

Obrada informacija: Profilometrija projiciranjem pruga i korištenjem boje

T. Petković

Sveučilište u Zagrebu

prosinac 2021.



Sadržaj

Uvod

3D skeniranje površine

Binokularni vid

Strukturirano svjetlo

Pomicanje pruga

Sinusoidalne pruga

Važnost faze

Odmatanje faze

Pomicanje obojanih pruga

Korištenje boje

De Bruijnov niz

Koraci obrade

Zaključak

Mali rječnik pojmova

3D skeniranje površine

3D skeniranje površine jest procedura kojom mjerimo **koordinate** (oblik) **površine** nekog predmeta.

► 3D skeniranje površine

- ▷ druga imena su 3D profilometrija, mjernje raspona, senziranje dubine
- ▷ postupci kojima mjerimo položaj površine
- ▷ mjerimo koordinate (x, y, z) neke površine
- ▷ ponekad mjerimo koeficijent refleksije ili albedo površine
- ▷ primjer: profilometrija projiciranjem pruga

► 3D oslikavanje

- ▷ postupci kojima dobivamo istinske 3D podatke
- ▷ mjerimo neku veličinu p za svaku točku (x, y, z) unutar konačnog volumena
- ▷ primjeri: CT, MRI, 3DRA

Ključni koncept: triangulacija

Triangulacija znači određivanje položaja neke točke konstrukcijom trokuta prema toj točci iz najmanje dvije poznate točke.

Ako želimo rekonstruirati položaj neke točke na površini predmeta tada moramo tu točku vidjeti iz barem dva različita gledišta.

Najčešće se koriste dvije kamere: **binokularni vid**.

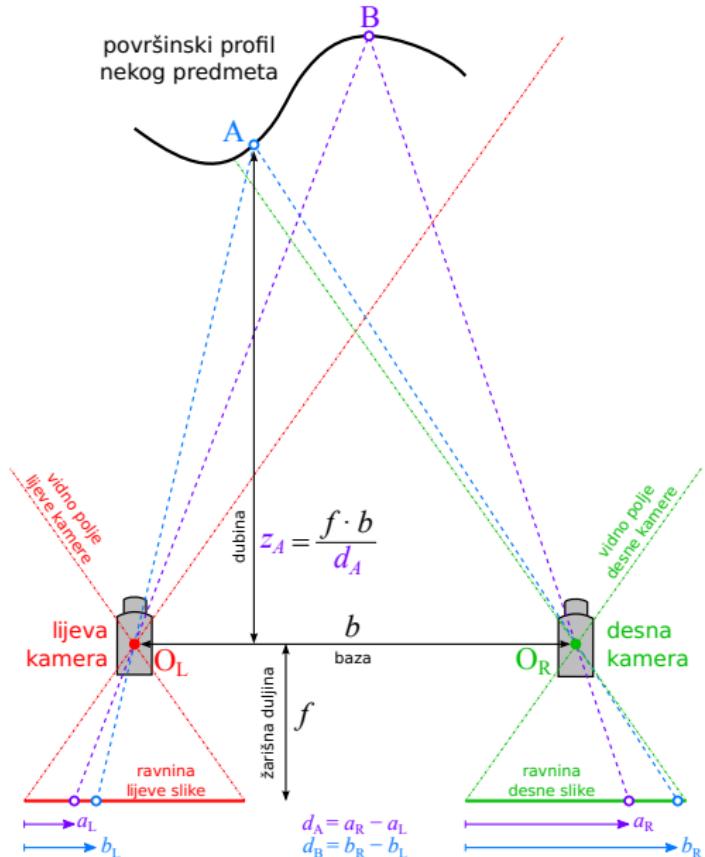
Binokularni vid

Koristimo dvije kamere za mjerjenje dubine.

Koraci obrade:

1. uklanjanje distorzije;
2. stereo rektifikacija;
3. nalaženje korespondentnih točaka;
4. triangulacija.

Nedostatak: ne radi za površine bez tekture.



Strukturirano svjetlo

Ako zamijenimo jednu kameru s projektorom dobivamo:
strukturirano svjetlo.

Projektor projicira posebno pripremljenu sliku koju nazivamo
uzorkom strukturiranog svjetla.

Princip strukturiranog svjetla jest rekonstrukcija površinskog profila nekog predmeta temeljem distorzije projiciranog uzorka strukturiranog svjetla.

Pri usporedbi s binokularnim vidom kod 3D skeniranja strukturiranim svjetlom zadatak pronalaženja korespondentnih točaka u dvije slike je zamijenjen zadatkom dekodiranja projiciranog uzorka iz jedne slike.

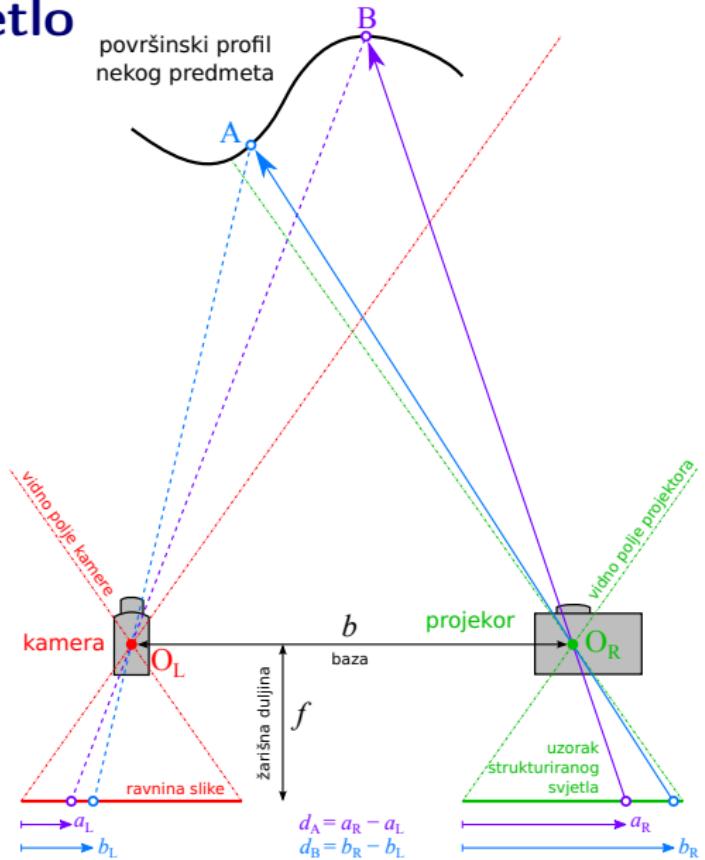
Strukturirano svjetlo

Promatramo deformaciju projiciranog uzorka.

Koraci obrade:

1. dekodiranje uzorka
(dobivanje koordinata projektor-a);
2. uklanjanje distorzije;
3. triangulacija.

Problemi: ambijentalno svjetlo i albedo predmeta.



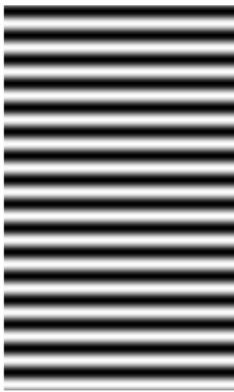
Primjer

Strukturirano svjetlo Binokularni vid

kamera lijeva kamera



desna kamera uzorak (projektor)



Uzorci strukturiranog svjetla

Kod skeniranja površine strukturiranim svjetlom možemo projicirati jedan ili više uzoraka:

1) jednostruki uzorak

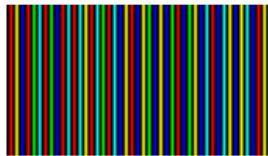
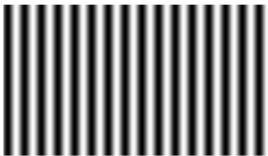
- ▶ rekonstrukcija iz jedne slike
- ▶ predmet se smije micati
- ▶ prostorno dekodiranje uzorka
- ▶ rekonstrukcija je rijetka/nisko-rezolucijska

2) višestruki uzorci

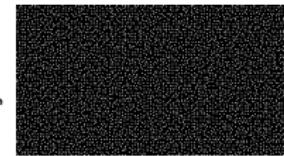
- ▶ više slike je projicirano slijedno u vremenu
- ▶ predmet mora biti nepomičan
- ▶ vremensko dekodiranje uzorka
- ▶ rekonstrukcija je gusta/visoko-rezolucijska

Primjeri uzoraka strukturiranog svjetla

Višestruki uzorci



Jednostruki uzorci



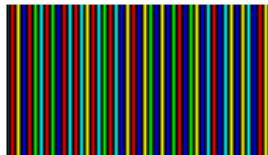
Grayev kod



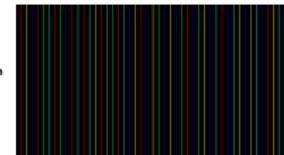
sive sinusoidalne pruge



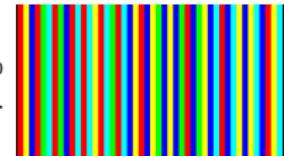
samo-ekvalizirajuće De-Brujijne sinusoidalne pruge



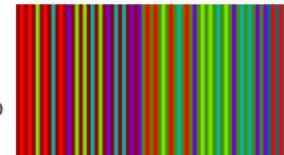
linije



pruge



Pages et al.



Sinusoidalne pruga

Najčešće korišteni uzorak sivih sinusoidalnih pruga je

$$I_p(x, y) = I_0(1 - \cos(2\pi x/\lambda + \varphi_n))/2, \quad (1)$$

gdje su (x, y) koordinate projektoru u pikselima, I_0 je najveći intenzitet uzorka, λ je valna duljina pruge (u px), i φ_n je fazni pomak.

Za **jednostruki** uzorak se koristi samo jedna slika ($\varphi_n = 0$).

Za **višestruki** uzorak koristi se zbir od N slika ($0 \leq n < N$).

Svaka slika ima drugačiji fazni pomak φ_n .



$$n = 0, \varphi_n = 0$$



$$n = 1, \varphi_n = \frac{\pi}{2}$$



$$n = 2, \varphi_n = \pi$$



$$n = 3, \varphi_n = 3\pi/2$$

Važnost faze

Višestruki uzorak sivih sinusoidalnih pruga jest:

$$I_{p,\text{stupac}}(x, y) = I_0(1 - \cos(2\pi x/\lambda_{\text{stupac}} + \varphi_n))/2, \quad 0 \leq n < N$$

$$I_{p,\text{redak}}(x, y) = I_0(1 - \cos(2\pi y/\lambda_{\text{redak}} + \varphi_m))/2, \quad 0 \leq m < M$$

Stupac x i redak y projektila su enkodirani u fazi.

Enkodiranje koordinata projektila u fazi nam daje nekoliko važnih prednosti:

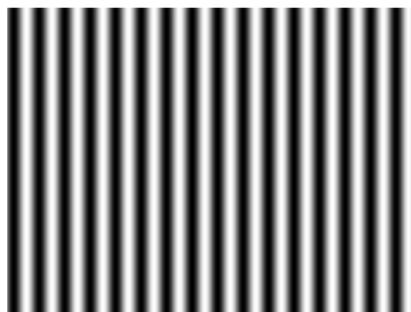
1. neosjetljivost na ambijentalno svjetlo;
2. neosjetljivost na albedo (boju); i
3. neosjetljivost na zamućenje/defokusiranje.

Određivanje faze

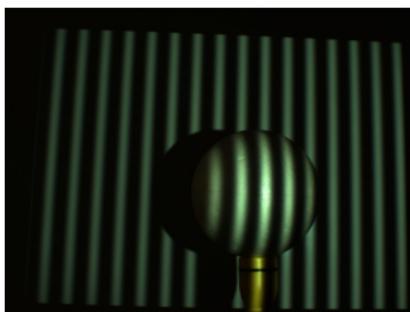
Fazu određujemo:

1. za višestruke uzorke korištenjem vremenske analize:
 - 1.1 algoritam u tri koraka (poseban slučaj za $N = 3$);
 - 1.2 postupak najmanjih kvadrata;
 - 1.3 Schwider-Hariharanov algoritam (otežani najmanji kvadrati);
2. za jednostrukе uzorke korištenjem prostorne analize:
 - 2.1 metode u prostornoj domeni;
 - 2.2 metode u domeni transformacije.

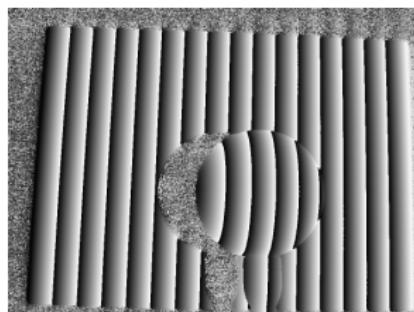
Primjer određivanja faze



projicirani I_p za $n = 0$



snimljeni I_p za $n = 0$



određena faza

Odmatanje faze

Fazu možemo odrediti samo modulo- 2π .

Formalno, neka je Φ prava vrijednost faze te neka je ϕ faza izmjerena modulo- 2π ; tada

$$\Phi = \phi + 2\pi k, \tag{2}$$

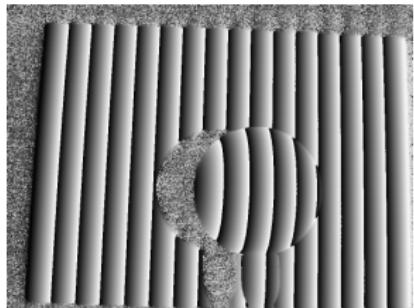
gdje je Φ **prava ili absolutna faza**, gdje je ϕ **zamotana ili glavna faza**, i gdje je $k \in \mathbb{Z}$ nepoznati cijeli broj koji modelira neodređenost faze te kojeg ponekad nazivamo **rednim brojem perioda ili rednim brojem pruge**.

Zadaća **odmatanja faze** jest **odmotati zamotanu fazu ϕ i odrediti pravu fazu Φ** .

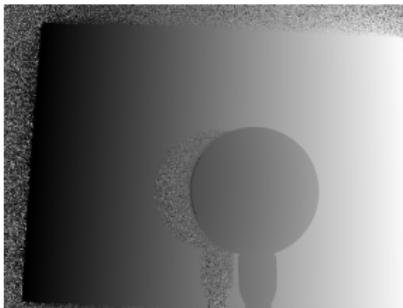
Odmatanje faze

Pristupi problemu odmatanja faze mogu se podijeliti u dvije odvojene skupine:

1. **prostorno** odmatanje faze (za **jednostrukе** uzorke),
2. **vremensko** odmatanje faze (za **višestruke** uzorke).

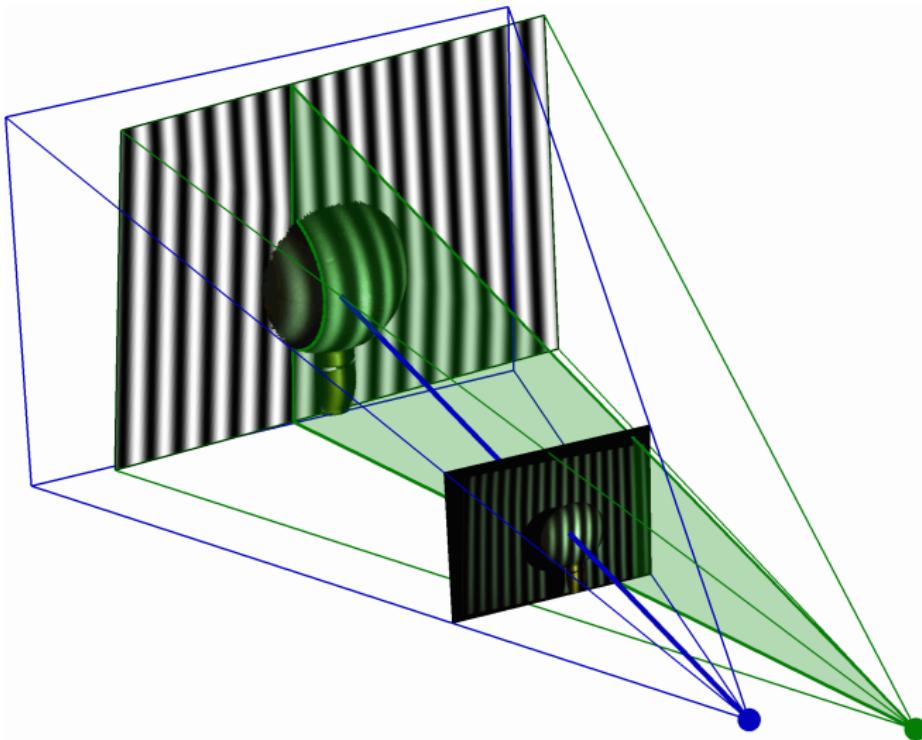


zamotana faza ϕ



odmotana faza Φ

Triangulacija



Motivacija

- ▶ Strukturirano svjetlo jest **robustni** postupak 3D profilometrije
- ▶ Želimo ostvariti robustno 3D skeniranje korištenjem svepristune **potrošačke** elektronike
 - ▷ projektor i kamera ugrađeni u mobilni uređaj
 - ▷ kućni DLP projektor i web kamera
- ▶ Gotovo svi takvi uređaju koriste **boju**

Problem boje

Korištenje **obojenog strukturiranog svjetla** je teško:

1. projektor mora vjerno reproducirati boju
2. kamera mora precizno snimiti boju
3. predmet ne smije promijeniti boju uzorka
4. cijeli sustav mora biti neosjetljiv na ambijentalno svjetlo

Profilometrija — Pomicanje obojanih pruga — Korištenje boje

previše zelene



automatsko podešavanje bijele (AWB)



previše plave

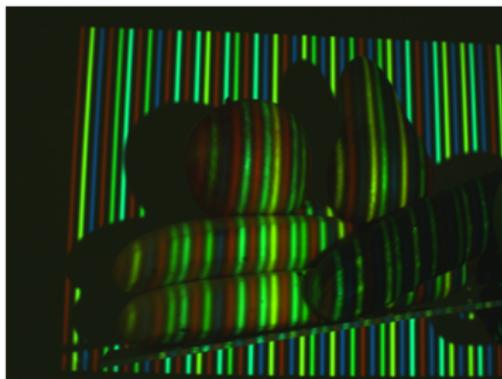


kalibrirano korištenjem SpyderCUBE-a

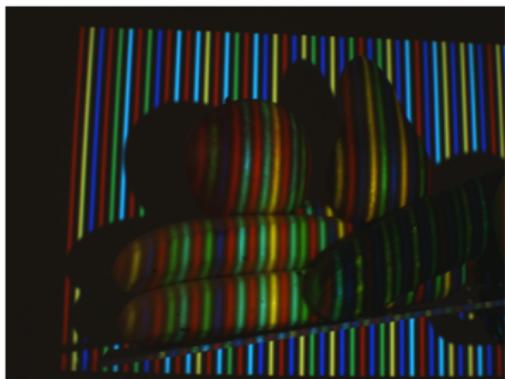


Profilometrija — Pomicanje obojanih pruga — Korištenje boje

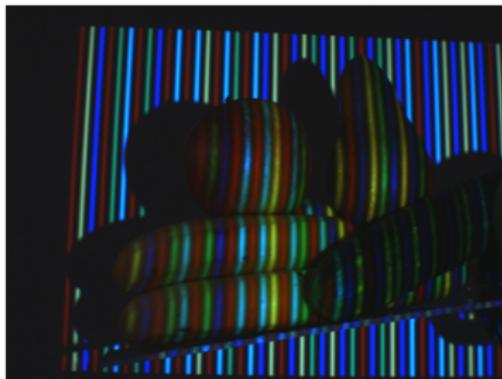
previše zelene



automatsko podešavanje bijele (AWB)



previše plave



kalibrirano korištenjem SpyderCUBE-a



Model boje

Model za **RGB** prostor boja u strukturiranom svjetlu jest:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} k_R & 0 & 0 \\ 0 & k_G & 0 \\ 0 & 0 & k_B \end{bmatrix}}_K f\left(\underbrace{\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}}_{I_p}\right) + \underbrace{\begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}}_{I_0}, \quad (3)$$

gdje je I_c boja koju vidi kamera, gdje je I_p kod boje koju šaljemo projektoru, gdje je A prijenosna matrica kanala boja, gdje je K matrica albeda, gdje je f monotona funkcija koja modelira nelinearnost projektor-a, i gdje je I_0 ambijentalno svjetlo.

Korištenje boje u profilometriji projiciranjem pruga je teško jer svaki predmet i svaka svena ima drugačiji i općenitno nepoznat albedo K .

Rješenje: Konstuirajmo uzorak strukturiranog svjetla I_p na takav način da svi nužni parametri modela (3) mogu biti estimirani iz snimljene slike.

Samo-ekvalizirajući De Bruijnov niz

De Bruijnov niz

k -znamenasti De Bruijinov niz reda n je ciklički niz duljine $L = k^n$ nad abecedom od k simbola u kojem se svaki podniz duljine n , kojeg nazivamo prozor, pojavljuje točno jednom unutar ciklusa.

Samo-ekvalizirajuće ograničenje

Samo-ekvalizirajuće ograničenje zahtijeva da svi kanali boja koriste cjelokupni raspoloživi dinamički opseg unutar svakog De Bruijnovog prozora.

Primjer za niz duljine 42:

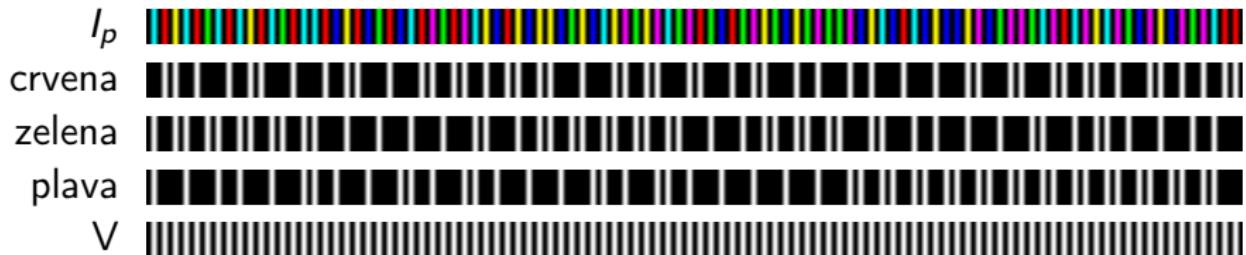


Uzorak strukturiranog svjetla

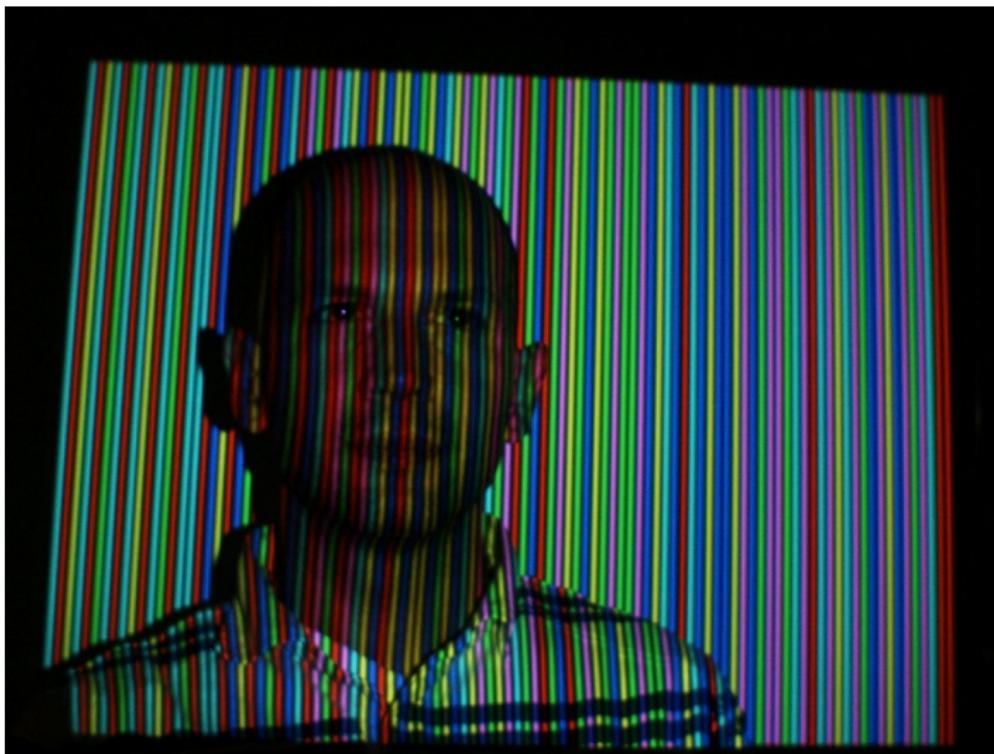
Najveća duljina ternarnog De Bruijnove niza reda $n = 3$ jest $k^n = 6^3 = 216$ članova.

Samo-ekvalizirajuće ograničenje uklanja sve prozore za koje parametri modela boje ne mogu biti određeni što skraćuje duljinu niza na 102 člana:

CRYCRGCR CYRCGRCC RBYRBGRB CRMGRMCYBRY BYBYYBGYBC YMGYMCG-
MRGBRGMYGBYGMGGMBYCBRCBYBBYMBGMMGCMRCMYCMGBMYBMGMC-
RR



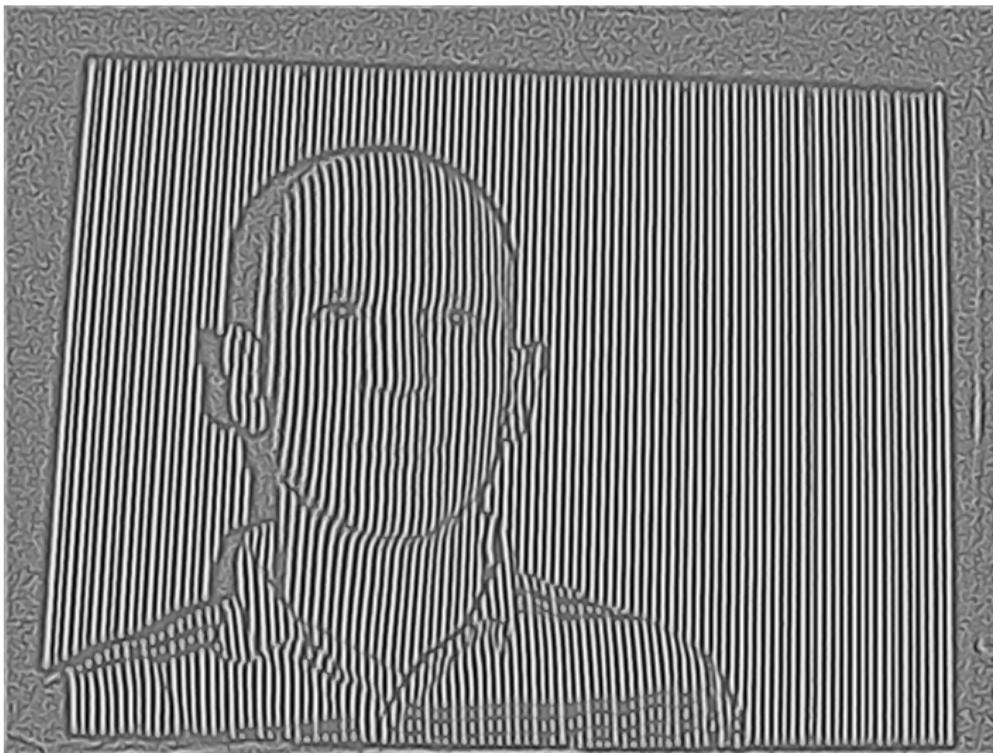
Ulazna slika



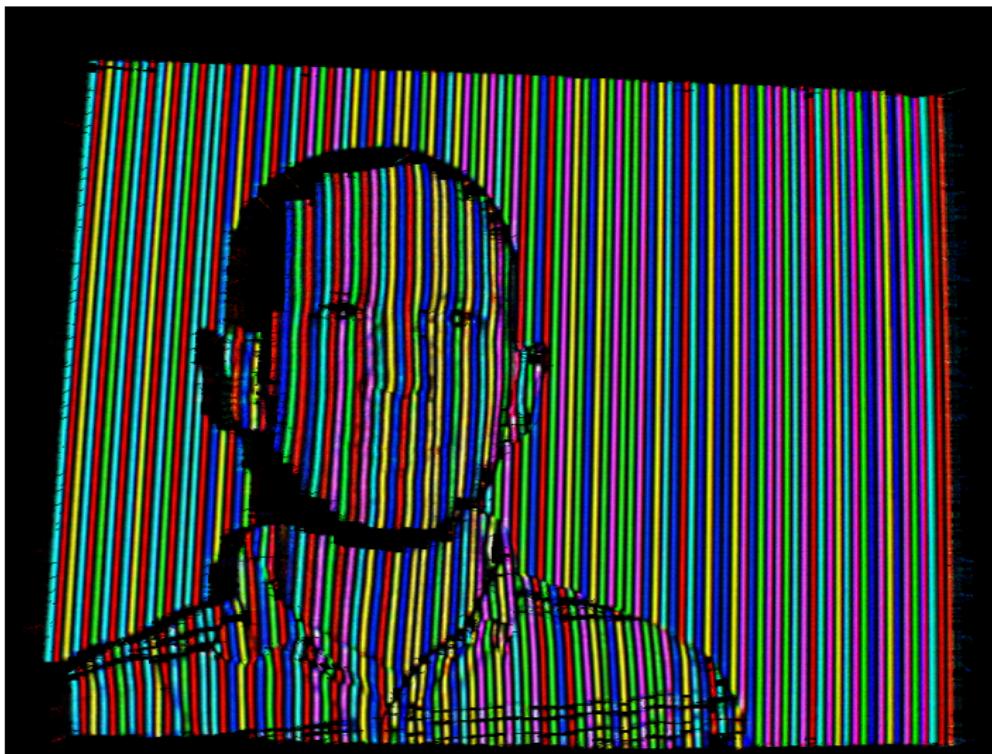
Zbroj svih ulaznih kanala



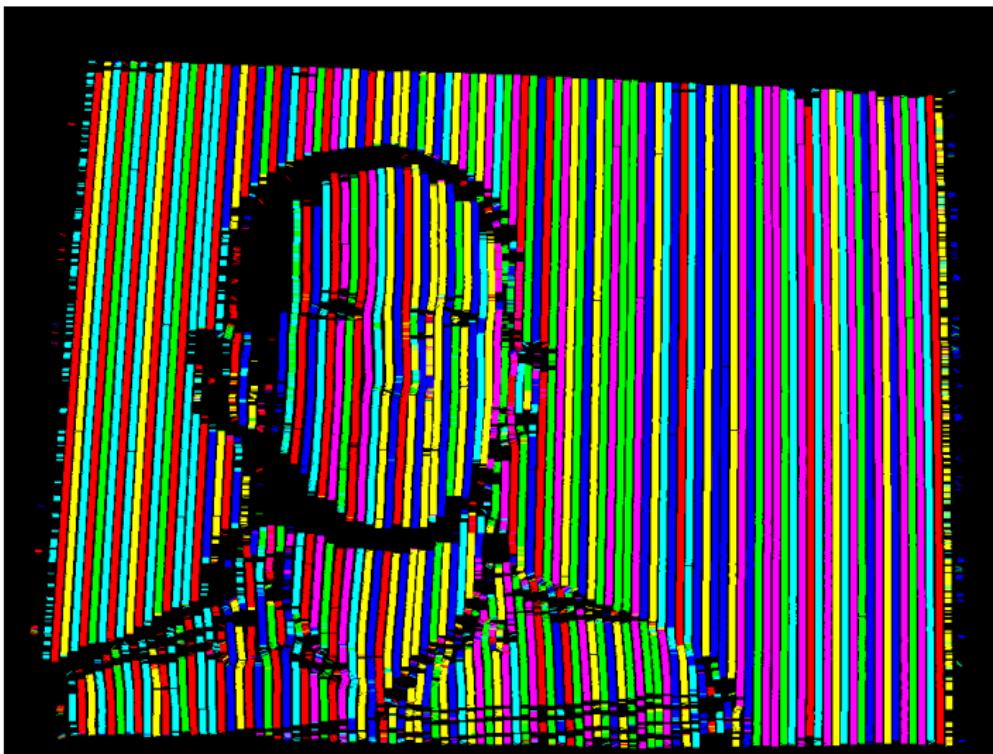
Detekcija pruga



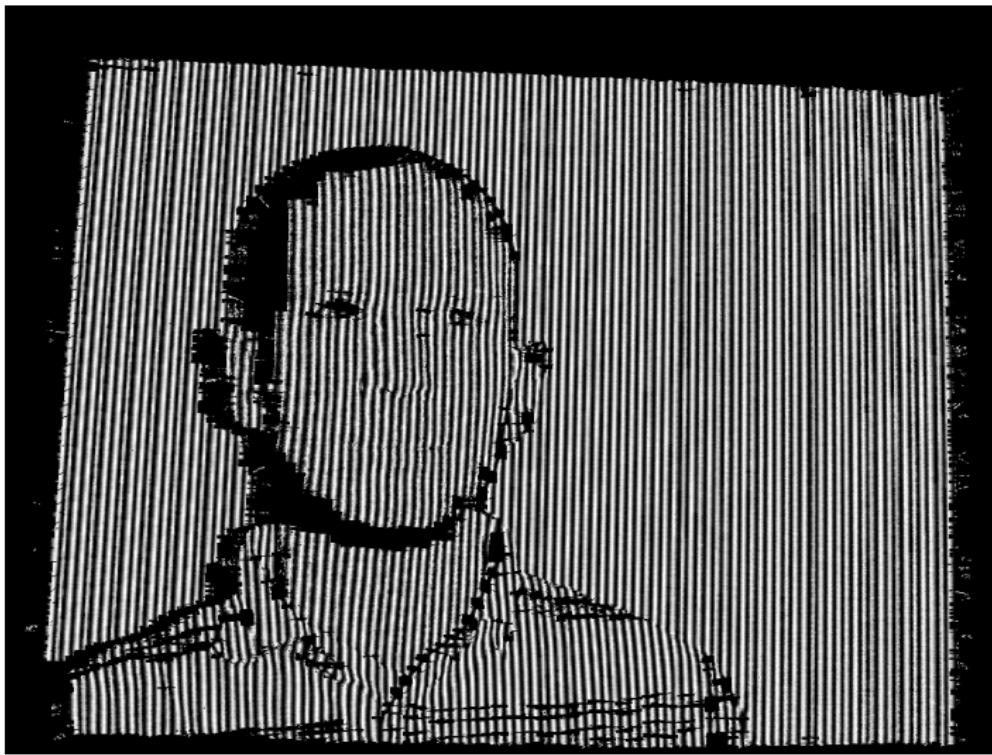
Ekvalizacija boja



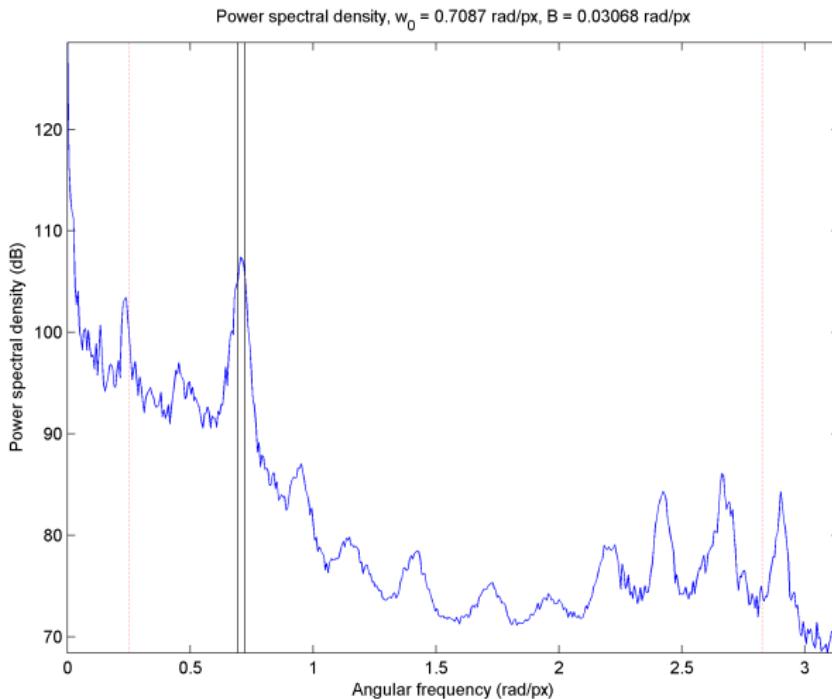
Raspoznata projicirana boja



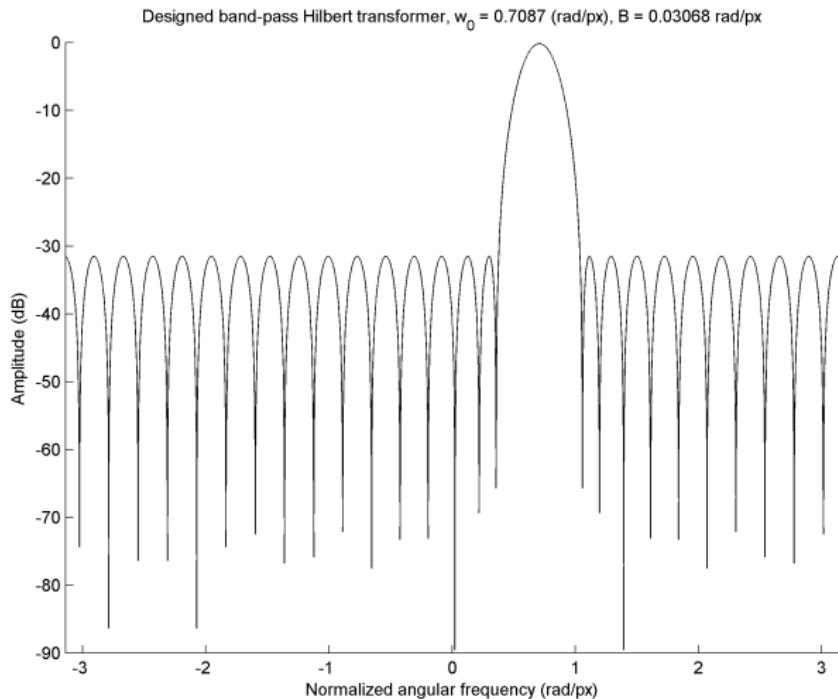
Izdvojen i ekvaliziran V kanal



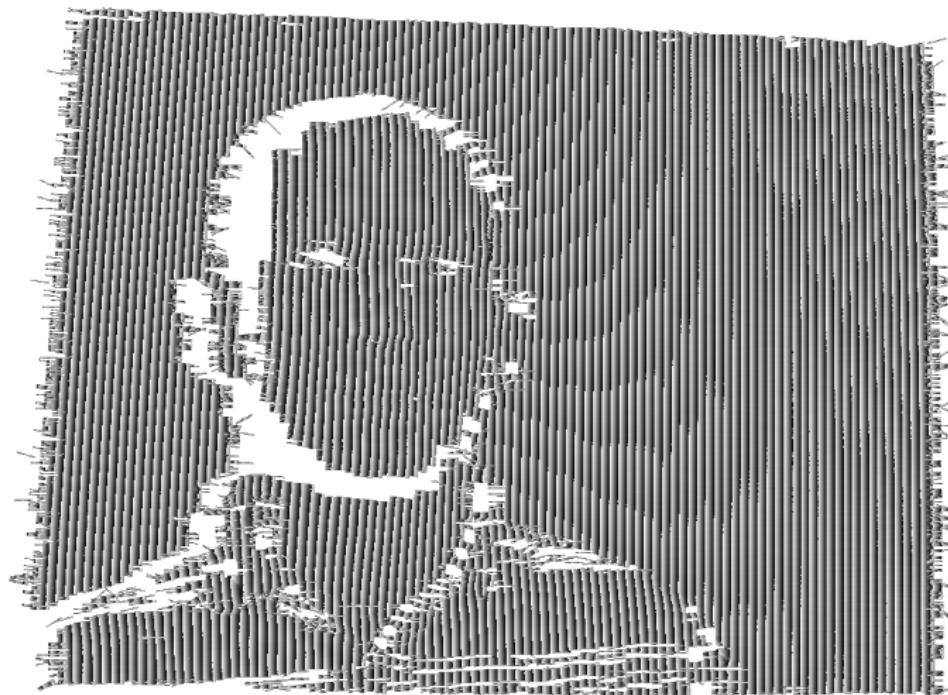
Projektiranje PP Hilbertovog filtra (I)



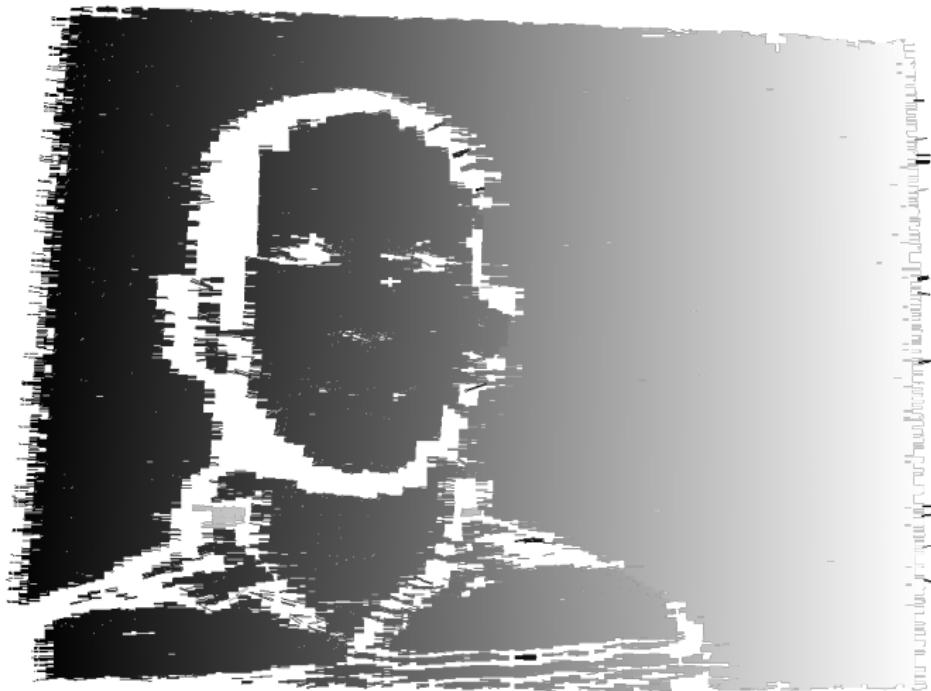
Projektiranje PP Hilbertovog filtra (II)



Estimirana zamotana faza



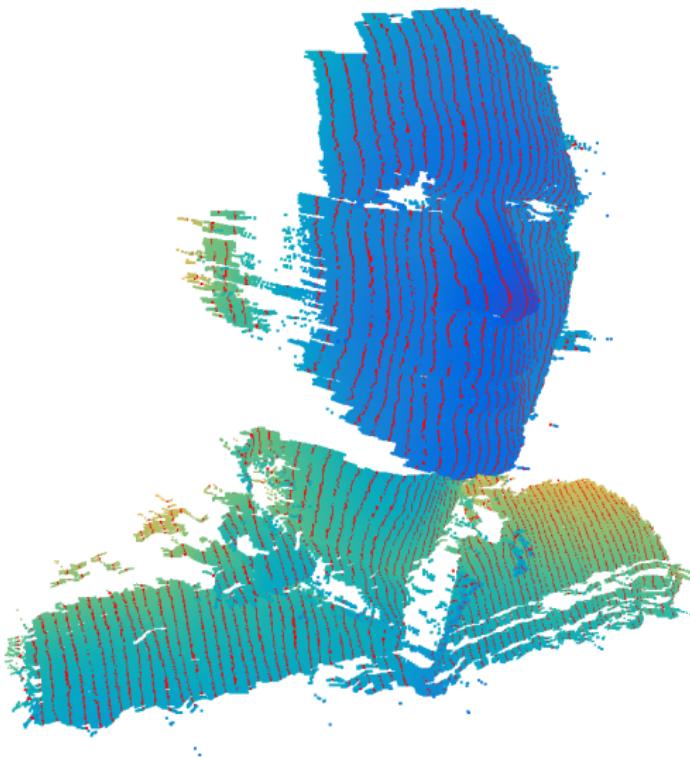
Odmotana faza



Konačna 3D rekonstrukcija (površina)



Usporedba guste i rijetke 3D rekonstrukcije



Teksturirana gusta rekonstrukcija



Zaključak

Samo-ekvalizirajući De Bruijnove niz omogućava:

1. uklanjanje ambijentalnog svjetla,
2. uklanjanje albeda predmeta, i
3. ekvalizaciju pojačanja pojedinih kanala boja.

Pametna kombinacija standardnih tehnika iz obrade signala (analiza Hessianove matrice na više skala i kompleksni PP Hilbertovi filtri) omogućava nam *vrlo gustu* 3D rekonstrukciju koja daje između 80% i 90% točaka u usporedbi s postupcima koji koriste vremensko multipleksiranje, a pri tome je zadržana izvrsna preciznost jer oko 90% rekonstruiranih točaka ima pogrešku određivanja koordinate projektoru manju od 1 px.

Mali hrvatsko-engleski rječnik pojmove

Engleski	Hrvatski
3D surface scanning	3D skeniranje površine
3D imaging	3D oslikavanje
structured light	strukturirano svjetlo
structured light pattern	uzorak strukturiranog svjetla
stero vision	binokularni vid (ili stereo vid)
one-shot pattern	jednostruki uzorak
multi-shot pattern	višestruki uzorak
profilometry	profilometrija
fringe projection profilometry	profilometrija projekcijom pruga
sinusoidal fringe	sinusoidalna pruga
phase unwrapping	odmatanje faze
wrapped phase	zamotana faza
principal phase	glavna faza
unwrapped phase	odmotana faza
absolute phase	apsolutna faza
period-order number	redni broj perioda
fringe-order number	redni broj pruge