

DELOVANJE OČAL ZA NAVIDEZNO IN OBOGATENO RESNIČNOST

EMA HANŽEL

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Članek obravnava delovanje očal za navidezno in obogateno resničnost. Opisan je zgodovinski razvoj teh tehnologij, ključni elementi za pravilno delovanje kot so sledenje gibanju in optični sistemi. Razloženi so različni tipi sledenja, predvsem notranje sledenje brez oznak, ki združuje senzorje in računalniški vid. Podrobno je predstavljena optika uporabljena v očalih s poudarkom na Fresnelovih in plastovitih lečah ter valovodih pri očalih za obogateno resničnost. Poleg tehničnega vidika je prikazan tudi širok spekter uporabe, od medicine, izobraževanja, arhitekture, industrije do zabave.

WORKING PRINCIPLES OF VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY GLASSES

The article discusses the operation of virtual and augmented reality glasses. It describes the historical development of these technologies and the key elements for their proper functioning, such as motion tracking and optical systems. Different types of tracking are explained, particularly inside-out tracking without markers, which combines sensors and computer vision. The optics used in the glasses are presented in detail, with an emphasis on Fresnel and Pancake lenses as well as waveguides in augmented reality glasses. In addition to the technical aspect, a wide range of applications is also shown, from medicine, education, and architecture to industry and entertainment.

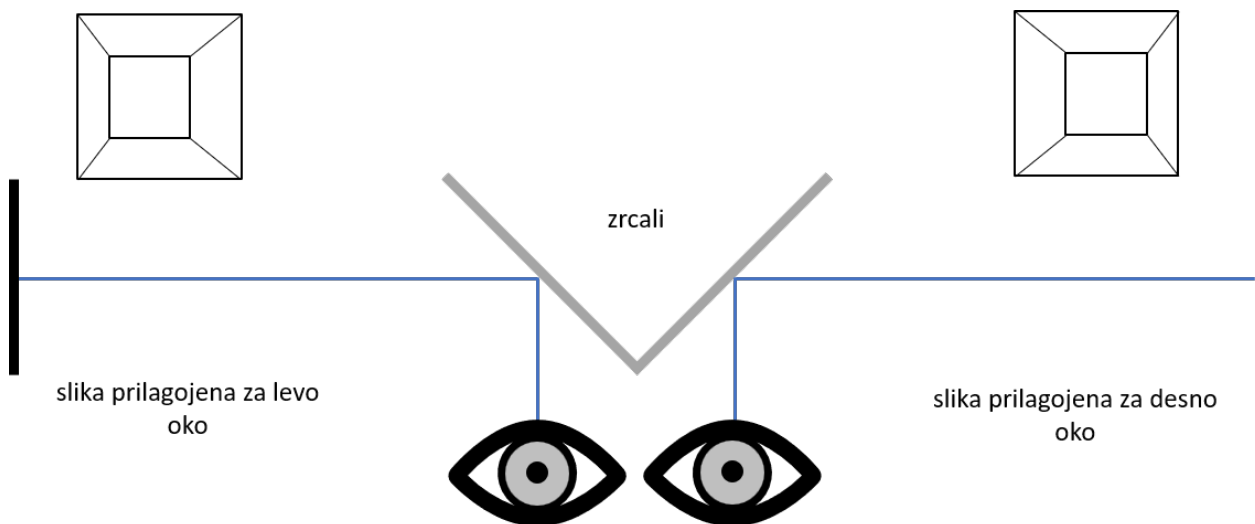
1. Uvod

Za navidezno resničnost obstaja veliko različnih definicij, vendar jim je skupno to, da zmorejo prelisčiti naše možgane in ustvariti občutek resničnosti, čeprav gre v resnici le za računalniško simulacijo. Ustvari umetno okolje, ki uporabnika prepriča, da je nekje drugje kot v resnici [1]. Prilagojena ali obogatena resničnost pa združuje resnične fizične elemente z digitalnimi vsebinami, torej dodaja k naši resničnosti [2].

Razvoj navidezne resničnosti se je začel že v 19. stoletju s slikanjem panoram, ki so jih razstavljali v sobah v obliki valja, da so opazovalci dobili občutek, da so del dogajanja. V letu 1838 je Charles Wheatstone ugotovil, da možgani dve dvodimenzionalni sliki, posneti iz malo drugačnega zornega kota, sestavijo v 3D objekt [3]. Na sliki 1 je prikazan Wheatstonov stereoskop, ki je s pomočjo zrcal opazovalcu prikazal dve različni sliki. Wheatstonove ugotovitve je uporabil David Brewster, ki je s pomočjo prizem leta 1849 stereoskop zmanjšal na velikost daljnogleda [4].

Prva očala za navidezno resničnost, ki so sledila uporabnikovemu gibanju, so nastala leta 1961. Uporabljala jih je vojska za ocenjevanje nevarnih situacij [3]. Namesto človeka so v nevarno območje poslali kamero, ki pa je sledila gibom uporabnika očal. Leta 1968 je Ivan Sutherland s pomočjo svojih študentov ustvaril prva očala za obogateno resničnost [3], ki so bila povezana z računalnikom. Poimenovali so jih Damoklejev meč, saj so morala biti zaradi svoje teže pritrjena na strop. V komercialne namene so očala za navidezno resničnost začeli prodajati konec 80. let prejšnjega stoletja, a so bila večini cenovno nedostopna [3].

Revolucija očal za navidezno in obogateno resničnost se je začela leta 2012, ko je Palmer Luckey zbral več kot 2,5 milijona dolarjev za razvoj svojega prototipa Oculus Rift. Leta 2014 je njegovo podjetje kupil Facebook in tudi ostala velika podjetja so že prodajala očala za navidezno resničnost za uporabo doma [3]. V naslednjih letih se je uporaba očal za navidezno resničnost razširila. Očala se uporabljajo predvsem za zabavo, v izobraževanju in medicini [1].



Slika 1. Wheatstonov stereoskop, ki z uporabo zrcal omogoča opazovalcu ogled dveh različnih slik za vsako oko posebej. Možgani sliki združijo in opazovalec dobi vtis tridimenzionalne slike.

2. Shematski pregled

2.1 Sledenje

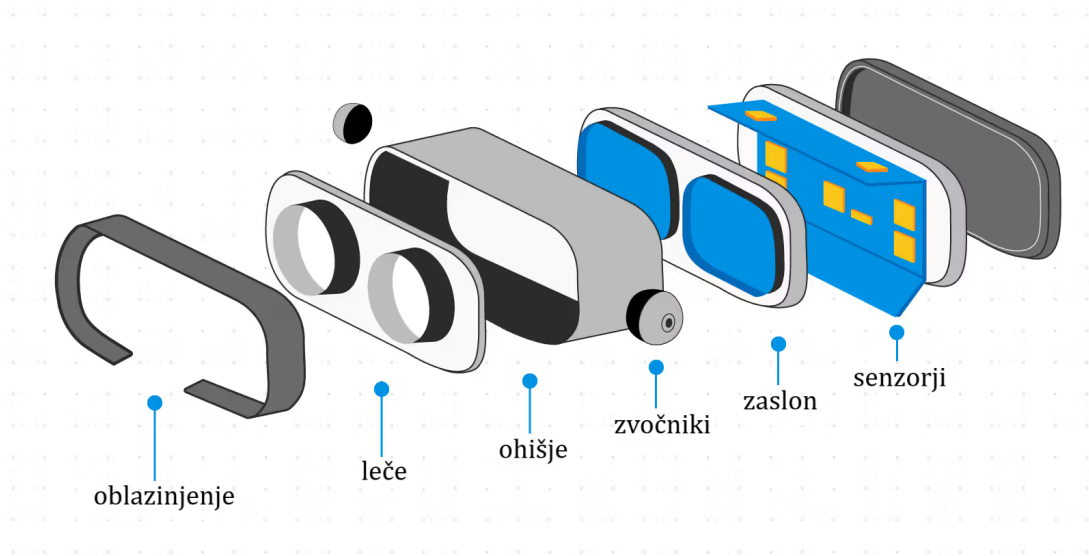
Najpomembnejši element očal za navidezno ali obogateno resničnost je dobro sledenje gibanju glave. Gibanju lahko sledimo s pomočjo senzorjev ali optično z uporabo računalniškega vida. Računalniški vid je področje računalništva, ki s pomočjo umetne inteligence interpretira in analizira slikovne podatke. Večina očal združuje obe metodi, da doseže kompromis med računsko zahtevnostjo in natančnostjo. Pri sledenju s senzorji ne dobimo povratne informacije o pravilnosti sledenja, prav tako pa s starostjo postanejo manj natančni. Sledenje z računalniškim vidom pomeni, da očala s kamerami posnamejo 60 sličic na sekundo in jih primerjajo ter iz sprememb določijo lokacijo. Takšno sledenje omogoči, da dobimo povratno informacijo o pravilnosti sledenja, torej, če se vrnemo na mesto, kjer smo že bili, algoritem to prepozna. Sledenje s senzorji in optično sledenje z uporabo računalniškega vida združimo tako, da s senzorji določimo približno lokacijo očal, natančnost pa izboljšamo z uporabo računalniškega vida [5].

2.2 Navidezna resničnost

Očala za navidezno resničnost so danes večja in težja od navadnih očal za korekcijo vida. Debela so okoli 10 cm in tehtajo med 400 in 900 gramov, zato imajo več trakov za udobno nošnjo. Glavni sestavni deli očal so predstavljeni na sliki 2. Na zunanji strani imajo kamere za sledenje gibanja rok in glave kot celote. V notranjosti se skrivajo senzorji, kot so girooskop, ki meri spremembe smeri gibanja, in pospeškomer. Za vsako oko je v očalih en zaslon in optična konfiguracija, da uporabnik vidi ostro sliko. Očala vsebujejo tudi več zvočnikov na različnih legah, da ustvarijo prostorski zvok [6]. V tem članku se bomo podrobneje posvetili različnim optičnim konfiguracijam očal za navidezno resničnost.

Zaslone so v očalih za navidezno resničnost zelo blizu očesom, zato potrebujemo leče ali optične sisteme, ki poskrbijo, da se naše oči ne utrudijo. Takšne leče zaslon močno povečajo, kar pomeni, da morajo imeti zasloni visoko ločljivost, da ne pride do mrežnega pojava (ang. *screen-door effect*), kjer uporabnik vidi prostor med posameznimi slikovnimi točkami. Zaslone imajo tudi visoko stopnjo osveževanja (vsaj 90 Hz), da se zmanjša občutek slabosti [6].

Ljudje imamo vidno polje široko približno 150 stopinj. Da očala ustvarijo občutek navidezne



Slika 2. Shematski prikaz očal za navidezno resničnost. Oblazinjenje skrbi za odobje. Leče sliko iz zaslona ustrezno povečajo, senzorji pa sledijo gibanju, da se slika na zaslonu pravilno premika. Slika prilagojena po: [6].

resničnosti, se morajo temu čim bolj približati. Današnje izvedbe imajo vidno polje med 90 in 120 stopinj [6].

2.3 Obogatena resničnost

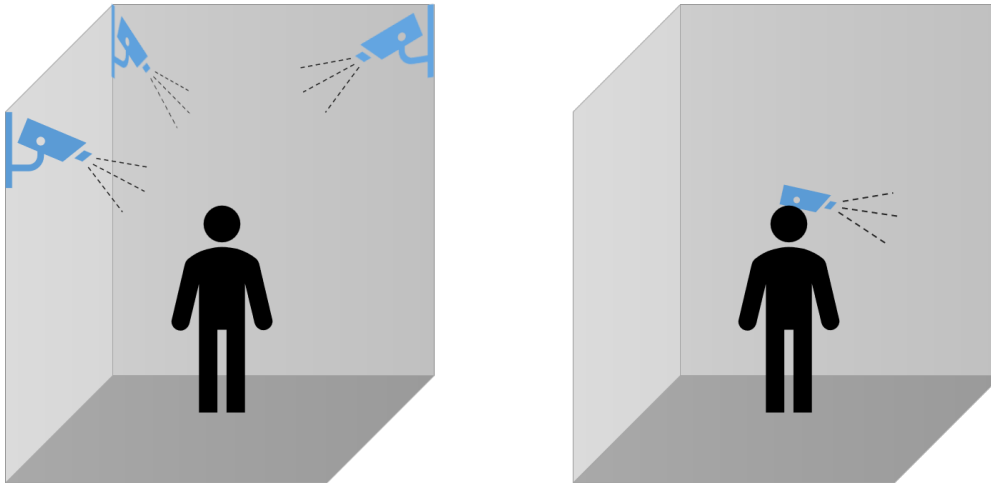
Očala za obogateno resničnost izgledajo kot rahlo zatemnjena korekcijska očala. Tehtajo med 70 in 200 gramov. Večina sestavnih delov je enakih kot pri očalih za navidezno resničnost, le da so manjša in tanjša. Razlika je tudi v tem, da v tem primeru želimo videti tudi zunanost, zato je zaslon postavljen ob strani in je zelo majhen [7]. Za združevanje slike iz zaslona in resničnosti uporabljamo različne optične konfiguracije, ki so podrobneje predstavljene v poglavju 4.3. Ena izmed možnosti je uporaba valovodov, ki izkorišča popolne odboje, da sliko iz zaslona pripelje do oči.

Zaslone v očalih za obogateno resničnost morajo imeti visoko ločljivost in hitrost osveževanja. Poleg tega se na steklih očal združita slika iz zaslona z realnostjo, zato mora biti svetlost zaslona primerljiva s svetlostjo zunanosti [7].

Vidno polje obogatene resničnosti v očalih je med 30° in 60°, kar je mnogo manj kot pri navidezni resničnosti. To pomeni, da očala dodajajo elemente obogatene resničnosti le majhnemu delu prostora centralno pred uporabnikom, medtem ko stranski vid ostane nespremenjen [7].

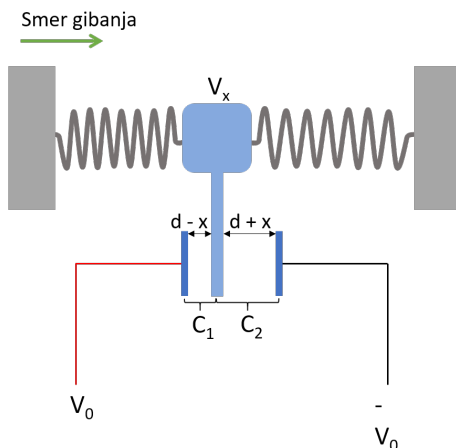
3. Sledenje gibanju

Očala za navidezno resničnost morajo natančno in hitro slediti gibanju uporabnika, da ohranjajo iluzijo resničnosti. Očala sledijo gibanju v smereh x , y in z osi ter rotacijam okoli posameznih osi, torej sledijo šestim prostostnim stopnjam. Obstajata dva različna načina sledenja in sicer notranje sledenje (ang. *inside-out tracking*) in zunanje sledenje (ang. *outside-in tracking*), ki sta prikazana na sliki 3. Pri zunanjem sledenju sledimo gibanju očal iz zunanosti, torej s pomočjo kamer fiksno postavljenih v prostoru, pri notranjem pa sledimo s pomočjo kamer in senzorjev na samih očalih. Notranje sledenje delimo na dva tipa: sledenje z oznakami, kjer so na fiksnih mestih v prostoru postavljene oznake, s pomočjo katerih se očala orientirajo, in sledenje brez oznak. V tem seminarju se bomo posvetili samo notranjemu sledenju brez oznak [8], saj je to najpogostejše uporabljeno v komercialno dostopnih očalih.

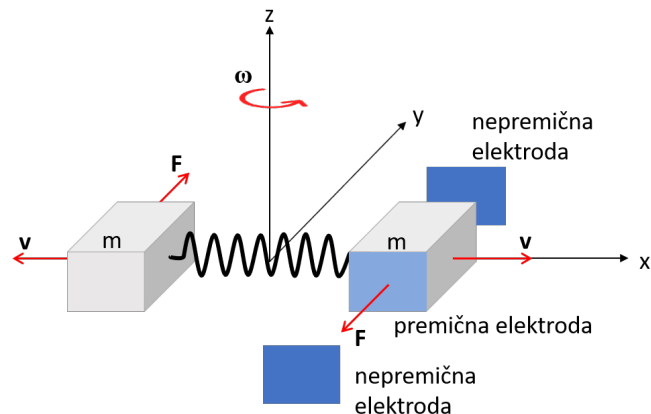


Slika 3. Na levi je prikazano zunanje sledenje pri katerem so kamere v okolici uporabnika. Na desni je notranje sledenje, kar pomeni, da je kamera na uporabniku.

Notranje sledenje brez oznak združuje optično sledenje s kamerami in sledenje s senzorji (pospeškometer in giroskop). V očalih so najpogostejše uporabljeni kapacitivni pospeškometri, ki so sestavljeni iz dveh nepremičnih elektrod in ene premične elektrode, ki leži med njima. Na premično elektrodo je pritrjena utež. Ko se utež zaradi pospeška premakne, se spremeni kapaciteta kondenzatorjev. Iz te spremembe lahko določimo velikost pospeška. Na sliki 4 je shematično prikazan pospeškometer.



Slika 4. Shematski prikaz pospeškometra, ki je sestavljen iz premične uteži, na kateri je elektroda. Ko se utež zaradi pospeševanja premakne, se spremeni kapaciteta kondenzatorjev.



Slika 5. Shematski prikaz giroskopa. Zaradi preglednosti je lega elektrod prikazana le na desni. Merilna masa m z elektrodo vibrira v smeri x . Ko se giroskop zavrti, Coriolisova sila premakne utež v y smeri. Tako kot pri pospeškometeru lahko izmerimo spremembo kapacitete kondenzatorjev.

Giroskop meri kotno hitrost. Deluje podobno kot pospeškometer. Sestavljen je iz štirih merilnih mas, ki paroma vibrirajo v x in y smereh. Ko se giroskop zavrti, na uteži deluje Coriolisova sila, ki jo izmerimo kot spremembo kapacitete kondenzatorjev, katerih elektrode so pritrjene na uteži (enako kot pri pospeškometeru). Na sliki 5 je shematsko predstavljen giroskop za merjenje kotne hitrosti v eni smeri. Za merjenje v vseh treh smereh pa potrebujemo štiri uteži [9].

S senzorji najprej približno določimo lego očal. Oceno lokacije izboljšamo z uporabo optičnega sledenja, ki temelji na hkratni lokalizaciji in mapiranju (ang. *simultaneous localization and mapping (SLAM)*), kar pomeni, da se očala naenkrat orientirajo v prostoru in ustvarjajo zemljevid okolice. Očala s pomočjo kamer v prostoru poiščejo nepremične karakteristike (značilke), kot na primer:

robovi pohištva, luči, okna... Lokacijo in opis značilke očala shranijo v mapo. To storijo za vsako posneto sliko. Če je opažena značilka že v mapi, lahko algoritem zmanjša negotovosti lokacije, določene s senzorji. S ponavljanjem postopka se ustvarjen zemljevid izboljšuje, torej se izboljšuje tudi ocena lokacije očal [5].

Uporaba dveh načinov je smiselna, saj tako odpravimo slabosti posameznih metod. Če kameri z rokami pokrijemo značilke, se lahko očala orientirajo s senzorji. Prav tako optično sledenje poda oceno lokacije le 60-krat na sekundo, senzorji pa lokacijo podajajo bolj pogosto [10].

Dobro sledenje je potrebno, da uporabniku ni slabo. Zamik med premikom in vidnimi posledicami na zaslonu mora biti čim manjši. Sprejemljiv zamik je manj kot 20 ms. V tem času morajo senzorji sporočiti svoje meritve računalniku (1-5 ms), ki jih obdela in določi, kako se mora premakniti slika na zaslonu (7-12 ms). Nato mora še zaslon spremeniti sliko, kar traja 3-5 ms [11].

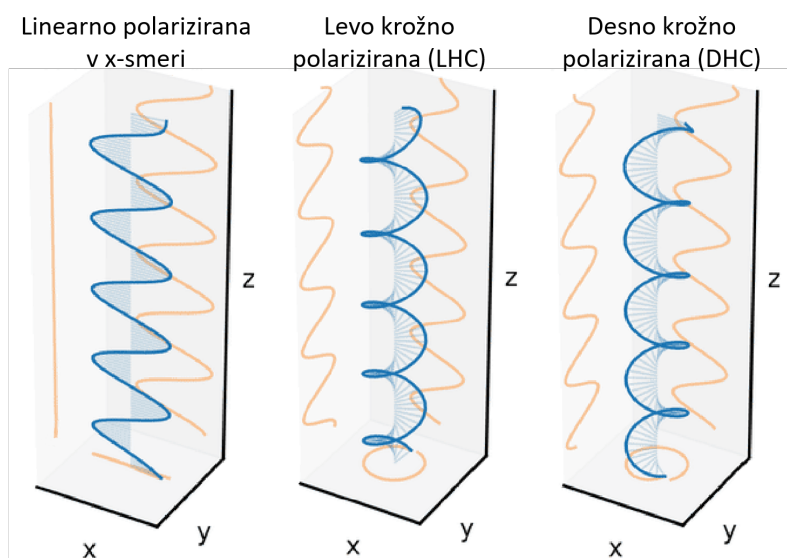
4. Optika

4.1 Osnove optike

Svetlobo obravnavamo kot elektromagnetno valovanje, ki se širi v smeri $\mathbf{k}$. Ker je elektromagnetno valovanje v izotropni snovi transversalno, zanj velja, da $\mathbf{E} \perp \mathbf{k}$. Označimo smer vektorja $\mathbf{k}$ z z , torej vektor $\mathbf{E}$ leži v ravnini xy . Lahko ga razstavimo na dve pravokotni komponenti E_x in E_y , ki sta vzporedni koordinatnima osema x in y . Tako lahko izrazimo jakost električnega polja kot:

$$\mathbf{E} = E_{0x}\mathbf{e}_x \cos(kz - \omega t) + E_{0y}\mathbf{e}_y \cos(kz - \omega t + \delta),$$

kjer smo z δ označili fazni zamik med komponentama. Če se fazni zamik med komponentama s



Slika 6. Grafični prikaz linearno polarizirane svetlobe, levo krožno polarizirane svetlobe (LHC) in desno krožno polarizirane (RHC) svetlobe. Slika prilagojena po: [12].

časom naključno spreminja med 0 in 2π , je svetloba nepolarizirana. V tem primeru vektor $\mathbf{E}$ ob različnih časih kaže v različnih smereh ravnine xy z enako verjetnostjo [13].

Za nas sta pomembna dva primera, pri katerih je δ konstanten, in sicer linearno polarizirano valovanje in krožno polarizirano valovanje (slika 6). O linearno polarizirani svetlobi govorimo, kadar je smer vektorja $\mathbf{E}$ konstantna. To pomeni, da E_x in E_y nihata ali v fazi ali v protifazi, torej je $\delta = N\pi$, kjer je N celo število. Pri krožno polarizirani svetlobi se vektor jakosti električnega polja vrti v ravnini xy . Velikosti komponent E_{0x} in E_{0y} morata biti enaki, fazna razlika med njima pa

je $\delta = (N + 1/2)\pi$. Zaradi periodičnosti funkcij lahko obravnavamo samo dva primera: $\delta = \pi/2$, ki označuje levo krožno polarizirano valovanje, in $\delta = -\pi/2$, ki označuje desno krožno polarizirano valovanje [13]. V očalih za navidezno resničnost spremembo polarizacije izkoriščamo za podaljševanje optične poti, kot bo predstavljeno v naslednjem poglavju.

Za spreminjanje polarizacije uporabljamo zakasnitvene ploščice, ki delujejo na osnovi dvolomnih snovi. V dvolomni snovi je hitrost širjenja svetlobe odvisna od polarizacije. V zakasnitveni ploščici leži optična os v ravnini ploščice. Poglejmo si primer navpično linearno polarizirane svetlobe, ki jo lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_y \cos(kz - \omega t).$$

Ta svetloba vpada na zakasnitveno ploščico z optično osjo pod kotom 45° glede na vpadno linearno polarizirano svetlobo. Vzemimo primer, ko je lomni količnik svetlobe za polarizacijo vzporedno z optično osjo $n_{\parallel}$ večji od lomnega količnika za polarizacijo pravokotno nanjo $n_{\perp}$. Vpadno svetlobo razdelimo na komponenti z enakima amplitudama: $E_{\parallel} = \sqrt{2}/2 E_0$ in $E_{\perp} = \sqrt{2}/2 E_0$. Po prehodu skozi ploščico med komponentama nastane fazna razlika:

$$\delta = \frac{2\pi d (n_{\parallel} - n_{\perp})}{\lambda},$$

kjer je d debelina zakasnitvene ploščice in λ valovna dolžina svetlobe. Da dobimo levo krožno polarizirano svetlobo, mora biti debelina ploščice d takšna, da je $\delta = \pi/2$. Iz česar sledi:

$$d(n_{\parallel} - n_{\perp}) = \frac{\lambda}{4},$$

kar je razlog, da takšni ploščici rečemo ploščica $\lambda/4$. Da bi dobili desno krožno polarizirano svetlobo, bi morali ploščico postaviti pod kotom -45° [13].

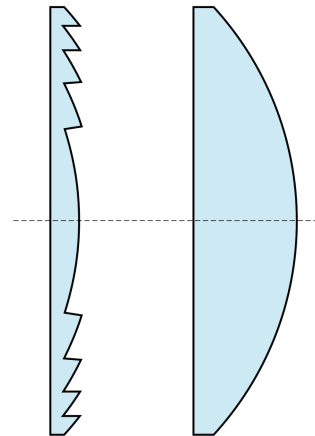
4.2 Optika v očalih za navidezno resničnost

V očalih za navidezno resničnost je zaslon zelo blizu očesom, kar pomeni, da je ostrenje naporno za oči. Da bi bila uporaba očal čim bolj udobna, uporabljamo različne optične sisteme.

Zaradi majhnih razdalj potrebujemo leče z veliko ukrivljenostjo, ki pa so velike in pretežke za uporabo v očalih. To rešujemo z uporabo Fresnelovih leč, ki imajo na površini izbrušene koncentrične kroge, tako da nastanejo odseki z enako ukrivljenostjo (slika 7) kot pri navadni leči, le da je Fresnelova leča lažja in tanjša [13]. Še vedno pa velja, da mora biti Fresnelova leča postavljena na primerni razdalji od zaslona, da dobimo ostro sliko, torej se sama velikost očal ne zmanjša v primerjavi z navadno lečo. Kvaliteta slike pri uporabi Fresnelove leče je slabša, saj se svetloba na robovih posameznih kolobarjev razprši, zaradi česar je slika bolj motna [15].

V novejših napravah je namesto Fresnelove leče uporabljena plastovita leča (ang. *Pancake lens*), ki zloži pot svetlobe in s tem podaljša optično pot ter skrajša goriščno razdaljo. Plastovita leča je sestavljena iz ukrivljenega polprepustnega zrcala, ploščice $\lambda/4$ in odbojnega polarizatorja (slika 8).

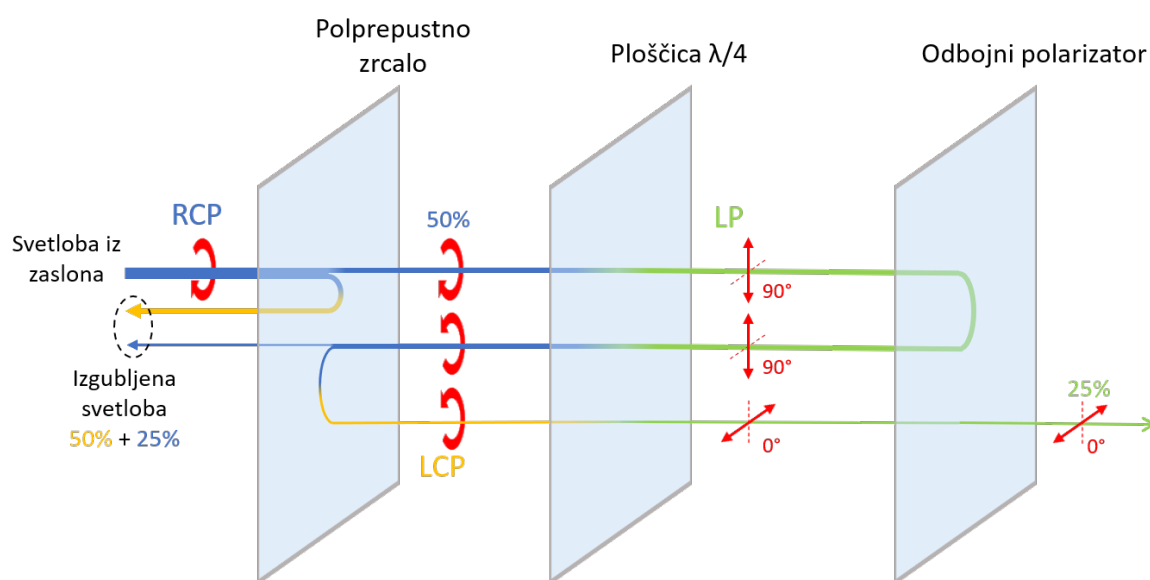
V plastovitih lečah se najpogosteje uporabljata dve vrsti odbojnih polarizatorjev: polarizatorji z žično mrežo in večplastni polarizatorji iz polimernih dvolomnih filmov. Polarizator z žično mrežo je sestavljen iz zelo tankih prevodnih žic, ki so med seboj vzporedne in razporejene na razdalji, manjši od valovne dolžine svetlobe. Ko na tak polarizator vpade svetloba, katere polarizacija je



Slika 7. Fresnelova leča z izbrušenimi koncentričnimi krogi v primerjavi z navadno lečo enake ukrivljenosti. Vir slike: [14].

vzporedna z žicami, začnejo elektroni v žicah oscilirati vzdolž žice. Pospešeni elektroni sevajo elektromagnetno valovanje naprej in nazaj. V smeri naprej se to sekundarno valovanje izniči z vpadnim valovanjem, medtem ko valovanje v nasprotni smeri predstavlja odboj, ki je polariziran vzporedno z žicami. Če pa na polarizator vpade svetloba, katere polarizacija je pravokotna na žice, elektroni ne morejo oscilirati po širini žice. Zaradi tega svetloba skozi polarizator preide praktično nespremenjena [16]. Druga vrsta so večplastni polarizatorji iz polimernih dvolomnih filmov. Ti so sestavljeni iz številnih izmeničnih plasti dveh polimerov, kjer je eden dvolomen (lomna količnika $n_{\perp}$ in $n_{\parallel}$), drugi pa izotropen (lomni količnik n_i). Za smer polarizacije, ki jo želimo odbiti, mora biti razlika med lomnima količnikoma obeh materialov čim večja, saj se tako na mejah med plastmi del svetlobe odbije. Če vzamemo primer, ko optična os leži v ravnini tanke plasti in želimo odbiti polarizacijo vzporedno optični osi, morata biti razlika $n_{\parallel}$ in n_i čim večja. Debeline posameznih plasti so izbrane tako, da odbiti valovi iz različnih plasti konstruktivno interferirajo. Za smer polarizacije, ki jo želimo prepustiti, pa morata biti lomna količnika obeh materialov enaka. Za enak primer kot zgoraj to pomeni $n_{\perp} = n_i$. Tako na mejah med plastmi ne pride do odboja, zato svetloba skozi strukturo prehaja brez večjih izgub [17].

V očalih iz zaslona prejmemo desno krožno polarizirano (RCP) svetlobo, ki pride do polprepustnega zrcala, ki prepusti polovico svetlobe, drugo polovico pa odbije nazaj proti zaslonu. Nato svetloba potuje skozi ploščico $\lambda/4$, ki desno krožno polarizirano svetlobo spremeni v navpično linearno polarizirano (LP) svetlobo. Odbojni polarizator je postavljen tako, da odbije vso navpično linearno polarizirano svetlobo in prepusti vodoravno polarizirano svetlobo. Zato se vsa svetloba, ki pride skozi ploščico $\lambda/4$, odbije nazaj, kjer po ponovnem prehodu skozi ploščico $\lambda/4$ postane desno krožno polarizirana. Svetloba tako pride do polprepustnega ogledala, od katerega se odbije polovica svetlobe, pri tem pa se ji obrne polarizacija v levo krožno (LCP). Ta svetloba potuje skozi ploščico $\lambda/4$, ki ji spremeni polarizacijo v vodoravno linearno. Takšno svetlobo pa odbojni polarizator prepusti do oči [18].



Slika 8. Prehod svetlobe skozi plastovito lečo. Ploščica $\lambda/4$ spreminja polarizacijo in omogoči podaljšanje optične poti znotraj same leče.

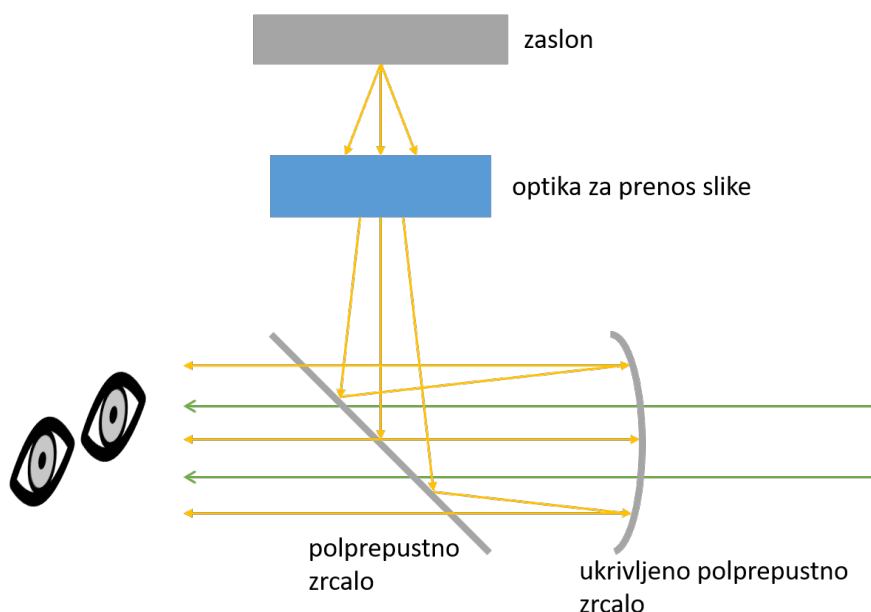
Hitro lahko opazimo, da pri takšni postavitvi optičnih elementov do oči pride le 25% začetne svetlobe, zaradi česar je slika temnejša. Prav tako je plastovito lečo zaradi več sestavnih delov težje izdelati in je posledično dražja. Zaradi zlaganja optične poti svetloba znotraj leče dvakrat potuje skozi ukrivljeno polprepustno zrcalo, kar pomeni, da se slika poveča enako kot pri klasični

leči z dvakrat večjo povečavo. Posledično je efektivna goriščna razdalja krajša. Zaradi tega lahko zaslon postavimo bližje leče, zato je bolj primerna za uporabo v očalih za navidezno resničnost, saj omogoča izdelavo bolj kompaktnih očal. Da je zlaganje učinkovito, moramo imeti dobro določeno polarizacijo svetlobe, saj drugače pride do podvojenih slik (t. i. slik duhov). To so zamegljene podvojene slike, ki so malo zamaknjene glede na originalno sliko [18].

Plastovita leča ohranja boljšo kvaliteto slike kot Fresnelova leča. Prav tako je kvaliteta slike plastovite leče manj občutljiva na premike levo in desno, zato ni potrebno zelo natančno nastaviti medzenične razdalje, kar izboljša uporabniško izkušnjo. Plastovita leča ima manjše vidno polje kot Fresnelova, ampak robovi slike niso zamegljeni. Problem, ki se pojavi pri obeh lečah, a je bolj opazen pri Fresnelovi, je barvna aberacija, do katere pride zaradi različnega loma svetlobe različnih valovnih dolžin [19].

4.3 Optika v očalih za obogateno resničnost

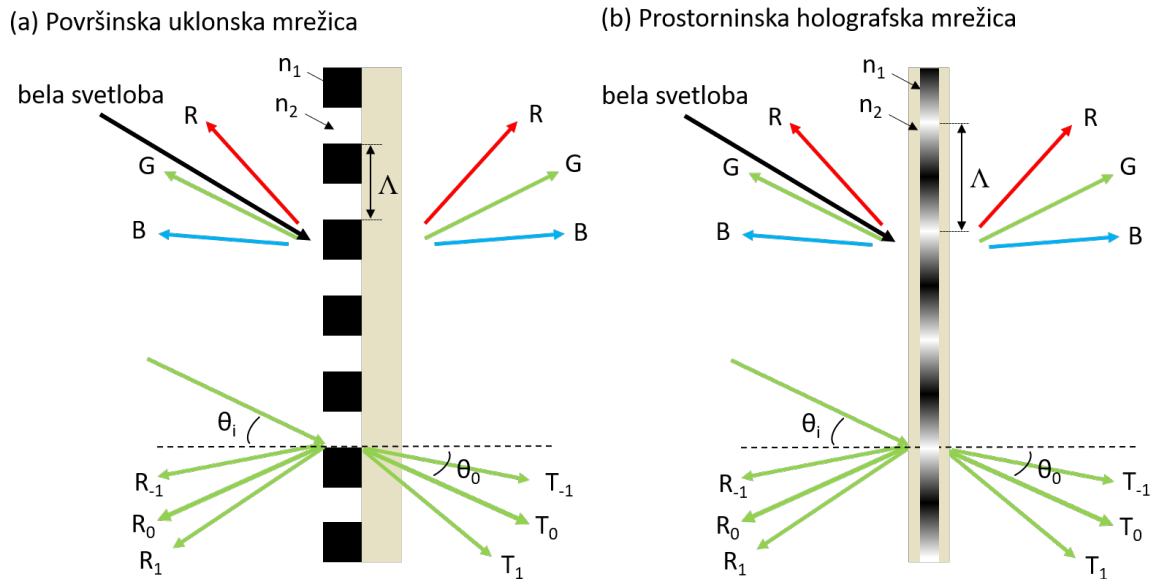
V očalih za obogateno resničnost želimo hkrati videti sliko iz zaslona in realno sliko. Najpreprostejši način združevanja je z uporabo ukrivljenega delilnika žarkov (ang. *Birdbath optics*). Sliko iz majhnega zaslona ustrezno povečamo in svetlobo usmerimo na ravno polprepustno zrcalo, ki polovico svetlobe odbije na ukrivljeno polprepustno zrcalo. Na ukrivljenem delilniku žarkov se delež svetlobe odbije proti očem. Na poti do oči gre svetloba še enkrat čez polprepustno zrcalo. Svetloba iz zunanjosti pa potuje skozi delilnik žarkov in polprepustno zrcalo do oči. Pot svetlobe si lahko ogledamo na sliki 9. Problem takšne postavitve je, da velik delež svetlobe izgubimo zaradi večkratne uporabe polprepustnega zrcala. Zaradi večkratnih odbojev lahko pride tudi do slik duhov [20].



Slika 9. Pot svetlobe pri uporabi ukrivljenega delilnika žarkov, ki združuje sliko iz zaslona in iz okolice.

Večina očal za obogateno resničnost danes deluje na osnovi uklonskih valovodov. Uklonski valovodi so narejeni iz plastike ali stekla s primernim lomnim količnikom, da v notranjosti pride do serije totalnih odbojev. Na vhodnem in izhodnem delu valovoda je uklonska mrežica, ki ali odbijata ali prepuščata svetlobo odvisno od proizvajalca očal. Primer na sliki 11 prikazuje valovod, pri katerem na vhodnem delu uklonska mrežica prepušča svetlobo, na izhodnem pa odbija. Obstajata dve vrsti uklonskih valovodov, in sicer valovod s površinsko reliefno uklonsko mrežico in valovod s prostorninsko holografsko mrežico. Površinske reliefne uklonske mrežice so periodični utori na

površini valovoda, prostorninske holografske mrežice pa so periodične tridimenzionalne strukture, vgrajene v valovod s pomočjo holografije. Obe strukturi sta prikazani na sliki 10 [21].



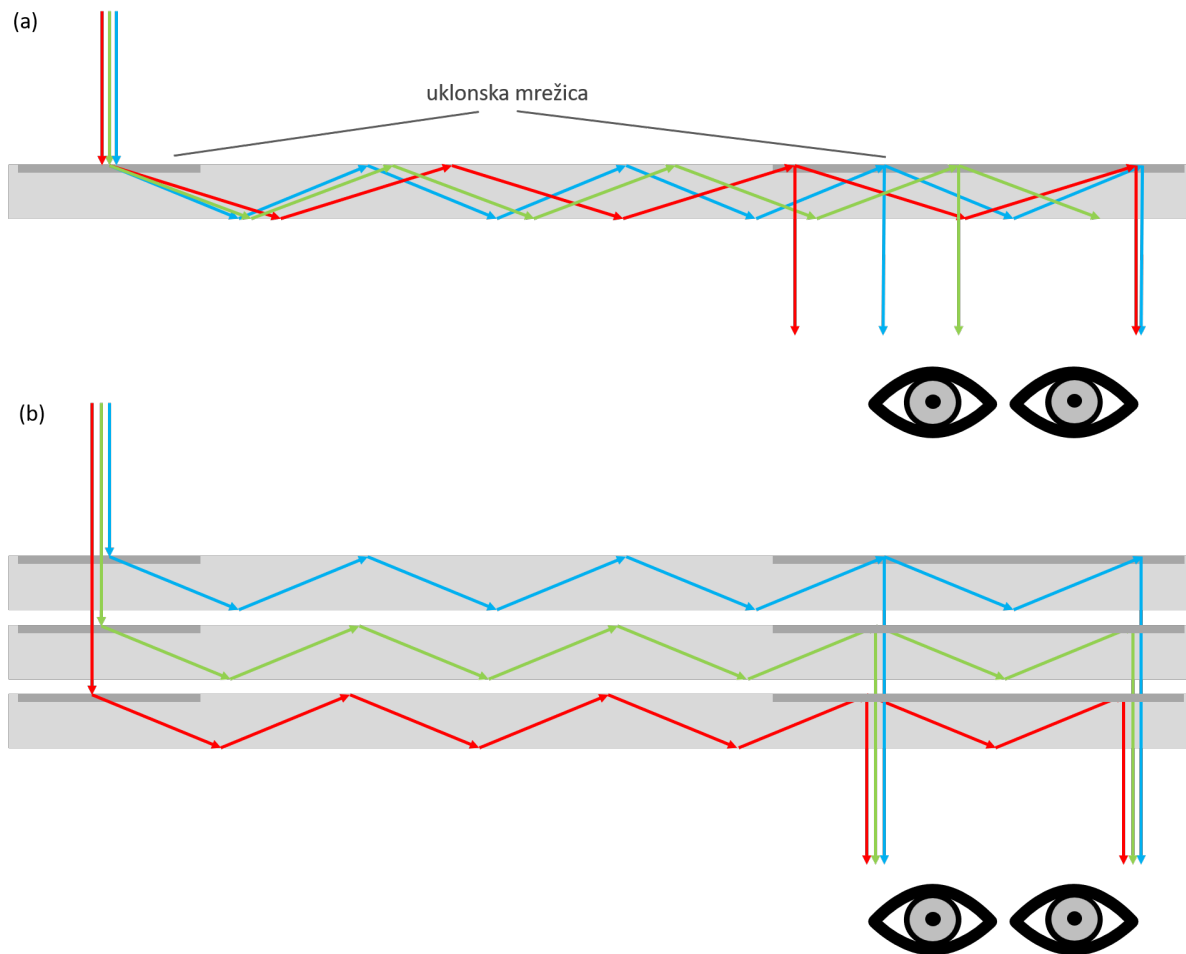
Slika 10. Površinska reliefna uklonska mrežica (a) in prostorninska holografska mrežica (b), ki sta na vhodu in izhodu valovoda.

Da vidimo maksimum pri uklonski mrežici kot je predstavljeno na sliki 10, mora biti razlika v dolžini poti med žarkoma, ki potujeta skozi sosednji reži, enaka večkratniku valovne dolžine. Ta pogoj lahko matematično zapišemo kot:

$$\Lambda (n_2 \sin \theta_m - n_1 \sin \theta_i) = m\lambda,$$

kjer je Λ razdalja med sosednjima režama, λ valovna dolžina vpadne svetlobe, θ_i vpadni kot, m red ojačitve, θ_m kot pod katerim vidimo ojačitev, n_2 lomni količnik valovnega vodnika in n_1 lomni količnik zraka. Leva stran enačbe predstavlja razliko v dolžini poti, desna pa je večkratnik valovne dolžine. Smer ojačitve je odvisna od valovne dolžine, kar pomeni, da svetloba različnih barv v valovod vstopi pod različnimi koti, kar lahko vidimo na sliki 10 in sliki 11(a). Na poti skozi valovod imajo različne valovne dolžine drugačno število totalnih odbojev in valovod zapustijo na različnih mestih. Zaradi tega je pogosta uporaba treh valovodov, ki so prilagojeni za rdečo, zeleno in modro barvo, kar lahko vidimo na sliki 11(b) [21].

Ena izmed slabosti uporabe valovodov je mavrični učinek, ki se pojavi zaradi uklona zunanjih virov svetlobe na izhodni uklonski mrežici. Rezultat tega je pojav mavričnih sledi, ki motijo pogled skozi očala. Ta učinek je najizrazitejši pri svetlobi, ki na mrežico vpada pod velikimi koti, zato se ga poskuša zmanjšati z uporabo valovodov z večjim lomnim količnikom ali optičnimi filtri. Druga pogosta težava je uhajanje svetlobe iz izhodne uklonske mrežice v zunanost. Vidimo jo kot svetleče oči, kar ustvari nenaraven videz, hkrati pa ne omogoča popolne zasebnosti. Težavo se rešuje z optimizacijo geometrije uklonske mrežice, na primer z uporabo nagnjenih utorov, ali z nagibanjem valovoda tako, da svetloba uhaja v smer, ki ostalim ni vidna. Uklonski valovodi imajo tudi probleme s slikami duhov, ki nastanejo zaradi višjih redov uklonov ali zaradi zaporednega prehoda skozi uklonsko mrežico [21].



Slika 11. (a) Pot žarkov pri uporabi enega valovoda. (b) Pot žarkov pri uporabi valovodov za rdečo, zeleno in modro barvo.

5. Uporaba

5.1 Navigacija

Navigacija s pomočjo očal za obogateno resničnost uporabniku omogoča boljše izkušnjo vodenja, saj mu prikaže smerokaze, puščice in druge dodatne informacije direktno v njegovo vidno polje. Tako se zmanjša verjetnost za napake, predvsem pri gibanju po neznanih poteh. Ker je uporabniku vse prikazano v njegovem vidnem polju, je bolj zbran, saj mu ni treba gledati na fizični zemljevid ali zemljevid na telefonu. Takšno navigacijo lahko uporablja pri hoji, kolesarjenju ali vožnji z avtom. Pri hoji je predvsem uporabna za turiste in navigacijo po notranjih prostorih, kot so nakupovalni centri, bolnišnice in letališča. Navigacija v avtomobilu lahko poleg željene poti prikaže tudi omejitve hitrosti, obvestila o zastojih in druge koristne informacije [22].

5.2 Medicina

V medicini očala za navidezno in obogateno resničnost uporabljajo za učenje in zdravljenje.

Očala za obogateno resničnost omogočajo, da kirurg med posegom na pacienta projicira slike iz magnetne resonance ali rentgenskega slikanja. To kirurgu omogoča boljše prostorsko predstavo notranjosti telesa, kar zmanjša možnosti za napake in zaplete [1].

Očala za navidezno resničnost študenti medicine lahko uporabljajo, da vadijo posege, ki jih še nikoli niso opravljali [23]. Prav tako lahko gledajo posnetke že opravljenih operacij iz pogleda ki-

rurga. Očala za navidezno resničnost že več kot 20 let uporabljajo za zdravljenje posttravmatske stresne motnje, tako da paciente postopno izpostavljajo sprožilcem v virtualnem svetu. Enak način se uporablja tudi pri zdravljenju fobij in anksioznih motenj. Uporabljajo jih tudi za lajšanje kroničnih bolečin v hrbtu, tako da program vodi paciente čez vaje, kar je v času pomanjkanja zdravnikov in fizioterapevtov zelo uporabno [1].

5.3 Izobraževanje

Uporaba navidezne resničnosti v izobraževalnem procesu omogoča transformacijo tradicionalnega učnega okolja v interaktivno izkušnjo. Z očali za navidezno resničnost lahko učenci doživijo pouk geografije kot virtualno potovanje, pri zgodovini si lahko ogledajo starodavna mesta in način življenja nekoč, pri biologiji pa „vstopijo“ v notranjost različnih celic in opazujejo procese, o katerih se učijo [1].

Obogatena resničnost predstavlja dopolnitev učbenikov. Ko učenec z očali za obogateno resničnost bere učbenik, se mu poleg slik pojavijo še videi in 3D animacije [1].

Očala za navidezno resničnost so primerna za izobraževanje na vseh stopnjah. Na univerzitetni stopnji jih uporabljajo pri izobraževanju inženirjev in arhitektov, da dobijo boljšo prostorsko predstavo stvari, ki jih ustvarjajo. Uporabljajo jih tudi pri učenju pilotov v simulatorjih letenja [1].

5.4 Arhitektura in gradbeništvo

Očala za obogateno resničnost so uporabna tudi na gradbišču. Delavci lahko vidijo projicirane načrte in tako točno vedo, kam morajo postaviti kakšne cevi. To povečuje natančnost izvedbe, zmanjšuje stroške popravkov in omogoča sprotno primerjavo z načrti [24].

Z očali za navidezno resničnost lahko arhitekti in investitorji še pred gradnjo „vstopijo“ v objekt in ga izkusijo v naravni velikosti. To omogoča prilagoditve oblikovanja, razporeditve prostorov in materialov na podlagi občutka prostora, ne le 2D načrtov. Po končani gradnji lahko z očali za obogateno resničnost najprej virtualno opremijo prostor in tako eksperimentirajo z različnimi barvami [25].

5.5 Industrija in proizvodnja

V proizvodnji so očala za obogateno resničnost postala ključno orodje za vodenje postopkov sestavljanja in servisiranja kompleksnih strojev. Namesto iskanja navodil po priročnikih lahko delavec vidi korake postopka neposredno pred svojimi očmi. Poleg korakov se mu prikažejo tudi interaktivne puščice, opozorila in 3D prikazi delov, ki jih mora zamenjati ali sestaviti. Tovrstne tehnologije uporablja Boeing za zmanjšanje časa sestavljanja in izboljšanje natančnosti [26].

5.6 Turizem

Očala za navidezno resničnost omogočajo virtualne ogledе znamenitosti, kar je bilo še posebej uporabno v času pandemije, ko je bil fizični dostop do muzejev in turističnih znamenitosti omejen. Očala za obogateno resničnost pa v fizičnih muzejih ali zgodovinskih mestih omogočajo dodatne sloje informacij. Ob ogledu srednjeveškega gradu se obiskovalcu lahko prikaže, kako je ta izgledal v 14. stoletju, z animacijami ljudi, orožja in oblačil iz tistega časa.

5.7 Varnost

Vojska uporablja očala za navidezno resničnost za simulacijo bojišč in za trening. To omogoča varno, a realistično izobraževanje brez dejanskega ogrožanja ljudi [1].

Tudi gasilci uporabljajo očala za virtualno resničnost za vaje gašenja požarov v različnih objektih, s čimer se pripravljajo na izjemno nevarne scenarije [27].

5.8 Zabava

Očala za navidezno resničnost pa so najpogostejše uporabljena za igranje videoiger. Z eno napravo lahko uporabnik igra tenis, golf ali dirka z avti. Seveda pa obstajajo tudi mirnejše možnosti, kot so igranje klavirja ali sestavljanje sestavljanek [1].

6. Zaključek

Navidezna in obogatena resničnost sta v zadnjih desetletjih iz znanstvene fantastike prešli v realnost. S tehničnega vidika sta glavna izziva visoka natančnost sledenja in napredna optika, ki skupaj zagotavljata kakovostno uporabniško izkušnjo. Uporaba očal je vse širša, od zdravstva in izobraževanja do industrije in zabave. V prihodnosti lahko pričakujemo uporabo na vseh področjih in tudi v vsakdanjem življenju. Razvoj bo v prihodnosti prinesel še bolj izpopolnjene in cenovno dostopnejše naprave, kar bo tehnologijo približalo širši javnosti.

LITERATURA

- [1] Wikipedia, *Virtual reality*, https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality, dostop: 6. 4. 2025.
- [2] Wikipedia, *Obogatena resničnost*, https://sl.wikipedia.org/wiki/Obogatena_resni%C4%8Dnost, dostop: 6. 4. 2025.
- [3] Virtual Reality Society, *History Of Virtual Reality*, <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>, dostop: 6. 4. 2025.
- [4] Wikipedia, *David Brewster*, https://en.wikipedia.org/wiki/David_Brewster, dostop: 6. 4. 2025.
- [5] A. Gobec, *Obogatena resničnost na spletu*, diplomsko delo, 2019, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=109944>, dostop: 10. 4. 2025.
- [6] Interaction Design Foundation, *What are VR Headsets?*, 2024, <https://www.interaction-design.org/literature/topics/vr-headsets>, dostop: 10. 4. 2025.
- [7] F. Simard, *Introduction to Smart Glasses – 2024 Tech Review*, 2024, <https://medium.com/antaeus-ar/introduction-to-smart-glasses-2024-tech-review-d871e7d95cb8>, dostop: 9. 4. 2025.
- [8] Wikipedia, *Pose tracking*, https://en.wikipedia.org/wiki/Pose_tracking, dostop: 9. 4. 2025.
- [9] VectorNav Technologies, *Learn about MEMS accelerometers, gyroscopes, and magnetometers*, 2025, <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-mems>, dostop: 30. 4. 2025.
- [10] Wikipedia, *Sensor fusion*, https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_fusion, dostop: 9. 4. 2025.
- [11] K. Raaen in I. Kjellmo, *Measuring Latency in Virtual Reality Systems*, 14th International Conference on Entertainment Computing (ICEC), Trondheim, Norway (2015), 457–462.
- [12] Wikimedia Commons, *Wave Polarisation (animated GIF)*, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave_Polarisation.gif, dostop: 27. 12. 2025.
- [13] I. Drevenšek Olenik in M. Vilfan, *Optika*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2023.
- [14] Wikimedia Commons, *Fresnel lens*, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel_lens.svg, dostop: 9. 4. 2025.
- [15] C. Jiang, Y. Omuro, J. She, J. Nan in M. Liu, *Improving the quality of Fresnel VR lenses by creating extra room for trapped air and evaluating slope angle*, *Optik* **288** (2023), 171–200.
- [16] D. V. Vorobiev, *Imaging Polarimetry with Polarization-Sensitive Focal Plane Arrays*, doktorska disertacija, 2017, <https://ridl.cfd.rit.edu/products/theses%20and%20senior%20projects/Dmitry%20Vorobiev%20Imaging%20Polarimetry%20with%20Polarization-Sensitive%20Focal%20Plane%20Array.pdf>, dostop: 7. 3. 2026.
- [17] M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt, A. J. Ouderkerk, *Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors*, *Science* **287**(5462) (2000), 2451–2456.
- [18] A. Maimone in J. Wang, *Holographic optics for thin and lightweight virtual reality*, *ACM Trans. Graph.* **39** (2020), 4, 67:1–67:14.
- [19] T. Smigla, *Fresnel vs. Pancake Lenses For VR – Which Ones Are Better?*, <https://techtactician.com/fresnel-vs-pancake-lenses-for-vr-which-ones-are-better/>, dostop: 9. 4. 2025.

- [20] X. Xia, F. Y. Guan, Y. Cai in N. Magnenat Thalmann, *Challenges and Advancements for AR Optical See-Through Near-Eye Displays: A Review*, *Frontiers in Virtual Reality* **3** (2022).
- [21] Y. Ding, Q. Yang, Y. Li, Z. Yang, Z. Wang, H. Liang in S.-T. Wu, *Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges*, *eLight* **3**, 24 (2023), <https://elicht.springeropen.com/articles/10.1186/s43593-023-00057-z>, dostop: 9. 4. 2025.
- [22] Caroline, *AR Navigation: Transforming Your Journey with Augmented Reality*, <https://tryon.kivisense.com/blog/ar-navigation/>, dostop: 9. 4. 2025.
- [23] J. Berg, *J&J Institute rolling out VR headsets to train surgeons*, <https://medcitynews.com/2020/02/jj-rolling-out-vr-headsets-to-train-surgeons/>, dostop: 9. 4. 2025.
- [24] M. Anderson, *Smart Glasses: Construction + Smart Safety Glasses Explored*, <https://onekeyresources.milwaukeeetool.com/en/smart-glasses-in-construction>, dostop: 9. 4. 2025.
- [25] S. Joseph, *How Ikea is using augmented reality*, <https://digiday.com/media/ikea-using-augmented-reality/>, dostop: 9. 4. 2025.
- [26] Field Service USA, *Boeing's AR Service Strategy For Maintenance Training*, (2020), <https://fieldserviceusa.wbresearch.com/boeing-ar-technology-strategy-maintenance-training-transform-ty-u>, dostop: 9. 4. 2025.
- [27] M. Vacková, P. Lošonczi, J. Drotárová in L. Kováčová, *The Use of Virtual Reality Resources to Increase Safety in the Training of Fire and Rescue Corps Units*, *Security Dimensions* **27** (2018), 126–138.