

ZAZNAVANJE IN PRIKAZOVANJE 3D SLIK

JAN RAVNIK

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Članek nas seznani z osnovnim človekovim dožemanjem treh dimenzij in predstavlja pregled različnih načinov zajemanja in prikazovanja 3D slik in njihovo splošno uporabnost za različne aplikacije. Podrobneje je predstavljenih nekaj najpogostejših tehnik in opisan princip njihovega delovanja ter prednosti in slabosti pred ostalimi podobnimi tehnikami.

SENSING AND DISPLAYING 3D IMAGES

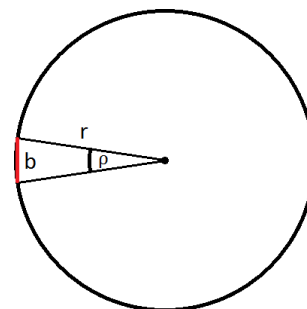
This paper describes the basics of human perception of three dimensions and represents an overview of different ways of sensing and displaying 3D images, as well as their general usage for different applications. Some of the most used techniques are described more detailed with advantages and disadvantages over other similar techniques.

1. Uvod

Običajno fotografiranje nam sicer ohrani trenutek, vendar pa pri fotografiranju izostane ena izmed bistvenih informacij o prostoru, in to je globina. Pri fotografiranju se prostor iz treh dimenzij preslika v dve, tretja dimenzija pa je zavržena. To nam vliva željo po razvoju tridimenzionalnih slik. Tehnologija tridimenzionalnega zaznavanja in predvajanja je zadnje čase vedno bolj raziskana, predvsem zaradi možnih načinov uporabe na veliko različnih področjih, kot so zabava, medicina, robotika, industrijska proizvodnja, varnost, obramba... Kot prvi način 3D slikanja je bil pred okoli 170 leti odkrit barvni stereoskop in od takrat naprej se pojavljajo številne nove tehnologije za prikazovanje 3D slik. Kot nasprotje tradicionalnim 2D slikam, lahko 3D slike prikažejo 3D strukturo, globino in teksturo predmetov, poleg tega pa so neobčutljive na prekrivanje objektov, z nekaterimi tehnikami namreč lahko rekonstruiramo tudi zakrite objekte. Obstaja več vrst 3D slikanja, na primer holografija in podobne interferenčne tehnike, stereoskopija, osvetlitev preko šablone ter tehnike, ki slonijo na času preleta svetlobe. Pasivne več perspektivne tehnike, na primer integralsko slikanje, so zaradi svojih lastnosti deležne posebne pozornosti. Sliko lahko posnamemo z eno kamero, pri čemer jo le opremimo z ustreznimi lečami in premikamo po prostoru. Za razliko od holografije, lahko zajamemo sliko v nepopolnih pogojih in z nekoherentno svetlobo. Prikažemo lahko 3D sliko v polnem barvnem spektru s polno paralakso in na videz zveznimi zornimi koti. Zaradi svojih edinstvenih lastnosti je integralsko slikanje oživel v zadnjem desetletju, kot obetaven pristop k komercializaciji 3D slikanja. [1]

2. Zaznavanje treh dimenzij

Človek dobi z uporabo oči precej informacij o tem kakšen je svet okoli njega. Poleg zaznavanja barv in oblik predmetov ter kota pod katerim se predmeti nahajajo, so oči sposobne razbrati tudi razdaljo do predmetov in posledično njihovo velikost. Pri ocenjevanju razdalje nam pomaga paralaksa, ki je posledica tega, da imamo dve očesi. Paralaksa ali sprememba je razlika med dvema kotoma pod katerima vidimo določen objekt. Ker naši očesi ne ležita v isti točki,



Slika 1. Paralaksa

vidimo z vsakim očesom malenkost drugačno sliko. Z b označimo razdaljo med našimi očmi, ki jo imenujemo baza in z r razdaljo od oči do predmeta. Predpostavimo, da imamo pri paralaksi majhne kote in velike razdalje, da torej velja $b \ll r$ in $\sin(\varphi) = \varphi$, kjer smo s φ označili kot paralakse. Potem lahko s pomočjo preproste skice izpeljemo, da za paralakso (merjeno v kotnih stopinjah) velja

$$\frac{b}{2\pi r} = \frac{\varphi}{360}. \quad (1)$$

Za razdaljo med očmi lahko vzamemo približno 6 cm, torej znaša paralaksa točkastega predmeta na razdalji 1 m približno 3,5 kotne stopinje. Maksimalna ločljivost najboljšega človeškega očesa je približno 1 kotno minuto. Če predpostavimo, da naše oko ni najboljše in znaša njegova ločljivost 3 kotne minute, lahko izračunamo, da paralakso za točkast predmet zaznamo na maksimalni razdalji 68,8 m. Če želimo paralakso povečati, lahko to naredimo s premikanjem po prostoru, s čimer povečamo bazo in s tem paralakso, kar je, kot bomo kasneje videli, tudi osnovna ideja integralskega slikanja. Če opazujemo točkast predmet na majhni oddaljenosti pred zelo oddaljenim ozadjem, ga z vsakim očesom vidimo, kot da je postavljen drugje, oziroma z drugimi besedami, zaradi paralakse vidimo z vsakim očesom drugo sliko. Ti dve sliki možgani sestavijo skupaj v naše tridimenzionalno dožemanje sveta [2]. Poleg paralakse je pomembno tudi dejstvo, da oko deluje kot spremenljiva leča. Z mišicami v očesu lahko spreminjamo obliko očesne leče tako, da se ji spreminja goriščna razdalja. Zaradi osnovnega principa delovanja leč, lahko naenkrat dobimo ostro sliko samo v goriščni ravnini. Ostale, izvengoriščne ravnine pa vidimo zamegljene in sicer so z oddaljevanjem od goriščne ravnine vedno bolj zamegljene. Tudi to nam pomaga pri zaznavanju sveta, saj se možgani osredotočijo na tisti del, ki je izostren in iz katerega lahko dobijo največ podatkov.

3. Stereoskopija

Je trenutno najbolj razširjen način prikazovanja 3D slik. Njeni začetki segajo v 19. stoletje, natančneje, predlagal jo je nemški ladijski poveljnik Wilhelm Rollmann leta 1853. Za ogled stereoskopskih fotografij potrebujemo posebna očala, zaradi katerih z vsakim očesom vidimo drugo sliko. Poznamo dve vrsti takih očal: aktivna in pasivna. Med pasivnimi so daleč najbolj razširjena polarizacijska in barvna očala.

3.1 Aktivna očala

Aktivna očala brezžično komunicirajo s predvajalnikom slike (3D televizijo). V sodobnih očalih so zaklopi s tekočimi kristali, ki sliko blokirajo do 120 krat v sekundi, vsakemu očesu posebej, istočasno pa utripa slika na ekranu. Tako v zelo kratkih časovnih presledkih vidimo z levim očesom eno sliko, z desnim pa drugo. Možgani ta signal interpretirajo kot eno 3D sliko. Z aktivnimi očali lahko gledamo vse barve v poljubno visoki ločljivosti, kot jo dopušča zaslon.

3.2 Pasivna očala

3.2.1 Polarizacijska očala

Polarizacijska očala imajo dva medsebojno pravokotno orientirana polarizacijska filtra. Prikazovalnik slike oddaja dve polarizirani sliki, ki sta prav tako pravokotno polarizirani druga na drugo. Zaradi očal lahko vidi vsako oko samo eno sliko, možgani pa ju sestavijo skupaj v enotno 3D sliko.

3.2.2 Barvna očala

Stereoskopska ali anaglifna očala imajo foliji v očalih obarvani z dvema komplementarnima barvama, na primer rdečo in modro-zeleno (cyan). Slika, ki jo gledamo pa je sestavljena iz dveh slik (leve in

desne), ki sta prav tako enobarvni, in sicer ravno nasprotno barve, kot pripadajoči filter na očalih. Možgani iz dveh enobarvnih slik sestavijo eno samo, ki daje občutek 3D. Taka očala so še danes pogosto v uporabi, predvsem zato, ker so poceni. Imajo pa slabo lastnost, da ne reproducirajo barve. Zaradi omejitev, ki jih prinaša predvsem obvezna uporaba očal, so se raziskovanja usmerila v avtostereoskopske tehnike, pri katerih ne potrebujemo nobenega pripomočka za gledanje 3D slik.

4. Slabosti stereoskopskih tehnik

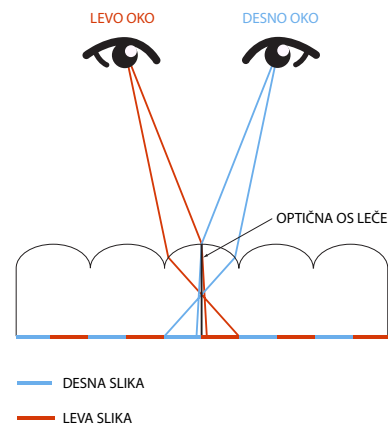
Stereoskopske tehnike za naše oči in možgane niso najboljše. Problem izhaja iz konflikta med akomodacijo očesne leče in sekanjem vidnih žarkov. Bistvo je, da oko pravzaprav gleda sliko na fiksni oddaljenosti (oddaljenost očesa od ekrana) in mora zato ostriti sliko na to razdaljo. Objekti na ekranu pa se pojavljajo na navidezno veliko večjih, ali veliko manjših razdaljah. Ta razlika sili oko v nenaravno gibanje, zaradi česar je oko pod stresom, kar lahko hitro pripelje do utrujenosti oči in včasih do občutka nelagodja.

5. Avtostereoskopija

Avtostereoskopske tehnike so tiste, pri katerih zaslon sam ustvarja funkcijo pošiljanja različnih slik levemu in desnemu očesu. Ta funkcija nam omogoča, da za ogled slik ne potrebujemo nobene dodatne naprave, kot so na primer posebna očala.

5.1 Lečasti lističi

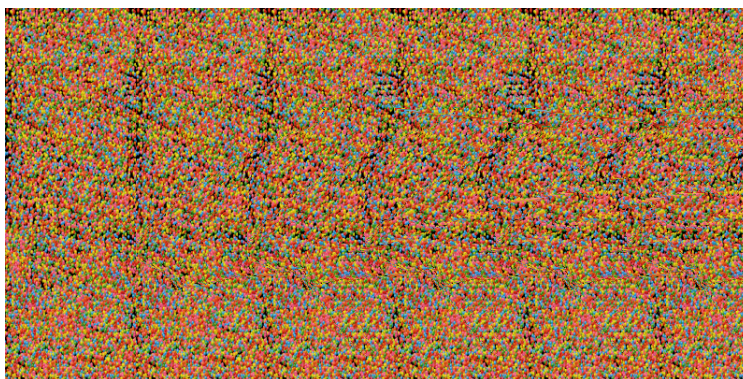
Med avtostereoskopskimi tehnikami je najbolj razširjena in najbolj preprosta uporaba lečastega lističa, ki je sestavljen iz zelo ozkih cilindričnih leč, postavljenih druga zraven druge na prozorni ploščici. Z gledanjem te ploščice iz različnih smeri, vidimo različne dele slike, ki so natisnjeni na listič, postavljen za lečami. Zaradi preprostosti izdelave so lečasti lističi lahko dostopni in jih najdemo na preprostih sličicah za otroke, v zadnjem času pa tudi na igralnih konzolah. Največja slabost je, da ustvarjajo samo vodoravno paralakso za dve očesi, postavljeni na točno določeni oddaljenosti. Razvita je tudi razširitev, ki omogoča gledanje iz večih (do devetih) različnih smeri. Pri tem se pojavi problem ločljivosti, saj je pri sliki, ki jo gledamo iz devetih smeri na voljo le devetina prostora na lističu za vsako smer, torej se ločljivost zmanjša za devetkrat. Da bi se izognili izgubi ločljivosti, lahko uporabimo več različnih pristopov, med katerimi je najbolj preprosta uporaba paralaksonih prepek. Te prepreke v praksi niso nič drugega, kot neprozoren material znotraj leče, ki preprečuje očesu, da bi videl druge dele slike. Tukaj je pozicija opazovalca še bolj natančno definirana, kot pri uporabi navadnega lečastega lističa, gledamo pa lahko le iz ene smeri.



Slika 2. Lečast listič

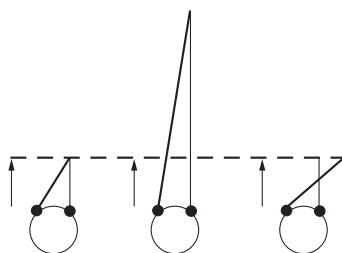
5.2 Avtostereogram

Na tem mestu je vredno omeniti tudi avtostereograme. To so dvodimenzionalne slike, ki nam ob pravilnem gledanju dajejo občutek treh dimenzij. Če želimo pravilno videti avtostereogram, moramo svoje oči prisiliti v nenaraven položaj. Očesno lečo moramo izostriti na razdaljo do slike, zato da jo



Slika 3. Primer avtostereograma [3]

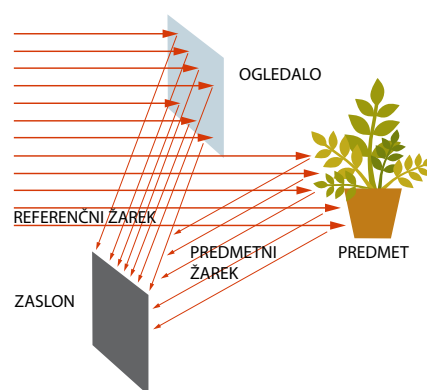
vidimo ostro, kot med očmi pa mora biti tak, kot da bi gledali nekam v daljavo, oziroma pri nekaterih stereogramih tak, kot da gledamo predmet, ki nam je bližji od ravnine slike. Ker je kot med očmi drugačen od tipičnega kota, pod katerim gledamo sliko na določeni razdalji, vidimo z vsakim očesom drug del slike. Avtostereogram je sestavljen tako, da sliki, ki ju vidimo sovpadata s slikama, ki ju možgani pričakujejo, kadar gledamo 3D sceno, zato celotna slika izgleda tridimenzionalna. Ker imamo oči v nenaravnem položaju nas pri gledanju takih slik lahko hitro začnejo boleti tako oči, kot tudi glava.



Slika 4. Možni načini gledanja v avtostereogram. Črtkana črta prikazuje ravnino slike, puščica pa kaže na katero ravnino ostrimo. a) normalno gledanje, b) gledamo v točko v daljavi, medtem ko ostrimo ravnino slike, c) gledamo v točko pred sliko, medtem ko ostrimo ravnino slike.

6. Holografija

Med tehnikami, ki omogočajo avtostereoskopsko gledanje fotografij je najbolj fascinantna holografija. Holografija omogoča zvezno paralakso v vseh smereh, za ceno tega pa potrebuje koherentno osvetlitev in temno okolje med samim zajemanjem slike. Bistvo holografije je v tem, da na zaslon ne zapišemo le intenzitete svetlobe, ampak se poleg tega zapiše tudi faza, v obliki interferenčnega vzorca dveh žarkov. Holografsko sliko posnamemo tako, da koherenten snop svetlobe razdelimo na dva dela. Prvega uporabimo za to, da osvetlimo predmet in odbito svetlobo od predmeta vodimo na zaslon. Drugi del pa vodimo direktno na zaslon, kot referenčni žarek. Na zaslonu se shrani interferenčni vzorec, v katerem je zakodirana fotografija. Ko na zaslon še enkrat posvetimo z enakim referenčnim žarkom, vidimo 3D sliko predmeta. Zapišimo električno polje



Slika 5. Paralaksa

odbite svetlobe s kompleksno zvezo

$$E_p(x, y) = E_{p0}(x, y)e^{-i\phi(x, y)} \quad (2)$$

in polje referenčnega valovanja z zvezo

$$E_r(x, y) = E_{r0}(x, y)e^{-i\psi(x, y)}. \quad (3)$$

Interferenčno polje zapišemo kot:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= E_p E_p^* + E_r E_r^* + E_p E_r^* + E_r E_p^* = \\ &= |E_p(x, y)|^2 + |E_r(x, y)|^2 + 2E_{p0}(x, y)E_{r0}(x, y) \cos(\vartheta) \vartheta(x, y) = \psi(x, y) - \phi(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

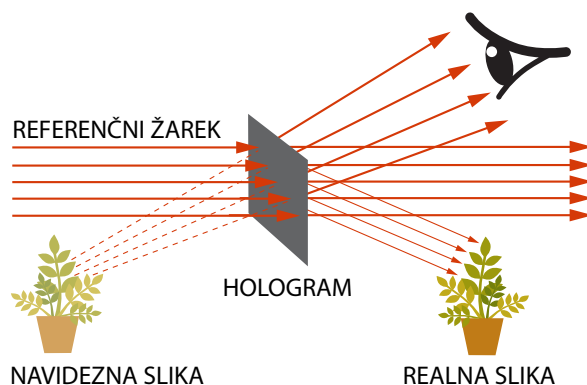
kjer je ϑ razlika v fazi odbitega in referenčnega žarka. Tako imamo na zaslonu združene tri informacije, in sicer intenziteto predmetnega (odbitega) valovanja (1. člen), intenziteto referenčnega valovanja (2. člen) in interferenčni vzorec (3. člen). Predpostavimo, da se lastnosti zaslona pri osvetljevanju spremenijo tako, da njegova prepustnost postane sorazmerna vpadni intenziteti, in sicer

$$t_h(x, y) \propto I(x, y) = t_0 + \beta(E_r^* E_p + E_r E_p^*). \quad (5)$$

Kjer smo uvedli transmissijski koeficient t_0 , transmissijski koeficient po izpostavljenosti $t_h(x, y)$, in $\beta = \beta' \tau_e$, kjer je β' snovna konstanta odvisna od fotografskega filma, τ_e pa čas izpostavljenosti. Ko potem na zaslon posvetimo s snopom $B(x, y)$, dobimo prepuščeno valovanje, ki je enako

$$B(x, y)t_h(x, y) = t_0 B + \beta E_r^* B E_p + \beta E_r B E_p^*. \quad (6)$$

Če je snop, s katerim posvetimo na zaslon enak referenčnemu žarku $B = E_r$, nam drugi člen da

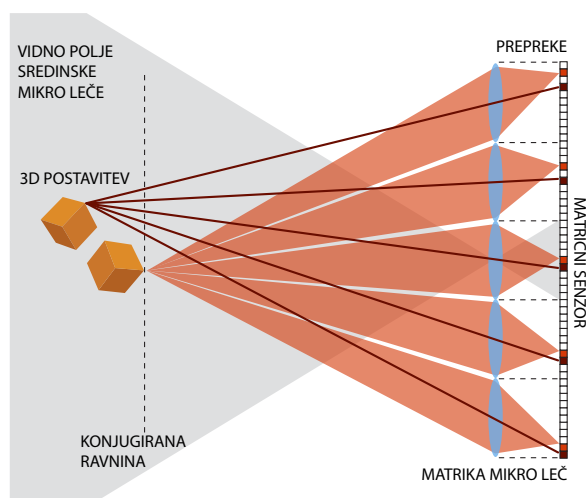


Slika 6. Rekonstrukcija holograma - realna in navidezna slika

$|E_r|^2 E_p(x, y)$, kar je ravno rekonstrukcija žarkov, odbitih s predmeta. Slika, ki jo vidimo je navidezna in izhaja iz točke, kjer je bil postavljen predmet. Tretji člen v enačbi pa nam v primeru, da je $B = E_r^*$ da val, ki rekonstruira realno sliko predmeta. Ta slika je glede na zaslon zrcalna navidezni sliki. Ker pri holografiji uporabljamo koherenten snop svetlobe, so slike enobarvne. Obstajajo tudi mavrični hologrami, ki so narejeni tako, da pri osvetlitvi z belo svetlobo spreminjajo barvo glede na kot opazovanja. Tudi tukaj nimamo nobene informacije o tem, kakšne barve je bil predmet, imamo pa zato bolj barvito in zanimivo sliko, poleg tega pa za njeno opazovanje ne potrebujemo koherentne svetlobe, ampak je koherentna svetloba potrebna le pri zapisovanju holograma [4], [5], [6].

7. Integralsko slikanje

Integralno fotografijo je kot novost predstavil nemški fizik francoskega rodu Gabriel Lippmann leta 1908. Osnovna ideja je posneti veliko različnih 2D slik iz različnih perspektiv. To lahko na makroskopskem nivoju dosežemo z veliko majhnimi kamerami, na mikroskopskem pa pred optični senzor postavimo matriko mikro leč. S to tehniko lahko rekonstruiramo objekte, ki jih kasneje opazujemo s popolno paralakso in kvazi zveznim vidnim kotom. Ta tehnika, ki temelji na reverzibilnem principu svetlobnih žarkov, producira avtostereoskopske slike, kar pomeni, da za ogled ne potrebujemo nobenih posebnih naprav (kot so na primer 3D očala), saj nam že sam monitor posreduje 3D sliko. Zaradi nedostopnosti tehnologije je bilo to polje raziskovanja v dvajsetem stoletju večinoma opuščeno. Z razvojem tehnologije, predvsem visoko ločljivostnih kamer, LCD zaslonov in računalnikov pa so se pred kratkim spet začele raziskave na tem področju. Največ truda je bilo vložena predvsem v izboljšanje ločljivosti, vidnega kota in zveznosti perspektiv. Integralsko sliko prikažemo tako, da več



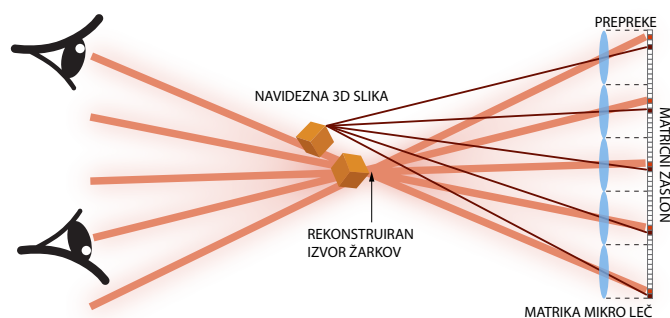
Slika 7. Vidno polje centralne mikro leče. Na sliki je poenostavljen primer senzorjev, postavljenih v ravnino za mikro lečami. S sivo barvo je označeno vidno polje sredinske leče. Navpična črna črta prikazuje konjugirano ravnino k ravnini senzorjev. To je ravnina, ki se skozi lečo preslika v ravnino senzorjev, torej jo vidimo najbolj izostreno. Z rdečimi in temno rdečimi črtami so prikazani žarki, ki izhajajo iz dveh točk na kockah in njihov prehod skozi leče. Kot vidimo iz skice, dobimo zaradi različne pozicije leč in senzorjev za njimi, za vsako lečo drugačno sliko. Enako sliko bi imeli, če bi narisali zaslon, le da bi namesto senzorjev imeli barvne diode, namesto predmeta (kock) pa sliko kock.

različnih 2D slik projiciramo na matriko mikro leč, ki jo postavimo med opazovalca in zaslon. To je ravno obratno, kot zajemanje slike. Mikro leče so lahko podobne, kot pri zajemanju slike, po navadi je sorazmerno spremenjena le velikost zaslona. Integralsko slikanje je v svojem bistvu popolnoma drugačno od stereoskopije. Pri stereoskopiji vsako oko vidi drugo sliko na zaslonu, možgani pa ju potem sestavijo v eno. Pri integralskem slikanju pa mikro leče ustvarijo razlike v intenziteti svetlobe pred zaslonom, zato imamo realno sliko med opazovalcem in zaslonom. Slika nastane zaradi križanja žarkov iz večih leč direktno pred opazovalcem. Po križanju žarkov ti nadaljujejo svojo pot do opazovalca, ki jih vidi, kot da bi izhajali iz večih realnih slik postavljenih med njega in zaslon. Zato objekti za opazovalca izgledajo tridimenzionalni, ne glede na opazovalčevo pozicijo in brez napora za oči [1].

7.1 Direktno zajemanje

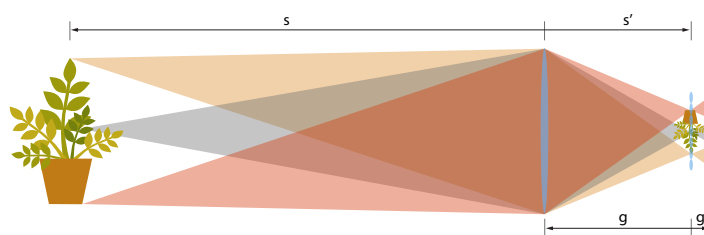
Pri direktnem zajemanju potrebujemo matriko leč, ki jo postavimo pred senzorje. Za vsako lečo dobimo sliko, ki jo imenujemo elementarna slika, matriko vseh elementarnih slik pa integralska slika 3D scene. Da se izognemo prekrivanju slik s sosednjih leč, je potrebno med leče postaviti tudi optične

Zaznavanje in prikazovanje 3D slik



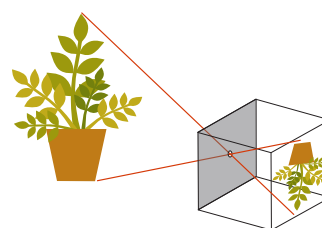
Slika 8. Zaslona za prikazovanje integralskih slik

pregrade. Zaradi osnovnega principa delovanja leč, lahko naenkrat dobimo ostro sliko samo ene ravnine predmeta. Ostale, izvengoriščne ravnine pa na sensorju vidimo zamegljene. Ta zameglitev je v primerjavi s samo velikostjo senzorjev po navadi zanemarljiva, zato lahko predpostavimo, da so vsi deli slike izostreni. Prava izbira parametrov pri zajemanju je močno odvisna od primera. Če fotografiramo na primer bližnje objekte, moramo goriščno razdaljo nastaviti popolnoma drugače, kot če fotografiramo nekaj zelo oddaljenega. Ker matrike leč ne moremo spreminjati, je v slednjem primeru potrebna dodatna, globinska leča, ki preslika oddaljeno referenčno ravnino 3D scene v ravnino matrike leč. Nekateri deli se zato preslikajo pred, drugi pa za matriko. Temu pravimo integralsko zajemanje v daljnem polju.



Slika 9. Skica globinske leče pri integralskem zajemanju v daljnem polju. Na levi je zelo oddaljen predmet, v sredini je postavljena globinska leča in na desni senzor, ki nam je znan od prej. Zelena, rdeča in rumena barva prikazujejo žarke, izhajajoče iz treh točk na predmetu.

Direktno zajemanje je zelo praktično, saj celotno sliko zajamemo v istem trenutku. Integralne slike, pridobljene na ta način so lahko zelo uporabne za globinsko rekonstrukcijo, predvsem za oddaljene scene. Poleg tega pa so fotografije, pridobljene na ta način, že takoj pripravljene za prikazovanje na integralskem zaslonu, saj ne potrebujejo nobene obdelave. Za prikazovanje takih slik na navadnem zaslonu pa je potrebno nekaj obdelave. Najlažji način je, da naredimo inverzno projekcijo elementarnih slik na zaslon. Izberemo si določeno ravnino v prostoru in vsako od elementarnih slik projiciramo na to ravnino skozi majhno luknjico, ki deluje kot prostorski filter. Tako lahko rekonstruiramo sliko v več različnih ravninah. Za poenostavitev predpostavimo, da je število slikovnih elementov na rekonstruirani sliki enako številu slikovnih elementov na vsaki izmed elementarnih slik. Vsak slikovni element na rekonstruirani sliki je povprečje superpozicije slikovnih elementov vseh elementarnih slik. Imamo K vrstic in L stolpcev elementarnih slik. Enačbo za sliko



Slika 10. Prikaz delovanja majhne luknjice kot leče. Vidimo, da se predmet pri preslikavi samo obrne in poveča ali pomanjša sorazmerno z oddaljenostjo.

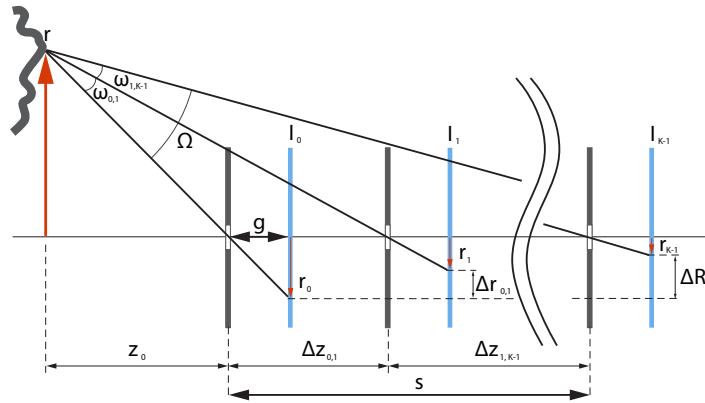
v ravnini z , kjer imajo slikovni elementi koordinati (x, y) lahko v tem primeru zapišemo kot

$$R(x, y, z) = \frac{1}{KL} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} I_{kl} \left(x - k \frac{N_x p}{c_x M}, y - l \frac{N_y p}{c_y M} \right), \quad (7)$$

pri čemer s k in l štejemo po vrsticah in stolpcih elementarnih slik, I_{kl} je intenziteta, ki jo dobimo iz elementarne slike v k -ti vrstici in l -tem stolpcu. N_x in N_y sta števili vseh slikovnih elementov v vrstici in stolpcu vsake elementarne slike, M je povečava, ki je enaka $\frac{z}{g}$, kjer je g goriščna razdalja. p je zamik med sensorji, c_x in c_y pa sta dimenziji sensorja. Namesto matrike majhnih sensorjev lahko za zajemanje slike uporabimo tudi en sam, bolj zmogljiv sensor (na primer navaden fotografski aparat, z ločljivostjo nekaj milijonov slikovnih elementov), ki se premika po ravnini. Na ta način pridemo do veliko večjega vidnega polja in visoko ločljivostnih 2D fotografij, ker z vsako posneto 2D fotografijo popolnoma izkoristimo detektor. Ta metoda ni primerna za dinamične scene, saj za zajetje ene 3D fotografije potrebujemo veliko več časa [1].

7.2 Osno porazdeljeno zajemanje

Pri tem načinu zajemanja imamo en 2D sensor, ki ga premikamo vzdolž njegove optične osi. V tem primeru ni paralakse za točke, ki ležijo na optični osi sensorja, bolj kot pa se oddaljujemo od središča, večja je paralaksa. Zajemanje je prikazano na sliki. Za poenostavitev je pred sensor



Slika 11. K izpeljavi osno porazdeljenega zajemanja.

postavljena prepreka z majhno luknjico, razdalja med sensorjem in luknjico pa je označena z g . Ker imajo vse slike isto središče, je najbolj naravno, da jih opišemo v cilindričnem koordinatnem sistemu, v katerem je koordinatna os z poravnana z optično osjo sensorja. Vzemimo predmet, ki je za z_0 oddaljen od najbližje pozicije sensorja in za r oddaljen od optične osi. Posnamemo K elementarnih slik, ki jih označimo z indeksom k . Pri tem ima najbližja slika indeks $k = 0$ in najbolj oddaljena slika indeks $k = K - 1$. V tej notaciji je vsaka slika oddaljena za $z_k = z_0 + z_{0,k}$ od predmeta, kjer je $z_{0,k}$ razdalja med najbližjo in k -to pozicijo sensorja. Ker je vsaka slika posneta pri različni povečavi, bo imel na k -ti sliki predmet povečavo $M_k = \frac{z_k}{g}$ in oddaljenost od središča $r_k = \frac{gr}{z_k}$, kjer je z označena razdalja med sensorjem in luknjico. Sprememba kota $\Delta\Omega(i, j)$ pod katerim zajamemo predmet z i -to in j -to sliko je podana kot

$$\Delta\Omega_{i,j} = \tan^{-1} \frac{r z_{i,j}}{r^2 + z_i^2 + z_i z_{i,j}}, \quad (8)$$

kjer je $z_{i,j}$ razdalja med i -to in j -to pozicijo sensorja, kar izpeljemo če uporabimo zvezo

$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan(\alpha) - \tan(\beta)}{1 + \tan(\alpha)\tan(\beta)}, \quad (9)$$

kjer za kota α in β vstavimo kota med osjo in zveznico luknjice s predmetom. Popoln kot, pod katerim vidimo predmet, je logično podan z razliko med najbližjo in najbolj oddaljeno sliko, in sicer tako, da zgornjo enačbo preoblikujemo v

$$\Omega = \tan^{-1} \frac{rs}{r^2 + z_0^2 + z_0s}, \quad (10)$$

kjer smo z $s = z_{0,K-1}$ označili razdaljo med najbližjo in najbolj oddaljeno pozicijo sensorja. Tukaj smo predpostavili, da je objekt viden na vseh slikah. V posebnem primeru $r = 0$, vidimo, da je kot enak 0, kar pomeni, da za predmete na optični osi nimamo nobene paralakse. Kot se poveča, če večamo r , kar kaže na to, da je več paralakse za objekte, ki so bolj oddaljeni od optične osi. Prav tako je kot večji, če so predmeti bližje sensorju. Pri premikanju sensorja moramo paziti, da premiki niso premajhni. Če je razdalja med i -to in j -to pozicijo sensorja manjša od neke mejne vrednosti $\min(z_{i,j})$, se zgodi, da se točka na predmetu zapiše na isti slikovni element, s čimer pa ne dobimo nobene prostorske informacije. Če z μ označimo velikost slikovnega elementa, lahko zapišemo minimalno razdaljo kot

$$\min(z_{i,j}) = \frac{\mu z_i^2}{\mu z_i + rg}, \quad (11)$$

ki velja za $r > 0$. Ta razdalja je očitno odvisna od oddaljenosti predmeta od optične osi, kar je jasno. Večja, kot je oddaljenost predmeta od optične osi, manjši premik potrebujemo. Za točke z $r=0$ pa že vemo, da s tem načinom slikanja ne moremo dobiti nobenih prostorskih informacij. Sliko rekonstruiramo tako, da naredimo superpozicijo vseh posnetih slik. Recimo, da je število posnetih slik enako K . Rekonstruirana slika $R(x, y, z)$, kjer sta x in y smeri v ravnini 2D slike, z pa oddaljenost od najbližje točke zajemanja je enaka

$$R(x, y, z) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} I_k\left(\frac{x}{M'_k}, \frac{y}{M'_k}\right), \quad (12)$$

kjer je $M'_k = \frac{z_k}{z_0}$, in nam pove relativno povečavo med najbližjo in i -to sliko. $I_k(x, y)$ nam pove intenziteto svetlobe na k -ti sliki, na poziciji (x, y) (citirano po Schulein R. et al., 2009, Optics Letters).

8. Zaključek

Z razvojem tehnologije in znanosti je področje 3D zapisovanja fotografij in videov v zadnjih letih vse bolj napredovalo. V ospredje so prišle tehnike, ki poleg prikazovanja treh dimenzij prikazujejo tudi barve. Komercialno so vedno bolj razširjeni 3D televizorji, ki s pomočjo aktivnih očal omogočajo predvajanje 3D barvne slike z visoko ločljivostjo. Poleg tega so komercialno dostopne tudi igralne konzole, ki uporabljajo poenostavljeno verzijo integralskega slikanja, ki zaradi zahtevnosti izvedbe matrike leč, omogočajo za enkrat samo vodoravno paralakso. Tehnik 3D zajemanja podatkov pa je seveda še veliko več, kot jih je opisanih na tem mestu. Med tehnikami integralskega slikanja lahko kot bolj razvito najdemo še tehniko s spreminjanjem goriščne razdalje. V zdravstvu pa se na primer veliko uporabljajo jedrska magnetna resonanca in podobne tehnike, ki pa so po svojem principu delovanja in namenu popolnoma drugačne od zgoraj opisanih. Razvoj 3D tehnik za komercialno uporabo se kaže predvsem v smeri avtostereoskopskih tehnik. Napredek stremi k temu, da bi bilo opazovanje 3D slik na zaslonih čim lažje, da torej ne bi bila potrebna dodatna oprema, kot na primer očala in da bi odpravili konflikt med razdaljo in kotom pod katerim gledamo predmete, zaradi česar opazovalca lahko začnejo boleti oči in glava. Te pogoje izpolnjujejo zasloni z matriko mikro leč, ki pa so žal še vedno predragi in prezapleteni za izdelavo in zato za enkrat širši javnosti nedostopni.

LITERATURA

- [1] X. Xiao, B. Javidi, M. Martinez-Corral, A. Stern, "Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications", *Applied Optics*, 546-560, (2013)
- [2] M. Prosen, "Paralaksa", *Presek*, 50-55 (1990)
- [3] Autostereogram, citirano 24.2.14, dostopno na naslovu: <http://en.wikipedia.org/wiki/Autostereogram>
- [4] E. Hecht, A. Zajac, "Optics", Addison-Wesley Publishing Company ltd., Philippines, (1974)
- [5] R. D. Guenther, "Modern Optics", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1976)
- [6] Holography, citirano 14.1.14, dostopno na naslovu: <http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
- [7] R. Schulein, M. Danesh Panah, B. Javidi, "3D imaging with axially distributed sensing", *Optics Letters* 34, 2012-2014 (2009)
- [8] A. Orth, K. B. Crozier, "Light Field Moment Imaging", *Optics Letter*, 2666-2668, (2013)
- [9] J. H. Park, K. Hong, B. Lee, "Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging", *Applied Optics* 48, 77-94 (2009)
- [10] D. Shin, B. Javidi, "Three-dimensional imaging and visualization of partially occluded objects using axially distributed stereo image sensing", *Optics Letters*, 1394-1396, (2012)
- [11] Autostereogram, citirano 24.2.14, dostopno na naslovu: <http://en.wikipedia.org/wiki/Autostereogram>
- [12] Stereoscopy, citirano 16.1.14, dostopno na naslovu: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscopy>