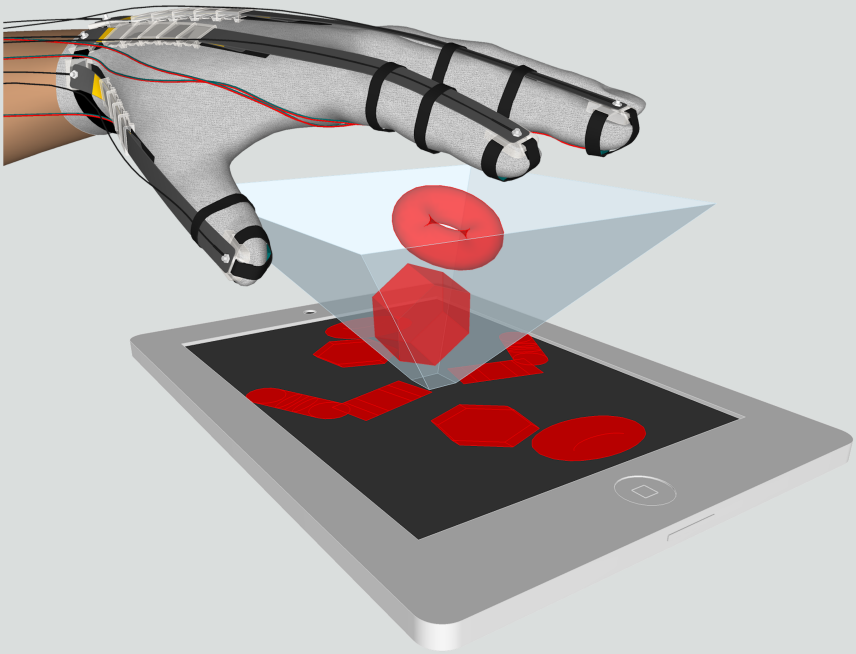
Zariadenia pre rozšírenú a virtuálnu realitu



Róbert Bohdal

Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Bratislava, 2020

Zariadenia pre rozšírenú a virtuálnu realitu

Róbert Bohdal

Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Bratislava, 2020

Publikácia vydaná v rámci grantu KEGA 012UK-4/2018 *CEPENSAR*

Recenzenti:	doc. Ing. Martin Šperka, PhD.
	prof. Ing. Veronika Stoffová, CSc.
Jazyková úprava:	doc. RNDr. Andrej Ferko, PhD.
Návrh obálky:	Róbert Bohdal
Sadzba:	Róbert Bohdal
Vydavateľ:	Knižničné a edičné centrum FMFI UK Bratislava

© RNDr. Róbert Bohdal, PhD.

ISBN 978-80-8147-097-4

Obsah

Úvod **9**

1 História zariadení pre AR a VR **11**

2 Technológie displejov **15**

2.1 Displeje s katódovou trubicou 15

2.2 LCD displeje 17

2.3 OLED displeje 21

2.4 Ostatné technológie 23

3 Zariadenia zobrazujúce priestorový obraz **27**

3.1 Stereoskopická projekcia a stereoskopické displeje 28

3.1.1 Anaglyfy 29

3.1.2 Stereoskopická projekcia 30

3.1.3 Stereoskopické displeje 32

3.2 Autostereoskopické displeje 36

3.2.1 Displeje využívajúce paralaxovú bariéru 36

3.2.2 Displeje využívajúce ohyb (refrakciu) svetla 37

3.2.3 Displeje využívajúce časovú uzávierku 38

3.3 Objemové (volumetrické) displeje 40

3.3.1 Objemové displeje so statickou zobrazovacou časťou . . 41

3.3.2 Objemové displeje s rotačnou plochou 44

3.4 Holografické displeje 45

3.4.1 Elektro-holografické displeje 47

3.5 Pseudo-3D displeje 50

4 Projektory **53**

4.1 CRT projektory 54

4.2 LCD projektory 55

4.3 LCoS projektory 56

4.4 DLP projektory 58

5 Náhlavné displeje a okuliare pre rozšírenú realitu 63

5.1 Náhlavné displeje 64

5.2 Okuliare pre rozšírenú realitu 65

5.3 Projekčné priehľadové displeje 70

6 Vstupné zariadenia pre AR a VR aplikácie 71

6.1 Klávesnice 72

6.2 Myši 73

6.3 Pákové ovládače 75

6.4 Dotykové panely 76

6.5 Obrazové snímače 78

6.6 Snímače pohybu a polohy 79

6.6.1 GPS prijímač 80

6.6.2 Inerciálne senzory 81

6.6.3 Optické snímače polohy 84

6.6.4 Elektromagnetické snímače polohy 88

6.6.5 Akustické snímače polohy 89

6.7 Haptické zariadenia 89

6.7.1 Hmatové haptické zariadenia 90

6.7.2 Kinestetické haptické zariadenia 92

6.7.3 Hybridné HZ 94

7 Simulátory pohybu pre virtuálnu realitu 97

7.1 Pohyblivé simulátory pohybu 98

7.2 Statické simulátory pohybu 100

7.3 Iné simulátory pohybu 102

8 Zvukové zariadenia 107

8.1 Reproduktory 108

8.1.1 Dynamické reproduktory 108

8.1.2 Piezoelektrické reproduktory 109

8.1.3 Elektrostatické reproduktory 110

8.2 Mikrofóny 111
8.2.1 Dynamické mikrofóny 112
8.2.2 Kondenzátorové a elektretové mikrofóny 113
8.2.3 Piezoelektrické mikrofóny 114

Záver **117**

Literatúra **119**

Zdroje obrázkov **125**

Register pojmov **127**

Register objaviteľov a vynálezcov **133**

Anglicko-slovenský slovník vybraných pojmov **135**

Slovník skratiek **137**

Zoznam obrázkov

1.1 Wheatstonov stereoskop a Brewsterov stereoskop 11
1.2 Mark IID, gyroskopický zameriavač 12
1.3 Virtual Fixtures 13

2.1 Schéma displeja s katódovou trubicou 16
2.2 Funkcia tieňovej masky 16
2.3 Princíp polarizačného filtra 18
2.4 Schéma LCD displeja 18
2.5 Pasívna vs. aktívna matica ovládania LCD 19
2.6 Schéma OLED displeja 22
2.7 Schéma E ink technológie 24
2.8 Schéma ClearInk displeja 25

3.1 Okuliare pre anaglyfy a príklad obrázku anaglyfu 30
3.2 Svetelné vlny prechádzajúce kruhovým polarizátorom 31
3.3 Princíp interferenčného úzkopásmového filtra 32
3.4 Schéma stereoskopickej projekcie s technológiou Dolby 3D . . 33
3.5 Zobrazované párne snímky obrazu v prvej 1/120 sekundy . . . 34
3.6 Zobrazované nepárne snímky obrazu v druhej 1/120 sekundy . 35
3.7 Princíp stereoskopického displeja s dvomi obrazovkami 35
3.8 Princíp paralaxovej bariéry 37
3.9 Princíp lentikulárneho displeja 38
3.10 Displej s časovou uzávierkou 39
3.11 Konflikt akomodácie-konvergencie očí 40
3.12 Príklad multivrstvového 3D displeja s LC panelmi 43
3.13 Princíp objemového displeja s rotačnou plochou 45
3.14 Princíp vytvorenia hologramu 46
3.15 Príklad interferenčných prúžkov 47
3.16 Rekonštrukcia hologramu 47
3.17 Princíp elektro-hologramu 49
3.18 Príklad pseudo-3D displeja 51

4.1 Príklad CRT projektoru 54
4.2 Schéma LCD projektora s dvomi laserovými zdrojmi svetla . . 56
4.3 Schéma LCoS projektora 57
4.4 Schéma DLP projektora 58
4.5 Detail DMD čipu 59
4.6 Príklady kotúčov s farebnými filtrami 61

5.1 Google Glass a Microsoft HoloLens 63
5.2 Oculus Rift 65
5.3 Princíp fungovania okuliarí pre AR 66
5.4 Planárny, sférický a free-form optický zlučovač 67
5.5 Optický zlučovač s holografickým vlnovodom 68
5.6 Headset Gear VR pre smartfón Samsung Galaxy 69

6.1 Vnútorná vrstva mechanickej klávesnice s membránou 73
6.2 Jeden kláves mechanickej klávesnice 73
6.3 Schéma mechanickej myši 74
6.4 Princíp pákového ovládača 75
6.5 Príklad herného pákového ovládača 76
6.6 Rez odporovým dotykovým panelom 77
6.7 Princíp akusticko-vlnového dotykového panelu 77
6.8 Príklad usporiadania subpixelov v CCD a CMOS senzore . . . 78
6.9 Microsoft Kinect a jeho nová verzia 2.0 79
6.10 Princíp akcelerometra 82
6.11 Efekt Coriolisovej sily na pohybujúci sa objekt 83
6.12 Princíp gyroskopu 83
6.13 Princíp elektronického kompasu 84
6.14 Komponenty svetelných majákov HTC 86
6.15 Princíp určovania polohy v zariadení HTC Vive 87
6.16 Určenie polohy bodov metódou epipolárnej geometrie 87
6.17 Princíp vibrátora využívajúceho elektrický motor 91
6.18 Princíp manipulanda a komerčný produkt Novint Falcon . . . 93
6.19 Úchopové zariadenie Wolverine 93
6.20 Hybridné haptické zariadenie DextrES Glove 95
6.21 Detail elektrostatickej brzdy v rukavici DextrES Glove 95

6.22 Hybridné haptické zariadenie HaptX Glove 96
6.23 Detail haptických prvkov v rukavici HaptX Glove 96

7.1 Simulátor pohybu Omnideck 98
7.2 Princíp činnosti simulátora pohybu Infinadeck 99
7.3 SpaceWalkerVR 99
7.4 Aperium K-01 Pod 100
7.5 Virtuix Omni 101
7.6 Cyberith Virtualizer Elite 2.0 102
7.7 Simulátor pretekárskeho auta 103
7.8 Simulátor pohybu Yaw VR 104
7.9 Pohyblivá plošina so 6 stupňami voľnosti 104
7.10 Simulátor lietania Birdly 105
7.11 Icaros Home – simulátor lietania 106

8.1 Schéma dynamického reproduktoru 109
8.2 Princíp piezoelektrického reproduktoru 110
8.3 Princíp elektrostatického reproduktoru 111
8.4 Príklad elektrostatického reproduktoru 112
8.5 Schéma dynamického mikrofónu 113
8.6 Schéma kondenzátorového a elektretového mikrofónu 114

Úvod

S nástupom nových, dokonalejších a cenovo prístupnejších technológií, najmä miniatúrnych kamier a displejov, snímačov polohy a náhlavných displejov (*head-mounted displays* – HMD), sa po viacerých rokoch vrátil záujem o virtuálnu realitu (VR). Rozšírená realita (AR) vstúpila na platformu mobilných zariadení (mobilné telefóny a tablety) a stala sa atraktívnou pre veľké množstvo používateľov vďaka obrovskému počtu nových aplikácií, z ktorých sa najznámejšou stala Pokémon GO. V súčasnosti už existuje pomerne veľa výrobcov zariadení pre VR a AR. Medzi najznámejšie zariadenia nesporne patrí Oculus Rift, HTC Vive, Google Glass a Microsoft HoloLens.

Súčasné tablety a mobilné telefóny ponúkajú dostatočný výpočtový výkon na to, aby sa mohli využívať v oblasti virtuálnej a rozšírenej reality. Pre plnohodnotný zážitok vo VR je dobré použiť nielen náhlavný displej, ale aj pohybový ovládač (*controller*) alebo dátovú rukavicu (*data glove*), či niektoré z haptických zariadení. V súčasnosti zobrazujú displeje väčšinou iba 2D obraz. Sú však už vytvorené prototypy zobrazovacích zariadení, ktoré umožňujú zobraziť aj priestorový obraz. Ako kompromis k tejto technológií budúcnosti slúžia dnes stereoskopické a autostereoskopické displeje používané v náhlavných displejoch a v 3D televízoroch. Rozvoj týchto technológií bol možný vďaka výraznému pokroku v mikroelektronike, pretože súčasné mobilné zariadenia, smartfóny a tablety, majú výpočtový výkon porovnateľný alebo dokonca vyšší, ako výkonné grafické stanice a superpočítače používané pred tridsiatimi rokmi, ktoré vypočítavali a zobrazovali „realistický“ obraz v reálnom čase.

Našim cieľom je ukázať, že aj keď sú súčasné technológie používané vo VR/AR zariadeniach komplikované, využívajú pomerne jednoduché princípy. Mnohí ľudia nechcú tieto zariadenia len používať, ale chcú aj vedieť, ako fungujú. Táto publikácia môže poslúžiť aj učiteľom, aby mohli študentom odpovedať na technické otázky VR/AR zariadení a podnietiť záujem o štúdium technických odborov, pretože technika sa dnes veľmi rýchlo vyvíja a neustále sa vymýšľajú a vytvárajú nové zariadenia.

Úlohou našej práce je jednoduchou formou, stručne, bez zložitých pojmov vysvetliť, ako fungujú najčastejšie používané zariadenia vo VR/AR, aby tomu porozumel aj čitateľ bez technického vzdelania a súčasne získal prehľad, aké zariadenia sa používajú. Nebudeme zdôrazňovať rozdiely medzi zariadeniami

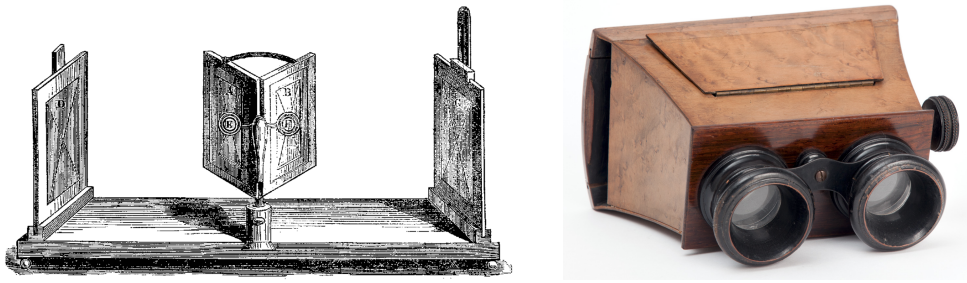
pre virtuálnu či rozšírenú realitu, pretože mnohé z nich využívajú rovnakú technológiu, alebo dokonca používajú úplne rovnaké zariadenia.

Každý pokrok sa začína nejakým objavom či vynálezom s jeho následným rozšírením do bežného života. Rovnako je tomu aj u VR/AR zariadení. Preto je prvá kapitola práce zameraná na ich históriu. Súčasne má možnosť čitateľ porovnať rozdiel medzi aktuálne používanými zariadeniami a ich prvými prototypmi. Druhá kapitola opisuje najpoužívanejšie technológie používané v displejoch – LCD (*liquid crystal displays*) a OLED (*organic light-emitting diode*). Aj keď majú OLED displeje lepší obraz ako LCD, ich vývoj je ešte stále na začiatku, a preto majú vyššiu cenu. Tretia kapitola opisuje zariadenia umožňujúce zobrazovať priestorový obraz. Väčšina z nich, až na stereoskopické displeje, sú len prototypy alebo sú cenovo neprístupné bežnému používateľovi. Štvrtá kapitola zoznamuje čitateľa s technológiami bežne používaných projektorov, ktoré sa využívajú nielen na premietanie obrazu či slúžia ako náhrada televízorov, ale sa vyskytujú aj v náhlavných displejoch a v okuliaroch pre rozšírenú realitu. Piata kapitola je venovaná stále viac dostupnejším náhlavným displejom a okuliarom pre rozšírenú realitu (*optical head-worn displays* – OHWD), ktoré sú využívané nielen pri hraní hier ale aj v celom rade priemyselných odvetví. Šiesta kapitola opisuje vstupné zariadenia pre AR a VR aplikácie, medzi ktoré patria klávesnice, myši a pákové ovládače, ktoré sa používajú pri hraní hier na stolných počítačoch, ale aj dotykové panely, obrazové snímače, snímače pohybu a polohy, ktoré sú využívané najmä v mobilných zariadeniach. Na konci šiestej kapitoly čitateľ ešte nájde stručný opis haptických zariadení, pomocou ktorých je možné simulovať dotyk s objektmi vo virtuálnej realite. Niektoré z nich sú komerčne dostupné, ale cena tých sofistikovanejších je veľmi vysoká. Predposledná časť je venovaná simulátorom pohybu, z ktorých väčšina je stále ešte vo fáze vývoja. Niekoľko z nich je komerčne dostupných, avšak kvôli vysokej cene, veľkej hmotnosti a objemu, nemôžu byť používané v bežných domácnostiach. Posledná časť opisuje princíp reproduktorov a mikrofónov, ktoré sú využívané nielen pre komunikáciu medzi ľuďmi či virtuálnymi asistentmi, ale aj pre ovládanie rôznych zariadení hlasovými povelmi.

1 História zariadení pre AR a VR

História zariadení pre rozšírenú realitu je spojená s históriou zariadení pre virtuálnu realitu, pretože veľká väčšina týchto zariadení sa využíva v oboch oblastiach.

K prvým zariadeniam zobrazujúcim „virtuálny“ obraz patrí *stereoskop*, ktorý vynašiel britský vedec Charles Wheatstone v roku 1838. V roku 1870 ho vylepšil ďalší britský vedec David Brewster. Namiesto zrkadiel použil šošovky, a preto jeho stereoskop mal oveľa kompaktnejší tvar (pozri obr. 1.1) (Thompson, 2017).



Obr. 1.1: Wheatstonov stereoskop (Nassiri, 2014) a Brewsterov stereoskop (Figuier, 1869)

Ďalší príklad využitia zariadenia prenášajúceho obraz môžeme nájsť na začiatku 40. rokov 20. storočia v lietadlách Britského Royal Air Force. V tomto lietadle bola použitá myšlienka priehľadového displeja (*head-up display* – HUD), v ktorom sa obraz radaru premietal na priesvitné sklo umiestnené pred čelným sklom kokpitu lietadla (pozri obr. 1.2). Vďaka tomuto riešeniu neboli piloti vyrušovaní jasným svetlom displeja radaru počas bojov v noci. Táto myšlienka sa aj dnes používa v navigačných softvéroch mobilov, ktorých obraz sa počas nočnej jazdy odráža na čelné sklo automobilov (Maroto et al.,

2018).

Obr. 1.2: Mark IID, gyroskopický zameriavač (Broom R R (Plt Off), 1944)

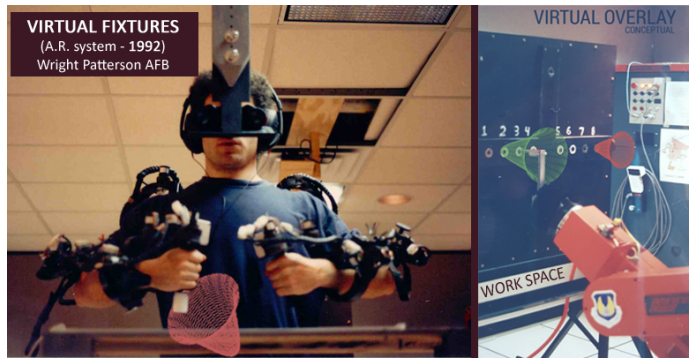
Medzi rokmi 1957 a 1962 zostrojil americký kameraman Morton Heilig prvé zariadenie pre virtuálnu realitu v podobe skrinky o veľkosti človeka s názvom *Sensorama*. Sensorama premietala film pomocou malého stereoskopického projektora a s využitím rôznych zariadení stimulovala ďalšie zmysly, ako sluch (stereozvuk), hmat (vibrácie a prúdenie vzduchu) a dokonca aj čuch (arómy). Tento prístroj však neumožňoval žiadnu interakciu s práve sledovaným filmom a skončil iba vo fáze prototypu. Morton Heilig skonštruoval aj prvý náhlavný displej s názvom „*Telesphere Mask*“, ktorý obsahoval dvojicu miniatúrnych televíznych obrazoviek (Boas, 2013).

Koncept náhlavného displeja vylepšila v roku 1961 spoločnosť Philco o systém, ktorý umožňoval sledovať polohu hlavy. Tento displej však bol využívaný iba pre vojenské účely a nezobrazoval virtuálny ale reálny obraz. Neskôr, v roku 1968 skonštruoval americký profesor Ivan Sutherland VR systém „*Sword of Damocles*“, ktorý pozostával z náhlavného displeja používajúceho priehľadovú optiku, snímača polohy a počítača. Keďže zariadenie bolo ťažké, muselo byť zavesené na ramene ukotvenom na strope laboratória. Výpočtový výkon vtedajších počítačov nebol veľký, a preto scéna vo virtuálnej realite pozostávala iba z čiarových obrazov (*wireframe*) 3D modelov (Schmalstieg et al., 2016).

Americký výskumník Myron Krueger so svojimi spolupracovníkmi vytvoril v polovici 70. rokov laboratórium umelej reality s názvom *Videoplace*. Videoplace používalo projektory, video kamery a špeciálny hardvér, aby zobrazovalo siluety reálnych postáv v interaktívnom virtuálnom prostredí. Aj keď sa

používatelia nachádzali v rôznych miestnostiach, mohli cez toto interaktívne prostredie spolu komunikovať a tiež ovplyvňovať objekty virtuálneho prostredia. Pokroky v oblasti počítačov na konci 80. rokov umožnili Kruegerovi a jeho spolupracovníkom experimentovať s mnohými konceptmi interakcie človeka s počítačmi generovaných objektov a scén (Krueger et al., 1985).

V 90. rokoch už AR nebola doménou vedcov zaoberajúcich sa počítačovou grafikou a dostala sa do ďalších oblastí – medicíny, vojenskej techniky, umenia a ďalších. V roku 1992 sa v práci Thomasa Caudella a Davida Mizella pre firmu Boeing prvýkrát objavil pojem rozšírenej reality. Obaja vedci spolupracovali na vývoji systému, ktorý pomocou náhlavného displeja umožňoval zefektívniť a zjednodušiť prácu robotníkom pri montáži lietadiel, aby nemuseli neustále nahliadať do rozsiahlych výkresov a schém (Caudell et al., 1992). V tom istom roku vytvoril Američan Louise Rosenberg prvý systém vnorenej rozšírenej reality „*Virtual Fixtures*“ (obr. 1.3), v ktorom používateľ pomocou pohybu ramien exoskeletu ovládal na diaľku ramená robota a vďaka haptickému senzoru cítil obmedzenia v pohybe ramien. Systém zobrazoval aj počítačom generované pomocné objekty, ktoré asistovali používateľovi pri vykonávaní reálnych fyzických úloh (Rosenberg, 1993).



Obr. 1.3: Virtual Fixtures (Trends, 1992)

O rok neskôr, traja americkí vedci – Steven Feiner, Blair Macintyre a Dorée Seligmann vytvorili ďalší prototyp rozšírenej reality *KARMA* (*Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance*), ktorý pomocou priehľadovej optiky v náhlavnom displeji zobrazoval virtuálny 3D obsah s nákresom a inštrukciami pre obsluhu laserovej tlačiarne (Feiner et al., 1993). V roku 1994 Julie Martin vytvorila prvé AR divadelné predstavenie „*Dancing in Cyberspace*“, v ktorom umelci tancovali okolo virtuálnych objektov na reálnom javisku. 27. septembra 1998 zobrazila americká televízna spoločnosť *Sportvision* vo vysielaní futbalového zápasu žltý pás, aby fanúšikovia pozerajúci zápas na televízoroch uvideli presný okamih, keď lopta prešla do

brány. V súčasnosti sa rôzne doplňujúce značky a informácie používajú takmer v každom športovom vysielaní. V tom istom roku, na univerzite North Carolina v Chapel Hill, prezentovali lekársku AR aplikáciu, umožňujúcu lekárovi pozorovať plod v tehotnej pacientke. Americká agentúra NASA vo svojom prototype záchranného lietadla X-38 počas testovacieho letu v roku 1999 zobrazila počítačom generovanú mapu pristávacej dráhy, doplnenú o letecké a meteorologické informácie aj so zvýraznenými prekážkami v dráhe letu (iGreet, 2017). Až do roku 1999 nebol k dispozícii žiadny AR softvér mimo špecializovaných výskumných laboratórií. Táto situácia sa zmenila, keď Hirokazu Kato a Mark Billinghurst v roku 1999 vydali prvú softvérovú platformu s otvoreným zdrojovým kódom pre AR s názvom *ARToolKit*, ktorá okrem iného používa *videotracking*, aby doplnila počítačom vytvorený objekt k obrazu snímaného webkamerou. Táto knižnica sa stále používa v rôznych oblastiach AR (Kato et al., 1999).

Po roku 2000, najmä s príchodom tabletov a smartfónov, sa AR stala dostupnou pre široké masy obyvateľstva. Svoje využitie si našla v rôznych odvetviach, v hernom priemysle, v školstve, v medicíne, v strojárenstve a v mnohých iných. V poslednom čase sa AR dostala aj do automobilového priemyslu, nielen v podobe rôznych asistentov jazdy (satelitná navigácia, systém výstrah, atď.) ale aj ako pomocník pre technikov v servisoch. V roku 2013 predstavila Google svoju novinku Google Glass a o tri roky neskôr Microsoft uviedol HoloLens, okuliare pre rozšírenú realitu nazývané aj „inteligentné okuliare“ (*smart glasses*), ktoré na svojom integrovanom displeji zobrazujú rozličný virtuálny obsah a s využitím vstavanej kamery umožňujú nielen snímať okolitý obraz ale i ovládať zobrazovaný obsah gestami rúk. V súčasnosti je trh s náhlavnými displejmi a okuliarmi pre rozšírenú realitu pomerne široký a existuje niekoľko desiatok ich výrobcov. Rozšírená realita sa stala veľmi populárna a čoraz častejšie používaná, aj keď si mnohokrát neuvedomujeme, že ju využívame. Príkladom je veľmi populárna hra Pokémon Go, uvedená v roku 2016.

2 Technológie displejov

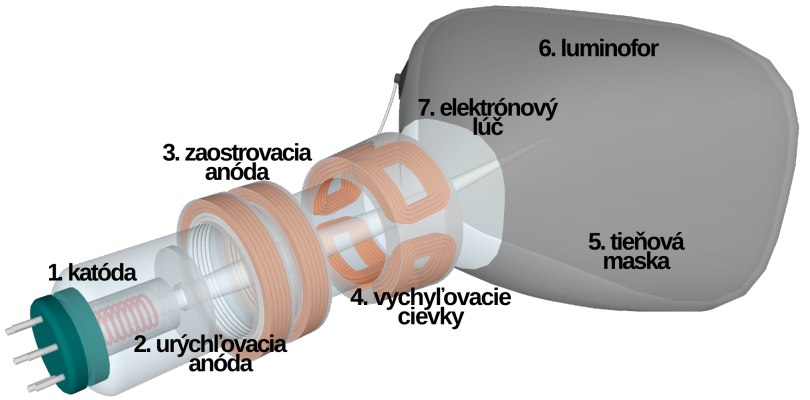
V súčasnosti sa v displejoch zariadení pre AR/VR takmer výhradne používajú tri technológie, a to LCD (*liquid crystal display*), OLED (*organic light emitting diode*) a EInk (*electronic ink*). V minulosti sa pomerne dlhý čas, vyše 60 rokov, používali displeje s katódovou trubicou (*cathode ray tube* – CRT), ktoré na konci 20. storočia boli nahradené LCD technológiou. Približne desať rokov sa používali aj plazmové displeje, ktoré sa začali komerčne využívať najmä v televízoroch väčších uhlopriečok po roku 2000. Keďže o ne nebol veľký záujem, tak sa v roku 2014 ich výroba ukončila (Goldman et al., 2014). OLED technológia sa masovo rozšírila až po roku 2003, keď firma Kodak uviedla digitálny fotoaparát s 2,2 palcovým OLED displejom. O pár rokov neskôr, v roku 2008, bol na trh uvedený prvý komerčne predávaný televízor Sony XEL-1 využívajúci OLED technológiu.

Väčšina typov súčasných displejov je tvorená farebnými bodmi (pixelmi). Každý pixel je zložený z trojice RGB (*red*, *green*, *blue*) subpixelov. Niektoré technológie používajú aj štvrtý subpixel určený pre ďalšiu farebnú zložku, zvyčajne bielu alebo žltú.

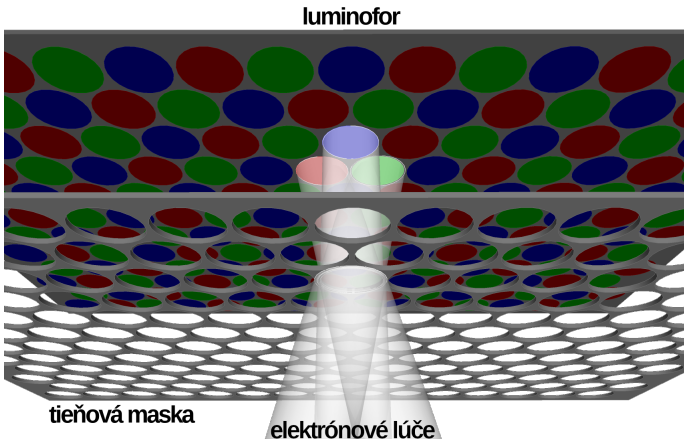
2.1 Displeje s katódovou trubicou

Využitie elektrónov v displejoch s katódovou trubicou, ktoré sú známe aj pod názvom CRT displeje, umožnil objav nemeckého fyzika Heinricha Geisslera, keď v roku 1855 ukázal, že vákuová trubica, naplnená zriedeným plynom, sa po pripojení na zdroj elektrického prúdu rozžiari. Neskôr, v roku 1878 anglický fyzik William Crookes ukázal, že katódové lúče obsahujú častice (elektróny), ktoré sa šíria priamočiaro, neprechádzajú kovom a nesú elektrický náboj, ktorý je možné magnetickým poľom odkloniť. Prvý displej s katódovou

trubicou bol malý osciloskop, známy pod názvom „Braunova trubica“, ktorú vynašiel nemecký fyzik Ferdinand Braun v roku 1897. Trvalo ešte mnoho rokov pokým firma Du Mont v roku 1931 začala s prvou komerčnou výrobou obrazoviek s katódovou trubicou (Dijkstra, 2018).



Obr. 2.1: Schéma displeja s katódovou trubicou



Obr. 2.2: Funkcia tieňovej masky

Displeje s katódovou trubicou tvorí sklenená vákuová trubica (pozri obr. 2.1), v ktorej lúč elektrónov (7) vytvorený pomocou žeraviaceho vlákna – katódy (1), urýchlený a zaostrený anódou (2, 3), vychýlený pomocou vychyľovacích cievok (4) prechádza cez tieňovú masku (5) a dopadá na luminoforovú vrstvu (6). V okamihu, keď elektróny dopadnú na luminofor, vyvolajú fosforescenciu, v ktorom sa kinetická energia elektrónov premení na viditeľné svetlo vo forme fotónov. Pri farebných displejoch s katódovou trubicou sa používajú tri elektrónové lúče, pre každú farebnú zložku jeden. Tieňová maska

zabezpečuje, aby každý elektrónový lúč dopadol iba na príslušný farebný luminoforový bod[1] – subpixel (pozri obr. 2.2) (Brain, 2006). Zatiaľ čo luminoforová vrstva v čierno-bielych displejoch je tvorená jediným druhom luminoforu, vo farebných displejoch je tvorená veľkým počtom skupiniek bodov. Každá skupinka pozostáva z trojice rôznych luminoforových bodov, ktoré emitujú červené, zelené alebo modré svetlo. Obraz v týchto displejoch je vykresľovaný postupne, po bodoch, keďže pre každý obrazový bod je treba trojicu elektrónových lúčov vychýliť na iné mesto. Body sú vykresľované zľava doprava, riadok za riadkom, až pokým je vykreslený posledný bod v pravom dolnom rohu displeja. Vykreslenie všetkých bodov na obrazovke trvá veľmi krátko, približne stotinu sekundy, zvyčajne podľa toho aké je rozlíšenie displeja. Intenzita zobrazovaného bodu je ovplyvňovaná riadiacou mriežkou, ktorá sa nachádza za žeraviacim vláknom a riadi množstvo elektrónov v každom z troch elektrónovych lúčov. Čím je v lúči elektrónov menej, tým je zobrazovaný subpixel tmavší.

Pretože displeje s katódovou trubicou majú veľkú spotrebu elektrickej energie, vyžarujú veľa škodlivého elektromagnetického žiarenia, obraz v rohoch displeja nie je dostatočne ostrý[2] a zaberajú veľký priestor, dnes sa už takmer nepoužívajú. Medzi ich prednosti patrí to, že zobrazujú širokú farebnú škálu, majú dobrý kontrast a široký pozorovací uhol.

2.2 LCD displeje

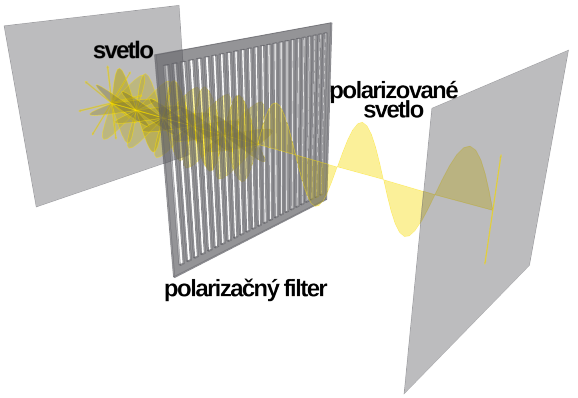
LCD displeje majú oproti displejom s katódovou trubicou výhodu v nižšej spotrebe energie, vyžarujú menej škodlivého žiarenia, a umožňujú výrobu plochých displejov v hrúbke niekoľko milimetrov.

História LCD displejov sa začala v roku 1888, keď rakúsky chemik Friedrich Rienitzer objavil prírodný tekutý kryštál v cholesterole získanom z mrkvy. Pri zvyšovaní teploty roztoku cholesterolu pozoroval zmenu zakalenej tekutiny na číru, ktorá sa po ochladení opäť zakalila. V roku 1962 americký výskumník Richard Williams objavil elektro-optické vlastnosti tekutého kryštálu a o dva roky neskôr americký elektrotechnik George Heilmeier vytvoril prvý displej z tekutých kryštálov. Od roku 1970 sa displeje z tekutých kryštálov začali používať v displejoch kalkulačiek a náramkových hodiniek. Farebné LCD displeje sa v televízoroch, monitoroch a projektoroch začali využívať od 80.

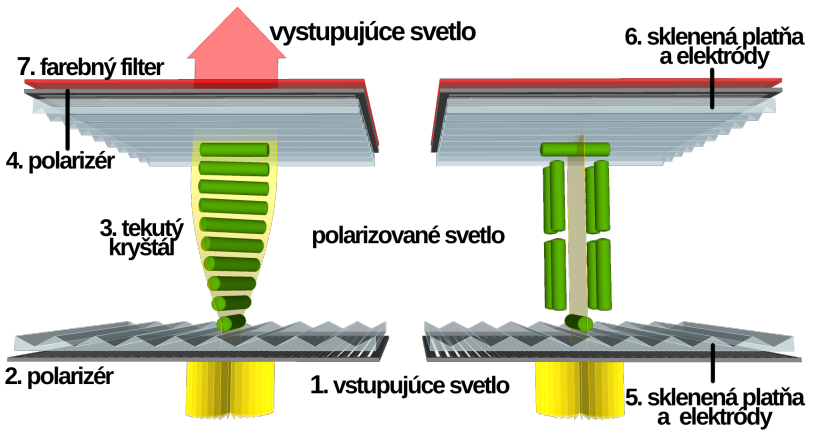
[1] Vo farebných CRT displejoch je luminofor tvorený tromi rôznymi chemickými látkami.

[2] Keďže je povrch obrazovky plochý, zaostrovacia anóda musí dynamicky meniť ohnisko, aby bol elektrónový lúč vždy zaostrený na bod, ktorý sa práve zobrazuje.

rokov 20. storočia (Bellis, 2017).



Obr. 2.3: Princíp polarizačného filtra



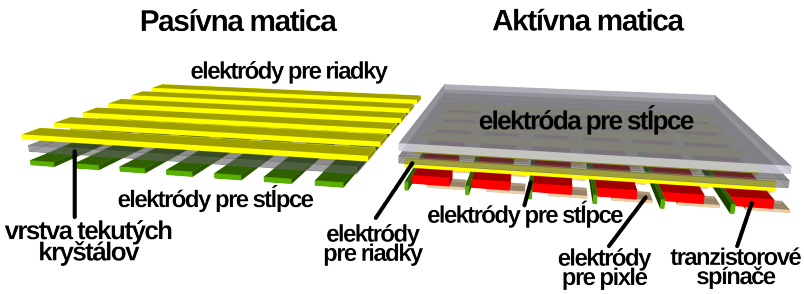
Obr. 2.4: Schéma LCD displeja

LCD displej (pozri obr. 2.4) tvorí tenká vrstva tekutých kryštálov[3], ktorá je umiestnená medzi dvomi lineárnymi polarizačnými filtrami[4] (pozri obr. 2.3). Vrstva tekutých kryštálov mení vplyvom elektrického napätia svoju usporiadanú štruktúru a určuje množstvo prechádzajúceho svetla. LCD displej ďalej obsahuje zdroj svetla, keďže tekuté kryštály nevyžarujú svetlo priamo. Ako zdroj sa najskôr používali tenké neónové trubice, ktoré ale boli veľmi nepraktické kvôli tvaru a veľkosti. V dnešných monitoroch sa používajú diódy emitujúce svetlo, ktoré rovnomerne pokrývajú buď celú zadnú plochu panelu, alebo sú iba na okraji displeja (*edge-lit*). Svetlo, ktoré produkujú, je cez

[3] Tekuté kryštály sú zložené zo zmesi rôznych organických látok, podľa druhu a použitia LCD.
[4] Keďže je svetlo elektromagnetické vlnenie, kmitá vo všetkých smeroch. Lineárny polarizačný filter prepustí iba vlnenie, ktoré kmitá v rovine rovnobežnej s optickou rovinou polarizačného filtra.

difúznu vrstvu a matnicu (*light guide layer*) rovnomerne rozptýlené po zadnej ploche displeja. LCD ešte obsahujú elektródy, ktoré ovplyvňujú jednotlivé segmenty (body, resp. pixely) displeja.

Princíp fungovania spočíva v tom, že svetlo vytvárané LED diódami (1) najskôr prechádza polarizačným filtrom (2). Takto polarizované svetlo ďalej prechádza vrstvou tekutých kryštálov (3) usporiadaných do skrutkovej plochy, ktoré postupne otočia rovinu polarizácie prechádzajúceho svetla o 90 stupňov (pozri obr. 2.4 vľavo). Nakoniec toto svetlo prechádza cez druhý polarizačný filter (4), ktorý je kolmo natočený na prvý polarizačný filter (2). Pokiaľ je na interné elektródy (5, 6) privedené napätie, vytvorí sa medzi nimi elektrické pole, ktoré spôsobí, že sa molekuly tekutých kryštálov „narovnajú“ a prestanú otáčať prechádzajúce svetlo (pozri obr. 2.4 vpravo). Keďže rovina polarizácie výstupného filtra je na vstupný filter kolmá – „nenatočené“ svetlo ním neprejde a daný bod sa zobrazí ako „čierny“. Farba bodov sa dosiahne pridaním farebného filtra (7) s RGB poľom farebných mikroplôšiek, ktorý je obyčajne umiestnený tesne pred ochrannou vrstvou LCD panela. Odtieň – intenzita farby sa dosahuje zmenou elektrického napätia, ktoré ovplyvňuje stupeň pootočenia/narovnania do skrutkovice usporiadaných tekutých kryštálov (Tyson, 2000).



Obr. 2.5: Pasívna vs. aktívna matica ovládania LCD

Vývoj LCD panelov prešiel za posledných 50 rokov pomerne dlhú cestu, pričom sa postupne odstraňovali jednotlivé nedostatky. Vďaka pokroku v miniaturizácii sa namiesto jednoduchej siete elektród (*passive matrix*) začali používať polia tranzistorov (*active matrix*) (pozri obr. 2.5). Táto novšia technológia dostala názov TFT (*thin film transistor*) a umožnila ovládať intenzitu každého pixelu samostatne a zobrazovať obraz naraz, čím sa vyriešil problém pomalého vykresľovania bodov, keďže staršia TN (*twisted nematic*) technológia musela vykresľovať obraz postupne – po riadkoch. Miniaturizácia umožnila vyrobiť aj farebné displeje využívajúce farebné filtre, pričom sa každý, predtým monochromatický pixel, nahradil farebnou trojicou subpixe-

lov. Ďalej sa lepším usporiadaním (*vertical alignment*) štruktúry tekutých kryštálov v jednotlivých bunkách subpixelov zvýšil kontrast a dobré zobrazovanie farieb aj pri pohľade zo strán. Nakoniec sa pomocou IPS (*in plane switching*) technológie dosiahla lepšia reprodukcia farieb a aj širší pozorovací uhol, vďaka čomu môžeme pozorovať displej aj z veľmi ostrých uhlov. Ešte lepšie podanie farieb sa zabezpečilo podsvietením farebnými LED diódami.

V súčasnosti je najmodernejšia technológia *quantum dots*[5], v ktorej displej už neobsahuje farebný filter, ktorý zbytočne pohlcuje časť svetla, a preto displej s touto technológiou dosahuje vyššie rozlíšenie a spotrebuje menej energie pri porovnateľnej svietivosti displeja. Pre zlepšenie kontrastu v LCD paneloch sa používa tzv. dynamické podsvecovanie, ktoré mení intenzitu svetla vychádzajúcu z diód podľa toho či sa zobrazuje svetlý alebo tmavý obraz. LCD panely často umožňujú využiť aj tzv. lokálne stmievanie (*local dimming*), pri ktorom sa intenzita svetla vychádzajúceho z jednotlivých diód riadi individuálne. Výraznejšie zlepšenie kontrastu, t. j. zobrazovanie skutočne čiernej farby, sa v cenovo drahších modeloch displejov dosahuje tým, že podsvietenie zabezpečujú skupiny miniatúrnych LED diód pokrývajúcich celú zadnú plochu displeja (*full-array backlit*, resp. *direct-lit*), pričom každá z nich sa dá samostatne rozsvecovať a zhasínať. Individuálne podsvietenie pixelov sa dá dosiahnuť aj pridaním ďalšieho panelu s tekutými kryštálmi, ktorý sa vloží medzi difúznu vrstvu a prvý polarizačný filter na zadnej strane displeja. Pridaním tohto panelu je možné meniť intenzitu vstupujúceho svetla pre každý pixel zvlášť. Toto vylepšenie má ale jednu drobnú nevýhodu, tou je ďalšie pohlcovanie svetla vychádzajúceho z diód.

Súčasné LCD zobrazujú minimálne 256 odtieňov základných farieb – červenej, zelenej a modrej. Riadením snímkovej frekvencie displeja (*frame rate control* – FRC)[6], t. j. počtu zobrazovaných snímok za sekundu, je možné zobraziť aj viac ako 256 odtieňov.

Tekuté kryštály spôsobujú ešte ďalší problém, ktorý sa podarilo vyriešiť. Tým je pomalá reakcia, tzv. odozva (*latency*), na zmenu natočenia skrutkovice tekutých kryštálov, pri ich ovplyvňovaní elektrickým poľom. Tento problém spôsobuje rozmazanie obrazu rýchlo sa pohybujúceho objektu na obrazovke. Podarilo sa ju vyriešiť pomocou kompenzácie času odozvy (*response time compensation*), pri ktorej sa urýchľuje natočenie tekutých kryštálov aplikovaním krátkodobého impulzu vyššieho napätia na tranzistoroch riadiacich

[5] Quantum dots sú polovodičové nano-častice, ktoré konvertujú ultrafialové svetlo na viditeľné pomocou fotoluminiscencie. Vlnová dĺžka premeneného svetla je určená veľkosťou nano-častice.

[6] FRC je metóda na zobrazenie väčšej farebnej hĺbky, pri ktorej sa používa časový rozklad (*temporal dithering*). Ak sa vo veľmi rýchlom slede zobrazuje postupne biely a čierny bod, tak človek vo výsledku vidí stabilný, neblikajúci šedý bod.

veľkosť ich natočenia.

LCD displeje nájdeme takmer v každej oblasti spotrebnej elektroniky – v hodinkách, kalkulačkách, mobilných telefónoch, tabletoch, autonavigáciach, monitoroch počítačov, televízoroch, projektoroch a tiež aj v náhlavných displejoch. Oproti staršej technológii CRT displejov majú výhodu v tom, že sú oveľa menšie, majú mnohonásobne nižšiu spotrebu elektrického prúdu a nemajú problém s ostrosťou obrazu v rohoch obrazu. Na druhej strane však majú nižší kontrast, zobrazujú menej odtieňov farieb a majú dlhší čas odozvy.

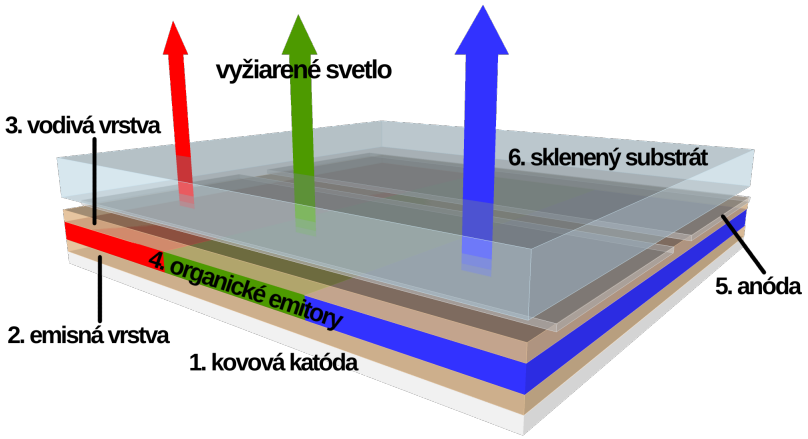
2.3 OLED displeje

Technológia OLED patrí v súčasnosti medzi najmodernejšie. Podobne ako LCD, aj táto technológia umožňuje výrobu plochých displejov, avšak s hrúbkou oveľa menšou než 1 milimeter. Tieto displeje môžu byť nielen ohybné ale aj transparentné. Táto technológia má stále jeden nedostatok, ktorým je vypaľovanie pixelov, t. j. postupné zoslabovanie intenzity svietenia jednotlivých subpixelov. Najväčší problém v súčasnosti predstavuje modrá organická zložka, ktorej životnosť, ale aj efektivita svietenia nie je na žiadanej úrovni. Na rozdiel od LCD je obraz na OLED displeji sýtejší, má vernejšie podanie tmavých farieb, vynikajúci kontrast, nižšiu spotrebu, široký pozorovací uhol vo vodorovnom i zvislom smere a hlavne rýchlejšie zobrazovanie bodov – prekresľovanie obrazu.

Aj keď sú elektroluminiscenčné materiály známe od začiatku 50. rokov 20. storočia, prvé praktické využitie OLED bolo umožnené vďaka americkým chemikom Chingovi Tangovi a Stevenovi Slykeovi, ktorí v roku 1987 zostrojili prvý prototyp klasickej dvojvrstvovej štruktúry, ktorá sa používa dodnes. Za začiatok reálneho vývoja OLED technológie môžeme považovať prvé použitie svietiacich polymérov firmou Cambridge Display Technology v roku 1996. O rok neskôr predviedla firma Universal Display Corporation technológiu flexibilných plochých panelov. Prvé displeje s touto technológiou sa očakávali už v roku 2001, avšak kvôli rôznym problémom prišiel prvý OLED televízor na trh až v roku 2008 (Gaspar et al., 2015).

OLED displej (pozri obr. 2.6) pozostáva z niekoľkých vrstiev. Na vrchnej strane je ochranná vrstva, pod ňou je kovová katóda (1), ktorá napája emisnú vrstvu (2). Vodivá vrstva (3) slúži pre prenos elektrónových dier a je ovládaná transparentnou anódou (5) z oxidu inditého. Na spodnej strane je vrstva

z pevného materiálu, napr. zo skla (6), ktorá zabezpečuje, aby mal displej pevný tvar.



Obr. 2.6: Schéma OLED displeja

Keď je na katódu a anódu privedené napätie, začnú elektróny prechádzať emisnou vrstvou (*electron transport layer*) smerom ku anóde. Na opačnej strane ich anóda odoberá, čím vznikajú vo vodivej vrstve (*hole transport layer*) elektrónové diery (miesta s chýbajúcimi elektrónmi). Emisná vrstva takto získa záporný náboj, vodivá vrstva zasa kladný náboj. Keďže „kladné diery" sú oveľa pohyblivejšie ako elektróny, preskočia hranicu medzi vrstvami a dostanú sa z vodivej vrstvy do emisnej vrstvy. Keď v emisnej vrstve elektrón zapadne do diery, nastane rekombinácia elektrónov a organický materiál (4) emituje fotóny. Keďže každý subpixel obsahuje iné chemické zloženie organických polymérov, vyžiarený fotón má červenú, zelenú alebo modrú farbu. Intenzita svietenia jednotlivých subpixelov sa ovplyvňuje veľkosťou napätia. Oproti LCD displejom je čierna farba skutočne čiernou, keďže OLED nevyžaduje podsvietenie (Freudenrich, 2005).

Podobne ako LCD aj OLED technológie prešli svojím vývojom. V jednoduchších displejoch sa stále používa sieť transparentných vodičov (*passive matrix*) namiesto tenkých tranzistorov (*active matrix*) kvôli nižšej výrobnej cene. Ďalšia možnosť, ako znížiť cenu, je použitie iba jedného druhu organického polyméru, napr. takého, ktorý vyžaruje bielu farbu. Farba subpixelov sa potom dosiahne pridaním farebného filtra, podobne ako u LCD. Zaujímavé vylepšenie prišlo v podobe SOLED (*stock-OLED*) technológie, v ktorej sú subpixely umiestnené nad sebou. Výsledná farba sa zmieša, čo umožňuje nielen vernejšie zobrazenie farieb ale aj väčšiu hustotu pixelov. Super AMOLED predstavuje jedno z posledných vylepšení OLED displejov. Oproti starším typom má vyšší kontrast, väčšiu sýtosť jednotlivých odtieňov,

menšiu spotrebu a lepšiu viditeľnosť na slnku. V poslednom čase sa začínajú využívať aj viacvrstvové OLED panely, ktoré majú medzi emisnou vrstvou a katódou vrstvu pre injekciu elektrónov (*electron injection layer*) a vrstvu pre blokovanie dier (*hole blocking layer*). Podobne sa medzi anódou a vodivou vrstvou pridala vrstva pre injekciu dier (*hole injection layer*) a vrstva pre blokovanie elektrónov (*electron blocking layer*). Aj keď je viacvrstvová technológia náročnejšia na výrobu, účinnosť[7] týchto OLED panelov je väčšia.

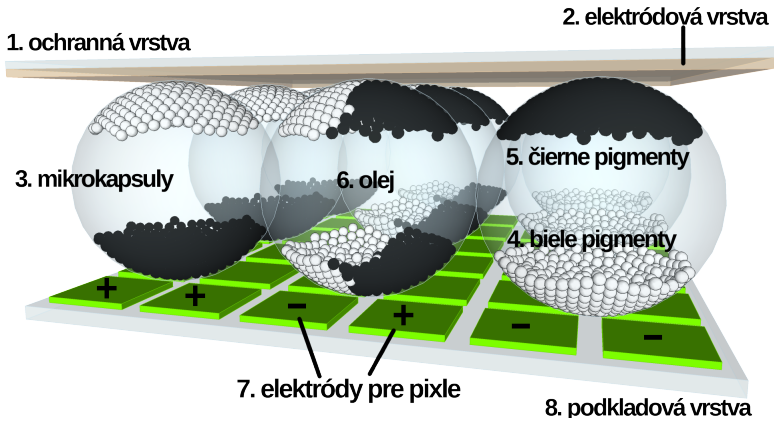
OLED displeje aj napriek ich nesporným výhodám nie sú stále masovo rozšírené. Najčastejšie sa používajú v displejoch mobilných telefónov a tabletov vyššej triedy, vo fotoaparátoch a v menších displejoch v zariadeniach s kratšou životnosťou. Väčšiemu rozšíreniu pre veľké formáty displejov, ktoré sa používajú v televízoroch a monitoroch počítačov bráni nielen vyššia cena ale aj životnosť organických polymérov. OLED displeje majú takmer všetky výhody LCD displejov. Navyše majú mnohonásobne vyšší kontrast i oveľa rýchlejšiu odozvu, vyššiu svietivosť, menšiu spotrebu elektrického prúdu, avšak ich problémom je vypaľovanie pixelov a v súčasnosti aj vyššia cena.

2.4 Ostatné technológie

Z ostatných technológií sa v súčasnosti v displejoch používa najmä elektronický papier. K najznámejším výrobcom patrí spoločnosť E ink. Displej od E ink využíva princíp elektroforézy (pozri obr. 2.7), v ktorej sú kladne nabité, biele pigmentové nanočastice (4) priťahované záporne nabitou elektródou (2) a čierne so záporným nábojom (5) sú priťahované kladne nabitou elektródou (7). Oba typy častíc plávajú v priesvitnom oleji (6) a sú uzavreté v priesvitných mikrokapsuliach (3). Displej má na vrchu ešte ochrannú vrstvu (1), ktorá zvyčajne nebýva veľmi hrubá a displej sa môže pri nešetrnom zaobchádzaní ľahko poškodiť. Tieto displeje zobrazujú iba odtiene šedej farby a prekreslenie obrazu im trvá pomerne dlho, cca 1/2 sekundy. Podobne ako novinový papier využívajú odrazené svetlo, preto sú výborne čitateľné na slnku. Obraz dokážu zobrazovať trvalo, bez spotreby elektriny, tú potrebujú len pri prekreslení obrazu. Ich výhodou je veľmi nízka spotreba energie (Bonsor, 2000).

Aj keď sa E ink displeje komerčne využívajú už približne 10 rokov, za ten čas sa podarilo len mierne zlepšiť kontrast a rýchlosť vykresľovania. Rozlíšenie najnovšej verzie E ink Carta HD dosahuje 300 bodov na palec. Od roku 2010 existuje aj farebná verzia elektronického papiera s názvom *Triton*, ktorá má navyše farebný filter, avšak pre malý kontrast a pomalé prekresľovanie

[7] Tieto panely majú pri rovnakej spotrebe väčšiu svietivosť ako štandardné trojvrstvové OLED panely.



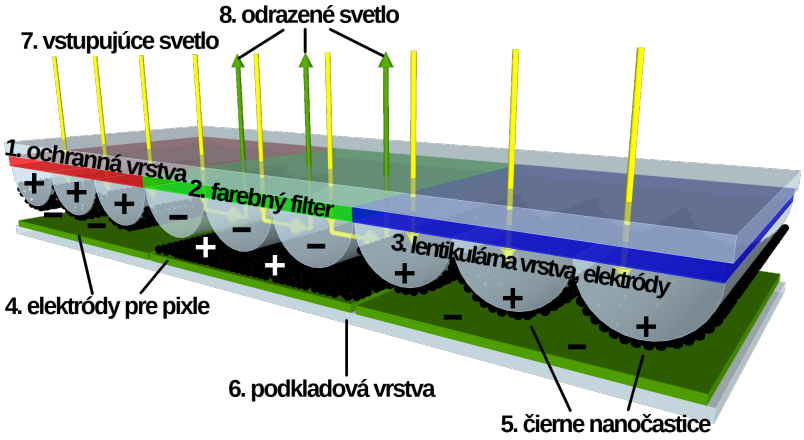
Obr. 2.7: Schéma E ink technológie

obrazu nebola veľmi používaná. V roku 2016 uviedol E ink *Advanced Color ePaper*, ktorý obsahuje štyri farebné pigmenty (žltý, tyrkysový, purpurový a biely) v každej mikrokapsule. Takto sa eliminovala potreba farebného filtra a dosiahol sa uspokojivý kontrast (EInk, 2017).

V roku 2018 uviedla firma CLEARink Displays farebný elektronický papier, ktorý využíva princíp elektroforézy a úplný (totálny) odraz svetla (pozri obr. 2.8). Poloha čiernych nanočastíc (5), priťahovaných kladným nábojom elektródy, určuje či konkrétny bod displeja odráža alebo pohlcuje svetlo. Ak častice pokrývajú priesvitnú lentikulárnu vrstvu (3), tak pohlcujú dopadajúce svetlo a bod je čierny/tmavý. Ak sú priťahované elektródou (4) na podkladovej vrstve (6), tak dopadajúce svetlo je v dôsledku totálneho odrazu odrážané k očiam pozorovateľa a bod je svetlý. Tento typ displeja má tiež veľmi nízku spotrebu energie a vynikajúcu čitateľnosť na slnku, navyše oveľa rýchlejšie prekresľuje obraz, a preto je použiteľný aj na zobrazovanie animácií.

V roku 2020 vylepšila firma E ink svoju technológiu Triton a začala so sériovou výrobou farebného displeja s názvom *Kaleido*. Displej Kaleido zobrazuje subpixely s 16-timi úrovňami šedej farby, čím umožňuje zobraziť až 4096 farieb pri rozlíšení približne 100 bodov na palec. Oproti staršej technológii je tento displej jasnejší, rýchlejšie sa prekresľuje, a keďže používa farebný filter vytlačený pomocou technológie *Color Filter Array*, je aj tenší.

Elektronický papier sa najčastejšie využíva v čítačkách elektronických kníh, v špeciálnych PC monitoroch pre ľudí, ktorí trpia poruchami zraku a nemôžu používať monitory vyžarujúce svetlo. Nájsť ich môžeme dokonca aj v niektorých modeloch mobilných telefónov, v ktorých sa používa buď ako doplnkový,



Obr. 2.8: Schéma ClearInk displeja

alebo ako hlavný displej. Oproti LCD a OLED displejom spotrebujú menej elektrického prúdu a sú výborne čitateľné aj na slnku, avšak zobrazujú oveľa menej farieb, mnohonásobne pomalšie prekresľujú obraz a majú vyššiu cenu.

V minulosti sa ešte vyrábali plazmové displeje, avšak pre ich vysokú spotrebu energie, veľkú hmotnosť a malé rozlíšenie obrazu sa už takmer nepoužívajú. Fungovali na podobnom princípe ako kompaktné žiarivky, ktoré používame v domácnostiach.

Budúcnosť zrejme patrí OLED displejom. Ak sa podarí vyriešiť problém so životnosťou organických polymérov, nájde sa dostatočne pevný a súčasne flexibilný materiál, ktorý dostatočne dlho vydrží v rozličných podmienkach, znížia sa výrobné náklady, bude OLED technológia nahrádzať ostatné typy technológií. OLED panely navyše môžu byť „vytlačené“ na vhodný (aj ohybný) substrát „atramentovými“ tlačiarňami, a preto môžu byť veľmi tenké a navyše aj priesvitné.

3 Zariadenia zobrazujúce priestorový obraz

Zariadenia zobrazujúce priestorový obraz sú známe už pomerne dlho. Prvým príkladom je použitie stereoskopie v 19. storočí. V súčasnosti sa o rozšírenie stereoskopických zariadení, ako sú napr. 3D televízory zaslúžila filmová kinematografia uvedením populárneho filmu v 3D stereoskopickom zobrazení s názvom *Avatar*.

Človek potrebuje pre správne vnímanie priestorového obrazu obe oči, pričom každým okom vidí mierne odlišný obraz. Tieto dva obrazy predstavujú pohľad na tú istú scénu, avšak je zobrazený z iného uhla pohľadu, keďže ľudské oči sú od seba mierne vzdialené. Ľudský mozog potom dokáže, na základe malých odlišností v týchto obrazoch, vnímať hĺbku. Pri vnímaní 3D obrazu používa ľudský vizuálny systém fyziologické a psychologické stimuly (Hong et al., 2011). Psychologické stimuly pri pozorovaní 3D objektov sú spojené s procesmi odohrávajúcimi sa v mozgu človeka a patria medzi ne vnímanie lineárnej perspektívy, prekrývania rôzne vzdialených objektov, tieňov a zmeny v zafarbení textúry. Lineárna perspektíva spôsobuje, že vzdialené objekty sa zobrazujú menšie ako tie, ktoré sú bližšie. Objekty v popredí zakrývajú objekty v pozadí a vďaka tieňom vieme odhadnúť vzájomnú pozíciu (prípadne aj vzdialenosť) dvoch objektov. Textúra vzdialenejších objektov sa javí pri bližších objektoch detailnejšia ako u vzdialených. Fyziologické stimuly sú spojené s reakciou ľudského organizmu (najmä očí) pri pozorovaní rozdielnej vzdialenosti objektov v priestore. Patrí k nim binokulárna disparita, očná konvergencia a akomodácia. Najvýznamnejšia z nich je binokulárna disparita, ktorá umožňuje vnímať hĺbku v obraze na základe rozdielnosti dvoch obrazov, ktoré človek pozoruje pravým resp. ľavým okom. Konvergencia oka je vychýlenie oka očnými svalmi do smeru pozorovaného objektu a zúčastňujú sa na ňom obe oči. Akomodácia je schopnosť oka zaostriť (vidieť ostro) na jednotlivé predmety, ktoré sa nachádzajú v rôznej vzdialenosti.

Existuje mnoho druhov zariadení zobrazujúcich priestorový obraz, väčšina z nich je len stále vo fáze prototypov. Mnohé sa líšia najmä v tom, koľko z fyziologických a psychologických stimulov umožňujú vyvolať. Ideálne zariadenie by malo využívať všetky z nich. V súčasnosti sa najviac používajú zariadenia využívajúce stereoskopiu. Okrem stereoskopických zariadení existujú ešte objemové (volumetrické, priestorové), holografické a pseudo-3D zariadenia. V každom zo spomínaných typov existuje možnosť rozsvecovať body priamo na displeji alebo vytvoriť obraz premietaním na priemetňu pomocou jedného či viacerých laserových lúčov alebo projektorov.

3.1 Stereoskopická projekcia a stereoskopické displeje

Základom stereoskopických displejov je zobrazovanie dvoch rozdielnych obrazov, pre každé oko jeden. Všeobecne ich môžeme rozdeliť na dva typy. Prvý typ vyžaduje pre pozorovanie hĺbky okuliare, zatiaľ čo pre druhý typ – autostereoskopické displeje okuliare potrebné nie sú. Oba typy ale vyžadujú, aby bol každým okom pozorovaný iba jeden obraz. Existuje veľa možností, ako to dosiahnuť. V náhlavných displejoch sú oba obrazy od seba dostatočne vzdialené a súčasne tak blízko očí, že nie je možné vidieť jedným okom oba obrazy alebo ich časť naraz. V klasických stereoskopických displejoch, medzi ktoré môžeme zaradiť aj 3D televízory, sú obrazy oddelené pomocou špeciálnych okuliarov. V autostereoskopických sa zasa najčastejšie využíva na oddelenie obrazov princíp paralaxovej bariéry.

Aj keď prvý stereoskop vytvoril už v roku 1838 anglický vynálezca Charles Wheatstone, praktické využitie stereoskopie umožnil až britský vedec David Brewster, keď v roku 1849 použil na oddelenie dvoch obrazov, zobrazujúcich sa vedľa seba, šošovky (pozri obr. 1.1) (Zone, 2007). Stereoskop využíva dva, vedľa seba zobrazované obrazy, a obsahuje dve šošovky, pre každé oko jednu. Tieto šošovky zabezpečujú, aby každé oko videlo iba jeden obraz, a aby pozorovateľ nemal problém zaostriť na obraz, ktorý je veľmi blízko pri jeho očiach.

V prípade malých displejov, aké sú použité v náhlavných displejoch, nie je problém použiť pre každé oko jeden malý displej. Pri displejoch s väčšími uhlopriečkami je nutné zobraziť na jednom displeji dva obrazy. Ako prvá možnosť sa nám ponúka rozdeliť displej na dve polovice, a v každom zobraziť jeden obraz. Toto riešenie ale nie je vyhovujúce, preto je treba zobrazovať

každý z dvoch obrazov cez celý displej. Oddelenie týchto dvoch obrazov umožňujú špeciálne okuliare. Štandardne sa používajú tzv. aktívne okuliare, ktoré v sebe obsahujú elektroniku umožňujúcu aktívne zatieniť obraz prechádzajúci cez okuliare. Existujú aj pasívne okuliare, ktoré sa používajú najmä v 3D kinách. Technologicky iné riešenie využívajú autostereoskopické displeje, ktoré okuliare nepotrebujú, a oddelenie obrazov pre pravé a ľavé oko zabezpečuje sám displej.

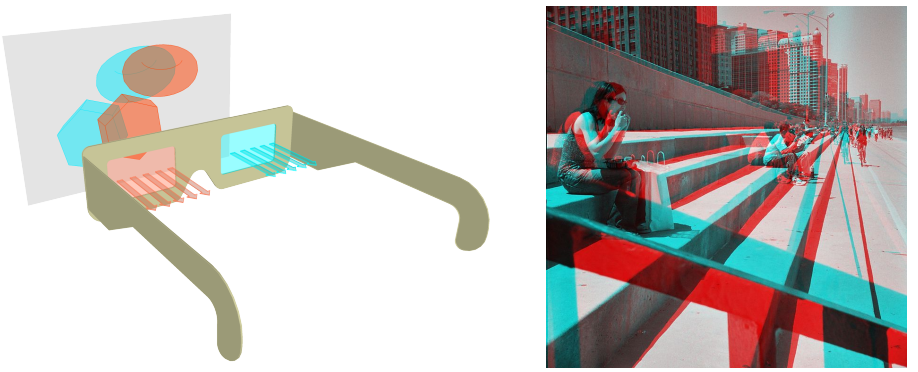
3.1.1 Anaglyfy

Anaglyf je stereoskopický 3D efekt využívajúci myšlienku stereoskopie, vďaka ktorému môžeme vidieť priestorový obraz. Využíva binokulárnu disparitu a stereoskopické okuliare s dvoma rôznymi farebnými filtrami. Anaglyf vynašiel nemecký matematik Wilhelm Rollmann v roku 1853.

V anaglyfoch sa dva obrazy súčasne zobrazované na jednom médiu (obrazovke, papieri či projekčnom plátne) oddeľujú pomocou jednoduchých okuliarov (pozri obr. 3.1 vľavo) obsahujúcich dva rôzne farebné filtre, ktoré zabezpečujú, aby každé oko videlo iba jeden obraz. Obraz anaglyfu (pozri obr. 3.1 vpravo) obsahuje dva odlišne zafarbené obrázky, pre každé oko jeden. Najčastejšie sa používajú červená a tyrkysová farba. Ide o tzv. doplnkové farby, ležiace vo farebnom modeli RGB oproti sebe. Pri pohľade cez okuliare obsahujúce príslušné farebné filtre sa do každého oka dostane len obraz, pre ktoré je určený. Červený filter prepúšťa iba červenú farbu, zatiaľ čo tyrkysový blokuje červenú farbu a prepúšťa modrú a zelenú zložku svetla, ktorej kombináciou vzniká tyrkysová. Okrem tradične používaných okuliarov s červeným a tyrkysovým filtrom sa používajú aj okuliare s červeným a modrým filtrom, prípadne červeným a zeleným či zeleným a purpurovým. Celkovo lepšie podanie farieb zabezpečujú anaglyfy s patentovanou technológiou ColorCode 3-D používajúcou jantárovú a modrú farbu (Geng, 2013). Každá farebná kombinácia filtrov spôsobuje nejaký problém, napr. mierne rozostrenie obrazu, nedostatočný farebný rozsah zobrazovaného obrazu[1] či farebnú aberáciu[2].

[1] Farebný rozsah udáva počet farieb, ktoré vie zobrazovacie zariadenie naraz zobraziť.

[2] Farebná aberácia je chyba šošovky, spôsobená tým, že sa svetlo rôznej vlnovej dĺžky neláme rovnako pri prechode šošovkou. Táto chyba spôsobuje vznik farebných lemov na okraji zobrazovaných objektov.



Obr. 3.1: Okuliare pre anaglyfy a príklad obrázku anaglyfu (Scarborough, 2006)

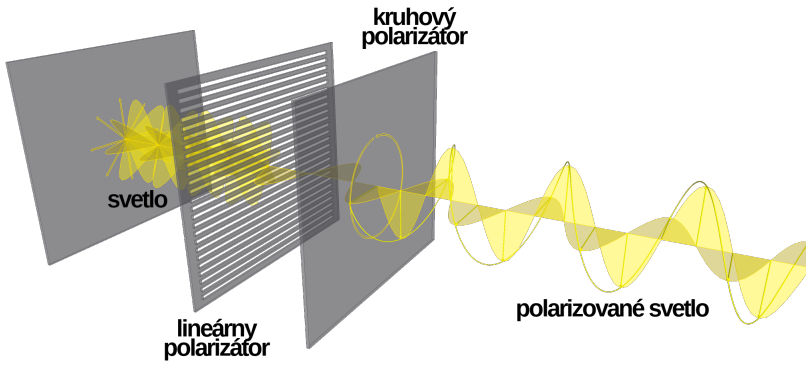
3.1.2 Stereoskopická projekcia

Stereoskopická projekcia sa využíva najmä v 3D kinách, avšak tento princíp sa dá využiť aj pri premietaní prezentácií na projekčnom plátne. Obraz premietaný v súčasných 3D kinách vychádza z princípu anaglyfu, avšak používa mierne odlišnú technológiu, ktorá je založená na princípe polarizácie svetla. Svetlo štandardne tvorí zväzok elektromagnetických vĺn a polarizačný filter prepustí iba vlny, ktoré kmitajú v rovine s rovnakým smerom ako je natočená rovina polarizácie filtru (pozri obr. 2.3). Svetlo vychádzajúce von z polarizačného filtra je potom polarizované. V minulosti existovali aj kiná, ktoré využívali anaglyfy, avšak pre problém s nedostatočným farebným rozsahom zobrazovaného obrazu používajú súčasné 3D kiná polarizačné filtre, ktoré tento nedostatok nemajú.

Film pre IMAX 3D sa nakrúca špeciálnou kamerou s dvoma objektívmi, ktoré snímajú naraz dva obrazy, každý z iného uhla pohľadu. Na plátno 3D kina sa potom premietajú dva obrazy pomocou dvoch projektorov, pričom každý má pred sebou lineárny polarizačný filter. Prvý je natočený tak, že má rovinu polarizácie vodorovne, druhý má rovinu polarizácie zvislo. Na plátne sú potom zobrazené súčasne dva obrazy, avšak každý má inak otočenú rovinu polarizácie. Návštevník kina dostane 3D okuliare s dvoma polarizačnými filtrami vzájomne pootočenými o 90°, ktoré prepustia do každého oka iba obraz z príslušného projektoru. Keďže každé oko vidí iba jeden obraz, vznikne dojem hĺbky (Fernandez, 2013).

Použitie lineárnych polarizačných filtrov neumožňuje, aby divák v 3D kine nakláňal hlavu na bok, keďže okuliare s polarizačnými filtrami musia mať optické roviny natočené rovnako ako sú natočené filtre na projektoroch.

Tento nedostatok rieši použitie kruhovej polarizácie. Nevýhodou je ale mierne vyššia cena takýchto okuliarov. V súčasnosti sa kruhové polarizačné filtre využívajú nielen v kinách RealD ale už aj v kinách IMAX. RealD kiná navyše nepoužívajú dva projektory, ktoré zobrazujú obraz na plátne naraz, ale iba jeden projektor, ktorý veľmi rýchlo (144× za sekundu) zobrazuje postupne obraz pre ľavé a pre pravé oko. Obraz pre pravé oko prechádza kruhovým polarizátorom, pozri obr. 3.2) s pravotočivou polarizáciou (v smere hodinových ručičiek), obraz pre ľavé oko prechádza cez filter s ľavotočivou kruhovou polarizáciou. Toto rýchle striedanie pravotočivej a ľavotočivej kruhovej polarizácie zabezpečuje tzv. *push-pull* elektro-optický modulátor využívajúci tekuté kryštály (Chandler, 2015). Použitie polarizačných filtrov má jeden nedostatok, a to že odrazené svetlo od projekčného plátna musí zachovávať polarizáciu dopadajúceho svetla. Preto sa plocha projekčného plátna pokrýva tenkou vrstvou striebra.



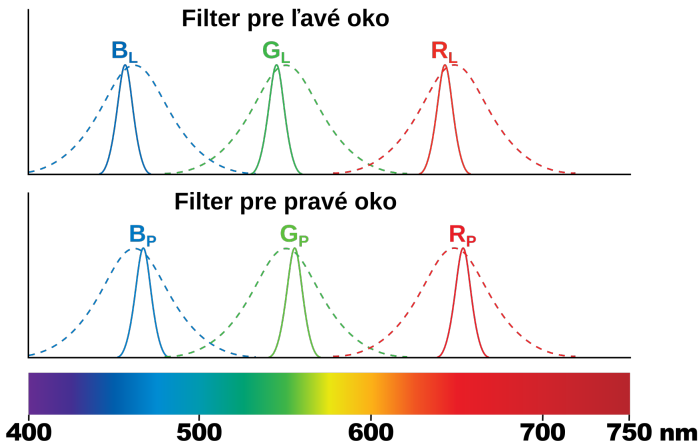
Obr. 3.2: Svetelné vlny prechádzajúce kruhovým polarizátorom

V kinách využívajúcich systém Dolby 3D[3] sa pre oddelenie dvoch obrazov nepoužívajú polarizačné filtre ale interferenčné filtre, ktoré prepúšťajú iba určitú skupinu vlnových dĺžok (frekvencií resp. farieb) svetla. Táto technológia vychádza z toho, že človek vníma farby pomocou troch druhov svetlocitlivých buniek. Prvý druh buniek je citlivý na červené, druhý na zelené a tretí na modré svetlo. Vďaka tomu je možné akúkoľvek farbu vytvoriť zložením (sčítaním) týchto troch primárnych farieb. Interferenčný filter prepustí práve tieto tri farby, zvyšné farby s inými vlnovými dĺžkami pohltí. Dolby 3D používa pre každé oko iný interferenčný filter, fungujúci ako trojnásobný úzkopásmový frekvenčný filter. Zo všetkých vlnových dĺžok (farieb) vnímaných ľudským okom prepustí iba úzky rozsah vlnových dĺžok (frekvencií) pre každú primárnu farbu (pozri obr. 3.3). Filter pre pravé oko prepustí iné

[3]Systém Dolby 3D sa využíva aj v niektorých kinách IMAX.

vlnové dĺžky ako filter pre ľavé oko. Takto sa do každého oka dostane iná trojica vlnových dĺžok zodpovedajúcich primárnych farieb.

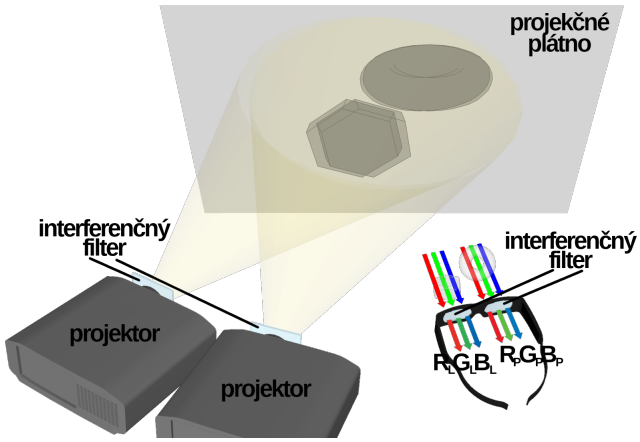
Stereoskopické premietanie v systéme Dolby 3D používa dva štandardné projektory zobrazujúce dva rôzne obrazy (pozri obr. 3.4). Pred každým projektorom je iný interferenčný filter, podľa toho či zobrazuje obraz pre pravé alebo pre ľavé oko. Na projekčnom plátne sú potom zobrazované dva obrazy naraz, pričom každý je vytvorený pomocou inej trojice primárnych farieb. Divák v kine sa pozerá na premietaný obraz cez špeciálne okuliare, obsahujúce rovnaké interferenčné filtre, aké sú pred projektormi. Filter pre pravé oko blokuje obraz pre pravé oko a naopak, filter pre ľavé oko blokuje obraz pre pravé oko. Takto sa do každého oka dostane iný obraz a divák vo výsledku vidí trojrozmerný obraz. Keďže farebné spektrum dvoch súčasne zobrazovaných obrazov sa líši, je film pred premietaním farebne upravený, aby sa tento farebný nesúlad kompenzoval. Výhodou tejto technológie je, že projekčné plátno nemusí zachovávať polarizáciu odrazeného svetla, a môže byť premietané na akúkoľvek plochu, napr. aj na stenu budovy. Nevýhodou je vyššia cena okuliarov, obsahujúcich špeciálne filtre (Jorke et al., 2009).



Obr. 3.3: Princíp interferenčného úzkopásmového filtra

3.1.3 Stereoskopické displeje

Stereoskopické displeje využívajú podobný princíp, aký sa používa v stereoskopickej projekcii. Najväčší rozdiel je v tom, že nepoužívajú projektory a projekčné plátno ale dva obrazy zobrazuje priamo displej. Existuje viacero prístupov, ako to dosiahnuť. Jednou z možností je použiť dva displeje a skombinovať ich dva obrazy do jedného stereo-obrazu, druhá možnosť je



Obr. 3.4: Schéma stereoskopickej projekcie s technológiou Dolby 3D

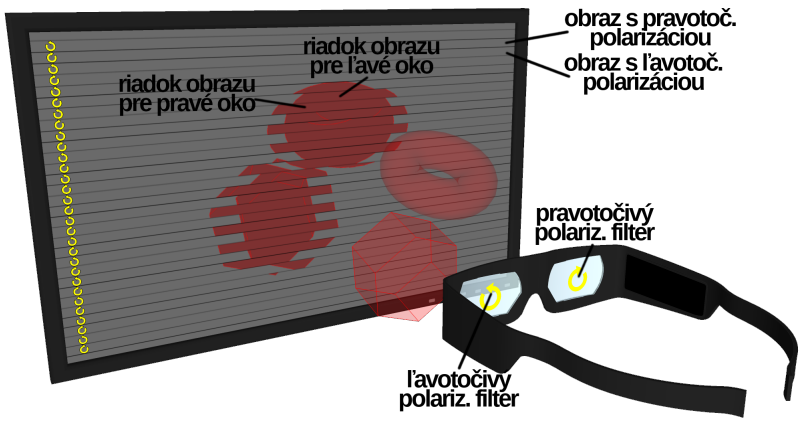
zobrazovať dva obrazy stero-obrazu veľmi rýchlo po sebe. V každom prípade musí používateľ pri sledovaní obrazu používať špeciálne okuliare. Podľa toho či okuliare využívajú iba obyčajné polarizačné filtre, alebo obsahujú elektroniku, ktorá riadi prepúšťanie svetla k očiam pozorovateľa, rozdeľujeme ich na stereoskopické displeje s pasívnymi či aktívnymi okuliarmi.

Stereoskopické displeje s pasívnymi okuliarmi

Princíp stereoskopických displejov s pasívnymi okuliarmi vychádza z princípu anaglyfu. Keďže takýto displej nemôže použiť dva projektory, aby naraz zobrazoval dva obrazy, rozdelí sa plocha obrazovky na riadky, v ktorých sa striedavo zobrazuje obraz pre pravé a pre ľavé oko. Párne riadky zobrazujú obraz pre ľavé oko s vodorovnou polarizáciou a nepárne riadky zobrazujú obraz pre pravé oko so zvislou polarizáciou[4]. Aby používateľ videl trojrozmerný obraz, musí sa pozerať cez okuliare, ktoré majú dva rôzne polarizačné filtre. Pre ľavé oko sa používa filter s vodorovnou polarizáciou, ktorý prepustí obraz z párnych riadkov, avšak zablokuje obraz z nepárnych riadkov. Pre pravé oko sa zasa používa filter so zvislou polarizáciou, ktorý prepustí obraz z nepárnych riadkov, ale zablokuje obraz z párnych riadkov. Takto sa do každého oka dostane príslušný obraz. Nevýhodou týchto displejov je to, že obraz má potom iba polovičné rozlíšenie vo zvislom smere (Hong et al., 2011). Našťastie sa dá aj tento nedostatok vyriešiť pomocou zobrazovania obrazu prekladaním (*interlacing*), ktorý sa dávnejšie využíval v displejoch

[4]V niektorých displejoch sa používa kruhová polarizácia (ľavotočivá a pravotočivá) namiesto lineárnej (vodorovnej a zvislej).

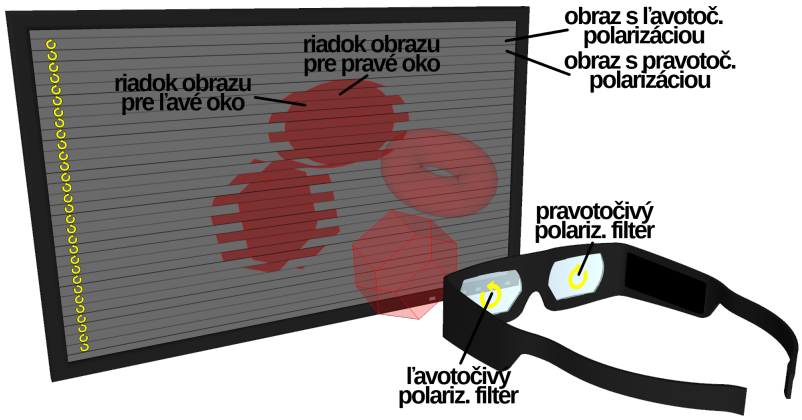
s katódovou trubicou[5]. Každá snímka obrazu sa zobrazuje na dva krát, veľmi rýchlo za sebou. Najskôr sa zobrazujú párne riadky snímky obrazu (pozri obr. 3.5), hneď za tým nepárne riadky obrazu (pozri obr. 3.6). Rozdiel oproti zobrazovaniu na CRT displejoch je v tom, že CRT displej v danom okamihu využíval iba polovicu plochy displeja (iba párne alebo iba nepárne riadky), zatiaľ čo stereoskopický displej využíva na zobrazovanie aktuálneho obrazu celú plochu displeja. Pri takomto zobrazovaní sa musí polarizácia jednotlivých riadkov displeja veľmi rýchlo prepínať, podľa toho, ktoré riadky snímky obrazu (párne alebo nepárne) práve zobrazuje. V prípade, že displej neumožňuje prepínať polarizáciu, je nutné každú druhú snímku zobrazovať posunutú o jeden riadok.



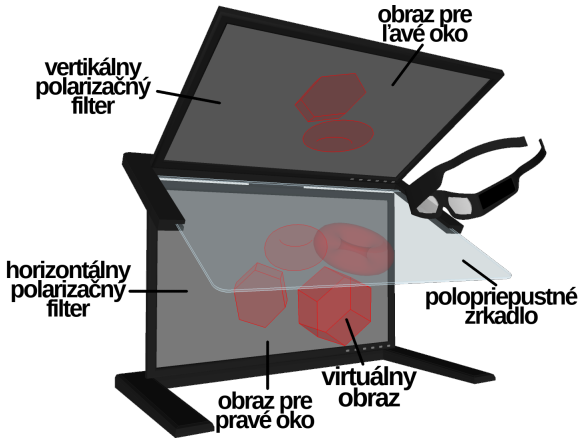
Obr. 3.5: Zobrazované párne snímky obrazu v prvej 1/120 sekundy

Ďalšia možnosť, ako vytvoriť dva rozličné obrazy pre každé oko (pozri obr. 3.7), je použiť dva LCD monitory, a zlúčiť zobrazované obrazy do jedného pomocou polopriepustného zrkadla. Použité monitory sa navzájom líšia len v tom, že prvý má oproti druhému o 90 stupňov pootočené polarizačné filtre. Svetlo vychádzajúce z dolného monitora má je polarizované vodorovne, keďže prechádza cez výstupný filter s vodorovnou polarizáciou, zatiaľ čo svetlo vychádzajúce z horného monitora je polarizované zvislo. Oba polarizované obrazy sú zlúčené do jedného pomocou polopriepustného zrkadla. Toto zrkadlo prepúšťa obraz z dolného monitora a odráža obraz z horného monitora, tak aby oba obrazy smerovali k očiam pozorovateľa. Používateľ sa na displej pozerá cez okuliare s vodorovným polarizačným filtrom pre pravé oko a zvislým pre ľavé oko.

[5]Kvôli pomalému prenosu signálu obrazu a jeho zobrazovaniu s vtedy menej výkonnou elektronikou sa zobrazoval obraz na dva krát. Najskôr sa zobrazovali párne riadky obrazu, hneď za tým sa zobrazovali nepárne riadky.



Obr. 3.6: Zobrazované nepárne snímky obrazu v druhej 1/120 sekundy



Obr. 3.7: Princíp stereoskopického displeja s dvomi obrazovkami

Stereoskopické displeje s aktívnymi okuliarmi

Táto technológia využíva nedokonalosť vnímania obrazu ľudským mozgom, pri ktorej človek vníma sled po sebe rýchlo zobrazovaných obrazov ako jeden obraz. Displeje pri tejto technológii používajú jednoduchší spôsob zobrazovania ako displeje s pasívnymi okuliarmi a navyše umožňujú natívne zobrazovať plné rozlíšenie obrazu. Okuliare sú ale omnoho zložitejšie a obsahujú elektroniku, ktorá ich synchronizuje so zobrazovaným obrazom na displeji. Každé sklíčko okuliarov tvorí malý LCD filter, ktorý elektronika prepne do stavu, keď prepúšťa alebo neprepúšťa svetlo. Displej najskôr zobrazí obraz pre pravé oko a okuliare súčasne zatienia obraz pre ľavé oko. Potom displej zobrazí obraz pre ľavé oko a okuliare zatienia obraz pre pravé oko. Keďže sa obrazy

pre ľavé a pravé oko rýchlo za sebou striedajú, ľudský mozog ich vníma, akoby boli zobrazované naraz. Bohužiaľ sledovanie blikajúceho obrazu môže u niektorých ľudí vyvolať závrate a bolesti očí (Hong et al., 2011). Aktívne okuliare spôsobujú aj menej závažný problém, ktorým je pokles jasu zobrazovaného obrazu na polovicu, keďže v danom momente je zakaždým obraz pre jedno oko zatienený.

Sledovanie obrazu na stereoskopických displejoch s pasívnymi okuliarmi je pre používateľa oveľa komfortnejšie ako pri displejoch s aktívnymi okuliarmi, avšak cena takýchto displejov je mierne vyššia. Takéto displeje sa niekoľko rokov využívali aj v televízoroch mnohých značiek, avšak pre nedostatok pútavých 3D filmov a kvôli problémom so sledovaním „blikajúceho obrazu“ či vyššej cene 3D televízorov sa v súčasnosti už takmer nepoužívajú. Keďže používanie dodatočných stereoskopických okuliarov predstavuje pre niektorých používateľov problém, vývoj nových zariadení sa sústreďuje najmä na autostereoskopické displeje, ktoré dodatočné okuliare nepotrebujú.

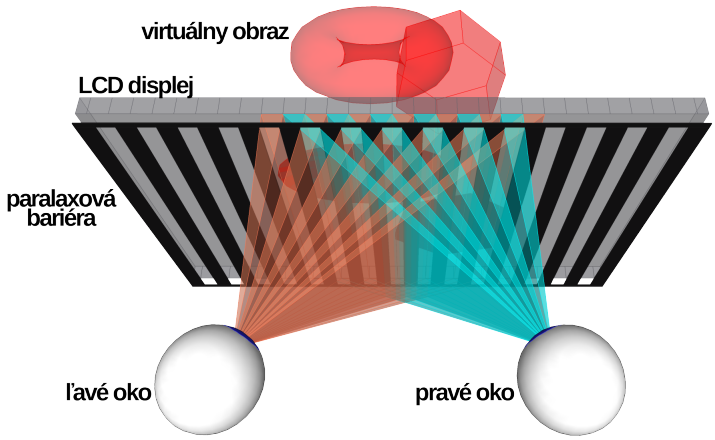
3.2 Autostereoskopické displeje

Autostereoskopické displeje síce majú veľkú výhodu v tom, že používateľ pri nich nemusí mať nasadené špeciálne okuliare, avšak sa na displej nemôže pozerať z ľubovoľného smeru. Navyše takmer všetky autostereoskopické displeje (podobne ako anaglyfy) využívajú iba horizontálnu paralaxu, čo spôsobuje, že priestorový obraz je možné sledovať iba vo vodorovnom smere. To znamená, že používateľ vidí rozdielne a správne obrazy pre pravé a ľavé oko iba ak sú oči v rovine rovnobežnej s rovinou hornej steny displeja. Pri viacpohľadových (*multiview*) autostereoskopických displejoch, je dokonca možné sledovať obraz z viacerých smerov pohľadu, čo dáva pozorovateľovi možnosť pozerať sa na obraz z viacerých strán, aj keď stále len vo vodorovnom smere. Existuje pomerne veľa druhov technológií, ako zabezpečiť, aby sa do každého oka dostal príslušný obraz. Môžu využívať princíp tzv. paralaxovej bariéry, alebo ohyb, odraz či rozptyl svetla (Geng, 2013).

3.2.1 Displeje využívajúce paralaxovú bariéru

Stereogram využívajúci paralaxovú bariéru je známy už od roku 1902, keď americký vynálezca Frederic Ives predstavil možnosť pozorovať stereoskopický obraz bez okuliarov (Ives, 1902). Táto technológia používa masku v tvare

zvislých prúžkov, umiestnenú v presne stanovenej vzdialenosti pred displejom, aby zakrývala tie časti obrazu, ktoré by nemali byť viditeľné z konkrétnych miest v oblasti, kde sa nachádzajú oči pozorovateľa (pozri obr. 3.8). Každé oko pozorovateľa vidí iné zvislé pruhy obrazu na displeji, pretože každý druhý prúžok je zatienený prúžkami masky. Ako paralaxová bariéra sa často používa samostatný priesvitný LCD panel, ktorý umožňuje dynamicky vytvárať zvislé čierne pruhy tak, aby maska vyhovovala aktuálnej pozícii pozorovateľa. Jednoduchou zmenou šírky „štrbín“ je možné vytvoriť viacpohľadový displej, avšak za cenu výrazného zníženia rozlíšenia displeja v x-ovom smere.



Obr. 3.8: Princíp paralaxovej bariéry

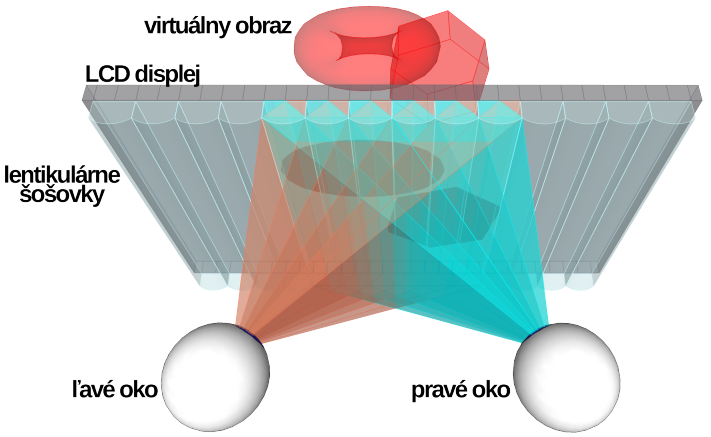
Displeje s paralaxovou bariérou majú niekoľko nedostatkov. Najzávažnejším je zníženie jasu a rozlíšenia na polovicu, menej závažným je to, že pri displejoch s menším rozlíšením je vidno tenké tmavé zvislé pruhy (Geng, 2013). Aj napriek týmto nedostatkom je princíp paralaxovej bariéry často v autostereoskopických displejoch používaný pre svoju konštrukčnú jednoduchosť a možnosť prepínať medzi 2D a 3D autostereoskopickým režimom[6].

3.2.2 Displeje využívajúce ohyb (refrakciu) svetla

Základ týchto displejov tvorí panel pozostávajúci zo zvislých prúžkov cylindrických šošoviek – lentikúl (pozri obr. 3.9). Tieto šošovky majú rovnakú úlohu ako paralaxová bariéra a keďže sú navyše priesvitné, nedochádza k strate jasu. Prúžky šošoviek sú zarovnané so zvislými stĺpcami pixelov na LCD paneli, ktorý sa nachádza v ohniskovej rovine šošoviek (Hong et al.,

[6]Pri 2D režime sa LCD panel slúžiaci ako paralaxová bariera nepoužíva, čo znamená, že celý panel prepúšťa svetlo, t. j. všetky jeho pixely sú priesvitné.

2011).



Obr. 3.9: Princíp lentikulárneho displeja

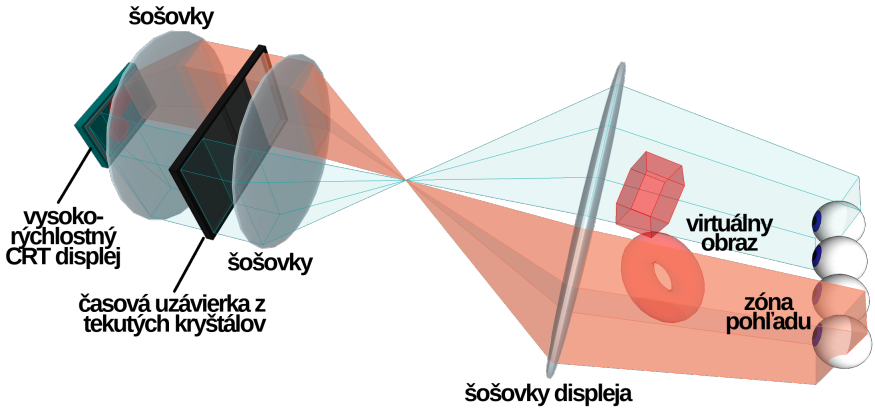
Lentikulárne displeje, ako aj displeje využívajúce paralaxovú bariéru, znižujú rozlíšenie obrazu na polovicu. V prípade multipohľadových displejov je zníženie rozlíšenia viac než dvojnásobné. Túto nevýhodu čiastočne kompenzuje šikmé umiestnenie prúžkov šošoviek, ktoré „rozkladá stratu rozlíšenia“ do zvislého smeru (Berkel et al., 1996). V tomto prípade je však rozloženie farebných RGB filtrov pre subpixely upravené podľa smeru sklonu lentikúl. Ďalším zaujímavým riešením je použitie druhého panelu tekutých kryštálov, ktoré sú elektrickým poľom postupne natáčané tak, že ohýbajú svetlo a nahrádzajú tak lentikuly. Elektrické pole na okrajoch subpixelov je oveľa silnejšie ako v ich strede, čím sa vytvorí alternatíva šošovky. Takýto displej je potom možné jednoduchým prepnutím zmeniť z 2D na 3D displej a naopak[7] (Huang et al., 2010). Problém zníženého rozlíšenia pri použití vertikálnej bariéry sa podarilo vyriešiť pomocou tzv. smerového podsvietenia, pri ktorom sa použitím rôznych technológií (napr. pomocou miniatúrnych hranolov a prepínateľného svetelného stĺpca pozostávajúceho z miniatúrnych LED), nasmeruje obraz do jednotlivých zón pohľadu pozorovateľa (Geng, 2013).

3.2.3 Displeje využívajúce časovú uzávierku

Na konci 90. rokov minulého storočia predviedli na anglickej univerzite v Cambridge viacpohľadový autostereoskopický displej, ktorého základom bol displej s katódovou trubicou s rýchlym zobrazovaním obrazu (*high speed*

[7] Podobné prepínanie je možné aj na displejoch používajúcich panely tekutých kryštálov ako paralaxovú bariéru.

CRT) a feroelektrický panel tekutých kryštálov (FELC) (pozri obr. 3.10) slúžiaci ako časová uzávierka.

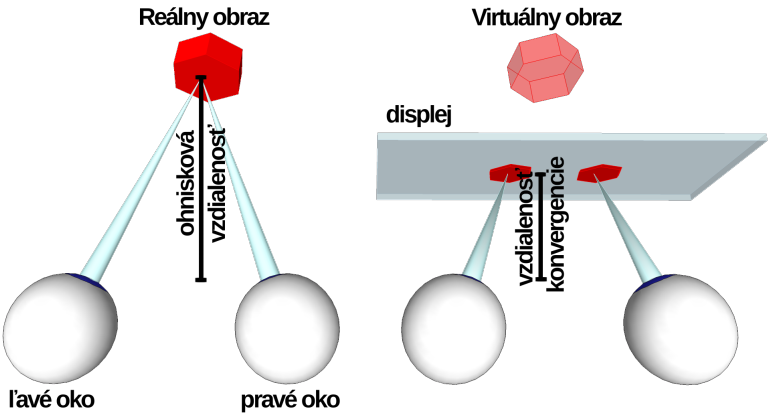


Obr. 3.10: Displej s časovou uzávierkou

Na displeji s katódovou trubicou sa s veľkou rýchlosťou zobrazovali obrazy, zakaždým jeden obraz pre jeden pohľad a jedno oko. Na to, aby sa obraz dostal do správneho oka, slúžila sústava šošoviek, pričom jedna bunka FELC bola priesvitná a prepúšťala časť kužeľu svetla vyžarovaného displejom s katódovou trubicou. Zvyšné bunky FELC boli v tom okamihu tmavé a blokovali zvyšnú časť kužeľa svetla, aby sa ten istý obraz z displeja s katódovou trubicou nedostal do druhého oka. Na displeji s katódovou trubicou sa v rýchlom slede zobrazovali jednotlivé obrazy a FELC synchrónne s displejom s katódovou trubicou fungoval ako potrebná bariéra, aby sa obraz premietol na správne miesto do konkrétnej zóny pohľadu (Dodgson, 2005). V novšej verzii tejto technológie bol displej s katódovou trubicou a FELC nahradený sústavou intenzívne svietiacich LED a LCD s rýchlym zobrazovaním obrazu. Tieto displeje majú výhodu v tom, že zobrazujú obraz v plnom rozlíšení, avšak za cenu pomalšieho zobrazovania stereoskopického obrazu. Pomalšie zobrazovanie obrazu znemožňuje využiť väčší počet zón pohľadov (Geng, 2013).

Vzhľadom na obmedzený počet pohľadov, ktoré môže viacpohľadový 3D displej zobrazovať, dochádza k nespojitej zmene jednotlivých pohľadov, ak sa pozorovateľ pozerá na virtuálny objekt z rôznych smerov. Pri pozorovaní skutočného objektu však k nespojitej zmene nedochádza. Táto skutočnosť znižuje zážitok pri sledovaní obrazu na viacpohľadových 3D displejoch. Problém nespojitej zmeny sa podarilo vyriešiť pomocou super-multiview a adaptívnej technológie. Super-multiview (SMV) 3D displeje poskytujú až 256 pohľadov a adaptívne 3D displeje zasa sledujú pohyb oka a jeho vzdialenosť od displeja,

vďaka čomu umožňujú zobraziť obraz pre aktuálnu pozíciu očí používateľa. Ďalším problémom týchto typov 3D displejov je konflikt akomodácie-konvergencie očí, ktorý spôsobuje zrakovú únavu pri sledovaní obrazu. Aj keď vďaka konvergencii ľudského oka vníma pozorovateľ správnu hĺbku virtuálnych objektov, akomodácia spôsobuje, že sú oči zaostrené vždy len na obrazovku a nie na virtuálny objekt (pozri obr. 3.11) (Geng, 2013).



Obr. 3.11: Konflikt akomodácie-konvergencie očí

Keďže v SMV displejoch dopadá na sietnicu oka obraz z viacerých zón pohľadu (pozri obr. 3.10), oko správne zaostruje na virtuálny obraz v priestore a ku konfliktu akomodácie-konvergencie nedochádza.

V poslednom čase sa záujem výskumníkov sústreďuje aj na autostereoskopické displeje využívajúce tzv. integrálny obraz. Táto technológia využíva obrovský počet mikrošošoviek rozmiestnených v pravouhlej mriežke, umožňuje využiť vodorovnú aj zvislú paralaxu súčasne, čím prekonáva niektoré nedostatky klasických autostereoskopických displejov. To znamená, že takýto displej zobrazuje rôzne obrazy nielen v horizontálnom ale aj vo vertikálnom smere, avšak za cenu ďalšieho zníženia rozlíšenia, tentoraz v y-ovom, t. j. zvislom smere.

3.3 Objemové (volumetrické) displeje

Zatiaľ čo stereoskopické displeje zobrazujú obraz na dvojrozmernej ploche zobrazovacieho média (napr. na LCD paneli), volumetrický 3D displej zobrazuje 3D obrazy v skutočnom 3D priestore. Každý voxel[8] 3D obrazu má

[8] Voxel je trojrozmerná obdoba dvojrozmerného pixelu.

skutočnú polohu v trojrozmernom priestore displeja a vyžaruje svetlo z tejto pozície do viacerých smerov. Toto svetlo sa podieľa na vytvorení reálneho obrazu objektu v očiach pozorovateľov. Objemové 3D displeje poskytujú pozorovateľovi reálne vnímanie hĺbky 3D objektov a nedochádza ku konfliktu akomodácie-konvergencie. Na druhej strane je ale ich najväčším nedostatkom práve veľkosť, ktorá často znemožňuje vytvárať objemové displeje s veľkou uhlopriečkou.

Podľa typu ich môžeme rozdeliť na displeje so statickou zobrazovacou časťou a na displeje s rotačnou plochou. V oboch typoch môže voxel vyžarovať svetlo priamo (napr. z miniatúrnej žiarovky) – to sú displeje aktívneho typu, alebo môže byť voxel osvetľovaný externým zdrojom svetla (napr. laserovým lúčom) – v tom prípade ide o displeje pasívneho typu (Geng, 2013).

3.3.1 Objemové displeje so statickou zobrazovacou časťou

Tieto displeje vytvárajú obraz bez pohyblivých častí v objeme displeja. Pri pasívnom type je celý objem displeja vyplnený voxelmi, ktoré sú selektívne rozsvecované.

V roku 1997 predstavila americká výskumníčka Elizabeth Downingová volumetrický displej využívajúci infračervené laserové lúče. Dva lúče vychádzajúce z laserov sú pomocou zrkadiel nasmerované na požadovaný bod vo vnútri displeja. V mieste ich prieniku dochádza k pohlteniu dvoch „infračervených“ fotónov (tzv. dvojfotónová absorpcia[9]) a k následnému vyžiareniu viditeľného svetla. Tento proces sa veľmi rýchlo opakuje pre všetky voxely, ktoré majú byť rozsvietené. Vnútro displeja tvorí sklo s prímesou fluorozirkónu a ďalších vzácnych prvkov (Downing, 1997). Veľká hmotnosť skla a použitie vzácnych prvkov bráni praktickému využitiu týchto displejov s väčšími uhlopriečkami.

O rok neskôr dvaja americkí fyzici Eric Korevaar a Brett Spivey vytvorili 3D displej pozostávajúci z vákuovej komory, ktorá mala priehľadné steny a bola vyplnená plynom obsahujúcim rubídium. Využitím dvojfotónovej absorpcie sa v mieste prieniku lúčov vyžarovaných dvoma lasermi rozžiaril malý svetelný bod. Rýchlym pohybom laserových lúčov bolo možné rozsvecovať ďalšie body dostatočne rýchlo na to, aby sa výsledný obraz javil pozorovateľovi ako statický a nie ako skupina blikajúcich bodov. Správnym výberom plynov a laserov je možné vytvárať svietiace body v celom spektre viditeľného svetla

[9]Pri dvojfotónovej absorpcii absorbuje molekula energiu dvoch fotónov žiariacich v neviditeľnej časti spektra a dochádza k fluorescencii, t. j. následnému vyžiareniu fotónu vo viditeľnej oblasti spektra.

(Korevaar et al., 1989). Nevýhodou tejto technológie je pomalé vykresľovanie obrazu, čo znemožňuje vytvoriť veľké 3D displeje s vysokým rozlíšením.

V roku 2006 bol predstavený systém, ktorý umožnil vytvárať svietiace body aj v obyčajnom vzduchu. Táto technológia používa impulzný infračervený laser, ktorého lúč je nasmerovaný dvomi pohyblivými zrkadlami a posuvnými šošovkami zaostrený na ľubovoľné miesto vo vzduchu. V mieste ohniska dochádza k veľkej koncentrácii energie a vytvorí sa svietiaca guľa žeravej plazmy (Kimura et al., 2006).

Na začiatku roku 2018, predviedli inžinieri na americkej Brigham Young University zaujímavý spôsob zobrazenia farebných svetelných bodov vo vzduchu. Pomocou fotoforetickej[10] pasce je možné vytvoriť plnofarebný 3D grafický displej kdekoľvek vo voľnom priestore, viditeľný z akéhokoľvek smeru. Princíp displeja spočíva v izolovaní celulózovej častice vo fotoforetickom lapači vytvorenom sférickými a astigmatickými aberáciami[11]. Častice sú potom postupne vychyľované na konkrétne miesta displeja a vo vhodných okamihoch osvetlené červeným, zeleným či modrým svetlom pomocou laserových lúčov. Výsledkom je trojrozmerný obraz vo voľnom priestore s veľkým farebným rozsahom a jemnými detailmi (Smalley et al., 2018).

Aktívne typy objemových displejov používajú na rozsvietenie voxelov farebné LED, optické vlákna alebo viac vrstiev priesvitných LCD alebo OLED panelov.

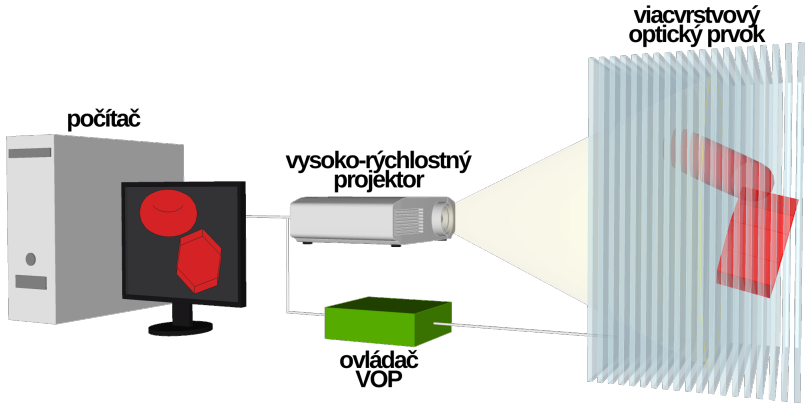
Koncept 3D displeja pozostávajúci z farebných LED je pomerne jednoduchý. Ide o 3D mriežku, v ktorej sú rovnomerne rozmiestnené trojfarebné LED diódy. Dokonca sa aj našiel komerčný výrobca, ktorý ponúka 3D LED kocku s rozlíšením $32 \times 32 \times 32$ voxelov. Keďže diódy nie sú priesvitné, musí byť medzi nimi značný rozstup, aby sa navzájom nezakrývali. Dôsledkom toho je, že pri aktuálnych veľkostiach LED prvkov sa nedá dosiahnuť vyhovujúce rozlíšenie displeja.

3D displej využívajúci optické vlákna umožňuje vytvoriť o niečo väčšie rozlíšenie ako technológia využívajúca LED. Optické vlákna slúžia podobne ako transparentné elektrické vodiče v LCD paneloch, avšak neprenášajú elektrinu ale svetlo. Sústava optických vláken je zaliata do priesvitnej živice so zmesou organického farbiva. V pokojnom stave sú bunky priehľadné, avšak keď sú ovplyvnené svetlom, vychádzajúcim z konca optických vlákien, fluoreskujú (MacFarlane, 1994).

[10] Fotoforéza je jav, pri ktorom sa malé častice začnú pohybovať, ak sú osvetlené iba z jednej strany.

[11] Astigmatická aberácia je optická chyba zapríčinená nepravidelným zakrivením šošovky. Spôsobuje to, že zvislá čiara obrazu kríža bude zaostrená v inej vzdialenosti ako jeho vodorovná čiara, ako keby mala šošovka viac ohnísk.

Ďalšou možnosťou, ako využiť statické prvky v 3D displejoch je použiť niekoľko vrstiev panelov (tzv. viacvrstvový optický prvok – VOP), na ktorých sa zobrazujú rezy trojrozmerného obrazu. V aktívnych typoch to môžu byť transparentné OLED panely, v pasívnych panely z tekutých kryštálov, fungujúce ako dvojstavové difúzory[12]. Voxely panelu z tekutých kryštálov sú opticky priehľadné, ak nie sú ovplyvňované elektrickým poľom. Ak je však niektorá bunka (voxel) panelu ovplyvňovaná elektrickým poľom, začne sa správať ako difúzor a rozptyľuje svetlo z bunky smerom k pozorovateľovi. Obrazy jednotlivých rezov sú generované projektorom, ktorý sa nachádza na zadnej strane 3D displeja. Projektor s rýchlym zobrazovaním obrazu a jednotlivé LC panely sú navzájom zosynchronizované a umožňujú zobraziť 2D rezy virtuálnych 3D objektov na jednotlivých rovinách LC panelov, čím sa vytvorí skutočný trojrozmerný obraz (pozri obr. 3.12). Objemový 3D zobrazovací systém založený na tejto technológii s 20-timi LC panelmi sa predáva od roku 2014 firmou LightSpace Technologies (LightSpaceTechnologies, 2014). Displeje používajúce túto technológiu však majú malý jas, ktorý je spôsobený pohlcovaním svetla veľkým počtom panelov a krátkym časovým úsekom, v ktorom môžu jednotlivé voxely svietiť.



Obr. 3.12: Príklad multivrstvového 3D displeja s LC panelmi

Výhody objemového 3D displeja využívajúceho statické voxelové elementy umiestnené v 3D priehľadnej kocke spočívajú v ich koncepčnej jednoduchosti, keďže neobsahujú žiadne pohyblivé časti. Avšak bez využitia rotačnej plochy, ktorá z poľa 2D prvkov vytvára 3D voxelovú mriežku, musí byť do 3D kocky umiestnený obrovský počet voxelov, čo vyžaduje technicky pokročilú miniaturizáciu, ktorá je ale v súčasnosti na hranici súčasnej technológie.

[12]Difúzor je optický prvok, ktorý spôsobuje rozptyl svetla.

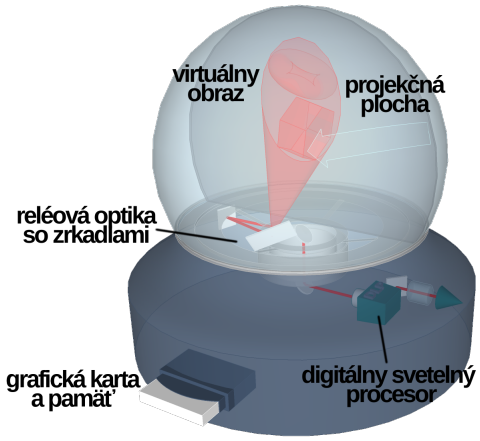
3.3.2 Objemové displeje s rotačnou plochou

Tento typ 3D displejov sa spolieha na zotrvačnosť vnímania obrazu človekom. Ak sa za sebou postupne zobrazujú v rýchlom slede rovinné rezy 3D objektu, ľudský mozog ich vníma ako jeden 3D obraz. Tieto rezy v skutočnosti nemusia byť rovinné, závisí to od druhu rotačnej plochy v 3D displeji. Rotačná plocha môže mať obdĺžnikový, kruhový alebo dokonca aj tvar skrutkovice. Keďže plocha rotuje veľkou rýchlosťou, prestáva byť sama osebe pre pozorovateľa viditeľnou. Pozorovateľ môže voľne prechádzať okolo 3D displeja a pozerať sa na trojrozmerný obraz virtuálneho objektu z ľubovoľného smeru.

Prvý volumetrický displej s rotačnou plochou, využívajúci displej s katódovou trubicou ako zdroj obrazu, bol skonštruovaný už v roku 1958 (Hirsch, 1961). Neskôr, v 60. rokoch bol uvedený displej obsahujúci rotačnú plochu pokrytú luminoforom. Voxely na tejto ploche boli rozsvecované elektrónovým lúčom, podobne ako v televízoroch s katódovou trubicou. V roku 1979 bol vyvinutý 3D displej, ktorého rotačná plocha pozostávala z veľkého množstva rýchlo blikajúcich LED prvkov. Rozlíšenie týchto displejov je dané nielen počtom a hustotou svietiacich prvkov, ale aj rýchlosťou rotácie plochy a časom, ako dlho jednotlivé body svietia (Geng, 2013).

V súčasnosti sa ako zdroj obrazu používa laserový lúč, alebo projektor s rýchlym zobrazovaním obrazu. Laserové skenovacie 3D displeje vytvárajú obraz na rotačnej ploche tak, že pomocou časovo presne synchronizovaného mechanizmu odkláňajú laserový lúč na konkrétny bod na rotujúcom povrchu. Príklad 3D displeja využívajúci skenovanie laserovým lúčom predstavili v roku 1997 Soltan a iní. Tento displej využíva viacero laserových lúčov, ktoré vykresľujú farebné body na rotujúcu skrutkovú plochu. Akusticko-optická jednotka vychyľuje záblesky laserových lúčov a nasmeruje ich na povrch rýchlo rotujúcej skrutkovice, takže sa zdá, že každý voxel svieti z určitého miesta v 3D priestore (Soltan et al., 1997).

Hlavným obmedzením techniky laserového skenovania je maximálny počet voxelov, ktoré je možné 3D displejom zobraziť. Keďže sa obraz vykresľuje skenovaním, môže byť v danom momente vysvietený iba jeden bod. Všetky aktívne obrazové body musia byť osvetľované jeden po druhom pomocou jediného laserového lúča. Čas potrebný na riadenie laserového lúča, aby vykreslil jeden bod dostatočne dlho a dosiahol požadovaný jas, limituje počet voxelov displeja. Ak je potrebné zvýšiť počet voxelov, môže sa použiť viac laserových lúčov, čo ma ale za následok skomplikovanie technickej realizácie a tým aj ceny displeja (Geng, 2013).



Obr. 3.13: Princíp objemového displeja s rotačnou plochou

Pre zdroj vytvárajúci 3D obraz nemusí slúžiť len laserový lúč. Príkladom toho je 3D displej využívajúci vysokorýchlostný DLP projektor[13] a rotujúci polkruh. Projektor je synchronizovaný s rýchlo otáčajúcou sa platňou (tá rotuje až 15× za sekundu) a zobrazuje na jej povrch dopredu vypočítané rezy 3D objektu (Favalora, 2005). Príkladom komerčne úspešného objemového 3D displeja je produkt Voxon VX1 s 500 miliónmi voxelov.

3.4 Holografické displeje

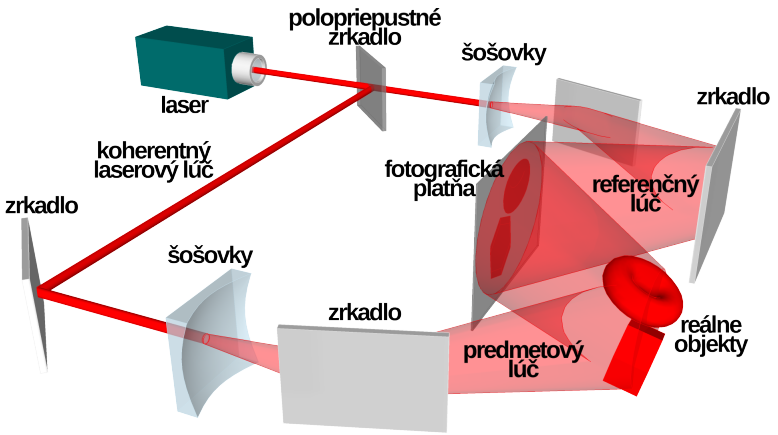
Skutočný priestorový obraz, resp. svetlo, ktoré ho vytvára je oveľa viac, ako len množina svietiacich bodov na 3D displeji. Svetlo je tvorené obrovským počtom elektromagnetických vĺn, ktoré sa navzájom ovplyvňujú. Ak by sa nám podarilo umelo vytvoriť takéto vlnenie a nasmerovať ho k očiam pozorovateľa, vznikol by ideálny 3D displej. Mohli by sme sa na virtuálny objekt pozerať nielen z ľubovoľného smeru, ale ho pomocou ďalšej optickej sústavy zväčšiť, zmenšiť či priblížiť. Takýto displej by fungoval ako virtuálne okno do reálnej 3D scény. Zo všetkých zariadení zobrazujúcich 3D obraz sú k tomuto ideálu najbližšie holografické displeje.

[13] DLP (*digital light processor*) projektor je malé zobrazovacie zariadenie využívajúce vibrujúce mikrozrkadlá, ktoré sa používa v štandardných projektoroch.

Princíp holografie

Holografia je optická zobrazovacia metóda, pomocou ktorej možno zaznamenať priestorové objekty trojrozmerne, na rozdiel od fotografie alebo záznamu kamerou, kde sú priestorové objekty zaznamenávané iba dvojrozmerne. Na holograme sa nezaznamenáva obraz predmetu, ale štruktúra svetelnej vlny, ktorá sa odrazila a rozptýlila na predmete. V ideálnom prípade, ak je hologram dostatočne dobre vytvorený, nedá sa obyčajným pohľadom zistiť, či sa pozeráme na reálnu scénu alebo na jej hologram.

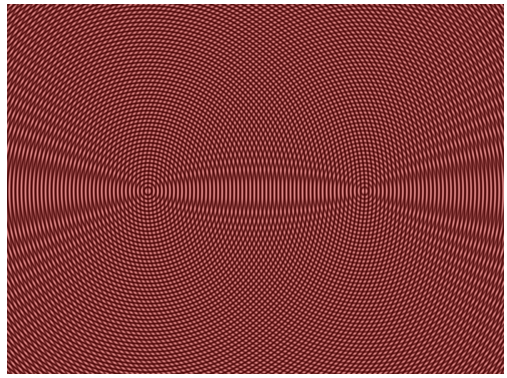
Princíp holografie objavil pôvodom maďarský fyzik Dennis Gabor v roku 1947. O pár desaťročí neskôr, v roku 1962, vynašiel ruský fyzik Jurij Denisjuk metódu umožňujúcu zaznamenať trojrozmerný obraz na fotografickú platňu. Táto metóda vytvorenia hologramu sa používa dodnes.



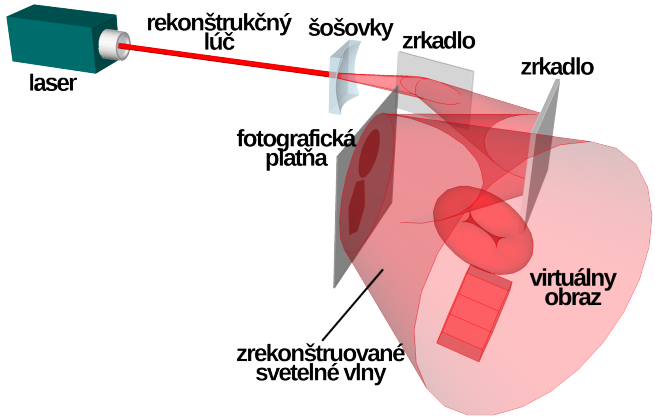
Obr. 3.14: Princíp vytvorenia hologramu

Hologram možno vytvoriť pomerne jednoducho, ak máme k dispozícií laser, polopriepustné zrkadlo a vhodnú fotografickú platňu (pozri obr. 3.14). Najskôr sa laserový lúč (vlnový zväzok) rozdelí pomocou polopriepustného zrkadla na dva. Jeden z nich, predmetový, nasmerujeme na predmet, z ktorého sa svetlo odráža na fotografickú platňu. Druhý, referenčný, nasmerujeme pomocou zrkadla priamo na fotografickú platňu. Keďže tieto dva vlnové zväzky prejdú rôzne dráhy a navyše je predmetový lúč zmenený odrazom od objektu, majú jednotlivé svetelné vlny posunutú fázu – sú časovo posunuté. Na fotografickej platni sa potom zaznamená interferencia týchto vĺn v podobe interferenčných prúžkov (pozri obr. 3.15). Na vyvolanú fotografickú platňu potom stačí namieriť pôvodný, tzv. rekonštrukčný laserový lúč. Jeho vlnový zväzok sa začne na interferenčných prúžkoch rôzne ohýbať a pozorovateľ cez

fotografickú platňu uvidí virtuálne objekty (obr. 3.16). Tieto virtuálne objekty je možné pozorovať z rôznych smerov, ako cez okno, ktoré je ohraničené rozmermi hologramu. Ak v čase vytvárania hologramu nejaké blízke predmety zakrývali vzdialenejšie predmety, zmenou polohy hlavy môže pozorovateľ uvidieť vzdialenejšie predmety a pozorovať aj to, čo bolo predtým zakryté iným objektom. V súčasnosti sa dajú vytvárať hologramy, ktoré nepotrebujú na rekonštrukciu laserový lúč, ale stačí im aj obyčajné svetlo (Wilson, 2019).



Obr. 3.15: Príklad interferenčných prúžkov



Obr. 3.16: Rekonštrukcia hologramu

3.4.1 Elektro-holografické displeje

Za zakladateľov elektro-holografie možno pokladať vedcov z americkej univerzity Massachusetts Institute of Technology (MIT), ktorí v roku 1992 zostrojili prvý holografický displej s názvom Mark I. Ich prvý prototyp zobrazoval ob-

raz veľký iba 2,5cm × 2,5cm × 2,5cm so 192 riadkami a s 15° zorným uhlom. Neskôr, v roku 2014 predviedli Mark IV, ktorý obsahuje výrazne lacnejšie komponenty a zobrazuje obraz vo väčšom rozlíšení. Tento displej však stále používa iba horizontálnu paralaxu, zobrazuje maximálne 468 riadkov a má malé zorné pole (Jolly et al., 2014).

Výpočtová holografia počíta interferenčné prúžky numericky, simulovaním šírenia a interferencie svetla alebo kombinuje dáta získané z viacerých CCD[14] kamier, ktoré snímajú reálny objekt z mnohých smerov pohľadu. Vytvorenie obrazu virtuálneho 3D objektu v elektro-holografickom displeji sa začína výpočtom, v ktorom sa pre priestorový obraz každého objektu v scéne vypočítajú optické vlnové charakteristiky[15]. Pri výpočte je scéna rozložená do veľkého počtu prvkov (tzv. subhologramov) a pre každý z nich sú následne vypočítané svetelné vlny. Zjednotenie všetkých vĺn potom predstavuje obraz celej scény. Tieto prvky môžu byť tvorené oblakom bodov, trojuholníkovou sieťou, viacerými vrstvami alebo zväzkami lúčov. Používa sa aj kombinácia prvkov, napr. spojenie oblaku bodov s trojuholníkovou sieťou (Park, 2017). Pri výpočte svetelných vĺn a smeru ich šírenia sa najčastejšie používa fázové spektrum, ktoré sa vypočíta Fourierovou transformáciou. Následne sa vypočítané informácie zakódujú do signálov, ktoré v displeji modulujú laserový lúč. Pri výpočte je nutné spracovávať obrovské množstvo údajov. Kým pri bežnom 2D displeji je veľkosť pixelov okolo 100 mikrometrov, pri holografickom displeji je nutné počítať s interferenčnými prúžkami, ktoré sú od seba vzdialené aj menej ako 0,5 mikrometra.

V holografickom displeji môžeme objekty vidieť z rôznych smerov, presne ako v reálnom prostredí. Obrazovka zariadenia sa správa ako hologram a všetky body na jej povrchu vyžarujú svetelné vlny do rôznych smerov s rôznymi charakteristikami, presne ako keby sme sa dívali cez normálne okno.

Vo vnútri holografického displeja Mark II (pozri obr. 3.17) je laser, ktorý vytvára zväzok lúčov. Tento zväzok prechádza cez akusticko-optický modulátor (AOM)[16], ktorý ho moduluje[17], t. j. zmení jeho pôvodné vlastnosti, pričom sa dá dosiahnuť, aby sa svetelné lúče šírili takými smermi, akoby vychádzali z bodu za obrazovkou displeja alebo boli zaostrené do nejakého bodu pred obrazovkou. AOM je ovládaný počítačom a vstupujú do neho údaje o jednotlivých „digitálnych interferenčných prúžkoch“. Modulovaný

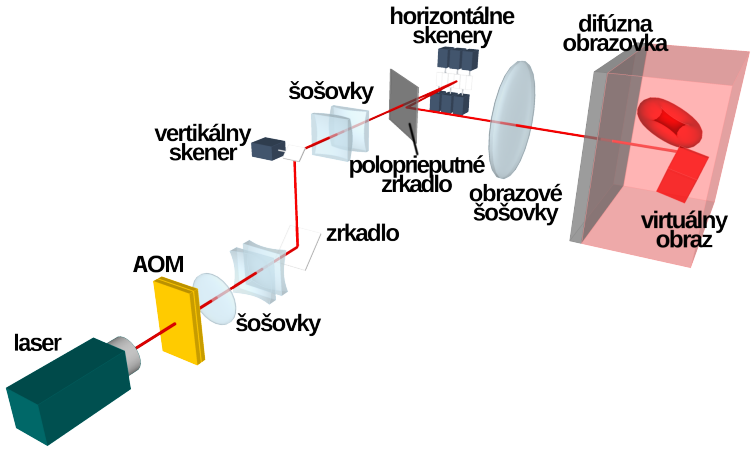
[14] CCD je skratka pre *charge-coupled device*. Je to typ senzora snímajúceho svetlo, ktorý sa používa vo fotoaparátoch a skeneroch.

[15] Neformálne povedané, je to digitálna obdoba interferenčných prúžkov.

[16] V názve má akustický, pretože používa zvuk, ktorý svojím vlnením pôsobí na piezoelektrický kryštál, a ten potom vytvára elektrický prúd. Piezoelektrický kryštál mení mechanickú energiu spôsobenú mechanickou deformáciou kryštálu na elektrickú.

[17] Modulácia svetelného lúča predstavuje zmenu jeho vlastností, ako napr. zmenu jeho intenzity, ohyb, atď.

zväzok lúčov je ďalej šošovkou zaostrený do jedného lúča a potom zrkadlami usmernený na ďalšiu šošovku. Lúč potom prechádza cez polopriepustné zrkadlo, pričom každá jeho časť ide na tri zo šiestich horizontálne spojených zrkadlových skenerov. Tieto skenery vychyľujú lúče, aby sa jeho svetlo dostalo na konkrétny bod v riadku displeja. Ďalej je lúč odrazený polopriepustným zrkadlom na zväčšovacie (obrazové) šošovky a nakoniec dopadá na matnicu (difúzor), na ktorej je možné pozorovať výsledný 3D obraz. Celý obraz vzniká postupným vykresľovaním jednotlivých bodov (St-Hilaire et al., 1992).



Obr. 3.17: Princíp elektro-hologramu

Počítačom vytváraný hologram musí spracovávať obrovský objem informácií. Prvý elektro-holografický displej Mark I vytváral malé obrázky, ktoré potrebovali pri každej zmene obrazu niekoľko minút výpočtu. Pomocou nových prístupov, ako holografická kompresia šírky pásma, využitie sledovania pohybu očí, použitie výkonnejších modulátorov, či rýchlejší hardvér, je možný interaktívny výpočet a zobrazovanie zložitého 3D obrazu aj s viacerými objektmi v reálnom čase (Geng, 2013).

Holografický displej od *SeeReal* používa snímač polohy očí, aby vypočítal smer šírenia svetelných vĺn odrazených od virtuálnych objektov iba pre miesta, kde sú umiestnené oči pozorovateľa. Tento prístup výrazne znižuje množstvo informácií, ktoré je potrebné spracovať a následne zobrazovať, čím umožňuje pozorovateľovi voľne sa pohybovať pred obrazovkou a sledovať zmenený obraz v reálnom čase s dostatočným rozlíšením a širokým zorným uhlom (SeeRealTechnologies, 2018).

Existujú aj iné prístupy ako vytvoriť elektro-holografický obraz. *IMEC* používa prvky na báze MEMS (micro-electro-mechanical system), v ktorom

milióny miniatúrnych difrakčných[18] plôšok rýchlo menia sklon a rozptyľujú svetlo s požadovanou vlnovou dĺžkou smerom k očiam pozorovateľa. *Qinetiq* zasa používa aktívny systém dlaždíc, v ktorom obraz vytvorený elektricky adresovateľnými priestorovými modulátormi svetla (*spatial light modulator* – SLM) prechádza cez šošovku a replikačnú optiku do opticky adresovateľných priestorových modulátorov svetla. V nich sa potom uchovávajú „digitálne interferenčné prúžky". Výhodou tohto systému je, že oproti iným dokáže zobraziť 3D obrazy s výrazne vyšším rozlíšením – až 5 miliárd voxelov (Geng, 2013).

Pre vytvorenie komerčne úspešného elektro-holografického displeja treba prekonať niekoľko významných problémov. Prvý je spôsobený samotným princípom holografie, pri ktorom musí holografický displej spracovávať a následne zobrazovať obrovské množstvo informácií. Ďalší problém predstavuje optická hustota (rozlíšenie) prvkov, ktoré modulujú svetelnú vlnu. Čím je ich rozlíšenie menšie, tým menší je zorný uhol. Pre uspokojivé výsledky by modulátor svetelných vĺn musel spracovávať v reálnom čase niekoľko desiatok gigapixelov. Vyriešenie týchto problémov predstavuje obrovskú technickú výzvu a nedá sa dopredu odhadnúť, kedy budú prvé komerčné holografické displeje dostupné za prijateľnú cenu.

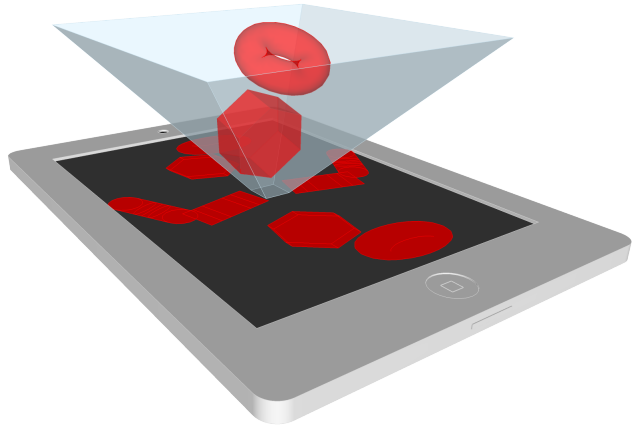
3.5 Pseudo-3D displeje

Keďže sa technológie 3D zobrazovania stávajú atraktívnymi pre médiá a verejnosť, často majú mnohé zariadenia zobrazujúce virtuálny obraz názov „holografické". Medzi príklady patrí „hologram" Jessicy Yellin, vysielaný v CNN počas prezidentských volieb v USA v roku 2008 (YouTube, 2008). Podobne sa hologramom nazýva zobrazenie premietaného obrazu, napríklad z tabletu, na sklenené plochy resp. polopriehľadné fólie, ktoré využíva techniku známu pod názvom *Pepper's ghost*[19] (pozri obr. 3.18). Mnohí nazývajú hologramom aj obraz premietaný do hmly alebo obraz vytvárajúci grafické vzory kvapiek tečúcej vody, ktoré mohli vidieť účastníci svetovej výstavy World Expo v Španielsku v roku 2008 (Geng, 2013). Niektoré technológie pseudo-3D displejov sa stali úspešným komerčným produktom. Príkladom je *HYPERVSN Solo* využívajúce rýchlo rotujúce ramená, na ktorých sú miniatúrne farebné LED (Hypervsn, 2018). V skutočnosti však tieto „hologramy"

[18] Difrakcia je optický jav, v ktorom sa svetelný lúč (vlnenie) za prekážkou ohýba od svojho pôvodného smeru.

[19] Pepper's ghost je technika, ktorá vytvára virtuálny obraz (ilúziu) pomocou optického zlučovača, ktorý sa nachádza v okuliaroch pre rozšírenú realitu. Ako optický zlučovač môže slúžiť aj obyčajná fólia.

nie sú založené na princípoch viacpohľadových stereoskopických, objemových či elektro-holografických displejov a neposkytujú potrebné fyziologické stimuly pre vnímanie hĺbky.



Obr. 3.18: Príklad pseudo-3D displeja využívajúceho techniku Pepper's ghost

Nájdu sa ale aj technológie, ktoré sa nedajú jednoznačne zaradiť do predchádzajúcich kategórií. Príkladom sú komerčne úspešné produkty od americkej firmy *Zebra Imaging*, ktoré využíva vojenská americká výskumná agentúra DARPA. Zebra Imaging vyrába nielen veľkoformátové hologramy, ale aj viacpohľadové „autostereoskopické" displeje, ktoré využívajú prvky nazývané *hogely* distribuujúce svetlo do viacerých pohľadov. Na takýto displej sa dá pozerať z mnohých smerov, pretože poskytuje úplnú paralaxu, na rozdiel od klasických autostereoskopických displejov, ktoré využívajú iba horizontálnu paralaxu (Burnett, 2017).

4 Projektory

Projektory sú zariadenia, ktoré premietajú obraz (digitálny alebo klasický – analógový) na nejakú projekčnú plochu. Najčastejšie sa využívajú v kinách, avšak vo všeobecnosti nimi môžeme nahradiť displeje, najmä vtedy, ak potrebujeme zobraziť obraz s veľkými rozmermi. Je oveľa jednoduchšie (a aj lacnejšie) použiť na zväčšenie obrazu šošovky, ako skonštruovať veľký LCD či OLED displej. Takéto zariadenia sa nachádzajú v priehľadových displejoch a aj v niektorých typoch náhlavných displejov a okuliarov pre rozšírenú realitu. V súčasnosti sa používajú najmä LCD a DLP (*digital light processor*) projektory, menej známe sú LCOS (*liquid crystal on silicon*). V minulosti sa ešte niekoľko desaťročí používali CRT projektory.

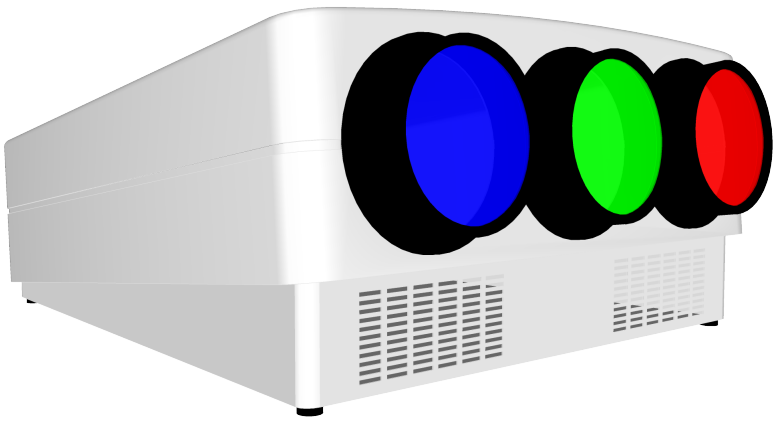
História týchto zariadení siaha minimálne do roku 1659, keď dánsky vedec Christian Huygens použil vyduté (konkávne) zrkadlo v zariadení s názvom *magic lantern*, ktoré odrážalo svetlo zo sviečky na sklenenú doštičku. Obraz, ktorý bol na sklenenej doštičke, sa potom premietol na plátno zväčšený, pretože zrkadlo bolo zakrivené. O storočie neskôr, v roku 1756, vynašiel švajčiarsky matematik, fyzik a konštruktér Leonhard Euler episkop, ktorý fungoval trochu inak ako zariadenie magic lantern. Episkop využíval obyčajné zrkadlo a šošovky, pomocou ktorých bol svetelný lúč zdroja svetla nasmerovaný na kresbu, od ktorej sa odrazil a cez výstupnú šošovku sa potom zväčšený obraz kresby premietol na projekčnú plochu. Projektory sa časom rozšírili aj do domácností a tzv. diaprojektory (*slide projectors*) sa stali veľmi populárne, najmä v 60. rokoch minulého storočia, keď slúžili na premietanie diapozitívov[1]. Prvý komerčný LCD projektor sa začal predávať okolo roku 1990, prvý DLP projektor o 6 rokov neskôr a prvý LCoS projektor až od roku 2005 (JMGO, 2018).

[1]Diapozitív je jedno políčko pozitívneho kinofilmového pásu. Zvyčajne sa nachádza v plastovom rámčeku, a obsahuje klasickým kinofilmovým (analógovým) fotoaparátom odfotografovaný obraz. Na rozdiel od kinofilmu je jeho obraz pozitívny a nie negatívny.

4.1 CRT projektory

CRT projektory využívajú rovnakú technológiu ako displeje s katódovou trubicou. Používali sa od 50. rokov minulého storočia až do jeho konca, keď boli nahradené LCD projektormi. Obraz vytvárali tri samostatné katódové trubice (displeje) s vysokým jasom, pre každú farebnú zložku bola potrebná jedna. Obraz, ktorý katódová trubica vytvárala, bol čiernobiely, zafarbil sa až keď prechádzal cez farebnú šošovku (pozri obr. 4.1), ktorá obraz zväčšovala a usmerňovala svetelný lúč na projekčné plátno. Šošovky museli byť nastavené tak, aby sa všetky tri obrazy presne prekrývali na projekčnom plátne. Z tohto dôvodu musel byť projektor umiestnený na presnom mieste pred projekčnou plochou. V opačnom prípade museli byť šošovky opätovne nastavené, aby nevznikol problém s prelínaním obrazov. Kombináciou troch obrazov, červenej, zelenej a modrej farby vznikol na plátne plnofarebný obraz.

Nevýhodou CRT projektorov je vypaľovanie fosforu, ktorým trpia aj displeje s katódovou trubicou. CRT projektory sú analógové zariadenia, a podobne ako čiernobiele displeje s katódovou trubicou majú premenlivé (voliteľné) rozlíšenie. Ich obraz ponúka širokú farebnú škálu, vysoké rozlíšenie, dobrú reprodukciu tmavých farieb a rýchle prekresľovanie obrazu. Nevýhodou je, že ich obraz nie je dostatočné intenzívny, sú rozmerné, ťažké, drahé a potrebujú nastavovať šošovky (PCTechGuide, 2020).



Obr. 4.1: Príklad CRT projektoru

4.2 LCD projektory

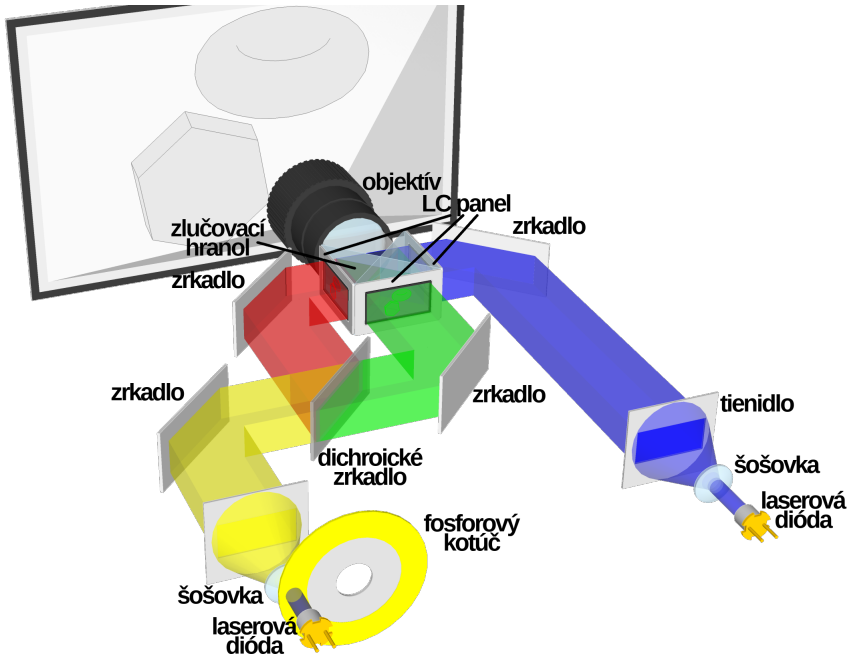
Princíp LCD projektora je relatívne jednoduchý. Lúč bieleho svetla, vytvorený intenzívnym zdrojom svetla (lampou), postupne prechádza cez dichroické zrkadlá[2] a je rozdelený na červený, zelený a modrý svetelný lúč (pozri obr. 4.3). Ďalšia možnosť, ako získať tri R, G, B svetelné lúče, je použiť zdroj svetla tvorený skupinou modro svietiacich laserových diód. Svetlo z diód je pomocou sústavy šošoviek a zrkadiel nasmerované na polopriepustné zrkadlo a rozdelené na dva lúče. Jeden z lúčov je potom nasmerovaný na rotujúci sklenený kotúč obsahujúci fosfor, ktorý premení modré svetlo pomocou fluorescencie na žlté svetlo. Lúč žltého svetla je nakoniec prostredníctvom dichroického zrkadla rozdelený na lúč červeného a lúč zeleného svetla (pozri obr. 4.2). Každý zo svetelných lúčov potom prechádza cez malý a priesvitný monochromatický panel z tekutých kryštálov (LCD panel – *LCD imager*) a takto sa vytvoria tri nezávislé obrazy červenej, modrej alebo zelenej farby[3]. Svetelné lúče s týmito tromi jednofarebnými obrazmi prechádzajú cez hranol, kde sa zlúčia do jedného lúča vytvárajúceho plnofarebný obraz. Zlúčený lúč nakoniec prechádza cez sústavu šošoviek výstupného objektívu a je nasmerovaný na projekčné plátno, na ktorom sa zobrazuje výsledný obraz. Bunky miniatúrnych LC panelov predstavujú subpixely premietaného obrazu a fungujú úplne rovnako ako u LCD displejov. Umožňujú prepustiť určité množstvo svetla alebo ho úplne zablokovať, podľa stupňa narovnania skrutkovice tekutých kryštálov ovplyvňovaných elektrickým poľom. Medzi bunkami (subpixelami) LC panelu je malá medzera, v ktorej sú tenké elektrické vodiče, pomocou ktorých sa ovplyvňujú tekuté kryštály v bunkách. Táto medzera medzi bunkami spôsobuje nežiadúci mriežkový efekt (*screen-door effect*), ktorý je postrehnuteľný, najmä ak používateľ sleduje premietaný obraz z krátkej vzdialenosti.

LCD projektory poskytujú dostatočný kontrast, ktorý sa dá zlepšiť použitím dynamickej clony a polarizovaného svetla, ktoré bráni nežiadúcemu rozptylu svetla v optickej sústave. Keďže vyrobiť LC panely s veľkým rozlíšením 4K Ultra HD[4] je v súčasnosti veľmi náročné, niektoré projektory používajú techniku pixelového posunu (*pixel-shifting*). Táto technika využíva veľmi rýchlo vibrujúcu refrakčnú platničku, ktorá sa nachádza medzi zlučovacím hranolom a výstupnou optikou. Refrakčná platnička dokáže o pol pixelu posunúť celý výsledný obraz šikmo hore a hneď za tým šikmo dole (v smere

[2] Dichroické zrkadlo je polopriepustné zrkadlo, ktoré prepúšťa len určitú časť svetelného spektra a zvyšnú odrazí. Takto je možné rozdeliť dichroickým zrkadlom lúč bieleho svetla na červený a azúrový. Azúrový lúč je potom možné ďalším dichroickým zrkadlom rozdeliť na modrý a zelený.

[3] Zobrazovacie LC panely sú miniatúrne a priesvitné LCD displeje vo veľkosti poštovej známky, ktoré neobsahujú farebné filtre a nemajú vlastný zdroj svetla.

[4] 4K Ultra HD rozlíšenie má 3840 × 2160 pixelov.



Obr. 4.2: Schéma LCD projektora s dvomi laserovými zdrojmi svetla

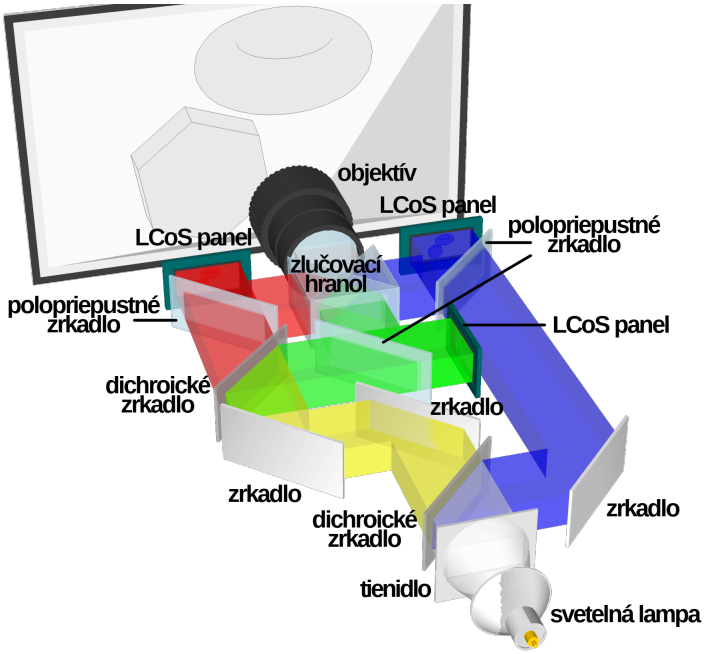
diagonály obrazu), čím sa dosiahne dvojnásobné rozlíšenie, keďže ľudský mozog vníma dva rýchlo za sebou zobrazené obrazy ako jeden. Navyše sa touto technikou redukuje mriežkový efekt, keďže sa pixely mierne prekrývajú (Wilkinson, 2020).

4.3 LCoS projektory

LCoS projektory využívajú veľmi podobný princíp ako LCD projektory. Tiež používajú tri samostatné panely obsahujúce tekuté kryštály, avšak tie sú mierne odlišné. Lúč zo zdroja svetla je rovnakým princípom ako u LCD projektorov rozdelený na lúč červenej, zelenej a modrej farby. Tieto tri lúče potom prechádzajú cez polopriepustné zrkadlá (pozri obr. 4.3) a dopadnú na LCoS panely (*LCoS imagers*). Svetlo z nich sa odráža do zlučovacieho hranola a nakoniec cez sústavu šošoviek vychádza z projektora von.

Štruktúra LCoS panelov sa od LC panelov líši v tom, že obsahuje na zadnej strane reflexnú vrstvu, od ktorej sa svetlo odráža. Vodiče aj tranzistory (elektródy), ktoré ovplyvňujú veľkosť narovnania skrutkovice tekutých kryštálov sa nachádzajú až za touto reflexnou vrstvou. Takéto usporiadanie prináša

niekoľko výhod. Prvá z nich je, že bunky môžu byť oveľa bližšie pri sebe, čím sa eliminuje nežiadúci mriežkový efekt. Druhá výhoda spočíva v tom, že bunky môžu byť menšie a nie je problém vyrobiť zobrazovacie panely s rozlíšením 4K. Poslednou výhodou je to, že takýto zobrazovací panel pohlcuje menej svetla ako klasický LC panel.

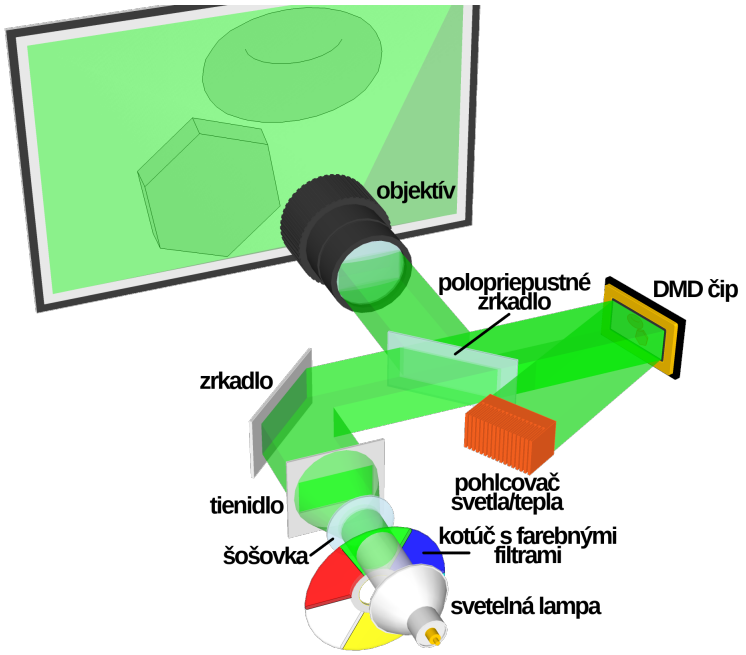


Obr. 4.3: Schéma LCoS projektora

LCoS projektory majú vynikajúci kontrast, ktorý je možné zlepšiť pomocou dynamickej clony či dynamickou moduláciou svetla. Existujú typy, ktoré obsahujú priamo LCoS panely s rozlíšením 4K, alebo ho podobne ako LCD projektory „simulujú“ pomocou techniky štvornásobného pixelového posunu s vertikálnym aj zvislým posunom. Existujú dokonca aj LCoS panely s rozlíšením 8K, ktoré sa využívajú v leteckých simulátoroch. LCoS projektory sú síce drahšie ako LCD projektory, avšak poskytujú lepší obraz i rozlíšenie. Používajú sa najmä v simulátoroch, digitálnych kinách ale aj v špičkových projektoroch domácich kín. Nájdeme ich aj v náhlavných displejoch a v okuliaroch pre rozšírenú realitu (Wilkinson, 2020).

4.4 DLP projektory

DLP projektory patria medzi najpoužívanejšie typy projektorov so širokou škálou použitia. Nájdeme medzi nimi lacné projektory pre bežné použitie až po veľmi drahé profesionálne 4K projektory používané v 3D kinách. Ich princíp fungovania je odlišný od predchádzajúcich dvoch typov. Existujú verzie s tromi zobrazovacími DLP panelmi (*DLP imagers*) ale aj s jedným zobrazovacím panelom. Pri verzii s tromi DLP panelmi musí byť svetelný lúč rozdelený na tri lúče červenej, zelenej a modrej farby. Ako zdroj svetla môže byť použitá výbojka s bielym svetlom, modré laserové diódy, modré a červené laserové diódy alebo vysokosvietivé LED[5] s červenou, zelenou a modrou farbou. V prípade použitia laserových diód sa kvôli vysokej výrobnej cene zelený laserový zdroj svetla takmer nepoužíva, ale sa pomocou fluorescenčného rotujúceho kotúča premení modrý lúč na žltý, prípadne na zelený (NEC, 2020). Pri verzii s jedným zobrazovacím panelom sa často používa biely zdroj svetla. Farebný lúč vznikne prechodom cez kotúč obsahujúci priesvitné farebné filtre (pozri obr. 4.4).

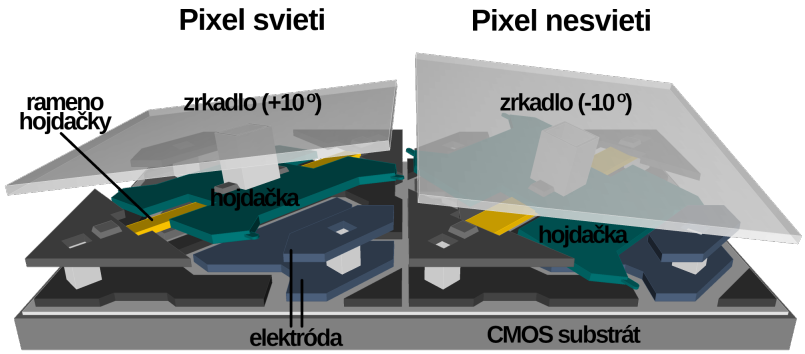


Obr. 4.4: Schéma DLP projektora

Princíp fungovania DLP projektoru spočíva v tom, že svetelný lúč červenej,

[5] Vysokosvietivé LED sa používajú pre projektory s menšou svietivosťou. Keďže nepotrebujú chladenie a rotujúci kotúč s filtrami, môžu byť menšie.

zelenej alebo modrej farby (prípadne inej, pozri časť nižšie) dopadá na DLP panel[6] od ktorého sa odráža. Namiesto malých buniek obsahujúcich tekuté kryštály, pozostáva DLP panel z veľkého počtu mikroskopických zrkadiel, predstavujúcich jednotlivé pixely. Tento DLP panel sa často označuje názvom *digital micromirror device* (DMD). Každé mikroskopické zrkadlo (mikrozrkadlo) je pripevnené na malom stĺpiku, ktorý sa hojdá na miniatúrnej „hojdačke“ (pozri obr. 4.5). Prostredníctvom elektrostatickej sily sa hojdačka nakloní na jednu alebo druhú stranu, čím vychýli zrkadlo do dvoch polôh. V prvej polohe sa svetelný lúč dopadajúci na mikrozrkadlo odrazí do výstupnej sústavy šošoviek objektívu projektora a na projekčnom plátne sa zobrazí svietiaci bod. V druhej polohe je svetlo odrazené mimo objektív do pohlcovača svetla a tepla (*light absorber*). Každé mikrozrkadlo je schopné vychyľovať sa do týchto dvoch pozícií „svieti“ alebo „nesvieti“ niekoľko tisíc krát za sekundu. Keďže tento princíp neumožňuje meniť intenzitu (jas) svietiacich bodov jednotlivo (zobrazovaný bod buď svieti alebo nesvieti), musí sa jas ovplyvňovať iným spôsobom. Využíva sa v ňom princíp veľmi rýchleho blikania a zotrvačnosť vnímania svetelného toku človekom[7]. Jas každého pixelu závisí od toho, aké percento celkového času strávi zrkadlo v cykle zobrazovania bodu snímky obrazu vychýlené v polohe svieti voči polohe nesvieti. Ak je napríklad mikrozrkadlo v aktuálnom cykle vychýlené do polohy svieti 10% celkového času a do polohy nesvieti 90% času, potom má svetelný bod (pixel) intenzitu 10% z maxima.



Obr. 4.5: Detail DMD čipu

Jednotlivé bunky (mikrozrkadlá) v DMD sú relatívne blízko pri sebe, takže tieto projektory nemajú až tak výrazný mriežkový efekt, ako LCD projektory. Kontrast DLP projektorov je horší ako u LCoS projektorov, avšak aj tu je

[6]DLP panely môžu mať rôznu veľkosť, podľa toho v akých projektoroch sa používajú. Existujú veľkosti s 0,5cm ale aj 3,5cm uhlopriečkou.

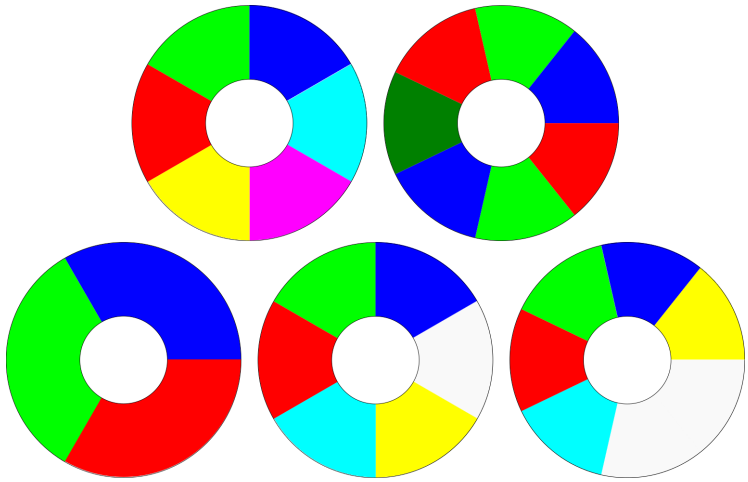
[7]Mozog človeka nevníma jednotlivé fotóny dopadajúce na svetlocitlivé bunky v oku, ale iba určitý súhrnný počet fotónov za krátky časový okamih.

možnosť zlepšiť ho pomocou dynamickej clony či dynamickou moduláciou osvetlenia. Podobne ako u LCoS projektorov, nie je problém vyrobiť DMD s rozlíšením 4K, prípadne zvýšiť rozlíšenie polpixelovým posunom, pomocou oscilujúcej refrakčnej platničky. Technológia DMD dokonca umožňuje vytvoriť aj mikrozrkadlá, ktoré sa môžu o malý uhol pootočiť, a tým zabezpečiť individuálny pixelový posun.

Na rozdiel od LCD a LCoS projektorov, DLP projektory môžu používať tri alebo iba jeden zobrazovací DMD čip. Keďže DLP projektory s tromi DMD sú zvyčajne drahé, väčšinou sa stretneme s jednočipovými, ktoré používajú ako zdroj osvetlenia xenónovú alebo vysokotlakovú výbojku obsahujúcu ortuťové pary. Každý lúč primárnej farby – červený, zelený alebo modrý – je nasmerovaný na jediný DMD postupne, jeden za druhým. DMD zakaždým vytvorí obraz pre farbu, ktorej svetelný lúč práve na DMD dopadá. Proces zobrazovania jednofarebných obrazov trvá veľmi krátko a navyše sa rýchlo za sebou strieda, čo ľudský mozog vníma, ako keby sa primárne farby zmiešavali a pozorovateľ vníma stabilný, plnofarebný obraz.

Pri jednočipových DLP projektoroch prechádza biely svetelný lúč cez rotujúci kotúč s farebnými filtrami (pozri obr. 4.4). Kotúč je rozdelený na segmenty, pričom v každom sa nachádza iný farebný filter. Existujú kotúče s filtrami troch primárnych farbieb, avšak používajú sa kotúče s viacerými farbami. Pridáva sa filter so žltou, azúrovou či purpurovou, prípadne tmavozelenou farbou (pozri obr. 4.6). Pridaním doplňujúcich farieb sa zlepšuje celkové farebné podanie zobrazovaného obrazu. Často sa pridáva aj priesvitný filter, ktorý zvyšuje celkovú intenzitu (jas) výsledného obrazu, podľa toho, koľko percent svetla filter prepustí. Ak svetelný lúč prechádza cez priesvitný filter, jeho farba zostáva biela a na DMD čipe sa musí zobraziť čierno-biely obraz. Použitie priesvitného filtra však spôsobuje, že farby zobrazovaného obrazu sú menej saturované, najmä ak priesvitný filter prepúšťa veľa bieleho svetla. Jednočipové DLP projektory majú síce výhodu v tom, že sú lacné, avšak vytváranie výsledného obrazu, z troch po sebe idúcich obrazov primárnych farieb, má za následok vznik nežiadúceho dúhového efektu (*rainbow effect*). Mnoho ľudí ho pozoruje na okrajoch svetlých objektov, nachádzajúcich sa na tmavom pozadí. Tento nedostatok sa dá čiastočne vyriešiť zrýchlením rotácie kotúča s filtrami, alebo využitím väčšieho počtu farebných segmentov na kotúči.

Každá z technológií projektorov má svoje prednosti a nedostatky. Dôležité je to, ktoré pri konkrétnom použití projektora prevažujú. Ak je potrebné, aby projektor zobrazoval sýte farby, mal široký farebný rozsah a dobrý kontrast, je dobré vybrať si LCD projektor. V prípade, že používateľovi vadí mriež-



Obr. 4.6: Príklady kotúčov s farebnými filtrami

kový efekt, je lepšia voľba LCoS projektor, ktorý má navyše lepší kontrast. Nevýhodou je však jeho vyššia cena. V prípade, že je pri zobrazovaní obrazu dôležité čo najväčšie rozlíšenie (napr. v kinách), je vhodná voľba LCoS alebo DLP projektor, ktorý ponúka natívne 4K rozlíšenie, a nemusí ho simulovať pixelovým posunom. Cenovo výhodné sú DLP projektory s jedným DMD čipom, avšak tie nemajú dobrý kontrast a farebné podanie zobrazovaného obrazu. Naopak, projektory s tromi zobrazovacími panelmi môžu spôsobovať problém so zarovnaním troch jednofarebných obrazov pri ich zlúčení do jedného. Našťastie niektoré typy projektorov umožňujú elektronicky posunúť červený, zelený alebo modrý obraz a problém so zarovnaním odstrániť. Aj celková svietivosť projektora, meraná v lúmenoch, môže byť pre používateľa dôležitá. Ak bude používateľ často premietať obraz v jasne osvetlenej miestnosti, alebo potrebuje aby projektor zobrazoval veľký obraz (ako napr. v kine), tak by si mal vybrať projektor, ktorý používa vysokovýkonný laserový zdroj svetla. Vo všeobecnosti majú laserové zdroje svetla dlhšiu životnosť ako často používané výbojky. V prípade, že používateľ nepotrebuje intenzívne svietiaci projektor, môže si vybrať z projektorov, ktoré používajú pre osvetlenie silno svietiace LED. Kotúč s farebnými filtrami sa dá potom nahradiť červeno, zeleno a modro svietiacimi diódami, čím sa dosiahne širší farebný rozsah zobrazovaného obrazu, dlhšia životnosť svetelného zdroja, menšia veľkosť projektora a nižšia cena (Wilkinson, 2020; Vandenberghe, 2014).

5 Náhlavné displeje a okuliare pre rozšírenú realitu

V kategórií náhlavných displejov (*head-mounted display* – HMD) a okuliarov pre rozšírenú realitu (*optical head-worn displays* – OHWD), resp. optických priehľadových zobrazovacích zariadení nájdeme už pomerne širokú škálu komerčne dostupných zariadení. Medzi najznámejšie patria *Oculus Rift*, *Google Glass* a *Microsoft HoloLens*. Ich praktické využitie je pomerne rozsiahle. Najčastejšie sa používajú vo virtuálnej a v rozšírenej realite. Dajú sa využiť v zábavnom priemysle, počítačových hrách, v rôznych vedeckých a technických oboroch, v medicíne ako pomôcka pri chirurgických zákrokoch, vo výučbe a na vojenské účely, napr. pri zobrazovaní taktických informácií. Časom sa s nimi pravdepodobne stretneme v mnohých oblastiach života. Širšiemu využitiu zatiaľ bráni vysoká cena a nie celkom uspokojivé technické parametre, ako sú šírka zorného uhla, rozlíšenie[1], ostrosť, kontrast zobrazovaného virtuálneho obrazu a v neposlednom rade aj priehľadnosť optickej sústavy a kompaktnosť celého zariadenia.

Obr. 5.1: Google Glass (Tim.Reckmann, 2014) a Microsoft HoloLens (Ramadhanakbr, 2016)

Výskumníci vyvíjajú technológie na podporu interaktívnej 3D vizualizácie,

[1]Rozlíšenie určuje počet zobrazovaných bodov na jednotku plochy. V HMD a OHWD sa uvádza rozlíšenie v uhlových minútach – arcmin. 1 arcmin je uhlová miera rovná 1/60 stupňa.

ktorá je využívaná v náhlavných displejoch a okuliaroch pre rozšírenú realitu už viac ako tri desaťročia. V roku 1968 popredný americký odborník na počítačovú grafiku Ivan Sutherland predviedol na Harvardskej univerzite prvé zariadenie s displejmi umiestnenými na hlave. V polovici deväťdesiatych rokov 20. storočia spoločnosť Microvision vyvinula sietnicový skener, ktorý vykresľoval rastrový obrázok priamo na očnú sietnicu (Rolland et al., 2009). V poslednom desaťročí vedci urobili veľký pokrok v konštrukcii HMD a OHWD. V roku 2013 predstavila Google svoje *Google Glass* a o pár rokov neskôr Microsoft predviedol *HoloLens*. V súčasnosti existuje už viac ako desiatka komerčných výrobcov týchto zariadení. Postupne sa zmenšovala ich veľkosť a hmotnosť, zväčšoval zorný uhol, rozlíšenie obrazu a niektoré z nich sa stali cenovo dostupné aj pre bežného človeka, keďže v minulosti boli využívané najmä pre vojenské účely.

Tieto zariadenia sa dajú rozdeliť na dva druhy, podľa toho či sú priehľadné ako napr. slnečné či dioptrické okuliare alebo nepriehľadné, ktoré sú využívané najmä vo virtuálnej realite. Do skupiny priehľadných možno zaradiť aj technológiu priehľadových displejov, ktorá sa už v minulosti používala v lietadlách a v súčasnosti aj v niektorých automobiloch. Využitím tejto technológie je možné zobraziť virtuálny obraz (napr. navigačné údaje) na plochu čelného skla auta.

5.1 Náhlavné displeje

Zariadenia s nepriehľadovou optikou, ktorú nosí používateľ na hlave, sú vyvíjané už pomerne dlho, avšak k masovému rozšíreniu došlo až v roku 2012 uvedením najznámejšieho produktu Oculus Rift (pozri obr. 5.2). Prvé HMD boli veľmi objemné, pretože používali malé displeje s katódovou trubicou. V súčasnosti sa používajú najmä miniatúrne LCD či OLED panely. Okrem displejov v nich ešte nájdeme optiku, ktorá je potrebná na to, aby oko nemuselo zaostrovať na displej, ktorý je od oka iba pár centimetrov vzdialený, a ďalej na to, aby obraz z miniatúrneho displeja zväčšila. Keďže sú displeje dva, pre každé oko jeden, používateľ vidí stereoskopický obraz. Využitím binokulárnej disparity je potom stereoskopický obraz vnímaný ako trojrozmerný. HMD ešte obsahujú zariadenie pre snímanie polohy hlavy, stereo slúchadlá a niektoré z nich ešte obsahujú jednu či viac kamier a zariadenie na sledovanie pohybu očí. Toto všetko pomáha k vytvoreniu plnohodnotného zážitku pri hraní hier či využívaní iných aplikácií virtuálnej reality. Použitím kamier snímajúcich obraz pred HMD je možné simulovať priehľadovú optiku

a kombinovať reálny obraz z kamier s virtuálnym obrazom. Takto je možné aj náhlavné displeje použiť v rozšírenej realite.

Obr. 5.2: Oculus Rift (Samwalton9, 2017)

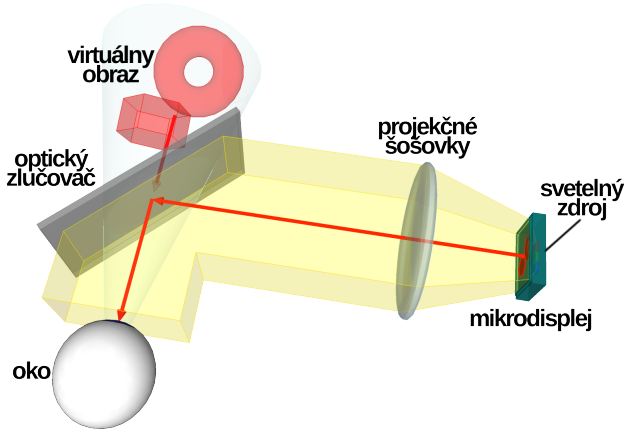
5.2 Okuliare pre rozšírenú realitu

Tieto zariadenia umožňujú nielen zobrazovať virtuálny obraz, ale súčasne dovoľujú používateľovi vidieť aj okolité prostredie. V tejto technológii je možne sledovať reálny obraz spolu s virtuálnym obrazom cez priehľadovú optiku. Niektoré zariadenia vytvárajú obraz iba pre jedno oko, sú ale aj také, ktoré vytvárajú stereoskopický (binokulárny) obraz pre obe oči, prípadne zobrazujú rovnaký obraz (biokulárny) pre každé oko. Základným prvkom týchto displejov je optický zlučovač, ktorý kombinuje virtuálny a reálny obraz do jedného.

Aj keď sa prvé displeje s touto technológiou objavili na konci 90. rokov minulého storočia, stále je na nich čo vylepšovať. Napriek značnému technologickému pokroku v optike, tieto displeje neponúkajú dostatočné rozlíšenie obrazu a súčasne veľký zorný uhol ($> 90°$). Kritickým prvkom v týchto displejoch už nie je zariadenie, ktoré vytvára obraz (mikrodisplej, mikroprojektor), ale optický zlučovač, ktorý má za úlohu spojiť svetlo prichádzajúce z okolia pozorovateľa s virtuálnym obrazom a cez optiku ho nasmerovať do oka pozorovateľa.

Najjednoduchší princíp, ako fungujú tieto zariadenia, môžeme vidieť na obrázku 5.3. Obraz je vytváraný malým zobrazovacím zariadením – mikroprojektorom, ktorý je umiestnený mimo zorného poľa a nachádza sa na boku alebo na vrchu celého zariadenia. Cez optickú sústavu je tento obraz nasmerovaný na optický zlučovač (napr. polopriepustné zrkadlo), ktorý pre-

pustí obraz z okolia pozorovateľa a súčasne odráža virtuálny obraz do oka pozorovateľa (Cakmakci et al., 2006).



Obr. 5.3: Princíp fungovania okuliarí pre AR

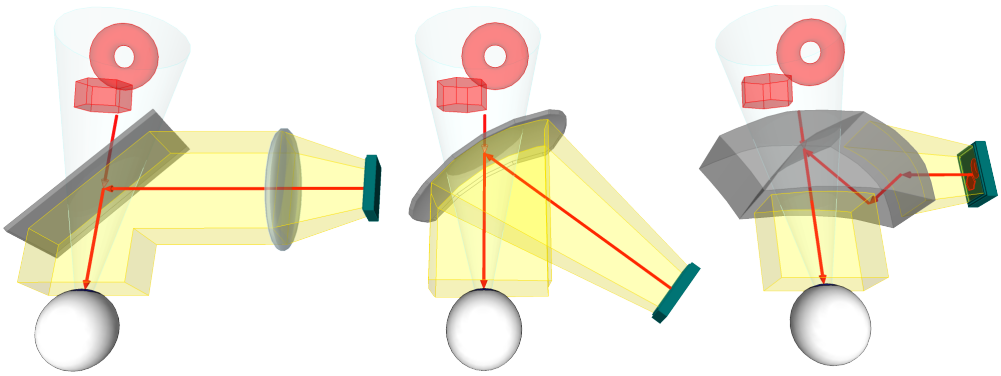
Zariadenie, ktoré vytvára virtuálny obraz, býva malý LCD či OLED panel alebo mikroprojektor. Mikroprojektor používa rovnakú technológiu, s akou sa stretneme v klasických projektoroch. Aby boli projektory do týchto displejov čo najmenšie, používa sa zvyčajne iba jeden DMD (*digital micromirror device*) čip, resp. jeden LCD či LCoS panel namiesto troch (po jednom pre každú RGB farebnú zložku). Farebný obraz sa potom vytvára tak, že sa postupne, rýchlo za sebou zobrazia tri obrazy, každý v inej farebnej zložke. Vďaka zotrvačnosti vnímania obrazu človekom je možné vidieť výsledný obraz s pestrou škálou všetkých farieb spektra. Ako zdroj svetla slúžia, buď tri RGB svetelné diódy, alebo je biele svetlo z LED rozložené na jednotlivé farebné zložky dichroickým zrkadlom (Hazra, 2015).

Vytvorený virtuálny obraz ďalej prechádza rôzne zložitou optickou sústavou. Tá je potrebná po prvé preto, aby sa obraz vytvorený mimo zorného poľa nakoniec dostal až do oka. Ďalej preto, aby sa virtuálny obraz „vznášal“ vo väčšej vzdialenosti od oka[2] a oko nemuselo zaostrovať na veľmi krátku vzdialenosť. Nakoniec preto, aby bol miniatúrny obraz z mikrodispleja zväčšený na potrebnú veľkosť. Súčasne sa požaduje, aby výsledný obraz bol čo najostrejší, bez optického skreslenia a mohol byť pozorovaný s dostatočne veľkým zorným uhlom.

V optickej sústave už nie sú len šošovky a prípadne zrkadlá, ako to bolo kedysi. V niektorých nájdeme sférické či planárne polopriepustné zrkadlá (pozri obr. 5.4), ktoré slúžia ako optický zlučovač. Tieto štandardné optické

[2]Doporučuje sa pár metrov až nekonečno.

zlučovače sú ale pomerne veľké a pohlcujú viac ako 50% svetla. Trochu lepšie s priehľadnosťou sú na tom *free-form* optické hranoly, ale tie sú stále ešte veľké. Preto sa do modernejších a menších displejov dávajú, buď polarizačné optické zlučovače[3], aké sú v Google Glass, alebo ploché holografické vlnovody (*holographic waveguides*) (pozri obr. 5.5), ktoré nájdeme v okuliaroch Microsoft HoloLens. Tieto najmodernejšie optické zlučovače pozostávajú z dvoch holografických optických prvkov a optického vlnovodu. Holografické optické prvky (*holographic optical elements* – HOE) ohýbajú svetlo pomocou veľmi malých štrbín a spôsobujú, že dopadajúci lúč sa od HOE odrazí tak, aby do optického vlnovodu dopadol pod približne 45° uhlom. Lúč sa v optickom vlnovode šíri od jedného okraju smerom k druhému využitím totálneho odrazu svetla. Holografické vlnovody sú ale pomerne náročné na výrobu a pre ich malú veľkosť neposkytujú uspokojivo široký zorný uhol. Google Glass má zorný uhol iba 13°, Microsoft HoloLens je na tom výrazne lepšie, má 35° (Guttag, 2016).

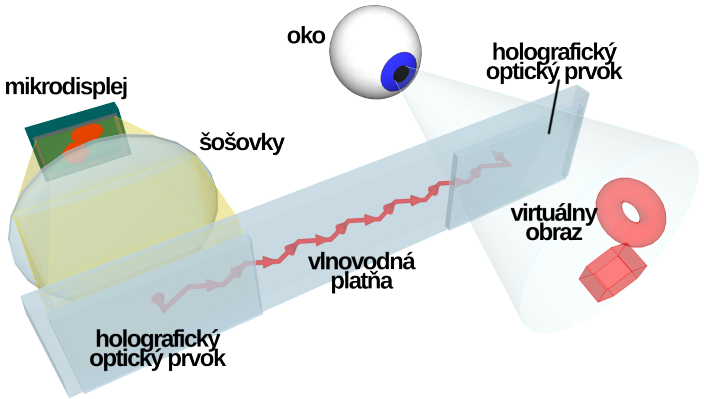


Obr. 5.4: Planárny, sférický a free-form optický zlučovač

Každý typ optického zlučovača má nejaký nedostatok. Planárne a sférické polopriepustné zrkadlá sú objemné, pohlcujú príliš veľa svetla, a v prípade sférických vzniká navyše deformácia obrazu. V holografických vlnovodoch dochádza k rozdielnemu lomu svetla pre rôzne farebné zložky, čo spôsobuje mierne rozostrenie obrazu. Navyše v prípade použitia menších optických zlučovačov je vidno aj jeho okraje. Malý zorný uhol je možné zväčšiť, buď zväčšením optického zlučovača, alebo zväčšením obrazu dopadajúceho do oka. Obe riešenia ale znižujú rozlíšenie virtuálneho obrazu (Guttag, 2016).

Jednou z ťažkostí pri spájaní virtuálneho obrazu s reálnym obrazom pomocou optického zlučovača je skutočnosť, že virtuálny objekt nemôže úplne zakryť objekty v reálnom obraze, ak je umiestený medzi pozorovateľom a scénou

[3]Polarizačné optické zlučovače prepúšťajú v každom smere iba vhodne polarizované svetlo.



Obr. 5.5: Optický zlučovač s holografickým vlnovodom

v reálnom svete. Existuje pomerne jednoduchý spôsob, ako problém oklúzie vyriešiť. Stačí pridať ďalší LCD panel, ktorý funguje ako maska a zabráni tomu, aby pozorovateľ videl tie časti obrazu reálnej scény, ktoré majú byť prekryté virtuálnym objektom. Doplnením ďalšej optickej sústavy pre túto masku sa dosiahne to, že jej obraz sa zobrazuje v nekonečne a virtuálne objekty budú zobrazované pred ňou. Keďže problém oklúzie nie je až taký podstatný a jeho riešenie vedie k pridaniu ďalšieho zobrazovacieho panela a optickej sústavy, v súčasných komerčných displejoch sa tento maskovací LCD panel nenachádza.

Druhý, vážnejší problém predstavuje vzdialenosť, v ktorej sa zobrazuje virtuálny objekt. Najčastejšie je totiž zobrazovaný v pevne danej „virtuálnej“ vzdialenosti (napr. 1 meter), ktorá je daná optickou sústavou. Ak je ale reálny objekt záujmu oveľa ďalej, vzniká problém s akomodáciou oka. Našťastie aj tento problém je možné vyriešiť. Použitím varifokálnej[4] optiky, napr. šošovkami z tekutých kryštálov, je možné zobraziť virtuálny objekt v potrebnej vzdialenosti (Hong et al., 2011).

Ďalší problém, o niečo menej vážnejší, sa týka ľudí nosiacich dioptrické okuliare. Niektoré konštrukcie OHWD, hlavne tie, ktoré sú masívnejšie, umožňujú, aby používateľ mohol pod OHWD používať svoje vlastné okuliare. Google Glass pre svoj minimalistický dizajn znemožňuje použitie vlastných okuliarov. Našťastie existujú verzie s pevným rámom, do ktorých si používateľ môže nechať osadiť dioptrické sklá, ktoré mu vyhovujú.

OHWD nie sú len „väčšie okuliare“, obsahujú v sebe veľa ďalších elektro-

[4] Varifokálna optika je tvorená šošovkami, ktoré vplyvom elektrického prúdu menia svoju ohniskovú vzdialenosť.

nických komponentov. Okrem spomínaných optických prvkov a zariadenia vytvárajúceho obraz – mikroprojektora, často ešte obsahujú jednu či viac kamier, mikrofón, senzory snímajúce pohyb hlavy, reproduktory a samozrejme malý počítač, ktorý to celé riadi. Nakoniec nesmie chýbať ani akumulátor, ktorý celému zariadeniu dodáva potrebnú elektrickú energiu. V niektorých modeloch býva navyše GPS a dokonca aj dotykový panel. Je celkom prirodzené, že sa často tieto zariadenia nazývajú „inteligentné okuliare“ (*smartglasses*). Môžu byť cez Bluetooth, Wi-Fi či USB pripojené k notebooku alebo smartfónu a komunikovať s ním. Jedna kamera sa zvyčajne používa pre nahrávanie obrazu. HoloLens okuliare ale majú navyše ďalšie dve, tzv. hĺbkové kamery. Zo stereo-obrazu, ktorý snímajú, vedia vypočítať priestorový obraz, ktorý je potrebný ak používateľ ovláda svoje „inteligentné okuliare“ pomocou gest rúk, alebo ak sú používané v nejakej AR aplikácii. Počítač v okuliaroch je potom schopný rozoznať jednotlivé roviny v reálnom prostredí a zobraziť na nich virtuálny obraz. Niektoré „inteligentné okuliare“ je možné ovládať zvukovými povelmi cez integrovaný mikrofón, alebo prstom na malom dotykovom paneli, podobne ako v notebooku (Warren, 2016).

Využitie OHWD môže byť naozaj všestranné, väčšiemu rozšíreniu zatiaľ bráni najmä vysoká cena. U niektorých modelov je to aj niekoľko tisíc USD. K smartfónu s aspoň Full HD displejom[5] je možné za pár desiatok dolárov kúpiť tzv. VR *headset* (pozri obr. 5.6), ktorý pozostáva z obyčajného „držiaka“ obsahujúceho dotykový panel, akcelerometer a optickú sústavu, do ktorého sa mobil jednoducho zasunie. Takéto zariadenie potom slúži ako normálny náhlavný displej.

Obr. 5.6: Headset Gear VR pre smartfón Samsung Galaxy (Pesce, 2014)

[5]Full HD má rozlíšenie 1080 × 1920. Doporučuje sa však mať smartfón s displejom, ktorého rozlíšenie je 4K Ultra HD, t. j. 2160 × 3840 pixelov.

5.3 Projekčné priehľadové displeje

Prvé typy projekčných priehľadových displejov využívali rovnaký princíp ako okuliare pre rozšírenú realitu, avšak používali veľký optický zlučovač, na ktorý sa premietal virtuálny obraz. Optický zlučovač bol tvorený obyčajným rovinným alebo zakriveným polopriepustným zrkadlom. Pri premietaní na zakrivenú plochu musel byť obraz najskôr umelo deformovaný, aby sa deformácia po zobrazení na zakrivenú plochu vyrovnala. Využitím princípu autostereoskopie a viacpohľadového displeja, ktorý premieta obraz na jednoduchý optický zlučovač, je možné vytvoriť 3D priehľadný displej bez konfliktu akomodácie-konvergencie očí. Keďže takýto systém je príliš objemný, sústreďujú sa ďalšie výskumy na využitie viacerých projektorov a holografických optických prvkov (Hong et al., 2011).

Takéto typy displejov sa zrejme v blízkej budúcnosti budú čoraz viac objavovať v automobiloch v podobe asistentov jazdy, zobrazujúcich vizuálne informácie na plochu čelného skla auta. V súčasnosti sa tieto priehľadové displeje (*head-up display* – HUD) v aute používajú iba pre navigáciu.

6 Vstupné zariadenia pre AR a VR aplikácie

Vstupných zariadení, pomocou ktorých komunikujeme so smartfónom, tabletom či notebookom a podobnými zariadeniami, je naozaj mnoho. Asi najbežnejším vstupom je klávesnica, myš alebo dotykový panel. Často si ani neuvedomujeme, že komunikujeme aj pomocou iných zariadení. Už pri odomykaní smartfónu či niektorých notebookov používame skener odtlačku prsta alebo zabudovanú kameru, ktorá sníma tvár používateľa. V smartfónoch a tabletoch nájdeme aj GPS modul, pomocou ktorého je možné určiť polohu, akcelerometer pre určenie aktuálneho zrýchlenia, gyroskop pre zistenie zmeny otočenia, elektronický kompas pre určenie severu a svetelný senzor, ktorý zisťuje intenzitu okolitého osvetlenia. Komunikáciu s ostatnými ľuďmi si skoro nikto nedokáže prestaviť bez mikrofónu a jedného či dvoch reproduktorov. Senzor priblíženia (*proximity sensor*) je vhodný na meranie krátkych vzdialeností a slúži napr. aj na to, aby vypol displej počas telefonovania. Už pomerne málokto vie, že smartfón často obsahuje aj senzor zisťujúci tlak vzduchu, aby mohol v niektorých aplikáciách presnejšie vypočítať aktuálnu nadmorskú výšku. V súčasnosti pribudla do smartfónov zaujímavá novinka v podobe infračerveného 3D skenera t. j. stereokamery s dvoma objektívmi pre získanie plnohodnotného priestorového obrazu, ktorý slúži napríklad na to, aby rozpoznal používateľa a odomkol smartfón. Aby bol zoznam takmer úplný, treba ešte spomenúť Wi-Fi a Bluetooth modul či USB konektor pre spojenie zariadenia s počítačom, televízorom či iným zariadením.

História vstupných zariadení sa pravdepodobne začína vynálezom dierneho štítku, ktorý sa prvýkrát použil v Spojených štátoch pri sčítaní ľudu v roku 1890, keď výrazne urýchlil spracovanie údajov pomocou elektrického sčítavacieho stroja. Aj keď prvú prakticky využiteľnú QWERTY klávesnicu si dal patentovať americký vynálezca Christopher Sholes už v roku 1868, až v roku 1948 bola klávesnica použitá na spojenie s počítačom. Prvý prototyp počítačovej myši bol vytvorený v roku 1964 americkým vynálezcom Douglasom

Engelbartom. Zaujímavosťou je, že grafické tablety a „dotykové“ perá boli používané skôr ako myš. Používajú sa od 50. rokov pre vkladanie grafických dát do počítačových systémov (Cardinal, 2011). Prvé pákové ovládače sa začali používať na začiatku 20. storočia v lietadlách[1]. Neskôr, v roku 1944 boli použité v druhej svetovej vojne na ovládanie kĺzavých bômb a riadených striel. V roku 1980 ho firma Atari ako prvá použila pre svoj herný počítač. V súčasnosti sa používa najmä na ovládanie dronov.

6.1 Klávesnice

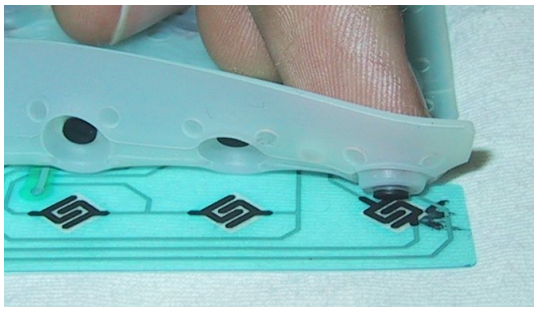
Klávesnica slúži na zadávanie znakov do počítača. Treba ale jasne odlíšiť mechanickú klávesnicu, ktorá je pripojená ku počítaču a funguje iným spôsobom ako softvérová či virtuálna klávesnica, ktorá sa zobrazuje napr. na dotykovej ploche tabletu.

Zjednodušene povedané, mechanická klávesnica funguje podobne ako tlačidlá na diaľkovom ovládaní. Aj keď existuje viacero typov – pružinovo-mechanické, mechanické s membránou a membránové, používajú viac-menej rovnakú myšlienku. Klávesnica obsahuje malý procesor a sieť vodičov usporiadaných do pravidelnej mriežky, ktoré prenášajú do procesora informáciu o tom, ktoré tlačidlo bolo stlačené. Vodiče sú pod každým klávesom prerušené. Keď je stlačený niektorý kláves, stlačí sa spínač, uzavrie sa prerušený obvod a do procesora príde informácia, ktorý obvod bol spojený. Klávesnica potom do počítača pošle číselný kód príslušného klávesu a ovládač v operačnom systéme zariadenia mu priradí konkrétny znak.

Najčastejšie sú používané mechanické klávesnice s pružnou (gumenou) membránou. Používajú malé, flexibilné silikónové či gumenné čiapočky, na ktoré sú zo spodnej strany nalepené ploché uhlíkové valčeky (pozri obr. 6.1). Keď je stlačený kláves, uhlíkový valček sa pritlačí na dvojicu rozdelených vodičov a uzavrie prerušený obvod. Keď je kláves uvoľnený, silikónová čiapočka sa vráti do svojho pôvodného tvaru a vytlačí klávesu späť do svojej pôvodnej polohy. Tieto klávesnice sú lacné, majú dobrú hmatateľnú odozvu a sú odolné voči poliatiu a korózii kvôli pružnej vrstve pokrývajúcej sieť vodičov.

Membránové klávesnice používajú jednoliatu, zvyčajne pružnú membránu, ktorá má na spodnej strane vodivú plochu pre každý kláves a na vrchnej strane má vytlačené symboly jednotlivých kláves. Je jednoduchšia na výrobu

[1] Cez sústavu kladiek a lán bolo možné pákovým ovládačom ovplyvňovať polohu klapiek na krídlach lietadiel.



Obr. 6.1: Vnútorná vrstva mechanickej klávesnice s membránou (Asiir, 2007)

a používa sa napr. v mikrovlnkách.

Čisto mechanické klávesnice fungujú na podobnom princípe ako bežné spínače. Každý kláves na klávesnici je tvorený samostatným mechanickým spínačom, ktorý obsahuje puzdro, v ktorom je pružinka a oddelené kovové pliešky, ktoré sa po stlačení spoja (pozri obr. 6.2). Tieto klávesnice sú zo spomínaných typov najťažšie a najdrahšie, ale majú dlhú životnosť (Tyson, 2000; Tyson et al., 2000).

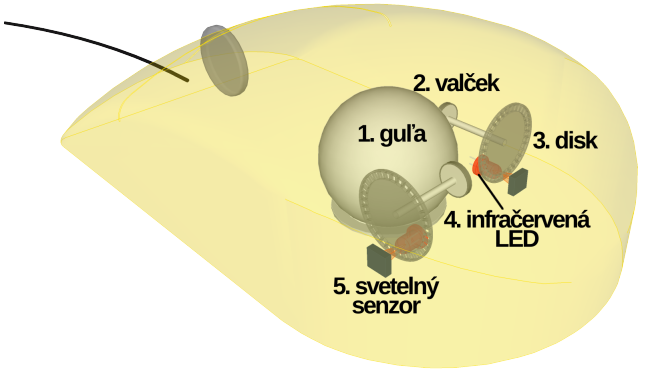
Obr. 6.2: Jeden kláves mechanickej klávesnice (Beardsmore, 2013)

6.2 Myši

Hlavnou úlohou myši je previesť pohyb ruky, ktorou je myš ovládaná, na signály, ktoré počítač používa na rôzne akcie, najčastejšie však na ovládanie kurzoru myši na obrazovke.

V mechanickej myši sa nachádza malá kovová guľôčka pokrytá gumovou

vrstvou. Pri pohybe myšou sa pohyb guľôčky (1) gúľajúcej sa po podložke prenáša na dva valčeky (2) vo vnútri myši. Jeden z valčekov je orientovaný tak, že registruje pohyb v smere osi x a keďže druhý je k nemu otočený o 90°, deteguje pohyb v smere y (pozri obr. 6.3).



Obr. 6.3: Schéma mechanickej myši

Každý valček je pripojený hriadeľom k disku s otvormi (3). Keď sa disk sa otáča, otvory na disku prerušujú svetlo prichádzajúce z LED (4) a infračervený snímač (5) zaregistruje počet týchto prerušení. Procesor myši počíta impulzy z oboch snímačov a premení ich na binárne údaje, ktoré počítač vyhodnotí ako aktuálnu zmenu polohy.

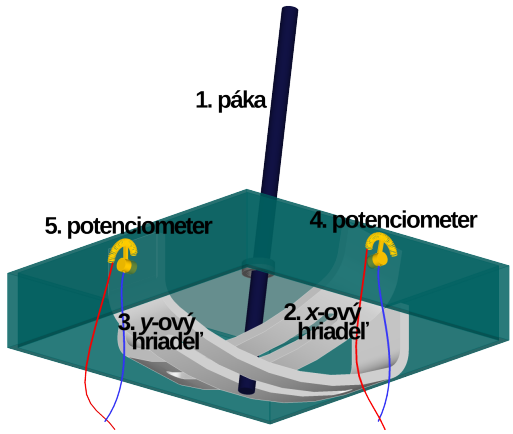
Optická myš bola predstavená spoločnosťou Agilent Technologies v roku 1999. Používa miniatúrny fotoaparát, ktorý sníma tisíce obrázkov za sekundu. Na spodku myši osvetľuje laserový lúč alebo červená LED plochu, po ktorej sa myš hýbe. Svetlo z nej sa odráža na svetelný CMOS senzor[2], ktorý slúži ako fotoaparát. Senzor pošle obrázok do signálneho procesora, ktorý deteguje vzory v obraze a skúma, ako sa vzory posunuli od predchádzajúceho záberu. Na základe zmeny vzorov v postupnosti obrázkov určí procesor myši, ako ďaleko a akým smerom sa myš presunula a odošle zodpovedajúce údaje do počítača. Optické myši nemajú mechanické časti a preto sa menej kazia. Nepotrebujú špeciálnu podložku a neprekáža im prach (Brain; Carmack, 2000).

[2]CMOS je skratka pre *complementary metal oxide semiconductor*. Je to svetlocitlivý senzor a používa sa vo fotoaparátoch a kamerách mobilných zariadení.

6.3 Pákové ovládače

Pákový ovládač (*joystick*) má veľmi podobné využitie ako myš, avšak sa väčšinou používa na hranie hier, prípadne ovládanie pohyblivých mechanizmov.

V štandardnom prevedení (pozri obr. 6.4) sa pohyb rukoväte prenáša na páku (1), ktorá je vložená do dvoch otočných, štrbinových hriadeľov (2, 3). Nakláňanie rukoväte dopredu a dozadu otáča hriadeľ okolo osi x, podobne naklonením rukoväte vľavo a vpravo otáča hriadeľ okolo osi y. Pri diagonálnom pohybe sa otočia oba hriadele naraz. Hriadele sú pevne spojené s potenciometrami (4, 5), ku ktorým sa privádza konštantný elektrický prúd. Ak na rukoväť nepôsobí žiadna sila, pružiny zabezpečia, aby sa vrátila do centrálnej polohy. Poloha rukoväte, t. j. naklonenie v x-ovom či y-ovom smere sa určí pomocou veľkosti napätia, ktoré vychádza z potenciometrov.



Obr. 6.4: Princíp pákového ovládača

Mnoho novších typov používa optické snímače na určenie polohy rukoväte, pričom sa používajú podobné komponenty a myšlienka, aká je využitá v mechanickej myši. Opäť tu nájdeme disky s otvormi, diódy a snímače infračervených lúčov (pozri obr. 6.3. Niektoré pákové ovládače majú navrchu a po stranách ešte malé spínače, ktoré majú podobnú funkciu ako tlačidlá myši. Nezriedka sa využíva aj tretí potenciometer pre os z (Harris, 2002a).

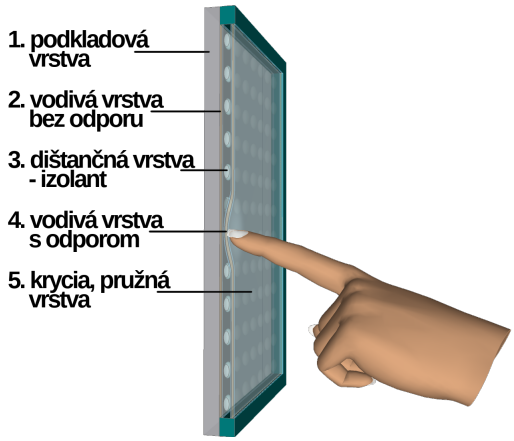
Obr. 6.5: Príklad herného pákového ovládača (Gamingforfun365, 2015)

6.4 Dotykové panely

Displeje ovládané dotykom sa v ére mobilov a tabletov stali úplne bežnými. Existujú tri základné systémy, ktoré sa používajú na rozpoznanie dotyku – odporové, kapacitné a vlnovo-akustické. Väčšinou sa používajú ako náhrada počítačovej myši.

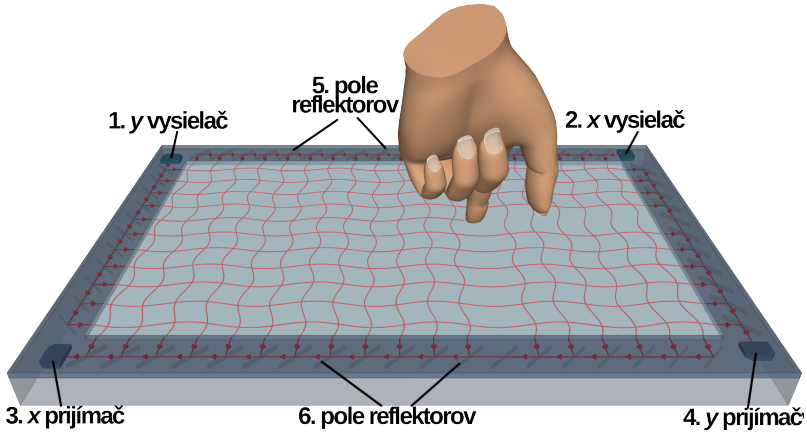
Základom odporových dotykových panelov sú dve vodivé vrstvy oddelené izolantom (3), pričom jedna z nich je vodivá a bez odporu (2). Druhá je neustále napájaná elektrickým prúdom a má špecifický odpor (4). Pri dotyku sa obe vrstvy (2, 4) spoja a na vodivej vrstve sa objaví napätie, zmenšené odporom, podľa toho kde sa vrstvy spojili. Podľa veľkosti napätia je potom možné určiť x-ovú či y-ovú vzdialenosť od okraja dotykovej plochy. Meranie veľkosti napätia sa vykonáva dvakrát, najskôr pre x-ový smer, potom pre y--ový smer. Pre spresnenie určenia polohy sa vykonáva meranie v každom smere viackrát a výsledná poloha sa vypočíta pomocou aritmetického priemeru.

Pri kapacitných dotykových paneloch je na vrchnej strane panelu vrstva, ktorá je schopná udržať elektrický náboj. Keď sa používateľ dotkne panelu prstom, časť náboja sa prenesie na používateľa a zníži sa náboj na kapacitnej vrstve. Tento pokles sa meria v obvodoch umiestnených v každom rohu dotykového panela. Z relatívnych rozdielov nábojov v každom rohu panelu sa určí výsledná pozícia dotyku. Kapacitná technológia má oproti odporovej výhodu v tom, že pri prechode svetla cez panel sa stratí len 10% intenzity, zatiaľ čo odporová pohlcuje až 25% svetla. Panely s odporovou technológiou sú síce náchylnejšie na poškodenie, ale na rozdiel od kapacitnej, reagujú aj na dotyk nevodivého predmetu (napr. na prsty ruky v rukavici).



Obr. 6.6: Rez odporovým dotykovým panelom

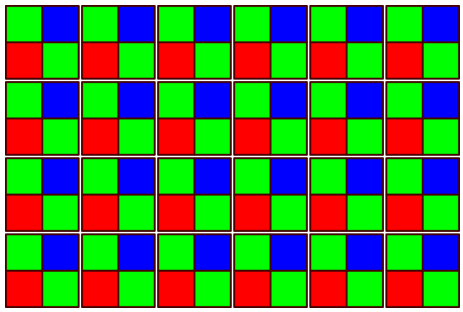
Technológia dotykových panelov, založená na princípe akustických vĺn, využíva dva prevodníky (*transducers*), jeden vysielač a jeden prijímač, umiestnené pozdĺž x-ovej a y-ovej osi dotykového panela (pozri obr. 6.7). Zvukové vlny šíriace sa z vysielača sú pomocou poľa reflektorov „rozptýlené“ po celej ploche displeja. Pomocou ďalšieho poľa sú potom nasmerované na snímač. Pri dotyku nastane prerušenie toku zvukových vĺn, ktoré je registrované procesorom zariadenia zo signálu na prijímači. Keďže princíp akustických vĺn nevyžaduje žiadne vodivé vrstvy, dotykový panel s touto technológiou má až 100% priepustnosť svetla. Takýto panel má navyše dlhú životnosť a možnosť reagovať na dotyk nevodivými predmetmi (HowStuffWorks, 2001).



Obr. 6.7: Princíp akusticko-vlnového dotykového panelu

6.5 Obrazové snímače

Obrazové snímače sú využívané najmä vo fotoaparátoch a kamerách. V ich vnútri nájdeme sústavu šošoviek a svetelný CCD či CMOS senzor. Svetelný senzor premieňa energiu fotónov na elektrický prúd. Čím viac fotónov dopadá na bunku senzora, tým viac elektrického prúdu v nej vznikne a tým jasnejší bude bod vo výslednom obraze. Hodnoty napätia v jednotlivých bunkách sú posielané do analógovo-digitálneho prevodníka, kde sa konvertujú na číselnú hodnotu. Z číselných hodnôt jednotlivých buniek senzora vypočíta procesor fotoaparátu hodnoty každého pixelu výsledného obrazu. Pre každý pixel snímaného obrazu sú zvyčajne použité až 4 bunky. Keďže ľudské oko je citlivejšie na zelenú farbu, dáva sa do svetelných senzorov viac buniek pre zelené svetlo (pozri obr. 6.8). Výsledný obraz sa potom z hodnôt buniek vypočíta interpoláciou.



Obr. 6.8: Príklad usporiadania subpixelov v CCD a CMOS senzore

V najmodernejších obrazových snímačoch nebývajú len klasické 2D svetelné senzory. Pre presné zistenie pohybu človeka v priestore je potrebný aj tretí rozmer, preto sa využívajú tzv. hĺbkové senzory. Ako hĺbkový senzor sa môžu použiť aj dva klasické 2D obrazové senzory, vzdialené od seba o niekoľko centimetrov. Z dvoch obrazov, ktoré senzory poskytnú, sa pomocou jednoduchých matematických vzťahov vypočíta pre každý „stereo-pixel“ jeho hĺbka.

V populárnom zariadení *Microsoft Kinect* (pozri obr. 6.9) sa používa iná technológia. Infračervený projektor (vysielač) osvetlí snímaný priestor štrukturálnym vzorom, pozostávajúcim z množstva jasných krúžkov. Infračervená kamera (senzor) sníma odrazený štrukturálny vzor a na základe deformácie vzorov (rozstup, naklonenie a sploštenie, rozostrenie), ktoré vznikajú kvôli odrazu od objektov s nerovným povrchom, určí zariadenie pomocou dopredu skalibrovanej mapy vzdialenosť (hĺbku) jednotlivých štrukturálnych prvkov. Štrukturálny vzor, napr. v podobe zvislých či vodorovných prúžkov, ktoré

sú zobrazované pomocou infračerveného projektoru, sa využíva v rôznych typoch hĺbkových kamier – 3D skenerov.

Snímač v Microsoft Kinect verzie 2.0 používa technológiu využívajúcu rýchlosť šírenia svetla (*time of flight* – TOF), ktorá nepriamo meria časový úsek, počas ktorého sa impulz vyslaný z laserového projektora odrazí z cieľového povrchu a vráti naspäť do obrazového snímača. Tento proces sa veľmi rýchlo opakuje, skenovaním pre každý „hĺbkový“ bod, a takto sa získa výsledná hĺbková mapa (Lau, 2013).

Microsoft Kinect obsahuje okrem infračerveného projektora a snímača ešte štandardnú kameru a viacero mikrofónov. Aj keď je to pomerne jedinečné zariadenie a veľa ľudí si s ním užilo, a ešte užije veľa zábavy, Microsoft sa rozhodol na konci roku 2017 prestať ho vyrábať. Našťastie existujú alternatívne produkty, ktoré ho zastúpia.

Obr. 6.9: Microsoft Kinect (Evan-Amos, 2011) a jeho nová verzia 2.0 (Evan-Amos, 2014)

6.6 Snímače pohybu a polohy

Inteligentné telefóny a iné mobilné zariadenia identifikujú svoju polohu a orientáciu pomocou skupiny senzorov. Pre určenie absolútnej polohy sa používa GPS (*global positioning system*), pre určenie lokálnej zmeny a orientácie zariadenia sa používa akcelerometer a gyroskop. Elektronický kompas zasa určuje natočenie zariadenia voči priamke spájajúcej magnetické póly Zeme. Snímače polohy a orientácie sú využiteľné nielen pri navigácii a orientácii v priestore, ale umožňujú hrať aj hry, ktoré sa ovládajú pomocou natočenia a sklonu displeja. Snímače zrýchlenia môžu byť dokonca použité na detekciu zemetrasení či spustenia airbagov v aute.

Pri pobyte vo VR je tiež dôležité určiť polohu používateľa. Pri prechádzke

vo virtuálnom prostredí interaguje používateľ s jeho objektmi a bez určenia presnej polohy a orientácie by to nebolo možné. V náhlavných displejoch sa pre orientáciu v priestore používajú nielen akcelerometre a gyroskopy, ale aj optické snímače, aby sa získala poloha používateľa s dostatočnou presnosťou. Podobne aj okuliare pre rozšírenú realitu potrebujú určiť polohu používateľa, aby mohli správne začleniť (zobraziť) virtuálne objekty do obrazu reálneho, trojrozmerného prostredia.

Existuje široká škála zariadení pre určenie polohy. Najčastejšie sa delia na optické, inerciálne, magnetické, akustické a mechanické. Dajú sa rozdeliť aj podľa toho, koľko stupňov voľnosti (*degrees of freedom* – DOF) poskytujú. Pre získanie polohy a natočenia objektu v priestore potrebujeme zariadenie, ktoré deteguje až 6 stupňov voľnosti. Tri stupne voľnosti sú potrebné pre určenie natočenia objektu[3], ďalšie tri stupne sú treba pre určenie polohy $[x, y, z]$ v priestore. Často používané inerciálne snímače polohy (akcelerometer, gyroskop a kompas) v mobilných zariadeniach nemajú dostatočnú presnosť, aby sa z nich získala presná poloha, a preto spoľahlivo poskytujú iba tri stupne voľnosti. Ak sa inerciálne snímače skombinujú s nejakým ďalším, je možné získať viac stupňov voľnosti. Ďalšími dôležitými parametrami sú presnosť, rýchlosť reakcie na zmenu polohy, veľkosť oblasti, v ktorej vedia určiť polohu a robustnosť, t. j. či sú dostatočne odolné na vplyv okolitých objektov a zariadení (Sherman et al., 2018).

Pri pobyte vo VR sa často používajú aj dátové rukavice (*data gloves*). Prostredníctvom nich môže softvér určiť polohu používateľa ako i polohu jeho prstov a umožniť mu interakciu s virtuálnymi objektmi. Pre určenie polohy prstov najčastejšie používajú ohybové, inerciálne alebo magnetické senzory.

6.6.1 GPS prijímač

Pre určenie polohy na povrchu Zeme (včítane výšky) musí GPS prijímač použiť signál zo štyroch a viac družíc satelitného navigačného systému. Teoreticky stačí na určenie presnej polohy pomocou trilaterácie[4] použiť tri družice. Keďže ale na určenie polohy potrebujeme poznať aj veľmi presný čas a GPS prijímač ho nedokáže poskytnúť, je nutné použiť aj štvrtú družicu. Signál z družice, šíriaci sa rýchlosťou svetla, obsahuje vysoko presné informácie o aktuálnom čase (na to využíva atómové hodiny) a polohe družíc. Na základe

[3] Natočenie objektu v 3D priestore vieme charakterizovať pomocou troch uhlov, napr. uhlov otočenia okolo osi x-ovej, y-ovej a z-ovej.

[4] Trilaterácia je metóda určovania pozície bodov podobná triangulácii, ktorá pri výpočte nepoužíva uhly ale iba vzdialenosti reprezentované kružnicami v 2D priestore alebo sférami v 3D priestore.

znalosti časov vyslania a prijatia signálu každej z družíc, vypočíta prijímač vzdialenosť ku každej družici. Následne sa pre každú družicu zostrojí guľa so stredom v mieste polohy družice a s polomerom rovným vzdialenosti družice ku GPS prijímaču. Keďže sa prijímač nachádza v mieste prieniku povrchu všetkých gúľ, k určeniu presnej pozície treba s ohľadom na časovú korekciu 4 satelity[5]. Pri prechode signálu atmosférou dochádza k zmene rýchlosti v jeho šírení, čo spôsobuje chyby v určení polohy. Ďalším problém predstavuje aj odraz signálu, či jeho pohltenie budovami. Pre korekciu týchto chýb používa GPS prijímač pri výpočte signál z ďalších satelitov. Zaujímavosťou je, že pre rýchlosť svetla, ktorým sa signál šíri, je treba počítať aj časovou dilatáciou, gravitačným pôsobením Zeme a jej otáčaním, aby výsledné GPS súradnice boli dostatočne presné (Blewitt, 1997).

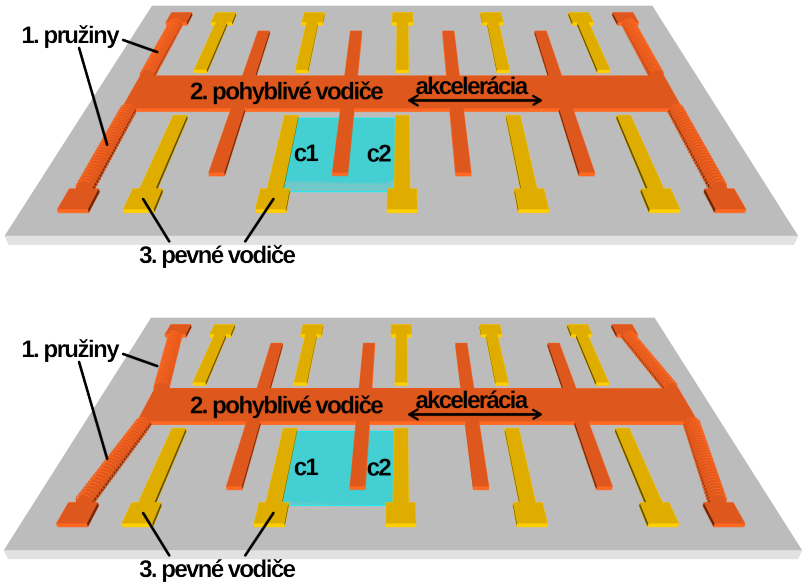
6.6.2 Inerciálne senzory

Výroba mikroelektro-mechanických akcelerometrov a gyroskopov sa začala v roku 1993 (SCME, 2017) a v súčasnosti je akcelerometer a gyroskop spolu s elektronickým kompasom taký malý, že sa nachádza na jednom malom čipe a tvorí tzv. inerciálnu meraciu jednotku (*inertial measurement unit* – IMU). Pomocou tejto jednotky a pozície získanej z GPS je možné relatívne presne určiť absolútnu polohu i natočenie mobilného zariadenia.

Akcelerometer

Akcelerometer je zariadenie na meranie zrýchlenia v danom smere. V súčasnosti sa používajú najmä kapacitné akcelerometre. Na meranie zrýchlenia sa používa zmena kapacity na miniatúrnych kondenzátoroch. Pohyblivá časť (2) je pomocou pružín (1) prichytená k podkladu, na ktorom sa nachádzajú pevné vodivé platničky (3) (pozri obr. 6.10 hore). Pri zrýchlení sa pohyblivá časť v dôsledku zákona zachovania hybnosti posunie do opačného smeru, ako je smer zrýchlenia a kapacita c_1 a c_2 medzi pevnými a pohyblivými platničkami sa zmení (pozri obr. 6.10 dole). Veľkosť zmeny kapacity potom určuje veľkosť akcelerácie (Bernstein, 2003). Pre určenie lokálnej zmeny a orientácie zariadenia v 3D priestore sú potrebné tri akcelerometre, pre každú súradnicovú os jeden.

[5]Prienikom povrchu dvoch gúľ je kružnica, prienikom troch sú dva body, pričom jeden z nich, ktorý neleží na zemskom povrchu sa dá eliminovať.



Obr. 6.10: Princíp akcelerometra

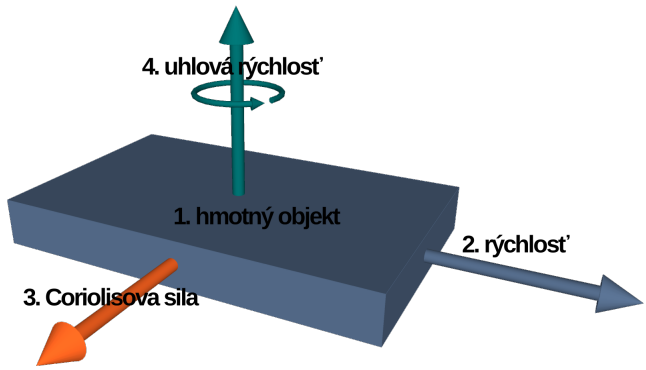
Gyroskop

Pomocou gyroskopu je možné zmerať veľkosť zmeny pootočenia okolo niektorej zo súradnicových osí. Gyroskop používa na meranie uhlovej rýchlosti efekt Coriolisovej sily (pozri obr. 6.11). Ak sa na hmotný objekt (1) pohybujúci sa v smere vektora (2) aplikuje uhlová rýchlosť (4), tak sa objekt začne vychyľovať od pôvodného smeru kvôli pôsobeniu Coriolisovej sily (3). Podobne ako u akcelerometra, toto posunutie spôsobí zmenu kapacity, ktorá je úmerná veľkosti aplikovanej uhlovej rýchlosti. Pre určenie výsledného pootočenia sú potrebné tri gyroskopy, rovnako ako u akcelerometra (Bernstein, 2003).

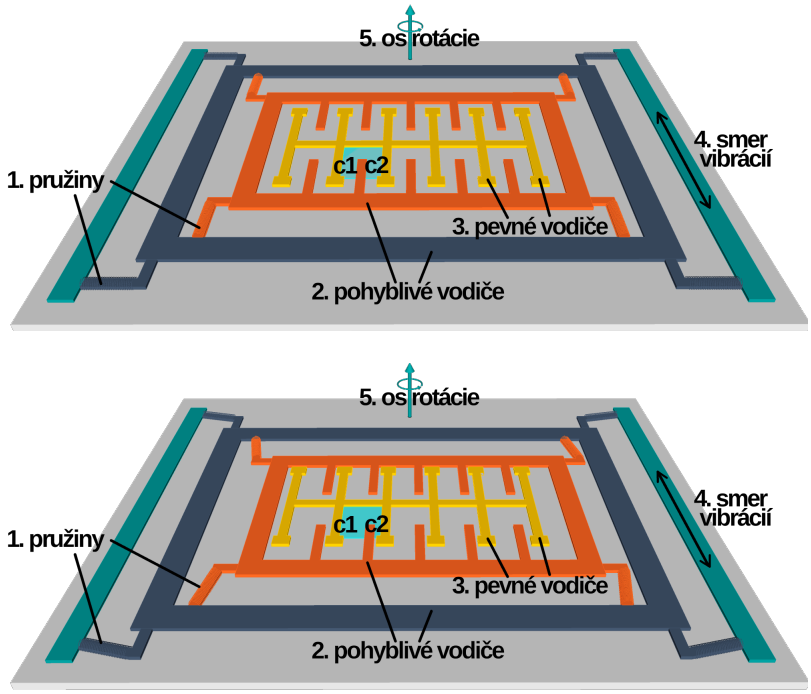
V gyroskope pohyblivá časť (2) veľmi rýchlo vibruje v pozdĺžnom smere (4). Ak sa však gyroskop začne otáčať okolo osi rotácie (5), vibrujúca časť sa začne vychyľovať v smere kolmom na smer vibrácie, čo má za následok zmenu kapacity c_1 a c_2 (pozri obr. 6.12 dole).

Magnetometer – elektronický kompas

Magnetometer využíva Hallov jav, ktorý spôsobuje vznik rozdielu potenciálu na elektródach polovodičovej doštičky (pozri obr. 6.13). Ak cez polovodičovú doštičku prechádza konštantný prúd, tak elektróny prechádzajú z katódy



Obr. 6.11: Efekt Coriolisovej sily na pohybujúci sa objekt

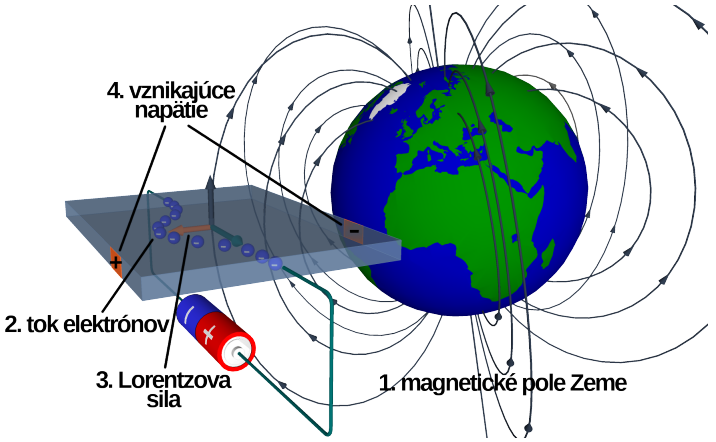


Obr. 6.12: Princíp gyroskopu

na anódu. Ak je však doštička ovplyvňovaná magnetickým poľom Zeme (1), naruší sa ich priamy tok a elektróny (2) sa pôsobením Lorentzovej sily[6] (3) začnú odkláňať na jednu stranu doštičky. V dôsledku toho je možné zaznamenať rozdiel potenciálu, t. j. napätie na protiľahlých stranách doštičky (4), ktoré závisí od sily a smeru magnetického poľa (Storr, 2019). Keďže

[6]Lorentzova sila je vyvolaná magnetickým poľom a mení smer pohybu nabitej častice (elektrónu), pričom neovplyvňuje jej rýchlosť

v zariadeniach využívajúcich elektronický kompas a v ich okolí je veľa rôznych elektromagnetických síl, ktoré kompas ovplyvňujú, je vhodné ho pred každým použitím „skalibrovať“. Vďaka kalibrácii dokáže softvér zariadenia eliminovať nežiadúci vplyv ďalších magnetických polí. Pre určenie severu, sa v smartfónoch zvyčajne používajú dva elektronické kompasy, ktoré sú na seba kolmo umiestnené. Na rozdiel od akcelerometra a gyroskopu, kompas neurčuje relatívnu zmenu ale absolútnu hodnotu pootočenia zariadenia vzhľadom na orientáciu magnetických pólov Zeme.



Obr. 6.13: Princíp elektronického kompasu

Inerciálne snímače sa zvyčajne nepoužívajú na určovanie polohy objektov, na ktorých sú umiestnené. Novú polohu pohybujúceho sa objektu vieme vypočítať, ak pričítame k jeho poslednej pozícii vektor zmeny polohy. V prípade, že zariadenie pre snímanie polohy dokáže mnohokrát za sekundu zosnímať zmenu v zrýchlení a pootočení, vektor zmeny vieme pomerne presne vypočítať[7]. Nanešťastie hodnoty zrýchlenia a pootočenia nie sú úplne presné a obsahujú chyby, ktoré sa postupne pričítavajú. Ak sme aj poznali presnú počiatočnú polohu objektu, tak sa po viacerých zmenách polohy objektu v priestore môže jeho aktuálna poloha značne líšiť od vypočítanej.

6.6.3 Optické snímače polohy

Optické snímače polohy najčastejšie používajú kamery. Pre získanie väčšej presnosti sa často používa skupina dvoch a viacerých kamier. Najčastejšie sa

[7]Keďže poznáme zrýchlenie, vieme vypočítať rýchlosť. Ak vieme koľkokrát za sekundu senzor sníma údaje, máme k dispozícii aj časovú jednotku. Z toho už vieme vypočítať veľkosť prejdenej dráhy. Smer, akým sa objekt pohybuje, získame pomocou gyroskopu.

rozdeľujú do dvoch skupín, podľa toho kde sa nachádzajú snímacie kamery. Ak sú kamery umiestnené na pohyblivom VR zariadení (napr. náhlavnom displeji), potom ide o snímače typu *inside-out*. Ak sú umiestnené na pevnom (nepohyblivom) zariadení, potom sú to snímače typu *outside-in* . Tieto senzory potrebujú pre určenie polohy v priestore nájsť v jeho okolí význačné body – značky (*markers*). Podľa toho či optický snímač využíva nejakým spôsobom označené či zvýraznené (svietiace body, reflexné plôšky) význačné body, alebo ich nepotrebuje[8], rozdeľujeme ich na značkové a bezznačkové (*markerless*) (exyte, 2019).

Pri určovaní polohy v priestore sa využívajú rôzne matematické postupy, aby pomocou význačných bodov v zosnímaných obrazoch našli polohu snímača či objektov v okolí. Najznámejšie sú fotogrametrické metódy, ktoré z dvoch (prípadne aj viacerých) obrazov význačných bodov, zosnímaných z rôznych uhlov pohľadu, dokážu napr. pomocou epipolárnej geometrie vypočítať 3D polohu význačných bodov. Pri využití známej polohy jedného pevného význačného bodu je potom možné spätne vypočítať polohu kamier, t. j. polohu optického snímača. Kombináciou optických a inerciálnych snímačov polohy sa dá získať dostatočne presná poloha v reálnom čase aj s presnosťou na jeden milimeter.

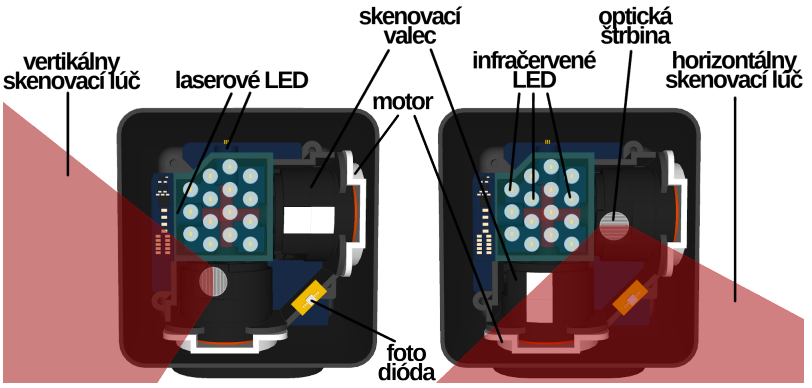
Optické snímače inside-out

Tieto snímače polohy využívajú kamery, ktoré sú umiestnené priamo na pohybujúcom sa VR zariadení.

Sledovanie polohy v zariadení *HTC Vive* zabezpečujú základné stanice (*base stations*), tzv. „svetelné majáky“. Každá stanica obsahuje dva rotačné valce, ktoré sú na seba kolmo umiestnené (pozri obr. 6.14). Na valcoch sa nachádzajú optické štrbiny, cez ktoré vychádza infračervený laserový lúč. Jeden z valcov vytvára horizontálny, druhý vytvára vertikálny skenovací lúč. Keď je horizontálny skenovací valec v základnej polohe, t. j. keď je uhol jeho pootočenia nulový, vyšle prvý zo svetelných majákov cez infračervené LED intenzívny synchronizačný záblesk. Tento záblesk (pozri obr. 6.15) vynuluje počítadlo času (časovač) na fotodiódach náhlavného displeja, na krátky okamih deaktivuje druhý svetelný maják, aby nevysielal skenovacie lúče, a spustí časovač. Keď horizontálny skenovací lúč osvieti fotodiódu, tak fotodióda odošle riadiacej jednotke čas, kedy bola osvetlená. Keďže je známa rýchlosť otáčania skenovacieho valca a čas, o koľko sa pootočil, zariadenie

[8] V tomto prípade musí optický snímač polohy nájsť význačné body v okolí sám. Zvyčajne sú to výrazné hrany a rohy objektov.

určí vodorovný uhol medzi svetelným majákom a fotodiódou. Tento postup sa opakuje aj pre vertikálny skenovací lúč, pričom sa získa zvislý uhol medzi svetelným majákom a práve osvetlenou fotodiódou. Celý proces sa vykoná aj pre druhý svetelný maják, pričom sa pre každú osvetlenú fotodiódu opäť získa dvojica uhlov. Na základe uhlov získaných z oboch staníc je možné pomocou epipolárnej geometrie, resp. iným spôsobom vypočítať presnú polohu infračervených diód na náhlavnom displeji, t. j. aktuálnu polohu používateľa (pozri obr. 6.16). Keďže sa tento proces opakuje mnohokrát za sekundu, nie je problém získať polohu v reálnom čase aj pri rýchlych pohyboch používateľa (Sherman et al., 2018; exyte, 2019).



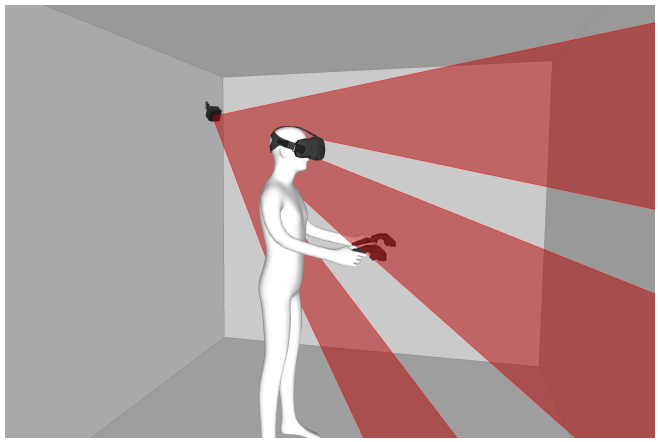
Obr. 6.14: Komponenty svetelných majákov HTC

Novšia verzia tohto zariadenia obsahuje iba jeden rotačný valec, ktorý je schopný vytvoriť dve nezávislé infračervené svetelné vlny nesúce zakódovaný údaj o aktuálnom čase vyslania vlny a uhle rotácie valca. Keď obe vlny postupne zasiahnu snímač v ovládači, čip vo vnútri ovládača dekóduje informáciu obsiahnutú vo svetelných vlnách. Z dvoch uhlov a vzdialenosti určenej pomocou rýchlosti šírenia svetla vypočíta procesor sledovacieho systému presnú polohu[9].

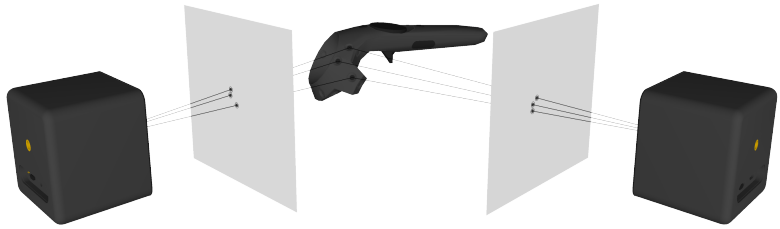
Rovnaký princíp získavania polohy využívajú aj HTC ovládače (*HTC Controllers*), ktoré môžu byť použité pre určenie polohy rúk či objektov držaných v ruke (strelné zbrane, športové náradie, atď.).

Ďalšie zariadenia používané vo VR a AR, ako napr. Oculus Quest, HTC Vive Cosmos, Microsoft HoloLens a iné využívajú tradičnejší spôsob získavania polohy objektov v priestore. Nepoužívajú význačné body ale pomocou dvoch či viacerých kamier získavajú obrazy, v ktorých hľadajú výrazné prvky, ako sú hrany a rohy objektov. Analýzou dvojice či viacerých obrázkov (každý získaný

[9]Popis platí pre *SteamVR base stations* V 2.0.



Obr. 6.15: Princíp určovania polohy v zariadení HTC Vive



Obr. 6.16: Určenie polohy bodov metódou epipolárnej geometrie

z inej kamery a z iného uhla pohľadu) sa nájdu identické výrazné prvky v obrazoch a pomocou fotogrametrických či iných metód počítačového videnia sa vypočítajú ich priestorové súradnice a poloha používateľa v priestore. Pri tomto postupe sa súčasne využívajú aj inerciálne snímače, čím sa zvyšuje presnosť určovania polohy. Tento spôsob snímania polohy má jednú nevýhodu a vyžaduje, aby bola scéna, v ktorej sa používateľ pohybuje, dostatočne osvetlená. Na druhej strane sú tieto systémy snímania polohy lacnejšie, keďže nevyužívajú ďalšie prídavné zariadenia.

Optické snímače outside-in

Optické snímače polohy tohto typu využívajú pevne umiestnené kamery, ktoré sa nachádzajú mimo pohybujúceho sa VR zariadenia. Často vyžadujú, aby mal snímaný objekt na povrchu umiestnené význačné body. Zvyčajne to bývajú svietiace body, ktoré svietia v infračervenom spektre, alebo sú to reflexné plôšky, odrážajúce svetlo. Tieto značky sa umiestňujú na známe,

presne určené miesta na povrchu snímaného objektu.

Zariadenie Oculus Rift využíva na určenie polohy veľký počet infračervených diód, ktoré pokrývajú celý jeho vonkajší povrch. Svetlo šíriace sa z týchto diód snímajú dve infračervené kamery v dvoch nezávislých senzoroch[10]. Keďže je presný tvar, veľkosť a poloha infračervených LED známa, možno pomocou analýzy obrazu zosnímaných infračervených bodov a údajov z inerciálnych snímačov vypočítať polohu a natočenie náhlavného displeja v priestore. Podobný princíp využíva aj VR zariadenie Playstation 4, ktoré namiesto svietiacich diód používa svietiaci pruh modrého svetla.

Výhodou týchto zariadení je, že poskytujú pomerne presnú polohu objektu, avšak pri každom použití sa musia nakalibrovať. Ich nevýhodou je vyššia cena, keďže vyžadujú externé zariadenia obsahujúce snímače obrazu – kamery (Heaney, 2019).

6.6.4 Elektromagnetické snímače polohy

Elektromagnetické snímače polohy patria medzi prvý typ snímačov, ktoré sa viac rozšírili vo VR. Sú pomerne lacné a veľmi presné. Pozostávajú z vysielača, ktorý vytvára a šíri do okolia slabé magnetické pole z troch elektromagnetických cievok orientovaných súhlasne so súradnicovými osami x, y, z. Toto magnetické pole je zachytávané v miniatúrnych prijímačoch, umiestnených na sledovanom objekte. Snímače sú tvorené tromi, rovnako orientovanými miniatúrnymi cievkami, v ktorých sa indukuje elektrický prúd, ak sú ovplyvňované magnetickým poľom. Vysielač je umiestnený na pevne danom mieste, aby bolo možné určiť absolútnu pozíciu každého prijímača. V cievkach sa počas každého merania vytvára určité množstvo elektrického prúdu, podľa toho ako cez ňu prechádzajú siločiary magnetického poľa. Z veľkosti prúdu, ktorá sa vytvára na trojici cievok, je možné získať 6 stupňov voľnosti, určujúcich pozíciu aj natočenie snímaného objektu.

Elektromagnetické snímače môžu byť ovplyvňované magnetickými a kovovými objektmi v okolitom prostredí, preto ich použitie nie je vždy možné. Ďalším obmedzením je krátky dosah generovaného magnetického poľa, pričom presnosť určovania polohy klesá s rastúcou vzdialenosťou od vysielača. Možným riešením je použitie viacerých vysielačov. V tomto prípade však nemôžu všetky vysielače generovať magnetické pole naraz, ale iba postupne jeden za druhým, čím sa však znižuje rýchlosť snímania, ktorá môže nega-

[10] Každý senzor je v samostatnom zariadení, ktoré sa dávajú do protiľahlých rohov priestoru, v ktorom sa používateľ pohybuje.

tívne ovplyvniť využitie sledovania v reálnom čase. Hlavnou výhodou je, že medzi vysielačom a prijímačom môže byť akýkoľvek nekovový a nemagnetický predmet (Sherman et al., 2018).

6.6.5 Akustické snímače polohy

Akustické snímače polohy patria k najmenej známym zariadeniam pre snímanie polohy. V súčasnosti sa už takmer nepoužívajú. Využívali ultrazvukové vlny[11], ktoré vychádzali z viacerých vysielačov umiestených na povrchu snímaného objektu. Jeden za druhým postupne vysielali ultrazvukové impulzy, ktoré boli zachytávané mikrofónmi (snímačmi) v okolí objektu. Pozícia bodov objektu sa potom vypočítala trilateráciou, zo vzdialeností medzi vysielačmi a prijímačmi. Vzdialenosti vieme určiť pomocou rýchlosti vlnenia zvuku a času koľko zvuková vlna putovala od vysielača ku konkrétnemu prijímaču (Sherman et al., 2018).

Medzi snímaným objektom a prijímačom nesmie byť pri meraní polohy žiadna prekážka. Sú citlivé na zmeny prostredia, keďže rýchlosť zvuku závisí od teploty a vlhkosti, v ktorom sa zvuk šíri. Na začiatku použitia ich preto treba vždy skalibrovať. Ich výhodou je nízka cena.

6.7 Haptické zariadenia

Haptické zariadenia (HZ) umožňujú interakciu s virtuálnymi objektmi pomocou dotyku. Ich využitím získa používateľ nový rozmer pri ovládaní objektov vo virtuálnom prostredí. Keďže pri interakcii s objektami VR/AR je použitie klávesnice či pákového ovládača nevyhovujúce, v blízkej budúcnosti tieto štandardné vstupné zariadenia pravdepodobne úplne nahradia. Podľa typu ich môžeme rozdeliť na hmatové (*tactile, cutaneous*), kinestetické (*kinesthetic*)[12] a hybridné.

Hmat vnímame pomocou nervových zakončení, nachádzajúcich sa v pokožke človeka. Ich stimuláciou môžeme vyvolať ilúziu dotyku s virtuálnym objektom. Pomocou hmatových HZ môžeme vnímať štruktúru (textúru) povrchu virtuálneho objektu, jeho drsnosť či hladkosť, teplotu, povrchové napätie,

[11] Podobne ako lekársky ultrazvukový sonar, ktorý využíva odrazené ultrazvukové vlny, aby získal vzdialenosti k bunkám orgánov ľudského tela.

[12] Kinestetika je schopnosť človeka uvedomovať si polohu jednotlivých časti svojho tela a ovládať ich pohybom.

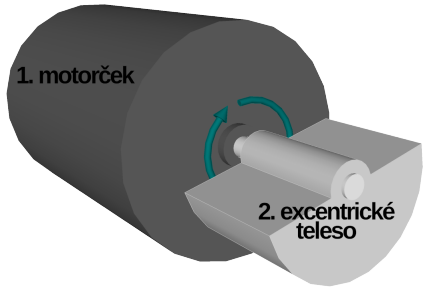
odpor (trenie), ktoré kladú pri dotyku, a iné. Kinestetické HZ slúžia na interakciu s objektom ako takým, a umožňujú vnímať nielen jeho celkový tvar a hmotnosť, ale aj silu, akou na nás pôsobí, zisťovať či ovplyvňovať jeho polohu, orientáciu a ďalšie. Na rozdiel od hmatových receptorov sa kinestetické nachádzajú v svaloch, kĺboch a šľachách. Pre správne vnímanie dotyku potrebujeme získať spätnú väzbu z oboch typov (kinestetických aj hmatových) haptických zariadení. Hybridné haptické zariadenia spájajú v sebe možnosti oboch typov, sú kombináciou hmatových a kinestetických HZ, čím výrazne zvyšujú realizmus pri vnímaní virtuálnych objektov (Ariza et al., 2016; Perret et al., 2018).

V haptických zariadeniach sa často využíva spätná väzba pri manipulácii s virtuálnymi objektmi, t. j. odozva objektu na jeho dotyk. Využitím spätnej väzby sa výrazne zvyšuje účinok interakcie. Najjednoduchšou formou odozvy je vibrácia, ktorá sa často používa pri stlačení virtuálneho (softvérového) tlačidla na tablete či mobilnom telefóne. Ďalším príkladom spätnej väzby je využitie mechanických síl, ktoré hýbu ramenami haptického zariadenia (Bermejo et al., 2017). Haptická spätná väzba sa používa vo VR už pomerne dlho. Príkladom je využitie vibrujúceho pákového ovládača v hracích automatoch v 70-tych rokoch. Rýchlosť spätnej väzby čiastočne limituje využitie aktuálnych HZ, keďže sa pre ne vyžaduje oveľa rýchlejšia spätná väzba ako u vizuálnych zariadení. V súčasnosti existuje pomerne málo komerčných HZ, väčšina z nich je len vo forme prototypov. Vývojári sa ale neustále snažia zlepšovať ich parametre, miniaturizovať ich, znižovať ich hmotnosť a aj veľmi vysokú výrobnú cenu.

6.7.1 Hmatové haptické zariadenia

Hmatové HZ patria v súčasnosti medzi najpoužívanejšie HZ. Existuje veľa technológií ako vytvoriť pocit dotyku s virtuálnym objektom. Napríklad vibráciu, ako reakciu na dotyk, možno vytvoriť použitím miniatúrneho motorčeka s excentrickým rotujúcim telesom (pozri obr. 6.17), alebo pomocou lineárneho rezonančného prvku, ktorý využíva na vibráciu elektromagnetickú cievku, podobne ako je to v reproduktoroch. Vibráciu je možné vytvoriť aj pomocou piezoelektrických kryštálov, keďže objem a tvar kryštálu je možné ovplyvniť elektrickým prúdom. Inou možnosťou, ako vytvoriť ilúziu dotyku je ovplyvniť receptory v pokožke priamo elektrickou stimuláciou.

Piezoelektrický kryštál je možné využiť nielen na vytvorenie vibrácií, ale aj na vydutie či vibrovanie plastického povrchu, ktorý vyvíja malý tlak na bruška



Obr. 6.17: Princíp vibrátora využívajúceho elektrický motor

prstov. Piezoelektrický kryštál, umiestnený na spodnej strane malej bunky naplnenej kvapalinou, vytvára prostredníctvom vibrácií stojaté zvukové vlny, ktoré nakoniec spôsobia vydutie povrchu bunky. Používateľ potom cíti nielen jemný tlak na prst, ale aj slabé vibrácie (Akther et al., 2019).

Niektorí výskumníci sa zameriavajú na vývoj malých hmatových HZ, ktoré sa dajú nasadiť na prst (*thimbles*), buď na jeho prvý alebo posledný článok. Tieto zariadenia môžu simulovať nielen dotyk s hrboľatým povrchom (pomocou vibrácií s premenlivou frekvenciou), ale aj vytvárať premenlivý tlak (pomocou elektrického motorčeka či elektromagnetu) na prst. Nevýhodou týchto zariadení je, že obmedzujú pohyb prstov a neumožňujú súčasne využívať prsty na interakciu s ďalšími predmetmi či zariadeniami ako je klávesnica, manipulandum, atď. (Pacchierotti et al., 2017; Perret et al., 2018).

Zaujímavé využitie HZ využívajúce vibráciu našli vedci z univerzity v Pittsburgu. Spojili malú kameru a vibračný mechanizmus s počítačom a skonštruovali zariadenie s výstižným názvom *FingerSight*, ktoré pomocou rôzne silných vibrácií umožňuje slabozrakým lokalizovať blízke predmety (Horvath et al., 2014).

Ďalšiu skupinu hmatových HZ predstavujú zariadenia využívajúce tzv. aktívne plochy. Technológia poľa ihličiek (*pin arrays*) simuluje povrch a tvar objektu vysúvaním veľkého množstva malých ihličiek usporiadaných v mriežke. Podobne funguje aj displej pre zobrazovanie Braillovho písma pre slabozrakých, kde sa na vysúvanie tenkých kolíkov používajú drobné elektromagnety alebo piezoelektrické kryštály. Môžu sa využiť aj malé pneumatické piesty stláčajúce vzduch, ktorý potom deformuje silikónové bunky na povrchu zariadenia.

Pri bezdotykovej *mid-air* technológii je možné použiť pole malých ultrazvukových reproduktorov alebo prúd vzduchu. Ultrazvukové reproduktory

vytvárajú zvukové vlny, ktoré pri styku s pokožkou ruky vytvárajú pocit dotyku s povrchom telesa. Tieto zariadenia sú často kombinované s hĺbkovou kamerou sledujúcou pohyb a polohu prstov. Výhodou tejto technológie je, že prsty ruky ostávajú voľné a haptické zariadenie neobmedzuje ich pohyb (Bermejo et al., 2017).

6.7.2 Kinestetické haptické zariadenia

Pri kinestetických HZ sa pri interakcii s virtuálnym objektom využíva najmä pohyb ruky a jej svaly, avšak môžu byť využité aj iné časti ľudského tela. Spätná väzba sa vytvára pomocou mechanických síl, ktoré kladú premenlivý odpor svalom rúk pri manipulácii s virtuálnym objektom. Tieto sily sú najčastejšie vytvárané pomocou elektromechanickej, pneumatickej či hydraulickej technológie, no nezriedka sa využívajú aj magnetoreologické tekutiny (*magnetorheological fluid*)[13], ktoré poskytujú rýchlejšiu odozvu.

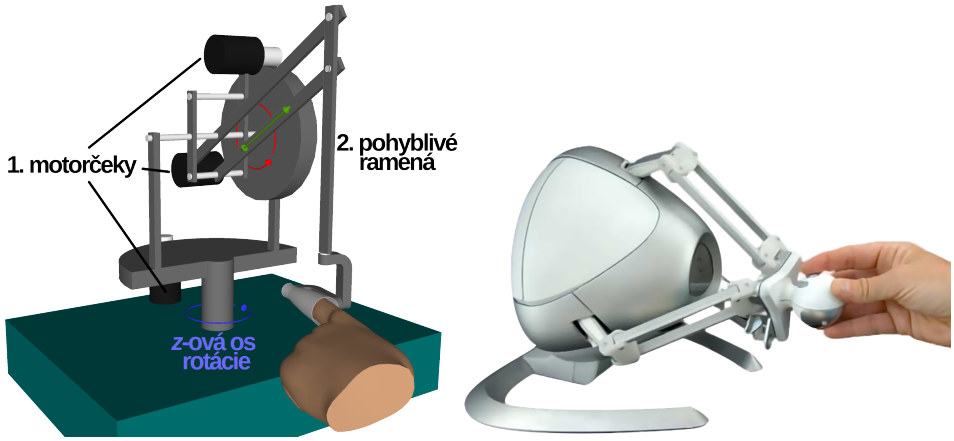
Kinestetické HZ majú široké možnosti využitia. Môžu slúžiť na ovládanie ramien vzdialených zariadení, ktoré sa pohybujú v nebezpečnom prostredí. Pomocou nich môže chirurg vyšetrovať či dokonca operovať pacienta vzdialeného mnoho kilometrov, ale dajú sa využiť aj pri rehabilitácii, vo výučbe a trénovaní pohybových zručností. V niektorých prípadoch je veľmi dôležitá okamžitá spätná odozva, ktorá je potrebná pre ovládanie vzdialených zariadení (napr. vzdialený chirurgický zákrok, riadenie rýchlo letiaceho drona, atď.).

Podľa konštrukcie môžeme kinestetické HZ rozdeliť do dvoch skupín. Prvú tvoria manipulandá, pevne stojace napr. na doske stola, druhú tvoria úchopové zariadenia (*grasp devices*) a exoskelety (*exoskeletons*), ktoré sa upevňujú na určitú časť tela, napr. na ruku (Bermejo et al., 2017).

Manipulandá využívajú sústavu ramien a elektromotory. Pri ťahu/tlaku na ich koncový prvok sa prenáša sila pomocou ramien na rotory elektromotorov (pozri obr. 6.18 vľavo). Podľa toho, aký odpor má vytvárať virtuálny objekt pri dotyku ruky či prstu v danom bode, vyvinú elektromotory potrebnú brzdnú silu.

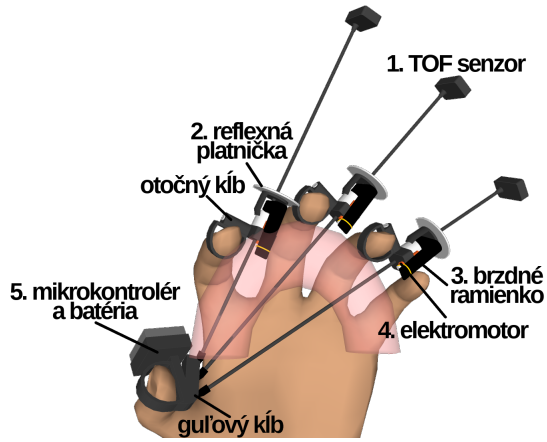
Úchopové zariadenia a exoskelety vyvíjajú variabilný tlak na jednotlivé prsty či inú časť tela, a tak simulujú dotyk s virtuálnym telesom. Pohyb prstov v exoskeletoch je prenášaný sústavou laniek a kladiek k elektromotorom,

[13] Magnetoreologickú tekutinu si môžeme prestaviť ako tekutý magnet, ktorý mení svoju viskozitu, ak je ovplyvňovaný magnetickým poľom. Viskozita je miera vnútorného odporu tekutiny, ktorý tekutina kladie pri jej tečení.



Obr. 6.18: Princíp manipulanda a komerčný produkt Novint Falcon (Novint14, 2006)

alebo sústavou hadičiek k hydraulickým či pneumatickým piestom. Tieto elektromotory, resp. piesty, vytvárajú potrebnú mechanickú silu, ktorá spätne ovplyvňuje mechanické napätie v lankách, resp. tlak v hadičkách.



Obr. 6.19: Úchopové zariadenie Wolverine

Príkladom jednoduchého úchopového zariadenia s nízkou výrobnou cenou a spotrebou elektrického prúdu je *Wolverine*, skonštruovaný vedcami zo Stanfordskej univerzity (pozri obr. 6.19). Toto zariadenie používa tri tenké ramienka, na ktorých sa posúva brzdný mechanizmus (3) ovládaný elektromotorom (4). Na konci každého ramena je svetelný senzor (TOF)[14] (1), ktorý je schopný určiť vzdialenosť prstu od senzoru pomocou reflexného disku (2) nachádzajúceho sa na brzdnom mechanizme. Pomocou týchto senzorov

[14]TOF senzor využíva pre určenie vzdialenosti rýchlosť šírenia svetla.

posiela mikrokontrolér riadiacemu počítaču aktuálnu polohu každého prstu. Zariadenie ešte obsahuje senzor pre určenie celkovej polohy ruky a batériu (5) (Choi et al., 2016).

Kinestetické HZ často v sebe obsahujú aj senzory polohy, aby pri ich používaní vedel softvér identifikovať polohu koncových prvkov (napr. prstov) či celej ruky.

6.7.3 Hybridné HZ

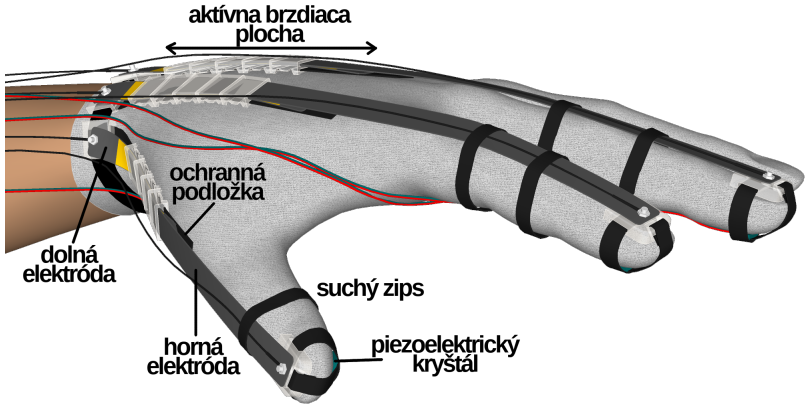
V súčasnosti sa väčšina výskumníkov zameriava na vývoj tzv. haptických rukavíc (*haptic gloves*). Snahou je vytvoriť rukavicu, ktorá je ľahká, pohodlná na nosenie a nebráni prirodzenému pohybu prstov. Ideálne by mala kombinovať vlastnosti hmatových aj kinestetických HZ a súčasne obsahovať senzory, ktoré poskytujú údaje o polohe jednotlivých prstov i celej ruky. Môžeme ich rozdeliť na tradičné haptické rukavice a exoskelety.

Do kategórie tradičných haptických rukavíc môžeme zahrnúť ľahké rukavice vyrobené z nejakej tkaniny, ktoré v sebe obsahujú senzory polohy či ohybu prstov, senzory tlaku a hmatové i kinestetické haptické prvky. Senzory polohy prstov používajú ohybové, inerciálne, alebo elektromagnetické snímače. Hmatové haptické prvky najčastejšie využívajú vibrácie vytvárané piezoelektrickými kryštálmi alebo vibrujúcimi elektromagnetmi. Kinestetické prvky používajú tzv. napínače šliach (*exotendons*) využívajúce napr. lanká napínané elektromotormi, ktoré sú zvyčajne umiestnené na predlaktí.

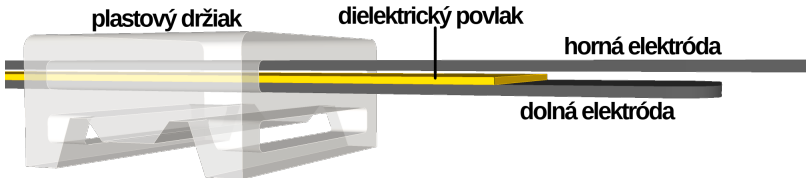
Vedcom na švajčiarskych univerzitách EPFL a ETH sa podarilo vyvinúť materiál, ktorý umožnil skonštruovať veľmi jednoduchý, ľahký a súčasne finančne nenáročný prototyp úchopového haptického zariadenia s názvom *DextrES Glove* (pozri obr. 6.20). Základný princíp spočíva vo využití špeciálneho materiálu, ktorý po ovplyvnení elektrickým prúdom vytvára veľký elektrostatický náboj. Tento náboj sa využíva ako elektrostatická brzda, ktorá spotrebuje veľmi málo elektrického prúdu[15]. Pri tvorbe tohto HZ použili dvojice tenkých a ohybných kovových prúžkov (spodný kratší a horný dlhší) uložených v plastových držiakoch, pričom hornú stranu spodných prúžkov pokryli špeciálnym dielektrickým povlakom (pozri obr. 6.21). K hornému aj dolnému prúžku priviedli vodiče, a vytvorili z nich tak jednoduché elektródy. Ak elektródy nie sú ovplyvňované elektrickým prúdom, tak kovové prúžky voľne po sebe kĺžu a horné prúžky nebránia ohybu prstov. Ak sa však cez

[15] Pre vznik dostatočne silného elektrostatického náboja je nutné použiť napätie až 300 V, avšak pri aktivovaní elektrostatickej brzdy sa spotrebuje iba 1mW/cm^2.

vodiče privedie jednosmerný elektrický prúd[16], tak sa medzi elektródami vytvorí elektrostatický náboj, ktorý pôsobí ako elektrostatická brzda. Silu tejto elektrostatickej brzdy je možné ovplyvňovať zmenou elektrického napätia. Pôsobením elektrostatickej brzdy sa zvýši trenie medzi horným a dolným prúžkom, čo v dôsledku vedie k obmedzeniu ohýbania prstov a používateľ má pocit, že do ruky uchopil nejaký reálny objekt. Pre väčší komfort používateľa sú všetky komponenty tohoto zariadenia upevnené pomocou prúžkov so suchým zipsom k povrchu obyčajnej textilnej rukavice. V novšej verzii tohto zariadenia využili vedci namiesto kovových prúžkov ľahšie a ohybnejšie textilné prúžky, na povrchu ktorých sú ohybné elektródy. Hmatovú spätnú väzbu, t. j. pocit dotyku s telesom, zabezpečujú piezoelektrické kryštály, ktoré pri dotyku používateľa s virtuálnym objektom na krátky okamih zavibrujú. Nachádzajú pod bruškami prstov a sú k nim prichytené tiež pomocou pružkov so suchým zipsom. Pre určenie aktuálnej polohy prstov i celej ruky použili vedci metódu optického sledovania (Hinchet et al., 2018).



Obr. 6.20: Hybridné haptické zariadenie DextrES Glove

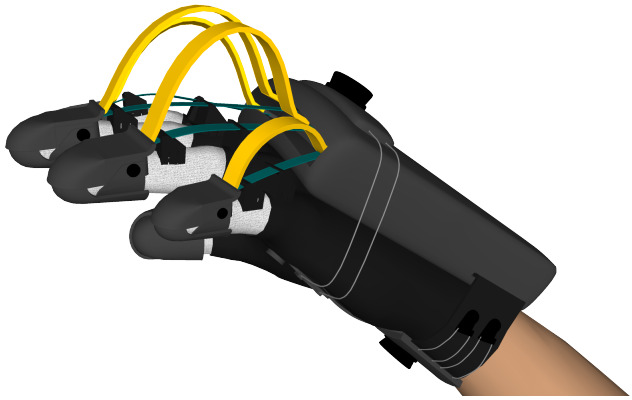


Obr. 6.21: Detail elektrostatickej brzdy v rukavici DextrES Glove

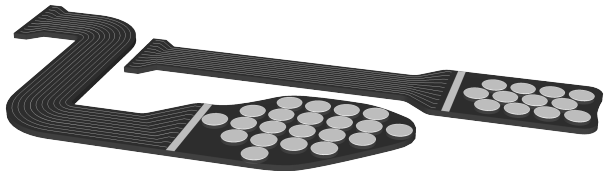
Exoskelety sú oproti predošlej kategórii značne objemnejšie. Môžu byť tvorené komplexnou štruktúrou laniek a kladiek alebo kĺbov a ramien, ktoré ovplyvňujú pohyb jednotlivých prstov. Silu napnutia laniek alebo ramien

[16]Kvôli väčšej bezpečnosti sa používa jednosmerný prúd.

zvyčajne ovplyvňuje sústava elektromotorov, ktoré sa môžu nachádzať na ruke alebo sú mimo ruky. Simulovanie dotyku s predmetom zabezpečujú vibrujúce piezokryštály či elektromagnety, prípadne malé pumpičky, ktoré prenášajú tlak kvapaliny k bruškám prstov. Snímače polohy prstov, využívajúce ohybové, inerciálne či elektromagnetické senzory, slúžia na to, aby riadiaca elektronika v súčinnosti so softvérom ovplyvňovala haptické prvky, ktoré svojou reakciou spôsobia, že používateľ vníma pocit dotyku, uchopenia či dokonca stláčania objektu (Perret et al., 2018).



Obr. 6.22: Hybridné haptické zariadenie HaptX Glove



Obr. 6.23: Detail haptických prvkov v rukavici HaptX Glove

Príklad hybridného HZ s názvom *HaptX Glove* od firmy HaptX, patriaceho do skupiny exoskeletov ilustruje obrázok 6.22. Toto sofistikované zariadenie v sebe spája vlastnosti kinestetických a hmatových HZ. Hmatové prvky simulujúce dotyk využívajú prúdenie mikrokvapalín (*microfluidics*), ktoré vydúvajú malé plôšky nachádzajúce sa pri bruškách prstov (pozri obr. 6.23).

Haptické zariadenia sú neoceniteľným doplnkom pri zvyšovaní zážitku pobytu vo VR. Môžu byť užitočné nielen pri hraní hier ale napr. aj pri výučbe medicíny, kde sa často vykonávajú vyšetrenia pomocou dotyku. Môžu dokonca slúžiť pri rehabilitácii pacientov, ktorí majú problémy s pohybom prstov a ovládaním rúk. Širokému využitiu hybridných a kinestetických HZ stále bráni vysoká cena, ktorá je v prípade drahších HZ až niekoľko desiatok tisíc dolárov.

7 Simulátory pohybu pre virtuálnu realitu

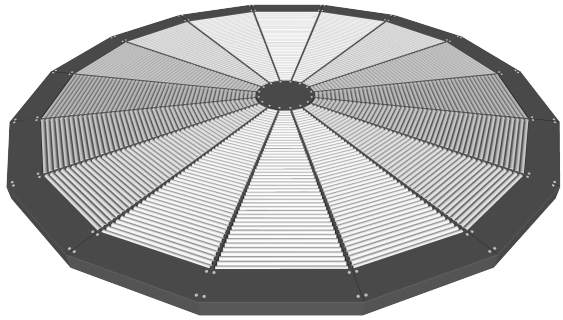
Simulátory pohybu pre virtuálnu realitu umožňujú prirodzený pohyb vo VR najmä pomocou pohybu nôh. Na rozdiel od pohybu pomocou klávesnice, myši či pákového ovládača je pohyb pomocou nôh oveľa prirodzenejší a zážitok vo VR oveľa realistickejší. Vedľajším efektom takéhoto pohybu, namiesto sedenia v kresle, je zlepšenie telesnej kondície, kvôli vyššej fyzickej aktivite. Je teda celkom prirodzené, že sa tieto zariadenia využívajú nielen pre hranie hier a nácvik určitých činností (napr. tréning bojových postupov vojenských či policajných jednotiek), ale aj vo fyzioterapii, alebo v psychoterapii pre liečbu niektorých fóbií. Mnoho hráčov hier nechce len pasívne sedieť na stoličke, ale sa prechádzať vo VR, podobne ako v reálnom svete. S týmito simulátormi pohybu sú ľudia schopní pohybovať sa aj v rozsiahlom virtuálnom svete a pritom zostať v bezpečí domova, v obmedzenom priestore. Mnohé z týchto zariadení umožňujú nielen chôdzu, beh a skoky vo VR, ale aj zažiť pocit lietania, pilotovania športového lietadla či riadenia pretekárskeho auta (CosmosCr, 2019). Použitím simulátora pohybu, spolu s náhlavným displejom a nejakým úchopovým haptickým zariadením možno dosiahnuť veľmi silný a realistický zážitok vo VR.

Veľká väčšina simulátorov pohybu je príliš objemná a cenovo náročná pre použitie v bežných domácnostiach, preto sa s nimi častejšie stretávame v herniach VR a na niektorých exhibíciách v predvádzacích miestnostiach.

Podľa funkčnosti ich môžeme rozdeliť na statické, pohyblivé a iné, podľa toho či plocha, po ktorej používateľ chodí, je statická alebo sa pohybuje, alebo používateľ na zariadení sedí či dokonca leží. Pohyblivé simulátory využívajú princíp bežeckého pásu (*treadmill*), statické zasa princíp kĺzania či šmýkania (*slidemill*), iné simulátory pohybu pomocou nejakého mechanizmu nakláňajú sedačku, v ktorej používateľ sedí, do rôznych smerov.

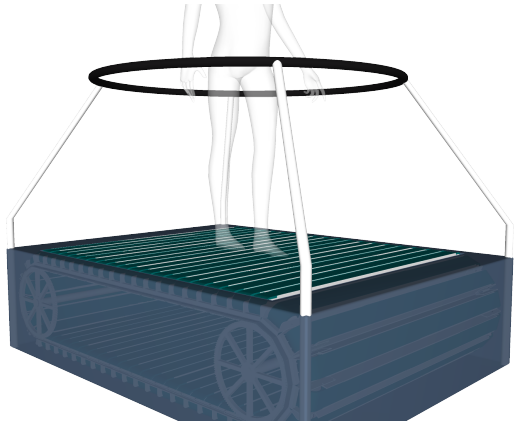
7.1 Pohyblivé simulátory pohybu

Najznámejším zástupcom pohyblivých simulátorov pohybu je *Omnideck*, pozostávajúci zo 16 modulov v tvare kruhových výsekov. Tieto výseky spolu vytvárajú veľký kruh s priemerom viac ako 4 metre a hmotnosťou takmer 1000 kg. Toto zariadenie umožňuje pohyb vo všetkých smeroch a v súčasnosti je jediné, ktoré realisticky simuluje všesmerový pohyb vo VR. Používateľ má dostatok priestoru na rozbehnutie, kým systém využívajúci snímače polohy zareaguje a roztočí motorom ovládané valce v smere opačnom k pohybu používateľa. Tieto valce pomaly, a s čo najmenším zrýchlením presunú používateľa späť do stredu simulátora. Je veľmi dôležité, aby bol tento pohyb plynulý, inak používateľ môže cítiť nevoľnosť (Lodola, 2018).



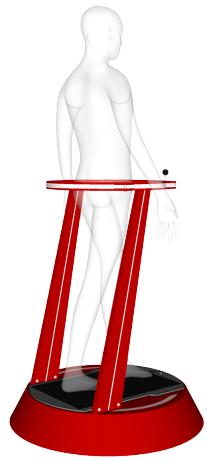
Obr. 7.1: Simulátor pohybu Omnideck

Princíp bežeckého pásu využíva i zariadenie *Infinadeck*, ktoré je v súčasnosti stále vo fáze vývoja. Aktuálny prototyp používa snímače polohy umiestnené na priehlavkoch nôh (detegujúce kroky) a na drieku používateľa (detegujúce zmenu polohy). Aby sa mohol používateľ pohybovať nielen v pozdĺžnom ale i priečnom smere, je „bežecký pás“ v priečnom smere rozdelený na väčšie množstvo segmentov – menších bežeckých pásov (pozri obr. 7.2). Pohyb každého segmentu je riadený samostatným motorom a zabezpečuje kompenzáciu pohybu používateľa do strán. V okamihu, keď zariadenie zaregistruje pohyb používateľa, zapne sa motor hlavného pásu spolu s príslušnými motormi menších pásov a premiestnia používateľa do východiskového bodu v strede plošiny (Lang, 2018). Kvôli bezpečnosti je po okraji tohto simulátora kruhová obruč, ktorá zabezpečuje, aby používateľ pri prechádzke vo VR nespadol z plošiny.



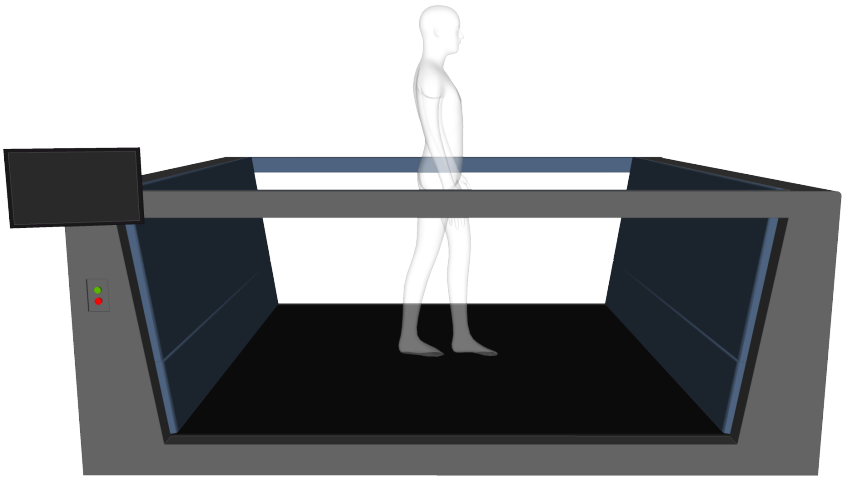
Obr. 7.2: Princíp činnosti simulátora pohybu Infinadeck

Simulátor pohybu *SpaceWalkerVR* používa princíp klasického bežeckého pásu na pohyb používateľa dopredu a dozadu (obr. 7.3). Tlakové senzory umiestnené pod ním, detegujú kroky používateľa a na základe ich informácie sa riadi rýchlosť jeho posunu. Zariadenie ďalej obsahuje gyroskopický senzor umiestnený na popruhu, ktorý obopína pás používateľa. Pri otočení používateľa zaregistruje tento senzor smer i veľkosť otočenia a celé zariadenie sa podľa toho otočí. Pohyb pásu i otočenie zariadenia je možný aj pomocou pákového ovládača, ktorý je umiestnený na bezpečnostnej obrube simulátoru. Tento ovládač slúži aj na bežné ovládanie VR aplikácií pomocou pravej ruky používateľa. Simulátor pohybu je navrhnutý tak, aby fungoval aj ako klasický bežecký pás pre fitness (FGTeam, 2016).



Obr. 7.3: SpaceWalkerVR

Bežecký pás v jeho nezmenenej podobe využíva zariadenie s názvom *Aperium K-01 Pod*. Simulácia priamočiareho pohybu je na ňom pomerne realistická, keďže zariadenie je dostatočne veľké a nemusí dochádzať k veľkým zmenám v rýchlosti pohybu pásu (pozri obr. 7.4). Rýchlosť pohybu pásu je riadená informáciami zo snímača polohy, ktorý je pripevnený k opasku používateľa. Tento simulátor využíva upravený pohľad na scénu VR tak, že sa používateľ domnieva, že sa pohybuje rôznymi smermi, avšak v skutočnosti ide stále tým istým smerom (Aperium, 2019).



Obr. 7.4: Aperium K-01 Pod

7.2 Statické simulátory pohybu

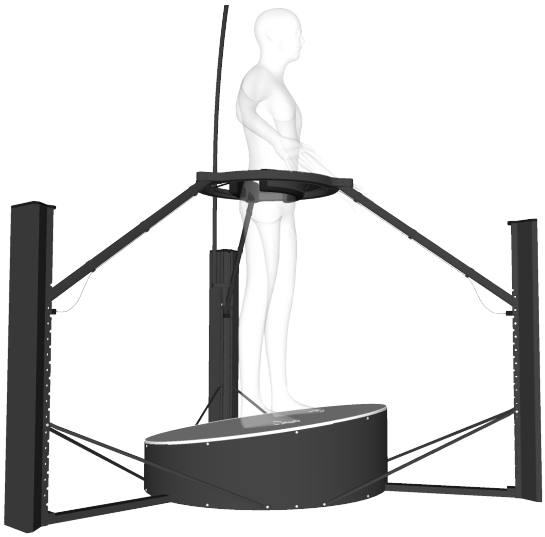
Statické simulátory pohybu využívajú pre pohyb vo VR princíp šmýkania a kĺzania, a preto nepotrebujú pre pohyb nôh pohyblivý prvok. Keďže pri šmýkaní ľudia nepoužívajú tú istú skupinu svalov nôh ako pri normálnej chôdzi, je pohyb na týchto simulátoroch menej realistický ako pri pohyblivých simulátoroch pohybu. Navyše pri takomto type pohybu vznikajú závraty, pretože vo VR vnímame pohyb dopredu bez toho, aby sme ho skutočne vykonávali. Niektorým používateľom to na začiatku spôsobuje problém pri chôdzi, avšak po istom čase si dokážu na odlišný pohyb zvyknúť. Najznámejšími zariadeniami tohto typu sú *Virtuix Omni*, *KatWalk Mini* a *Cyberith Virtualizer*. Všetky tri zariadenia umožňujú všesmerový pohyb, t. j. pohyb dopredu, dozadu i do strán (Weis, 2018).

Virtuix Omni (pozri obr. 7.5) a *Kat Walk Mini* používajú na kĺzanie špeciálnu

obuv, ktorá má na spodku klznú plochu. Používateľ sa pri „chôdzi“ kĺže po „parabolicky zakrivenej“ ploche. Virtuix Omni má na tejto ploche aj drážky brániace kĺzaniu do strán. Obe zariadenia využívajú snímače polohy umiestnené na obuvi používateľa, detegujúce pohyb jeho nôh. Z informácií získaných zo snímačov polohy sa následne vypočíta aktuálna poloha a rýchlosť pohybu v scéne. Keďže pri kĺzaní a šmýkaní často dochádza k pádom, sú statické simulátory pohybu vybavené popruhom obopínajúcim používateľa, ktorý pádu bráni. V popruhu sa nachádza ďalší snímač polohy, ktorý poskytuje údaj o aktuálnom natočení používateľa. Virtuix Omni používa popruh s opornými ramenami, ktoré sa kĺžu po pevnej kruhovej obruči. Kat Walk Mini má popruh pevne pripevnený k opornej plošine, ktorá sa otáča za chrbtom používateľa. Keďže je oporná plošina vzadu, za chrbtom používateľa, nebráni mu, aby mohol mať ruky voľne priložené k telu. Táto plošina umožňuje pohyb aj vo zvislom smere, a používateľ si môže vo VR kľaknúť, sadnúť či dokonca vyskočiť.

Obr. 7.5: Virtuix Omni

Cyberith Virtualizer nevyužíva pre kĺzanie špeciálnu obuv. Pohyb nôh detegujú optické senzory, nachádzajúce sa v hladkej a rovnej plošine, po ktorej sa používateľ kĺže (pozri obr. 7.6). Pre jednoduchší pohyb kĺzania sa plošina mierne nakloní, vždy smerom k čelu používateľa. Vibrujúci prvok v plošine navyše umožňuje poskytnúť haptickú spätnú väzbu a zvýšiť zážitok prechádzky vo VR. Uhol natočenia používateľa poskytuje senzor v obruči, ktorá mu umožňuje aj pohyb vo zvislom smere, keďže je pripevnená k výškovo pohyblivým ramenám (Cyberith, 2019).



Obr. 7.6: Cyberith Virtualizer Elite 2.0

7.3 Iné simulátory pohybu

Do tejto kategórie môžeme zaradiť všetky zariadenia, ktoré neslúžia na simulovanie chôdze. Sú to napríklad simulátory pretekárskych áut (*Atomic A3*), letecké simulátory (*DOF Reality Motion Simulator*, *Yaw VR*), simulátory vojenských bojových vozidiel, zariadenia simulujúce lietanie (*Birdly*, *Icaros*) či spojenie virtuálnej reality a stacionárneho bicykla. Nájdeme tu pomerne širokú škálu produktov určených pre bežných používateľov až po zariadenia pre výcvik profesionálnych pilotov. Mnohé z nich sú modulárne a umožňujú napr. premontovať letecký simulátor na simulátor pretekárskych áut, prípadne pridávať do existujúceho zariadenia ďalšie prvky (pákový ovládač, displej, atď).

Letecké simulátory (lietadiel, helikoptér), simulátory vozidiel (pretekárskych aut, tankov, obrnených transportérov, atď.), simulátory plavidiel (plachetníc, motorových člnov, atď.) a ďalších podobných obyčajne využívajú pohyblivú plošinu (*motion platform*), na ktorej sú zvyšné časti (sedadlo, volant, riadidlá, pedále a ďalšie) namontované. Obraz virtuálnej scény sa zvyčajne zobrazuje na viacerých štandardných displejoch alebo na projekčných plochách, ktoré plošinu obklopujú. V jednoduchšom prípade je možné použiť aj náhlavný displej. Pohyblivé plošiny sú nakláňané pomocou elektrických motorov a pák, resp. pomocou lineárnych aktuátorov[1]. Plošina sa môže hýbať a nakláňať

[1]Lineárne aktuátory menia rotačný pohyb na priamočiary. Najčastejšie sa používa kombinácia elektrického

Obr. 7.7: Simulátor pretekárskeho auta (Elekes, 2015)

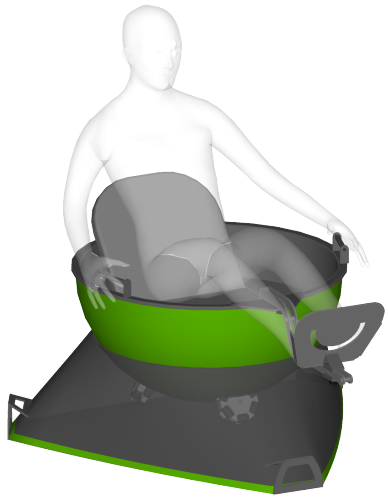
do rôznych smerov, podľa počtu stupňov voľnosti, ktoré pohybová sústava umožňuje.

Pri dvoch stupňoch voľnosti sa plošina môže nakláňať do strán, avšak nie je možný jej vertikálny pohyb. Dva stupne voľnosti stačia pre simulovanie pohybu nákladných áut, vlakov a pre menej realistickú simuláciu jazdy v pretekárskom aute. K dvom stupňom voľnosti sa pri simulátoroch pretekárskych áut často pridáva ďalší stupeň voľnosti, ktorý umožňuje simulovať stratu trakcie zadnej nápravy[2].

Pri troch stupňoch voľnosti je možné simulovať náklon do strán (*pitch*), náklon dopredu/dozadu (*roll*) a pohyb vo zvislom smere (*heave*). Tri stupne voľnosti sa využívajú najmä v simulátoroch pretekárskych áut a v jednoduchších leteckých simulátoroch. Pri zariadení *Yaw VR* (pozri obr. 7.8), ktoré sa dá okrem iného využiť aj ako letecký simulátor, sa namiesto pohybu v zvislom smere využíva otáčavý pohyb okolo osi z (*yaw*). Toto zariadenie nepoužíva klasickú rovnú pohyblivú plošinu, ale otáčavú polguľu[3], ku ktorej sú všetky ostatné časti primontované. Pre získanie aktuálneho natočenia používateľa využíva gyroskop a akcelerometer.

Pre šesť stupňov voľnosti je treba použiť až 6 elektrických motorov (resp. lineárnych aktuátorov) (pozri 7.9), vďaka čomu je možný nielen náklon (otočenie) plošiny okolo všetkých troch osí x, y, z (*roll*, *pitch*, *yaw*), ale navyše aj pohyb (posunutie) plošiny hore/dole (*heave*), do strán (*sway*) a dopredu/dozadu (*surge*), čím sa dá simulovať akcelerácia vozidla či lietadla. Šesť stupňov voľnosti je nevyhnutných pre realistický zážitok v leteckom simulátore.

motora a dlhej skrutky, menej často hydraulické piesty.
[2]Strata trakcie zadnej nápravy spôsobuje šmyk zadných kolies auta. Pretekári ju využívajú na driftovanie.
[3]Polguľa je otáčaná tromi všesmerovými motormi s hriadeľmi pokrytými gumou.



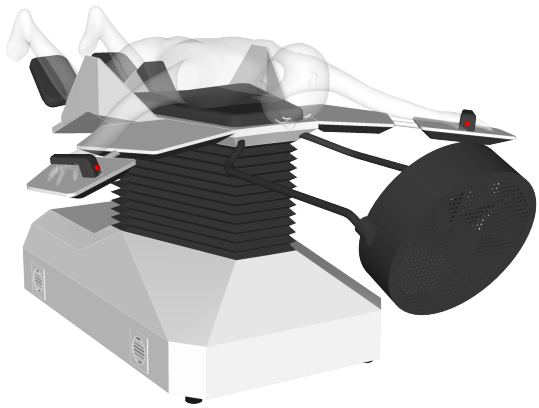
Obr. 7.8: Simulátor pohybu Yaw VR

Obr. 7.9: Pohyblivá plošina so 6 stupňami voľnosti

Simulátory pohybu využívajú pre zvýšenie realistickosti simulácie aj vibrácie, tlak a zvuk. Vibrácie umožňujú napr. simulovať jazdu po hrboľatej ceste. Sú vytvárané buď motormi, ktoré hýbu plošinou, alebo iným zariadením, napr. basovými (nízkofrekvenčnými) reproduktormi. Tlak simuluje dlhšie trvajúce zrýchlenie (akcelerácia vozidla, prejazd zákrutou, atď.), a je vytváraný sedačkou, ktorá začne v určitých miestach tlačiť na chrbát používateľa. Zvuk je vytváraný skupinou dvoch a viac reproduktorov.

Birdly (pozri obr. 7.10) je zariadenie, ktoré umožní používateľovi prostredníctvom pohybu ramien a rúk zažiť plnohodnotný zážitok z lietania. Používateľ pri simulácii lietania leží na bruchu na zariadení s dvomi stupňami voľnosti, ktoré prostredníctvom ventilátoru imituje tretí stupeň voľnosti (pohyb dopredu). Zariadenie umožňuje náklon dopredu a dozadu, do strán a virtuálne

aj pohyb dopredu a dozadu. Rýchlosť letu je ovplyvnená rýchlosťou, akou používateľ hýbe ramenami zariadenia. Náklon letu, stúpanie a klesanie sa riadi pomocou klapiek, ktoré používateľ ovláda pomocou zápästia. Birdly využíva pre zvýšenie realistickosti pohybu vo VR aj haptickú spätnú väzbu. Ramená a klapky zariadenia vytvárajú voči pohybu používateľa premenlivý odpor, ktorý je daný rýchlosťou a smerom pohybu vo virtuálnom prostredí. Zmenu v rýchlosti letu je možné pocítiť vďaka premenlivému prúdeniu vzduchu, ktoré zabezpečuje ventilátor nachádzajúci sa vpredu, pred hlavou používateľa. Rýchlosť otáčania lopatiek ventilátora je prispôsobená rýchlosti letu vo virtuálnom prostredí. Birdly navyše poskytuje spätnú väzbu aj vo forme vôní. Simulátor vytvára vôňu podľa krajiny, nad ktorou používateľ lieta. K dispozícii ma vône pre more, les, priemyselné pachy nad mestom a ďalšie (D3DCinema, 2019; FanVanDam, 2018).



Obr. 7.10: Simulátor lietania Birdly

Icaros je balančné zariadenie s dvomi stupňami voľnosti, ktoré pre simulovanie lietania[4] nepoužíva motor ale zmenu ťažiska vyvolanú pohybom používateľa, podobne ako hojdanie na hojdačke. Používateľ „leží“ na zariadení bruchom dole, kolená, brucho a predlaktia má položené na mäkkých opierkach (pozri obr. 7.11). Nakláňanie zariadenia sa vykonáva najmä prostredníctvom svalov nôh, chrbta a brucha. Pomocou tlačidiel ovládača na rukoväti môže používateľ ovládať napr. strelnú zbraň či rýchlosť letu vo VR. Ovládač obsahuje aj snímač polohy, ktorý informuje softvér o aktuálnom smere letu používateľa. Keďže zariadenie používa aktívny pohyb, najvhodnejšie je ho využiť pre fitness (Icaros, 2019).

V súčasnosti sú čoraz viac populárnejšie cyklotúry vo virtuálnej realite. Stačí k tomu vhodne spojiť stacionárny bicykel, počítadlo kilometrov a počítač. Na

[4]Môže sa použiť aj na simuláciu potápania či plávania pod morskou hladinou.

Obr. 7.11: Icaros Home – simulátor lietania

monitore, projekčnej ploche alebo v náhlavnom displeji sa potom zobrazuje virtuálna krajina, v ktorej sa cyklista pohybuje. Je dokonca možné urobiť aj spoločnú cyklotúru pre viacerých cyklistov.

Simulátory pohybu majú okrem vysokej ceny a objemnosti aj ďalší nedostatok. Pri dlhšom používaní simulátora používateľ často cíti tzv. simulačnú nevoľnosť (*sim sickness*), keďže vníma rozdiely medzi pohybom simulátora a virtuálnym pohybom. Je teda veľmi dôležité, aby pohyb vo VR bol softvérovo čo najlepšie zladený s hardvérovým pohybom simulátora, pričom je treba brať do úvahy aj oneskorenú reakciu zariadenia (latenciu). Napríklad pri leteckom simulátore, vizuálne a iné podnety spôsobujú, že používateľ očakáva rovnaké pohyby, aké vznikajú pri skutočnom lete, avšak na telo používateľa pôsobí nedokonalý a obmedzený pohyb simulátora.

8 Zvukové zariadenia

Zvuk je dôležitou súčasťou našej komunikácie. Je teda pochopiteľné, že sa zvuk používa v mnohých zariadeniach. Použitím zvukového sprievodu sa výrazne zvyšuje zážitok pobytu vo VR, navyše sa zvuk často používa ako spätná väzba pri rôznych softvérových udalostiach, ako je kliknutie myšou či stlačenie klávesu. Často sa pri spätnej väzbe používa aj spojenie zvukových zariadení s hmatovými HZ, ako napr. spojenie zvuku kliknutia s vibráciou pri reakcii na stlačenie tlačidla.

Historicky sú zvukové zariadenia spájané s Alexandrom Grahamom Bellom, ktorý v roku 1876 zostrojil telefón požívajúci mikrofón a reproduktor. Prvenstvo však patrí Johannovi Philippovi Reisovi, nemeckému vedcovi a vynálezcovi, ktorý v roku 1861 zostrojil prvý telefón na základe myšlienky francúzskeho vedca Charlesa Bourseula. V súčasnosti sa zvukový vstup nepoužíva len na komunikáciu medzi ľuďmi, ale vďaka rozpoznávaniu reči môžeme komunikovať aj s virtuálnym asistentom v telefóne (Siri), notebooku (Cortana) alebo so samostatným zariadením, napr. Amazon Alexa. Existuje viacero technológií, ktoré sa využívajú v reproduktoroch a mikrofónoch. Najznámejšie sú dynamické, elektrostatické a piezoelektrické (keramické), ale existujú mnohé ďalšie.

Ozvučenie virtuálnej scény pomocou priestorového 3D zvuku bolo implementované už v roku 1997 vo VRML97, v jednom z prvých jazykov na opis virtuálnej scény. Pomocou zvukového uzla *Sound* je vo VRML možné definovať nielen 3D umiestnenie zdroja zvuku, ale aj priestorové vlastnosti jeho šírenia. Pri prechádzke vo virtuálnej realite musí zvukový systém pri pohybe hlavy používateľa prepočítavať charakteristiky zvukových vĺn, aby umožnil simulovať umiestnenie virtuálnych zvukových zdrojov kdekoľvek v priestore, nielen pred hlavou ale aj nad, pod či za hlavou poslucháča. Pri použití 5 a viac zdrojov zvuku (reproduktorov) je možné pri ich vhodnom rozmiestnení

(napr. v rohoch miestnosti) simulovať šírenie zvuku z ľubovoľného miesta priestoru. Najnovšia zvuková technológia *Dolby Atmos*[1], používaná najmä v kinách, využíva až 49 reproduktorov, ktoré sú umiestnené za plátnom, po obvode kinosály a dokonca aj v strope. Zvukový systém využívajúci Dolby Atmos vypočíta pozíciu zvukového objektu v priestore podľa práve použitej sústavy reproduktorov, na ktorej je zvuk prehrávaný. Zvuk nie je pevne viazaný na konkrétny smer v rovine, ako v prípade stále používaného stereo zvuku, ale je pohyblivý v trojrozmernom priestore, keďže využíva aj tretí rozmer, t. j. výšku.

V súčasnosti sa mnoho výskumníkov zameriava na vývoj plochých a malých zvukových zariadení (reproduktorov a mikrofónov), ktoré by vďaka malým rozmerom a kompaktnému plochému tvaru boli vhodné do masovo rozšírených smartfónov, tabletov a ďalších mobilných zariadení. Pokrok v miniaturizácii už dávnejšie umožnil vyrobiť malé mikrofóny s uspokojivou kvalitou záznamu zvuku, avšak pri reproduktoroch je ešte stále priestor na ich zlepšenie. Tradičné cievkové reproduktory (a aj mikrofóny) sú príliš objemné na to, aby sa montovali do mobilných zariadení, avšak vytvárajú čistý (bez skreslenia) a súčasne dostatočne silný zvuk v širokom frekvenčnom rozpätí.

8.1 Reproduktory

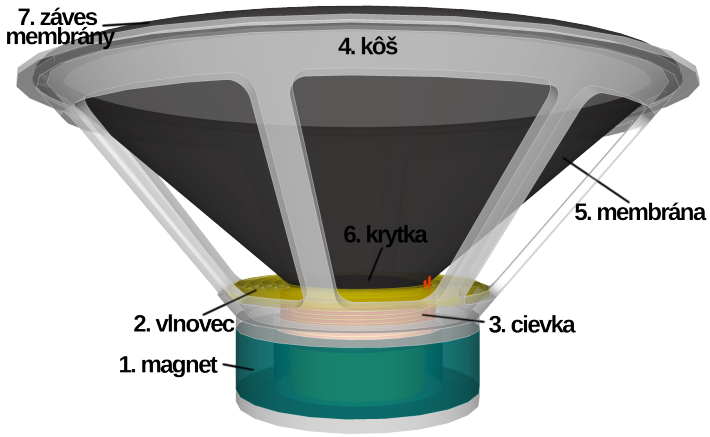
Reproduktor je zariadenie, ktoré vytvára zvuk rýchlymi vibráciami membrány. Pomocou elektromagnetu, piezoelektrického kryštálu, prípadne elektrostatického elementu mení elektrický signál na mechanickú silu, ktorá sa prenáša na membránu. V bežných audio-sústavách (televízory, hifi systémy, rádiá, atď.) sa väčšinou používajú tradičné dynamické reproduktory, v mobilných zariadeniach sa najčastejšie vyskytujú piezoelektrické prípadne elektrostatické.

8.1.1 Dynamické reproduktory

Princíp dynamického reproduktoru je pomerne jednoduchý (pozri obr. 8.1). Striedavý elektrický prúd (audio-signál) prechádza cez drôt cievky (3) a v jej okolí vytvára magnetické pole, ktoré je buď priťahované alebo odpudzované magnetickým poľom permanentného magnetu (1), v závislosti od aktuálnej polarity a veľkosti vstupujúceho prúdu. Pohyb cievky, ovplyvňovanej premenlivým magnetickým poľom, je vykonávaný veľmi rýchlo, mnohokrát

[1] Dolby Atmos je 3D objektová technológia na reprodukciu priestorového zvuku.

za sekundu. Keďže je cievka spojená s membránou (5), prenáša sa pohyb cievky na membránu, ktorá rozvibruje vzduch pred reproduktorom a vytvára zvukové vlny. Membrána je na dolnom konci spojená s pružným krúžkom – vlnovcom (2), ktorý umožňuje voľný pohyb cievky (3). Na hornom konci je prichytená pomocou pružnej obruby (7) ku kovovému rámu koša (4) (Harris, 2002b).

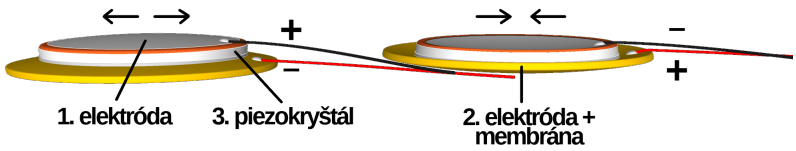


Obr. 8.1: Schéma dynamického reproduktoru

Dynamické reproduktory sú používané najmä pre to, že vytvárajú silný a pomerne čistý zvuk v širokom frekvenčnom spektre. Keďže ich membrána nie je úplne tuhá, má tendenciu sa pri určitých frekvenciách ohýbať a rezonovať, čo spôsobuje malé skreslenie zvuku a nerovnomernú odozvu. Nevýhodou dynamických reproduktorov sú väčšie rozmery, vyššia hmotnosť a spotreba elektrického prúdu. Obsahujú permanentný magnet a cievku, preto vytvárajú magnetické pole, ktoré môže narušovať alebo nevhodne ovplyvňovať ďalšie zariadenia či elektronické obvody v jeho blízkosti.

8.1.2 Piezoelektrické reproduktory

Princíp piezoelektrického reproduktoru sa líši od princípu dynamického reproduktoru. Namiesto magnetu a cievky používa piezoelektrický kryštál (pozri obr. 8.2). Po aplikovaní elektrického poľa na keramickú piezoelektrickú platničku (3) sa vyvolá jej elastická deformácia, natiahnutie alebo skrátenie, podľa polarity privádzaného elektrického prúdu. Keďže je piezoelektrická platnička spojená s membránou (2), spôsobí jej ohnutie. Rýchle ohýbanie membrány rozvibruje vzduch v jej blízkosti, a vznikajú zvukové vlny. Čím rýchlejšie membrána vibruje, tým vyšší tón z reproduktoru vychádza.



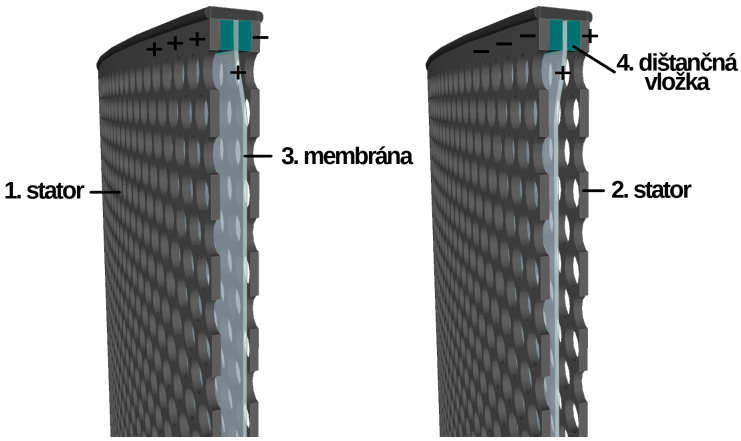
Obr. 8.2: Princíp piezoelektrického reproduktoru

Piezoelektrické reproduktory spotrebujú menej elektrického prúdu, avšak čistotou a silou vyprodukovaného zvuku za dynamickými reproduktormi v nízkych a stredných frekvenciách (tónoch) značne zaostávajú. Je to spôsobené tým, že membrána v nich je menej ohybná a nekmitá tak intenzívne ako v dynamických reproduktoroch. Dôsledkom toho je, že vytvárajú slabšie zvukové vlny. Vďaka jednoduchej a kompaktnej konštrukcii sú veľmi tenké (aj menej ako 1mm) a môžu byť aj vodotesné. Keďže nevyužívajú elektromagnet, neovplyvňujú elektromagnetickým poľom ďalšie zariadenia v jeho blízkosti. Často sa používajú ako lacné a jednoduché (najmä jednofrekvenčné) bzučiaky v alarmoch, hodinkách či zvončekoch. V súčasnosti sa využívajú nielen v mobilných zariadeniach ale kvôli nižšej cene nahradzujú vysokotónové dynamické reproduktory v bežných reproduktorových sústavách (Hughes, 2016).

8.1.3 Elektrostatické reproduktory

Elektrostatické reproduktory využívajú pri pohybe membrány elektrostatickú silu. Pozostávajú z troch vrstiev (pozri obr. 8.3), dvoch pevných častí – statorov (1 a 2), medzi ktorými sa nachádza pevne napnutá pohyblivá membrána (3), oddelená od statorov dištančnými vložkami (4). Membrána je vytvorená z veľmi ľahkej a priesvitnej plastovej fólie, impregnovaná elektricky vodivým materiálom. Statory sú z tenkého oceľového plechu potiahnutého izolátorom. Oceľový plech je perforovaný, aby umožňoval voľný priechod vzduchu k membráne. Membrána sa nabíja nepremenlivým, kladným napätím z vysokonapäťového zdroja, a vytvára sa okolo nej silné elektrostatické pole. Statory sú vodičmi pripojené k výstupu audio systému cez výkonný transformátor, ktorý konvertuje výstup z audio systému na dvojicu vysokonapäťových signálov s navzájom opačnou polaritou. Keďže je membrána nabitá kladne, začne sa pohybovať smerom k záporne nabitému statoru. Čím silnejšie sú náboje na statoroch, tým väčší je posun membrány. Rýchly pohyb membrány rozvibruje vzduch v jej okolí a vznikne zvuková vlna.

Elektrostatické reproduktory (pozri obr. 8.4) vynikajú veľmi čistým zvukom.



Obr. 8.3: Princíp elektrostatického reproduktoru

Ich membrána je vychyľovaná rovnomerne po celej svojej ploche, takže nevzniká žiadne skreslenie a vychádzajúci zvuk je neobyčajne čistý, pričom počuť aj najjemnejšie zvukové detaily. Tieto typy reproduktorov sa v reproduktorových sústavách takmer vždy vyskytujú v pároch s hlbokotónovým (basovým) dynamickým reproduktorom, keďže nedokážu dostatočne silno rozvibrovať zvuk pri nízkych tónoch. Pri ich používaní sa vytvára veľmi vysoké napätie a môže sa stať, že medzi membránou a statorom preskočí iskra, ktorá môže reproduktory poškodiť. Ďalším nedostatkom je ich vysoká cena a úzky kužeľ šíreného zvuku, najmä pri vyšších frekvenciách (MartinLogan, 2020).

V súčasnosti sa sústreďuje snaha výskumníkov na zmenšovanie elektrostatických reproduktorov, aby boli vhodné do malých mobilných zariadení a poskytovali dostatočne silný a čistý zvuk. Hľadajú sa materiály, z ktorých by sa mohli vyrábať miniatúrne membrány s požadovanými vlastnosťami. Zosilnenie vychádzajúceho zvuku z malých elektrostatických reproduktorov sa môže dosiahnuť napr. využitím princípu fázovaného poľa[2] (Audiopixels, 2020).

8.2 Mikrofóny

Mikrofóny slúžia na zaznamenávanie zvuku, pričom menia mechanickú energiu zvukových vĺn na elektrickú pomocou elektromagnetickej cievky, piezoelek-

[2]Využíva sa skupina elektronicky riadených pulzujúcich mikroreproduktorov tak, aby vytvorili interferenciou zvukovú vlnu, ktorú je možné nasmerovať do želaného smeru.

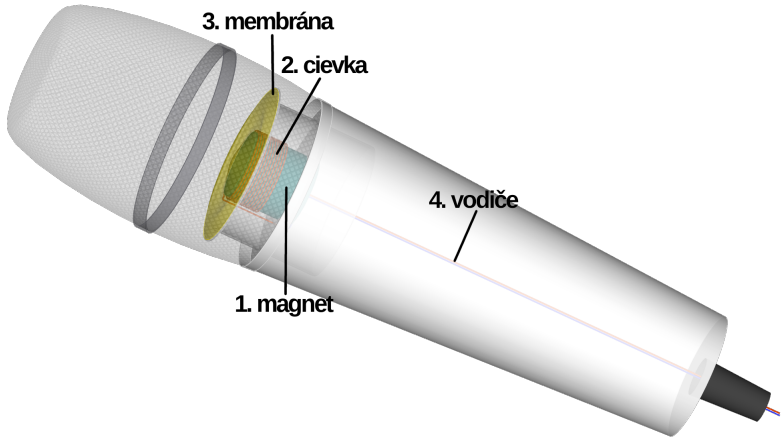
Obr. 8.4: Príklad elektrostatického reproduktoru

trického kryštálu, kondenzátoru s vibrujúcou elektródou, laseru skenujúceho vibrujúcu plochu, atď. V porovnaní s reproduktormi je princíp ich činnosti presne opačný. Zjednodušene povedané, takmer každý reproduktor sa dá využiť na zaznamenanie zvuku. Výsledný elektrický signál je však veľmi slabý, a preto ho je treba zosilniť. Existuje veľa druhov mikrofónov, ktoré sa líšia nielen použitou technológiou ale aj konštrukčným usporiadaním a vlastnosťami (parametrami). Používateľov zaujíma najmä citlivosť mikrofónu (maximálna úroveň akustického tlaku), smerová charakteristika, frekvenčný rozsah snímaného zvuku, čistota zaznamenávaného zvuku, šum a ďalšie.

8.2.1 Dynamické mikrofóny

Princíp dynamického mikrofónu, ktorý využíva elektromagnetickú indukciu je presne opačný ako u dynamického reproduktoru. Zvukové vlny rozhýbu membránu (3), spojenú s cievkou (2). Keďže sa cievka pohybuje v magnetickom poli permanentného magnetu (1), vytvára sa v nej elektrický prúd, ktorý prechádza cez vodiče (4) do zvukového zariadenia, kde je ďalej spracovávaný (pozri obr. 8.5) (Boré et al., 1999).

Dynamické mikrofóny sú robustné, schopné zvládnuť aj vysoké hladiny akus-



Obr. 8.5: Schéma dynamického mikrofónu

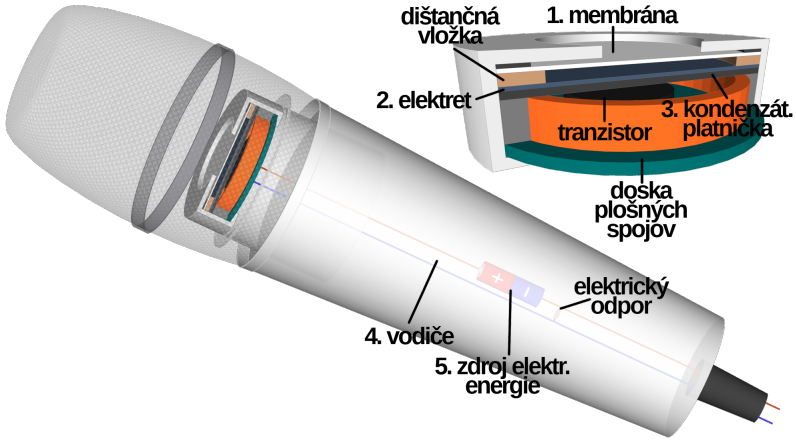
tického tlaku (napr. zvuk bubnov). Poskytujú dobrú kvalitu zvuku, nevyžadujú dodatočný zdroj energie a sú pomerne lacné. Oproti kondenzátorovým mikrofónom sa menej hodia na nahrávanie nástrojov s vyššími frekvenciami (ako napr. husle).

8.2.2 Kondenzátorové a elektretové mikrofóny

Tieto mikrofóny využívajú elektrostatický princíp. Premieňajú zvukové vlny na elektrickú energiu pomocou kondenzátora, t. j. dvojice elektricky nabitých kovových platničiek (elektród)[3] a dodatočného zdroja elektrického prúdu (pozri obr. 8.6). Keď zvuková vlna zasiahne ľahkú a pohyblivú membránu (1), zmení sa vzdialenosť medzi dvoma platničkami (1 a 3), čo spôsobí zmenu náboja (kapacity) kondenzátora. Čím bližšie sú platničky pri sebe, tým väčšia je kapacita kondenzátora a tým väčšie napätie sa objaví na výstupe mikrofónu (4). Kmitanie membrány vyvoláva rýchlu zmenu elektrického napätia, čo predstavuje elektrický signál zachytenej zvukovej vlny. Keďže kondenzátor vytvára veľmi slabý elektrický prúd, ktorý treba zosilniť, a navyše treba kondenzátor napájať, potrebuje tento typ mikrofónu externý zdroj energie (5) (Shah et al., 2019; Boré et al., 1999).

Kondenzátorové mikrofóny patria k najkvalitnejším snímačom zvuku. Ich membrána je v porovnaní s dynamickými mikrofónmi oveľa ľahšia a pri pohybe efektívnejšia. Preto sú tieto mikrofóny citlivejšie a sú schopné zachytiť široký rozsah vysokých frekvencií. Používajú sa najmä na nahrávanie akustických

[3]Môžu sa použiť aj membrány z ľahkého tenkého plastu, ktorý je pokrytý vrstvičkou zlata.



Obr. 8.6: Schéma kondenzátorového a elektretového mikrofónu

nástrojov a spevu. Na druhej strane sú ale zložitejšie (a preto aj drahšie) ako dynamické mikrofóny a majú menšiu odolnosť na extrémne teploty a vlhkosť. Lacnejšie modely môžu produkovať slabý šum.

V menších, prenosných mikrofónoch, ako sú mikrofóny pre notebooky, tablety a mobilné telefóny sa používajú elektretové mikrofóny[4] (pozri obr. 8.6 vpravo hore). Ich princíp je totožný s kondenzátorovým mikrofónom, avšak jeho pevná alebo pohyblivá elektróda (membrána) je obalená tenkou vrstvou elektretu (2).

8.2.3 Piezoelektrické mikrofóny

Tento druh mikrofónov využíva známy piezoelektrický jav, pri ktorom mechanická deformácia kryštálu vyvoláva vznik elektrického prúdu. Tvorí ho tenký prúžok keramického piezokryštálu, ktorý sa nachádza medzi dvoma elektródami a je pevne pripojený k pohyblivej či pružnej membráne. Ak zvuková vlna dopadne na membránu, rozkmitá ju, pričom sa jej pohyb prenesie na piezokryštál, ktorý mierne stlačí – deformuje. Pri deformácií piezokryštálu vzniká na jeho povrchu elektrický náboj, ktorý je cez elektródy a vodiče odvádzaný na výstup mikrofónu. Vzniknutý náboj, t. j. veľkosť napätia, je priamoúmerný veľkosti deformácie piezoelektrického kryštálu (Shah et al., 2019).

Piezoelektrické mikrofóny sa používajú hlavne na priame snímanie zvuku akustických nástrojov, keďže ich plochý tvar im umožňuje dobré upevnenie na

[4]Elektret je permanentne nabitá, nevodivá dielektrická látka, ktorá dodáva energiu kondenzátoru.

rezonančnú dosku hudobných nástrojov (gitara, husle a pod.). Majú pomerne veľké skreslenie, avšak môžu byť veľmi malé, vodotesné a môžu snímať zvuk aj pod vodou, dokonca aj v ultrazvukovom pásme. Sú málo citlivé, a preto nezachytávajú slabé, rušivé zvuky z okolia.

Pri mikrofónoch je dôležitá aj ich smerová charakteristika. Tá určuje, v akom smere a v akej intenzite bude mikrofón prijímať zvukový signál. Najčastejšie sa používa všesmerový mikrofón, ktorý prijíma zvuk zo všetkých strán s rovnakou intenzitou. Príkladom sú konferenčné mikrofóny. Ďalej sú často používané mikrofóny s kardioidnou charakteristikou, ktorá potláča zvuk prichádzajúci k zadnej strane mikrofónu. Tieto mikrofóny sú vhodné pre nahrávanie spevu a hovoreného slova, pretože dobre tlmia spätnú väzbu. Menej často sa používajú mikrofóny s úzko smerovou charakteristikou. Sú vhodné na špeciálne účely napr. pri filmovaní, keďže veľmi silno potlačujú zvuk zo strán a zo zadu (Shah et al., 2019; Boré et al., 1999).

Záver

V tomto prehľade opisujeme súčasný stav niektorých zariadení používaných vo virtuálnej a rozšírenej realite, princípy ich fungovania, ich výhody i nevýhody ako aj možnosti, ktoré ponúkajú. K plnohodnotnému používateľskému zážitku vo virtuálnej realite sa v súčasnosti využíva množstvo zariadení, ktoré v sebe integrujú displeje, projektory, obrazové snímače, snímače pohybu a polohy, dátové rukavice, haptické zariadenia, simulátory pohybu, zvukové zariadenia a mnohé ďalšie. Štandardným príkladom sú vizuálne hybridné systémy pre virtuálnu realitu s názvom *CAVE*, ktoré v sebe kombinujú projektory s vysokým rozlíšením zobrazujúce stereoskopický obraz na okolité steny (prípadne aj podlahu a strop), systém pre sledovanie pohybu používateľa, reproduktory pre vytváranie zvuku a výkonné počítače.

Kombinácia rôznych zariadení umožní používateľovi nielen vidieť a počuť objekty vo virtuálnej realite, ale sa ich aj dotýkať, interagovať s nimi, ba dokonca ich aj ovoňať či pocítiť. Zariadenia virtuálnej a rozšírenej reality môžu ovplyvňovať takmer všetky ľudské zmysly. Zrak pomocou obrazu vytváraného displejmi či projektormi, sluch pomocou reproduktorov, hmat pomocou haptických zariadení, čuch pomocou zariadení vytvárajúcich vône ale aj ďalších, ktoré vytvárajú napr. pocit tepla či chladu. Ďalej môžeme simulátormi pohybu vytvoriť ilúziu, že sa pohybujeme vo virtuálnom prostredí, dokonca môžeme použiť aj obyčajný ventilátor, aby sme cítili účinky vetra.

Mnohé z opísaných zariadení sú prístupné bežnému používateľovi, ale tie sofistikovanejšie, medzi ktoré patria simulátory pohybu ale najmä kinestetické haptické zariadenia, využívajúce viacero najnovších technológií, sú nedostupné kvôli vysokej cene. Naopak, niektoré zariadenia, ako sú počítače a displeje, mobilné telefóny a tablety, sa kvôli množstvu dostupných aplikácií a prijateľnej cene už niekoľko rokov vo virtuálnej a rozšírenej realite používajú.

Keďže zobrazovacie zariadenia hrajú vo VR/AR primárnu úlohu, je užitočné poznať nielen spôsob fungovania súčasných 2D displejov, ale aj technológie, ktoré budú v blízkej budúcnosti využívané na zobrazovanie priestorového obrazu. Mnoho z týchto zariadení sú v súčasnosti iba prototypy, mnoho z nich už ani neexistuje a mnoho z nich sa v budúcnosti už nebude používať. Vhodné je však vedieť ako fungujú, aké princípy a technológie používajú a aké sú ich výhody a nevýhody. Príkladom zobrazovacích zariadení, ktoré sa už takmer nepoužívajú sú displeje s katódovou trubicou, či plazmové displeje, aj keď kvalitou obrazu nezaostávajú za súčasnými zobrazovacími zariadeniami.

Klávesnice, myši a pákové ovládače sa už v súčasnosti pre potreby virtuálnej reality takmer nepoužívajú, keďže ich už nahradili gestá rúk či zvukové povely. Niektoré zo zariadení sa zasa budu používať častejšie ako doteraz. Príkladom sú čoraz viac používané okuliare pre rozšírenú realitu.

Je veľmi pravdepodobné, že najmä rozšírená realita bude viac zasahovať do bežného života. Nesmieme zabúdať aj na to, že pre plnohodnotný zážitok vo virtuálnej či rozšírenej realite potrebujeme kvalitný a sofistikovaný softvér, ktorý potrebuje určitý výpočtový výkon. Ak chceme vytvoriť naozaj realistický obraz, nezaobíde sa to bez výkonnej grafickej karty. Neustály rast výkonu procesorov a neustále vylepšovanie renderovacích algoritmov povedie k tomu, že ľudský mozog nebude schopný rozlíšiť, čo je virtuálne a čo je reálne...

Dúfame, že tento prehľad pomôže čitateľovi nielen porozumieť, ako niektoré zariadenia fungujú, ale umožní mu aj vytvoriť si predstavu, akým smerom sa vyvíjajú. Pre čitateľa je k dispozícii elektronická verzia tejto publikácie na webovej adrese:
`flurry.dg.fmph.uniba.sk/webog/SuboryOG/bohdal/KnihaZariadeniaPreARaVR.pdf`
ako aj webstránka s 3D modelmi zariadení a schém, ktorých obrázky sa nachádzajú v tejto publikácii:
`flurry.dg.fmph.uniba.sk/zariadenia-pre-vr-a-ar.html`.
Všetky 3D modely sú uvoľnené pod licenciou Creative Commons CC BY-SA 4.0.

Elektronická verzia knihy

Webstránka 3D modelov

Literatúra

AKTHER, Asma; CASTRO, Jasmine; SHAEGH, Seyed; REZK, Amgad; YEO, Leslie, 2019. Miniaturised acoustofluidic tactile haptic actuator. *Soft matter*. Roč. 15, č. 20, s. 4146–4152.

APERIUM, 2019. *Aperium, Manufacturing easy to use VR treadmills* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://aperiumreality.com/index.php/en/home/.

ARIZA, Vera Zasúlich Pérez; SANTÍS-CHAVES, Mauricio, 2016. Haptic Interfaces: Kinesthetic Vs. Tactile Systems. *Revista EIA*. Roč. 13, s. 13–29.

AUDIOPIXELS, 2020. *Technology* [online] [cit. 2020-09-19]. Dostupné z : http://www.audiopixels.com.au/index.cfm/technology/.

BELLIS, Mary, 2017. *The History of Liquid Crystal Display* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.thoughtco.com/liquid-crystal-display-history-lcd-1992078.

BERKEL, Cees; PARKER, David; FRANKLIN, Anthony, 1996. Multiview 3D LCD. In: International Society for Optics a Photonics. Zv. 2653, s. 32–40.

BERMEJO, Carlos; HUI, Pan, 2017. A survey on haptic technologies for mobile augmented reality. *arXiv preprint arXiv:1709.00698*.

BERNSTEIN, Jonathan, 2003. *An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.sensorsmag.com/components/overview-mems-inertial-sensing-technology.

BLEWITT, Geoffrey, 1997. Basics of the GPS technique: observation equations. *Geodetic applications of GPS*, s. 10–54.

BOAS, Yuri Antonio Gonçalves Vilas, 2013. Overview of virtual reality technologies. In.

BONSOR, Kevin, 2000. *How Electronic Ink Works* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/gadgets/high-tech-gadgets/e-ink.htm.

BORÉ, Gerhart; PEUS, Stephen, 1999. *Microphones for Studio and Home-Recording Applications: Operation Principles and Type Examples*. Neumann.

BRAIN, Marshall, 2006. *How Television Works* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/tv3.htm.

BRAIN, Marshall; CARMACK, Carmen, 2000. *How Computer Mice Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://computer.howstuffworks.com/mouse.htm.

BURNETT, Thomas, 2017. Light-field Display Architecture and the Challenge of Synthetic Light-field Radiance Image Rendering. In: Wiley Online Library. Zv. 48, s. 899–902. Č. 1.

CAKMAKCI, Ozan; ROLLAND, Jannick, 2006. Head-worn displays: a review. *Journal of display technology*. Roč. 2, s. 199–216.

CARDINAL, David, 2011. *From punchcards to Siri: The history (and future) of input devices* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.extremetech.com/computing/98287-from-punchcards-to-ipads-the-history-of-input-devices.

CAUDELL, Thomas; MIZELL, David, 1992. Augmented reality: An application of heads--up display technology to manual manufacturing processes. In: System Sciences, IEEE. Zv. 2, s. 659–669.

COSMOSCR, 2019. *Using your Body in the Virtual World: VR Platforms and Treadmills* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://medium.com/cosmoscr/using-your-body-in-the-virtual-world-vr-platforms-treadmills-27eeb918557.

CYBERITH, 2019. *Virtualizer ELITE 2* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.cyberith.com/virtualizer-elite/.

D3DCINEMA, 2019. *Birdly* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : http://birdlyvr.com/.

DIJKSTRA, Henk, 2018. *The CRT History page* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : http://www.crtsite.com/page3.html.

DODGSON, Neil, 2005. Autostereoscopic 3D displays. *Computer*. Roč. 38, s. 31–36.

DOWNING, Elizabeth Anne, 1997. *Method and system for three-dimensional display of information based on two-photon upconversion*. 5 684 621.

EINK, 2017. *Electronic Ink* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.eink.com/electronic-ink.html.

EXYTE, 2019. *Technologies behind immersive VR: positional tracking and VR-accessories.* [Online] [cit. 2020-09-19]. Dostupné z : https://arvrjourney.com/technologies-behind-immersive-vr-positional-tracking-and-vr-accessories-part-1-f38f9a7f1a02.

FANVANDAM, 2018. *Birdly - Making the Dream of Flying a Virtual Reality* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.rs-online.com/designspark/birdly-making-a-flying-virtual-reality-experience-truly-immersive.

FAVALORA, Gregg, 2005. Volumetric 3D displays and application infrastructure. *Computer*. Roč. 38, s. 37–44.

FEINER, Steven; MACINTYRE, Blair; SELIGMANN, Dorée, 1993. Knowledge-based Augmented Reality. *Communications of the ACM*. Roč. 36, s. 53–62.

FERNANDEZ, Timothy, 2013. *RealD vs. Imax Digital 3D: What's the difference?* [Online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://423digital.wordpress.com/2013/01/06/reald-vs-imax-digital-3d-whats-the-difference-cnet-asia/.

FGTEAM, 2016. *SpaceWalkerVR Omnidirectional Walking Simulator Allows Users to Freely Move Around in Virtual Worlds* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.fitness-gaming.com/news/fitness-and-sports/spacewalkervr-walking-simulator.html.

FREUDENRICH, Craig, 2005. *How OLEDs Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/oled.htm.

GASPAR, Daniel; POLIKARPOV, Evgueni, 2015. *OLED fundamentals: materials, devices, and processing of organic light-emitting diodes*. CRC Press.

GENG, Jason, 2013. Three-dimensional display technologies. *Advances in optics and photonics*, s. 456–535.

GOLDMAN, David; O'TOOLE, James, 2014. *The world is running out of plasma TVs* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : http://money.cnn.com/2014/10/30/technology/plasma-tv/index.html.

GUTTAG, Karl, 2016. *AR/MR Optics for Combining Light for a See-Through Display (Part 1)* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.kguttag.com/2016/10/21/armr-optics-for-combining-light-for-a-see-through-display-part-1/.

HARRIS, Tom, 2002a. *How Joysticks Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/joystick.htm.

HARRIS, Tom, 2002b. *How Speakers Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/speaker3.htm.

HAZRA, Sid, 2015. *How are pico-projectors built? How do I build one?* [Online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.quora.com/How-are-pico-projectors-built-How-do-I-build-one.

HEANEY, David, 2019. *How VR Positional Tracking Systems Work* [online] [cit. 2020-09-19]. Dostupné z : https://uploadvr.com/how-vr-tracking-works/.

ST-HILAIRE, Pierre; BENTON, Stephen; LUCENTE, Mark; HUBEL, Paul, 1992. Color images with the MIT holographic video display. In: International Society for Optics a Photonics. Zv. 1667, s. 73–85.

HINCHET, Ronan; VECHEV, Velko; SHEA, Herbert; HILLIGES, Otmar, 2018. Dextres: Wearable haptic feedback for grasping in VR via a thin form-factor electrostatic brake. In: *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, s. 901–912.

HIRSCH, Max, 1961. *Three dimensional display apparatus*. 2 967 905.

HONG, Jisoo; KIM, Youngmin; CHOI, Hee-Jin; HAHN, Joonku; PARK, Jae-Hyeung; KIM, Hwi; MIN, Sung-Wook; CHEN, Ni; LEE, Byoun, 2011. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues. *Applied Optics*. Roč. 50, H87–H115.

HORVATH, Samantha; GALEOTTI, John; WU, Bing; KLATZKY, Roberta; SIEGEL, Mel; STETTEN, Georg, 2014. FingerSight: Fingertip haptic sensing of the visual environment. *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*. Roč. 2, s. 1–9.

HOWSTUFFWORKS, 2001. *How do touch-screen monitors know where you're touching?* [Online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://computer.howstuffworks.com/question716.htm.

HUANG, Yi-Pai; CHEN, Chih-Wei; SHEN, To-Chiang; HUANG, Jian-Fung, 2010. Autostereoscopic 3D display with scanning multi-electrode driven liquid crystal (MeD-LC) lens. *3D Research*. Roč. 1, s. 39–42.

HUGHES, Mark, 2016. *How Piezoelectric Speakers Work* [online] [cit. 2020-09-19]. Dostupné z : https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-piezoelectric-speakers-work/.

HYPERVSN, 2018. *HYPERVSN – integrated 3D holographic display system* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://hypervsn.com/how-it-works.

CHANDLER, Nathan, 2015. *How RealD 3-D Works* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://entertainment.howstuffworks.com/reald-3-d.htm.

CHOI, Inrak; HAWKES, Elliot; CHRISTENSEN, David; PLOCH, Christopher; FOLLMER, Sean, 2016. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. In: IEEE, s. 986–993.

ICAROS, 2019. *Icaros* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.icaros.com/.

IGREET, 2017. *Brief History of Augmented Reality* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : http://www.igreet.co/brief-history-of-augmented-reality.

IVES, Frederic, 1902. A novel stereogram. *Journal of the Franklin Institute*. Roč. 153, s. 51–52.

JMGO, 2018. *The History of The Projectors* [online] [cit. 2020-09-14]. Dostupné z : http://en.jmgo.com/enblog/blog/the-history-of-the-projectors.

JOLLY, Sundeep; SMALLEY, Daniel; BARABAS, James; BOVE, Michael, 2014. Computational architecture for full-color holographic displays based on anisotropic leaky-mode modulators. In: International Society for Optics a Photonics. Zv. 9006.

JORKE, Helmut; SIMON, Arnold; FRITZ, Markus, 2009. Advanced stereo projection using interference filters. *Journal of the Society for Information Display*. Roč. 17, č. 5, s. 407–410. Dostupné tiež z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1889/JSID17.5.407.

KATO, Hirokazu; BILLINGHURST, Mark, 1999. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: IEEE, s. 85–94.

KIMURA, Hidei; UCHIYAMA, Taro; YOSHIKAWA, Hiroyuki, 2006. Laser produced 3D display in the air. In: ACM, s. 20.

KOREVAAR, Eric; SPIVEY, Brett, 1989. *Three dimensional display apparatus*. 4 881 068.

KRUEGER, Myron; GIONFRIDDO, Thomas; HINRICHSEN, Katrin, 1985. VIDEOPLACE – an artificial reality. *ACM SIGCHI Bulletin*. Roč. 16, s. 35–40.

LANG, Ben, 2018. *Hands-on: Infinadeck's Latest Prototype is the Most Natural Feeling VR Treadmill Yet* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.roadtovr.com/infinadeck-2018-prototype-hands-on-most-natural-feeling-vr-treadmill-yet/.

LAU, Daniel, 2013. *The Science Behind Kinects or Kinect 1.0 versus 2.0* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.gamasutra.com/blogs/DanielLau/20131127/205820/The/_Science/_Behind/_Kinects/_or/_Kinect/_10/_versus/_20.php.

LIGHTSPACETECHNOLOGIES, 2014. *Gen3 Volumetric 3D image front view and surface displays* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.lightspace3d.com/index.php/Products/gen3-volumetric-3d-image-displays/.

LODOLA, Alex, 2018. *The best VR treadmills and VR slidemills* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.aniwaa.com/blog/best-vr-treadmills-vr-slidemills/.

MACFARLANE, Duncan, 1994. Volumetric three-dimensional display. *Applied optics*. Roč. 33, s. 7453–7457.

MAROTO, Marcos; CAÑO, Enrique; GONZÁLEZ, Pavel; VILLEGAS, Diego, 2018. Head-up displays (HUD) in driving. *arXiv preprint arXiv:1803.08383*.

MARTINLOGAN, 2020. *Electrostatic (ESL) Theory* [online] [cit. 2020-09-19]. Dostupné z : https://www.martinlogan.com/en/electrostatic-esl-theory.

NEC, 2020. *Laser Technologies* [online] [cit. 2020-09-14]. Dostupné z : https://www.nec-display-solutions.com/p/laser/en/technologies.xhtml.

PACCHIEROTTI, Claudio; SINCLAIR, Stephen; SOLAZZI, Massimiliano; FRISOLI, Antonio; HAYWARD, Vincent; PRATTICHIZZO, Domenico, 2017. Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives. *IEEE transactions on haptics*. Roč. 10, s. 580–600.

PARK, Jae-Hyeung, 2017. Recent progress in computer-generated holography for three--dimensional scenes. *Journal of Information Display*. Roč. 18, s. 1–12.

PCTECHGUIDE, 2020. *CRT Projectors* [online] [cit. 2020-09-15]. Dostupné z : https://www.pctechguide.com/projectors/crt-projectors.

PERRET, Jérôme; VANDER POORTEN, Emmanuel, 2018. Touching virtual reality: a review of haptic gloves. In: *ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators*, s. 1–5.

ROLLAND, Jannick; CAKMAKCI, Ozan, 2009. Head-worn displays: the future through new eyes. *Optics and Photonics News*. Roč. 20, s. 20–27.

ROSENBERG, Louis, 1993. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. In: IEEE, s. 76–82.

SCME, 2017. *History of MEMS* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://nanohub.org/resources/26535/download/App/_Intro/_PK10/_PG.pdf.

SEEREALTECHNOLOGIES, 2018. *Unique and patented technology solutions for real-time holography* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.seereal.com/technology/.

SHAH, Muhammad Ali; SHAH, Ibrar Ali; LEE, Duck-Gyu; HUR, Shin, 2019. Design approaches of MEMS microphones for enhanced performance. *Journal of Sensors*. Roč. 2019, s. 1–26.

SHERMAN, William; CRAIG, Alan, 2018. *Understanding virtual reality*. Morgan Kaufmann.

SCHMALSTIEG, Dieter; HOLLERER, Tobias, 2016. *Augmented reality: principles and practice*. Addison-Wesley Professional.

SMALLEY, D. E.; NYGAARD, E.; SQUIRE, K.; WAGONER, J. Van; RASMUSSEN, J.; GNEITING, S.; QADERI, K.; GOODSELL, J.; ROGERS, W.; LINDSEY, M. et al., 2018. A photophoretic-trap volumetric display. *Nature*. Roč. 553, s. 486.

SOLTAN, Parviz; LASHER, Mark; DAHLKE, Weldon; ACANTILADO, Neil; MCDONALD, Malvyn, 1997. Laser-projected 3D volumetric displays. In: International Society for Optics a Photonics. Zv. 3057, s. 496–507.

STORR, Wayne, 2019. *Hall Effect Sensor* [Electronics Tutorials] [online] [cit. 2020-07-09]. Dostupné z : https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html.

THOMPSON, Clive, 2017. *Stereographs Were the Original Virtual Reality* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.smithsonianmag.com/innovation/sterographs-original-virtual-reality-180964771/.

TYSON, Jeff, 2000. *How LCDs Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://electronics.howstuffworks.com/lcd.htm.

TYSON, Jeff; WILSON, Tracy; POLLETTE, Chris, 2000. *How Computer Keyboards Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://computer.howstuffworks.com/keyboard.htm.

VANDENBERGHE, Patrick, 2014. Data Projectors. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Ed. CHEN, Janglin; CRANTON, Wayne; FIHN, Mark. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 1–8. ISBN 978-3-642-35947-7. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-642-35947-7_133-2.

WARREN, Tom, 2016. *Inside Microsoft's HoloLens* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.theverge.com/2016/4/6/11376442/microsoft-hololens-holograms-parts-teardown-photos-hands-on.

WEIS, Shachar, 2018. *VR Treadmill Overview – March 2018* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://packet39.com/blog/2018/03/25/vr-treadmill-overview-march-2018/.

WILKINSON, Scott, 2020. *LCD, LCoS, or DLP: Choosing a Projector Imaging Technology* [online] [cit. 2020-09-14]. Dostupné z : https://www.projectorcentral.com/Digital-Projector-Imaging-Technologies-Explained.htm.

WILSON, Tracy, 2019. *How Holograms Work* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://science.howstuffworks.com/hologram.htm.

YOUTUBE, 2008. *CNN Hologram TV First* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://www.youtube.com/watch?v=thOxW19vsTg.

ZONE, Ray, 2007. *Stereoscopic Cinema and the Origins of 3-D Film*. University Press of Kentucky.

Zdroje obrázkov

ASIIR, 2007. *Construction of a typical notebook computer dome-switch keyboard* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Keyboard_Construction_Button_Press.JPG. CC BY-SA 2.5.

BEARDSMORE, Daniel, 2013. *Cherry MX switches* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cherry%20MX%20--%20opened,%202.jpg. CC0 1.0.

BROOM R R (PLT OFF), Royal Air Force official photographer, 1944. *Stéréoscope à Miroirs de M. Wheatstone* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferranti_Mark_IID_gyroscopic_gunsight_mounted_in_a_Supermarine_Spitfire_Mk_IX_of_No._127_Wing_RAF_at_B2-Bazenville,_Normandy,_17_August_1944._CL854.jpg. Public Domain.

ELEKES, Andor Derzsi, 2015. *Car racing simulator in action* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Car_racing_simulator_-%20_SBR_Racing,_Construma,_2015.04.17.JPG. CC BY-SA 4.0.

EVAN-AMOS, 2011. *Microsoft Kinect peripheral for the Xbox 360* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Xbox-360-Kinect-Standalone.png. Public domain.

EVAN-AMOS, 2014. *The Xbox One's Kinect* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Xbox-One-Kinect.jpg. Public domain.

FIGUIER, Louis, 1869. *Stéréoscope à Miroirs de M. Wheatstone* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T3-%20d201%20-%20Fig.%20119.%20%E2%80%94%20St%C3%A9r%C3%A9oscope%20%C3%A0%20Miroirs%20de%20M.%20Wheatstone.png. Public Domain.

GAMINGFORFUN365, 2015. *Modern joystick called Cyborg 3D Gold* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%20Joystick%20Cyborg%203D%20Gold.png. CC BY-SA 3.0.

NASSIRI, Alessandro, 2014. *Visore stereoscopico portatile di tipo Brewster* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IGB_006055_Visore_stereoscopico_portatile_Museo_scienza_e_tecnologia_Milano.jpg. CC BY-SA 4.0.

NOVINT14, 2006. *Novint Falcon 3D touch (haptic) controller* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Novint_Falcon.jpg. CC BY-SA 3.0.

PESCE, Maurizio, 2014. *A Samsung Gear VR head-mounted display* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Samsung_Gear_VR_(15247457825).jpg. CC BY 2.0.

RAMADHANAKBR, 2016. *Microsoft Hololens* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ramahololens.jpg. CC BY-SA 4.0.

SAMWALTON9, 2017. *Oculus Rift CV1 from the back* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oculus_CV1_Back.jpg. CC BY-SA 4.0.

SCARBOROUGH, Kim, 2006. *Anaglyph* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beach_Steps_(anaglyph)_(169131818).jpg. CC BY-SA 2.0.

TIM.RECKMANN, 2014. *Google Glass - View of the mini-computer* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Google_Glass_Main.jpg. CC BY-SA 3.0.

TRENDS, AR, 1992. *Virtual Fixtures system* [online] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Virtual-Fixtures-USAF-AR.jpg. CC BY-SA 4.0.

Register pojmov

aberácia
  astigmatická, 42
  farebná, 29
absorbcia dvojfotónová, 41
Advanced Color ePaper, 24
akcelerometer, 69, 71, 79–81, 103
akomodácia očná, 27, 40, 68
aktuátor lineárny, 102, 103
anaglyf, 29, 30
anóda, 16, 21, 83
Aperium K-01 Pod, 100
ARToolKit, 14
Atomic A3, 102

bicykel stacionárny, 102, 105
Birdly, 102, 104

cievka
  elektromagnetická, 88, 90, 108, 111, 112
  vychyľovacia, 16
CLEARink, 24
clona dynamická, 55, 57, 60
Coriolisova sila, 82
Cyberith Virtualizer, 101

Dancing in Cyberspace, 13
DextrES Glove, 94
diaprojektor, 53
diera elektrónová, 21, 22
difúzor, 43, 49
disparita binokulárna, 27, 29, 64
displej
  autostereoskopický, 28, 36
    adaptívny, 39
    s lentikulárnymi šošovkami, 37
    s paralaxovou bariérou, 37
    s časovou uzávierkou, 38
    viacpohľadový, 36, 38, 39, 51, 70
  CLEARink, 24
  CRT, 15, 34, 38, 44, 54, 64
  E ink, 23
  holografický, 28, 45, 47, 48
  LCD, 17, 34, 39, 55
  LED, 53
  náhlavný, 12, 13, 28, 53, 57, 63, 64, 69, 80, 85, 88, 97, 102, 106
  objemový, 28, 40
    aktívny, 41
    pasívny, 41
    s rotačnou plochou, 44
    so statickou zobr. časťou, 41
  OLED, 15, 21, 53
  plazmový, 15, 25
  priehľadový, 11, 53, 63, 70
  projekčný priehľadový, 70
  pseudo-3D, 28, 50
  stereoskopický, 28, 32
    s aktívnymi okuliarmi, 35
    s pasívnymi okuliarmi, 33
dióda, 66
  laserová, 55, 58
  LED, 19, 20, 39, 42, 44, 50, 74, 75
    infračervená, 85, 88
DOF Reality Motion, 102
Dolby 3D, 31
Dolby Atmos, 108

E ink, 23
  Carta, 23
  Kaleido, 24
  Triton, 23
efekt
  dúhový, 60
  mriežkový, 55
elektroforéza, 23, 24
elektroluminiscencia, 21
elektromagnet, 91, 96, 108
elektromotor, 92, 94, 96, 102, 103
elektróda, 19, 23, 24, 56, 82, 94, 112–114
elektrón, 15, 17, 22, 82
exoskelet, 13, 92, 94–96

filter
  farebný, 19, 20, 24, 29, 38, 58
  interferenčný, 31, 32

LCD, 35
polarizačný, 18–20, 30, 31, 33, 34
priesvitný, 60
fluorescencia, 41, 55
fosforescencia, 16
fotodióda, 85
fotoforéza, 42
fotoluminiscencia, 20
fotón, 16, 22, 78

Google Glass, 14, 63, 67, 68
GPS, 69, 71, 79
gyroskop, 71, 79, 80, 82, 99, 103

Hallov jav, 82
HaptX Glove, 96
holografia, 46
výpočtová, 48
hologram, 46, 49, 50
HTC Vive, 85
HTC Vive Cosmos, 86

Icaros, 102, 105
indukcia elektromagnetická, 112
Infinadeck, 98
interferencia, 46

kamera, 64, 69, 71, 79, 84, 86, 87, 91
kapacita, 81, 82
KARMA, 13
Kat Walk Mini, 100
katóda, 16, 21, 82
kino 3D, 30, 58
klávesnica, 71, 72
mechanická, 73
mechanická s membránou, 72
membránová, 72
pružinovo-mechanická, 72
kompas elektronický, 71, 79, 82
kondenzátor, 81, 112, 113
konflikt akomodácie-konvergencie, 40, 41, 70
konvergencia očná, 27, 40
kotúč rotujúci
fosforový, 55, 58
s farebnými filtrami, 58, 60
kryštál
piezoelektrický, 48, 90, 94–96, 108, 109, 112, 114
tekutý, 17–20, 31, 68

lentikuly, 38
Lorentzova sila, 83
luminofor, 16, 44
lúč
elektrónový, 16, 44
laserový, 42, 44, 46, 48, 74
infračervený, 41, 42, 85
predmetový, 46
referenčný, 46
rekonštrukčný, 46
skenovací, 85
svetelný, 48, 54, 55, 58–60

magic lantern, 53
magnet permanentný, 108, 112
manipulandum, 91, 92
maska tieňová, 16
membrána, 72, 108–114
Microsoft HoloLens, 14, 63, 67, 86
Microsoft Kinect, 78
mikrodisplej, 64–66
mikrofón, 69, 71, 79, 89, 108, 111
dynamický, 112
elektretový, 114
kondenzátorový, 113
piezoelektrický, 114
mikrokapsula, 23, 24
mikrokvapaliny, 96
mikroprojektor, 65, 66, 69
modulácia svetla
dynamická, 57, 60
modulátor
akusticko-optický, 48
elektro-optický, 31
mriežka riadiaca, 17
myš, 71, 73
mechanická, 73
optická, 74

nanočastice
pigmentové, 23
farebné, 24
čierne, 24
napínače šliach, 94
náboj
elektrický, 76

elektrostatický, 94, 95

obraz
integrálny, 40
priestorový, 27, 29, 40, 42–46, 48, 69
stereoskopický, 36, 64, 65
Oculus Quest, 86
Oculus Rift, 63, 64, 88
odozva displeja, 20
odraz svetla
totálny, 24, 67
okuliare
3D, 30
aktívne, 29
pasívne, 29
pre rozšírenú realitu, 14, 53, 57, 63–65, 68, 80
s polarizačným filtrom, 30, 34
stereoskopické, 29
Omnideck, 98
optické štrbiny, 85
optika
priehľadová, 12, 13, 64, 65
varifokálna, 68
osciloskop, 16
ovládač pákový, 72, 75, 99

panel
DLP, 58, 59
dotykový, 69, 71, 76
kapacitný, 76
odporový, 76
feroelektrický, 39
LCD, 37, 38, 42, 43, 56, 64, 66, 68
monochromatický, 55
LCoS, 56, 66
OLED, 42, 64, 66
priesvitný, 43
viacvrstvový, 23
papier elektronický, 23, 24
paralaxa
horizontálna, 36, 48, 51
vodorovná a zvislá, 40
piest
hydraulický, 93
pneumatický, 93
platnička refrakčná, 55
platňa fotografická, 46
plošina pohyblivá, 102
plátno projekčné, 30, 32, 53, 55, 59, 106
podsvietenie
direct-lit, 20
dynamické, 20
full-array, 20
pohlcovač svetla, 59
polarizácia
kruhová, 31
pravotočivá, 31
svetla, 30
vodorovná, 33
zvislá, 33
ľavotočivá, 31
pole
elektrostatické, 110
magnetické, 83, 88, 108, 112
pole reflektorov, 77
posun pixelový, 55, 57
potenciometer, 75
potenciál, 82
premietanie stereoskopické, 32
prevodník analógovo-digitálny, 78
prijímač, 77, 88
GPS, 80
princíp šmýkania/kĺzania, 100
projekcia stereoskopická, 30
projektor, 30, 32, 33, 53
CRT, 53, 54
DLP, 45, 53, 58, 61
infračervený, 78
laserových lúčov, 79
LCD, 53–56, 60
LCoS, 53, 56, 60, 61
vysokorýchlostný, 43, 44
prvok
akusticko-optický, 44
optický
holografický, 67
viacvrstvový, 43
rezonančný, 90
prúžok interferenčný, 46, 48
pás bežecký, 97–100

rekombinácia elektrónov, 22
reproduktor, 69, 71, 104, 108
dynamický, 108, 111
elektrostatický, 110

piezoelektrický, 109, 110
ultrazvukový, 91
rukavica dátová, 80
rukavice haptické, 94

Sensorama, 12
senzor
haptický, 13
priblíženia, 71
svetelný, 71
simulácia
dotyku, 91, 92, 96
lietania, 104
zrýchlenia, 103
simulátor
bojových vozidiel, 102
letecký, 57
lietania, 102
pohybu, 97, 104
pohyblivý, 97, 98
statický, 97, 100
pretekárskych áut, 102
vôní, 105
skener sietnicový, 64
skenovací valec, 85
snímač
akustický, 89
CCD, 78
CMOS, 74, 78
hĺbkový, 78
infračervený, 74, 78
infračervených lúčov, 75
obrazu, 78–80
optický, 101
polohy, 12, 49, 64, 69, 79, 98
akustický, 80, 89
bezznačkový, 85
elektromagnetický, 88, 94, 96
inerciálny, 80, 81, 84, 85, 87, 88, 94, 96
inside-out, 85
magnetický, 80
mechanický, 80
ohybový, 80, 94, 96
optický, 80, 84
outside-in, 85, 87
značkový, 85
svetelný, 93
tlaku, 94, 99
SpaceWalkerVR, 99
spätná väzba, 90, 101, 105, 107
spínač mechanický, 73
stator, 110
stereogram, 36
stereoskop, 11, 28
stereoskopia, 27–29, 70
stimul
fyziologický, 27
psychologický, 27
stmievanie lokálne, 20
stupeň voľnosti, 80, 88, 103
svetlo polarizované, 19, 55, 67
Sword of Damocles, 12

technológia
IPS, 20
quantum dots, 20
Telesphere Mask, 12
televízor 3D, 27, 28, 36
trilaterácia, 80, 89
trubica vákuová, 15, 16

uhol zorný, 48–50, 63–65, 67
usporiadanie kryštálov
vertikálne, 20

vibrácia, 90, 91, 94, 101, 104, 107
Videoplace, 12
Virtual Fixtures, 13
Virtuix Omni, 100
vlna
svetelná, 46, 48
infračervená, 86
ultrazvuková, 77, 89, 92
zvuková, 109, 110, 113, 114
vlnovod holografický, 67
vlákno
optické, 42
žeraviace, 16
voxel, 40, 42–44, 50
vrstva
emisná, 21
kapacitná, 76
lentikulárna, 24
odporová, 76
pre blokovanie dier, 23

pre blokovanie elektrónov, 23
pre injekciu dier, 23
pre injekciu elektrónov, 23
reflexná, 56
vodivá, 21, 76
vysielač, 77, 88
akustický, 89
vzor štrukturálny, 78
výbojka, 58
ortuťová, 60
xenónová, 60
význačné body, 85–87

Wolverine, 93

Yaw VR, 102, 103

zariadenie
haptické, 89
hmatové, 89, 90, 107
hybridné, 89, 90, 94, 96
kinestetické, 89, 90, 92
úchopové, 92–94, 97
zdroj svetla, 55, 56, 58, 66
laserový, 61
LED, 61
zlučovač optický, 50, 55, 56, 65–67, 70
free-form, 67
polarizačný, 67
zrkadlo
dichroické, 55, 66
konkávne, 53
mikroskopické, 59
polopriepustné, 34, 46, 49, 55, 56, 65
planárne, 66, 67, 70
sférické, 66, 67, 70
zrýchlenie, 81
zvuk priestorový, 108

Register objaviteľov a vynálezcov

Bell Alexander Graham, 107
Billinghurst Mark, 14
Bourseul Charles, 107
Braun Ferdinand, 16
Brewster David, 11, 28

Caudell Thomas, 13
Crookes William, 15

Denisjuk Jurij, 46
Downingová Elizabeth, 41

Engelbart Douglas, 72

Feiner Steven, 13

Gabor Dennis, 46
Geissler Heinrich, 15

Heilig Morton, 12
Heilmeier George, 17
Huygens Christian, 53

Ives Frederic, 36

Kato Hirokazu, 14
Korevaar Eric, 41
Krueger Myron, 12

Macintyre Blair, 13
Martin Julie, 13
Mizell David, 13

Reiss Johann Philipp, 107
Rienitzer Friedrich, 17
Rollmann Wilhelm, 29
Rosenberg Louise, 13

Seligmann Dorée, 13
Sholes Christopher, 71
Slyke Steven, 21
Spivey Brett, 41
Sutherland Ivan, 12, 64

Tang Ching, 21

Wheatstone Charles, 11, 28
Williams Richard, 17

Anglicko-slovenský slovník vybraných pojmov

active matrix – aktívna matica
base stations – základné stanice
cathode ray tube – obrazovka s katódovou trubicou
charge-coupled device – nábojovo viazaná súčiastka
data glove – dátová rukavica
degrees of freedom – stupne voľnosti
digital light processor – digitálny svetelný procesor
digital micromirror device – zariadenie s mikrozrkadlami
direct-lit – priame podsvietenie
DLP imager – zobrazovací panel s DLP
edge-lit – okrajové podsvietenie
electron blocking layer – vrstva pre blokovanie elektrónov
electron injection layer – vrstva pre injekciu elektrónov
electron transport layer – emisná vrstva
electronic ink – elektronický atrament
exoskeleton – exoskelet
exotendons – napínače šliach
frame rate control – riadenie snímkovej frekvencie
full-array backlit – podsvietenie po celej ploche
global positioning system – satelitný navigačný systém
grasp device – úchopové zariadenie
haptic glove – haptická rukavica
head-mounted display – náhlavný display
head-up display – priehľadový displej
heave – pohyb hore/dole
hole blocking layer – vrstva pre blokovanie dier
hole injection layer – vrstva pre injekciu dier
hole transport layer – vodivá vrstva
holographic optical element – holografický optický prvok
holographic waveguide – holografický vlnovod
in plane switching – prepínanie v rovine
inertial measurement unit – inerciálna meracia jednotka
interlacing – prekladanie (obrazu)
joystick – pákový ovládač
kinesthetic – kinestetické (haptické zariadenie)
latency – odozva (displeja)
LCD imager – zobrazovací panel s LCD

LCoS imager – zobrazovací panel s LCoS
light absorber – pohlcovač svetla
light guide layer – vrstva šíriaca svetlo
liquid crystal display – displej s tekutými kryštálmi
local dimming – lokálne stmievanie
magnetorheological fluid – magnetoreologické tekutiny
marker – značka (významný bod)
markerless – bezznačkový (snímač polohy)
micro-electro-mechanical system – mikromechanický systém
microfluidics – mikrokvapaliny
mid-air – vo vzduchu
motion platform – pohyblivá plošina
multiview – viacpohľadový
optical head-worn displays – okuliare pre rozšírenú realitu
organic light emitting diode – organická svetlo-emitujúca dióda
passive matrix – passívna matica
Pepper's ghost – Pepperov prízrak
pin arrays – pole ihličiek
pitch – náklon do strán
pixel-shifting – pixelový posun
proximity sensor – senzor priblíženia
quantum dots – kvantové bodky
rainbow effect – dúhový efekt
response time compensation – kompenzácia času odozvy
roll – náklon dopredu/dozadu
screen-door effect – mriežkový efekt
sim sickness – simulačná choroba
slide projectors – diaprojektor
slidemill – zariadenie pre kĺzanie
smart glasses – okuliare pre rozšírenú realitu
spatial light modulator – priestorový svetelný modulátor
surge – pohyb dopredu/dozadu
sway – pohyb do strán
tactile, cutaneous – hmatové (haptické zariadenie)
temporal dithering – časový rozklad
thin film transistor – pole tenkých tranzistorov
time of flight – čas letu (šírenia svetla)
transducer – prevodník (energie)
treadmill – bežecký pás
vertical alignment – vertikálne zarovnanie
yaw – otáčanie okolo osi z

Slovník skratiek

CCD – Charge-Coupled Device
CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRT – Cathode Ray Tube
DLP – Digital Light Processor
DMD – Digital Micromirror Device
DOF – Degrees of Freedom
FELC – Ferroelectric Liquid Crystal
FRC – Frame Rate Control
GPS – Global Positioning System
HMD – Head-Mounted Display
HOE – Holographic Optical Element
HUD – Head-Up Display
IMU – Inertial Measurement Unit
IPS – In Plane Switching
LCD – Liquid Crystal Display
LCOS – Liquid Crystal on Silicon
MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems
OHWD – Optical Head-Worn Display
OLED – Organic Light Emitting Diode
SLM – Spatial Light Modulator
SMV – Super Multi View
SOLED – Stock OLED
TFT – Thin Film Transistor
TN – Twisted Nematic
TOF – Time of Flight

Vydané s finančnou podporou grantu KEGA 012UK-4/2018 *CEPENSAR*

Názov:	Zariadenia pre rozšírenú a virtuálnu realitu
Autor:	RNDr. Róbert Bohdal, PhD.
Recenzenti:	doc. Ing. Martin Šperka, PhD.
	prof. Ing. Veronika Stoffová, CSc.
Jazyková úprava:	doc. RNDr. Andrej Ferko, PhD.
Vydal:	Knižničné a edičné centrum FMFI UK Bratislava
Rok vydania:	2020
Poradie vydania:	prvé
Počet strán:	140
Náklad:	100 kusov, nepredajné

Vydané pod licenciou CC BY-NC-ND 4.0

ISBN 978-80-8147-097-4

Zariadenia pre rozšírenú a virtuálnu realitu

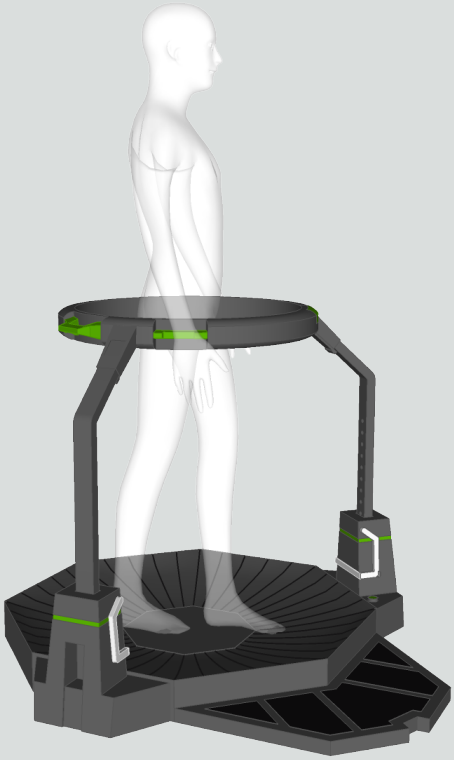
Róbert Bohdal

„Práca vypĺňa medzeru v publikáciach na danú tému. V takomto rozsahu v populárnej podobe s patričnou pedagogickou transformáciou téma Zariadenia pre rozšírenú a virtuálnu realitu spracovaná nebola.“

prof. Ing. Veronika Stoffová, CSc.

„Publikácia je prvou svojho druhu na Slovensku a iste bude užitočným zdrojom informácií pre záujemcov o rozšírenú a virtuálnu realitu.“

doc. Ing. Martin Šperka, PhD.



ISBN 978-80-8147-097-4