

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

Technologie pro 3D-zobrazování

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Volodymyr Ryzhenko, Ph.D.

Autor práce: Jan Lachman

PRAHA 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Lachman

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Technologie pro 3D-zobrazování

Název anglicky

3D display technologies

Cíle práce

Na základě studia dostupných materiálů vypracovat přehled různých metod 3D-zobrazování, jejich porovnání z hlediska výhod a nevýhod a současný stav jejich použití.

Metodika

1. Na základě studia dostupných materiálů zpracujte přehledovou studii různých metod 3D-zobrazování.
2. Popište způsoby polarizaci světla, polarizační filtry a jejich aplikace.
3. Popište základní princip 3D stereoskopického záznamu a 3D stereoskopického zobrazení, a základní části různých typů zobrazovacích jednotek pro 3D-zobrazování (aktivní 3D technologie, pasivní 3D technologie, aktivně-pasivní 3D technologie, 3D auto-stereoskopické monitory, anaglyf).
4. Provedte analýzu dalších technologií 3D zobrazování. Popište výhody a nevýhody použití vybraných technologií 3D-zobrazování.
5. Analyzujte problematiku současného stavu vývoje technologií 3D-zobrazování.
6. Popište principy holografie.
7. Popište výhody a nevýhody použití vybraných technologií 3D-zobrazování a srovnejte tyto technologie. Popište jejich praktické použití.
8. Citujte veškerou použitou literaturu, včetně webových stránek.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

3D, anaglyf, stereoskopie, holografie

Doporučené zdroje informací

<http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-princip-3d/>

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/457-holografie>

http://polar-peza.euweb.cz/vyuziti_polarizace.html

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Holografie>

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Stereoskopie>

<http://www.fyzika007.cz/optika/holografie>

Radek Chajda: Svět 3D. Pozoruhodný svět prostorových obrázků, Edika, 2013, 92 s., ISBN 9788025125793.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Volodymyr Ryzhenko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2016

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Technologie pro 3D-zobrazování“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne _____

Poděkování

Těmito slovy bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Volodymyru Ryzhenkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultace při její tvorbě. Dále bych rád poděkoval mé rodině a přátelům, kteří mě nepřestávali po celou dobu studia podporovat.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je vytvoření uceleného přehledu 3D metod zobrazování, základní vysvětlení principů, které jednotlivé metody využívají, jejich analýza, porovnání a možnosti použití v různých odvětvích. K sestavení práce jsou využity informace z odborných databází a internetových stránek výrobců a vývojářů 3D technologií. Dále jsou v práci popsány výhody a nevýhody stereoskopických a autostereoskopických metod 3D zobrazení a jejich zásadní nedostatky spolu s budoucími technologiemi, které se tyto nedostatky snaží řešit. Přínosem této práce a přehledu 3D technologií pro čtenáře je poskytnutí informací o používaných technologiích 3D zobrazování dnes i v budoucnu, o jejich nedostacích a možné aplikaci tak, aby se zamezilo špatnému výběru a nesprávné manipulaci.

Klíčová slova: 3D, stereoskopie, autostereoskopie, holografie, volumetrické displeje

Summary: The aim of this bachelor work is to provide a complex review of 3D display technologies, explanation of their basic principles, their analysis, comparison and potential possibilities in different departments. Information from expert databases and internet websites of 3D display technology producers were used to formulate this work. Advantages and disadvantages of stereoscopic and autostereoscopic methods of 3D display technologies are also depicted in this work, as well as their essential insufficiency together with future technologies that are trying to solve those deprivations. The contribution of this work, with its review of 3D display technologies, is to provide information for the reader about today's and years to come used 3D display technologies, about their imperfections and possible application in a way to prevent a bad selection and improper operation.

Key words: 3D, stereoscopic, autostereoscopic, holography, volumetric displays

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Metodika práce	3
4	Současný stav sledované problematiky	4
4.1	Světlo	4
4.2	Princip zrakového vnímání prostoru.....	5
4.2.1	Paralaxa pohybu	5
4.2.2	Binokulární disparita	6
4.2.3	Akomodace.....	6
4.2.4	Vergence.....	6
4.2.5	Využití nápovědí pro 3D zobrazovací technologie	7
4.3	Stereoskopické displeje.....	8
4.3.1	Anaglyf.....	8
4.3.2	ColorCode 3-D	9
4.3.3	Infitec.....	9
4.3.4	3D displeje využívající lineární polarizaci (pasivní technologie)	10
4.3.5	3D displeje využívající kruhovou polarizaci (pasivní technologie)	12
4.3.6	3D displej s časově prokládanými obrazy a brýlemi s časovou uzávěrkou (aktivní technologie).....	13
4.3.7	3D displej s časově prokládanými obrazy a přepínatelným polarizátorem (pasivní technologie)	16
4.3.8	HMD zobrazovací jednotky.....	17
4.3.9	Sledování pohybu hlavy u HMD.....	19
4.4	Autostereoskopické displeje	20
4.4.1	3D displej s paralaxní bariérou.....	20
4.4.2	3D displej s lentikulárními čočkami.....	22
4.4.3	3D displej s přepínatelnými lentikulárními čočkami.....	23
4.4.4	3D displeje s čočkami MeD-LC	24
4.4.5	3D zobrazovací technologie trixel.....	25
4.4.6	Sledování autostereoskopických vícehledových displejů	26

4.4.7	Volumetrické autostereoskopické displeje	26
4.4.8	Holografie	28
5	Aplikace 3D displejů v praxi	30
5.1	Zábavní průmysl	30
5.2	Lékařství	30
5.3	Energetický průmysl	31
5.4	Navrhování produktů	31
5.5	Letecká doprava	32
5.6	Výzkum	33
5.7	Logistika	33
5.8	Marketing	34
5.9	Problematika 3D technologií zobrazení	34
6	Zhodnocení výsledků	36
6.1	Srovnání technologií 3D zobrazování	36
7	Závěr	43
8	Seznam použitých zdrojů	45
9	Seznam obrázků	49
10	Seznam tabulek	50
11	Seznam příloh	51

1 ÚVOD

Zkratka 3D je v dnešní době často skloňovaným pojmem, který pro mnoho lidí představuje módní trend a pro jiné technologii budoucnosti. Samotná zkratka 3D je odvozena z anglického výrazu three-dimensional, neboli trojdimenzionální či trojrozměrný. Takto je označováno mnoho dnešních technologií, které nějakým způsobem pracují s trojrozměrným prostorem, např. 3D tisk, počítačová 3D grafika, 3D film, 3D televize atd. Tato práce se zabývá několika technologiemi, které se používají pro vytváření a zobrazování prostorového vjemu jednomu či více pozorovatelům.

Vývoj 3D zobrazovačů započal již v druhé polovině 19. století s příchodem fotografie. Historicky prvním zobrazovačem se stal stereoskop, což jsou brýle speciálně vytvořené pro sledování stereofotografií, fotek vytvořených pomocí fotoaparátu se dvěma stejnými objektivy, který snímá dva obrazy současně. Během následujících let, s dále se zlepšující technikou, vzniká roku 1915 první 3D film za použití technologie anaglyfu. V průběhu II. Světové války bylo 3D používáno jako propaganda i jako špionážní nástroj, který pomáhal zachraňovat životy. Ve druhé polovině 20. století zájem o 3D technologie postupně téměř vymizel, až do roku 2009, kdy byl v kinech uveden 3D film Avatar od Jamese Camerona, který znova rozpoutal u lidí zájem o 3D technologie.

Význam 3D technologií však nespočívá jen v zábavní a spotřební elektronice, čím dál více se také uplatňuje v průmyslu jako nástroj, který usnadňuje vývoj nových produktů, pomáhá s komunikací se zákazníky nebo omezuje chybovost. Svoji užitečnost nalezne také v lékařství, kde dokáže pomoci s diagnózou, ve školství, kde může posloužit k vizualizaci molekulových vazeb, v letecké dopravě, kterou může zrychlit a zbezpečnit, nebo ve spoustě dalších odvětvích.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je vypracování uceleného přehledu používaných nebo vyvíjených metod 3D zobrazování, včetně popsání základních principů vzniku prostorového vjemu a funkce jednotlivých technologií, které umožňují tvorbu 3D obrazu. Dalším cílem je vytvoření studie o současném použití technologií 3D zobrazování v praxi a případných problémech, které nastávají při běžném používání. Posledním bodem je pak srovnání jednotlivých technologií 3D zobrazování z hlediska jejich výhod a nevýhod.

3 METODIKA PRÁCE

Značnou částí práce bude teoretická část vypracovaná formou literární rešerše, která bude obsahovat vysvětlení základních funkcí a principů lidského vnímání prostoru a přehled nejdůležitějších technologií 3D zobrazování, včetně vědeckého popisu každé z nich. Tato část práce bude vypracována převážně za použití odborné literatury, doplněné o informace z internetových zdrojů.

V další části práce bude proveden výzkum z hlediska aplikace 3D technologií zobrazování pro různá odvětví v praxi, kde se bude zjišťovat jejich současný nebo potencionální stav použití. Následně bude vypracována analýza zabývající se vznikem problémů při využívání technologií 3D zobrazování, mezi které hlavně patří přeslechy (crosstalk) a konflikt akomodace avergence.

Poslední část práce představuje popsání výhod a nevýhod použití vybraných technologií 3D zobrazování zmíněných v teoretické části a vytvoření jejich srovnání.

4 SOUČASNÝ STAV SLEDOVANÉ PROBLEMATIKY

Monitory, televize, projektory a jiné druhy displejů jsou nezbytnou součástí správného chodu moderního světa, které slouží jako výstupní periferie elektronických zařízení. Existuje mnoho typů displejů a všechny se liší vlastnostmi, parametry a metodami zobrazování, ale mnoho jich má společnou vlastnost a to, že nedokážou pozorovateli poskytnout informaci o prostoru. U převážné většiny je pro displeje nepotřebné přenášet a následně informaci o prostoru zobrazovat, ale v některých případech to může být přínosem.

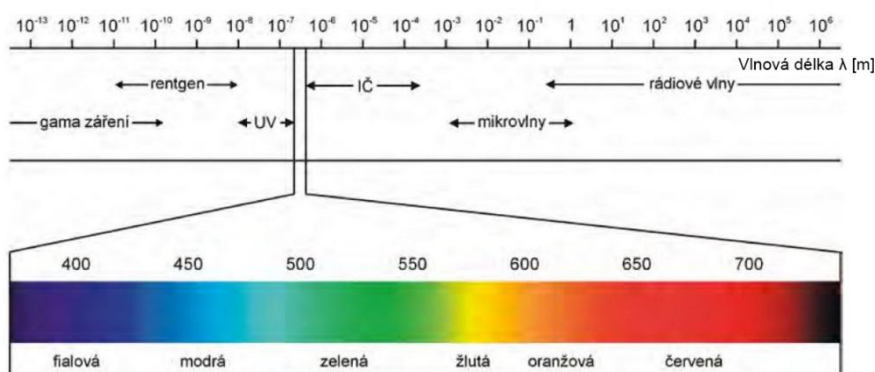
Pro lepší pochopení fungování 3D displejů je nejdříve potřeba vysvětlení základních principů šíření světla a lidského vnímání prostoru.

4.1 Světlo

Světlo je prostředek, který přináší do našeho oka informace okolního prostředí. Je to příčné elektromagnetické záření s duální povahou, které se chová v některých situacích jako vlna a v některých jako proud částic. Dá se popsat dvěma na sebe kolnými vektory intenzity elektrického pole \vec{E} a intenzity magnetického pole \vec{B} . Oba dva kmitají v rovině kolmé na směr šíření. Ve vakuu je rychlost šíření světla rovna $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v jiném prostředí se jeho rychlost zmenšuje. Jeho spektrum (Obr. 1) sahá přibližně k vlnovým délkám λ od 10^{-13} do 10^6 m. Lidské oko je citlivé na vlnové délky v rozmezích 370 až 730 nm [1, 2].

Při dopadu světelného paprsku, vyzářeného ze světelného zdroje, na povrch objektu, dochází buďto k jeho odrazu, pohlcení nebo kombinaci obou jevů zároveň. Poměr odraženého a pohlceného paprsku závisí na vlnové délce a indikuje, v jaké barvě předmět uvidíme. Odražené paprsky putující do našeho oka způsobují, že jsme schopni vidět a rozpoznat svět kolem nás [1].

Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření [1]

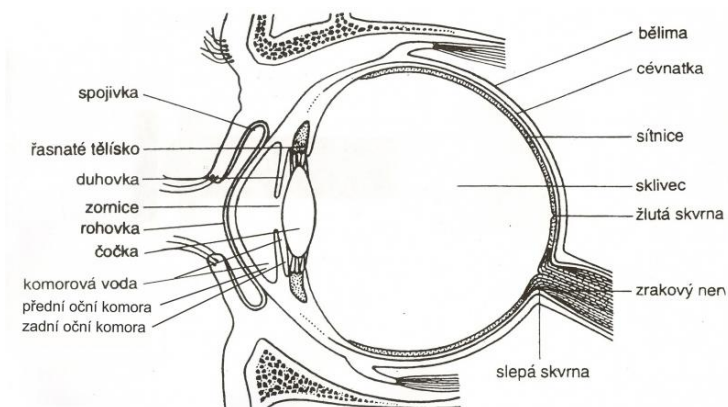


4.2 Princip zrakového vnímání prostoru

Zrak je jedním z pěti hlavních smyslů člověka. Jeho smyslovým orgánem je oko, které slouží k zachycení dopadajícího světla a jeho soustředění na sítnici, jinak známou jako retina. Při průchodu musí světlo projít nejdříve rohovkou, která spolu s čočkou soustřeďuje světelné paprsky na sítnici tak, aby výsledný vjem byl ostrý. Mezi rohovkou a čočkou je zornice, která reguluje množství dopadajícího světla na sítnici. Ta obsahuje dva typy fotoreceptorů, tyčinky a čípky, které jsou citlivé na jiné světelné intenzity (čípky na vyšší a tyčinky na nižší hodnoty), jsou na sítnici rozmístěny různě a plní jinou funkci. Při dopadu světla na sítnici je světlo absorbováno a přeměněno na nervový vzruch, který je přes zrakový nerv veden do mozku, kde je zrakový podnět zpracováván [1, 3]. Celková stavba oka je vyobrazena na Obr. 2.

Vzniklý sítnicový obraz je stranově a výškově převrácený, je ve většině případů zmenšený, kvůli zakřivení sítnice deformovaný a vždy jen dvourozměrný. Každý sítnicový obraz je tedy mnohoznačný a může být interpretován mozkiem pokaždé jinak. Při určování prostoru musí mozek správně sestavit obraz buďto ze zkušenosti, interakce nebo z nápovědí o prostoru. Ty můžeme rozdělit na monokulární, které vyžadují jenom jedno oko, nebo binokulární, které vyžadují oči obě. Dále se mohou nápovědi dělit podle toho, jestli pochází ze sítnicového obrazu nebo jsou fyziologického druhu. Pro 3D technologie jsou nejvíce stěžejní tyto nápovědi o prostoru: paralaxa pohybu, binokulární disparita, akomodace avergence [1].

Obr. 2 Stavba oka [4]



4.2.1 Paralaxa pohybu

Paralaxa pohybu patří mezi nápovědi monokulární dynamické, což znamená, že během pohybu objektu nebo pozorovatele se přirozeně mění pozice sledovaného objektu v sítnicovém obraze. Jelikož je mezi velikostí úhlového posunu a vzdáleností objektu lineární vztah, budou se nám jevit blíže objekty, které se posunuly o větší vzdálenost za daný časový

úsek. Paralaxa pohybu se dá dobře simulovat na ploše a je dlouhodobě využívána u animovaných filmů nebo v počítačové grafice k vytvoření dojmu prostoru [1].

4.2.2 Binokulární disparita

Nejdůležitější nápověda o prostoru vzniká, jsou-li při sledování objektu použity obě oči. Vzdálenost očí, tzv. binokulární vzdálenost, se pohybuje u dospělého člověka v rozmezí 6 až 7 cm. Při sledování se objekt zájmu promítá na obě sítnice do žlutých skvrn, což jsou místa s největší koncentrací fotoreceptorů, kde je nejostřejší vidění. Ostatní objekty v zorném poli se promítají do jiných míst na sítnici. U každého oka se stejný objekt promítá pod jiným úhlem. Rozdíl úhlů obrazu na sítnici pro stejný objekt se nazývá binokulární disparita. Mozek vyhodnocuje a zpracovává rozdíly úhlů jako prostorový vjem neboli stereopsi [1, 5].

4.2.3 Akomodace

Na začátku kapitoly 4.2 bylo zmíněno, že čočka spolu s rohovkou slouží k soustředování světelných paprsků na sítnici. Důležité je to, aby sledovaný objekt byl promítnut na sítnici zaostřený neboli aby se souběh paprsků sledovaného objektu křížil v místě sítnice. Při sledování objektů v jiných vzdálenostech je proto v oku potřeba nefixní prvek, který dokáže měnit svoji lomivost a tím měnit souběh paprsků (akomodovat). K tomuto účelu slouží v oku čočka.

Akomodovat se dá buďto posunem čočky blíže či dále od sítnice anebo jejím zakřivením. První možnost je využívána u kamer a fotoaparátů a druhá u některých živočichů, z nichž jedním je i člověk. U lidského oka je čočka přichycena vazivovými vlákny závěsného aparátu ke svalu řasnatého tělíska. V klidu jsou vlákna napnutá a tím jak je čočka zploštělá zaostřuje na objekty ve větších vzdálenostech. Při sledování bližších objektů je potřeba zvětšení zakřivení čočky. To vzniká při kontrakci řasnatého tělíska, které sníží napětí ve vláknech. Míra napětí ve svaly řasnatého tělíska je mozem brána jako nápověda o vzdálenosti sledovaného objektu, jedná se tak o fyziologickou nápovědu o prostoru [1].

4.2.4 Vergence

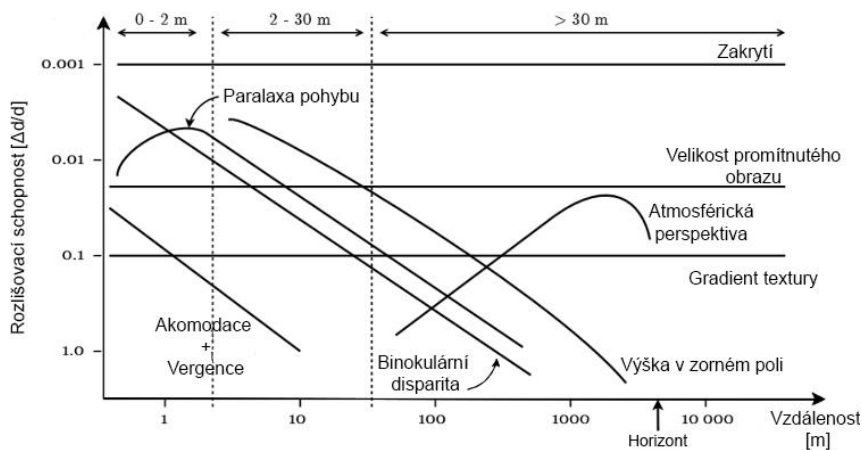
Aby byl sledovaný objekt ostrý, musí se od něj odražené paprsky prostřednictvím akomodace sbíhat do místa na sítnici s nejostřejším viděním, do tzv. žluté skvrny. Když objekt sledujeme oběma očima, osy pohledů obou očí se sbíhají tak, aby obraz sledovaného objektu byl na sítnicích v každém oku umístěn ve žlutých skvrnách. Tento jev se nazývá vergence. Úhel os, které oči svírají, se ze vzdáleností objektu zmenšuje a naopak zvětšuje,

čím je objekt blíže. Napětí v okolních svalech je mozkiem interpretováno jako fyziologická náповěda o vzdálenosti v prostoru [1].

4.2.5 Využití náповědí pro 3D zobrazovací technologie

Náповědí o prostoru je celá řada, např. velikost promítnutého prostoru, zakrytí, lineární perspektiva, gradient textury, atmosférická perspektiva, atd. V současné době jich bylo popsáno okolo 30, každá z nich poskytuje svůj vlastní odhad o prostoru a mozek vytváří z jejich kombinací výsledný prostorový vjem. V závislosti na vzdálenosti sledovaného objektu jsou náповědy různě informativní. Na Obr. 3 je graf, kde osa x je vzdálenost [m] a osa y vyjadřuje rozlišovací schopnost $[\Delta d/d]$. Všeobecně u displejů uvažujeme se vzdáleností sahající od několika centimetrů až do desítek metrů (např. u televizorů se doporučuje vzdálenost sahající od 0,61 do 3,66 m v závislosti na rozlišení a úhlopříčce displeje). Z grafu vyplývá, že v těchto vzdálenostech se na vytváření prostorového vjemu nejvíce podílí náповědy zakrytí, binokulární disparita, paralaxa pohybu, akomodace avergence. Jelikož nejvýznamněji k prostorovému vjemu přispívá binokulární disparita, je využíván její princip při vytváření iluze prostoru na ploše [1].

Obr. 3 Graf závislosti rozlišovací schopnosti na vzdálenost podle Cutting, Vishton (1995)



Zdroj: <http://blog.manfredas.com/3d-display-simulation-using-head-tracking-with-microsoft-kinect/>

Hlavní myšlenkou, kterou 3D technologie zobrazování používají, je promítnutí pozorovateli dvou pozičně posunutých obrazů, jeden pro každé oko. Tím je dosaženo, že dva vzniklé sítnicové obrazy budou vlastnit disparitu a výsledný zobrazovaný vjem se bude podobat vjemu prostorovému. Technologií, jak tohoto jevu dosáhnout, je spousta. Liší se ve způsobu promítání vzájemně posunutých obrazů, v použití dalších pomůcek, v počtu možných pozorovatelů nebo v možnostech využití. Displeje 3D můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou stereoskopické displeje, vyžadující ke správnému

fungování speciální brýle, druhou skupinou jsou autostereoskopické displeje, které žádné brýle nevyžadují. Ty se dále rozdělují na více pohledové (přeloženo z anglického multiview), volumetrické a holografické [1, 6].

4.3 Stereoskopické displeje

U stereoskopických displejů je nutné, aby pozorovatel nosil speciální brýle, které umožňují každému oku vidět jiný obraz. Brýle se podle druhu použité technologie odlišují, ale jejich záměna je u některých typů možná. Zásadní rozlišností těchto systémů je způsob zobrazování dvou obrazů a s tím související následné odfiltrování jednoho z nich tak, aby oko přijímalo jen jeden. Pro rozdělení dvou obrazů bylo použito hned několik způsobů založených na principu vlnového, polarizačního, prostorového nebo časového multiplexování [5, 6]. V následujících oddílech je uveden přehled těch nejvýznamnějších technologií využívajících principu stereoskopie.

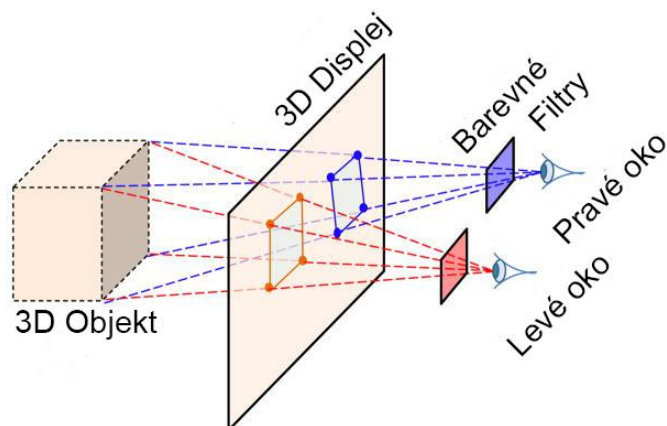
4.3.1 Anaglyf

Anaglyf patří k nejstarším technologiím, které využívají stereoskopii. Počátek anaglyfu se datuje ke konci 19. století, ale i přes své stáří má dnes mnoho příznivců. Základní myšlenkou je barevné oddělení (vlnové multiplexování) dvou obrazů pro levé a pravé oko. Ty se zobrazují přes sebe současně a pozorovatel je následně musí pomocí brýlí s barevnými filtry separovat (Obr. 4). Způsob, jakým jsou obrazy barevně odděleny, musí odpovídat zvoleným barevným filtrům na brýlích. Při použití např. červeného filtru pro levé oko a azurového pro pravé, musí být z levého obrazu odstraněny střední a krátké vlnové délky. Červený filtr propouští jenom červenou a při nasazení brýlí bude levý obraz bez problému vnímán levým okem. Následně musí být u druhého obrazu odstraněny dlouhé vlnové délky odpovídající červené, a jelikož azurová je doplňková barva k červené, bude propouštět jen takto upravený obraz [1, 6, 7].

Anaglyf je velice jednoduchá technologie, která nevyžaduje žádné speciální nároky na displeje. Pro zobrazení 3D obrazu bohatě vystačí jakákoliv televize, displej monitoru, projektor nebo dokonce papír. Jediné co je potřeba, je správná barevná korekce dvou obrazů, v dnešní době za použití specializovaného softwaru, a 3D brýle se správnými barevnými filtry. Problém, který znemožňuje širší použití této technologie, spočívá v barevném podání výsledného prostorového vjemu, obzvláště pro červenou barvu. Nejvýhodnější a tedy

nejpoužívanější je barevná kombinace červená-azurová, která má nejlepší barevné podání, přijatelné přeslechy a nejlepší jasovou propustnost [6, 7].

Obr. 4 Princip anaglyfu [6]



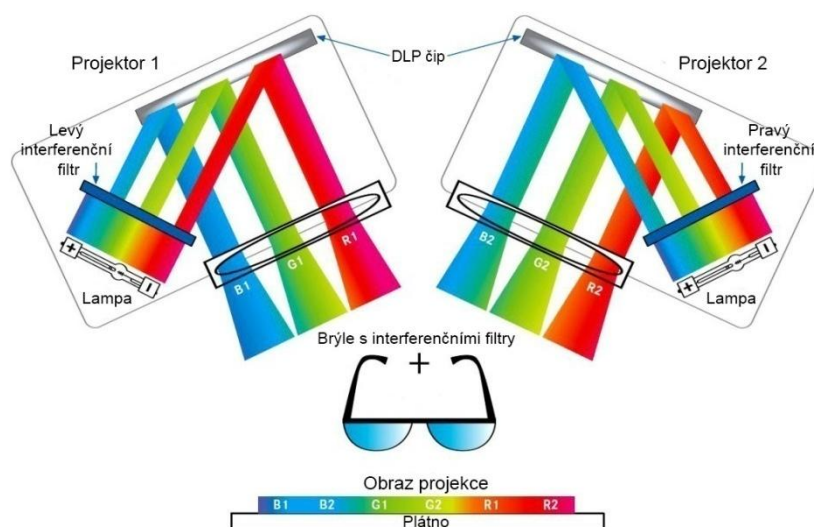
4.3.2 ColorCode 3-D

ColorCode 3D je novější technologie, založená na principu anaglyfu, která je schopna poskytnout plně barevný obraz. Rozdíl spočívá v tom, že jedno oko přijímá informaci o barevném spektru a druhé plně monochromatický obraz, který obsahuje informaci o hloubce. Brýle využívají jantarově žlutý filtr pro levé a modrý filtr pro pravé oko. Jsou navrženy tak, aby jantarový filtr propustil jakékoliv vlnové délky nad 500 nm a modrý filtr propouštěl vlnové délky v oblasti 450 nm. To způsobí, že levé oko vidí většinu viditelného spektra a pravé jen jednobarevný obraz. Mozek tyto dva obrazy spojí do jednoho barevného prostorového vjemu [8].

4.3.3 Infitec

Další technologií s obdobným principem založeným na vlnovém multiplexování je infitec. Obrazy pro levé a pravé oko jsou složeny ze dvou trojic vlnových délek, zobrazených na Obr. 5. Každá z nich se pohybuje okolo barev RGB tak, aby dva obrazy neměly stejné vlnové délky. Pro zobrazení jsou potřeba dva projektoři obsahující dva světelné zdroje, které emitují světlo skrze interferenční filtry. Ty propouštějí světlo jen ve vybraných vlnových pásmech tak, aby vznikly dvě trojice vlnových délek. Upravené světelné paprsky se od displejů, které obsahují informaci o levém a pravém obraze, odráží na plátno. Při sledování obrazu na plátně 3D brýlemi, které mají stejné interferenční filtry korespondující s levým a pravým projektořem, je pozorovatel schopen vnímat plný 3D obraz [5].

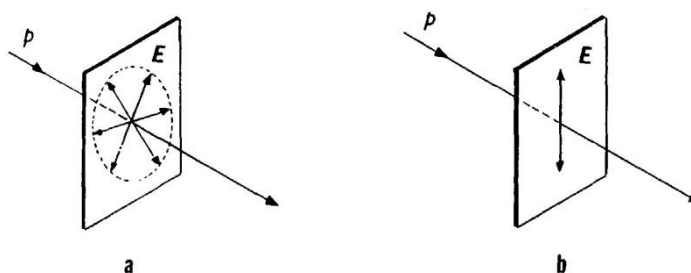
Obr. 5 Projektor 3D technologie infitec [9]



4.3.4 3D displeje využívající lineární polarizaci (pasivní technologie)

V kapitole 4.1 bylo poznamenáno, že světlo je příčné elektromagnetické záření popsané vektorem elektrické intenzity \vec{E} a na něho kolmým vektorem magnetické indukce \vec{B} , které tvoří rovinu vždy kolmou na směr šíření. Když směr a velikost kmitání vektoru \vec{E} je v dané rovině náhodný, mluvíme tak o světle nepolarizovaném (Obr. 6a), které se normálně vyskytuje v přírodě. Lineárně polarizované světlo (Obr. 6b) získáme tehdy, usměrníme-li směr kmitání do jedné přímky. Naše oči nejsou schopné rozeznávat rozdíl mezi nepolarizovaným a polarizovaným světlem, ale jsme schopni vytvořit polarizační filtry, které propouští polarizované vlnění jen o určité orientaci [2]. Tato vlastnost světla se dá využít k rozdělení dvou obrazů do levého a pravého oka. Displeje 3D, které aplikují polarizační filtry na brýlích, se také označují jako pasivní.

Obr. 6 Světlo (a) nepolarizované a (b) lineárně polarizované



Zdroj: <http://kvinta-html.wz.cz/fyzika/>

Na Obr. 7 je zobrazena realizace 3D displeje, využívající principu založeném na lineární polarizaci. Dva obrazy se zde zobrazují současně na LCD displeji, kde liché řádky jsou určeny pro zobrazování pravého obrazu a sudé řádky pro zobrazování levého obrazu. Jedná se

o prostorové multiplexování. Výsledkem je, že výsledné dva obrazy budou mít o polovinu snížené řádkové rozlišení. Sloupcové rozlišení je neovlivněno. LCD musí vyzařovat diagonálně polarizované světlo o úhlu 45° , které dál pokračuje přes vzorkovanou fázovou retardační destičku připojenou na displej. Ta musí být zarovnaná s řádky tak, aby překrývala jen ty řádky, které korespondují s jedním obrazem. Její funkce spočívá v otáčení polarizace o 90° a tím je docíleno, že dva obrazy budou mít vzájemně zkrříženou polarizaci [5].

Obr. 7 Stereoskopický 3D displej využívající lineární polarizaci [5]



Fázové retardační destičky jsou složeny z optických anizotropních materiálů, takže rychlost šíření elektromagnetické intenzity \vec{E} bude v závislosti na směru odlišná. Chování vlny v ose x popisuje rovnice

$$E_x(t, z) = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t + \varphi - k_x z) \quad (1)$$

a pro osu y rovnice

$$E_y(t, z) = E_0 \sin \alpha \cos\left(\omega t + \varphi - k_x z + 2\pi \frac{\Delta n z}{\lambda}\right), \quad (2)$$

kde E_0 představuje velikost amplitudy, ω je úhlovou frekvencí, φ je fáze vlny, z je tloušťka fázové retardační destičky a

$$k_x = 2\pi \frac{n_x}{\lambda} z. \quad (3)$$

Optická anizotropie materiálu je vyjádřena indexem Δn a vyjadřuje rozdíl mezi vertikální anizotropií n_x a horizontální anizotropií n_y . Rovnice (1) se liší s rovnicí (2) o člen,

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta n}{\lambda} z, \quad (4)$$

který se nazývá fázový posun [5].

Při diagonální polarizaci světla o úhlu 45° vzniká záření, které se dá rozložit na dvě na sebe kolmé vlny, každá se stejnou velikostí a kmitající na ploše souběžné s osou x a osou y . K rotaci polarizace o 90° je nutné vlnu kmitající na ose y fázově posunout o $\delta = \pi$. Z tohoto důvodu se používané destičky také označují jako půlvlnné. Doplněním fázového posunu do rovnice (4) se dá zjistit potřebná tloušťka fázové retardační destičky, která je rovna

$$z = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\Delta n}. \quad (5)$$

Brýle potřebné ke sledování jsou vybavené polarizačními filtry, které musí být stejně zkřížené tak, aby se ke každému oku dostal pouze jeden obraz, který s ním koresponduje. Problém však nastává, když pozorovatel nakloní s brýlemi hlavu. Tím se změní orientace filtrů, které začnou propouštět druhý obraz. Tyto jevy se označují jako přeslechy (v angličtině crosstalk) a už při nízkých hodnotách významně ovlivňují kvalitu obrazu a pohodlí sledování. Na displej se také nedá dívat ze širokého zorného pole, protože při větším pozorovacím úhlu se zvětšuje vzdálenost, kterou musí světlo procházet půlvlnnou destičkou, což způsobuje odlišný fázový posun [5, 10].

4.3.5 3D displeje využívající kruhovou polarizaci (pasivní technologie)

Použití lineární polarizace značně limituje pohyb hlavy. Další technologie proto byla vyvinuta, aby tento problém zcela eliminovala. Když zkombinujeme rovnice (1) a (2) vznikne tak výrok

$$\left(\frac{E_x}{E_0 \cos \alpha}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_0 \sin \alpha}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_0^2 \cos \alpha \sin \alpha} \cos \alpha = \sin^2 \delta. \quad (6)$$

Zvolíme-li fázový posun

$$\delta = v \frac{\pi}{2}, \quad v = \pm 1, \pm 3, \dots \quad (7)$$

a víme-li, že při polarizaci 45° je velikost a fáze dvou na sebe kolmých vln na ose x a ose y stejná, dostáváme tak

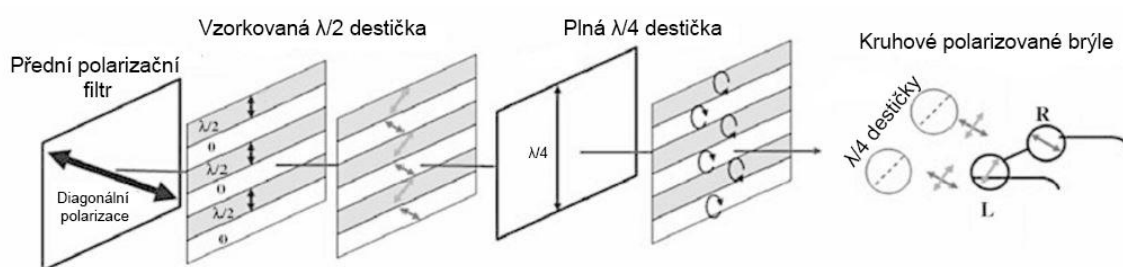
$$E_x(t, z)^2 + E_y(t, z)^2 = (E_0 \cos \alpha)^2, \quad (8)$$

což odpovídá středové rovnici kružnice. Výsledný vektor \vec{E} po fázovém posunu tedy opisuje kruh.

Směr otáčení vektoru \vec{E} je závislý na fázovém posunu. Při zpomalení v rozmezí $0 < \delta < \pi$ je výsledný směr pravotočivý. Naopak levotočivý směr získáme, jestliže zvolíme posun v rozmezí $\pi < \delta < 2\pi$ [5].

Na Obr. 8 je vyobrazeno schéma 3D displeje, který využívá kruhovou polarizaci. Opět, stejně jako v případě lineárně polarizovaného displeje, vyzařuje z LCD displeje diagonálně polarizované světlo. To musí projít nejdříve přes vzorkovanou půlvlnnou retardační destičku, která rotuje lineárně polarizované světlo o 90° . Navíc se ale přidává ještě čtvrtvlnná destička, která zabírá místo přes všechny řádky. Výsledkem je, že polarizovaný obraz, který prošel jen čtvrtvlnnou destičkou, bude mít fázové zpoždění $\pi/2$ a ten, který prošel přes obě dvě destičky, bude fázově posunutý o $3\frac{\pi}{2}$. To odpovídá podmínce $0 < \delta < \pi$ pro pravotočivou polarizaci a podmínce $\pi < \delta < 2\pi$ pro levotočivou polarizaci [5].

Obr. 8 Schéma 3D displeje využívající kruhovou polarizaci [5]



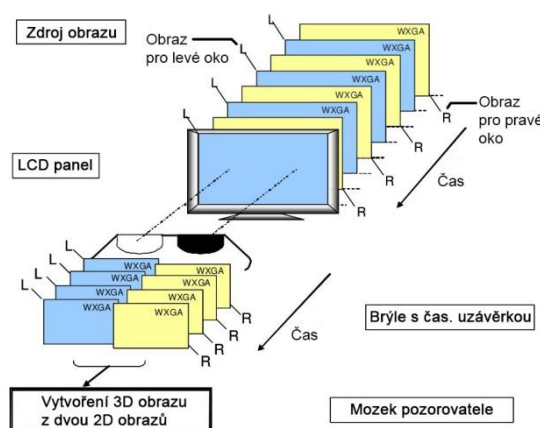
Aby byl obraz správně pozorován, musí být brýle také upraveny před polarizačními filtry o čtvrtvlnnou destičku pro každé oko. Kruhově polarizované vlny se fázově zpozdí o dalších $\pi/2$, takže výsledné zpoždění pro první obraz je $\pi/2 + \pi/2 = \pi$ a pro druhý obraz $3\frac{\pi}{2} + \pi/2 = 2\pi$. Výsledkem jsou dva obrazy zkřížené polarizované jako v případě lineárně polarizovaného displeje, které dále pokračují přes stejně zkřížené polarizační filtry k jednotlivým okům. Použitím kruhové polarizace jsou zcela eliminovány přeslechy vzniklé posunem hlavy a je i zajištěn širší pozorovací úhel, protože se tu změna fázového posunu v závislosti na úhlu pozorování nevyskytuje [5].

4.3.6 3D displej s časově prokládanými obrazy a brýlemi s časovou uzávěrkou (aktivní technologie)

Lidské oko je schopné slučovat podněty, jestliže jsou jejich obrazy promítnuté na sítnici v intervalu 50 ms. Tato vlastnost oka je známá pod názvem setrvačnost vidění a je na ní postaven základ televizního vysílání. Dá se také použít pro technologii 3D zobrazení, kde levý a pravý obraz bude v čase střídavě promítán nebo zobrazován na displeji, který musí být sledován spolu s brýlemi opatřenými časovou uzávěrkou. Ta synchronně problikává tak, aby pravé oko bylo zakryto, když je zobrazen obraz pro levé oko a naopak. Kvůli tomu, že brýle vyžadují elektroniku a podílí se na tvorbě prostorového vjemu, označuje se tato technologie jako aktivní [6, 11].

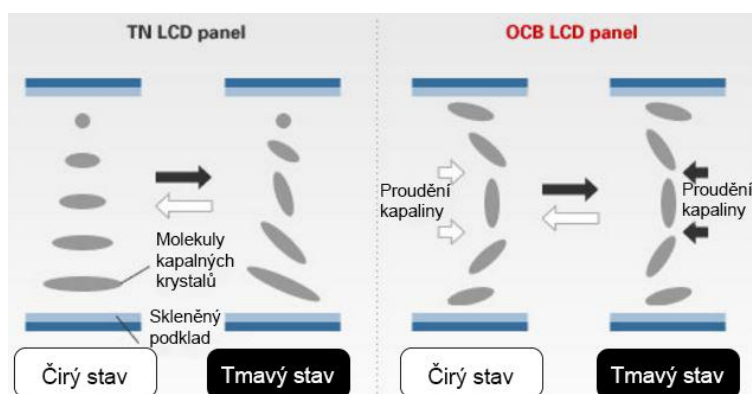
Schéma 3D displeje na principu časově prokládaných obrázků a brýlí s časovou uzávěrkou je zobrazeno na Obr. 9. Pro získání správného a kvalitního 3D obrazu musí zobrazovací médium, které chceme použít, splňovat několik zásad. V první řadě jsou tu vysoké nároky na obnovovací frekvenci displeje. Pro sledování 2D obrazu se řadu let používá standardizovaná obnovovací frekvence 50 Hz (60 Hz pro Severní Ameriku), tedy jsme za jednu sekundu schopni zobrazit 50 pulsů. Potřebujeme-li zobrazit dva obrazy, logicky musíme vyžadovat minimální obnovovací frekvenci 100 Hz (120 Hz pro Severní Ameriku).

Obr. 9 Princip časově prokládaných obrazů a brýlí s časovou uzávěrkou pro 3D zobrazování [5]



Dalším důležitým faktorem je stavba brýlí a jejich synchronizace s obrazem displeje. Ty musí obsahovat závěrku, přijímač IR nebo rádiových vln (nejčastěji Bluetooth) pro příjem synchronizace, mikrokontrolér (MCU, microcontroller unit), řídicí obvody pro ovládání závěrky a baterii, která celé brýle napájí. Samotná závěrka je tvořena z vrstvy TN (twisted nematic) nebo OCB (optically compensated bend) tekutých krystalů, které jsou v normálním stavu transparentní a ztmavnou až po přivedení napětí. Mezi hlavní odlišnost uvedených tekutých krystalů patří jejich doba odezvy. U TN vrstvy se doba odezvy pohybuje okolo 5 až 10 ms a používá se u snímkové frekvence 100 Hz, zatímco u OCB vrstvy je možné dosáhnout odezvy 2,3 ms a dá se využít snímková frekvence 200 Hz (240 Hz pro Severní Ameriku). Krátká doba odezvy u OCB byla docílena úspornější orientací tekutých krystalů než u TN vrstvy. Schéma uspořádání tekutých krystalů pro TN a OCB vrstvu je zobrazeno na Obr. 10 [12, 13].

Obr. 10 Rozdílné uspořádání TN (vlevo) a OCB (vpravo) panelů tekutých krystalů



Zdroj: <https://www.engadget.com/2009/01/06/toshiba-matsushita-display-teases-handheld-high-res-no-glasses/>

Posledním faktorem je vliv přeslechů a jejich eliminace. Když se obrazy pro levé a pravé oko zobrazují střídavě bez prodlevy, může přes časovou uzávěrku kvůli nepřesné

synchronizaci, dojít k únikům malého množství světla do nesprávného oka. To způsobuje přeslechy, které podstatně zhoršují kvalitu obrazu.

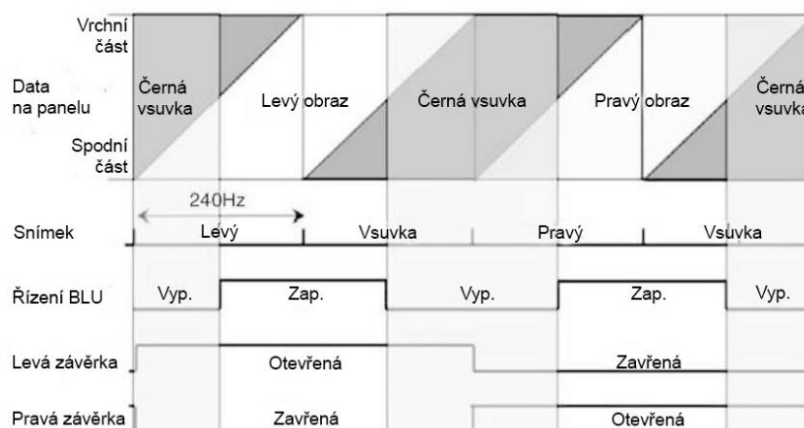
Prvním řešením onoho problému je zavedení tzv. blikajícího podsvícení. To odděluje jednotlivé snímky jasovým poklesem a tím zmenšuje podíl světla, které projde do nesprávného oka. Technika blikajícího podsvícení redukuje přeslechy až do 0,1 %, což je akorát před prahem povšimnutí. Ovšem použitím tohoto řešení velmi limitujeme jas displeje. Při použití 3D zobrazení by tak displej, který má jas 400 cd/m^2 při 2D zobrazení, měl snížený jas na 120 cd/m^2 . To je dáno nejen blikajícím podsvícením, ale také problikáváním uzávěrky [5].

Podobně se ke snížení přeslechů dají využít černé snímky vsunuté mezi levý a pravý obraz. Je důležité si uvědomit, že obraz vzniká adresováním jednotlivých řádků, v tomto případě od spodního až po vrchní. To samé platí i pro černé vsuvky, které potřebují více jak jeden snímek, aby byly znatelné. Během vytváření parametrů černých vsuvek, nastavení délky zčernání časové uzávěrky a blikání podsvícení, musí také být brán v potaz fakt, že jas po konci zobrazování obrazu ihned nezmizí, ale má určitou dobu doznívání. Problikávání zajišťuje jednotka blikajícího podsvícení BLU (blinking backlight unit).

Na Obr. 11 je zobrazeno první možné řešení, kde byl experimentálně zjištěn nejvyšší jas. Jednotka BLU je zapnuta na dobu 4,1 ms a je tedy identická s délkou jednoho pulsníku, který odpovídá frekvenci 240 Hz. Ta se periodicky zapíná ve frekvenci 120 Hz (pro Evropu by výsledný systém využíval frekvenci 200 Hz a 100 Hz). Časové závěrky brýlí jsou synchronizovány tak, aby byly otevřené během trvání celého snímku, tedy 8,2 ms, a prošlo přes ně co nejvíce světla, i za cenu mírně zvýšených přeslechů.

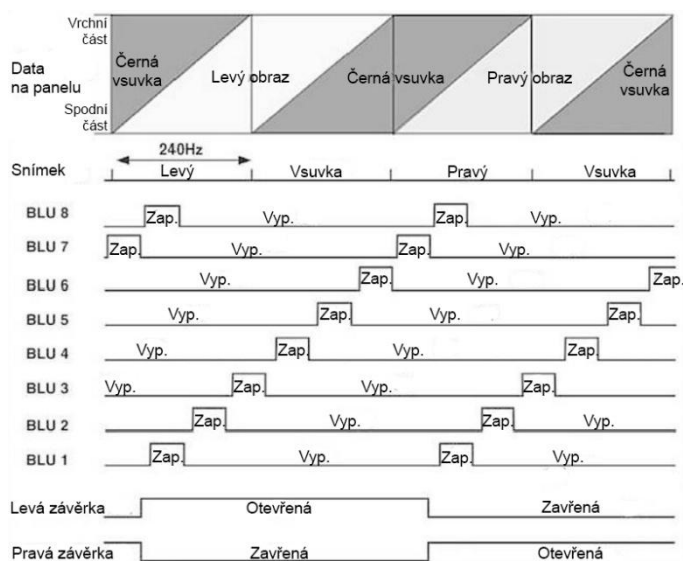
Výsledný jas lze dále zvýšit případnou modifikací minulého systému. Na Obr. 12 je znázorněno schéma využívající snímacího podsvícení, kde jednu centrální BLU jednotku nahradíme několika dalšími s kratším intervalem. Ty jsou rozmístěny tak, že každá spravuje jenom část displeje a spouští se ve shodnou dobu jako adresování řádků, které mají na starost.

Obr. 11 Schéma zobrazování obrazu s černými vsuvkami a synchronizací závěrek a BLU jednotky [5]



Minulé případy využívaly displeje s délkou černých vsuvek a pulsů problikávajících obrazů s délkou 4,1 ms, odpovídající frekvenci 240 Hz. Z tohoto důvodu je vhodné použít displeje schopné rychlé obnovovací frekvence. Nejlepším řešením se ukázaly být OCB a OLED displeje [5, 13].

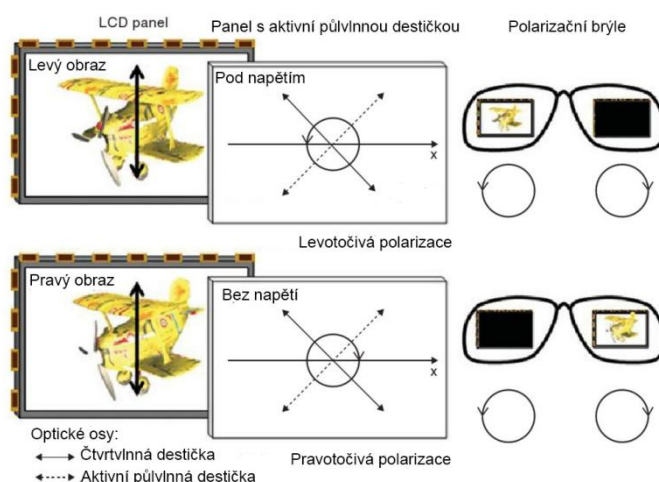
Obr. 12 Schéma zobrazování obrazu s černými vsuvkami při použití snímací podsvícení [5]



4.3.7 3D displej s časově prokládanými obrazy a přepínatelným polarizátorem (pasivní technologie)

Kombinací technologie s časově prokládanými obrazy a lineární nebo kruhovou polarizací vznikla technologie, která je v některých případech označovaná také jako aktivně-pasivní technologie. Na Obr. 13 je zobrazen princip 3D displeje s časově prokládanými obrazy a přepínatelným polarizátorem.

Obr. 13 Princip 3D displeje s přepínatelným polarizátorem a polarizačními brýlemi [14]



Obrázky pro levé a pravé oko jsou, jako v předešlém případě, zobrazovány střídavě na displeji, před kterým je čtvrtvlnná fázová destička a aktivní půlvlnná fázová destička. Ta nemění fázový posun δ , když je na ní přivedeno napětí a naopak při nulovém napětí, fázově posouvá světlo o $\delta = \pi$. Světlo vycházející z displeje je vertikálně polarizované a proto musí být čtvrtvlnná fázová destička natočena o 45° , aby ve výsledku bylo procházející světlo vůči ní diagonálně natočeno. Po průchodu destičkou je světlo levotočivě polarizováno a pokračuje skrze aktivní půlvlnnou destičku, která je při levém obraze pod napětím, takže pokračuje beze změny. Během pravého obrazu je odstraněno napětí, levotočivě polarizované světlo je fázově zpožděno o $\delta = \pi$ a tím přeměněno na pravotočivě polarizované [14].

Tato technologie nelimituje řádkové rozlišení, na rozdíl od předešlých technologií, které využívaly polarizaci. Ke správné funkci používá stejné brýle jako u kruhové polarizace. Existuje i obdobná verze, kde namísto kruhové polarizace je využívána polarizace lineární a má jen jednu aktivní fázovou destičku.

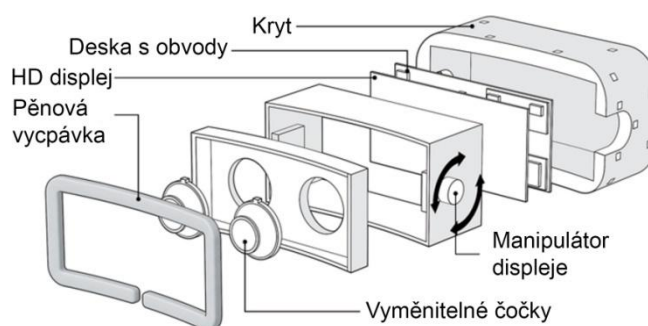
4.3.8 HMD zobrazovací jednotky

Head-mounted displays neboli displeje upevněné na hlavě (dále jen HMD) jsou 3D displeje typické ve formě brýlí nebo headsetů, které promítají levý a pravý obraz na jednom nebo dvou separovaných displejích blízko očí a tím docilují vytvoření prostorového vjemu. Co HMD odlišuje od ostatních displejů, je možnost použití různých druhů senzorů ke snímání pohybů a polohy hlavy. Tím umožňuje relativně upravovat zobrazovaný 3D obraz podle pohybů pozorovatele. Podle zdroje, zpracování a způsobu zobrazení obrazu, se HMD dělí na virtuální realitu (VR, virtual reality) a rozšířenou realitu (AR, augmented reality).

Charakteristickým rysem VR systému je plné zakrytí zorného pole pozorovatele, takže jedině co může vidět je světlo emitované buďto LCD nebo OLED displejem, který zobrazuje

dva obrazy posílané přes kabely nejčastěji z počítače. Jelikož lidské oko není schopné akomodace na blízké vzdálenosti, ve kterých se displej nachází, jsou mezi oky a displejem uloženy dvě čočky speciálně navržené na typ displeje. Ty mají za úkol zaostřit a zformovat obraz, který je kvůli čočkám na displeji zobrazován zdeformovaný. U některých typů VR HMD jsou čočky vyměnitelné za jiné, s vlastnostmi kompenzující oční vady pozorovatele. Na Obr. 14 je zjednodušené schéma VR HMD zobrazovací jednotky Oculus Rift, u které je přidán mechanický manipulátor displeje. Pomocí VR je možné sledovat 2D a 3D obraz, nebo za užití senzorů snímající pohyb hlavy umožnit rozhlížet se ve virtuálním prostředí (VE, virtual environment) [6, 15, 16].

Obr. 14 Schéma VR HMD zobrazovací jednotky Oculus Rift

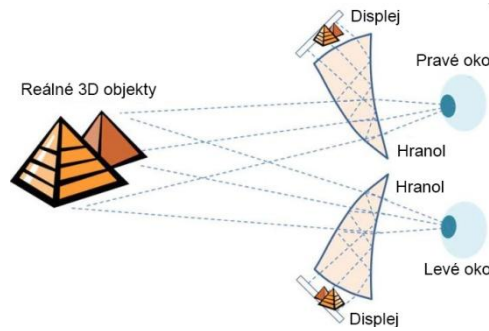


Zdroj: <http://blog.meddigital.com/virtual-reality-what-is-it-how-does-it-work-why-should-you-care/>

Současně s velkým pokrokem v mobilních telefonech přišla i další možná realizace 3D HMD, která se nazývá mobile VR. Principem je shodná s předešlým systémem, ale s tím rozdílem, že místo displeje je umístěn mobilní telefon, který aplikace vytváří a zobrazuje dva upravené obrazy, na každé půlce displeje jeden. Pro detekci rotace hlavy využívá senzory nainstalované v telefonu. Jediné co je potřeba, jsou brýle s držákem telefonu a čočkami na mobilní telefon, schopný zobrazovat dva upravené obrazy pro 3D.

Na Obr. 15 je možné vidět schéma AR HMD zobrazovací jednotky pro stereoskopickou projekci. Na rozdíl od VR, které blokovalo okolní svět a vytvářelo úplný obraz pro pozorovatele, u AR je možné přes brýle vidět reálný svět, ke kterému je doplněna projekce z AR HMD. Princip spočívá v promítání levého a pravého obrazu z mikrod displeje na polopropustná zrcadla nebo klínové hranoly, které jsou umístěné před oběma očima. Ty odraží světelné paprsky vyzářené z displeje, a zároveň nebrání paprskům odražených z reálné scény se do oka dostat. Často jsou AR systémy opatřeny snímací kamerou, která získává informace o prostředí pro synchronizaci polohy zobrazovaného obrazu a reálné scény [6].

Obr. 15 Stereoskopický AR HMD [6]



4.3.9 Sledování pohybu hlavy u HMD

Pro HMD je sledování pohybu hlavy klíčovým prvkem, který jí odlišuje od ostatních technologií a dovoluje pozorovateli plně se ponořit do VR nebo AR. Pozice a orientace hlavy je reprezentována podle relativních orientací a vzdáleností od tří os centrovaných uprostřed hlavy. Hlava se může pohybovat do šesti směrů, mluvíme tedy o sledování šesti stupňů volnosti (6 DoF, Degrees of freedom). Rotace hlavy se zjišťuje pomocí kombinace inerciálních senzorů, mezi které patří akcelerometr měřící lineární zrychlení, gyroskop měřící úhlové zrychlení a magnetometr měřící místní magnetické pole. Pro určení pozice hlavy se využívá senzorů optických a podle způsobu použití rozlišujeme technologie inside-out (zevnitř-ven), outside-in (zvenku-dovnitř) a lighthouse (majákové) sledování [17].

Inside-out sledování, jak již z názvu vyplývá, funguje na principu snímání prostředí prostřednictvím kamer připevněných na HMD. Pokud není již známý, nebo se nachází v neznámém prostředí, tak se pomocí algoritmu vytváří geometrický model prostředí, sestavený z nasnímaných snímků. Kamerami je snímán relativní posun v prostředí, který je vyhodnocován k úpravě obrazu podle pohybu pozorovatele. Použití inside-out technologie vyžaduje sofistikované algoritmy, má vysoké nároky na výpočetní výkon a nemá vysokou spolehlivost, ale nevyžaduje dalších zařízení umístěných v prostředí a je tedy vhodné pro mobilní užití [17].

Na opačném předpokladu pracuje sledovací technologie outside-in, kde kamery jsou stacionární a sledují prostor, ve kterém se HMD pohybuje. Na něm jsou umístěny světelné emitory, nejčastěji IR diody, v předem známé struktuře, takže poloha zařízení bude po zachycení kamerami jednoznačně zjistitelná. To ovšem limituje prostor, ve kterém technologie může být použita, za cenu jednodušší implementace a lepší spolehlivosti [15, 17].

Poslední, hojně využívanou technologií, je lighthouse sledování, které představuje upravené provedení inside-out sledování, avšak pro správný provoz potřebuje několik základů, tzv. majáků, rozmístěných po prostoru. Ty střídavě emitují IR horizontální

a vertikální paprsky, které pročešávají prostor a jsou prokládané IR problíknutím, sloužícím jako synchronizační puls. Vzdálenosti mezi základnami musí být systému známy, jinak nelze přesně určit polohu. Na HMD je optimálně umístěno několik IR senzorů, které čekají na synchronizační puls, který problíkává ve frekvenci 60 Hz. Když se tak stane, spustí se časovač a měří se čas, kdy IR senzory zachytí záblesky z horizontálního nebo vertikálního paprsku. Z časů se zjistí úhlová rychlost pročešávání jednotlivých paprsků emitujících základen. Pozice HMD se pak vypočítá z úhlové rychlosti paprsků a známých poloh základen [17].

4.4 Autostereoskopické displeje

Oproti stereoskopickým, nevyžadují autostereoskopické displeje od pozorovatele při sledování nošení speciálních brýlí, ovšem za cenu jiných limitací. Podle způsobu tvorby prostorového vjemu rozlišujeme autostereoskopické displeje na vícehledové, volumetrické a holografické. U vícehledových displejů je cílem vytvořit konečný počet obrazů scény, které jsou potom zobrazovány v horizontálním sledu do prostoru, kde tvoří tzv. pozorovací zóny. Každá zóna nese informaci pro jedno oko a je distribuována tak, aby jen jedna byla viděna jen jedním okem. Naopak holografické displeje se snaží zaznamenávat veškeré světelné vlny odražené od objektu, které později rekonstruuje, aby mohly být pozorovatelem vidět. Volumetrické displeje se liší v tom, že vytvářejí obraz rovnou do prostoru pomocí tzv. voxelů (trojrozměrných pixelů) [6].

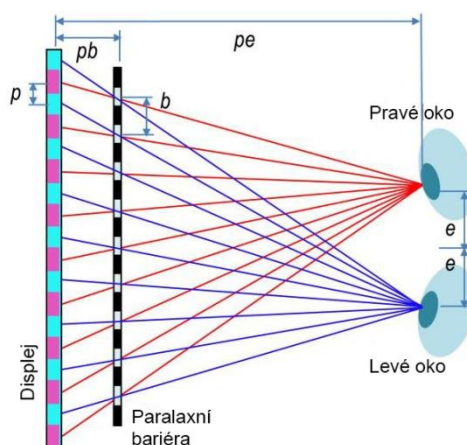
Oproti stereoskopickým jsou autostereoskopické displeje schopny přenášet i informaci o paralaxě pohybu. To znamená, že při pohybu pozorovatele se bude náležitě měnit zobrazovaný obraz, avšak za cenu vysokých nároků a vzniku jiných problémů. U předešlých displejů byl obraz při pohybu vždy stejný [5].

4.4.1 3D displej s paralaxní bariérou

Paralaxní bariéry spadají do třídy vícehledových autostereoskopických 3D displejů fungujících na bázi absorpce (occlusion based). Na Obr. 16 je vyobrazeno schéma, kde na displeji jsou zobrazovány dva obrazy rozdělené ve sloupcích, střídavě pro pravé a levé oko. Je tedy sníženo řádkové rozlišení. Před displejem ve vzdálenosti pb je vertikální mřížkovaná clona, zvaná paralaxní bariéra, která absorbuje světlo vycházející z jednotlivých částí displeje tak, aby bylo viditelné jen z konkrétní pozorovací zóny. Z té je viditelný jen jeden obraz, protože bariéra blokuje sloupce, kde je zobrazovaný druhý obraz. Takto vytvořených pozorovacích zón vznikne několik a nesou informaci o dvou nebo i více pohledech (paralaxa

pohybu), za cenu sníženého rozlišení. K zajištění barevného obrazu, musí být barevné sub-pixely RGB uspořádány podle řádků jednoho zobrazovaného obrazu [5, 6].

Obr. 16 Displej 3D s paralaxní bariérou [6]



Stěžejní parametry pro vytvoření paralaxní bariéry jsou její vzdálenost od displeje pb a rozteč mřížek b . Jejich výpočet je dán vztahem

$$pb = \frac{(p * pe)}{(e + p)} [m] \quad (9)$$

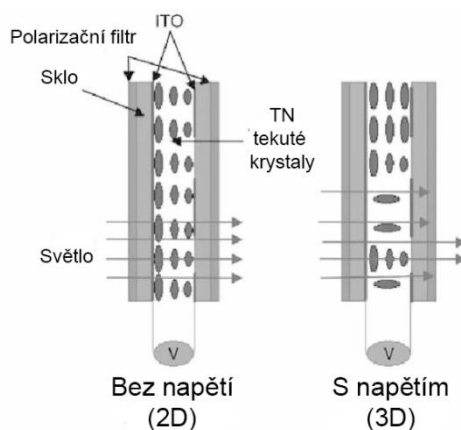
a

$$b = \frac{2 * p(pe - pb)}{pe} [m], \quad (10)$$

kde p představuje rozteč pixelů [m], pe je sledovací vzdálenost [m] a e je polovina binokulární vzdálenosti [m]. Ostatní parametry jsou již předurčeny hardwarem nebo zadané [6].

Paralaxní bariéra se vyskytuje ve dvou variantách. První variantou jsou fixní bariéry, kde před displejem je umístěna vertikální mřížková clona. Jde o velice jednoduchou a nenákladnou technologii, která ale znemožňuje použít mód 2D zobrazení. Druhou variantou jsou přepínatelné bariéry (Obr. 17). Ty jsou složeny z vrstvy TN tekutých krystalů, vrstvy vodivého materiálu (ITO, indium tin oxide) a polarizátoru, podobně jako u fixní bariéry. Když není pod napětím, polarizované světlo vyzařované displejem je otočeno o 90° a může projít stejně orientovaným polarizačním filtrem. Žádné světlo se bariérou neabsorbovalo, displej se chová normálně a jedná se tak o mód zobrazení 2D. Při 3D zobrazení je aplikováno napětí na část vrstvy tekutých krystalů tak, aby reprezentovali paralaxní bariéru. Při průchodu polarizovaného světla se na místech s napětím polarizace neotočí a světlo je následně absorbováno polarizátorem [5].

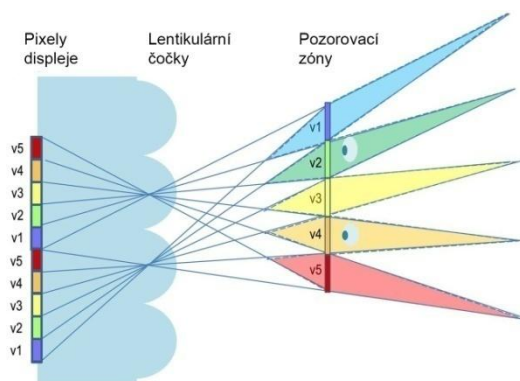
Obr. 17 Přepínatelná bariéra z tekutých krystalů pro 2D a 3D mód [5]



4.4.2 3D displej s lentikulárnými čočkami

Vícepohledová 3D technologie zobrazování patří do třídy fungující na principu lomu světla (refraction based). Na Obr. 18 je znázorněna základní struktura 3D displeje, s použitím válcových planko-konvexních neboli lentikulárních čoček. Ten se skládá z displeje, nejčastěji LCD nebo OLED, před kterým jsou v řadě umístěny lentikulární čočky, které jsou vertikálně srovnané s pixely. Čočky mají za úkol lomit světlo pocházející z displeje do pozorovacích zón, které mohou nést informaci o dvou nebo více pohledech a docílit tak paralaxy pohybu. Počtem zobrazovaných pohledů, jako u parallaxních bariér, ubývá celkové řádkové rozlišení. Na již zmíněném Obr. 18 je realizace pěti pohledů a příslušných pozorovacích zón, kde každý pátý sloupec na displeji zobrazuje jeden odlišný obraz [5, 6].

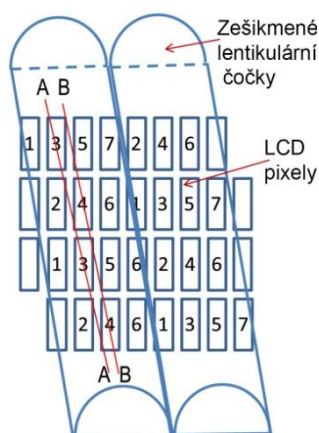
Obr. 18 Displej 3D s lentikulárnými čočkami s pěti pohledy [6]



Předchozí provedení s vertikálními řádky lentikulárních čoček, dosahuje dobré světelné účinnosti, na rozdíl od parallaxních bariér. Velký problém však představuje celkové zhoršení rozlišení, které způsobuje čočkami promítaná černá maska, která obklopuje každý jednotlivý pixel. Velice znatelný je tento jev při pohybu pozorovatele mezi pozorovacími zónami.

Na Obr. 19 je schéma rozložení pixelů se zešikmenými lentikulárními čočkami pro zobrazování sedmi pohledů (čísla na pixelech odpovídají jednomu pohledu). Jelikož se displej nachází v ohniskové vzdálenosti čoček, budou všechny pixely, ležící na linii rovnoběžné se směrem zešikvení čočky, náležet jedné pozorovací zóně. Takže všechny pixely, které jsou protnuté linií A–A, se promítají do stejné pozorovací zóny a stejně je tomu u linie B–B. To má za následek, že pozorovatel během pozorování a přechodu mezi zónami vidí více světla z pixelů a méně černé masky. Výsledkem je zvýšené vnímání rozlišení. Barevné sub-pixely RGB jsou řazeny podle linií, které korespondují s jedním zobrazovaným obrazem [5,6].

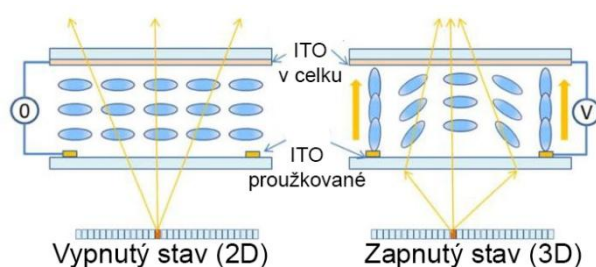
Obr. 19 Uspořádání pixelů zakryté zešikvenými lentikulárními čočkami [6]



4.4.3 3D displej s přepínatelnými lentikulárními čočkami

Zatím byly probrány displeje s lentikulárními čočkami s pevnými optickými vlastnostmi, které se hodí jen pro zobrazování 3D obrazu. Pro přepínání mezi 2D a 3D jsou hojně využívány tekuté krystaly, které mění svoje optické vlastnosti podle orientace. Realizace takové čočky je znázorněna na Obr. 20. Přepínání mezi módy je možné pomocí přivedeného napětí mezi dvě ITO elektrody, kde spodní jsou proužkované a vrchní v celku. To má za následek vytvoření elektrického pole, podle kterého se změní orientace tekutých krystalů do formace, která má stejné optické vlastnosti jako řada lentikulárních čoček. Je tedy v 3D módu zobrazování. Když není žádné napětí přivedeno, vrací se tekuté krystaly do původní formace, zpět do 2D zobrazovacího režimu [6].

Obr. 20 Čočky vytvořené s tekutých krystalů pro 2D (vlevo) a 3D (vpravo) pozorování [6]

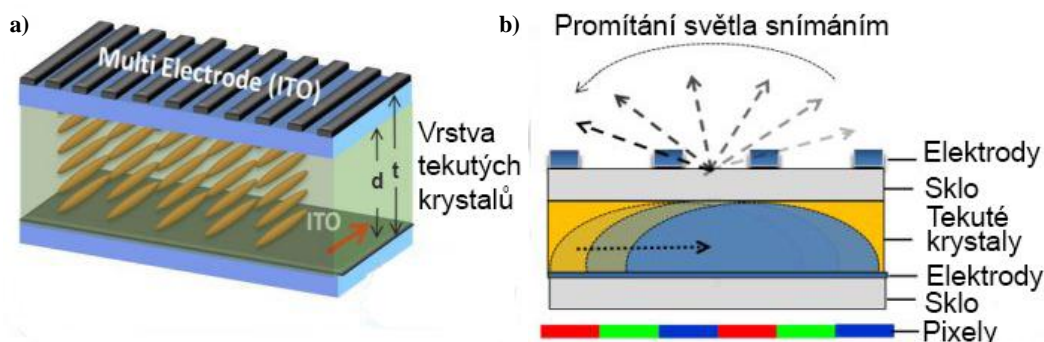


Použití přepínacích čoček sebou přináší mnoho úskalí, především zvýšenou míru přeslechů, způsobenou nepřesným zarovnáním tekutých krystalů v hraničních oblastech elektrod [6]. Přetrvává tu i problém zmenšeného rozlišení, při použití více pohledů. Oba tyto problémy se však můžou eliminovat technologií MeD-LC (Multi-Electrode Driving Liquid Crystal) čoček.

4.4.4 3D displeje s čočkami MeD-LC

Struktura MeD-LC čočky je zobrazena na Obr. 21a. Proužkované elektrody jsou vyměněny za vrchní a je také zvýšen jejich počet. Napětí musí mít opačnou polaritu a na každou sekvenci elektrod je přiváděno rozdílné napětí, které bylo experimentálně zjištěno, produkující elektrické pole a orientaci tekutých krystalů s nejlepšími optickými vlastnostmi. Navíc, když se toto napětí začne posílat na vedlejší elektrody, docílíme toho, že čočkovitý tvar tekutých krystalů se začne posunovat horizontálním směrem. Toho se dá využít pro promítání jednoho pixelu do více pozorovacích zón, tak jak je zobrazeno na Obr. 21b.

Obr. 21 Čočka MeD-LC (a) a princip promítání světla snímáním (b) [18]



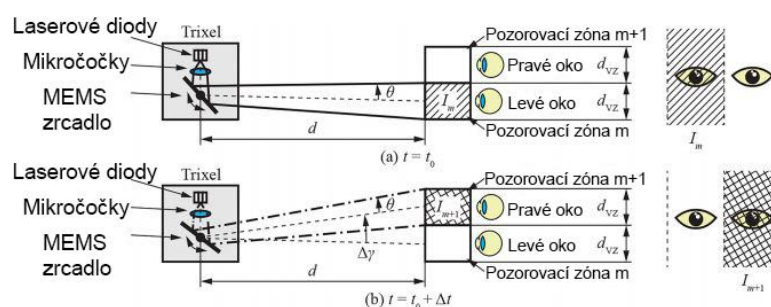
V [18] pojmenovali tento princip jako technologii promítání světla snímáním. Kombinací s OLED displejem s vyšší obnovovací frekvencí, který bude měnit obrazy v jednotlivých sloupcích, je možné sestavit 3D autostereoskopický displej s více pohledy, bez ztráty rozlišení.

4.4.5 3D zobrazovací technologie trixel

Trixel je novější technologií náležící do vícehledových 3D displejů, fungujících na bázi odrazu světla. Je sestavena z řady jednotlivých obrazových bodů zvaných trixel, kde každý sám je schopen emitovat světlo do několika pozorovacích zón. Struktura jednoho trixelu se skládá z integrovaného světelného zdroje se třemi říditelnými laserovými diodami, společnými cylindrickými mikročočkami a otáčejícího MEMS (micro-electro-mechanical systems) zrcadla, které odráží světelné paprsky teoreticky až do několika tisíců pozorovacích zón. Cylindrické mikročočky dokážou kolimovat laserové paprsky jen do jednoho směru a tím jsou pozorovací zóny přesné, jelikož nedochází k zatoulání paprsků, nepřekrývají se, a proto jsou velice vhodné na použití paralaxy pohybu nejen ve vertikálním směru, ale i v horizontálním [19].

Na Obr. 22 je možné vidět základní operační princip založený na časovém multiplexu. Laserové diody prochází přes mikročočky a kolimované dopadají na MEMS zrcadlo. To odráží světlo prvního obrazu do pozorovací zóny m v čase t_0 , kde se nachází levé oko. Po uplynutí doby Δt se MEMS zrcadlo vychýlí o úhel $\Delta\gamma$ tak, aby se ve sledovací vzdálenosti d posunula pozorovací zóna o binokulární vzdálenost d_{vz} . Diody pak začnou emitovat světlo druhého obrazu, které se odráží do pozorovací zóny $m+1$, kde je spatřeno okem pravým. Tento proces se pak nadále opakuje. Divergenční úhel θ , který způsobuje nepřesnosti na zrcadle, představuje velice důležitý parametr, jelikož s jeho vzrůstající velikostí klesá maximální pozorovací vzdálenost.

Obr. 22 Princip zobrazování jednoho Trixelu [19]

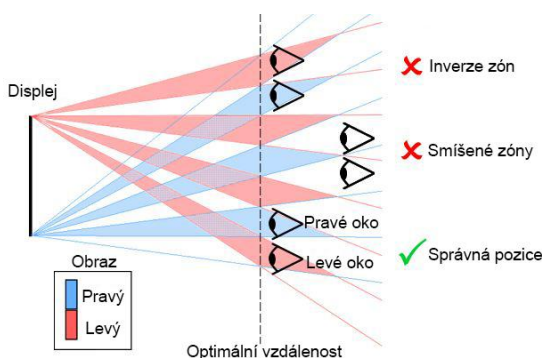


Výška jednoho trixelu je rovna 12 mm a není proto vhodné používat tuto technologii v blízkých vzdálenostech. Ale díky potenciálně vysokému množství pozorovacích zón, výborným jasovým vlastnostem, díky použití laserových diod, a dlouhé pozorovací vzdálenosti, je velice vhodná pro venkovní použití [19].

4.4.6 Sledování autostereoskopických vícehledových displejů

Použití vícehledových displejů značně limituje pohyb hlavy, jelikož musí být vůči displeji orientovaná tak, aby každé oko vidělo jenom tu pozorovací zónu, kterou má vidět. V opačném případě vidí oko špatný obraz a prostorový vjem nenastane. S tím souvisí i sledovací vzdálenost, protože s klesající nebo rostoucí vzdáleností od displeje se začnou jednotlivé pozorovací zóny mísit a vzniká tak vysoká míra přeslechů, které kompletně eliminují prostorový vjem [5, 6]. Všechny zde uvedené případy, které mohou nastat při pozorování, jsou graficky znázorněny na Obr. 23.

Obr. 23 Schéma správné pozice hlavy při sledování



Zdroj: <https://www.3d-forums.com/threads/autostereoscopic-displays.1/>

Někteří výrobci se snaží tyto problémy řešit detektory pohybu a indikátory, které pozorovateli indikují správnou nebo špatnou pozici pro pozorování. Vyspělejší systémy sledují oči pozorovatele, softwarově vyhodnotí, jestli jeho oči pozorují správný obraz, a při neshodě obraz nebo strukturu tekutých krystalů u paralaxních bariér a lentikulárních čoček upravují tak, aby byly pozorovací zóny v souladu.

4.4.7 Volumetrické autostereoskopické displeje

Doposud zmíněné stereoskopické a autostereoskopické displeje používají dva obrazy, jeden pro levé a druhý pro pravé oko, aby navodili 3D prostorový efekt. U volumetrických displejů je 3D obraz přímo promítán v trojrozměrném prostoru. Ten je složen z mnoha voxelů, slovní spojení z anglického volumetric pixel (objemový pixel). Každý z nich se fyzicky nachází v prostoru, kde by podle zobrazovaného obrazu měl být, a odráží nebo emituje světlo z této pozice do všech směrů tak, aby vytvořil reálný obraz pro pozorovatele. Výsledný promítaný obraz sestavený z voxelů sám o sobě poskytuje fyziologické a psychologické nápovědy o prostoru, které jsou silnější a vhodnější pro lidské vnímání než u jiných 3D displejů [6].

Volumetrické displeje se podle způsobu vytvoření voxelů rozdělují na statické (static), kde objem obrazu vzniká statickým stohem displejů naskládaných vedle sebe a swept (pročesávající), které simulují vjem prostoru mechanicky. Nejobvykleji je prostorový jev navozován rotačním nebo translačním pohybem emitujících zdrojů světla, které pročesávají prostor v různých hloubkách. Volumetrické displeje swept jsou velmi objemné, hlučné a jejich použití je limitované. Je tedy velmi nepravděpodobný jakýkoliv jejich rozvoj a širší využití. Mnohem atraktivnější se zdají být statické volumetrické displeje, především technologie založená na konverzi pevného skupenství.

Volumetrický displej představený v [20] je založený na technologii TFTS (two-frequency two-step) konverzi pevného skupenství s využitím dvou DMD (digitálních mikro-zrcadlových displejů) pro adresaci v optickém krystalu.

Základní myšlenka technologie TFTS je vidět na Obr. 24. Fotony, které jsou vyzářené ze dvou infračervených zdrojů o různé vlnové délce, dopadají na opticky aktivní materiál, kterým jsou absorbovány. Když je foton z prvního zdroje s vlnovou délkou λ_0 absorbován částicí aktivního materiálu v základním stavu, je energetická hladina E_0 částice excitována na přechodnou energetickou hladinu E_1 , ve které setrvává po určitou dobu. Následně, je-li vyzářený foton z druhého zdroje s vlnovou délkou λ_1 absorbován totožnou částicí, je energetická hladina E_1 částice excitována na vyšší energetickou hladinu E_2 . Dalším krokem je radiace celkové absorbované energie snížené o vnitřní ztráty, když se částice vrací zpět do základního stavu. Pro správně zvolený opticky aktivní materiál tato radiace generuje viditelný foton, který se jeví pozorovateli jako bod světla uvnitř materiálu. Aby mohl vzniknout soudržný viditelný obraz bez blikání, je potřeba zajistit obnovovací frekvenci od 30 do 100 Hz.

Obr. 24 Princip TFTS procesu [20]



Jako opticky aktivní materiál jsou nejčastěji používány krystaly nebo sklo s přísadami prvků vzácných zemin, známé pod názvem ZBLAN, což je fluorozirkoničité sklo s chemickou formulí $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-AlF_3-NaF$. Existují i systémy, které využívají plynný nebo kapalný materiál, ale kvůli vysokým tlakům a dalším vzniklým problémům se od nich upustilo. Výhodou skla je jeho možnost zformovat ho do libovolných tvarů. Slibným kandidátem, který by mohl ZBLAN nahradit, jsou polymery, u kterých bylo dokázáno, že

jsou také schopny stejné funkce. Dosažení trojbarevného obrazu uvnitř materiálu je možné pomocí rozdílných přísad, ve spojení s několika zobrazovacími zdroji. Významnou limitací pro všechny materiály však představuje výsledný rozměr displeje, který je typicky v řádech několika desítek centimetrů u každé strany.

Obr. 25 Princip adresace a vzniku obrazu [20]



Adresace voxelů v prostoru a následný vznik obrazu je zobrazeno na Obr. 25, kde objem zobrazovaného obrazu je rozdělen na N vertikálních průřezů. Zdrojem IR světla jsou dva DLP (Digital Light Processing) projektory s DMD. Přes optický kabel je do DLP emitováno IR záření, které je přivedeno na DMD přes optiku. Světlo odražené od pixelů v DMD je pak promítáno přes zobrazovací optiku ven. Projektor umístěný pod aktivním materiálem promítá IR světlo do vertikálních průřezů a je nazýván adresovacím zdrojem, jelikož určuje, jaký průřez se bude zobrazovat. Druhý projektor, zvaný obrazový, promítá IR světlo, které obsahuje informaci o obrazu v daném průřezu, do aktivního materiálu, kde je již ozářený průřez od prvního projektoru. Celková rychlost snímání DLP je tedy závislá na počtu vertikálních průřezů a je rovna $R_s = 30 * N$ [20].

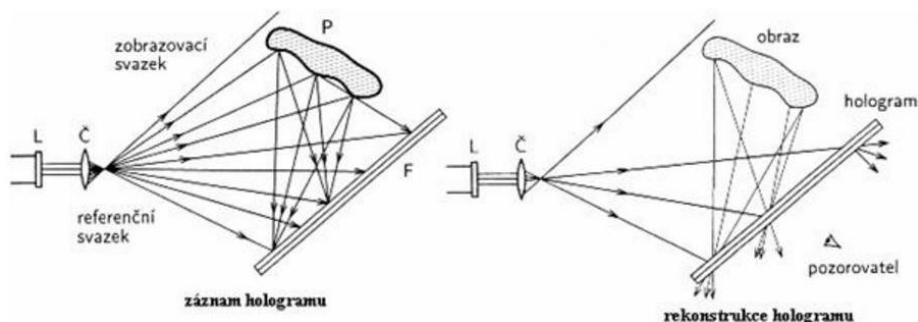
4.4.8 Holografie

Složeno z řeckého slovního spojení slova *holos* - úplný a slova *grafie*, znamenající nákras, záznam. Holografie byla vynalezena roku 1947 maďarsko-britským fyzikem Dennisem Gaborem a umožňuje zaznamenat světelné vlny odražené od objektu, které lze později zpátky rekonstruovat pro pozorovatele bez původního objektu. Unikátností holografie je její vlastnost zaznamenávat a zobrazovat ze záznamu všechny charakteristiky světelných vln, včetně fáze, amplitudy a vlnové délky [6].

Základní myšlenka holografie je založena na interferenci vysoce koherentního světla, které emituje laser L na Obr. 26. Ty se po přechodu přes čočkový objektiv \check{C} (možné jsou i polopropustná zrcadla) rozdělí na dva svazky. Jeden svazek dopadá na zobrazovaný objekt P , od kterého se paprsky odráží na fotografickou desku F . Druhý svazek, který je současně vyzařován pouze na destičku, se nazývá referenční. Na fotografické destičce F tak vzniká

interferenční obrazec způsobený fázovým rozdílem mezi svazkem rozptýleným předmětem a přímo vyzářeným. Rekonstrukci obrazu lze získat osvětlením laserovým zdrojem světla pod stejným úhlem jako při záznamu. Vytvoří se tak světelné pole, které je vnímáno očima jako prostorový obraz objektu P ve stejném směru, kde se předtím nacházel. Vzniklý obraz je samozřejmě jednobarevný, pro barevný je potřeba tří laserů barev RGB a fotografickou destičku citlivou na celé barevné spektrum [21].

Obr. 26 Princip záznamu a rekonstrukce hologramu [22]



S rozvojem výpočetní techniky přišla i schopnost zaznamenávat a rekonstruovat uměle vytvořený holografický obraz pomocí počítačů, prostřednictvím numerických metod. Displeje označované jako CGH (computer generated holograms), jsou v dnešní době realizovatelné, avšak jejich vysoká cena výrazně limituje jakékoliv použití. S postupem času se bude, díky stálému zlevňování hardwaru, celková cena snižovat. Existuje mnoho způsobů, jak sestavit barevný holografický 3D displej, kde nejběžnějším klíčovým komponentem je počítačem adresovatelný PMS (prostorový modulátor světla), který nahrazuje fotografickou destičku. Ten je upravován podle počítače tak, aby vznikl interferenční obrazec zobrazované scény. Po průchodu světla se tedy vytvoří světelné pole, které je jako v předešlém případě, vnímáno pozorovatelem [6, 21].

5 APLIKACE 3D DISPLEJŮ V PRAXI

V úvodu již bylo zmíněno, že 3D displeje se aplikují na místech, kde je potřeba nebo výhodné zobrazování prostoru. Důsledků aplikace 3D technologií v některých průmyslových odvětvích může být hned několik: záchrana lidských životů, zrychlení operací, zvýšení efektivity, šetření času nebo peněz. V následující části bude zmíněno několik odvětví, kde se 3D displeje již využívají nebo se mohou v budoucnu objevit.

5.1 Zábavní průmysl

Velmi podstatná část aplikace 3D displejů je nepřekvapivě vyhrazena zábavnímu průmyslu. Spadají sem vesměs všechny zmíněné typy technologií, lišící se v parametrech podle místa použití, počtu pozorovatelů, požadavků na celkovou kvalitu a co možná nejnižší cenu, aby si je mohlo dovolit co nejvíce lidí. I když poptávka po domácích 3D televizích, na základě technologií prokládaných snímků, lineární a kruhové polarizace, úplně opadla až do bodu, kdy přední výrobci v čele se Sony, LG a Samsung přerušili výrobu, je tu stále vysoký zájem v ostatních odvětvích.

Populárními se stávají VR HMD a mobilní VR brýle, s uvedením do prodeje HTC Vive [23] a Oculus Rift [15] roku 2016. Původně byly zaměřené pro herní průmysl, ale jejich použití se s přibývajícím zájmem rozšířilo do dalších odvětví i mimo zábavní průmysl. Nachází se zde i možnost použití např. pro vzdělávání, kde některá muzea a univerzity začínají poskytovat tzv. virtuální prohlídky známých měst nebo rekonstruovaných památek, ze kterých je dnes jen zřícenina.

5.2 Lékařství

Již řadu let se v lékařství pracuje s 3D daty k dosažení správných a přesných diagnóz nebo k asistenci při operacích. Magnetická rezonance, CT, výpočetní tomografie a 3D ultrazvuk, snímají příčné řezy specifické části těla, které posléze skládají dohromady k vytvoření 3D obrazu. Ve většině nemocnic jsou tyto obrazy zobrazovány na konvenčních 2D displejích a cíleného 3D efektu se docílí jejich interakcí, např. rotací. U některých případů však pouhá interakce přináší neprůkazné informace a u orgánů nebo částí těla jako je mozek, páteř, klouby nebo vaskulární systém, jsou přesné informace zásadní. Proto se při diagnostice [24, 25] a operacích [25, 26] stále více začíná používat 3D zobrazování. Nejčastěji jsou aplikovány 3D displeje s technologií kruhové polarizace, která poskytuje nejvyšší komfort při

dlouhých operacích, výjimečně se vyskytují i displeje holografické nebo s přepínatelnými lentikulárními čočkami.

Displeje s 3D zobrazením také našly své uplatnění jako nezaměnitelný nástroj při minimálně invazivní chirurgii [27]. Při ní se do těla pacienta tělními otvory nebo malým řezem vsune stereoskopický laparoskop, který je schopen snímat dva obrazy. Tím je zajištěno vidění orgánů. Speciální chirurgické nástroje jsou tak vkládány dalšími otvory a jsou schopné chirurgických zákroků na pacientovi bez nutnosti otevřené operace. Tím se snižují nemocniční náklady, pacientovo trauma i ztráta jeho krve. Namísto konvenčních laparoskopů a 2D displejů, používají specializované VR HMD [26] nebo displeje s kruhovou polarizací [25], které umožňují chirurgovi mnohem snadnější rozpoznávání detailů a tím lépe porozumět řešenému problému, čímž se zvyšují šance na úspěšný zákrok.

Značný vliv na obor lékařství mají také AR HMD, které představují výborný nástroj, díky kterému budou schopni doktoři v budoucnu pozorovat orgány pacienta s chirurgickými nástroji uvnitř jeho těla [28]. V dnešní době však převažuje v tomto oboru použití VR HMD. Mimo jiné se dá např. aplikovat pro diagnostiku Alzheimerovy choroby [29], expoziční terapie pro léčbu posttraumatické stresové poruchy [30] nebo pro tvorbu lékařských simulací [31].

5.3 Energetický průmysl

Velký užitek 3D displeje nalézají v plynárenství a ropném průmyslu, kde nalézání a vrtání vrtů představuje značně nákladnou investici. K posuzování vhodného naleziště se využívají naměřená seizmická data, ze kterých geofyzikové vytvářejí 3D modely vrtů k analýze. Aplikací 3D displejů je možné zmenšit chybovost při rozhodování a tím i případné ztráty, jelikož poskytují lepší informace o přístupnosti, umístění a rozměrech nalezišť, než běžné metody zobrazování. V energetickém průmyslu se nejběžněji setkáváme s aktivními stereoskopickými projektory [32] nebo mimořádně s holografickými displeji [24]. Velice atraktivní se zdá být použití volumetrických displejů v budoucnu, jelikož by měly ideálně zobrazovat seizmické modely do prostoru, kde by byly snadněji interpretovány.

5.4 Navrhování produktů

Stále více firem prosazuje CAD (Computer Aided Design) nebo CAM (Computer Aided Manufacturing) systémy pro návrh designu a výrobu výsledných produktů. Pro konstruktéra je potom snazší, aby výsledný produkt vypadal dobře, fungoval podle zadání a na jeho výrobu bylo vynaloženo co nejméně prostředků. Aplikace 3D technologií zobrazování v oboru

počítačového návrhářství sebou přináší několik dalších výhod, zejména zvýšení produktivity a snížení výskytu chyb, díky zlepšenému vnímání a vyšší realitě 3D modelu. Možné je taky používat 3D zobrazení finálního produktu jako formu zpětné vazby mezi designéry, výrobcí, potencionálními zákazníky a investory, bez nutnosti produkt sestavit, a tím lze ušetřit čas a peníze.

I když se mohou aplikovat veškeré 3D displeje pro zobrazování počítačem vytvořených modelů, největšího užítku docílíme u technologií, které umožňují více pozorovatelům prohlédnout si model z různých úhlů. Proto nejslibnějšími displeji se zdají být holografické, volumetrické nebo HMD, namísto stereoskopické technologie, kde se promítá vždy jen jeden pohled všem pozorovatelům. Navíc u HMD je možné, aby se pozorovatel dostal dovnitř virtuálně vytvořeného modelu, a tím si vytvořil lepší představu o rozměru a umístění jednotlivých součástí, nebo aby mohl model prozkoumat i zevnitř.

5.5 Letecká doprava

Podstatné uplatnění v letecké dopravě mají stereoskopické displeje využívané v pilotních simulátorech. Kombinací aktivního 3D projektoru se systémem kolimovaných zrcadel [32], které zakrývají pilotům zorné pole okolo kabiny, je možné poskytnout výrazně lepší výcvikové prostředí pro piloty velkých dopravních letadel, než u normálních simulátorů. Výsledkem je vyšší připravenost pilotů na nestandardní situace a snížení nákladů, díky snížení cvičných letů nebo případně zničené technice.

Další případné využití 3D displejů je možné u letištní nebo hraniční kontroly zavazadel. Některá letiště již využívají autostereoskopické displeje s paralaxní bariérou pro bezpečnostní kontroly. Pro plné využití kapacity rentgenů jsou hlavním kandidátem do budoucna volumetrické displeje. Poskytnutím více pohledů nasnímaných zavazadel by se výrazně zvýšila efektivita, díky zmenšení počtu nejasností při kontrole.

Poslední možná aplikace v letecké dopravě je použití holografických nebo volumetrických displejů k řízení letového provozu [24]. Dočasné systémy zobrazují pozici a výšku letadel jako ikonky na 2D displeji. S vizualizací na 3D displeji bude pro operátory rozhodování rychlejší a jednodušší, jelikož budou moci pozorovat skutečnou polohu všech letadel v prostoru okolí letiště. Dosáhnout by se tak mělo lepší navigace letadel na vzletové a přistávací ploše a tím i zlepšení celkové bezpečnosti.

5.6 Výzkum

Pro některé výzkumné obory jsou 3D displeje nezaměnitelným nástrojem, který pomáhá s vizualizací složitějších struktur 3D modelů. Jsou využívány pro zkoumání digitálních modelů terénu (DMT) v geologii, kde správné porozumění povrchu země je zásadní. Mimo jiné zlepšují předvídání hladin řek, monitorování eroze nebo přípravu na možné přírodní katastrofy, mezi které patří tornáda nebo tsunami. Jelikož je zkoumán jenom povrch modelu, je postačující aplikace stereoskopických technologií anaglyfu nebo pasivní polarizace.

Mezi další obory, kde je možné aplikovat 3D zobrazovací techniky, patří biomedicínský nebo biochemický výzkum, kde pomáhají k prostorovému zobrazení složitějších molekulových struktur, jako jsou proteiny a enzymy nebo k vizualizaci virů a buněk. Pro astronomy může posloužit jako nástroj pro lepší vizualizaci povrchů planet. Mimo jiné mohou být také užitečným nástrojem při simulacích tekutin nebo aerodynamiky.

Technologie 3D zobrazení je vhodné aplikovat pro sledování miniaturních mechanických nebo elektronických součástek. Sloužily by tedy jako výstup stereomikroskopu. Lépe by byly schopny zobrazovat případné mechanické poškození, opotřebení nebo vliv koroze na povrchu zařízení. Velmi výhodné je použití technologie anaglyfu, kvůli nízkým nákladům.

Novou alternativou je kombinace VR HMD a GIS (geografický informační systém) technologie. Hlavní myšlenkou je propojení 3D virtuálního prostoru s databází obsahující prostorová data. S celým tímto systémem je prováděna interakce skrze HMD. Přínosem kombinace je vytvoření efektivního nástroje pro architekty, který by sloužil např. k rozvoji měst.

5.7 Logistika

Značný potenciál pro zefektivnění činností v logistice mají technologie AR HMD [33]. S jejich pomocí by pracovníci ve skladu mohli používat vnitřní navigaci k zásilkám, v reálném čase je rozpoznávat podle čárových kódů a případně by se k nim zobrazovala dokumentace. Posloužit by také mohla jako plánovací nástroj k optimálnějšímu uskladnění budoucích zásilek nebo k rychlejší inventuře. Aplikací AR HMD by se tak docílilo vyšší účinnosti, díky konstantnímu rozpoznávání by se také výrazně zamezilo chybovosti a tím by došlo ke snížení nákladů. Nevýhodou by byly zvýšené provozní náklady způsobené neustálou potřebou nabíjení akumulátorů a možné komplikace při implementaci systému.

5.8 Marketing

Autostereoskopické technologie jsou vhodné k atraktivnějším veřejným, informačním a prezentačním displejům, jelikož nevyžadují brýle a jsou poměrně dostupné. Nejpoužívanější v oboru marketingu jsou displeje se zešíkmenými lentikulárními čočkami [34] využívané při veletrzích, tiskových konferencích, speciálních akcích, ve výstavních síních, obchodních centrech nebo firemních budovách. Dalším potencionálním kandidátem je technologie trixel, která díky svým vlastnostem vyhovuje k aplikaci na billboardy. Hlavní předností použití 3D displejů je upoutání pozornosti potenciálního zákazníka nebo možnost zobrazení produktu z více úhlů při použití stejné plochy.

Možné je taky využít 3D technologie zobrazování k prezentaci virtuálních produktů na zakázku, které jsou kvůli skladování nesestavené, nebo i produktů ve fázi vývoje. Zákazník má tak lepší možnost si produkt prohlédnout a udělat případné modifikace, čímž se výrazně sníží počet reklamací nebo nespokojených zákazníků.

5.9 Problematika 3D technologií zobrazení

Velikost přeslechlů je u 3D displejů velice zásadní činitel, který ovlivňuje celkovou kvalitu obrazu a zhoršení komfortu při sledování. Přeslechy vznikají proniknutím světla levého obrazu do sítnice pravého oka a naopak. Podle množství proniknutého světla je následkem mírné rozostření obrazu až po úplný rozklad prostorového vjemu. Přijatelné hodnoty se pohybují do 1 až 2 % [10], kde se vyskytuje práh povšimnutí. Hodnoty okolo 5 % až 9 % už způsobují u velké části populace nepohodlí při pozorování. Podle typu použité technologie 3D zobrazení, vznikají různé míry přeslechlů, které závisejí:

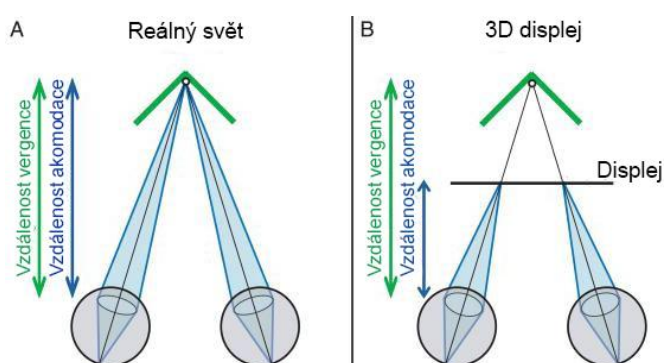
- a) U technologií založených na principu *anaglyfu* na spektrální kvalitě displeje, barevných filtrech a celkovém provedení barevného oddělení obou obrazů.
- b) U technologie *lineární polarizace* na přesnosti položení a tloušťce vzorkované fázové retardační destičky, úhlu sledování (z širších pozorovacích úhlů jsou zvýšené přeslechy), orientaci brýlí vůči displeji a optické kvalitě polarizátorů umístěné v brýlích.
- c) U technologie *kruhové polarizace* na přesnosti zarovnání a tloušťce půlvlnné retardační destičky, tloušťce čtvrtvlnné retardační destičky, úhlu sledování (z širších pozorovacích úhlů jsou zvýšené přeslechy) a optické kvalitě polarizátorů a tloušťce čtvrtvlnných destiček umístěných v brýlích.
- d) U technologie *časově prokládaných obrazů* na provedení a synchronizaci aktivních brýlí, rychlosti orientace kapalných krystalů v závěrkách, realizaci černých vsuvek, četnosti

problíkávaní, obnovovací frekvenci pixelů a jejich pozici na displeji (podle nastavení času závěrek je možné, aby vrchní a spodní část displeje měly vyšší míru přeslechů).

- e) U technologie *časově prokládaných obrazů s přepínatelným polarizátorem* na tloušťce a synchronizaci aktivní půlvlnné destičky, optické kvalitě polarizátorů a tloušťce čtvrtvlnných destiček umístěné v brýlích.
- f) U *autostereoskopických vícehledových displejů* na přesnosti položení a optické kvalitě čoček nebo bariér, jejich vzdálenosti od displeje, která určuje pozorovací vzdálenost, uspořádání RGB sub-pixelů a pozicí hlavy v zobrazovacích zónách (viz. kapitola 4.4.6).

Volumetrické, HMD a holografické displeje jsou díky své konstrukci zcela nepostihnuty tvorbou přeslechů. U volumetrických displejů je obraz vytvářen uvnitř opticky aktivního materiálu a veškeré nápovědy o prostoru jsou vnímány jako za normálních podmínek. U HMD jsou obrazy zobrazovány na dvou rozdílných displejích a přes optiku vedeny na sítnici. Holografické displeje vytvářejí světelné pole, které se podobá skutečnému obrazu.

Obr. 27 Akomodace avergence při sledování (a) reálného objektu a (b) objektu zobrazeného na 3D displeji [35]



Dalším velice závažným problémem je konflikt akomodace avergence, který postihuje, s výjimkou volumetrických displejů, všechny ostatní typy 3D displejů. Jedná se o fyziologické nápovědy o prostoru, které jsou podrobněji popsány v kapitolách 4.2.3 a 4.2.4. Při sledování reálného objektu (Obr. 27a) se oči se na objekt pomocívergence zaměří a skrze akomodaci soustředí jeho paprsky na sítnici. V tomto případě jsou vzdálenostivergence a akomodace totožné. Problém nastává při sledování objektu na 3D displeji (Obr. 27b), kdy se oči zaměřují na vzdálený objekt, ale akomodují na bližší displej. Vzdálenosti již nejsou totožné a náš mozek musí sestavit obraz ze dvou konfliktních nápovědí. Důsledkem může být pro některé jedince zvýšená únava očí po relativně krátké pozorovací době nebo vážnější vedlejší účinky po dlouhodobém pozorování.

6 Zhodnocení výsledků

Následující sekce se zabývá srovnáním technologií 3D zobrazování, které jsou zmíněné v kapitole 4 Současný stav sledované problematiky.

6.1 Srovnání technologií 3D zobrazování

Pro zvýšení přehlednosti jsou jednotlivé 3D technologie rozříděny do pěti skupin, podle společných vlastností nebo způsobu, jakým vytvářejí 3D obraz.

Tab. 1 Výhody a nevýhody 3D technologií na principu barevného oddělení

Technologie	Výhody	Nevýhody
Anaglyf	<ul style="list-style-type: none"> a) Jednoduchá a minimálně nákladná na realizace. b) Poskytuje 3D obraz v plném rozlišení. c) Může být zobrazena na jakémkoliv barevném displeji nebo vytisknuta na papíře. d) Brýle jsou velice levné a jednoduché na distribuci. e) Nevyžaduje speciální hardware. f) Software pro konverzi obrazu je běžně dostupný. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s barevnými filtry. b) Kompletní ztráta barevného podání. c) Zvýšená míra přeslechů, pohybující se okolo 4 až 15 %, je ovlivněna kvalitou a typem barevných filtrů. d) Výsledný obraz se může jevit kvůli poškozenému podání barev nepříjemný. e) Konflikt akomodace avergence.
ColorCode 3D	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plném rozlišení a téměř celém barevném podání. b) Může být zobrazena na jakémkoliv displeji nebo vytisknuta na papíře. c) Levná pořizovací cena brýlí. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s jantarově žlutým a modrým filtrem. b) Vyžaduje již speciální software, který není běžně k dostání. c) Špatné barevné podání barev v rozmezí 450 až 500 nm (světle modrá). d) Výsledný obraz je tmavý. e) Konflikt akomodace avergence. f) Mírně zvýšená míra přeslechů okolo 5 %.
Infitec	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje plné rozlišení 3D obrazu s celkovým barevným podáním. b) Minimální výskyt přeslechů (0,1 - 1 %). c) Velice dobré jasové vlastnosti. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s interferenčními filtry. b) Vysoké pořizovací náklady. c) Pro zobrazení vyžaduje dva projektory s interferenčními filtry a jejich správné seřízení. d) Konflikt akomodace avergence. e) Potřeba seřizovač obrazu, který rozděljuje obrazy do dvou projektorů.

V Tab. 1 je shrnutí výhod a nevýhod 3D technologií, založených na principu barevného oddělení. Podle celkových vlastností je rozhodně nejlepší variantou technologie infitec, s velmi nízkou mírou přeslechů do 1 % a velmi kvalitním obrazem s nízkou ztrátou jasu.

Avšak jeho velkou nevýhodou je neuniverzálnost, jelikož jediná aplikovatelná možnost zobrazení je přes dva projektory s interferenčními filtry, oproti ostatním technologiím, které je možné zobrazovat na jakémkoliv displeji nebo je lze vytisknout. Pořizovací náklady technologie infitec se pohybují okolo 70 000 Kč, jen pro sadu interferenčních filtrů a seřizovač obrazu.

Finančně nejvýhodnější je jednoznačně použití anaglyfu, kde vytvoření barevně oddělených obrazů je možné v podstatě zdarma a brýle lze pořídit okolo 20 Kč, ale za cenu poškozeného barevného podání. V závěsu je technologie ColorCode 3D, která poskytuje dobrý barevný obraz s menším jasem. Ta vyžaduje od výrobce speciální software a brýle, jejichž cena se pohybuje od 20 do 37 Kč za kus.

V Tab. 2 je shrnutí 3D technologií, využívajících principu polarizace, včetně displejů časové uzávěrky, která polarizaci rovněž využívá. Pro pozorovatele jsou nejvýraznější rozdíly mezi aktivními a pasivními brýlemi. Kvůli nutnosti je napájet, synchronizaci, rozměrné velikosti, problíkávání a vyšším pořizovacím a provozním nákladům, jsou systémy s časově prokládanými obrazy odsunuty do pozadí před ostatními, i navzdory lepší míře přeslechů, plynulejšímu obrazu s plným rozlišením při aplikaci technologie s displeji s vysokou obnovovací frekvencí. Oproti tomu levnější lineární polarizace poskytuje obraz s lepším jasem, ale o polovinu sníženém rozlišení a bez možnosti rotace hlavy. U dražší kruhové polarizace je zhoršení jasu vyměněno za možnost pohybu hlavy při sledování.

Ponechávající si výhody lineární a kruhové polarizace, a dosažení vyššího jasu a kontrastu obrazu, umožňuje technologie přepínatelného polarizátoru, ovšem do dnešní doby nebyla nikdy zavedena do výroby. Technologie využívající pasivních polarizačních brýlí jsou z hlediska dnes používaných 3D technologií nejvhodnější pro dlouhé sledování.

Tab. 2 Výhody a nevýhody 3D technologií na principu polarizace světla

Technologie	Výhody	Nevýhody
Lineární polarizace světla	<ul style="list-style-type: none"> a) Levnější realizace než u kruhové polarizace. b) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez blikání. c) Možná projekce na stříbrné plátno, které nemění při odrazu polarizaci (lze použít dva nebo jeden projektor s polarizačním modulátorem). d) Brýle jsou pasivní, lehké a jednodušší na výrobu než u kruhové polarizace. e) Vhodné pro dlouhé pozorování. f) Menší ztráty jasu než u kruhové polarizace. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s polarizačními filtry. b) Míra přeslechů se pohybuje od 1 % nahoru, jelikož je závislá na rotaci hlavy a pozorovacím úhlu. c) U displejů je zmenšené řádkové rozlišení o polovinu. d) O polovinu snížení jasu obrazu způsobené polarizačními filtry. e) Konflikt akomodace avergence.
Kruhová polarizace světla	<ul style="list-style-type: none"> a) Levné pořizovací náklady. b) Brýle jsou pasivní a lehké. c) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez blikání. d) Možná projekce na stříbrné plátno, které nemění při odrazu polarizaci (potřeba dvou projektorů s polarizačními filtry). e) Orientace hlavy neovlivňuje míru přeslechů. f) Míra přeslechů se pohybuje okolo 1 %. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s polarizačními filtry a fázovou retardační destičkou. b) U displejů je zmenšené řádkové rozlišení o polovinu. c) Míra přeslechů závislá na úhlu pozorování. d) Více jak poloviční snížení jasu obrazu způsobené polarizačními filtry a fázovými destičkami. e) Konflikt akomodace avergence.
Časově prokládané obrazy	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení. b) Může dosahovat přeslechů až do 0,1 % za cenu sníženého jasu. c) Při použití černých vsuvek lze u displejů s vysokou obnovovací frekvencí 200 (240) Hz docílit míry přeslechů okolo 0,5 % při relativně dobrém jasu. d) Míra přeslechů není tak závislá na šířce pozorovacího úhlu. e) Rychlé pohyby v obrazu jsou plynulé. f) Pro projekci nevyžaduje speciální stříbrné plátno a vystačí si s jedním vysokofrekvenčním projektorem. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení těžších aktivních brýlí s časovou závěrkou. b) Vyšší pořizovací a provozní náklady z důvodu nabíjení akumulátoru nebo výměny baterek v aktivních brýlích. c) Nutná synchronizace časově prokládaných obrazů a závěrky v brýlích. d) Míra přeslechů je závislá na rotaci hlavy. e) Potřeba displejů s minimální obnovovací frekvencí 100 Hz. f) Možné problikávání obrazu při nízkých frekvencích časové závěrky (hrozí jen při nízkých frekvencích okolo 100 Hz). g) Snížení jasu způsobené problikáváním závěrky dosahující až 70 %. h) Konflikt akomodace avergence.
Přepínatelný polarizátor	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení. b) Brýle jsou pasivní a lehké. c) Vysoký kontrast výsledného obrazu. d) Lepší jasové vlastnosti obrazu. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení brýlí s polarizačními filtry a fázovou retardační destičkou. b) Zvýšená míra přeslechů (okolo 2,5 %). c) Míra přeslechů závislá na úhlu pozorování. d) Zatím nebyla zavedena do výroby. e) Konflikt akomodace avergence.

Tab. 3 Výhody a nevýhody 3D technologií využívající HMD

Technologie	Výhody	Nevýhody
VR HMD	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení po celém zorném poli pozorovatele. b) Umožňuje sledování hlavy v šesti stupních volnosti. c) Kompletně bez přeslechů. d) Vysoké pořizovací náklady. Umožňuje pohyb a interakci přes ovladače ve virtuálním prostředí. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Brýle musí být upevněné na hlavě a jsou poměrně rozsáhlé a těžké (okolo 0,5 kg). b) Poskytuje obraz jen jednomu pozorovateli. c) Vyžaduje kabelové připojení ke zdroji obrazu a energie. d) Při rychlých pohybech nastává znatelná prodleva v aktualizaci obrazu. e) Výrazný konflikt akomodace avergence. Pro detekci pohybu vyžaduje technickou přípravu.
Mobile VR HMD	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení po celém zorném poli pozorovatele. b) Jsou o poznání lehčí a levnější než VR HMD. c) Menší rozměry než VR HMD. d) Kompletně bezdrátové a mobilní. e) Žádné přeslechy. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Umožňuje sledování hlavy jen ve třech stupních volnosti. b) Poskytuje obraz jen jednomu pozorovateli. c) Dosahují menších výkonů a mají nižší parametry než VR HMD. d) Při rychlých pohybech nastává velmi znatelná prodleva v aktualizaci obrazu. e) Výrazný konflikt akomodace avergence.
AR HMD	<ul style="list-style-type: none"> a) Pozorovatel může skrze ně zaostřit a vidět reálný svět. b) Poskytuje 3D obraz v plné barvě, který je schopný reagovat na reálné prostředí. c) Umožňuje sledování hlavy v šesti stupních volnosti. d) Mobilní. e) Žádné přeslechy. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Vyžaduje nošení poměrně rozměrných brýlí. b) Ke správné reakci obrazu na prostředí vyžaduje komplexní algoritmy a vysoce kvalitní snímací senzory. c) Znatelná prodleva mezi pohybem a generováním obrazu. d) Zatím komerčně nedostupné. e) Výrazný konflikt akomodace avergence.

V Tab. 3 jsou uvedeny výhody a nevýhody technologií HMD, které se podle zobrazovaného prostředí rozdělují na VR a AR. Jelikož využívají dva zdroje obrazu, které emitují světlo přes optiku na sítnici v oku, nemůžou přeslechy nastat v žádné situaci. Výrazný problém tu představuje konflikt akomodace avergence, který je u HMD znatelný a po určité době způsobuje únavu očí a závratě. Některá řešení pro eliminaci tohoto problému již jsou vymyšlena [36] a do budoucna se plánuje jejich implementace.

Co odlišuje HMD od ostatních technologií, je možnost měnit zobrazovaný obraz v reakci na pohyb hlavy. U převážné části mobilních VR displejů se využívá senzorů uvnitř telefonu, které dokážou snímat jen rotaci a naklonění hlavy. Displeje AR obvykle využívají technologii inside-out, která umožňuje naprostou mobilitu a znalost prostředí. U VR HMD převládají technologie sledování outside-in (Oculus Rift) a lighthouse (HTC Vive), které využívají

vysílacích stanic a proto se dají použít jen v předem vymezeném prostoru. V přesnosti snímání pohybu je s přehledem lepší technologie lighthouse, která už se dvěma stanicemi je schopná velice dobrých výsledků a se třemi je téměř stoprocentní. U outside-in je potřeba minimálně tři stanic ke sledování pohybu pozorovatele v 360° s přijatelnou přesností. K optimálním výsledkům jsou doporučeny čtyři stanice.

Z finančního hlediska jsou nejvýhodnější mobile VR HMD, kde se cena pohybuje okolo 1 000 Kč za headset s čočkami a 9 000 Kč za podporovaný mobilní telefon. Kvůli svému výkonu jsou určeny spíše pro domácí použití, ale jelikož je zdrojem obrazu mobilní telefon, dá se využít i k jinému použití. U výkonnějších VR HMD se cena pohybuje od 20 000 Kč (Oculus Rift) až do 25 000 Kč (HTC Vive). Displeje pro AR nejsou zatím komerčně dostupné.

V Tab. 4 jsou shrnuty výhody a nevýhody vícehledových technologií zobrazování. Společným rysem těchto technologií je nevyžadující přítomnost brýlí nebo jakýchkoli jiných pomůcek, ale za cenu zmenšení rozlišení podle počtu pozorovacích zón, zvýšené míry přeslechů a limitovanému pohybu hlavy. Jsou však výhodné v místech s mnoha pozorovateli, kteří nemůžou nosit brýle, nebo na mobilních zařízeních. Díky svým vlastnostem jsou schopny i v omezeném množství reprodukovat horizontální paralaxu pohybu.

Pro marketing a prezentování ve vnitřním prostoru jsou využívány displeje se zešíkmenými lentikulárními čočkami, jejichž cena se pohybuje okolo 20 000 až 50 000 Kč. Levnější paralaxní bariéry s horšími jasovými vlastnostmi jsou využívány pro mobilní zařízení, kde cena nepřesahuje 5 000 Kč a je možná kombinace čelních kamer a přepínatelných paralaxních bariér pro dosažení nejlepšího obrazu.

Atraktivní se zdají být technologie MeD-LC pro vnitřní a Trixel pro venkovní zobrazování, které jsou schopny zobrazení několika pozorovacích zón bez ztráty rozlišení. V současné době však mají velice zásadní nevýhody a proto jsou stále ve fázi vývoje.

Tab. 4 Výhody a nevýhody 3D technologií vícehledových

Technologie	Výhody	Nevýhody
Paralaxní bariéra (fixní a přepínatelné)	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez nutnosti nosit brýle. b) Jednoduchá a nenákladná realizace (fixní bariéry, přepínatelné jsou dražší). c) Umožňuje vytvořit horizontální paralaxu pohybu. d) Možnost vypnutí 3D režimu (platí jen pro přepínatelné bariéry) e) Lze nastavovat parametry a pozici u přepínacích bariér. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Snížený jas (polovina jasu je blokována bariérou). b) Limitovaný pohyb hlavy. c) Snížené rozlišení o $1/I$, kde I je počet pohledů. d) Neplynulý přechod mezi pozorovacími zónami. e) S rostoucím počtem pozorovacích zón roste šířka bariéry. f) Rozlišení displeje je kvůli velikosti otvorů mezi bariérami limitováno. g) Konflikt akomodace avergence. h) Minimální míra přeslechů je okolo 2.3 % (okolo 5 % pro přepínatelnou).
Lentikulární čočky (svislé a zešíkmené)	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez nutnosti nosit brýle. b) Lepší jasové vlastnosti než u paralaxní bariéry. c) Umožňuje vytvořit horizontální paralaxu pohybu. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Snížené rozlišení o $1/I$, kde I je počet pohledů. b) Limitovaný pohyb hlavy. c) Neplynulý přechod mezi pozorovacími zónami. d) Zarovnání čoček na displeji je velice obtížné. i) Neplynulý přechod mezi pozorovacími zónami. e) Promítaná černá maska (svislé čočky). f) Konflikt akomodace avergence. g) Minimální míra přeslechů je 5 %.
Lentikulární čočky přepínatelné	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez nutnosti nosit brýle. b) Umožňuje vytvořit horizontální paralaxu pohybu c) Možnost vypnutí 3D režimu. d) Lze nastavovat parametry čoček. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Snížené rozlišení o $1/I$, kde I je počet pohledů. b) Limitovaný pohyb hlavy. c) Neplynulý přechod mezi pozorovacími zónami. d) Zvýšená míra přeslechů. e) Vysoké pořizovací náklady. f) Konflikt akomodace avergence.
MeD-LC	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení bez nutnosti nosit brýle. b) Umožňuje vytvořit horizontální paralaxu pohybu několika pohledů bez ztráty rozlišení. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Limitovaný pohyb hlavy, kvůli zobrazovaným pohledům. b) Neplynulý přechod mezi pozorovacími zónami. c) Ve fázi vývoje. d) Velice vysoká míra přeslechů (24 %). e) Konflikt akomodace avergence.
Technologie Trixel	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje 3D obraz v plné barvě a rozlišení bez nutnosti nosit brýle. b) Dlouhá pozorovací vzdálenost. c) Výborné jasové vlastnosti. d) Umožňuje vytvořit horizontální a vertikální paralaxu pohybu. e) Velké množství pozorovacích zón. f) Skoro plynulé přechody mezi zónami. g) Téměř žádná míra přeslechů. 	<ul style="list-style-type: none"> a) V rané fázi vývoje. b) Velké rozměry pixelu ($0,96 \text{ cm}^3$). c) Není vhodný pro krátké pozorovací vzdálenosti. d) Potenciálně nebezpečné (zdrojem světla je laserový paprsek). e) Obsahuje pohyblivé části. f) Konflikt akomodace avergence.

Tab. 5 Výhody a nevýhody ostatních autostereoskopických technologií

Technologie	Výhody	Nevýhody
Volumetrické displeje	<ul style="list-style-type: none"> a) Vytváří jednobarevný popřípadě barevný 3D obraz v prostoru bez nutnosti nosit brýle. b) Obraz obsahuje veškeré nápovědy o prostoru včetně plynulé horizontální i vertikální paralaxy pohybu. c) Žádný konflikt akomodace avergence. d) Kompletně bez přeslechů. 	<ul style="list-style-type: none"> a) V rané fázi vývoje. b) Malé rozměry displeje. c) Potenciálně nebezpečné (zdrojem světla jsou dva projektory IR záření). d) Potřeba ochrany před IR zářením okolo displeje. e) Vzorkovaná textura výsledného obrazu.
Holografické displeje (CGH)	<ul style="list-style-type: none"> a) Poskytuje plně barevný 3D obraz bez nutnosti nosit brýle. b) Obraz obsahuje veškeré nápovědy o prostoru včetně plynulé horizontální i možné vertikální paralaxy pohybu. c) Žádný konflikt akomodace avergence. d) Kompletně bez přeslechů. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Velmi drahé. b) Stále ve fázi vývoje. c) Veliké rozměry displejů. d) Využívá ke tvorbě obrazu potenciálně nebezpečný laser. e) Vysoké požadavky na velikost pixelu (v ideálním případě je potřeba menší než 1 μm, nejmenší vytvořené dosahují 2-4 μm). f) Vysoce náročné na výpočetní výkon při generaci obrazu (jeden snímek může mít velikost až 90 Mb).

V Tab. 5 je zobrazen výčet výhod a nevýhod poslední skupiny autostereoskopických technologií, mezi které patří volumetrické a holografické displeje. I když jsou z velké části stále ve vývoji, už teď jsou považovány za technologie, které zásadně změní způsob zobrazování informací. Na rozdíl od všech ostatních metod zobrazení jsou založeny na úplně jiném principu a dokážou poskytovat 3D obraz bez přeslechů a konfliktu akomodace avergence. Zobrazují veškeré nápovědy o prostoru včetně horizontální a někdy i vertikální paralaxy pohybu bez výrazných skoků, jako u vícehledových displejů.

Musí však ještě překonat některá úskalí, která tyto displeje oddalují od zavedení do výroby a širšího použití. K reprodukci obrazu používají potenciálně nebezpečné lasery nebo IR záření, u volumetrického displeje není možné dosáhnout větších rozměrů než pár centimetrů, vysoké nároky na výpočetní výkon a veliké rozměry u CGH, jsou jenom některé problémy, které je ještě potřeba vyřešit.

7 ZÁVĚR

Schopnost zobrazit plně trojrozměrný obraz je vlastnost, které se snaží dosáhnout obecně všechny zobrazovací jednotky již od vytvoření první fotografie. Technologie pro 3D zobrazování jsou schopné simulovat podněty, tzv. nápovědy o prostoru, ze kterých je pozorovatel schopen vytvořit věrohodný obraz s informací o hloubce zobrazovaného předmětu. I když v dnešní době je u převážné části displejů nejběžnější zobrazení informací ve formě 2D, aplikace 3D displejů u některých oborů v praxi přináší lepší výsledky a vyšší efektivitu práce. I přes několik svých nedostatků je zcela možné, že v budoucnu mohou technologie pro 3D zobrazení zcela nahradit dnes používané technologie pro zobrazování informací.

První část práce je věnována popsání fyzikálních základů světla a fyziologii lidského vnímání světla a prostoru, včetně popsání prostorových nápovědí, které jsou pro 3D zobrazování nejpodstatnější. Jejich vysvětlení je důležité a vede k lepšímu porozumění celkové problematice tvorby 3D obrazu. Teoretická část dále pokračuje souhrnem technologií displejů určených pro 3D zobrazování, které jsou rozděleny na stereoskopické, vyžadující ke správnému fungování brýle, a autostereoskopické, které brýle nevyžadují. Jelikož je téma 3D zobrazování velice rozsáhlé, velký důraz je kladen na technologie současné nebo ve vývoji, které mají aplikační použití v jiném než zábavním průmyslu.

Podstatná část práce je proto věnována analýze současného stavu použití 3D technologií v různých oborech praxe. Jsou vhodné zvláště tam, kde na přesné orientaci a interpretaci prostoru u nejrůznějších 3D modelů velmi záleží, jako při diagnostice nebo vrtání vrtů. Jsou také výborným nástrojem pro vizualizaci simulací při navrhování nebo výzkumu. Uvedeny jsou v práci i potenciální aplikace novějších technologií, které se mohou s postupem let stát skutečností a např. výrazně zvýšit bezpečnost na letištích, úspěšnost chirurgických zákroků nebo efektivitu činností v logistice. Zobrazování 3D obrazu ovšem sebou přináší i několik problémů, mezi které patří hlavně přeslechy, které zhoršují výslednou kvalitu obrazu, a konflikt akomodace avergence, který může u některých jedinců způsobovat až vážné zdravotní komplikace. Jejich vznik je velmi závislý na typu a kvalitě použité metody 3D zobrazování.

Metod zobrazování 3D obrazu je několik, jsou založeny na několika fyzikálních principech a liší se ve vlastnostech, použité technologii, pořizovacích nebo provozních nákladech, výhodách a nevýhodách. Podle způsobu vytvoření 3D obrazu, jsou technologie 3D zobrazení v práci rozděleny a porovnány v pěti skupinách, podle způsobu, jakým vytváří výsledný

prostorový vjem. Jelikož jsou principy zobrazení prostoru u každé skupiny odlišné, projevuje se to i na jejich výhodách a nevýhodách, které bývají uvnitř skupiny podobné. U technologií na principu barevného oddělení, kromě technologie infitec, je možné použít jakékoliv zobrazovací médium za nízké pořizovací náklady, ale za zhoršené výsledné kvality obrazu, způsobené vyšším výskytem přeslechů a ztráty barevného podání. Naopak u technologií na principu polarizace světla, je dosaženo vysoké kvality obrazu, ale za cenu sníženého jasů kvůli polarizačním filtrům. Na popularitě výrazně posílily HMD neboli displeje upevněné na hlavě, které dokážou zobrazit 3D obraz bez přeslechů a snímat pohyb pozorovatele. Na druhou stranu mohou u někoho způsobit zdravotní potíže a vyžadují technické zázemí. Vícepohledové technologie zase nevyžadují žádné brýle, ale limitují pohyb hlavy při sledování. Velice slibné do budoucna jsou technologie volumetrických a holografických displejů, které mají vynikající vlastnosti bez nevýhod dnes používaných technologií, avšak jsou stále nepoužitelné kvůli problémům, které je drží stále ve fázi vývoje.

Kvůli stanovenému rozsahu práce jsou některé méně známé nebo nepříliš používané technologie v přehledu metod 3D zobrazování jenom zmíněné nebo zcela vynechané. Mezi další témata, která by mohla být vypracována nad rámec této bakalářské práce, související s technologiemi pro 3D zobrazování, patří způsob záznamu a zpracování 3D obrazu, tvorba 3D obrazu z jednoho obrazu nebo zkoumání přesnosti sledování senzorů u HMD.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 312 s. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-3029-5.
- [2] Polarizace světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. [Praha]: Reichl, 2017 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla>
- [3] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014, 96 s. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [4] NOVOTNÝ, Ivan a Michal HRUŠKA. *Biologie člověka*. 3. rozš. a upr. vyd. Praha: Nakladatelství Fortuna, 1995. ISBN 80-716-8819-3.
- [5] LÜDER, Ernst. *3D displays*. C 2012. Chichester: Wiley, 2012, 280 s. Wiley-SID series in display technology. ISBN 978-1-119-99151-9.
- [6] GENG, Jason. Three-dimensional display technologies. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2013, **5**(4), 456- [cit. 2017-02-01]. DOI: 10.1364/AOP.5.000456. ISSN 1943-8206. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/aop/abstract.cfm?uri=aop-5-4-456>
- [7] *Colorstereo* [online]. LEVINE, Gene, 1999 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.colorstereo.com/>
- [8] Colorcode 3-D. *Ogon3d.com* [online]. United States(US), 2015 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://ogon3d.com/colorcode3d.htm>
- [9] JORKE, Helmut, Arnold SIMON a Markus FRITZ. Advanced stereo projection using interference filters. *Journal of the Society for Information Display* [online]. 2009, **17**(5), 407- [cit. 2017-02-04]. DOI: 10.1889/JSID17.5.407. ISSN 10710922. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1889/1.1828693>
- [10] WOODS, Andrew. *Understanding crosstalk in stereoscopic displays*. Keynote Presentation at the Three-Dimensional Systems and Applications Conference, Tokyo, Japan, 2010, s. 19-21. Dostupné také z: http://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/2010-23_understanding_crosstalk_woods.pdf
- [11] Setrvačnost oka. *Techmania* [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2006 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/lidske-oko/setrvacnost-oka>

- [12] HAN, Jeong. IR Sensor Synchronizing Active Shutter Glasses for 3D HDTV with Flexible Liquid Crystal Lenses. *Sensors* [online]. 2013, **13**(12), 16583-16590 [cit. 2017-02-16]. DOI: 10.3390/s131216583. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/12/16583/>
- [13] CHEN, Szu-Fen, Shen-Jiang JENG, Chien-Lin PAN, Chih-Liang WU a Peter HSU. Improving the Motion-Image Quality of LCD TVs. *Information Display* [online]. 2006, **2006**(1106), 3 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://informationdisplay.org/IDArchive/2006/November/ImprovingtheMotionImageQualityofLCDTVs.aspx>
- [14] YANG, Deng-Ke. a Shin-Tson. WU. *Fundamentals of liquid crystal devices*. Second edition. Wiley, 2014, 591 s. ISBN 978-1-118-75200-5.
- [15] *DEVELOPER3.OCULUS* [online]. [Menlo Park], 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://developer3.oculus.com>
- [16] Virtual Reality: What is it? How does it work? Why should you care?. *MedDigital* [online]. London: MOHAMAD, Sarah, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://blog.meddigital.com/virtual-reality-what-is-it-how-does-it-work-why-should-you-care/>
- [17] GOURLAY, Michael a Robert HELD. Head-Mounted-Display Tracking for Augmented and Virtual Reality. *Information Display* [online]. 2017, **33**(1), 4 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://informationdisplay.org/Portals/InformationDisplay/IssuePDF/01_2017.pdf
- [18] HUANG, Yi-Pai, Chih-Wei CHEN a To-Chiang SHEN. 25.1 Invited Paper: High Resolution Autostereoscopic 3D Display with Scanning Multi-Electrode Driving Liquid Crystal (MeD-LC) Lens. *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2009, **40**(1), 336-. DOI: 10.1889/1.3256780. ISSN 0097966x. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1889/1.3256780>
- [19] REITTERER, Jörg, Franz FIDLER, Gerhard SCHMID, Thomas RIEL, Christian HAMBECK, Ferdinand SAINT JULIEN-WALLSEE, Walter LEEB a Ulrich SCHMID. Design and evaluation of a large-scale autostereoscopic multi-view laser display for outdoor applications. *Optics Express*. 2014, **22**(22), 27063-. DOI: 10.1364/OE.22.027063. ISSN 1094-4087. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-22-27063>

- [20] REFAI, H.H. Static Volumetric Three-Dimensional Display. *Journal of Display Technology*. 2009, **5**(10), 391-397. DOI: 10.1109/JDT.2009.2027911. ISSN 1551-319x. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5280616/>
- [21] ABBASI, Hamed, Talie ZAREI, Neda JALALI FARAHANI a Adeleh GRANMAYEH RAD. Studying the Recent Improvements in Holograms for Three-Dimensional Display. *International Journal of Optics*. 2014, **2014**, 1-7. DOI: 10.1155/2014/519012. ISSN 1687-9384. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/ijo/2014/519012/>
- [22] Holografie. *Encyklopedie fyziky* [online]. [Praha]: REICHL, Jaroslav, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/457-holografie>
- [23] *Vive* [online]. Bellevue: HTC, c2011-2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.vive.com/eu/>
- [24] *Holografika* [online]. Budapest: Holografika, 2012 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.holografika.com/>
- [25] *MedicalExpo* [online]. [Marseille]: Virtual Expo Group, 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.medicalexpo.com/>
- [26] *Sony UK* [online]. UK: Sony Europe, c2004-2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.sony.co.uk/>
- [27] NOONAN, D.P., P. MOUNTNEY, D.S. ELSON, A. DARZI a GUANG-ZHONG YANG. A stereoscopic fibroscope for camera motion and 3D depth recovery during Minimally Invasive Surgery. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009, , 4463-4468. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152698. ISBN 978-1-4244-2788-8. ISSN 1050-4729. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5152698/>
- [28] A Look into the Body: Augmented Reality in Computer Aided Surgery. *Technische Universität München: Fakultät für Informatik* [online]. München: Technische Universität München, 2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://www.in.tum.de/en/research/research-highlights/augmented-reality-in-medicine.html>
- [29] GARCÍA-BETANCES, Rebeca, María ARREDONDO WALDMEYER, Giuseppe FICO a María CABRERA-UMPIÉRREZ. A Succinct Overview of Virtual Reality Technology Use in Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2015, **7**, -. DOI: 10.3389/fnagi.2015.00080. ISSN 1663-4365. Dostupné také z:

<http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fnagi.2015.00080/abstract>

- [30] BENEDEK, David a Gary WYNN. *Complementary and alternative medicine for PTSD*. Oxford: Oxford University Press, 2016, 368s. ISBN 978-019-0205-959.
- [31] RILEY, Richard. *Manual of simulation in healthcare*. Second edition. Oxford: Oxford University Press, 2015, 480s. ISBN 978-0-19-871762-1.
- [32] *ChristieDigital* [online]. Cypress: Christie Digital Systems, 2017 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.christiedigital.com/en-us>
- [33] Rozšířená realita v oblasti logistiky. *TechMagazín* [online]. Praha: TechMagazín, c2010-2017 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/1880>
- [34] *Alioscopy* [online]. Paris: Alioscopy, 2016 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.alioscopy.com>
- [35] HOFFMAN, David, Ahna GIRSHICK, Kurt AKELEY a Martin BANKS. Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*. 2008, **8**(3), 33-. DOI: 10.1167/8.3.33. ISSN 1534-7362. Dostupné také z: <http://jov.arvojournals.org/article.aspx?doi=10.1167/8.3.33>
- [36] KRAMIDA, Gregory. Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2016, **22**(7), 1912-1931. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2473855. ISSN 1077-2626. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7226865/>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření [1]</i>	4
<i>Obr. 2 Stavba oka [4]</i>	5
<i>Obr. 3 Graf závislosti rozlišovací schopnosti na vzdálenost podle Cutting, Vishton (1995)</i>	7
<i>Obr. 4 Princip anaglyfu [6]</i>	9
<i>Obr. 5 Projektor 3D technologie infitec [9]</i>	10
<i>Obr. 6 Světlo (a) nepolarizované a (b) lineárně polarizované</i>	10
<i>Obr. 7 Stereoskopický 3D displej využívající lineární polarizaci [5]</i>	11
<i>Obr. 8 Schéma 3D displeje využívající kruhovou polarizaci [5]</i>	13
<i>Obr. 9 Princip časově prokládaných obrazů a brýlí s časovou uzávěrkou pro 3D zobrazování [5]</i>	14
<i>Obr. 10 Rozdílné uspořádání TN (vlevo) a OCB (vpravo) panelů tekutých krystalů</i>	14
<i>Obr. 11 Schéma zobrazování obrazu s černými vsuvkami a synchronizací závěrek a BLU jednotky [5]</i>	16
<i>Obr. 12 Schéma zobrazování obrazu s černými vsuvkami při použití snímací podsvícení [5]</i>	16
<i>Obr. 13 Princip 3D displeje s přepínatelným polarizátorem a polarizačními brýlemi [14]</i> ..	17
<i>Obr. 14 Schéma VR HMD zobrazovací jednotky Oculus Rift</i>	18
<i>Obr. 15 Stereoskopický AR HMD [6]</i>	19
<i>Obr. 16 Displej 3D s paralaxní bariérou [6]</i>	21
<i>Obr. 17 Přepínatelná bariéra z tekutých krystalů pro 2D a 3D mód [5]</i>	22
<i>Obr. 18 Displej 3D s lentikulárními čočkami s pěti pohledy [6]</i>	22
<i>Obr. 19 Uspořádání pixelů zakryté zešikmenými lentikulárními čočkami [6]</i>	23
<i>Obr. 20 Čočky vytvořené s tekutých krystalů pro 2D (vlevo) a 3D (vpravo) pozorování [6]</i> ..	24
<i>Obr. 21 Čočka MeD-LC (a) a princip promítání světla snímáním (b) [18]</i>	24
<i>Obr. 22 Princip zobrazování jednoho Trixelu [19]</i>	25
<i>Obr. 23 Schéma správné pozice hlavy při sledování</i>	26
<i>Obr. 24 Princip TFTS procesu [20]</i>	27
<i>Obr. 25 Princip adresace a vzniku obrazu [20]</i>	28
<i>Obr. 26 Princip záznamu a rekonstrukce hologramu [22]</i>	29
<i>Obr. 27 Akomodace avergence při sledování (a) reálného objektu a (b) objektu zobrazeného na 3D displeji [35]</i>	35

10 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Výhody a nevýhody 3D technologií na principu barevného oddělení.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2 Výhody a nevýhody 3D technologií na principu polarizace světla</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 3 Výhody a nevýhody 3D technologií využívající HMD.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4 Výhody a nevýhody 3D technologií vícehledových</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5 Výhody a nevýhody ostatních autostereoskopických technologií.....</i>	<i>42</i>

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Použité zkratky	I
----------------------------------	---

Příloha 1: Použité zkratky

2D - zkratka výrazu dvojdimenzionální nebo dvourozměrný, z anglického two-dimensional

3D - zkratka výrazu trojdimenzionální nebo trojrozměrný, z anglického three-dimensional

AR - z anglického spojení augmented reality neboli rozšířená realita (někdy označována zkratkou **RR**)

BLU - z anglického spojení blinking backlight unit, přeloženo do češtiny jako jednotka blikajícího podsvícení

CAD - z anglického computer aided design, kde český překlad znamená počítačem podporované navrhování

CAM - z anglického computer aided manufacturing, kde český překlad znamená počítačem podporovaná výroba

CGH - z anglického computer generated hologram, holograms nebo holography, přeloženo do češtiny jako počítačem generovaná holografie

CT - z anglického computer tomography neboli počítačová tomografie

DLP - z anglického digital light processing, technologie na digitální zpracování světla nejčastěji u projekčních technologií

DMD - z angličtiny digital micromirror device je zařízení s několika stovkami tisíců mikroskopických zrcátek, které je součástí DLP projektorů

DoF - z anglického degrees of freedom neboli v českém překladu stupně volnosti

GIS - z anglického geographic information system neboli v českém překladu geografický informační systém

HMD - z anglického head mounted display neboli v českém překladu displeje připevněné na hlavě

IR - z anglického infrared nebo infra radiation, přeloženo do češtiny jako infračervené záření

ITO - z anglického indium tin oxide je sloučenina prvků india, cínu a oxidů, nejčastěji používána k vytvoření transparentních vodících vrstev

LCD - zkratka z anglického liquid crystal display neboli v českém překladu displej z tekutých krystalů

MCU - z anglického microcontroller unit je v českém překladu mikrokontrolér nebo také jednočipový počítač

MeD-LC - zkratka z anglického multi-electrode driving liquid crystal je jedna z technologií tekutých krystalů, která se dá využít k vytvoření autostereoskopického 3D displeje

MEMS - anglická zkratka pro micro-electro-mechanical systems, v češtině mikro-elektrické-mechanické systémy

OCB - zkratka anglického spojení slov optically compensated bend je jedna z možných konstrukcí displeje z tekutých krystalů

OLED - z anglického organic light-emitting diode neboli v češtině organická elektroluminiscenční dioda

PMS - prostorový modulátor světla

RGB -zkratka základních barev red, green a blue (červená, zelená a modrá), která se používají k aditivnímu skládání barev

TFTS - zkratka z anglického two-frequency two-step představuje jednu z technologií využívanou u volumetrických displejů

TN - anglická zkratka twisted nematic je jedna z možných konstrukcí displeje z tekutých krystalů

VR - z anglického virtual reality. v českém překladu virtuální reality

ZBLAN - je zkratka fluorozirkoničitého skla s chemickou formulí $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$