

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY – K13137



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kolorimetrická kalibrace multiview videosekvencí
(Colorimetric calibration of multiview videosequences)

JAKUB PAROULEK

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph. D.

zadání

Anotace

Bakalářská práce obsahuje návrh metody kolorimetrické kalibrace multiview videosekvencí. Tato metoda je implementována v programovém prostředí MATLAB, následně je provedeno objektivní posouzení i subjektivní testování této metody skupinou pozorovatelů.

Annotation

This bachelors thesis contains a concept of applying the methods of colorimetric calibration to a multiview video sequence. The method is implemented in MATLAB with objective considerations being made as well as subjectively testing the method on a group of observers.

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

22. 5. 2014

podpis:

Poděkování

Na tomto čestném místě ve své práci chci poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph. D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Stejnou mírou bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům.

OBSAH:

1. ÚVOD	8
2. BARVY	10
2.1. HISTORIE	10
2.2. TEORIE	11
2.2.1. SVĚTLO	11
2.2.2. SVĚTELNÉ ZDROJE	13
2.2.2.1. BAREVNÁ TEPLOTA	13
2.3. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY BAREV	14
2.3.1. TÓN BARVY	14
2.3.2. SYTOST BARVY	14
2.3.3. JAS BARVY	15
2.4. SPEKTRÁLNÍ DATA A KŘIVKY	16
2.5. MÍSENÍ BAREV	17
2.5.1. ADITIVNÍ MÍSENÍ	17
2.5.2. SUBTRAKTIVNÍ MÍSENÍ	17
2.6. BAREVNÉ MODELY	18
2.6.1. RGB	18
2.6.2. CMYK	19
2.6.3. SROVNÁNÍ RGB A CMYK	20
2.6.4. PŘEVOD MEZI RGB A CMYK	20
2.6.5. HSV (HSB)	21
2.6.6. HSL	22
2.6.7. LAB	23
2.7. BAREVNÝ PROSTOR	24
2.7.1. GAMUT	24
3. FYZIOLOGICKÉ VLASTNOSTI LIDSKÉHO OKA	25
3.1. BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ	25
4. STEREOSKOPIE	26
4.1. PASIVNÍ	26
4.1. AKTIVNÍ	27
5. KOLORIMETRICKÁ KALIBRACE V PROSTŘEDÍ MATLAB	28
5.1. GRAY WORLD ALGORITMUS	29
5.1.1. IMPLEMENTACE GRAY WORLD ALGORITMU	30
5.2. PŘEVOD Z RGB DO LAB	31
5.2.1. PŘEVOD V MATLABU	31
5.3. METODA K-MEANS CLUSTERING (ZPŮSOB SHLUKOVÁNÍ)	32
5.3.1. EUKLIDOVSKÁ VZDÁLENOST	32
5.3.2. METODA K-MEANS CLUSTERING V MATLABU	32
5.3.3. IDENTIFIKACE CLUSTERŮ	34
5.4. STŘEDOVÉ TĚŽIŠTĚ	35
5.4.1. KÓD VÝPOČTU V MATLABU	36
5.5. VÝSLEDNÁ KALIBRACE	36
5.6. UPRAVENÍ JASU	36
5.7. ZKALIBROVANÉ FOTOGRAFIE	37
5.7.1. ULOŽENÍ DO FORMÁTU JPEG	37

6. HODNOCENÍ KVALITY	38
6.1. SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ	38
6.1.1. PŘÍPRAVA FOTEK	38
6.1.2. VÝSLEDEK SUBJEKTIVNÍHO HODNOCENÍ	39
6.2. OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ	40
6.2.1. VÝSLEDEK OBJEKTIVNÍHO HODNOCENÍ	41
7. ZÁVĚR.....	42
SEZNAM TABULEK.....	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	45
CELKOVÝ POČET STRAN	52

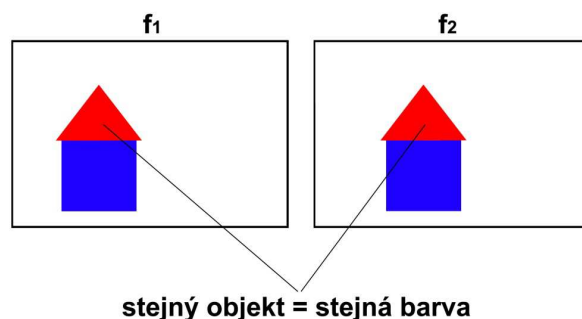
1. ÚVOD

V poslední době dochází k velkému rozmachu multiview videosekvence (mnozí to znají více pod názvem 3D filmy – videa). Nejdříve byly 3D stereoskopické snímky promítány v naučných parcích nebo v IMAXu (3D kino). Ale po uvedení filmu *Avatar* ve formátu 3D do kin se mnohonásobně zvýšil zájem o 3D technologie, takže v současnosti je už možné filmy v tomto formátu sledovat i doma na televizních obrazovkách.

Se správným vjemem 3D obrazu souvisí několik faktorů. Jedním z nich je nutnost, aby snímky pro pravé a levé oko byly barevně zkorigovány. Právě tím se zabývám ve své bakalářské práci. Protože při snímání stereoskopických snímků se mohou použít i dvě různé kamery (které jsou přibližně vodorovně posunuty od sebe 65 mm = přibližná vzdálenost očí), a každá z nich může být jinak barevně nastavena. Nebo také může každá kamera kvůli posunu pracovat s jinými světelnými podmínkami. Cílem mé bakalářské práce bylo proto najít způsob, jak snímky ze dvou kamer kolorimetricky upravit tak, aby byly barevně stejné, a došlo k lepšímu výslednému barevnému vjemu.

V první části práce se zabývám problematikou barev (historie, teorie, mísení barev, barevné modely atd.). Poté se zaměřuji na funkce lidského oka (kapitola 3.) a vysvětlení pojmu stereoskopie (kapitola 4.).

Ve druhé části práce se zabývám kolorimetrickou kalibrací. Na obou snímcích (pravé a levé oko) multiview videosekvence existují vlastně tytéž obrazy - jenom jsou mírně posunuté. Je možné postupovat různými způsoby, jak kalibrovat tyto dva snímky. Například podle prostorového přístupu tak, že v obrazu se vyhledají stejné objekty obou snímků a těm se pak nadefinuje stejná barva dle obrázku č. 1. Tento způsob je však velice obtížný, a proto je lepší zvolit jednodušší způsob – přístup z hlediska barev. Vyberou se skoro stejné barvy, které se pak kalibrují (více o kalibraci v kapitole 5.). Právě tuto metodu jsem implementoval v programovém prostředí MATLAB.



Obrázek č. 1: Příklad kalibrace

f_1 snímek pro levé oko

f_2 snímek pro pravé oko

V závěru práce je zaznamenáno subjektivní a objektivní hodnocení kvality kalibrovaných fotek. Subjektivní hodnocení kvality stereoskopických fotek před a po kolorimetrické kalibraci probíhalo se skupinou pozorovatelů na televizi Samsung s 3D technologií (kapitola 6.).

2. BARVY

Barvy velmi ovlivňují grafický návrh, a to jak na pozorovatele celek zapůsobí. Jsou jedním z nejdůležitějších prvků návrhu a rozhodně by se neměly nijak podcenit. Proto je důležité si problematiku barev nastudovat a zjistit, jak barvy působí na člověka – jakou náladu v něm vyvolají. Vše se získá až zkušeností a řádným prozkoumáváním.

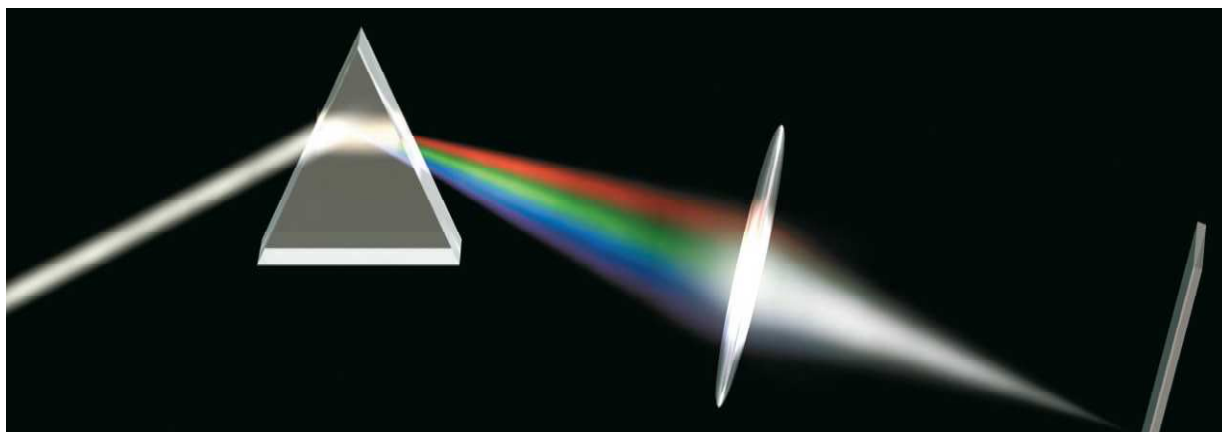
2.1. HISTORIE¹

Skutečnost, že lidské oko rozeznává barvy, je jedním z důležitých předpokladů přežití člověka. V dávné minulosti to mohlo rozhodnout – např. ovoce „špatné“ a „dobré“ se rozeznávalo i podle barvy.

Jako jeden z prvních se naukou o barvách zabýval **Isaac Newton** (1642–1727).

„Bylo známo, že barva souvisí s vlastnostmi povrchu objektu a zároveň se světlem odraženým od objektu. Byly využívány geometrické vlastnosti světla, jako jsou odraz a lom, ale vlastnosti související s barevností světla do té doby nebyly nijak systematizovány. Newton zjistil, že bílé světlo může být rozděleno na jednotlivé základní barvy. Pás těchto základních barev pojmenoval spektrum a popsal pořadí barev – oblast červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, modrou, indigovou a fialovou. K popisu barev si vybral těchto sedm základních oblastí, i když bylo i jemu zřejmé, že existuje bezpočet dalších barev, které leží mezi nimi. Podstatné je zejména to, že Newton definuje barvu jako vlastnost světla. Bílé světlo v sobě obsahuje všechny barvy. Pokud se nám povrch jeví „žlutý“, pak to znamená, že tento povrch nějakým způsobem změnil původně bílé světlo, které se od něj odrazilo. Není-li světlo, nejsou ani barvy.“²

Často se říká, že to byl právě Newton, kdo objevil optický hranol. Přitom v jeho době byl už dávno známý. Newton celý svůj pokus zrealizoval **roku 1666** ve Woolsthorpe v hrabství Lincolnshire. *„Zatemnil pokoj a nechal do něj vstupovat malým kruhovým otvorem v okenici pouze úzký paprsek denního světla. Tento paprsek se jevil po dopadu jako malá bílá skvrna. Poté Newton umístil k otvoru trojboký hranol, který lámal paprsek světla, a tím zároveň způsobil, že se bílá skvrna změnila v pestrobarevný pruh. Jeden konec pruhu byl červený, druhý fialový a ostatní barvy se objevily mezi nimi.“³* Poté provedl celý pokus i opačným způsobem, a to tak, že barevné spektrum dále změnil v bílé světlo.



Obrázek č. 2: Průchod bílého světla hranolem a zase naopak

Newton svým pokusem zjistil, že díky různým úhlům hranolu se mění vlastnosti světla => barvy. Dnes se tento proces definuje tak, že se světlo rozloží na různé **vlnové délky**. Odhalení vztahu mezi vlnovou délkou a barvou světla objevil až později **James Clerk Maxwell** (1831–1879). Podařilo se mu dokázat, že světlo je pouze jednou z forem elektromagnetické energie a může být popsáno pomocí standardních rovnic elektromagnetických vln => vytvořil ucelenou teorii elektromagnetického vlnění. Dnes již umíme ke každé barvě přiřadit její vlnovou délku.

2.2. TEORIE

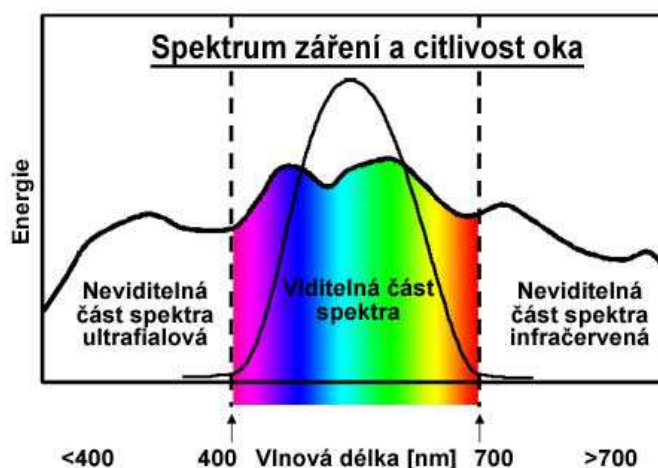
Barva je mnohoznačný pojem a existuje několik způsobů, jak ji vysvětlit. Vyjadřuje **vlastnost lidského zrakového vjemu**. Je určena spektrálním složením světelného podnětu vstupujícího do lidského oka na sítnici. Barva slouží k vyhodnocování **barevného podnětu**. Záleží na tom, jak má člověk citlivý zrakový orgán, na podmínkách pozorování, ale i na psychickém stavu pozorovatele. Barva je charakterizována **spektrálním složením barevného podnětu** (tj. spektrálním složením světla). Spektrální složení barevného světla je objektivně zjistitelná a měřitelná fyzikální veličina.⁴

2.2.1. SVĚTLO

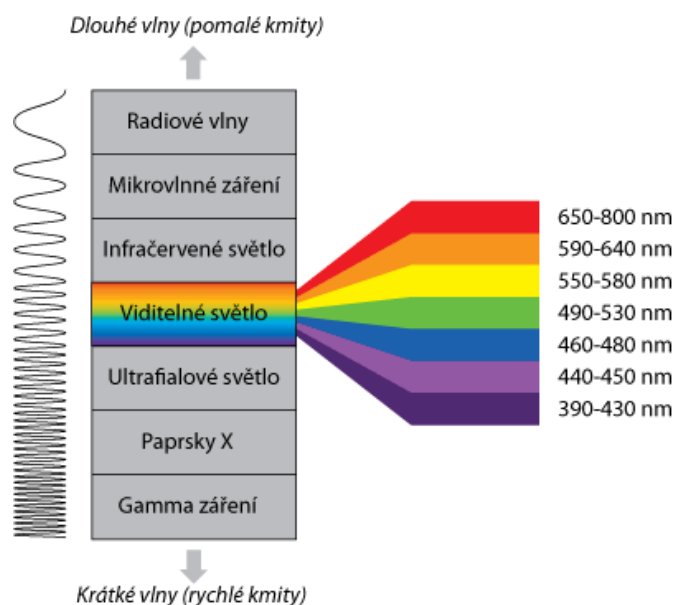
Základní **charakteristiky** světla jsou⁵:

- **Vlnová délka** (tedy rychlost či frekvence kmitání)
- **Intenzita** (tedy síla či amplituda vlny)
- **Polarizace** (tedy směr kmitání)

Jak již bylo zmíněno v kapitole o historii, spektrální složení barevného světla je možné rozdělit podle odpovídající vlnové délky. Lidské oko vidí barvy ve vlnové délce přibližně od **400 – 700 nm** (někde i napsáno cca **380 – 770 nm**). Představují hranici viditelného světla (spektrální barvy tvoří barevnou stupnici od červené, přes žlutou a zelenou až po fialovou). Mimo hranici již lidské oko barvu nevnímá – zde leží infračervené a ultrafialové záření.⁶



Obrázek č. 3: Spektrum záření



Obrázek č. 4: Spektrum záření 2

Obecně můžeme všechny objekty kolem nás zařadit to těchto **kategorií**:⁷

1. objekty **vyzařující** světlo (světelné zdroje – žárovky, monitory, projektory...) – vyzařování je způsobeno různými chemickými nebo fyzikálními procesy.
2. objekty **pohlcující** světlo:
 - a. **pohlcují** – záleží na tloušťce vrstvy, kterou světlo prochází. I předměty, které se zdají být úplně průhledné a vypadají, že jimi světlo jen prochází (např. voda), tak při větších tloušťkách světlo pohltní.
 - b. **odrážejí** – předměty nejdřív světlo pohltní, ale následně ho odrazí (např. zrcadlo).

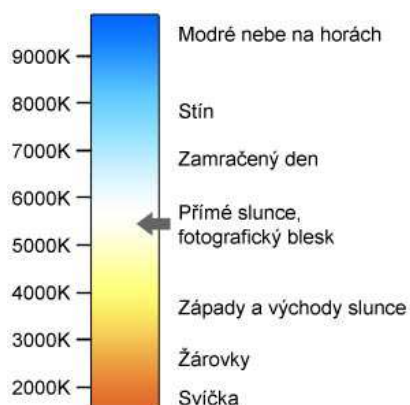
2.2.2. SVĚTELNÉ ZDROJE

Světelným zdrojem je každé těleso, ze kterého vychází světlo. Světelné zdroje rozlišujeme podle toho, jestli jsou **přírodní** (Slunce), nebo **umělé** (vytvořené člověkem – žárovka). Můžeme je rozdělit také podle toho, zda světlo vzniká přímo ve zdroji (**primární zdroj světla**), či se pouze odráží (**sekundární zdroj světla**). Mezi primární zdroje patří například žárovka a mezi sekundární zdroje například Měsíc, který odráží světlo přicházející od Slunce.

2.2.2.1. BAREVNÁ TEPLOTA⁸

Světelné zdroje zabarvují fotografii (či video), a to je dáno tzv. barevnou teplotou světla. Barevná teplota (někdy se jí také říká teplota chromatičnosti) charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátým na tuto teplotu. Měří se v kelvinech (K).

Člověk se umí subjektivně přizpůsobit světelným podmínkám (vnímá bílý papír jako bílý, i když je světelným zdrojem trochu zabarvený), ale tuto schopnost fotoaparáty a kamery nemají. Musí se na nich využít možnost nastavení – musí se vyvážit bílá. Příklady různých barevných teplot jsou uvedeny na obrázku č. 5.



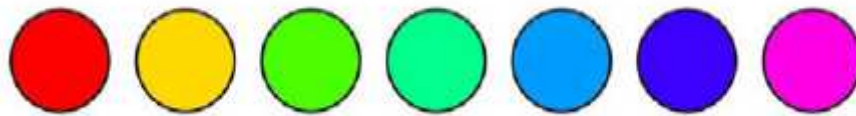
Obrázek č. 5: Příklady světelných zdrojů

2.3. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY BAREV

Je několik možností, jak barvu posuzovat. Existují ovšem základní body, které jsou charakteristické:

- Tón
- Sytost
- Jas

2.3.1. TÓN BARVY



Obrázek č. 6: Tón

Tón barvy určuje barevnost. Je charakterizovaný vlnovou délkou dominantního světla, které je v barvě zastoupené. Lidské oko dokáže nejvíce barevných tónů rozlišit v oblasti žlutooranžové a azurové, nejméně pak v okolí modré a červené.

2.3.2. SYTOST BARVY



Obrázek č. 7: Sytost

Sytost barvy aneb čistota barvy – posuzuje se zde účast čisté pestré barvy na celkovém vjemu (jedná se o vlastnost zrakového vjemu). Sytost je tedy dána **poměrem energií** jednotlivých monochromatických světél zastoupených v dané barvě. Rozlišují se barvy syté a nesyte (bledé). Rozdílnost sytosti barvy se vyjadřuje v procentech barvy šedé.

Syté barvy – neobsahují bílou složku - spektrální barvy, atd. => sytost barev je 100 %.

Nesyte barvy – obsahují bílou složku => bílé světlo má sytost 0 %.

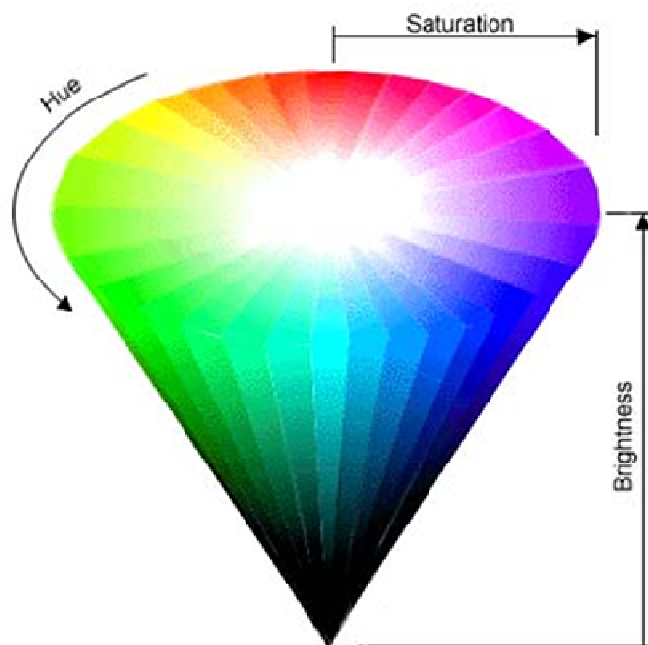
2.3.3. JAS BARVY



Obrázek č. 8: Jas

Jas barvy udává relativní čistotu barvy. Popisuje přechod od neutrální šedé k čistému odstínu při stálé hodnotě jasu. Jas určuje intenzitu barevného vjemu.

Rozlišují se barvy **světlé** a **tmavé**. Při tisku se světlé barvy dosahuje nanášením rastrů nebo přimísením dalších chromatických barev. Tmavé barvy naopak tiskem plných ploch, popř. přimísením šedi nebo dalších chromatických barev.⁹

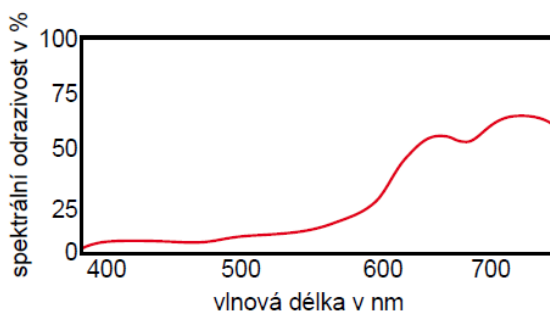


Obrázek č. 9: Odstín, sytost, jas

*Vysvětlení k obrázku s popisky v angličtině:
hue = odstín,
saturation = sytost,
brightness = jas.*

2.4. SPEKTRÁLNÍ DATA A KŘIVKY¹⁰

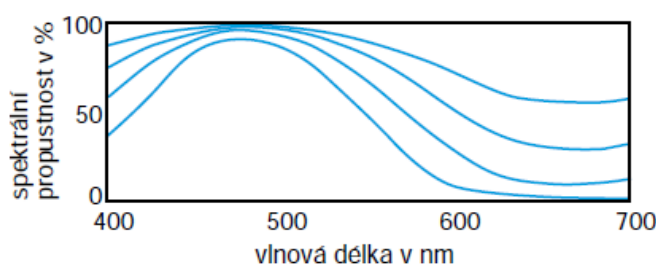
Jakým způsobem ovlivňují jednotlivé objekty světlo, určují spektrální data. Můžeme mít spektrální křivku jak pro objekt, které světlo odráží, tak pro objekt, které světlo pohlcuje. Objekty odrážející světlo mohou mít rozdílné vlastnosti – mohou odrážet různé vlnové délky odlišným způsobem – určují se procenta spektrální odrazivosti (reflektance) jednotlivých vlnových délek.



Obrázek č. 10: Graf odrazivosti pro červený předmět

Vysvětlení k obrázku č. 10:

Zde je graf odrazivosti pro červený předmět. Červený předmět odráží nejvíce světla vyšších vlnových délek (= červené a oranžové barvy) a nejméně kratších vlnových délek (= modré a zelené barvy).



Obrázek č. 11: Graf propustnosti pro azurový inkoust

Vysvětlení k obrázku č. 11:

Zde je graf propustnosti pro azurový inkoust. Předmět propouští nejvíce světla kratších vlnových délek (= modré a zelené barvy) a nejméně delších vlnových délek (= červené a oranžové barvy).

2.5. MÍSENÍ BAREV

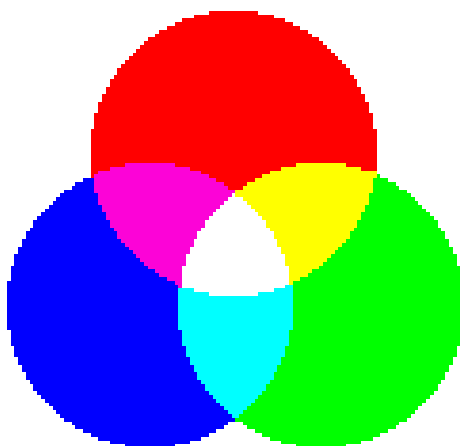
Různým mícháním vlnových délek vzniká řada barev, které nikdy nemohou být vytvořeny jedinou vlnovou délkou – tzv. **nespektrální barvy**. Existuje **aditivní** (součtové) nebo **subtraktivní** (odčítání) mísení barev. Typickými nespektrálními barvami jsou například barvy jako je **šedá** či **bílá** nebo pak **růžová** či **purpurová**, které jsou směsí červené a fialové z opačných konců spektra.¹¹

2.5.1. ADITIVNÍ MÍSENÍ

„Mísení barev aditivním způsobem spočívá v tom, že k jednomu barevnému světlu se připojí další (jiná) barevná světla tak, že výsledné světlo má bohatší spektrální složení než dílčí světla.“¹²

Kombinují se zde základní barvy – **červená, zelená a modrá** (RGB). Nový odstín má světlejší barvu. Tento způsob kombinování barev používají **projektory, monitory, skenery** nebo **displeje**. Výsledné světlo má pro lidské oko vždy jedinou výslednou barvu – tuto barvu ale je možné připravit mnoha kombinacemi, tj. dvě světla s různým spektrálním složením mohou mít tutéž barvu.

Pokud jsou vyzařovány všechny tři složky, vznikne barva bílá.



Obrázek č. 12: Aditivní mísení – RGB barvy

2.5.2. SUBTRAKTIVNÍ MÍSENÍ

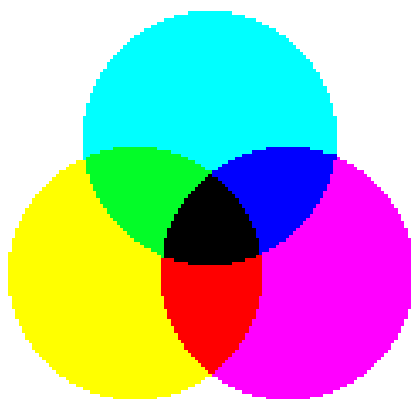
*„Při subtraktivním mísení barev se z daného mnohobarevného **světla** odebírají (odčítají) některé jeho spektrální složky. Výsledná barva má tedy chudší spektrální složení a jeví se obecně jiná, než je původní **barva světla**.“¹³*

Tento způsob mísení barev používají hlavně tiskárny – přidáním barevného odstínu vznikne tmavší barva. Ovšem na rozdíl od aditivního mísení se již k tvorbě nového odstínu používají doplňkové barvy – **azurová, purpurová a žlutá** (CMYK). Odlišné barvy lze získat různým

vzájemným poměrem těchto barev. **Šedá barva** vzniká při stejných hustotách. Pokud jsou filtry dostatečně syté a neprochází jimi žádné světlo, objeví se **černá barva**.¹⁴

Obecně platí (pokud se omezíme na filtry stejné hustoty)

- 1) azurová + žlutá = zelená;
- 2) purpurová + žlutá = červená;
- 3) azurová + purpurová = modrá;
- 4) azurová + purpurová + žlutá = černá (resp. šedá).



Obrázek č. 13: Substraktivní mísení – CMYK barvy

2.6. BAREVNÉ MODELY¹⁵

Výše zmíněný J. C. Maxwell sestrojil přístroj, kterým ověřil teorii, že všechny barvy, které vidíme, je možné popsat pomocí tří barev (přístroj z roku 1861). Dalším významných vědcem, který posunul teorii třibarevného vidění oka, byl **Herman von Helmholtz** (1821–1894) – popsal, že oko má receptory červené, zelené a modré barvy.

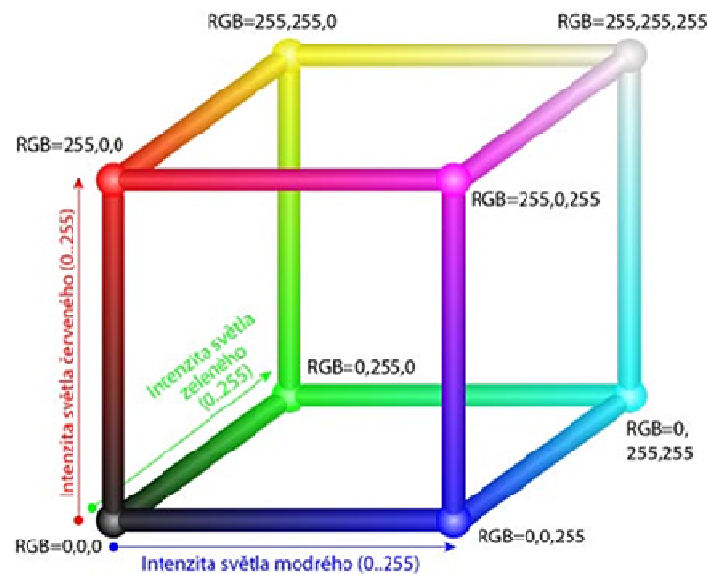
2.6.1. RGB

Jak již bylo popsáno v minulých kapitolách, RGB obsahuje následující barvy:

- **R**ED = ČERVENÁ
- **G**REEN = ZELENÁ
- **B**LUE = MODRÁ

Každou další barvu je možné získat kombinací těchto tří základních barev. „*Překrýváním vždy dvou barevných složek v různé intenzitě na černé ploše dochází k vytváření širokého*

spektra barev, přičemž překrytím všech tří složek vytvoří bílou. Hodnoty jsou určeny mohutností jednotlivých složek, které souvisí se schopností vnímání lidského oka. Minimální hodnota může být nula a maximální dosahuje hodnoty 255 pro každou ze tří složek. Celkový počet kombinací je tedy **2553 barev** tedy **16,7 miliónů barev**.¹⁶



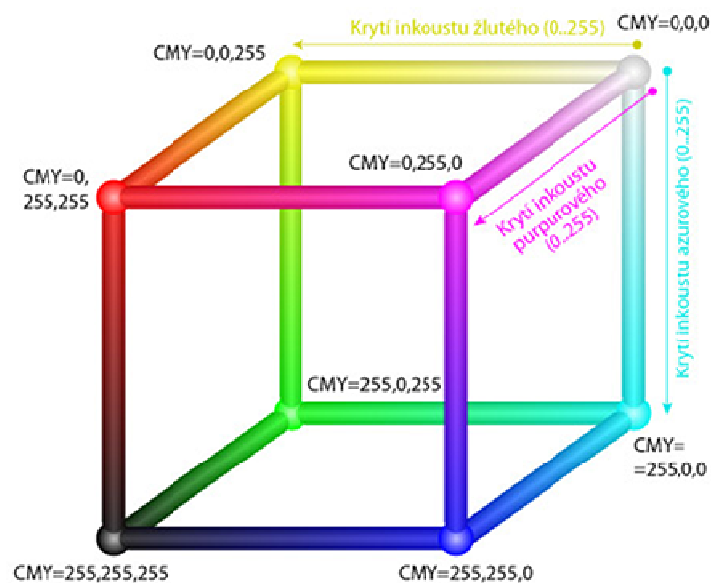
Obrázek č. 14: Hodnoty RGB

2.6.2. CMYK

Pro změnu CMYK obsahuje následující barvy:

- **C**YAN = AZUROVÁ
- **M**AGENTA = PURPUROVÁ
- **Y**ELLOW = ŽLUTÁ
- **„K“** – VYJADŘUJE POUŽITÍ ČERNÉ BARVY – BLACK

Kdybychom první tři barvy (bez černé) smíchali, vznikla by tmavě šedá, proto se s nimi používá i barva černá. Tyto barvy se používají hlavně při tisku. Ale smíchání tří barev (azurové, purpurové a žluté) je dražší variantou, proto se v tisku používá i samostatně černá (např. na text). Dá se říct, že model CMYK je inverzní k modelu RGB (při RGB vystupují kvalitnější a jasnější barvy).¹⁷

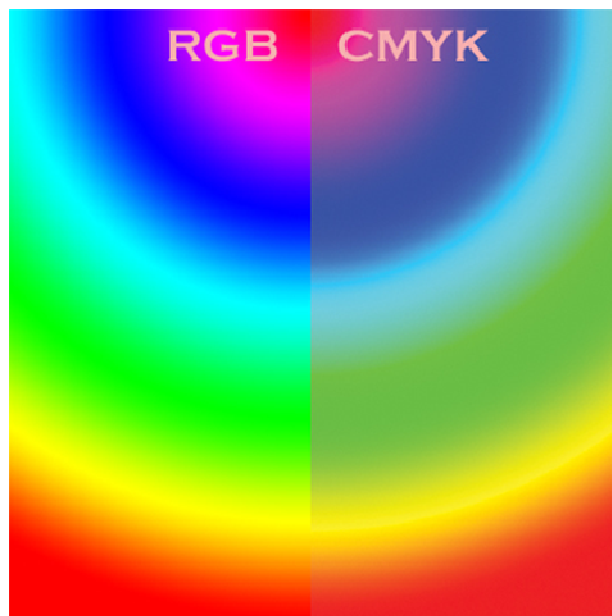


Obrázek č. 15: Hodnoty CMYK

2.6.3. SROVNÁNÍ RGB A CMYK

(Pozn.: Na potištěném papíře možná nebude rozdíl tolik patrný – je třeba se podívat na dokument BP ve formátu PDF v počítači.)

RGB – jasnější a kvalitnější barvy



Obrázek č. 16: CMYK + RGB - srovnání

2.6.4. PŘEVOD MEZI RGB A CMYK

Pokud se převádí obraz z jednoho režimu do druhého, hrozí, že se trvale změní jeho barevnost. Je třeba si dávat pozor, když se něco vytvoří v počítači v režimu RGB (noviny, časopis, obrázky atd.), a pak se vytiskne. Změní se tím úplně vzhled. V současnosti se proto

pracuje rovnou v barvách CMYK, aby při tisku vznikl co nejmenší rozdíl. Další možností je kalibrace barev monitoru.

Převod barev je založen na jednoduchých vzorcích:¹⁸

$$\begin{aligned}C, M, Y &= (1, 1, 1) - (R, G, B) \\R, G, B &= (1, 1, 1) - (C, M, Y)\end{aligned}$$

Např:

Červená barva má modelu **RGB** hodnoty **(255, 0, 0)** =>**převod do CMYK**

Postup: $(255, 255, 255) - (255, 0, 0) = (0, 255, 255)$

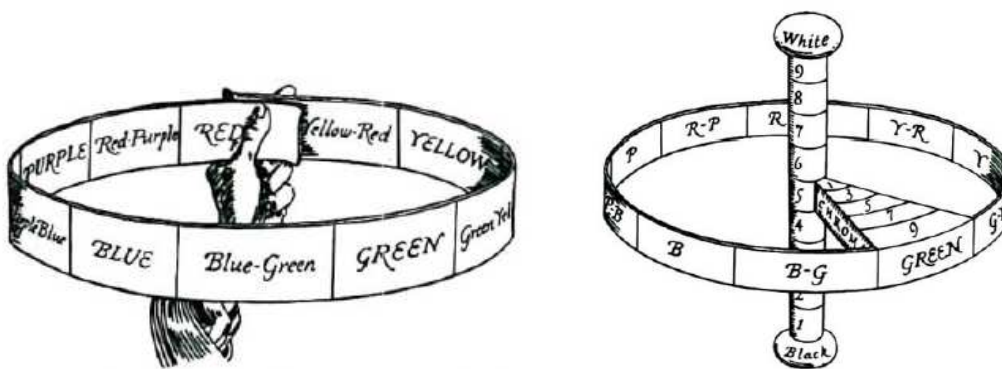
Výsledek: červená barva v modelu CMYK má hodnoty složek C = 0, M = 255, Y = 255.

2.6.5. HSV (HSB)

V tomto modelu se zaměřujeme na vnímání barvy **lidským okem**. Barvy se zde nemíchají jako u předchozích modelů (RGB a CMYK), ale definují se přirozeným způsobem. Barva je zde popsána třemi veličinami – **sylostí**, **jasem** a **odstínem** (u RGB a CMYK to byla čísla). Popis těchto veličin můžeme najít již v kapitole 2.3. (Základní charakteristiky barev) a obrázek modelu viz obrázek č. 9.

- **HUE = Odstín** – vyjadřuje se v úhlových stupních (0° - 360°).
- **SATURATION = Sylost** – vyjadřuje se v procentech, signalizuje, jak je barva čistá. Když dosahuje hodnoty 100 %, neobsahuje vůbec bílou složku a je „nejčistější“.
- **VALUE = Jas** – vyjadřuje se také v procentech. Udává, kolik světla barva obsahuje – rozděluje barvy na světlé a tmavé.

Předchůdcem modelu HSV je umělec **Albert H. Munsell** (1858–1918). „*Jeho principy se používají dodnes. Sestavil systém třídění a popisu barev založený na lidském vnímání rozdílů a vztahů mezi barvami. Vyvinul ucelený systém, pomocí něhož je možné pracovat s takovými pojmy, jako jsou doplňkové barvy, vyvážení barev a barevné kombinace.*“¹⁹ Složku „jas“ nazval Munsell „**hodnota**“, složku „sylost“ jako „**barevnost**“ a složka **odstín** zůstává stejná. Jeho model je pevný vůči pozorování lidským okem. „*Vzdálenosti mezi barevnými vzorky v katalogu odpovídají subjektivně vnímaným rozdílům mezi barvami.*“¹⁹



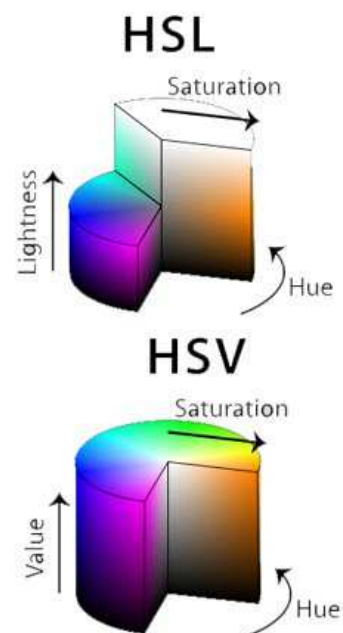
Obrázek č. 17: Odstín; hodnota + barevnost – Munsellova souřadnice

Hodnoty HSB se používají hlavně proto, že jsou dobré pro editaci barev uživatelem – přímý kontakt s barvami (pozn. u modelů RGB a CMYK se pracuje hlavně s čísly, a to je zase dobré pro práci na počítači atd.). Je jednodušší určit správnou barvu pomocí sytosti, jasů a odstínu, než pomocí toho, jak jsou které barvy zastoupeny.

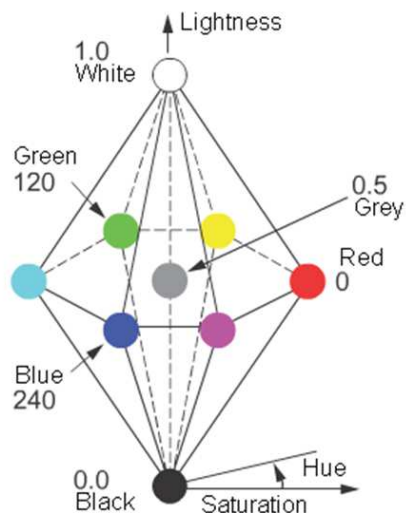
2.6.6. HSL

Model HSL je velmi podobný modelu HSB, ale snaží se odstranit jeho nedostatky. Zde se setkáváme s rozdělením na:

- **HUE** = Odstín – stejný jako u modelu HSB.
- **SATURATION** = Sytost – nabývá hodnot od 0 do 1. Pokud má barva hodnotu 1, je to stejné jako by měla 100 % u modelu HSB = neobsahuje bílou složku.
- **LIGHTNESS** = Světlost – rozdíl mezi HSV a HSL modelem (HSV model má nasycené barvy po obvodu horní podstavy válce, HSL uprostřed obvodu válce)



Obrázek č. 18: Rozdíl mezi HSL a HSV



Obrázek č. 19: HSL Model

Vysvětlení k obrázku s popisky v angličtině:

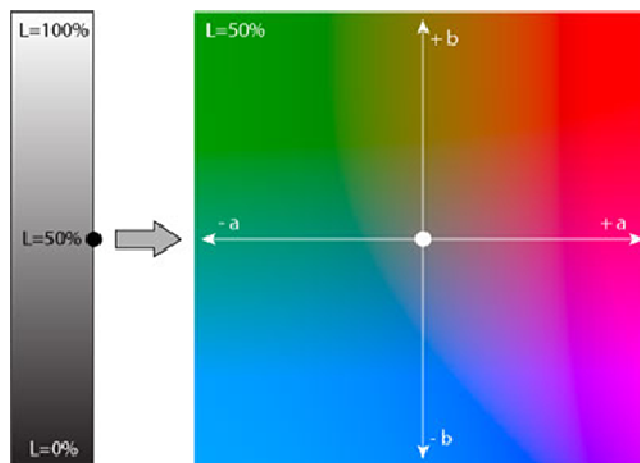
hue = odstín, saturation = sytost, lightness = světlost, red = červená, grey = šedá, blue = modrá, green = zelená, white = bílá, black = černá.

2.6.7. LAB

Model Lab je oproti jiným modelům nezávislý na zařízení, a proto se často označuje jako referenční. I přes to, že je zajímavý, moc se nepoužívá a hodně editorů s ním neumí vůbec pracovat. Tento model používá například program Photoshop (používá se zde hlavně k doostřování fotografií – nejprve se převede fotografie do modelu Lab a poté se doostří světlost = nevznikají barevné vady). K vyjádření modelu Lab se používají jen dvě osy (určující odstín barvy) a světlost.²⁰

- **L**IGHTNESS = SVĚTLOST – dosahuje hodnot od 0-100. Hodnota **0** znamená černý bod a hodnota **100** zase bílý bod.
- **A** – popisuje barvu bodu ve směru od zeleno-modré (záporné hodnoty) po červeno-purpurovou (kladné hodnoty).
- **B** – popisuje barvu bodu ve směru od modro-purpurové (záporné hodnoty) po zeleno-žluto-červenou (kladné hodnoty).

Lab model je odvozen z prostoru CIE XYZ.



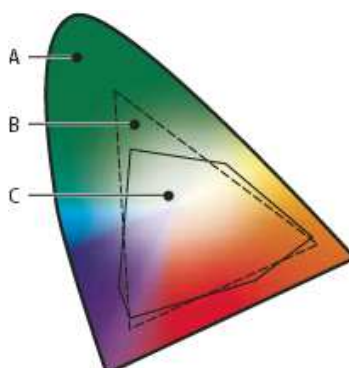
Obrázek č. 20: LAB Model

2.7. BAREVNÝ PROSTOR²¹

Různá technická zařízení (fotoaparát, skener, tiskárna) zachytí či interpretují barvy jinak, než jak je vidí lidské oko. Proto nás zajímá, v jakém barevném prostoru zařízení pracuje. Barevný prostor je předem definovaný rozsah barev ve viditelném spektru (má standardizované odstíny základních barev). Obvykle je barevný prostor variantou nějakého barevného modelu. Například barevné prostory založené na modelu RGB jsou sRGB, Adobe RGB, Apple RGB atd.

2.7.1. GAMUT²²

Každý barevný prostor má rozdílný gamut. Gamut je rozsah barev, který patří do konkrétního barevného prostoru. Barvy, které nepatří do gamutu, jdou v daném barevném prostoru jen přibližně zobrazit. Např. libovolný barevný obrázek pozorovaný na monitoru počítače bude mít po vytištění určitě jiné barevné podání. Protože gamut monitoru je vždy větší než gamut tiskárny.

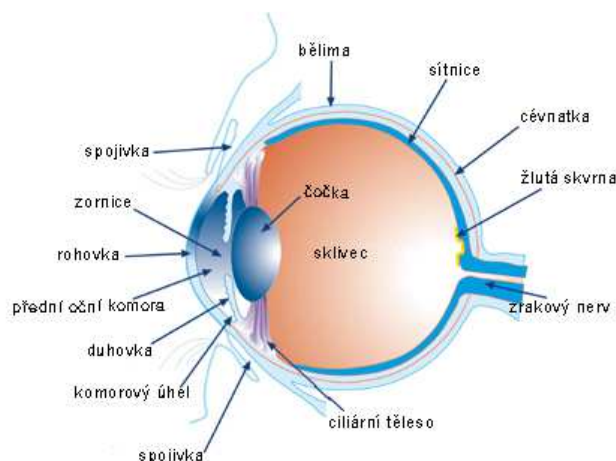


(A - viditelný gamut, B - barevný prostor RGB, C - barevný prostor CMYK)

Obrázek č. 21: Gamuty různých barevných prostorů

3. FYZIOLOGICKÉ VLASTNOSTI LIDSKÉHO OKA²³

Nepochybně nejdůležitějším lidským smyslem je zrak (přijímáme jím 80–90 procent všech informací). Děje se tak pomocí skvělého zařízení – lidského oka. Oko má tvar lehce zploštělé koule a je uloženo v kostěném prostoru očníce. Je uchyceno pletenci vnějších očních svalů, které ovládá centrální nervová soustava.



Obrázek č. 22: Řez lidským okem

Oční bulva obsahuje tři vrstvy. Povrchová bělma přechází vpředu oka v průhlednou rohovku, kterou přicházejí paprsky přes čočku do oka. Střední vrstva cévnatka zásobuje celý zrakový orgán krví a přechází vpředu v ciliární sval. Jeho úkolem je měnit tvar čočky, a tím měnit její ohniskovou vzdálenost a zaostřit obraz na vnitřní vrstvě oka – sítnici. Ciliární sval na vnější straně čočky přechází v duhovku, která mění množství dopadajícího světla (jas).

3.1. BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ²⁴

Pokud se hovoří o binokulárním vidění, tak to znamená, že se dva obrazy vnímané simultánně oběma očima spojí do jednoho. Tato vlastnost není vrozená, ale rozvíjí se u každého jedince postupem věku a rozdílně.

Pokud dojde k poruchám binokulárního vidění, následkem je v motorické části šilhavost a v senzorické části změny ve zrakovém vnímání. Zpravidla dochází ke snížení zrakové ostrosti, k excentrické fixaci nebo k poruchám ve vnímání prostoru.

Pokud se ale stane, že je jedno oko slabší (utlumené, tupozraké) nebo úplně chybí (třeba následkem úrazu), musíme počítat s omezením zorného pole. Toto zorné pole je naštěstí větší než polovina binokulárního zorného pole. Zmíněnou poruchu je možné léčit.

4. STEREOSKOPIE²⁵

Člověk je zvyklý vnímat svět kolem ve třech rozměrech – tedy prostorově. Je známo, že každý předmět má určitou výšku, šířku a hloubku, a je v nějaké vzdálenosti. Svým zrakem jsme schopni odhadnout tuto vzdálenost, a proto se snadno orientujeme v prostoru. Pro toto vidění je ale třeba, aby každé oko vidělo stejný předmět z jiného úhlu.

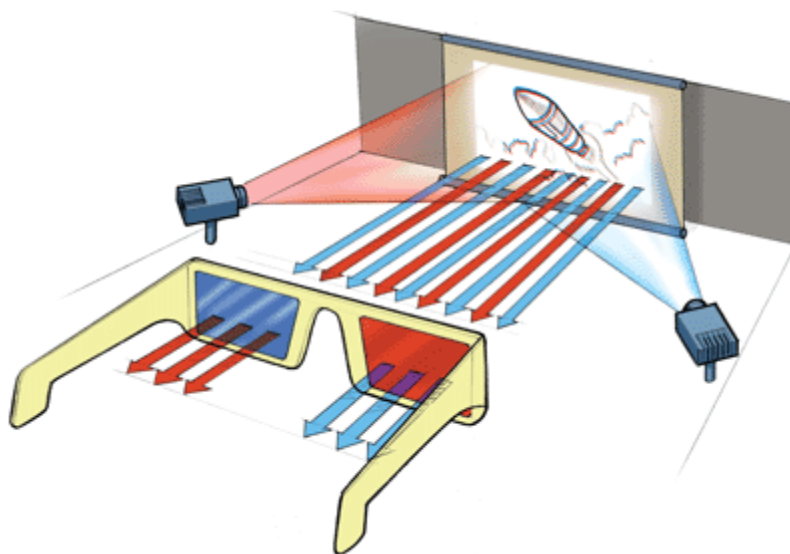
Stereoskopie využívá toho, že vidíme dvourozměrný obraz trojrozměrně (3D filmy, 3D fotografie). K vytvoření efektu využívá vždy ještě nějaký předmět (například stereoskopické brýle), protože je třeba oku nějak pomoci.

Stereoskopii můžeme rozdělit na dvě části – na pasivní a aktivní. Pasivní metoda se nejvíce hodí pro projekce s vyšším počtem diváků – 3D kino, zato aktivní metoda je vhodnější pro menší skupinu nebo pro domácí využití např. pro hraní 3D her na PC.

4.1. PASIVNÍ

Pasivní používá brýle – bez nich bychom efektu nedosáhli. Tyto brýle mají v očnicích dva různé polarizační filtry. Jedna očnice propouští světlo kmitající v horizontální rovině, druhá očnice světlo kmitající ve vertikální rovině = obsahuje stejný o devadesát stupňů otočený filtr. Pasivní metoda nevytváří tak kvalitní obraz jako aktivní (chybí cca polovina pixelů).

Tento systém používá třeba kino IMAX v Praze. Je to založen na principu, že dva obrazy (ze dvou projektorů pro pravé a levé oko) se promítají na jednu projekční plochu, přičemž před projektory je upevněn polarizační filtr. Projekční plocha je vyrobena ze speciálního materiálu (zachová polarizaci dopadajícího světla). Každý z projektorů má filtr, který propouští světlo kmitající jen v určité rovině. Divák díky speciálním brýlím vidí prostorový efekt.



Obrázek č. 23: Pasivní 3D stereoskopie

4.1. **AKTIVNÍ**

Aktivní také používá brýle (anaglyfické či polarizační), protože ploché obrazovky nikdy neposkytnou skutečně plastický obraz. Každá očníce zde oproti pasivní stereoskopii obsahuje dva různé polarizační filtry (fólie). Proto každé oko, bez závislosti na druhé očníci, může vidět 3D obraz. Diváci pak vidí kvalitnější obraz – je to ale dražší varianta.

5. KOLORIMETRICKÁ KALIBRACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

Pro snížení počítačích kroků počítače jsem si vyfotografoval dva snímky, které jsou posunuty přibližně stejně jako snímky v multiview videosekvenci. Při pokusu jsem použil jediný fotoaparát (Canon EOS 400D). Cílem bylo zachytit dvě fotografie, aby byly stejně barevně (či jasově) vyváženy. Abych dosáhl vjemu, shodnému s pohledem obou očí, posunul jsem fotoaparát o 65 mm ve vodorovném směru tak, aby první fotografie odpovídala pohledu levého oka pozorovatele a druhá byla po posunutí pohledu pravého oka. Obrázky jsem poté zmenšil na velikost 720x480 bodů. Tato velikost stačí k rozeznání barevného vyvážení. Ale jak jsem předpokládal, nepodařilo se mi snímky vyfotografovat tak, aby byly stejně barevně (či jasově) vyváženy. Na druhé straně můžeme mít dva různé fotoaparáty, které jsou různě nastaveny, a proto snímky také vypadají rozdílně. Cílem mé bakalářské práce je obrázky barevně vyvážit, aby prostorový vjem byl správný.



Obrázek č. 24: Fotografie - pohled levého oka



Obrázek č. 25: Fotografie - pohled pravého oka

5.1. GRAY WORLD ALGORITMUS

Nejdříve vyvážení bílé pomocí Gray World algoritmu (pro obě fotky, pro pravé a levé oko):

Gray World algoritmus je založen na předpokladu, že daný obraz obsahuje širokou škálu různých barev. A průměrná hodnota jednotlivých složek R, G a B (všech bodů obrazu) je stejná jako průměrná hodnota šedé barvy (čili R: 128, G: 128, B: 128).²⁶

Předpoklad pro GW algoritmus (rozměry obrazu = $m \cdot n$ (šířka*výška)):

$$R_{průměr} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} R(x) \sim 128$$

$$G_{průměr} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} G(x) \sim 128$$

$$B_{průměr} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} B(x) \sim 128$$

Vyvážení bílé pomocí Gray World algoritmu nebude fungovat, když v obrazu bude dominovat jedna barva či nebude v obrazu široká škála různých barev.

5.1.1. IMPLEMENTACE GRAY WORLD ALGORITMU

Nejdříve je potřeba si načíst fotky (fotky ve formátu *.jpg) pomocí funkce *imread* do prostředí MATLABu. Získají se tím hodnoty všech tří barevných složek RGB pro každý obrazový bod fotky (pixel).

```
% Načtení fotky
```

```
image1=imread('b1.jpg');
```

Algoritmus upravuje všechny tři barevné složky (R, G a B) obrazu pomocí vyrovnávacích koeficientů, ke kterým se dostaneme tímto způsobem. Nejdříve se určí převrácená hodnota průměrné hodnoty z jednotlivých barevných složek.

$$mR = \frac{1}{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} R(x)}$$

$$mG = \frac{1}{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} G(x)}$$

$$mB = \frac{1}{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} B(x)}$$

Každá hodnota jednotlivé složky se vydělí nejvyšší hodnotou koeficientů z mR, mG, mB , a tímto se dostane výsledný vyrovnávací koeficient:

$$\alpha R = \frac{mR}{\max(mR, mG, mB)}$$

$$\alpha G = \frac{mG}{\max(mR, mG, mB)}$$

$$\alpha B = \frac{mB}{\max(mR, mG, mB)}$$

Vyvážená fotka pomocí Gray World algoritmu se získá vynásobením všech tří základních složek vyrovnávacím koeficientem ($\alpha R, \alpha G, \alpha B$).

$$\begin{aligned} R_{obraz} &= R(x) \cdot \alpha R \\ G_{obraz} &= G(x) \cdot \alpha G \\ B_{obraz} &= B(x) \cdot \alpha B \end{aligned}$$

Celý kód vyvážení bíle pomocí Gray World algoritmu je v PŘÍLOZE A.



Obrázek č. 26: Ukázka vyvážení bílé (vlevo základní fotografie, vpravo po vyvážení bílé)

5.2. PŘEVOD Z RGB DO LAB

Pomocí funkce 'srgb2lab' (*makecform* a *applycform*) se převedou hodnoty RGB do barevného prostoru Lab. Tento barevný prostor bude lepší pro naši barevnou kalibraci proto, že číselné hodnoty v modelu Lab popisují všechny barvy, které můžeme vidět (má tedy nejširší rozsah zaznamenaných barev). Dalším důvodem je i to, že má naprosté oddělení jasové složky „L“ od barevných složek „a“ a „b“.

5.2.1. PŘEVOD V MATLABU

Provádí se převod hodnot z barevného modelu RGB do Lab:

```
% Převod RGB do Lab
```

```
cform = makecform('srgb2lab');  
lab_image1 = applycform(nimage1,cform);
```

5.3. METODA K-MEANS CLUSTERING (ZPŮSOB SHLUKOVÁNÍ)

Ke kalibraci budeme dále potřebovat oddělené barvy (či barevné odstíny) obrazu, a k tomu právě použijeme metodu K-means clustering.

K-means je metoda shlukové analýzy uvedená v roce 1967 **Johnem MacQueenem**.²⁷

Tato metoda je jednoduchá. Rozdělí obraz do určitého počtu shluků (neboli do určitého počtu clusterů). V tomto případě shluk je množina obrazových bodů maximálně si podobných v rámci shluku a maximálně odlišných mezi shluky. Nejdříve se definuje jedno těžiště (cluster center) pro každý shluk. Nejlepší volbou je, když jednotlivá těžiště jsou co nejdále od sebe. Dalším krokem je, že se každý bod obrazu přiřadí k nejbližšímu těžišti. Jednoduše řečeno – najde se ten s nejmenší dosahovou vzdáleností.

V tomto případě se hledá nejmenší vzdálenost pomocí Euklidovské vzdálenosti.

5.3.1. EUKLIDOVSKÁ VZDÁLENOST²⁸

Euklidovskou vzdálenost D_E dvou obrazových bodů vypočítáme takto:

$$D_E = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

První bod má souřadnice $[x_1, y_1]$ a druhý $[x_2, y_2]$.

5.3.2. METODA K-MEANS CLUSTERING V MATLABU

Po převodu se dále pracuje jen s hodnotami barevných složek „a“ a „b“.

Pomocí funkce `size` se zjistí rozměry fotky v obrazových bodech, který měří celkový počet obrazových bodů podél šířky a výšky obrazu. Tyto rozměry potřebujeme vědět kvůli tomu, abychom věděli kolik hodnot (obrazových bodů) bude v matici **ab**. Dále se pomocí funkce `reshape` přetransformuje matice do typu (celkový počet obr. bodů * 2) tak, že počet řádků bude celkový počet obrazových bodů (**radek * sloup**). V prvním sloupci budou hodnoty barevné složky „a“ a v druhém sloupci barevné složky „b“.

```
ab = double(lab_image1(:, :, 2:3));  
radek = size(ab,1);  
sloup = size(ab,2);  
ab = reshape(ab,radek*sloup,2);
```

Proměnná **nColors** určuje na kolik clusterů (barev) se rozdělí fotka. V tomto případě se zadalo do proměnné číslo šest (fotka se rozdělí do šesti clusterů), a to by mělo pro kalibraci stačit.

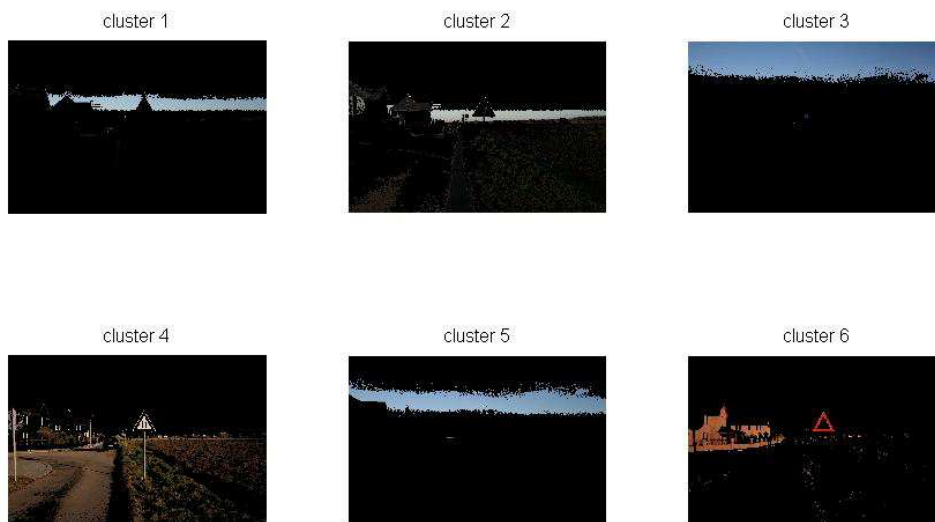
Funkce *kmeans* rozdělí obrazové body do jednotlivých clusterů (u každého obrazového bodu se dozvíme, ke kterému **cluster_center** je nejbližší, tudíž do kterého **cluster_idx** patří).

```
nColors = 6;  
[cluster_idx cluster_center] =  
kmeans(ab,nColors,'distance','sqEuclidean',...  
        'Replicates',3);  
pixel_labels = reshape(cluster_idx,radek,sloup);  
segmented_images = cell(1,3);  
rgb_label = repmat(pixel_labels,[1 1 3]);
```

Aby bylo vidět, jak se fotografie rozdělila na jednotlivé clustery, je možné se podívat na obrázky č. 27 a č. 28. Rozdělení do clusterů je možné vidět díky cyklu, který na fotografii zakrývá obrazové body ostatních clusterů:

```
for k = 1:nColors  
    color = image1;  
    color(rgb_label ~= k) = 0;  
    segmented_images{k} = color;  
end
```

(image1 je základní fotka, pokud rgb_label není roven číslu clusteru, rovná se nule (neboli barva toho obrazového bodu je černá)



Obrázek č. 27: Zobrazení rozdělení clusterů pro fotografii pro levé oko



Obrázek č. 28: Zobrazení rozdělení clusterů pro fotografii pro pravé oko

5.3.3. IDENTIFIKACE CLUSTERŮ

Na obou fotografiích máme zachycené stejně barevné objekty (jenom jsou minimálně posunutě), takže nám metoda k-means vybere pro obě fotografie vždy stejné clustery. Dále se pro kalibraci musí identifikovat, jaké clustery patří k sobě. To se zjistí pomocí jejich center (**cluster_center**). V tomto cyklu se počítá Euklidovská vzdálenost center mezi sebou, která se zaznamená do matice **vz**:

```
for j = 1:nColors;
    for i = 1:nColors;
        r1 = (cluster_center(j,1)-cluster_center2(i,1));
        r2 = (cluster_center(j,2)-cluster_center2(i,2));

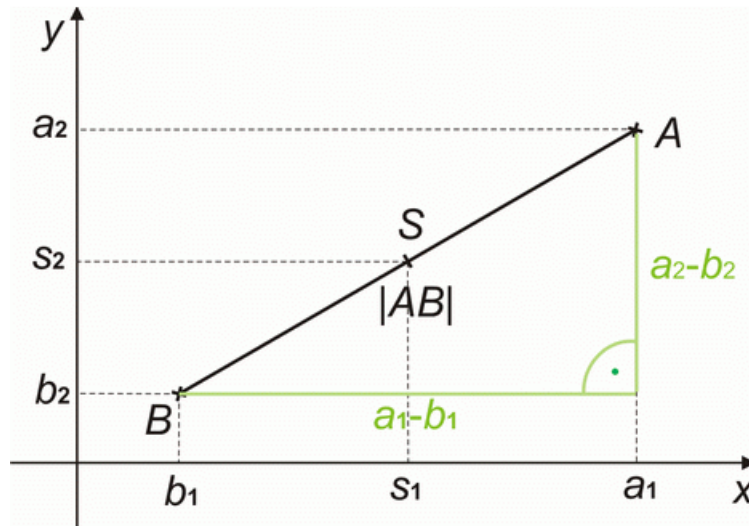
        vz(i,j) = sqrt( r1.^2 + r2.^2);
    end
end
```

Poté se funkcí *min* najde nejmenší Euklidovská vzdálenost **ymin** a přiřadí se podobné clustery k sobě indexem **yi**:

```
[ymin, yi] = min(vz);
```

5.4. STŘEDOVÉ TĚŽIŠTĚ

Ted, když už jsou přiřazené jednotlivé clustery k sobě, přechází se ke kalibraci barev. Můj předpoklad proto, aby obě fotografie byly stejně barevně sladěny, je, že hodnoty center dvou přiřazených clusterů k sobě budou stejné. Centra jsou dána hodnotami barevných složek „a“ a „b“ (hodnoty složky a jsou podél osy x a hodnoty složky b jsou podél osy y). Nejdříve se vypočítají hodnoty budoucího centra tak, že se určí střed mezi dvěma body (centry) v prostoru.



Obrázek č. 29: Výpočet těžiště

Popis k obrázku č. 29:

Bod $A = [a_1, a_2]$ center (těžiště) prvního clusteru

Bod $B = [b_1, b_2]$ center (těžiště) druhého clusteru

Bod $S = [s_1, s_2]$ výsledné středové center (těžiště)

Výpočet hodnot s_1 a s_2 ²⁹:

$$s_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}$$

$$s_2 = \frac{a_2 + b_2}{2}$$

5.4.1. KÓD VÝPOČTU V MATLABU

Cyklus, který nám vypočítá hodnoty středové těžišť **st**:

```
for d = 1:nColors;
    s1 = (cluster_center(d,1) + cluster_center2(yi(1,d),1));
    s2 = (cluster_center(d,2) + cluster_center2(yi(1,d),2));

    st(d,1) = (s1/2);
    st(d,2) = (s2/2);
end
```

5.5. VÝSLEDNÁ KALIBRACE

Výsledný parametr kalibrace se určí cyklem, který odečítá hodnoty center od středového těžiště **st**.

```
% určení parametru
for d = 1:nColors;
    prep(d,1) = (cluster_center(d,1) - st(d,1));
    prep(d,2) = (cluster_center(d,2) - st(d,2));
end
```

Můj předpoklad kalibrace je ten, že kalibrování všech hodnot barevných složek „a“ a „b“ podle toho, v jakém jsou clusteru, zajistí všechny výsledné **cluster_center** patřící k sobě – stejné pro obě fotografie. Výsledkem by mělo být stejné barevné podání.

Když je parametr kalibrace **prep** kladný, tak se pro první fotografii parametr odečítá od barevných složek „a“ a „b“. Pro druhou fotografii se naopak přičítá k barevným složkám „a“ a „b“, aby výsledné hodnoty byly v středu těžišť (aby byly „stejně“). A to je vidět v cyklu PŘÍLOHY B.

5.6. UPRAVENÍ JASU

S jasovou složkou „L“ fotek se v celé kalibraci vůbec nepracovalo. Ale na konec se bude taky kalibrovat. Pro jednotlivé fotky se vypočítá průměrná hodnota $L_{prům1}$, $L_{prům2}$, a to tak, že se vypočítá suma všech hodnot jasové složky, která se vydělí počtem hodnot (počtem obrazových bodů fotografie).

$$L_{prům1} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} L_1(x); \quad L_{prům2} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=1}^{m \cdot n} L_2(x)$$

$L_1(x)$hodnoty všech jasových složek fotky pro levé oko

$L_2(x)$hodnoty všech jasových složek fotky pro pravé oko

Průměrné hodnoty $L_{prům1}$, $L_{prům2}$ se od sebe odečtou, a tím se získá výsledný jasový parametr kalibrace **prepL**.

$$prepL = L_{prům1} - L_{prům2}$$

Poté následuje cyklus, který parametr odečte či přičte podle toho, jestli parametr je kladný či záporný. Celý kód kalibrace jasu je v PŘÍLOZE C.

5.7. ZKALIBROVANÉ FOTOGRAFIE

Zobrazení fotografií po kolorimetrickém kalibrování, načtení jednotlivých složek (barevné i jasová) do jedné matice a poté převod z Lab do RGB je v kódu PŘÍLOHY D.

5.7.1. ULOŽENÍ DO FORMÁTU JPEG

Pomocí funkce *imwrite* se uloží fotka pod názvem **L1** s příponou **.jpg** (uloží se do formátu JPEG - zkratka z Joint Photographic Experts Group).

```
%% Uložení do jpg
imwrite(rgb_image3, 'L1.jpg', 'jpg');
```

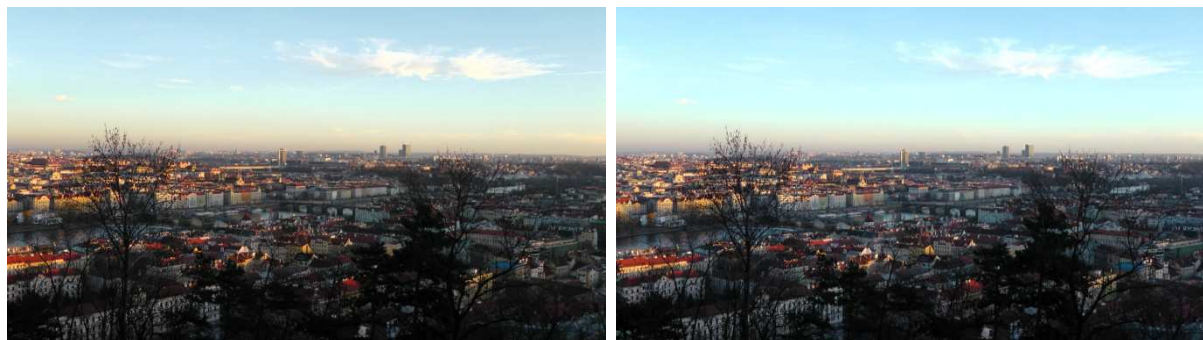
6. HODNOCENÍ KVALITY

6.1. SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ

Pro subjektivní hodnocení kvality byly použity stereoskopické fotografie ze stránky: <http://deimos-project.cz/tag/stereo>, které se kolorimetricky kalibrovaly podle kapitoly 5. A tyto stereoskopické fotografie byly zobrazeny před pozorovateli v zatemněné místnosti na 3D televizi Samsung. Každý pozorovatel měl na sobě brýle Samsung s aktivní technologií 3D, které udělaly výsledný 3D obraz.

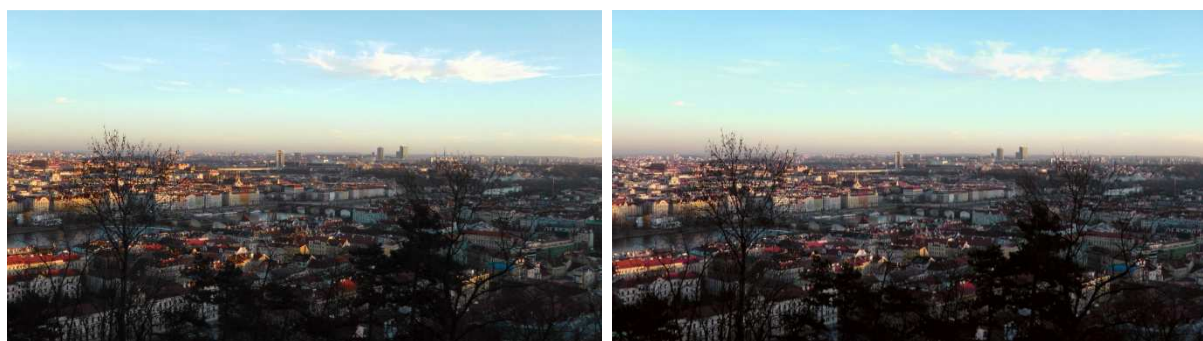
6.1.1. PŘÍPRAVA FOTEK

Ukázka jedné dvojice fotografií před kolorimetrickou kalibrací je vidět na obrázku č. 30 (levá fotografie je zobrazení levého oka a pravá fotografie je zobrazení pravého oka). Ostatní dvojice stereo fotografií jsou v PŘÍLOZE E - H.



Obrázek č. 30: Stereo fotografie před kalibrací

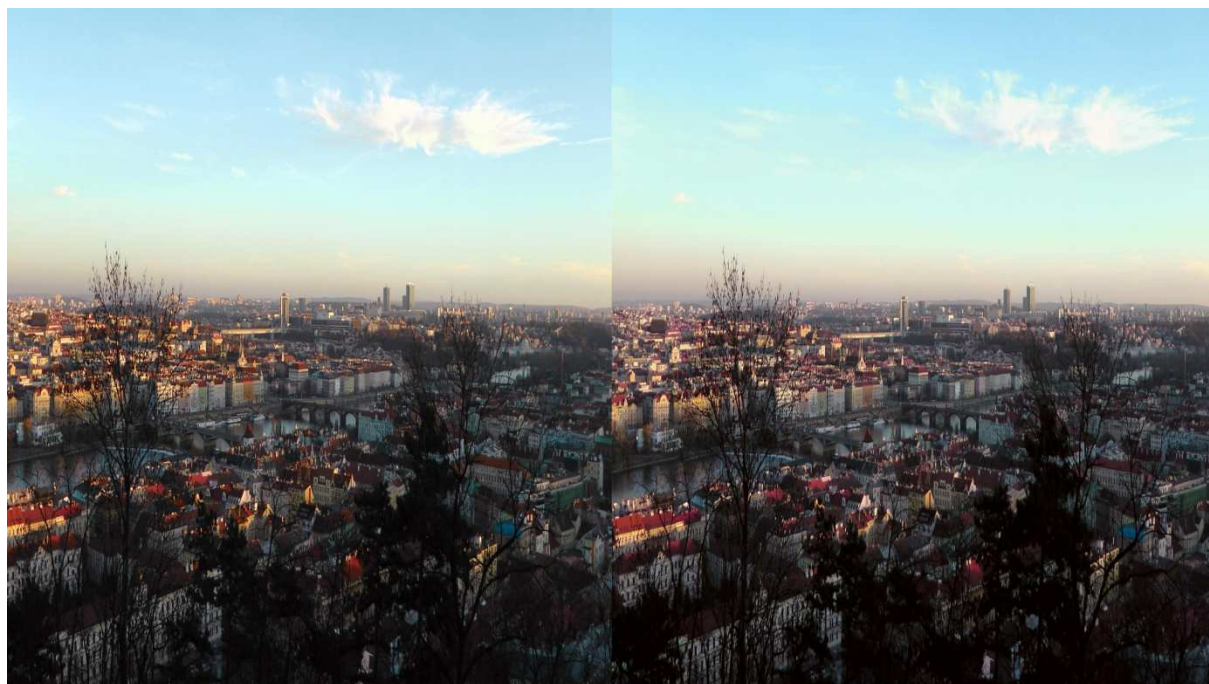
Na obrázku č. 31 jsou vidět fotografie po kolorimetrické kalibraci.



Obrázek č. 31: Stereo fotografie po kalibraci

Tyto dvojice fotografií se upravily do jedné fotografie, aby je dokázala zobrazit televize s technologií 3D ve třírozměrném obrazu. Tak, že šířka každé fotografie se zmenšila na polovinu (rozměry základní fotografie byly 4600x2588 obrazových bodů, a to se změnilo na

fotografii o rozměrech 2300x2588 obrazových bodů). Poté se srovnaly vedle sebe tak, jak je patrné z obrázku č. 32.



Obrázek č. 32: Příprava fotografií pro zobrazení na 3D televizi

6.1.2. VÝSLEDEK SUBJEKTIVNÍHO HODNOCENÍ

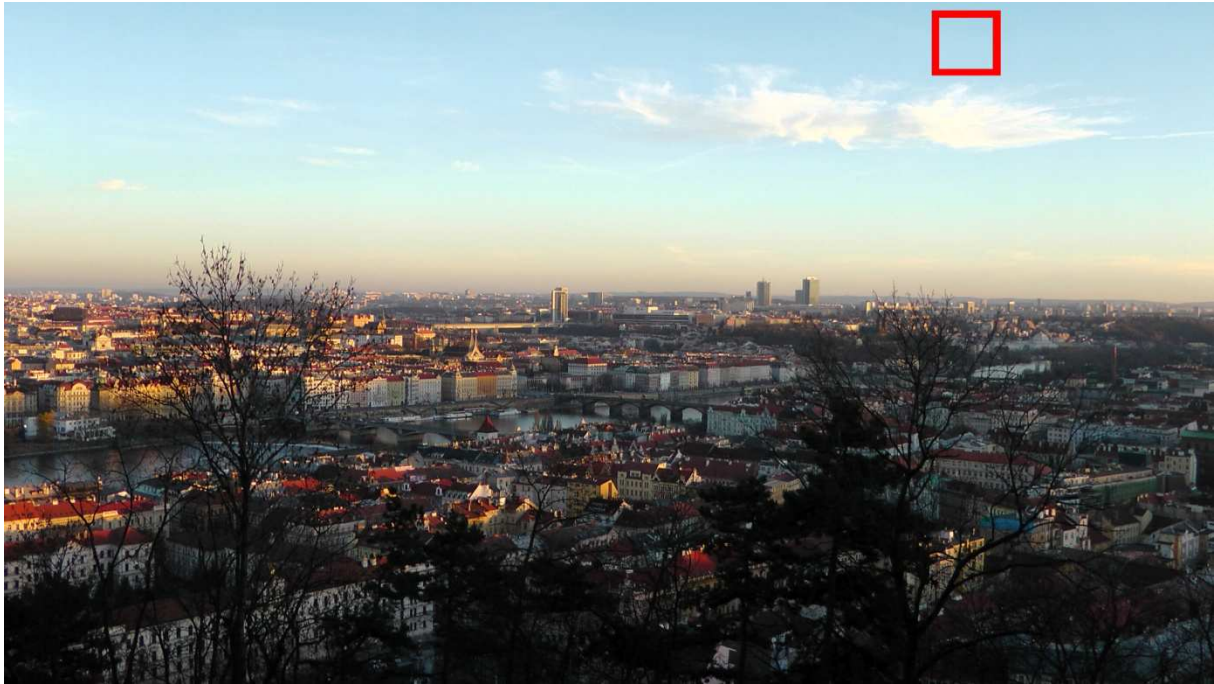
Zajímavé bylo, že u některých fotografií nebyl příliš znatelný barevný rozdíl před kalibrací a po kalibraci, i když při zobrazení fotografií ve 2D je. Jako například u stereoskopické fotografie lampy ve tmě – viz PŘÍLOHA F a také u fotografie Petřínské věže s modrým pozadím oblohy – viz PŘÍLOHA H.

Nejvíce patrná barevná změna k lepšímu po kalibraci byla u stereoskopické fotografie PŘÍLOHY E. Na této fotografii je zachycena velká plocha sněhu. Je možné, že tento vjem je velice ovlivněn tím, že mozek si pamatuje a představí si bílou barvu sněhu tak, jak má vypadat.

Výsledkem subjektivního hodnocení skupinou pozorovatelů byl lepší barevný vjem po kolorimetrické kalibraci.

6.2. OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ

Pro objektivní hodnocení kvality byly použity fotografie ze subjektivního hodnocení (kapitola 6.1.). Na těchto fotografiích byla vybrána stejná část oblohy (ta část oblohy je znázorněna obrázkem č. 33), kde se odečtou hodnoty Lab náhodně vybraným pěti bodům, které se poté zprůměrují.



Obrázek č. 33: Ukázka části vybrané oblohy

Odečtené hodnoty Lab libovolných bodů z vybrané části oblohy:

bod	Fotka před kalibrací					
	L (levé zobrazení)			R (pravé zobrazení)		
	L	a	b	L	a	b
1	84	-12	-13	86	-13	-19
2	85	-12	-13	87	-14	-18
3	84	-11	-14	88	-13	-19
4	84	-13	-13	87	-14	-18
5	85	-12	-13	88	-13	-18
průměr	84,4	-12	-13,2	87,2	-13,4	-18,4

Tabulka č. 1: Tabulka hodnot Lab z fotky před kalibrací

Fotka po kalibraci						
L (levé zobrazení)				R (pravé zobrazení)		
bod	L	a	b	L	a	b
1	84	-14	-15	84	-14	-17
2	86	-12	-15	85	-15	-17
3	85	-14	-15	84	-14	-18
4	84	-12	-15	84	-15	-17
5	86	-14	-15	85	-14	-18
průměr	85	-13,2	-15	84,4	-14,4	-17,4

Tabulka č. 2: Tabulka hodnot Lab z fotky po kalibraci

Z průměrných hodnot Lab se vypočítá hodnota barevného rozdílu ΔE_{ab} mezi fotkou pro pravé a levé oko:³⁰

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_p - L_l)^2 + (a_p - a_l)^2 + (b_p - b_l)^2}$$

L_p, a_p, b_p průměrné hodnoty Lab z fotky pro pravé oko

L_l, a_l, b_l průměrné hodnoty Lab z fotky pro levé oko

Hodnota barevného rozdílu okolo 2,3 odpovídá JND (just-noticeable difference, česky: právě postřehnutelný rozdíl):

$$\Delta E_{ab} \sim 2,3$$

6.2.1. VÝSLEDEK OBJEKTIVNÍHO HODNOCENÍ

Podle vypočtených hodnot barevných rozdílů v tabulce č. 3 je vidět, že po kolorimetrické kalibraci se hodnota snižuje. Čím je menší tato hodnota, tím menší rozdíl mezi fotografiemi vidí pozorovatel. To je kladný výsledek pro mojí bakalářskou práci, protože i z objektivního hodnocení je vidět, že kolorimetrická kalibrace je správná.

Fotka před kalibrací	Fotka po kalibraci
ΔE_{ab1}	ΔE_{ab2}
6,07	2,75

ΔE_{ab1} je ΔE_{ab} pro fotku před kalibrací

ΔE_{ab2} je ΔE_{ab} pro fotku po kalibraci

Tabulka č. 3: Tabulka vypočtených barevných rozdílů

7. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit fungující metodu kolorimetrické kalibrace multiview videosekvencí a tuto metodu implementovat v programovém prostředí MATLAB. Následně provést subjektivní testování této metody skupinou pozorovatelů.

Při počátečním rozboru kolorimetrické kalibrace jsem přemýšlel, zda kalibrace bude mít výběry objektů pomocí prostorového přístupu či přístup z hlediska barvy. Prostorový přístup se mi jevil velice obtížný na algoritmy, a proto jsem se vydal jednodušší cestou. Tato cesta výběru pomocí barev byla nakonec v hodnocení kvality úspěšná.

Na začátku kalibrace probíhá vyvážení bílé pomocí Gray World algoritmu, ale toto vyvážení bílé se nedá použít, když ve snímku dominuje jedna barva či nebude ve snímku široká škála různých barev. Proto bylo toto vyvážení bílé vyřazeno například z kalibrace stereoskopické fotografie lampy ve tmě (PŘÍLOHA F).

Pomocí K-means clustering se rozdělí fotografie do šesti shluků (do šesti přibližně stejných barev). Je ale možné, že kdyby se rozdělila do více než šesti shluků, kalibrace by fungovala lépe. Dalším námětem by mohlo být určení počtu dominantních barev fotografie a její rozdělení do tohoto počtu shluků.

Výsledná kalibrace už posunuje barevné vektory každého obrazového bodu blíže k sobě – tak, aby barevný rozdíl byl menší.

Subjektivní hodnocení fotografií probíhalo v zatemněné místnosti na televizi Samsung s technologií 3D. Na televizi se střídaly stereoskopické fotografie před a po kolorimetrické kalibraci, a pozorovatelé určili, ze které fotografie mají lepší barevný vjem. Při subjektivním hodnocení kvality skupinou pozorovatelů byl po kolorimetrické kalibraci lepší výsledný barevný vjem stereoskopické fotografie. Tento výsledek byl potvrzen i objektivním hodnocením. Při něm se použila stejná část fotografie (pro pravé i levé oko), z níž se vypočítal právě postřehnutelný rozdíl mezi těmito fotografiemi. Rozdíl byl následně srovnán s rozdílem fotografií po kolorimetrické kalibraci. Subjektivní i objektivní hodnocení kvality potvrdily, že kolorimetrická kalibrace probíhá správně.

SEZNAM TABULEK:

TABULKA Č. 1: TABULKA HODNOT LAB Z FOTKY PŘED KALIBRACÍ	40
TABULKA Č. 2: TABULKA HODNOT LAB Z FOTKY PO KALIBRACI	41
TABULKA Č. 3: TABULKA VYPOČTENÝCH BAREVNÝCH ROZDÍLŮ	41

SEZNAM OBRÁZKŮ:

OBRÁZEK Č. 1: PŘÍKLAD KALIBRACE	8
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 2: PRŮCHOD BÍLÉHO SVĚTLA HRANOLEM A ZASE NAOPAK	11
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf)	
OBRÁZEK Č. 3: SPEKTRUM ZÁŘENÍ	12
(Zdroj: Technologie: Fotografické filtry v digitální praxi V. - Infračervený filtr. FOTOGRAFOVÁNÍ.CZ. Fotografování.cz: Digitální fotografie v praxi [online]. 2005, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.fotografovani.cz/vybirame/technologie1/fotograficke-filtry-v-digitalni-praxi-v-infracerveny-filtr-151268cz?send)	
OBRÁZEK Č. 4: SPEKTRUM ZÁŘENÍ 2	12
(Zdroj: PIHAN, Roman. Vše o světle - 1. Co je to světlo. Fotoroman: Fotografie a fototechniky [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/techniques3/svetlo01zaklad.htm)	
OBRÁZEK Č. 5: PŘÍKLADY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	13
(Zdroj: PIHAN, Roman. Vše o světle - 1. Co je to světlo. Fotoroman: Fotografie a fototechniky [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/techniques3/flash3_wb.htm)	
OBRÁZEK Č. 6: TÓN	14
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf)	
OBRÁZEK Č. 7: SYTOST	14
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf)	
OBRÁZEK Č. 8: JAS	15
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf)	
OBRÁZEK Č. 9: ODSŤÍN, SYTOST, JAS	15
(Zdroj: ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. Poster bar: plakáty na zeď [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely)	
OBRÁZEK Č. 10: GRAF ODRAZIVOSTI PRO ČERVENÝ PŘEDMĚT	16
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf)	

OBRÁZEK Č. 11: GRAF PROPUSTNOSTI PRO AZUROVÝ INKOUST	16
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf)	
OBRÁZEK Č. 12: ADITIVNÍ MÍSENÍ – RGB BARVY	17
(Zdroj: REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Aditivní mísení barev. Encyklopedie fyziky [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/547-aditivni-souctove-miseni-barev)	
OBRÁZEK Č. 13: SUBTRAKTIVNÍ MÍSENÍ – CMYK BARVY	18
(Zdroj: REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Subtraktivní odčítání mísení barev. Encyklopedie fyziky [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/549-subtraktivni-odcitaci-miseni-barev)	
OBRÁZEK Č. 14: HODNOTY RGB	19
(Zdroj: ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. Poster bar: plakáty na zeď [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely)	
OBRÁZEK Č. 15: HODNOTY CMYK	20
(Zdroj: ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. Poster bar: plakáty na zeď [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely)	
OBRÁZEK Č. 16: CMYK + RGB - SROVNÁNÍ	20
(Zdroj: ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. Poster bar: plakáty na zeď [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely)	
OBRÁZEK Č. 17: ODSTÍN; HODNOTA + BAREVNOST – MUNSellova souřadnice	22
(Zdroj: KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. Školská fyzika [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf)	
OBRÁZEK Č. 18: ROZDÍL MEZI HSL A HSV	22
(Zdroj: ColorSpaceColor Model: HSL and HSV Color Model. COLOR CODE. ColorSpaceColor Model: A colorspaceisanarbitraryagreeduponway to definecolor. [online]. 2012 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: http://www.colorcodehex.com/color-model.html)	
OBRÁZEK Č. 19: HSL MODEL	23
(Zdroj: HSL color model. AUTODESK. Autodesk: 3D Desing, Engineering and Entertainment Software [online]. 2014 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: http://www.autodesk.com/techpubs/aliasstudio/2010/index.html?url=WS1a9193826455f5ff-54f556ca1166ac9ee9e-7837.htm,topicNumber=d0e195248)	
OBRÁZEK Č. 20: LAB MODEL	24
(Zdroj: ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. Poster bar: plakáty na zeď [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely)	
OBRÁZEK Č. 21: GAMUTY RŮZNÝCH BAREVNÝCH PROSTORŮ	24
(Zdroj: Adobe - help. Barevné prostory a gamut Dostupné z: http://help.adobe.com/cs_CZ/illustrator/cs/using/WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-6295a.html#WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-628fa)	
OBRÁZEK Č. 22: ŘEZ LIDSKÝM OKEM	25
(Zdroj: Lidské smysly: zrak. Websnadno.cz [online]. 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.lidske-smysly.wbs.cz/Zrak.html)	
OBRÁZEK Č. 23: PASIVNÍ 3D STEREOskopie	26
(Zdroj: VÁCLAVÍK, Lukáš. Pasivní 3D televizory od LG mají opravdu rozlišení 1080p. Cože?. NEJVĚTŠÍ ČESKÉ VYDAVATELSTVÍ POPULÁRNĚ-NAUČNÝCH ČASOPISŮ. CNEWS.cz [online].	

12.7.2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.cnews.cz/pasivni-3d-televizory-od-lg-maji-opravdu-rozliseni->

OBRÁZEK Č. 24: FOTOGRAFIE - POHLED LEVÉHO OKA	28
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 25: FOTOGRAFIE - POHLED PRAVÉHO OKA	29
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 26: UKÁZKA VYVÁŽENÍ BÍLÉ (VLEVO ZÁKLADNÍ FOTOGRAFIE, VPRAVO PO VYVÁŽENÍ BÍLÉ)	31
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 27: ZOBRAZENÍ ROZDĚLENÍ CLUSTERŮ PRO FOTOGRAFII PRO LEVÉ OKO	33
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 28: ZOBRAZENÍ ROZDĚLENÍ CLUSTERŮ PRO FOTOGRAFII PRO PRAVÉ OKO	34
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 29: VÝPOČET TĚŽIŠTĚ	35
(Zdroj: Bod: Bod - příklady. FYZIKA.NET. Aristoteles.cz: Náš online učitel [online]. 21. listopadu 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.aristoteles.cz/matematika/analyticka_geometrie/bod/bod.php)	
OBRÁZEK Č. 30: STEREO FOTOGRAFIE PŘED KALIBRACÍ	38
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 31: STEREO FOTOGRAFIE PO KALIBRACI	38
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 32: PŘÍPRAVA FOTOGRAFIÍ PRO ZOBRAZENÍ NA 3D TELEVIZI	39
(Zdroj: vlastní)	
OBRÁZEK Č. 33: UKÁZKA ČÁSTI VYBRANÉ OBLOHY	40
(Zdroj: vlastní)	

SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA A	46
PŘÍLOHA B	46
PŘÍLOHA C	47
PŘÍLOHA D	48
PŘÍLOHA E	48
PŘÍLOHA F	49
PŘÍLOHA G	49
PŘÍLOHA H	50
PŘÍLOHA I	50

PŘÍLOHA A

```
% WHITE BALANCE (GRAY WORLD)
clear, close all

image1=imread('b1.jpg');

R=image1(:,:,1);
G=image1(:,:,2);
B=image1(:,:,3);

mR = 1/(mean(mean(R)));
mG = 1/(mean(mean(G)));
mB = 1/(mean(mean(B)));

maxRGB = max(max(mR, mG), mB);

mR = mR/maxRGB;
mG = mG/maxRGB;
mB = mB/maxRGB;

nimage1(:,:,1)=R*mR;
nimage1(:,:,2)=G*mG;
nimage1(:,:,3)=B*mB;

subplot(2,2,1);
imshow(image1), title('pred WB')
subplot(2,2,2);
imshow(nimage1), title('po WB')
```

PŘÍLOHA B

```
%% Výsledná kalibrace

for e=1:(nrows*ncols)
    if cluster_idx(e,1)==1,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(1,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(1,2));
    elseif cluster_idx(e,1)==2,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(2,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(2,2));
    elseif cluster_idx(e,1)==3,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(3,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(3,2));
    elseif cluster_idx(e,1)==4,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(4,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(4,2));
    elseif cluster_idx(e,1)==5,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(5,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(5,2));
    elseif cluster_idx(e,1)==6,
        image1new(e,2) = (ab(e,1) - prep(6,1));
        image1new(e,3) = (ab(e,2) - prep(6,2));
```

```

        end
    end

    for f=1:(nrows2*ncols2)
        if cluster_idx2(f,1)==1,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(1,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(1,2));
        elseif cluster_idx2(f,1)==2,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(2,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(2,2));
        elseif cluster_idx2(f,1)==3,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(3,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(3,2));
        elseif cluster_idx2(f,1)==4,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(4,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(4,2));
        elseif cluster_idx2(f,1)==5,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(5,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(5,2));
        elseif cluster_idx2(f,1)==6,
            image2new(f,2) = (ab2(f,1) + prep(6,1));
            image2new(f,3) = (ab2(f,2) + prep(6,2));
        end
    end
end

```

PŘÍLOHA C

```

%% Kalibrace jasu
Lsloz = double(lab_image1(:,:,1));
image1new = reshape(Lsloz,nrows*ncols,1);

Lsloz2 = double(lab_image2(:,:,1));
image2new = reshape(Lsloz2,nrows2*ncols2,1);

upravaL=(sum(image1new(:,1))/(nrows*ncols));
upravaL2=(sum(image2new(:,1))/(nrows2*ncols2));

prepL=upravaL-upravaL2;

if prepL < 0
    for w=1:(nrows2*ncols2)
        image2new(w,1)=(image2new(w,1) + prepL);
    end
else
    for w2=1:(nrows*ncols)
        image1new(w2,1)=(image1new(w2,1) - prepL);
    end
end
end

```

PŘÍLOHA D

```
[image1newL] = reshape(image1new(:,1),nrows,ncols);  
[image1newa] = reshape(image1new(:,2),nrows,ncols);  
[image1newb] = reshape(image1new(:,3),nrows,ncols);  
  
lab(:,:,1) = [image1newL];  
lab(:,:,2) = [image1newa];  
lab(:,:,3) = [image1newb];  
  
lab=uint8(lab);  
  
cform3 = makecform('lab2srgb');  
rgb_image3 = applycform(lab,cform3);
```

PŘÍLOHA E

před kolorimetrickou kalibrací:



po kolorimetrické kalibraci bez vyvážení bílé:



PŘÍLOHA F

před kolorimetrickou kalibrací:



po kolorimetrické kalibraci bez vyvážení bílé:



PŘÍLOHA G

před kolorimetrickou kalibrací:

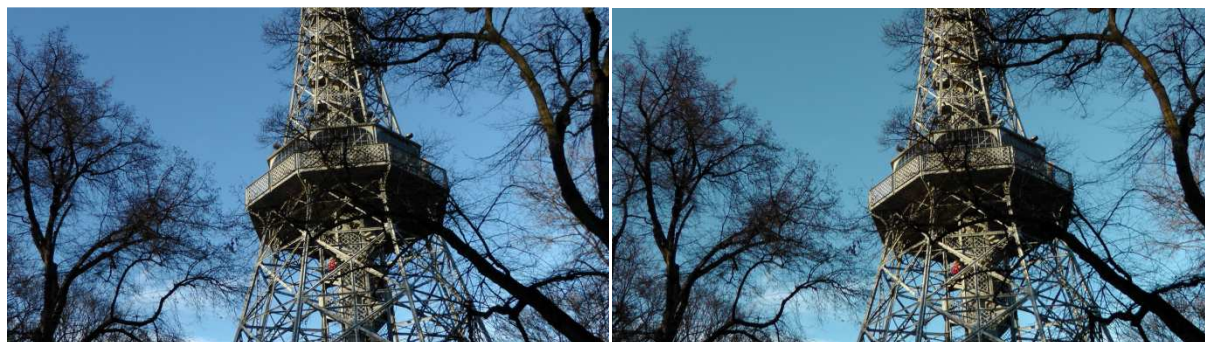


po kolorimetrické kalibraci:

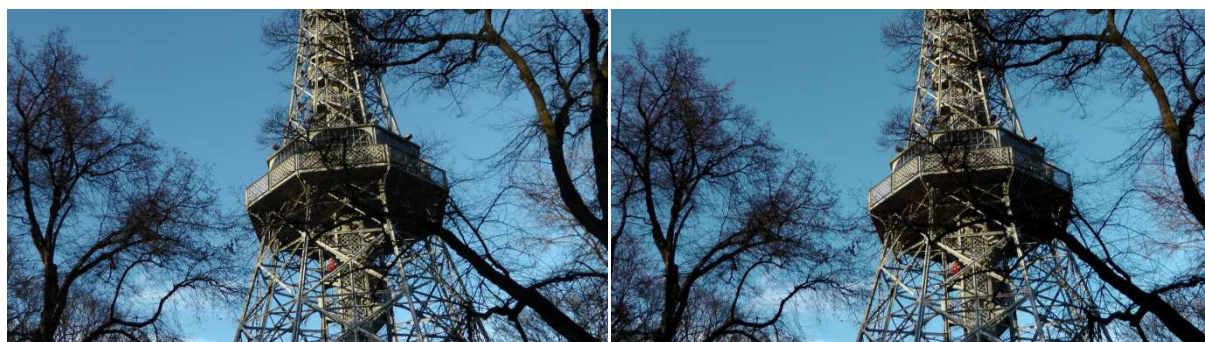


PŘÍLOHA H

před kolorimetrickou kalibrací:



po kolorimetrické kalibraci bez vyvážení bílé:



PŘÍLOHA I

Přiložené CD obsahuje:

- elektronickou podobu bakalářské práce ve formátu PDF (BP_Jakub_Paroulek.pdf),
- skript s kódem kolorimetrické kalibrace v MATLABu (kalibrace.m).

Použitá literatura:

The MathWorks, Inc. *MATLAB help* [online]. 1994, 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/>

¹KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf

²KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf

³KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf

⁴REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Vymezení barvy. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/543-vymezeni-barvy>

⁵PIHAN, Roman. Vše o světle - 1. Co je to světlo. *Fotoroman: Fotografie a fototechniky* [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/techniques3/svetlo01zaklad.htm>

⁶Technologie: Fotografické filtry v digitální praxi V. - Infračervený filtr. FOTOGRAFOVÁNÍ.CZ. *Fotografování.cz: Digitální fotografie v praxi* [online]. 2005, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.fotografovani.cz/vybirame/technologie1/fotograficke-filtry-v-digitalni-praxi-v-infracerveny-filtr-151268cz?send>

⁷KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf

⁸ Barevná teplota. *Megapixel* [online]. MEGAPIXEL s.r.o., 2001, 2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.megapixel.cz/barevna-teplota>

⁹TEORETICKÉ ZÁKLADY: Barva. SOŠS A SOU KADAŇ. *Za školou se školou: SOŠS a SOU Kadaň* [online]. Klášterec nad Ohří: SOŠS a SOU Kadaň, 2004, 2.12.2004 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://skola.amoskadan.cz/s_pp/s_pp_pg/pg4.htm

¹⁰KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev I.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2012/sf2012_04_3.pdf

¹¹PIHAN, Roman. Vše o světle - 1. Co je to světlo. *Fotoroman: Fotografie a fototechniky* [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/techniques3/svetlo01zaklad.htm>

¹²REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Aditivní mísení barev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/547-aditivni-souctove-miseni-barev>

¹³REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Subtraktivní odčítání mísení barev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/549-subtraktivni-odcitaci-miseni-barev>

¹⁴REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Subtraktivní odčítání mísení barev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/549-subtraktivni-odcitaci-miseni-barev>

¹⁵KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf

¹⁶ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. *Poster bar: plakáty na zeď* [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely>

¹⁷ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. *Poster bar: plakáty na zeď* [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely>

¹⁸HNIDEK, Jiří. Ústav nových technologií a aplikované informatiky: Přednáška o barvách a barevných modelech. P5EDNÁŠKA O BARVÁCH A BAREVNÝCH MODELECH. *Přednáška o barvách a barevných modelech* [online]. 2007, 2009 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: http://www.nti.tul.cz/cz/images/7/71/Prednaska_barva.pdf

¹⁹KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev II.: Fyzika kolem nás. ČASOPIS ŠKOLSKÁ FYZIKA. *Školská fyzika* [online]. Západočeské univerzity v Plzni: Časopis Školská fyzika, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_01_7.pdf

²⁰ŠIML, David. Barevné modely. POSTER BAR. *Poster bar: plakáty na zeď* [online]. Praha: Posterbar, 2010 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.posterbar.cz/rady/barevne-modely>

²¹ Barevný prostor - sRGB a Adobe RGB. *Nikon: At the heart of the image* [online]. 2013, 16/04/2014 [cit.2014-05-21].Dostupné z: https://nikoneurope.cz.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/57731/~/barevn%C3%BD-prostor---srgb-a-adobe-rgb

²²Adobe-help. Barevné prostory a gamut Dostupné z: http://help.adobe.com/cs_CZ/illustrator/cs/using/WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-6295a.html#WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-628fa

²³KUBA, Petr a Vladimír VÍT. *Televizní technika: studiové zpracování televizního signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 223 s. ISBN 80-860-5688-0.

²⁴Zrakové vady - XVII. Binokulární vidění. SONS. *BrailNET.cz* [online]. 1995 - 1999 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.brailnet.cz/sons/docs/zrak/17.htm>

²⁵Stereoskopie. BANAN S.R.O. *Banan.cz webhosting* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.banan.cz/serialy/JavaServer-Page-a-Serverlety/Stereoskopie>

²⁶ Gray World Algorithm. *Scien: The Stratford center for images systems engineering* [online]. 2011 [cit.2014-05-05].Dostupné z: <http://scien.stanford.edu/pages/labsite/2000/psych221/projects/00/trek/GWimages.html>

²⁷ A Tutorial on Clustering Algorithms: K-Means Clustering. MAGNANI, GianAntonio. *Politecnico di Milano-Intranet*[online].2014[cit.2014-05-05].Dostupné z: http://home.deib.polimi.it/matteucc/Clustering/tutorial_html/kmeans.html

²⁸Euklidovská vzdálenost. ING. JIŘÍ TÝŘ. *E-learning: Univerzitní e-learningový systém* [online]. 2014 [cit.2014-05-05].Dostupné z: http://e-learning.tul.cz/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?ID_tema=67&ID_obsah=1116&stranka=publ_tema&akce=polozka_vstup

²⁹ Bod: Bod - příklady. FYZIKA.NET. *Aristoteles.cz: Náš online učitel* [online]. 21. listopadu 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.aristoteles.cz/matematika/analyticka_geometrie/bod/bod.php

³⁰ Gaurav Sharma (2003). *Digital Color Imaging Handbook* (1.7.2 ed.). CRC Press. ISBN 0-8493-0900-X. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=OxIBqY67rI0C&pg=PA31&vq=1.42&dq=jnd+gaurav+sharma&hl=cs#v=onepage&q=1.42&f=false>