

Holografija

Tadej Strah

10. januar 2023

Izvedeno 20. oktober

1 Uvod

Holografija je posebna vrsta fotografije, ki omogoča tridimenzionalno ponazoritev predmeta. Pri navadni fotografiji zabeležimo na fotografski film ali ploščo projekcijo porazdelitve gostote svetlobnega toka, ki ga seva predmet. Projekcijo dosežemo s pomočjo (sistema) leč. Nastala slika je dvodimenzionalna.

Svetlobno valovanje (električna poljska jakost) nosi podatek o globinski porazdelitvi posameznih točk na površini predmeta v fazi valovanja. Pri običajni fotografiji je ta podatek izgubljen, saj je počrtnitev filma sorazmerna povprečni vrednosti kvadrata električne poljske jakosti, ki je neodvisen od faze valovanja. Pri holografskem zapisu ohranimo podatke o fazah tako, da s fotografsko ploščo registriramo interferenčno sliko, ki nastane pri interferenci med svetlobo, ki jo siplje predmet in svetlobo, ki na poti do fotografske plošče predmet obide.

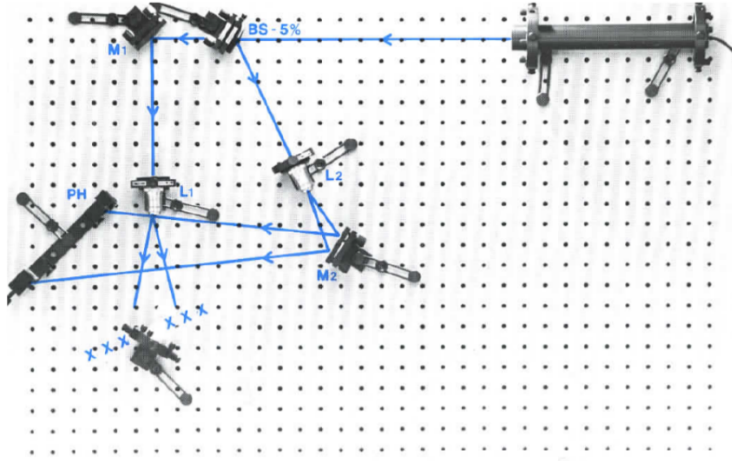
Postavitev eksperimenta kaže slika 1.

Laserski snop s pomočjo delilnika žarka razcepimo na dva enako močna snopa. Prepuščeni snop, ki se odbije na ravnem zrcalu s pomočjo mikroskopskega objektiva razpršimo in z njim osvetlimo predmet (predmetni žarek). Oba snopa interferirata in fotografska plošča registrira njuno interferenčno sliko. Kot izvor svetlobe uporabimo laser, saj je za dosego interference potrebno, da je koherentna dolžina svetlobe daljša od razlike poti, ki jo opravita predmetni in referenčni snop.

Koordinatni sistem za opis valovanja na fotografski plošči postavimo tako, da se njegova (x,y) ravnina ujema s fotografsko ploščo. Svetlobno polje opišemo s poljem električne poljske jakosti E . Zaradi enostavnejše obravnave računamo, kot da ima električna poljska jakost po odboju na predmetu isto smer kot pred odbojem. Vzeli bomo, kot da ima E ves čas eno samo komponento E , ki jo bomo obravnavali kot skalar. Zapišimo v točki (x,y) na fotografski ploščki električno poljsko jakost predmetnega snopa $E_p(x, y)$ in referenčnega snopa $E_r(x, y)$ kot:

$$E_p(x, y) = E_{p0}(x, y) \exp(-i\Phi(x, y)) \exp(i\omega t)$$

$$E_r(x, y) = E_{r0}(x, y) \exp(-i\Psi(x, y)) \exp(i\omega t),$$



Slika 1: Shema postavitve za snemanje holograma

kjer sta Φ in Ψ fazi valovanja. Ker sta valovanju koherentni, je rezultirajoča električna poljska jakost

$$E(x, y) = E_p(x, y) + E_r(x, y).$$

Ustrezna gostota svetlobnega toka je sorazmerna kvadratu električne poljske jakosti, ki ga označimo z I .

$$I = (E_p + E_r)(E_p + E_r)^* = |E_p|^2 + |E_r|^2 + E_p E_r^* + E_p^* E_r$$

Vidimo, da se na fotografsko emulzijo poleg intenzitete predmetnega in referenčnega snopa (prvi in drugi člen) zapišeta tudi interferenčna člena (tretji in četrti), ki vsebujeta informacijo o relativnih fazah med predmetnim in referenčnim snopom. Počrnitev fotografskega filma na določenem mestu je odvisna od ploskovne gostote energije, ki pade na emulzijo. Ploskovna gostota energije je enaka produktu gostote svetlobnega toka in časa osvetljevanja in jo bomo označili z W_{ex} (ekspozicija).

Po osvetljevanju je transmisivnost emulzije T v odvisnosti od ekspozicije W_{ex} podana z

$$T \propto W_{ex}^\gamma \propto I^\gamma.$$

Parameter γ je odvisen od lastnosti emulzije in načina razvijanja. Pri naši nadaljnji obravnavi bomo rabili amplitudno prepustnost, ki je definirana kot

$$T_{ampl} = \sqrt{T}.$$

Če vstavimo enačbo intenzitete svetlobe v izraz za amplitudno transmisivnost holograma in upoštevamo, da je pri snemanju holograma običajno $E_p \ll E_r$ dobimo

$$T_{ampl} = A + B E_p E_r^* + B E_p^* E_r,$$

kjer sta A in B konstanti.

Poglejmo, kaj dobimo, če po razvijanju holograma postavimo na prejšnje mesto, ga osvetlimo z referenčnim žarkom, predmet pa odstranimo. V tem primeru je električna poljska jakost na izstopni strani fotografske plošče E_{holo} enaka produktu

$$E_{holo} = T_{ampl} E_r = A E_r + B |E_r|^2 E_p + B E_r^2 E_p^*.$$

Prvi člen predstavlja prepuščeni referenčni snop, ki je delno oslabljen. Drugi člen opisuje divergenten snop žarkov, ki je tak kot bi izhajal od predmeta. Pri prehodu skozi očesno lečo se zbere na

mrežnici, kjer nam da realno sliko. Ker so valovne fronte, ki izhajajo iz holograma enake tistim, ki so izhajale od predmeta, zaznamo sliko, ki jo vidimo pri gledanju holograma kot tridimenzionalno. Zadnji člen pa predstavlja snop, ki se širi v obratni smeri tako, kot da bi izhajal iz predmeta, ki bi bil postavljen zrcalno glede na ravnino holograma. Žarki so v tem primeru konvergentni in bi nam dali realno sliko, ki bi jo videli na drobnih delcih v zraku.

2 Hologram ravnih valov

Poglejmo si hologram, ko sta predmetni in referenčni žarek ravna valova oblike $e^{i(kr-\omega t)}$, od kateri prvi pada na fotografsko ploščo pod kotom α glede na normalo, drugi pa v smeri normale. Izberimo koordinatni sistem, v katerem se valovna vektorja prvega in drugega žarka zapišeta kot $\vec{k}_p = (k \sin \alpha, 0, k \cos \alpha)$ in $\vec{k}_r = (0, 0, k)$. Vzemimo, da se fotografska plošča nahaja v ravnini $z = 0$. Potem je intenziteta interferenčnega vzorca n njej enaka

$$I_{int} = C |1 + e^{ik \sin \alpha x}|^2 = C'(1 + \cos(k \sin \alpha x)).$$

Hologram je kosinusna uklonska mrežica s periodo

$$d = \frac{2\pi}{k \sin \alpha}.$$

Splošen tankoplastni hologram lahko torej razumemo kot superpozicijo kosinusnih uklonskih mrežic, ki nastanejo pri interferenci referenčnega žarka in žarkov, ki izvirajo iz posameznih točk objekta.

3 Potek dela in rezultati

Najprej postavimo optično mizo, kot prikazuje slika 1. Pri tem pazimo, da sta žarka čimbolj vzporedna, ter da se njuna skupna dolžina ne razlikuje za več kot 10cm (znotraj koherentne dolžine laserskega snopa.) S tem dosežemo, da so razdalje med minimumi in maksimumi na fotografski plošči dovolj razmaknjene, da nas ne ovira končna resolucija plošče in tresenje mize.

Za izdelavo holograma potrebujemo fotografsko emulzijo nanešeno na kos stekla. V popolni temi jo namestimo na željeno mesto in osvetlimo za cca. 10 sekund.

Sloj fotografske emulzije vsebuje v želatno vmešane molekule srebrovih halogenidov. Le ti reagirajo s svetlobo; obsevani deli nekako spremenijo svoje lastnosti, da potem razvijalec povzroči, da se srebro iz teh molekul združi v kovinsko strukturo, ki je obstojna in nepropustna za svetlobo. Za kemijsko stabilnost vsega skupaj poskrbi fiksir, ki ustavi delovanje razvijalca.

Ko se nastali hologram posuši, ga postavimo nazaj v (referenčni) laserski žarek in poiščemo sliko predmeta.

Rezultat deloma vidimo na sliki 2

Posnamemo še hologram ravnih valov. Elemente postavimo kot kaže slika 3.

Narejen hologram, ki je ubistvu uklonska mrežica, postavimo pred žarek in izmerimo kot, po katerem se le ta ukloni na eno in drugo stran.

Izmerimo kot

$$\vartheta = (15 \pm 1)^\circ$$

Iz postavitve pa izmerimo, da je kot med vpadnima žarkoma enak $\vartheta_s = (16 \pm 2)^\circ$, odvisno, od kje na hologramu merimo kot.

Iz znane valovne dolžine laserja in uklonskega kota lahko izračunamo razdaljo med režami uklonske mrežice; dobimo:

$$d = (2.4 \pm 0.1)\mu\text{m}.$$



Slika 2: Hologram kipca mačke



Slika 3: Postavitev zajema holograma dveh ravnih valov.