

**Senzorske  
tehnologije**

ak. god. 2021./2022.

# BESKONTAKTNO MJERENJE PROSTORNOG POLOŽAJA POMOĆU STRUKTURIRANOG SVJETLA

prof. dr. sc. Tomislav Pribanić

prof. dr. sc. Mario Cifrek

doc. dr. sc. Željka Lučev Vasić

# Motivacija

---

- zašto mjeriti prostorni položaj točaka/3D oblik tijela?
- industrijska kontrola kvalitete
- reverzno inženjerstvo
- prepoznavanje objekata
- dizajn obuće i odjeće
- izrada zubnih proteza
- 3D virtualni muzej
- ...

# Kontaktna mjerenja

- tradicionalno korištena u industriji
- relativno robusno rješenje sa stanovišta primjene 😊
- visoki stupanj točnosti 😊
- skupa ticala za mjerenje 😞
- vremenski zahtjevan postupak za veći broj točaka 😞
- u mnogim primjenama kontakt s predmetom mjerenja nije moguć 😞



- Microscribe - coordinate measuring machine (CMM)  
<https://gomeasure3d.com/microscribe/>



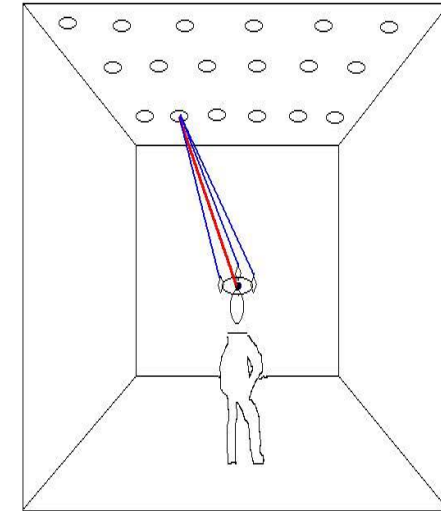
# Beskontaktna mjerenja

- magnetski senzori



Bobby Leach Image Courtesy of Film East.

- akustični senzori



- računalni vid – obrada slika kamera



Senzorske tehnologije

- <https://www.vicon.com/>

# Gdje pripada kontekst mjerenja prostornog položaja ?

## Računalni vid

- Računalni vid je područje umjetne inteligencije koje obuhvaća metode za stjecanje, obrade, analiziranja i razumijevanja slike u cilju dobivanja numeričkih ili simboličkih informacija

### Nizak nivo apstrakcije (engl. low-level vision)

- obrada slika u cilju nalaženja osnovnih karakteristika scene, npr. rubova na slikama

### Srednji nivo apstrakcije (engl. middle-level vision)

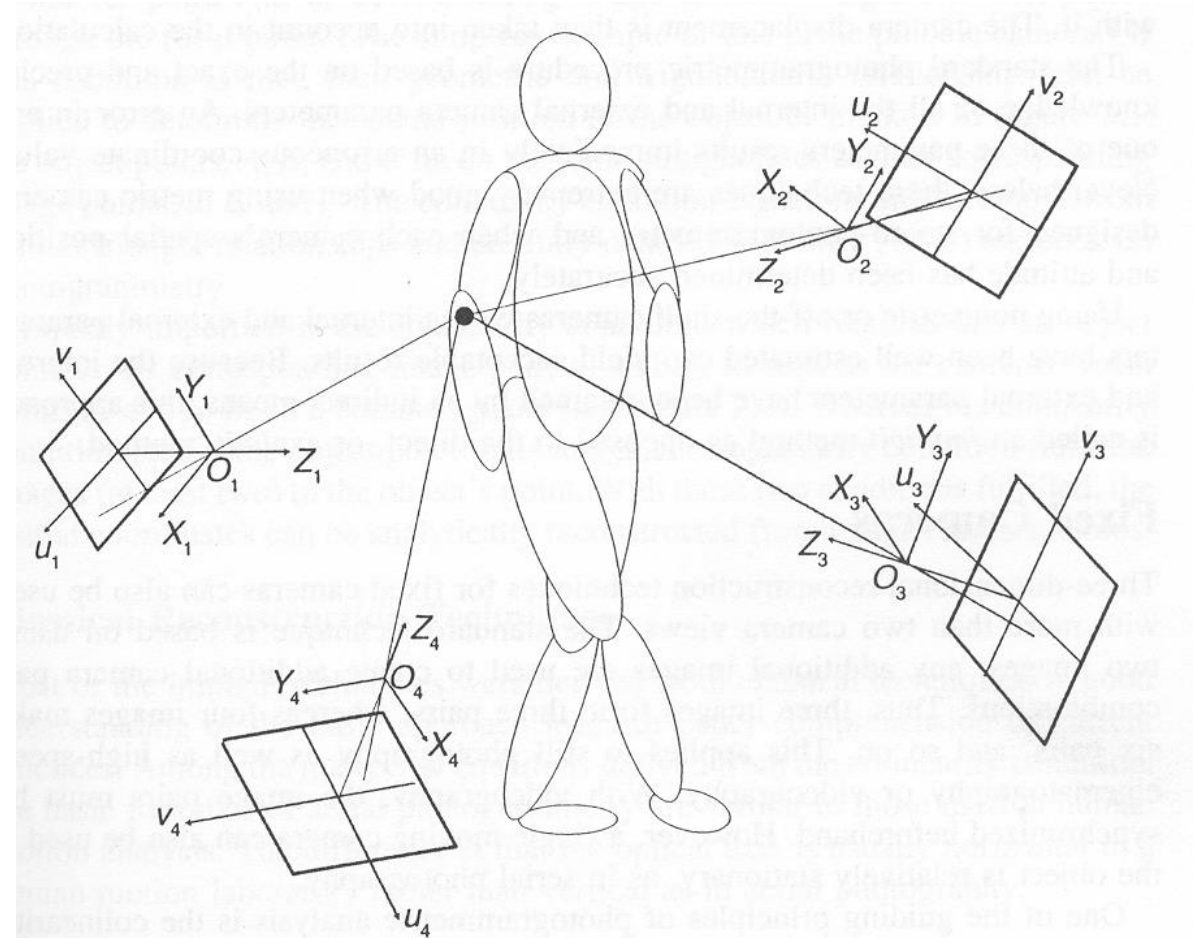
- prepoznavanje objekata, analiza pokreta, **mjerenje prostornog položaja/3D rekonstrukcija** koristeći značajke dobivene iz prethodnog sloja apstrakcije

### Visoki nivo apstrakcije (engl. high-level vision)

- tumačenje informacija koje pruža vizija srednje razine poput npr., opisa scene, aktivnosti, namjere i ponašanja subjekata na slikama itd.

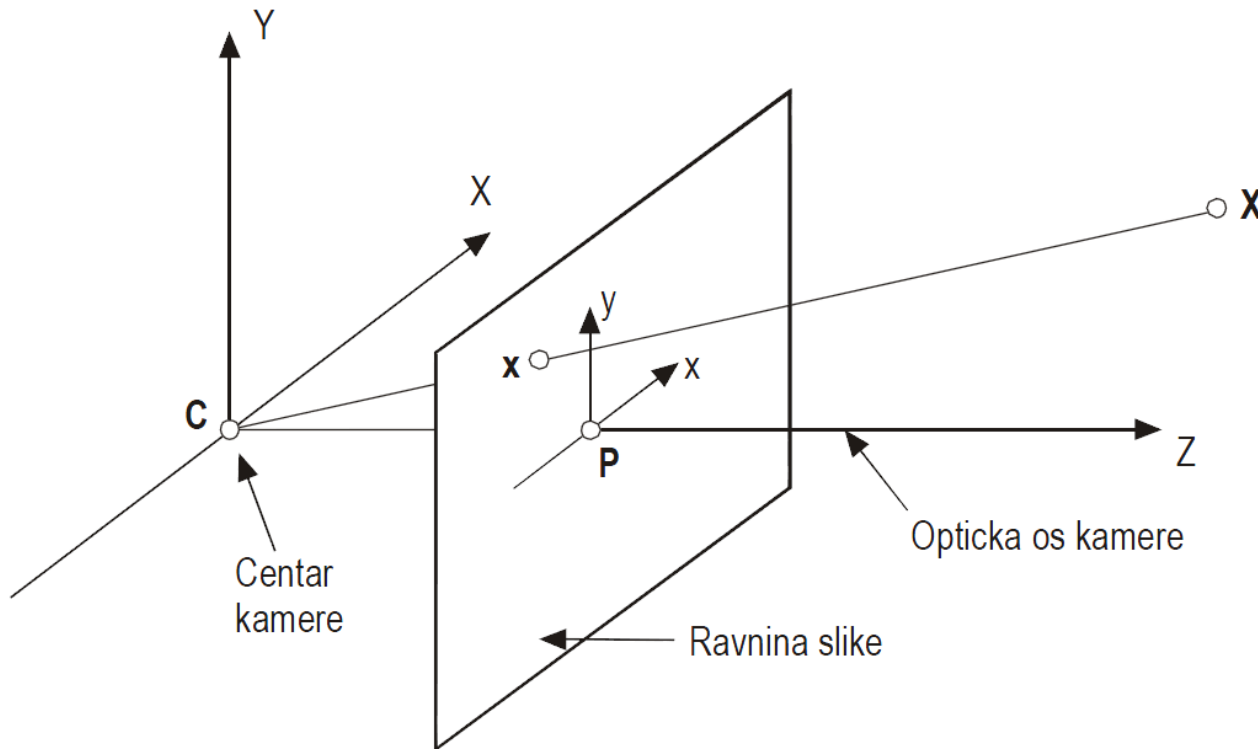
# Triangulacija prostornog položaja točaka

- nužni preuvjeti:
- slike s dvije ili više kamera
- nalaženje korespondentnih točaka na slikama
- umjerene kamere
  - izračun parametra funkcije modela kamera
  - opisuje preslikavanje točke iz 3D prostora u 2D ravninu slike



# Funkcija modela kamere

- opisuje preslikavanje točke iz 3D prostora u 2D ravninu slike



$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}$$

$$x = f \cdot \frac{X}{Z}$$

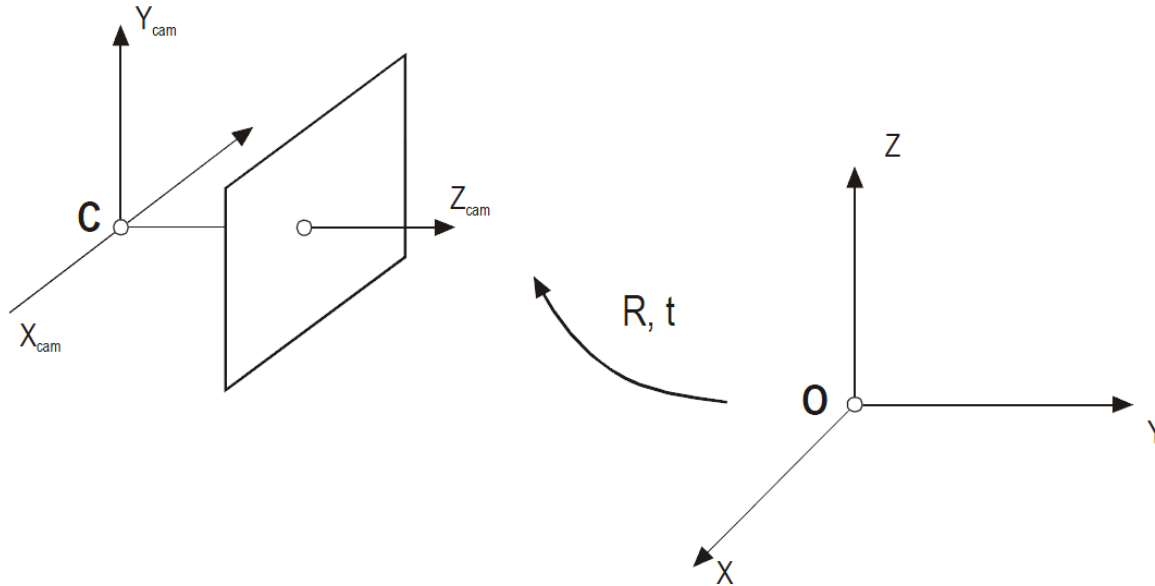
$$y = f \cdot \frac{Y}{Z}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_{cam} \quad \mathbf{x} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{X}_{cam}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{I} | \mathbf{0}] \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- (X, Y, Z) - koordinatni sustav kamere
- (p<sub>x</sub>, p<sub>y</sub>) - glavna točka snimke
- f - efektivna žarišna duljina
- C - središte centralne projekcije (objektiva kamere) tj. sustava (X, Y, Z)
- **P projektivna matrica** – matrični zapis preslikavanja točke iz 3D prostora u 2D ravninu slike

# Poopćenje na proizvoljni prostorni koordinatni sustav



$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{cam}} = \mathbf{R} \cdot (\tilde{\mathbf{X}} - \tilde{\mathbf{C}}) = \mathbf{R} \cdot \tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{t}}$$

$$\mathbf{X}_{\text{cam}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R} \cdot \tilde{\mathbf{C}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R} \cdot \tilde{\mathbf{C}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}$$

- točku  $X (X, Y, Z)$  izraženu u proizvoljnom prostornom koordinatnom sustavu  $(X, Y, Z)$  moguće je **rotacijskom matricom  $\mathbf{R}$  i translacijskom vektorom  $\mathbf{t}$**  preslikati u koordinatni sustav kamere  $(X_{\text{cam}}, Y_{\text{cam}}, Z_{\text{cam}})$

$$\mathbf{x} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\tilde{\mathbf{C}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} \quad \mathbf{x} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \cdot \mathbf{X}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{R} | \mathbf{t}]$$

- **umjerena kamera**: poznata vanjska i unutarnja orijentacija kamere
- vanjska orijentacija: rotacijska matrica  $\mathbf{R}$  i vektor  $\mathbf{t}$
- unutarnja orijentacija: glavna točka snimke  $(p_x, p_y)$  i žarišna duljina  $f$
- proširenje linearnog modela kamere na nelinearni model kamere



# Načini umjeravanja kamera



- Tomislav Pribanić, Peter Sturm, Stanislav Peharec. **Wand-based calibration of 3D kinematic system**. IET Computer Vision. 3 (3); 124-129, 2009.

# Nalaženje korespondentnih točaka na slikama

- Ima li 3D scena (dovoljno) prirodne teksture potrebne za nalaženje korespondentnih točaka na slikama?
- DA => moguće primijeniti **pasivni stereo**
  - osnovna pretpostavka - korespondentne točke na slikama kamera imati će okolinu koja 'izgleda' (gotovo) jednako

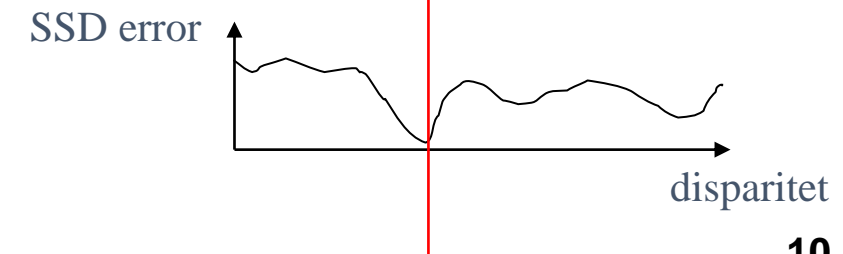


Redak pretrage korespondentnih točaka

Slika lijeve kamere



Slika desne kamere



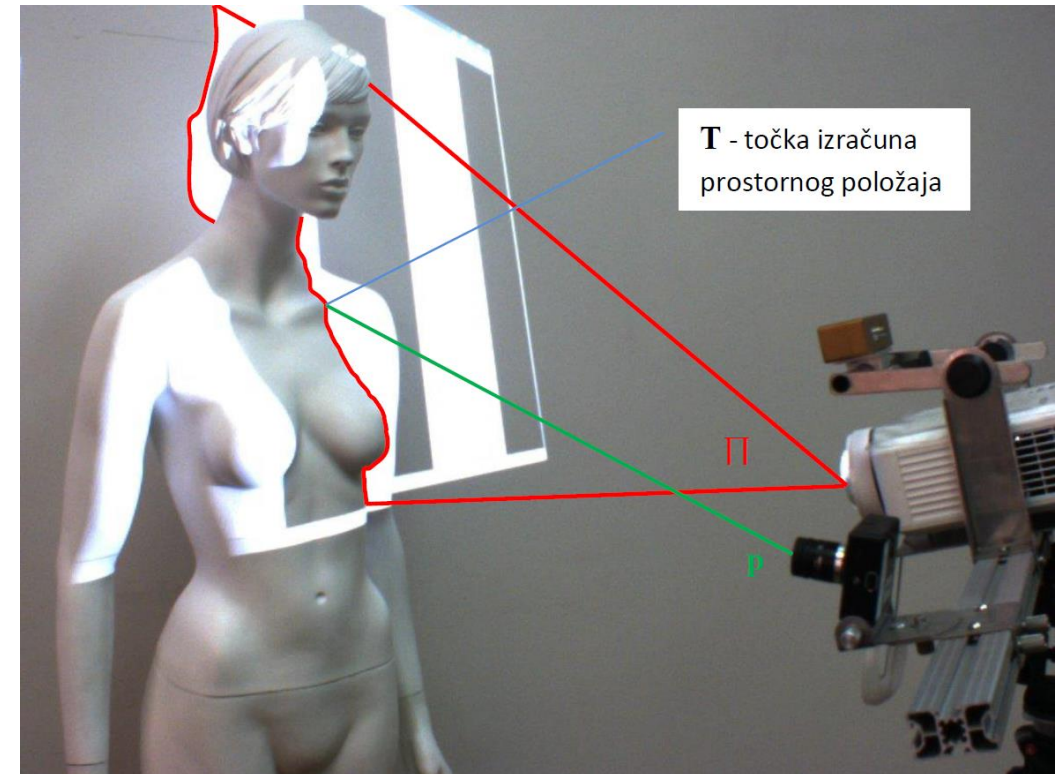
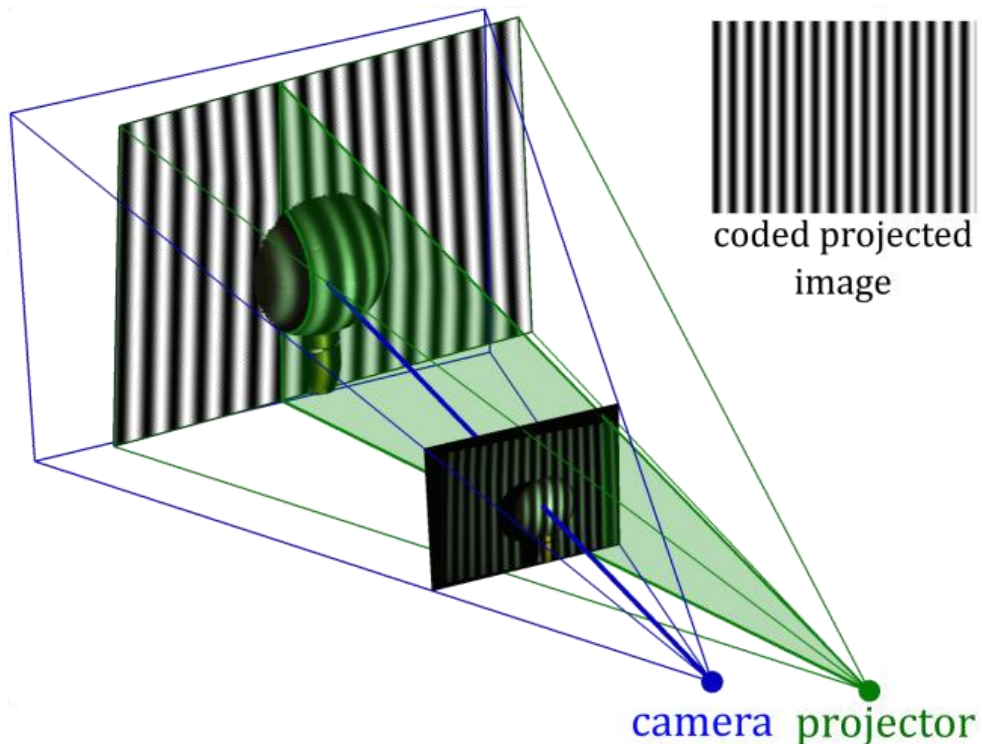
- Što ako 3D scena nema (dovoljno) teksture, npr. monokromatske površine ?

- ToF (time of flight) kamera

- **Strukturirano svjetlo (aktivni stereo)**

# Strukturirano svjetlo (engl. structured light - SL)

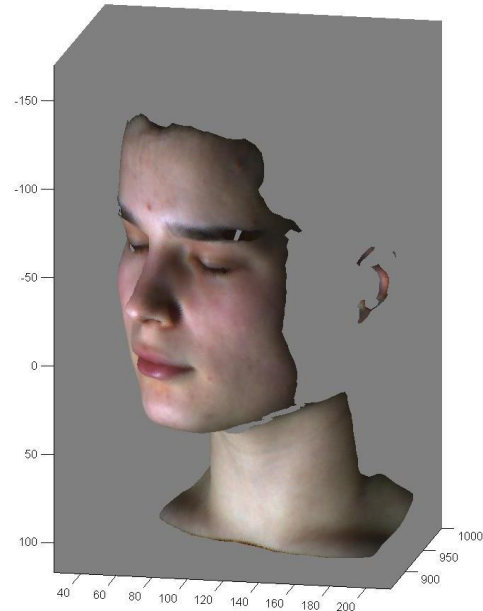
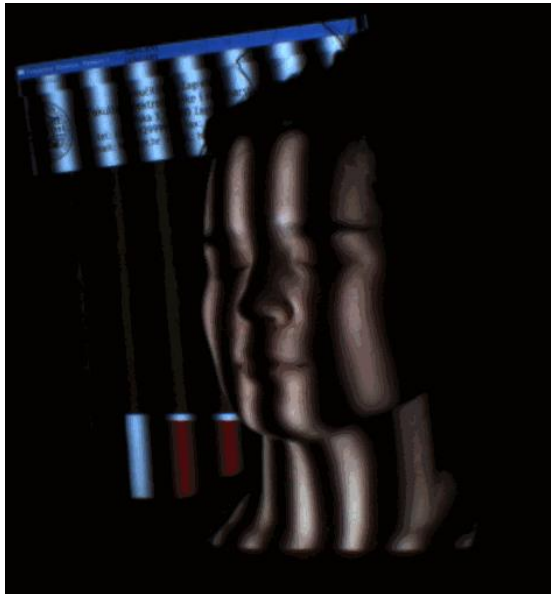
- temeljna ideja: zamijeniti jednu od kamera s izvorom osvjetljenja, npr. video projektorom, te projicirati u 3D scenu određeni uzorak slike/teksture
- obradom snimljenih projiciranih uzoraka (slika) nalaze se korespondentne točke na slikama umjerenih kamera i/ili projektor
- 3D triangulacija prostornog položaja točke  $T$  – ravnina projekcije  $\Pi$  (projektor) & pravca  $p$  (kamera)





# Osnovni koraci 3D skeniranja strukturiranim svjetlom

1. Umjeravanje 3D SL sustava sastavljenog od projektor i kamere.
2. Generiranje jednog ili više uzoraka (slika) za projekciju video projektorom. Uzorak/uzorci imaju takvu strukturu da je položaj (barem većeg broja) piksela u uzorku moguće jedinstveno opisati odgovarajućim kodom.
3. Projekcija jednog ili više uzorka video projektorom na površinu objekata čiji prostorni položaj se želi odrediti. U slučaju projiciranja više uzoraka nužna je vremenska sinkronizacija između projektor i kamere



4. Snimanje kamerom jednog ili više projiciranih uzoraka svjetla.
5. Obradba snimljenih slika kojom se izračunava dotični kod za određeni broj (idealno za svaki) piksela kamere. Uobičajeni nositelji informacije o kodu su boja piksela, intenzitet sive skale piksela, faza (frekvencija) te određeni geometrijski oblik. Složenost i brzina obradbe slika su uvelike određeni tipom nositelja informacije koda.
6. Na temelju izračunatih kodova u prošlom koraku, uparivanje piksela kamere sa pikselima projiciranih uzoraka projektorom. Ovaj korak se, zajedno sa prethodnim, smatra općenito govoreći najsloženijim u cijelom postupku primjene strukturiranog svjetla.
7. Izračun prostornog položaja točke za korespondentni (upareni) slikovni par projektor i kamere korištenjem parametra umjeravanja 3D sustava (prethodni slide).
8. Obrada sirovih 3D podataka. Uključuje cijeli niz radnji, a neke od najčešći su detekcija i uklanjanje outliera u 3D podacima, opise površine objekta generiranjem 3D mreže podataka, generiranje texture površine itd.



# Različite podjele metoda strukturiranog svjetla prema namjeni i tipu korištenih uzoraka za projiciranje

- postupci (uzorci projiciranja) namijenjeni za 3D rekonstrukciju statičkih objekata ili za dinamičke objekte

- način multitepleksiranja koda projiciranih uzoraka: vremenski, prostorni ili frekvencijski multipleks

- diskretni ili kontinuirani projicirani uzorci

- uzorci za projiciranje u boji, sivoj skali ili crno-bijeli

- uzorci za projiciranje kodirani po jednoj ili obje koordinatne osi slike

- projiciranje samo jednog ili više uzoraka

- ...

- Joaquim Salvi, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanić, Xavier Llado. **A state of the art in structured light patterns for surface profilometry.** Pattern recognition. 43 (8), 2666-2680, 2010.

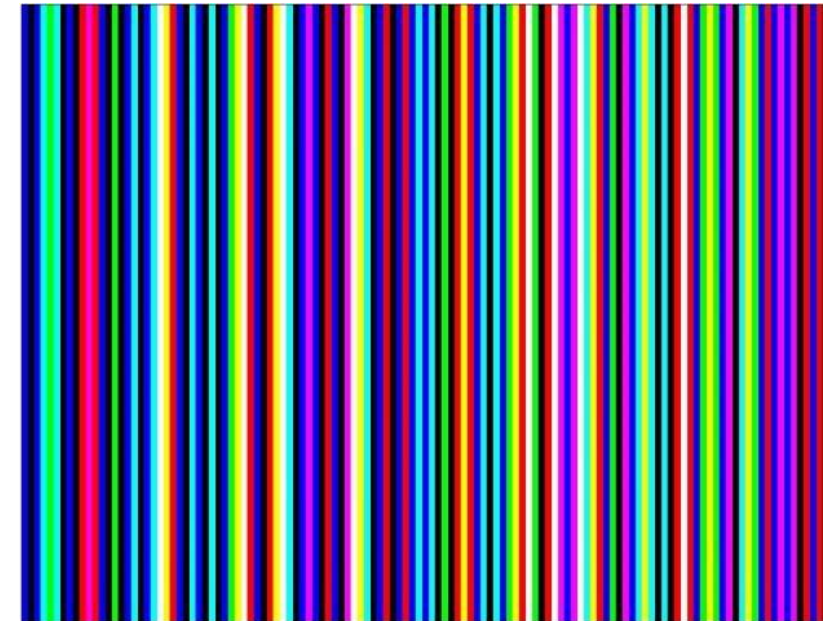
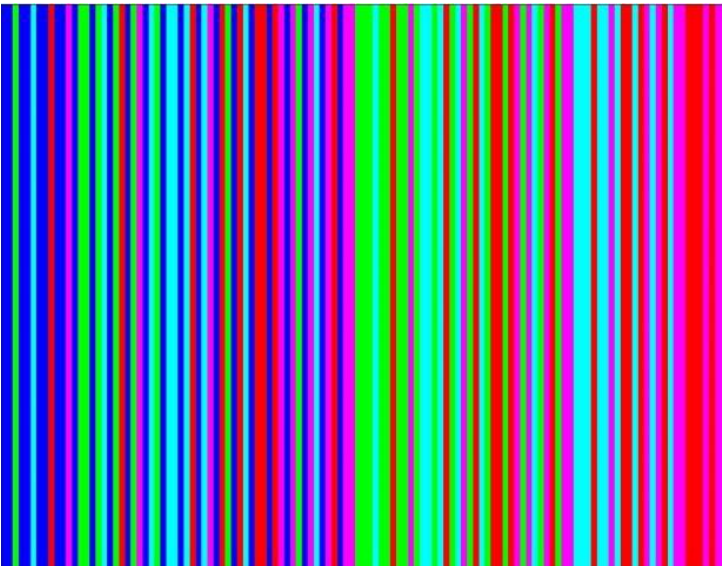
# Diskretne metode kodiranja uzoraka za projiciranje

---

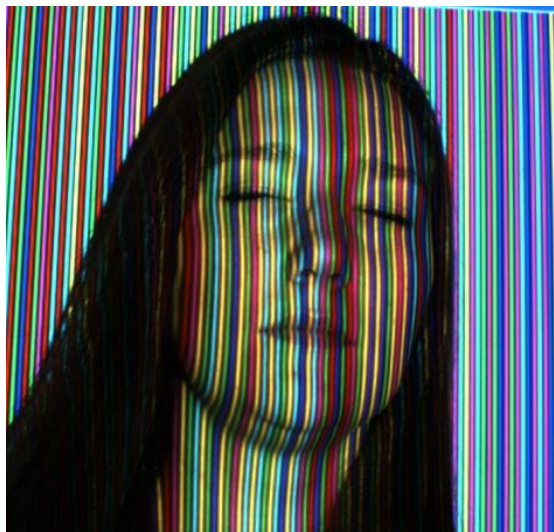
- isti SL *kod* dodijeljen pojedinim regijama piksela uzorka za projiciranje, a prijelaz između mogućih kodnih riječi je tipično skokovit
- uzorci prostornog multipleksa ili vremenskog multipleksa
- **prostorni multipleks:**
  - **De Brujinovi uzorci**
  - M polja
  - Neformalno kodiranje
- **vremenski multipleks:**
  - Binarni kod
  - **Grayev kod**
  - N dimenzionalni kod
  - Vremenski hibridni kod

# De Bruijnovi uzorci

- De Bruijnov niz reda  $n$  te koji koristi abecedu elementa veličine  $k$  je niz pseudoslučajnih vrijednosti  $d_1, d_2, \dots, d_k^n$  u kojem se svaki podniz (prozor) duljine  $n$  **pojavljuje samo jednom -> takvo svojstvo definira jedinstveni SL kod**
- konstrukcija: Hamiltonov put kroz  $n$ -dimen. De Bruijnov graf (Eulerov krug na  $n-1$  dimen. De Bruijnov grafu)
- Ideja: dizajnirati uzorak gdje će se pojedina vrijednost De Bruijnovog niza poistovjetiti sa određenom bojom pravokutne regije piksela unutar uzorka (<https://jgeisler0303.github.io/deBruijnDecode/> )
- Naivno konstruiran De Bruijnov uzorak
- Što nije dobro?
- Poboljšana verzija konstrukcije De Bruijnovog uzorka
- U čemu je poboljšanje?



# De Bruijnov uzorak – primjer 3D rekonstrukcije



- Tomislav Petković; Tomislav Pribanić, Matea Đonlić. **Single-Shot Dense 3D Reconstruction using Self-Equalizing De Bruijn Sequence.** IEEE Transactions on image processing. 25 (2016), 11; pp. 5131-5144.

- **glavni izazovi prilikom korištenja uzorka gdje je nositelj koda boja:**

- tekstura objekta modulira projiciranu boju te znatno otežava detekciju vrijednosti projicirane boje
- nagle promjene u dubini – perturbacija koda



(a) Input image



(b) One-shot texture



(c) One-shot depth



(d) Multiple-shot texture



(e) Multiple-shot depth

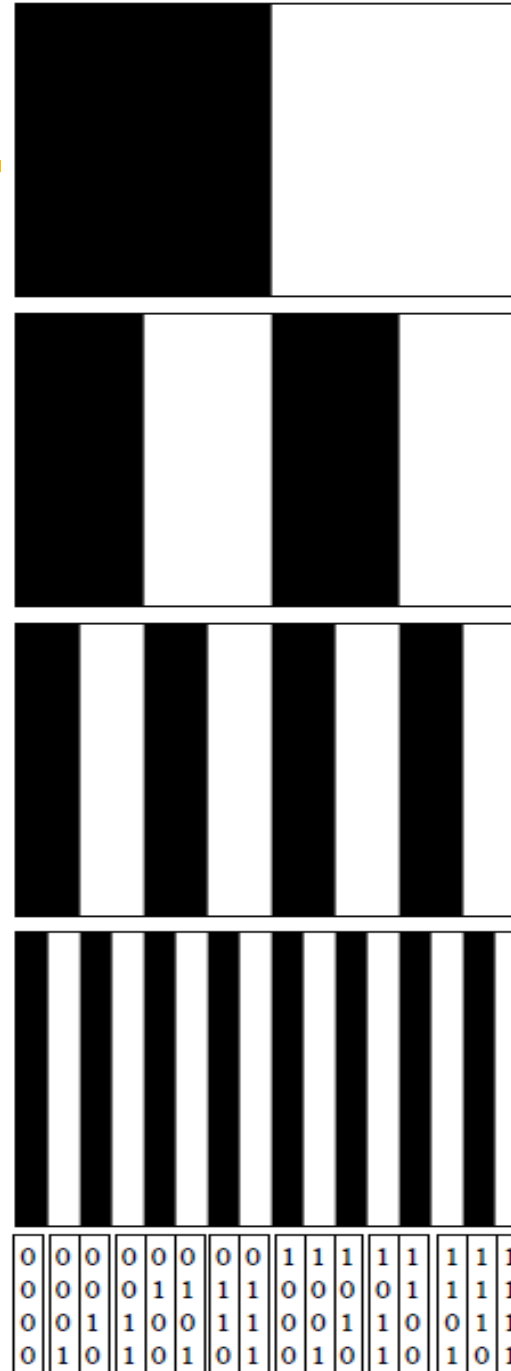
Figure 7: Comparison of one- and multiple-shot reconstruction of a human face. Note the lower spatial resolution in the horizontal direction for the one-shot method.



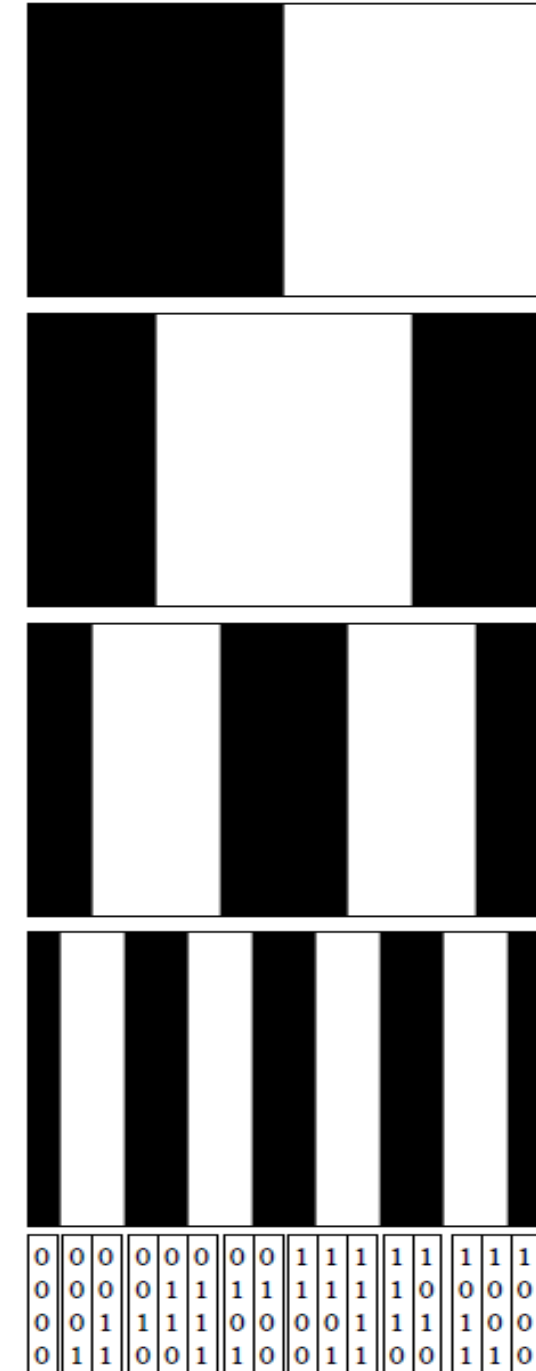
# Grayev kod

- vremenski multipleks: projekcija niza uzoraka s crno-bijelim prugama
- **robustan način nalaženja (ne)osvjetljenih piksela slike**
- binarno kodiranje: susjedne regije na slikama imaju kodove koji se razlikuju za više od jednog bita
- Grayev kod: susjedne regije na slikama imaju kodove koje se razlikuju za jedan bit
- Koji način kodiranja je bolji i zašto?

a) Binarno kodiranje



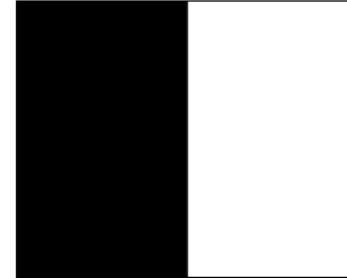
b) Gray kod



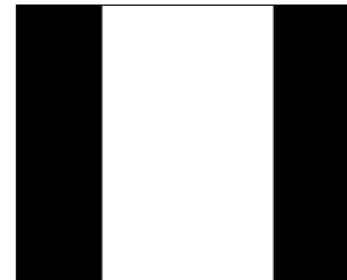
# Vremenski n-dimenzionalni kodovi

- kako smanjiti broj potrebnih uzoraka kod kodiranja binarnim kodovima?
  - projiciranje uzroka s prugama više od dva intenziteta
  - korištenje različitih kanala boja projektor/kamere za drugačije uzorke

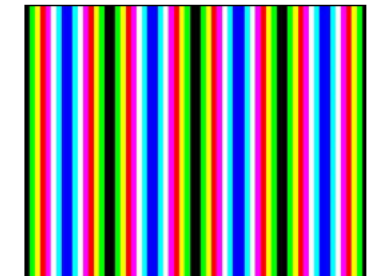
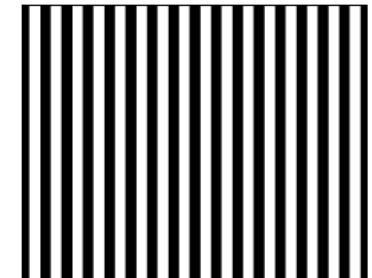
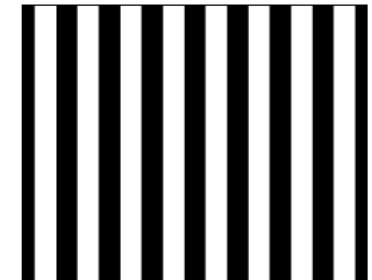
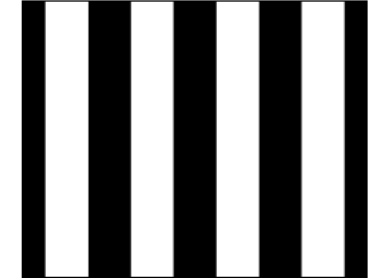
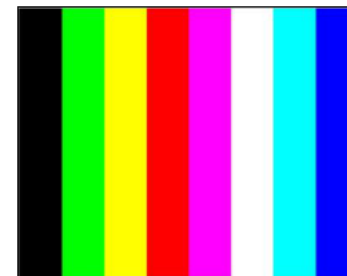
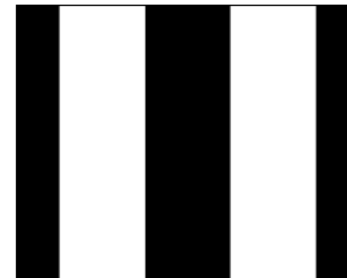
B



G



R

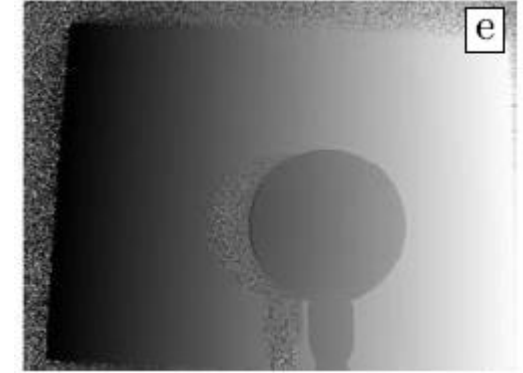
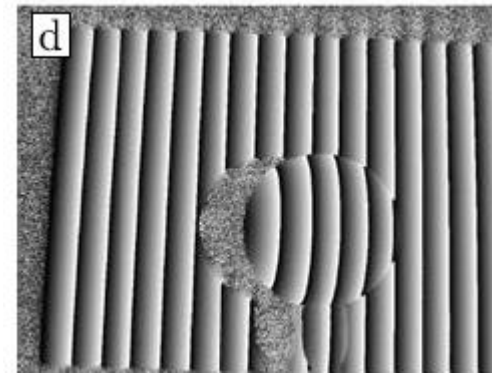
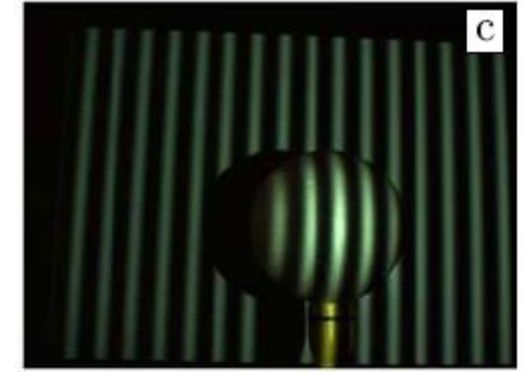
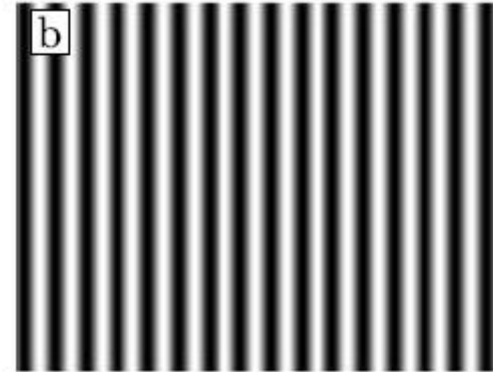
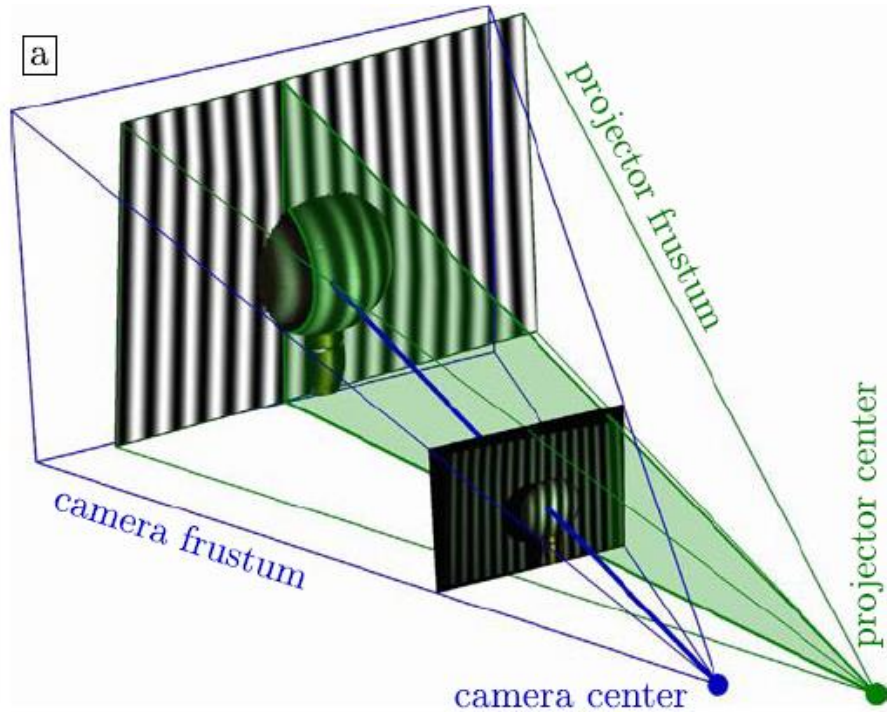


# Kontinuirane metode kodiranja uzoraka za projiciranje

---

- nositelj koda projiciranih uzoraka se **kontinuirano** mijenja, npr. intenzitet sive skale ili boja
- često su takvi uzorci se po dijelovima periodični, a što zahtjeva dodatni napor kod dekodiranja u cilju izračuna apsolutnog koda u odnosu na cijeli uzorak
- **metode vremenskog multipleksa**
  - metoda faznog pomaka (u kombinaciji s diskretnom metodom Gray-vim *kodom*)
  - metoda višestrukog faznog pomaka
- **metode frekvencijskog multipleksa**
  - Fourierova analiza sinusoidalno projiciranog uzorka

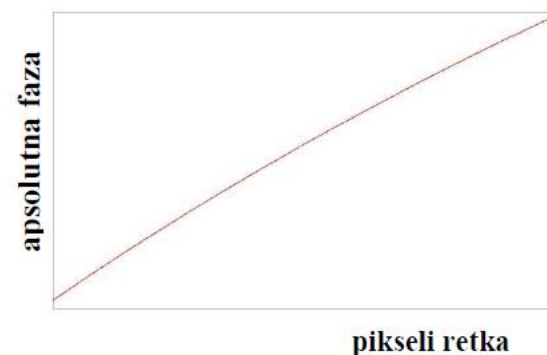
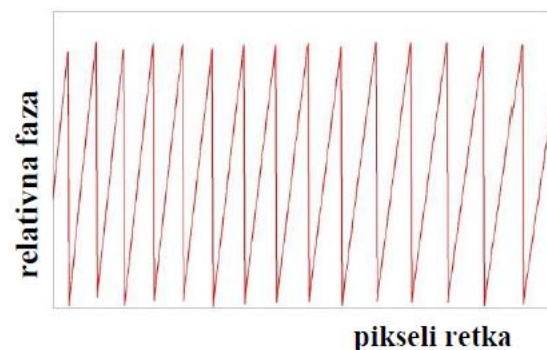
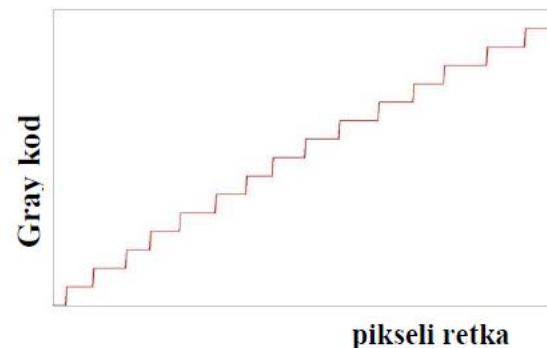
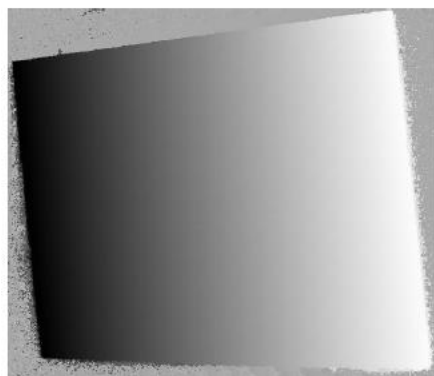
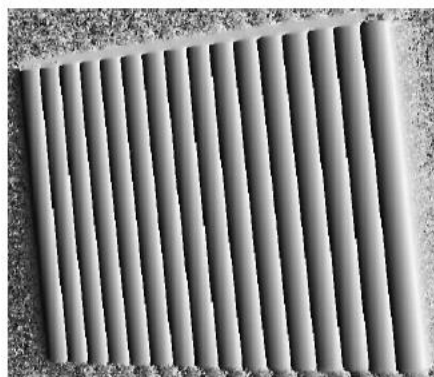
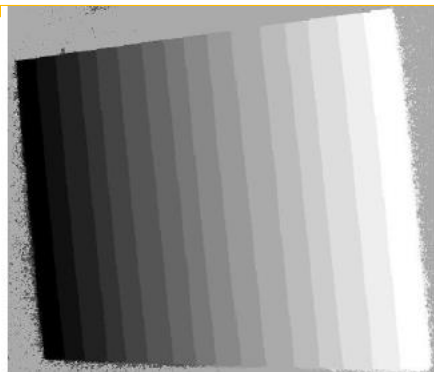
# Metoda faznog pomaka



- Projektor projicira (slika a) niz od  $N \geq 3$  sinusoidnih uzoraka (slika b) gdje je svaki projicirani  $i$ -ti uzorak pomaknut u fazi za iznos  $\varphi_R = N \cdot i / 2 \cdot \pi$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$
- iz deformacija uzroka na slikama kamere (slika c)) računa se zamotana faza (slika d) koju je zbog očigledne periodičnosti koda na dobivenoj slici nužno 'odmotati' da bi se dobio jedinstveni neperiodični kod (slika e), barem po jednoj koordinatnoj osi projiciranog uzorka

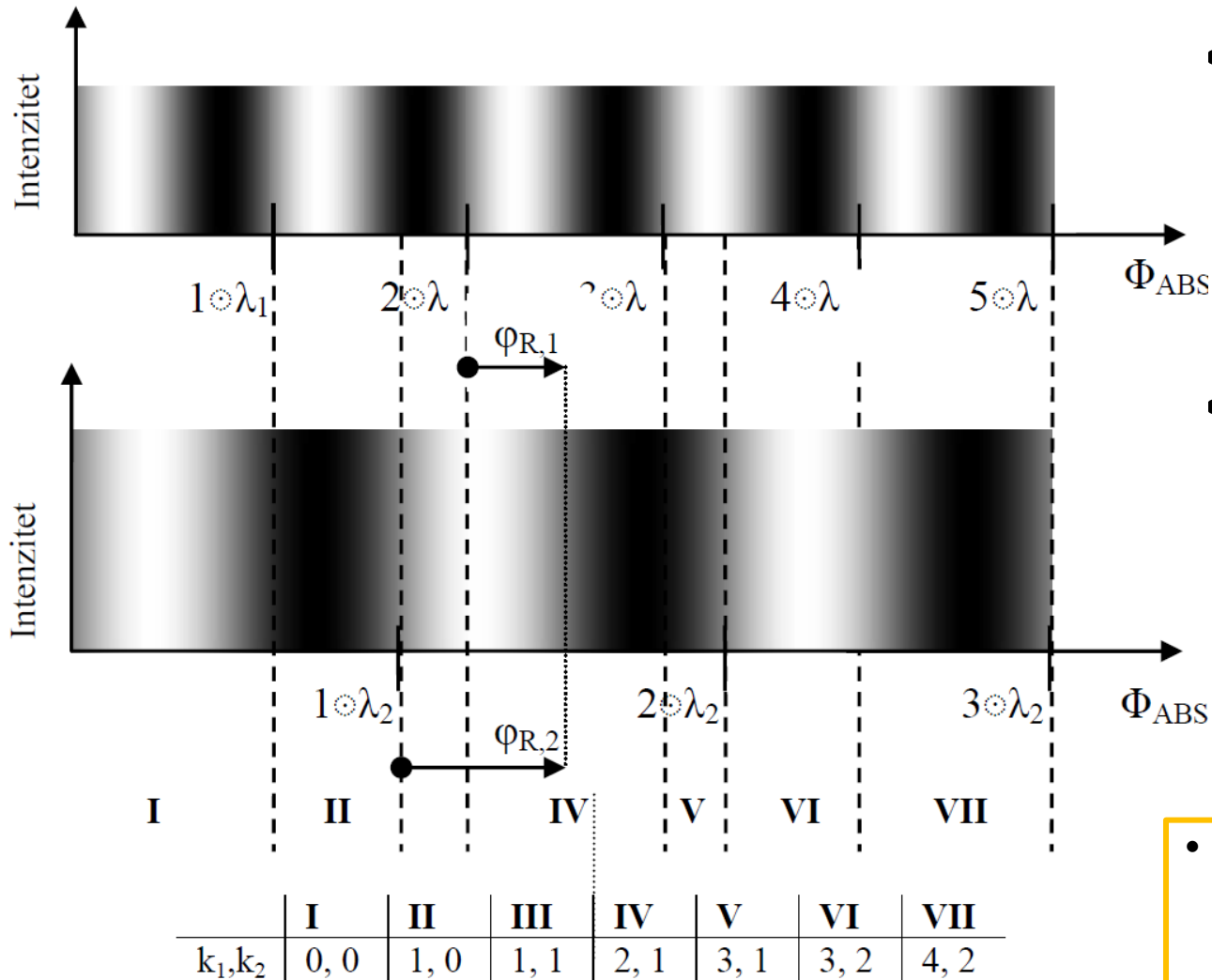


# Odmotavanje faze Grayevim kodom



- Segmentirani dijelovi slike Grayevim kodom jedinstveno kodiraju svaku od perioda na slici relativnih faza

# Odmotavanje faze višestrukim faznim pomakom

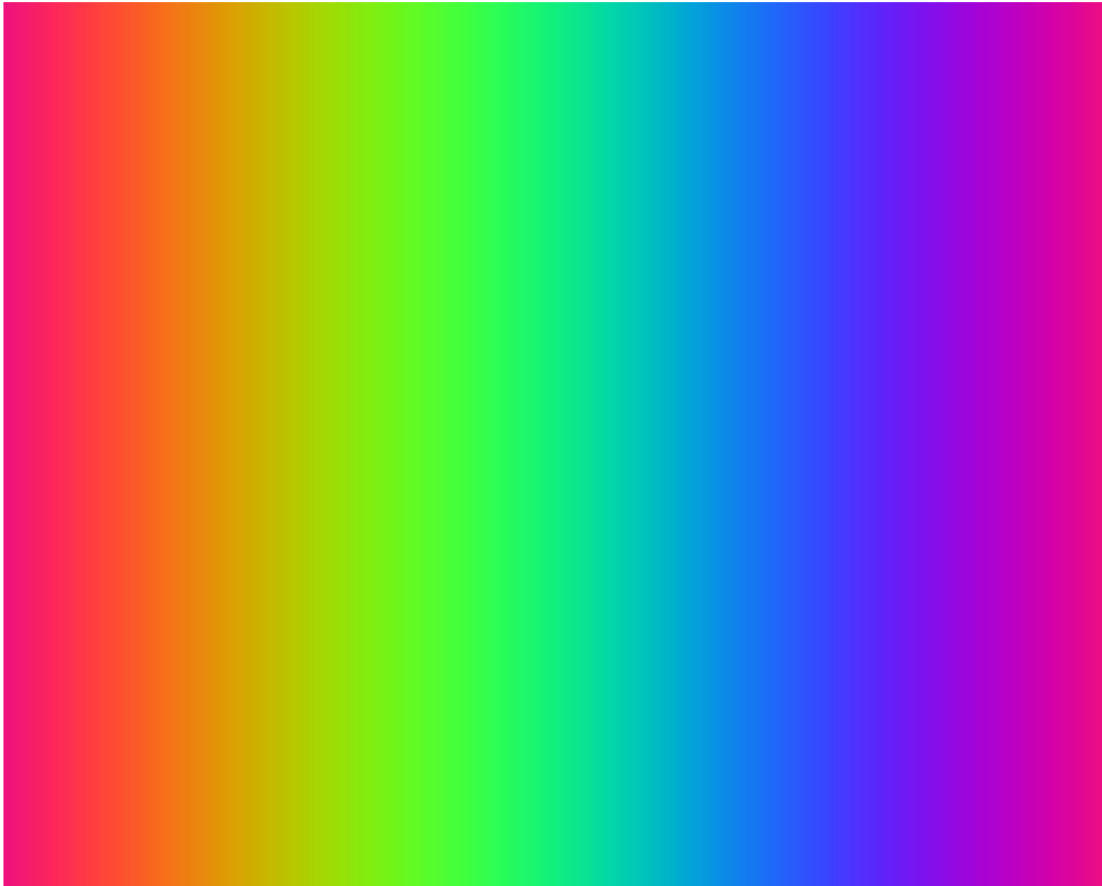


- promjena vrijednosti relativne faze uzduž osi apsolutne faze  $\Phi_{ABS}$  za dva različita sinusna signala. Za dotičan iznos apsolutne faze slika istaknut je odgovarajući par relativnih faza ( $\phi_{R,1}$ ,  $\phi_{R,2}$ )
- vertikalne isprekidane linije pokazuju intervale  $\Phi_{ABS}$  karakterizirane sa jedinstvenim kombinacijama brojeva perioda ( $k_1$ ,  $k_2$ )

• Tomislav Pribanić, Saša Mrvoš, Joaquim Salvi.  
**Efficient Multiple Phase Shift Patterns for Dense 3D Acquisition in Structured Light Scanning.** Image and Vision Computing. 28 (8), 1255-1266, 2010.

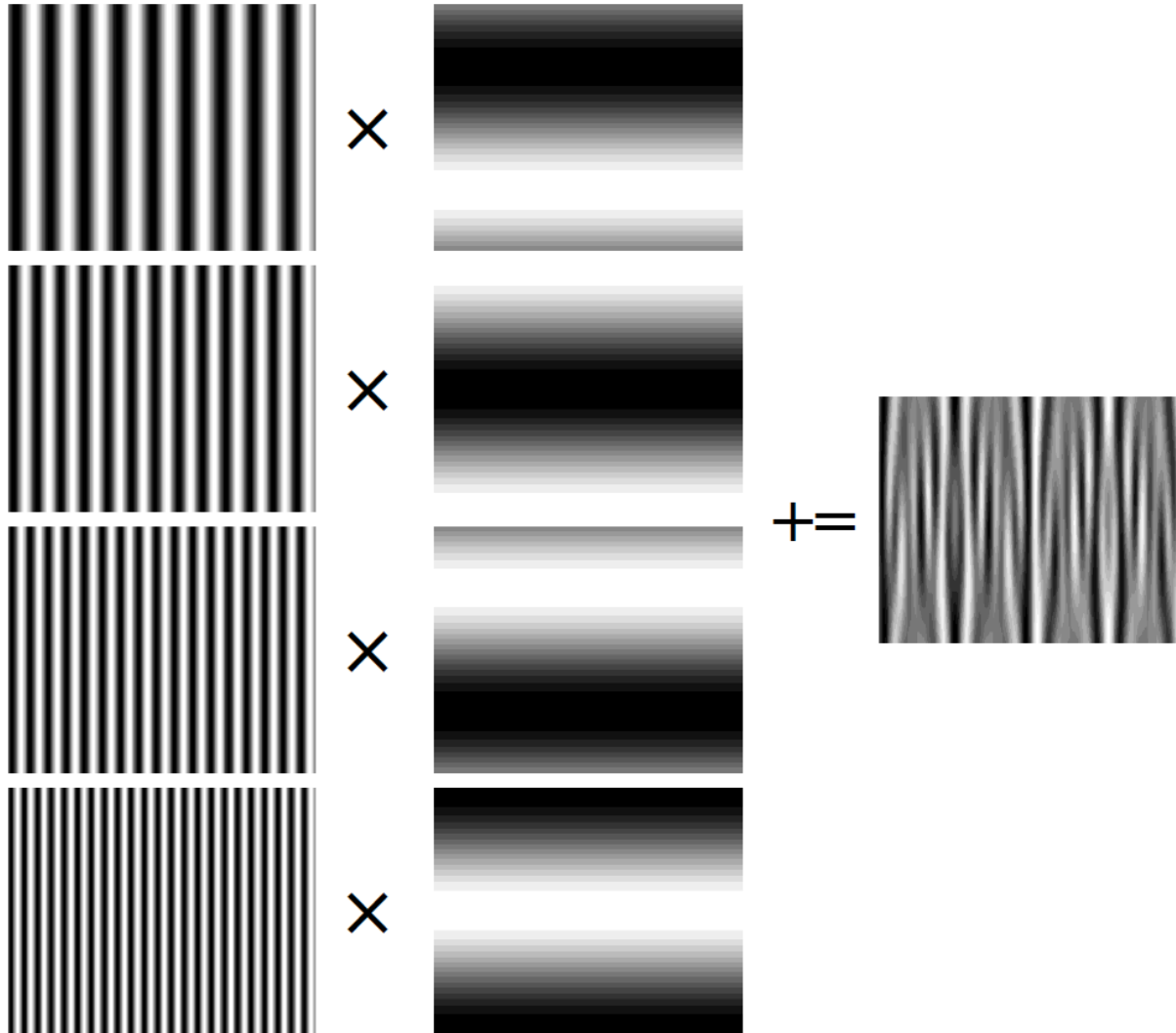
# Metoda faznog pomaka implementirana kanalima boja

---



- uzorak u boji gdje se odvojenim promatranjem intenziteta u R, G i B kanalima koristi metoda faznog pomaka za izračun relativne faze
- **projekcija samo jednog uzorka slike: idealno za 3D skeniranje dinamičkih scena**

# Metoda faznog pomaka implementirana frekvencijskim multipleksom



- kompozitni uzorak dobiven modulacijom četiri signala nosioca sa uzorcima slike faznog pomaka te njihovom sumom
- **projekcija samo jednog uzorka slike: idealno za 3D skeniranje dinamičkih scena**
- u praksi odabir frekvencije nosioca signala, filtriranje signala te demodulaciju signala nije trivijalno učiniti robusnim



# Full body 3D structured light scanner I

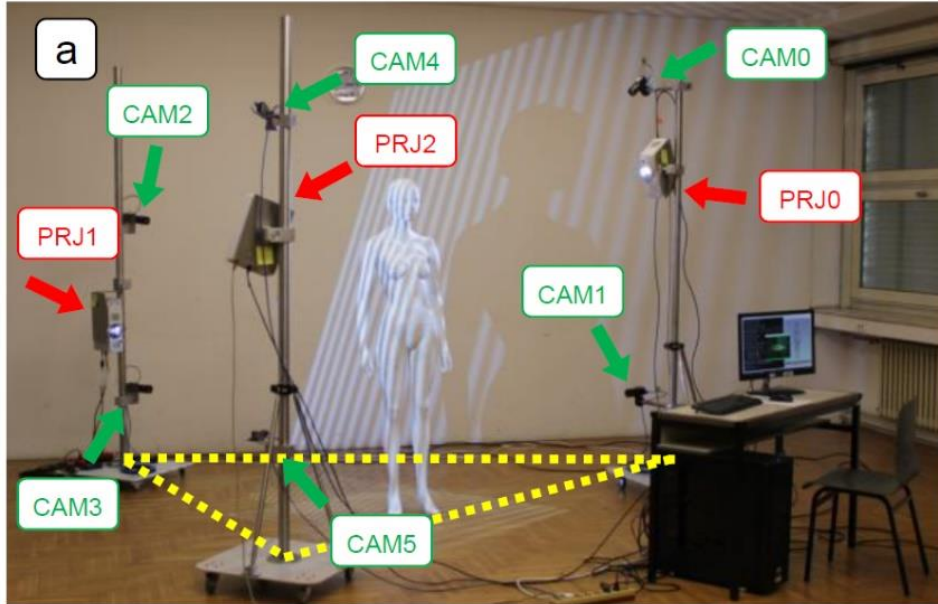


Figure 3. A developed prototype scanner: (a) three vertical poles each carrying one projector (red arrow) and two cameras (green arrows) are placed at the vertices of a triangle (dotted yellow lines) with a mannequin in the middle; (b) control console. Note the interference pattern on the mannequin in (b).

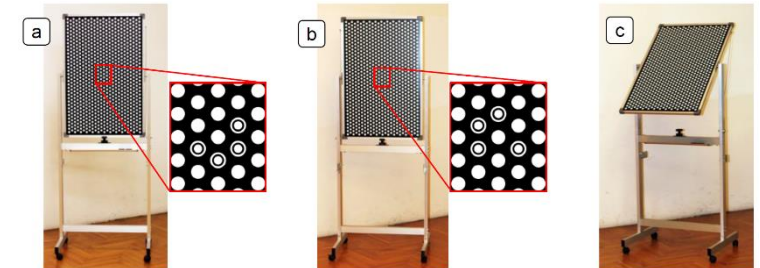


Figure 2. A double-sided calibration board: (a) front side; (b) back side; and (c) side view. Note the markings used to automatically identify board side.

# Full body 3D structured light scanner II

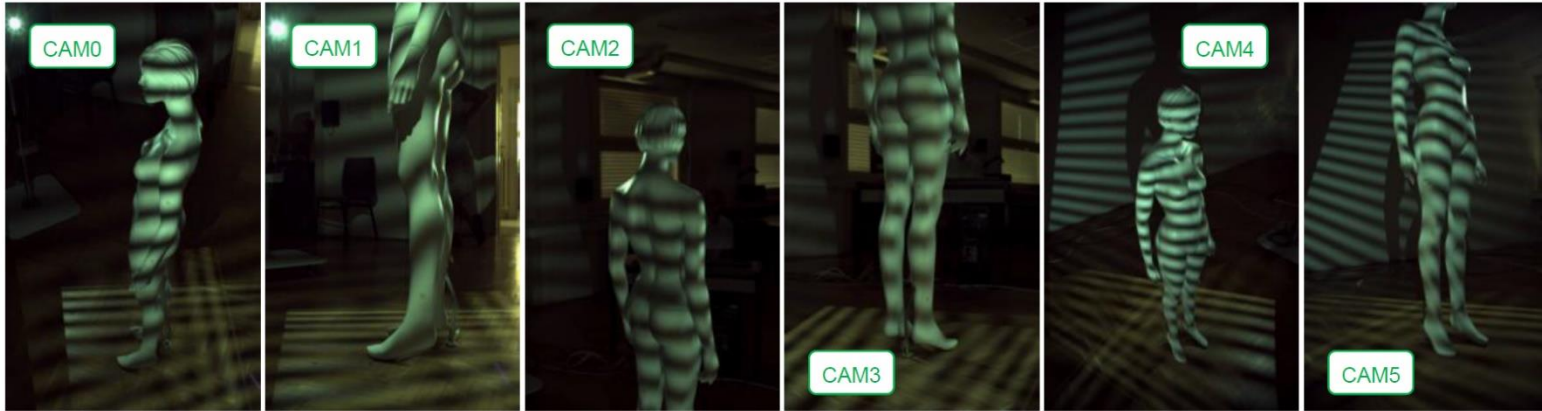


Figure 4. First acquired frame (1/42) for all six cameras. Position of a mannequin is the same as in Fig. 3. Note the inter-projector interference on the floor.

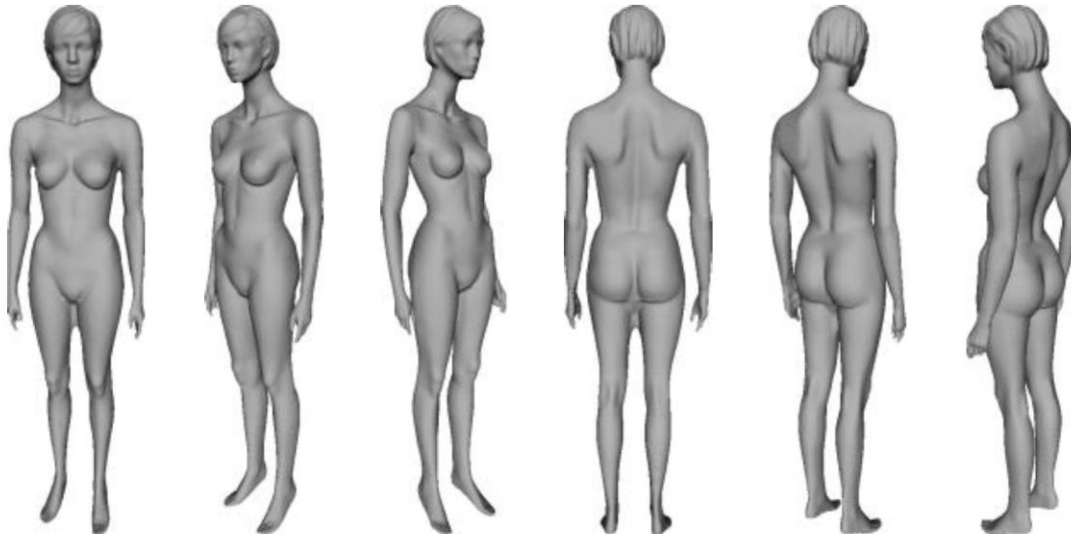
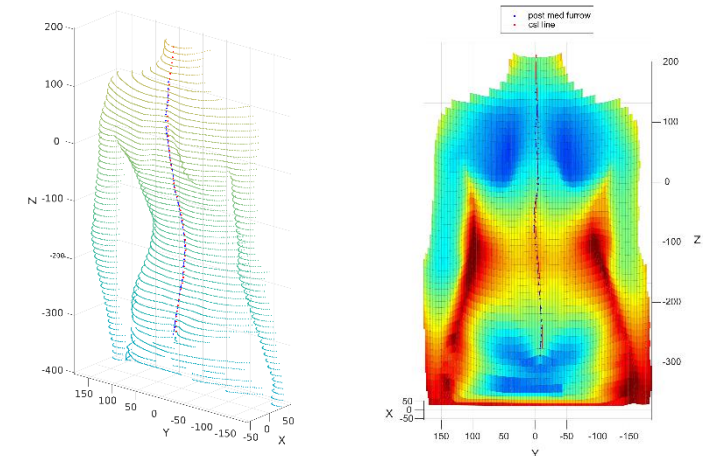


Figure 6. Six views of a created mesh.

- 3D analiza posture/leđa



- Tomislav Petković, Tomislav Pribanić, Matea Đonlić, Nicola D'Apuzzo. **Multi-Projector Multi-Camera Structured Light 3D Body Scanner**. 8th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, 2017.



# 3D skeniranje strukturiranim svjetlom na tabletu

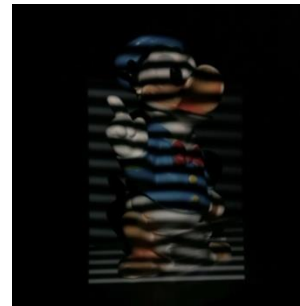
- Strukturirano svjetlo
  - metoda višestrukih faznih pomaka
- Lenovo Yoga Tab 3 Pro 10
- Broj točaka ~15000 points



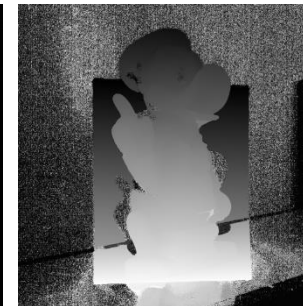
scanning setup



input image



coded phase

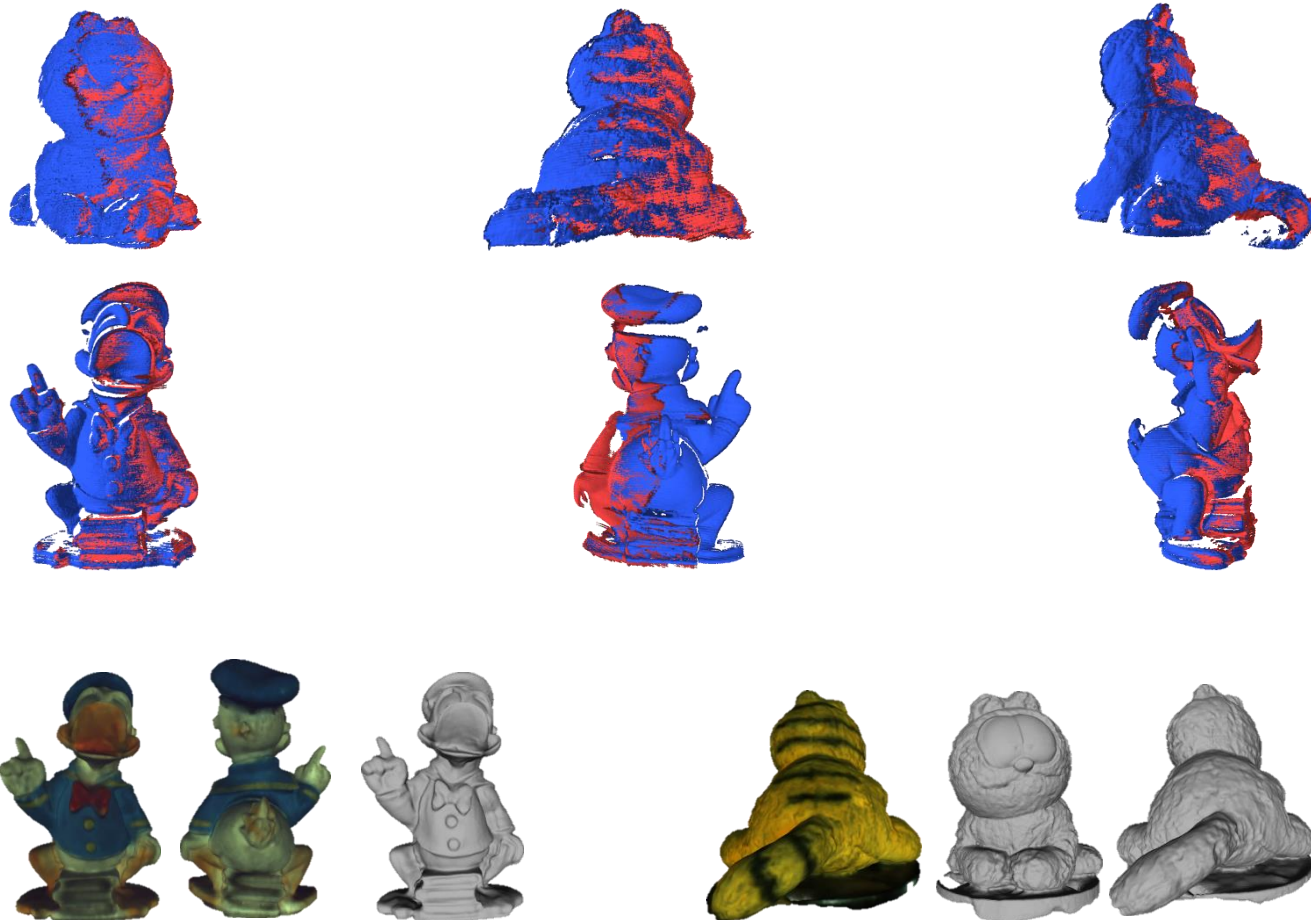


3D reconstruction



# 3D registracija točaka

- spajanje više 3D skeniranih oblaka točaka u jedinstveni 3D oblak točaka



- Matea Đonlić, Tomislav Petković, Tomislav Pribanić. **On Tablet 3D Structured Light Reconstruction and Registration**  
IEEE International Conference on Computer Vision Workshop: Capturing and Modelling Human Bodies, Faces and Hands, 2017.

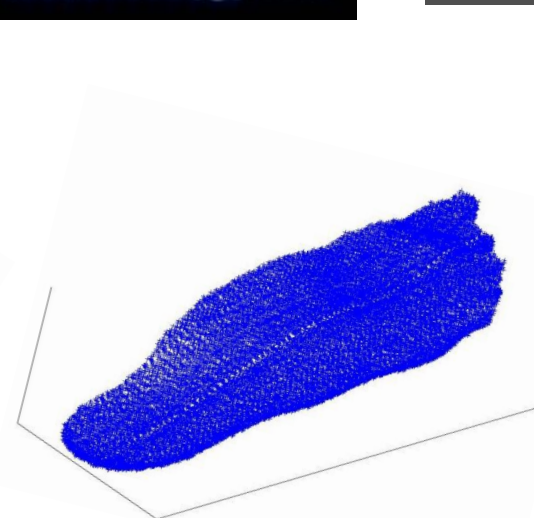
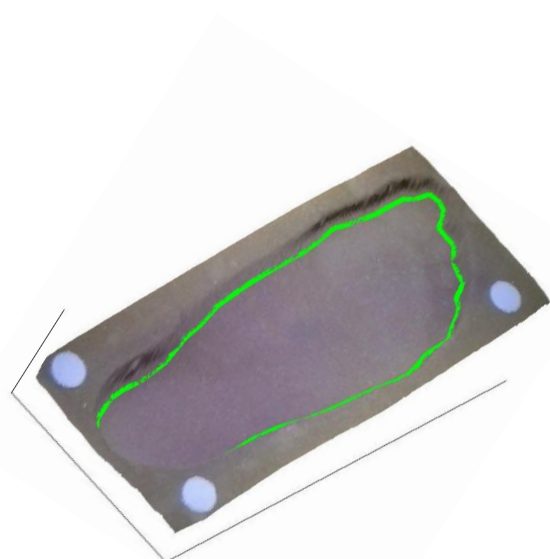
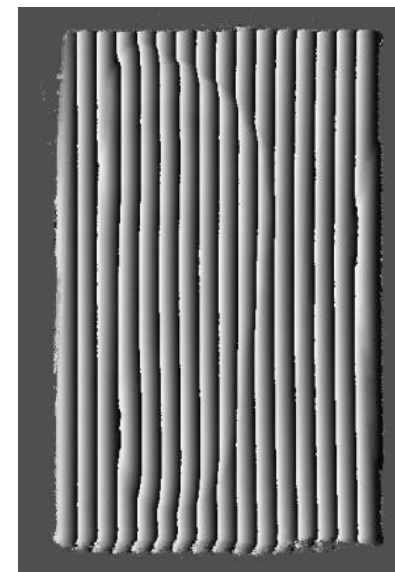
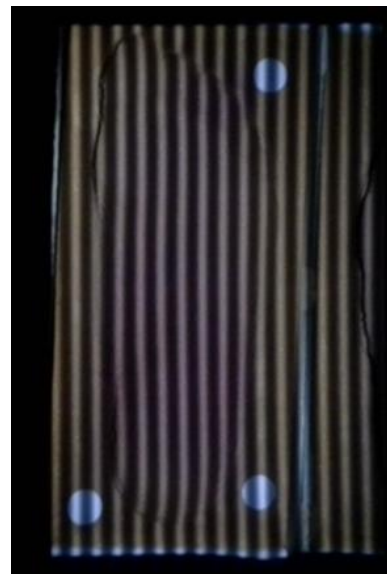
# 3D skeniranje strukturiranim svjetlom na pametnom telefonu



- Tomislav Pribanić, Tomislav Petković, Matea Đonlić, Matea, Vedran Hrgetić.  
**On Fabrication of a Shoe Insole: 3D Scanning using a Smartphone.**  
International Conference on Biomedical and Health Informatics (ICBHI2015)



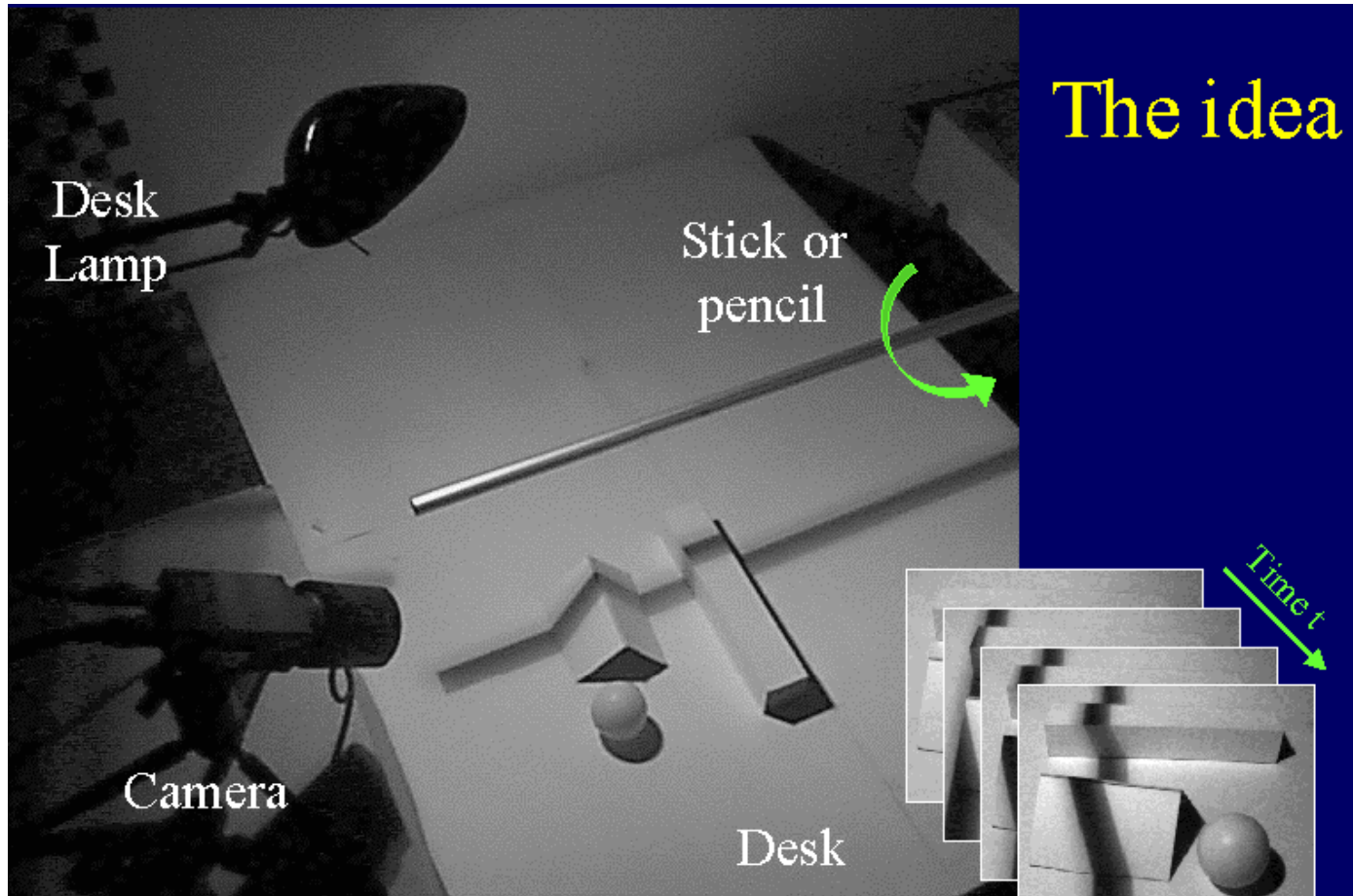
# 3D skeniranje stopala – izrada uložaka za stopala



- 2015 **Silver Medal** on 13th International innovation exhibition ARCA 2015, 15-18. October 2015, Zagreb, Croatia, for the innovation "First world structured light scanner on the smartphone".

# 3D skeniranje sjenom I

- Jedna od najjednostavnijih izvedbi 3D skeniranja strukturiranim svjetlom/sjenom



- **3D Photography on your desk (ICCV 1998)** by Jean-Yves Bouguet and Pietro Perona
- <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/ICCV98/>

# 3D skeniranje sjenom II

