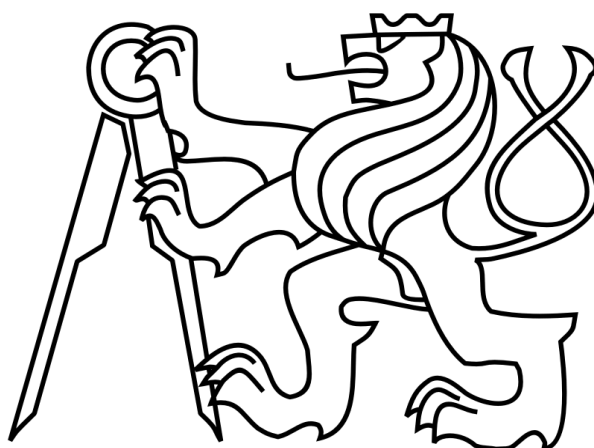


**České vysoké učení technické v Praze**  
**fakulta elektrotechnická**



**Bakalářská práce**

**Zpracování obrazu pro autostereoskopický displej**

**Autor:** Martin Krupička

**Vedoucí práce:** Ing. Karel Fliegel, Ph.D.

**2014**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **K R U P I Č K A Martin**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Zpracování obrazu pro autostereoskopický displej**

### Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku zobrazování na autostereoskopickém displeji, vyhodnoťte metody generování obrazového signálu pro tento displej, zejména pak algoritmy pro výpočet hloubkové mapy a vyberte nejvhodnější postup pro tvorbu obrazového obsahu ve formátu 2D+Z.
2. Na základě získaných poznatků navrhnete algoritmy, které umožní budít autostereoskopický displej Philips/Dimenco BDL4251VS kompatibilním signálem 2D+Z pro různé formáty vstupního stereoskopického obrazu (L+R, side-by-side, top-bottom). Při řešení vycházejte z analýzy zpracování obrazového signálu v integrovaném procesoru Dimenco Rendering Core.
3. Implementujte softwarové nástroje do uživatelsky přívětivé podoby.
4. Navržené algoritmy otestujte na základě subjektivního hodnocení kvality reprodukovánéh obrazu.
5. Navrhnete doporučení pro další postup řešení problému.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Ozaktas, H. M., Onural, L.: Three-Dimensional Television: Capture, Transmission, Display, Springer, 2008.
- [2] Javidi, B., Okano, F.: Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies, Springer, 2002.
- [3] Technická dokumentace k autostereoskopickému displeji Philips/Dimenco BDL4251VS.

Vedoucí: **Ing. Karel Fliegel, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 21. 1. 2014

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním obrazu pro autostereoskopické displeje, jak lze odhadnout již z názvu práce, a související problematikou. Teoretická část práce se nejprve zaměřuje na stereoskopii a autostereoskopii. Následuje popis dnešních formátů pro 3D video, úvod do teorie získávání hloubkových map ze stereopáru snímků a teorie provádění a vyhodnocování subjektivního hodnocení kvality obrazu. Praktická část práce začíná popisem použitého vybavení a jeho ovládání. V následujícím textu je rozebrána tvorba statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth v prostředí MATLAB. V tomto prostředí byla vytvořena také aplikace s grafickým rozhraním provádějícím uživatele základními úkony potřebnými k tvorbě obrazu ve zmíněném formátu. Nakonec bylo prostřednictvím subjektivního hodnocení kvality obrazu porovnáno několik způsobů výpočtu hloubkové mapy ze stereopáru vstupních snímků.

## Klíčová slova

autostereoskopický displej, hloubková mapa, subjektivní hodnocení, MATLAB, 2D-plus-depth

## Abstract

This bachelor thesis deals generally with image processing for autostereoscopic displays and related theory as expected from its title. The theoretical part begins with the description of stereoscopy and autostereoscopy in general. Afterwards the text describes 3D video formats, depth map generation from a pair of stereo images and subjective assessment of the image quality. The practical part of the thesis begins with the description of the used equipment and its control methods. The following chapters are focused on the steps necessary to create static images in the 2D-plus-depth format in MATLAB. An application with graphical user interface was written in this environment to guide the user through the content creation in the mentioned format. Eventually subjective assessment of the image quality was carried out to compare several methods of depth map generation from a pair of stereo images.

## Key words

autostereoscopic display, depth map, subjective assessment, MATLAB, 2D-plus-depth

# Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne .....

.....

Martin Krupička

# Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Karlu Fliegelovi, Ph.D. za pomoc při psaní této práce, cenné připomínky, rady a postřehy. Cítím také potřebu ocenit jeho časovou flexibilitu při organizování konzultací k této bakalářské práci. Dále bych chtěl poděkovat všem účastníkům subjektivního hodnocení kvality obrazu, které jsem v rámci této práce realizoval, a samozřejmě také všem blízkým, kteří mě při psaní podporovali.

# Seznam obrázků

Obr. 1: Pasivní 3D.....	4
Obr. 2: Princip pasivní 3D projekce – vysílání.....	4
Obr. 3: Princip pasivní 3D projekce – příjem.....	4
Obr. 4: Aktivní 3D.....	5
Obr. 5: Aktivně-pasivní 3D.....	5
Obr. 6: 3D bez brýlí.....	6
Obr. 7: Princip lentikulární vrstvy ohýbající vhodné části obrazu do odpovídajících očí, inspirováno z [11].....	8
Obr. 8: Princip paralaxní bariéry propouštějící vhodné části obrazu do odpovídajících očí, inspirováno z [11].....	8
Obr. 9: Technologie autostereoskopických displejů.....	9
Obr. 10: Stereo video formát.....	12
Obr. 11: Multiview video formát.....	12
Obr. 12: Typické uspořádání stereopáru snímků v podobách side-by-side a top-and-bottom.....	13
Obr. 13: Video + depth format.....	14
Obr. 14: Ukázka obrazu ve formátu 2D + Z před změnou přípony souboru z „.bmp“ na „.b3d“ získaná s využitím [36], [37], [38], [39].....	15
Obr. 15: Multiview + depth formát.....	15
Obr. 16: Vrstvené hloubkové video.....	16
Obr. 17: Hledání globálního minima funkce porovnání pomocí „winner takes all“ ( „vítěz bere vše“) algoritmu, inspirováno z [24].....	19
Obr. 18: Ukázková podoba grafu s orientovanými hodnocenými hranami, inspirováno z [25].....	23
Obr. 19: Ukázka spojitě stupnice pro hodnocení celkové kvality obrazu prostřednictvím subjektivního hodnocení kvality obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem.....	27
Obr. 20: Dimenco Rendering Core Premium.....	33
Obr. 21: Ukázka prostředí programu Dimenco 3D Player.....	34
Obr. 22: Ilustrativní obrázek vztahu mezi normovanou hloubkou a disparitou, inspirováno z [43].....	36
Obr. 23: Ukázka prokládání při přenosu snímku ve formátu 2D + Z, inspirováno z [43].....	36
Obr. 24: Změna rozlišení.....	39
Obr. 25: Závěrečné zřetězení a uložení ve vhodném formátu.....	41
Obr. 26: Prostředí vytvořené aplikace pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth.....	42

Obr. 27: Ukázka chybové hlášky ve vytvořené aplikaci pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth .....	43
Obr. 28: Ukázka aplikací upravených hloubkových map v porovnání s výchozí podobou.....	43
Obr. 29: Ukázka obsahu jedné obrazové sady z Middlebury Stereo Vision Page ([36], [37], [38], [39]) .....	44
Obr. 30: Proces tvorby statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth .....	46
Obr. 31: Ukázka hodnocených vzorků vytvořených pomocí všech kvalit hloubkových map.....	48
Obr. 32: Průběh subjektivního hodnocení kvality stereoskopického obrazu.....	50
Obr. 33: Podmínky pro subjektivní hodnocení kvality stereoskopického obrazu .....	50
Obr. 34: Ukázka prostředí využívaného při hodnocení .....	51
Obr. 35: Podíl mužů a žen mezi účastníky hodnocení.....	51
Obr. 36: Znalost stereoskopie hodnotitelů .....	52
Obr. 37: Základní výsledky provedeného subjektivního hodnocení kvality v grafické podobě.....	54

## Seznam tabulek

Tab. 1: Příklady oblastí zajímavých pro využití autostereoskopických displejů.....	9
Tab. 2: Základní přehled autostereoskopických displejů na trhu .....	10
Tab. 3: Ukázka některých základních parametrů autostereoskopických displejů na trhu .....	11
Tab. 4: Přehled vybraných formátů 3D videa .....	16
Tab. 5: Základní možnosti volby hardwaru pro vypočetní část porovnávání stereopáru snímků.....	18
Tab. 6: Stupnice pro subjektivní hodnocení dvou parametrů stereoskopického obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem.....	27
Tab. 7: Co je nutné zvážit při přípravě subjektivního hodnocení stereoskopického obrazu?.....	30
Tab. 8: Minimální požadavky na počítač připojovaný k Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD uváděné v [35].....	31
Tab. 9: Základní přehled parametrů displeje Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD .....	32
Tab. 10: Základní možnosti programu Dimenco 3D player .....	33
Tab. 11: Možnosti ovládání programu Dimenco 3D player .....	34
Tab. 12: Ukázka parametrů zobrazení nastavitelných pomocí Dimenco Control Toolu .....	35
Tab. 13: Skripty zajišťující rozdělení formátu side-by-side a top-and-bottom na stereo pár .....	38

Tab. 14: Definice základních podmínek k subjektivnímu hodnocení.....	49
Tab. 15: Stupnice pro subjektivní hodnocení dvou parametrů stereoskopického obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem.....	49
Tab. 16: Shrnutí základních výsledků získaných během subjektivní hodnocení kvality obrazu.....	54

## Seznam používaných zkratk

V + D – video + depth format  
 MVD – multiview + depth format  
 LDV – layered depth video format  
 SAD – sum of absolute differences  
 SSD – sum of squared differences  
 DSP – digital signal processor  
 FPGA – field programmable gate array  
 WTA – winner takes all  
 SS – single stimulus  
 PC – pair comparison  
 DSCQS – double stimulus continuous quality scale  
 SSCQE – single stimulus continuous quality evaluation  
 DMAG – Depth Map Generator  
 DMAG3 – Depth Map Generator 3  
 DVI – digital visual interface  
 HDMI – high definition multimedia interface  
 MATLAB – matrix laboratory  
 CLAHE – contrast-limited adaptive histogram equalization  
 CD – compact disc  
 HD – high definition



# Obsah

Předmluva autora .....	1
Úvod.....	2
1 Úvod do stereoskopie.....	3
1.1 Pasivní 3D technologie .....	3
1.2 Aktivní 3D technologie.....	5
1.3 Aktivně-pasivní 3D technologie .....	5
1.4 Stereoskopie bez brýlí.....	5
1.5 Zhodnocení oddílu .....	6
2 Autostereoskopie.....	7
2.1 Základní technologie autostereoskopických displejů .....	7
2.2 Využití autostereoskopických displejů .....	9
2.3 Současná nabídka autostereoskopických displejů na trhu .....	10
3 Formáty pro 3D video .....	12
3.1 Formáty stereo a multiview .....	12
3.1.1 Základní podoby vysílání videa ve stereo formátu.....	13
3.2 2D video + hloubková informace (V + D).....	13
3.2.1 2D + Z (2D-plus-depth).....	14
3.3 Multiview + hloubková informace (MVD) .....	15
3.4 Vrstvené hloubkové video (LDV) .....	15
3.5 Shrnutí oddílu.....	16
4 Porovnávání stereopárů obrázků a získání hloubkové mapy .....	17
4.1 Vliv volby a nastavení hardwaru na celkové zpracování.....	17
4.2 Kroky algoritmů pro stereo porovnávání, typicky lokálních metod .....	18
4.2.1 Předzpracování .....	18
4.2.2 Funkce porovnání .....	18
4.2.3 Seskupení hodnot funkce porovnání.....	19
4.2.4 Problematické prvky při stereo porovnávání, především při užití lokálních metod	20
4.2.5 Globální metody a jejich porovnání s lokálními .....	21
4.3 Příklady reálných implementací .....	21
4.4 Principy algoritmů užitých v praktické části této práce.....	22
4.4.1 Stereo porovnávání založené na přístupu řezu grafů.....	22
4.4.2 Stereo porovnávání založené na přístupu variačních metod.....	23
4.5 Zhodnocení oddílu .....	23
5 Subjektivní hodnocení kvality obrazu .....	25
5.1 Metody hodnocení .....	25

5.2	Stupnice hodnocení .....	26
5.3	Vyhodnocení získaných dat .....	27
5.3.1	Průměrné skóre vzorku .....	27
5.3.2	Interval spolehlivosti .....	28
5.3.3	Vyřazení určitých hodnotitelů .....	28
5.4	Zhodnocení oddílu .....	29
6	Dostupné vybavení, jeho ovládání a tvorba obrazu ve formátu 2D + Z .....	31
6.1	Využívaný autostereoskopický displej .....	31
6.1.1	Dimenco Rendering Core Premium .....	32
6.2	Možnosti nastavení zobrazení na užívaném autostereoskopickém displeji .....	33
6.2.1	Dimenco 3D player .....	33
6.2.2	Dimenco Control Tool .....	35
6.2.3	Roztažení obrazu při zobrazení na displeji .....	35
6.2.4	Přepoččet hloubky na disparitu .....	35
6.3	Podoba přenosu dat do displeje .....	36
6.3.1	Záhlaví .....	37
6.4	MATLAB a jeho užití v této práci .....	37
6.5	Realizace jednotlivých kroků tvorby obsahu .....	38
6.5.1	Řešení více podob vstupních snímků .....	38
6.5.2	Rozlišení snímků .....	39
6.5.3	Užité algoritmy pro výpočet hloubkových map .....	39
6.5.4	Zřetězení a závěrečné kroky .....	40
6.6	Vytvořená aplikace s grafickým rozhraním .....	41
6.7	Vstupní obrazový obsah do vytvořených nástrojů .....	44
6.8	Alternativní zdroje hloubkových map .....	45
6.9	Shrnutí oddílu .....	45
7	Realizace subjektivního hodnocení kvality obrazu a jeho vyhodnocení .....	47
7.1	Hodnocené vzorky .....	47
7.2	Průběh a podmínky subjektivního hodnocení .....	48
7.3	Vyhodnocení získaných dat .....	51
7.3.1	Základní údaje o hodnotících .....	51
7.3.2	Postup zpracování získaných hodnot .....	52
7.3.3	Výsledky hodnocení .....	53
7.3.4	Zhodnocení získaných výsledků .....	54
7.4	Shrnutí oddílu .....	56
8	Možnosti pokračování práce .....	57
9	Závěrečné zhodnocení .....	59

10 Literatura.....	60
11 Přílohy.....	65
11.1 Příloha A – dokumenty využívané při subjektivním hodnocení.....	65
11.1.1 Úvodní informace o hodnocení, poděkování hodnotitelům a jejich seznam se základními informacemi o nich .....	65
11.1.2 Stupnice pro hodnocení .....	66
11.1.3 Hodnotící arch .....	67
11.2 Příloha B – přehled všech hodnocení jednotlivých vzorků při subjektivním hodnocení .....	68
11.3 Příloha C – přehled základních vypočtených hodnot při vyhodnocování subjektivního hodnocení .....	69
11.4 Příloha D – CD.....	70

# Předmluva autora

V šestém, tedy při doporučeném průchodu studiem posledním, semestru bakalářského studia bylo mým úkolem vypracovat následující závěrečnou práci. Jejím hlavním cílem bylo vytvoření nástrojů vhodných k tvorbě obsahu pro autostereoskopický displej, který je k dispozici na katedře radioelektroniky naší fakulty. Vlastní implementace nástrojů pro tvorbu obsahu ve formátu 2D + Z jsem prováděl v prostředí MATLAB. V textu práce předchází praktické části nejprve rozbor vhodné teorie.

V některých, především úvodních, kapitolách jsem vycházel z vlastních materiálů vyprodukovaných v předchozím semestru při předmětu Projekt individuální II [1]. Touto závěrečnou prací jsem na předchozí projekt navázal a rozšířil ho ve všech směrech. Některé části textu jsem ze své závěrečné zprávy k projektu přejal, jiné jsem zcela vynechal. Vždy jsem provedl minimálně revizi a aktualizaci textu. Následně jsem text vhodným způsobem zapracoval do této práce. V praktické části této bakalářské práce jsem taktéž využil základy vytvořené při práci na předcházejícím předmětu. Využitelných částí kódu bylo však jen naprosté minimum.

Většina informací byla čerpána z anglicky psaných zdrojů. K mnohým výrazům nebylo často možné najít vhodný český ekvivalent, a proto je místy uvedena, společně s českými překlady, i originální anglická terminologie.

# Úvod

V následující závěrečné práci lze najít nejprve teoreticky zaměřený text na stereoskopii obecně. V dalších kapitolách bylo zaměření textu zúženo na autostereoskopii, formáty pro 3D video a problematiku generování hloubkových map ze stereo páru snímků pro pravé a levé oko. V posledním úseku teoretické části jsou rozebrány základy subjektivního hodnocení kvality obrazu z teoretického hlediska.

V následující praktické části této bakalářské práce jsou nejprve popsány prostředky využívané v této části práce a také způsob jejich užívání a ovládání. Lze v ní tedy nalézt popis používaného autostereoskopického displeje, popis postupu tvorby požadovaných výstupů a popis funkčnosti jednotlivých částí kódů v MATLABu. V další části je rozebráno provedené subjektivní hodnocení kvality obrazu a jsou zhodnoceny jeho výsledky. V závěrečných oddílech této práce jsou popsány možnosti pokračování práce na tomto tématu, návrhy na další zlepšování produkovaných výsledků. Na úplný konec je zařazeno závěrečné shrnutí se zhodnocením dosažených výsledků.

# 1 Úvod do stereoskopie

V této kapitole a jejích pododdílech bylo čerpáno především ze zdroje [2], kontrolováno a rozšiřováno prostřednictvím [3]. Několik doplňujících poznatků bylo zjištěno ve zdrojích [4], [5], [6], [7], [8]. Lidský mozek vnímá okolní svět přirozeně ve třech rozměrech, vše kolem nás můžeme alokovat prostřednictvím tří souřadnic. Do našich očí ovšem vstupuje vždy pouze dvourozměrný obraz. Prostorový vjem je způsoben mírnou odlišností mezi obrazy viděnými jednotlivými očima a následným zpracováním v lidském mozku.

Stereoskopie je obecně nauka, která se zabývá tím, jak zajistit, aby lidský mozek dokázal vnímat speciálně připravený 2D obraz trojrozměrně. Existuje hned několik základních technik, jak to provést. Lze očekávat, že časem budou pravděpodobně přibývat mnohé další.

Pokud se v dnešní době chystáme zachytit nějaký obrazový záznam, je dobré už předem počítat s tím, zda ho v budoucnu budeme chtít využívat ve 3D podobě. Pokud ano, je vhodné snažit se ho zaznamenat podobným způsobem, jak by ho vnímaly naše oči při reálném zážitku. Měli bychom ho tedy v takovém případě zachytit ze dvou horizontálně mírně odlišných poloh. K tomuto účelu se obvykle využívá dvou synchronizovaných kamer či jedné se dvěma objektivy. U statických scén je možné použít běžného fotoaparátu a získat tyto dva mírně odlišné obrazy postupně po posuvu záznamového zařízení.

Následně stojíme před problémem, jak doručit správný obraz do odpovídajícího oka, obraz pro levé oko do levého a obraz pro pravé do pravého. Pro tento úkol bylo vynalezeno hned několik metod. Základně je lze rozdělit na aktivní, pasivní, aktivně-pasivní a autostereoskopické. V následujících pododdílech lze nalézt stručný přehled těchto technologií.

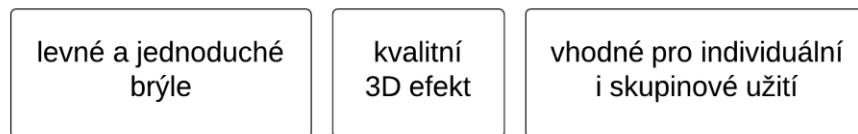
## 1.1 Pasivní 3D technologie

Pasivních technologií pro 3D zobrazování existuje obecně více druhů. Vzhledem k zaměření této práce jsou v tomto pododdíle zmíněny dvě – anaglyf a pasivní technologie využívající principu polarizace světla. Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, je čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

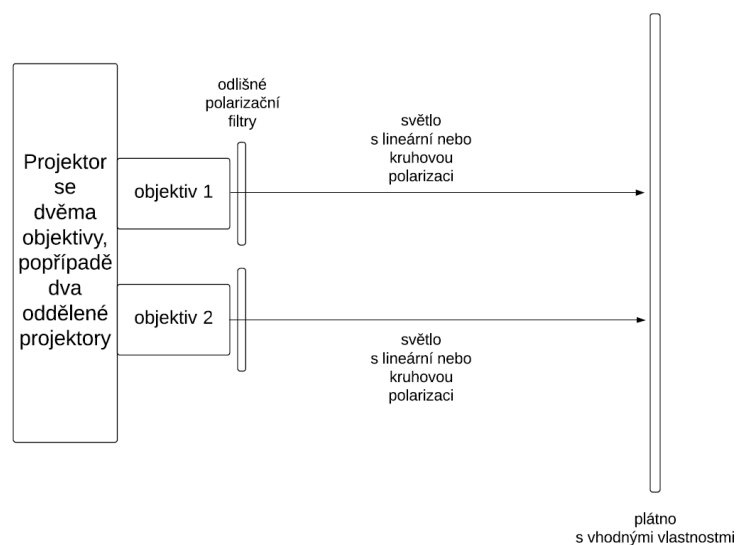
Začneme anaglyfem, jehož princip je asi nejznámější a nejjednodušší. Má tu výhodu, že ho lze zobrazit na každém počítači, každé televizi a dokonce i v tištěné podobě. Každý snímek se skládá ze dvou mírně posunutých obrazů vměstnaných do jednoho. Každý obraz v původní podobě anaglyfu má pouze jednu barvu a obě použité barvy by měly být doplňkové, typicky červená a azurová. U moderního anaglyfu lze získat i mnohobarevné obrazy, avšak jen s omezeným spektrem barev. Člověk, který chce následně stereoeфекt vnímat, potřebuje brýle s barevnými filtry, které oddělí jednotlivé obrazy anaglyfu. Mezi hlavní nevýhody této metody patří především nemožnost zobrazit některé barvy, což kromě špatného dojmu způsobuje i výrazné namáhání lidského mozku a náchylnost k tvorbě takzvaných duchů.

Asi nejtypičtější pasivní 3D technologií dnešní doby je princip využívající polarizace světla. Pozorovatel k vnímání prostorového efektu potřebuje brýle s polarizačními filtry, které do každého oka propouští jen obraz s vhodnou polarizací světla. Využívá se lineární nebo kruhové polarizace světla. Typické použití této technologie nalezneme u 3D projekce. Pro samotnou projekci je nutné využít speciálního projektoru/projektorů, ideálně jednoho se dvěma objektivy. Samotnou polarizaci zajišťují polarizační filtry před objektivy. Zároveň je na místě využít plátno

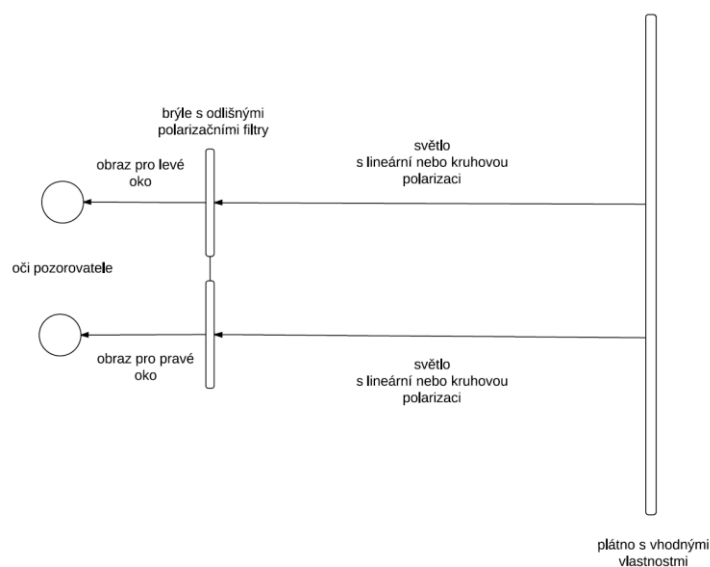
s patřičnými odrazovými vlastnostmi. Základní principy tohoto druhu projekce jsou zachyceny na obrázcích 2 a 3. U monitorů a televizních obrazovek je tato technologie o něco složitější a výsledný obraz většinou nedosahuje kvality plného rozlišení displeje. Technologie je dobře využitelná při projekcích pro větší množství lidí, protože divákům stačí vcelku jednoduché levné brýle k dosažení relativně kvalitního prostorového vjemu.



Obr. 1: Pasivní 3D



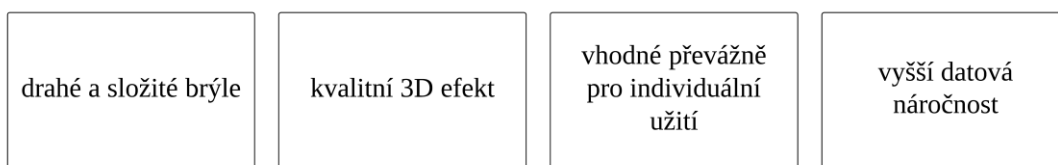
Obr. 2: Princip pasivní 3D projekce – vysílání



Obr. 3: Princip pasivní 3D projekce – příjem

## 1.2 Aktivní 3D technologie

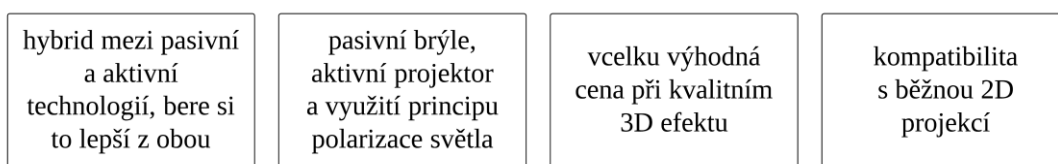
Nyní se podívejme na aktivní 3D technologii. Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, je zde čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Jejím hlavním znakem, který vedl i k pojmenování technologie, jsou aktivní brýle se střídavě zatmívanými skly. Zobrazovací zařízení střídavě zobrazuje obrazy pro levé a pravé oko a brýle zároveň vhodně střídavě zatmívají levou a pravou oční. Takové brýle je samozřejmě nutné napájet a vhodně synchronizovat se zařízením produkujícím obraz. Požadavky na přesnost synchronizace jsou velmi vysoké. Výsledkem je kvalitní prostorový vjem, potřeba jen jednoho projektoru pro promítání, plnohodnotná kvalita videa na obrazovkách. Bohužel má video dvojnásobnou frekvenci snímků oproti běžnému 2D videu kvůli nutnosti odlišných obrazů pro jednotlivé oči, a s tím je spojena obvykle dvojnásobná velikost datového toku. Při přenosu je potom třeba využít dvojnásobné šířky pásma. Brýle jsou poměrně drahé a relativně složité na údržbu. Této technologii se obvykle nevyužívá pro masové produkce určené velkému množství lidí především z důvodu drahých a komplikovaných brýlí. Hodí se pro domácí využití při hraní her či sledování filmů.



Obr. 4: Aktivní 3D

## 1.3 Aktivně-pasivní 3D technologie

Po prozkoumání výhod aktivní a pasivní technologie s polarizací byla nalezena ještě možnost využívající 3D polarizační modulátor neboli také aktivně-pasivní technologie, která si bere to lepší z obou předchozích metod. Jak již bylo zmíněno v úvodu oddílu, je zde čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Stačí použít pouze jeden aktivní projektor, který vysílá sekvenci obrazů pro levé a pravé oko. Před ním je umístěn polarizační modulátor, který vhodným způsobem polarizuje obrazy pro jednotlivé oči. Vzniká tedy pasivní projekce, k jejímuž zhlédnutí stačí pasivní polarizační brýle. Mezi jejich výhody patří především nízká cena a jednoduchá konstrukce. Fakt, že se oba obrazy pro jednotlivé oči nevysílají zároveň, může být trochu problematický, a proto se vysílá typicky prokládaně s dvojnásobnou frekvencí. Mezi další výhody této technologie patří i fakt, že používaný projektor je plně kompatibilní s běžnou 2D projekcí bez dalších úprav.



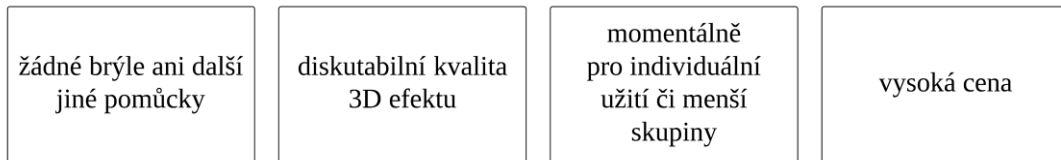
Obr. 5: Aktivně-pasivní 3D

## 1.4 Stereoskopie bez brýlí

Dále následují i možnosti, při kterých pozorovatel nepotřebuje žádné speciální pomůcky. Jak již bylo zmíněno v úvodu oddílu, je zde čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4],



[5], [6], [7], [8]. Zajímavou možností je například holografie, ale vzhledem k zaměření této práce se soustředíme především na autostereoskopické displeje. Ty musí už samy o sobě bez dalších pomůcek umět rozdělit obraz na části pro levé a pravé oko a následně je vyslat vhodným způsobem k divákovi. Pro plné využití možností displeje je nutné pozorovat monitor ze správného místa neboli správné pozorovací polohy. V případě vícepolohových monitorů může být vhodných poloh více. Případně může být displej vybaven speciálním zařízením pro sledování očí pozorovatele, což však způsobuje nemožnost přítomnosti více diváků v jeden okamžik. V současné době je kvalita zobrazení poměrně nízká. Proti rozšíření technologie mluví i vysoká cena.



Obr. 6: 3D bez brýlí

## 1.5 Zhodnocení oddílu

V této kapitole byly popsány obecné principy několika základních metod pro 3D zobrazování. Zajímavý pro tuto práci je zejména pododdíl zabývající se stereoskopií bez brýlí. Ve vhodných zdrojích lze najít určitě mnohé další techniky 3D zobrazování. Během reálného zpracování například 3D filmu do kina se producenti a technici musí potýkat i s mnohými dalšími problémy. Nakonec se například může stát, že mnozí lidé nebudou schopni 3D efekt vnímat díky nějaké oční vadě. Údajně kolem 10% dospělé populace trpí nějakou vadou zraku [5]. Někomu může sledování 3D obsahu dokonce způsobovat zdravotní obtíže typu zvracení, bolesti hlavy atp. Oči jsou totiž během promítání zaostřeny jen na plátno, na konstantní vzdálenost, a prostorového efektu se docílí jen a jen virtuálně, což může mít na citlivější jedince neblahý vliv. Při reálném přirozeném vnímání prostoru se oči synchronně pohybují a ostří podle potřeby na vzdálenost pozorovaného objektu, tedy střídavě na blízko a na dálku.

V různých situacích máme v dnešní době na výběr, zda využít dvourozměrné či trojrozměrné zobrazení. Vždy je nutné zvážit, zda výhody využití 3D převáží v našem případě nad nevýhodami, jakými jsou mimo jiné nutnost speciálního vybavení, kvalita prostorového efektu a zpravidla vyšší cena.

Jak již bylo několikrát řečeno, bylo v této kapitole čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

## 2 Autostereoskopie

V předchozí kapitole jsme se zabývali tím, jak přesvědčit lidský mozek, aby ve speciálně připraveném dvourozměrném obraze vnímal i třetí rozměr – hloubku. Seznámili jsme se s obecnými principy stereoskopie jako takové a bylo nám jedno, zda pozorovatel potřebuje nějaké speciální pomůcky pro vjem 3D efektu nebo ne. V této kapitole je podrobněji rozebrána autostereoskopie, tedy odvětví stereoskopie, u kterého pozorovatel nepotřebuje žádné zvláštní příslušenství pro plnohodnotné vnímání třetího rozměru obrazu. Většina faktických informací v tomto oddíle a jeho pododdílech byla čerpána ze zdroje [11], kontrola a rozšiřování textu za pomoci [12]. Další velmi zajímavé informace se lze dočíst v [9] a [10].

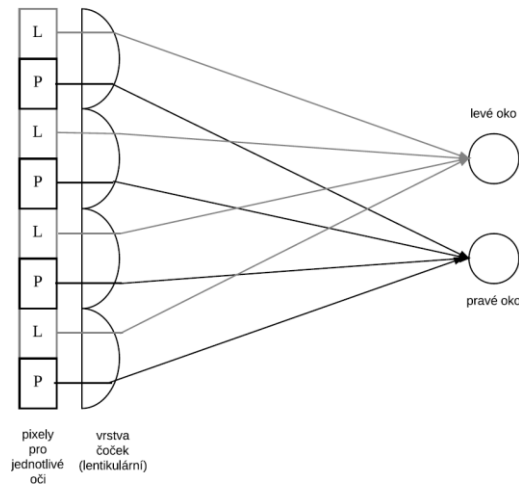
Velmi běžně se člověk setkává s autostereoskopickým zobrazením v tištěné formě v podobě různých pohlednic, sběratelských kartičky atp. Vzhledem k zaměření této práce je následující text zaměřen především na technologie autostereoskopických displejů, monitorů a televizí. Základně je nutné vědět, odkud se na daný autostereoskopický displej lze dívat, aby bylo dosaženo stereovjemu. Může být pouze jedna, ale existují také displeje s mnoha pozorovacími polohami pro více uživatelů zároveň. Typicky je pak definována alespoň ideální pozorovací vzdálenost a i tu můžeme často pomocí ovládacího softwaru displeje upravit. Případně se lze setkat ještě s jednou specifickou variantou, kdy je obsah určen pouze jednomu uživateli. Ten může stát kdekoliv v určitém okruhu kolem displeje a efekt vnímá, protože v displeji je zabudován systém sledující jeho oči. Podle toho je přizpůsobován vysílaný obsah, tedy nějakým optickým způsobem ohýbán směrem do očí diváka.

Pro dosažení prostorového efektu bez brýlí by měly autostereoskopické displeje emulovat paralaxní efekt, jak statický, tak pohybový. Statický zohledňuje fakt, že díváme-li se na skutečný svět kolem sebe, každé naše oko vidí vždy jiný obraz než to druhé oko. Pohybový paralaxní efekt zohledňuje skutečnost, že i při velmi malém pohybu hlavou vnímáme vždy trochu jiný obraz. Je logické, že v reálném světě můžeme vidět při jakkoliv malém pohybu hlavou nekonečně mnoho různých obrazů. Vyvolávat oba tyto paralaxní efekty je pro autostereoskopické displeje velmi obtížné a nezvládají to všechny modely. Obvykle je definován konečný počet míst, odlišných především horizontálně, ze kterých lze vnímat plnohodnotný 3D efekt. Na každém z těchto míst potom vidí člověk danou scénu z jiného úhlu a do každého oka přichází nepatrně odlišný obraz, jak by se stalo při pozorování v realitě. Displeje sledující oči diváka bohužel často vysílají pouze jednu sadu obrazů pro levé a pravé oko, a tudíž pohybového paralaxního efektu není dosaženo. Navíc je u těchto systému sledujících oči nutné flexibilně pohybovat s poměrně malou pozorovací zónou pro jeden pár očí, což je nutné realizovat dostatečně rychle a přesně. S tím bývají také často problémy.

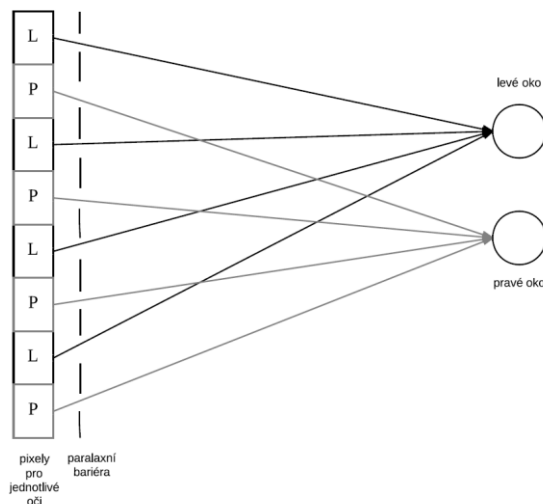
### 2.1 Základní technologie autostereoskopických displejů

Podívejme se nyní na základní technologie autostereoskopických displejů. Jak již bylo řečeno, je v této kapitole čerpáno především ze zdrojů [11] a [12]. Nahlédnuto bylo také do [9] a [10]. Pro rozdělení vysílaného obrazu na dva (pro každé oko jiný obraz) pro více pozorovacích poloh se na povrch displeje obvykle přidává optický prvek navíc. S jeho pomocí lze tohoto dělení obrazu dosáhnout. Typicky se jedná o paralaxní bariéru nebo lentikulární vrstvu. Paralaxní bariéra má podobu jakéhosi síta zabraňujícího nevhodnému obrazu před vstupem do nevhodného oka. Lentikulární vrstva je prvek složený ze zaoblených mikročoček, který vhodným způsobem láme

příslušné obrazy do příslušných očí pozorovatele. Jejich principy jsou v grafické podobě vyjádřeny na obrázcích 7 a 8. Jisté z principů obou těchto optických prvků je, že do každého oka může při jejich použití dorazit obraz s pouze polovičním horizontálním rozlišením než je maximální rozlišení zobrazovacího panelu. Počet pozorovacích poloh je bohužel zatím omezený, i když ne nijak zásadně. Mimoto je vhodné dodržovat ideální pozorovací vzdálenost, ve které je dosahováno nejlepšího výsledného dojmu. Komplikace mohou přinést také další skutečnosti běžně se vyskytující mezi lidmi, například má-li divák nestandardní rozestup očí či nějakou jinou oční vadu. Zmiňme například šilhavost.



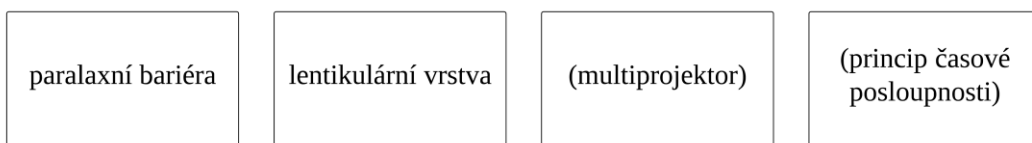
Obr. 7: Princip lentikulární vrstvy ohýbající vhodné části obrazu do odpovídajících očí, inspirováno z [11]



Obr. 8: Princip paralaxní bariéry propouštějící vhodné části obrazu do odpovídajících očí, inspirováno z [11]

Co se dalších technologií autostereoskopických displejů týče, můžeme kromě již popsaného principu prostorového multiplexu s lentikulárními čočkami či paralaxní bariérou využít další možnosti. Těmi jsou například multiprojektor či princip časové posloupnosti. V těchto dvou případech se ale jedná zatím spíše o teoretické koncepty. Většina autostereoskopických displejů na trhu využívá paralaxní bariéru nebo lentikulární vrstvu.

Prostorový multiplex obecně rozděluje celkové rozlišení monitoru do jednotlivých pozorovacích poloh, snižuje tedy kvalitu obrazu. Paralaxní bariéry navíc značně brání průchodu světla, a tudíž snižují jas displeje. Lentikulární vrstvy složené z čoček ohýbajících světlo přinášejí určité zlepšení, ale tvorba displeje pro opravdu velký počet pozorovacích poloh je stále ještě problematická. Technologie multiprojektoru může být realizována více způsoby. Klasický je způsob, kdy jeden projektor vysílá pohled pro jedno oko. Je tedy nutné využít většího množství projektorů, což je velmi drahé a náročné na synchronizaci. Lze ovšem dosáhnout velmi vysokého počtu pozorovacích poloh. Metoda časové posloupnosti principiálně spočívá v tom, že každý jeden snímek videa je postupně pomocí čočky promítán do jedné každé pozorovací polohy. Je tedy nutné udělat přepínání poloh při vysílání jednoho snímku dostatečně rychlé. Další z našich možností výroby autostereoskopických displejů jsou hybridní technologie.



Obr. 9: Technologie autostereoskopických displejů

## 2.2 Využití autostereoskopických displejů

Co se využití autostereoskopických displejů týče, doma v obývacích pokojích je zatím většinou nenajdeme. V této podkapitole jsou zmíněny některé oblasti, ve kterých by mohl být přínos používání autostereoskopických displejů velmi zajímavý. Čerpáno bylo z [11], [12]. Hodí se například pro vědecké využití, v lékařském prostředí či pro manipulaci s roboty na dálku. Možnost jejich užití pro konstrukci virtuálních prototypů namísto vyrábění skutečných modelů může být pro mnohé firmy také určitě zajímavé. Nebo si představte online chat s přáteli ve 3D. Zážitek by se mohl pomalu blížit reálnému setkání. Masové rozšíření těchto displejů se i tak zatím zdá být nepravděpodobné vzhledem k jejich ceně, kvalitě a faktu, že lidé jsou ve většině případů schopni pracovat s 2D obrazem a třetí rozměr si domyslet na základě svých zkušeností. Při práci s obrazem lidé většinou hloubku reálně vnímat nepotřebují, jen to může usnadňovat či zpříjemňovat jejich činnost. Pokud však autostereoskopické displeje doženou dnešní běžné 2D displeje cenou a alespoň z velké části kvalitou obrazu, určitě o nich začnou uvažovat i běžní uživatelé moderní techniky. Zmíněné oblasti se zajímavou možností využití autostereoskopických displejů shrnuje tabulka 1.

Tab. 1: Příklady oblastí zajímavých pro využití autostereoskopických displejů

lékařské prostředí
konstrukce prototypů
ovládání robotů na dálku
online komunikace mezi lidmi
(domácí prostředí)

## 2.3 Současná nabídka autostereoskopických displejů na trhu

V této podkapitole lze najít stručný přehled autostereoskopických displejů dostupných v současné době na trhu v podobě tabulek 2 a 3. Přehled určitě není podrobný ani úplný, toho by šlo jen těžko dosáhnout. Byl vytvořen na začátku dubna 2014 a logicky nelze dlouhodobě garantovat jeho aktuálnost vzhledem k dnešnímu rychlému vývoji trhu. Jedná se především o ilustrativní náhled současné nabídky. Ani na stránkách výrobce často nelze nalézt úplně podrobné informace o daném produktu, ale z prohlédnutých webů lze dojít k následujícím závěrům. Technologie obrazovky bývá obvykle založena na principu lentikulární vrstvy, případně paralaxní bariéry. Maximální rozlišení bývá až na výjimky Full HD, tedy 1920 x 1080 pixelů, což je při úvaze vlastností často podporovaného vstupního formátu 2D + Z poměrně málo. Podrobnější informace o tomto formátu se lze dočíst v dalším textu této bakalářské práce. Řekněme nyní jen, že maximální rozlišení hlavní obrazové informace je při maximálním rozlišení panelu 1920 x 1080 bodů jen 960 x 540 bodů, tedy čtvrtinové. To je pro dosažení kvalitního zážitku na větších úhlopříčkách televizí většinou nedostatečné. Zlepšení lze očekávat s rozšířením rozlišení 4K. Nejvýznamějším hráčem na trhu je pravděpodobně momentálně Philips potažmo Dimenco, které založili bývalí zaměstnanci Philipsu a na svou předchozí práci v bývalé firmě navazují. Pro další informace o Dimencu je dobré podívat se na jejich webové stránky.<sup>1</sup> Stručný přehled samotných displejů a typických parametrů je uveden v následujících tabulkách. Jejich obsah byl získán prohledáváním webů různých výrobců, „datasheetů“ k displejům a „googlováním“. Pro podrobnější a aktuálnější informace je vhodné navštívit web daného výrobce, případně udělat nový průzkum trhu.

Tab. 2: Základní přehled autostereoskopických displejů na trhu

Značka	Řada	Rozsah úhlopříček	Zdroj
Magnetic3D	Allura	22" - 55"	<a href="http://www.magnetic3d.com/t/products/alluradisplays">http://www.magnetic3d.com/t/products/alluradisplays</a>
3DFusion	3DFMax	42" - 52"	<a href="http://www.3dfusion.com/3d-display.html">http://www.3dfusion.com/3d-display.html</a>
Tridelity	MV	26" - 65"	<a href="http://www.tridelity.com/3D-Displays.3d-displays.0.html">http://www.tridelity.com/3D-Displays.3d-displays.0.html</a>
Alioscopy	LV, SV, SW	21,5" - 55"	<a href="http://www.alioscopy.com/en/3Ddisplays.php">http://www.alioscopy.com/en/3Ddisplays.php</a>
Dimenco/Philips	BDL	23" - 55"	<a href="http://www.dimenco.eu/dimencodisplays/3d-displays/">http://www.dimenco.eu/dimencodisplays/3d-displays/</a>
MasterImage 3D	Smartphone, Tablet	4,3" - 10,1"	<a href="http://www.masterimage3d.com/mobile/3d-displays">http://www.masterimage3d.com/mobile/3d-displays</a>
EIZO	DuraVision	23"	<a href="http://www.eizo.com/global/products/dura-avision/dfd2301-3d/index.html">http://www.eizo.com/global/products/dura-avision/dfd2301-3d/index.html</a>
Akira Display	ALM	46" - 82"	<a href="http://www.akiradisplay.com/product_category.php?cid=5">http://www.akiradisplay.com/product_category.php?cid=5</a>
Exceptional 3D	EX3D	10,1" - 55"	<a href="http://www.exceptional3d.com/products_displays.html">http://www.exceptional3d.com/products_displays.html</a>

<sup>1</sup> Webové stránky společnosti Dimenco jsou dostupné z <http://www.dimenco.eu/>.

Tab. 3: Ukázka některých základních parametrů autostereoskopických displejů na trhu<sup>2</sup>

Značka	Princip 3D	Maximální počet pohledů	Maximální rozlišení [pixelů x pixelů]	Vstupní formát
Magnetic3D	lenticular lens	9	1920 x 1080	neuvedeno
3DFusion	lenticular lens	9	1920 x 1080	typicky 2D-plus-depth
Tridality	parallax barrier	5/2	1920 x 1080/ /2560 x 1600	pravděpodobně multiview
Alioscopy	lenticular lens	8	1920 x 1080	pravděpodobně multiview
Dimenco/Philips	lenticular lens	28	3840 x 2160	typicky 2D-plus-depth
MasterImage 3D	parallax barrier	neuvedeno	1920 x 1200	neuvedeno
Akira Display	parallax barrier	21	1920 x 1080	neuvedeno
Exceptional 3D	lenticular lens	9	1920 x 1080	typicky 2D-plus-depth

Kromě této základní nabídky jednotlivých výrobců nabízí někteří z nich také možnost výroby na zakázku podle požadavků zákazníka. V případě zájmu o takovéto služby je třeba obrátit se vždy přímo na konkrétní firmu, podrobnější informace nelze v obecné podobě najít.

Jako poměrně zajímavá se jeví ještě možnost „vyrobit“ si autostereoskopický displej na svém telefonu či notebooku pomocí přidání speciální vrstvy před displej zařízení, typicky na lentikulárním principu. Pro mobilní telefony iPhone či určité modely notebooků nabízí takovéto příslušenství firma Spatial View s nabídkou dostupnou na internetu.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Informace do této tabulky byly čerpány ze stejných webových stránek jako v předchozí tabulce.

<sup>3</sup> Nabídku společnosti Spatial View si lze najít a prohlédnout na <http://www.spatialview.com/>.

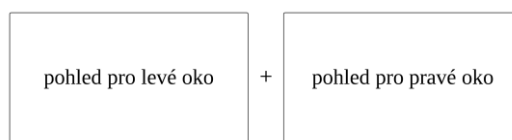
## 3 Formáty pro 3D video

Každému po základním zamyšlení jistě dojde, že k rozšíření používání 3D obsahu nestačí pouze hardware na dostatečné úrovni, ale je třeba vyladit vše i po softwarové stránce a v oblasti zpracování signálů. Zásadním problémem je vyvinutí vhodného formátu, pomocí kterého bude možné univerzálně přenášet obrazový obsah při co nejmenší možné datové náročnosti a co nejlepší možné kvalitě. Existuje samozřejmě více možností, jejichž vhodnost záleží na situaci. V následujícím textu je uveden základní přehled principů současných možností. V této kapitole je čerpáno z materiálu [13] s kontrolou a rozšiřováním za pomoci [14]. Pro získání dalších zajímavých informací k tématu lze doporučit [19], [15] a [16].

Obecně se jedná o více různých formátů od klasického stereo formátu skládajícího se ze snímků pro levé a pravé oko po propracovanější formáty typu multiview, tedy mnohopohledový formát, navíc s aditivní informací o hloubce. Některé z nich jsou již plně využívány v praxi, jiné jsou především ve fázi vývoje. Názvy jednotlivých formátů v následujícím přehledu nejsou úplně přesné. Jedná se o překlady anglických názvů se snahou zachovat vypovídající hodnotu názvu o formátu.

### 3.1 Formáty stereo a multiview

V tomto pododdíle je čerpáno především ze zdrojů [13] a [14], pročteny byly také [19], [15] a [16]. Stereo a multiview lze bezpochyby zařadit mezi nejzákladnější formáty 3D videa. Jedná se o obrazové záznamy ze dvou nebo více kamer, které mohou být navíc upraveny některými základními technikami pro zpracování obrazu, jakými jsou například rektifikace či korekce barev. Následně už jsou oba formáty připraveny ke vstupu do příslušných zobrazovacích zařízení. Jejich principy popisují obrázky 11 a 12. Jedná se pouze o více oddělených 2D obrazů, žádná informace o hloubce není k dispozici. Lze s nimi i nakládat jako s více úplně oddělenými dvourozměrnými obrazovými signály, což usnadňuje manipulaci s nimi. S počtem přenášených pohledů logicky roste objem přenášených dat. Jeho velikost lze omezit snížením rozlišení, zmenšením frekvencí snímků atp. Velmi důležité pro velikost objemu dat je také kódování. Testováním bylo také zjištěno, že při přenosu stereo videa lze značně omezit kvalitu jednoho z pohledů a přitom to na výsledný dojem nemusí mít výrazný vliv. Základními problémy těchto dvou formátů je jejich nemožnost adaptability podle vlastností zobrazovacího zařízení a omezený počet pohledů, který lze pouze snížit, zvýšit už nikoliv. Vyvolání pohybového paralaxního efektu nelze při použití těchto formátů dost dobře dosáhnout.



Obr. 10: Stereo video formát



Obr. 11: Multiview video formát

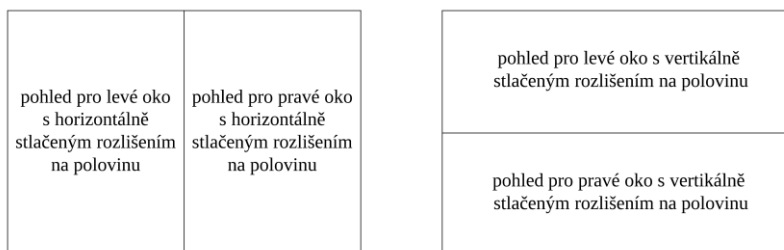
### 3.1.1 Základní podoby vysílání videa ve stereo formátu

V tomto pododdíle jsou stručně popsány tři možnosti vysílání stereo videa, tedy páru snímků pohledů pro levé a pravé oko. V textu podkapitoly je čerpáno z [27], [31] a [17].

První možností, která určitě každého napadne, je ta nejjednodušší, a to vysílání jednotlivých pohledů sekvenčně. Mezi výhody patří jednoduchost řešení, mezi komplikace například fakt, že oba pohledy nedorazí do zobrazovače současně, a to je nutné řešit.

Z hlediska kompatibility s běžným 3D vysíláním byly zavedeny standardy side-by-side a top-and-bottom. Jedná se o zřetězení obou pohledů do jednoho snímku buď horizontálně, side-by-side, nebo vertikálně, top-and-bottom, s případnou redukcí rozlišení v tomtéž směru, abychom se vešli do celkově stejného rozlišení jako u běžného snímku 2D videa. Zobrazovací zařízení po příjmu snímky oddělí a dopočte jejich často zredukované rozlišení v jednom směru do plnohodnotné velikosti. S takovýmto dopočtem bodů na vyšší rozlišení je logicky spojená jistá ztráta kvality. Výhodná je naopak již zmíněná zpětná kompatibilita s běžnými 2D systémy a také nulový nárůst šířky pásma požadované pro přenos dat.

Kromě rozebraných možností jistě existují i mnohé další. Pravděpodobně však nebudou tak univerzální a rozšířené jako tyto uvedené a hlavně není třeba znát jejich vlastnosti při praktické části této práce, která bude následovat. V úvahu připadají například varianty využívající principu prokládání v různých formách. Uspořádání stereopáru snímků v podobách side-by-side a top-and-bottom znázorňuje obrázek 12.



Obr. 12: Typické uspořádání stereopáru snímků v podobách side-by-side a top-and-bottom

### 3.2 2D video + hloubková informace (V + D)

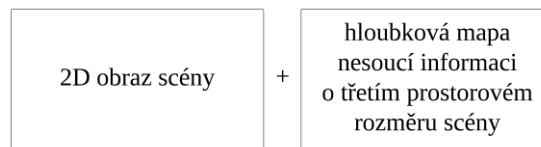
Dalším zajímavým formátem pro 3D video je formát 2D video + hloubková informace, anglicky video + depth. Jak již bylo řečeno, v této kapitole je čerpáno především z [13] a [14]. Zajímavé informace lze nalézt také v [15], [16] a [19]. Tento formát vždy obsahuje informaci složenou ze dvou částí, klasického dvourozměrného obrazu a dále hloubkové informace přenášené pomocí takzvané hloubkové mapy, v angličtině „depth map“. Ke každému obrazovému snímku je přenášena hloubková mapa, kde jednotlivé pixely nesou informaci o hloubce sobě odpovídajících pixelů v klasickém 2D obraze (v případě překryvu mapy a obrazu jsou to pixely na sobě ležící). Hloubková mapa je speciální jasový obrázek, jehož každý jeden pixel odpovídá právě jednomu pixelu 2D obrazu a určuje tomuto pixelu ve 2D snímku jeho teoretickou vzdálenost od povrchu displeje. V hloubkové mapě přitom nenesou pixely přímo informaci o reálné hloubce, ale nabývají hodnot tzv. disparity. Disparitu lze na hloubku snadno přepočítat při znalosti geometrie scény. To je pro případ displeje užívaného v praktické části této bakalářské práce popsáno v jedné z dalších kapitol. Podle hodnoty disparity příslušného bodu v hloubkové mapě se bod scény může



nacházet před i za displejem. Rozsah hodnot, kterých může pixel hloubkové mapy nabývat, záleží na tom, kolik bitů této informaci vyhradíme. Typicky se využívá kvantizace na 8 bitů, takže se pohybujeme v rozsahu absolutních hodnot 0-255. Hodnota 255, odpovídající úplně bílé barvě, umísťuje pixel opticky nejbližší k uživateli. Při hodnotě 0, odpovídající černé barvě, se daný pixel nachází naopak opticky nejdále od pozorovatele. Díky tomu, že se signál obsahující hloubkovou informaci podobá klasickému černobílému videu, můžeme ho zpracovávat pomocí běžných kodeků pro 2D video a značně tím snížit přenášený datový tok. Samozřejmě vždy záleží na okolnostech situace. U podrobné velmi členité hloubkové mapy nelze mnoho informace vynechat či zredukovat, takže je pak nutné ji přenášet v téměř stejné kvalitě jako barevný obraz.

Tento datový formát je zajímavý zejména díky zpětné kompatibilitě s dnešními technologiemi bez větších úprav a přizpůsobení. Je nutné jen vhodně oddělovat zpracování obrazové a hloubkové informace. Mimoto tento formát umožňuje flexibilní konverzi do multiview formy s různým počtem pohledů podle potřeby, o možnosti emulovat pohybový paralaxní efekt nemluvě. Kódováním tohoto formátu se zabývá standard ISO/IEC 23002-3 známý také jako MPEG-C Part 3. Pro získání více informací o tomto standardu lze doporučit například článek [18], případně rovnou oficiální dokument o něm.<sup>4</sup>

Oproti předchozím formátům stereo a multiview trpí video + depth ale i určitými nevýhodami. Zpracování dat na stranách vysílače i přijímače bývá značně komplexní, takže zvyšuje technické požadavky na tato zařízení. Získání hloubkových map může být mnohdy problematické či značně výpočetně náročné a přitom se často nejsme schopni vyvarovat chyb. Principiální uspořádání obrazové informace v tomto formátu naznačuje obrázek 13.



Obr. 13: Video + depth formát

### 3.2.1 2D + Z (2D-plus-depth)

Formát 2D + Z nebo také 2D-plus-depth je určitou variantou předchozího, popsaného v minulém pododdíle. Pro nás je na něm zajímavý fakt, že je to právě ten formát, který podporuje poměrně velké množství autostereoskopických displejů z přehledu uvedeného v předchozí kapitole jako vstupní signál.

Jedná se o klasický 2D obraz spojený do jednoho obrázku společně s hloubkovou mapou, vždy jde o horizontální zřetězení do jednoho snímku. Pro podrobnější informace je vhodné nahlédnout do dokumentu 3D Interface Specification od firmy DIMENCO [43]. V dokumentu je tento formát velmi názorně a kvalitně popsán. Další informace lze také nalézt ve zbývajícím textu tohoto dokumentu. Ukázkou obrazu v tomto formátu zachycuje obrázek 14.

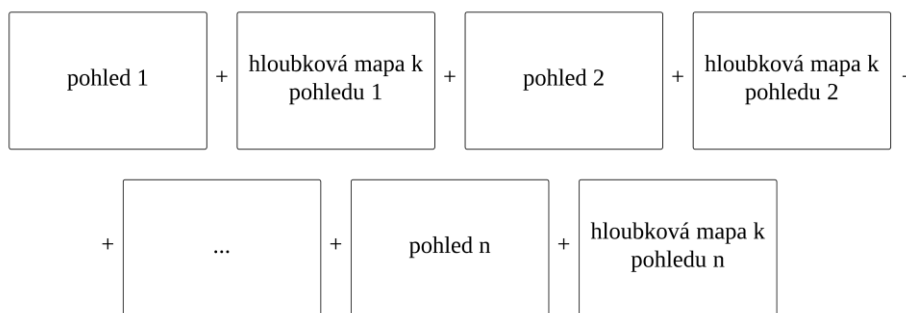
<sup>4</sup> Ten lze získat na [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=44354](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=44354).



Obr. 14: Ukázka obrazu ve formátu 2D + Z před změnou přípony souboru z „.bmp“ na „.b3d“ získaná s využitím [36], [37], [38], [39]

### 3.3 Multiview + hloubková informace (MVD)

Jak již bylo řečeno, v této kapitole je čerpáno především z [13] a [14]. Pročteny byly také vhodně zaměřené články [19], [15] a [16]. Formát multiview + hloubková informace, anglicky „multiview + depth“, je jakousi kombinací předchozích popisovaných formátů. Jeho podpora mezi běžnými zařízeními zatím není běžná. Jeví se jako ideální pro autostereoskopické displeje, u nichž by si uživatel mohl zvolit pozorovací polohu a vzdálenost podle sebe. Oproti formátu 2D + Z by využití tohoto formátu značně přidalo na komfortu pro uživatele. Principiálně by se jednalo o přenos multiview videa spolu s odpovídajícími hloubkovými mapami, a z této informace by bylo možné na straně přijímače dopočítat ještě značný počet dalších pohledů. Samozřejmě by odpovídajícím způsobem narostlo množství přenášených dat. Požadavky na komplexnost zpracování na stranách vysílacího a přijímacího zařízení by se také zvýšily. To by šlo flexibilně řešit možností volby omezení počtu přijímaných obrazových signálů a odpovídajících map až k základnímu počtu 1 + 1 jako u předchozího formátu 2D video + hloubková informace. Princip formátu graficky znázorňuje obrázek 15.



Obr. 15: Multiview + depth formát

### 3.4 Vrstvené hloubkové video (LDV)

Jak již bylo řečeno, v této kapitole je čerpáno především z [13] a [14]. Pročteny byly také vhodně zaměřené články [19], [15] a [16]. Formát vrstvené hloubkové video, anglicky „layered depth video“, vychází do určité míry z předchozích dvou obsahujících hloubkovou informaci. Odpovídá to z velké části představě Declipse formátu užívaného u Philips/Dimenco autostereoskopických displejů. Více informací o něm lze nalézt v následujícím textu a opět také v dokumentu 3D Interface Specification od firmy Dimenco [43].

Kromě 2D snímku a odpovídající hloubkové mapy přenášíme ještě další dvojici obrazů s informací o pozadí, které zakrývají objekty na výchozím 2D snímku. Jeden z přidaných snímků nese informaci o podobě pozadí, druhý o hloubce jednotlivých částí původně zakryté části scény. Možnosti tohoto formátu jsou podobné jako u předchozího MVD, avšak množství přenášených dat je značně menší. Bohužel je tento formát oproti MVD náchylnější k zobrazování většího množství chyb a artefaktů. Uspořádání obrazů formátu graficky znázorňuje obrázek 16.

2D scéna	hloubková mapa odpovídající 2D scéně
2D informace o pozadí zakrytém ve výchozím obraze objekty	hloubková mapa k informaci o zakrytém pozadí

Obr. 16: Vrstvené hloubkové video

### 3.5 Shrnutí oddílu

V této kapitole jsme se seznámili se základními formáty umožňující záznam a přenos 3D videa. Při obecném zpracování a přenosu signálů je možnost volby mezi více možnostmi věc pozitivní. Pro obecné rozšíření 3D obsahu mezi běžné uživatele je to spíše problematické. Odlišnost mezi jednotlivými přístupy bývá v celkovém počtu přenášených pohledů, zda s nimi přenášíme odpovídající hloubkové mapy a zda je současně přítomna také informace o pozadí zakrytém na výchozích pohledech přítomnými objekty ve scéně. Nezdá se pravděpodobné, že by budoucí zobrazovače měly podporovat všechny zmíněné formáty, spíše se budou specializovat jen na některý z nich. To, kromě problémů se vzájemnou kompatibilitou, klade zvýšené nároky na samotnou tvorbu obsahu. V současné době je nejrozšířenějším formátem klasické stereo složené ze dvou 2D snímků pro jednotlivé oči, a to jak v kinech, tak v domácím prostředí na televizích. U autostereoskopických displejů jsou nejčastěji využívané formáty 2D + Z a multiview.

Obecně by bylo vhodné zavést nějaký univerzální standard zajišťující jak zpětnou kompatibilitu se stávajícími či jednoduššími zařízení, tak pokročilejší možnosti při práci s informací o hloubce. V hlavním zdrojovém dokumentu této kapitoly [13] navrhuje formát „depth enhanced stereo“, což by v překladu znamenalo „o hloubku obohacené stereo“. Jedná se o formát přenášející pár stereo snímků, k nim odpovídající hloubkové mapy a navíc ještě tzv. „occlusion layers“, zohledňující fakt, že části scény jsou na jednom ze snímků páru zakryté objekty před nimi a na druhém jsou díky pohledu z nepatrně jiného úhlu vidět. Přehled popsanych formátů pro 3D video shrnuje tabulka 4.

Tab. 4: Přehled vybraných formátů 3D videa

stereo video
multiview video
video + depth
multiview + depth
layered depth video
depth enhanced stereo

## 4 Porovnávání stereopárů obrázků a získání hloubkové mapy

Máme-li k dispozici ideální pár stereo snímků, chceme nějakým způsobem vyjádřit jejich odlišnost. Touto problematikou se zabývá takzvaný „stereo matching“, po překladu do češtiny stereo porovnávání. V systému Theses.cz<sup>5</sup> provozovaném Masarykovou univerzitou byly nalezeny závěrečné práce zabývající se touto problematikou a používají termín stereo korespondence. To je však vhodný překlad ke spojení „stereo correspondence“, a proto je v této práci „stereo matching“ překládán jako stereo porovnávání. V tomto úvodním pododdíle kapitoly je čerpáno především z části knihy Concise Computer Vision [22] a zároveň z elektronicky volně dostupné přednášky předmětu Introduction to Computer Vision na University of California, Santa Barbara [23]. V dalších pododdílech této kapitoly je čerpáno hlavně z [24] a [25]. Bylo nahlíženo i do [30].

Jako první věc musíme zařídit, aby byly snímky páru rektifikovány. To znamená, že je nutné je geometricky transformovat takovým způsobem, aby se sobě odpovídající pixely v obou obrázcích lišily polohou jen v horizontální rovině, tedy nacházely se na jedné pomyslné přímce. U kvalitně pořízených/vytvořených stereopárů to bývá již splněno, takže se tím nemusíme zabývat. Následně řešený problém porovnávání usnadňuje rektifikace nejenom teoreticky, ale také snižuje výpočetní náročnost. Jeden snímek páru je vždy považován za referenční („base“) a druhý za porovnávaný („match“). Podle toho rozlišujeme metody left-to-right nebo right-to-left stereo porovnávání. Následně se snažíme najít sobě odpovídající pixely v obou obrazech. Díky rektifikaci snímků hledáme shodné body pouze na přímce, což je značně snazší, než kdybychom hledali po ploše. Metod pro realizaci tohoto procesu existuje poměrně velké množství. Jmenujme například poměrně jednoduché metody – sumu absolutních rozdílů (SAD) a sumu čtvercových rozdílů (SSD). Obě hledají odpovídající pixely v porovnávaném snímku v rámci určitého okolí, typicky čtvercového okna (jak se lze dočíst v dalším textu této kapitoly, většinou se při užití těchto metod neporovnávají jednotlivé pixely, nýbrž větší skupiny pixelů, typicky čtvercového tvaru). Kvalita a povaha výsledku na velikosti okna poměrně hodně závisí. Jak již bylo řečeno v dřívějších kapitolách této práce, žádoucím výstupem vyjadřujícím odlišnost snímků stereopáru je v našem případě hloubková mapa obsahující hodnoty disparity. Reálná hloubka je pak funkcí disparity a geometrie scény. Hloubkové mapy mají v současném zpracování obrazu velký význam nejen při tvorbě obsahu ve formátu 2D + Z, ale také pro tvorbu 3D modelů scén, pro prostorovou orientaci strojů, prostě všude, kde se dá využít znalosti všech tří rozměrů reálné scény.

### 4.1 Vliv volby a nastavení hardwaru na celkové zpracovávání

Jak již bylo řečeno, v tomto i následujících pododdílech této kapitoly, je čerpáno především z [24] s částečnou kontrolou či doplněním za pomoci [22].

Při práci s reálnými snímky je důležité dát si velký pozor hned na začátku na způsob jejich získávání, abychom pak vůbec měli možnost kvalitně je vyhodnotit. Před samotným snímáním je nutné zvolit vhodné kamery, správně je nastavit, stabilizovat a také synchronizovat.

---

<sup>5</sup> Theses. cz je systém pro odhalování plagiátů mezi závěrečnými pracemi dostupný z <https://theses.cz/>.

Jakmile máme stereo páry snímků zachycené a připravené k porovnávání, stojí před námi otázka volby hardwaru ke zpracování výpočtů. První možnosti, které většinu lidí napadnou, budou pravděpodobně běžný mikroprocesor z osobního počítače nebo grafická karta, a to díky jejich rozšířenosti a našemu zvyku pracovat s nimi. Velkou výhodou užití mikroprocesoru je možnost programování v relativně rozšířených jazycích C/C++. Pokud bychom však chtěli dosáhnout kvalitních výsledků při rozumné rychlosti výpočtu, vyšel by nás hardware poměrně drahý a spotřeba zařízení by byla vcelku vysoká. U grafické karty, uvažujme dedikovanou, bychom mohli využít značného výkonu, ale naprogramovat stereo porovnávání s jejím využitím by umělo jen malé procento lidí. Proti grafické kartě mluví opět i poměrně vysoká spotřeba energie. Jako ideální varianty řešení hardwarové platformy pro výpočetní zpracování stereo porovnávání se jeví využití FPGA („field programmable gate array“) nebo DSP („digital signal processor“). Obě tato řešení jsou účinná s malou spotřebou oproti předchozím variantám. DSP procesory jsou pro většinu lidí pravděpodobně snáze programovatelné než FPGA, u kterých je vhodné znát například jazyk VHDL. Základní možnosti volby hardwaru pro porovnávání stereo páru snímků shrnuje tabulka 5.

Tab. 5: Základní možnosti volby hardwaru pro výpočetní část porovnávání stereopáru snímků

mikroprocesor
grafická karta
FPGA (field programmable gate array)
DSP (digital signal processor)

## 4.2 Kroky algoritmů pro stereo porovnávání, typicky lokálních metod

Většina algoritmů pro porovnávání snímků stereopáru má v základech velmi podobnou strukturu, jen jednotlivé kroky často může řešit jiným způsobem. Zásadní rozdíl v přístupu k řešení problému lze najít především mezi lokálními a globálními metodami. Nejprve jsou v textu popsány kroky využívané většinou porovnávacích algoritmů. Následuje porovnání lokálních metod s globálními. Jak již bylo řečeno, v tomto pododdíle je čerpáno především z [24] s částečnou kontrolou či doplněním za pomoci [22] a [25]. Obzvlášť v této kapitole celé bakalářské práce byl problém najít adekvátní české překlady některých výrazů, a proto lze doporučit seznámit se i s anglickou terminologií, která je vždy uvedena také.

### 4.2.1 Předzpracování

Prvním krokem je předzpracování obrázků, anglicky „preprocessing“. Jeho cílem je vhodná předúprava vstupních snímků pro dosažení lepších výsledků při následném porovnávání. Jedná se především o potlačení šumu a fotometrických zkreslení, anglicky „photometric distortion“, jakým je například rozmazání. Mezi typické metody využívané v tomto kroku patří ekvalizace histogramu a bilaterální filtrování. Čerpáno bylo z [24] a [22].

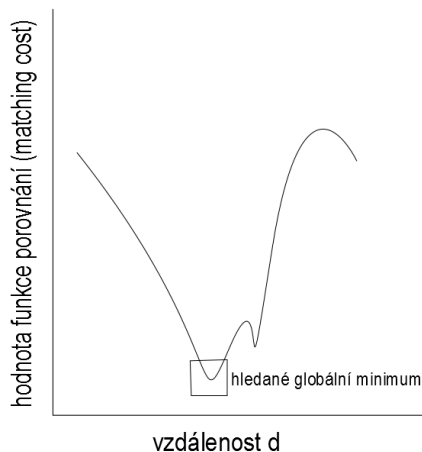
### 4.2.2 Funkce porovnání

Následuje krok nazývaný anglicky „matching cost“, což by se dalo přeložit jako náklad porovnání. Protože to zřejmě není úplně vhodným českým ekvivalentem, je v textu

této závěrečné práce používáno pomocného výrazu funkce porovnání, který situaci lépe vystihuje. Principem je porovnávání vlastností jednotlivých pixelů, například pomocí jejich intenzity/jasu. To lze provádět podle různých matematických přístupů podle použité metody porovnávání. Uvedme příklad výpočtu funkce porovnání („matching cost“) za pomoci absolutních rozdílů („absolute differences“) podle vzorce (1) převzatého z [24]. Konkrétní ukázkové příklady v tomto a příštím pododdílu odpovídají stereo porovnávání pomocí lokálního přístupu na základě sumy absolutních rozdílů („sum of absolute differences“).

$$AD = |I_L(x, y) - I_R(x + d, y)| \quad (1)$$

Následně je podle vypočtených hodnot možné vybrat sobě odpovídající pixely v levém a pravém obrázku. Podobnost těchto bodů je nejvyšší možná, v ideálním případě je rozdíl logicky nulový a podobnost 100%. Hodnota funkce porovnání je tedy v případně užití metody absolutních rozdílů (AD) nejmenší. Algoritmus vybírající odpovídající pixel k referenčnímu může být například na principu „Winner Takes All“ (WTA) algoritmu, v českém překladu „vítěz bere vše“ algoritmu. Jeho úkolem je najít právě ten bod, ve kterém závislost hodnoty funkce porovnání na poloze nabývá svého globálního minima. Princip cíle algoritmu znázorňuje obrázek 17. Podle toho, o jaký posun  $d$  souřadnice  $x$  se odpovídající pixel na přímce porovnávaných bodů nachází, můžeme určit hodnotu disparity. Bylo však zjištěno, že porovnávat takhle přímo hodnoty funkce porovnání jednotlivých pixelů vede často k chybnému vyhodnocení a nekvalitním výsledkům. Zlepšení lze dosáhnout za pomoci kroku, jehož popis naleznete v následujícím pododdílu. V tomto pododdíle bylo čerpáno z [24], [22] a [25].



Obr. 17: Hledání globálního minima funkce porovnání pomocí „winner takes all“ („vítěz bere vše“) algoritmu, inspirováno z [24]

### 4.2.3 Seskupení hodnot funkce porovnání

Všechny předchozí kroky bylo možné využít jak u lokálních, tak i globálních metod. Tento krok už je typický jen pro lokální metody a navazuje na předchozí popsany krok. Anglický název „cost aggregation“ lze přeložit jako seskupení hodnot funkce porovnání při návaznosti na předchozí překlad výrazu „matching cost“. Nesrovnáváme při něm podobnosti jednotlivých pixelů, ale porovnáme podobnosti větších oken složených z více pixelů, typicky čtvercových o rozměrech  $A \times A$ . To značí už slovo „aggregation“ v původním názvu kroku, což znamená sdružení

nebo seskupení. Při porovnávání odpovídajících oken pomocí metody absolutních rozdílů (AD) záleží na celkovém součtu absolutních hodnot rozdílů intenzit jednotlivých pixelů v rámci porovnávaných oken. Přecházíme pak při použití tohoto matematického přístupu k metodě sumy absolutních rozdílů, anglicky „sum of absolute differences“, podle vzorce (2) převzatého z [24]. Jak již bylo řečeno, je to typická lokální metoda pro stereo porovnávání.

$$SAD = \sum_{(x,y) \in W} |I_L(x,y) - I_R(x+d,y)| \quad (2)$$

Zlepšení oproti porovnávání jednotlivých pixelů je logické díky tomu, že je snazší najít větší oblasti s celkově nejvyšší mírou podobnosti než porovnávat jednotlivé body. U pixelů s podobnými vlastnostmi se mohou snadno splést a zaměnit je například díky zkreslení hodnot (například vlivem šumu), což vede logicky k chybnému vyhodnocení a chybovému pixelu v hloubkové mapě. U větších ploch by nemělo mít drobné zkreslení příliš velký vliv na celkové vlastnosti oblasti. Zhoršení oproti porovnávání jednotlivých pixelů spočívá v tom, že zanedbávám stavbu v rámci porovnávaných oken a zajímají mne pouze jeho celkové vlastnosti. Vnitřní stavbu okna považuji za homogenní. Důsledkem je pak ztráta detailů a menší podrobnost vyprodukované hloubkové mapy. Dalším problémem je také neschopnost poradit si s vyhodnocováním na plochách s konstantními vlastnostmi či s opakujícími se motivy. V těchto případech nedokážou algoritmy s lokálním přístupem s jistotou vybrat odpovídající si okna, protože jich v dané oblasti existuje větší počet se shodnými vlastnostmi. Kromě metody sumy absolutních rozdílů lze mezi lokální metody zařadit také sumu čtvercových rozdílů neboli „sum of squared differences“ (SSD) a další. Samotný výběr odpovídajícího okna k referenčnímu lze stejně jako při porovnávání jednotlivých pixelů řešit pomocí „Winner Takes All“ (WTA) algoritmu, v českém překladu „vítěz bere vše“ algoritmu.

Podívejme se nyní na další problémy těchto algoritmů s porovnávacími okny. Mimo jiné počítají s vyhodnocováním přítomnosti objektů mířících kolmo ke kameře. Následný výskyt ohnutých a zkosených struktur jim dělá problémy. Úhly se při změně pohledu mohou značně měnit a bylo by vhodné měnit tvar porovnávacího okna. K problému a chybnému vyhodnocení také dochází překrývá-li porovnávací okno plochu s měnící se hloubkou. Algoritmy uvažují hloubku v rámci okna konstantní. Dalším problémem je obsahuje-li okno na referenčním snímku motivy, které jsou na druhém porovnávaném snímku zakryté. Ty pak nelze nikde najít a vyhodnocení musí být zákonitě chybné. Tyto vyjmenované překážky lze částečně řešit rozdělením porovnávacího okna do více sektorů nebo pomocí posunutelného centra okna, případně i dalšími způsoby. V tomto pododdíle bylo čerpáno z [24], [22] a [25].

#### **4.2.4 Problematické prvky při stereo porovnávání, především při užití lokálních metod**

I v této podkapitole byly hlavními zdroji informací [24] a [22]. Už pouhým pohledem na výchozí porovnávaný pár snímků lze částečně usuzovat na kvalitu produkované hloubkové mapy při použití některé z lokálních metod pro výpočet. Existuje totiž několik základních prvků, které dělají lokálním porovnávacím algoritmům často problémy. Bývají velmi častým zdrojem chyb a nesouvislostí ve vypočtených mapách. Jedná se o šum, odlesky, odrazové a zrcadlové plochy, průhledné prvky, deformace poměrů rozměrů vlivem změny úhlu. Obtíže způsobují i souvislejší jednolitě plochy beze změn vlastností obrazu, pravidelně se opakující stejné motivy a dále také části

snímků, které jsou v jednom ze snímků zakryté nějakým objektem, ale na druhém snímku jsou viditelné.

#### 4.2.5 Globální metody a jejich porovnání s lokálními

V tomto pododdíle je čerpáno z [24], [22] a [25]. V předchozích několika pododdílech byly popsány kroky, po kterých už jsme schopni zhotovit celou hloubkovou mapu a metodám založeným na tomto postupu se říká lokální. Počítají hodnoty disparity pro každý jeden pixel zvlášť. Neuvažují vlastnosti okolí porovnávaných pixelů ani celkové vlastnosti snímku.

První kroky jako předzpracování a určení hodnot funkce porovnání („matching cost“) se využívají i u globálních metod. Krok seskupení hodnot funkce porovnání, anglicky „cost aggregation“, však už u metod globálního typu nenajdeme. Využívají naopak metod minimalizace funkce celkové energie. Mezi typické globální přístupy lze zařadit ty založené na přístupech „graph cuts“, přeložitelné jako řezy grafů nebo dělení grafů, nebo „dynamic programming“, v češtině dynamické programování.

Obecně globální metody neuvažují pouze vlastnosti právě porovnávaných pixelů, ale sledují i vlastnosti okolních bodů, potažmo celého obrázku. Lze rozlišovat, zda řeší problém jednorozměrně, jako například přístup dynamického programování, anglicky „dynamic programming“, nebo zda nahlíží na problém dvourozměrně a zohledňují i vlastnosti obrazu dané jeho druhým rozměrem jako například přístup řezu grafů, anglicky „graph cuts“. Jednorozměrné řešení zkoumá pouze vlastnosti pixelů v rámci jedné přímky, dvourozměrné sleduje i vlastnosti okolních pixelů na okolních přímkách. Algoritmy zohledňující vlastnosti dané dvourozměrností obrazu jsou logicky o něco komplexnější a složitější, ale produkují zpravidla lepší výsledky. Globální metody nezohledňují při hledání shod jen vlastnosti daného pixelu a jeho okolí, ale zohledňují také to, jak už byly přiřazeny shody k okolním pixelům. Přiřazení dvou pixelů jako sobě odpovídajících tedy ovlivňuje přiřazování ostatních bodů v jejich okolí. Dále tyto metody většinou zohledňují také fakt, že v blízkém okolí se hloubka většinou nemění příliš skokově.

Díky komplexnějšímu přístupu nahlížení na obraz nejsou oproti lokálním metodám zdaleka tak náchylné na produkci chyb při přítomnosti drobných zakrytí, větších ploch bez změny vlastností atp. Větší složitost algoritmů logicky přináší vyšší výpočetní náročnost a potřebu delších časů pro vykonání výpočtu.

Lokální algoritmy jsou zpravidla rychlejší a méně výpočetně náročné. Produkované výsledky bývají většinou o něco horší. Jejich reálné využití je však stále častější než u globálního přístupu.

Prostor k dalšímu zlepšování výsledků a rychlosti vede přes optimalizaci. Vzhledem k vysoké výpočetní náročnosti je to přímo nutností, pokud bychom chtěli dosáhnout přijatelných výsledků za přijatelný čas při současné úrovni běžně užívaného hardwaru k vyhodnocování. V případě, že bychom chtěli realizovat aplikace s vyhodnocováním v reálném čase, volí se většinou řešení založená na lokálních metodách.

### 4.3 Příklady reálných implementací

Samotných kódů pro výpočet hloubkových map existuje velké množství. I řešení založená na stejném přístupu lze naprogramovat nespočetně mnoha způsoby. Informace o mnohých konkrétních implementacích lze nalézt na webové stránce „Middlebury Stereo Vision Page“, na které se nachází rovnou i jejich porovnání



podle definované metodiky.<sup>6</sup> Záleží na výsledcích dané implementace na definovaných výchozích stereo párech, které lze stáhnout na téže webu. V datasetech jsou přiloženy i teoreticky objektivně správné, takzvané „ground truth“, verze hloubkových map.

## 4.4 Principy algoritmů užitých v praktické části této práce

V této podkapitole lze nalézt základní principy metod, které při stereo porovnávání využívají programy a skript použité v praktické části této práce pro generaci hloubkových map a následnou tvorbu obrazu ve formátu 2D-plus-depth. Obecně se jedná o velmi složitou problematiku, v tomto textu najdete pouze nastínění základního principu jednotlivých přístupů. Pro další informace lze doporučit přečtení uvedené literatury, která je značně rozsáhlá.

Prvním užitým byl FAST MATLAB STEREO MATCHING ALGORITHM (SAD) ve skriptu stereomatch.m vytvořený jako součást diplomové práce [44]. Jak už vyplývá z jeho názvu, je založen na lokálním porovnávání na principu sumy absolutních rozdílů („sum of absolute differences“). Tato metoda byla už rozebrána jako ukázkový příklad v rámci popisu typických kroků lokálních metod pro stereo porovnávání.

Programy Depth Map Generator (DMAG) a Depth Map Generator 3 (DMAG3) od autora jménem Ugo Capeto jsou založeny na globálních přístupech variace metod (DMAG), anglicky „variational methods“ a řezu grafů (DMAG3), anglicky „graph cuts“. Tyto přístupy jsou stručně popsány v následujícím pododdílu.

Další informace o zmíněném skriptu i o jmenovaných programech se lze dočíst v praktické části této práce, kde byly využity, nebo na blogu autora<sup>7</sup> a v diplomové práci [44].

### 4.4.1 Stereo porovnávání založené na přístupu řezu grafů

Jak již bylo řečeno v jednom z předchozích pododdílů, jedná se o stereo porovnávání s globálním přístupem. Základním zdrojem informací je v této kapitole [26], kde autor přiznává čerpání ze zdroje [48], který byl během psaní této práce také pročten. Je čerpáno také z [25].

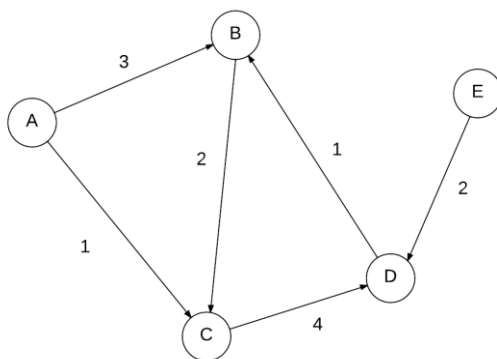
Celkovou energii lze definovat více způsoby, které mohou být různě složité a přesné. Při hledání odpovídajících si pixelů nezkoumá tento přístup vlastnosti bodů pouze po přímce, ale zohledňuje dvourozměrnost problému a vlastnosti okolí v obou rozměrech. Předpokládá se také, že hloubka, potažmo hodnoty disparity, se většinou nemění skokově, takže sousední pixely nabývají podobných hodnot. Přiřazení odpovídajících si pixelů následně ovlivňuje přiřazování jejich sousedů. Přejděme ale k samotnému principu přístupu, a to velmi zjednodušeným způsobem.

Začíná se výběrem referenčního snímku ze dvou možností ve stereopáru. Dále je nutné definovat funkci nákladů porovnání, anglicky „matching cost function“. To lze podobným způsobem jako u lokálních metod, například při použití dvou kamer pomocí rozdílů druhých mocnin intenzit jednotlivých pixelů. Následně už můžeme začít se samotným hledáním hloubkové mapy. Řešený problém popisujeme a řešíme graficky popsat pomocí trojrozměrné mřížky od níž lze vhodnou transformací přejít ke specifickým grafům, na což odkazuje název samotného přístupu. Graf se typicky skládá z uzlů odpovídajících jednotlivým pixelům a dále ze dvou speciálních

<sup>6</sup> A touto webovou stránkou je Middlebury Stereo Vision Page dostupná z <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/>.

<sup>7</sup> Tento blog je dostupný z <http://3dstereophoto.blogspot.cz/>.

přidaných uzlů source (S) a sink (T). Jedná se tedy o síť propojených uzlů. Slovo „cuts“ v názvu naznačuje rozdělování sítě uzlů na dvě části a to podle hodnot disparity, kterých nebývají jednotlivé pixely. Hledáme takzvaně optimální řez. Uzly odpovídající pixelům s vyššími přiřazenými hodnotami disparity by měly po rozdělení grafu zůstat připojené k uzlu source (S). Pro konkrétní způsoby realizace lze doporučit přečtení zmíněné literatury. Ukázkovou podobu jednoduchého grafu s orientovanými hodnocenými hranami si lze prohlédnout na obrázku 18.



Obr. 18: Ukázková podoba grafu s orientovanými hodnocenými hranami, inspirováno z [25]

#### 4.4.2 Stereo porovnávání založené na přístupu variačních metod

Variační metody, anglicky „variational methods“, jsou další z možností globálních metod pro stereo porovnávání. V matematice spadají pod takzvaný variační počet. Informace do tohoto pododdílu byly čerpány z [27], částečně také z [28]. Pročten byl ještě materiál [29], který lze zájemců o další informace na toto téma také doporučit.

Stejně jako ostatní globální metody, i tato se zabývá výpočtem hloubkové mapy především prostřednictvím minimalizace funkce energie. Variační metody minimalizují energii řešením Euler-Lagrangeovy rovnice. Lze ji řešit například pomocí Jacobiho iterační metody. Následně se tedy jedná především o matematický problém. Důležité je najít způsob řešení, který bude produkovat výsledky v co nejkratších možných časech. Rozhodně lze doporučit přečtení hlavního zmíněného zdrojového dokumentu této kapitoly [27], ve kterém je velmi kvalitně popsána implementace výpočtu hloubkových map založená na tomto přístupu. Zajímavé je, že jejich řešení produkuje kvalitní výsledky v reálném čase a to při využití výpočetních možností mikroprocesoru.

#### 4.5 Zhodnocení oddílu

V této kapitole byla popsána základní teorie generace hloubkových map ze vstupního páru stereo snímků. Jedná se o problematiku stereo porovnávání nebo také stereo korespondence, anglicky „stereo matching“ a „stereo correspondence“. Nejprve byly rozebrány výhody a nevýhody různých hardwarových platform pro realizaci samotného výpočtu. Jako ideální volba bylo doporučeno využít DSP („digital signal processor“). Následoval popis a srovnání lokálních a globálních metod pro stereo porovnávání. Lokální metody jsou obecně méně náročné na hardware a výpočetní čas. Produkované výsledky však bývají zpravidla o něco horší. Byly popsány také některé vlastnosti scén, které lokálním metodám dělají problémy a často způsobují chyby ve vypočtených hloubkových mapách. Globální metody jsou

komplexnější, méně náchylné na produkci chyb při přítomnosti určitých prvků ve scéně. Typicky řeší problém minimalizace funkce energie. Byly také popsány principy metod, které využívají pro svou činnost programy a algoritmus používané v praktické části této bakalářské práce.

## 5 Subjektivní hodnocení kvality obrazu

Co se týče subjektivního hodnocení kvality obrazu, bylo by toho dost i na téma pro celou závěrečnou práci, a proto jsou v této kapitole nastíněny jen základy dané problematiky. V praktické části této bakalářské práce bylo provedeno porovnání několika způsobů výpočtu hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků právě prostřednictvím subjektivního hodnocení kvality obrazu, a proto je důležité vědět, jak takové hodnocení správně realizovat a vyhodnotit. Rozbor této problematiky je hlavním cílem této kapitoly. Většina materiálů zaměřených na toto téma se zabývá hodnocením kvality videa, ale vzhledem ke vztahu mezi videem a jednotlivými snímky lze určitě většinu metod použít i na jednotlivé obrázky. Informace uvedené v následující kapitole jsou čerpány především z diplomové práce [31] a oficiálního doporučení ITU-R BT.2021 [32]. Další informace byly také čerpány z dalšího doporučení ITU-R BT.500-13 [33]. Pročtena a využita byla také diplomová práce [34]. Pro dodržení správné terminologie je řada výrazů uváděna v angličtině spolu s autorovým překladem do češtiny. Je dobré si ještě uvědomit, že popsané poznatky v této kapitole jsou zaměřeny především na hodnocení kvality stereoskopického videa. Pro hodnocení kvality běžného monoskopického 2D videa je lepší hledat informace v jiných materiálech, například v [33].

Při subjektivním hodnocení kvality obrazu je nutné pracovat s větším množstvím lidí, kterým postupně promítneme porovnávané obrazové vzorky. Podle naší potřeby se liší v jednom nebo více ohledech. V případě této závěrečné práce se mohou jednotlivé hodnocené snímky lišit buď celým algoritmem generace hloubkové mapy, nebo jen v parametrech nastavení právě jednoho algoritmu. Informace o hodnocení provedeném v této práci lze nalézt v dalších kapitolách. Příslušný divák hodnotí každý jeden vzorek na nabídnuté stupnici. Hodnotit lze různé vlastnosti obrazu, ale základně rozlišujeme u stereoskopického videa především hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu, kvality hloubky a vizuálního komfortu pozorování. Dále lze známkovat podobnost scény realitě, pocit vlastní přítomnosti ve scéně a mnohé další. Mimoto lze samozřejmě hodnotit i vlastnosti typické pro klasické monoskopické 2D video jako jsou ostrost či kvalita barev. Čím více pozorovatelů se zúčastní hodnocení, tím by měly mít výsledky lepší vypovídající hodnotu.

### 5.1 Metody hodnocení

Jak již bylo zmíněno, v celé této kapitole je čerpáno ze zdrojů [31], [32], [33] a [34]. Základními metodami hodnocení jsou „single stimulus“ (SS), v českém překladu jednorázový podnět, „double stimulus continuous quality scale“ (DSCQS), v češtině dvojitý podnět se spojitou stupnicí hodnocení, „pair comparison“ (PC), v českém překladu porovnávání párů, „single stimulus continuous quality evaluation“ (SSCQE), po překladu jednorázový podnět s průběžným hodnocením kvality. Už samotné názvy o metodách mnohé vypovídají. Metody je možné do určité míry podle potřeby přizpůsobit, je však nutné tyto adaptace u hodnocení uvést a definovat, aby bylo možné hodnocení kdykoliv zpětně zrekapitulovat.

Při užití metody s jednorázovým podnětem (SS) typicky oddělujeme hodnocení každého jednoho vzorku delším časovým intervalem, přičemž těsně před a po hodnocení daného snímku/sekvence zobrazujeme hodnotiteli šedý snímek s případnými informacemi k hodnocení. Známkovaný obsah je samozřejmě nutné zobrazovat dostatečně dlouho, aby měl hodnotitel čas uvážit, kam ho na stupnici umístit a aby stačil své hodnocení zaznamenat. Jednotlivým hodnocením vzorků se

říká „opinion score“ neboli zhruba přeloženo názorové skóre. S tím lze následně statisticky pracovat a s jeho pomocí vyhodnocovat výsledky.

Metoda dvojnásobného podnětu se spojitou stupnicí hodnocení (DSCQS) využívá časově odděleného vícenásobného pozorování daného vzorku ve dvou verzích. Hodnocení většinou probíhá vícefázově a v každé fázi je hodnotiteli zobrazen stejný vzorek dvakrát ve dvou různých verzích. Jedna z verzí bývá referenční kvality. Záleží také na tom, zda hodnotí jeden nebo více lidí souběžně. Tomu lze přizpůsobit průběh hodnocení. Při hodnocení jednotlivě lze uplatnit individuální přístup. Je například možné dát pozorovateli ovladač pro přepínání mezi danými verzemi vzorku, aby mohl střídavě pozorovat oba snímky/obě sekvence, a to i vícenásobně a až následně hodnotit. Výstupem této metody je typicky „difference opinion score“, po překladu názorové skóre rozdílu, což ukazuje na rozdílnost hodnocení mezi referenčním vzorkem, většinou objektivně nejlepší kvality, a vzorkem s nějakým způsobem ovlivněnou kvalitou. Tento rozdíl získáme odečtením hodnocení ovlivněného vzorku od hodnocení referenčního vzorku.

Už název techniky porovnávání párů (PC) vypovídá o jejím principu. Hodnocené ukázky jsou vždy zobrazovány dvě současně (což je rozdíl oproti předchozí metodě DSCQS, kdy vzorky nebyly zobrazovány souběžně), například vedle sebe, a účastník si u každého páru vybírá vzorek podle něho lepší. Nezáleží na předchozích hodnoceních. Úkolem pozorovatele je vybrat si vždy ten lepší vzorek pouze z těch dvou aktuálně zobrazovaných. Pro více vypovídající výsledky hodnotíme všechny možné kombinace vzorků a to i včetně pouhého prohození stran zobrazení. Jednotlivé dvojice opět oddělujeme pomocí šedých polí v mezičasech. Vždy je důležité dát hodnotiteli dostatek času pro vyhodnocení daného páru. Vzhledem k oznámkování všech kombinací vzorků bychom na konci měli být schopni seřadit snímky od subjektivně nejhoršího k subjektivně nejlepšímu.

Poslední zmíněnou je metoda hodnocení s jednorázovým podnětem s průběžným hodnocením kvality (SSCQE). Ta je pro hodnocení jednotlivých snímků celkem nepoužitelná, protože využívá průběžného hodnocení kvality v průběhu celé videosekvence. U videa může jeho kvalita kolísat například v závislosti na zobrazované scéně. Pro hodnocení kvality videa může být tato metoda velmi zajímavá, v našem případě pro hodnocení statických scén bohužel ne.

## 5.2 Stupnice hodnocení

Stupnice hodnocení musí vždy odpovídat používané metodě a hodnocené vlastnosti. Může být diskrétní s oddělenými stupni pro hodnocení, nebo spojitá například ve formě číselné osy s vyznačenými záchytnými body, často stejnými jako v případě diskrétní stupnice. Jednotlivé stupně se typicky rozlišují buď číselně nebo slovně. Porovnávám-li jen vztah mezi dvěma vzorky, volím logicky binárně mezi volbami Lepší – Horší nebo 1 – 0. Ukázkové stupnice podle doporučení [32] si lze prohlédnout v tabulce 6 a na obrázku 19.

Tab. 6: Stupnice pro subjektivní hodnocení dvou parametrů stereoskopického obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem

Stupnice pro hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu	Stupnice pro hodnocení vizuálního komfortu pozorování daného obrazu
1 – Excellent (Excelentní)	1 – Very comfortable (Velmi příjemný)
2 – Good (Dobrá)	2 – Comfortable (Příjemný)
3 – Fair (Ucházející)	3 – Mildly uncomfortable (Mírně nepříjemný)
4 – Poor (Špatná)	4 – Uncomfortable (Nepříjemný)
5 – Bad (Velmi špatná)	5 – Extremely uncomfortable (Velmi nepříjemný)



Obr. 19: Ukázka spojité stupnice pro hodnocení celkové kvality obrazu prostřednictvím subjektivního hodnocení kvality obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem

## 5.3 Vyhodnocení získaných dat

V rámci subjektivního hodnocení kvality stereoskopického obrazu je obvykle získáno poměrně velké množství dat, stejně tak tomu bylo i v případě praktické části této závěrečné práce. Ty je nutné vhodným způsobem statisticky zpracovat pro získání vypovídajících závěrů. V této práci jsou využívány metody uváděné v oficiálním doporučení ITU-R BT.500-13 [33] vhodné při vyhodnocování hodnocení pomocí metody single-stimulus (SS). Z [33] je v této podkapitole částečně čerpáno a zájemci v uvedeném dokumentu najdou i další podrobnější informace. Při psaní tohoto textu bylo využito také informací v [34].

### 5.3.1 Průměrné skóre vzorku

Základní určovanou hodnotou je průměrné skóre vzorku. Definujeme ho vztahem (3).

$$\bar{u}_{jkr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ijkr} \quad (3)$$

kde:

$N$  – počet pozorovatelů

$i$  – pozorovatel

$j$  – testovaná podmínka

$r$  – opakování

$u_{ijkr}$  – skóre pozorovatele  $i$  pro testovanou podmínku  $j$ , scény  $k$  pro opakování  $r$ , tedy hodnocení určitého pozorovatele pro danou prezentaci (jeden konkrétní specifický vzorek)

Daný vzorec je univerzální pro vyhodnocování hodnocení pomocí více možných metod. Počty lze tedy zjednodušovat podle aktuální situace. V naší praktické

části například nedocházelo k žádnému opakování, a tudíž proměnnou  $r$  jsme nemuseli uvažovat.

### 5.3.2 Interval spolehlivosti

Při vyhodnocování a prezentaci výsledků hodnocení je vhodné ke každému průměrnému skóre určit také příslušný interval spolehlivosti. Ten je určován pomocí směrodatné odchylky a průměrného skóre vzorku. Je doporučován takzvaný 95 % interval spolehlivosti určený následujícím rozmezím (4).

$$[\bar{u}_{jkr} - \delta_{jkr}, \bar{u}_{jkr} + \delta_{jkr}] \quad (4)$$

kde:

$$\delta_{jkr} = 1,96 \frac{S_{jkr}}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

a  $S_{jkr}$  značí směrodatnou odchylku pro každou prezentaci (celkový počet prezentací je  $L$ ) a je určena následujícím vzorcem (6).

$$S_{jkr} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{u}_{jkr} - u_{ijkr})^2}{(N-1)}} \quad (6)$$

Pro většinu uvedených vzorců lze v programu Microsoft Excel nalézt již předpřipravené ekvivalenty v podobě funkcí. Tento software tudíž lze pouze a jen doporučit pro zpracování dat. Je však vhodné si vždy zkontrolovat, že vzorec dané funkce odpovídá požadovanému účelu a pracuje se správným vzorcem. Například my chceme při výpočtu směrodatné odchylky funkci pro výpočet směrodatné odchylky výběru, jejíž matematický vzorec se drobně liší od vzorce pro výpočet směrodatné odchylky základního souboru.

U 95 % intervalu spolehlivosti máme právě 95% pravděpodobnost, že objektivně správná střední hodnota (teoreticky získatelná při velmi vysokém počtu účastníků hodnocení) se nachází někde v námi určeném intervalu spolehlivosti kolem námi experimentálně určené střední hodnoty. Více se lze dozvědět v [33].

### 5.3.3 Vyřazení určitých hodnotitelů

V každém subjektivním hodnocení se pravděpodobně najdou hodnotitelé, kteří budou mít tendenci být přehnaně pozitivní či naopak význačně negativní. Jejich známky se pak výrazně odlišují od většiny ostatních hodnocení a zkreslují získané výsledky nevhodným způsobem. Některé extrémní případy je dokonce vhodné z celého hodnocení vyřadit. Doporučená pravidla pro postup vyřazování nevhodných pozorovatelů popisuje opět [33]. V tomto dokumentu najdete případně i další podrobnější informace.

Vždy je nejprve nutné u každé prezentace určit, zda je či není rozložení jednotlivých hodnocení normálního charakteru. To lze zjistit pomocí  $\beta_2$  testu, který definujeme pomocí vzorců (7) a (8).

$$\beta_2 = \frac{m_4}{(m_2)^2} \quad (7)$$

kde:

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^N (u_{ijk_r} - \bar{u}_{ijk_r})^x}{N} \quad (8)$$

Pokud vychází koeficient špičatosti  $\beta_2$  v rozmezí mezi hodnotami (2;4), můžeme rozložení jednotlivých hodnot považovat za normální. Následně porovnáváme jednotlivá hodnocení vzorků jednotlivých pozorovatelů se dvěma hodnotami, u každého vzorku specifickými pro daný vzorek. Definice určení těchto dvou čísel se liší podle charakteru rozložení všech hodnocení daného vzorku. Pro normální rozložení porovnáváme s hodnotami  $\bar{u}_{jkr} + 2S_{jkr}$  a  $\bar{u}_{jkr} - 2S_{jkr}$ . Význam proměnných je stejný jako v předchozích pododdílech,  $\bar{u}_{jkr}$  značí průměrné hodnocení vzorku a  $S_{jkr}$  směrodatnou odchylku. Pro jiné než normální rozložení jednotlivých hodnocení daného vzorku porovnáváme hodnocení pozorovatele s čísly  $\bar{u}_{jkr} + \sqrt{20}S_{jkr}$  a  $\bar{u}_{jkr} - \sqrt{20}S_{jkr}$ . U každého pozorovatele si zároveň vedeme jeho dvě charakteristická čísla  $P_i$  a  $Q_i$ . Je-li hodnocení  $u_{ijk_r}$  větší než  $\bar{u}_{jkr} + 2S_{jkr}$  nebo  $\bar{u}_{jkr} + \sqrt{20}S_{jkr}$  podle typu rozložení, potom zvýšíme číslo  $P_i$  daného hodnotitele o  $+1$ . Je-li hodnocení  $u_{ijk_r}$  menší než  $\bar{u}_{jkr} - 2S_{jkr}$  nebo  $\bar{u}_{jkr} - \sqrt{20}S_{jkr}$  podle typu rozložení, potom zvýšíme číslo  $Q_i$  daného hodnotitele o  $+1$ . Po porovnání všech hodnocení od daného pozorovatele je nutné zpracovat jeho konečná charakteristická čísla  $P_i$  a  $Q_i$ . Zajímají nás konkrétně dvě hodnoty určené vztahy (9) a (10).

$$x = \frac{P_i + Q_i}{JKR} \quad (9)$$

$$y = \left| \frac{P_i - Q_i}{P_i + Q_i} \right| \quad (10)$$

kde:

$J$  – počet testovaných podmínek včetně referenční

$K$  – počet testovaných scén nebo sekvencí

$R$  – počet opakování

( $L$  – počet prezentací, což u většiny hodnocení odpovídá číslu  $J.K.R$ )

Je-li  $x > 0,05$  a zároveň  $y < 0,3$ , potom bychom měli daného pozorovatele z hodnocení vyřadit a provádět celkové vyhodnocení výsledků hodnocení bez jeho příspěvků.

## 5.4 Zhodnocení oddílu

V tomto oddíle byly rozebrány základy subjektivního hodnocení kvality stereoskopického obrazu se zaměřením na testovací metody a průběh hodnocení. Pro hodnocení v praktické části této práce jsou zajímavé především metody s jednorázovým podnětem („single stimulus“) a porovnávání párů („pair comparison“). Pro metodu s jednorázovým podnětem byly popsány i základní principy statistického vyhodnocení získaných dat. Ty lze využít i pro vyhodnocování hodnocení pomocí jiných metod, ale je vhodné se dále informovat v doporučení [33]. Při samotné realizaci není možné zohledňovat jen výše zmíněné principy. Zásadní je také udržení stejných podmínek hodnocení pro všechny účastníky po celou dobu jejich práce. Sofistikovanost celého hodnocení je vhodné uvážit podle důležitosti testování,



jeho účelu, dostupného vybavení, financí, počtu účastníků a případně i dalších faktorů. Co je nutné zvážit před realizací samotného hodnocení ještě jednou shrnuje tabulka 7.

Tab. 7: Co je nutné zvážit při přípravě subjektivního hodnocení stereoskopického obrazu?

cíle a důležitost hodnocení
dostupné vybavení
výběr vhodných vzorků
metoda a stupnice hodnocení
způsob zobrazování vzorků
počet účastníků
finanční rozpočet

## 6 Dostupné vybavení, jeho ovládání a tvorba obrazu ve formátu 2D + Z

Tento a následující oddíly této závěrečné práce se již zabírají řešením praktické části zadání bakalářské práce. Jde především o tvorbu nástrojů pro autostereoskopické displeje ve formátu 2D-plus-depth. K praktickému testování a následné realizaci subjektivního hodnocení kvality obrazu byl využit autostereoskopický displej dostupný na katedře radioelektroniky – Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD display.<sup>8</sup>

Velká část informací všech následujících oddílů jsou mé vlastní poznatky nabyté při tvorbě požadovaných nástrojů, následném testování a hodnocení vyprodukovaných výsledků. Z cizích materiálů bylo pracováno hlavně s různými návody, letáky atp. Zmiňme hlavně [35], [40], [41], [42] a [43]. Zcela přeжатé byly výchozí vstupní páry stereo snímků a algoritmy pro generování hloubkových map.

### 6.1 Využívaný autostereoskopický displej

Autostereoskopický displej je naprostou nutností chceme-li testovat funkčnost jednotlivých výsledků praktické části práce. Jedná se o model Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD. Z přední strany se od běžných LCD televizí odlišuje na první pohled díky přítomnosti lentikulární vrstvy na povrchu navíc. Na zadní straně si lze všimnout přítomnosti dalších dvou neobvyklých prvků. Jedná se o Dimenco Rendering Core Premium od firmy Dimenco a napájecí zdroj k němu. Informace o tomto displeji jsou čerpány z manuálu k displeji [35], případně jsou doplněny vlastní postřehy z práce s displejem.

K počítači tento displej připojujeme přes rozhraní DVI („Digital Visual Interface“), příslušný kabel by měl být součástí balení. Při použití redukce lze využít například také HDMI („High Definition Multimedia Interface“). Této možnosti jsme využili i my při testování funkčnosti vytvořených obrazů ve formátu 2D-plus-depth a následném subjektivním hodnocení kvality obrazu. Náš počítač by měl pro bezproblémové připojení k uvedenému displeji splňovat minimální parametry uvedené v tabulce 8. Údaje pochází ze zmíněného manuálu [35] z roku 2013, takže by měly být poměrně aktuální.

Tab. 8: Minimální požadavky na počítač připojovaný k Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD uváděné v [35]

2 GHz processor
NVidia grafická karta, rozlišení 1920 x 1080
DVI, HDMI nebo DisplayPort
Windows XP or Windows 7

Lentikulární vrstva na povrchu displeje umožňuje využívat až 28 pozorovacích poloh. Pro dosažení 3D produkce je nutné, aby vstupní signál přicházel do displeje ve formátu 2D-plus-depth, který je stručně popsán v předchozí teoretické části práce. Další informace o tomto formátu jsou obsaženy i v dalších oddílech tohoto textu. Samotná tvorba obsahu v tomto formátu je rozebrána samozřejmě také. Na displeji lze

<sup>8</sup> Více informací o něm se lze dozvědět v následujícím textu nebo na stránkách firmy Dimenco dostupné z <http://www.dimenco.eu/>.

přehrávat také běžná dvourozměrná videa jako na jiných zobrazovačích, avšak díky lenticulární vrstvě na povrchu obrazovky bych to nepovažoval za úplně vhodné. Kvalita ani vizuální komfort pozorování nejsou při přehrávání 2D videa úplně optimální. Očím je pozorování nepříjemné již po velmi krátké době. Pro samotné přehrávání obrazu je třeba mít na počítači nainstalovaný Dimenco 3D Player, který zvládne přehrávat soubory v požadovaném formátu s příponami „.s3d“ nebo „.b3d“. Přípona „.s3d“ náleží video sekvencím, „.b3d“ statickým snímkům. Tento program lze zdarma stáhnout z webových stránek výrobce. Odkaz na ně naleznete v poznámce pod čarou na předchozí straně. Kromě speciálních formátů podporuje přehrávač i různé běžné 2D formáty.

Základní přehled paramterů zobrazovače využívaného při práci na této bakalářské práci shrnuje tabulka 9. Podrobnější informace lze nalézt ve zmiňovaném manuálu od výrobce [35].

Tab. 9: Základní přehled parametrů displeje Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD

Úhlopříčka	42" (107 cm)
Rozlišení	Full HD (1920 x 1080 pixelů)
Rozměry	968 x 559 x 132 mm
Jas	700 cd/m <sup>2</sup>
Typický kontrast	1100:1
Typická odezva	9 ms
3D technologie	Fixed Lenticular 3D Technology
Vstupní obrazový konektor	ideálně DVI
Váha	37 kg
Provozní rozsah teplot	0 °C - 40 °C
Střední doba mezi poruchami (MTBF)	50 000 hodin
Zajímavost	Připraveno na fungování v nepřetržitém provozu.

### 6.1.1 Dimenco Rendering Core Premium

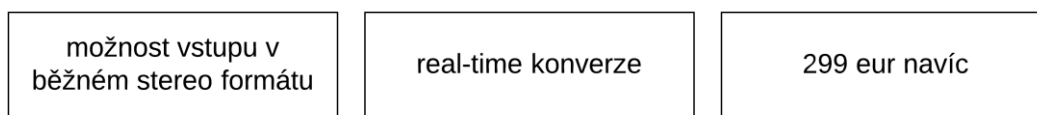
Jak již bylo zmíněno, Dimenco Rendering Core Premium je jednou z hlavních odlišností využívaného autostereoskopického displeje oproti běžným Philips LCD zobrazovačům. Jeho hlavním úkolem je přepočítání vstupního signálu ve formátu 2D + Z na multiview video signál, který je z výstupu tohoto vykreslovacího jádra přiváděn v příslušné podobě do displeje. Lze využívat také ekvivalentního termínu rendering box, který lze poměrně přirozeně přejmout z angličtiny.

Teoreticky by mělo být možné se bez takového zařízení navíc obejít a budit displej přímo multiview video signálem ve stejné přizpůsobené podobě jako vykreslovací jádro. Nicméně podle manuálu k displeji [35] by to tak snadné být nemuselo. Je v něm přímo napsáno, že model BDL4251VS zobrazuje ve 3D výhradně při buzení pomocí signálu ve formátu 2D-plus-depth prostřednictvím rendering boxu. Kromě základních informací v manuálu k televizi [35] si lze najít i speciální leták věnovaný jen tomuto vykreslovacímu jádru [42]. Z něho je zde také uvedeno několik informací.

Odlišnost verze Premium od běžné verze spočívá v tom, že po zakoupení příslušné licence lze pomocí prémiového modelu budit displej také pomocí běžného stereo videa. Převod do formátu kompatibilního s autostereoskopickým displejem proběhne v jádru automaticky. Ze stereo páru je vypočtena hloubková mapa a následně je už možné generovat video v multiview formátu. Celý tento proces funguje plně

automaticky a prakticky v reálném čase. Zpoždění vzniklé touto činností navíc by podle [42] nemělo přesáhnout dobu trvání jednoho snímku videa. Díky těmto vlastnostem lze televizi s prémiovou verzí produktu snadno propojit například s kamerou natáčející živě a souběžně zobrazovat natáčený obsah na autostereoskopickém displeji ve 3D. Jak již bylo řečeno v teoretické části této práce, jedním z ideálních hardwarových řešení, na kterém je vhodné stereo porovnávání provádět, je FPGA („field programmable gate array“). A právě této hardwarové platformy využívá i popisované jádro od Dimenca. Ke dni 17. 4. 2014 stojí licence pro konverzi v reálném čase 299 eur. Premiová verze rendering boxu nemusí být součástí všech modelů autostereoskopických displejů od Dimenca. U 42" a 55" verzi by součástí balení být měla.

Výrobce také uvádí, že vykreslovací jádra nejsou jednoduše zaměnitelná za jiná, a to ani za stejné typy z jiného kusu stejného modelu displeje. Tento fakt bych rád ověřil, nicméně neměl jsem k dispozici více než jedno kompletní balení autostereoskopického displeje. Propojení boxu, obrazovky a počítače je realizovatelné základně přes rozhraní DVI, nicméně při užití redukce lze využít například i HDMI kabelu.



Obr. 20: Dimenco Rendering Core Premium

## 6.2 Možnosti nastavení zobrazení na užívaném autostereoskopickém displeji

Jak již bylo zmíněno, pro samotné přehrávání obrazu ve formátu 2D + Z je třeba mít nainstalovaný Dimenco 3D player dostupný na webu výrobce. Kromě něho je nutné si nainstalovat také Dimenco Control Tool, taktéž zdarma dostupný na webu výrobce displeje. Odkaz na tento web lze najít v poznámce pod čarou o dvě strany zpět. Bližší popis těchto dvou softwarových nástrojů je předmětem následujícího textu.

### 6.2.1 Dimenco 3D player

Dimenco 3D player je vchozím softwarovým řešením Dimenca pro přehrávání 3D obrazových souborů ve formátu 2D + Z na jejich autostereoskopických displejích. Kromě samotného přehrávání podporuje program také několik dalších možností. Většinu z nich shrnuje následující tabulka.

Tab. 10: Základní možnosti programu Dimenco 3D player

tvorba, uložení i načtení playlistu
přehrávání 2D a stereo videa
roztažení obrazu na celou obrazovku
vynucení zachování poměru stran obrazu
přehrávání ve smyčce

Pro ovládnutí všech možností nástroje lze náhlédnout do manuálu od Dimenca [40] volně dostupného z jejich webu, avšak ovládání je celkově poměrně intuitivní a dobře řešené. Po základním osahání programu by běžný uživatel neměl mít problémy

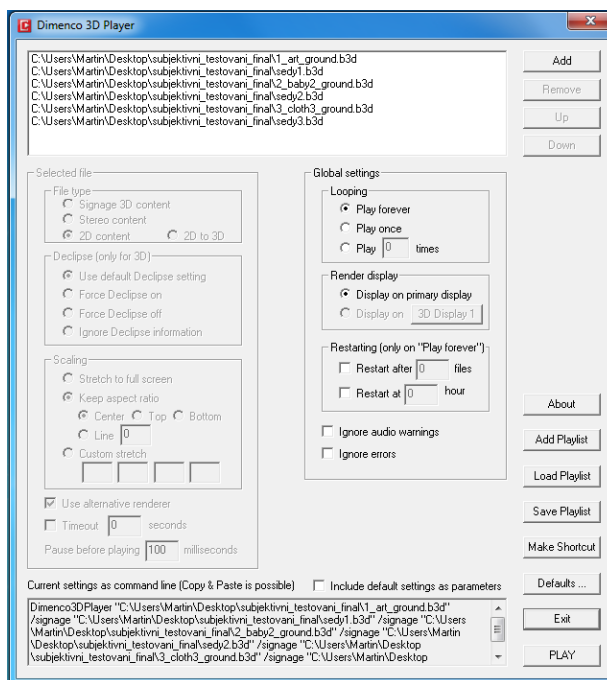
pracovat s ním pomocí grafického rozhraní i bez studia manuálu. Některé další informace z něho však mohou být užitečné, například metody řešení některých problémů při přehrávání, které mohou potenciálně nastat.

Přehrávání souboru ve formátu 2D-plus-depth je možné pouhým dvojklikem na jeho ikonu, samozřejmě však až po nastavení Dimenco 3D Playeru jako výchozího přehrávače pro daný typ souborů. Při takto jednoduchém spuštění přicházíme o možnost úpravy nastavení programu. Druhou možností je nejprve spustit program a následně přetáhnout do jeho okna soubory určené k přehrávání. Po jejich výběru v okně programu lze následně upravovat nastavení pro jejich zobrazení. Třetí a poslední možností je ovládání programu pomocí příkazové řádky. Pro využití této třetí možnosti už je určitě vhodné do manuálu nahlédnout. Bez něho se v tomto případě asi nikdo z běžných uživatelů neobejde. Asi jedinou možností, kterou lze nastavit pouze pomocí příkazové řádky, je možnost ukládání historie přehrávání do speciálního souboru, tedy logování. Stačí to však nastavit pouze jednou a přehrávač by si to měl do budoucna pamatovat. Zajímavou vlastností grafického uživatelského rozhraní je zobrazování toho, jak by vypadal příkaz v příkazové řádce odpovídající aktuálnímu nastavení zobrazení. Díky tomu je snadné naučit se ovládat program pomocí příkazové řádky postupně pomocí ukázek zobrazených v okně programu.

Tab. 11: Možnosti ovládání programu Dimenco 3D player

pouhé spuštění přehrávání souboru pomocí dvojkliku
ovládání pomocí grafického rozhraní
ovládání pomocí příkazové řádky

Přestože je náš autostereoskopický displej konstruován tak, aby vydržel nepřetržitý provoz, přehrávač je vhodné pravidelně restartovat pro udržení stability. Automatické restartování lze nastavit jak v okně programu, tak pomocí příkazové řádky. Ukázkou prostředí programu si lze prohlédnout na obrázku 21.



Obr. 21: Ukázka prostředí programu Dimenco 3D Player

## 6.2.2 Dimenco Control Tool

Druhým potřebným softwarovým nástrojem pro plnohodnotnou práci s Dimenco/Philips autostereoskopickými displeji je Dimenco Control Tool. Tento program umožňuje měnit parametry zobrazení na displeji. Lze ho ovládat pomocí přehledného grafického rozhraní a na stránkách výrobce k němu lze nalézt manuál [41], ze kterého je v této kapitole uvedeno několik poznatků. Stavěno je také na mých vlastních zkušenostech z práce s displejem. Z výrazně užitečných částí manuálu bych vyzdvihl především část věnovanou pomoci při řešení problémů, které se při práci s displejem mohou vyskytnout. Pro správnou funkci softwaru je vhodné mít předem nainstalovaný Windows Media Player 11, jedná se především o nutnou přítomnost prvku Windows Media Video 9 Advanced Codec. Po spuštění displeje, počítače nebo obojího je nevhodné manipulovat s propojovacími kabely.

Prováděné změny nastavení se projevují okamžitě, tedy v reálném čase, což značně usnadňuje nalezení ideálního nastavení pro danou situaci. Modifikovatelných možností je hned několik. Mezi ty důležitější patří například možnost úpravy ideální pozorovací vzdálenosti v rozsahu od 150 cm do 500 cm. Výchozí hodnotou nastavenou z výroby je 250 cm. Dalším zásadním parametrem zobrazení, který lze měnit, je hodnota offsetu. To je číslo, jehož změnou lze posouvat celou scénu blíže k uživateli či naopak dále od něj. Parametr „depth factor“, neboli česky koeficient hloubky, určuje, jaký bude zobrazený reálný hloubkový rozdíl mezi objekty, které jsou od uživatele v nejmenší a největší vzdálenosti. Jednotlivé možnosti nastavení je dobré si vždy vyzkoušet a vybrat si jejich hodnoty podle našich preferencí a oblastí využití displeje. Pro získání dalších informací lze doporučit přečtení návodu k softwaru [41]. Některé vybrané pomocí tohoto nástroje nastavitelné parametry zobrazení shrnuje tabulka 12.

Tab. 12: Ukázka parametrů zobrazení nastavitelných pomocí Dimenco Control Toolu

pozorovací vzdálenost
offset
depth factor
jas
kontrast

## 6.2.3 Roztažení obrazu při zobrazení na displeji

Informace v této podkapitole jsou převzaty z [43]. Před vysláním výsledných obrazových dat je nutné vzít v potaz ještě jeden zásadní fakt a to ten, že po obou stranách displeje, nebude při pohledu kolmo na obrazovku vidět určitý úzký pruh obrazu, typicky 10 nebo 15 pixelů. Dívá-li se totiž nějaký uživatel více ze strany, očekává, že uvidí nějakou další informaci, jako kdyby se v reálném světě díval z jiného úhlu. Těchto 10/15 pixelů tvoří jakási rezervní data právě pro případy pozorování z většího úhlu. Drobnou nevýhodou tohoto oříznutí části scény je drobná deformace poměru stran obrazu.

## 6.2.4 Přepočítání hloubky na disparitu

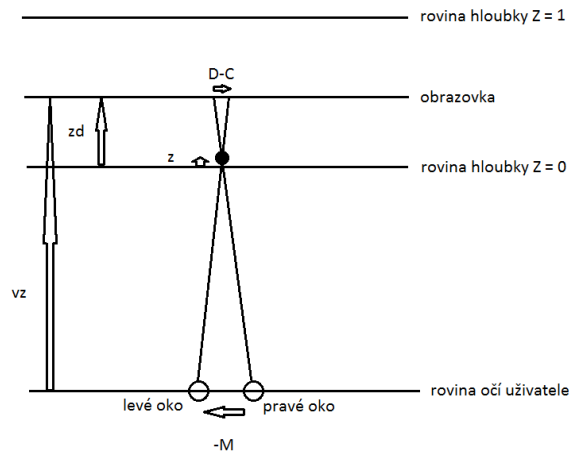
Disparita vyjadřuje rozdílnost polohy pixelu mezi obrazy pro levé a pravé oko. Může nabývat hodnot mezi 0 až 255 (v našem případě omezení na 8 bitů a 256 hodnot) a značí se  $D(Z)$ . Ze značení vyplývá, že disparita je funkcí reálné hloubky. Ta se totiž značí

právě  $Z$  a ukazuje na reálnou hloubku v obraze. Může nabývat hodnot mezi 0 a 1. Základně se s ní tedy pracuje v normované podobě. V tomto pododdíle je popsán způsob přepočtu při využití našeho autostereoskopického displeje Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD. Informace jsou čerpány z [43].

Převod mezi disparitou a hloubkou lze definovat matematicky vzorcem (11).

$$D(Z) = M \left( 1 - \frac{vz}{z - z_d + vz} \right) + C \quad (11)$$

$M$ ,  $Z_d$ ,  $vz$  a  $C$  jsou konstanty podle použitého typu displeje,  $D$  značí disparitu a  $Z$  normovanou hloubku. Pro 42“ displej, tedy v této práci využívaný, mají hodnoty  $M = -1960,37$ ,  $Z_d = 0,467481$ ,  $vz = 7,655192$  a  $C = 127,5$ . Pro lepší představu významu jednotlivých hodnot je přiložen obrázek 22.



Obr. 22: Ilustrativní obrázek vztahu mezi normovanou hloubkou a disparitou, inspirováno z [43]

### 6.3 Podoba přenosu dat do displeje

Jak již bylo řečeno, obraz ve formátu 2D + Z je do displeje přenášen pomocí kabelu a rozhraní DVI. Zajímavá je však podoba přenášených dat, jak se lze dočíst v [43]. Na počítači je obraz uchovávan v podobě dvou vedle sebe horizontálně spojených obrázků – 2D obrazu scény a odpovídající hloubkové mapy. Přenášen v této podobě ale není. Je uplatněn princip prokládání a na úplný začátek dat každého snímku je přidáno navíc speciální záhlaví umožňující displeji poznat, že budou následovat data v určitém formátu. Pomocí obsahu záhlaví lze také ovlivnit různá nastavení. Ukázková podoba jednoho přenášeného snímku je schematicky naznačena na obrázku 23.

záhlaví	2D obraz, řádek 1	hloubková mapa k 2D obrazu, řádek 1
informace o pozadí ve 2D, řádek 1 (u 2D + Z bílá plocha)		hloubková mapa k informaci o pozadí, řádek 1 (u 2D + Z bílá plocha)
2D obraz, řádek 2		hloubková mapa k 2D obrazu, řádek 2
informace o pozadí ve 2D, řádek 2 (u 2D + Z bílá plocha)		hloubková mapa k informaci o pozadí, řádek 2 (u 2D + Z bílá plocha)
⋮		⋮
2D obraz, řádek 540		hloubková mapa k 2D obrazu, řádek 540
informace o pozadí ve 2D, řádek 540 (u 2D + Z bílá plocha)		hloubková mapa k informaci o pozadí, řádek 540 (u 2D + Z bílá plocha)

Obr. 23: Ukázka prokládání při přenosu snímku ve formátu 2D + Z, inspirováno z [43]

### 6.3.1 Záhloví

V minulém pododdíle bylo zmíněno, že přítomnost speciálního záhlaví upozorňuje autostereoskopický displej na formát následujících dat a umožňuje také změnu určitých nastavení práce s daty. Podrobnější informace o tom jsou obsahem této kapitoly. Bylo čerpáno z [43].

Umístěno je hned na počátku vysílaných dat, jak je symbolicky zakresleno na obrázku 23 v předchozí kapitole. Konkrétně se nachází na místech sudých modrých subpixelů. Při následném vykreslování obrazu jsou hodnoty záhlaví ignorovány a do daných modrých subpixelů jsou nakopírovány hodnoty ze sousedních modrých subpixelů. Díky tomu, že barva se málokdy mění skokově, nedochází k příliš velké chybě zobrazení.

Délka záhlaví je 32 bytů a má dvě části. Prvních deset bytů je základních a pro využití obrazu v základní podobě formátu 2D + Z plně dostačují. Pokud chceme využít možnosti obrazu v rozšířeném formátu Declipse, je nutné příslušným způsobem vyplnit i následujících 22 bytů. Formát Declipse odpovídá představě vrstveného hloubkového video (LDV) popsaného v teoretické části. Pro podrobnější informace lze doporučit nahlédnutí do [43]. V této bakalářské práci se s tímto formátem vůbec nepracuje.

Z bytů záhlaví lze určit mnoho informací. Hned na začátku je v něm určeno, zda následuje obraz v základním formátu 2D + Z nebo ve formátu Declipse. Obsahuje také hodnotu offsetu a mnohé další. Pro konkrétnější informace je nutné podívat se do [43]. Obsah záhlaví je kontrolován v každém snímku videa zvlášť, jakékoliv změny se tedy projeví prakticky okamžitě.

## 6.4 MATLAB a jeho užití v této práci

MATLAB neboli MATrix LABoratory jsem zvolil jako vývojové prostředí pro další práci z důvodů jeho názornosti, srozumitelnosti, rozšířenosti v akademickém a výzkumném prostředí. Jak už vyplývá z jeho názvu, přistupuje ke všemu jako k maticím a následně s nimi provádí maticové operace. To je důležité si uvědomovat při práci s jakýmkoliv obsahem, v našem případě obrazovým. U obrázku jsou dva rozměry matice určeny celkem logicky rozlišením, třetím rozměrem disponují pouze barevné obrázky. Ten odpovídá jednotlivým barevným kanálům prostoru RGB.

Při své práci využívám převážně základní matematické operace a funkce dostupné v rozšiřujícím balíčku, u MATLABu se takovýmto balíčkům říká „toolboxy“, Image Processing Toolboxu. Ten obsahuje mnoho užitečných funkcí pro práci s obrazovými daty, které pak člověk nemusí sám implementovat a zkoumat jejich vnitřní princip. Většinu nutných informací k užívání jednotlivých funkcí všeho druhu najdeme ve velmi propracované nápovědě dostupné pomocí příkazu „help“.

Z ne úplně základních funkcí a procesů bylo při práci využíváno také možnosti spolupráce MATLABu a kódů napsaných v jazyce C/C++. Ty nejsou sice tak názorné jako čistě matlabovský kód, umožňují však značné urychlení výpočetní části procesů. Jedna z jejich nevýhod spočívá v nutnosti kompilace zdrojového kódu podle užívaného operačního systému a verze MATLABu, což může být jinak častým zdrojem chyb a nefunkčnosti skriptů.

Pro určité zlepšení či usnadnění práce by bylo dobré mít možnost využít také funkcí dalšího balíčku („toolboxu“) pojmenovaného Computer Vision System Toolboxu. Minimálně pro výpočet disparity by nabízel speciální předpřipravenou funkci, a díky tomu by nebylo nutné využívat převzatých kódů od jiných autorů. Další



informace o rozšiřujících balíčcích („toolboxech“) i programu jako takovém lze najít na webových stránkách programu<sup>9</sup> a mnohých uživatelských fórech.

## 6.5 Realizace jednotlivých kroků tvorby obsahu

Nástroj určený pro tvorbu obsahu pro ve formátu 2D + Z by mohl být realizovaný v rámci jednolitého skriptu, vhodnější je však rozložit jednotlivé kroky tvorby obsahu v požadovaném formátu do více skriptů pro usnadnění následných úprav a vylepšování jednotlivých částí. Tímto způsobem je to řešeno i v této práci.

Vždy je dobré se zamyslet nad tím, co všechno je nutné speciálně programovat, a co lze řešit pomocí již zabudovaných funkcí MATLABu, šetří to práci i čas. Sám jsem vytvořil obslužný skript *testovaci\_skript.m*, pomocí kterého jednotlivé skripty a různá další nastavení celého nástroje tvorby obsahu můžeme ovlivňovat a ovládat. Obsahuje pravděpodobně všechny základní možnosti, které může běžný uživatel při tvorbě obsahu ve formátu 2D + Z potřebovat. Je určen pouze pro tvorbu statický obrazového obsah v požadovaném formátu. Nakonec jsem vytvořil ještě aplikaci s grafickým uživatelským rozhraním, jejíž možnosti jsou velmi analogické jako u ovládacího skriptu *testovaci\_skript.m*. Některé kroky lze provést jen pomocí skriptu, některými možnostmi disonuje naopak pouze aplikace. Je dobré si vyzkoušet obojí. Popis obslužného skriptu a realizace jednotlivých kroků tvorby obrazu ve zmíněném formátu je hlavním obsahem následujících několika pododdílů. Vytvořené aplikaci je následně věnován vlastní pododdíl.

### 6.5.1 Řešení více podob vstupních snímků

Podle požadavků zadání práce je nutné počítat s třemi možnými podobami vstupních párů snímků – separátně oddělené snímky pro levé a pravé oko, dvojice stereo snímků spojená do podoby side-by-side nebo do podoby top-and-bottom. Oddělené obrázky lze rovnou načíst do vhodně pojmenovaných proměnných pomocí dostupného příkazu „*imread()*“. Pro zbylé dvě možnosti vstupů je však nutné připravit vlastní skripty pro rozdělení výchozího obrázku na stereo pár, abychom měli univerzálně připravené obrazy ve vždy stejných proměnných pro následující práci bez ohledu na volbu podoby vstupu. U vstupů ve formách side-by-side a top-and-bottom je navíc nutné uvažovat i možnost, že jednotlivé pohledy mají kromě horizontálního či vertikálního spojení ještě také stlačené rozlišení ve stejném směru jako spojení. Situaci jsem vyřešil napsáním skriptů s názvy skrnutými v tabulce 13. Lze je samozřejmě nalézt na přiloženém médiu. Podrobnější představu o jejich principu lze dostat jejich analýzou a pročtením komentářů uvnitř skriptů. Vesměs na nich není nic zásadně složitějšího.

Tab. 13: Skripty zajišťující rozdělení formátu side-by-side a top-and-bottom na stereo pár

topbottom_to_stereo.m
topbottom_to_stereo_s_roztazenim.m
sbs_to_stereo.m
sbs_to_stereo_s_roztazenim.m

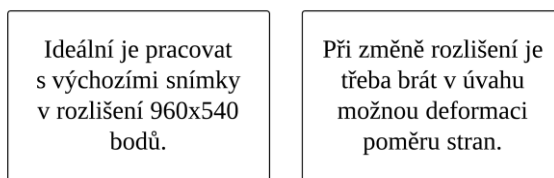
<sup>9</sup> Na tento web lze přejít z <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

## 6.5.2 Rozlišení snímků

Vzhledem k poměrně vysoké výpočetní náročnosti výpočtu hloubkové mapy a omezenému rozlišení autostereoskopického displeje není nutné pracovat v případech velkých snímků s jejich plným rozlišením. Nemá smysl pracovat s obrazem s vyšším rozlišením než 960 x 540 bodů. Vyššího rozlišení neumí displej nijak využít. Pro řešení úpravy rozlišení byla do obslužného skriptu zařazena možnost redukce rozlišení pomocí příkazu „*imresize()*“. Lze volit mezi změnami rozlišení na maximální využitelné, pro náš displej tedy 960 x 540 pixelů, nebo na uživatelem volitelné prostřednictvím přenásobení obou rozměrů obrázků zadaným koeficientem. První volba tvrdého vnucení konkrétních rozměrů logicky nemusí zachovat poměr stran. Druhá možnost díky násobení obou rozměrů stejným číslem poměr stran naopak zachovává.

Obsah o menším než uvedeném rozlišení lze snadno roztáhnout na celou plochu displeje a poměr stran tedy můžeme stejně často zdeformovat. Tento problém lze řešit doplněním zbylé plochy kolem obrázku prázdnou plochou jedné barvy až do dosažení rozlišení 960 x 540 bodů. Tuto možnost v obslužném skriptu nenajdete, ale testoval jsem ji a troufnu si říct, že lepším dojmem rozhodně působí roztažený obsah na celou obrazovku. Samozřejmě to neplatí pro případy extrémní deformace poměru stran.

Z toho, co již bylo napsáno o formátu 2D + Z, by se dalo očekávat, že maximální rozlišení 2D obrazové části může být až 960 x 1080 bodů, abychom se i s hloubkovou mapou dostali na celkové rozlišení panelu 1920 x 1080 bodů. Není tomu ale tak. 2D obraz může využívat jako maximální rozlišení snímku scény i hloubkové mapy jen již zmíněných 960 x 540 pixelů. U Declipse formátu by byla spodní polovina celého snímku obsazena informací o pozadí a jeho hloubce, u běžné 2D + Z varianty je spodní polovina obrazu tvořena bílou plochou bez užitečné hodnoty. Tyto a mnohé další informace se lze dočíst v [43].



Obr. 24: Změna rozlišení

## 6.5.3 Užité algoritmy pro výpočet hloubkových map

Algoritmů pro generaci hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků bylo do vytvořeného ovládacího skriptu *testovaci\_skript.m* zapracováno hned několik. Vzhledem k programátorským schopnostem autora tohoto textu a nedostatku času byly bohužel všechny převzaty od jiných autorů. Bylo vždy nutné především patřičně upravit jejich práci se vstupy a výstupy, aby správně spolupracovaly s ovládacím skriptem. Jejich zapracování je v souboru *testovaci\_skript.m* naznačeno, avšak samotné algoritmy na přiloženém CD dostupné nejsou z důvodů autorských práv. Všechny použité kódy jsou však volně dostupné na internetu a neměl by pro nikoho být příliš velký problém si je do skriptu zapracovat sám. Autoři je navíc mohou občas aktualizovat, takže je v každém případě před jejich použitím vhodné vyhledat nejnovější verzi.

Následuje seznam použitých skriptů s krátkým popisem. Jedná se výhradně o skripty, se kterými bylo v rámci této práce zkoušeno produkovat nějaké výstupy ve formátu 2D + Z. Kvalita výstupů byla často diskutabilní, nicméně funkční byly všechny. Pro více informací o nich je lepší podívat se do příslušné publikace, na webovou stránku autora nebo samotného autora nějakým způsobem zkontaktovat.

- FAST MATLAB STEREO MATCHING ALGORITHM (SAD) ve skriptu `stereomatch.m` vytvořený jako součást diplomové práce [44]. Celý matlabovský kód i s grafickou nadstavbou lze dohledat v rámci MathWorks - MATLAB Central - File Exchange.<sup>10</sup> Jedná se o nejpoužitelnější implementaci v tomto seznamu. Rychlost i kvalita produkováných výsledků byla při správném nastavení akceptovatelná.
- Function-Compute Correlation between two images using various similarity measures with Left Image as reference od autora jméno Siddhant Ahuja z roku 2010 dostupný z webových stránek autora.<sup>11</sup> Žádnou publikaci, která by se ke skriptu vázala se mi najít nepodařilo. Lze užít porovnávání založené například na principech sumy absolutních rozdílů (SAD) nebo sumy čtvercových rozdílů (SSD). Jedná se tedy o lokální metody pro stereo porovnávání. Na stránkách autora lze najít i další zajímavé využitelné kódy. Problémem tohoto skriptu byla rychlost. Díky příliš dlouhým výpočetním časům nebylo možné provést důkladnější testování a ozkoušet všechny jeho možnosti.
- 3D from stereo ve skriptech `stereo_nofilter.m` a `stereo.m` s využitím `modefilt2.m` a `modefilt2_mex.cpp` od autora jménem Shawn Lankton dostupný z webových stránek autora.<sup>12</sup> Autor uvádí, že se při programování svého kódu inspiroval publikací [51]. Tato implementace je stejně jako první v seznamu vcelku dobře použitelná. Výpočetní časy bývají zpravidla o něco delší, ale je-li uživatel dostatečně trpělivý, výsledky bývají akceptovatelné kvality.

Základní teorie výpočtu hloubkových map ze vstupního páru stereo snímků je rozebrána v teoretické části práce. Pokud by čtenáře zajímal konkrétní princip činnosti uvedených algoritmů, neměl by, vzhledem k jejich dostupnosti, být problém stáhnout si jejich zdrojové kódy a analyzovat je.

V případě, že bychom nechtěli využít žádného z nich a měli bychom hloubkovou mapu už připravenou předem, lze vykonání těchto algoritmů přeskočit a mapu načíst ze souboru do adekvátní proměnné. Tato možnost je v ovládacím skriptu samozřejmě zakomponována také.

#### 6.5.4 Zřetězení a závěrečné kroky

Pro vytvoření statického obrazu ve formátu 2D + Z je nutné na závěr snímek scény a k němu adekvátní hloubkovou mapu horizontálně spojit a uložit výsledek ve formátu s příponou „.bmp“. Tu je následně nutné změnit na „.b3d“ a to pouhým přejmenováním.

---

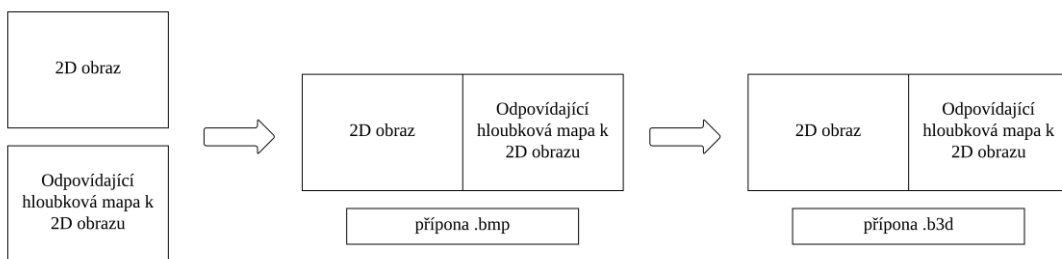
<sup>10</sup> Výrobce programu MATLAB provozuje speciální server pro výměnu matlabovských skriptů. Tento konkrétní skript lze najít na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28522-stereo-matching/content/stereomatch.m>.

<sup>11</sup> Lze nalézt spolu s dalšími informacemi na <http://siddhantahuja.wordpress.com/2010/04/11/correlation-based-similarity-measures-summary/>.

<sup>12</sup> Lze nalézt spolu s dalšími informacemi na <http://www.shawnlankton.com/2008/04/stereo-vision-update-with-new-code/>.

Díky praktickému testování bylo zjištěno, že je často nutné změnit datový typ matice hloubkové mapy, aby se shodoval s datovým typem matice obrazu. Tento proces mívá často za následek ztmavení nebo zesvětlení hloubkové mapy, většinou ztmavení. Pro kompenzaci tohoto jevu byla do ovládacího skriptu přidána možnost přenásobení matice hloubkové mapy uživatelem určeným koeficientem prvek po prvku. Při užití koeficientu většího než 1 je mapa zesvětlována, při koeficientu menším než 1 naopak ztmavována.

Samotné horizontální spojení snímku a odpovídající hloubkové mapy vedle sebe je realizováno pomocí skriptů *horizontal\_concat\_bw.m* a *horizontal\_concat\_colour.m*. O tom, který z nich zvolit, rozhoduje to, zda je obrazová část černobílá (bw) nebo barevná (colour). Při použití jen jednoho z nich pro barevné i černobílé snímky by nastával problém s rozměry matic, které u černobílých obrázků postrádají třetí rozměr. Tyto dva skripty v sobě mají zabudováno rovnou i uložení výsledku zřetězení ve formátech s příponami „.bmp“ i „.b3d“. Výsledek je prostřednictvím oblužného skriptu zobrazen pro kontrolu i v MATLABu. Kroky realizované skripty zmíněnými v této podkapitole jsou graficky znázorněny na obrázku 25.



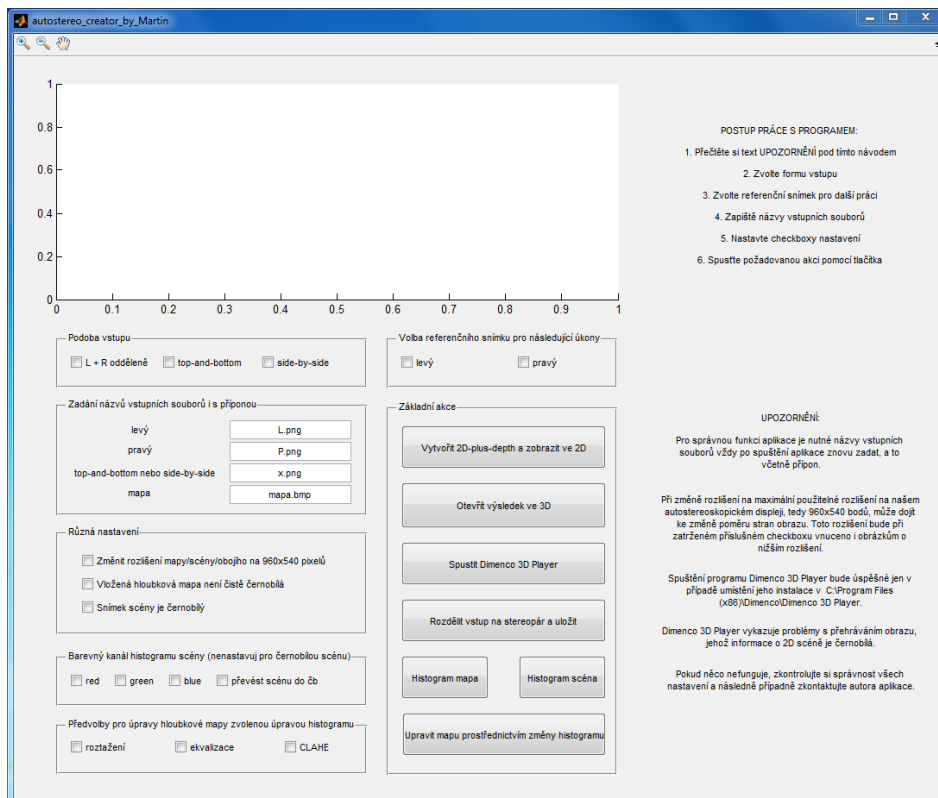
Obr. 25: Závěrečné zřetězení a uložení ve vhodném formátu

## 6.6 Vytvořená aplikace s grafickým rozhraním

Vytvořené skripty a nabyté poznatky při práci s MATLABem a využívaným autostereoskopickým displejem byly využity také k tvorbě uživatelsky přívětivé aplikace provádějící uživatele tvorbou statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth. Její vzhled, možnosti a způsob užívání jsou popsány v tomto pododdíle.

Jedná se o aplikaci vytvořenou v MATLABu verze 8.2.0.701 (R2013b). Pro její správnou funkci je třeba mít nainstalovaný také Image Processing Toolbox. Na přiloženém CD ji lze nalézt jak ve formě instalovatelné aplikace, tak ve formě dílčích skriptů.

Způsob ovládání je řešen pomocí jednoduchého grafického rozhraní. Obsahuje pouze základní ovládací prvky a jeho vzhled si lze prohlédnout na obrázku 26.



Obr. 26: Prostředí vytvořené aplikace pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth

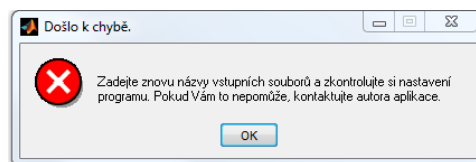
Pojďme se podívat na její možnosti a způsob ovládání. Jak vyplývá z požadavků zadání této bakalářské práce, jako vstup lze zvolit pár stereo snímků ve třech různých podobách – odděleně, v uspořádání side-by-side nebo top-and-bottom. Názvy vstupních souborů i s příponami je třeba vždy po spuštění aplikace zapsat do příslušných polí. Následně je nutné zatrhnout příslušná zaškrťávací políčka pro volbu podoby vstupů a referenčního snímku pro další práci. Referenční snímek je využíván pro tvorbu obrazu ve formátu 2D-plus-depth, případně s ním lze rovádět i další akce, které aplikace umožňuje. Dále je vhodné zatrhnout i příslušná zaškrťávací políčka pro další nastavení. Aplikace umožňuje například změnit rozlišení snímku scény i hloubkové mapy na rozlišení 960 x 540 bodů, což je maximální využitelné rozlišení na v této práci používaném autostereoskopickém displeji. Je třeba brát v úvahu důsledky možné změny poměru stran snímků a také případného dopočtení bodů při nízkém rozlišení vstupů.

Jakmile máme nastaveny vstupy, které budeme využívat, a také další příslušná nastavení správným způsobem, můžeme s nimi provádět akce podporované aplikací. Ty shrnuje následující seznam:

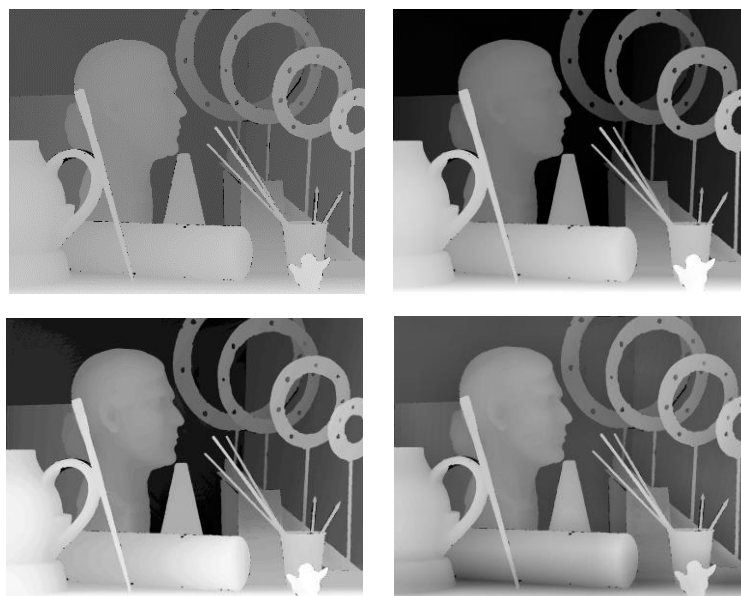
- Vytvořit obraz ve formátu 2D-plus-depth z referenčního vstupního snímku a hloubkové mapy načtené ze souboru. Výsledek je zobrazen v okně aplikace a uložen do pracovní složky ve formátech s příponami „.bmp“ a „.b3d“.
- Otevřít vytvořený obraz ve formátu 2D-plus-depth v programu Dimenco 3D Player. To lze samozřejmě provést až následně po vykonání předchozího kroku. (Případně lze stejným tlačítkem otevřít soubor s názvem „2D\_plus\_depth\_file.b3d“, pokud se nachází v nastavené pracovní složce.)
- Spustit program Dimenco 3D Player. Ten musí být pro správnou funkci tlačítka nainstalován v umístění C:\Program Files (x86)\Dimenco\Dimenco 3D Player.

- Načíst a rozdělit vstup v podobě side-by-side nebo top-and-bottom na pár oddělených stereo snímků. Výsledky jsou uloženy do souborů do pracovní složky.
- Zobrazit histogram snímku scény ve zvoleném barevném kanálu. Případně lze zobrazit histogram po převodu obrazu scény do černobílé podoby. Histogram je uložen do pracovní složky.
- Zobrazit histogram hloubkové mapy a uložit ho do pracovní složky.
- Upravit hloubkovou mapu prostřednictvím úpravy jejího histogramu. Jsou k dispozici možnosti provést roztažení histogramu, ekvalizaci histogramu a CLAHE („contrast-limited adaptive histogram equalization“). Všechny úpravy lze použít pouze s automatickým nastavením bez možnosti ovlivňování výsledku. Upravený histogram je zobrazen a upravená hloubková mapa uložena do pracovní složky.

V případě, že uživatel nastaví něco chybně nebo nenastaví vůbec, upozorní ho aplikace chybovou hláškou s příslušnou textovou informací. Ukázkou chybového okna si lze prohlédnout na obrázku 27. Na obrázku 28 jsou zobrazeny ukázkově upravené hloubkové mapy prostřednictvím aplikace v porovnání s výchozí verzí.



Obr. 27: Ukázkou chybové hlášky ve vytvořené aplikaci pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth



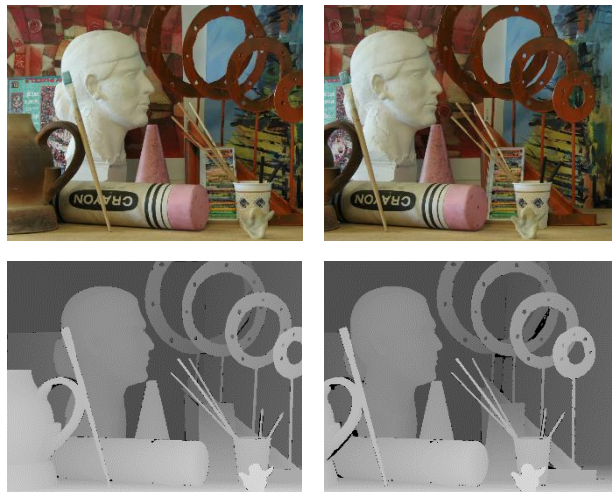
Obr. 28: Ukázkou aplikací upravených hloubkových map v porovnání s výchozí podobou

pořadí vzorků: vlevo nahoře pomocí původní mapa (získaná z [36], [37], [38], [39]), vedle s roztaženým histogramem, vlevo dole s ekvalizovaným histogramem, vedle s ekvalizovaným histogramem pomocí CLAHE

## 6.7 Vstupní obrazový obsah do vytvořených nástrojů

K tomu, aby bylo v praktické části práce vůbec možné tvořit obraz ve formátu 2D + Z, bylo nutné, aby nejen dobře fungovala aplikace/skript v MATLABu zajišťující kroky tvorby jako takové, ale bylo také nutné mít k dispozici nějaký vstupní obrazový materiál v přijatelné kvalitě. Z požadavků zadání práce se muselo jednat o stereo páry snímků nebo obrazový obsah ve formátech top-and-bottom nebo side-by-side, které si nástroje vytvořené v MATLABu na stereo pár sami rozloží. Bylo by samozřejmě možné si tyto výchozí snímky nafotit/nakreslit, zabralo by to však příliš mnoho času. Rozhodl jsem se proto využít obrazový materiál dostupný na internetu.

Základně jsou v této práci využívány stereo páry z „Middlebury Stereo Vision Page“.<sup>13</sup> Příslušné reference vztahující se k použitým párům jsou [36], [37], [38], [39]. Z různých pročených článků a diskuzí si troufám tvrdit, že právě tyto stereo páry obrázků jsou jedny z celosvětově nejvyužívanějších pro testování a vývoj algoritmů pro výpočet hloubkových map a dalších algoritmů pracujících se stereo páry snímků. V jejich databázi najdeme opravdu široké spektrum párů obrázků různých rozlišení i vlastností. Lze najít páry vhodné pro testování vlivu specifických prvků na kvalitu generace hloubkových map, jakými jsou například opakující se motivy, výskyt ostrých hran atp. Fakt, že jsou to jedny z výchozích testovacích snímků při vývoji nových algoritmů, může mít za následek to, že právě na nich dosahují algoritmy nejlepších výsledků. Mohou být pro některé z nich jaksi mimochodem optimalizovány a následně při užití reálných fotek produkovat horší výsledky. Vzhledem k velkému množství párů s velmi různorodými vlastnostmi by však toto riziko nemělo být nijak velké. Mezi výhody využití těchto snímků patří jejich dobrá dostupnost, možnost porovnávání výsledků své práce s ostatními či dostupnost objektivně správných hloubkových map, tzv. „ground truth“ map, společně s páry. Tyto hloubkové mapy byly získány metodou využívající osvětlování scény pomocí tzv. strukturovaného světla, anglicky „structured light“. Prodrobnější popis lze nalézt v [37]. Ukázkový obsah jedné sady, tzv. „datasetu“, tedy stereo snímky a jejich hloubkové mapy si lze prohlédnout na obrázku 29.



Obr. 29: Ukázka obsahu jedné obrazové sady z Middlebury Stereo Vision Page ([36], [37], [38], [39])

<sup>13</sup> Tato internetová stránka je dostupná z <http://vision.middlebury.edu/stereo/>.

## 6.8 Alternativní zdroje hloubkových map

Kromě vlastního výpočtu hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků se nabízí možnost využít již předpřipravené mapy získané jiným způsobem. Na „Middlebury Stereo Vision Page“ lze stáhnout se všemi stereo páry i objektivně správné, tzv. „ground truth“, verze odpovídajících hloubkových map. Další možností je možné využití programů pro práci s 3D grafikou typu komerčních Autodesk Maya a Autodesk 3ds Max nebo open-source programu Blender. Pomocí těchto programů lze snadno získat hloubkovou mapu ke zpracovávanému 3D modelu, který si můžeme buď sami vytvořit nebo můžeme využít nějakého volně dostupného.

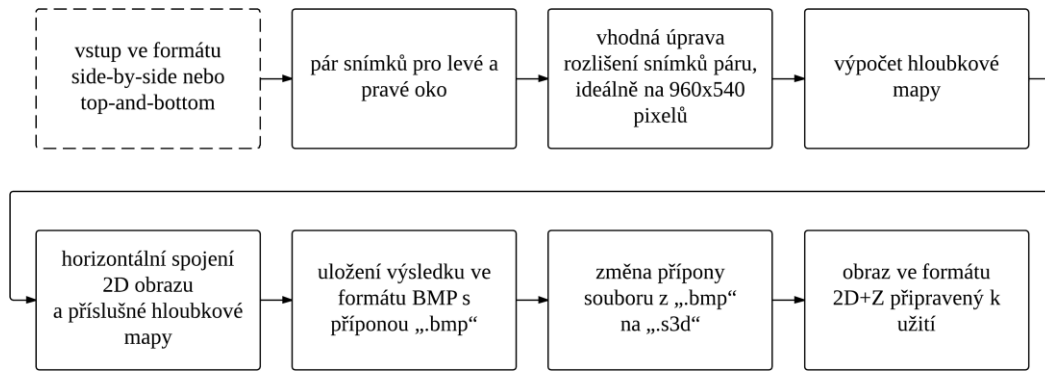
## 6.9 Shrnutí oddílu

V tomto oddíle byl základně popsán využívaný autostereoskopický displej Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD display a možnosti jeho nastavení pro správné používání. Čerpáno bylo z dokumentů od výrobce [35], [40], [41], [42] a [43] a také z vlastních zkušeností z práce s displejem.

Následně je v této kapitole zdůvodněno, proč se pro zpracování nástrojů pro tvorbu obsahu ve 2D + Z hodí právě prostředí MATLAB. Tyto vytvořené nástroje jsou dostupné ve dvou formách – nejprve ve formě většího počtu jednoduchých skriptů ovládaných centrálním skriptem *testovaci\_skript.m* a dále v podobě uživatelsky přívětivé aplikace s grafickým rozhraním. Jejich detailnější popis najdeme v příslušných pododdílech a konkrétní realizaci na přiloženém CD. Zásadním problémem tvorby obrazu ve formátu 2D-plus-depth je získání odpovídajících hloubkových map k 2D obrazu v přijatelné kvalitě za rozumný čas. Zmíněn je také zdroj vstupních stereopárů, které byly přežaty z cizích zdrojů [36], [37], [38], [39].

Rád bych v tomto rekapitulujícím pododdíle zmínil vlastní poznatky, na které je nutné dát si při tvorbě obsahu ve formátu 2D + Z pozor. Z praktického hlediska je jedno, zda je vstup ve formě side-by-side, top-and-bottom nebo rovnou jako stereopár. Stejně tak nezáleží na formátu, potažmo příponě, vstupu. MATLAB si v dané podobě skriptu poradí s většinou běžně používaných možností a na další zpracování to nemá vliv. Pro urychlení práce je vhodné pracovat se snímky nejvýše v maximálním použitelném rozlišení na využívaném displeji, tedy 960 x 540 pixelů. Následně je nutné vypočíst/načíst ze souboru hloubkovou mapu a horizontálně ji spojit s 2D obrazem scény. Zásadní je uložit výsledek ve formátu s příponou „.bmp“, aby s tím uměl využívaný autostereoskopický zobrazovač po změně přípony na „.b3d“ pracovat. S žádným jiným výchozím obrazovým formátem kompatibilní není. Popsaný postup tvorby obrazu v požadovaném formátu je použitelný pouze pro jednotlivé statické snímky, pro video zatím nikoliv. Celý proces tvorby statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth je graficky zrekapitulován na obrázku 30.





Obr. 30: Proces tvorby statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth

# 7 Realizace subjektivního hodnocení kvality obrazu a jeho vyhodnocení

Vzhledem k faktu, že hlavním tématem této práce není zabývat se subjektivním hodnocením kvality obrazu, snažil jsem se o jednoduchý přístup, avšak pokud možno takovým způsobem, aby výsledky měly adekvátní vypovídající hodnotu. Realizaci i zpracování výsledků jsem samozřejmě prováděl především podle informací obsažených v oficiálních doporučeních [32] a [33]. Průběh hodnocení byl částečně inspirován z [31].

## 7.1 Hodnocené vzorky

Všechny testované vzorky jsem připravil sám a liší se buď obsahem scény nebo způsobem získání hloubkové mapy. Vše ostatní, kromě samotného získání hloubkové informace, jsem řešil pomocí vlastních nástrojů vytvořených v prostředí MATLAB. Cílem je především porovnání dojmu z celkové kvality obrazu při různých kvalitách hloubkové mapy. Hodnocen byl také vizuální komfort pozorování daného obrazu. Pro každou scénu bylo vždy využito hloubkové mapy získané čtyřmi způsoby.

- Mapu jsem vypočetl pomocí skriptu *stereomatch.m* vytvořeného v rámci psaní diplomové práce [44] mužem, který se jmenuje Wim Abbeloos. Jedná se o projekt realizovaný kompletně v MATLABu a lze s ním pracovat i v rámci mnou vytvořených nástrojů pro tvorbu obsahu ve formátu 2D + Z. Na příloženém CD ho najít nelze, a to z důvodu autorských práv. Je však volně dostupný na internetu a jeho zabudování do mnou vytvořených nástrojů je poměrně snadné. Nastavení parametrů skriptu jsem prováděl metodou pokus-omyl do té doby, než jsem byl s produkovanou hloubkovou mapou spokojen. Celý tento skript i s grafickou nadstavbou lze dohledat v rámci MathWorks - MATLAB Central - File Exchange.<sup>14</sup>
- Využil jsem objektivně správné, tzv. „ground truth“, mapy dostupné společně se stereo páry z webu, jehož adresu uvádím v poznámce pod čarou.<sup>15</sup> Uvedme ještě reference na literaturu spojenou s použitými stereo páry a jejich hloubkovými mapami [36], [37], [38], [39].
- Vypočetl jsem hloubkové mapy pomocí programu Depth Map Generator (DMAG) od autora jménem Ugo Capeto volně dostupného z jeho blogu.<sup>16</sup> DMAG je založený na principu globálního stereo porovnávání pomocí přístupu variačních metod. Tento software neprodukoval přímo hloubkovou mapu, ale tzv. „displacement map“, což by se dalo přeložit jako mapa posuvů. Z té jsem získal hloubkovou mapu jednoduchou inverzí barev realizovanou v MATLABu. K tomuto programu se neváže žádná konkrétní autorova

---

<sup>14</sup> Výrobce programu MATLAB provozuje speciální server pro výměnu matlabovských skriptů. Tento konkrétní skript lze najít na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28522-stereo-matching/content/stereomatch.m>.

<sup>15</sup> V práci využité datasety obsahující stereo páry a referenční hloubkové mapy lze najít na <http://vision.middlebury.edu/stereo/>.

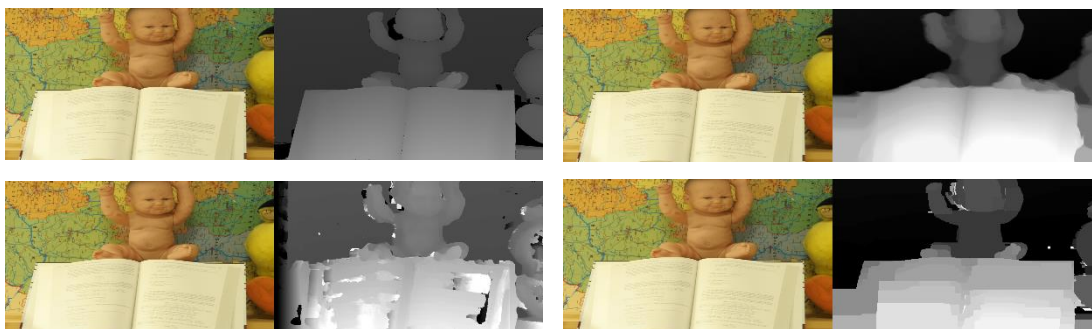
<sup>16</sup> Program Depth Map Generator (DMAG) od autora jménem Ugo Capeto lze nalézt volně ke stažení z blogu autora na <http://3dstereophoto.blogspot.cz/p/software.html>. Jedná se o program určený pro operační systémy Windows. Osobně jsem při práci využíval počítač s nainstalovaným operačním systémem Windows 7.

publikace, ale sám autor uvádí, že při programování využíval informací z [46] a využil také textu [47].

- Vypočetl jsem hloubkové mapy pomocí programu Depth Map Generator 3 (DMAG3) od autora jménem Ugo Capeto volně dostupného z jeho blogu.<sup>17</sup> DMAG3 je založený na principu globálního stereo porovnávání pomocí přístupu řezu grafů. K tomuto programu se neváže žádná konkrétní autorova publikace, ale sám Ugo Capeto uvádí, že při programování využíval především informací z [48] a využil také textů [49], [50].

Aplikace od Uga Capeta většinou negenerovaly mapy čistě černobílé, a tedy jejich matice v MATLABu nebyla dvourozměrná. To bylo nutné pro další práci vyřešit a dosáhl jsem toho využitím matlabovské funkce „*rgb2gray()*“.

V případě, že se mi zdála hloubková mapa příliš tmavá, zesvětlil jsem ji prostřednictvím přenásobení celé její matice multiplikačním parametrem. Jeho velikost jsem volil podle vlastního uvážení pro konkrétní situaci. Na obrázku 31 si můžete prohlédnout ukázkou vytvořených vzorků ve formátu 2D + Z prostřednictvím v této práci vytvořených a popsanych nástrojů za pomoci párů z [36], [37], [38], [39] a hloubkových map získaných popsanymi způsoby.



Obr. 31: Ukázkou hodnocených vzorků vytvořených pomocí všech kvalit hloubkových map  
pořadí vzorků: vlevo nahoře pomocí „ground truth“ mapy, vedle něho pomocí programu DMAG3,  
vlevo dole pomocí *stereomatch.m*, vedle něho pomocí DMAG3

Z obrázku 31 je jasně vidět, že kvalita a povaha vypočtených hloubkových map může být velmi výrazně rozdílná. Hodnocení subjektivního dojmu kvality po zobrazení na autostereoskopickém displeji však nemusí odpovídat předpokladům získaným pouhým prohlédnutím hloubkových map.

## 7.2 Průběh a podmínky subjektivního hodnocení

Rozhodl jsem se využít metody jednorázového podnětu (SS) popsané v teoretické části této práce z důvodů jednoduchého principu a možnosti realizace. Aby nedocházelo k ovlivňování hodnotitelů mezi sebou, probíhalo hodnocení vždy individuálně. V místnosti jsme byli vždy v jeden čas přítomni pouze já a jeden hodnotitel. Pomocí počítače byly posílány hodnocené vzorky do autostereoskopického displeje, na předběžně určených *30 sekund* a poté následovalo *10 sekund*, během kterých byl hodnotiteli zobrazován neutrální šedý snímek. Pozorovatel měl během tohoto času

<sup>17</sup> Program Depth Map Generator 3 (DMAG3) od autora jménem Ugo Capeto lze nalézt volně ke stažení z blogu autora na <http://3dstereophoto.blogspot.cz/p/software.html>. Jedná se o program určený pro operační systémy Windows. Osobně jsem při práci využíval počítač s nainstalovaným operačním systémem Windows 7.

možnost přemýšlet o svém hodnocení. Rozhodl jsem se dát jednotlivým hodnotícím možnost požádat o adaptaci jednotlivých časů podle jejich potřeby. Většina účastníků možnosti úpravy časových intervalů využila jen při samotném pozorování vzorků a zpravidla vyžadovali o něco delší časy na hodnocení prvních snímků. Poté se většinou postupně „rozkoukali“, požadované časy k pozorování se pohybovaly kolem oněch 30 s u většiny vzorků. U posledních hodnocených snímků už povětšinou hodnotitelé využívali i výrazně kratší časy k posouzení požadovaných parametrů. Samozřejmě se vyskytovaly výjimky využívající obecně výrazně kratší nebo delší časy. Jako časový interval pro zobrazení šedého snímku a známkování dané vlastnosti obrazu bylo dodržováno předem určených 10 s bez jakýchkoliv požadavků o úpravu. Tento časový interval byl tedy určen vhodným způsobem.

Zaznamenávání výsledků bylo řešeno pomocí jednoduchého papírového záznamového archu, jehož podobu najdete v příloze. Výsledky jsem do něho zaznamenával já osobně podle pokynů účastníků hodnocení. Zvolil jsem tento přístup z důvodů zjednodušení následujícího zpracování výsledků, urychlení celého procesu hodnocení a zamezení ovlivňování názory předchozích hodnotitelů. O jednotlivých účastnících hodnocení bylo zjišťováno několik informací – jméno, úroveň jejich znalosti stereoskopie (Na výběr měli z možností žádná-základní-pokročilá.) a věk. Tyto informace, kromě jména, byly využity při zpracování výsledků hodnocení. Základní podmínky průběhu hodnocení shrnuje tabulka 14.

Tab. 14: Definice základních podmínek k subjektivnímu hodnocení

čas zobrazení jednoho vzorku typicky 30 s, možnost úpravy podle požadavku hodnotícího
čas zobrazení šedého mezisnímku 10 s, čas využíván také k určení a záznamu hodnocení vzorku
pozorovací vzdálenost 2,5 m
výsledky zaznamenávány autorem hodnocení do společného papírového záznamového archu

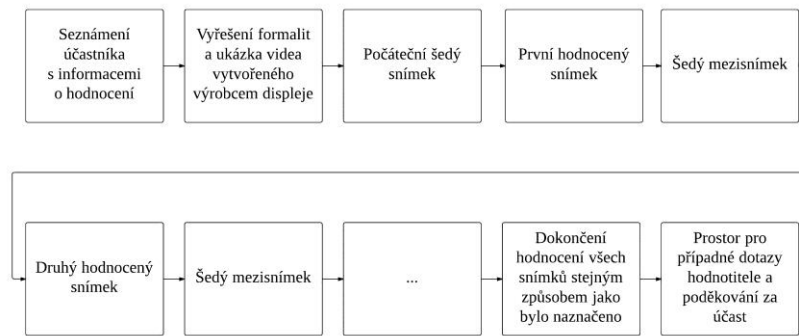
Před samotným započítáním hodnocení vytvořeného obsahu bylo účastníkovi promítnuto ukázkové video od výrobce displeje za účelem demonstrace nejlepších možných dosažitelných výstupů při současném stavu technologií. Jednalo se o video „Pinochio.s3d“, které je volně dostupné ke stažení z FTP serveru<sup>18</sup> výrobce našeho displeje jako ukázkový vzorek videa ve formátu 2D + Z. Po celý průběh hodnocení měli hodnotící k dispozici k nahlédnutí připravenou stupnici pro hodnocení jednotlivých kategorií. Používanou podobu stupnice lze nalézt v příloze. Její stručná verze je zachycena v tabulce 15.

Tab. 15: Stupnice pro subjektivní hodnocení dvou parametrů stereoskopického obrazu podle doporučení ITU-R BT.2021 [32] s uvedeným českým překladem

<b>Stupnice pro hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu</b>	<b>Stupnice pro hodnocení vizuálního komfortu pozorování daného obrazu</b>
1 – Excellent (Excelentní)	1 – Very comfortable (Velmi příjemný)
2 – Good (Dobrá)	2 – Comfortable (Příjemný)
3 – Fair (Ucházející)	3 – Mildly uncomfortable (Mírně nepříjemný)
4 – Poor (Špatná)	4 – Uncomfortable (Nepříjemný)
5 – Bad (Velmi špatná)	5 – Extremely uncomfortable (Velmi nepříjemný)

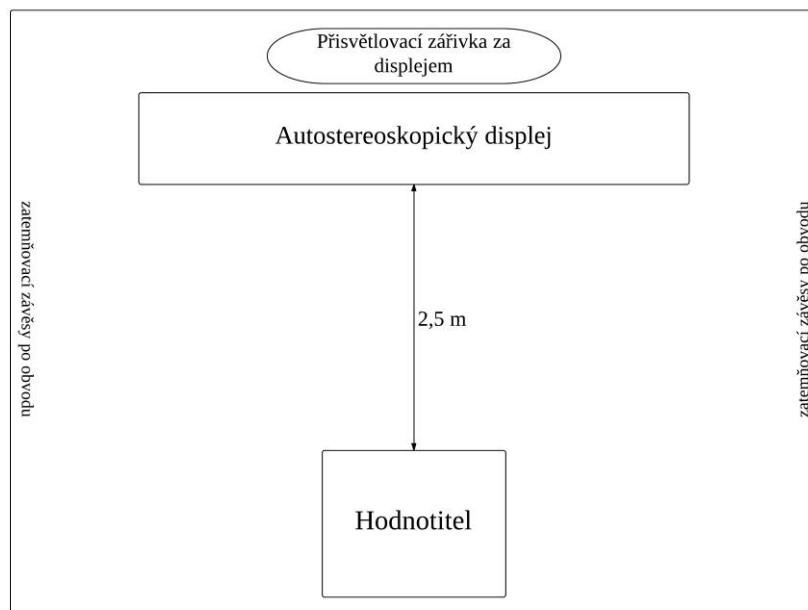
<sup>18</sup> Konkrétně lze toto video stáhnout z FTP serveru firmy Dimenco dostupného z <http://www.dimenco.eu/dimencodisplays/downloads/>.

Průběh hodnocení je ještě přehledně graficky zachycen na obrázku 32.



Obr. 32: Průběh subjektivního hodnocení kvality stereoskopického obrazu

Nyní přejdeme krátce k testovacím podmínkám. Základním požadavkem bylo samozřejmě zajistit stejné stálé testovací podmínky pro všechny účastníky hodnocení s maximální možnou eliminací rušivých vlivů. Každý pozorovatel byl před začátkem hodnocení dotazován, zda ho nic neruší a až po negativní odpovědi bylo pokračováno v práci. Schématický popis prostředí pro hodnocení si lze prohlédnout na obrázku 33. Prostředí bylo také ilustrativně vyfoceno. Tato fotka je vložena ve formě obrázku 34.



Obr. 33: Podmínky pro subjektivní hodnocení kvality stereoskopického obrazu



Obr. 34: Ukázka prostředí využívaného při hodnocení

## 7.3 Vyhodnocení získaných dat

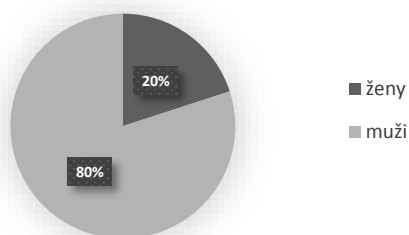
Provedené subjektivní hodnocení kvality obrazu bylo vyhodnoceno pomocí statistických metod popsanych v teoretické části této práce, podrobněji rozebraných v [33]. Detaily a podrobné mezivýsledky vyhodnocení lze najít v excelovském souboru na přiloženém CD. Základní přehled výsledků je uveden v této podkapitole. Velkou část zachycených a vypočtených hodnot lze nalézt také v příloze na konci tohoto dokumentu.

### 7.3.1 Základní údaje o hodnotících

Jednotliví účastníci byli požádáni o jméno, podpis, údaje o věku a úrovni znalosti stereoskopie. Následující údaje a diagramy charakterizují účastníky hodnocení jako celek.

- Počet osob: 20

Podíl mužů a žen



Obr. 35: Podíl mužů a žen mezi účastníky hodnocení

- Průměrný věk hodnotitele: 21,95 let

- Znalost stereoskopie (Na výběr bylo z možností žádná-základní-pokročilá.):



Obr. 36: Znalost stereoskopie hodnotitelů

### 7.3.2 Postup zpracování získaných hodnot

Nejprve bylo nutné zjistit, jestli není nutné některé pozorovatele z hodnocení vyloučit podle kritérií popsaných v [33]. Pomocí  $\beta_2$  testu bylo vždy nejprve určováno, zda má soubor všech hodnocení daného jednoho vzorku charakter normálního rozložení nebo ne. Asi jediný složitější vzorec, který bylo nutné využít a nenajdeme ho předpřipravený ve formě speciální funkce v programu Microsoft Excel, je právě ten pro výpočet koeficientu špičatosti. Těchto koeficientů existuje více druhů. Námí požadovaný koeficient si může člověk sám snadno naprogramovat nebo využít zjednodušení uvedeného v [45]. Na této webové stránce navrhuji, jak lze snadným přepočtem získat náš požadovaný koeficient pomocí toho, který Excel počítat umí pomocí předpřipravené funkce  $KURT()$ . Tento jednoduchý přepočet lze zapsat pomocí vztahu (12).

$$K_{\text{požadovany}} = \left( \left( \frac{KURT(\text{jednotliva\_hodnoceni})(N-2)(N-3)}{N-1} - 6 \right) \frac{1}{N+1} \right) + 3 \quad (12)$$

kde:

$N$  – počet hodnocení daného vzorku

Byly vyzkoušeny oba způsoby výpočtu a výsledky si v našem případě opravdu odpovídaly, minimálně na několika prvních desetinných místech. Následně bylo určováno, zda jednotlivá hodnocení pozorovatelů spadají do intervalů hodnot definovaných v teoretické části práce. Podle toho byly určeny koeficienty  $P_i$  a  $Q_i$ . Z jejich hodnot byla vypočtena další dvě čísla, v excelovském dokumentu označená  $x$  a  $y$ . Podle jejich velikosti již bylo možné rozhodnout, zda je nutné daného pozorovatele z celého hodnocení vyloučit. Hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu bylo od hodnocení vizuálního komfortu pozorování striktně oddělováno, jako kdyby tato dvě hodnocení probíhala naprosto nezávisle a odděleně. To je logické vzhledem k tomu, že jejich výsledky by se neměly vzájemně ovlivňovat. S určitým uspokojením lze konstatovat, že nebylo nutné vyřadit žádného pozorovatele ani z jedné části hodnocení.

Následně už bylo možné určit průměrná hodnocení jednotlivých vzorků i průměrné výsledky jednotlivých metod získání hloubkové mapy bez ohledu na obsah

scény. Dalším krokem bylo určení příslušných intervalů spolehlivosti. Následně bylo možné ze získaných čísel udělat celkové zhodnocení výsledků.

### 7.3.3 Výsledky hodnocení

V této podkapitole jsou uvedeny základní výsledky získané při subjektivním hodnocení kvality obrazu prováděném jako součást této bakalářské práce. Podrobnější čísla a mezihodnoty lze nalézt v excelovském souboru na přiloženém médiu. Část údajů lze nalézt také v příloze.

Nejlepších výsledků v kategorii hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu dosahovaly vzorky vytvořené za pomoci objektivně správných („grund truth“) hloubkových map, což se dalo logicky očekávat. Vzorky vytvořené za pomoci hloubkových map, dopočtených uvedenými třemi metodami, dosahovaly vcelku srovnatelných výsledků. Pohybovaly se většinou mezi známkami 2 (dobrá) až 4 (špatná), s průměrem kolem 3 (ucházející). Dalo by se tedy říct, že kvalita byla většinou přijatelná. Nejlepších výsledků bez ohledu na obsah scény dosahoval program Depth Map Generator, v závěsu za ním byl většinou skript *stereomatch.m* a nejhůře hodnocené obrazy byly vytvořeny za pomoci programu Depth Map Generator 3. Více o těchto programech/skriptu lze najít v podkapitole Hodnocené vzorky.

Při hodnocení vizuálního komfortu pozorování dopadly výsledky obdobně jako v předchozím případě při hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu. Opět výrazně nejlepších hodnocení dosahovaly vzorky vytvořené za pomoci objektivně správných („grund truth“) hloubkových map. I celkové pořadí ostatních metod zůstalo stejné jako v předchozím případě. Nejlepších výsledků bez ohledu na obsah scény dosahoval program Depth Map Generator. Skript *stereomatch.m* měl obvykle nepatrně nižší známky hodnocení. Nejhůře hodnocené byly vzorky vytvořené za pomoci hloubkových map získaných pomocí programu Depth Map Generator 3. Oproti hodnocení dojmu z celkové kvality se však nepatrně zlepšil trend hodnocení. Většina známek se nacházela v rozmezí 2 (příjemný) až 3 (mírně nepříjemný).

Z výsledků lze usoudit, že kvalita a vizuální komfort pozorování jsou a autostereoskopického obrazu docela provázané. Vzorky většinou dosahují v průměru podobných hodnocení v obou hodnocených kategoriích. Scény s nekvalitně vytvořeným 3D efektem, chybami a neostrostmi, mají většinou špatné hodnocení nejen v kolonce kvality, ale i v té druhé, patřící vizuálnímu komfortu pozorování. Kvalitní vzorky mají naopak dobré známky v obou kategoriích.

Co se hodnocení konkrétních vzorků týče, většinou se držely celkových trendů a příliš nevybočovaly z průměru. Výjimkou byl vzorek vytvořený ze stereo páru Cloth3 za pomoci programu Depth Map Generator. Jeho hodnocení v kolonkách kvality i komfortu se pohybovala na úrovni vzorků vytvořených za pomoci referenčních hloubkových map. Z porovnání vlastností této scény oproti dvěma zbylým lze odhadnout, že se pozitivně projevíly vlastnosti postupných pozvolných přechodů hloubky, u kterých dochází při určování disparity maximálně k drobným chybám. U ostrých skokových změn hloubky si oko všimne chyb a nepřesností mnohem snáze. V tom byla asi největší slabina programu Depth Map Generator 3. Po jednoduchém prohlédnutí hloubkových map by se zdálo, že ty jím produkové vypadají poměrně přesně. Výrazně dobře si poradil s hranami objektů. Na všech jeho vypočtených hloubkových mapách se však objevily místy velmi výrazné skokové chyby. I přesto, že jejich počet byl relativně malý, byly tak výrazné, že velmi snadno po zobrazení na autostereoskopickém displeji poutaly pozornost a kazily dojem z celé



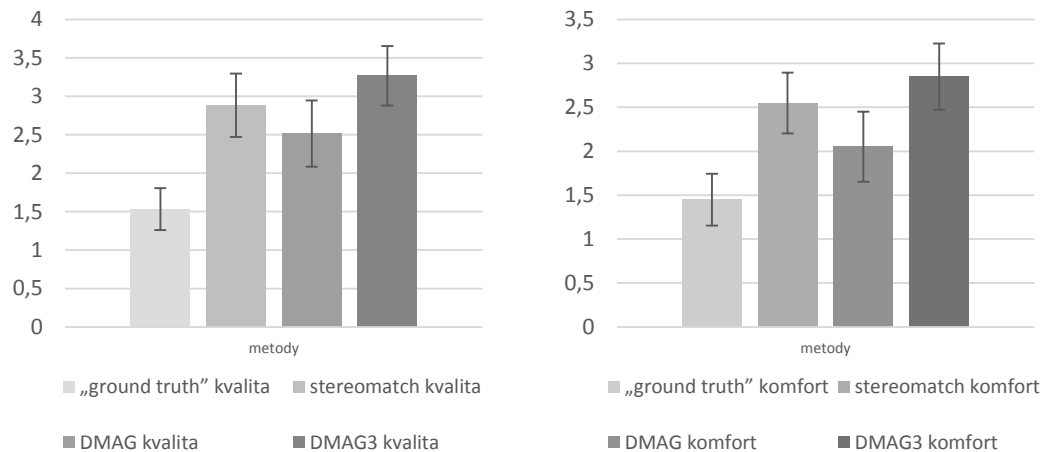
scény. Oproti tomu program Depth Map Generator nebyl zdaleka tak citlivý na detaily. Většina přechodů hloubky byla postupná a tedy nepřiliš přesná. Nebyl však zdaleka tak náchylný k produkci skokových chyb a právě díky tomu produkoval pro oko o něco příjemnější a subjektivně kvalitnější výsledky. *Stereomatch.m* produkoval na první pohled asi nejhorší kvalitu hloubkových map, avšak zřejmě díky povaze chyb se to na hodnocení výrazně neprojevovalo.

Uvedme ještě alespoň nějaká základní čísla ilustrující dosažené výsledky. U intervalů spolehlivosti je uváděna jen hodnota  $\delta_{jkr}$  z důvodu lepší přehlednosti tabulky. Rozsah intervalu spolehlivosti definujeme jako  $[\bar{u}_{jkr} - \delta_{jkr}; \bar{u}_{jkr} + \delta_{jkr}]$ . Více o významu jednotlivých hodnot si lze přečíst v teoretické části nebo v [33]. V tabulce 16 si lze prohlédnout pouze souhrnné hodnoty zpracované vždy ze všech hodnocení získaných u všech tří vzorků s hloubkovou mapou vypočtenou za pomoci jedné metody. Podrobnější získané výsledky lze nalézt v příloze.

Tab. 16: Shrnutí základních výsledků získaných během subjektivní hodnocení kvality obrazu

	„ground truth“		stereomatch.m		DMAG		DMAG3	
	kvalita	komfort	kvalita	komfort	kvalita	komfort	kvalita	komfort
průměr metody mapy	1,53	1,45	2,88	2,55	2,52	2,05	3,27	2,85
směrodatná odchylka	0,62	0,67	0,94	0,79	0,98	0,91	0,88	0,86
$\delta_{jkr}$ intervalu spolehlivosti	0,27	0,30	0,41	0,35	0,43	0,40	0,39	0,38

Na obrázku 37 lze najít grafickou reprezentaci základních získaných výsledků z tabulky 16, tedy průměrných hodnot s vyznačenými intervaly spolehlivosti.



Obr. 37: Základní výsledky provedeného subjektivního hodnocení kvality v grafické podobě

### 7.3.4 Zhodnocení získaných výsledků

Z výsledků získaných při subjektivním hodnocení kvality obrazu v této práci lze udělat několik závěrů. Obecně platí, že kvalita hloubkové mapy zásadně ovlivňuje dojem, který zanechá pozorovaný obraz v divákovi. Nejlepší by tedy bylo při natáčení videa nějakým způsobem souběžně zaznamenávat i informaci o hloubce, právě například do podoby hloubkové mapy. Pokud chceme využít nějakého staršího obrazového materiálu a informaci o hloubce nemáme, lze ji různými způsoby dopočíst. Tato práce se zabývá některými z těch, které počítají hloubku ze vstupního páru stereo snímků.

Z provedeného hodnocení lze říci, že kvalitních výsledků lze dosáhnout mnohými z nich a kvality výstupu záleží na konkrétní situaci, která je určena například vlastnostmi scény.

Porovnávány byly dvě metody založené na globálních principech stereo porovnávání a jedna založená na lokálním přístupu. Podle výsledků hodnocení se v kvalitě výstupů zásadně neliší. Z vypočtených výsledků hodnocení dojmu z celkové kvality a vizuálního komfortu pozorování totiž často nelze s jistotou určit jejich celkové pořadí v dané kategorii. Mají-li výsledky průměrnou hodnotu blízko sebe a jejich intervaly spolehlivosti se překrývají, logicky nelze vybrat s jistotou ten lepší. Nevíme totiž, kde přesně v rámci intervalu spolehlivosti, se nachází „pravá průměrná hodnota“, kterou bychom získali při hodnocení na velmi vysokém počtu účastníků. Zásadní rozdíly mezi jednotlivými porovnávanými implementacemi proto hledejme jinde.

Odmysleme si odlišnosti v samotném principu metod a podívejme se na ně jako na určité „black boxy“. Zásadní rozdíly jsou mezi nimi v možnosti nastavování různých vstupních parametrů a obrovský rozdíl je také v době potřebné pro generování hloubkové mapy ze stereo páru. Právě potřebný čas k vykonání výpočtu může být značně omezující pro nalezení optimálního nastavení pro naše potřeby. Z hlediska vyžadovaného času si výrazně nejhůř stál Depth Map Generator 3 (DMAG3). Získání jedné hloubkové mapy, při rozlišení vstupů 960 x 540 bodů, trvalo desítky minut a zátěž počítače byla po celou dobu výpočtu velmi vysoká. Depth Map Generator (DMAG) na tom byl značně lépe, časy i výpočetní zatížení počítače byly v přijatelných mezích. Doba výpočtu se typicky pohybovala v rámci jednotek minut. Zdaleka nejlépe na tom však byl skript *stereomatch.m*. Výsledky produkoval za velmi krátké časy, běžně v řádech desítek sekund. Projevilo se to, že jeho přístup řešení problému stereo korespondence je založen na lokálním metodě. Mezi jeho další výhody lze zařadit jednoduché ovládání prostřednictvím dvou hlavních nastavitelných parametrů (maximální disparity a velikosti porovnávacího okna) a také možnost snadno nahlédnout do jeho zdrojového kódu. Základní uživatel této možnosti asi nevyužije, ale těm pokročilejším se určitě hodí.

Pomineme-li nejistotu způsobenou překryvem intervalů spolehlivosti některých vypočtených hodnot, lze výsledné pořadí porovnávaných programů/skriptů z různých úhlů pohledu shrnout následovně. (Pořadí je tedy seřazeno podle průměrných získaných hodnot bez ohledu na intervaly spolehlivosti.)

Z hlediska rychlosti výpočtu:

1. *stereomatch.m*
2. Depth Map Generator (DMAG)
3. Depth Map Generator 3 (DMAG3)

Z hlediska hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu:

1. Depth Map Generator (DMAG)
2. *stereomatch.m*
3. Depth Map Generator 3 (DMAG3)

Z hlediska hodnocení vizuálního komfortu pozorování:

1. Depth Map Generator (DMAG)
2. stereomatch.m
3. Depth Map Generator 3 (DMAG3)

Rozdíl mezi jednotlivými implementacemi porovnávanými v této práci ovšem nemusí být vypovídající o vlastnostech samotných přístupů pro stereo porovnávání. Z různých zkoušení a pokusů s dalšími programy a skripty si trůfám tvrdit, že zásadní je vždy optimalizace. Lze jejím prostřednictvím zásadně zkrátit výpočetní časy i náročnost a zároveň také zlepšit kvalitu produkovaných výsledků.

Mimo všechna uvedená fakta je také vhodné si uvědomit, že hodnocení, provedené s pouhými 20 účastníky, může mít částečně zkreslené a nepřesné výsledky. Je to malý počet lidí. Navíc je většina z nich z poměrně specifické části společnosti. Byli to zpravidla mladí lidé studující technické obory na vysoké škole. Znalost stereoskopie u nich většinou byla na velmi nízké úrovni. Nelze tedy říct, že by to byl reprezentativní vzorek z dnešní společnosti. Bylo by samozřejmě zajímavé podívat se také například na to, jak rozdílně by hodnotily pouze ženy a jak pouze muži. To by však vzhledem k malému zastoupení žen mohlo mít velmi zkreslenou vypovídající hodnotu. Stejný problém by nastal, pokud bychom chtěli rozlišovat výsledky podle úrovně znalosti stereoskopie. Vzhledem k tomu, že převážná většina pozorovatelů uvedla stejnou úroveň, získali bychom pro osatní úrovně znalosti maximálně zkreslené výsledky.

## 7.4 Shrnutí oddílu

Bylo provedeno subjektivní hodnocení kvality stereoskopického obrazu podle oficiální normy ITU-R BT.2021 [32]. Vyhodnocení výsledků bylo provedeno podle oficiální normy ITU-R BT.500-13 [33]. Během samotného průběhu hodnocení nedošlo k žádným nepředpokládaným situacím. S uspokojením lze konstatovat, že nebylo nutné z hodnocení nikoho vyloučit.

Z výsledků hodnocení lze, pro účely stejné jako v této práci, doporučit využívat program DMAG vzhledem k relativně kvalitním výsledkům produkovaným v přijatelných časech. V případě požadavku na co největší rychlost a pohodlnost práce při tvorbě obsahu ve formátu 2D + Z bych osobně zvolil skript *stereomatch.m*. Je dobře přizpůsobený pro spolupráci s ovládacím skriptem *testovaci\_skript.m* vytvořeným v této práci a kvalita jeho výstupů je akceptovatelná.

Pro zlepšení vypovídající hodnoty výsledků by bylo určitě vhodné pracovat s výrazně větším počtem pozorovatelů. Zajímavé by také bylo porovnat mezi sebou více skriptů/programů využívajících stejnou metodu pro výpočet hloubkové mapy. Cest pro zlepšení je nespočetně mnoho a i z výsledků získaných v této práci by mělo jít vyčíst i další zajímavé informace než jen ty, které byly uvedeny v předchozím textu.

Jednotlivý pozorovatelé byli na závěr po samotném hodnocení ještě dotazováni na celkové pocity z prezentované technologie autostereoskopických displejů. Až na výjimky byly reakce veskrze pozitivní. Většinu překvapila poměrně dobrá kvalita 3D vjemu a výrazně kladně byl vnímán také fakt, že je možné sledovat 3D obraz bez brýlí. I když je pravdou, že do obývacích pokojů tento typ televizí asi v dohledné době nezamíří, vypadá to, že budoucnost by tato technologie mít mohla. Z mého pohledu jde asi hlavně o snížení ceny samotných displejů.

## 8 Možnosti pokračování práce

Vzhledem k úrovni této práce, jak z hlediska rozebrané teorie, tak vyprodukovaných praktických výsledků, je možností k pokračování práce nepřeborné množství. V této kapitole je zmíněno alespoň několik možných směrů, jakými by bylo možné na tuto práci navázat. Nepochybně by šlo rozšířit všechny teoretické texty do podstatně větší hloubky. Chtělo by to však zaměřit se na teorii využitelnou k nějakým dalším praktickým realizacím.

Velmi zajímavou je problematika generování mnohohledového („multiview“) videa z formátu video + hloubka („video + depth“). V případě, že by se podařilo zjistit, jakým způsobem probíhá zpracování signálu uvnitř vykreslovacího jádra Dimenco Rendering Core Premium, bylo by zajímavé zkusit nějakým způsobem budít autostereoskopický displej kompatibilním signálem bez využití tohoto boxu.

Rozhodně bych také rád zlepšil své programátorské znalosti a naprogramoval nějaký vlastní skript pro stereo porovnávání. Zajímavé by bylo naprogramovat například shodnou metodu v MATLABu a jazyce C/C++ a porovnat je jak z hlediska rychlosti, tak kvality produkovaných výsledků.

Další realizovatelnou výzvou a zajímavým krokem kupředu by byl skok z práce se statickým obrazem k videu. Praktické využití produkovaných výstupů by bylo mnohem širší. Dalo by se určitě využít podobnosti po sobě jdoucích často velmi podobných snímků videa. Problém by však mohl nastat s dostupností dostatečně výkonného hardwaru pro takovou práci vzhledem k tomu, že můj pracovní počítač měl problémy už při psaní této bakalářské práce s výpočtem jediné hloubkové mapy prostřednictvím programu Depth Map Generator 3 popsáném v předchozím textu.

Aplikaci vytvořenou v rámci této práce by bylo vhodné rozšířit takovým způsobem, aby měl uživatel možnost více ovlivňovat parametry výstupů při tvorbě obsahu ve formátu 2D-plus-depth. Aplikace by měla být rozšířena o již zmíněnou možnost pracovat s videem a rozhodně by se mohl dát větší prostor možnostem úprav hloubkové mapy. Přidat možnosti úprav snímku 2D scény by se také mohlo leckdy hodit. Uživatelé, kteří nemají dispozici prostředí MATLAB, by určitě ocenili vytvoření nějaké univerzálnější spustitelné verze aplikace například v jazyce C/C++ nebo jazyce Java.

Výsledky subjektivního hodnocení kvality obrazu by bylo možné v dlouhodobém horizontu také značně rozšířit. Určitě by bylo vhodné pracovat se značně větším počtem pozorovatelů a jejich složení by mělo být více různorodé. Mělo by se pracovat s nějakým více reprezentativním vzorkem složení dnešní společnosti. Hodnotitelé v této práci byli z příliš úzkého okruhu lidí s podobnými vlastnostmi. Bylo by zajímavé porovnat větší počet přístupů pro generaci hloubkových map nebo zkusit porovnat rozdílnost více konkrétních implementací založených na stejné metodě. Mohli bychom také provést hodnocení pomocí jiné metody subjektivního hodnocení kvality obrazu, například prostřednictvím metody porovnávání párů („pair comparison“), a porovnat odlišnost získaných výsledků, například celkových pořadí jednotlivých algoritmů při hodnocení různých parametrů obrazu. Dalším možným krokem by bylo podívat se na možnosti objektivního hodnocení kvality tohoto typu obrazu, vyhodnotit nějaké výsledky a porovnat je s výsledky získanými prostřednictvím subjektivního hodnocení.

V textu předchozích kapitol bylo také zmíněno, že je možné získávat hloubkové mapy za pomoci různých programů pro práci s grafikou ze 3D modelů. Bylo by tedy možné a velmi zajímavé namodelovat si v některém z nich nějakou 3D

animaci a souběžně si vygenerovat i hloubkovou mapu. Kvalita obrazu vyprodukovaného tímto způsobem by měla být velmi vysoká.

Jako poslední návrh na pokračování práce s tímto zaměřením uveďme možnost porovnání technologie našeho autostereoskopického displeje Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD s technologiemi 3D televizí běžně dostupných na dnešním trhu. Odlišnosti samotných technologií by mělo jít definovat poměrně dobře. Zajímavé by mohlo být porovnání způsobů tvorby obrazu pro jednotlivé technologie, porovnání produkovaného 3D vjemu a tak podobně. Možností by se dalo najít zcela jistě velké množství.

## 9 Závěrečné zhodnocení

Tato bakalářská práce je zaměřena na zpracování tvorby obsahu pro autostereoskopický displej. V úvodních kapitolách je rozepsána teorie, kterou je vhodné znát k pochopení základních souvislostí této problematiky. Jedná se o úvody do stereoskopie, autostereoskopie, formátů pro 3D video. Rozebrány jsou také způsoby generování hloubkových map ze vstupního páru stereo snímků a základní metody pro provádění a vyhodnocování subjektivního hodnocení kvality stereoskopického obrazu. Z hlediska nastudování a zpracování příslušné teorie lze považovat předem stanovené cíle této bakalářské práce za splněné.

Praktická část této bakalářské práce byla vázána na práci s konkrétním autostereoskopickým displejem, konkrétně modelem Philips/Dimenco BDL4251VS 3D LCD. Všechna praktická testování byla prováděna na něm a parametry produkovaného obrazu přizpůsobovány jeho vlastnostem. Subjektivní hodnocení kvality obrazu bylo provedeno také s jeho využitím.

V praktické části bylo hlavním cílem vytvořit uživatelsky přívětivé nástroje pro tvorbu obrazu ve formátu 2D-plus-depth, tedy formátu kompatibilním s využívaným autostereoskopickým displejem. Pro splnění tohoto cíle byla napsána aplikace s grafickým rozhraním v prostředí MATLAB řešící téměř všechny základní kroky (všechny s výjimkou jednoho) tvorby obsahu ve zmíněném formátu s několika funkcemi navíc. Tím chybějícím procesem, který by aplikace měla ještě zvládat, je výpočet hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků. To je bohužel úkol vhodný pro špičkového programátora. Do budoucna je však vytvořená aplikace pro obohacení o tuto možnost plně připravena. Stačí přidat jedno tlačítko a přiřadit k němu příslušný algoritmus. Kromě aplikace s grafickým rozhraním byl vytvořen ještě ovládací skript *testovaci\_skript.m* umožňující realizovat podobné akce jako popsaná aplikace, jen v textové podobě.

Bylo provedeno také porovnání tří způsobů generování hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků na základě výsledků získaných pomocí metod subjektivního hodnocení kvality obrazu. Kvality vypočtených hloubkových map prostřednictvím testovaných implementací se příliš nelišila, vizuální komfort jejich pozorování také ne. Značná odlišnost mezi implementacemi však byla v rychlosti produkování výsledků a v uživatelské přívětivosti jejich provedení. Na pozici pozorovatelů se hodnocení zúčastnilo 20 lidí. Do budoucna by chtěl jejich počet zvýšit pro zlepšení vypovídající hodnoty výsledků.

V předchozí kapitole byly popsány možnosti pokračování práce na tomto tématu. Splnění všech bodů zadání lze tedy považovat za téměř plně úspěšné. Za jediný větší nedostatek práce osobně považují absenci vlastní implementace pro výpočet hloubkové mapy ze vstupního páru stereo snímků, což by však vzhledem ke složitosti problému mohlo být považováno za pochopitelné. Protože to nebylo hlavním cílem a zaměřením této závěrečné práce, bylo vytvoření vlastní implementace s touto funkcí v rámci krátkého času určeného k psaní bakalářské práce téměř nerealizovatelné.

## 10 Literatura

- [1] KRUPICĀKA, Martin. *Zpracování obrazu pro autostereoskopický displej*. Praha, 2013. Projekt II. ČVUT v Praze.
- [2] GALI-3D: *3D Technologická knihovna* [online]. © 2005-2011 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-3d/>
- [3] COLLINS, Robert. Computer Vision I: lecture. In: *Department of Computer Science and Engineering at The Penn State University website* [online]. podzim 2007 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.cse.psu.edu/~rcollins/CSE486/lecture08.pdf>
- [4] Stereoskopie - jak funguje 3D kino. *Magazín Stahuj.cz* [online]. 2009 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <http://magazin.stahuj.centrum.cz/stereoskopie-jak-funguje-3d-kino/>
- [5] Sledování 3D obrazu v televizi i v kině není bez rizika. In: *Idnes.cz* [online]. 2010 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: [http://technet.idnes.cz/sledovani-3d-obrazu-v-televizi-i-v-kine-neni-bez-rizika-pfn-tec\\_video.aspx?c=A\\_101211\\_1497470\\_tec\\_video\\_vse](http://technet.idnes.cz/sledovani-3d-obrazu-v-televizi-i-v-kine-neni-bez-rizika-pfn-tec_video.aspx?c=A_101211_1497470_tec_video_vse)
- [6] Anaglyf: aneb barevná separace obrazů. In: *Stereofotograf.eu* [online]. Rok vydání neuveden [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <http://stereofotograf.eu/navody/anaglyf/>
- [7] Holografie. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2013 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/457-holografie>
- [8] A Passive 3D Approach Page 2. *Sound & Vision* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.soundandvision.com/content/passive-3d-approach-page-2>
- [9] DELANEY, B. Forget the Funny Glasses. *IEEE Computer Graphics and Applications* [online]. 2005, vol. 25, issue 3, s. 14-19 [cit. 2014-05-11]. DOI: 10.1109/MCG.2005.56. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1438253>
- [10] SON, J.-Y., B. JAVIDI a KAE-DAL KWACK. Methods for Displaying Three-Dimensional Images. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2006, vol. 94, issue 3, s. 502-523 [cit. 2014-05-11]. DOI: 10.1109/JPROC.2006.870686. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1605199>
- [11] DODGSON, N.A. *Autostereoscopic 3D displays*. Computer [online]. 2005, vol. 38, issue 8, s. 31-36 [cit. 2013-10-25]. DOI: 10.1109/MC.2005.252. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1492263>
- [12] VALERIUS, Brian. An Overview of Autostereoscopy as Used in Augmented and Virtual Reality Systems. In: *UMWiki is the University of Minnesota's Collaborative Wiki* [online]. revize 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <https://wiki.umn.edu/pub/UmmCSciSeniorSeminar/Spring2011Talks/BrianValerius.pdf>

- [13] SMOLIC, Aljoscha, Karsten MUELLER, Philipp MERKLE, Peter KAUFF a Thomas WIEGAND. An overview of available and emerging 3D video formats and depth enhanced stereo as efficient generic solution. *2009 Picture Coding Symposium* [online]. IEEE, 2009, č. -, s. 1-4 [cit. 2014-03-23]. DOI: 10.1109/PCS.2009.5167358. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5167358>
- [14] MÜLLER, Karsten. 3D Video Formats and Coding Standards. In: *The workshop of 90th MPEG & JPEG 50th Meeting* [online]. 2009 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://see.xidian.edu.cn/conference/mpegjpeg/workshop/PPT/karstenmuller.pdf>
- [15] BRULS, W.H.A., C. VAREKAMP, R. Klein GUNNEWIEK, B. BARENBRUG a A. BOURGE. Enabling Introduction of Stereoscopic (3D) Video: Formats and Compression Standards. *2007 IEEE International Conference on Image Processing* [online]. IEEE, 2007, vol. 1, I - 89-I - 92 [cit. 2014-05-14]. DOI: 10.1109/ICIP.2007.4378898. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4378898>
- [16] MULLER, Karsten, Philipp MERKLE, Gerhard TECH a Thomas WIEGAND. 3D video formats and coding methods. *2010 IEEE International Conference on Image Processing* [online]. IEEE, 2010, s. 2389-2392 [cit. 2014-05-14]. DOI: 10.1109/ICIP.2010.5652030. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5652030>
- [17] FLIEGEL, Karel. Advances in 3D imaging systems: Are you ready to buy a new 3D TV set?. *20th International Conference Radioelektronika 2010* [online]. IEEE, 2010, s. 1-6 [cit. 2014-05-14]. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2010.5478550. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?>
- [18] BRULS, W.H.A., C. VAREKAMP, R. Klein GUNNEWIEK, B. BARENBRUG a A. BOURGE. Enabling Introduction of Stereoscopic (3D) Video: Formats and Compression Standards. *2007 IEEE International Conference on Image Processing* [online]. IEEE, 2007, vol. 1, I - 89-I - 92 [cit. 2014-05-15]. DOI: 10.1109/ICIP.2007.4378898. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4378898>
- [19] MÜLLER, K, P MERKLE a T WIEGAND. 3-D Video Representation Using Depth Maps. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2011, vol. 99, issue 4, s. 643-656 [cit. 2014-05-15]. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2091090. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5668523>
- [20] BRULS, W.H.A., C. VAREKAMP, R. Klein GUNNEWIEK, B. BARENBRUG a A. BOURGE. Enabling Introduction of Stereoscopic (3D) Video: Formats and Compression Standards. *2007 IEEE International Conference on Image Processing* [online]. IEEE, 2007, č. 1, I - 89-I - 92 [cit. 2014-03-22]. DOI: 10.1109/ICIP.2007.4378898. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4378898>
- [21] REDERT, Andre, Robert-Paul BERRETTY, Chris VAREKAMP, Oscar WILLEMSSEN, Jos SWILLENS a Hans DRIESSEN. Philips 3D Solutions: From Content Creation to Visualization. *Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06)* [online]. IEEE, 2006, č. -, s. 429-431 [cit. 2014-03-22]. DOI: 10.1109/3DPVT.2006.107. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4155757>



- [22] KLETTE, Reinhard. *Concise computer vision: an introduction into theory and algorithms* [online]. 1st edition. Londýn: Springer, 2014, s. 287-330 [cit. 2014-03-23]. ISBN 9781447163190.
- [23] MANJUNATH, B. S. L14 (morestereo): Stereo matching (přednáška). In: *Electrical and Computer Engineering | UC Santa Barbara* [online]. 2004 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: [http://www.ece.ucsb.edu/~manj/ece181bS04/L14\(morestereo\).pdf](http://www.ece.ucsb.edu/~manj/ece181bS04/L14(morestereo).pdf)
- [24] NAVAB, Nassir a Christian UNGER. Stereo Vision II: Dense Stereo Matching: přednáška. In: *Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin & Augmented Reality* [online]. 2011 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: [http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingWs11Cv2/3D\\_CV2\\_WS\\_2011\\_Stereo.pdf](http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingWs11Cv2/3D_CV2_WS_2011_Stereo.pdf)
- [25] ZUREIKI, Ayman, Michel DEVY a Raja CHATIL. Stereo Matching and Graph Cuts. *Stereo Vision* [online]. InTech, 2008-11-01 [cit. 2014-05-17]. DOI: 10.5772/5888. Dostupné z: [http://www.intechopen.com/books/stereo\\_vision/stereo\\_matching\\_and\\_graph\\_cuts](http://www.intechopen.com/books/stereo_vision/stereo_matching_and_graph_cuts)
- [26] CAPETO, Ugo. Stereo Matching and Graph Cuts. In: *3D Stereoscopic Photography* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://3dstereophoto.blogspot.cz/2013/09/stereo-matching-and-graph-cuts.html>
- [27] KOSOV, Sergey, Thorsten THORMÄHLEN a Hans-Peter SEIDEL. Accurate Real-Time Disparity Estimation with Variational Methods. *Advances in visual computing* [online]. New York, NY: Springer, 2009, s. 796-807 [cit. 2014-05-17]. DOI: 10.1007/978-3-642-10331-5\_74. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3->
- [28] CAPETO, Ugo. Stereo Matching - Variational Methods. In: *3D Stereoscopic Photography* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://3dstereophoto.blogspot.cz/2012/06/stereo-matching-variational-methods.html>
- [29] HUGUET, Frederic a Frederic DEVERNAY. A Variational Method for Scene Flow Estimation from Stereo Sequences. *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision* [online]. IEEE, 2007, s. 1-7 [cit. 2014-05-17]. DOI: 10.1109/ICCV.2007.4409000. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4409000>
- [30] Wenxian, Hong. *A Study of Fast, Robust Stereo-Matching Algorithms*. Cambridge, Massachusetts: MIT 2010. Diplomová práce, MIT, Department of Mechanical Engineering.
- [31] MARTIN, Šindelář. *Subjektivní hodnocení kvality stereoskopického obrazu* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9208/DP\\_Martin\\_Sindelar.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9208/DP_Martin_Sindelar.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [32] ITU-R BT.2021. *Subjective methods for the assessment of stereoscopic 3DTV systems*. Geneva: International Telecommunication Union, 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2021-0-201208-I/en>

- [33] ITU-R BT.500-13. *Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*. Geneva: International Telecommunication Union, 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-13-201201-I/en>
- [34] KRMELA, Tomáš. *Subjektivní hodnocení kvality videosekvencí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/10678>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [35] Koninklijke Philips Electronics. *Addendum BDL4251VS User Manual*. Místo vydání neuvedeno, 2013. Dostupné z: <http://www.dimenco.eu/downloads/manuals/BDL4251VS%20Addendum%20User%20Manual-English%2020130109.pdf>
- [36] D. Scharstein and R. Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1/2/3):7-42, April-June 2002.
- [37] D. Scharstein and R. Szeliski. High-accuracy stereo depth maps using structured light. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003)*, volume 1, pages 195-202, Madison, WI, June 2003.
- [38] D. Scharstein and C. Pal. Learning conditional random fields for stereo. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007)*, Minneapolis, MN, June 2007.
- [39] H. Hirschmüller and D. Scharstein. Evaluation of cost functions for stereo matching. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007)*, Minneapolis, MN, June 2007.
- [40] DIMENCO. *Dimenco 3D Player – User Manual*. 2011. Dostupné z: <http://www.dimenco.eu/dimencodisplays/downloads/>
- [41] DIMENCO. *Dimenco Control Tool – User Manual*. 2011. Dostupné z: <http://www.dimenco.eu/dimencodisplays/downloads/>
- [42] DIMENCO. *3D Core premium flyer*. 2012. Dostupné z: [http://www.dimenco.eu/wp-content/uploads/2012/09/real-time\\_premium-leaflet\\_v3.pdf](http://www.dimenco.eu/wp-content/uploads/2012/09/real-time_premium-leaflet_v3.pdf)
- [43] DIMENCO. *3D Interface Specification*. 2011.
- [44] ABBELOOS, Wim. *Real-Time Stereo Vision*. Belgium (Belgie), 2010. Master Thesis (Diplomová práce). Karel de Grote-Hogeschool University College
- [45] Kurtosis in Excel (KURT). In: *Macroption* [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.macroption.com/kurtosis-excel-kurt/>
- [46] BROX, Thomas, Andrés BRUHN, Nils PAPENBERG, Joachim WEICKERT. *High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping* [online]. Berlin: Springer, 2004, s. 25-36 [cit. 2014-05-04]. ISBN 9783540246732.
- [47] SÁNCHEZ, Javier, Nelson MONZÓN a Agustín SALGADO DE LA NUEZ. Robust Optical Flow Estimation. In: *Image Processing On Line* [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. ISSN 2105-1232. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2013.21>

- [48] KOLMOGOROV, Vladimir a Ramin ZABIH. Computing Visual Correspondence with Occlusions using Graph Cuts. In: *International Conference on Computer Vision* [online]. 2001 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.cs.cornell.edu/rdz/Papers/KZ-ICCV01-tr.pdf>
- [49] KOLMOGOROV, Vladimir, Pascal MONASSE a Pauline TAN. Kolmogorov and Zabih's Graph Cuts Stereo Matching Algorithm. In: *Image Processing On Line* [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. ISSN 2105-1232. Dostupné z: <http://www.ipol.im/pub/pre/97/preprint.pdf>
- [50] KUK-JIN YOON a IN SO KWEON. Adaptive support-weight approach for correspondence search. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2006, vol. 28, issue 4, s. 650-656 [cit. 2014-05-04]. DOI: 10.1109/TPAMI.2006.70. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1597121>
- [51] KLAUS, A., M. SORMANN a K. KARNER. Segment-Based Stereo Matching Using Belief Propagation and a Self-Adapting Dissimilarity Measure. *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)* [online]. IEEE, 2006, č. 3, s. 15-18 [cit. 2014-05-06]. DOI: 10.1109/ICPR.2006.1033. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1699458>
- [52] 3D Formats. *3D University* [online]. 2012 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.3duniversity.net/page.aspx?page=33>

# 11 Přílohy

## 11.1 Příloha A – dokumenty využívané při subjektivním hodnocení

Dokumenty jsou vloženy v téměř původní podobě. Často byla upravena velikost písma pro lepší sladění se zbytkem formátování této práce. Některé informace k hodnocení byly sděleny pouze v ústní formě.

### 11.1.1 Úvodní informace o hodnocení, poděkování hodnotitelům a jejich seznam se základními informacemi o nich

Nakonec byl dodatečně zjišťován ještě věk účastníků, což z tohoto uvedeného dokumentu nevyplývá.

#### Subjektivní hodnocení stereoskopického obrazu

Seznam hodnotících a základní informace pro ně

Součást bakalářské práce Martina Krupičky (2014)

Vážený účastníku,

děkuji Ti/Vám za účast při tomto subjektivním hodnocení kvality autostereoskopického obrazu vytvořeném jako součást bakalářské práce Martina Krupičky. Jedná se o hodnocení pomocí metody single-stimulus(SS), kde uvidíš/uvidíte porovnávané vzorky a budeš/budete hodnotit svůj subjektivní dojem podle připravené stupnice. Aby nedošlo k ovlivňování Tvého/Vašeho úsudku, podrobnější informace o jednotlivých obrazech můžeš/můžete získat až po skončení Tvého/Vašeho hodnocení.

Teď podrobněji k průběhu testování. Postupně uvidíš/uvidíte několik sad vzorků, na nich celkem 3 různé scény. Několik snímků tedy bude zobrazovat vždy stejnou scénu, přičemž informace o hloubce, hloubková mapa, byla ke každému z nich získána jiným způsobem. Tvým/Vaším úkolem je ohodnotit každý jeden vzorek podle vlastního dojmu na stupnici od 1 do 5, přičemž 1 značí nejlepší a 5 nejhorší. Hodnotí se dva parametry dvěma navzájem nezávislými známkami – dojem z celkové kvality obrazu a vizuální komfort pozorování daného obrazu. Každý testovaný obraz bude zobrazen po dobu 30s, na ohodnocení budeš/budete mít následně 10s, během kterých bude na obrazovce zobrazen šedý snímek. Lze požádat o změnu délky času na obě činnosti, případně i o pauzu.

Jednotlivé odpovědi zanáším do připravené tabulky já pod Tvým/Vaším dohledem. Je to realizováno tímto způsobem pro usnadnění další práce s vyhodnocováním a kvůli zamezení Tvého/Vašeho ovlivnění názory předchozích hodnotitelů.

Následujícím podpisem stvrzuješ souhlas s využitím Tvých/Vašich názorů při zpracování mé bakalářské práce.

Seznam účastníků, jejich podpisy a úroveň znalosti stereoskopie (na výběr z možností žádná-základní-pokročilá):

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_
6. \_\_\_\_\_
7. \_\_\_\_\_
8. \_\_\_\_\_
9. \_\_\_\_\_
10. \_\_\_\_\_
11. \_\_\_\_\_
12. \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

## 11.1.2 Stupnice pro hodnocení

### Subjektivní hodnocení stereoskopického obrazu

Stupnice pro hodnocení

Součást bakalářské práce Martina Krupičky (2014)

Jako výchozí jsem zvolil diskrétní stupnici s možnostmi 1, 2, 3, 4, 5, kde 1 značí nejlepší dojem a 5 nejhorší. Uvádím zde pro lepší představu i slovní ekvivalenty jednotlivým stupňům. Vycházím z oficiálního doporučení ITU-R BT.2021 [1] a stupnice je tedy anglicky, což by v dnešní době neměl být pro většinu lidí problém. Pro jistotu přesto uvádím v závorce vlastní přibližné překlady.

I) Stupnice pro hodnocení dojmu z celkové kvality obrazu

**1 – Excellent (Excelentní)**

**2 – Good (Dobrá)**

**3 – Fair (Ucházející)**

**4 – Poor (Špatná)**

**5 – Bad (Velmi špatná)**

II) Stupnice pro hodnocení vizuálního komfortu pozorování daného obrazu

**1 – Very comfortable (Velmi příjemný)**

**2 – Comfortable (Příjemný)**

**3 – Mildly uncomfortable (Mírně nepříjemný)**

**4 – Uncomfortable (Nepříjemný)**

**5 – Extremely uncomfortable (Velmi nepříjemný)**

Literatura:

[1] ITU-R BT.2021. Subjective methods for the assessment of stereoscopic 3DTV systems. Geneva: International Telecommunication Union, 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2021-0-201208-I/en>

### 11.1.3 Hodnotící arch

## Subjektivní hodnocení stereoskopického obrazu

Hodnotící arch (zapisuje koordinátor hodnocení s kontrolou hodnotících)

Součástí bakalářské práce Martina Krupičky (2014)

	hodnotitel													
vzorek		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	1													
	2													
	3													
	4													
	5													
	6													
	7													
	8													
	9													
	10													
	11													
	12													
	13													
	14													
	15													

Způsob hodnocení:

- 1) Hodnotí se subjektivní dojem na stupnici 1 - 5, kde 1 značí nejlepší a 5 nejhorší.
- 2) Hodnotí se dva parametry dvěma navzájem nezávislými známkami - dojem z celkové kvality obrazu a vizuální komfort pozorování daného obrazu.
- 3) Způsob záznamu odpovědi je: hodnocení celkové kvality obrazu/hodnocení vizuálního komfortu pozorování daného obrazu.
- 4) Podrobnější informace jsou napsané na přidruženém archu se seznamem jmen hodnotících, případně jsou sděleny v ústní podobě.
- 5) Tabulka má určitý počet rezervních míst, která pravděpodobně nebudou využita.

Datum: \_\_\_\_\_

## 11.2 Příloha B – přehled všech hodnocení jednotlivých vzorků při subjektivním hodnocení

		Vzorky (v levém sloupci je vždy hodnocení dojmu z celkové kvality, v pravém hodnocení vizuálního komfortu pozorování)																							
		„ground truth“ z datasetů						skript stereomatch.m						program DMAG						program DMAG3					
		1 (art)		2 (baby2)		3 (cloth3)		4 (art)		5 (baby2)		6 (cloth3)		7 (art)		8 (baby2)		9 (cloth3)		10 (art)		11 (baby2)		12 (cloth3)	
Hodnotitel	1	2	2	3	3	1	1	4	3	3	4	2	4	3	2	5	5	2	1	4	4	5	5	4	3
	2	2	1	1	1	1	1	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2	2	1	4	3	3	2	3	3
	3	2	3	2	2	2	2	4	3	4	2	3	3	3	2	4	2	1	2	4	3	3	3	4	4
	4	2	2	3	4	2	1	5	4	4	3	4	3	3	3	4	3	3	2	4	4	5	3	4	2
	5	2	2	3	2	1	1	5	2	3	3	3	2	2	4	4	3	1	1	3	2	4	4	3	4
	6	1	1	1	2	1	1	2	1	3	3	2	3	2	1	4	3	1	1	2	2	3	2	1	3
	7	2	1	2	3	1	1	3	2	3	2	2	2	4	2	3	4	2	1	3	3	4	2	3	3
	8	1	1	1	2	2	1	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	1	1	3	2	2	4	2	3
	9	2	2	2	2	1	2	2	3	3	4	3	2	2	2	3	3	2	3	2	3	4	3	4	3
	10	1	2	1	1	1	1	4	3	2	3	2	1	1	1	2	2	1	1	3	3	2	1	2	2
	11	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	3	4	4	3	3	2
	12	1	1	2	1	1	1	4	3	3	3	2	3	3	2	3	1	2	2	3	3	2	3	3	4
	13	2	2	2	2	2	2	5	2	4	2	3	1	3	2	4	3	3	3	4	2	4	3	3	3
	14	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	2	3	2	2	4	1	1	3	1	2	2	4	3
	15	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	16	1	1	2	1	1	2	4	4	4	3	2	3	2	2	3	1	2	1	5	4	4	3	3	4
	17	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	2	3	2	1	3	2	2	1	4	3	3	4	4	3
	18	2	1	3	2	1	1	2	3	2	3	2	2	1	2	4	2	2	1	3	2	4	3	4	3
	19	2	1	2	2	1	1	4	3	3	2	3	3	3	2	2	3	1	1	4	3	4	4	4	2
	20	2	1	1	1	1	1	3	2	3	3	2	2	3	2	4	2	2	2	3	3	3	2	3	2

## 11.3 Příloha C – přehled základních vypočtených hodnot při vyhodnocování subjektivního hodnocení

	Vzorky (v levém sloupci je vždy hodnocení dojmu z celkové kvality, v pravém hodnocení vizuálního komfortu pozorování)																							
	„ground truth“						skript stereomatch.m						program DMAG						program DMAG3					
	1 (art)		2 (baby2)		3 (cloth3)		4 (art)		5 (baby2)		6 (cloth3)		7 (art)		8 (baby2)		9 (cloth3)		10 (art)		11 (baby2)		12 (cloth3)	
průměrné skóre	1,6	1,4	1,8	1,8	1,2	1,2	3,3	2,7	2,9	2,6	2,5	2,4	2,6	2,1	3,3	2,6	1,8	1,5	3,3	2,8	3,4	2,9	3,2	2,9
směrodatná odchylka	0,5	0,6	0,8	0,9	0,4	0,4	1,1	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,9	1,0	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0	0,9	0,8
δjkr	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
koeficient špičatosti	1,2	3,3	1,8	3,5	3,3	3,3	1,6	3,0	3,1	2,6	2,8	2,4	2,6	4,0	2,3	3,2	2,4	2,8	2,5	2,4	1,9	2,7	2,9	2,7
normální rozložení	N	A	N	A	A	A	N	A	A	A	A	A	A	N	A	A	A	A	A	A	N	A	A	A
horní hranice screening	3,8	2,6	5,2	3,5	2,0	2,0	8,3	4,2	4,5	4,2	3,8	4,0	4,2	5,3	5,0	4,5	3,0	2,9	4,9	4,5	7,8	4,8	4,9	4,5
dolní hranice screening	-0,6	0,2	-1,6	0,0	0,4	0,4	-1,7	1,2	1,3	0,9	1,1	0,8	0,9	-1,1	1,5	0,6	0,5	0,1	1,7	1,1	-1,1	1,0	1,4	1,2

Zkratka „A“ v textu značí odpověď ANO, zkratka „N“ značí odpověď NE.

Z důvodu omezené velikosti strany A4 bylo nutné značně omezit počet zobrazovaných desetinných míst. Díky tomu lze občas nabýt zkresleného dojmu o výsledcích jako například v případě rovnosti koeficientu špičatosti 4,01. Podle dříve definovaných pravidel to značí, že dané rozložení nelze považovat za normální, ale díky zobrazené hodnotě 4,0 to může čtenáře této publikace zmást. Čísla s větší přesností lze nalézt v excelovském dokumentu na přiloženém médiu.



## 11.4 Příloha D – CD

Příložené paměťové médium obsahuje celou práci v elektronické podobě ve dvou verzích – ve wordovském dokumentu a ve formátu PDF. Obsahuje také všechny nástroje pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth vytvořené v programu MATLAB. Následuje kompletní seznam obsažených souborů.

- text bakalářské práce v podobě souboru BAP\_krupima2.pdf
- text bakalářské práce v podobě souboru BAP\_krupima2.docx
- vytvořené nástroje pro tvorbu statického obrazu ve formátu 2D-plus-depth, tedy aplikace a ovládací skript *testovaci\_skript.m* spolu se všemi příslušnými podskripty
- excelovský sešit *subjektivni\_hodnoceni\_vyhodnocovani.xlsx* obsahující všechny zaznamenané a vypočtené hodnoty v rámci realizovaného subjektivního hodnocení kvality obrazu