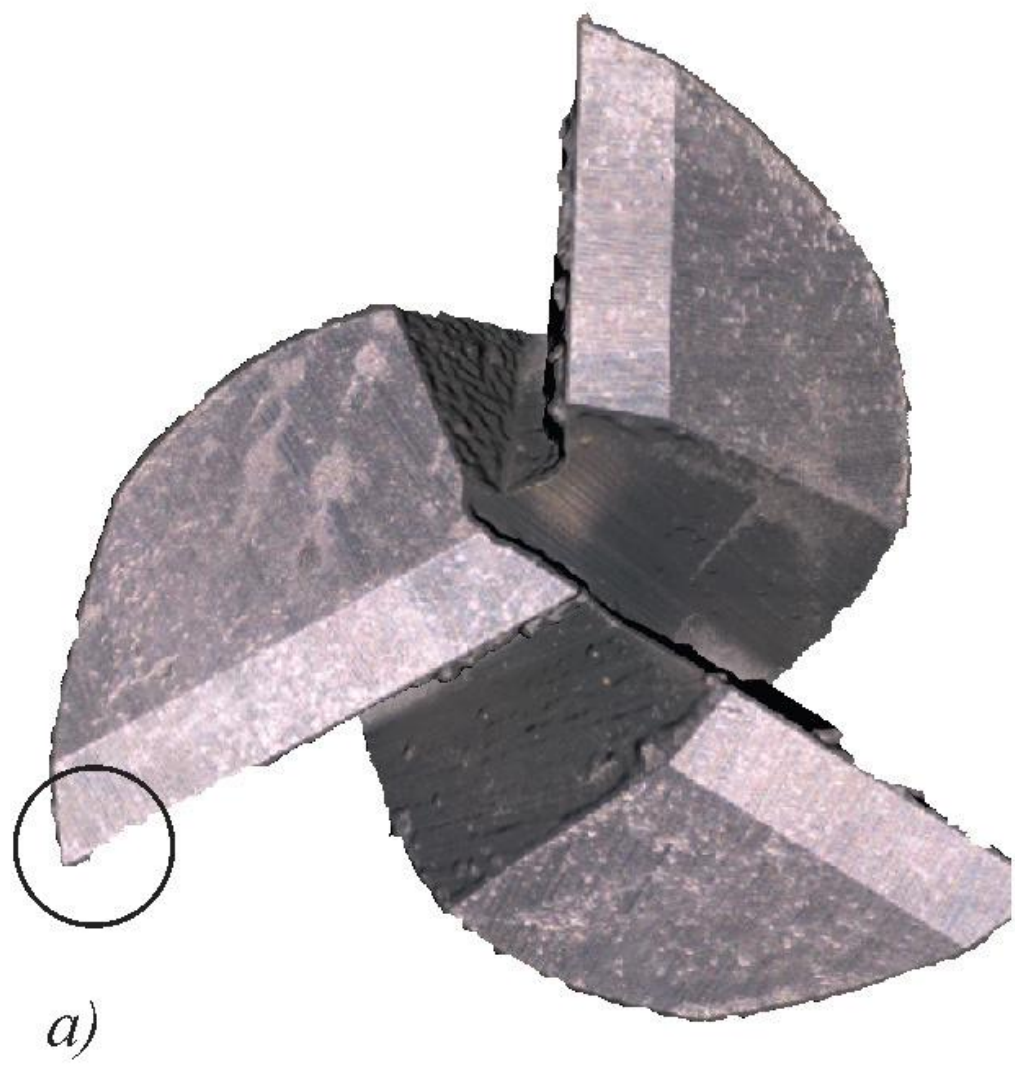
EXTERNAL ANALYSIS

SensioAPP SensioPRO Image

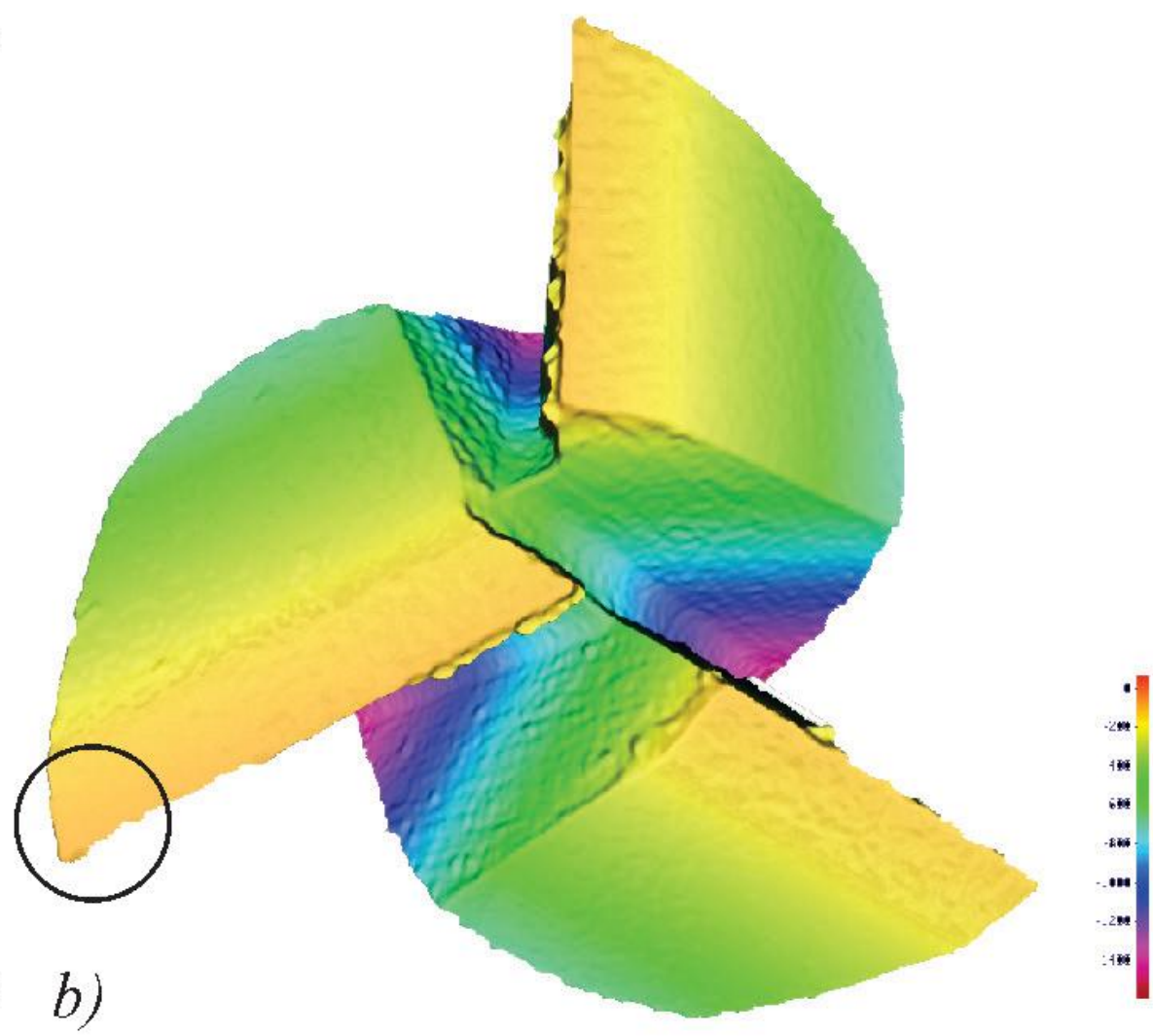
System Ready. Restore done

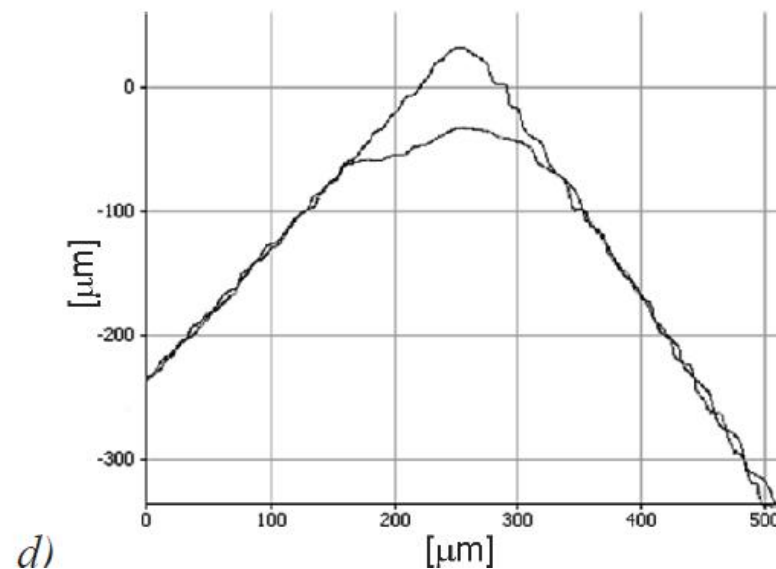
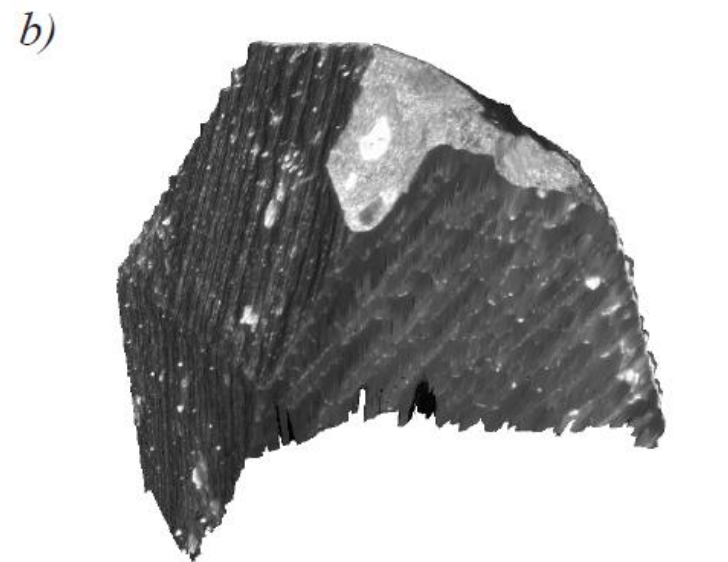
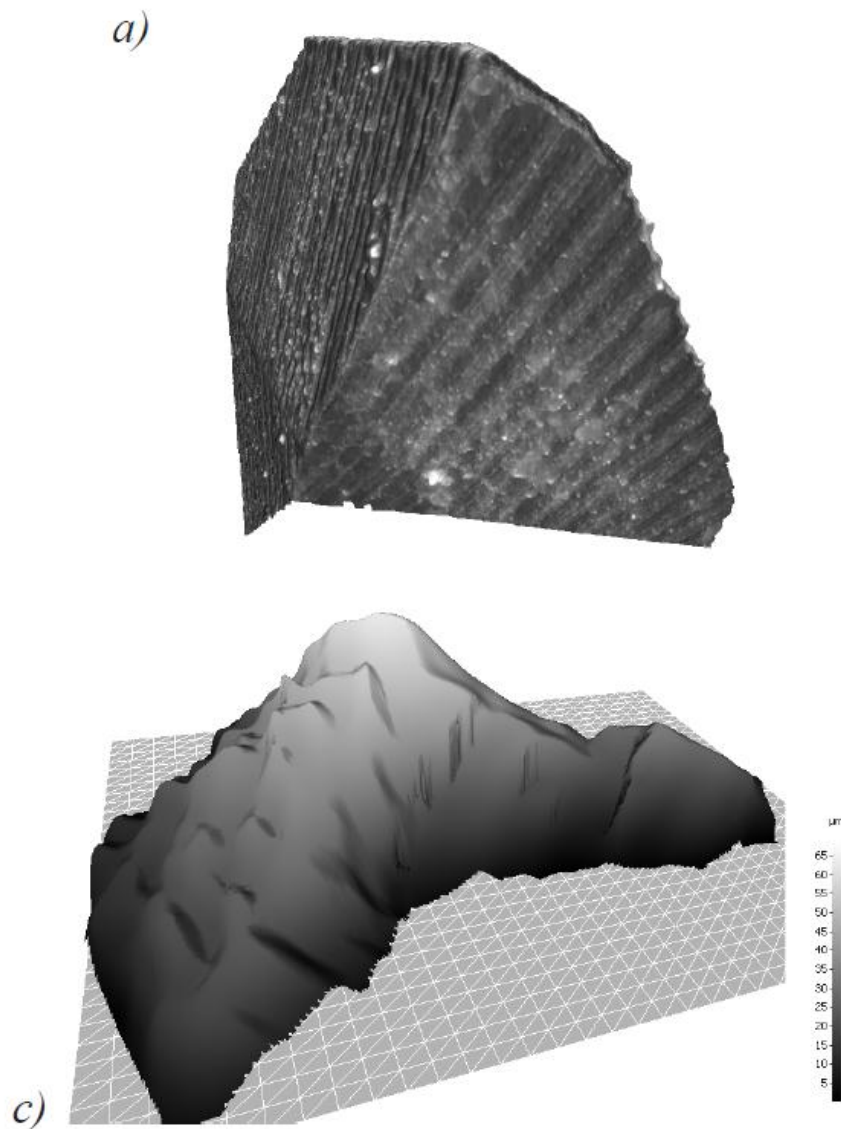
Bright Field

ACQUIRE

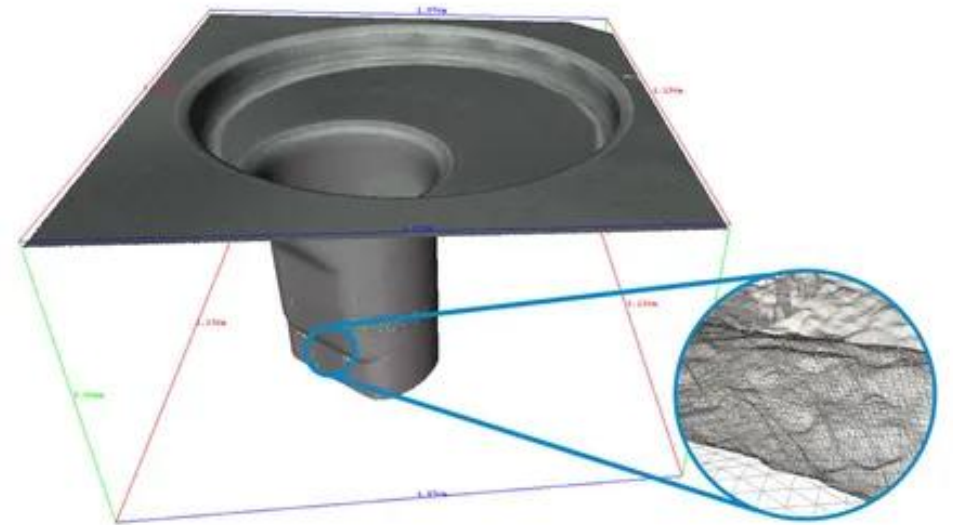
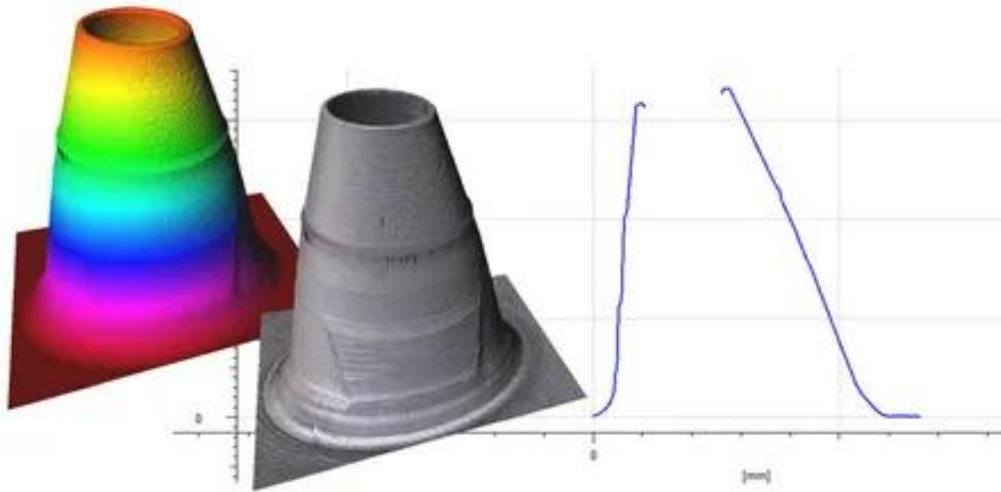
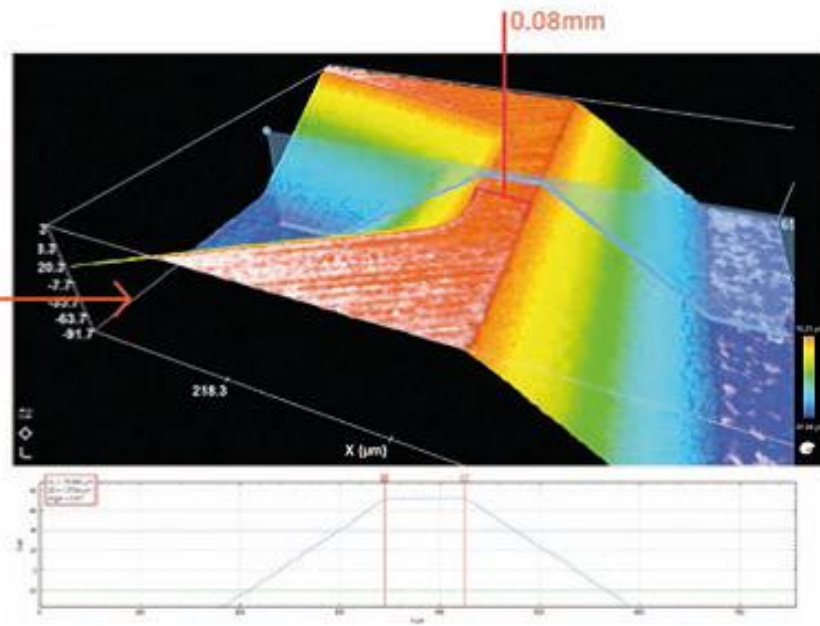
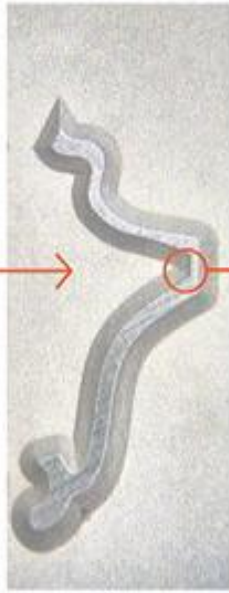


4mm





*Merenje pohabanosti rezne ivice glodala,
 a) nepohabana rezna ivica, b) pohabana rezna ivica, c) zapreminska razlika između pohabane i nepohabane
 rezne ivice, d) koparacija profila*



Ne-optičke metode za 3D digitalizaciju

```
graph TD; A[Ne-optičke metode za 3D digitalizaciju] --> B[Mikrotalasni radar]; A --> C[Ultrazvuk]; B --- D["•Merenje vremena potrebnog impulsu mikrotalasne energije da dođe do objekta i da se vrati"]; C --- E["•Merenje vremena potrebnog zvučnom impulsu da dođe do objekta i da se vrati"];
```

Mikrotalasni radar

•Merenje vremena potrebnog impulsu mikrotalasne energije da dođe do objekta i da se vrati

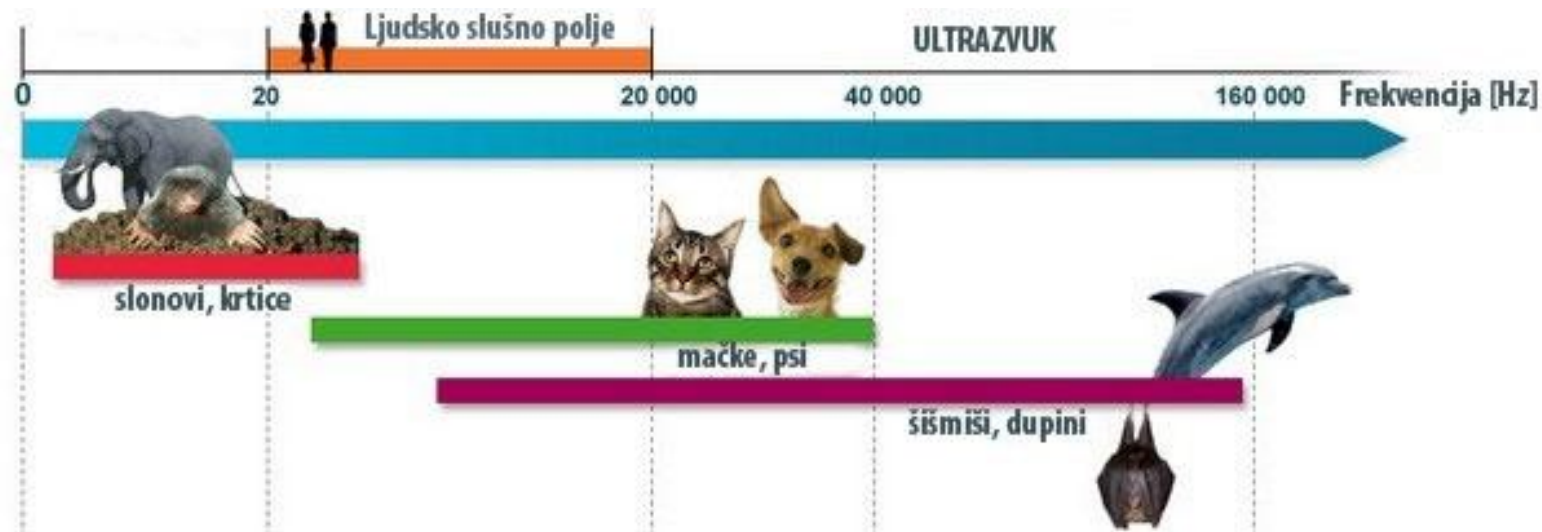
Ultrazvuk

•Merenje vremena potrebnog zvučnom impulsu da dođe do objekta i da se vrati

Ultrazvuk

Ultrazvučno 3D skeniranje koristi zvučne talase visoke frekvencije (izvan opsega ljudskog sluha, iznad 20 kHz) za generisanje trodimenzionalnih slika unutrašnjih struktura objekata ili tela.

Za razliku od optičkog skeniranja koje vrši 3D digitalizaciju samo spoljašnje geometrije, ultrazvuk je prvenstveno metoda za **volumetrijsko (zapreminsko) 3D skeniranje**.



Ultrazvuk

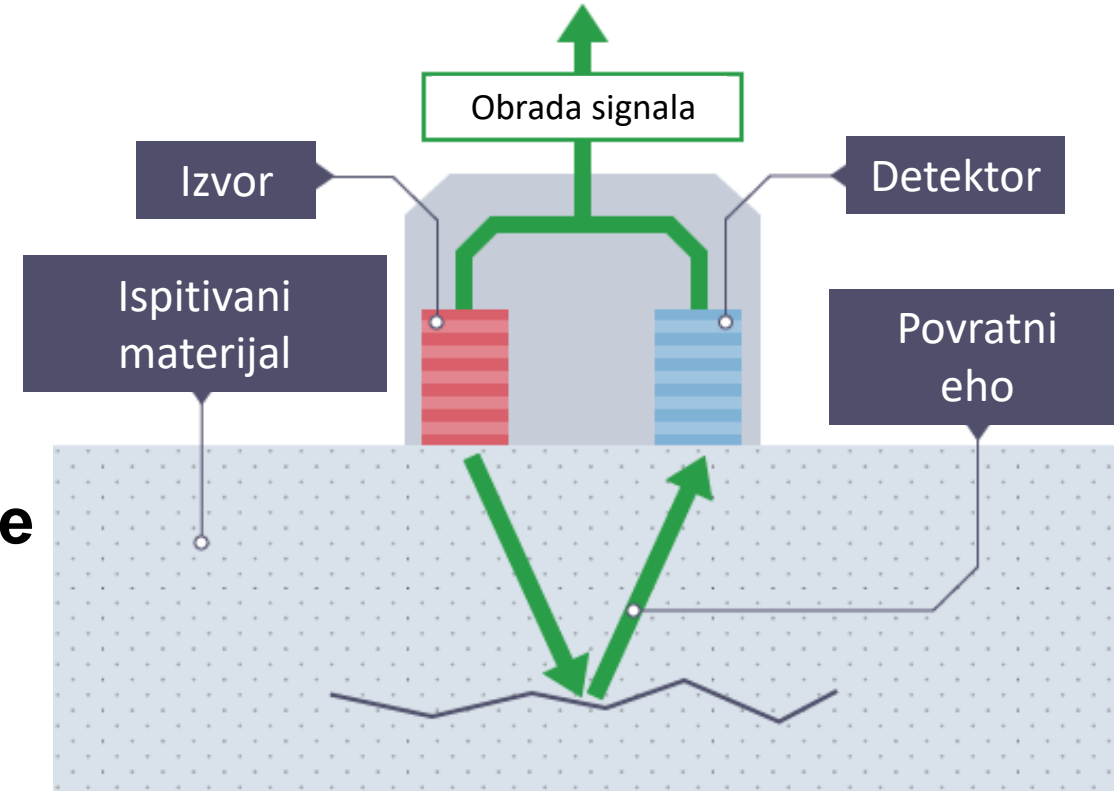
Osnovni Princip Rada:

Generisanje i Emitovanje ultrazvučnih talasa:

Koristi se pretvarač (transducer) koji emituje kratke impulse ultrazvučnih talasa u medijum (npr. ljudsko telo, metalni deo, plastika).

Interakcija i Refleksija: Kada zvučni talas putuje kroz medijum i naiđe na granicu između dva različita materijala ili tkiva (gde se menja **akustička impedansa**), deo talasa se **reflektuje** nazad prema pretvaraču.

Prijem i Vreme Prolaska: Pretvarač prihvata reflektovane (eho) signale. Sistem meri **vreme potrebno** da se zvučni talas vrati.



Ultrazvuk

Izračunavanje Dubine: Pošto je poznata **brzina zvuka** u datom medijumu, dubina na kojoj se nalazi reflektujuća granica izračunava se formulom:

$$d=2v \cdot t$$

gde je:

d - dubina

v - brzina zvuka u medijumu

t - ukupno vreme prolaska (do granice i nazad)

3D Rekonstrukcija: Moderni 3D/4D ultrazvučni sistemi koriste **matrice pretvarača** i brze računarske algoritme za skeniranje volumena, omogućavajući rekonstrukciju trodimenzionalnog prikaza unutrašnjosti (npr. fetusa, organa, unutrašnjih defekata u materijalu).