

Univerzita Palackého v Olomouci
Katedra psychologie Filozofické fakulty

PROSTOROVÉ VIDĚNÍ



Bakalářská práce

Autor: **Ing. Michal Krumnikl**

Vedoucí práce: **Prof. PhDr. Alena Plháková, CSc**

Olomouc

2010

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Olomouci 31. března 2010

.....

Děkuji Prof. PhDr. Aleně Plhákové, CSc za cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce.

Obsah

I Teoretická část	3
Úvod	4
1 Základní pojmy	5
1.1 Binokulární disparita	5
1.2 Problém korespondence v obraze	5
1.3 Stereogram	6
2 Historie výzkumu zraku	7
2.1 Starověký Egypt	7
2.2 Antické Řecko	7
2.3 Římská říše	8
2.4 Středověká Evropa	9
2.5 Počátek moderní vědy	9
3 Fyziologie vidění	11
3.1 Zrakové ústrojí	11
3.2 Zrakové dráhy	14
3.3 Corpus geniculatum laterale	14
3.4 Zraková oblast V1	15
3.5 Binokulární neurony oblasti V1	16
3.6 Vertikální disparita	17
3.7 Limity disparity	18
4 Stereoskopické projekční systémy	20
4.1 Historie projekčních systémů	20
4.2 Současné stereoskopické techniky	22
4.2.1 Stereoskop	22
4.2.2 Aktivní stereoskopické brýle (LCD shutter glasses)	23
4.2.3 Pasivní stereoskopické brýle (Polarized glasses)	24
4.2.4 Anaglyf	25
4.2.5 Autostereogram	25
4.2.6 Lentikulární tisk	25
4.3 Zařízení používaná pro výzkum binokulární disparity	26

5 Problém korespondence	29
5.1 Korelace	29
5.1.1 Hledání vzorů pomocí korelace	30
5.2 Modely	31
 II Empirická část	 34
 6 Experimentální výzkum	 35
6.1 Technické vybavení použité v experimentální části	35
6.1.1 Software pro generování podnětů	36
6.2 Zkoumaný soubor	37
6.3 Metoda	37
6.4 Výsledky	38
6.5 Regresní analýza	41
6.6 Model	42
6.7 Diskuze	43
 7 Závěry	 47
 8 Literatura	 48
 III Přílohy	 54
I. Seznam použitých zkratek a symbolů	55
II. Abstrakt bakalářské práce	56
III. Abstract of Bachelor's Thesis	57
IV. Zadání bakalářské práce	58
V. Ilustrační obrázky a fotografie	60

Část I

Teoretická část

Úvod

Vnímání prostoru nám může připadat jako samozřejmá a snadná věc. Bereme jej jako standard a příliš se nezabýváme mechanismem jeho fungování. Začíná nás zajímat až tehdy, když nepracuje správně, nebo když se snažíme stejné mechanismy přenést do oblasti počítačového vidění.

V této bakalářské práci se budeme zabývat problematikou prostorového vnímání. V úvodu musíme ale upozornit na fakt, že problematika vnímání prostoru je extrémně rozsáhlá, a není předmětem této práce pojednat podrobně o všech jejích aspektech. Z tohoto důvodu se omezíme jen na vnímání prostoru na základě binokulární disparity. Klíčovým krokem pro správné určení binokulární disparity je vyřešení tzv. problému korespondence. Jak uvidíme, jedná se o nesmírně náročný problém, který ani mozek není schopen v určitých situacích správně řešit.

Proto, abychom mohli tyto jevy zkoumat u člověka, musíme být schopni každému oku promítнуть rozdílný obraz. Pro tyto účely byla vynalezena řada zařízení a optických pomůcek. Vznikající vjemy mohou být z hlediska prostorového vnímání paradoxní, působit nepřirozeně a pro některé jedince mohou být tyto podněty i nepříjemné. Vzniklé chybné vjemey nám však mohou napovědět mnohé o mechanismech probíhajících v mozковé kůře, místech, kde jsou jednotlivé impulsy z obou očí spojovány a vyhodnocovány do podoby prostorového vidění. V současnosti je nejvíce propracovaná teorie, předpokládající slučování obrazu v mozku na základě podobnosti. Tuto teorii podporují i experimentální výsledky s vnímáním prostoru na tzv. random-dot stereogramech. V experimentální části této práce zreplikujeme jeden z těchto výzkumů a pokusíme se určit maximální intenzitu šumu, při kterém je mozek ještě schopen správně zpracovat podnět. Výsledky lze uplatnit nejen při návrhu nových projekčních systémů, ale i algoritmů pro rekonstrukci trojrozměrné scény.

Následující text lze pomyslně rozdělit na teoretickou a experimentální část. Teoretickou část zahajuje krátká kapitola definující základní pojmy; dále následuje část věnující se historii výzkumu zrakového vnímání; třetí kapitolu věnujeme fyziologii vidění a procesům probíhajícím v primární zrakové kůře mozku; následovat bude popis dostupných technických prostředků umožňujících stereoskopickou projekci; teoretickou část uzavřeme kapitolou popisující problém korespondence z matematického pohledu. V praktické části popíšeme experimenty s random-dot stereogramy a vyhodnotíme naměřené výsledky. V závěru pak shrneme přínos celé práce a možnosti dalšího rozšíření.

1 Základní pojmy

Cílem úvodní kapitoly je na jedné straně objasnit některé důležité pojmy a zároveň uvést čtenáře do problematiky spojené s vnímáním prostoru. Základním prostředkem pro vnímání prostorové hloubky je binokulární disparita.

1.1 Binokulární disparita

Pojmem binokulární disparita označujeme rozdíly v umístění obrazu předmětu viděného levým a pravým okem. Díváme-li se na nějaký předmět, pak se osy našich očí stáčejí tak, abychom fixovali zrakem nějaký bod daného předmětu. Obraz tohoto předmětu je promítán do středu žluté skvrny obou očí. Mozek oba obrazy sloučí a my vnímáme jen jeden obraz. Podíváme-li se na celou situaci podrobně, zjistíme, že obrazy, které vnímá jedno oko, se mírně liší od obrazu oka druhého. Je to způsobeno jejich rozdílnou polohou. Tato rozdílnost je základem binokulární disparity.

V počítačovém zpracování obrazu má pojem disparita totožný význam s tím rozdílem, že se jedná o obrazy získané kamerou. Pokud nebude řečeno jinak, bude v následujícím textu pod pojmem disparita myšlena jen horizontální disparita. Formálně řečeno, horizontální disparita je definována jako vzdálenost mezi horizontálními souřadnicemi korespondujícího bodu na levém a pravém snímku.

Díky binokulární disparitě jsme schopni určit vzdálenost předmětů. Vzdálené předměty mají menší binokulární disparitu než předměty umístěné blízko pozorovateli. Známe-li parametry optického soustavy, která byla použita pro pořízení snímku, jsme schopni zrekonstruovat trojrozměrné souřadnice objektů. Tato technika je nejvíce užívána ve fotogrammetrii, která se zabývá zaměřováním, měřením a rekonstrukcí objektů zobrazených na fotografických snímcích.

1.2 Problém korespondence v obraze

Mějme několik snímků téže trojrozměrné scény pořízených z různých míst, zachycujících scénu z různých úhlů pohledu. Problém korespondence se dá definovat jako hledání obrazu konkrétního bodu v prostoru na takto pořízených snímcích. Pro zjednodušení uvažujme případ, kdy máme dva snímky téže scény. Vstupem jsou tedy dva obrazy, na kterých je zachycen nějaký trojrozměrný objekt. Výstupem je množina přiřazení, která každému bodu z prvního obrazu přiřadí bod téhož objektu na druhém obrazu. Jednou z možných reprezentací této množiny je disparitní mapa (Valois, 2000). V informatice se

tímto pojmem míní obraz, kde jas (případně barva) kóduje horizontální posun bodu mezi levým a pravým snímkem.

1.3 Stereogram

Stereogram zde budeme chápat v původním významu, jak jej definoval Charles Wheatstone. Jde o dvojici snímků pořízených z různých míst, které při prohlížení speciálním optickým přístrojem – stereoskopem vytvářejí iluzi prostorového vjemu (Wheatstone, 1838). Dnes se kromě klasického stereoskopu užívá řada dalších zařízení, která budou popsána v následující kapitole. Zvláštní kategorii stereogramů tvoří autostereogramy a anaglyfy.

2 Historie výzkumu zraku

Schopnost vnímat okolní prostředí zrakem je předmětem vědeckého zkoumání již několik tisíciletí. Výzkum zrakového vnímání byl po dlouhou dobu spjat s rozvojem medicíny. V době kolem 5000 let před n. l. dochází ve vývoji společnosti k zásadnímu zlomu, vytvářejí se nové společenské vztahy. Vzniká písma, které je klíčové pro vznik nového společenského prvku – vědy, jakožto hlavního nositele pokroku a poznání. Do tohoto období spadá i vznik medicíny; objevují se první zmínky o studiu zraku.

2.1 Starověký Egypt

Starověký Egypt byl jednou z nejvýznamnějších a také nejstarších starověkých civilizací ve Středomoří. Staroegyptská medicína zavedla první anatomické výrazy jako mozek, srdce, oko. Zároveň se začínají objevovat první lékařské specializace (oční, kožní, útrobní, zubní lékař). První písemné zmínky o očních operacích nalézáme ve staré Babylonii. Počet očních operací byl dokonce natolik velký, že byl upraven i zákonem. Paragraf Chamurapiho zákoníku jasně ukládá jakou odměnu má získat lékař, který provede takovýto zákrok: „*Jestliže lékař provedl plnoprávnému občanovi bronzovým nožem obtížnou operaci a plnoprávného občana uzdraví nebo bronzovým nožem otevře oční oblouk plnoprávného občana a uzdraví oko plnoprávného občana, vezme deset šekelů stříbra*“ (Junas, 1977, s. 12). Starověký Egypt a Babylonská říše nebyli jedinými centry medicíny. V knize staroindického lékaře Sušruty datované do 6. – 5. stol. před n. l. je popsáno 72 očních chorob společně s léčebnými postupy. Je zde i zmínka o použití magnetu k odstranění kovových těles (Junas, 1977).

2.2 Antické Řecko

Počátky systematického zkoumání zraku a především mechanismu vzniku zrakového vnějmu se datují od 6. století před n.l. První teorie vysvětlující princip vidění je připisována Empedoklovi, filozofu presokratického období. Ten předpokládal, že lidské oko je zdrojem světelných paprsků, které tvoří kužel s vrcholem v zornici. Předměty pak vnímáme paprsky stejně jako bychom je ohmatávali prsty. Na tuto teorii dále navázal Alcmaeon, Platón, Eukleides, Hipparchos a Ptolemaios. Atomisté v čele s Leukippem a Démokritem s tímto názorem nesouhlasili a vytvořili alternativní model. Jejich teorie vidění předpokládá existenci jemných obrazů (eidolů), které vyzařují všechny předměty. Tyto obrazy se setkávají s paprsky oka a vytvářejí s nimi ve vzduchu obrazy, které pak vstupují do zornice (Irby-Massie – Keyser, 2001). Eukleides dále rozvíjel tyto teorie, které formuloval ve svých 13 knihách Základy planimetrie a optiky. Jeho model vycházel z Empedoklovy

představy paprsků vycházejících z oka, kterými vysvětloval často paradoxní zkreslení pozorovaných předmětů (Irby-Massie – Keyser, 2001). Zabýval se geometrickými vztahy mezi vzdáleností, směrem a úhlem paprsků světla. Eukleidovská optika vycházela z 10 základních axiomů, z kterých bylo odvozeno 467 tvrzení z oblasti planimetrie a stereometrie (Euclid, 1482). Pro následující tisíciletí se jeho knihy staly učebnicemi matematiky a umožnily budoucí vývoj kartografie, perspektivy ve výtvarném umění a daly základ moderní projektivní geometrii.

Ptolemaios navázal na eukleidovskou geometrii. Jeho pětisvazkové dílo nazvané Optika (*Optica*) bylo v 9. století přeloženo do arabštiny a pravděpodobně bylo základem Alhazenovy Knihy optiky (*De Aspectibus*). Nalezneme zde první pokusy o popis geometrie prostorového vidění a binokulární disparity. Jedná se o základní principy, které byly později připisovány Heringovi. Původní svazky se bohužel nezachovaly. Dnes máme k dispozici jen latinský překlad arabské verze, který byl pořízen v 12. století na Sicílii admirálem Eugeniem. Pro rozvoj vědy byl neméně důležitý i řecko-latinský překlad Ptolemaiové Velké knihy (*Almagest*) (Lindberg, 1980).

2.3 Římská říše

Obrovský rozmach Římské říše za císaře Traiana vedl ke koncentraci vědeckého bádání do centra Římské říše, Říma. V roce 162 n. l. přichází do Říma Claudius Galénos, jeden z nejznámějších lékařů starověku. O 13 let později zde dokončuje 17 svazkové dílo O použití částí těla (*De usu partium corporis humani*). Desátý svazek je věnován zraku. Galén na základě popisu Rufuse z Efesu charakterizoval překřížení mediálních optických nervů (*chiasma opticum*) jako místo, kde se setkávají optické nervy a spojují se nezávislé obrazy do jediného vjemu zahrnujícího i prostorovou hloubku (French, 2003).

Po pádu Říma se vědecký vývoj přesunul zpět do Řecka. Vzniklá novoplatónské škola však byla císařem Justiniánem rozpuštěna a učenci hledali útočiště v Persii a Sýrií. Bagdád se stal kulturním střediskem, kde se překládala slavná díla řeckých učenců. Z mnoha arabských spisů týkajících se optiky a vidění je asi nejvýznamnější sedmisvazkové dílo Kniha optiky (*Kitáb al-Manázir*) Abu Ali Al-Hasan ibn Al-Haytham, známého v Evropě pod jménem Alhazen. Alhazen vytvořil ucelenou teorii vidění, která byla překonána až v 17. století Keplerem. Alhazen kategoricky odmítl ideu, že oko je zdrojem světelných paprsků. Podle něj každý předmět vyzařuje nebo odráží světelné paprsky. Část těchto paprsků pak dopadá do oka a vytváří obraz skutečnosti. Experimentoval také s temnou komorou (*camera obscura*), která byla známa v Číně již ve 4. století př. n. l. (Šikl, 2004) V prvním svazku popisuje základní pojmy spojené s prostorovým vnímá-

ním - korespondující body na sítnici, dvojité vidění nekorespondujících bodů a splynutí korespondujících (Lindberg, 1996).

2.4 Středověká Evropa

Vzkříšení evropské vědy přišlo až ve 13. století. Poznatky Eukleida, Aristotela, Galéna a Alhazena byly oživeny v povědomí evropských učenců díly Rogera Bacona, Johna Peckhama a Vitella. Ve spisech Leonarda da Vinciho nalezneme pojednání týkající se disparity a zákrytu objektů ve scéně. Částečně zakryté oblasti mohou podle něj sloužit jako prostorové vodítka. Nakayama a Shimojo pojmenovali tento typ vnímání hloubky jako da Vinciho prostorové vidění (Alais, 2004). Giovanni Battista della Porta navrhl v roce 1593 první test vizuální dominance a popsal binokulární rivalitu (Wade, 2000). Na začátku 17. století popsal Benedetto Castelli paobrazy vznikající po předchozí fixaci na světelné zdroje a změny ve velikosti paobrazu v závislosti na vzdálenosti plochy, na kterou byl promítán. Tento fenomén byl podrobně popsán až na konci 19. století a je dnes znám pod názvem Emmertův zákon (Wade – Tatler, 2005).

Klíčovou osobností 17. století byl Johannes Kepler, který během pobytu v Praze objevil geometrické principy tvorby obrazu na sítnici oka. Tento objev publikoval v roce 1611 v díle Dioptrice. Kepler se musel vyrovnat s problémem, který nastínil již Alhazen. Jedná se o mechanismus, který je zapotřebí pro korekci převráceného obrazu světa, který vzniká při průchodu paprsků čočkou. Kepler byl nejdříve nakloněn Alhazenovu konceptu druhé inverze, později jej ale opustil a předpokládal, že správné vnímání obrazu je pouze výsledkem mentálního procesu nezávislého na optickém uspořádání (Finger, 2001).

2.5 Počátek moderní vědy

V roce 1838 Charles Wheatstone v článku pro Royal Society dokazuje nezpochybnitelnou spojitost mezi disparitou a vnímanou prostorovou hloubkou. Wheatstone vynalezl první moderní stereoskop, který umožňoval promítat každému oku nezávislé obrazy. S rozvojem fotografie se stereoskop stává populárním zařízením pro prohlížení trojrozměrných snímků (Bowers, 2001).

Kepler, Berkeley, Descartes a další neměli téměř žádnou představu o fyziologických procesech probíhajících ve zrakovém orgánu ani o mechanismech přenosu vzruchu na nervových synapsích. Teprve až objev mikroskopu umožnil poznat detailní strukturu lidského oka. Není jasné, kdo objevil mikroskop jako první, ale vzhledem k podobné konstrukci to bylo pravděpodobně těsně po objevu dalekohledu. První zmínky o použití mikroskopu jsou spojovány s holandským inženýrem Corneliem Drebbellem. Robert

Hook, Camillo Golgi, Marcello Malpighi, Antoni van Leeuwenhock vytvořili obsáhlá díla obsahující detailní mikroskopické nákresy tkání (Burns, 2001).

Za zakladatele moderní neurofyziologie je pokládán Santiago Ramón y Cajal. Jako první za použití Golgiho barvení, metody přípravy mikroskopických preparátů nervové tkáně, popsal organizaci vrstev sítnice. Cajal rozpoznal jednotlivé části neuronů, popsal dosťedivé šíření informace dendrity a odstředivé impulzy vedené axony (Greenblatt, 1996). Z oblasti prostorového vnímaní publikoval Cajal článek zabývající se prostorovým viděním, ve kterém popsal ranou formu random-dot stereogramu. Golgi a Cajal získali v roce 1906 Nobelovou cenu za fyziologii.

Do konce 60. let panoval obecný názor, přisuzující binokulární prostorové vidění vyšším poznávacím procesům. Předpokládalo se, že prostorového vnímání jsou schopni jen vyšší savci. Podle Ramóna y Cajala se vstupní informace z korespondujících oblastí sítnic spojují na tzv. isodynamických buňkách (*isodynamic cells*) a utvářejí jednotný vjem prostorové hloubky. Experimenty Hubela a Wiesela potvrdily existenci receptivních polí v mozkové kůře koček. V mozkové kůře existují skupiny buněk, které jsou citlivé na úzce vymezená pásma disparity (Howard – Rogers, 1996). Jack Pettigrew společně s Tetsurou Nikarou a Larrym Squirem objevili při zkoumání zrakové kůry koček (*visual cortex*, V1) velkou citlivost buněk striata na disparitu vnímaného objektu. Výzkumy prováděné pomocí random-dot stereogramů toto pozorování potvrdily (Squire, 1996). Pokusy prováděné Poggiem a Fisherem na opicích, naučených upřít svůj pohled na bod v určité vzdálenosti, zaznamenaly výskyt obdobných struktur reagujících na disparitu i v týlní kůře V2 (DeValois – DeValois, 1991).

Výzkum kognitivních procesů pokročil v dalších letech do stádia, kdy se snažíme popsat biochemické procesy probíhající přímo v lidském mozku. Díky moderním zobrazovacím metodám, jakou jsou PET, CT a MRI můžeme nepřímo monitorovat činnost mozkové kůry a odhalovat procesy, které zůstávaly dluho nepřístupné vědeckému zkoumání.

3 Fyziologie vidění

Než se začneme plně věnovat fyziologickým procesům spojených s prostorovým vnímáním, je vhodné pro úplnost zmínit i základní údaje z anatomie lidského oka a fyziologie vidění.

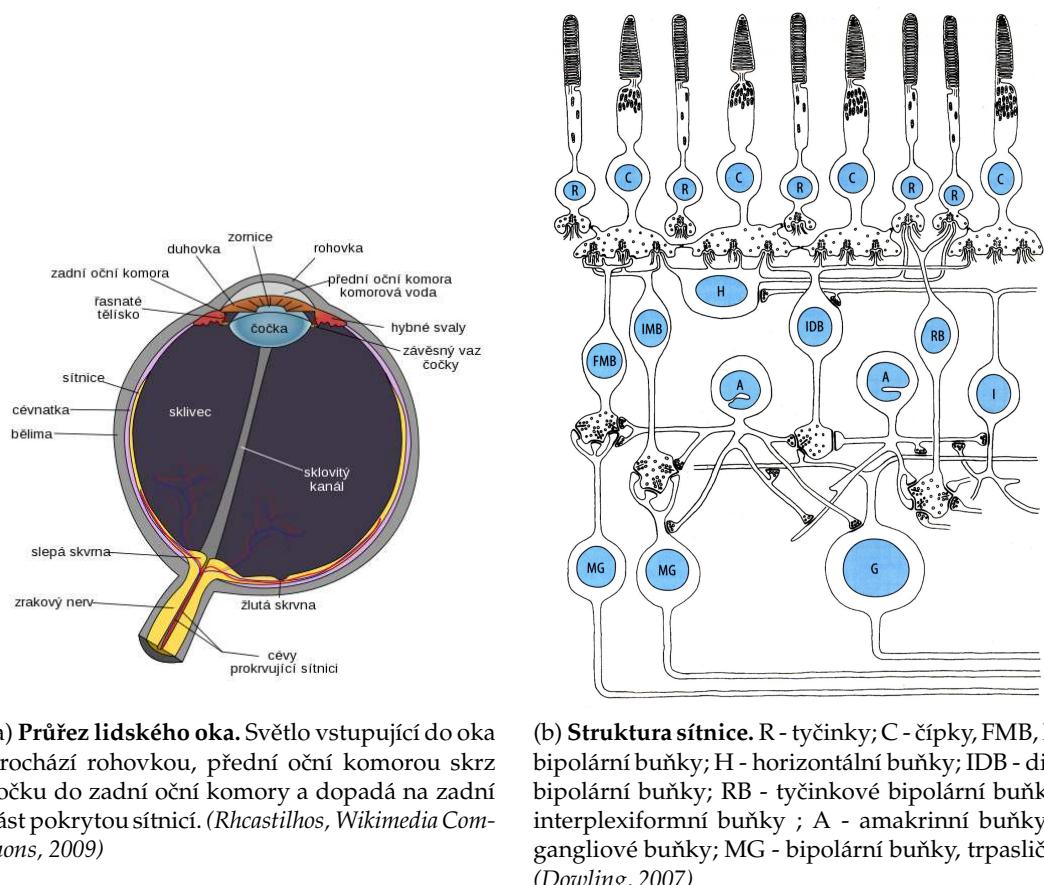
Následující kapitola představuje stručný přehled základních mechanismů, na který navážeme částí týkající se fyziologie disparity a prostorového vidění. S ohledem na rozsah problematiky a zaměření tohoto textu je popis ukončen v momentě úspěšného kódování disparity, tedy v primární zrakové oblasti. Procesy probíhající nad touto vrstvou jsou vynechány.

3.1 Zrakové ústrojí

Zrakové ústrojí se skládá z oční koule, zrakového nervu a pomocných ústrojí. Oční koule má tvar nepravidelné koule o průměru přibližně 24 mm. Světlo vstupuje dovnitř oka rohovkou o průměru 12 mm. Rohovka je průhledná, zakřivená vrstva s poloměrem zakřivení přibližně 8 mm, což odpovídá optické mohutnosti 42 dioptrií. Duhovkové svaly (*m. sphincter pupillae* a *m. dilatator pupillae*) ovládají zornici, otvor v centru duhovky, která funguje jako clona regulující množství dopadajícího světla. Velikost duhovky ovlivňuje hloubku ostrosti a kvalitu obrazu. Mozek ovládá tyto svaly na základě intenzity osvětlení a vzdálenosti, ve které se nachází pozorovaný objekt. Celková propustnost optické soustavy oka je 75 % – 80 % (Howard, 2002).

Vnitřní vrstva stěny koule se nazývá sítnice. Ta se skládá z několika vrstev: *stratum pigmenti retinae*, vrstvy bohaté na pigment; vrstvy neuroepiteliálních buněk, tyčinek a čípků; zevní hraniční vrstvy; zevní zrnité vrstvy, tvořené částmi tyčinek a čípků, v nichž jsou jádra; zevní vrstvy síťové; vnitřní vrstvy zrnité; vnitřní vrstvy síťové; vrstvy multipolárních ganglionových buněk; vrstvy vláken zrakového nervu a vnitřní hraniční vrstvy. Na zadní straně je oválné vyvýšení, ve kterém se sbíhají axony ganglionových buněk sítnice, jež prostopupují cévnatkou a tvoří nervus opticus. V této oblasti se nachází slepá skvrna, kde chybí světločivé receptory. 3 – 4 mm zevně je žlutá skvrna, macula lutea, což je místo nejostřejšího barevného vidění. Jsou zde zastoupené jen čípky (Sinělníkov, 1970).

O prvním detailním popisu sítnice Ramóna y Cajala, jsme se zmínili již v předchozím historickém ohlédnutí. Sítnice je vícevrstevnatá membrána o celkové rozloze přibližně 1000 mm^2 . V nejširším místě je silná přibližně $250 \mu\text{m}$, k okrajům se zužuje na průřez $230 \mu\text{m}$. Od cévnatky ji dělí pigmentový epitel, který zabraňuje zpětnému odrazu světla zpět do receptorů. Receptory jsou hustě rozmístěné ve vnější vrstvě. Tyčinky mají vysokou citlivost, širokou spektrální odezvu a jsou rozmístěné výlučně po obvodě. Čípky mají



Obrázek 1: Průřez lidského oka a struktura sítnice

ve srovnání s tyčinkami menší citlivost, nalezneme je ve vysoké koncentraci v oblasti fovey (1,5 mm velká oblast na zadním pólu oka charakterizovaná nejostřejším viděním, tvořená hexagonální mozaikou čípků s rozestupem $2 - 3 \mu\text{m}$), přičemž k okrajům jejich koncentrace klesá. Podle spektrální odezvy dělíme čípky na tři typy receptorů : typ S (nejvyšší citlivost na vlnovou délku 450 nm), typ M (535 nm) a typ L (565 nm). Poslední typ tvoří jen 5 – 10 % všech čípků. Citlivost čípků se pohybuje v intervalu $10^{-7} \text{ cd/m}^2 - 10^{-4} \text{ cd/m}^2$ (Howard, 2002).

Sítnice dospělého člověka obsahuje zhruba 126 miliónů receptorů, přičemž asi 120 miliónů připadá na tyčinky a zbylých 6 miliónu na čípky. (Nairne, 2008) Nejvyšší koncentrace čípků je ve fovey, kde dosahuje až 320 000 na mm^2 . Curcio (Curcio et al., 1990) uvádí průměrnou hodnotu 199 000 čípků na mm^2 , přičemž tato hodnota se silně individuálně liší a kolísá v intervalu 100 000 až 324 000 čípků na mm^2 .

Každý receptor se skládá z prodlouženého vnějšího segmentu, vnitřního segmentu, buněčného těla, krátkého axonu ($50 - 500 \mu\text{m}$) a synaptického zakončení. Na obrázku 1 je schématicky zakreslena struktura sítnice a synaptických spojů.

Část světla procházejícího sítnici je absorbována ve vrstvě tyčinek a čípků, kde rozkládá specifické pigmenty obsažené v cytoplasmě - rhodopsin a iodopsin. „*Rhodopsin je složen z aldehydu vitaminu A (retinalu) a bílkovinného nosiče opsinu. Fotony mění retinal z izomeru 11-cis na all-trans, což vede k disociaci retinalu od vazby na opsin a odbarvení pigmentu. Tento proces vyvolá difuzi kalciových iontů do nitra tyčinky, které redukují prostupnost cytoplazmatické membrány pro natrium. Uzavření natriových kanálů vyvolá hyperpolarizaci membrány.*“ (Jelínek et al., 2009, s. 208). Po hyperpolarizaci se pigment opět obnovuje a proces může proběhnout znova. Ve tmě je membrána depolarizována na úroveň přibližně -40 mV. Dopadající fotony jsou čípkem vyhodnocovány přibližně 50 ms, přičemž během této doby dopadne na plochu čípku od 100 do 10000 fotonů (Howard, 2002).

Elektrický impuls je přenášen na dendrity ganglionových buněk (G) pomocí bipolárních (FMB, IMB), amakrinních (A) a horizontálních buněk (H) a odtud již ve formě klasického nervového vzruchu do CNS. Rozdíl v rozlišovací schopnosti tyčinek a čípků je dán typem propojení s bipolárními neurony. Jeden bipolární neuron bývá propojen s několika tyčinkami, zatímco s čípkem tvoří jen jednoduché propojení.

Na základě hustoty čípků jsme schopni určit maximální rozlišovací schopnost lidského oka. Při počtu 100 000 až 324 000 čípků na mm^2 , jak uvádí Curcio (Curcio et al., 1990), vychází maximální rozlišovací frekvence oka na 47 až 86 cpd⁸. Campbell (Campbell – Gubisch, 1966) tento předpoklad experimentálně ověřil. Lidské oko je schopno rozlišovat vzory až do frekvence 60 cpd. Receptory v oku převádějí spojitou veličinu intenzity dopadajícího světla na posloupnost elektrických impulsů. Pro převod platí Shannon-

Nyquistův teorém⁹, který definuje jaký zrakový podnět jsme schopni zpracovat tak, aby rekonstruovaný signál v mozku odpovídal reálnému podnětu. Překročíme-li tuto frekvenci, pak mohou vznikat různé falešné vjemy, které označujeme slovem aliasing. Jako příklad se často uvádí filmové záběry rychle se otáčejícího kola nebo vrtule. Při promítání se obvykle otáčí bud' nepřirozeně pomalu nebo i opačným směrem. Obdobné projevy lze zachytit i u zrakového vnímání. Thibosa (Thibosa et al., 1996) popsal moiré vzory vnímané u obrazů promítaných na periferní oblast sítnice. Podle Campbella a Gubishe (Campbell – Gubisch, 1966) je však hlavním limitujícím faktorem optický systém oka a ne hustota receptorů.

3.2 Zrakové dráhy

Primární zraková dráha začíná ganglionovými buňkami a končí až v corpus geniculatum laterale. Axony ganglionových buněk opouštějí oko v podobě zrakového nervu. Zrakový nerv má v průřezu až 4 mm a obsahuje více než 1,5 milionu axonů.

Nerv vycházející ze sítnice se po několika centimetrech kříží v místě nazvaném chiasma opticum. Ramón y Cajal popsal základní typy křížení, které se vyskytují u různých živočišných druhů. U obratlovců se kříží většina axonů. Toto křížení se nazývá dekusace (lat. *decussare*, dělit křížem). Primátům a některým dalším savcům se axony kříží jen částečně (částečná dekusace, hemidekusace). Vlákna z nazální poloviny sítnice, kam se promítají podněty ze zevních polovin zorného pole se kříží, naproti tomu vlákna z temporálních částí sítnice se nekříží. Poměr křížených a nekřížených vláken závisí na umístění očí a je vyjádřen Newton-Müller-Guddenovým zákonem. U primátů a lidí je podíl mezi nekříženými a kříženými vlákny přibližně jedna polovina, u psů jen jedna čtvrtina (Cajal, 1999). Míra překřížení závisí na velikosti zorného pole, které je vnímáno oběma očima.

3.3 Corpus geniculatum laterale

Z chiasma opticum pokračují vlákna dále do thalamu a do korového zrakového centra v týlním laloku. *Corpus geniculatum laterale* se u primátů, tedy i u lidí, rozděluje na 6 vrstev. První dvě vnitřní vrstvy obsahují převážně magnocelulární (periferní, M) buňky, zbylé čtyři vrstvy jsou tvořeny parvocelulárními (centrálními, P) buňkami. Obraz z poloviny

⁸Prostorová frekvence je udávána jako počet cyklů na úhlový stupeň. Rozlišení v cpd odpovídá počtu černo/bílých pruhů které jsme schopni rozlišit. Např. 1 cpd odpovídá pruhům 17,5 mm širokým pozorovaných ze vzdálenosti 1 m.

⁹Tento teorém říká, že přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného, signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byl vzorkován frekvencí alespoň dvakrát vyšší než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu.

sítnice jednoho oka je mapován jednou ve vrstvě magnocelulární a dvakrát ve vrstvách parvocelulárních (Koukolík, 2000). Každá buňka zpracovává informace z určité malé plochy sítnice. Oblast, která je zpracovávána danou buňkou se nazývá receptivní pole.

Magnocelulární buňky jsou rovnoměrně rozloženy po celé sítnici, přičemž tvoří asi 10 % ganglionárních sítnicových buněk. Tyto buňky jsou charakteristické rychlou reakcí na pohyb, rozlišují základní tvary a malé rozdíly v jasu. Parvocelulární buňky tvoří 80 % sítnicových ganglionárních buněk, zajišťují vjem barev a podrobnosti tvarů. Magnocelulární buňky a parvocelulární buňky jsou ve zrakové mozkové kůře oddělené. *P-buňky přechází i do temporální, dolní části kory a M-buňky směřují přes temporální do zadní parietální oblasti, která je ve spojení s premotorickou oblastí frontální kory. Tak může stimulace periferie sítnice pohybem nebo hrubšími tvary vyvolat sakadicke pohyby, na které potom navazuje podráždění centrálního, parvocelulárního systému, který navozuje klouzavé, pomalejší pohyby a přesnější odlišení a rozpoznání podrobností.* (Anton, 2004)

Z corpus geniculatum laterale pokračují nervové dráhy do primární zrakové oblasti V1 a dále do korových oblastí V2, V3 a dalších.

3.4 Zraková oblast V1

Primární zraková oblast leží na okraji žlábku *sulcus calcarinus*, zhruba ve středu vnitřní plochy týlního laloku (Orel – Facová, 2009). Tato oblast je známá i pod názvy Brodmanna oblast 17 nebo *cortex striatum*. Název striatum pochází od žlhání, které lze pozorovat v kolmém řezu. Nejčastěji se však setkáme s označením oblast V1. Tato oblast se dále rozděluje na vrstvy I, II, III, IVA, IVB, IVC alfa, IVC beta, V, VIA, VIB (Koukolík, 2000).

Primární zraková oblast je zodpovědná za zpracovávání informací o tvaru, pohybu a barvě. Informace se vyhodnocují v navzájem se prolínajících jednotkách. Výstupy těchto jednotek jsou pak přiváděny do vyšších zrakových oblastí dvěma oddělenými korovými drahami. Zadní dráha je převážně vyhrazená pro zpracování informace o pohybu a pozici objektů v prostoru. Přední dráhou pak proudí informace o rozpoznaných objektech a jejich tvarech. V kůře makaků (*makak rhesus*) bylo vymezeno 32 oblastí, které se starají o vyhodnocování zrakových podnětů a jejich integraci s ostatními smyslovými informacemi (Hubel – Wiesel, 1968). Magnocelulární systém se společně s parvocelulárním systémem podílejí na zpracování prostorové hloubky, binokulární disparity a odhadu prostorové hloubky z pohybu.

3.5 Binokulární neurony oblasti V1

Lidský mozek má pozoruhodnou schopnost rekonstruovat trojrozměrnou scénu na základě dvou obrazů získaných receptory na sítnici. Aby toho byl schopen, musí části obrazu vzájemně spárovat (problém korespondence) a určit velikost jejich vzájemného posunutí, disparity. Jednou z možností, jak toho lze dosáhnout je aplikovat funkci vzájemné korelace a hledat takové dvojice, které spolu vzájemně korelují. Dnes již klasický algoritmus řešící problém korespondence popsal Marr a Poggio (Marr – Poggio, 1979). Ukazuje se, že lidský mozek funguje obdobně jako počítač a také „počítá“ pro všechny možné pozice jejich korelací a poté vybírá maxima, která reprezentují nejvíce pravděpodobnou dvojici pro spárování. Tento proces probíhá v týlním laloku v oblasti označované jako V1.

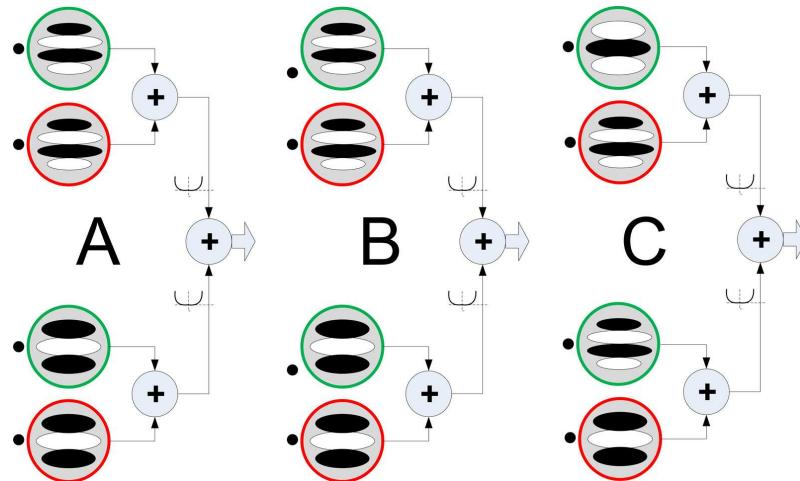
Neurofyziologické výzkumy prováděné na primátech prokazují existenci neuronů citlivých na disparitu ve zrakové oblasti V1. Tyto buňky jsou citlivé na určitou absolutní hodnotu disparity. Rozsah hodnot disparit, kterou je buňka schopna zachytit, je úměrný velikosti receptivního pole. Neurony citlivé na detaily reagují jen na malý rozsah absolutní disparity, zatímco buňky zpracovávající hrubé rysy mají mnohem větší rozsah (Cumming – Deangelis, 2001). Detektor disparity, tak jak je popisován v oblasti V1, je realizován dvěma typy buněk – jednoduchými (*simple cells*) a komplexními (*complex cells*).

Podněty, procházející jednoduchými buňkami, jsou lineárně sčítány. Experimentálně je možno modelovat jejich odezvu na monokulární podnět (tvořený světlými a tmavými skvrnami v obraze) pomocí mapy receptivního pole (Cumming – Deangelis, 2001). Tuto mapu můžeme chápat jako matici, popisující jak bude vypadat odezva na konkrétní uspořádání světlých a tmavých skvrn. Díky témtu mapám jsme poté schopni předpovídat odezvu na jakýkoliv jiný podnět, a to tak, že provedeme konvoluci¹⁰ vnímaného vzoru s mapou receptivního pole.

Citlivost buněk na disparitu pak můžeme modelovat obdobně. Konvoluce se provede pro každé oko a výsledky se sečtou (záporný výsledek z levého oka může potlačit kladnou excitaci z pravého oka a naopak). Po sečtení je výsledek normalizován, záporné hodnoty jsou potlačeny. Buňka pak vysílá impulzy zhruba v poměru, který odpovídá tomuto součtu (Fleet et al., 1997).

Chování komplexních buněk vyžaduje náročnější model, protože jejich odezva není lineární. Tyto buňky jsou citlivé na určitý typ orientovaných hran a dále pak na intenzitu podnětu. Současný model, popisující komplexní buňku, ji popisuje jako soustavu

¹⁰Konvoluce je matematický operátor funkcí $f(\vec{x})$ a $g(\vec{x})$. $f(\vec{x}) \star g(\vec{x}) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\vec{y})g(\vec{x} - \vec{y})d^N\vec{y}$. Funkce $g(\vec{x})$ se označuje jako konvoluční jádro. Diskrétní konvoluci si lze představit jako tabulkou (matici), kterou položíme na příslušné místo obrazu. Každý bod překrytý tabulkou vynásobíme koeficientem v příslušné buňce a provedeme součet všech těchto hodnot. Výsledek pak tvoří výstupní hodnotu pro daný bodu.



Obrázek 2: **Model binokulárního neuronu.** Obrázek zachycuje různé varianty detekce disparity. Červené a zelené ohraničení map receptivních polí odpovídá levému a pravému oku. (A) Citlivost na nulovou disparitu. (B) Citlivost na nenulovou disparitu, které je dosaženo posunutím receptivních polí (černé tečky označují polohu). (C) Další varianta, fázově posunutá o 90° , citlivá na nenulovou disparitu. (Převzato podle Fleet et al. (1997))

vzájemně propojených jednoduchých buněk (viz obrázek 2). Každá komplexní buňka má na vstupu minimálně čtyři jednoduché buněky. Jejich vstupy jsou fázově posunuté o 90° , takže jejich součet je nezávislý na fázovém posunu monokulárního podnětu. Shodné vzory v receptivním poli (nulová disparita) se projeví maximálním vybuzením komplexní buňky. Citlivost na jinou, nenulovou disparitu, se dosáhne fázovým posuvem vstupů jednoduchých buněk nebo posuvem receptivního pole. Výstup jednoduché buňky se dá symbolicky vyjádřit vztahem $(L + R)^2 = L^2 + R^2 + 2LR$, kde L a R jsou výsledky konvoluce podnětu daného oka a odpovídající mapy receptivního pole. Zmíněný model má velmi blízké charakteristiky k údajům zjištěným v rámci experimentálních studií (Akiyuki Anzai – Freeman, 1999; Filippini – Banks, 2009).

3.6 Vertikální disparita

V tomto textu jsme pod pojmem disparity uvažovali jen o horizontální složce disparity. Tím se ale dopouštíme jisté redukce. Korektní definice disparity by zahrnovala nejenom její velikost, ale i směr (vektor) posuvu. Posun v obraze nemusí být obecně jen horizontální, ale může obsahovat i vertikální složku. Zanedbat vertikální složku si můžeme dovolit z toho důvodu, že většina informací o prostorové hloubce je již obsažena v horizontální složce disparity. Podstatnou výhodou takto vzniklého jednodimenzionálního kódování

je ekonomičnost přenosu (kóduje se menší množství informací). Ukazuje se, že téměř veškeré podstatné informace obsažené ve vertikální disparitě lze teoreticky odvodit z výstupů detektorů horizontální disparity (Read – Cumming, 2006). Nenulová vertikální disparita se totiž projeví v nižších hodnotách binokulární korelace.

Přestože je většina prostorových informací kódována v horizontální disparitě, jsou binokulární neurony citlivé i na vertikální disparitu. Varianta A obrázku 2 zobrazuje optimální stav, kdy je neuron maximálně vybuzený podnětem s nulovou disparitou, receptivní pole jsou stejná. Jakýkoliv posun (vertikální i horizontální) v receptivním poli povede ke snížení intenzity vybuzení. Pokud bychom modelovali neuron korelací, pak při úplné shodě obrazů bude hodnota korelace 1. Vertikální posun pak tuto hodnotu nutně sníží. Ve výsledku potom celý soubor horizontálních buněk bude vracet nižší hodnoty lokálních maxim. Schopnost detekce bude úměrně klesat s rostoucí hodnotou vertikální disparity.

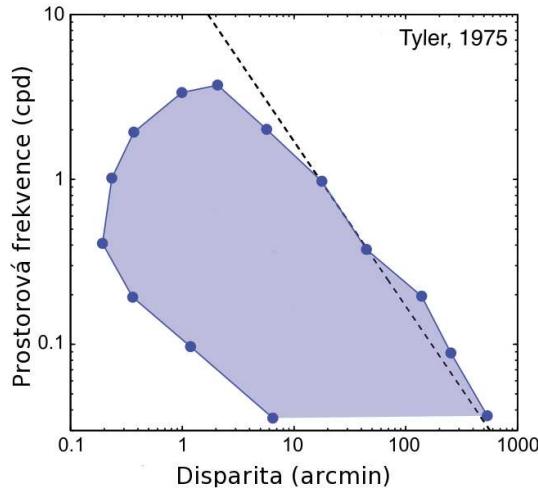
V primární pozici očí (osy jsou rovnoběžné) jsou všechny epipoláry¹¹ horizontální, tedy i disparita je jen horizontální. Avšak při pohledu na blízký předmět, osy očí se sbíhají tak, aby se obraz předmětu promítal na žlutou skvrnu. V této konfiguraci již nejsou epipoláry horizontální a disparita má nenulovou vertikální složku. Na základě znalosti horizontální i vertikální disparity je lidský mozek schopen určit polohu očí a odvodit tak pozici objektu v prostoru. Experimenty zahrnující vertikální disparitu tuto funkci potvrzují (Maske et al., 1986; Backus et al., 1999; Read – Cumming, 2006; Serrano-Pedraza – Read, 2009).

Statistická srovnání rozsahu horizontální a vertikální disparity jasně naznačují dominantu horizontální složky pro kódování prostorového vjemu. Podrobný matematický popis formování sítnicového obrazu společně s komplexním modelem neuronu zahrnujícím i vertikální složku disparity lze najít například v Read – Cumming (2006). Schopnost zpracovávat vertikální disparitu je vysvětlována jako adaptace mozku na možné vady v obraze dané nedokonalým tvarem sítnice, odlišným vertikálním umístěním očí či jinými anatomickými vadami. Maximální vertikální disparita, kterou je mozek schopen zpracovat bez dalších vodítek, se pohybuje v rozmezí 44 arcmin až 88 arcmin (Fukuda et al., 2009).

3.7 Limity disparity

Jak již víme, jedním z klíčových vodítek pro vnímání prostoru je binokulární disparita. I v případech, kdy nemáme k dispozici žádná jiná vodítka (monokulární či binokulární), jsme

¹¹Epipolára je taková přímka, na kterou se do druhého obrazu promítá bod z prvního obrazu.



Obrázek 3: **Hranice prostorového vnímání.** Modře ohraničená plocha vyjadřuje prostor parametrů (disparita, prostorová frekvence), ve kterém byli pozorovatelé schopni správně vnímat prostorovou hloubku. (Převzato podle Filippini – Banks (2009))

schopni pomocí disparity téměř dokonale vnímat prostorové uspořádání. Disparita má však také řadu omezení, která brání jednoznačnému určení prostorové hloubky předmětu v prostoru.

Máme-li správně vnímat prostor scény je třeba, aby se hodnota disparity objektů ve scéně dostatečně odlišovala, jinak nám hrozí jejich splynutí do jedné roviny. Nejmenší rozdíl disparity, který jsme schopni vnímat, označujeme jako práh disparity (*disparity threshold*). Hodnota binokulární disparity je omezena i shora, neboť mozek není schopen správně vyhodnotit ani příliš velké hodnoty disparity. Obraz z obou očí nesplynne do jediného vjemu, vidíme dvojitě a prostorové vnímání se ztrácí. Maximální hodnota disparity je označována jako mez splynutí (*fusion limit*).

Christopher W. Tyler se ve svých výzkumech, prováděných v sedmdesátých letech, zaměřil na zmiňované meze vnímání prostorové hloubky (Tyler, 1977). Většina pozorovatelů je schopna za běžných podmínek určit rozdíl mezi dvěma objekty s relativní disparitou pouhých 10 arcsec. Za optimálních podmínek se dokonce udává hodnota blízká 2 arcsec. Maximální hodnota disparity, kdy ještě dochází k úspěšnému splynutí, je téměř 10° . Obrázek 3 graficky zobrazuje oblast, ve které byli pozorovatelé schopni správně vnímat prostorovou hloubku (osa X – hodnota disparity, osa Y – prostorová frekvence).

4 Stereoskopické projekční systémy

Projekčními systémy rozumíme převážně optické přístroje, sloužící k pozorování optických obrazů promítaných na stínítko nebo projekční plátno. Předlohou mohou být jak počítačové obrazy tak i reálné předměty.

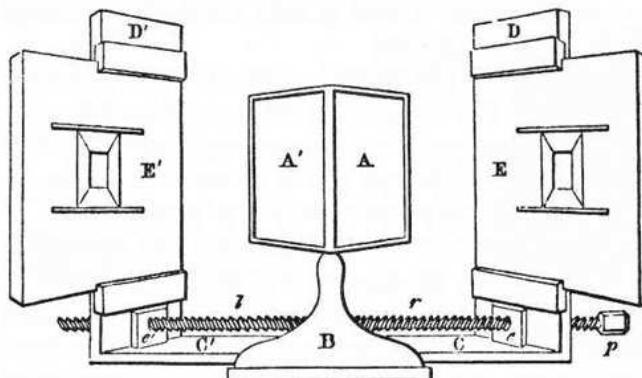
V úvodu této kapitoly shrneme relativně dlouhou historii projekčních systémů, přičemž se zaměříme především na klíčové objevy, které vedly ke vzniku moderních stereoskopických systémů. V následující části budou popsány současné metody stereoskopického zobrazování. Dále podáme přehled technických prostředků užívaných v experimentech s binokulární disparitou. Závěr obsahuje popis vybavení použitého v experimentální části této práce.

4.1 Historie projekčních systémů

Za jeden z nejstarších projekčních systémů lze považovat stínohru. Loutkové divadelní představení využívající stínu vrženého na plátno má své kořeny v starověké Číně. Uvádí se, že první stínohra si nekladla menší cíl, než přivést zpět do života obrazy mrtvých. Císař Wu, dynastie Han (2. stol. př.n.l.), byl natolik zničen tragickou smrtí své milované konkubíny Li Fu Jen, že netoužil po ničem jiném, než ji vidět ještě jednou živou. Příležitosti se chopil kouzelník Shao Ong, který za pomocí vhodně situovaných lamp a svící promítal pohybující se obraz loutky oblečené do šatů Li Fu Jen natolik věrohodně, že císař uvěřil, že vidí stín své zesnulé milované (Needham, 1962).

Přestože temná komora (dírková komora) byla známá již v antickém Řecku, její užití se rozšířilo až v 16. století. Byla využívána k pozorování zatmění slunce, nejčastěji však jako pomůcka ke kresbě. Klasická štěrbina byla později nahrazena konvexní čočkou, čímž se docílilo větší světlosti. Takováto konstrukce s použitím jednoduché optiky umožňovala i zpětnou projekci. Popis prvního předchůdce projektoru, laterny magiky, se objevuje v díle Giovanni Battisty della Porty, *Magiae naturalis* vydané v Neapoli v roce 1558 (Porta, 1597). Kresby na skleněných destičkách byly osvětleny lampou a jejich obraz byl čočkou promítán na vhodné povrchy. Žádné z těchto zařízení však nenabízí reálný prostorový vjem. Již od Alhazena víme, že prostorový vjem je možný jen tehdy, vnímáme-li každým okem mírně odlišný obraz.

Zařízení, které je schopno vyvolat iluzi trojrozměrné scény pomocí dvou odlišných dvourozměrných obrázků, se nazývá stereoskop. Autorem prvního stereoskopu je Sir Charles Wheatstone, který jej předvedl před Královskou společností (*Royal Society*) v roce 1838. Ve svém rozsáhlém příspěvku (přes 12 000 slov) popsal experimenty, při kterých pozorovateli promítal pomocí jednoduchého optického zařízení obrazy totožných ob-



Obrázek 4: **Stereoskop Charlese Wheatstona.** Stereoskop užíval dvojici natočených zrcadel (A), které odrážely stereoskopické obrazy (E) pozorovateli. (Bill Gamber and Ken Withers Collections, 1996)

jektů zobrazených z odlišných úhlů pohledů. Hlavní částí stereoskopu byla dvě rovinná zrcadla svírající svou zadní částí pravý úhel (viz obrázek 4). Obrazy předloh byly mechanicky upevněny na posuvných stojanech, jejichž vzdálenost bylo možno regulovat. Mechanismus posuvu zajišťoval zachování stejné vzdálenosti u obou předloh. Pozorovatel sedící naproti ose úhlu svíraného zrcadly vnímá levým okem obraz levé předlohy, zatímco pravé oko pozoruje zrcadlový obraz pravé předlohy (Wheatstone, 1838).

Stereoskop se objevil ve stejné době jako vynález fotografie. Joseph Nicéphore Niépce byl první, kterému se podařilo zachytit a ustálit fotografický obraz. První fotografie pocházejí z roku 1825. Wheatstone společně s dvěma fotografiemi pořídil v roce 1841 první stereoskopickou fotografiu, jednalo se o portrét Charlese Babbage, otce programovatelných počítačů (Wilson, 2001).

Stereoskopické obrázky se staly mezi veřejností velmi populární. Vznikající zábavní průmysl využil tento objev a rozšířil jej po celém světě. Během následujícího století se objevovaly různé konstrukce umožňující zobrazovat nejen statické, ale i pohybující se obrazy. Thomas Edison experimentoval s trojrozměrnou projekcí již v samých začátcích filmové techniky. William Kennedy-Laurie Dickson při prvním předvedení kinematografu Thomasu Edisonovi uvádí ve svých pamětech následnou diskuzi, která se týkala možnosti projekce stereoskopických snímků. Přestože Edison patentoval i stereoskopickou verzi kinematografu není jasné, zda-li byl někdy zkonstruován. Edison zřejmě nevěřil v rozšíření této technologie. Dickson od Edisona později odchází a zakládá vlastní společnost zabývající se vývojem vlastních stereoskopických projektorů (Zone, 2007).

V roce 1895 britský fyzik John Anderton patentuje techniku projekce pomocí dvou projektorů s rozdílnou polarizací. Tento typ projekce se používá dodnes např. v kinech IMAX. První prostorové snímky mohli diváci vidět v roce 1915, jednalo se především o krátké filmy, které zaujaly především použitou technologií a ne dějem.

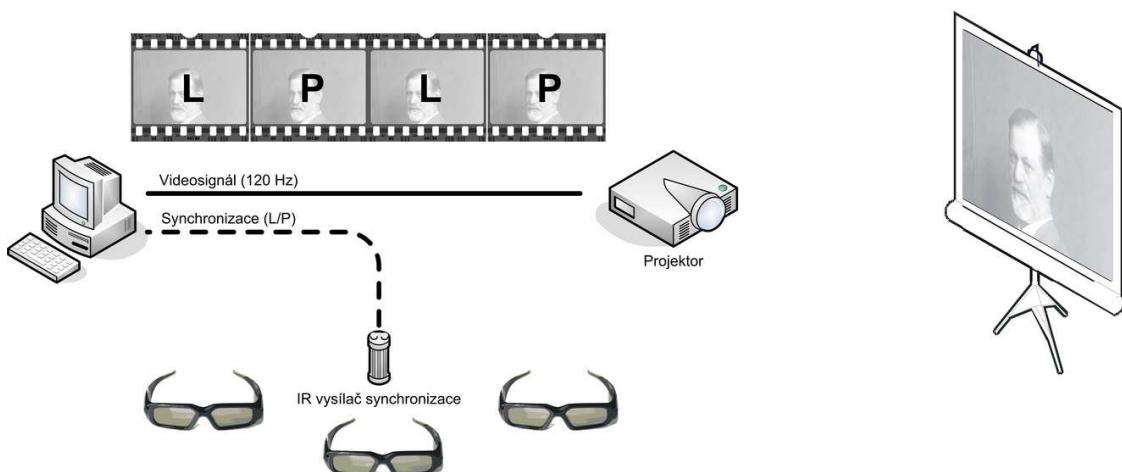
4.2 Současné stereoskopické techniky

Stereoskopická projekce umožňuje vytvořit při promítání na běžné plátno dojem prostorové hloubky. Používají se různé metody lišící se technickou náročností a kvalitou obrazu. V současné době brání hromadnému rozšíření především vysoká pořizovací cena. V České republice existuje pouze několik míst, kde je stereoskopická projekce provozována komerčně. Jedním z nich je kino IMAX v Praze. Trojrozměrná projekce ale nalezla své uplatnění v projekčních kancelářích a výzkumných ústavech. Následující přehled je výběrem z nejrozšířenějších současných technologií.

4.2.1 Stereoskop

Stereoskop (také Haploskop) je optické zařízení, které umožňuje každému oku promítat pomocí čoček, hranolů nebo zrcadel odlišné obrazy. Pohled může být zaostřen do nekonečna (bez akomodace čočky) a pomocí okuláru je přeostřen na rovinu obrazu, nebo je pohled upřen na blízký bod a zrcadlem nebo hranolem odkloněn správným směrem na promítaný obraz. Konstrukce stereoskopu, popsaná v předešlé kapitole, se od dob Charlese Wheatstona příliš nezměnila, jen stínítka byla nahrazena počítačovými monitory. Velmi populární a rozšířená byla i stereoskopické kukátky na diapozitivy nebo kotoučky.

Do této skupiny optických konstrukcí bychom mohli zařadit i zařízení označována jako náhlavní soupravy (*head-mounted display*, HMD). Jedná se o zařízení upevněná na hlavě, často jako součást helmy, která promítají obraz těsně před okem. Obraz z miniaturních displejů (v minulosti klasické CRT, nyní LCD a OLED) je převáděn soustavou čoček a zrcadel do zorného pohledu uživatele. Větší část vyráběných HMD umožňuje zobrazovat jen počítačem vytvořený obraz, existují však i typy, které umožňují kombinovat počítačem generované scény s reálným obrazem. Moderní HMD s širokým zorným polem ($> 60^\circ$) se uplatňují především ve vojenských aplikacích a leteckých simulátorech. Studie srovnávající konstrukce a parametry HMD byla publikována například v časopise Journal of Display Technology (Cakmakci – Rolland, 2006).

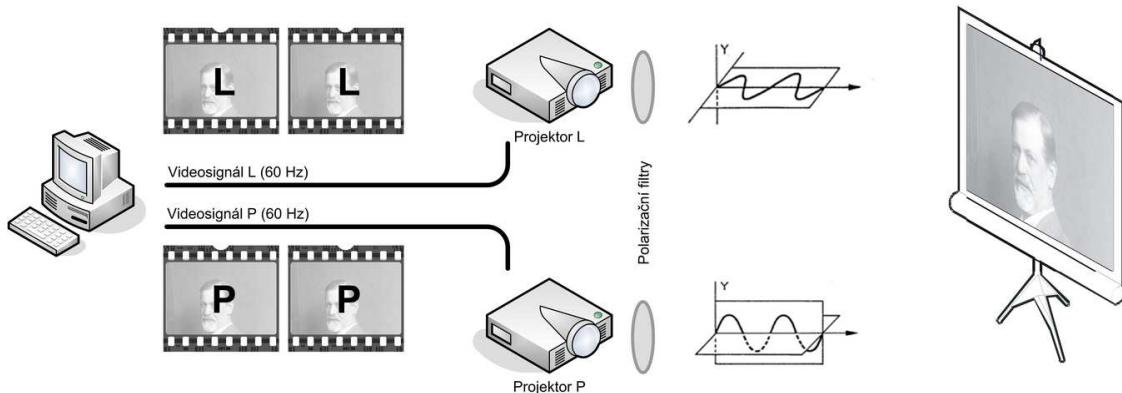


Obrázek 5: **Aktivní stereoprojekce.** Projekce tvořená projektorem promítajícím stereoskopické obrazy a aktivními brýlemi synchronizovanými s projektorem.

4.2.2 Aktivní stereoskopické brýle (LCD shutter glasses)

Tento typ brýlí umožňuje sledovat obraz tvořený prokládanými snímkům určenými střídavě pro levé a pravé oko. Projektor nebo monitor zobrazuje sekvenci tvořenou obrazy pro každé oko tak, že každý lichý snímek tvoří obraz pro levé oko a naopak sudé snímky jsou určeny pro pravé oko (viz obrázek 5). Skla brýlí obsahují vrstvu tekutých krystalů a dva polarizační filtry s navzájem kolmými osami polarizace. Molekuly tekutých krystalů jsou navíc umístěny mezi dvěma průhlednými elektrodami. Jsou-li elektrody připojeny ke zdroji elektrického proudu, jsou molekuly tekutých krystalů orientovány rovnoběžně s elektrickým polem a mění polarizaci procházejícího světla. Působením elektrického proudu je možné ovlivnit množství světla procházející sklem brýlí. Synchronizace brýlí s projektorem zajišťuje, že v daném okamžiku je jen jedno sklo průchozí pro světlo, tedy obraz.

Výhodou této technologie je relativně nízká cena a dobré optické parametry, které odstraňují výskyt duchů - částí obrazu určeného pro druhé oko. Nevýhodou je nutnost projekce s dvojnásobnou frekvencí obrazu, protože oko vidí každý druhý snímek. Obraz je navíc trochu tmavší z důvodu menší světelné propustnosti způsobené použitím polarizačních filtrů.



Obrázek 6: **Pasivní stereoprojekce.** Dva projektoru promítají rozdílné obrazy v navzájem kolmé polarizaci, brýle s polarizačními filtry propouštějí do každého oka vždy jen jeden obraz.

4.2.3 Pasivní stereoskopické brýle (Polarized glasses)

Další z rozšířených technik nabízejících prostorový vjem jsou pasivní systémy užívající dvojici projektorů promítajících obraz polarizovaným světlem. Obrazy určené pro levé a pravé oko jsou souběžně promítány projektoru na společné plátno (viz obrázek 6). Před objektivy projektorů jsou umístěny polarizační filtry (v závislosti na systému mohou být použity filtry s lineární nebo kruhovou polarizací). Podstatné je, aby každý z filtrů měl opačnou polarizaci a promítací plátno neměnilo polarizaci odraženého světla. Používají se speciální stříbrná (metalizovaná) projekční plátna. Tím se zabrání interferenci mezi promítanými obrazy. Pozorovatel sleduje obraz skrz brýle vybavené obdobnými polarizačními filtry. Sklíčkem brýlí projde vždy jen světlo se správnou polarizací, přičemž paprsky opačné polarizace jsou pohlceny.

Výhodou kruhové polarizace je, že divák může s těmito brýlemi natočit hlavu a nedojde k zhoršení kvality, které by nastalo u brýlí s lineární polarizací, kde je třeba udržovat vodorovnou pozici.

Zvláštním typem pasivního systému je projekce vytvořená v rámci výzkumného projektu automobilky Daimler. Tato technologie využívá toho, že čípky vnímající základní barvy nemají úzkopásmovou charakteristiku. Identický vjem zelené barvy vyvolá světlo vlnové délky 532 nm, tak i 518 nm. Projekce využívá dvojici projektorů, které se liší vlnovou délkou základních barev, ze kterých vzniká obraz. Brýle, které je potřeba pro tento typ projekce použít, mají filtry, které propouštějí vlnové délky právě jednoho projektoru. Každé oko tak vnímá svůj obraz, byť každý z nich je tvořený jinou sadou základních barev (Klein, 2009).

4.2.4 Anaglyf

Anaglyf je typ stereogramu tvořený dvěma překrývajícími se obrazy, z nichž každý je zobrazen za použití jiné barvy. Název pochází z řečtiny a dal by se volně přeložit jako opakovaná rytina, což plně vystihuje techniku jeho výroby. První anaglyf vyrobil Louis Ducos du Hauron. Technologii tisku si nechal patentovat v roce 1891 (Zone, 2007).

Obraz v anaglyfu je zakódovaný v jednom barevném kanále, není proto možné zachovat barevnou informaci originálních snímků. Pro prohlížení anaglyfů se používají jednoduché brýle s barevnými filtry, které odstíní druhý obraz. Nejčastěji se používá barevná kombinace červeného a modrozeleného filtru. Jedná se o jednu z nejméně finančně náročných technik, umožňující použití i v tisku. Zásadní nevýhodou je ztráta barevné informace a pro diváka nepříjemný pocit vznikající z odlišných barev, které musí každé oko vnímat. Tato technika se v posledních letech dočkala znovuoživení právě pro své jednoduché nasazení. V současné době ji používá například NASA pro prezentaci trojrozměrných snímků z povrchu Marsu. Fotografii povrchu Marsu (NASA, 2009) pořízenou touto technikou najeznete v příloze (viz obrázek 21).

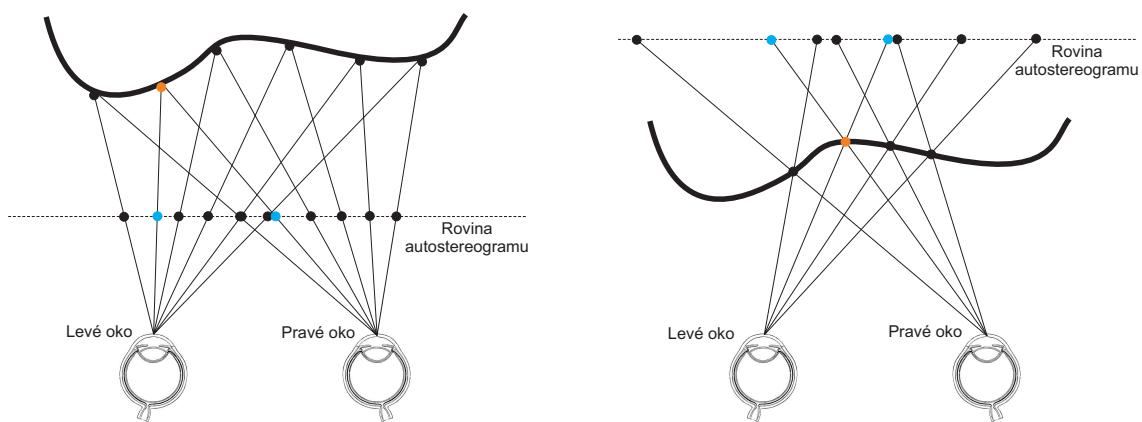
4.2.5 Autostereogram

V předchozích případech bylo vždy potřeba dvou obrazů, které byly nezávisle promítány na každé oko. Autostereogram je obraz vytvořený tak, aby při zaostření pohledu na jinou rovinu než je vlastní rovina obrazu, umožnil vytvořit prostorový vjem. Obraz autostereogramu je tvořen pravidelně se opakujícím vzorkem, který je mírně modifikován tak, aby při pohledu mimo jeho rovinu mohlo dojít k sloučení obrazu a vznikl odpovídající prostorový vjem (Tyler – Clarke, 1990).

Princip je znázorněn na obrázku 7. Levá část odpovídá pohledu s akomodací do ne-konečna, vpravo do blízka. Bodu objektu v prostoru (zvýrazněn oranžově) odpovídají dva body v rovině autostereogramu (modře), které odpovídají rozdílnému úhlu pohledu každého oka. Tímto způsobem počítač vypočítá polohy všech bodů obrazu a s použitím zvolené textury vytvoří autostereogram. (Valberg, 2005). Ukázku počítačem generovaného stereogramu včetně vstupní mapy prostorové hloubky najeznete v příloze (viz obrázek 20).

4.2.6 Lentikulární tisk

Dojem prostorové hloubky nabízí i lentikulární tisk (*lenticular prints*). Jedná se o obraz, který je pokryt tenkou fólií, tvořenou matricí optických čoček – lentikul, které usměrňují optické paprsky tak, že určité části obrazu jsou viditelné jen z určitého úhlu pohledu.



Obrázek 7: **Princip autostereogramů.** Obrázek zachycuje průsečíky paprsků na průmětně autostereogramu, které konvergují do bodů zobrazovaného trojrozměrného tělesa

Nejčastěji se obraz vytváří prokládaným tiskem dvou obrazů, tj. liché sloupce výsledného obrazu přísluší levému snímkovi, sudé pak pravému. Lentikulární fólie na povrchu pak zajistí, že levé oko uvidí jen sloupce levého obrazu a naopak. Fólie se dá použít jak pro tištěné podklady, tak i s drobnými úpravami pro LCD monitory.

4.3 Zařízení používaná pro výzkum binokulární disparity

Pro výzkum prostorového vnímání a disparity se používá celá řada optických přístrojů a pomůcek. Tabulka 1 uvádí přehled optických zařízení a jejich parametrů použitých ve výzkumech spojených s problematikou binokulární disparity. Zde uváděné informace byly vybrány ze souboru článků publikovaných v časopise Journal of Vision během posledních deseti let. Kromě technických parametrů je zde uveden i počet zúčastněných osob (N).

Z technických parametrů byly vybrány následující údaje: frekvence obrazu (f, Hz), použité rozlišení (pixelů), velikost bodu (VB, arcmin), vzdálenost stínítka od zkoumané osoby (V, cm) a velikost stimulu (VS, °).

Z tabulky vyplývá, že největší oblibě se těší klasický stereoskop, kde původně statické papírové předlohy byly nahrazeny obrazovkou počítače. Za zmínku stojí výzkum (Brooks, 2002), kde byla konstrukce výrazně zjednodušena použitím stínítka umístěného ve středové rovině monitoru. Výhodou tohoto řešení je, že není třeba dvou vzájemně synchronizovaných monitorů. Výzkumník se ale musí spokojit s polovinou projekční plochy oproti řešení s dvěma monitory.

Velmi rozšířena je i aktivní projekce s použitím 3D brýlí a CRT monitoru. Běžný CRT monitor je schopen dosahovat obnovovacích frekvencí vyšších než 120 Hz, tedy dostatečně vysokých, aby obraz neblikal při použití aktivních brýlí. LCD monitory se s tak vysokou obnovovací frekvencí nevyrábějí, neboť použití vyšší frekvence není u této technologie opodstatněné a nepřináší žádnou přidanou hodnotu. Výjimku tvoří jen LCD monitory speciálně určené pro 3D aplikace.

Pasivní stereoprojekce s polarizačními filtry byla použita jen v jedné studii (Serrano-Pedraza – Read, 2009). Stejně tak i autostereogramy, které byly použity pouze v práci zabývající se indukovaným pohybem spojeným čistě s vnímáním prostoru (Likova – Tyler, 2003).

¹FE-1 ferro electric shutter google, Cambridge Research Systems

²Obraz byl rozdělen přepážkou

³CrystalEyes shutter glasses

⁴Polarizované filtry

⁵RE7-CANE Stereo shutter glasses

⁶Software Psychtoolbox

⁷Software MATLAB Psychophysical Toolbox

Autor	N	Zařízení	Projektor	Rozlišení	f	VB	V	VS
Banks et al. (2001)	3	stereoskop	2 × CRT	1280×1024	75 Hz	2.5	42	35×35
Brooks (2002)	4	stereoskop ²	CRT	–	60 Hz	4.2×3.6	180	8.89×5.81
Krauskopf – Forte (2002)	2	stereoskop	CRT	–	–	1.0	–	–
Berends et al. (2003)	3	aktivní brýle ¹	CRT	1024×768	120 Hz	–	30	48×48
Likova – Tyler (2003)	5	autostereogram	CRT	–	–	–	70	29×22
Zhang et al. (2003)	3	aktivní brýle ¹	CRT	1024×768	120 Hz	2.1	57	–
Brooks – Stone (2004)	6	aktivní brýle ¹	CRT	–	240 Hz	2.5×3.7	250	7.3×6.2
Farell et al. (2004)	3	stereoskop	2 × CRT	–	–	1.5	93	10.5×16
Berends et al. (2005)	3	aktivní brýle ¹	CRT	1024×768	120 Hz	2.1	57	24×24
McKee et al. (2005)	6	stereoskop	2 × CRT	1024×768	74.9 Hz	0.71	122	–
Brooks – Stone (2006)	6	aktivní brýle ¹	CRT	–	240 Hz	2.5×3.7	250	7.3×6.2
Brooks – Gillam (2006)	4	stereoskop ⁷	2 × CRT	–	60 Hz	0.62	86	24.3×19
Lu et al. (2006)	17	aktivní brýle	CRT	–	120 Hz	–	57	13×6
Rauschecker et al. (2006)	–	systém VR	–	–	–	–	–	–
Knill (2007)	8+8	aktivní brýle ³	CRT	1280×1024	118 Hz	–	50	38×38
Tanabe et al. (2008)	–	aktivní brýle ⁵	CRT	–	85 Hz	0.14×0.14	57	–
Tsirlin et al. (2008)	3	stereoskop	2 × CRT	1024×768	100 Hz	1.9	60	14.25×10.7
Filippini – Banks (2009)	4	stereoskop	2 × CRT	–	–	0.53	39	–
Fukuda et al. (2009)	–	stereoskop	–	–	–	57	–	–
Serrano-Pedraza – Read (2009)	6	pasivní brýle ⁴	2 × DLP	1400×1050	–	–	165	42×32
Vlaskamp et al. (2009)	4	stereoskop ⁶	2 × CRT	2048×1536	75 Hz	1.6	39	–

Tabulka 1: Přehled zařízení užívaných ve výzkumech disparity.

5 Problém korespondence

Z předchozího textu víme, že úspěšná rekonstrukce polohy bodu v prostoru je podmíněná nalezením jeho průmětů v obou obrazech. Chceme-li tento typ úlohy řešit algoritmicky, můžeme postupovat takto: pro každý bod z levého obrazu nalezneme korespondující bod v pravém obrazu. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že oba obrazy jsou rektifikované. Rektifikace je nelineární geometrická transformace, která zaručí že korespondující bod bude ležet na epipoláře druhého obrazu (musí mít shodnou y -souřadnici). Polohu korespondujícího bodu poté nalezneme tak, že prohledáme všechny body na epipoláře, které leží v povoleném rozsahu disparity.

Stále jsme ale nezodpověděli klíčovou otázku, a to, jak poznáme, že jsme našli korespondující bod. Jedna z metod užívaných pro určení korespondence vychází z předpokladu, že body vzájemně korespondují tehdy, koresponduje-li jejich okolí. Ukázka okolí korespondujících bodů je znázorněna na obrázku 8. Porovnáme tedy množinu okolí všech potencionální bodů pravého obrazu a zvolíme ten, který má okolí nejvíce podobné okolí referenčního bodu levého obrazu. Matematicky jsme schopni vyjádřit podobnost korelací.

5.1 Korelace

O hodnotě korelace můžeme říct, že vyjadřuje míru podobnosti dvou funkcí. V technických aplikacích se často využívá pro nalezení známé funkce v zašumělém signálu. Ve zpracování obrazu pak pro nalezení předem známého vzoru v obrazu. Korelace (*cross-correlation*) funkcí $f_1(\vec{x})$ a $f_2(\vec{x})$ je matematicky definována jako integrál

$$f_1(\vec{x}) \star f_2(\vec{x}) = \iint_{-\infty}^{\infty} f_1^*(\vec{y}) f_2(\vec{y} + \vec{x}) d^N \vec{y}. \quad (1)$$

Definice spojité funkce nám však nedává použitelný návod, jak vypočítat hodnotu korelace pro námi uvažované případy. Pro zpracování obrazu se mnohem více hodí diskrétní reprezentace. S diskrétní reprezentací obrazu se můžeme setkat jak v oblasti digitálního zpracování, tak i v mozku. Diskrétní obraz je reprezentován konečnou množinou hodnot. Převod spojitého signálu na diskrétní podobu probíhá vzorkováním a následnou kvantizací. Vzorkování, tedy rozdelení obrazu na jednotlivé snímané body, probíhá na sítnici. Informace z každého fotoreceptoru reprezentuje jeden bod obrazu. Kvantizace pak převádí spojitý rozsah hodnot intenzity podnětu na pevně daný počet diskrétních hodnot. Diskrétní hodnota může být reprezentována frekvencí nervových impulzů. Uvedená analogie je sice zjednodušující, ale pro naše účely dostačující. Normalizovaná diskrétní korelace se zapisuje jako suma



Obrázek 8: **Okolí bodu (problém korespondence)** Zvýrazněné okolí korespondujících bodů na levém a pravém snímku.

$$C(f, g) = \frac{1}{n-1} \sum_{x,y} \frac{(f(x, y) - \bar{f})(g(x, y) - \bar{g})}{\sigma_f \sigma_g}, \quad (2)$$

kde n je počet bodů v porovnávaném obrazu. Povšimněme si podobnosti s modelem jednoduché buňky popsáno v odstavci 3.5, kde člen $2LR$ odpovídá součinu funkcí $f(x)$ a $g(x)$. V této rovnici jsou navíc zakomponovány členy, které normalizují rozdíly v jasu. Binokulární neurony oblasti V1 fungují obdobně, tedy jako soustava korelátorů citlivých na různé hodnoty disparity.

5.1.1 Hledání vzorů pomocí korelace

Podívejme se, jak bude tento postup fungovat na příkladu hledání vzoru v obrazu. Grafické znázornění výsledků korelace užité pro hledání daného vzoru (oblasti) je na obrázku 9. Oblast hledání nebyla pro názornost omezena epipolárou. V prvním případě (d) bylo na obrázku budovy (a) hledáno jedno z oken (b). Hodnota korelace je znázorněna barevným přechodem; modrá barva odpovídá záporným hodnotám korelace, červená kladným. Bez použití dalších omezení a jen na základě výsledků korelace, nejsme schopni jednoznačně určit polohu tohoto okna. Důvody jsou zcela jasné, daná budova má více oken stejné konstrukce a tudíž všechna okna mají vysokou hodnotu korelace s hledaným vzorem. Pro nalezení jediného řešení bychom museli do zpracování zavést další omezující podmínky, které by eliminovaly falešné shody. Situace se zjednoduší, hledáme-li objekt, který je natolik odlišný od jiných prvků v obrazu, že nemůže být zaměněn. Příkladem může být druhá oblast (c) reprezentující sochu s modrým pozadím. Spočtená korelace dosahuje

jen v jednom místě významného maxima, které skutečně odpovídá poloze hledaného objektu.

Shrneme tedy znovu celý postup, jakým způsobem získáme hodnoty disparity pro celý obraz: (1) Pro každý bod levého obrazu nalezneme jeho okolí, které pak porovnáváme s okolím všech bodů ležících na epipoláře pravého snímku. (2) Porovnáváme jen ty body, které se nacházejí v povoleném rozpětí disparity. Výrazně se tak sníží procento nesprávně určených shod. Porovnáváme-li pomocí korelace, obdržíme pro každou možnou polohu reálnou hodnotu. (3) Ze získaných hodnot vybereme maximum a pozici, ve které bylo maximum nalezeno, prohlásíme za korespondující bod. V mozku tento proces probíhá paralelně, přičemž vyšší vrstvy neuronů jsou pravděpodobně zodpovědné za selekci správné disparity.

5.2 Modely

Následuje stručný popis dvou výpočetních modelů, které se snaží formálně popsat funkce (v našem případě korelační model) probíhající v mozku. Vlaskamp et al. (2009); Filippini – Banks (2009) použili pro výpočet korelace výraz identický s již uvedeným vzorcem 2. Jediná drobná odlišnost je v konvoluci vyhodnocovaného okna s dvourozměrným symetrickým Gaussiánem. Tím zajistili vyšší váhu centrálních bodů na úkor periferních. Disparita byla určována v rozsahu -10° až $+10^\circ$ horizontálně.

Vzhledem k tomu, že nelze přímo porovnat disparitní mapu modelu s reprezentací disparity v mozku, musíme k počítačovému modelu připojit rozhodovací modul. Počítač musí učinit stejné rozhodnutí jako člověk, který na základě šumem rušeného podnětu vybírá jednu z více možností. V modelu Filippini – Banks (2009) je rozhodováno na základě porovnání s šablonou (*template matching*). Pro každý podnět autoři spočetli správnou podobu disparitní mapy, která poté sloužila jako šablona. Výstupy v podobě disparitní mapy (získané korelací) byly porovnány s každou z šablon a vybrána byla ta, která se nejvíce podobala. Kritériem podobnosti byla opět korelace, tentokrát nad celou oblastí disparitní mapy a šablony.

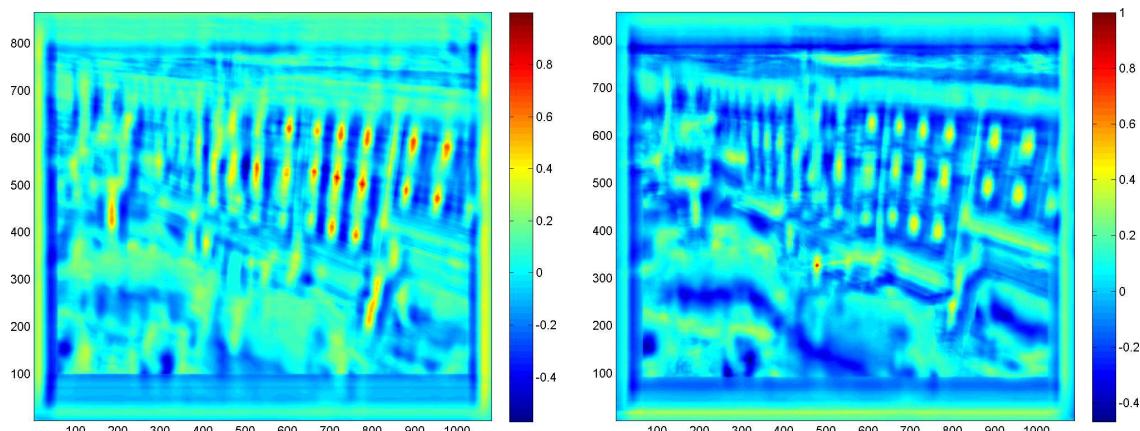
V modelu, který byl použit v navazující experimentální části, byla snaha replikovat postup popsaný výše. Podle popisu autorů byla vytvořena množina šablon správných disparitních map, která je součástí přiloženého softwaru. Takto vytvořený vyhodnocovací modul má ale výrazně odlišné výstupní parametry. Ve srovnání s Filippini – Banks (2009) je daleko citlivější a je schopen s vysokou úspěšností detekovat i téměř nerozpoznatelné vzory. Výstupní charakteristika je však nevhodná pro srovnání s lidmi. V době psaní



(a) **Vstupní obraz.** Fotografie klášterního Hradiska v Olomouci.

(b) **Oblast A.**

(c) **Oblast B.**



(d) **Korelace oblasti A.** Grafické znázornění hodnot korelační funkce vstupního obrazu a oblasti A ve všech jeho bodech. V obraze lze nalézt více lokálních maxim korelační funkce a proto nejsme schopni jednoznačně určit na základě vzájemné korelace polohu oblasti A ve vstupním obraze. (Grafická reprezentace korelační funkce je horizontálně převrácena z důvodu užití rozdílných souřadných soustav. V počítačové grafice je počátek soustavy obrazu $(0, 0)$ umisťován do levého horního rohu.)

(e) **Korelace oblasti B.** Hodnoty korelační funkce vstupního obrazu a oblasti B. V obraze se vyskytuje jen jedno významné maximum, které odpovídá správné poloze oblasti B ve vstupním obrazu. (Temně rudý bod $(480, 319)$ odpovídá místům s korelační funkcí blížící se hodnotě 1)

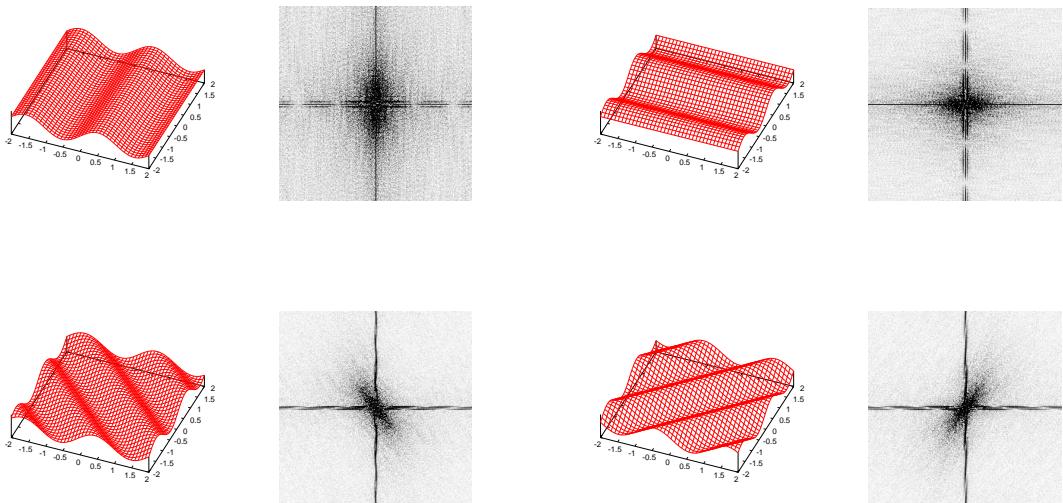
Obrázek 9: **Grafická reprezentace vzájemné korelace.** Ukázka použití korelační funkce pro nalezení pozice hledané oblasti.

tohoto textu se nepodařilo identifikovat příčinu odlišného chování od publikovaného modelu. Pravděpodobně bude nutno konzultovat postup s autory.

Protože se předešlý model nechoval podle očekávání, byla navržena alternativní forma rozhodovací funkce. Konstrukce nového modelu vychází z charakteristiky podnětů. Jedná se o sinusové vzory lišící se rotací kolem svislé osy. V analyzované disparitní mapě, která bude obsahovat řadu chyb způsobených šumem, nám stačí najít orientaci převažující sinusové frekvence. Zde se nám nabízí Fourierova transformace, která nám převede disparitní mapu z prostorové domény do frekvenční, ve které jsme schopni snadno nalézt frekvenci a fázi dominantní složky. V modelu byla použita diskrétní Fourierova transformace, která má pro jednodimenzionální hodnoty tuto podobu:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-ink2\pi/N}, n = 0, \dots, N - 1. \quad (3)$$

Ze vzniklého spektra jsme pak na základě rozložení hodnot reálné části detekovali o jaký vzor se jednalo. Obrázek 10 prezentuje ukázky amplitudového spektra používaných vzorů. V našem testovacím softwaru je diskrétní Fourierova transformace implementována v podobě Cooley-Tukey algoritmu. Pro účely detekce se porovnávaly sumy hodnot amplitud rozložených kolem hlavních poloos a uhlopříček. To odpovídá frekvencím v úhlu 0° , 45° , 90° a 135° . Odpověď byla stanovena, pokud se jednotlivé sumy lišily o více než 5 %. V další kapitole budou popsány výsledky dosažené použitím obou modelů.



Obrázek 10: **Analýza obrazů ve Fourierově spektru.** Obraz reálné složky centrovaného spektra Fourierovy transformace. Obrazy byly získány z používaných vzorů (SNR = 20 %).

Část II

Empirická část

6 Experimentální výzkum

Cílem experimentů bylo ověřit publikované parametry vnímání prostorové hloubky generované RDS stereogramy s přítomností šumu (Tyler, 1977; Vlaskamp et al., 2009; Filippini – Banks, 2009) a současně otestovat použitou techniku a software.

V tabulce 1 shrnující technické prostředky výzkumů, nalezneme pouze jeden výzkum realizovaný stereoskopickým projektorem. Můžeme si položit otázku, zda-li se jedná o vhodnou metodu pro testování prostorového vnímání. Na jedné straně nabízí možnost současně testovat více osob, zároveň ale částečně přicházíme o možnost striktní kontroly vjemového pole. V následujícím experimentu se ukázaly výsledky s použitím projektoru v souladu s hodnotami dosaženými s použití stereoskopu.

6.1 Technické vybavení použité v experimentální části

Experimenty byly prováděny na dvou typech zařízení. Jedná se o 3D HMD soupravu 5DT 800 Series, tvořenou dvěma displeji typu LCOS s maximálním rozlišením 800×600 bodů. Optický systém vytváří obraz o uhlopříčce 26° s obnovovací frekvencí 60 Hz. Toto zařízení bylo používáno jen v rámci pretestů pro prvotní stanovení vhodných parametrů.

Druhé zařízení je stereoskopický projektor InFocus DepthQ s technologií zobrazování DLP. Fyzické rozlišení projektoru je 800×600 s frekvencí obrazu 120 Hz. Maximální světelný tok projektoru je 1600 ANSI lumenů s kontrastním poměrem 2000:1. Velikost obrazu se pohybuje v rozmezí 2,7 až $21,6^\circ$ (uhlopříčka 0,8 m – 6,5 m) v závislosti na vzdálenosti plátna. V experimentech se používaly aktivní brýle NuVision 60 GX.

V laboratoři zpracování obrazu VŠB–TUO je k dispozici pět kusů těchto brýlí. Současně lze tedy testovat maximálně pět osob. Projekce probíhala v zatemněné místnosti, testované osoby byly usazeny před projekčním plátnem, odpovědi volily z několika možností zobrazených na kapesním počítači PDA s dotykovou obrazovkou. První sezení byla administrována na klasickém papírovém formuláři. Každý účastník měl vlastní PDA, přenos odpovědí probíhá bezdrátovou sítí. Na rozdíl od tlačítek, či podobných zařízeních zmiňovaných v odborné literatuře, nabízí PDA daleko univerzálnější způsob sběru dat. Umožňuje dynamicky měnit počet voleb a zároveň graficky zobrazuje zvolenou variantu. Bezdrátový způsob přenosu dat ulehčuje administraci testování, není třeba pokládat kabely k tlačítkům, což by bylo při větším počtu testovaných osob náročné.

6.1.1 Software pro generování podnětů

Pro experimentální část této bakalářské práce bylo třeba nalézt vhodný software pro generování testovacích obrazců. Vhodným a dostupným nástrojem se jeví Psychophysics Toolbox Version 3, který je citován ve více než 400 publikacích (Brainard, 1997). Jedná se o sadu nástrojů určených pro výzkumy v oblasti kognitivní psychologie, vybudovanou na základech matematického softwaru Matlab, případně Octave. Použití tohoto nástroje se však ukázalo jako problematické, zvláště ve spojení s 3D projektorem, byť quad-buffering měl být ve verzi 3 již funkční. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli implementovat vlastní řešení, přizpůsobené čistě pro generování random-dot stereogramů a umožňující automatické vyhodnocování odpovědí. Řešení je navrženo jako síťová aplikace, skládající se z několika vzájemně komunikujících modulů. Základním prvkem je aplikace generující vzory, disponující uživatelským rozhraním (viz obrázek 12). Tato část komunikuje se zobrazovacím serverem, který zobrazuje přijaté vzory na 3D projektor. Vyhodnocovací server dostává informace jak od aplikace generující vzory, tak od zařízení, přenášejících odpovědi účastníků výzkumu. Podrobnější popis tohoto systému vzhledem ke svému rozsahu a technickému charakteru bude vynechán. Zmíním zde jen klíčové rysy podstatné pro experimentální část.

Aplikace pro generování RDS umožňuje vytvářet následující vzory: nakloněné roviny (Filippini – Banks, 2009), sinusový průběh (Vlaskamp et al., 2009) a dislokované kruhy (Tanabe et al., 2008). Na obrázku 11 jsou zobrazeny sinusové průběhy použité v experimentální části. Pro každý vzor je možno definovat frekvenci, amplitudu a fázový posun generovaného vzoru. RDS může být tvořen jak jednotlivými pixely obrazu, tak body o velikost 4×4 pixelů. V takto vytvořeném obrazu je možno nastavit hustotu bodů, poměr mezi signálem a šumem (tj. body, které jsou umístěny ve správné disparitě a podporují prostorový vjem a body, které byly náhodně rozmístěny v obrazu a mají náhodnou disparitu) a velikostí obrazu pro pravé a levé oko. Podnět může být promítán nepřetržitě nebo v definovaném časovém okně.

V systému je integrován generátor testovacích sad. Ten na základě nastavených parametrů (rozsahu testovaných hodnot a minimálního kroku) generuje testovací sadu společně s protokolem, který je použit pro vyhodnocování odpovědí zkoumaných osob. Hodnoty jsou generovány generátorem náhodných čísel.

Pro správné zobrazení stereoskopických snímků je vyžadována podpora OpenGL a quad-bufferingu. V případě, že počítač nedisponuje vhodnou grafickou kartou, je možno software využívat pouze ke generování testovacích vzorů, bez možnosti je správně zobrazit. Další alternativou je použít vygenerované obrazy jako předlohu pro anaglyf. Ukázky

takto generovaných obrazců s různými parametry šumu jsou v příloze této práce (viz obrázky 19). Aplikace a potřebné knihovny jsou k dispozici na přiloženém CD.

6.2 Zkoumaný soubor

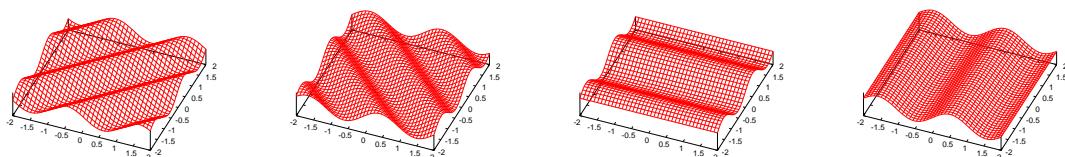
Experiment byl proveden na souboru 12 osob, mužů ve věku 22 – 41 let ($\mu = 25,17 \sigma = 5,42$). Jednalo se o studenty a zaměstnance Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě. Jedno sezení trvalo necelé tři hodiny. Experiment byl avizován jako dobrovolný test zrakových schopností, studenti byli odměněni bonusovými body k zápočtu. Po ukončení testů byl účastníkům objasněn princip experimentu. Studenti si mohli poté vyslechnout krátkou přednášku o možnostech 3D zobrazování a principu programování aplikací pro tento typ zobrazovačů. U jednoho účastníka experimentu se vyskytla mírná bolest hlavy, která však po přerušení rychle odezněla.

6.3 Metoda

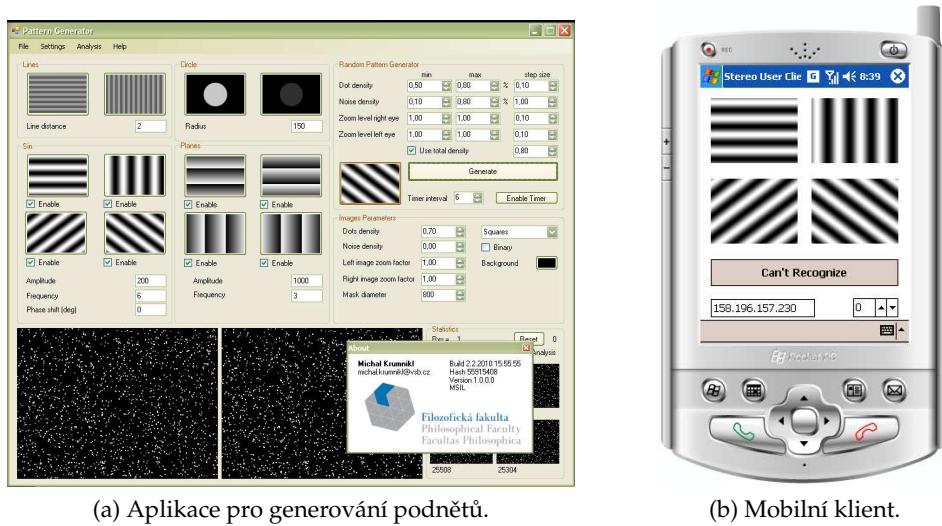
Testování probíhalo během několika sezení v laboratoři mobilních a embedded systémů katedry informatiky. Místnost byla během experimentů zatemněná, cílem bylo zajistit shodné podmínky pro všechny účastníky. Obrázek 18 zachycuje rozmístění projektoru, plátna a účastníků v místnosti.

Podněty v podobě random-dot stereogramů (RDS) byly generovány softwarem, který vznikl v rámci této práce. Obrazy byly promítány na plátno vzdálené 3,3 m od zkoumaných osob, což odpovídá stimulu velikosti $21,5 \times 15,9$ deg. Stereogramy byly tvořeny body o velikost 1,6 arcmin s průměrnou hustotou 5,58 bodů/deg². Body byly generovány náhodně a rozmístěny rovnoměrně po celé ploše. Promítány byly čtyři vzory tvořené sinusovitým průběhem s frekvencí 0,3 cyklů/deg (viz obrázek 11).

Systém vylosoval náhodnou posloupnost vzorů a pro každý z nich zvolil parametry zobrazení. Jednotlivé obrazy se lišily úrovní šumu, který se pohyboval v rozmezí 0 – 87,5 %



Obrázek 11: **Generované sinusové vzory.** Grafická vizualizace hodnot disparity v generovaných obrázcích.



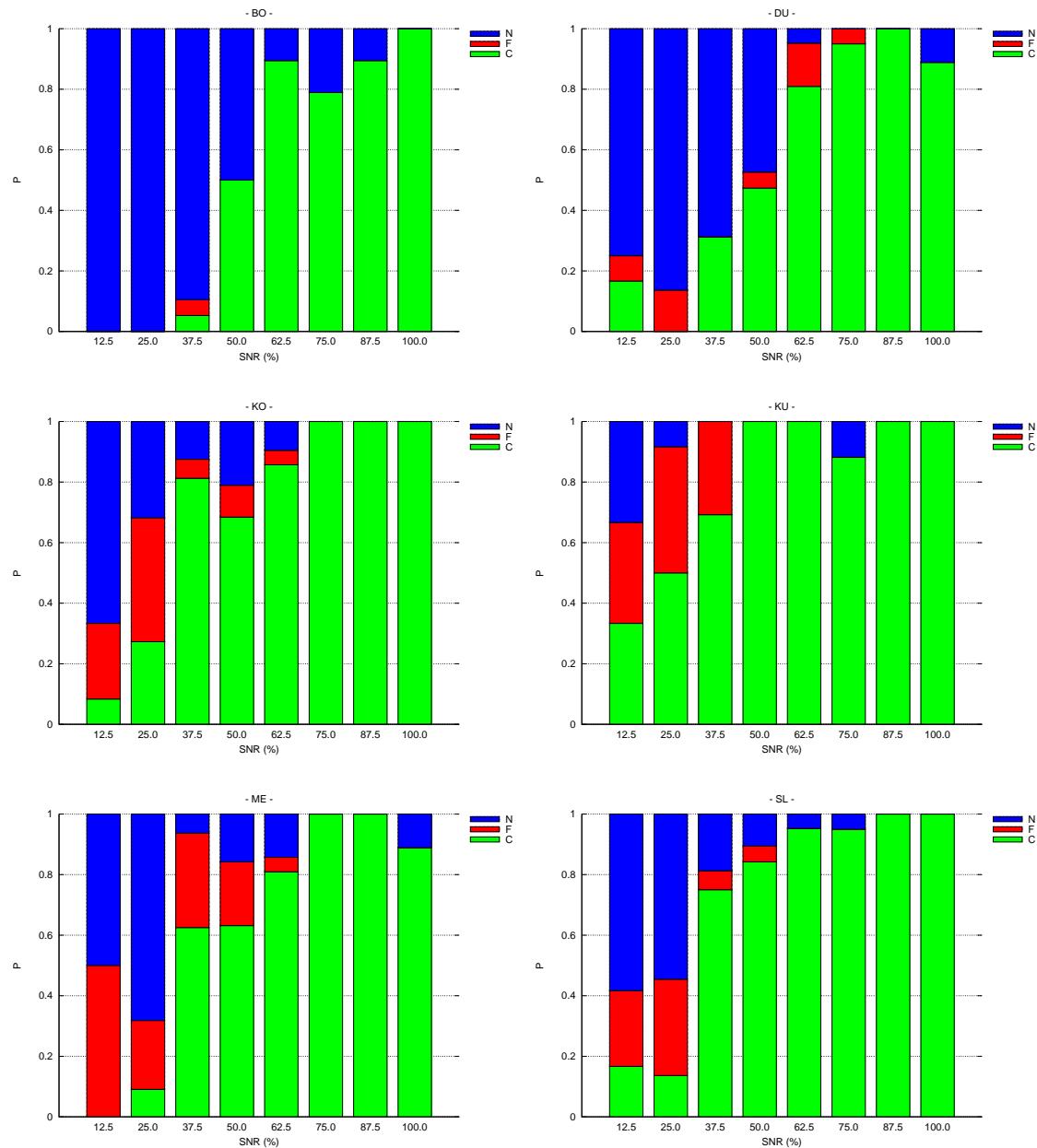
Obrázek 12: **Testovací software.** Screenshoty aplikací vyvinutých pro realizaci experimentálního výzkumu.

s krokem 12,5 %. Šum nahrazoval původní body, hustota bodů tak zůstala konstantní. Jednotlivé obrazy byly zobrazeny po dobu 600 ms, poté měli účastníci vybrat jednu ze čtyř možných variant nebo zvolit možnost, že vzor nerozeznali. Účastníci neměli zpětnou odezvu, zda-li byl jejich výběr správný. Mezi jednotlivými pokusy byl promítán jednoduchý vzor s nulovou disparitou, který umožňoval zaostřit pohled na projekční plochu. Odpovědi byly účastníky zaznamenávány na papírový arch nebo přímo vybírány na obrazovce PDA a online vyhodnocovány. Práh vnímaní byl stanoven jako hodnota, při které dosahoval pozorovatel úspěšnosti vyšší než 75 % (Vlaskamp et al., 2009; Filippini – Banks, 2009).

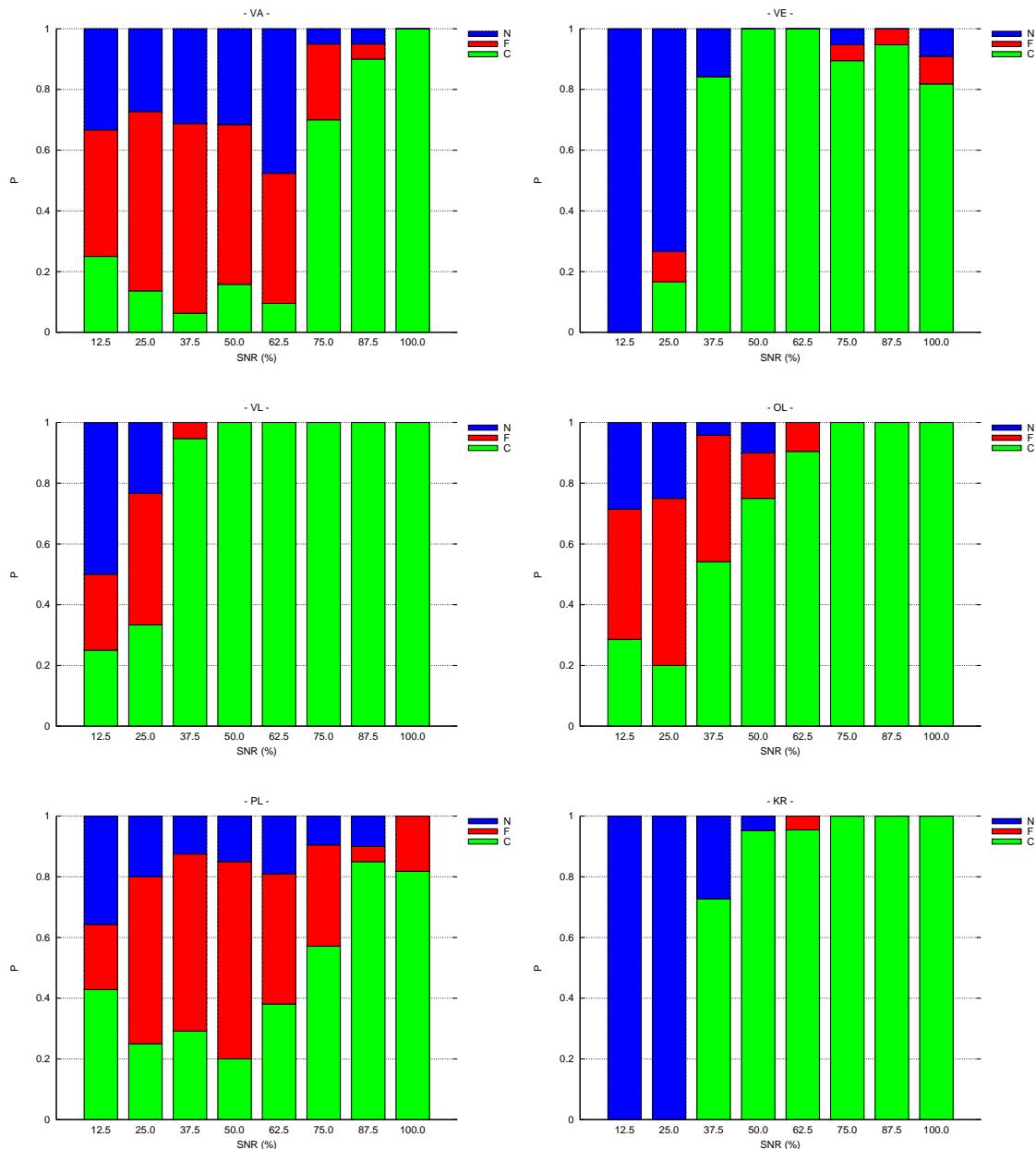
6.4 Výsledky

Grafy 13, 14 zobrazují histogramy četností odpovědí jednotlivých účastníků pro každou z hodnot SNR¹². Zelená barva je přiřazena množině správných odpovědí, červená nesprávně určeným a modrá reprezentuje situace, kdy nebyla uvedena žádná odpověď. Pohledem na zmíněné grafy pozorujeme od hodnoty 37,5 % prudký nárůst správných odpovědí. S hodnotou SNR = 62,5 % a vyšší byla již většina odpovědí správných. Zajímavá je také velká míra variability odpovědí mezi jednotlivými osobami. U dvou účastníků (PL, VA) jsme zaznamenali výrazně sníženou schopnost detektovat prostorové obrazce generované random-dot stereogramy.

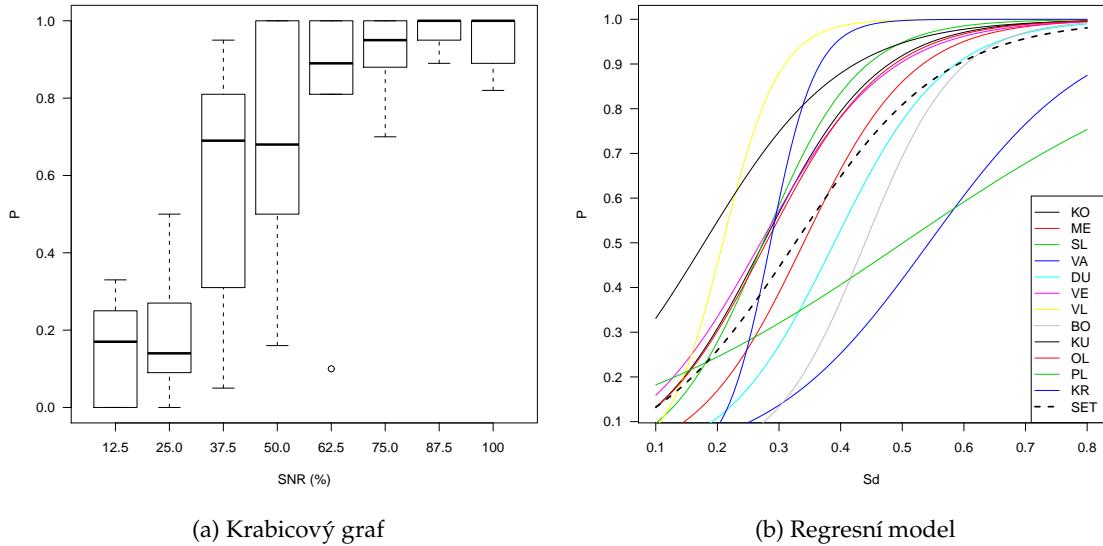
¹²Signal to Noise Ratio, poměr signálu k šumu.



Obrázek 13: Histogramy odpovědí (i)



Obrázek 14: Histogramy odpovědí (ii)



Obrázek 15: **Grafy závislosti P/SNR**

Sloučíme-li hodnoty vzorků všech účastníků do jednoho souboru, můžeme krabicovým grafem znázornit průměrné střední hodnoty a variabilitu pro jednotlivé hodnoty SNR (obrázek 15a). V krabicovém grafu představuje střední čára medián, hranice krabice odpovídají 1. a 3. kvartilu. Extrémní hodnoty ($1,5 \times$ interkvartilový interval) reprezentují koncové úsečky. Odlehlá měření jsou znázorněna kolečky.

Získané výsledky korespondují s údaji publikovanými Filippini – Banks (2009), respektive test neprokázal statisticky významný rozdíl mezi oběma soubory výsledků ($t = -0,7955$, $df = 11,398$, $p\text{-value} = 0,4426$). Porovnávány byly pouze hodnoty dosažené se stereogramy s frekvencí 0,3 cyklů/deg a amplitudou 150 arcmin. Práh byl stanoven hodnotou 75 % správných odpovědí. Porovnání bylo provedeno Welchovým t-testem. Jedná se o obdobu t-testu, kde je počet stupňů volnosti referenčního t-rozdělení approximován. Je tak možno porovnávat střední hodnoty za nestejného rozptylu. Hodnoty dosažené Filippini – Banks (2009, Figure 4) byly odečteny na základě otištěného grafu.

6.5 Regresní analýza

Regresní analýza nám slouží k popisu empirických vztahů mezi nezávislými a závislými veličinami. Úkolem regresní analýzy je vytvořit model, regresní funkci. Typ regresní funkce se často volí na základě rozboru naměřených dat, fyzikálních vztahů nebo před-

pokládaných závislostí. Pro popis vztahu mezi úspěšností rozpoznání stereoskopických podnětů a poměrem signál šum zvolil Filippini – Banks (2009) Gaussovou funkci, definovanou jako

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (4)$$

kde $a > 0, b, c > 0$ jsou reálné konstanty. Pro náš model jsme ale zvolili logistickou funkci, jejíž tvar se zdá lépe popisovat očekávanou závislost. Logistická funkce má širokou škálu aplikací, v praxi se používá jako model růstu populace, koncentrace či v ekonomii pro prognázování poptávek. Tato funkce dobře postihuje saturační charakter námi popisované veličiny. Logistickou funkci lze zapsat jako

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{e^z}{1 + e^z} \\ z &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k, \end{aligned} \quad (5)$$

kde $\beta_1 \dots \beta_k$ jsou reálné hodnoty. Vhodnost našeho výběru potvrzuje i Akaikovo informační kritérium (AIC), což je kritérium hodnotící kvalitu regrese (Akaike, 1974). Hodnoty AIC pro celkový soubor byly následující: Gaussova funkce – 1579, logistická funkce – 1510. Nejnižší hodnota AIC indikuje nejlepší model. Tabulka 2 obsahuje hodnoty parametrů regresní funkce pro jednotlivé případy a následně pro celý zkoumaný soubor. Grafické zobrazení je na obrázku 15b. Pravděpodobnost úspěšnosti rozpoznání vzoru v našem souboru můžeme modelovat výrazem

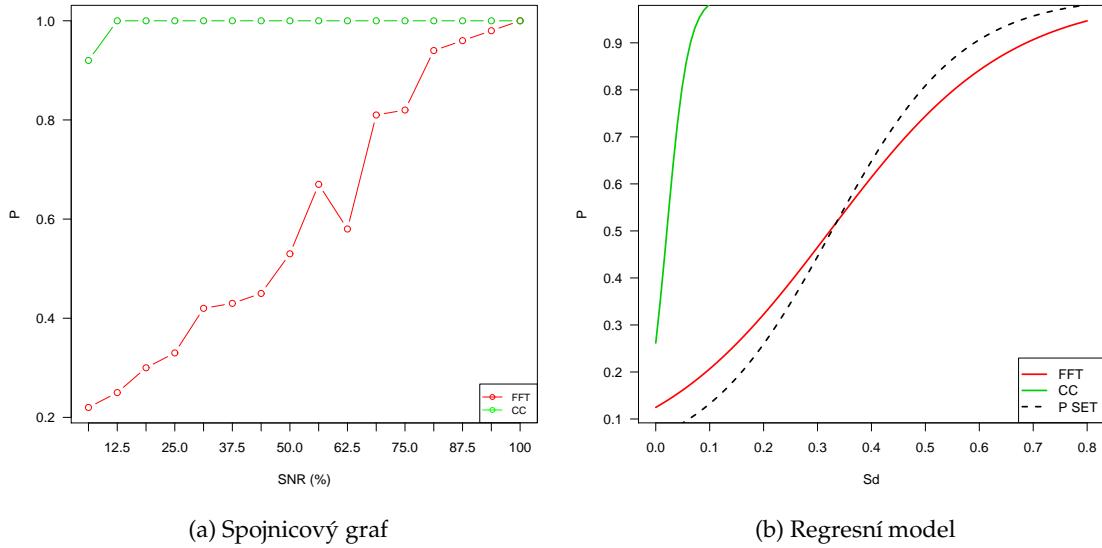
$$P(SNR) = \frac{e^{-2.7098+8.3040 \cdot SNR}}{1 + e^{-2.7098+8.3040 \cdot SNR}}. \quad (6)$$

Podle tohoto modelu dosahujeme 75% úspěšnosti od hodnoty $SNR = 0,46$.

6.6 Model

Stejné podněty, které byly promítány účastníkům, jsme paralelně vyhodnocovali počítačovými modely popsanými v kapitole 5. Disparita byla počítána korelací s velikostí korelačního okna 30 pixelů, což odpovídá 48 arcmin. Filippini – Banks (2009) zvolili velikost 18 arcmin, což odpovídá velikosti standardní odchylky jimi použité Gaussovy funkce v konvoluci s korelovanou oblastí. Vlaskamp et al. (2009) použil okna velikosti 6, 18 a 30 arcmin s přibližně shodnými výsledky.

Výsledky obou modelů jsou znázorněny grafem na obrázku 16a. Vynesené hodnoty odpovídají úspěšnosti jednotlivých modelů pro různé hodnoty SNR. Jak můžeme vidět,



Obrázek 16: Grafy závislosti P/SNR počítačových modelů.

model používající porovnávání předlohy (CC) pro rozlišení vzoru vykazuje extrémní úspěšnost. To je dáné tím, že vybírá jen z omezeného souboru předem definovaných šablon. Pro obecné případy, nebo složitější vzory by byl nepoužitelný. Druhá alternativa, užívající Fourierovu transformaci (FFT) je obecnější a je schopna detektovat libovolné sinusovité průběhy s rozdílnou frekvencí a fází. Volně by se dalo říct, že odpovídá na otázku, jak je natočený dominantní sinusovitý průběh v disparitní mapě. Oproti modelu založeném na korelace nevyžaduje znát předem správné řešení.

Získané hodnoty byly podrobeny regresní analýze a jsou zobrazeny společně s výsledkem získaným lidmi (P SET) na obrázku 16b. Parametry logistické funkce pro oba modely jsou následující: CC ($\beta_0 = -1,0374$, $\beta_1 = 50,2933$, $SE_{\beta_0} = 0,5804$, $SE_{\beta_1} = 10,9456$), FFT ($\beta_0 = -1,9491$, $\beta_1 = 6,0339$, $SE_{\beta_0} = 0,1842$, $SE_{\beta_1} = 0,4483$).

Model s FFT tak dosahuje 75% úspěšnosti od hodnoty SNR = 0,51, což je velmi blízké hodnotě 0,46 u lidí.

6.7 Diskuze

Filippini – Banks (2009) zkoumali schopnost vnímat prostorovou hloubku nejen v závislosti na poměru signál šum, ale i hodnotě amplitudy vzorů. V této práci jsme se omezili jen na první z uvedených faktorů. Experiment zahrnující oba faktory by byl vzhledem

k počtu 12 účastníků časově neúnosný. Pro srovnání, Filippini – Banks (2009) prováděli výzkum se 4 účastníky, přičemž dva byli samotní autoři. Experiment představuje velkou psychickou zátěž a velmi brzo se u účastníků dostavuje únava a klesá výkon. U více než poloviny osob k tomu docházelo již po hodině, přestože mezi jednotlivými sadami byly desetiminutové přestávky.

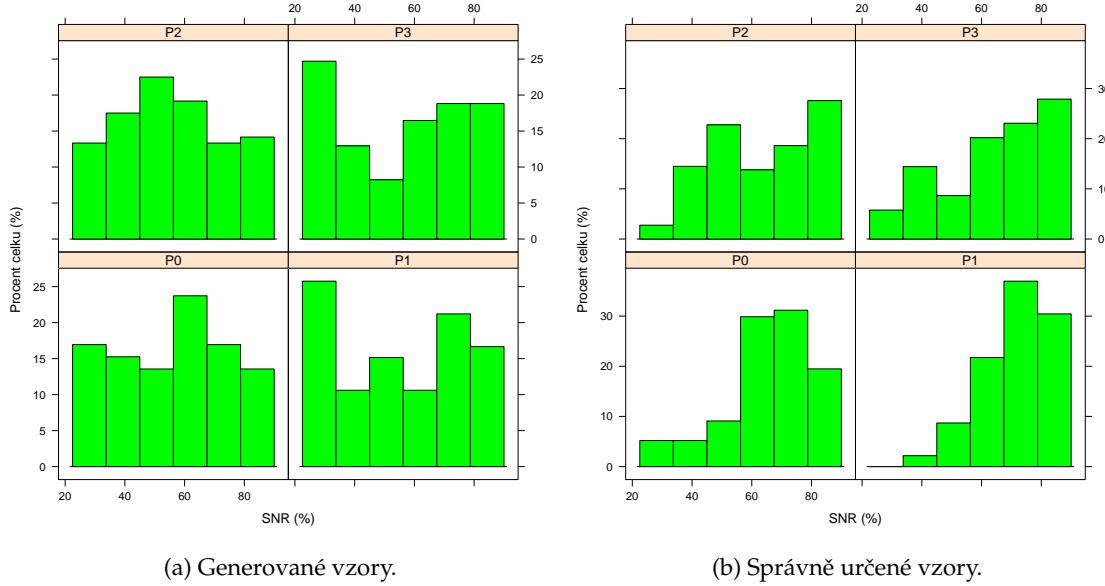
V průběhu našeho experimentu někteří účastníci uváděli subjektivní rozdíly v obtížnosti vnímat některé vzory. V původním experimentu Filippini – Banks (2009) se používaly jen dva vzory. Zde jsme použili čtyři ve snaze snížit vliv náhody. V histogramech odpovědí jednotlivých účastníků lze také vidět rozdílný postoj k výběru odpovědí. U některých se vyskytuje minimální počet špatných odpovědí, zatímco jiní se snažili tipovat odpovědi ve všech případech.

Přestože teoreticky jsou si všechny vzory rovny (jedná se o sinusový vzor se stejnou frekvencí a amplitudou, pootočený o 0° , 45° , 90° a 135°) výsledky tomu nenasvědčují. Na základě pozorování účastníků experimentu, jsme si položili otázku, zda-li skutečně neexistuje signifikantní rozdíl v úspěšnosti rozlišování jednotlivých vzorů. V průběhu sezení někteří účastníci spontánně komentovali své pocity při pozorování různých vzorů. Opakovaně se vyskytl názor, že uhlopříčné vzory jsou hůře viditelné, než rovinné.

Na obrázku 17b je zobrazen histogram úspěšných odpovědí pro jednotlivé vzory a hodnoty SNR. χ^2 -test potvrzuje rozdíly mezi jednotlivými vzory ($\chi^2 = 38,9178$, $df = 15$, p-value = 0,0006592). Vzhledem k relativně malému počtu vzorků je možné, že tyto rozdíly byly způsobeny nerovnoměrným rozdělením vygenerovaných podnětů. Histogram výskytu jednotlivých testovacích konfigurací je na obrázku 17a. Rozdělení jednotlivých variant se však zdá být z pohledu generátoru v pořádku ($\chi^2 = 19,4246$, $df = 15$, p-value = 0,1951). Výsledky odpovědí vzorů P0 a P1 jsou rozloženy rovnoměrně ($\chi^2 = 5,5057$, $df = 5$, p-value = 0,3573). Jedná se o identické vzory, které byly použity v citovaném článku. V případě námi přidaných vzorů P2 a P3 však vidíme odchylku v úspěšnosti odpovědí.

Příčina rozdílné úspěšnosti v rozpoznávání použitých vzorů by měla být předmětem dalšího zkoumání. Náš relativně malý soubor nemá příliš silnou argumentační hodnotu. Je zde řada faktorů, které nelze kontrolovat stejně dobře jako při použití stereoskopu. Přinejmenším zde musíme zmínit mírně odlišné pozorovací úhly jednotlivých účastníků a především volnost v pohybech hlavy, která by byla u stereoskopu fixovaná. Pokud by se však tyto rozdíly potvrdily, znamenaly by rozpor se současným korelačním modelem vyhodnocování disparity v oblasti V1. Citlivost tohoto detektoru by měla být invariantní k rotaci, jsou-li dodrženy ostatní parametry.

V navazující práci bychom tento experiment rádi zopakovali a zároveň rozšířili množství sledovaných faktorů. Pro dosažení většího počtu měření by bylo patrně vhodnější



Obrázek 17: Histogram odpovědí členěný podle typu podnětů.

angažovat menší počet osob, ale s těmi provést více dílčích měření. V našem experimentu se ukázalo, že i při počtu 12 osob docházelo k mnoha organizačním problémům. Dále bychom navázali v práci nad současným počítačovým modelem, opravili zřejmou chybu v rozhodovacím modelu na bázi korelace disparitní mapy s množinou šablon a dále jej rozvíjeli.

Jedním z možných budoucích výzkumných témat by byla i otázka, zda-li při sledování tohoto typu podnětů nedochází k procesu adaptace a postupnému zlepšování výsledků v těchto experimentech. Zvláště zajímavé by to bylo s ohledem na fakt, že ve většině publikovaných výsledků byli součástí experimentálního souboru samotní autoři. Prezentované údaje pak nemusí odpovídat běžné populaci.

Osoba	β_0	β_1	SE_{β_0}	SE_{β_1}	AIC
KO	-2.9627	10.7767	0.6328	1.8724	101.57
ME	-3.8590	11.3522	0.7043	1.8338	104.07
SL	-3.5285	12.8782	0.7234	2.2651	89.213
VA	-4.1130	7.5687	0.7006	1.3129	136.79
DU	-4.3252	11.1047	0.7453	1.7502	108.94
VE	-2.6466	9.7939	0.5578	1.6930	119.37
VL	-4.539	21.744	1.1050	4.9120	69.80
BO	-5.9087	13.4409	0.9351	2.0652	95.904
KU	-1.6006	8.9658	0.7434	2.2776	66.631
OL	-2.9496	10.5634	0.6107	1.7911	115.06
PL	-1.8749	3.7405	0.4404	0.8887	191.62
KR	-7.788	27.230	1.7150	5.7820	55.295
Celý soubor	-2.7098	8.3040	0.1597	0.4038	1510

Tabulka 2: **Tabulka parametrů regresního modelu.**

7 Závěry

Procesy spojené s prostorovým vnímáním jsou předmětem intenzivního zkoumání mnoha vědeckých disciplín. V této práci jsme se pokusili o interdisciplinární přístup, spojující kognitivní psychologii s informatikou a diskrétní matematikou. Z široké škály problémů spadajících do oblasti prostorového vidění jsme se zaměřili na základní nízkoúrovňové procesy detekce disparity, probíhající v primární zrakové oblasti.

V úvodní části jsme shrnuli současné poznatky o prostorovém vidění, mechanismech probíhajících v primárním zrakové oblasti a způsobu kódování binokulární disparity. Seznámili jsme se s dlouhou historií zkoumání zraku a procesů s ním spojených. Klíčové objevy moderní doby jsou spojeny se jmény Charlese Wheatstona a Santiago Ramóna y Cajala. Prostorové vnímání by nebylo možno zkoumat bez řady optických přístrojů a pomůcek. Ukázali jsme si jak klasickou konstrukci stereoskopu, která se od dob prvního uvedení příliš nezměnila, tak i moderní optické projekční systémy umožňující kvalitní stereoskopickou projekci. V závěru teoretické části jsme velmi hrubě načrtli matematické metody, které se dají použít pro modelování procesů vytvářejících disparitní mapu.

Experimentální část této práce prezentuje experiment zaměřený na schopnost vnímat prostorovou hloubku z podnětů, které jsou zasaženy šumem. Zvolili jsme metodu využívající random-dot stereogramů. Díky výpočetní technice jsme schopni je velmi snadno vytvářet a modifikovat. Tento typ stereogramů je velmi vhodný pro naše experimenty. Díky němu jsme schopni eliminovat veškerá monokulární vodítka, která se běžně spolu-podílí na prostorovém vnímání. Osobám v našem experimentu byly promítány obrazy, ve kterých byla prostorová hloubka kódována jen binokulární disparitou. Je-li daný obraz pozorován jen jedním okem, pozorovatel není schopen vidět nic než shluk náhodný bodů. Dosažené výsledky byly srovnatelné s výzkumem (Filippini – Banks, 2009).

Hlavním přínosem této práce bylo vytvoření funkčního prostředí pro výzkum prostorového vidění. S běžným stereoskopickým projektorem se podařilo dosáhnout výsledků srovnatelných s nejčastěji užívanými zařízeními, stereoskopy. Vyvinutý software je schopen generovat nejfrekventovanější vzory užívané ve výzkumech disparity a v budoucnu je možno jej dále rozšiřovat.

Změřené prahy vnímání prostoru v random-dot stereogramech se shodují s publikovanými údaji. Zajímavým zjištěním byl rozdíl v úspěšnosti rozpoznávání některých typů vzorů. Tyto výsledky ale bohužel nelze v současnosti porovnat s jinými publikovanými údaji vzhledem k tomu, že tato kombinace vzorů byla použita poprvé. Jedná se o zajímavý jev, který by mohl být předmětem dalšího výzkumu.

8 Literatura

- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on automatic control*. 1974, 19, 6, s. 716–723.
- AKIYUKI ANZAI, I. O. – FREEMAN, R. D. Neural Mechanisms for Processing Binocular Information II. Complex Cells. *Journal of Neurophysiology*. 1999, 82, s. 909–924. ISSN 0022-3077.
- ALAIS, D. *Binocular Rivalry*. MIT Press, 2004. ISBN 978-0262012126.
- ANTON, M. Vidění - jak a kde. *Česká oční optika*. 1 2004, , 3, s. 20. ISSN 1211-233X.
- BACKUS, B. T. et al. Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*. 1999, 39, 6, s. 1143–1170. ISSN 0042-6989.
- BANKS, M. S. – HOOGE, I. T. C. – BACKUS, B. T. Perceiving slant about a horizontal axis from stereopsis. *J. Vis.* 8 2001, 1, 2, s. 55–79. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/1/2/1/>.
- BERENDS, E. M. – ZHANG, Z.-L. – SCHOR, C. M. Eye movements facilitate stereo-slant discrimination when horizontal disparity is noisy. *J. Vis.* 12 2003, 3, 11, s. 780–794. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/3/11/12/>.
- BERENDS, E. M. – LIU, B. – SCHOR, C. M. Stereo-slant adaptation is high level and does not involve disparity coding. *J. Vis.* 2 2005, 5, 1, s. 71–80. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/5/1/7/>.
- BOWERS, B. *Sir Charles Wheatstone*. Institution of Engineering and Technology, The Science Museum, 2001. ISBN 978-0852961032.
- BRAINARD, D. H. The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*. 1997, 10, s. 433–4363. ISSN 0169-1015.
- BROOKS, K. R. Interocular velocity difference contributes to stereomotion speed perception. *J. Vis.* 4 2002, 2, 3, s. 218–231. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/2/3/2/>.
- BROOKS, K. R. – GILLAM, B. J. The swinging doors of perception: Stereomotion without binocular matching. *J. Vis.* 6 2006, 6, 7, s. 685–695. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/6/7/2/>.

- BROOKS, K. R. – STONE, L. S. Stereomotion speed perception: Contributions from both changing disparity and interocular velocity difference over a range of relative disparities. *J. Vis.* 12 2004, 4, 12, s. 1061–1079. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/4/12/6/>.
- BROOKS, K. R. – STONE, L. S. Stereomotion suppression and the perception of speed: Accuracy and precision as a function of 3D trajectory. *J. Vis.* 10 2006, 6, 11, s. 1214–1223. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/6/11/6/>.
- BURNS, W. E. *The Scientific Revolution: A World History Companion*. ABC-CLIO, Incorporated, 2001. ISBN 978-0874368758.
- CAJAL, S. R. *Texture of the nervous system of man and the vertebrates*. Springer, 1st edition, 1999. ISBN 978-3211830574.
- CAKMAKCI, O. – ROLLAND, J. Head-Worn Displays: A Review. *Journal of Display Technology*. 2006, 2, 3, s. 199–216.
- CAMPBELL, F. W. – GUBISCH, R. W. Optical quality of the human eye. *The Journal of physiology*. 10 1966, 186, 3, s. 558–78. ISSN 0022-3751.
- CUMMING, B. G. – DEANGELIS, G. C. The physiology of stereopsis. *Annual Reviews in Neuroscience*. 2001, 24, s. 203–238. ISSN 0147-006X. doi: 10.1146/annurev.neuro.24.1.203. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.203>.
- CURCIO, C. A. et al. Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology*. February 1990, 292, 4, s. 497–523. doi: 10.1002/cne.902920402.
- DEVALOIS, R. L. – DEVALOIS, K. K. *Spatial Vision*. Oxford Psychology Series, OUP USA, 1991. ISBN 978-0195066579.
- DOWLING, J. Retina. *Scholarpedia*. 2007, 2, 12, s. 3487.
- EUCLID. *Elementa Geometriae*. Venice - The Bancroft Library, University of California, Berkeley, 1482. Dostupné z: <http://www.rarebookroom.org/Control/eucgeo/index.html>.
- FARELL, B. – LI, S. – MCKEE, S. P. Coarse scales, fine scales, and their interactions in stereo vision. *J. Vis.* 6 2004, 4, 6, s. 488–499. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/4/6/8/>.

- FILIPPINI, H. R. – BANKS, M. S. Limits of stereopsis explained by local cross-correlation. *J. Vis.* 1 2009, 9, 1, s. 1–18. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/9/1/8/>.
- FINGER, S. *Origins of Neuroscience: A History of Explorations into Brain Function*. Oxford University Press, USA, 2001. ISBN 978-0195146943.
- FLEET, D. – HEEGER, D. – WAGNER, H. Modelling Binocular Neurons in the Primary Visual Cortex, 1997. Dostupné z: citesear.ist.psu.edu/fleet97modelling.html.
- FRENCH, R. *Medicine before Science: The Business of Medicine from the Middle Ages to the Enlightenment*. Cambridge University Press, 1st edition, 2003. ISBN 978-0521007610.
- FUKUDA, K. et al. A reevaluation of the tolerance to vertical misalignment in stereopsis. *J. Vis.* 2 2009, 9, 2, s. 1–8. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/9/2/1/>.
- GREENBLATT, G. *A History of Neurosurgery*. American Association of Neurological Surgeons, 1996. ISBN 978-1879284173.
- HOWARD, I. P. *Seeing in Depth*, 1. I. Porteous, Toronto, 1st edition, 2002. ISBN 978-0195367607.
- HOWARD, I. P. – ROGERS, B. J. *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford University Press Inc, USA, 1996. ISBN 978-0195084764.
- HUBEL, D. H. – WIESEL, T. N. Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *The Journal of Physiology*. 1968, 195, 1, s. 215–243. ISSN 0022-3751.
- IRBY-MASSIE, G. L. – KEYSER, P. T. *Greek Science of the Hellenistic Era: A Sourcebook*. Routledge, 1st edition, 2001. ISBN 978-0415238472.
- JELÍNEK, R. – DOSTÁL, M. – AL., Z. L. *Histologie, Embryologie*. Universitas Carolina, 2009. Dostupné z: www.lf3.cuni.cz/histologie/materialy/doc/skripta.pdf.
- JUNAS, J. *Příkopníci medicíny*. Avicenum, zdravotnické nakladatelství n. p., Praha, 1977.
- KLEIN, A. *Interference Filters (Wavelength multiplex visualisation)*, INFITEC GmbH. stereoscopy.com, 2009. Dostupné z: <http://www.stereoscopy.com/faq/interference-filters.html>.

- KNILL, D. C. Robust cue integration: A Bayesian model and evidence from cue-conflict studies with stereoscopic and figure cues to slant. *J. Vis.* 5 2007, 7, 7, s. 1–24. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/7/7/5/>.
- KOUKOLÍK, F. *Lidský mozek : funkční systémy : normy a poruchy*. Praha : Portál, 2000. ISBN 80-7178-379-X.
- KRAUSKOPF, J. – FORTE, J. D. Influence of chromaticity on vernier and stereo acuity. *J. Vis.* 12 2002, 2, 9, s. 645–652. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/2/9/6/>.
- LIKOVA, L. T. – TYLER, C. W. Spatiotemporal relationships in a dynamic scene: stereomotion induction and suppression. *J. Vis.* 6 2003, 3, 4, s. 304–317. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/3/4/5/>.
- LINDBERG, D. C. *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler*. University Of Chicago Press, 1996. ISBN 978-0226482354.
- LINDBERG, F. A. *Science in the Middle Ages (Chicago history of science and medicine)*. Chicago University Press, 1980. ISBN 978-0226482330.
- LU, H. – TJAN, B. S. – LIU, Z. Shape recognition alters sensitivity in stereoscopic depth discrimination. *J. Vis.* 1 2006, 6, 1, s. 75–86. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/6/1/7/>.
- MARR, D. – POGGIO, T. A computational theory of human stereo vision. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 204, s. 301–28, 1979.
- MASKE, R. – YAMANE, S. – BISHOP, P. O. End-Stopped Cells and Binocular Depth Discrimination in the Striate Cortex of Cats. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 229, s. 257–276, 1986.
- MCKEE, S. P. – VERGHESE, P. – FARELL, B. Stereo sensitivity depends on stereo matching. *J. Vis.* 11 2005, 5, 10, s. 783–792. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/5/10/3/>.
- NAIRNE, J. S. *Psychology*. Wadsworth Publishing Company; 5 Har/Pas edition, 2008. ISBN 978-0495504559.
- NASA. *Mars Exploration Program*. National Aeronautics and Space Administration, 2009. Dostupné z: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/>.

-
- NEEDHAM, J. *Science and Civilisation in China: Volume 4, Physics and Physical Technology; Part 1, Physics.* Cambridge University Press, 1962. ISBN 978-0521058025.
- OREL, M. – FACOVÁ, V. *Člověk, jeho mozek a svět.* Grada, 2009. ISBN 978-8024726175.
- PORTEA, G. D. *Magiae naturalis libri viginti.* Bavarian State Library, 1597.
- RAUSCHECKER, A. M. – SOLOMON, S. G. – GLENNERSTER, A. Stereo and motion parallax cues in human 3D vision: Can they vanish without a trace? *J. Vis.* 12 2006, 6, 12, s. 1471–1485. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/6/12/12/>.
- READ, J. C. A. – CUMMING, B. G. Does depth perception require vertical-disparity detectors? *J. Vis.* 11 2006, 6, 12, s. 1323–1355. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/6/12/1/>.
- SERRANO-PEDRAZA, I. – READ, J. C. A. Stereo vision requires an explicit encoding of vertical disparity. *J. Vis.* 4 2009, 9, 4, s. 1–13. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/9/4/3/>.
- SINĚLNIKOV, R. D. *Atlas anatomie člověka,* 3. Avicenum, zdravotnické nakladatelství n. p., Praha, 1970.
- SQUIRE, L. R. *The history of neuroscience in autobiography.* Society for Neuroscience, 1996. ISBN 978-0916110512.
- TANABE, S. – YASUOKA, S. – FUJITA, I. Disparity-energy signals in perceived stereoscopic depth. *J. Vis.* 3 2008, 8, 3, s. 1–10. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/8/3/22/>.
- THIBOS, L. N. – STILLA, D. L. – BRADLEY, A. Characterization of spatial aliasing and contrast sensitivity in peripheral vision. *Vision Research.* 1 1996, 36, 2, s. 249–258. ISSN 0042-6989.
- TSIRLIN, I. – ALLISON, R. S. – WILCOX, L. M. Stereoscopic transparency: Constraints on the perception of multiple surfaces. *J. Vis.* 5 2008, 8, 5, s. 1–10. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/8/5/5/>.
- TYLER, C. W. Spatial limitations in stereopsis. In *Proceedings of SPIE,* 120, s. 36–42, 1977.
- TYLER, C. W. – CLARKE, M. B. The autostereogram. In *Proceedings of SPIE,* 1256, s. 182–197, 1990.

-
- VALBERG, A. *Light Vision Color*. Wiley, 1st edition, 2005. ISBN 978-0470849026.
- VALOIS, K. K. D. *Seeing (Handbook Of Perception And Cognition)*. Academic Press, 2nd edition, 2000. ISBN 978-0124437609.
- VLASKAMP, B. N. S. – FILIPPINI, H. R. – BANKS, M. S. Image-size differences worsen stereopsis independent of eye position. *J. Vis.* 2 2009, 9, 2, s. 1–13. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/9/2/17/>.
- WADE, N. J. *A Natural History of Vision*. The MIT Press, 2000. ISBN 978-0262731294.
- WADE, N. J. – TATLER, B. W. *The Moving Tablet of the Eye: The Origins of Modern Eye Movement Research*. Oxford University Press, USA, 1st edition, 2005. ISBN 978-0198566175.
- WHEATSTONE, C. Contributions to the Physiology of Vision. Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision. *Philosophical Transactions*. 1838, 128, s. 371–394.
- WILSON, M. *Sir Charles Wheatstone*. The Institution of Engineering and Technology, 2nd edition, 2001. ISBN 978-0852961032.
- ZHANG, Z.-L. – BERENDS, E. M. – SCHOR, C. M. Thresholds for stereo-slant discrimination between spatially separated targets are influenced mainly by visual and memory factors but not oculomotor instability. *J. Vis.* 11 2003, 3, 11, s. 710–724. ISSN 1534-7362. Dostupné z: <http://journalofvision.org/3/11/6/>.
- ZONE, R. *Stereoscopic Cinema and the Origins of 3-D Film, 1838-1952*. University Press of Kentucky, 2007. ISBN 978-0813124612.
- ŠIKL, R. Alhazen (965 - 1039): jeho dílo v kontextu starověké a středověké optiky. *Česko-slovenská psychologie*. 2004, 48, 4, s. 364–377.

Část III

Přílohy

I. Seznam použitých zkratek a symbolů

B/W	– Černobílý obraz (Black-and-white)
cpd	– Jednotka prostorového rozlišení (cycles per degree)
CRT	– Běžná obrazovka tvořená katodovou trubicí (Cathode Ray Tube)
CT	– Počítačová tomografie (Computed tomography)
DLP	– Technologie projektorů, obraz tvoří mikroskopicky malá zrcadla (Digital Light Processing)
FFT	– Rychlá Fourierova transformace (fast Fourier transform)
HMD	– Virtuální brýle, náhlavní souprava (Head Mounted Display)
LCD	– Displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
LCOS	– Technologie projektorů, obraz je tvořen odrazem od tekutých krystalů (Liquid crystal on silicon)
MRI	– Magnetická rezonance (Magnetic Resonance Imaging)
OLED	– Displej využívající technologii organických elektroluminiscentních diod (Organic light-emitting diode)
PDA	– Osobní digitální asistent, kapesní počítač s dotykovou obrazovkou (Personal Digital Assistant)
PET	– Pozitronová emisní tomografie (Positron Emission Tomography)
VR	– Virtuální realita (Virtual Reality)

II. Abstrakt bakalářské práce

Vysoká škola: **Univerzita Palackého v Olomouci** Fakulta: **Filozofická**
Katedra: **Psychologie** Akad. rok: **2009/2010**

ABSTRAKT BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno: **Ing. Michal Krumnikl**
Obor: **Psychologie – jednooborová** Rok imatrikulace: **2007**
Vedoucí práce: **Prof. PhDr. Alena Plháková, CSc** Oponent:
Počet stran: **64**

Název bakalářské práce:

Prostorové vidění

Abstrakt bakalářské práce:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou prostorového vnímání, se zaměřením na problém korespondence a disparity. Práce obsahuje historický přehled výzkumů vnímání, používaných technik a přístupů. Shrnuje teoretický základ fyziologie vidění a vyhodnocovacích procesů v primární zrakové kůře. V experimentální části se zabývá výzkumem prahu vnímaní vzorů v random-dot stereogramech a ověřuje některé publikované výsledky.

Klíčová slova:

prostorové vidění, disparita, problém korespondence v obrazu, stereoskop, stereoskopický projektor, primární zraková oblast, binokulární neurony, vertikální disparity

III. Abstract of Bachelor's Thesis

University: **Univerzita Palackého v Olomouci** Faculty: **Filozofická**
Department: **Psychologie** Academic year: **2009/2010**

ABSTRACT OF BACHELOR'S THESIS

Name: **Ing. Michal Krumník**
Field of study: **Psychology** Matriculation year: **2007**
Supervisor: **Prof. PhDr. Alena Plháková, CSc** Opponent:
Number of pages: **64**

Title of Bachelor's Thesis::

Spatial Vision

Abstract of Bachelor's Thesis:

This thesis is aimed at exploring the principles of stereopsis, especially at problems of correspondence and binocular disparity. The work consists of two parts, the theoretical part reviews historical background and current state of vision research, used techniques and approaches. This part describes basic physiological processes taking place in primary visual cortex. The experimental part consists of the tests of perceiving random-dot stereograms.

Keywords:

stereopsis, binocular disparity, correspondence problem, stereoscope, stereoscopic video projector, primary visual cortex, binocular neurons, vertical disparity

IV. Zadání bakalářské práce

Vysoká škola: **Univerzita Palackého v Olomouci** Fakulta: **Filozofická**
Katedra: **Psychologie** Akad. rok: **2009/2010**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno: **Ing. Michal Krumnikl**
Osobní číslo: **I07394**
Obor: **Psychologie – jednooborová**

Název bakalářské práce:

Prostorové vidění

Zásady pro vypracování:

1. Studium literatury z oblasti psychologie vnímání, se zaměřením na prostorové vidění, zejména na tzv. problém korespondence v prostorovém vidění (correspondence problem in spatial vision).
2. Příprava laboratorního výzkumu, jehož cílem je srovnat dosavadní výsledky počítačové simulace spojování binokulárních obrazů s formováním trojrozměrného zrakovému vjemu u lidí.
3. Realizace výzkumu u 15 studentů VŠ v laboratoři zpracování obrazu Katedry informatiky Vysoké školy báňské - Technické univerzity v Ostravě.
4. Převážně kvantitativní zpracování výsledků práce a jejich interpretace.
5. Zpracování diskuze, závěru a souhrnu.

Seznam doporučené literatury::

- Cumminsová, D.: Záhady experimentální psychologie. Praha, Portál, 1995

- Eysenck, M. W., Keane, M. T. Kognitivní psychologie. Praha. Academia, 2008
- Howard, I. P., Rogers, J. Seeing in depth: Volume 1: Basic Mechanics/ Volume 2: Depth Perception 2-Volume set. Oxford University Press, 2008
- Faugeras, O., Luong, Q.-T. The geometry of multiple images. The MIT Press, 2001
- The Journal of Vision, vydavatel The Association for Research in Vision and Ophthalmology

Vedoucí bakalářské práce:

Prof. PhDr. Alena Plháková, CSc

Datum zadání bakalářské práce:

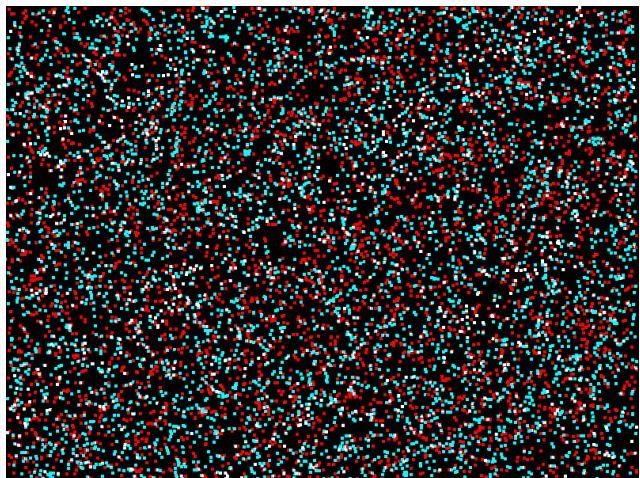
12.2.2009

Termín odevzdání bakalářské práce: **březen 2010**

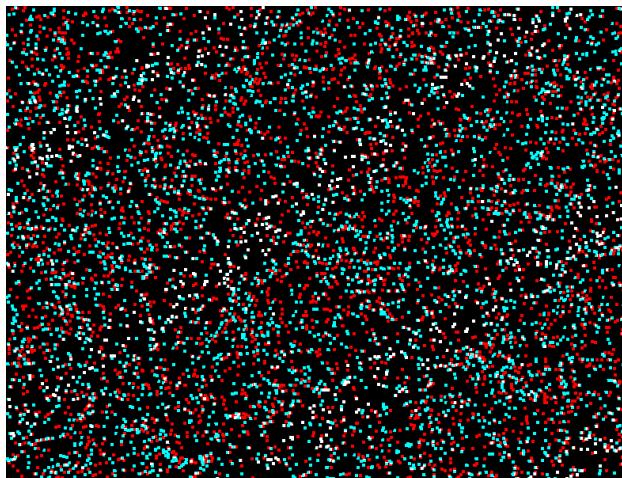
V. Ilustrační obrázky a fotografie



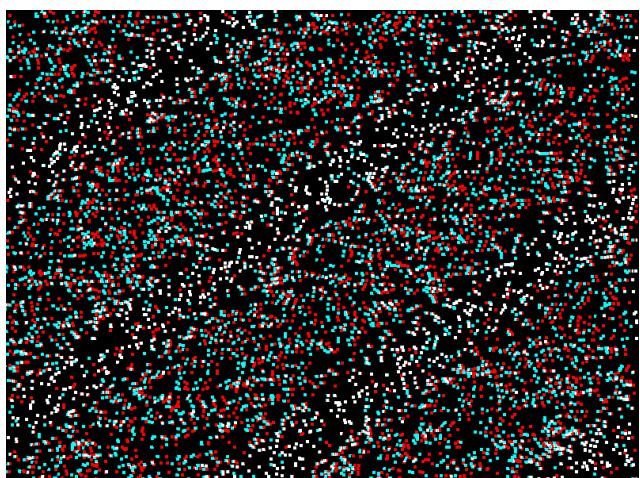
Obrázek 18: **Místo, kde probíhaly experimenty** V pozadí projekční plátno, vpravo od plátna na stole modul pro IR synchronizaci brýlí, v popředí stereoskopický projektor.



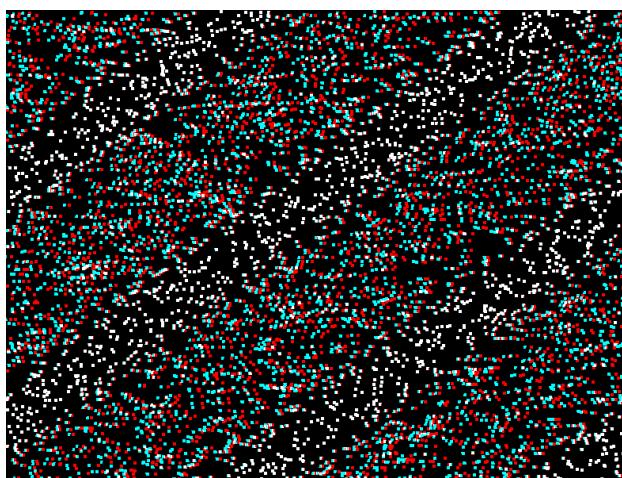
(a) SNR 25 %



(b) SNR 50 %

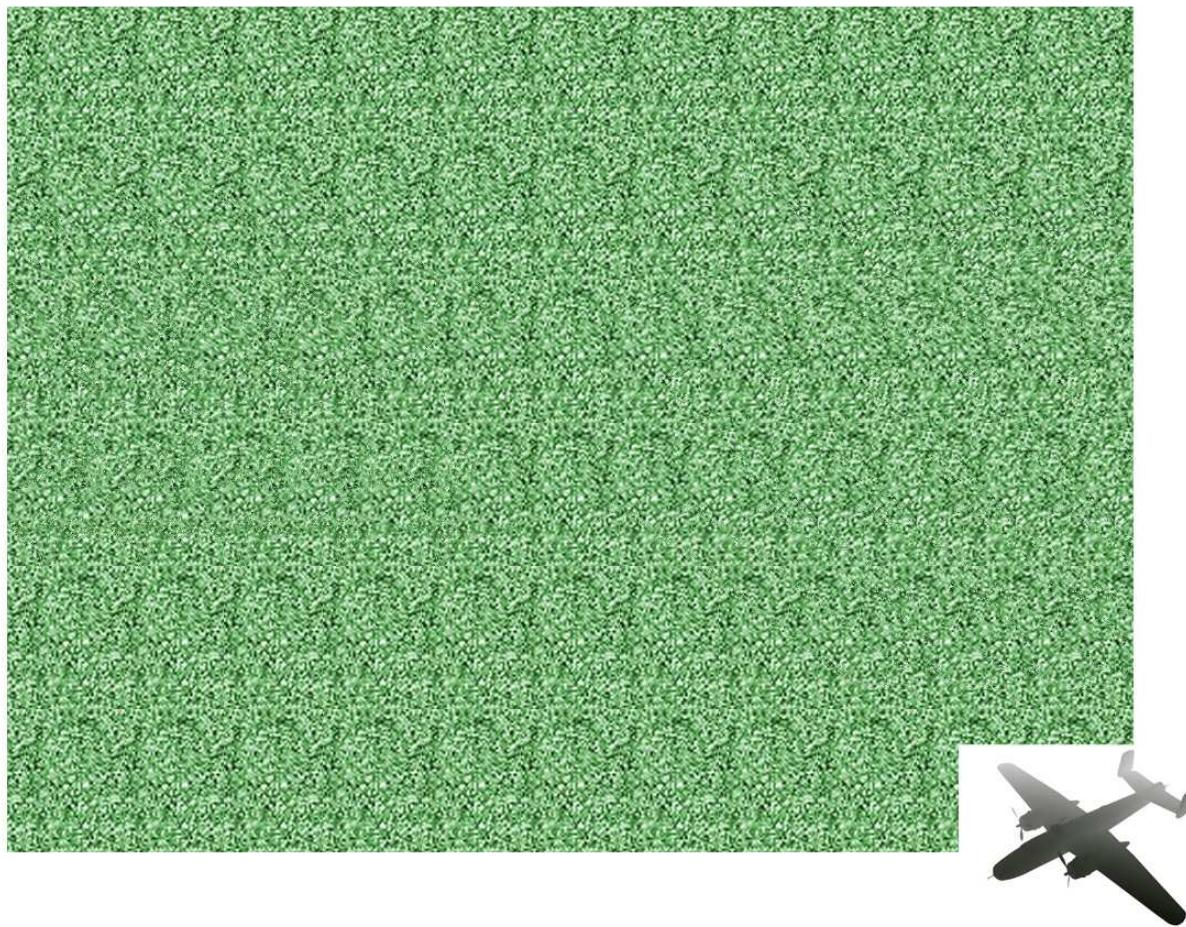


(c) SNR 75 %

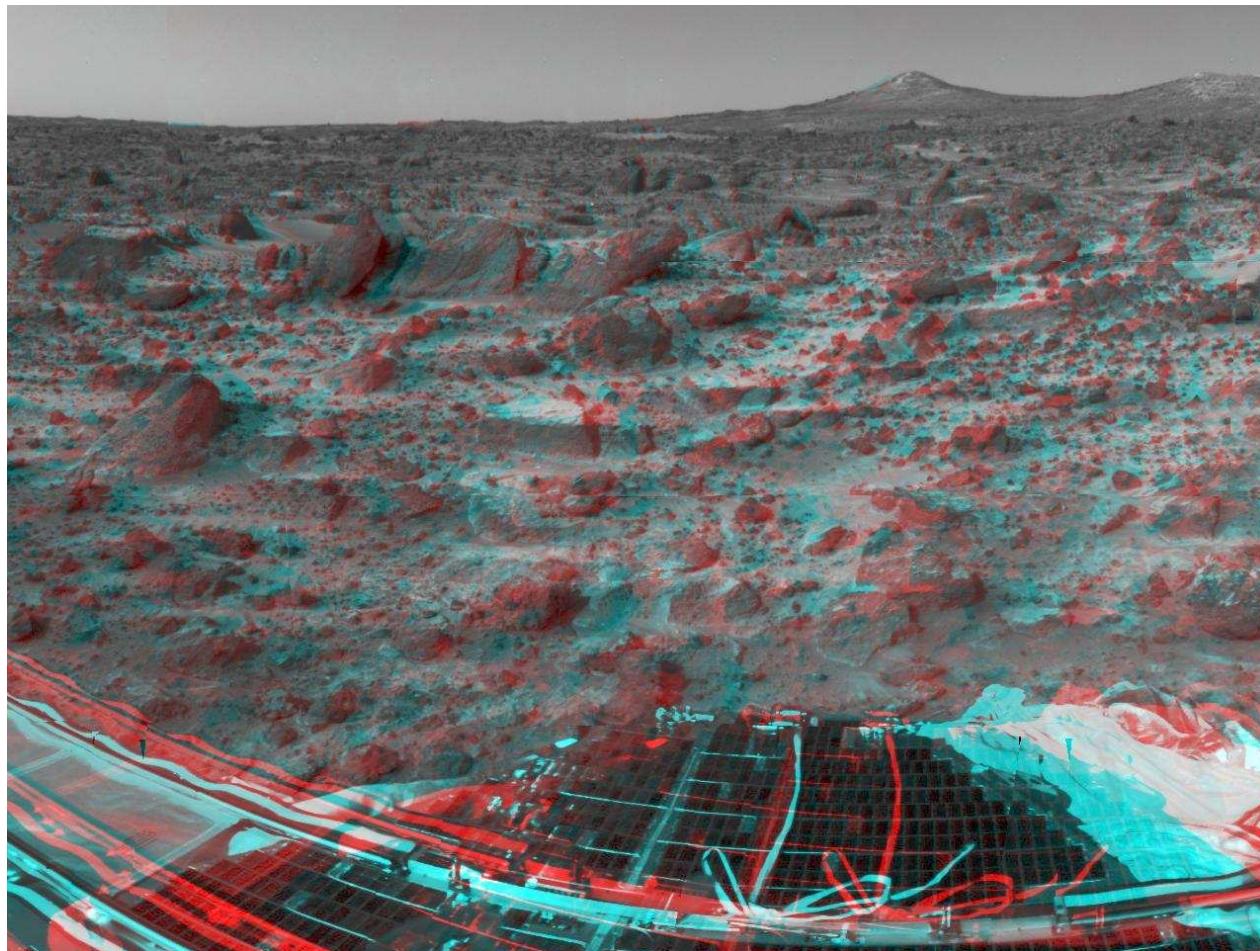


(d) SNR 100 %

Obrázek 19: Anaglyfy testovacího vzoru.



Obrázek 20: **Ukázka autostereogramu.** Model bombardéru B52.



Obrázek 21: **Ukázka anaglyfu.** Snímek povrchu Marsu pořízený sondou Spirit.