



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky**

**Zpracování surových obrazových dat z digitálního fotoaparátu**

**Processing of RAW image data obtained from digital camera**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Fliegel Karel Ph.D.

**Jan Švihálek**

---

**Praha 2015**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Švihálek**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Zpracování surových obrazových dat z digitálního fotoaparátu**

Pokyny pro vypracování:

Podějte přehled metod pro zpracování surových obrazových dat z digitálního fotoaparátu. Implementujte softwarové nástroje pro analýzu a zpracování surových obrazových dat s důrazem na metody vyvážení bílé barvy. Na základě vhodných objektivních nebo subjektivních kritérií srovnajte účinnost implementovaných metod.

Seznam odborné literatury:

- [1] Nakamura, J.: Image sensors and signal processing for digital still cameras, Taylor&Francis, 2006.
- [2] Gonzalez, R. C., Woods, R. E.: Digital Image Processing, Prentice Hall, 2007.
- [3] Lukac, R.: Single-Sensor Imaging: Methods and Applications for Digital Cameras, CRC Press, 2008.

Vedoucí: Ing. Karel Fliegel, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 2. 2015



## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním surových obrazových dat získaných z digitálního fotoaparátu se zaměřením na problematiku algoritmů vyvážení bílé barvy a hodnocením jejich kvality. Teoretická část uvádí možnosti zpracování surových obrazových dat a také podrobněji popisuje základní metody vyvážení bílé barvy v digitální fotografii. Dále jsou uvedeny metody hodnocení kvality algoritmů vyvážení bílé barvy a v poslední části jsou zmíněny základní informace o kolorimetrické kalibraci digitálního fotoaparátu.

Cílem praktické části této práce byla realizace grafického uživatelského rozhraní, které umožňuje zpracování surových dat a kolorimetrickou kalibraci digitálního fotoaparátu. Do uživatelského rozhraní byly implementovány základní metody vyvážení bílé barvy a dále bylo provedeno hodnocení kvality těchto metod za použití vybraných objektivních kritérií. S využitím implementovaného kalibračního rozhraní byla provedena kolorimetrická kalibrace digitálního fotoaparátu a následně i zhodnocení přesnosti provedené kalibrace.

## **Klíčová slova**

Surová obrazová data, zpracování digitálního obrazu, vyvážení bílé barvy, kalibrace, charakterizace, digitální fotoaparát, objektivní hodnocení

## **Abstract**

The objective of the thesis is digital still camera RAW image data processing with special interest in the issue of white-balance algorithms and evaluation of their quality. Theoretical part presents possibilities of RAW image data processing and also describes the basic methods of white-balancing in digital photography. White-balance quality assessment methods were also mentioned and the last part was focused on fundamental information about colorimetric calibration of digital still camera.

The objective of practical part of this thesis was to implement a graphical user interface that enables processing of RAW image data and colorimetric calibration of digital still camera. The basic white-balance algorithms were implemented into user interface and eventually quality assessment of these methods using selected objective criteria was performed. Colorimetric calibration was performed using a digital still camera with the use of implemented interface for calibration and then the accuracy of performed colorimetric calibration was evaluated.

## **Keywords**

RAW image data, digital image processing, white-balance, calibration, characterization, digital still camera, objective evaluation

## **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 22. května 2015

---

vlastnoruční podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Karlu Fliegelovi, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích, odborné rady a cenné připomínky, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Surová data</b> .....	<b>11</b>
1.1 Obecné informace .....	11
1.2 Rozdíl oproti formátu JPEG .....	12
1.3 Volně dostupné nástroje pro zpracování surových dat.....	13
<b>2 Barevné modely a prostory</b> .....	<b>15</b>
2.1 RGB model.....	15
2.2 CIE 1931 XYZ a CIE xyY.....	16
2.3 CIE L*a*b*.....	16
2.4 Převody mezi barevnými prostory.....	17
2.4.1 Z CIELAB do CIE XYZ .....	17
2.4.2 Z CIE XYZ do RGB.....	18
<b>3 Softwarový nástroj dcraw</b> .....	<b>19</b>
3.1 Úvod do programu dcraw .....	19
3.2 Funkce programu dcraw .....	20
<b>4 Metody vyvážení bílé barvy</b> .....	<b>23</b>
4.1 Vyvážení bílé barvy .....	23
4.2 Gray World Method .....	23
4.3 Perfect Reflector Method.....	24
4.4 Max RGB.....	25
4.5 Kombinace Gray World a Perfect Reflector .....	25
4.6 Metoda roztahování histogramu .....	26
<b>5 Kalibrace digitálního fotoaparátu</b> .....	<b>27</b>
5.1 Kalibrační matice.....	27
5.2 Kalibrační terč .....	28
<b>6 Hodnocení účinnosti metod WB</b> .....	<b>30</b>
6.1 Subjektivní hodnocení.....	30
6.2 Objektivní hodnocení.....	32
6.2.1 Barevný rozdíl dle definice CIE76.....	32
6.2.2 Barevný rozdíl dle definice CIE94.....	32
6.2.3 Barevný rozdíl dle definice CIEDE2000.....	33
6.2.4 Střední kvadratická chyba .....	33



6.2.5	Úhlová chyba .....	34
6.2.6	Rozdíl RGB hodnot .....	34
<b>7</b>	<b>Uživatelské rozhraní dcraw .....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Kalibrace digitálního fotoaparátu .....</b>	<b>37</b>
8.1	Generátor kalibračních vzorků .....	37
8.2	Rozhraní pro kalibraci .....	39
8.3	Postup při kalibraci .....	42
8.4	Výsledky kalibrace .....	46
<b>9</b>	<b>Objektivní hodnocení metod WB .....</b>	<b>49</b>
9.1	Navržená metoda objektivního hodnocení .....	49
9.2	Výsledky objektivního hodnocení .....	52
<b>ZÁVĚR</b>	<b>.....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>.....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>.....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>.....</b>	<b>64</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>.....</b>	<b>64</b>

# ÚVOD

Zpracování obrazových dat z digitálního fotoaparátu tak, aby poskytovalo co nejpřesnější barevnou reprezentaci scény, je již dlouhou dobu klíčovým problémem ve vyvážení bílé barvy v digitální fotografii. Ke zpracování fotografií lidé dříve využívali negativního filmu u analogových fotoaparátů a jeho obdobou u fotoaparátů digitálních jsou surová data. Surové formáty, obsahující minimálně zpracovaná data ze senzoru, využívají především profesionální fotografové, nadšenci, ale i vědci mnoha různých oborů.

Cílem této práce je vytvořit uživatelské rozhraní pro zpracování surových dat z digitálního fotoaparátu se zaměřením na algoritmy provádějící vyvážení bílé barvy a objektivně posoudit účinnost těchto implementovaných algoritmů. Dalším cílem této práce bylo implementovat nástroje pro kalibraci digitálního fotoaparátu. Vedlejším cílem je seznámit čtenáře s problematikou zpracování surových dat, vyvážení bílé barvy a kolorimetrickou kalibrací digitálního fotoaparátu.

Teoretická část se převážně zabývá popisem zpracování obrazové matice ze surových dat. V první kapitole „Surová data“ je čtenář obeznámen s vlastnostmi a charakteristikou surových dat, jejich rozdílem oproti běžně využívanému formátu a s možnostmi jejich zpracování. Tématem druhé kapitoly „Barevné prostory a modely“ je výběr barevných prostorů, které jsou využívány při zpracování digitální fotografie. Třetí kapitola „Softwarový nástroj dcraw“ podává stručný rozbor open-source nástroje dcraw, který slouží ke zpracování surových dat. Ve čtvrté kapitole „Metody vyvážení bílé barvy“ je čtenáři přiblížena problematika vyvážení bílé barvy a jsou zde popsány nejznámější používané algoritmy, které byly v práci implementovány. Pátá kapitola „Kalibrace digitálního fotoaparátu“ popisuje způsob kalibrace digitálního fotoaparátu, což spočívá v získání kalibrační matice, která mapuje jeho, na zařízení závislé, barevné souřadnice do souřadnic nezávislých na zařízení. V šesté kapitole „Hodnocení účinnosti metod WB“ jsou v první řadě stručně popsány možnosti subjektivního hodnocení kvality algoritmů pro vyvážení bílé barvy v digitální fotografii. V dalších podkapitolách šesté kapitoly je čtenář podrobněji seznámen s vybranými kritérii kvantitativního vyhodnocení výkonu algoritmů vyvážení bílé barvy.

V praktické části této práce, je v sedmé kapitole zpracován popis realizovaného uživatelského rozhraní pro nástroj dcraw s implementovanými algoritmy vyvážení bílé barvy. V kapitole osmé je podrobně popsáno rozhraní sloužící ke kalibraci digitálního fotoaparátu. Dále je v této kapitole popsán provedený experiment a jeho zhodnocení. Poslední kapitola pojednává o navržené metodě objektivního posouzení implementovaných algoritmů a výsledcích tohoto hodnocení. Kapitoly 1.3, 3, 4 a 7 vycházejí z předchozího individuálního projektu II. zabývajících se zpracováním surových dat.

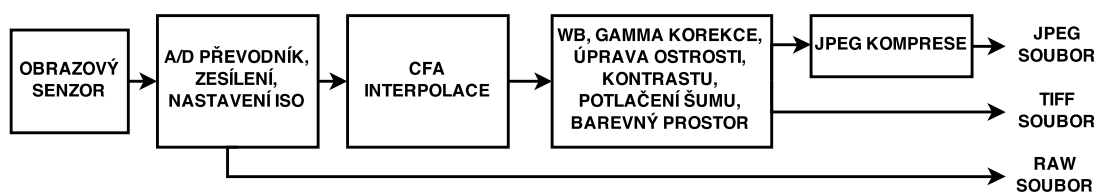
# 1 Surová data

Většina digitálních fotoaparátů v této době umožňuje uložit, kromě výsledného snímku v klasickém formátu JPEG, i data přímo zachycená snímačem, takzvaná surová data (dále RAW data). V digitálním obrazu se pro dosažení maximální kvality využívá surových formátů tak, jako se u analogových fotoaparátů využívalo negativů.

## 1.1 Obecné informace

Surová data jsou v podstatě data na výstupu A/D převodníku snímače fotoaparátu bez jakýchkoliv destruktivních úprav. Snímač zaznamenává, kolik světla dopadá na každou buňku snímače reprezentující jeden bod obrazové matice [1]. Převodník A/D pak tyto hodnoty převede na číslo, odpovídající intenzitě dopadajícího světla na danou světlocitlivou buňku. Rozsah čísel vystupujících z převodníku se nazývá dynamický rozsah a udává počet kvantizačních úrovní. A/D převodníky mohou být 8 bitové ( $2^8 = 256$  jasových úrovní), ale většina digitálních fotoaparátů využívá převodníky 10 až 14 bitové. Zde nastává první rozdíl surových dat oproti formátu JPEG, jelikož dynamický rozsah tohoto formátu je omezen 8 bity [1]. Pro co nejpřesnější zaznamenávání je tedy třeba využívat surových dat, která mají dostatečnou barevnou hloubku díky 10, 12 a 14 bitovým A/D převodníkům [1]. Surová data z 14 bitového A/D převodníku jsou poté zapsána v 16 bitovém formátu pro větší možnosti zpracování snímku (při úpravě nedochází ke ztrátě informace). Kvalitě zaznamenaných dat odpovídá také několikanásobně větší velikost výstupního souboru v případě ukládání do surových formátů. Výstupní soubor v surovém formátu obsahuje další doplňkové informace, které se mohou u výrobců fotoaparátu lišit, ale obecně jsou uložena tato data [1]:

- obrazová matice obsahující lineární data ze senzoru
- hlavička, obsahující informaci o řazení bajtů, identifikátor souboru a offset hlavní datové části
- metadata senzoru přístroje, obsahující velikost senzoru, atributy barevné masky filtrů a barevný prostor
- metadata snímku (důležitá pro další zpracování) jako například doba expozice, clonové číslo, citlivost ISO, koeficienty vyvážení bílé, rozměr obrazové matice surových dat a rozlišení náhledového snímku
- dodatkové informace jako model fotoaparátu, datum pořízení snímku (někdy i místo) a autora fotografie
- náhledový snímek, většinou ve formátu JPEG nebo PPM



Obr. 1.1: Postup při zpracování dat ze senzoru. Překresleno podle [22]

Formáty surových dat se liší některými detaily v závislosti na výrobci digitálního fotoaparátu. Nejrůznější výrobci mají své formáty surových dat – např.: *Nikon* - NEF, *Canon* – CR2, *Olympus* - ORF, *Panasonic* – RW2, *Sony* – ARW, SRF, SR2, *Kodak* – DCR, K25, KDC. Všechny tyto formáty jsou založeny na souborovém formátu TIFF a liší se například v různém zpracování hlavičky souboru, šifrováním a v dodatkových informacích o snímku [1]. Tyto formáty je potřeba dále zpracovat, jelikož se nejedná o samotný snímek, který si lze jednoduše prohlížet. Některé formáty (např. formáty výrobců *Nikon* a *Kodak*) používají „ztrátové“ komprese RAW formátu. Tato komprese mapuje úrovně zachycené snímačem do komprimovaných hodnot takovým způsobem, že nízké hodnoty (stíny) nejsou komprimovány vůbec a vyšší hodnoty (světla místa) jsou komprimována podle předem definované závislosti<sup>1</sup>. Pro mnoho aplikací surových dat je tento způsob komprese považován za přijatelný, jelikož efektivně zmenšuje čas zápisu a množství uložených dat. Obecně je jakékoliv zpracování dat u RAW formátů omezeno na procesy, které probíhají na hardwarové úrovni, jako například základní redukce šumu, úprava úrovně, odstranění černého rámečku a odstranění vlivu vadných („mrtvých“) bodů obrazové matice[22].

## 1.2 Rozdíl oproti formátu JPEG

Některé rozdíly RAW formátů oproti formátu JPEG byly již uvedeny v předchozí podkapitole, lze zmínit podstatný rozdíl v bitové hloubce jasové informace ze snímače. Rozdílů existuje mnoho, jelikož data formátů JPEG jsou sérií úprav získávána ze surových dat (zobrazeno na obrázku 1.1). V případě pořizování snímku ve formátu JPEG provede fotoaparát jakékoliv zpracování surových dat za uživatele sám, s výjimkou několika nastavitelných parametrů. Lineární surová data jsou upravena interpolací zaznamenaných dat jednotlivých barevných kanálů ze snímače podle fotoaparátem definované barevné mřížky, kódování dat, odstranění artefaktů vzniklých vadnými pixely (možné i u některých RAW formátů), vyvážení bílé barvy (dle nastaveného režimu), redukce šumu, převedení do barevného prostoru a především samotnou kompresí do formátu JPEG [1]. V dnešní době existuje mnoho přístrojů, které již umožňují ukládat nekomprimované barevné snímky ve formátu TIFF a lze se tak vyhnout ztrátové kompresi JPEG. Dále pak může docházet k dalším úpravám snímku, například k úpravě barev, zvyšování ostroty, úpravě kontrastu, úpravě přeexponovaných bodů. Rozdíly mezi zaznamenáváním snímku do formátu JPEG a RAW jsou tedy podstatné. V následující tabulce (tab. 1.1) je porovnání rozdílů těchto výstupních formátů.

---

<sup>1</sup> MARTINEC, Emil. 2008. *Noise, Dynamic Range and Bit Depth in Digital SLRs: The Consequences of Noise* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://theory.uchicago.edu/~ejm/pix/20d/tests/noise/>

Tab. 1.1: Porovnání rozdílů formátů RAW a formátu JPEG

	RAW formáty	formát JPEG
Dynamický rozsah (jednoho kanálu)	až 16 bit (65536 odstínů)	8 bit (256 odstínů)
Barevná interpolace	možnost využití kvalitnější, časově náročnější interpolace	definována fotoaparátem
Kvalita	lineární data ze senzoru (teoreticky maximální možná)	komprese dat, ztráta detailů
Barevný prostor	zpětně nastavitelný	pevný dle nastavení fotoaparátu
Zpracování dat	v postprodukci pomocí software	v reálném čase při zpracování signálu fotoaparátem, poté jsou úpravy již destruktivní
Velikost	desítky MB	jednotky MB

Další výhodou RAW formátů je to, že jejich následná úprava je nedestruktivní, neboť originální soubor zůstává stále zachován. Vzhledem k rozdílné velikosti je nutno poznamenat, že buffer fotoaparátu dokáže v surových datech zaznamenat pouze zlomek počtu snímků pořízených ve formátu JPEG [1]. Tak jako s klasickým negativem, je i se surovým formátem potřebné a (mnohdy časově náročnější) další zpracování zachycených dat. Pro převažující využití digitálního fotoaparátu, kde je kladen důraz na kvantitu pořízených snímků, rychlost snímání a zpracování je zaznamenávání dat ve formátu JPEG bohatě dostačující.

### 1.3 Volně dostupné nástroje pro zpracování surových dat

Jelikož jsou surové formáty poměrně často využívány, existuje mnoho možností pro volbu softwaru provádějící konverzi a úpravu RAW dat z fotoaparátů. Mezi ty nejlepší patří placené programy jako je *Adobe Photoshop Lightroom* nebo *Zoner Photo Studio*. Jejich kvalitě se postupem času přibližují volně dostupné nástroje, které dosahují stále lepších výsledků v oblasti zpracování surových dat. Někteří výrobci fotoaparátů poskytují volně dostupný software pro jejich fotoaparáty (volně dostupný se zpravidla stává při koupi fotoaparátu jejich značky). Patří sem například programy *ViewNX* (*Nikon*) a jeho placená verze *CaptureNX* (*Nikon*)<sup>2</sup>, *Digital Photo Professional* (*Canon*)<sup>3</sup>, *Image Data Converter* (*Sony*)<sup>4</sup> a *Image Viewer 3* (*Olympus*)<sup>5</sup>. Tyto nástroje většinou poskytují široké možnosti úprav surových dat, ale problémem těchto programů je jejich nekompatibilita s RAW formáty jiných výrobců. S požadavkem na nulové pořizovací náklady a větší kompatibilitu se pro konverzi a úpravu RAW dat jeví jako nejlepší možnost některý z volně dostupných nástrojů, které nejsou nijak závislé na samotných výrobcích fotoaparátů a stávají se tak široce použitelnými. Pouhým výběrem z mnoha softwarových nástrojů pro

<sup>2</sup> <http://www.nikonusa.com/en/Nikon-Products/Product/Imaging-Software/ViewNX.html>

<sup>3</sup> [http://cpn.canon-](http://cpn.canon-europe.com/content/product/canon_software/inside_digital_photo_professional.do)

[europe.com/content/product/canon\\_software/inside\\_digital\\_photo\\_professional.do](http://cpn.canon-europe.com/content/product/canon_software/inside_digital_photo_professional.do)

<sup>4</sup> <http://support.d-imaging.sony.co.jp/www/disoft/int/idc/index.html>

<sup>5</sup> <http://www.getolympus.com/us/en/software>

dekódování surových dat (především pro operační systémy *Windows*) lze zmínit [8] *RawTherapee*, *ImageMagick*, *LightZone*, *Scarab Darkroom*, *FastStone Image Viewer*, *Able RAWer*, *UFRaw* a *Microsoft Pro Photo Tools*. Většina těchto volně dostupných nástrojů využívá (především pro konverzi z širokého množství RAW formátů do formátu TIFF) další volně dostupný nástroj, a to program *dcraw*, který je možné ovládat pouze přes příkazovou řádku. Vzhledem k tomu, že *dcraw* je využíván ve velkém množství dalších softwarových nástrojů, bude tvořit důležitou část této práce. Pro důkladné zhodnocení jednotlivých volně dostupných nástrojů ke zpracování surových dat by bylo za potřebí všechny nástroje důkladně vyzkoušet. Tento proces by byl časově velmi náročný, takže v následující tabulce (tab. 1.2) jsou uvedena alespoň některá kritéria, získaná z webových stránek samotných autorů. V tabulce je obsažen již výše zmíněný výběr softwarových nástrojů (funkčních na systémech *Windows*), ale existuje i mnoho dalších.

Tab. 1.2: Porovnání open-source nástrojů pro zpracování surových dat z digitálních fotoaparátů

Název (autor)	Možnosti (hodnocení) <sup>6</sup>	OS	Využívá <i>dcraw</i> <sup>7</sup>	Verze <sup>8</sup>	Webové stránky <sup>9</sup>
RawTherapee (Gábor Horváth)	Široké možnosti zpracování. (5)	Multi-platformní	ANO	4.2 (2014)	www.rawtherapee.com
ImageMagick (Studio LLC)	Zpracování RAW a jiných formátů, možnost dodatečné tvorby. (5)	Multi-platformní	ANO	6.9.0-4 (2014)	www.imagemagick.org
LightZone (Light Crafts)	Mnoho možností zpracování. (4)	Multi-platformní	ANO	4.0 (2013)	www.lightzoneproject.org
Scarab Darkroom (Scarab labs)	Mnoho možností zpracování RAW, má však i lepší placenou verzi. (4)	Windows Vista a novější	ANO	2.2 (2014)	www.scarablabs.com
FastStone Image Viewer (FastStone)	Zpracování RAW a jiných formátů, možnost dodatečné tvorby. (5)	Windows 98 a více	NE	5.3 (2014)	www.faststone.org/FSViewerDetail.htm
Able RAWer (Graphic Region)	Základní možnosti zpracování RAW. (3)	Windows 98 a více	NE	1.7 (2014)	www.graphicregion.com/ablerawer.htm
UFRaw (Udi Fuchs)	Základní možnosti zpracování RAW. (3)	Multi-platformní	ANO	0.19.2 (2014)	www.ufraw.sourceforge.net
Microsoft Pro Photo Tools (Microsoft)	Konverze, změna velikosti, editor metadat. (2)	Windows 2003 a více	NE	2.2 (2008)	www.microsoft.com

<sup>6</sup> Hodnocením 1-5, kde 5 je nejlepší, bylo posuzováno množství funkcí pro zpracování surových dat, přehlednost nástrojů (uživatelské rozhraní), možnost čtení i jiných než surových dat, úprava snímků, funkce kreslení, metadata, množství podporovaných formátů, práce s vrstvami, konverze, změna velikosti, efekty a další

<sup>7</sup> bylo posuzováno, zda nástroj využívá open-source nástroje *dcraw*

<sup>8</sup> aktuální k datu 26. 1. 2015 – slouží pouze pro posouzení aktuálnosti nástrojů

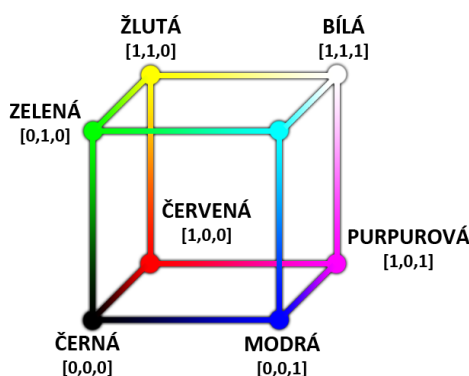
<sup>9</sup> webové stránky konkrétních nástrojů zároveň posloužily jako zdroje informací

## 2 Barevné modely a prostory

Barevný prostor si je možné představit jako přístup, pomocí kterého lze popisovat a zobrazovat barvy. Barva je většinou zaznamenána formou tří souřadnic v určeném prostoru. Je definováno mnoho barevných prostorů, aby každý vyhovoval odlišným požadavkům na konkrétní aplikace. Některé prostory jsou přímo závislé na zařízení, které jej používá (RGB, CMY(K), HSL), a některé barevné prostory jsou na zařízení nezávislé (CIE XYZ, CIE L\*a\*b\*, CIE Luv) [9]. V této práci jsou zmíněné zejména barevné modely a prostory RGB, CIE XYZ a CIE L\*a\*b\*.

### 2.1 RGB model

RGB je aditivní barevný model, jehož výsledná barva vzniká na základě kombinace jednotlivých barevných složek  $R$ ,  $G$  a  $B$  (Red – červená, Green – zelená, Blue – modrá). RGB prostory jsou závislé na zařízení (tzv. device-dependent) a vyskytují se hlavně v koncových zařízeních, protože jsou jednoduché na implementaci. Tyto prostory bohužel neodpovídají vizuálnímu vnímání. Od vzniku barevného RGB modelu se vyvinulo mnoho RGB prostorů, vznikajících k uspokojení různých požadavků [9]. Mezi RGB prostory používanými k digitálnímu zpracování obrazu patří především Adobe RGB, sRGB, Apple RGB a ProPhoto Kodak RGB, ale existuje mnoho dalších [9]. V RGB modelu je možné barvu zobrazit jako aditivní kombinaci tří složek  $R$ ,  $G$  a  $B$ , z nichž každá může nabývat 256 úrovní od 0 po 255 (při 8 bitové hloubce barev). Kombinací maximálních hodnot  $R$ ,  $G$  a  $B$  vzniká bílá barva, kombinací minimálních hodnot naopak barva černá. Pokud jsou si úrovně zelené, červené a modré složky rovny jedná se vždy o odstín šedi. Na obrázku 2.1 je pro názornost zobrazen RGB model s hodnotami v rozmezí 0 až 1.



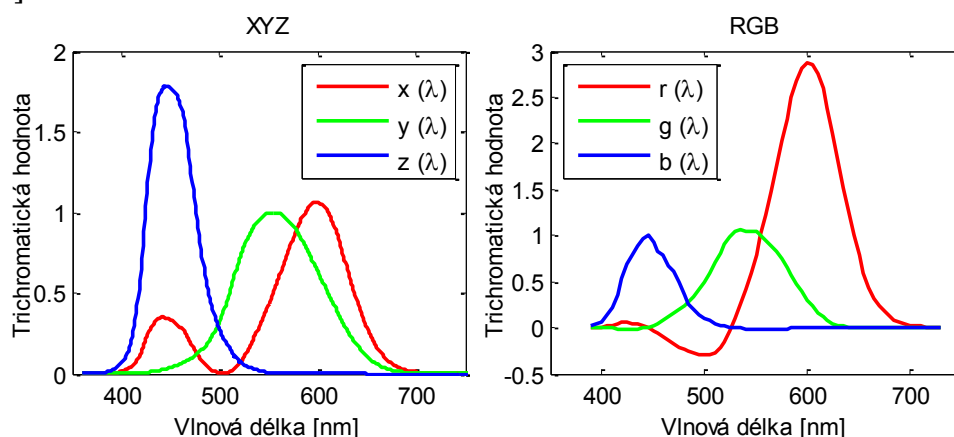
Obr. 2.1: Znázornění modelu RGB jako jednotková krychle

RGB barevný prostor lze vyjádřit také jako normalizovaný dvourozměrný prostor bez informace o jas, dle následujících vztahů.

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = 1 - r - g \quad (2.1)$$

## 2.2 CIE 1931 XYZ a CIE xyY

Matematicky vyjádřený prostor z roku 1931 byl definován mezinárodním úřadem Commission internationale de l'éclairage (zkráceně CIE) [9]. CIE XYZ (dále XYZ) není závislý na zařízení a skládá se opět ze tří složek ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Trichromatické složky prostoru XYZ jsou také definovány jako systém souřadnic, kde složka  $Y$  zastupuje jas a kombinací složek  $X$  a  $Z$  lze dosáhnout všech možných barevností na dané hodnotě jasu [9].



Obr. 2.2: Trichromatické členitelé RGB a XYZ. Data průběhů převzata z <sup>10</sup>

Prostor XYZ je opět aditivním barevným prostorem. Jako RGB prostor, lze i prostor XYZ převést do dvourozměrného prostoru. Souřadnice chromatičnosti  $x$ ,  $y$  lze pro prostor XYZ vypočítat analogicky jako souřadnice  $r$  a  $g$  z prostoru RGB (vztahy 2.1) dle následujících vztahů [22].

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad , \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad , \quad z = 1 - x - y \quad (2.2)$$

Tento normalizovaný prostor je nazýván CIE xyY [9]. Z uvedených vztahů je zřejmé, že k přenosu informace stačí složky  $x$  a  $y$ . Při této transformaci dochází ke ztrátě informace o jasu. Spolu s těmito souřadnicemi je možné přenášet i původní složku  $Y$  s informací o jasu, a proto vzniklo označení prostoru xyY [22]. Z těchto tří hodnot lze zpětně vypočítat souřadnice prostoru XYZ. Jelikož souřadnice  $x$  a  $y$  nesou informaci o barevnosti, je možné je zobrazit jako diagram chromatičnosti zobrazující rovinu (gamut) barev viditelných průměrným pozorovatelem na dané hodnotě jasu  $Y$ . Tento diagram bude zobrazován v praktické části této práce a je i několikrát uveden v příloze D.

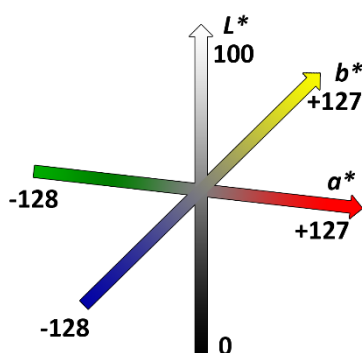
## 2.3 CIE L\*a\*b\*

Tento barevný prostor je také určen třemi souřadnicemi,  $L^*$  - světlost (osa jasové složky) a barevné složky  $a^*$  (zeleno-červená osa) a  $b^*$  (modro-žlutá osa) [10].

<sup>10</sup> CVRL functions. In: *Colour & Vision Research Laboratory* [online]. © 1995-2015 Color and Vision Research Labs. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.cvrl.org/cvrlfunctions.htm>



Prostor CIE  $L^*a^*b^*$  (dále CIELAB) je založen na lidském vnímání barev a není závislý na zařízení (tzv. device-independent). Tento prostor na rozdíl od prostoru RGB, který spíše informuje o tom, jak výslednou barvu vytvořit na vstupním/výstupním zařízení, skutečně informuje o tom, jak barva vypadá. Jak již název napovídá, jedná se o jeden z barevných prostorů vytvořených organizací CIE a v literatuře se lze setkat s různým označením tohoto prostoru (LAB, CIE Lab,  $L^*a^*b^*$ ). Světlost  $L^*$  se pohybuje v rozsahu hodnot 0 až 100 (od plně černé po bílou) a barevné kanály  $a^*$ ,  $b^*$  se pohybují v rozsahu -128 až +127 [10]. Barevné kanály jsou založené na faktu, že nemůže existovat barva jako žlutá modř z důvodu, že jsou si tyto barvy opakem. Výhodou tohoto prostoru je oddělená jasová informace od barevných složek. Úprava barev nebo světlosti může probíhat bez zbytečného ovlivnění ostatních složek a tím zamezení vzniku nechtěných artefaktů. Tohoto se využívá především při doostřování v postprodukčním software tak, že se před ostřením snímek převede do prostoru CIELAB, doostří se složka  $L^*$  a poté se snímek převede zpět do původního prostoru. Prostor CIELAB je využíván jako referenční prostor při převodu mezi barevnými prostory [10] a také při přesném vyhodnocování barevných rozdílů.



Obr. 2.3: Znázornění os barevného prostoru CIELAB. Překresleno z [5]

## 2.4 Převody mezi barevnými prostory

Převod mezi různými barevnými prostory je ve zpracování digitální fotografie velice důležitý. Pro co nejkratší dobu zpracování digitálního obrazu je potřeba převádět souřadnice z jednoho prostoru do druhého co nejrychleji, proto bylo definováno několik jednoduchých matematických postupů. Převod z prostoru RGB (resp. XYZ) do jeho chromatického zobrazení souřadnicemi  $r$  a  $g$  (resp.  $x$  a  $y$ ) je již uveden v předchozí podkapitole 2.1 (resp. 2.2). V následujících podkapitolách budou uvedeny další dva typy převodů mezi barevnými prostory, které byly využity v této práci.

### 2.4.1 Z CIELAB do CIE XYZ

Převod souřadnic z prostoru CIELAB do prostoru XYZ vyžaduje znalost souřadnic referenční bílé  $X_m$ ,  $Y_m$ ,  $Z_m$ . XYZ souřadnice referenční bílé lze vyhledat v tabulkách [9], ale standardně je definováno  $X_m Y_m Z_m = [95,047; 100; 108,883]$  pro standardního pozorovatele s  $2^\circ$  zorným polem a osvětlením D65.

Převod z prostoru CIELAB do prostoru XYZ lze provést pomocí následujících rovnic (2.3) pro hodnoty světelnosti  $L^* \leq 8,0$  a pro  $L^* > 8,0$  [9].

$$\begin{array}{l}
 \text{Pro } L^* \leq 8,0 \\
 X = X_m \left[ \left( \frac{L^*}{903,3} \right)^{\frac{1}{3}} + (a^*/500) \right]^3 \\
 Y = Y_m (L^*/903,3) \\
 Z = Z_m [(L^*/903,3)^{1/3} - (b^*/200)]^3
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 \text{Pro } L^* > 8,0 \\
 X = X_m \left[ \left( \frac{L^* + 16}{116} \right) + (a^*/500) \right]^3 \\
 Y = Y_m \left( \frac{L^* + 16}{116} \right) \\
 Z = Z_m \left[ \left( \frac{L^* + 16}{166} \right) - (b^*/200) \right]^3
 \end{array}
 \right.
 \quad (2.3)$$

Zpětný převod z prostoru XYZ do prostoru CIELAB lze provést použitím skupiny vztahů 2.4. Při zpětném převodu je potřeba použít opět tyto stejné referenční souřadnice bílé ( $X_m, Y_m, Z_m$ ) [9].

$$\begin{array}{l}
 L^* = 116 \cdot f(x) - 16 \\
 a^* = 500 \cdot (f(x) - f(y)) \\
 b^* = 200 \cdot (f(y) - f(z)) \\
 x_r = \frac{X}{X_m}, y_r = \frac{Y}{Y_m}, z_r = \frac{Z}{Z_m}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x_r} & x_r > 0,008856 \\ \frac{903,3 \cdot x_r + 16}{116} & x_r \leq 0,008856 \end{cases} \\
 f(y) = \begin{cases} \sqrt[3]{y_r} & y_r > 0,008856 \\ \frac{903,3 \cdot y_r + 16}{116} & y_r \leq 0,008856 \end{cases} \\
 f(z) = \begin{cases} \sqrt[3]{z_r} & z_r > 0,008856 \\ \frac{903,3 \cdot z_r + 16}{116} & z_r \leq 0,008856 \end{cases}
 \end{array}
 \quad (2.4)$$

#### 2.4.2 Z CIE XYZ do RGB

Převod z prostoru XYZ do různých prostorů RGB je proveden pomocí transformačních matic rozměru  $3 \times 3$  [9]. Těchto matic je několik, odpovídajících několika barevným RGB prostorům [9]. Trojice souřadnic prostoru RGB se získá vynásobením transformační matice  $M_{XYZ \rightarrow RGB}$  a transponovaného vektoru souřadnic XYZ dle vztahu 2.5.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB} \\ 3 \times 3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Je možné, že převodem dosáhneme hodnot přesahujících rozmezí 0 až 1 (resp 0 až 255). Přesahující hodnoty je potřeba pevně upravit na hodnoty 0 a 1 (resp. 0 a 255)[9]. Zpětné převedení z libovolného RGB prostoru do prostoru XYZ je možné provést stejným postupem s použitím inverzní matice  $\mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB}^{-1}$ .

## 3 Softwarový nástroj dcraw

Dcraw je open-source software, jehož autorem je David Coffin [8]. Tento nástroj umožňuje čtení a práci s téměř všemi RAW formáty, využívanými výrobci fotoaparátů. Seznam podporovaných RAW formátů se postupem času rozšiřuje spolu s funkcemi softwaru. V následujících podkapitolách bude čtenář podrobněji seznámen s možnostmi, které tento nástroj poskytuje.

### 3.1 Úvod do programu dcraw

Program je multiplatformní, tudíž je plně funkční jak v operačních systémech Windows, tak v systémech na bázi UNIX, tedy různé distribuce Linux a Mac OS X [8]. Dcraw nemá žádné grafické rozhraní a je ovládán pouze pomocí příkazové řádky operačního systému. Výstupem toho programu může být atraktivní upravená fotografie ve formátech PPM a TIFF, které se pak dále snadněji zpracovávají v dalším softwaru. K provozu není vyžadována žádná složitá instalace, stačí pouze zadat cestu ke spustitelné verzi programu dcraw a uživateli se zobrazí funkce, odvíjející se od použité verze programu (obr. 3.1).

```
C:\Users\Jan>dcraw
Raw photo decoder "dcraw" v9.24
by Dave Coffin, dcoffin a cybercom o net

compiled by Sergio Namias, www.CentroStudiProgressoFotografico/en/dcraw

Usage: dcraw [OPTION]... [FILE]...

-v          Print verbose messages
-c          Write image data to standard output
-e          Extract embedded thumbnail image
-i          Identify files without decoding them
-i -v       Identify files and show metadata
-z          Change file dates to camera timestamp
-w          Use camera white balance, if possible
-a          Average the whole image for white balance
-A <x y w h> Average a grey box for white balance
-r <r g b g> Set custom white balance
+M/-M      Use/don't use an embedded color matrix
-C <r b>    Correct chromatic aberration
-P <file>   Fix the dead pixels listed in this file
-K <file>   Subtract dark frame (16-bit raw PGM)
-k <num>    Set the darkness level
-S <num>    Set the saturation level
-n <num>    Set threshold for wavelet denoising
-H [0-9]   Highlight mode (0=clip, 1=unclip, 2=blend, 3+=rebuild)
-t [0-7]   Flip image (0=none, 3=180, 5=90CCW, 6=90CW)
-o [0-5]   Output colorspace (raw,sRGB,Adobe,Wide,ProPhoto,XYZ)
-d          Document mode (no color, no interpolation)
-D          Document mode without scaling (totally raw)
-j          Don't stretch or rotate raw pixels
-W          Don't automatically brighten the image
-b <num>   Adjust brightness (default = 1.0)
-g <p ts>   Set custom gamma curve (default = 2.222 4.5)
-q [0-3]   Set the interpolation quality
-h          Half-size color image (twice as fast as "-q 0")
-f          Interpolate RGGB as four colors
-m <num>   Apply a 3x3 median filter to R-G and B-G
-s [0..N-1] Select one raw image or "all" from each file
-6         Write 16-bit instead of 8-bit
-4         Linear 16-bit, same as "-6 -w -g 1 1"
-T         Write TIFF instead of PPM
```

Obr. 3.1: Nástroj dcraw v příkazové řádce – výpis možností úpravy RAW dat

Oproti komerčně využívaným programům pro úpravu RAW fotografií má dcraw několik dále jmenovaných výhod. S použitím správných příkazů lze získat lineární „čistá“ RAW data bez aplikace jakýchkoliv transformací. Dále umožňuje získat nevyvážené barevné kanály tak, jak je snímač zachytil [8]. Vytvoří výsledný snímek bez provedení jakýchkoliv barevných úprav, neodstraňuje okrajové pixely a neprovádí žádnou redukci šumu, pokud tak uživatel neurčí zadáním příslušného

příkazu. Dcraw je široce využívaným nástrojem ve spoustě komerčních programů, kde je vyhledáván hlavně pro jeho schopnost čtení velkého množství RAW formátů. Avšak přímé používání samotného dcraw přiblíží uživateli podstatu RAW formátů a postupu zpracování snímku v digitálním fotoaparátu.

### 3.2 Funkce programu dcraw

Jak již bylo zmíněno, dcraw je spouštěn z příkazového řádku a přijímá množství volitelných příkazů, které mají být provedeny na použitém souboru ve formátu RAW. Převážně poskytuje různé možnosti v oblasti dekódování a zpracování fotografie v RAW formátech, zobrazuje metadata a extrahuje náhledové obrázky vložené fotoaparátem. Dcraw je použit zavoláním z příkazové řádky pomocí příkazu ve formě: „[cesta]/dcraw.exe [parametry] [soubor]“ (např.: „C:/dcraw.exe -v -i fotografie.CR2“). V následujících řádcích jsou popsány některé volby (**-volba**) a jejich zadávané parametry (**[parametr]**), které dcraw umožňuje [8].

#### Základní volby:

- **-v** - Vypisuje zprávy o procesu zpracování RAW souboru (jinak jsou vypisovány pouze varování a chyby).
- **-e** - Extrahuje náhledové obrázky vložené do RAW souboru (výstupem může být soubor formátu JPEG nebo PPM, dle typu fotoaparátu).
- **-z** - Změní čas a datum poslední modifikace souboru na datum, kdy byla fotografie pořízena.
- **-i** - Vypíše formát surových dat (typ fotoaparátu), ale neprovádí jeho dekódování (např.: „xxx.nef is a NIKON D7000 image.“). Při použití příkazu „-v -i“ jsou zobrazena veškerá metadata souboru.

#### Volby oprav:

- **-k [black]** a **-S [saturation]** - Nastaví příslušné úrovně černé a saturace, které budou použity při zpracování. Je však doporučeno nechat dcraw vypočítat úroveň černé a saturace. Úroveň černé je průměrována ze světlocitlivých bodů senzoru skrytých před dopadajícím světlem.
- **-n [noise\_threshold]** - Je použita vlnková transformace za účelem snížení šumu, avšak zachová detaily. Vhodná hodnota bývá v rozsahu 100 a 1000.
- **-C [red\_mag blue\_mag]** - Vynásobí červený a modrý kanál zadaným koeficientem. Hodnota bývá většinou v rozmezí hodnot 0,999 až 1,001. Využívá se pro korekci chromatické aberace (barevná vada).
- **-H [0 až 9]** - Tato volba opravuje přeexponované body obrazové matice. „-H 0“ změní všechny přeexponované body na čistě bílou (původní stav), „-H 1“ nechá všechny přeexponované body beze změny (vznikají tak různé odstíny fialové barvy), „-H 2“ smísí přeexponované body s ostatními a vytvoří tak gradient přecházející do bílé, od „-H [3 a více]“ opravuje přeexponované body, kde nižší čísla upřednostňují bílou a vyšší čísla upřednostňují barvy.

**Volby úprav barev a vyvážení bílé barvy:** (jako výchozí nastavení vyvážení bílé barvy používá dcraw vyvážení podle neutrální šedé a jako barevný prostor je nastaven prostor sRGB)

- **-w** - Pokud může, tak program použije vyvážení bílé barvy, které bylo použito fotoaparátem při pořízení fotografie. Pokud dcraw tuto hodnotu nezíská z metadat, je vysáno varování.
- **-a** - Provede automatické vyvážení bílé barvy výpočtem průměru z celého obrázku.
- **-A [left top width height]** (pozice zleva, pozice shora, šířka, výška) - Provede vyvážení bílé barvy dle průměru ze zadaného obdélníku. Využívá se pro WB dle neutrální šedé tabulky.
- **-r [r g1 b g2]** - Provede vyvážení bílé barvy pomocí zadaných násobitelů. Tyto násobitelé lineárně upraví velikosti úrovní kanálu RGBG. Všechny úrovně se tedy posunou od svých původních pozic, což může být občas nežádoucí. Pokud není žádoucí provést vyvážení bílé barvy, je možné provést příkaz „-r 1 1 1 1“.
- **-o [0 až 5]** - Touto možností lze vybrat výstupní barevný profil, kde **0** – Raw RGB (unikátní pro každý fotoaparát), **1** – sRGB (výchozí hodnota), **2** – Adobe RGB, **3** – Wide Gamut RGB, **4** – Kodak ProPhoto RGB, **5** – XYZ.
- **-g [gamma toe\_slope]** – Touto funkcí lze aplikovat gamma korekci. Lze nastavit hodnotu gamma a špičku sklonu gamma křivky.

#### **Volby interpolace:**

- **-D** - Extrahuje čistá RAW data bez použití jakéhokoliv interpolace (občas nazýváno jako de-mozaikování či „de-Bayerování“) a úpravy.
- **-d** - Jako předchozí příkaz, neprovádí žádnou interpolaci, ale nastaví úroveň černé, saturace a vyvážení bílé barvy.
- **-h** - Použitím této volby lze získat výstupní obrázek poloviční velikosti.
- **-q [0 až 3]** - Tímto parametrem je možné zvolit metodu interpolace (kvalitu algoritmu pro interpolaci pomocí Bayerovy masky). Čím vyšší číslo, tím bude použit kvalitnější a složitější algoritmus, avšak dcraw je rychlý při použití jakéhokoliv z nich. „-q 0“ použije velmi rychlou bilineární interpolaci, která není ovšem příliš kvalitní. „-q 1“ použije VNG (Variable Number of Gradients) interpolaci. „-q 2“ použije PPG (Patterned Pixel Grouping) interpolaci. „-q 3“ použije AHD (Adaptive Homogeneity-Directed) interpolaci. Podle autora programu dcraw vždy použije nejvhodnější algoritmus pro konkrétní model fotoaparátu.

**Volby výstupu:** (jako výchozí je nastavený výstup 8 bitové obrazové matice ve formátu PGM/PPM/PAM s aplikovanou gamma křivkou BT.709 [8], úrovní bílé podle histogramu a bez uložených metadat)

- **-W** - Není provedeno automatické zesvětlení snímku. Použije pevnou hodnotu bílé, ignoruje histogram obrázku.
- **-b [brightness]** - Vydělí hodnotu bílé zadaným číslem *brightness* (výchozí hodnota je 1.0).
- **-4** - Místo 8 bitového (výchozí nastavení) obrázku je výstup zapsán jako 16 bitový lineární obrázek s pevnou úrovní bílé barvy a bez gamma korekce (stejně jako „-6 -W -g 1 1“).
- **-6** - Výstupní snímek je zapsán v 16 bitové hloubce.
- **-T** - Uloží snímek ve formátu TIFF.
- **-t [0-7]** - Tímto parametrem lze otočit výstupní obrázek. Jako výchozí je nastavené otočení použité fotoaparátem.

```
C:\Users\Jan>dcraw -v -T -4 -n 200 DSC_0017.nef
Loading NIKON D5000 image from DSC_0017.nef ...
Wavelet denoising...
Scaling with darkness 0, saturation 3840, and
multipliers 2.170906 1.000000 1.163053 1.000000
AHD interpolation...
Converting to sRGB colorspace...
Writing data to DSC_0017.tiff ...
```

Obr. 3.2: Příklad použití nástroje dcraw

Na obrázku 3.2 je zobrazeno použití nástroje dcraw v příkazové řádce. V prvním řádku je vidět struktura příkazu pro dcraw a na dalších řádcích jsou již postupně vypisovány jednotlivé kroky úprav nástroje dcraw. Načtení snímku „DSC\_0017.nef“ pořízeným fotoaparátem NIKON D5000, použití vlnkové transformace pro snížení šumu, nastavené úrovně černé, saturace a použití koeficientů vyvážení bílé barvy. Pokud není nastaveno jinak, tak dcraw používá pro nastavení úrovně černé a saturace předem definované hodnoty pro konkrétní typy fotoaparátů, nebo úroveň černé vypočítá jako průměr z pixelů, skrytých před dopadajícím světlem. Dalším krokem je interpolace. Zde, pokud není nastaveno jinak, dcraw použije nejvhodnější algoritmus interpolace pro daný fotoaparát. Předposledním krokem je převod do výstupního barevného prostoru. Snímek je převeden do prostoru sRGB, který je v nástroji dcraw nastaven jako výchozí [8]. V posledním kroku program oznámí, že byl snímek uložen ve formátu TIFF pod názvem „DSC\_0017“ do stejné složky, ve které jsou uložena i vstupní RAW data.

## 4 Metody vyvážení bílé barvy

Jedním z procesů úpravy digitálního obrazu z fotoaparátu je proces vyvážení bílé barvy (angl. White Balance, dále používána zkratka WB). V podstatě jde o napodobení lidské schopnosti určení barvy objektu nezávisle na typu osvětlení [11]. V oblasti zpracování digitálního snímku je velká snaha přiblížit se právě této lidské schopnosti. Digitální fotoaparáty poskytují možnost automatického vyvážení bílé barvy (AWB), která může být svou účinností dostačující pro běžné aplikace. Většina fotoaparátů také poskytuje možnost WB podle zdroje osvětlení scény nebo umožňuje nastavit barevnou teplotu osvětlení scény (jednotkou barevné teploty je kelvin, K). V následujících podkapitolách budou probrány základní algoritmy WB.

### 4.1 Vyvážení bílé barvy

Jedná se v podstatě o dynamické vyvážení bílé barvy [11]. Snahou WB je zachytit scénu přesně tak, jak ji viděl pozorovatel. Lidský zrak vidí bílou zeď přibližně stejně bílou, ať už je osvětlená denním světlem, zářivkou nebo klasickou žárovkou. Digitální fotoaparát nemá takové schopnosti jako lidské oko a mozek, jeho výstup závisí na světle, které dopadá na scénu, na odrazivosti objektů vyskytujících se na scéně a na vlastnostech samotného fotoaparátu [11]. Fotoaparát nefunguje jako lidské oko a má pevnou spektrální citlivost, tudíž je pevně nastaven na vyvážení barvy. Tento fakt způsobuje to, že vyfotografovaná scéna osvětlená klasickou žárovkou může mít načervenalý nádech, zatímco scéna osvětlená zářivkou může mít lehce zelený nádech [11]. Digitální fotoaparáty mají již přednastavené možnosti světelných zdrojů na scéně, které způsobí určitý posun v barevných kanálech  $R$ ,  $G$  a  $B$  k dosažení vyvážení barvy. K WB je možné přistupovat několika způsoby. U algoritmů WB je důležitá především spolehlivost. Je potřeba, aby daná metoda fungovala stejně efektivně pod všemi možnými zdroji světla a za všech možných podmínek [11]. Většina metod funguje na principu odhadu světelného zdroje ze scény, pomocí kterého vypočítá korekční koeficienty pro jednotlivé barevné kanály, ale existují i metody, které zdroj světla na scéně neodhadují a rovnou upravují barevné vlastnosti snímku. Použitelné jsou i jednodušší metody, které odhadnou osvětlení scény na základě nějakého statistického předpokladu a pracují se všemi pixely v pořízeném snímku [11]. Avšak jsou známé i složitější metody, jako například metoda využívající neuronových sítí, rozpoznávání objektů [7], mapování gamutu, correlation-by-colour [7]. V literatuře jsou uváděny i metody WB, které jsou prováděny v jiných barevných prostorech, než v prostoru RGB typickém pro digitální fotografii [25].

### 4.2 Gray World Method

Nejnámější metodou WB je Gray World Method/Assumption (dále GW) neboli metoda předpokladu šedého světa [2]. Předpokládá, že průměrné intenzity barevných složek  $R$ ,  $G$ ,  $B$  zastoupené ve scéně jsou si rovny a tedy, že průměrná barva scény je šedá. Tato jednoduchá metoda je jednou z nejstarších, ale je efektivní a často

využívána [7]. Z podstaty této metody je zřejmé, že nebude fungovat správně, když bude ve scéně nějaká z barev dominantní. Algoritmus nejdříve spočítá průměrnou hodnotu intenzity jednotlivých barevných kanálů. V rovnici 4.1 je uveden tento výpočet pouze pro červený kanál obrazové matice o rozměrech  $m \times n$ , pro ostatní kanály je hodnota vypočítána analogicky.

$$\bar{R}_{SENZOR} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{SENZOR}(x, y) \quad (4.1)$$

Z těchto průměrných hodnot se vypočítají koeficienty pro červený a modrý kanál. Zelený kanál se v této, stejně jako v některých jiných metodách, neupravuje. Koeficienty se vypočítají dle následující rovnice (4.2), a výsledná obrazová matice vzniká pomocí rovnice 4.3. Pokud by vstupní snímek již splňoval podmínky metody šedého světa, to znamená, že průměrné hodnoty jednotlivých kanálů se rovnají ( $\bar{R}_{SENZOR} = \bar{G}_{SENZOR} = \bar{B}_{SENZOR}$ ), korekční koeficienty (vztah 4.2) by se rovnaly jedné a další úprava obrazové matice by tedy nebyla potřebná.

$$k_R = \frac{\bar{G}_{SENZOR}}{\bar{R}_{SENZOR}}, \quad k_G = 1, \quad k_B = \frac{\bar{G}_{SENZOR}}{\bar{B}_{SENZOR}} \quad (4.2)$$

Výsledný červený a modrý kanál upravené obrazové matice vznikne vynásobením hodnot původních s právě vypočtenými koeficienty z rovnice (4.2). Metoda GW je často využívána hlavně pro svůj poměr efektivního výsledku a jednoduchosti algoritmu. V literatuře se lze setkat s dalšími modifikacemi této metody vedoucími k jejímu zlepšení na základě databáze z experimentálně získaných dat [7].

$$\begin{bmatrix} R_{OUT} \\ G_{OUT} \\ B_{OUT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_R & 0 & 0 \\ 0 & k_G & 0 \\ 0 & 0 & k_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{SENZOR} \\ G_{SENZOR} \\ B_{SENZOR} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

### 4.3 Perfect Reflector Method

Perfect Reflector (dále PR) nebo v literatuře také občas nazývána White-Patch nebo Retinex Method [2] je založená na teorii retinex neboli na tzv. perfektním reflektoru, kde se očekává, že bod obrazové matice s nejvyšší hodnotou se dá považovat za bílý a podle něj je provedeno vyvážení bílé barvy. Metoda tedy předpokládá, že se v zachycené scéně objeví bílý bod a tento bod ideálně odráží dopadající světlo. Násobné koeficienty jsou vypočítány podle následujících vztahů,

$$k_R = \frac{G_{max}}{R_{max}}, \quad k_G = 1, \quad k_B = \frac{G_{max}}{B_{max}} \quad (4.4)$$

kde hodnoty  $R_{max}$ ,  $G_{max}$  a  $B_{max}$  jsou právě hodnotami nejsvětlejšího pixelu. Získanými koeficienty jsou jednotlivé barevné kanály vstupního obrazové matice vynásobeny (obdobně jako u metody GW – vztah 4.3) a je tak získán vyvážený snímek. Tato metoda patří také mezi ty jednodušší, a přesto je poměrně efektivní. Problém může



vzniknout se šumem nebo přeexponovanými body v obrazové matici, proto se také v literatuře objevují adaptace této metody, které nehledají přímo obrazový bod s nejvyšší intenzitou, ale bod splňující podmínky různých filtrů nebo skupinku obrazových bodů s vysokou intenzitou [12]. Tato metoda byla implementována pomocí Matlabu do uživatelského rozhraní pro zpracování surových dat (viz kapitola 9) takovým způsobem, že je na vstupní snímek paralelně použit filtr s kruhovým průměrováním (pro rozmazání snímku), čímž dojde k eliminaci přeexponovaných bodů nebo šumových pixelů s příliš velkou intenzitou. Z této obrazové matice je získána intenzita nejzářivějšího obrazového bodu a ta je použita pro výpočet korekčních členů, pomocí kterých je dále upravována vstupní, nerozmazaná obrazová matice.

#### 4.4 Max RGB

Metoda vyvážení bílé Max RGB [12] (také nazývána Scale-By-Max) je velmi podobná metodě Perfect Reflector (PR). Metoda PR vyhledává obrazový bod s nejvyšší intenzitou. Metoda Max RGB hledá nejvyšší hodnotu kanálu  $R$ ,  $G$  a  $B$  nezávisle na tom, v jakém obrazovém bodu se vyskytují. Odhad osvětlení scény tedy podléhá maximální odezvě každého barevného kanálu [12]. Tato metoda vede většinou k dobrým výsledkům, pokud se v zachycené scéně nalézá bílý povrch. Vzhledem k jeho podstatě je zřejmé, že tato metoda může být opět náchylná na šum a přeexponované obrazové body [12]. Jako u předchozí metody zde lze zvýšit robustnost metody aplikací filtru na obrazovou matici, čímž dojde ke zprůměrování obrazových bodů s extrémními hodnotami. Metoda dosahuje špatných výsledků v případech, kdy ve vyfotografované scéně není žádný bílý bod [7]. Získání a aplikace korekčních koeficientů je provedena obdobně jako u předchozí metody.

#### 4.5 Kombinace Gray World a Perfect Reflector

Tento algoritmus WB vznikl na základě kombinace dvou metod – GW a PR. Tato metoda byla navržena E. Lamem (občas nazývána jako Lam's algorithm)[12]. Obě předchozí metody upravují snímek lineárním způsobem, ale tato kombinace přistupuje k úpravám kvadraticky. Vzhledem k tomu, že obě tyto metody hledají ve snímku nějaké podmínky, tak i tato metoda je založena na tom, že se v první řadě musí najít tyto podmínky. Stejně jako u předchozích metod se zde nijak neupravuje zelený kanál. Upravený červený kanál reprezentuje následující rovnice,

$$R_{OUT}(x, y) = a_R \cdot R_{SENZOR}^2(x, y) + b_R \cdot R_{SENZOR}(x, y) \quad (4.5)$$

kde  $a_R$ ,  $b_R$  jsou koeficienty WB. Pro GW je požadováno, aby se u upraveného snímku součet intenzit červeného kanálu rovnal součtu intenzit zeleného kanálu (resp. jejich průměrné hodnoty) a analogicky pro modrý kanál. Z toho vyplývá, že je třeba splnit rovnici 4.6. Následným spojením rovnic 4.5 a 4.6 lze získat vztah 4.7.

$$\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{OUT}(x, y) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{SENZOR}(x, y) \quad (4.6)$$

$$a_R \cdot \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{SENZOR}^2(x, y) + b_R \cdot \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{SENZOR}(x, y) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{SENZOR}(x, y) \quad (4.7)$$

Podobně pro splnění podmínky PR se získá rovnice 4.8.

$$a_R \cdot \max\{R_{SENZOR}^2(x, y)\} + b_R \cdot \max\{R_{SENZOR}(x, y)\} = \max\{G_{SENZOR}(x, y)\} \quad (4.8)$$

Kvadratické rovnice 4.7 a 4.8 tvoří dohromady dvě rovnice o dvou neznámých. Pro snazší vyřešení a znázornění je třeba dát tyto rovnice do matice (4.9). Vyřešení této matice lze provést pomocí determinantu, dle Cramerova pravidla. Takto vypočítané koeficienty  $a_R$  a  $b_R$  vstupují do rovnice 4.5 pro úpravu červeného kanálu vstupní obrazové matice. Vše je provedeno analogicky pro modrý kanál.

$$\begin{bmatrix} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{SENZOR}^2(x, y) & \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n R_{SENZOR}(x, y) \\ \max\{R_{SENZOR}^2(x, y)\} & \max\{R_{SENZOR}(x, y)\} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_R \\ b_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{SENZOR}(x, y) \\ \max\{G_{SENZOR}(x, y)\} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

#### 4.6 Metoda roztahování histogramu

Tato velice jednoduchá a rychlá metoda funguje na principu tzv. „roztahování“ histogramu (dále NH) [13]. V tomto procesu se roztáhne barevný histogram snímku po celé jeho šíři a jsou odebrány okrajové barvy, které jsou zastoupeny pouze 1% obrazových bodů a to jak v levé, tak i v pravé části histogramu. Tato metoda vytvoří ze světlého pixelu ještě světlejší a naopak z tmavého ještě tmavší. Výsledný snímek má bohatší kontrast a lépe vyvážené barvy. Avšak nevýhodou této metody je fakt, že občas se může odstín dané barvy značně posunout do nereálných hodnot. V příloze C je pro názornost obrázků obsahující dva snímky a jejich histogramy vstupního, nijak nevyváženého snímku a výstupního snímku upraveného pomocí této metody. Velmi patrné je zde roztažení především modrého kanálu, který v použitém snímku převažoval. V porovnání s ostatními metodami WB zde vůbec nedochází k odhadu osvětlení scény a algoritmus využívá přímo barevného obsahu upravované obrazové matice [13].

## 5 Kalibrace digitálního fotoaparátu

K tomu, aby digitální fotoaparát mohl reprezentovat barvy scény co nejpřesněji, je nutné provést kalibraci, pomocí které je získána kalibrační matice. Digitální fotoaparát má svou kalibrační (charakterizační) matici  $3 \times 3$  pro převod z barevného prostoru závislého na zařízení (device-dependent) na barevný prostor nezávislý na zařízení (device-independent). V praxi se tato matice nazývá kalibrační nebo transformační, protože transformuje snímek z RGB prostoru použitého zařízení do trichromatického prostoru XYZ [5]. Za předpokladu podmínky podle Roberta Luthera [5], že odezva fotoaparátu je lineární funkcí osvětlení scény, lze provést kalibraci pomocí  $3 \times 3$  lineární transformační matice.

### 5.1 Kalibrační matice

Získání lineární transformační matice je dosaženo tím, že je vyfotografován kalibrační terč, obsahující barevné vzorky obsahující pečlivě vybírané barvy (např. GretagMacbeth ColorChecker – 24 vzorků, ve kterých jsou zahrnuty stupně šedé, CMY, RGB, odstíny pleti, oblohy a další). Z vyfotografovaného snímku jsou poté odečteny průměrné hodnoty RGB pro  $n$  barevných čtverců (vzorků). Pro těchto  $n$  vzorků se pomocí kolorimetru získají také trichromatické hodnoty XYZ, které lze považovat za „správné“ [5]. Pro přesné získání souřadnic je zapotřebí, aby byl kalibrační terč dokonale rovnoměrně nasvětlen, což je v praxi velmi složité [16]. Mapování z RGB do XYZ lze zapsat následující rovnicí s neznámou maticí  $\mathbf{M}$  [18],

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{R} \quad (5.1)$$

kde  $\mathbf{R}$  je  $n \times 3$  matice obsahující vektory  $\vec{p}_i = [r, g, b]$  (kde  $i=1, 2, \dots, n$  reprezentuje číslo barevného vzorku) a  $\mathbf{X}$  je  $n \times 3$  matice odpovídajících vektorů  $\vec{x}_i = [x, y, z]$ . Tato matice  $\mathbf{M}$  je získána lineární regresí pomocí metody nejmenších čtverců tak, aby byl minimalizován barevný rozdíl mezi všemi použitými barevnými vzorky [18],

$$E = \sum_{i=1}^n (\vec{x}_i^T - \mathbf{M} \cdot \vec{p}_i^T)^2 \quad (5.2)$$

kde  $\vec{x}_i$  je trojrozměrný vektor s trichromatickými „správnými“ hodnotami XYZ a vektor  $\vec{p}_i$  je trojrozměrný vektor s hodnotami RGB. V praxi se využívá také polynomiální regrese, kdy je tento vektor rozšířen o další podmínky, například na  $\vec{p}_i = [r \ g \ b \ r \cdot g \ r \cdot b \ g \cdot b \ r^2 \ g^2 \ b^2 \ r \cdot g \cdot b \ 1]$  [17]. Výsledná matice  $\mathbf{M}$  má rozměry  $3 \times 11$  a měla by dosahovat lepších výsledků. Pro minimalizaci rozdílu  $E$  je s použitím metody nejmenších čtverců vypočtena matice následujícím vztahem,

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{X} \quad (5.3)$$

kde  $\mathbf{R}^T$  je transponovaná matice  $\mathbf{R}$  a  $(\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1}$  je matice inverzní k matici  $(\mathbf{R}^T \mathbf{R})$ . Výsledná matice  $\mathbf{M}$  má tedy rozměry  $3 \times 3$  a je plná na rozdíl od matic používaných při WB, kdy je korekční matice diagonální [17]. Problémem této metody je téměř

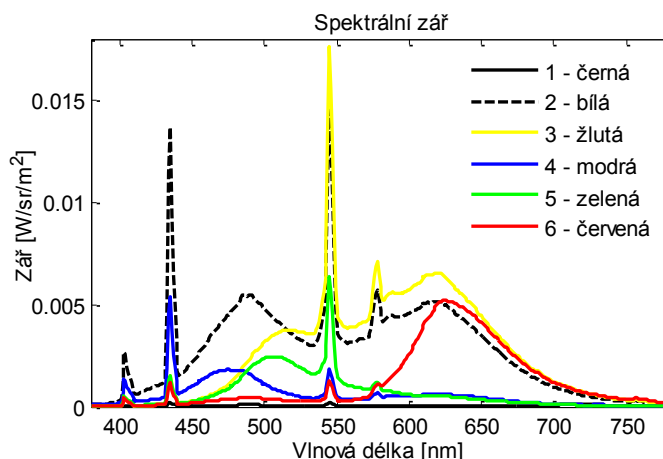
nemožné zajištění dokonale rovnoměrného osvětlení kalibračního terčíku [5]. S velkou pravděpodobností se ozáření přes kalibrační terčík bude lehce měnit a tím budou ovlivněny i odečtené RGB hodnoty. Pokud nejsou tyto změny osvětlení známy, potom se pomocí předem známých „správných“ XYZ hodnot špatně vypočítá kalibrační matice  $\mathbf{M}$  [16]. Dalším problémem, který by mohl ovlivnit přesnost kalibrace, je tzv. vinětace (vignetting). Vinětace je optickou vadou, vznikající při průchodu světla objektivem, kdy čočka (nebo více čoček) nepropouští světlo rovnoměrně a na světlocitlivé buňky uprostřed senzoru dopadá více světla než na buňky umístěné na okrajích [5]. Tento problém nemusí vždy způsobovat pouze čočka, ale může vznikat i díky objímce objektivu, použitému filtru a také při větších změnách úhlu dopadajícího světla na buňky senzoru (tzv. pixel vignetting), kdy se snižuje jejich účinnost. Vzniklý problém lze obejít pořízením snímku s kalibračním terčem takovým způsobem, že je terč pouze v určitém středu snímku a není rozmístěn po celé jeho ploše. Výhodou této metody je její jednoduchost a poměrně krátká doba výpočtu. K získání charakterizační matice fotoaparátu lze přistoupit i pomocí nelineárních metod, které lépe zvládají minimalizaci barevného rozdílu  $\Delta E$ , ale jsou však obtížnější, časově náročnější a vyžadují větší množství vstupních dat [5].

## 5.2 Kalibrační terč

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, proces kalibrace zahrnuje získání hodnot RGB a XYZ z kalibračního terče. Komerčně využívané kalibrační terče jsou vyvíjeny tak, aby se daly použít pro různé aplikace. Kalibrační terče obsahují většinou několik desítek důkladně zvolených barevných vzorků jako například stupnici šedé, základní RGB a CMY barvy. Kalibrační terče používané pro digitální fotoaparáty rovněž obsahují barevné vzorky reprezentující barvy s častým výskytem v běžném světě a barvy zastupující často fotografované objekty (nebe, listy, pleť, atd.). Pro kalibraci barev digitálního fotoaparátu se nejčastěji využívá terč GretagMachbeth z roku 1976, který v této době produkuje společnost zabývající se měřeními barev X-Rite pod názvem „ColorChecker“ [19]. Tento terč obsahuje 18 odborně vybraných čtverců v přírodních a primárních barvách a 6 čtverců zastupujících stupnici šedé. Tyto barvy zastupující čtverce odrážejí světlo stejným způsobem ve všech částech viditelného spektra pod libovolným osvětlením a odpovídají tak barvám, které reprezentují. Kalibrační terč lze využít i k velmi přesnému vyvážení bílé barvy pomocí neutrálně bílých čtverců [19].



Obr. 5.1: Rozmístění 24 čtverců barevné tabulky



Obr. 5.2: Naměřená spektrální zář vzorků z barevného kalibračního terče

Kalibrační terče lze zakoupit v několika různých velikostech a provedeních. Ceny těchto terčů se pohybují v řádech stovek a tisíců korun a jsou nejčastěji výhradou profesionálních fotografů nebo se používají pro speciální aplikace, kde je přesnost získaná kalibrační snímacího zařízení nepostradatelná. Pro kalibraci digitálních fotoaparátů se využívá několik kalibračních terčů, pouhý výběr z nich je uveden v následující tabulce.

Tab. 5.1: Kalibrační terče používané ke kalibraci digitálních fotoaparátů

<b>ColorChecker SG [19]</b>	Rozšíření klasického GretagMacbeth terče 140 polí (včetně původních 24)
<b>Universal Test Target (UTT)<sup>11</sup></b>	Obsahuje převážně vzorky z GretagMacbeth terče Levnější alternativa 27 barevných polí, 4×20 polí v odstínech šedi
<b>QPcard<sup>12</sup></b>	35 barevných a šedých polí
<b>Datacolor SpyderCHECKR<sup>13</sup></b>	24 až 48 barevných a šedých polí

<sup>11</sup> *Universal Test Target Technical Specification* [online]. Fachverband für Multimediale, 2009. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:<http://www.universaltesttarget.com/specs.php>

<sup>12</sup> *Datacolor SpyderCHECKR* [online]. © 2015 Datacolor [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:<http://spyder.datacolor.com/portfolio-view/spydercheckr/>

<sup>13</sup> *Press Material* [online]. © 2011-13 QPcard. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:<http://www.qpcard.com>

## 6 Hodnocení účinnosti metod WB

V průběhu zpracování obrazového signálu se vyskytuje mnoho kroků, během kterých dochází k úpravám obrazové matice, jako například gamma korekce, ostření, demozaikování, formátová komprese a v neposlední řadě k vyvážení bílé barvy. Většinu těchto kroků upravujících obrazovou matici lze provést mnoha způsoby s různými výsledky. Tyto různé výsledky lze hodnotit dle objektivních a subjektivních kritérií. Výsledky subjektivního hodnocení metod WB udávají jejich účinnost posouzenou dle skupiny hodnotitelů (pozorovatelů). Objektivním hodnocením lze získat přesné hodnoty získané dle předem definovaných kritérií. Pomocí výsledků z těchto hodnocení určujících účinnosti metod WB lze tyto algoritmy dále porovnávat mezi sebou. V první podkapitole budou nastíněny metody subjektivního hodnocení vhodné pro porovnávání algoritmů WB a v dalších podkapitolách budou podrobněji popsány kritéria, dle kterých lze tyto algoritmy hodnotit objektivně.

### 6.1 Subjektivní hodnocení

Subjektivní hodnocení je vhodnou metodou posouzení účinnosti a kvality úpravy obrazové matice, protože pozorovatelův vjem je v mnoha případech nejdůležitější. Hodnocení skupinou hodnotitelů je možné provádět několika různými způsoby, platí to i pro zpracování obdržených výsledků z těchto hodnocení. Radiokomunikační sektor Mezinárodní telekomunikační unie (ITU – International Telecommunication Union) definoval doporučené pokyny (ITU-R BT.500-13) pro subjektivní analýzu kvality 2D obrazu a video obrazu [23]. Toto doporučení pojednává o několika různých metodách subjektivního hodnocení, z nichž každá je vhodná pro jiný problém určený k posuzování.

Tab. 6.1: Přehled metod subjektivního hodnocení kvality [23]

Double stimulus continuous quality-scale (DSCQS)	Využívá k porovnávání vstupní obrazovou matici (referenční) a obrazovou matici na výstupu posuzovaného algoritmu. Hodnotitel porovnává vždy referenční s posuzovaným dle stupnice „výborné“ až „velmi špatné“.
Single stimulus (SS)	Hodnotiteli je zobrazena testovací sekvence $n$ snímků ( $n$ posuzovaných algoritmů). Může být bez referenčního snímku.
Stimulus comparsion (SC)	Zobrazeny dvě sekvence (dva snímky) a hodnotitel porovnává poměr kvality mezi nimi. Např.: stimul A je o mnoho horší/horší/stejný/lepší/o mnoho lepší než stimul B.
Metoda nuceného výběru	Jsou zobrazeny dvě sekvence (dva snímky) a hodnotitel je nucen mezi nimi vybrat ten snímek, který se mu jeví lepší z hlediska posuzovaného atributu.

Jsou definovány i přesné podmínky, za kterých by měl hodnotitel obraz posuzovat, například maximální úhel pozorovatele vůči obrazovce, nastavení obrazovky (jas, kontrast, rozlišení, poměry stran,...), barva pozadí, osvětlení místnosti a mnoho dalších parametrů [23]. Počet hodnotitelů subjektivního testování by měl být co nejvyšší, avšak doporučuje se počet alespoň 15 hodnotitelů. Celý proces subjektivního hodnocení jednoho pozorovatele (nebo skupiny pozorovatelů) by neměl překročit dobu 45 minut, včetně samotného uvedení do problému.

Pokud je v odborné literatuře zabývající se WB hodnocena kvalita posuzovaných algoritmů subjektivními metodami, je využíváno metod, při kterých se posuzují dva snímky nebo poměr mezi nimi [26]. Z uvedených způsobů (v tab. 6.1) je to právě metoda stimulus comparison (porovnávání stimulů) neboli pair comparison (porovnávání páru). Při tomto porovnávání jsou hodnotiteli zobrazeny dva snímky (výsledky zpracování dvěma algoritmy WB) a hodnotitel určí, který z nich mu připadá lépe vyvážený (nebo více „přirozený“) [28]. Páry jsou většinou tvořeny tzv. systémem „round-robin“, což připomíná systém turnaje, kde se utká každý s každým. Se zvyšujícím se počtem algoritmů a upravovaných snímků se ale samozřejmě zvyšuje i počet posuzovaných párů a metoda subjektivního hodnocení tak může být časově náročná. Dalším z problémů je fakt, že většina subjektivních metod hodnocení vyžaduje referenční snímek, který by bylo v případě vyvážení bílé těžké určit. V odborné literatuře se zhodnocení algoritmů WB posuzuje především pomocí kvantitativních kritérií. Z uvedených důvodů bylo i v této práci upřednostněno objektivní hodnocení algoritmů WB jehož způsoby jsou popsány v následující kapitole.

## 6.2 Objektivní hodnocení

V této části je záměrem objasnit některé metody objektivního hodnocení, aplikovatelné na hodnocení algoritmů WB v digitálním obrazu. Při objektivním hodnocení algoritmů WB se většinou používají velká množství snímků (vstupních dat) obsahující barevnou tabulku nebo tzv. gray ball (míček obarvený na neutrální šedou), pomocí nichž se dají vypočítat RGB (nebo CIELAB) souřadnice, které spolu se dopředu známými referenčními souřadnicemi slouží pro porovnání účinnosti metody. Například použitá sada dat v praktické části této práce obsahovala v každém snímku barevnou kalibrační tabulku [21] nebo je možné využít několika dalších, často používaných sad<sup>14</sup>. K volnému stažení je k dispozici několik různých datových sad (tzv. data sety) obsahujících samotné pořízené snímky, souřadnice označující místo výskytu barevné tabulky (nebo šedého míčku) a občas také spektrální funkci světelného zdroje, spektrální funkci povrchu použitého referenčního bodu a spektrální funkci senzoru fotoaparátu. Referenční objekt (barevná tabulka nebo šedý míček) by měl být z obrazové matice vymaskován a z takto upravené obrazové matice mohou být dále získávány korekční koeficienty WB. Hodnocení poté probíhá pomocí vstupních obrazových matic (obsahujících nevymaskovaný referenční objekt). Pomocí metod z následujících podkapitol lze vyhodnotit rozdíly mezi barevnými souřadnicemi získanými algoritmy WB a barevnými souřadnicemi, které lze považovat za referenční.

### 6.2.1 Barevný rozdíl dle definice CIE76

V praxi se používá několik metod objektivního hodnocení zpracování snímku. Jako první je vhodné zmínit metodu výpočtu Euklidovské vzdálenosti ( $\Delta E^*_{ab}$ ), tzv. barevný rozdíl. Výpočet  $\Delta E$  je popsán různými definicemi, lze uvést například CIE76, její rozšíření CIE94 a CIEDE2000 [3]. Metody výpočtů jsou definovány Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE. Pro vypočítání barevného rozdílu  $\Delta E^*_{ab}$  jsou uvažovány dvě barvy v barevném prostoru CIELAB, který je nezávislý na zařízení. Budeme tedy uvažovat dvě barvy se souřadnicemi  $(L^*_1, a^*_1, b^*_1)$  a  $(L^*_2, a^*_2, b^*_2)$ , kde  $L^*$  je osa světlosti, a  $a^*$  a  $b^*$  popisují barvu v červeno-zeleném a modro-žlutém spektru. Dle definice CIE76 se barevný rozdíl vypočítá následujícím vztahem (6.1)[22].

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \quad (6.1)$$

### 6.2.2 Barevný rozdíl dle definice CIE94

Definice z roku 1976 pro výpočet barevného rozdílu nevyužívá váhovacích faktorů a předpokládá, že lidské oko vnímá všechny barvy rovnoměrně, a proto byla rozšířena definicí CIE94 [3]. Tato definice bere v potaz i veličiny z polárních

---

<sup>14</sup> *Data for Computer Vision and Computational Colour Science* [online]. Computational Vision Lab, 2014. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/>  
*Color Constancy Datasets* [online]. Colorconstancy.com, 2014. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: [http://colorconstancy.com/?page\\_id=21](http://colorconstancy.com/?page_id=21)



souřadnic barevného prostoru CIE-LCh, kde  $L^*$  je opět světlost (jako v prostoru CIELAB),  $C^*$  odpovídá sytosti barvy (vzdálenost od středu diagramu v obr. 2.3) a  $h^\circ$  odpovídá odstínu barvy. Veličiny  $C^*$  a  $h^\circ$  lze z prostoru CIELAB získat pomocí jednoduchých přepočtů uvedených ve vztazích 6.2 a 6.3. Pomocí vztahu 6.4 se vypočítá rozdíl v odstínu. Samotný barevný rozdíl  $\Delta E_{94}^*$  se vypočítá dle vztahu vzorce 6.5 [3].

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (6.2)$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (6.3)$$

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta E_{ab}^{*2} - (L_1^* - L_2^*)^2 - (C_1^* - C_2^*)^2} \quad (6.4)$$

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + \left( \frac{C_1^* - C_2^*}{1 + 0,045 \cdot C_1^*} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{1 + 0,015 \cdot C_1^*} \right)^2} \quad (6.5)$$

### 6.2.3 Barevný rozdíl dle definice CIEDE2000

Tato definice, poprvé zveřejněna v publikaci CIE 142-2001 [27], je založena na barevném prostoru CIELAB a je poslední z řady barevných rozdílů definovaných organizací CIE [15]. Tato definice je navržena především pro rozpoznání malých barevných rozdílů v průmyslu. Celkový výpočet barevného rozdílu  $\Delta E_{00}$  dvou barevných vzorků v souřadnicích CIELAB je mnohem složitější a komplexnější, zde je uveden pouze jeho výsledný vztah [20],

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left( \frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H} \right)^2 + R_T \cdot \left( \frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C} \right)^2 \cdot \left( \frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H} \right)^2} \quad (6.6)$$

kde  $S_L$ ,  $S_C$ ,  $S_H$  a  $R_T$  jsou váhovací funkce závislé na světlosti, odstínu a sytosti. Koeficienty  $S_H$ ,  $S_L$  jsou v této definici zařazeny nově, ale koeficient  $S_C$  je převzat z předchozí definice CIE94. Rotační faktor  $R_T$  je zde pro korekci rozdílu odstínu a sytosti v modré oblasti prostoru CIELAB. Korekční faktory  $k_L$ ,  $k_C$  a  $k_H$  jsou v dalšími vstupními hodnotami, které udávají parametry podmínek, při kterých je rozdíl posuzován [15]. Výchozím nastavením je  $k_L = k_C = k_H = 1$ , což znamená, že se posuzuje rozdíl pod podmínkami danými referenčními hodnotami. Parametry  $\Delta L'$ ,  $\Delta C'$ ,  $\Delta H'$  jsou rozdíly ve světlosti, odstínu a sytosti barvy. Tato metoda je nejpřesnější při posuzování malých barevných rozdílů, tedy když  $\Delta E < 5$  [15].

### 6.2.4 Střední kvadratická chyba

Dalším kritériem pro objektivní hodnocení algoritmů WB může být výpočet střední kvadratické chyby ( $MSE$  – Mean Square Error), kterým lze hodnotit neshodu předpovězené hodnoty se skutečnou. Jde o jeden z nejjednodušších způsobů výpočtu zkreslení. Pro výpočet rozdílu jsou v tomto případě zapotřebí referenční a výstupní (z algoritmu WB) RGB souřadnice ( $R_{REF}$ ,  $G_{REF}$ ,  $B_{REF}$  resp.  $R_{TEST}$ ,  $G_{TEST}$ ,  $B_{TEST}$ ).

Pomocí vztahu 6.7 lze vypočítat střední kvadratickou chybu mezi těmito snímky pro jeden barevný vzorek [12].

$$MSE = \frac{1}{3} [(R_{REF} - R_{TEST})^2 + (G_{REF} - G_{TEST})^2 + (B_{REF} - B_{TEST})^2] \quad (6.7)$$

Toto kritérium je často využíváno pro kvantitativní vyhodnocení výkonu algoritmů WB. Je možné počítat střední kvadratickou chybu přímo pro RGB souřadnice nebo pro jejich odvozené  $r, g$  souřadnice (bez informace o jasu). V případě objektivního hodnocení v této práci se počítá aritmetický průměr chyby přes všechny porovnávané barevné vzorky ve snímku a poté aritmetický průměr těchto chyb přes všechny zpracované snímky.

### 6.2.5 Úhlová chyba

Pomocí této metody lze vypočítat úhlovou chybu (angl. angular error) mezi vektory obsahující RGB souřadnice posuzované barvy [11]. Výpočet úhlové odchylky lze pomocí dvou RGB vektorů s referenčními a posuzovanými hodnotami provést dle následujícího vztahu,

$$\theta_{Error} = \cos^{-1} \left( \frac{\overrightarrow{RGB}_{TEST} \cdot \overrightarrow{RGB}_{REF}}{\|\overrightarrow{RGB}_{TEST}\| \cdot \|\overrightarrow{RGB}_{REF}\|} \right) \quad (6.8)$$

kde  $\overrightarrow{RGB}_{TEST} = [R_{TEST}, G_{TEST}, B_{TEST}]$  je vektor obsahující souřadnice RGB získané po WB a  $\overrightarrow{RGB}_{REF} = [R_{REF}, G_{REF}, B_{REF}]$  jsou referenční souřadnice RGB. Ze získaných chyb pro  $n$  snímků se obvykle počítá aritmetický průměr nebo medián.

### 6.2.6 Rozdíl RGB hodnot

Další metodou, jak objektivně zhodnotit algoritmy WB v digitálním obrazu, je jednoduché porovnání RGB souřadnic upravených obrazových matic se souřadnicemi, které lze považovat za referenční [2]. Pro vyhodnocení touto metodou je vhodné pořídit nevyvážené snímky obsahující barevnou tabulku (viz kapitola 5.2) a na tyto snímky aplikovat algoritmy WB. Následně získáme souřadnice RGB jednotlivých čtverců barevné tabulky ( $R_{TEST}, G_{TEST}, B_{TEST}$ ). Z článku Danny Pascale [21] lze získat RGB souřadnice vzorků barevné tabulky GretagMachbeth pro různé RGB prostory a považovat tyto souřadnice za referenční ( $R_{REF}, G_{REF}, B_{REF}$ ). Souřadnice získané z upravených snímků je poté možné s těmito referenčními souřadnicemi jednoduše porovnávat pomocí jejich rozdílu.

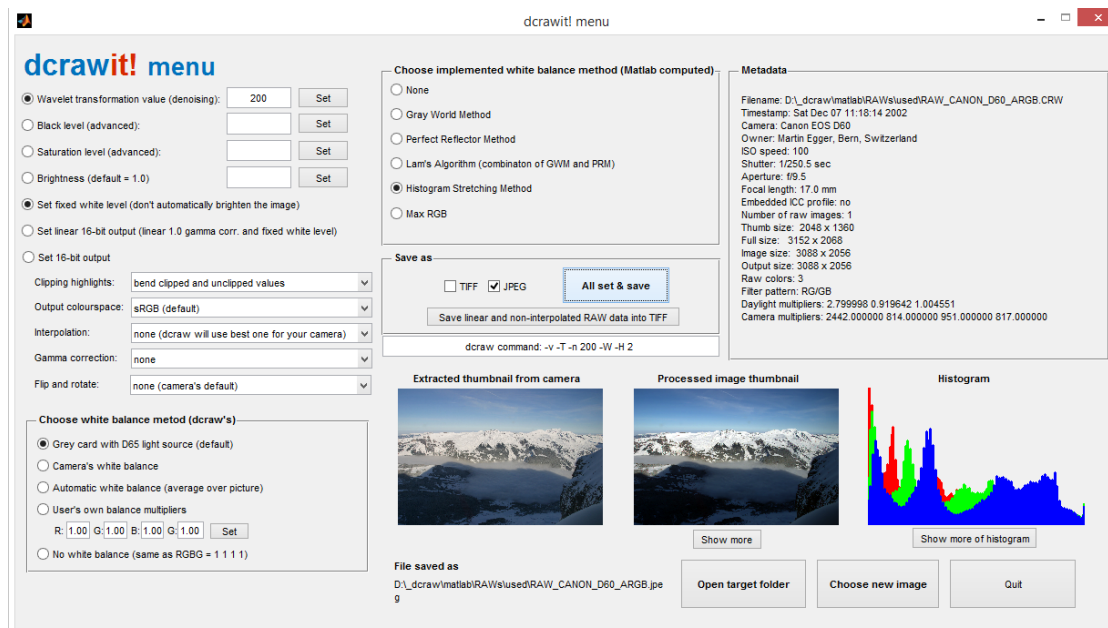
## 7 Uživatelské rozhraní dcraw

Grafické uživatelské rozhraní (dále GUI – Graphical User Interface) pro softwarový nástroj dcraw bylo vytvořeno v programovém prostředí Matlab. Důvodem realizace uživatelského rozhraní bylo především značné zjednodušení a urychlení práce s tímto nástrojem a také umožnění snadné implementace metod WB pomocí prostředí Matlab. Na obrázku 7.1 je zobrazeno vstupní okno, pomocí kterého lze pokračovat do samotného GUI. Toto okno je uživateli zobrazeno po zadání příkazu „dcraw“ do příkazového řádku prostředí Matlab (za předpokladu správně nastavené současné složky). První volbou „Select dcraw“ je uživateli umožněno vybrat si libovolnou spustitelnou verzi nástroje dcraw (\*.exe). Jako výchozí je nastavena cesta na spustitelnou verzi dcraw, která je přiložena ke skriptu. Další možností v tomto okně je volba upravovaných surových dat stisknutím tlačítka „Select raw image“. Uživatel má možnost vybrat soubor, který svým formátem odpovídá formátům podporovaných programem dcraw. Pomocí tlačítka „Continue to process image“ lze pokračovat dále do samotného GUI nebo ukončit průběh tlačítkem „Quit“. Ve vstupním oknu má uživatel také možnost přejít do rozhraní pro generování vzorků určených ke kalibraci nebo do rozhraní sloužící k samotné kalibraci fotoaparátu. Oba tyto skripty jsou podrobněji popsány v následující kapitole.



Obr. 7.1: Vstupní okno uživatelského rozhraní

Skript uživatelského rozhraní spouští nástroj dcraw na příkazové řádce a pomocí příslušných příkazů získá náhledový snímek (z fotoaparátu) a metadata vybraného souboru. Obě tyto informace jsou zobrazeny v GUI (viz obr. 7.2). Uživatel poté dle potřeby zvolí a nastaví funkce nástroje dcraw, které chce na surová data aplikovat. Na základě této volby je vytvořena struktura příkazu pro dcraw. S vytvořeným příkazem jsou poté použity zvolené funkce na načtená surová data. Po zpracování dat je zobrazen náhled na obrazovou matici ve spodní části GUI, kde je také možnost zpracovanou obrazovou matici přiblížit nebo zobrazit její RGB a jasový histogram.

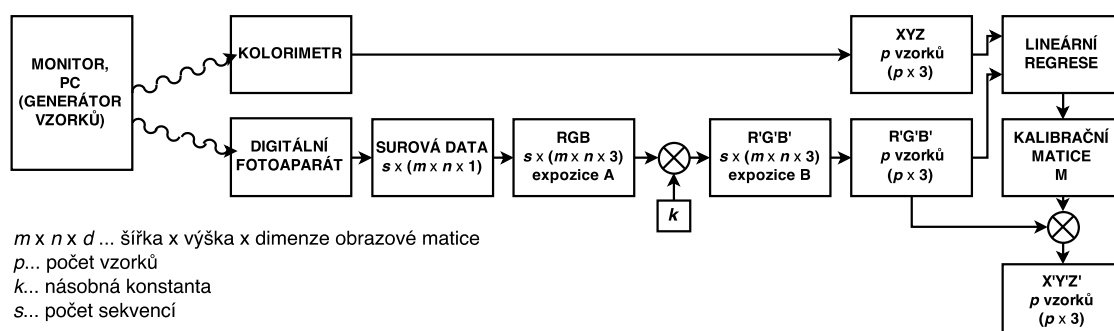


Obr. 7.2: Uživatelské rozhraní programu ddraw

Na obr. 7.2 je zobrazeno použití uživatelského rozhraní, kde má uživatel možnost aktivovat a nastavit jednotlivé funkce nástroje ddraw. Volby uživatelského rozhraní jsou založeny na možnostech nástroje ddraw, které byly podrobněji popsány ve třetí kapitole, a také na implementovaných metodách WB. Zpracovaná surová data lze uložit ve formátu TIFF, který podporuje přímo nástroj ddraw, ale je zde také možnost uložit data ve formátu JPEG přes prostředí Matlab.

## 8 Kalibrace digitálního fotoaparátu

Do GUI pro nástroj ddraw byla implementována rozhraní sloužící ke kalibraci digitálního fotoaparátu. Kolorimetrické kalibrace digitálního fotoaparátu se využívá pro co nejpřesnější barevné zachycení scény. Kalibrace fotoaparátu se skládá ze dvou hlavních částí a v rozhraní jim příslušným skriptů. První část zahrnuje pořízení snímků (v surovém formátu) se vzorky, které jsou zobrazovány na monitoru pomocí skriptu pro generování barevných vzorků. V tomto skriptu má uživatel možnost zvolit sady zobrazovaných kalibračních vzorků, jejich rozlišení a rozmístění. Vygenerováním počtu  $p$  vzorků je zobrazen počet skupin vzorků  $s$ , který se odvíjí od celkového počtu vzorků a jejich rozmístění. Vzorky mohou být zobrazovány ve skupinách zobrazujících  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$  nebo  $3 \times 3$  vzorků uspořádaných v matici (poté  $s=p$ ,  $s=p/4$  resp.  $s=p/9$ ). V dalším kroku je provedeno samotné měření pomocí digitálního fotoaparátu a spektrometru. Fotoaparátem je pořízen počet snímků odpovídající počtu skupin  $s$  a pomocí spektrometru je proveden počet měření odpovídající počtu vzorků  $p$ . Druhá část kalibrace zahrnuje načtení pořízených surových dat a naměřených XYZ souřadnic do rozhraní druhého skriptu, pomocí kterého je proveden výpočet kalibrační matice a následně dochází k použití této matice. Celý proces kalibrace je znázorněn na následujícím blokovém diagramu.



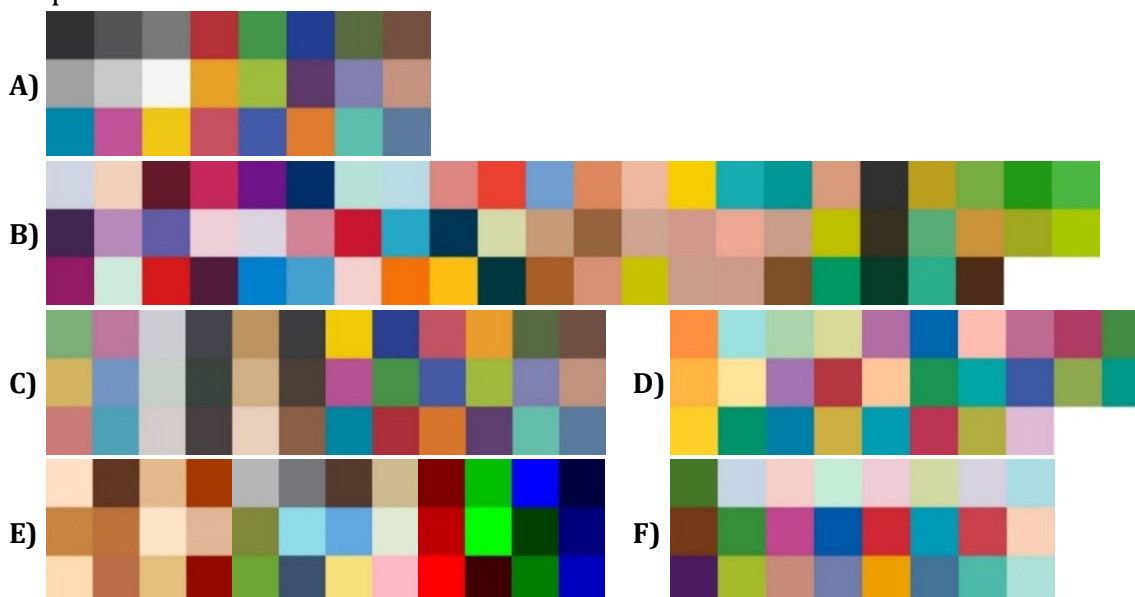
Obr. 8.1: Blokový diagram popisující proces kalibrace (mapování souřadnic RGB do XYZ)

### 8.1 Generátor kalibračních vzorků

V této části rozhraní probíhá generování kalibračních vzorků. V ovládacím menu je 6 zaškrťovacích polí, ve kterých si může uživatel vybrat z přednastavených 6 sad barevných vzorků (viz obr. 8.2). Přesnost kalibrace závisí především na vhodně vybraných vzorcích, ale z části také na počtu použitých vzorků. Se zvyšujícím se počtem vzorků se zvyšuje i počet potřebných měření, a proto je důležité zvolit vhodné vzorky, které zajistí dostatečnou přesnost kalibrace i při použití na ostatních vzorcích.

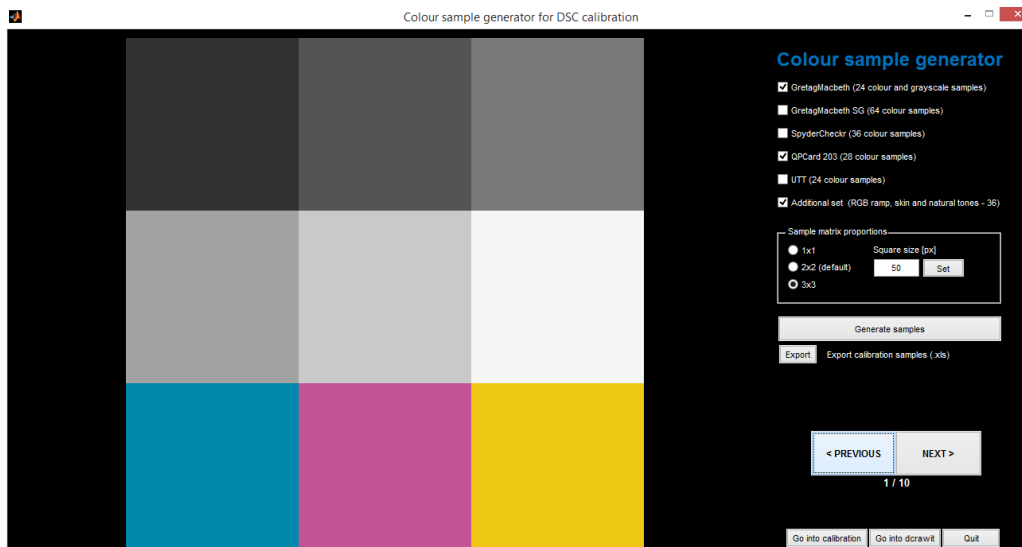
Prvních pět sad vzorků je použitých z komerčně nabízených terčů určených pro kalibraci. Sada GretagMachbeth SG původně obsahuje 140 vzorků, z nichž 24 je z původní klasické tabulky GretagMachbeth a dále obsahuje velký počet vzorků stupnice šedé. Verze tabulky GretagMachbeth SG v této práci obsahuje pouze výběr 64 ze 140 vzorků, jelikož velká většina z nezvolených vzorků obsahuje odstíny šedé.

Další sady jako QPcard a UTT jsou implementovány bez jejich stupnice šedé, jelikož stupnice šedé je již obsažena v základní tabulce GretagMacbeth. Šestá sada byla vytvořena experimentálně a slouží především pro zvětšení počtu kalibračních vzorků a obsahuje 12 odstínů pleti, 12 přírodních odstínů a 12 vzorků zastupujících stupnici RGB.



Obr. 8.2: Implementované sady barevných vzorků: A) GretagMacbeth - 24 vzorků (barevné + stupně šedi), B) GretagMacbeth SG - 64 vzorků, C) SpyderCHECKR - 36 vzorků, D) QPcard 203 - 28 vzorků, E) Doplnková sada - 36 vzorků, F) Universal Test Target - 24 vzorků

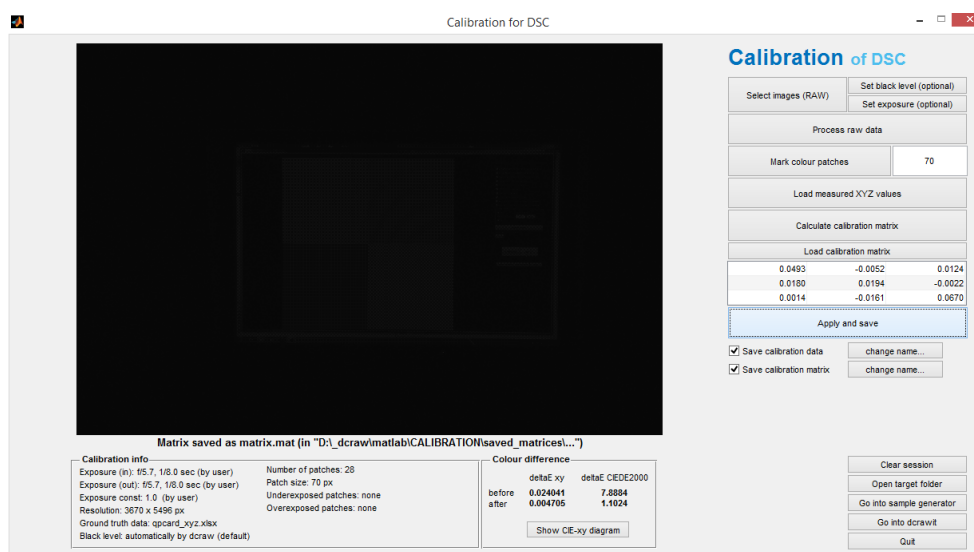
Po výběru kalibračních vzorků následuje nastavení rozmístění a velikosti vzorků. Uživatel může nechat vzorky zobrazovat vždy jeden po jednom nebo v maticovém zobrazení 2×2 a 3×3. Dále má uživatel možnost nastavit rozměr čtvercových vzorků v podobě obrazových bodů (pixelů). Výchozí nastavení pro zobrazování vzorků je zobrazení v matici 2×2 a rozměr jednoho vzorku je 50×50 pixelů. Vybrané vzorky je možné vygenerovat stisknutím tlačítka „Generate samples“ (Vygenerovat vzorky). Uživateli je také poskytnuta možnost exportu zobrazovaných vzorků v podobě tabulky RGB hodnot ve formátu xls. Pomocí tlačítek „NEXT“ a „PREVIOUS“ se lze pohybovat se mezi skupinami vygenerovaných vzorků. Na následujícím obrázku (obr. 8.3) je znázorněno použití rozhraní pro generování kalibračních vzorků. Pozadí tohoto rozhraní je černé z důvodu omezení možného vyzařování bílé/šedé z okolních obrazových bodů obrazovky, které by mohlo měření zbytečně ovlivňovat.



Obr. 8.3: Rozhraní generátoru kalibračních vzorků

## 8.2 Rozhraní pro kalibraci

V tomto rozhraní probíhá kalibrace digitálního fotoaparátu. Na obrázku 8.4 je znázorněno rozhraní při jeho použití – v hlavní části je vždy po úvodním zpracování všech načtených surových dat zobrazen první snímek, na kterém se v dalších krocích pomocí kurzoru označí jednotlivé čtvercové vzorky nasnímané fotoaparátem. Vpravo je umístěno ovládací menu kalibračního rozhraní, to bude popsáno podrobněji na následující straně. Ve spodní části GUI jsou uvedeny informace ohledně kalibrace, například hodnoty nastavení expozice, úroveň černé, rozlišení obrazových matic, počet vzorků, rozměr vzorku v obrazových bodech (přes který probíhá průměrování odečtených hodnot) a také název načteného souboru s daty obsahující referenční souřadnice XYZ.



Obr. 8.4: Rozhraní pro kalibraci digitálního fotoaparátu

Load calibration matrix		
0.0493	-0.0052	0.0124
0.0180	0.0194	-0.0022
0.0014	-0.0161	0.0670

Obr. 8.5: Menu rozhraní pro kalibraci digitálního fotoaparátu

Popis ovládání kalibračního rozhraní:

*Select images (RAW)* – volba většího množství souborů v surovém formátu přímo z digitálního fotoaparátu.

*Select black level* – nastavení hodnoty černé nebo volba RAW souboru s hodnotou černé.

*Set exposure* – volba expozice (expoziční čas, clona nebo expoziční konstanta) vstupních dat a expozice, pro kterou bude vypočtena kalibrační matice.

*Process raw data* – zpracování předzpracovaných surových dat nástrojem ddraw.

*Mark colour patches* – stisknutím tohoto tlačítka je možné pomocí kurzoru označit čtvercové vzorky.

*Patch size [px]* – možnost nastavit velikost čtverce, přes který budou průměrovány RGB souřadnice odečtených vzorků (výchozí nastavení je 50 px).

*Load measured XYZ values* – načtení tabulkového souboru (formát xls nebo csv), obsahujícího naměřené XYZ hodnoty barevných vzorků.

*Calculate calibration matrix* – provede výpočet kalibrační matice.

*Load calibration matrix* – možnost načtení kalibrační matice vypočítané v předchozích měřeních.

*Save calibration data* – uloží kalibrační data (vypočtené barevné rozdíly, názvy použitých dat, kalibrační matici a původní, naměřené a kalibrované XYZ hodnoty) do souboru ve formátu xls.

*Save calibration matrix* – uloží kalibrační matici ve formátu mat.

V následujících odstavcích bude podrobněji popsán celý proces kalibrace probíhající v tomto rozhraní. V prvním kroku je uživateli umožněno stisknout pouze první tlačítko a zvolit tak sérii snímků (minimálně 2 soubory) s kalibračními vzorky. Poté má uživatel možnost nastavit hodnotu černé nebo nahrát RAW soubor obsahující tuto úroveň (pořízený snímek s nasazenou krytkou objektivu). Hodnota černé se pro různá nastavení expozice liší v závislosti na šumu, jehož úroveň je obsažena v obrazové matici i v případě, že na senzor nedopadá žádné světlo. Úroveň šumu je značně závislá na hodnotě ISO a také na teplotě senzoru [22]. Pro kalibraci je důležité, aby byla nastavená hodnota ISO pokud možno co nejnižší, protože vyšší hodnota ISO znamená, že je potřeba méně světla dopadajícího na senzor. Nízké úrovně na senzoru musí být poté zesíleny a tím se zesiluje i případný šum. Nejjednodušší možností je však nechat tuto volbu na nástroji ddraw, který průměruje úroveň černé z obrazových bodů senzoru, skrytých před dopadajícím světlem [8].



V dalším kroku je možné nastavit hodnoty expozice (kombinace clony a expozičního času) při pořizování snímků a hodnoty pro výstupní matici, tedy takové hodnoty, pro které bude výsledná kalibrační matice určena. Možnost nastavení hodnot expozice je zde dostupná pouze pro případ, kdyby se programu z nějakého důvodu nepodařilo přechíst hodnoty ze získaných metadat surových souborů. Předzpracování vstupních surových dat s nastavenou expozicí A (s již odečtenou úrovní černé) na surová data s expozicí B, pro které bude proveden výpočet kalibrační matice, je provedeno pomocí následujících vtaů,

$$k = \left(\frac{ISO_B}{ISO_A}\right) \cdot \left(\frac{F_A}{F_B}\right)^2 \cdot \left(\frac{t_B}{t_A}\right) \quad (8.1)$$

$$RAW_B(x, y) = k \cdot RAW_A(x, y) \quad (8.2)$$

kde  $ISO$  je hodnota citlivosti ISO,  $F$  jsou clonová čísla a  $t$  jsou expoziční doby. Tato rovnice, využívající násobnou konstantu, předpokládá lineární odezvu senzoru na změnu času expozice, citlivosti ISO a nelineární závislost  $f^2$  na clonovém číslu. Clonové číslo (označováno také jako F-number) udává poměr ohniskové vzdálenosti optické soustavy  $f$  [mm] a průměru vstupní čočky  $D$  [mm] [22].

$$F = \frac{f}{D} \quad (8.3)$$

Po nastavení hodnot expozice je provedeno předzpracování surových dat pomocí nástroje *dcraw* a na jeho výstupu jsou získávána surová lineární data ze senzoru (obrazová matice bez interpolace - ve stupních šedi) [8]. Poté je po stisknutí tlačítka „*Mark colour patches*“ nutno pomocí kurzoru vybrat čtvercové kalibrační vzorky. Tento výběr je proveden pouze na první obrazové matici z celé série, protože se předpokládá, že byly vzorky sejmuty bezprostředně po sobě a fotoaparát byl umístěn na stativu, a tedy na každém dalším snímku budou vzorky opět na stejné pozici. Po vybrání  $n$  pozic ( $n = 1;4;9$ ) obsahujících příslušné souřadnice (udávající pozice v obrazové matici) čtvercových vzorků jsou odečteny RGB souřadnice všech vzorků a jejich příslušné XYZ souřadnice (souřadnice před kalibrací) získané opět pomocí nástroje *dcraw*. Tyto XYZ souřadnice jsou získávány pouze pro přibližné vyhodnocení barevného rozdílu před kalibrací a pro získání původních  $x$ ,  $y$  souřadnic do diagramu CIE-xy (viz diagramy v příloze D). V první řadě je z metadat určen typ Bayerovy masky (možnost 4 různých rozestavení Bayerovy masky pro digitální fotoaparáty - RGGB, BGGR, GBRG, GRBG) [8]. Tyto čtyři znaky reprezentují umístění barevných filtrů na matici  $2 \times 2$  světlocitlivých buněk, kde první dva znaky znamenají barevné filtry v prvním řádku a další dva v řádku druhém [22]. Pro danou oblast, ze které se odečítají hodnoty, jsou získávány RGB souřadnice pomocí mediánu z hodnot obrazových bodů odpovídajícího kanálu na poli barevných filtrů. Při získávání RGB souřadnic je také kontrolováno, zdali některý ze vzorků neobsahuje přeexponované nebo podexponované obrazové body.

Po získání střední hodnoty RGB souřadnic všech vzorků je nutné zvolit soubor obsahující naměřené souřadnice XYZ zvolených vzorků. Souřadnice vzorků musí být v tabulkovém souboru seřazeny ve stejném pořadí, jako jsou vzorky v pořízených snímcích, a musí být seřazeny do sloupců. Po nahrání souboru je provedena kontrola, zdali souhlasí počet vektorů obsahujících odečtené RGB souřadnice kalibračních vzorků s počtem vektorů obsahujících naměřené XYZ souřadnice. Stisknutím tlačítka „*Calculate calibration matrix*“ je proveden výpočet kalibrační matice o rozměrech 3×3 metodou popsanou v kapitole 5.1. Tato matice je ihned po vypočtení zobrazena v tabulce pod zmíněným tlačítkem.

Po vypočtení kalibrační matice lze pomocí zaškrtačacích polí zvolit, zdali chceme uložit kalibrační matici a kalibrační data obsahující původní, kalibrované a naměřené XYZ hodnoty, vypočtené barevné rozdíly, seznam použitých souborů surových dat a také čísla vzorků, které obsahovaly přeexponované nebo podexponované pixely. Stisknutím tlačítka „*Apply and save*“ jsou provedeny zaškrtnuté procesy a aplikace kalibrační matice. Po aplikaci kalibrační matice je zobrazen barevný rozdíl před a po kalibraci digitálního fotoaparátu ( $\Delta E$  podle definice CIEDE2000 a rozdíl barevných souřadnic  $x, y$ ) a možnost zobrazení CIE-xy diagramu, znázorňující odchylky kalibrovaných  $x, y$  souřadnic od souřadnic naměřených a od souřadnic původních.

### **8.3 Postup při kalibraci**

Jak již bylo zmíněno, celý postup kalibrace se skládá ze dvou částí. V první části je potřeba změřit a nafotit barevné vzorky. Nejobvyklejší metodou kalibrace je pořízení jednoho snímku obsahující barevnou tabulku ve fyzické podobě pro získání RGB souřadnic a následné změření XYZ souřadnic vzorků barevné tabulky. Při této metodě je velmi důležité rovnoměrné osvětlení barevné tabulky. V této práci byly získány RGB souřadnice vzorků několika takových tabulek, určených pro kalibraci, a tyto RGB souřadnice byly následně v podobě barevných vzorků zobrazovány na monitoru. Zde bylo důležité pokud možno co nejvíce minimalizovat světlo okolního prostředí tak, aby nevznikalo případné rušení. Měření bylo provedeno v zatemněné místnosti s použitím monitoru EIZO, fotoaparátu a spektrometru. Získání RGB souřadnic bylo zajištěno pomocí kvalitního digitálního fotoaparátu Canon EOS 6D s objektivem Canon EF 24-105 mm  $f/4.0L$ , který byl po celou dobu měření umístěn ve stativu. Při měření byly pořízeny snímky všech kalibračních vzorků z nabídky a některé z nich i při několika různých nastaveních doby expozice (hodnota ISO byla pevně nastavena po celou dobu měření na hodnotu 100). Nastavení expozice bylo provedeno tak, aby vzniklé snímky nebyly přeexponovány a neztrácela se tak žádná barevná informace.

Pro měření trichromatických složek XYZ byl použit kolorimetr (spektroradiometr) PR-740 od firmy PhotoResearch. Přístroj byl připojený k PC pomocí rozhraní USB, aby bylo možné z PC přímo ovládat a ihned zaznamenávat naměřená data. Přístroj PR-740 umožňuje měřit ve viditelném spektru 380 až 780 nm<sup>15</sup>. Z měření potřebného pro kalibraci byla uložena naměřená spektra a XYZ souřadnice pro všechny barevné vzorky.



Obr. 8.6: Zobrazování kalibračních vzorků na monitoru EIZO



Obr. 8.7: Přibližné uspořádání experimentu



Obr. 8.8: Spektroradiometr PhotoResearch PR-740. Převzato z<sup>15</sup>

Byly pořízeny snímky stejných kalibračních vzorků se změněnou expoziční dobou a se změnou ohniskové vzdálenosti, ale při stejném clonovém čísle. Z tohoto důvodu je fotoaparát automaticky změněn průměr clony takovým způsobem, aby zůstala zachována hodnota clonového čísla. Při experimentu se ukázalo, že násobná konstanta vypočtená dle navrženého vztahu (8.1) není zcela přesná (dále nazývána jako teoretická). V tomto případě tedy nebylo možné počítat násobnou konstantu ze získaných metadat snímků, ale musela být určena pomocí naměřených RGB souřadnic pro požadované nastavení expozice. Při přepočtu z expozice A do expozice B byl tedy vypočítán poměr jejich RGB souřadnic ( $R_B/R_A$ ,  $G_B/G_A$ ,  $B_B/B_A$ ) pro odpovídající kalibrační vzorky. Tento poměr byl spočítán pro všechny kalibrační vzorky a jeho průměr byl poté používán jako násobná konstanta (dále nazývána jako skutečná) pro přepočet mezi konkrétními nastaveními expozice. V následující tabulce je uveden přehled výsledků výpočtů teoretické a skutečné násobné konstanty pro různá nastavení expozice.

<sup>15</sup> PR-740 / PR-745 SpectraScan Spectroradiometer [online]. PhotoResearch, Inc., 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.photoresearch.com/current/pr740.asp>

Tab. 8.1: Porovnání teoretické a skutečné násobné konstanty pro různá nastavení expozice

	Nastavení expozice		Násobná konstanta $k$	
	A	B	Teoretická	Skutečná
<b>Případ 1</b>				
Clonové číslo	5,7	5,7	0,775	0,829
Expoziční čas	1/6,2 s	1/8,0 s		
Ohnisková vzdálenost	92,0 mm	75,0 mm		
ISO	100	100		
<b>Případ 2</b>	C	D	Teoretická	Skutečná
Clonové číslo	5,7	5,7	0,775	0,786
Expoziční čas	1/6,2 s	1/8,0 s		
Ohnisková vzdálenost	92,0 mm	92,0 mm		
ISO	100	100		
<b>Případ 3</b>	E	F	Teoretická	Skutečná
Clonové číslo	5,7	5,7	0,500	0,498
Expoziční čas	1/4,0 s	1/8,0 s		
Ohnisková vzdálenost	92,0 mm	92,0 mm		
ISO	100	100		

Pro případ 1 (nastavení expozice A a B) byly pořízeny snímky všech kalibračních vzorků a z jejich RGB souřadnic byla vypočtena teoretická a skutečná násobná konstanta. Tyto hodnoty se značně liší a vypočtená teoretická hodnota nebyla pro přesnost kalibrace použitelná. Díky získané skutečné násobné konstantě už bylo možné dosáhnout přesného přepočtu surových dat z expozice A do expozice B a následně ověřit přesnost kalibrace. Je totiž důležité, aby získaná kalibrační matice byla použitelná na různá nastavení expozice. Z vypočtených konstant vyplývá, že reprezentace dat digitálního fotoaparátu pro změnu expoziční doby a ohniskové vzdálenosti není lineární. Porovnání teoretické a skutečné násobné konstanty bylo provedeno i pro další nastavení expozice (případ 2 a případ 3). Při pořizování těchto snímků byla změněna pouze doba expozice a ohnisková vzdálenost (spolu s clonovým číslem) zůstala konstantní. V tomto případě se vypočtená teoretická násobná konstanta od skutečné téměř nelišila, a byla použitelná pro požadovanou přesnost kalibrace. Z této skutečnosti by vyplývalo, že nepřesnost při přepočtu vzniká při změně ohniskové vzdálenosti. Bohužel tato nastavení expozice byla použita pouze pro jeden set kalibračních vzorků, neboť se neočekávalo, že by zde mohla vzniknout tato nepřesnost.

Pro zjištění vlivu změny ohniskové vzdálenosti na výpočtu násobné konstanty byl na základě doporučení vedoucího práce implementován vztah pro výpočet tzv. efektivního clonového čísla (angl. „working f-number“) [4] do výpočtu násobné konstanty. Toto efektivní clonové číslo je závislé na zvětšení a mohlo by tak korigovat vliv změny ohniskové vzdálenosti. Clonové číslo, popisující schopnost sestavy shromažďovat světelný tok, je přesné pro objekty vzdálené nekonečně daleko (paralelní paprsky světla). Tato skutečnost se v digitální fotografii dá zanedbat vzhledem k typické vzdálenosti objektu od objektivu v poměru

s vzdáleností senzoru od čočky objektivu. Přepoččet clonového čísla na efektivní clonové číslo je využíván především při aplikacích, kdy je snímáný objekt blízko k objektivu fotoaparátu a lze ho vypočítat dle následujícího vztahu,

$$F_w = F \cdot (1 + m) \quad (8.4)$$

kde  $F_w$  je efektivní clonové číslo,  $F$  je původní udávané clonové číslo a  $m$  je kladné číslo udávající zvětšení, které lze vypočítat pomocí jednoho z následujících dvou vztahů,

$$m = \frac{h_l}{h_o}, \quad m = \frac{f}{d - f} \quad (8.5)$$

kde  $h_l$  je výška objektu promítnutého na snímáči (ta lze snadno získat pomocí rozměru snímáče a pomocí obrazových bodů udávajících rozměr objektu na obrazové matici),  $h_o$  je výška reálného objektu. V druhém vztahu  $f$  značí ohniskovou vzdálenost a  $d$  vzdálenost objektu na scéně od objektivu fotoaparátu. Dle uvedených vztahů bylo získáno zvětšení a poté efektivní clonové číslo pro různá nastavení expozice. V následující tabulce je uveden příklad při korekci vlivu ohniskové vzdálenosti pomocí efektivního clonového čísla pouze pro případ nastavení expozice A a B (uvedeno v předchozí tab. 8.1).

Tab. 8.2: Korekce vlivu ohniskové vzdálenosti pomocí efektivního clonového čísla

	Nastavení expozice		Násobná konstanta $k$		
	A	B	Bez korekce vlivu $f$	S korekcí vlivu $f$	Skutečná
<b>Případ 1</b>					
Clonové číslo $F$	5,7	5,7	0,775	<b>0,790</b>	0,829
Efektivní clonové číslo $F_w$	5,974	5,917			
Expoziční čas $t$ [s]	1/6,2	1/8,0			
Ohnisková vzdálenost $f$ [mm]	92,0	75,0			

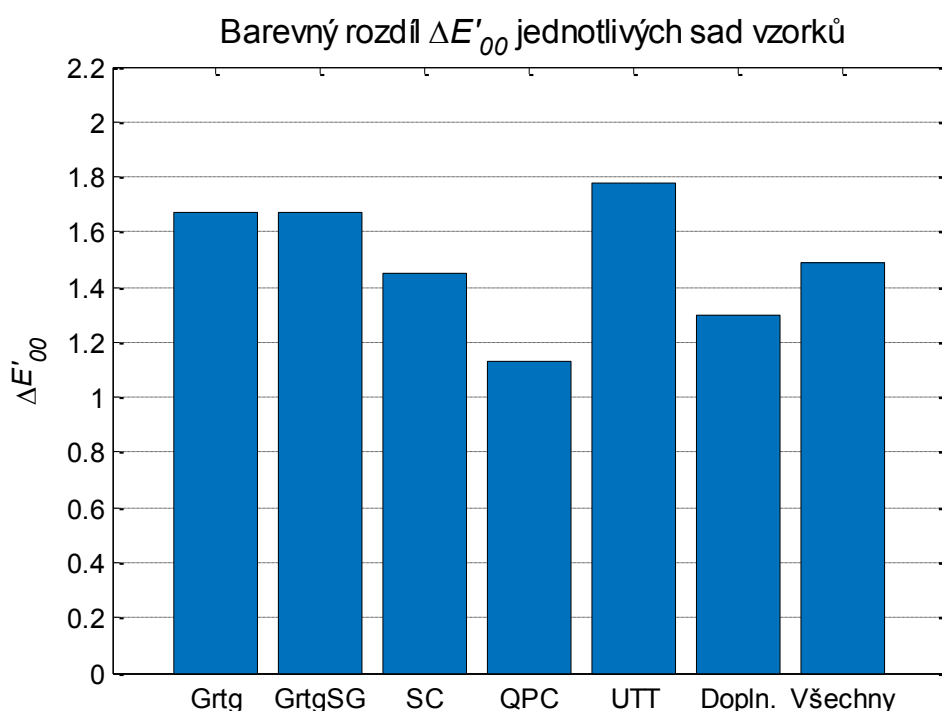
Z uvedených výsledků je zřejmé, že ani po korekci ohniskové vzdálenosti pomocí efektivního clonového čísla nezískáváme násobnou konstantu, která by odpovídala skutečné násobné konstantě vypočítané pomocí poměru intenzit mezi jednotlivými expozicemi. V budoucnu by bylo vhodné zopakovat měření, při kterém by se zaznamenala data při větším množství nastavených expozic, hodnot ohniskové vzdálenosti a dále i několika přesněji zaznamenaných změn vzdálenosti mezi systémy displej-fotoaparát, což by mohlo vést ke zlepšení přesnosti výpočtu násobné konstanty. Bohužel se nepodařilo zjistit příčinu, která ovlivňovala výpočet teoretické násobné konstanty a tak se v dalších výpočtech pro zjištění přesnosti kalibrace využívala násobná konstanta získaná pomocí poměru úrovní (skutečná).

## 8.4 Výsledky kalibrace

Výpočet kalibrační matice a následný výpočet odhadovaných souřadnic XYZ barevných vzorků ze získaných souřadnic RGB je proveden podle postupu uvedeného v předchozích podkapitolách. Pro zhodnocení přesnosti kalibrace byl proveden výpočet barevného rozdílu  $\Delta E_{00}$  (dle definice CIEDE2000) a rozdíl  $\Delta xy$  pro všechny sady kalibračních vzorků jednotlivě a poté barevný rozdíl kalibrace pro všechny kalibrační vzorky zároveň. Dle definice CIEDE2000 se dá považovat  $\Delta E=0,5$  za JND (Just-noticeable difference, z angl. přeloženo jen patrný rozdíl) [30]. V následující tabulce je přehled barevných rozdílů před ( $\Delta E_{00}$  a  $\Delta xy$ ) a po kalibraci ( $\Delta E_{00}'$  a  $\Delta xy'$ ) provedených na jednotlivých a všech sadách vzorků.

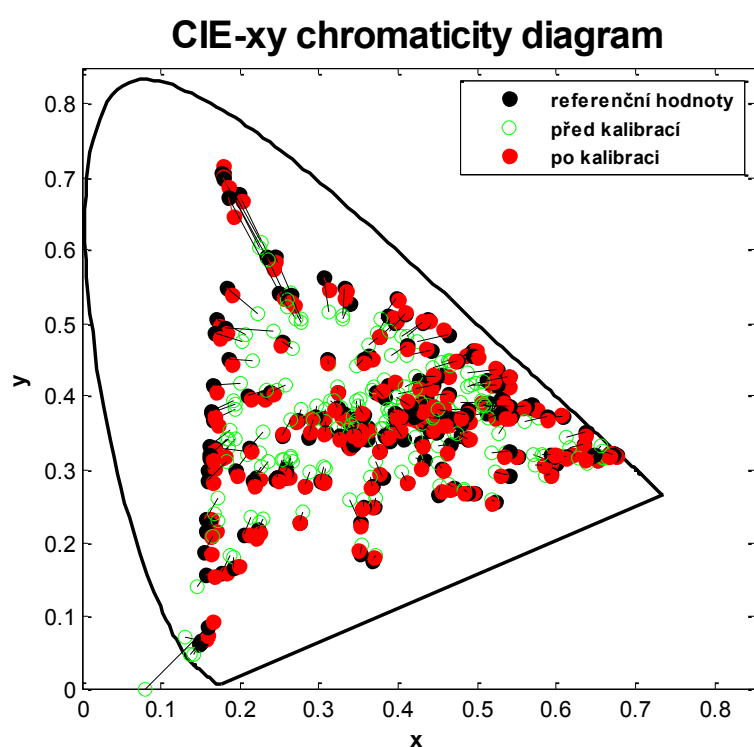
Tab. 8.3: Porovnání barevných rozdílů v případě kalibrace jednotlivých sad kalibračních vzorků a v případě kalibrace všech vzorků

Sada vzorků (počet vzorků)	$\Delta E_{00}$	$\Delta E'_{00}$	$\Delta xy [10^2]$	$\Delta xy' [10^2]$
GretagMacbeth (24)	8,01	1,67	2,09	0,55
GretagMacbeth SG (64)	8,24	1,67	2,59	0,69
SpyderCHECKR (36)	7,69	1,48	1,89	0,61
QPcard 203 (28)	7,84	1,13	2,41	0,47
Universal Test Target (24)	8,09	1,78	2,30	0,70
Doplňená sada (36)	7,97	1,30	3,45	0,73
Všechny kalibrační vzorky (212)	8,39	1,49	2,54	0,63



Obr. 8.9: Sloupcový graf znázorňující barevný rozdíl kalibrace při použití vybraných matic na testovací sady. Vysvětlivky popisu osy x – Grtg (GretagMacbeth), GrtgSG (GretagMacbeth SG), SC (SpyderCHECKR), QPC (QPcard), UTT (Universal Test Target), Dopln. (Doplňková sada), Všechny (sada obsahující všechny vzorky)

Z výsledků uvedených v tabulce 8.3 a z grafu na obr. 8.9 je zřejmé, že vyšší počet vzorků nemusí nutně zajistit vyšší přesnost kalibrace na použité sadě vzorků. Zde je především důležitý správný výběr barevných vzorků. Sada kalibračních vzorků z terče QPcard dosahovala nejnižšího barevného rozdílu  $\Delta E_{00}$  a  $\Delta xy$ . Doplnková sada byla do rozhraní přidána především pro rozšíření množství vzorků o chybějící typy odstínů a i když dosahuje poměrně nízké hodnoty barevného rozdílu, není vhodné ji používat ke kalibraci samostatně, protože neobsahuje odborně vybírané barvy a výsledná kalibrační matice by nemusela vykazovat dostatečnou přesnost. Tuto skutečnost by bylo vhodné v budoucnosti ještě ověřit pomocí měření většího počtu vzorků. Na obrázku 8.10 je CIE-xy diagram získaný po kalibraci provedené pomocí všech vzorků, ostatní diagramy, získané po kalibracích pomocí ostatních sad vzorků jsou zobrazeny v příloze D.

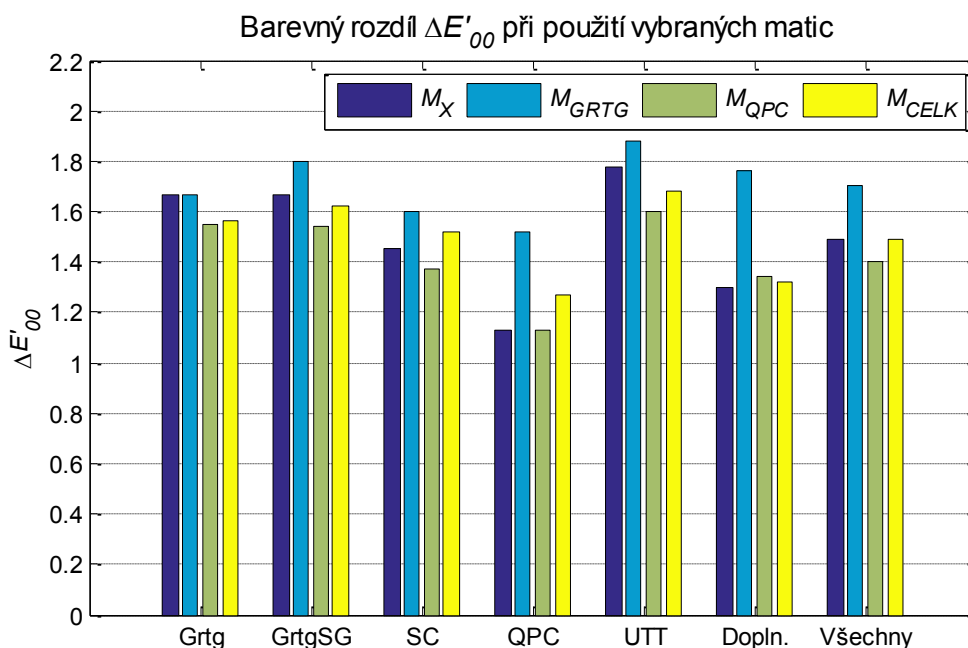


Obr. 8.10: CIE xy diagram znázorňující kalibraci provedenou všemi vzorky

Předchozím způsobem však nebylo ověřeno, zdali bude kalibrace dosahovat podobné přesnosti i při použití na ostatních (testovacích) vzorcích. Pro další ověření přesnosti kalibrace bylo provedeno zhodnocení výkonu kalibrační matice získané zahrnutím všech vzorků ( $\mathbf{M}_{\text{CELK}}$ ), matice získané ze vzorků kalibračního terče QPcard, a pro porovnání i ze vzorků GretagMacbeth ( $\mathbf{M}_{\text{QPC}}$  resp.  $\mathbf{M}_{\text{GRTG}}$ ). Pro zhodnocení přesnosti byly tyto matice použity na ostatních vzorcích z možného výběru (dále testovacích vzorcích). V následující tabulce je uveden barevný rozdíl získaný pro testované sady vzorků pomocí matice získané z testované sady ( $\Delta E'_{00}(\mathbf{M}_x)$ ), rozdíl získaný pomocí kalibrace maticemi  $\mathbf{M}_{\text{GRTG}}$ ,  $\mathbf{M}_{\text{QPC}}$  a  $\mathbf{M}_{\text{CELK}}$  ( $\Delta E'_{00}(\mathbf{M}_{\text{GRTG}}$  atd.), a jejich rozdíly s  $\Delta E'_{00}(\mathbf{M}_x)$ .

Tab. 8.4: Vyhodnocení výkonu kalibrace pomocí matic  $M_{GRTG}$ ,  $M_{QPC}$  a  $M_{CELK}$

Sada vzorků	1 $\Delta E'_{00}$ ( $M_X$ )	2 $\Delta E'_{00}$ ( $M_{GRTG}$ )	Rozdíl 1 a 2	3 $\Delta E'_{00}$ ( $M_{QPC}$ )	Rozdíl 1 a 3	4 $\Delta E'_{00}$ ( $M_{CELK}$ )	Rozdíl 1 a 4
GretagMacbeth	1,67	1,67	0,00	1,55	-0,12	1,56	-0,11
GretagMacbeth SG	1,67	1,80	+0,13	1,54	-0,13	1,62	-0,05
SpyderCHECKR	1,45	1,60	+0,15	1,37	-0,08	1,52	+0,07
QPCard	1,13	1,52	+0,39	1,13	0,00	1,27	+0,14
Universal Test Target	1,78	1,88	+0,10	1,60	-0,18	1,68	-0,10
Doplňková sada	1,30	1,76	+0,46	1,34	+0,04	1,32	+0,02
Všechny vzorky	1,49	1,70	+0,21	1,40	-0,09	1,49	0,00



Obr. 8.11: Sloupcový graf znázorňující barevný rozdíl kalibrace při použití vybraných matic na testovací sady. Vysvětlivky os x jsou uvedeny u obr. 9.9

Z výsledků lze vyčíst, že kalibrace pomocí matice  $M_{QPC}$  (získané ze vzorků QPCard) dosahovala nejnižšího barevného rozdílu při použití na téměř všech testovacích vzorcích. Také bylo ověřeno, že vysoké množství vzorků, použitých pro kalibraci, nemusí znamenat vyšší přesnost [29]. Kalibrační matice  $M_{CELK}$ , získaná všemi vzorky, dokázala u některých testovacích sad snížit barevný rozdíl, ale matice  $M_{QPC}$ , získaná sadou QPCard, dosahovala vždy větší přesnosti (s výjimkou použití na doplňkové sadě). Bylo zjištěno, že kalibrační matice  $M_{QPC}$  snižovala barevný rozdíl na testovacích sadách v průměru o 0,09 jednotky CIEDE200 a  $M_{CELK}$  o 0,005. Pokud bychom porovnávali vizuálně rozpoznatelný rozdíl, bylo by možné obě tyto hodnoty považovat za zanedbatelné, jelikož jak již bylo uvedeno u barevného rozdílu dle CIEDE2000 se dá považovat  $\Delta E=0,5$  za JND. Při použití matice  $M_{GRTG}$  došlo ke zvýšení barevného rozdílu průměrně o 0,24 jednotky CIEDE2000, což by se dalo opět zanedbat a považovat za přijatelné. Z uvedených možností vyšla nejvyšší vzdálenost mezi rozdíly při použití matic  $M_{QPC}$  a  $M_{GRTG}$  na testovací sadu všech vzorků, kde vznikla odchylka 0,4 jednotky CIEDE2000 což už se přiblížilo JND.

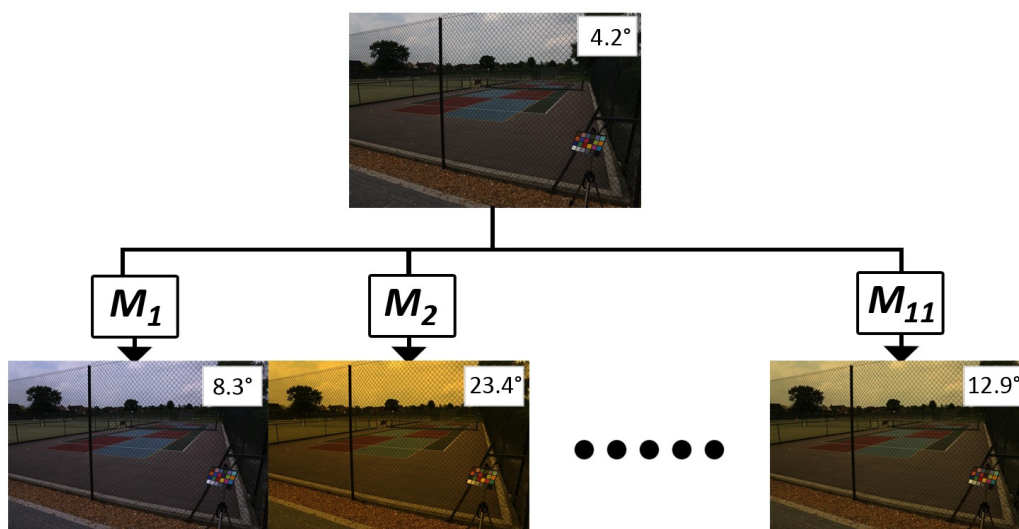


## 9 Objektivní hodnocení metod WB

Pro zhodnocení účinnosti metod WB, použitých v této práci (viz kapitola 4), byla upřednostněna objektivní kritéria před subjektivními. Při subjektivním hodnocení je potřeba většího množství hodnotitelů a při hodnocení pěti vybraných algoritmů WB by byl celý proces subjektivního hodnocení zdlouhavý. Objektivním hodnocením účinnosti metod WB na větším množství dat získáme kvantitativní výsledky, pomocí kterých lze tyto metody porovnávat.

### 9.1 Navržená metoda objektivního hodnocení

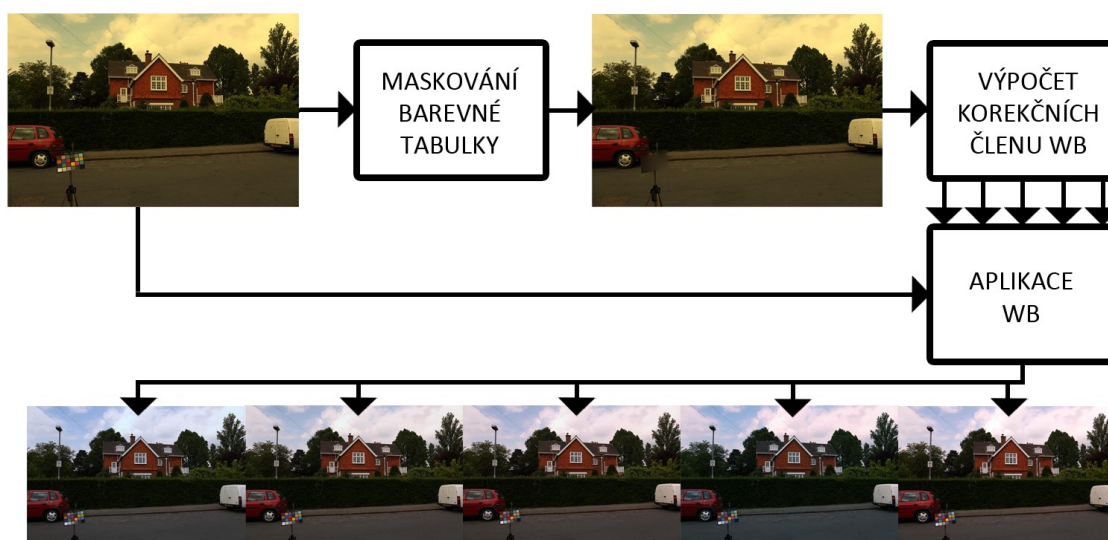
Protože je třeba metody WB vyzkoušet na velkém množství snímků, byla pro objektivní hodnocení využita sada pořízených fotografií obsahujících klasickou barevnou tabulku GretagMacbeth s 24mi barevnými vzorky. Sada snímků [14], kterou realizoval Peter Gehler, Carsten Rother, Andrew Blake, Tom Minka a Toby Sharp, obsahuje 568 snímků pořízených ve městě Cambridge a v jeho okolí. Snímky jsou pořízené digitálními fotoaparáty Canon 5D a Canon 1D jako surová data, ta jsou softwarem dále zpracována, zmenšena (na 20% z původního rozlišení) a převedena do formátu TIFF. Z těchto 568 snímků bylo vybráno 231 snímků, které zastupují běžné snímky (klasické scény), barevná tabulka zde pokrývá více než cca 5% snímku a také pokud možno je rovnoměrně osvětlena. Velikost barevné tabulky ve snímcích byla zásadní, z důvodu obtížného získávání souřadnic RGB jednotlivých barevných čtverců z již zmenšených snímků. Pro správné odečtení průměrných hodnot RGB (aby se do průměru nezapočítávaly i hodnoty z okrajů tabulky) z barevných polí, je potřeba, aby mělo každé barevné pole z tabulky na snímku rozměry alespoň  $7 \times 7$  obrazových bodů. Každý snímek z této sady byl upraven 10 maticemi, využívanými pro chromatické přizpůsobení [24], tedy z jednoho snímku (s automatickým WB podle digitálního fotoaparátu) vzniklo 10 nevyvážených barevně snímků. Tato úprava je znázorněna na obrázku 9.1, kde nahoře je původní snímek s vyvážením pomocí digitálního fotoaparátu.



Obr. 9.1: Znázornění syntetického vytvoření nevyvážených snímků

V pravém rohu snímku je vždy uvedena úhlová chyba dané obrazové matice ve srovnání s referenčními hodnotami. Jako referenční RGB hodnoty jsou považovány hodnoty barevné tabulky z článku, jehož autorem je Danny Pascale [21]. Tyto referenční souřadnice RGB vznikly zprůměrováním měření několika barevných tabulek různého stáří a od několika majitelů.

Na takto upravené snímky jsou poté aplikovány jednotlivé metody WB. Ještě předtím, než bude upravený snímek vyvážen některým z algoritmů, je důležité, aby byla ze snímku vymaskována barevná tabulka. Maskování barevné tabulky bylo provedeno nahrazením tabulky interpolováním hodnot z jejího okolí. Tabulku je potřeba vymaskovat proto, aby neovlivňovala výpočty algoritmů WB a tak i výsledné hodnoty. Zejména algoritmy PR a Max RGB, které vyvažují podle maximálních hodnot souřadnic RGB v upravovaném snímku, by ve většině případů získávaly hodnoty právě z bílého čtverce barevné tabulky. Ze snímku s vymaskovanou barevnou tabulkou (obr. 9.2 vpravo nahoře) jsou získány korekční koeficienty jednotlivých metod WB a ty jsou následně použity na snímek s nevymaskovanou barevnou tabulkou (obr. 9.2 vlevo nahoře).



Obr. 9.2: Blokový diagram procesu získání vyvážených snímků pro objektivní hodnocení

Z obrazových matic vyvážených pomocí implementovaných algoritmů WB jsou získány RGB souřadnice všech 24 polí barevné tabulky jako vektory  $RGB_{test} = [R_{test}, G_{test}, B_{test}]$ . Poté jsou tyto získané hodnoty  $RGB_{test}$  porovnávány s hodnotami referenčními  $RGB_{ref} = [R_{ref}, G_{ref}, B_{ref}]$ . Pro objektivní porovnání získaných souřadnic byly vybrány vztahy pro výpočet úhlové chyby, střední kvadratické chyby pro normalizované souřadnice  $r, g$  (oba tyto výpočty jsou uvedené v kapitole 7.2). Normalizované  $r, g$  bylo zvoleno proto, že tato transformace z RGB souřadnic odstraní informaci o jasu a minimalizuje se tak chyba výpočtu pro případy, kdy nebyla barevná tabulka správně nasvětlena. Jako poslední je proveden přesný

výpočet barevného rozdílu  $\Delta E$  pomocí definice CIEDE2000, která je podrobněji popsána v kapitole 7.2.3.

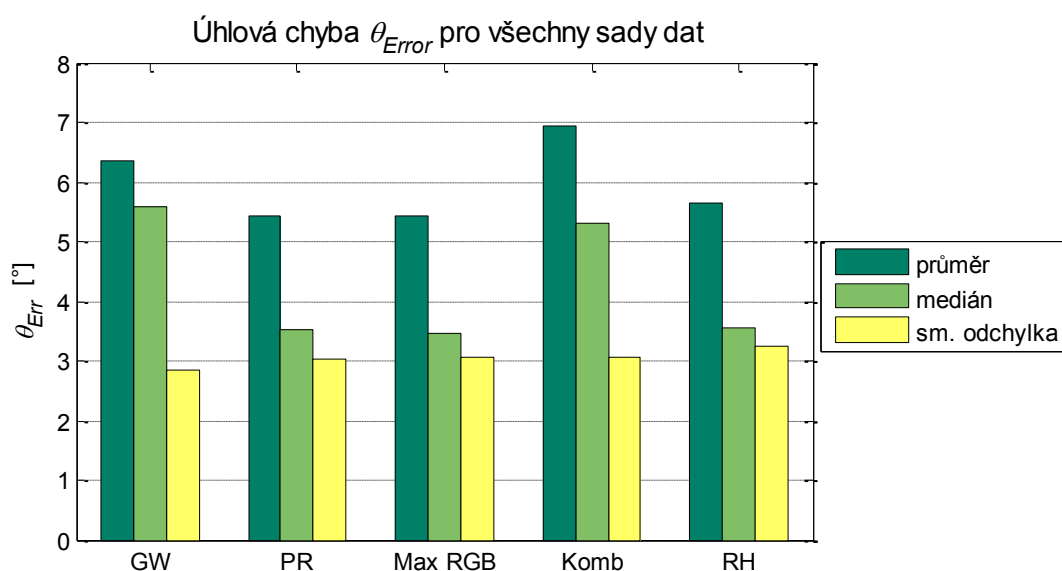
Po získání hodnot vyvážených snímků a vypočítání jejich barevných rozdílů uvedenými metodami je vždy provedeno průměrování jednotlivých chyb nebo barevných rozdílů přes všechny vzorky v barevné tabulce. Tím se získá chyba dané metody WB použité na daný nevyvážený snímek. Následně je získána střední hodnota chyb všech vyvážených snímků pro jednotlivé metody WB. Touto navrženou metodou objektivního hodnocení kvality algoritmů WB je ze vstupních 231 snímků získáno 2310 barevně nevyvážených snímků pomocí 10 matic. Tyto nevyvážené snímky byly následně zpracovány pomocí 5 algoritmů WB (11550 výsledných vyvážených snímků). Celkem bylo pomocí 3 různých metod vyhodnocení rozdílů získáno 34650 hodnot barevných rozdílů barevnými tabulkami na vyvážené fotografii oproti hodnotám referenčním a z těchto hodnot byly dále získávány střední hodnoty barevných rozdílů a chyb.

## 9.2 Výsledky objektivního hodnocení

Ve výsledném vyhodnocení je uveden aritmetický průměr a medián úhlové chyby přes všechny zpracované snímky jednotlivých metod. Dalším parametrem objektivního hodnocení byl barevný rozdíl  $\Delta E$ , který byl vypočítán pomocí přesné metody CIEDE2000. Ve vyhodnocení je uveden aritmetický průměr a směrodatná odchylka přes všechny zpracované snímky. Třetím kritériem objektivního hodnocení byla střední kvadratická chyba normalizovaných RGB souřadnic, pro který byl vyhodnocen průměr i medián. Zpracované snímky a jejich vypočtené chyby byly ještě rozděleny do dvou kategorií, a to na snímky pořízené ve venkovním prostředí (dále outdoor) a na snímky pořízené uvnitř (dále indoor). V následující tabulce (tab. 9.1) jsou uvedeny výsledky hodnocení metod WB pro všechny snímky z použité sady dat.

Tab. 9.1: Výsledky objektivního hodnocení pro všechny sady dat (celkem 231 snímků)

Metoda výpočtu	Střední hodnota	Gray World	Perfect Reflector	Max RGB	Kombinace GW + PR	RH
$\theta_{Error}$	průměr	6,35°	5,42°	5,43°	6,95°	5,66°
	medián	5,59°	3,52°	3,48°	5,31°	3,54°
	směr. odch.	2,85°	3,04°	3,06°	3,05°	3,24°
$\Delta E_{00}^*$	průměr	13,85	12,30	12,35	13,82	12,07
	směr. odch.	4,21	4,28	4,27	4,08	3,76
$MSE_{rgb}$ [·10 <sup>3</sup> ]	průměr	2,04	1,84	1,85	2,97	2,26
	medián	1,43	1,10	1,12	2,05	1,20
	směr. odch.	1,91	2,37	2,33	4,23	3,34



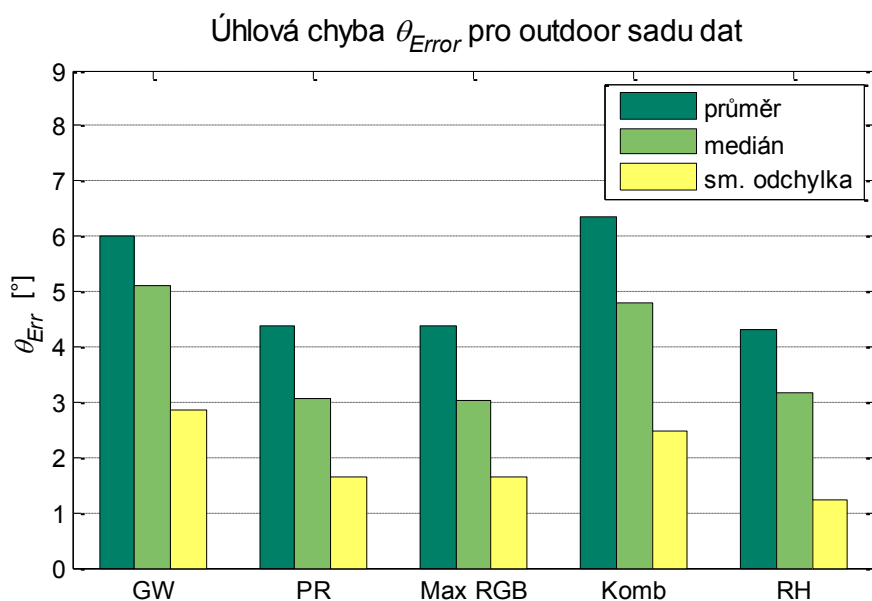
Obr. 9.3: Sloupcový graf zobrazující úhlovou chybu (průměr a medián) přes všechny vstupní snímky. Popis osy x: GW – Gray World, PR – Perfect Reflector, MaxRGB – MaxRGB, Komb – Kombinace GW + PR, RH – Roztahování histogramu.

Pokud bychom vyhodnocovali pomocí úhlové chyby, což je také kritérium, podle kterého se metody WB v literatuře hodnotí velmi často, tak z výsledků pro všechny zpracované snímky vychází jako nejlepší metody PR, Max RGB a metoda roztahování histogramu. Metoda PR a metoda Max RGB jsou si velmi podobné, a proto také dosahují velmi podobných výsledků.

Úhlová chyba použitých metod na snímky pořízené z outdoor sady dat je velmi podobná s výsledky ze všech snímků, což je převážně způsobeno tím, že počet venkovních snímků převažoval počet snímků pořízených uvnitř (viz grafy v obr. 9.3 a 9.4). Nejpřesnější byly opět metody PR, Max RGB a roztahování histogramu. Pokud porovnáme směrodatnou odchylku metody GW vyhodnocenou pro celkovou sadu dat a pro outdoor sadu dat tak lze usoudit, že právě na venkovních snímcích nedosahuje tato metoda WB takových kvalit jako ostatní metody.

Tab. 9.2: Výsledky objektivního hodnocení pro outdoor sadu dat (144 snímků)

Metoda výpočtu	Střední hodnota	Gray World	Perfect Reflector	Max RGB	Kombinace GW + PR	RH
$\theta_{Error}$	průměr	6,00°	4,37°	4,39°	6,34°	4,32°
	medián	5,11°	3,06°	3,04°	4,78°	3,16°
	směr. odch.	2,86°	1,64°	1,66°	2,48°	1,24°
$\Delta E_{00}^*$	průměr	13,63	11,56	11,63	13,5	11,55
	směr. odch.	4,22	4,07	3,95	4,12	3,45
$MSE_{rgb}$ [·10 <sup>3</sup> ]	průměr	1,78	1,06	1,08	2,17	1,09
	medián	1,12	0,92	0,91	1,58	0,93
	směr. odch.	1,51	0,76	0,73	1,65	0,58



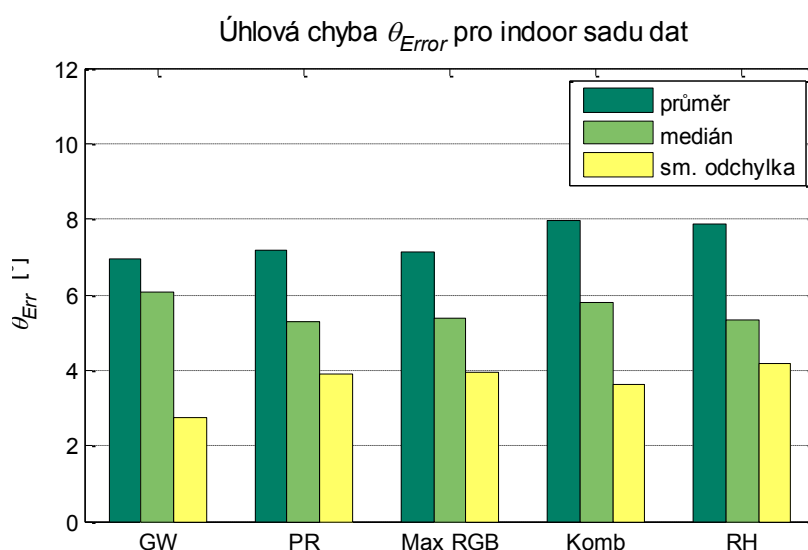
Obr. 9.4: Úhlová chyba pro outdoor sadu dat. Popis osy x (viz obr 9.3).

Metoda roztahování histogramu produkuje snímky, které mohou být vizuálně přitažlivější, jelikož se pomocí této metody automaticky upravuje i kontrast snímku, ale nemusí pak dosahovat tolik přesné reprodukce barev. To je zřejmé při použití této metody na indoor sadě snímků, kde dosahuje poměrně velké úhlové chyby.

Posledních 87 vstupních snímků bylo pořízeno uvnitř budov. Metody PR a Max RGB zde dosahují nejlepších výsledků při hodnocení barevného rozdílu dle CIEDE2000 a také při posouzení mediánu z úhlové chyby a ze střední kvadratické chyby. Při vyhodnocení tohoto setu podle průměrné úhlové chyby vychází metoda šedého světa jako nejpřesnější, což potvrzuje její robustnost. To může být způsobeno především tím, že proti venkovním snímkům je zde častěji splněna podmínka této metody a průměrná barva scény je šedá, protože snímky jsou rovnoměrněji barevně zastoupeny. Metoda kombinující GW a PR není příliš přesná a při vyvažování snímků se silným zbarvením dosahuje dokonce velmi špatných výsledků a vytváří tak další nevyvážený snímek (viz obrázky v přílohách A a B).

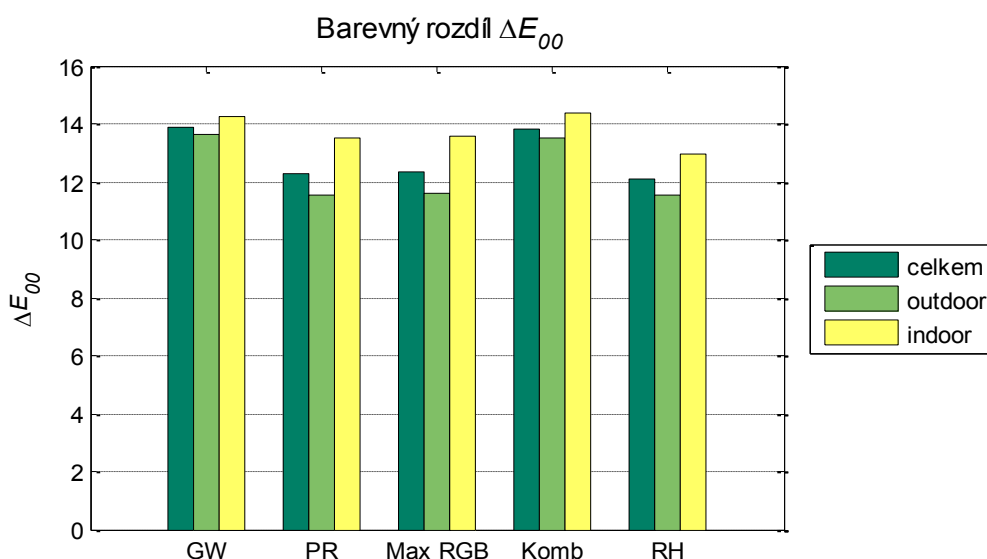
Tab. 9.3: Výsledky objektivního hodnocení pro indoor sadu dat (87 snímků)

Metoda výpočtu	Střední hodnota	Gray World	Perfect Reflector	Max RGB	Kombinace GW + PR	RH
$\theta_{Error}$	průměr	6,95°	7,16°	7,15°	7,95°	7,89°
	medián	6,09°	5,27°	5,40°	5,79°	5,32°
	směr. odch.	2,76°	3,91°	3,96°	3,62°	4,19°
$\Delta E_{00}^*$	průměr	14,23	13,52	13,55	14,34	12,93
	směr. odch.	4,15	4,32	4,50	3,95	4,13
$MSE_{rgb}$ [·10 <sup>3</sup> ]	průměr	2,47	3,14	3,14	3,75	3,91
	medián	1,95	1,84	1,84	2,91	2,14
	směr. odch.	2,09	3,38	3,32	3,02	3,86



Obr. 9.5: Úhlová chyba pro indoor sadu dat. Popis osy x (viz obr 9.3).

Metoda roztahování histogramu dosahuje podle všech kritérií průměrných výsledků a při vyhodnocení barevného rozdílu CIEDE2000 vychází jako nejpřesnější. Dalo by se diskutovat o přesnosti a použitelnosti tohoto výpočtu barevného rozdílu, protože je určen (je nejpřesnější) především pro aplikace, kdy  $\Delta E < 5$ . Metoda GW, spolu s metodou kombinující GW a PR, dosáhly v této kategorii nejhorších výsledků v obou posuzovaných sadách snímků. Metoda šedého světa bude ze své podstaty fungovat špatně na snímcích, kde převládá jedna barva (nebo je podstatně zbarvena), a to byly v tomto setu dat převážně snímky, na kterých byl velký podíl např. travnaté plochy, zeleně a oblohy. Metoda kombinující GW a PR byla v porovnání s ostatními nejméně přesná a v mnoha případech vytvořila snímek se značným posunem barev (viz příloha A a B). Hodnocení pomocí metody CIEDE2000 přináší podobné výsledky, jako jsou výsledky hodnocení pomocí úhlové chyby. Tato metoda je pro zhodnocení algoritmů WB na použitých snímcích poněkud „přísná“, jelikož není potřeba měřit tak přesné barevné rozdíly, na které je navržena. Uvedená metoda se také vzhledem ke zdlouhavému výpočtu, v literatuře zabývající se WB příliš nevyužívá.

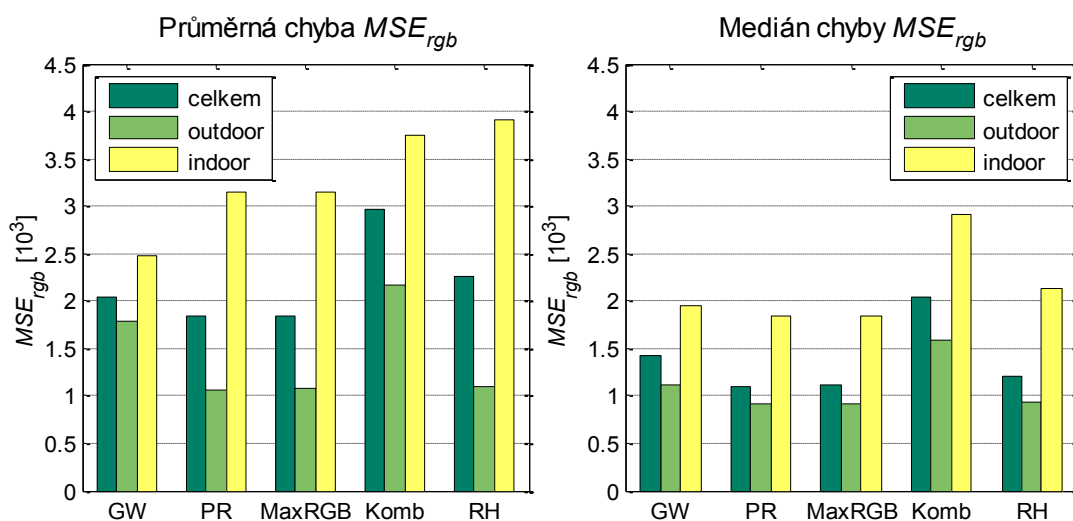


Obr. 9.6: Průměr barevného rozdílu CIEDE2000. Popis osy x (viz obr 9.3).

Výsledky střední kvadratické chyby přinášejí podobné výsledky jak pro všechny vstupní snímky, tak pro outdoor sadu snímků. Metoda kombinující GW a PR opět vychází jako nejméně přesná a metody PR a Max RGB dosahují nejnížší střední kvadratické chyby. Výsledky indoor sady dat jsou zde však velmi rozdílné. U této sady dosahuje metoda roztahování histogramu velké kvadratické chyby, pokud se počítá její průměr přes 87 zpracovaných snímků, ale pokud se počítá medián, tak jsou tyto výsledky téměř podobné s výsledky ostatních metod výpočtu chyby. To je způsobeno především tím, že u několika snímků z této sady dosáhla metoda extrémně vysoké hodnoty *MSE*, což značně ovlivnilo výsledný průměr. Několik podobných případů se vyskytlo i u metod založených na teorii retinex a u metody kombinující GW a PR, ta ale dosahuje poměrně špatných výsledků i když je

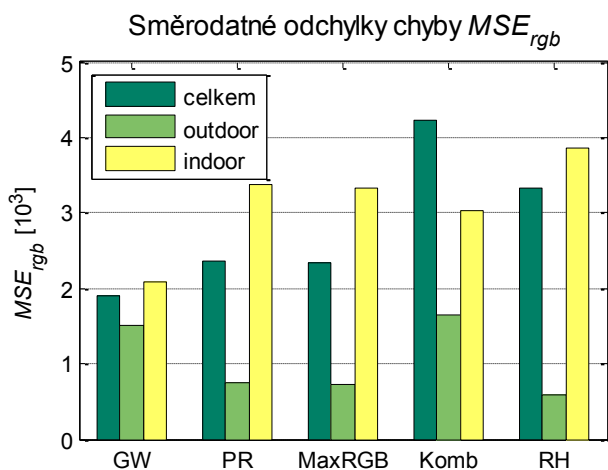


vyhodnocen medián střední kvadratické chyby. Z těchto výsledků lze opět posoudit metodu GW jako robustní, což je zřejmé z dosažení velmi podobných hodnot střední kvadratické chyby při vyhodnocení průměru i mediánu.



Obr. 9.7: Sloupcové grafy znázorňující průměr a medián střední kvadratické chyby  $MSE$  pro všechny metody WB použité na jednotlivé a všechny sady dat. Popis osy x (viz obr 9.3).

Při posouzení směrodatných odchylek  $MSE$  pro všechny sady dat i pro jednotlivé sady dat lze potvrdit robustnost metody GW. Ostatní metody mají poměrně velké rozdíly směrodatných odchylek pro jednotlivé sady dat. Metoda GW dosahuje nižší směrodatné odchylky u indoor data setu, který jak již bylo uvedeno, obsahuje rovnoměrněji barevně zastoupené snímky. U outdoor sady dat dosahuje tato metoda sice podobné směrodatné odchylky, ale při porovnání s ostatními algoritmy vychází jako horší (s výjimkou metody kombinující GW a PR).



Obr. 9.8: Sloupcový graf znázorňující směrodatné odchylky střední kvadratické chyby  $MSE$  pro všechny metody WB použité na jednotlivé a všechny sady dat. Popis osy x (viz obr 9.3).



Pokud bychom hodnotili pomocí výsledků všech tří uvedených kritérií hodnocení, algoritmy založené na teorii retinex (PR a Max RGB) vycházejí jako nejlepší. Uvedené metody jsou zpravidla účinné, pokud snímek obsahuje světlé nebo bílé plochy. Tato skutečnost je ve většině zpracovávaných snímků splněna a metoda tak obecně dosahovala nejlepších výsledků. Metoda šedého světa, která získává své korekční hodnoty ze všech bodů obrazové matice, je zcela jistě robustnější a její výsledky jsou průměrné přes všechny hodnocené kritéria a na všech použitých sadách. Metoda kombinující GW a PR se snaží splnit podmínky obou předchozích metod a podle nich vypočítává korekční členy obrazové matice. Objektivním hodnocením vychází jako nejhorší z vyhodnocovaných algoritmů. Tato metoda dosahuje dobrých výsledků u snímků, které nejsou tolik nevyvážené, ale značně selhává u snímků s těžkým zbarvením (viz příloha B). Tato skutečnost zvyšovala průměr chyb a rozdílů této metody během celého hodnocení. Metoda roztahování histogramu dosahuje poměrně dobrých výsledků ve všech kritériích hodnocení v porovnání s ostatními metodami WB. Zmíněná metoda může provést nepřesné vyvážení v případě, že snímek neobsahuje žádné světlé (resp. tmavé) části a ze své podstaty „donutí“ nejvyšší (resp. nejnižší) hodnoty intenzity kanálů roztáhnout do pravého (resp. levého) okraje histogramu a mohou tak vzniknout značné posuny v barevných odstínech.

## ZÁVĚR

V této bakalářské práci bylo popsáno zpracování surových dat z digitálního fotoaparátu a také metody, které se běžně využívají pro vyvážení bílé barvy v digitální fotografii. Vyvážení bílé barvy je oblastí, která se vzhledem ke stále rostoucímu počtu aplikací obrazových snímačů stále vyvíjí. V práci byly dále nastíněny některé způsoby hodnocení kvality algoritmů vyvážení bílé barvy.

Na základě nástroje `dcraw`, který slouží ke zpracování surových dat, bylo vytvořeno uživatelské rozhraní. Vytvořené rozhraní uživateli usnadňuje práci s uvedeným nástrojem, který lze jinak běžně používat pomocí příkazové řádky operačního systému a pomáhá uživateli získat přehled o zpracování surových dat. Do rozhraní byla implementována možnost kalibrace digitálního fotoaparátu. Pomocí kalibrace, která nevyžaduje fyzické kalibrační terče, bylo dosaženo dobrých výsledků. Bohužel pro přepočítání úrovně obrazové matice s různým nastavením expozice nebylo možné určit násobnou konstantu pomocí informace o expozici z metadat souborů v surovém formátu, ale tato konstanta musela být získána jako poměr úrovně obrazových matic s příslušnými nastaveními expozic. V rámci uživatelského rozhraní byly implementovány základní algoritmy vyvážení bílé barvy. Algoritmy byly v další části této práce porovnány pomocí navržené metody objektivního hodnocení, která svými výsledky potvrdila vlastnosti a použitelnost většiny algoritmů.

V případě pokračování na tomto projektu by bylo vhodné zlepšit přesnost přepočtu úrovně obrazových matic pro různá nastavení expozice fotoaparátu tak, aby byla využívána metadata surových dat. Dále by bylo vhodné pokusit se navrhnout lepší sadu barevných vzorků, popřípadě provádět výpočet kalibrační matice dalšími metodami, což by mělo vést ke zlepšení přesnosti kalibrace. Bylo by také zajímavé provést další měření a porovnat přesnost prováděné kalibrace s kalibrací pomocí fyzických kalibračních terčů. Během další práce by bylo možné do rozhraní implementovat novější, sofistikovanější algoritmy vyvážení bílé barvy.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VERHOEVEN, G. J. J. It's all about the format – unleashing the power of RAW aerial photography. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2010, 31(8): 2009-2042 [cit. 2015-02-19]. DOI: 10.1080/01431160902929271. ISSN 0143-1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160902929271>
- [2] ZAPRYANOV, G., D. IVANOVA a I. NIKOLOVA. Automatic White Balance Algorithms for Digital Still Cameras – a Comparative Study. *Information Technologies and Control* [online]. 2012, s. 16-22 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: [http://www.acad.bg/rismim/itc/sub/archiv/Paper3\\_1\\_2012.pdf](http://www.acad.bg/rismim/itc/sub/archiv/Paper3_1_2012.pdf)
- [3] FERNANDEZ-MALOIGNE, Christine (Ed.). *Advanced Color Image Processing and Analysis*. New York: Springer, 2013. [cit. 2015-01-13]. ISBN 978-1-4419-6190-7.
- [4] GREIVENKAMP, John E. 2004. *Field guide to geometrical optics*. Bellingham: SPIE Press, xii, 117 s. ISBN 08-194-5294-7.
- [5] SHARMA, Gaurav. *Digital color imaging handbook: Chapter five: Device characterization* [online]. Boca Raton, FL: CRC Press, © 2003 [cit. 2015-02-04]. ISBN 084930900x. Dostupné z: <http://wiki.epfl.ch/edicpublic/documents/Candidacy%20exam/dcihchap5devchar.pdf>
- [6] MANTIUK, Rafał K., Anna TOMASZEWSKA a Radosław MANTIUK. Comparison of Four Subjective Methods for Image Quality Assessment. In: *Computer Graphics Forum* [online]. 2012, s. 2478-2491 [cit. 2015-02-04]. ISSN 01677055. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03188.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2012.03188.x>
- [7] JIANG, Xiaoyun. *Estimation of illuminants from color signals of illuminated objects* [online]. Rochester, 2003. [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: <http://scholarworks.rit.edu/theses/7066>. Dizertační práce. Rochester Institute of Technology. Vedoucí práce Mark Fairchild.
- [8] COFFIN, David J. Decoding raw digital photos in Linux. *Dave Coffin's Home Page* [online]. 2015 [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://cybercom.net/~dcoffin/dcrawl/>
- [9] PASCALE, Danny. A Review of RGB Color Spaces ... from xyY to R'G'B'. [online]. © 2002-2003 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://www.babelcolor.com/download/A%20review%20of%20RGB%20color%20spaces.pdf>

- [10] CRUSE, Phil. Introduction to Colour Spaces. *Colour Management Consultancy* [online]. 2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z:[http://www.colourphil.co.uk/lab\\_lch\\_colour\\_space.shtml](http://www.colourphil.co.uk/lab_lch_colour_space.shtml)
- [11] EBNER, Marc. *Color constancy* [online]. Chichester: John Wiley, © 2007, xiv, 393 p. [cit. 2015-03-04]. ISBN 04-700-5829-3. Dostupné z:<http://tesis-nico.googlecode.com/svn/trunk/documentos/bibliografia/Color%20Constancy.pdf>
- [12] LAM, Edmund Y. a George S. K. FUNG Chapter 10. Automatic White Balancing in Digital Photography. LUKAC, Rastislav. *Single-sensor imaging: methods and applications for digital cameras* [online]. Boca Raton, FL: CRC Press, © 2009, s. 267-294 [cit. 2015-03-04]. ISBN 9781420054521.
- [13] SHEN-CHUAN, Tai, Liao TZU-WEN, Chang YI-YING a Yeh CHIH-PEI. Automatic White Balance algorithm through the average equalization and threshold. In: *Information Science and Digital Content Technology (ICIDT), 2012 8th International Conference* [online]. 3. vyd., 2012, s. 571-576 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6269338>
- [14] GEHLER, Peter Vincent, Carsten ROTHER, Andrew BLAKE, Tom MINKA a Toby SHARP. Bayesian color constancy revisited. In: *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* [online]. IEEE, 2008, s. 1-8 [cit. 2015-05-04]. ISBN 978-1-4244-2242-5. DOI: 10.1109/CVPR.2008.4587765. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4587765>
- [15] MELGOSA, Manuel. *CIE/ISO new standard: CIEDE2000* [online]. 2013. Workshop on Colorimetry, Graphic Arts and Colour Management. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.color.org/events/colorimetry/Melgosa\\_CIEDE2000\\_Workshop-July4.pdf](http://www.color.org/events/colorimetry/Melgosa_CIEDE2000_Workshop-July4.pdf)
- [16] FUNT, Brian a BASTANI. Irradiance-independent camera color calibration. In: *Color Research* [online]. s. 540-548 [cit. 2015-05-04]. ISSN 03612317. DOI: 10.1002/col.21849. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.21849>
- [17] GUOWEI HONG, BING HAN a M.R. LUO. Colorimetric characterisation of low-end digital camera and its application for on-screen texture visualisation. In: *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing* [online]. IEEE, 2000, s. 741-744 [cit. 2015-05-04]. ISBN 0-7803-6297-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=901065>

- [18] WOLF, Stephen. Color Correction Matrix for Digital Still and Video Imaging Systems. In: *NTIA Technical Memo TM-04-406*[online]. 2003 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.its.bldrdoc.gov/publications/04-406.aspx>
- [19] ColorChecker Digital SG. X-RITE INCORPORATED. *X-Rite Photo* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:[http://xritephoto.com/ph\\_product\\_overview.aspx?ID=938](http://xritephoto.com/ph_product_overview.aspx?ID=938)
- [20] SHARMA, Gaurav, Wencheng WU a Edul N. DALAL. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research* [online]. 2004, vol. 30, issue 1, s. 21-30 [cit. 2015-05-04]. DOI: 10.3403/30281540. Dostupné z:<http://www.ece.rochester.edu/~gsharma/ciede2000/ciede2000noteCRNA.pdf>
- [21] PASCALE, Danny. RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker. [online]. 2000-2006, s. 1-16 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.babelcolor.com/download/RGB%20Coordinates%20of%20the%20Macbeth%20ColorChecker.pdf>
- [22] NAKAMURA, Junichi. 2006. *Image sensors and signal processing for digital still cameras*. Boca Raton, FL: Taylor, 336 p. [cit. 2015-05-11]. ISBN 08-493-3545-0.
- [23] ITU-R BT.500-13. *Recommendation: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*. International Telecommunication Union, 2012-01 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-E.pdf)
- [24] LINDBLOOM, Bruce. Chromatic Adaption. *Brucelindbloom.com* [online]. ©2001-2015, 2009 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:[http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_ChromAdapt.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_ChromAdapt.html)
- [25] KLOSS, Guy K. Colour constancy using von Kries transformations: colour constancy "goes to the Lab". *Research Letters in the Information and Mathematical Sciences* [online]. 2009, s. 19-33 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:<http://hdl.handle.net/10179/4502>
- [26] JANG, I.-S., K.-H PARK a Y.-H. HA. 2009. Color Correction by Estimation of Dominant Chromaticity in Multi-Scaled Retinex. *The Journal of Imaging Science and Technology* [online]. [cit. 2015-05-10]. ISSN 1062-3701. Dostupné z: <http://cilab.knu.ac.kr/publication/2009/ColorCorrectionbyEstimationofDominantChromaticityinMulti-ScaledRetinex.pdf>
- [27] *Improvement to industrial colour-difference evaluation* [online]. 2001. Vienna, Austria: CIE Central Bureau [cit. 2015-05-16]. Publication CIE, CIE 142-2001. ISBN 9783901906084.

- [28] VAZQUEZ, Javier, C.Alejandro PÁRRAGA, Maria VANRELL a Ramon BALDRICH. 2009. Color Constancy algorithms: psychophysical evaluation on a 2 new dataset. *Journal of Imaging Science and Technology* [online]. 53(Number 3): pp. 31105-1-31105-9(9) [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.cat.uab.cat/Research/colour%20constancy/jistversiofinal.pdf>
- [29] AKKAYNAK, Derya, Tali TREIBITZ, Bei XIAO, Umut A. GÜRKAN, Justine J. ALLEN, Utkan DEMIRCI a Roger T. HANLON. 2014. Use of commercial off-the-shelf digital cameras for scientific data acquisition and scene-specific color calibration. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 31(2): 312-321 [cit. 2015-05-13]. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000312. ISSN 1084-7529. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josaa-31-2-312>
- [30] YANG, Yang, Jun MING a Nenghai YU. 2012. Color Image Quality Assessment Based on CIEDE2000. *Advances in Multimedia* [online]. 2012: 1-6 [cit. 2015-05-13]. DOI: 10.1155/2012/273723. ISSN 1687-5680. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/am/2012/273723/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Postup při zpracování dat ze senzoru .....	11
Obr. 2.1: Znázornění modelu RGB jako jednotková krychle .....	15
Obr. 2.2: Barevné funkce RGB a XYZ.....	16
Obr. 2.3: Znázornění os barevného prostoru CIELAB .....	17
Obr. 3.1: Nástroj dcraw v příkazové řádce – výpis možností úpravy RAW dat .....	19
Obr. 3.2: Příklad použití nástroje dcraw .....	22
Obr. 5.1: Rozmístění 24 čtverečků barevné tabulky .....	29
Obr. 5.2: Naměřená spektrální zář vzorků z barevného kalibračního terče.....	29
Obr. 7.1: Vstupní okno uživatelského rozhraní.....	35
Obr. 7.2: Uživatelské rozhraní programu dcraw .....	36
Obr. 8.1: Blokový diagram popisující proces kalibrace (mapování z RGB do XYZ) .	37
Obr. 8.2: Implementované sady barevných vzorků.....	38
Obr. 8.3: Rozhraní generátoru kalibračních vzorků.....	39
Obr. 8.4: Rozhraní pro kalibraci digitálního fotoaparátu.....	39
Obr. 8.5: Menu rozhraní pro kalibraci digitálního fotoaparátu .....	40
Obr. 8.6: Zobrazování kalibračních vzorků na monitoru EIZO .....	43
Obr. 8.7: Přibližné uspořádání experimentu.....	43
Obr. 8.8: Spektroradiometr PhotoResearch PR-740 .....	43
Obr. 8.9: Sloupcový graf znázorňující barevný rozdíl kalibrace při použití vybraných matic na testovací sady .....	46
Obr. 8.10: CIE xy diagram znázorňující kalibraci provedenou všemi vzorky .....	47
Obr. 8.11: Sloupcový graf znázorňující barevný rozdíl kalibrace při použití vybraných matic na testovací sady .....	48
Obr. 9.1: Znázornění syntetického vytvoření nevyvážených snímků.....	49
Obr. 9.2: Blokový diagram procesu získání vyvážených snímků pro objektivní hodnocení .....	50
Obr. 9.3: Sloupcový graf zobrazující úhlovou chybu (průměr a medián) přes všechny vstupní snímky .....	52
Obr. 9.4: Úhlová chyba pro outdoor sadu dat .....	53
Obr. 9.5: Úhlová chyba pro indoor sadu dat.....	54
Obr. 9.6: Průměr barevného rozdílu CIEDE2000 .....	55
Obr. 9.7: Sloupcové grafy znázorňující průměr a medián střední kvadratické chyby <i>MSE</i> pro všechny metody WB použité na jednotlivé a všechny sady dat.....	56
Obr. 9.8: Sloupcový graf znázorňující směrodatné odchylky střední kvadratické chyby <i>MSE</i> pro všechny metody WB použité na jednotlivé a všechny sady dat .....	56

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Porovnání rozdílů formátů RAW a formátu JPEG .....	13
Tab. 1.2: Porovnání open-source nástrojů pro zpracování surových (RAW) dat z digitálních fotoaparátů .....	14
Tab. 5.1: Kalibrační terče používané ke kalibraci digitálních fotoaparátů .....	29
Tab. 6.1: Přehled metod subjektivního hodnocení kvality .....	30
Tab. 8.1: Porovnání teoretické a skutečné násobné konstanty pro různá nastavení expozice .....	44
Tab. 8.2: Korekce vlivu ohniskové vzdálenosti pomocí efektivního clonového čísla .....	45
Tab. 8.3: Porovnání barevných rozdílů v případě kalibrace jednotlivých sad kalibračních vzorků a v případě kalibrace všech vzorků .....	46
Tab. 8.4: Vyhodnocení výkonu kalibrace pomocí matic $M_{GRTG}$ , $M_{QPC}$ a $M_{CELK}$ .....	48
Tab. 9.1: Výsledky objektivního hodnocení pro všechny sady dat .....	52
Tab. 9.2: Výsledky objektivního hodnocení pro outdoor sadu dat .....	53
Tab. 9.3: Výsledky objektivního hodnocení pro indoor sadu dat .....	54

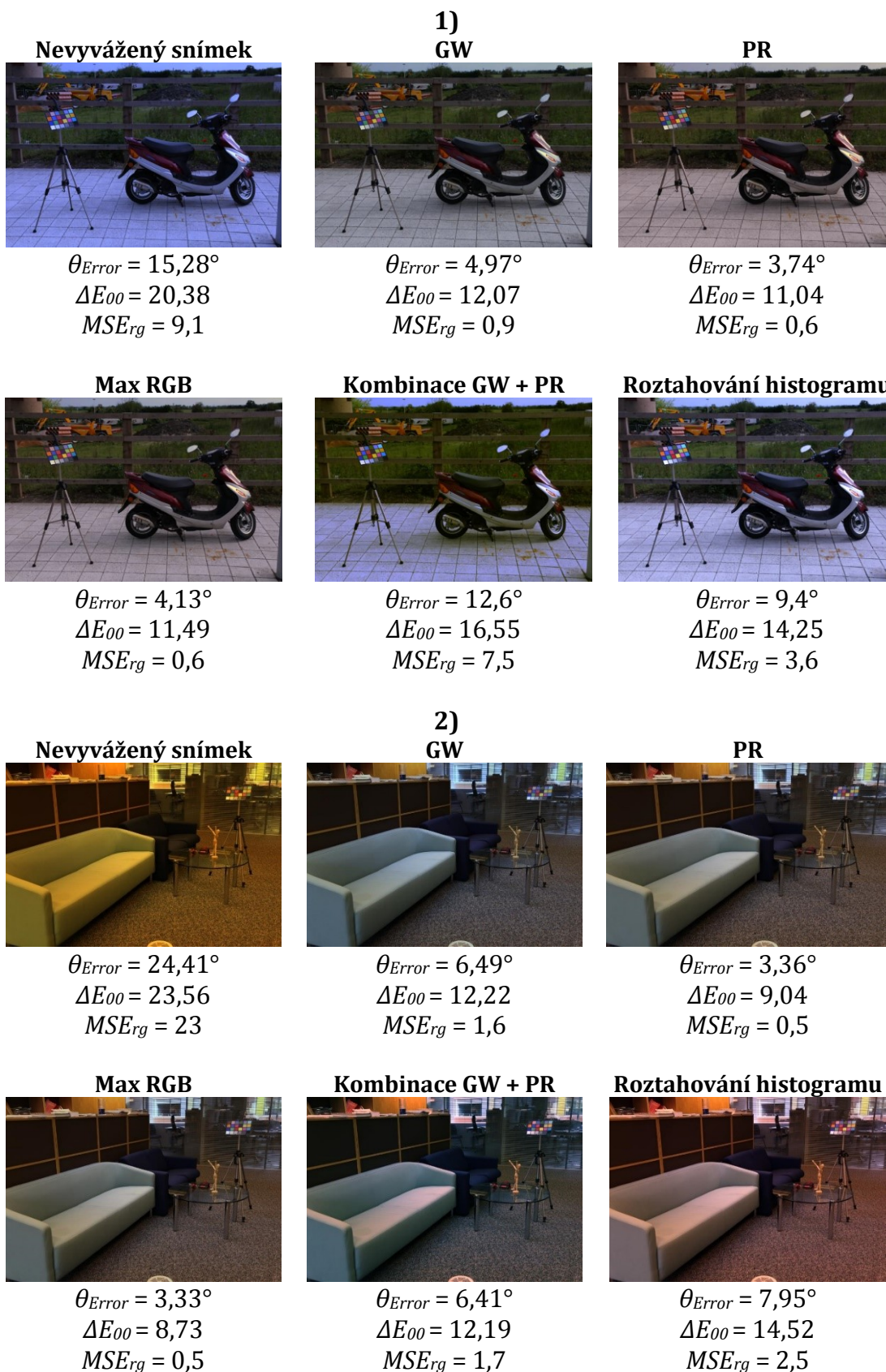
## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Příklady snímků zpracovaných při objektivním hodnocení WB	
Příloha B: Příklady snímků s lehkým a těžkým zbarvením zpracovaných při objektivním hodnocení WB	
Příloha C: Znázornění metody WB roztahování histogramu	
Příloha D: CIE-xy diagamy získané kalibrací jednotlivých sad	
Příloha E: Obsah příloženého CD	
Příloha F: Podrobný popis skriptů a souborů vytvořeného rozhraní v programu Matlab	



# Příloha A

Příklady snímků zpracovaných při objektivním hodnocení WB:



**Nevyvážený snímek**



$\theta_{Error} = 14,41^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 18,56$   
 $MSE_{rg} = 13$

**3)  
GW**



$\theta_{Error} = 4,80^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 13,08$   
 $MSE_{rg} = 1,1$

**PR**



$\theta_{Error} = 6,43^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 12,76$   
 $MSE_{rg} = 2$

**Max RGB**



$\theta_{Error} = 3,41$   
 $\Delta E_{00} = 12,06$   
 $MSE_{rg} = 0,9$

**Kombinace GW + PR**



$\theta_{Error} = 5,57^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 13,22$   
 $MSE_{rg} = 1,4$

**Roztahování histogramu**



$\theta_{Error} = 5,95^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 10,24$   
 $MSE_{rg} = 1,9$

**Nevyvážený snímek**



$\theta_{Error} = 10,31^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 14,61$   
 $MSE_{rg} = 3,9$

**4)  
GW**



$\theta_{Error} = 9,84^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 16,61$   
 $MSE_{rg} = 3,7$

**PR**



$\theta_{Error} = 4,00^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 9,55$   
 $MSE_{rg} = 0,6$

**Max RGB**



$\theta_{Error} = 3,47^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 8,87$   
 $MSE_{rg} = 0,5$

**Kombinace GW + PR**



$\theta_{Error} = 8,88^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 15,18$   
 $MSE_{rg} = 3,3$

**Roztahování histogramu**



$\theta_{Error} = 3,81^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 9,24$   
 $MSE_{rg} = 0,6$



**Nevyvážený snímek**



$\theta_{Error} = 16,02^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 25,07$   
 $MSE_{rg} = 10$

**5)  
GW**



$\theta_{Error} = 7,72^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 18,33$   
 $MSE_{rg} = 2,6$

**PR**



$\theta_{Error} = 5,18^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 13,85$   
 $MSE_{rg} = 1,4$

**Max RGB**



$\theta_{Error} = 5,12$   
 $\Delta E_{00} = 14,40$   
 $MSE_{rg} = 1,4$

**Kombinace GW + PR**



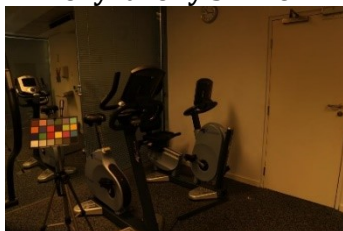
$\theta_{Error} = 10,66$   
 $\Delta E_{00} = 18,54$   
 $MSE_{rg} = 6,5$

**Roztahování histogramu**



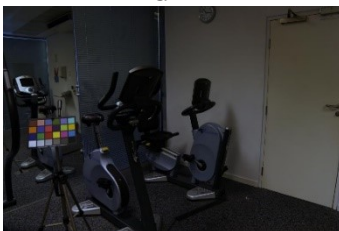
$\theta_{Error} = 6,99^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 16,02$   
 $MSE_{rg} = 2,5$

**Nevyvážený snímek**



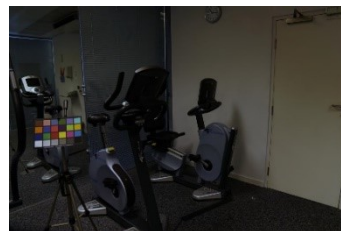
$\theta_{Error} = 25,01^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 23,55$   
 $MSE_{rg} = 25,4$

**6)  
GW**



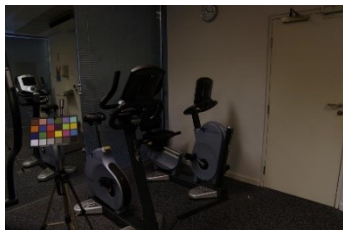
$\theta_{Error} = 5,23^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 15,92$   
 $MSE_{rg} = 1,2$

**PR**



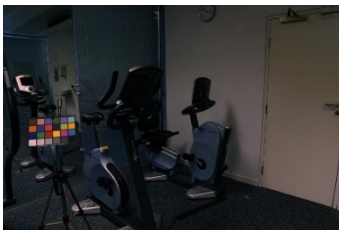
$\theta_{Error} = 4,51^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 14,88$   
 $MSE_{rg} = 0,9$

**Max RGB**



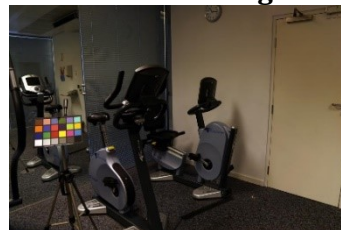
$\theta_{Error} = 5,63^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 14,47$   
 $MSE_{rg} = 1,5$

**Kombinace GW + PR**



$\theta_{Error} = 5,84^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 15,06$   
 $MSE_{rg} = 1,4$













**Roztahování histogramu**



$\theta_{Error} = 6,43^\circ$   
 $\Delta E_{00} = 8,45$   
 $MSE_{rg} = 1,9$

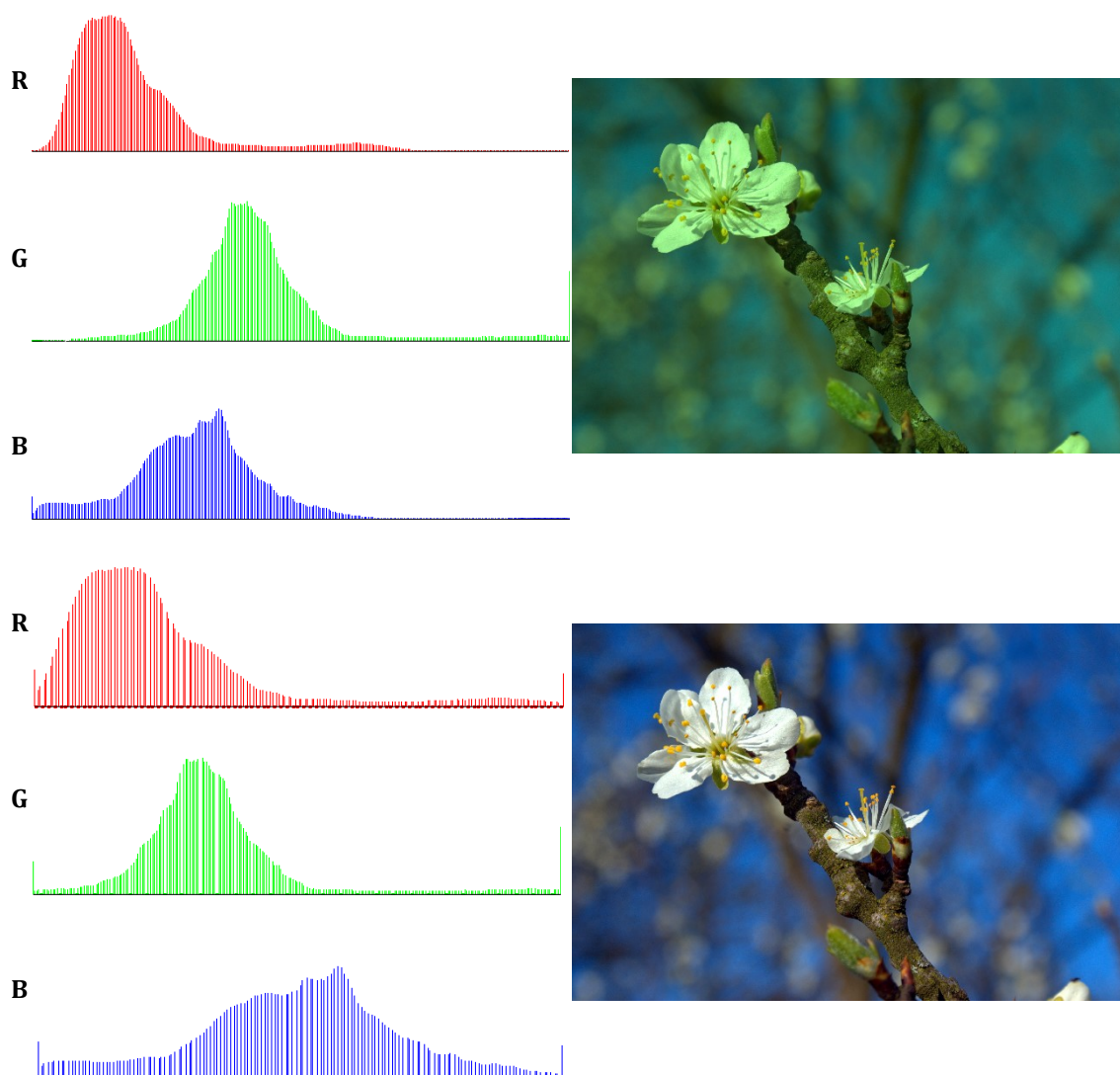
## Příloha B

Příklad snímků s lehkým a těžkým zbarvením zpracovaných při objektivním hodnocení WB:

POUŽITÁ METODA	PŘÍPAD A	$\theta_{Error\_A}$	PŘÍPAD B	$\theta_{Error\_B}$
Nevyvážený vstupní snímek		14,65°		25,49°
Gray Wold		3,82°		4,04°
Perfect Reflector		3,35°		4,34°
Max RGB		3,24°		4,36°
Kombinace GW+PR		7,10°		18,82°
Roztahování histogramu		3,64°		6,35°

## Příloha C

Znázornění metody WB roztahování histogramu:

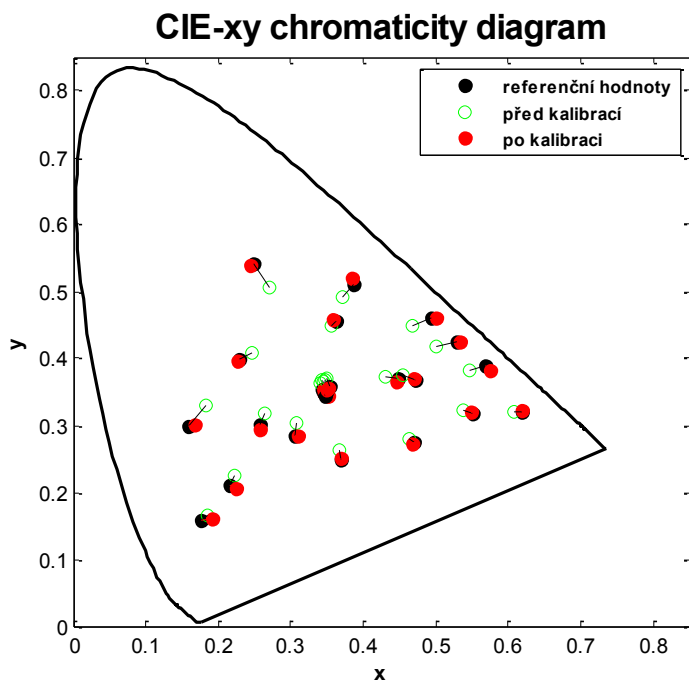


Histogramy vstupního (nahore) a výstupního (dole) snímku jednoduché metody roztahování histogramu. Testovací snímek převzat z<sup>16</sup>.

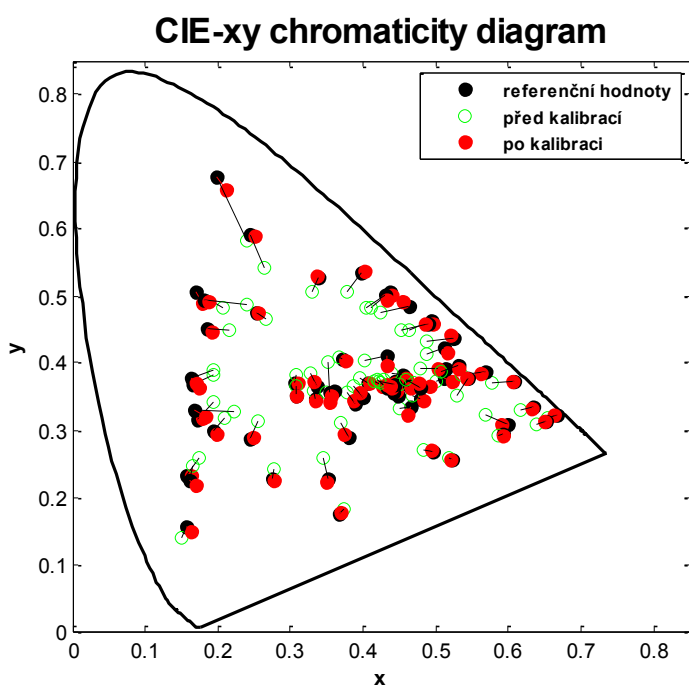
<sup>16</sup> Sony A100 RAW sample. In: *Sony – RAWSAMPLES.CH* [online]. © 2015 RAWSAMPLES.CH [vid. 2014-10-10]. Dostupné z: [http://www.rawsamples.ch/raws/sony/a100/RAW\\_SONY\\_A100.ARW](http://www.rawsamples.ch/raws/sony/a100/RAW_SONY_A100.ARW)

## Příloha D

CIE-xy diagamy získané kalibrací jednotlivých sad:

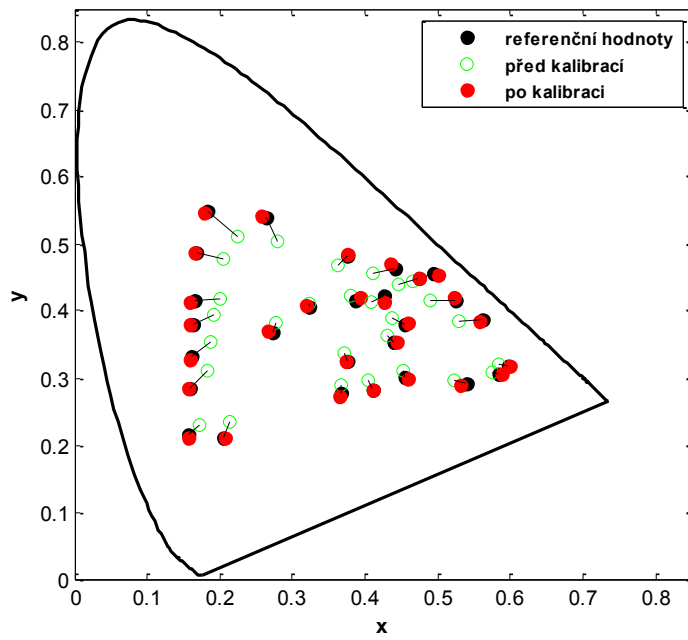


CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z terče GretagMacbeth



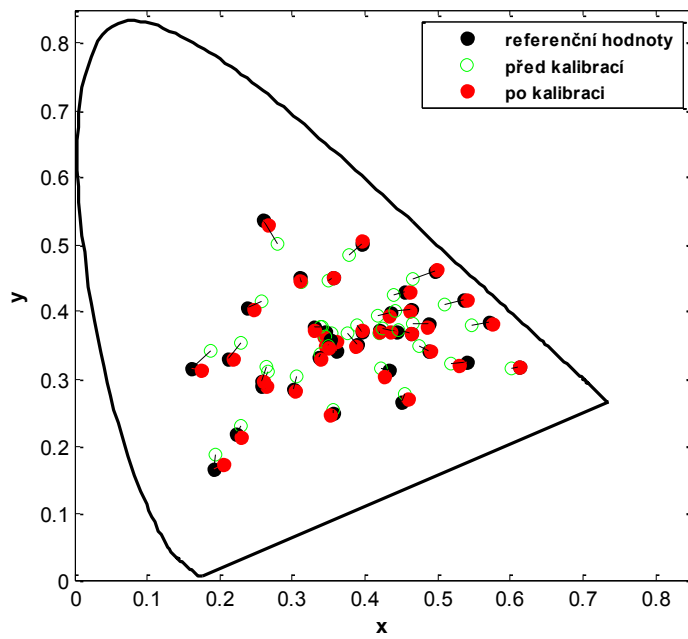
CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z terče GretagMacbeth SG

### CIE-xy chromaticity diagram



CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z terče QPcard

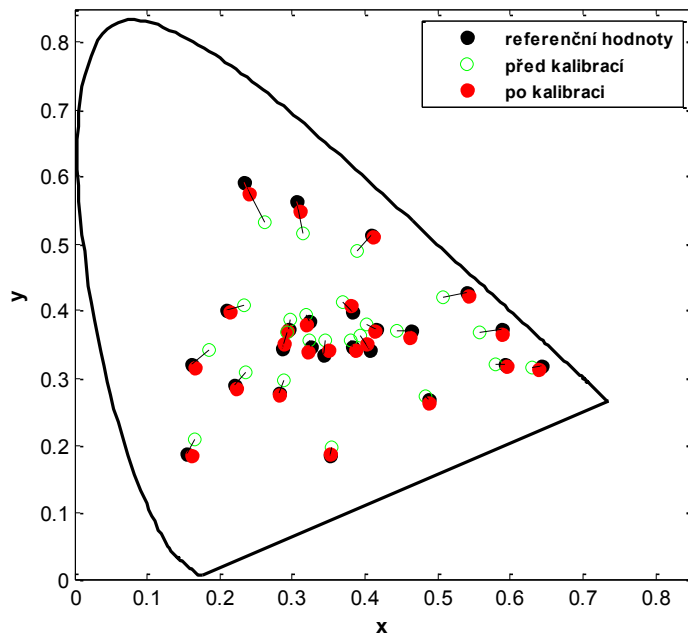
### CIE-xy chromaticity diagram



CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z terče SpyderCHECKR

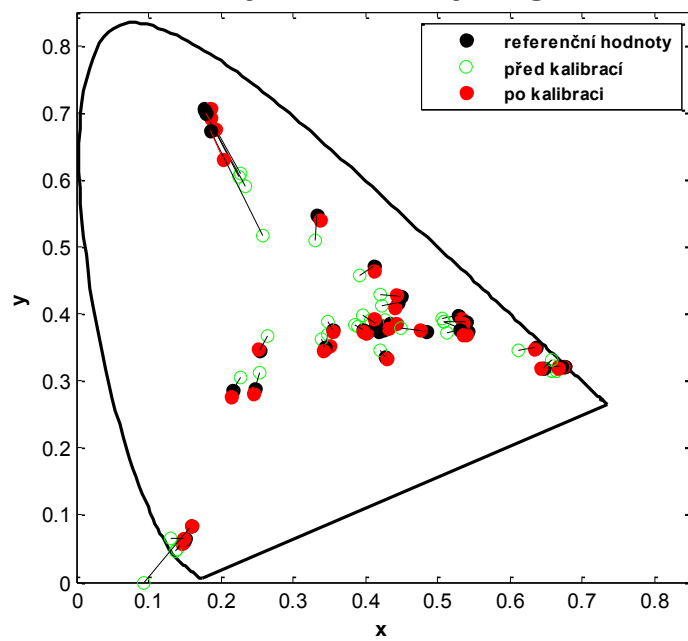


### CIE-xy chromaticity diagram



CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z terče UTT

### CIE-xy chromaticity diagram



CIE xy diagram pro kalibraci provedenou na vzorcích z doplňující sady



## Příloha E

Obsah přiloženého CD.

- **/(kořenový adresář)/BP\_Jan\_Svihalek.pdf** ... tato práce v elektronické podobě ve formátu PDF.
- **/Prilohy/** ... složka s podsložky A, B, C, D obsahující příslušné obrazové přílohy.
- **/Testovaci\_snimky/** ... složka obsahující všechny testovací snímky použité při objektivním hodnocení kvality metod WB.
- **/Objektivni\_hodnoceni/** ... složka obsahující výsledky objektivního hodnocení metod WB pro indoor, outdoor sadu dat a pro obě sady dohromady.
- **/Implementovane\_rozhrani/** ... složka obsahující skripty vytvořeného rozhraní v programu Matlab. Podrobnější popis všech souborů v této složce je uveden v příloze F.

## Příloha F

Podrobný popis skriptů a souborů vytvořeného rozhraní v programu Matlab. Všechny uvedené soubory se vyskytují na příloženém CD.

Soubor	Funkce
<b>/Implementovane_rozhrani/...</b>	
.../README.txt	Textový soubor obsahující podrobnější popis jednotlivých funkcí.
.../dcraw.m	Vyčistí pracovní prostor Matlabu a spouští vstupní okno uživatelského rozhraní initial.m.
.../initial.m	Vstupní okno uživatelského rozhraní.
.../initial.fig	Soubor obsahující rozložení GUI a jeho komponent (pro initial.m).
.../svihalek.m	Skript GUI pro dcraw.
.../svihalek.fig	Soubor obsahující rozložení GUI a jeho komponent (pro svihalek.m).
.../gwm.m	Skript pro algoritmus WB Gray World. Vstupním parametrem je tří rozměrná obrazová matice, výstupním parametrem je již zpracovaná tří rozměrná obrazová matice.
.../perfectReflector.m	Skript pro algoritmus WB Perfect Reflector. Vstupním parametrem je tří rozměrná obrazová matice, výstupním parametrem je již zpracovaná tří rozměrná obrazová matice.
.../lams.m	Skript pro algoritmus WB kombinující GW a PR. Vstupním parametrem je tří rozměrná obrazová matice, výstupním parametrem je již zpracovaná tří rozměrná obrazová matice.
.../maxRGB.m	Skript pro algoritmus WB Max RGB. Vstupním parametrem je tří rozměrná obrazová matice, výstupním parametrem je již zpracovaná tří rozměrná obrazová matice.
.../hist.m	Skript pro algoritmus WB roztahování histogramu. Vstupním parametrem je tří rozměrná obrazová matice, výstupním parametrem je již zpracovaná tří rozměrná obrazová matice.
.../data/dcraw.exe	Spustitelná verze nástroje dcraw, nastavená jako výchozí pro všechny aplikace pokud uživatel nezvolí jinak.
.../sampler.m	Skript GUI generující barevné vzorky určené pro kalibraci dig. fotoaparátu.
.../sampler.fig	Soubor obsahující rozložení GUI a jeho komponent (pro sampler.m).
.../sampleCal.m	Skript GUI pro provedení kalibrace dig. fotoaparátu.
.../sampleCal.fig	Soubor obsahující rozložení GUI a jeho komponent (pro sampleCal.m).
.../cfa.m	Skript pro získání rozmístění CFA na daném vyříznutém vzorku z lineárních dat senzoru.
.../locus.mat	Tabulkový soubor obsahující xy souřadnice CIE diagramu potřebné pro vykreslení „podkovy“, která vymezuje barvy CIE diagramu.
.../xyz2lab.m	Skript převádějící souřadnice z prostoru XYZ do prostoru CIELAB.
.../ciede2000.m	Skript provádějící výpočet barevného rozdílu dle definice CIEDE2000. Použit skript z [20].
.../data/samples.xls	Tabulkový soubor obsahující RGB souřadnice všech vzorků, které je možné zobrazit v rozhraní sampler.m.
.../data/[název].xlsx	Tabulkové soubory obsahující naměřené XYZ souřadnice [název] sady. Tyto hodnoty se využívají pro kalibraci v rozhraní sampleCal.m.