

## PROJEKTOVANJE I IZRADA HOLOGRAFSKOG STEREOGRAMA

Dušan Vukić, Marko Živković, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*  
Svetlana Savić Šević, Dejan Pantelić, *Institut za fiziku, Zemun*

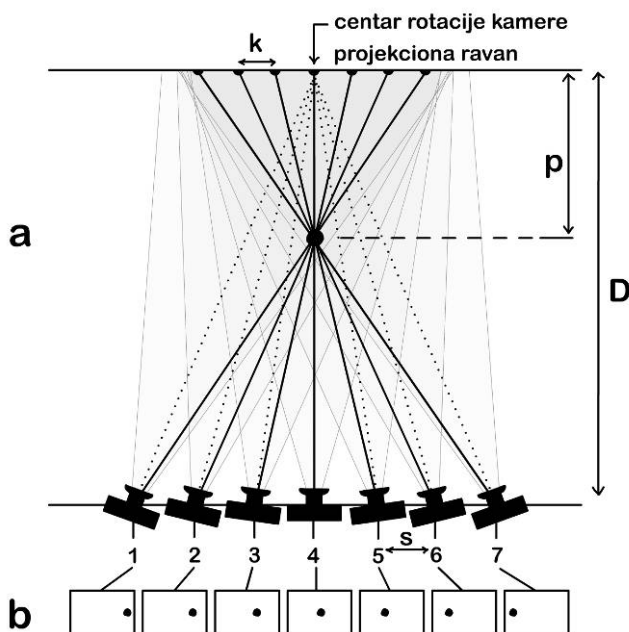
**Apstrakt** – Kod holografskih stereograma, informacija o trodimenzionalnom prostoru se ne beleži u integralnom obliku (kao kod klasičnog holograma), već se aproksimira nizom dvodimenzionalnih slika. Multipleksiranjem ovih slika, vodeći računa o paralaksi i osobinama čula vida, holografski stereogram može da rekonstruiše trodimenzionalnost scene bez upotrebe vizuelnih pomagala.

U ovom radu predstavljen je proces izrade holografskog stereograma. 2D snimci su generisani pomoću kompjutera, u programu za 3D modeliranje. Konstruisan je uređaj za holografsko spajanje dobijenih slika u stereogram, i uvedene su određene modifikacije u odnosu na standardni način snimanja, za koje smatramo da pojednostavljuju proces.

### 1. UVOD

Holografski stereogram predstavlja spoj dva pristupa 3D vizuelizaciji – holografije i autostereoskopije. Holografija podrazumeva snimanje kompletne trodimenzionalne scene, dok autostereoskopija nudi način za diskretizaciju, odnosno smanjivanje ogromne količine podataka neophodnih za dobijanje vizuelno prihvatljive trodimenzionalne slike [1].

Svaki holografski stereogram se sastoji od određenog broja dvodimenzionalnih slika, odnosno niza fotografija iste scene, snimljenih sa različitih pozicija. Ako su pozicije pravilno raspoređene, možemo, na osnovu analogije sa diskretizacijom 1-D signala, definisati periodu odabiranja, odnosno razmak između susednih položaja kamere. Prema teoremi odabiranja, da pri rekonstruisanju signala ne bi dolazilo do izobličenja, frekvencija odabiranja, mora biti najmanje dvostruko veća od maksimalne frekvencije kontinualnog signala koji se snima.



Slika 1. Fotografisanje jedne tačke iz više pozicija:  
a) Kamera se kreće sa intervalom odabiranja  $s$ .  
b) Niz slika koji se dobija kao rezultat snimanja.

Prostorna frekvencija jedne tačke definisana je „brzinom“ prividnog kretanja njene projekcije preko projekcione ravni. Ako se tačka nalazi na udaljenosti  $p$  od projekcione ravni, sa intervalom odabiranja  $s$  se dobija da između dve ekspozicije tačka treba da „pređe put“  $k$  preko projekcione ravni (slika 1a). Pomeraj  $k$ , odnosno prostorna frekvencija tačke, zavisi od udaljenosti  $p$ . Naravno, tačka koja se nalazi u samoj projekcionoj ravni (odnosno na  $p=0$ ), neće se ni pomerati od jednog do drugog snimka ( $k=0$ ), dok će se tačka iza ravni pomerati u suprotnom smeru [2].

Jasno je da je u snimljenom nizu 2-D slika (slika 1b) sačuvana informacija o „dubini“ tačke. Da bi se ta informacija reprodukovala, potrebno je svaku sliku posmatrati tačno iz onog položaja u kojem se nalazila kamera prilikom snimanja. Osim toga, treba obezbediti da levo i desno oko ne vide istovremeno istu sliku. Posmatrač u svakom položaju sme da vidi samo po jedan stereopar.

Ove uslove možemo ostvariti spajanjem snimljenih slika u jedan hologram, koji se u tom slučaju zove holografski stereogram. Prostornim multipleksiranjem snimljenih 2-D slika, holografski stereogram nam omogućava da svaku sliku vidimo samo iz one pozicije koja korespondira sa položajem kamere pri njenom snimanju. Sve slike se nalaze preklapljene u istoj ravni, ali je svaka od njih vidljiva samo unutar određenog prostornog ugla, tako da od položaja posmatrača zavisi koje će slike biti vidljive u datom trenutku.

Za razliku od klasičnog holograma, holografski stereogram samo aproksimira trodimenzionalnost scene. Tačnost aproksimacije zavisi od toga koliko je data tačka udaljena od projekcione ravni. Međutim, nezavisno od kvaliteta aproksimacije, ne postoji principijelno ograničenje dubine polja – položaj svake tačke u prostoru se može aproksimirati korišćenjem signala iz isključivo jedne ravni.

### 2. SNIMANJE HOLOGRAFSKOG STEREOGRAMA

Projektovanje i izrada holografskog stereograma uključuje tri odvojene, ali međusobno vrlo povezane celine:

#### 1. Snimanje fotografija

Predmet snimanja može biti realan ili kompjuterski generisan. U oba slučaja, kamera se kreće po zadatoj putanji i u svakom položaju snima po jedan kadar.

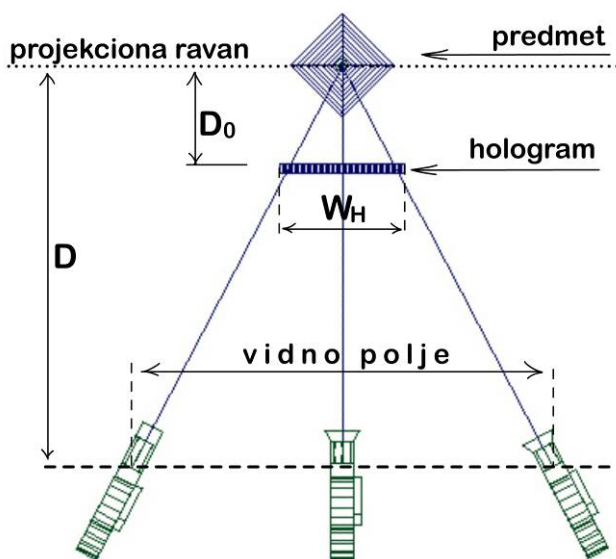
#### 2. Spajanje fotografija u jedan hologram

Koristi se standardni holografski proces, sa dva snopa, s tom razlikom što predmetni snop zapravo predstavlja projekciju datog kadra na holografski film. Svaki od kadrova, jedan po jedan, projektujemo na holografski film, ali pri svakoj ekspoziciji osvetljavamo samo jednu usku vertikalnu traku širine  $W$ . Na kraju dobijamo stereogram širine  $W_H=N \cdot W$ , gde je  $N$  broj kadrova, odnosno elementarnih holograma.

#### 3. Rekonstrukcija

Pri rekonstrukciji, odnosno osvetljavanju holograma svetlošću koja odgovara referentnom snopu, pojavljuje se istovremeno svih  $N$  likova, ali položaj posmatrača određuje koji će kadrovi u datom trenutku biti vidljivi.

Da ne bi došlo do velikih izobličenja rekonstruisane slike, geometrijski odnosi u svakom od ovih procesa moraju biti identični. To znači da se sva tri koraka moraju planirati istovremeno.

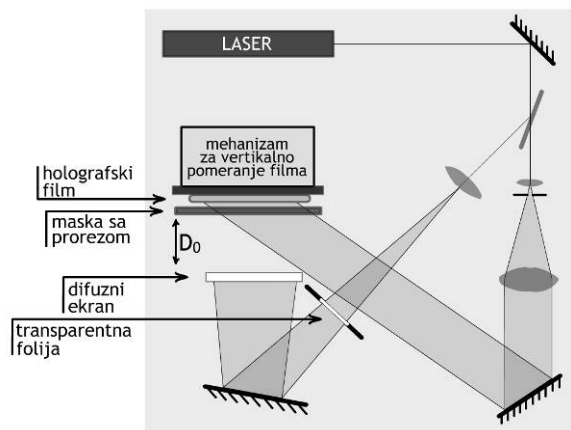


Slika 2. Geometrijski odnosi između predmeta, holograma i kamere, odnosno posmatrača.

Kamera treba da rotira oko predmeta kako bi uvek bila orijentisana ka istoj tački, odnosno da bi u položaju pravilno kadrirala predmet snimanja. Putanja može da bude kružna, ali se tako narušava jednakost geometrija u okviru fotografskog i holografskog procesa, s obzirom da je holografski film planaran, a ne zakrivljen. Sa pravolinijskom putanjom se dobijaju manja izobličenja nego sa lučnom [2].

To znači da se kamera uvek nalazi na udaljenosti  $D$  od projekcione ravni (ravni u kojoj se nalazi centar rotacije kamere). Udaljenost  $D$  treba da bude jednaka udaljenosti posmatrača pri rekonstrukciji, da bi se položaj očiju poklopio sa položajima kamere. Optimalna udaljenost posmatrača treba da bude takva da se predmet može videti sa što više detalja (znači što bliže hologramu), a da vidno polje ostane što veće (znači što dalje od holograma). Vidno polje je definisano vidnim uglom holograma, a on je uslovljen dimenzijama holografskog filma  $W_H$  i udaljenošću filma od projekcionog ekrana, tj. predmeta,  $D_0$  (slika 2).

Očigledno je da je poželjna što manja udaljenost  $D_0$ , jer se time značajno povećava vidni ugao. Međutim postavka za snimanje holograma ograničava približavanje ekrana filmu, zato što mora se ostaviti dovoljno prostora za referentni snop (slika 3).

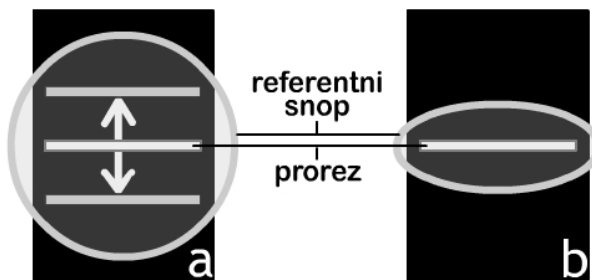


Slika 3. Postavka za holografsko snimanje.

Predmetni snop prolazi kroz transparentnu foliju na kojoj je odštampan kadar i projektuje ga na ekran od difuznog stakla. Uvećanje projektovanog lika se podešava odgovarajućim sočivima. Holografski film se prekriva neprozirnom maskom, sa jednim prorezom širine  $W$ . Prorez se pomera sinhronizovano sa promenom kadra, tako da je svaki kadar zabeležen samo na vertikalnoj traci površine  $W \cdot H$ , gde je  $H$  visina filma.

Treba napomenuti da se, pri snimanju, holografski film i predmet snimanja rotiraju za  $90^\circ$ . Time se postiže zgodan efekat: referentni snop pri snimanju dolazi sa strane, a pri rekonstrukciji iznad holograma (pod istim uglom, naravno). U izložbenim prostorima je uobičajeno da se hologrami osvetljavaju sa visine.

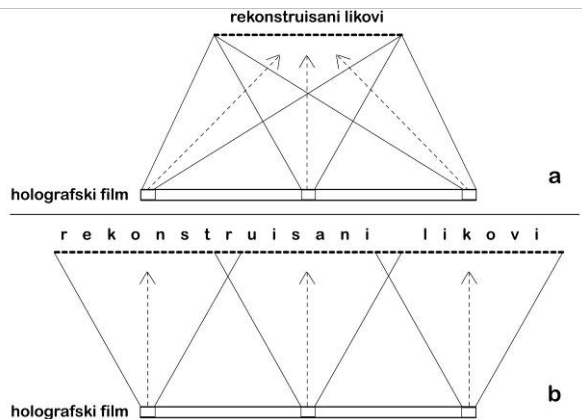
Kao posledica ove rotacije, vidimo da je za dobijanje uskih vertikalnih traka na holografskom filmu, prorez postaviti horizontalno, i pomerati ga po vertikalnoj osi. Pokazalo se, međutim, da pri pomeranju proreza neminovno dolazi do tehničkih problema. Naime, zbog Gausove raspodele intenziteta laserskog snopa, referentni snop je pri eksponiranju centralnih kadrova znatno većeg intenziteta nego pri eksponiranju krajnjih kadrova. Vrlo je teško formirati kolimisan referentni snop koji može uniformno da osvetli čitavu površinu  $N \cdot W \cdot H$  (slika 4a).



Slika 4. Površina koju referentni snop treba uniformno da osvetljava ako se prorez pomera (a) i ako je stacionaran (b).

Ovaj problem smo pokušali da izbegnemo uvođenjem inverzne geometrije: da prorez bude stacionaran, dok se film pomera vertikalno. Na filmu se opet eksponira samo jedna uska traka, a dovoljno je obezbediti referentni snop koji je uniforman na površini  $W \cdot H$ , što je daleko izvodljivije (slika 4b).

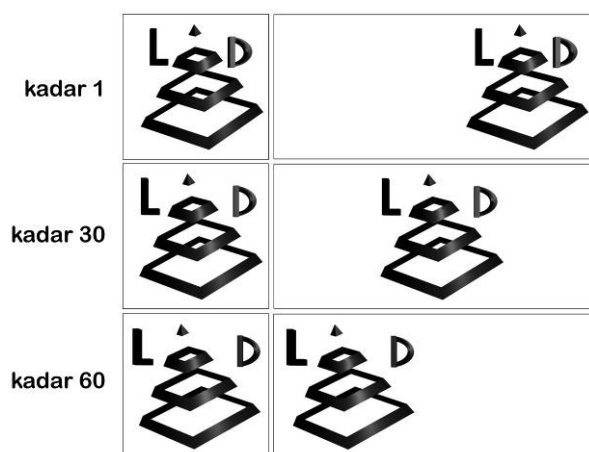
Međutim, na taj način bi bio narušen prostorni odnos između holografskog filma i predmeta snimanja. Ovako bi došlo do velikih izobličenja, jer bi sada svaka traka holograma „videla“ predmet iz istog pravca, a znamo da se pri fotografisanju kamera ne kreće paralelno, već rotira, stalno menjajući ugao u odnosu na projekcionu ravan [3] (slika 5).



Slika 5. Rekonstrukcija likova pri snimanju sa pomeranjem proreza (a) i sa pomeranjem filma (b).

Dakle, da bi se u varijanti „pokretan film – nepokretan prerez“ očuvali geometrijski odnosi, morali smo omogućiti da predmet prati pomeranje filma. To se ostvaruje tako što pri svakom pomeraju filma za  $W$ , i projektovani kadar treba da pređe preko difuznog ekrana istu dužinu puta. Tek se tako dolazi do potpuno inverzne geometrije u odnosu na varijantu „pokretan prerez – nepokretan film“, što nam opet omogućava snimanje bez izobličenja.

Vertikalno pomeranje kadrova za korak  $W$  preko difuznog ekrana, obavlja se tako što se svaka slika u programu za digitalnu obradu horizontalno pomeri za korak  $W/M$  u odnosu na prethodnu ( $M$  je uvećanje do kojeg dolazi pri projektovanju na difuzni ekran). To znači da će obrađeni kadrovi biti za  $N \cdot W/M$  širi od originalnih renderovanih slika, a da će sadržaj kadra, osim pomeranja zbog paralakse, sada imati ugrađeno dodatno pomeranje radi usklađivanja geometrije snimanja (slika 6).



Slika 6. Originalni i modifikovani kadrovi.

### 3. REZULTATI

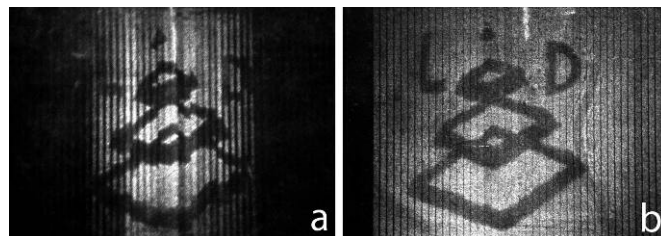
Kao provera ovih principa snimanja, napravljen je holografski stereogram dimenzija 10 cm x 12 cm. Predmet je napravljen u programu za 3D modeliranje *Maya*, i približno je dimenzija 10 cm x 10 cm. Za udaljenost od ekrana do holografskog filma je odabrano  $D_0=10$  cm, kako bi referentni snop nesmetano osvetlio film pod uglom od  $30^\circ$ . Sa ovim parametrima se dobija da je vidni ugao oko  $10^\circ$ , pa se zadovoljavajuće vidno polje od oko 20 cm dobija na udaljenosti  $D=60$  cm. S druge strane, 60 cm bi trebalo da bude dovoljno blisko rastojanje za posmatranje predmeta veličine 10 cm.

Da bi se na holografski film širine  $W_H=12$  cm snimilo  $N=60$  kadrova, širina preseza treba da bude  $W=2$  mm. Kamera se kreće na  $D=60$  cm, i prelazi put od 20 cm, tako da se za korak kamere uzima 3,5 mm.

Renderovane slike su odštampane na transparentnim folijama. One treba da budu male da bi ih laserski snop uniformno osvetlio, ali treba paziti da se ne izgubi rezolucija. U ovom slučaju, slike su smanjene na 25 mm x 25 mm. Pri projektovanju se dobija uvećanje  $M=4$ , pa je predmet na difuznom ekranu bio 10 cm x 10 cm. Pre štampanja na folije, slike se obrađuju tako što se svaki kadar pomeri za 0,5 mm u odnosu na prethodni, pa se dobija da su dimenzije novih frejmova 25 mm x 55 mm.

Snimanje je obavljeno HeNe laserom snage 10 mW, sa ekspozicijom od 15 sekundi. Za pomeranje holografskog filma između ekspozicija korišćen je koordinatni sto sa step-motorom. Kontrola ekspozicije i koordinatnog stola obavlja se pomoću računara.

Međutim, promena kadrova, odnosno pomeranje folija, nije automatizovano, već se radi ručno. Pomeranje folija, osim što izaziva usporavanje čitavog procesa (snimanje 60 kadrova trajalo je oko 90 minuta), otvara mogućnost za pojavu greške. Ako se folija ne pozicionira dovoljno precizno, na stereogramu će taj lik biti pomeren u odnosu na ostale. S obzirom da se greška pozicioniranja uvećava 4 puta, to može veoma da smeta posmatraču (slika 7a).



Slika 7. Fotografije napravljenih holografskih stereograma, sa nepreciznim (a) i preciznijim (b) pozicioniranjem kadrova

Dodavanjem kontrolnih tačaka na sve kadrove i njihovim poklapanjem sa kontrolnim tačkama na difuznom ekranu, znatno je povećana preciznost pozicioniranja. Stereogram snimljen na ovaj način izgleda vrlo zadovoljavajuće i automatski stvara kod posmatrača utisak dubine (slika 7b).

### 4. ZAKLJUČAK

Analizom snimljenih holografskih stereograma, može se zaključiti da prikazani proces daje vizuelno prihvatljivu trodimenzionalnu sliku kompjuterski generisanog predmeta.

Predložene modifikacije komplikuju rad utoliko što uvode dodatni korak između snimanja fotografija i snimanja holograma – obradu renderovanih kadrova. Međutim, pojednostavljenje holografskog snimanja je daleko značajniji činilac, i vrlo povoljno utiče na kvalitet finalnog proizvoda.

Još većem poboljšanju kvaliteta i brzine rada, značajno bi doprinela automatizacija promene kadrova, odnosno korišćenje transparentnog LCD ekrana umesto folija i difuznog stakla.

### LITERATURA

- [1] D. J. DeBitetto, "Holographic panoramic stereograms synthesized from whitelight recordings", *Applied Optics*, 8—8:1740—1741, August 1969.
- [2] M. W. Halle, "Holographic stereograms as discrete imaging systems", SPIE Proceedings #2176 "Practical Holography VIII", (SPIE, Bellingham, WA, 1994), S. A. Benton, editor, pp. 73-84.
- [3] M. W. Halle, S. A. Benton, M. A. Hug, J. S. Underkoffler, "The Ultragram: a generalized holographic stereogram", SPIE Proceedings #1461 "Practical Holography V" (SPIE, Bellingham, WA, 1991), S. A. Benton, editor, pp. 142-155.

**Abstrakt** – Holographic stereogram approximates 3D spatial information by a series of 2D samples.

A production process has been presented and some modifications have been proposed, as they prove to simplify work and enhance quality.

### THE MAKING OF A HOLOGRAPHIC STEREOGRAM

Dušan Vukić, Marko Živković,  
Svetlana Savić Šević, Dr Dejan Pantelić