



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Analýza metod vyvážení bílé

Analysis of white balance method performance

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika
Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

Bc. Jiří Diviš

Praha 2014

P r o h l á š e n í

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Analýza metod vyvážení bílé vypracoval samostatně a použil k tomu pouze literaturu, kterou uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci. Nemám námitky proti půjčování, zveřejnění a dalšímu využití práce, pokud s tím bude souhlasit katedra radioelektroniky.

V Praze dne

.....
podpis studenta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jiří Diviš**

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

Název tématu: **Analýza metod vyvážení bílé**

Pokyny pro vypracování:


Vypracujte přehled metod vyvážení bílé. Vybrané metody po dohodě s vedoucím implementujte v programovém prostředí Matlab. Navrhněte metodu objektivního porovnání metod vyvážení bílé. Proveďte objektivní porovnání implementovaných algoritmů, diskutujte výsledky, případně porovnejte s výsledky subjektivních testů.

Seznam odborné literatury:

- [1] Stephen Westland, Caterina Ripamonti, Computational Colour Science using MATLAB, Wiley, 2004, ISBN: 978-0-470-02031-9
- [2] Marc Ebner, Color Constancy, Wiley, 2007, ISBN: 978-0-470-05829-9

Vedoucí: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2014

Anotace

Následující diplomová práce se zabývá rozborem vybraných metod vyvážení bílé ve fotografii a vzájemným porovnáním jejich účinnosti. Cílem práce je seznámit se s různými přístupy k problematice automatického vyvážení bílé ve fotografii, které je nedílnou součástí práce s obrazem. Dále nabízí přehled barevných prostorů, bez jejichž znalosti není možné bílou v obraze vyvažovat.

Klíčová slova: Automatické vyvážení bílé, barevný prostor, kolorimetrie, chromatičnost

Abstract

The following diploma thesis deals with the analysis of selected white balancing methods in photography and mutual comparing of their performance. The goal of the thesis is to acquire knowledge of different approaches to the issue of automatic white balance, which is integral part of work with an image. It also offers an overview of color spaces, without whose knowledge it is not possible to balance white in the image.

Index terms: Automatic white balance, color spaces, colorimetry, chromacity

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D., za představení problematiky, umožnění práce pod jeho vedením a odborné rady. Mé další díky patří rodině a nejbližším přátelům za podporu a trpělivost.

1	Úvod	4
2	Teoretický popis	6
2.1	Blokové schéma soustavy	6
2.2	Kolorimetrie	6
2.2.1	<i>1931 CIE Diagram chromatičnosti</i>	7
2.2.2	<i>Kritérium kolorimetrického zkreslení JND</i>	9
2.3	Barevné prostory	11
2.3.1	<i>Barevné prostory založené na HVS</i>	11
2.3.2	<i>Barevné prostory založené na teorii protilehlých barev</i>	13
2.3.3	<i>Mimořádné barevné prostory</i>	14
2.3.4	<i>Munsellův barevný prostor</i>	15
2.3.5	<i>HSL barevný prostor</i>	15
2.3.6	<i>Barevné prostory pro aplikace</i>	16
2.3.7	<i>Barevné prostory pro TV</i>	17
2.3.8	<i>CIE barevné prostory</i>	18
2.4	Metody vyhodnocení.....	20
2.5	Formát dat	24
2.5.1	<i>RAW data</i>	24
2.5.2	<i>JPEG - Joint Photographic Experts Group</i>	25
2.5.3	<i>Exif - Exchangeable image file format</i>	25
2.6	Vyvážení bílé	25
2.6.1	<i>Gray World</i>	26
2.6.2	<i>White Patch</i>	27
2.6.3	<i>Histogram Strech</i>	28
2.6.4	<i>Edge Detection</i>	30
2.6.5	<i>Zone System</i>	33
2.6.6	<i>Single Retinex</i>	37
2.6.7	<i>Automatic Color Enhancement</i>	39
3	Praktická část	41
3.1	1. Experiment	44
3.2	2. Experiment	57
4	Závěr	62
5	Zdroje	65

6	Přílohy	67
6.1	Příloha 1	67
6.2	Příloha 2	75

1 Úvod

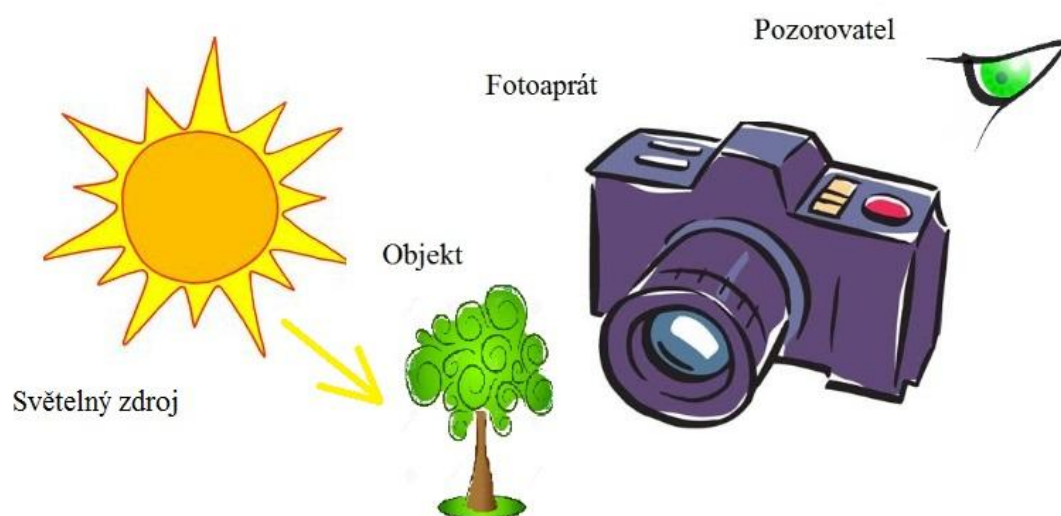
Diplomovou prací týkající se práce s obrazem jsem si vybral na základě mého vzrůstajícího zájmu o daný obor. Ač nejsem aktivní fotograf, je pro mne velmi zajímavé proniknout, alespoň z části, do problematiky, kterou fotografové musí vždy řešit při své tvorbě. Hlavním cílem této práce je objektivně porovnat účinnost různých přístupů a algoritmů vyvážení bílé barvy v digitální fotografii. Dále pochopit, jakým způsobem se pracuje s barevnými prostory a seznámit se a následně aktivně využít techniky objektivního hodnocení kvality obrazu. V první části práce je popsán teoretický základ, který je důležitý pro odbornou práci s barvou. Čtenář je seznámen se samotným pojmem barva, jak vzniká a co ji ovlivňuje. Jsou představeny termíny barevný prostor a jeho druhy a termín kolorimetrie. V další části jsou pak popsány algoritmy pro vyvážení bílé barvy ve fotografii. Nakonec jsou prezentovány výsledky praktického hodnocení vybraných vyvažovacích algoritmů implementovaných v programovém prostředí Matlab a dále algoritmů využitých v běžných fotoaparátech.

Fotografové při své práci řeší různé problémy, aby se jejich tvorba co nejvíce blížila jejich představám. Musí se vypořádat kromě výběru místa pro pořízení snímku požadované scenerie i se čtyřmi hlavními proměnnými, které ovlivňují digitální fotografii. Jedná se o dobu otevření závěrky, která se obvykle pohybuje ve zlomcích sekundy, nastavení citlivosti ISO, což je hodnota ovlivňující šum, clonu neboli průměr otvoru v objektivu a konečně jas (osvětlení, odrazivost) scény. Poslední parametr je v naprosté většině případů neměnný. Právě kvůli nemožnosti nebo velké obtížnosti změnit osvětlení scény se využívá postprocessingových úprav snímku, při kterých se berou v úvahu světelné podmínky při pořízení fotografie. Jde o vyvážení bílé v digitální fotografii.

Každý druh světla má trochu jiný barevný nádech, který je ale pouhým okem většinou nerozeznatelný. Důvodem je fyziologie lidských očí, respektive mozku, který automaticky převádí to, co člověk vidí do přirozené formy, tak aby vnímal svět kolem sebe způsobem, jakým jej zná. Tento proces však fotoaparáty nejsou schopny simulovat a je tedy potřeba jim pomoci.

Soustava objekt - fotoaparát - pozorovatel, kterou je možné vidět na obrázku 1, ilustruje konfiguraci, která musí být dodržena při pořizování snímků. Je možné ji i vyjádřit v blokovém schématu (viz obrázek 2). Tato práce se bude zabývat blokem postprocessing.

V tomto bloku probíhá zpracování pořízené informace. Na snímek jsou aplikovány algoritmy, které nasnímaná data mění ke spokojenosti uživatele.

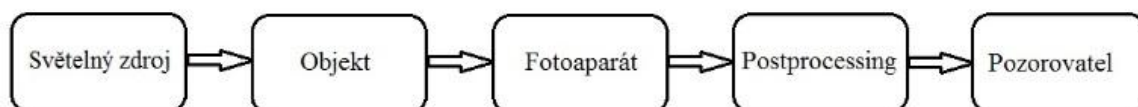


Obrázek 1 Ilustrace soustavy

2 Teoretický popis

2.1 Blokové schéma soustavy

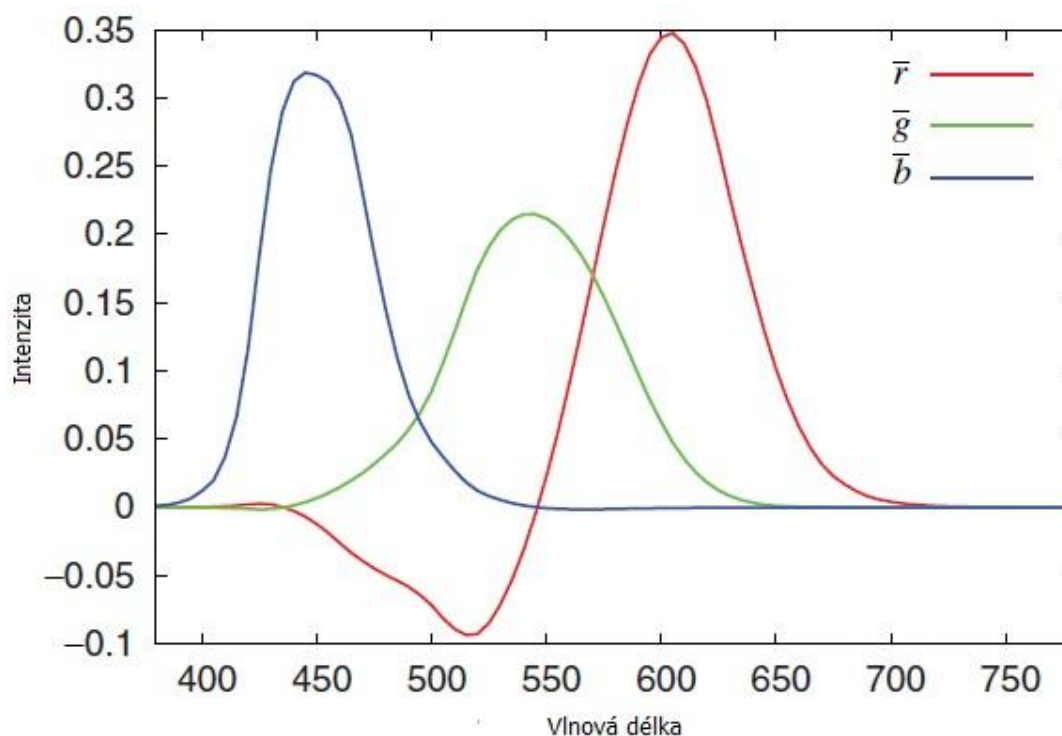
Osvětlený objekt zachycený fotoaparátem je převeden do digitální podoby a následně upravován v závislosti na vybavení daného snímacího zařízení. Dnešní fotoaparáty mají mimo jiné vlastní základní funkce vyvážení bílé, které však nemusí být vždy vhodné pro různé externí podmínky, při kterých byla fotografie pořízena. Externí podmínky s největším vlivem na výsledek jsou charakter osvětlení a barevná škála scény. Výsledný snímek pak může působit horším dojmem po úpravě než před ní. Proto existují postupy, které se snaží co nejdokonaleji zobrazit barvy snímku takové, jaké byly ve skutečnosti, nebo takové, jaké by byly za jiných světelných podmínek. Hned zde se však objeví problém reprezentace barev, která je odlišná u fotoaparátů a obrazových zobrazovačů. Navíc, žádné zařízení není schopné zaznamenat či zobrazit všechny existující barvy. Řešením je práce na zařízeních, které mají totožné vlastnosti v reprezentaci barev, a postprocessingové zpracování obrazové informace vyvážení bílé vhodným algoritmem.



Obrázek 2 Blokové schéma soustavy

2.2 Kolorimetrie

Barva, kterou vnímá člověk, je v podstatě barevný vjem, což je vlastnost lidského zrakového ústrojí. Umožňuje zjistit rozdíl mezi dvěma plochami zorného pole o stejné velikosti, tvaru a struktury. Tento rozdíl je stejný rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla. Světlo, které je vnímáno okem a budí barevný vjem, je barevný podnět a jeho vlnová délka, jež je člověk schopen vidět, se pohybuje mezi 380nm a 750nm.



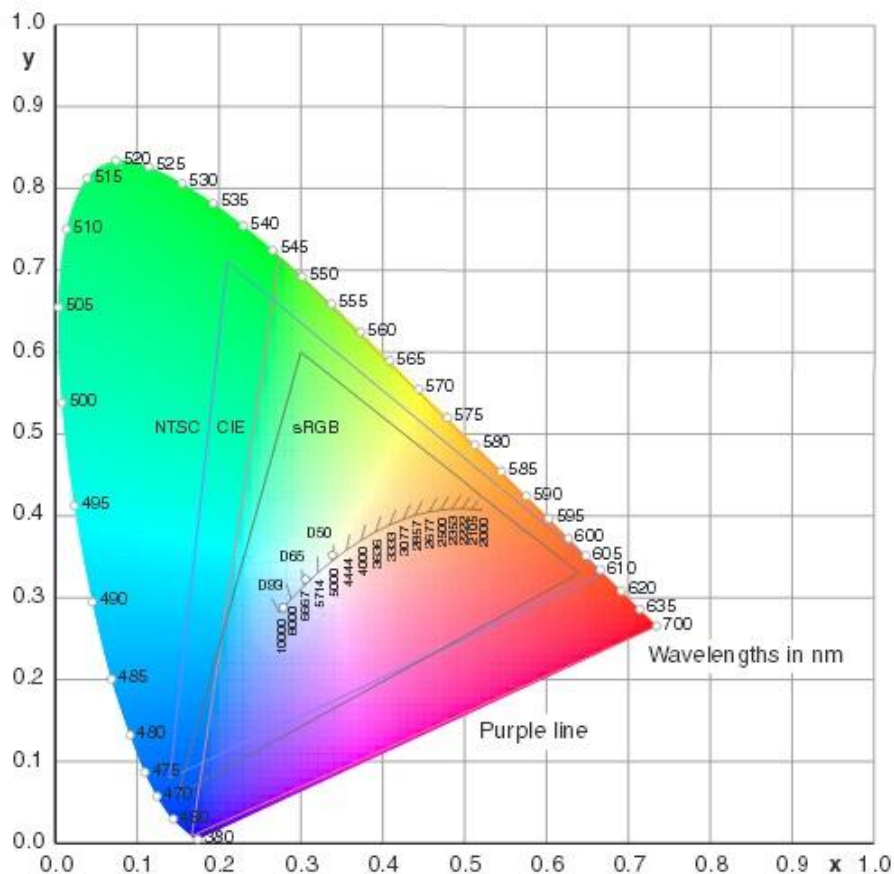
Obrázek 3 Viditelné spektrum lidským okem v základních barvách [21]

Jeho barevná jakost čili barevný odstín, tzv. chromatičnost, je dána spektrem daného světla. Nicméně je možné dosáhnout stejného barevného vjemu i změněným spektrálním složením, čemuž se říká metamerismus. Spektrální složení nepopisuje chromatičnost podnětu dokonale, jelikož nebere v úvahu právě metamerismus. Proto se zavádí kolorimetrické soustavy neboli barevné prostory, jimiž je popsána barevná jakost s ohledem na metamerismus [3].

2.2.1 1931 CIE Diagram chromatičnosti

Třídídimenzionální barevný prostor CIE XYZ je základem pro všechny systémy pracující s barvou. Daná množina barev obsahuje všechny možné barevné odstíny viditelné lidským okem. Uprostřed diagramu se nachází oblast bílé, která obsahuje barvy, které lidské oko vnímá jako bílou barvu. Většinu barev z dané množiny pak není možné zobrazit na obrazovkách televizí či monitorů nebo je vytisknout. Množina zobrazitelných (tisknutelných) barev se nazývá gamut a v diagramu je vyznačena trojúhelníkem. Pro různé systémy se gamuty liší, žádný však nepokrývá celý diagram. V případě, že do systému je vyslána informace o barvě, která je mimo gamut zobrazovacího zařízení, pak se dané souřadnice požadované barvy přepočtou na nejbližší možnou zobrazitelnou barvu. To je provedeno tak, že se proloží přímkou bod, který leží mimo gamut, s bodem v oblasti bílé,

který leží přibližně uprostřed diagramu. Výsledná přímka pak protne hranu trojúhelníku, což je již barva, kterou je možné zobrazit. Dvojdímní CIE chromatický diagram na obrázku 4 ilustruje speciální projekci třídimenzionální varianty barevného prostoru [2, 21].



Obrázek 4 CIE Diagram [2]

Jak již bylo zmíněno, diagram je množina bodů. Každý bod znázorňuje chromatičnost v rovinné soustavě souřadnic, ve kterých je diagram prezentován. Tyto body jsou definovány trichromatickými souřadnicemi, což jsou poměry jednotlivých složek podnětu a součtu všech složek [2, 21].

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$x = \int_{380}^{830} E(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$$

$$y = \int_{380}^{830} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$z = \int_{380}^{830} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

kde X , Y a Z jsou trichromatické složky, které jednoznačně udávají chromatičnost podnětu. $E(\lambda)$ představuje spektrální složení světla a $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, a $z(\lambda)$ se nazývají trichromatičtí členitelé. Rovnice pro z se neuvádí, protože součet souřadnic je 1.

$$x + y + z = 1$$

Z toho se dá jednoduše složka z dopočítat. V literatuře se může vyskytnout i popis jednotlivých souřadnic podle RGB soustavy, kde r zastává x , y je g a z je b . Souřadnice neobsahují informaci o množství světla, což je řešeno uvedením dalším údajem, jasnem.

V diagramu je také vyobrazena barevná teplota neboli teplota chromatičnosti vyjádřená ve stupních Kelvina, která charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané absolutně černým tělesem, které je zahřáté na tuto teplotu. Má-li tedy žárovka barevnou teplotu 6500K, je barevná jakost jejího světla zhruba stejná jako jakost světla absolutně černého tělesa o teplotě 6500K. Nicméně shoda není dokonalá, jelikož v diagramu neleží příslušný bod na křivce, ale jen v její blízkosti. Pak je potřeba použít náhradní teplotu chromatičnosti. Barevná teplota se tedy používá pro vyjádření chromatičnosti světla místo trichromatických souřadnic [2, 21].

2.2.2 Kritérium kolorimetrického zkreslení JND

Tento výklad diferenciální rozlišovací schopnosti zrakového ústrojí při vyhodnocení barevných zkreslení je však nepřesný. Důvodem je nerovnoměrné rozložení míry rozlišení po ploše diagramu. Řešením je vyrovnání tohoto rozložení, čímž vnikl diagram se stejnými geometrickými vzdálenostmi reprezentujícími stejné rozlišitelné barevné rozdíly. Diagram je definován nelineární transformací souřadnicové soustavy x , y do nových souřadnic u a v pomocí rovnic [4]:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

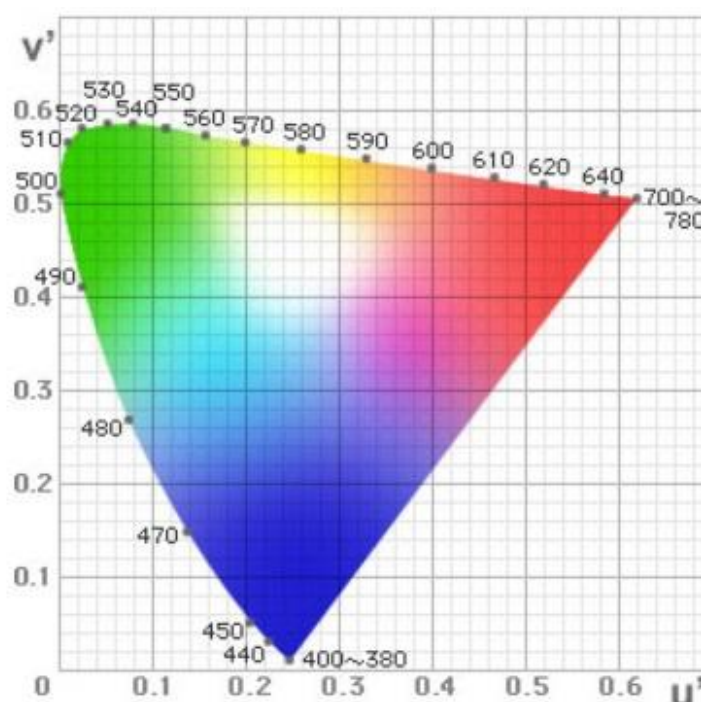
Jednotky JND (Just Noticeable Difference - právě postřehnutelný rozdíl) pak určují příslušné matematické vyjádření kolorimetrických rozdílů. Jsou dány vztahem [4]:

$$N = \sqrt{N_b^2 + N_y^2}$$

$$N_b = \frac{\sqrt{(u_r - u_o)^2 + (v_r - v_o)^2}}{0,00384}$$

$$N_y = \frac{\log(Y_r) - \log(Y_o)}{0,0198}$$

kde N_b udává barevnou diferenci pomocí $(u_r - u_o)$ a $(v_r - v_o)$, kde u_r a v_r jsou reprodukovatelné barvy a u_o a v_o jsou barvy originální a N_y je vliv jasové difference. Hodnota 1 jnd pak představuje hodnotu 2,3 rozdílu ΔE v barevném prostoru Lab a v rovnoměrném diagramu CIEuv vzdálenost 0,00384. Tento údaj je pokládán za realistickou míru prakticky pozorovatelného rozdílu dvou barevných tónů [4]. Výsledný diagram je na obrázku 5.



Obrázek 5 Diagram právě postřehnutelného rozdílu JND [5]

2.3 Barevné prostory

Výběr barevného prostoru má významný vliv na výsledek procesu. Znalost rozličných barevných prostorů usnadní výběr toho správného, který bude nejlepší pro danou aplikaci. Barva je způsob, kterým lidský optický systém (HVS - Human Visual System) vnímá a měří část elektromagnetického spektra přibližně mezi vlnovými délkami 300nm a asi 800nm. V důsledku fyziologických vlastností lidského zrakového aparátu pro nás není možné detekovat všechny možné kombinace viditelného spektra, nicméně inklinujeme k seskupování různých spekter do barev.

Rozdělení barevných prostorů je odvozeno ze zkušeností z praxe a kategorizace je následující: Barevné prostory založené na HVS zahrnují RGB barevný prostor (Red, Green, Blue), barevné prostory založené na teorii protilehlých barev a mimořádné barevné prostory. Barevné prostory pro aplikace odvozené z TV systému (YUV, YIQ), foto systému (Kodak PhotoYCC) a tiskařského systému (CMY(K)). Barevné prostory navržené CIE, což je mezinárodní komise pro osvětlení (Commission Internationale de l'Eclairage), mají důležité vlastnosti, kterými jsou hlavně nezávislost na zařízení a linearita (CIE XYZ, Lab a Luv) [1].

2.3.1 Barevné prostory založené na HVS

Hlavní ideou, která vyústila ve specifikaci RGB prostoru, byla úvaha, která říkala, že pokud bude dosaženo popsání viditelného spektra takovým způsobem, který napodobuje úplně první detekci světla lidským okem, pak bude k dispozici celá informace potřebná pro uložení, zpracování a vizualizaci odpovídajícího spektra. Tato myšlenka tedy počítá se znalostí funkce lidského oka. Trichromatická teorie uvádí, že existují tři typy fotoreceptorů citlivých na červenou, zelenou a modrou oblast viditelného spektra. Tyto fotoreceptory neboli čípky, jsou také označovány jako L, M a S (Long, Middle, a Short), což napovídá, na kterou vlnovou délku jsou citlivé - tedy dlouhou, střední a krátkou, kde dlouhá je červená, zelená střední a modrá krátká vlnová délka [1].

2.3.1.1 Barevný prostor RGB

Většina zařízení pro zachycení obrazu používá LMS světelný detektor a obvykle se nazývají RGB senzory. Barva je popsána všemi třemi komponentami a hodnota těchto komponent je vyjádřena konvolučním integrálem citlivosti a dopadajícího světla [1].

$$R = \int_{380}^{830} S(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$

$$G = \int_{380}^{830} S(\lambda)G(\lambda)d\lambda$$

$$B = \int_{380}^{830} S(\lambda)B(\lambda)d\lambda$$

kde $S(\lambda)$ je světelné spektrum, $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ a $B(\lambda)$ jsou trichromatické členitelé, kteří udávají citlivost jednotlivých kanálů. Tato transformace ze spektrálního výkonového rozložení do třídimensionálního vektoru je výkonná kompresní technika s kompresním poměrem více než 10:1. Vedlejším účinkem této transformace je ztráta informace, která vede k existenci takzvaných metamermů, což jsou barvy s jiným spektrem, ale se stejnými vnímatelnými hodnotami. Z rovnic je zřejmé, že hodnoty RGB závisí na daných citlivostních funkcích obrazového snímače. Tím je dáno, že RGB barevný prostor se řadí mezi aditivní barevné prostory.

Nicméně tento barevný prostor se nehodí na všechny aplikace. V podstatě je nedokonalý, jelikož nedokáže zobrazit všechny existující barvy. Model RGB je vlastně barevný prostor určený vrcholy trojúhelníku s barvami R, G a B. Každá barva je vyjádřena rozsahem 0-255, tedy 8 bity. Z toho vyplývá, že k popisu barvy 1 bodu obrazu je potřeba 24 bitů (3 x 8). Čistá červená je určena souřadnicemi 255,0,0 a ekvivalentně čistá zelená je 0,255,0 a čistá modrá 0,0,255 [1].

2.3.1.2 Barevný prostor sRGB

sRGB prostor je určen pro obecné komerční použití. Je navržen společnostmi HP a Microsoft pro aplikace, jakými jsou zobrazování barev na monitorech, barevných tiskárnách nebo obecně na internetu. Tento prostor tedy hlavně cílí na World Wide Web, nicméně neměly by se opomíjet aplikace typu skener – tiskárna a jiné. Pro tento prostor byl navržen rozšířený barevný gamut, který podporuje více úrovní přesnosti při plné kompatibilitě se základními prostory [13, 21].

Specifikace prostoru je navržena tak, aby korespondovala s typickými domácími nebo kancelářskými podmínkami. Nepočítá s temnějším prostředím obvykle použitým pro komerční srovnávání barev. Většina programů je v dnešní době designována na

předpokladu, že 8 bitový snímek zobrazen na 8 bitový display se bude jevit tak, jak doporučuje sRGB prostor. Chrominanční složky prostoru včetně bílého bodu mají následující souřadnice [13]:

Červená: $x = 0,6400$; $y = 0,3300$

Zelená: $x = 0,3000$; $y = 0,6000$

Modrá: $x = 0,1500$; $y = 0,0600$

Bílá: $x = 0,3127$; $y = 0,3290$

2.3.1.3 Barevný prostor aRGB

Aditivní RGB barevný prostor je definovaný RGB složkami, bílým bodem, černým bodem a přenosovou funkcí barevných komponent. Chrominanční složky prostoru včetně bílého bodu mají následující souřadnice

Červená: $x = 0,6400$; $y = 0,3300$

Zelená: $x = 0,2100$; $y = 0,7100$

Modrá: $x = 0,1500$; $y = 0,0600$

Bílá: $x = 0,3127$; $y = 0,3290$

Prostor byl vyvinut společností Adobe systems pro zobrazení co největšího množství barev dosažitelných na barevných tiskárnách, za použití RGB složek. Dále, tento prostor zabírá asi 50 % viditelných barev specifikovaných prostorem Lab [14].

2.3.2 Barevné prostory založené na teorii protilehlých barev

Jedná se o barevný prostor, který vychází z teorie německého psychologa Ewalda Heringa, ve které zmínil, že není možné, aby se určité barevné odstíny objevily společně (červenozelená, žlutomodrá). Později vědci objevili, že v HVS existuje vrstva, která převádí RGB hodnoty z čípků na vektory protilehlých barev. Tento vektor má achromatickou složku bílá-černá a dvě chromatické složky červená-zelená a žlutá-modrá. Tato transformace je uskutečněna postreceptory v sítnici zvanými ganglia. Existuje více modelů tohoto barevného prostoru, nejjednodušší a zároveň nejznámější variantou je soustava rovnic [1]:

$$RG = R - G$$

$$YeB = 2B - R - G$$

$$WB = R + G + B$$

Logaritmická varianta této transformace je přesnějším vyjádřením, jelikož čípky v sítnici mají logaritmickou odezvu [1].

$$RG = \log(R) - \log(G)$$

$$YeB = \log(R) - \frac{\log(R) + \log(G)}{2}$$

$$WB = \log(G)$$

Další verzí barevného prostoru založeného na teorii protilehlých barev je aproximace Karhunen-Loevovy transformace RGB, což je využito v mnoha aplikacích zpracovávajících obraz [1].

$$I_1 = \frac{R + G + B}{3}$$

$$I_2 = \frac{R - B}{2}$$

$$I_3 = \frac{2G - R - B}{4}$$

2.3.3 Mimořádné barevné prostory

Tyto barevné prostory používají tři atributy popisující barvu, a to barevný tón, který určuje odstín dané barvy (fialová, oranžová, tyrkysová, ...), saturace, což je úroveň nebílé (saturovaná barva má pouze jednu spektrální složku - viz RGB barevný prostor - zatímco nesaturovaná barva má vždy určité množství bílé) a jas, který měří intenzitu světla. Tyto barevné prostory jsou modifikace RGB barevného prostoru, obvykle se jedná o lineární transformaci [1].

2.3.4 Munsellův barevný prostor

Přehled 1500 systematicky navržených barevných vzorků. Jednotlivé vzorky jsou voleny tak, aby kroky mezi nimi byly percepčně stejné [1].

2.3.5 HSL barevný prostor

HSL (Hue - barevný tón, Saturation - saturace, vaLue - hodnota) barevný prostor je odvozen z RGB barevného prostoru, tudíž se také potýká s nelinearitou a závislostí na zařizení, kterým je zpracováván [1].

$$L = \max(R, G, B)$$

$$S = \frac{L - \min(R, G, B)}{L}$$

$$H = 5 + B'; R = \max(R, G, B), G = \min(R, G, B)$$

$$H = 1 - G'; R = \max(R, G, B), G = \min(R, G, B)$$

$$H = R' + 1; G = \max(R, G, B), B = \min(R, G, B)$$

$$H = 3 - B'; G = \max(R, G, B), B = \min(R, G, B)$$

$$H = 3 + G'; B = \max(R, G, B)$$

$$H = 5 - R'; \text{ jinak}$$

$$R' = \frac{L - R}{L - \min(R, G, B)}$$

$$G' = \frac{L - G}{L - \min(R, G, B)}$$

$$B' = \frac{L - B}{L - \min(R, G, B)}$$

Pokud je $S = 0$, pak je odstín nedefinován. H je nakonec konvertováno na stupně vynásobením konstantou 60.

Nevýhodami těchto barevných prostorů jsou závislost na zařízení, nenesou informaci o chromatičnosti a bílém bodě, protože jsou lineárními transformacemi z RGB, a objevuje se nekontinuita barevného tónu kolem 360° , kvůli které je složité provádět aritmetické operace v takovýchto barevných prostorech [1].

2.3.6 Barevné prostory pro aplikace

2.3.6.1 Subtraktivní míchání barev

Je protikladem k aditivnímu míchání barev. Jde o metodu, která selektivně odnímá části viditelného spektra. Předpokládejme, že máme světelný zdroj se spektrem $S_i(\lambda)$ a povrch, jehož reflektance je dána $R_s(\lambda)$. Spektrum odraženého světla je pak možné dosáhnout pomocí výpočtu [1]:

$$S_r(\lambda) = S_i(\lambda)R_s(\lambda)$$

V případě, že je požadováno, aby se povrch jevil modrý, pak je potřeba, aby absorboval zelenou a červenou složku spektra a odrážel modrou složku spektra. Jestliže přidáme na povrch například zelený inkoust, který absorbuje modré a červené spektrum, pak dostaneme odstín černé a nikoli modrozelené, jelikož se pak již jedná o aditivní skládání barev a ne subtraktivní [1].

2.3.6.2 CMY (K)

CMY (Cyan, Magneta, Yellow) barevný prostor je subtraktivní metoda využívána v tiskárnách. Tři složky představují tři odrazné filtry. Často se přidává i čtvrtá složka K představující množství černého inkoustu.

Transformace do CMY(K) barevného prostoru jsou dva typy. První jsou velmi jednoduché a v podstatě se jedná o doplňky do RGB, které jsou nepřesné. Druhý typ, určený pro praktické aplikace, využívá komplikovaných polynominálních interpolací. Jednoduché transformace jsou popsány následujícím způsobem [1, 21]:

$$C = 1 - R$$

$$M = 1 - G$$

$$Y = 1 - B$$

Převedení do prostoru CMYK [1] :

$$K = \min (C, M, Y)$$

$$C = C - K_1 - K$$

$$M = M - K_1 - K$$

$$Y = Y - K_1 - K$$

2.3.7 Barevné prostory pro TV

Dnešní televizní obrazovky a monitory již splňují požadavky normy ITU-R Recommendation BT.709, což zajišťuje, že na jakékoli obrazovce zobrazíte stejnou informaci se stejným vizuálním výsledkem. Jedná se o barevný prostor RGB709, který se přenáší TV signálem. Skládá se z jasové složky a dvou chrominančních R - Y a B - Y. Pro evropský systém PAL jsou tyto signály kódovány v YUV prostoru [1].

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$$

$$U = -0,147R - 0,289G + 0,437B = 0,493(B - Y)$$

$$V = 0,615R - 0,515G - 0,1B = 0,877(R - Y)$$

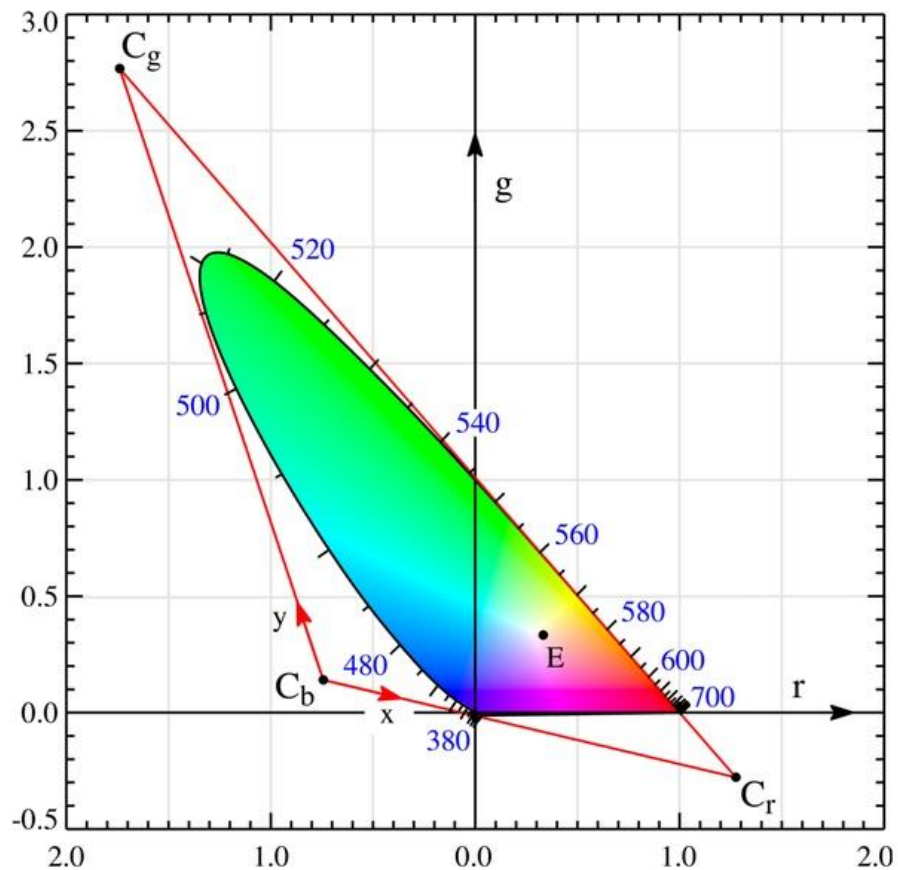
Dalšími barevnými prostory pro aplikace jsou YIQ, což je obdoba YUV pro americký systém NTSC a dále barevný prostor, který byl definován firmou Kodak pro ukládání digitálních barevných snímků PhotoYCC. Transformace mezi RGB709 a PhotoYCC sestává z Gamma korekce z hodnot RGB na R'G'B', lineární transformace z R'G'B' do Y'C'C' a kvantizace Y'C'C' na 8 bitová YCC data [1].

2.3.8 CIE barevné prostory

Organizace CIE se věnuje mezinárodní kooperaci a výměně informací mezi jejími členy na téma související s vědou o osvětlení [1].

2.3.8.1 CIE XYZ

XYZ barevný prostor je složen z myšlených základních nezobrazitelných světél, která slouží pro zobrazení všech barevných existujících světél. Všechny hodnoty, kterých nabývá, jsou kladné. Tento barevný prostor, viz obrázek 6, disponuje důležitou vlastností, kterou je nezávislost na zařízení. Pak každý barevný prostor, který má transformaci z CIE XYZ, je možné považovat za nezávislý [1].



Obrázek 6 CIE XYZ [22]

2.3.8.2 CIE Luv a Lab barevné prostory

Hlavní úlohou těchto barevných prostorů je poskytnout percepčně stejný prostor. Znamená to, že Euklidovské vzdálenosti mezi dvěma barvami jsou silně korelované

s lidským zrakem. K dosažení této vlastnosti bylo potřeb brát v úvahu chromatickou adaptaci a nelineární odezvu zraku. Lab barevný prostor normalizuje svoje hodnoty podílem s bílým bodem, kde a je barva na zeleno-červené škále a b je barva na modro-žluté škále. Luv normalizuje svoje hodnoty rozdílem mezi danou hodnotou a bílým bodem. Obě barevné soustavy jsou určeny pomocí CIE XYZ a složek X_n , Y_n a Z_n , což jsou složky nejjasnějšího bílého bodu v zorném poli. CIE Lab je dána rovnicemi [1, 21]:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \right]$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \right]$$

$$f(x) = x^{1/3}; x \geq 0,008856$$

$$f(x) = 7,787x + \frac{16}{116}; x \leq 0,008856$$

CIE Luv pak vychází ze vztahů [1]:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13L^*(u' - u_n')$$

$$v^* = 13L^*(v' - v_n')$$

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v' = \frac{9X}{X + 15Y + 3Z}$$

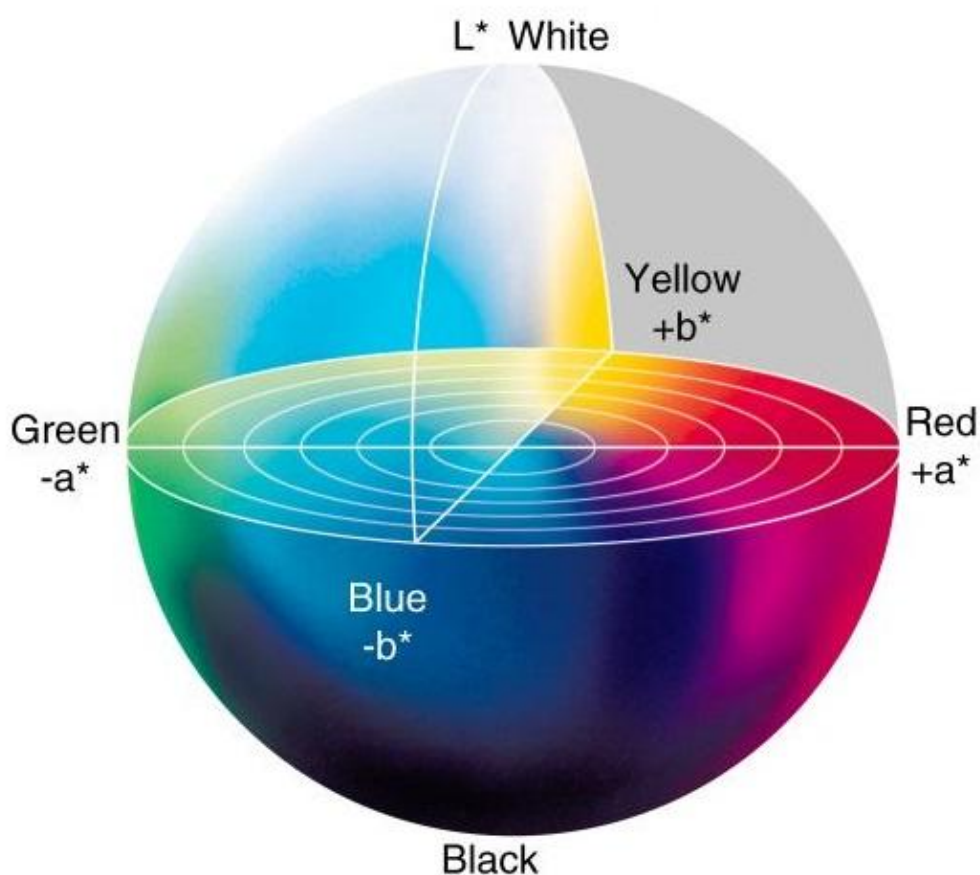
$$u_n' = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}$$

$$v'_n = \frac{9X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}$$

$$f(x) = x^{1/3}; x \geq 0,008856$$

$$f(x) = 7,787x + \frac{16}{116}; x \leq 0,008856$$

Barevný prostor Lab je ilustrován na obrázku 7.



Obrázek 7 Barevný prostor Lab [23]

2.4 Metody vyhodnocení

Vyvážení bílé je možné hodnotit buď subjektivně, nebo objektivně. Subjektivní metoda spočívá v pořízení testovacích obrázků a následném promítnutí subjektům (nezávislým osobám), které mají za úkol jednotlivé výstupy porovnat a ohodnotit na základě vlastních pocitů a zkušeností. Nevýhodou tohoto testování je nutnost sehnat

dostatečný počet osob ochotných pro testování. Dalším nedostatkem je nižší vypovídající hodnota výsledků testování, jelikož každý subjekt může výstupní obrázky vnímat odlišně, což musí mít za následek zkreslení vyhodnocení.

Objektivní metoda vyhodnocení vyvážení bílé nevyžaduje žádné osoby pro ohodnocení použitých metod vyvážení, jelikož používá numerickou kalkulaci.

$$C = \sqrt{C_b^2 + C_r^2}$$

Vztah udává chromatičnost jednotlivých barev obrazu a C_b a C_r představují chrominanční hodnoty na zeleno-červené škále (C_r) a na modro-žluté škále (C_b). Průměrná hodnota chrominance je pak dána podílem měřené a ideální chrominance.

$$\text{Chroma} = 100\% \frac{\text{mean}(C_{\text{měřené}})}{\text{mean}(C_{\text{ideální}})}$$

kde mean představuje aritmetický průměr z hodnot z prvních třech řádek ColorCheckeru.

$$\text{mean} = \frac{\sum_1^{18}}{18}$$

Čím menší je hodnota Chroma, tím je vyvážení bílé dokonalejší. Z uvedeného vztahu vyplývá, že při vyvažování bílé je potřeba převést snímek z RGB barevného prostoru do soustavy YCbCr. Dále je zřejmé, že pro určení účinnosti metod vyvážení bílé není nutné používat jasovou složku. Další, velmi podobnou metodou vyhodnocení kvality algoritmů pro vyvážení bílé ve fotografii, je metoda pracující s barevným prostorem Lab. V této práci bude výkon algoritmů zpracováván touto metodou, jelikož Lab prostor je lineární. Numerický výpočet vzdálenosti pixelů obsahuje všechny tři složky prostoru.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

kde

$$\Delta L = L_r - L_s$$

$$\Delta a = a_r - a_s$$

$$\Delta b = b_r - b_s$$

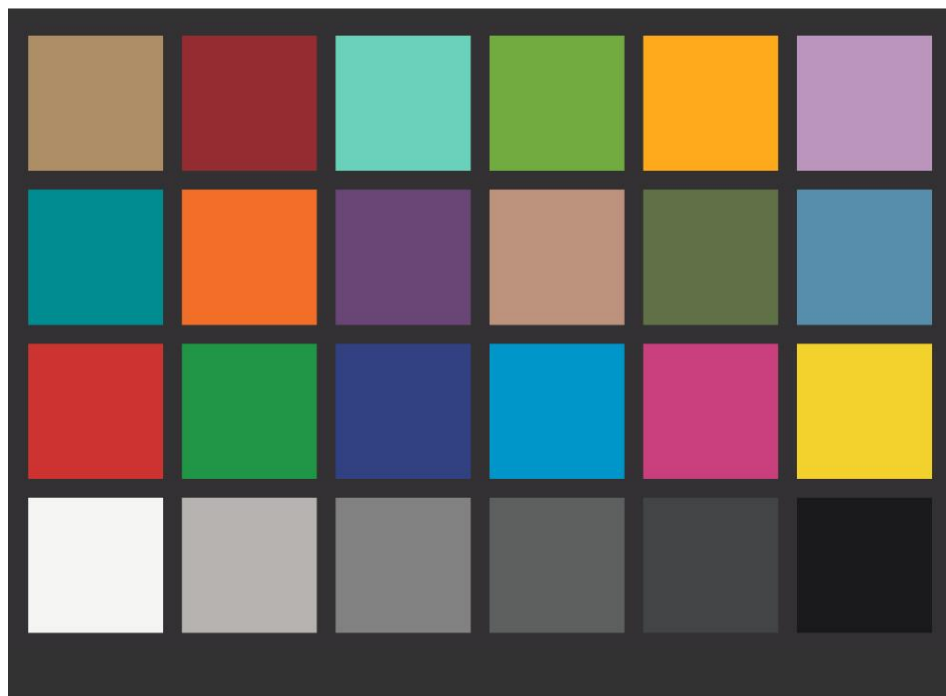
kde L_r , a_r a b_r jsou složky rekonstruovaného snímku a L_s , a_s a b_s jsou složky snímku správného. Vzdálenost obrázků je pak definována.

$$\Delta E = \frac{\sum_i^m \sum_j^n \Delta E_{\text{damaged}}(i, j)}{\sum_i^m \sum_j^n \Delta E_{\text{reference}}(i, j)}$$

kde $\Delta E_{\text{reference}}$ představuje

$$\Delta E_{\text{reference}} = \sqrt{(L)^2 + (a)^2 + (b)^2}$$

Pro vyhodnocení účinnosti vyvážení bílé objektivní metodou je zapotřebí i objektivního pozorovatele. Toho představuje testovací obrazec GretagMachbeth ColorChecker Color Redition chart, jehož podoba je na obrázku 8. Test je možné použít i pro měření šumových vlastností.



Obrázek 8 GretagMachbeth ColorChecker Color Redition chart [15]

Jedná se o tabulku 24 políček s 18 přesně definovanými barevnými tóny a 6 odstíny šedi, jejichž optické denzity se pohybují v rozmezí od 0,05 do 1,5. Tento ColorChecker je určen pro barevný prostor sRGB, čímž je dáno, že políčko 18, které představuje barvu Cyan, není možné správně zobrazit na většině monitorů, jelikož tento odstín je mimo sRGB gamut. Barvy jednotlivých políček nejsou vysoce satureovány a jsou tisknuty samostatně pomocí přesně řízených pigmentů. Jejich povrch je hladký a matný. Obrázek 9 obsahuje informace o barevných souřadnicích všech polí v prostorech Yxy a Lab pro barevnou teplotu 5000K.

		D50					
Pole	Barva	Y	x	y	L*	a*	b*
A 1	Light Brown	29,7	0,421	0,403	61,4	9,0	25,6
A 2	Ruby	9,1	0,561	0,332	36,2	46,5	24,1
A 3	Mint Green	51,0	0,284	0,392	76,7	-36,2	0,0
A 4	Lemon Green	32,8	0,364	0,511	64,0	-33,1	45,9
A 5	Warm Yellow	52,7	0,512	0,437	77,7	27,1	77,7
A 6	Lila	36,2	0,352	0,309	66,7	20,4	-14,1
B 1	Turquoise Blue	18,6	0,209	0,349	50,2	-41,8	-17,4
B 2	Orange	32,4	0,562	0,387	63,7	50,3	62,4
B 3	Purple	8,8	0,334	0,261	35,6	22,0	-20,7
B 4	Light Skin	33,4	0,416	0,377	64,5	16,0	17,7
B 5	Foliage	14,7	0,367	0,441	45,3	-12,6	20,4
B 6	Sky	23,7	0,264	0,312	55,8	-13,1	-22,4
C 1	Red	17,2	0,596	0,337	48,5	62,3	41,7
C 2	Green	21,9	0,300	0,525	53,9	-48,3	31,4
C 3	Blue	5,9	0,227	0,202	29,1	10,0	-39,4
C 4	Cyan	24,2	0,207	0,277	56,3	-25,1	-38,9
C 5	Magenta	19,0	0,481	0,282	50,6	60,1	-0,8
C 6	Yellow	66,9	0,461	0,473	85,5	1,6	78,1
D 1	White	91,1	0,346	0,360	96,4	-0,5	0,8
D 2	Grey 1	45,7	0,351	0,362	73,3	0,8	1,8
D 3	Grey 2	22,3	0,345	0,359	54,3	-0,2	0,1
D 4	Grey 3	11,6	0,342	0,358	40,5	-0,6	-0,5
D 5	Grey 4	5,9	0,340	0,357	29,1	-0,8	-0,8
D 6	Black	1,0	0,343	0,346	9,0	1,1	-1,4

Obrázek 9 Tabulka barevných souřadnic [15]

Měření začíná pořízením fotografie obrazce při známých podmínkách. Těmi jsou vlastnosti fotoaparátu a barevná teplota okolního prostředí, jelikož výsledek vyvážení může být rozdílný při focení s bleskem nebo při zářivkovém osvětlení. Obrazec je možné vyfotit samostatně nebo jako část scény. Nezáleží na vzdálenosti, ve které je test umístěn od snímacího zařízení. To znamená, že není nutné snímek vyplnit pouze obrazcem, dokonce

tento postup může snížit přesnost měření, jelikož případná vinětace zdeformuje obraz natolik, že měření je významně zkresleno. Doporučuje se zařadit do scény další prvky, které mohou ovlivnit vyvážení bílé. Snímek ColorCheckeru se šířkou do 100 pixelů je ideálním pro náš případ. Je také vhodné umístit test na šedé pozadí s odrazivostí přibližně 18% pro zajištění standardní expozice. Obrazce totiž bývají přeexponovány na černém pozadí a podexponovány na pozadí bílém.

Osvětlení by mělo být co nejrovnoměrnější. Odchylna osvětlení v různých místech obrazce by neměla překročit hodnotu $\pm 5\%$. Pro vyvarování se snížení kontrastu snímku je potřeba zajistit, aby světelný zdroj nevycházel zpoza snímacího zařízení. Nastavení těchto podmínek je dostatečné pro přesné měření účinnosti vyvažovacích algoritmů. Pro snížení výpočetních nároků se musí pracovat buď s RAW soubory nebo je převést na JPEG o maximální kvalitě, TIFF bez LZW komprese nebo PNG [6].

2.5 Formát dat

Moderní zařízení pro zachycení statického obrazu snímají data a ukládají je do dvou formátů. Používají třídu souborových formátů RAW a komprimovaný JPEG. To jsou formáty, se kterými se bude pracovat.

2.5.1 RAW data

Jedná se o soubor dat, která jsou neovlivněna postprocessingovými algoritmy daného zařízení. Jsou to data, která byla sejmuta přímo z obrazového snímače a neprošla konverzí do interního barevného prostoru aparátu a následným převodem do formátu typu JPEG. Nejsou tak přímo reprodukovatelná tiskárnou nebo upravovatelná v grafickém editoru. Splňují v podstatě roli negativů v případě kinofilmu, kdy negativy nejsou hned použitelné pro výsledný snímek, nicméně obsahuje všechny potřebné informace pro vytvoření fotografie. Podobně jako negativní snímek může digitální negativ obsahovat větší dynamický rozsah nebo barevný gamut než výsledná fotografie. Zachovává všechnu informaci zachycené scény. Hlavním účelem nezpracovaných (surových) dat tedy je uložení informace z obrazového senzoru s minimální ztrátou. Tím vzniknou metadata, která jsou definovaná jako data poskytující informaci o jednom nebo více aspektech dat. Mezi tyto aspekty patří mimo jiné prostředky pro pořizování dat, jejich účel, časová informace o pořizování dat, nebo použité standardy. Pro případ digitální fotografie, metadata mohou obsahovat velikost snímku, barevnou hloubku, či rozlišení. Struktura RAW snímků sleduje

sjednocený vzor pro uchování informace. Obsahuje: 1) krátkou hlavičku s indikátorem pro pořadí bytů, identifikátor a offset na hlavní souborová data. 2) Metadata obrazového senzoru pro interpretaci dat ze senzoru. 3) Obrazová metadata potřebná pro vložení do databáze. Obsahují nastavení expozice, model čočky a kamery, čas a datum pořízení snímku. Některé RAW soubory obsahují i data v Exif formátu. 4) Náhled obrázku 5) Další informace. Každý výrobce má svoji vlastní verzi surových dat (KDC - Kodak, CR2 - Canon, RW2 - Panasonic, NEF - Nikon) [16].

2.5.2 JPEG - Joint Photographic Experts Group

Formát ztrátové komprese využívaný v digitální fotografii. Stupeň komprese je možné upravit a tím nastavit hranici mezi velikostí snímku v paměťovém prostoru a kvalitou snímku. Typicky je kompresní poměr kolem 10:1. Je používáno více typů JPEG komprese. Nejběžnější obrazovým formátem jsou JPEG/Exif a JPEG/JFIF. Exif je formát určen pro digitální fotoaparáty, zatímco JFIF je formát pro ukládání a posílání snímků na Internet. Základním formátem pro JPEG byl JIF - JPEG Interchange Format, nicméně již se nevyužívá, jelikož postrádal definici barevného prostoru, podvzorkovací registraci a definici pixelového podílu. Standardy, které tyto nedostatky odstraňují, byly nejprve právě JFIF - JPEG File Interchange Format a následně Exif [17].

2.5.3 Exif - Exchangeable image file format

Formát specifikující metadata pro obrázky, které jsou vloženy do každého vytvořeného souboru digitálním fotoaparátem. Ve snímku jsou zaznamenána data o výrobci, modelu aparátu, datu a času pořízení, systému měření, režimu blesku, nastavení zoomu a clony, citlivost, hodnota expozice a expoziční kompenzace [18].

2.6 Vyvážení bílé

Automatické vyvážení bílé (AWB - Automatic White Balance) je jedna z nejdůležitějších funkcí pro obrazové přijímače pro dosažení vysoké kvality zachycené scény. Lidské oko má schopnost barevné stálosti, která se vypořádává s rozdílnými světelnými podmínkami přizpůsobováním a upravováním spektrální odezvy. Tuto vlastnost digitální videokamery a fotoaparáty postrádají. Pokud je bílý objekt osvětlen nízkou barevnou teplotou, tak se výsledný obraz bude jevit jako načervenalý. Naopak pokud bude

osvětlen vysokou barevnou teplotou, tak bude snímek namodralý. Proto je potřeba zavést vyvážení bílé, abychom dosáhli, co nejvěrnější reprezentace barev na fotografii. Následující metody vyvážení bílé jsou všechny tzv. globálního charakteru. Tedy, obrázek upravují jako celek, nevybírají určité lokality ve fotografii, na které by pak aplikovaly rozdílné parametry. Tento fakt je důležitý pro správné zajištění okolních podmínek při testování, jelikož je nutné, aby osvětlení zachytávané scény bylo rovnoměrné.

2.6.1 Gray World

Jednou z nejběžnějších metod vyvážení bílé je algoritmus šedého světa, který předpokládá, že průměrná reflektance ve snímané scéně osvětlené neutrálním světelným zdrojem je achromatická. Tedy, že průměrné hodnoty intenzit červeného, zeleného a modrého kanálu jsou téměř vyrovnané. Tento algoritmus navrhl Buchsbaum a předpokládá, že v průměru tihne skutečný svět k šedému barevnému tónu a odhad osvětlení snímané plochy je proveden aritmetickým průměrem všech barevných pixelů. Od původního návrhu šedého světa se odvíjí spousta dalších úprav. Informace dána průměrem každého barevného kanálu snímku představuje šedotónovou úroveň. Prvním krokem je tedy získat průměrnou hodnotu pixelů v jednotlivých kanálech [9, 10].

$$R_{\text{mean}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} R(x, y)$$

$$G_{\text{mean}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} G(x, y)$$

$$B_{\text{mean}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} B(x, y)$$

Následně je potřeba vypočítat průměrnou hodnotu Avg ze všech kanálů. Ta je použita k získání koeficientů pro jednotlivé kanály, kterými se dané kanály upraví.

$$K_r = \frac{\text{Avg}}{R_{\text{mean}}}$$

$$K_g = \frac{\text{Avg}}{G_{\text{mean}}}$$

$$K_b = \frac{\text{Avg}}{B_{\text{mean}}}$$

Nicméně tento algoritmus nedosahuje uspokojivých výsledků v případech, kdy je ve scéně dominující plocha jedné barvy (modrá obloha, vodní plocha, zelená louka, atp.) [9, 10].

2.6.2 White Patch

Jedná se o další velmi známou a používanou metodu vyvážení bílé. Spočívá v tom, že maximální odezva v RGB kanálech je způsobena perfektní odrazivostí. Povrch s téměř dokonalými odrazivými vlastnostmi odráží celou světelnou škálu, která na daný povrch dopadne. Tím je dáno, že barva téměř dokonalé odrazivosti je barvou světelného zdroje. V praxi je určení maximální odrazivosti mírně uvažováním barevných kanálů odděleně, což resultuje v max-RGB algoritmus, který z white patch algoritmu vychází [12].

Algoritmus spočívá v určení maximálních hodnot ve všech barevných kanálech snímku, z nichž se následně určí průměrná hodnota.

$$K_r = \max(R)$$

$$K_g = \max(G)$$

$$K_b = \max(B)$$

$$M_r = \text{mean}(K_r)$$

$$M_g = \text{mean}(K_g)$$

$$M_b = \text{mean}(K_B)$$

Tou se pak podělí maximální možná hodnota 255, čímž se dosáhne zisku pro všechny kanály.

$$R_{\text{gain}} = \frac{255}{M_r}$$

$$G_{gain} = \frac{255}{M_g}$$

$$B_{gain} = \frac{255}{M_b}$$

Tímto ziskem se nakonec jednotlivé barevné kanály vynásobí a tím se vyváží testovací snímek.

$$I_r = R_{gain}I_o$$

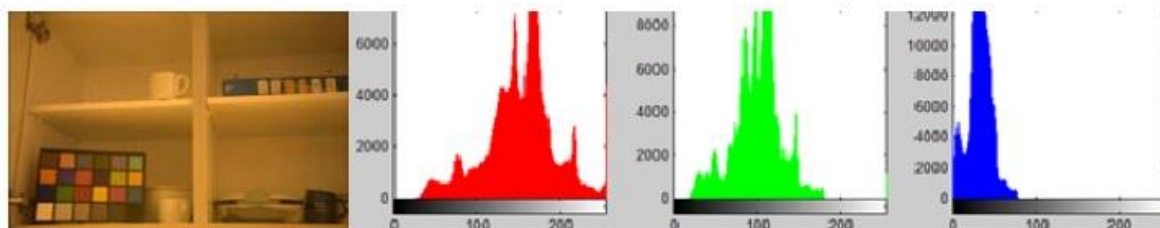
2.6.3 Histogram Stretch

Roztažení histogramu cílí na rozložení frekvencí výskytu pixelů přes celou šíři histogramu. Histogram se tak modifikuje způsobem, aby nejnižší hodnota intenzity byla nulová a nejvyšší dosahovala maximální možné hodnoty. Pokud jsou tedy hodnoty intenzit velmi blízko sebe, pak roztažení zajistí lepší rozložení pixelů, čímž se dosáhne stavu, kdy světlé pixely budou ještě světlejší a tmavé se budou více blížit černé. Tím je dosaženo zvýšení kontrastu obrázku. Barevné histogramy jsou tři oddělené histogramy pro jednotlivé R, G a B složky a reprezentují distribuci všech barev v RGB obrázku. Pro digitální kamery je barevný histogram snadno dosažitelný a přitom velmi užitečným zdrojem informací. Mimo jiné slouží k zobrazení vyvážení bílé. V jednotlivých histogramech pro všechny kanály je možné vidět špičky intenzit. V případě, že všechny tři špičky jsou ve stejném místě a tedy se překrývají, obrázek je neutrální a vyvážení bílé je korektní. V opačném případě je nutné změnit nastavení barevné teploty fotoaparátu. Například, pokud je modrý kanál výrazně odlišný od ostatních složek, pak se bude obrázek jevit příliš modrý a je potřeba upravit vyvážení bílé nebo barevnou teplotu.

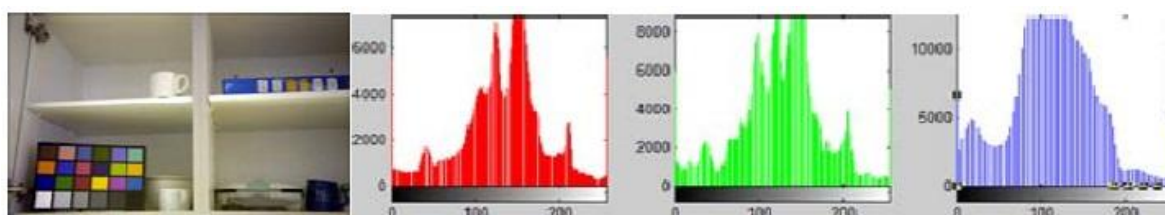
Obecně je cílem vyvážení bílé poskytnout obrázek bez jakýchkoli nežádoucích barevných odstínů způsobených osvětlením. Jinak řečeno, každý povrch v obrázku by se měl jevit, jako kdyby byl osvětlen bílým světlem. Aby bylo dosaženo těchto výsledků je potřeba nalézt dva tónové prahy a následně roztáhnout tón mezi tyto dva prahy pro každý kanál. K tomu slouží následná rovnice [7]:

$$C_{out} = \frac{C_{in} - L}{H - L} \text{range}(1)$$

kde C_{out} značí výstup tónové hodnoty pixelu, C_{in} je vstup tónové hodnoty pixelu, H a L jsou dva prahy, kde H je maximální hodnota ze vstupu barevného histogramu a L hodnota minimální. Range reprezentuje výstupní tónový rozsah, který je přednastaven na 255, a c_{min} je nejnižší tónová hodnota pixelu a může být přednastavena na 0. R , G a B tónové hodnoty každého pixelu jsou pak určeny rovnicí (1). Celý postup je možné rozdělit do 4 kroků. Nejdříve je potřeba zobrazit barevné histogramy všech kanálů. Následně se určí práh H , který převyšuje 99% všech pixelů a práh L , který je nižší než 99% všech pixelů pro každý kanál. Tím se odstraní horní a dolní 1% pixelů s nejvyšší a nejnižší tónovou hodnotou a následně se tak může dosáhnout roztažení zbylých pixelů do celé šíře histogramu. Každý pixel ze všech tří barevných složek pak projde procesem podle rovnice C_{out} . Nakonec se zobrazí výsledný obrázek. Příklad je zobrazen na obrázcích 10 a 11. Na horním obrázku je možné vidět, že modrý histogram se pohybuje pouze v nízkých hodnotách intenzit. Zelený histogram se také nepohybuje v těch nejvyšších hodnotách. Dolní obrázek pak ukazuje snímek s vyváženou bílou roztažením hlavně modrého a zeleného histogramu [7].



Obrázek 10 Původní snímek s barevnými histogramy [7]



Obrázek 11 Upravený snímek s barevnými histogramy [7]

Pro výpočet chromatické chyby algoritmu vyvážení bílé jsou potřeba dvě hodnoty, a to úhlová chyba a Euklidovská vzdálenost. Tyto hodnoty jsou nezávislé na jasů a osvětlení a jednoduše porovnávají barvy. Úhlová chyba vyjadřuje úhel mezi očekávaným osvětlením ρ_w a vektorem skutečného osvětlení ρ_{w1} při snímání scény [7].

$$e_{\text{ang}} = \cos^{-1} \left(\frac{\rho_w^T \rho_w}{\|\rho_w^T\| \|\rho_w\|} \right)$$

Euklidovská vzdálenost je určena jako střední kvadratická odchylka mezi chromatičností očekávaného osvětlení ($\rho_{w1}, \rho_{w2}, \rho_{w3}$) a skutečným osvětlením ($\hat{\rho}_{w1}, \hat{\rho}_{w2}, \hat{\rho}_{w3}$) podle následujícího vzorce [7]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{(\hat{\rho}_{w1} - \rho_{w1})^2 + (\hat{\rho}_{w2} - \rho_{w2})^2 + (\hat{\rho}_{w3} - \rho_{w3})^2}$$

Tato metoda je testována výpočtem saturace achromatických barevných štítků v testovacím obrazi od Imatestu [11]. Saturace reprezentuje barevnost barev a je jedna ze tří koordinátů v HSI barevném prostoru, což značí barevný tón, saturaci a intenzitu. Pro neutrální barvu má být saturace nulová [7].

$$S = 1 - \frac{\text{Min}(R,G,B)}{\text{Max}(R,G,B)}$$

kde $\text{MIN}(R,G,B)$ a $\text{MAX}(R,G,B)$ jsou minimální a maximální R, G a B hodnoty achromatických barevných štítků.

Uvedená metoda vyvážení bílé je nenáročná na výpočet a tím tedy i velmi rychlá nicméně má dva nedostatky. Prvním je možnost rozšíření snímku a zvýšení intenzity ve výsledném obrázku, což může být problém v případech, kdy je vyžadováno dodržet původní míru intenzity. Druhým je pak neúčinek na snímky, jejichž barevné histogramy jsou již roztaženy na celý tónový rozsah [7].

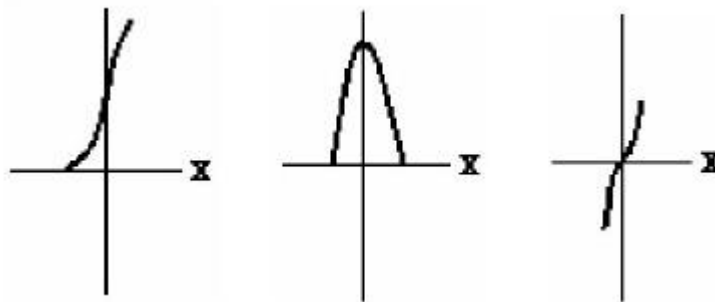
2.6.4 Edge Detection

Hrany v chrominančních rovinách obrázku jsou oblasti, kde chromatické hodnoty pixelů kolísají nejsilněji. V podstatě se jedná o meze oddělující jednotlivé barevné odstíny. Algoritmus vyvážení bílé za použití detekce hran se skládá ze tří hlavních částí. Nejprve je potřeba detekovat hrany, pak určit kanálové zisky a nakonec přizpůsobit hodnoty pixelů. Popsány jsou následovně [8]:

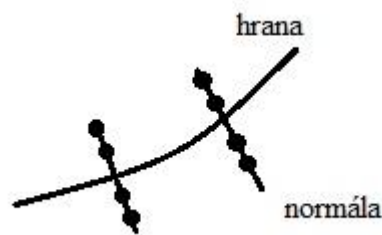
-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

Obrázek 12 Operátor pro detekci hran [8]



Obrázek 13 Příklady tvaru hran [8]



Obrázek 14 Typické označení pixelů [8]

Pro detekci hran je tedy použit operátor z obrázku, kterým je vygenerován snímek chromatických hran. Hodnota pixelu (x, y) ve snímku je vypočtena vztahem [8]:

$$D(x, y) = \Delta C_b(x, y) + \Delta C_r(x, y)$$

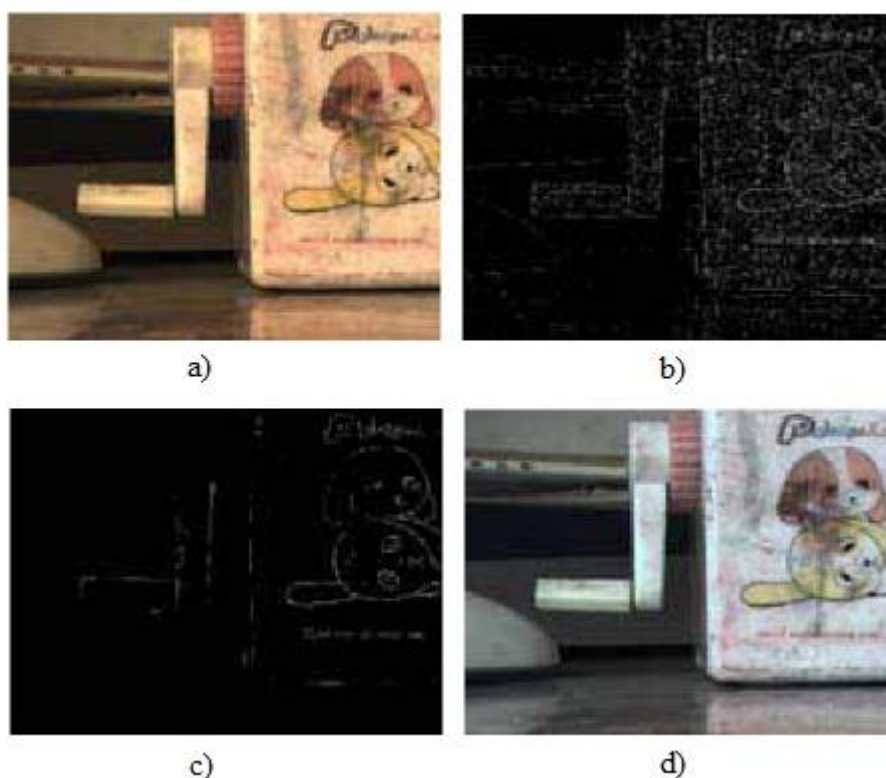
kde

$$C_b(x, y) = \frac{|C_b(x + 1, y - 1)C_b(x + 1, y) + C_b(x + 1, y + 1) - C_b(x - 1, y - 1) - C_b(x - 1, y) - C_b(x - 1, y + 1)|}{4} + \frac{|C_b(x - 1, y + 1) + C_b(x, y + 1) + C_b(x + 1, y + 1) - C_b(x - 1, y - 1) - C_b(x, y - 1) - C_b(x + 1, y - 1)|}{4}$$

a

$$C_r(x,y) = \frac{|Cr(x+1,y-1) + Cr(x+1,y) + Cr(x+1,y+1) - Cr(x-1,y-1) - Cr(x-1,y) - Cr(x-1,y+1)|}{4} + \frac{|Cr(x-1,y+1) + Cr(x,y+1) + Cr(x+1,y+1) - Cr(x-1,y-1) - Cr(x,y-1) - Cr(x+1,y-1)|}{4}$$

V rovnicích pro ΔC_b a ΔC_r jsou $C_b(x,y)$ a $C_r(x,y)$ chromatické hodnoty pixelu (x,y) ve vstupním obrázku. Pro redukci šumu je aplikován operátor $\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, který vyhladí C_b a C_r roviny vstupního obrázku. Hranice je odvozena podle histogramu $D(x,y)$ pro vymazání hran, které jsou příliš slabé. Tloušťka hran je závislá na hranici binarizování. Tím je velmi obtížné lokalizovat přesnou hranu ve snímku. Pro typickou funkci hrany $f(x)$ jsou její první a druhá derivace na obrázku. Ukazuje nám to, že nulový bod druhé derivace funkce hrany neboli maximální bod první derivace hrany, by měl být určen přesně. V uvedeném algoritmu jsou hrany o tloušťce jednoho pixelu tvořeny lokálním maximem ve snímku chromatických hran. Průběh algoritmu je vidět na obrázku 15 [8].



Obrázek 15 a) Původní snímek b) všechny detekované hrany c) Pročištěné hrany d) upravený snímek [8]

Pro výpočet kanálových zisků je potřeba označit referenční pixely ve snímku. Všechny zvolené pixely jsou podél hran na obou stranách, jak je ilustrováno na obrázku. Pro

hranový pixel jsou zvoleny dva nejbližší pixely na normále po obou stranách. Kanálové zisky jsou pak dány:

$$R_{\text{gain}} = \frac{Y_{\text{avg}}}{R_{\text{avg}}}$$

$$G_{\text{gain}} = \frac{Y_{\text{avg}}}{G_{\text{avg}}}$$

$$B_{\text{gain}} = \frac{Y_{\text{avg}}}{B_{\text{avg}}}$$

kde R_{avg} , G_{avg} a B_{avg} jsou střední hodnoty referenčních pixelů pro tři kanály a Y_{avg} je střední hodnota jasu. Přizpůsobení hodnot pixelů je provedeno pomocí Von Kriesova diagonálního modelu:

$$R_{\text{new}} = R_{\text{gain}} \times R$$

$$G_{\text{new}} = G_{\text{gain}} \times G$$

$$B_{\text{new}} = B_{\text{gain}} \times B$$

kde R , B a G jsou původní hodnoty pixelů ve snímku a R_{new} , G_{new} a B_{new} jsou přizpůsobené. Kroky pro daný algoritmus jsou překonvertování snímku z RGB prostoru do YCbCr prostoru, detekování hran z C_b a C_r rovin, označení referenčních pixelů ve snímku, odvození zisků pro R , G a B kanály a přizpůsobení hodnot všech pixelů [8].

2.6.5 Zone System

Zónový systém byl vyvinut pro spojení různých svítivostí objektu s hodnotami šedé od černé k bílé, které vidí lidské oko pro přesné zobrazení ve výsledné fotografii. Expoziční přesnost je zdokonalována čtením průměrné hodnoty jednoho povrchu se střední hodnotou ve scéně. Hodnota 18% odrazivosti je matematicky prezentována jako střední šedá na geometrické škále od černé k bílé. Zónový systém definuje střední šedou, která odpovídá 18% odrazivosti šedé na 90% bílou a je referována jako zóna V. Systém celkem

rozděluje barevnou stupnici do jedenácti zón od 0 do X, kde zóna 0 představuje čistě černou barvu a zóna X čistě bílou, viz obrázek 16. Nejdůležitější tři zóny jsou zóna III, používána pro měření stínů ve filmu, zóna V pro 18% odrazivost šedé a zóna VII, používána pro měření světlých míst ve fotografii.

Fotografové obecně preferují měření expozice ve stopách. Jednostopová expozice se mění jako změna jedné zóny na logaritmické expoziční stupnici, ve které je povrch odrážející dvakrát více světla než jiný o jednu stopu výše. V denzitometrii je tedy škála expozice relativní logaritmus expozice a jedna stopa odpovídá 0,3 jednotky logaritmu expozice. To reprezentuje aritmetickou změnu o faktor 2. Důsledkem je hodnota denzity zóny I nastavena na 0,1 jednotky a pak je každá vyšší zóna 0,3 jednotky logaritmu expozice až do zóny X. Tedy, každá zóna představuje dvojnásobek jasu následující zóny a polovinu zóny předcházející [19].

Zóna	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Tónová hodnota	0	26	51	77	102	128	153	179	204	230	255
Počet jednotek	1/2	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Tónový rozsah	0	24	47	70	93	116	140	163	186	209	232
	23	46	69	92	115	139	162	185	208	231	255

Obrázek 16 Rozdělení jednotlivých zón v histogramu [19]

Histogram je grafické znázornění barevné distribuce v obraze. V této metodě vyvážení bílé je histogram rovněž rozdělen téměř uniformě do jedenácti oblastí, které reprezentují zónový systém a expoziční jednotky pro zobrazení relativního jasu. Následně je přiděleno 256 barevných tónů do jedenácti zón aplikováním procentního podílu každé oblasti. Zóna 0 má jas 0 % a s 10% krokem se dostáváme k 100 % jasu v zóně X.

Navrhovaný algoritmus zahrnuje detekci barevného nádechu a barevné vyvážení. Fotografický měřič osvětlení je kalibrován na střední šedou, což znamená předpoklad, že vše co měří je středně šedé. V podstatě je tím řečeno, že průměrný barevný tón průměrně snímané scény odpovídá střední šedé. Je tedy potřeba zjistit barevný nádech fotografie. Obrázek je tedy převeden do prostoru YCbCr, kde C_b a C_r budou směrodatné pro určení daného nádechu. Dále, $I(x,y)$ označuje zpracováváný obraz s rozměry $M \times N$, kde x a y jsou souřadnice pozice pixelu. $I_y(x,y)$, $IC_b(x,y)$ a $IC_r(x,y)$ jsou jasová složka a chrominanci složky C_b a C_r . Průměrná a standardní odchylka je pak vypočtena podle vzorce [19]:

$$Y_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_y(x, y)$$

$$Cb_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_{cb}(x, y)$$

$$Cr_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_{cr}(x, y)$$

a

$$Y_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_y(x, y) - Y_{\text{avg}})^2}$$

$$Cb_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_{cb}(x, y) - Cb_{\text{avg}})^2}$$

$$Cr_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_{cr}(x, y) - Cr_{\text{avg}})^2}$$

Podle teorie zónového systému je zóna VI dvakrát jasnější než zóna V a zóna IV je dvakrát temnější než zóna V. Proto se pro detekci barevného nádechu využívají rovnice [19].

$$I_{\text{adj}}(x, y) = \begin{cases} Cb_{\text{adj}} & \text{pro } Cb_{\text{diff}} < (\theta_{cb} \times Cb_{\text{std}}) \\ Cr_{\text{adj}} & \text{pro } Cr_{\text{diff}} < (\theta_{cr} \times Cr_{\text{std}}) \end{cases}$$

kde

$$Cb_{\text{diff}}(x, y) = I_{cb}(x, y) - Cb_{\text{avg}}$$

$$Cr_{\text{diff}}(x, y) = I_{cr}(x, y) - Cr_{\text{avg}}$$

a

$$\theta_{Cb} = \begin{cases} 2 \left[\frac{Cb_{avg} - zoneVupper}{zoneS} \right] & \text{pro } Cb_{avg} > zoneVupper \\ 1 & \text{pro } Cb_{avg} = zoneVupper \text{ nebo } Cb_{avg} = zoneVlower \\ 0,5 \left[\frac{zoneVlower - Cb_{avg}}{zoneS} \right] & \text{pro } Cb_{avg} < zoneVlower \end{cases}$$

a

$$\theta_{Cr} = \begin{cases} 2 \left[\frac{Cr_{avg} - zoneVupper}{zoneS} \right] & \text{pro } Cr_{avg} > zoneVupper \\ 1 & \text{pro } Cr_{avg} = zoneVupper \text{ nebo } Cr_{avg} = zoneVlower \\ 0,5 \left[\frac{zoneVlower - Cr_{avg}}{zoneS} \right] & \text{pro } Cr_{avg} < zoneVlower \end{cases}$$

kde $zoneVupper$, $zoneVlower$ a $zoneS$ značí horní a dolní hranici zóny V a celkovou velikost dané zóny.

Jasová složka Y ovlivňuje všechny tři složky v RGB prostoru. Nežádoucí barevný odstín je odstraněn v případě, že světlé a střední pixely jsou upraveny. Jelikož škála zón je rozdělena po 10% nárůstech, je celkový zisk I_{gain} dosažen udržením horních pixelů z $\max(\theta_{Cb}, \theta_{Cr}) * 90\%$ pixelů po uspořádání přizpůsobených pixelů od nejvyššího po nejnižší. Nové zisky jednotlivých kanálů jsou pak [19].

$$R_{new} = R_{old} R_{gain}$$

$$G_{new} = G_{old} G_{gain}$$

$$B_{new} = B_{old} B_{gain}$$

kde

$$R_{gain} = \frac{\min(Y)}{(\text{mean}(R(I_{gain}(x, y,))) + \frac{\min(R(I_{gain}(x, y)))}{2})}$$

$$G_{gain} = \frac{\min(Y)}{(\text{mean}(G(I_{gain}(x, y,))) + \frac{\min(G(I_{gain}(x, y)))}{2})}$$

$$B_{gain} = \frac{\min(Y)}{(\text{mean}(B(I_{gain}(x, y,))) + \frac{\min(B(I_{gain}(x, y)))}{2})}$$

2.6.6 Single Retinex

Základní retinex model je založen na předpokladu, že HVS (Human Visual System - Lidský zrakový systém) operuje se třemi retinal-kortikálními systémy. Každý pracuje nezávisle na nízkých, středních a vysokých frekvencích viditelného elektromagnetického spektra. Každý systém produkuje hodnotu světelnosti, která pomocí superpozice určuje vnímání barvy lidským zrakem. V digitálních RGB snímcích je světelnost reprezentována hodnotami L_R , L_G a L_B ve třech trichromatických kanálech.

Land a McCann pozorovali, že hrany jsou hlavním zdrojem informace pro dosažení barevné stálosti. Navíc zjistili, že podíl mezi dvěma sousedními body může detekovat hranu a eliminovat neuniformní osvětlení snímku. Hodnoty osvětlení jsou počítány z logaritmických hodnot odezvy senzoru, z čehož vyplývá, že jsou určovány rozdíly hodnot. Původní hlavní myšlenkou je uvažování prostorové chromatické informace kolem každého pixelu x k vypočtení jeho hodnoty osvětlení. Snímková data $I(x)$ představují hodnotu intenzity pro každý chromatický kanál v místě x . Land a McCann používají soubor N cest $\gamma_1, \dots, \gamma_N$ a začínají na j_k a končí na x . Pokud n_k bude číslo pixelů cesty γ_k a určeno $x_{t_k} = \gamma_k(t_k)$ pro $t_k = 1, \dots, n_k$, pak $x_{t_{k+1}} = \gamma_k(t_{k+1})$ bude následný pixel cesty. Hodnota osvětlení pixelu x v daném chromatickém kanálu je průměrné relativní osvětlení x přes všechny cesty [11].

$$L(x) = \frac{\sum_{k=1}^N L(x; j_k)}{N}$$

kde $L(x; j_k)$ je relativní osvětlení pixelu x definované jako

$$L(x; j_k) = \sum_{t_k=1}^{n_k} \delta \left[\log \frac{I(x_{t_k+1})}{I(x_{t_k})} \right]$$

pro případy t

$$\delta(s) = \begin{cases} s & \text{pro } s > t \\ 0 & \text{pro } s < t \end{cases}$$

Novější a pokročilejší metoda implementace retinex algoritmu spočívá v použití pouze jednoho parametru, a to prahu δ . Tato implementace je založena na Poissonově rovnici.

$$F(x) = f\left(\frac{I(x)}{I(x_{-0})}\right) + f\left(\frac{I(x)}{I(x_{+0})}\right) + f\left(\frac{I(x)}{I(x_{0-})}\right) + f\left(\frac{I(x)}{I(x_{0+})}\right)$$

kde x_{-0} , x_{+0} , x_{0-} a x_{0+} představují čtyři diskrétní sousedy a $f(x) = \delta(\log(x))$. Osvětlení v chromatickém kanálu L je řešením diskrétní Poissonovy rovnice s Neumannovými okrajovými podmínkami.

$$\begin{cases} -\Delta_d L(x) = F(x) & x \in \Omega \\ \frac{\partial L}{\partial n} = 0 & x \in \partial\Omega \end{cases}$$

kde F je funkce, která závisí na intenzitě každého pixelu a jeho sousedů.

Poissonovu rovnici je možné vyřešit pomocí Fourierovou transformací. Diskrétní Fourierova transformace dvoudimenzionální funkce $f(n,m)$ na ploše $N \times M$ je definována následovně [11].

$$\hat{f}(k,l) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f(n,m) e^{-i\frac{2\pi kn}{N}} e^{-i\frac{2\pi lm}{M}} \begin{cases} k = 0, \dots, N-1 \\ l = 0, \dots, M-1 \end{cases}$$

a inverzní diskrétní Fourierova transformace

$$f(n,m) = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \hat{f}(k,l) e^{i\frac{2\pi kn}{N}} e^{i\frac{2\pi lm}{M}} \begin{cases} n = 0, \dots, N-1 \\ m = 0, \dots, M-1 \end{cases}$$

Diskrétní Poissonova rovnice

$$\Delta_d L(n,m) = F(n,m)$$

je vyřešena substitucí diskrétní Fourierovy transformace, což resultuje v rovnici

$$\hat{L}(k,l) \left(4 - 2 \cos \frac{2\pi k}{N} - 2 \cos \frac{2\pi l}{M}\right) = \hat{F}(k,l)$$

Z definice diskretní Fourierovy transformace vyplývá, že $f(0,0)$ je střední hodnota f v mřížce. Poissonova rovnice s Neumannovými okrajovými podmínkami má unikátní řešení do aditivní konstanty. Takže vypočtením řešení, jehož střední hodnota je nulová, dostáváme [11]:

$$\hat{L}(k,l) = \begin{cases} \frac{\hat{F}(k,l)}{\left(4 - 2 \cos \frac{2\pi k}{N} - 2 \cos \frac{2\pi l}{M}\right)} & \text{pro } (k,l) \neq (0,0) \\ 0 & \text{pro } (k,l) = (0,0) \end{cases}$$

Použitím inverzní diskretní Fourierovy transformace je možné vypočítat L v každém bodě matice a následným normalizováním rozsahu L v intervalu $[0,255]$ dostaneme finální výsledek. Neumannovy okrajové podmínky jsou převedeny symetrizací podél snímku pro vznik $2N \times 2M$ obrázku. Všechny výpočty jsou tedy provedeny v $2N \times 2M$ prostoru. Tato metoda se nazývá FFT (Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova Transformace) implementace a vyžaduje dvě provedení FFT na snímek [11].

2.6.7 Automatic Color Enhancement

Automatic Color Enhancement "ACE" je efektivní metoda pro korekci a vylepšení barevného snímku, kterou představili Gatta, Rizzi a Marini. Je založena na modelování několika nízkoúrovňových mechanismů lidského zrakového ústrojí, jakými jsou Gray World, White Patch, laterální inhibice a lokálně – globální adaptace. Modelováním těchto mechanismů je možné simulovat proces vnímání. Vylepšený snímek vypadá přirozeně, protože vstupní obrázek je upraven takovým způsobem, který je konzistentní se způsobem vnímání lidského oka.

Je prokázáno, že ACE je spjata s uniformním vyrovnáním histogramu. Pokud I je vstupní šedotónový obrázek s Ω doménou a intenzity normovány na hodnoty v množině $(0,1)$, pak je definice normalizovaného kumulativního histogramu F následující:

$$F(\lambda) = \frac{1}{|\Omega|} |\{x \in \Omega: I(x) \leq \lambda\}|, \lambda \in [0,1],$$

kde $|\Omega|$ je celkový počet pixelů ve snímku. V případě, že snímek je barevný, se uvedený postup aplikuje na všechny tři barvosné kanály jednotlivě. Když se bude intenzita snímku I uvažovat jako náhodná proměnná, bude kumulativní distribuce $F(\lambda) = \mathbf{P}(I \leq \lambda)$. Obrázku s vyrovnaným histogramem je pak dosaženo pomocí $F(I(x))$.

Samotné ACE je pak provedeno lokální adaptací snímkového kontrastu:

$$R(x) = \sum_{y \in \Omega} \frac{S_{\alpha}(I(x) - I(y))}{\|x - y\|}, x \in \Omega,$$

Laterální inhibice je simulována sousedícími rozdíly $I(x) - I(y)$ a váhována podle vzdálenosti $\|x - y\|$. Funkce S_{α} zesiluje malé rozdíly a saturuje rozdíly velké, což má za následek expanzi nebo kompresi dynamického rozsahu podle lokálního obsahu snímku. Globálního vyvážení bílé je pak dosaženo následujícím podílem:

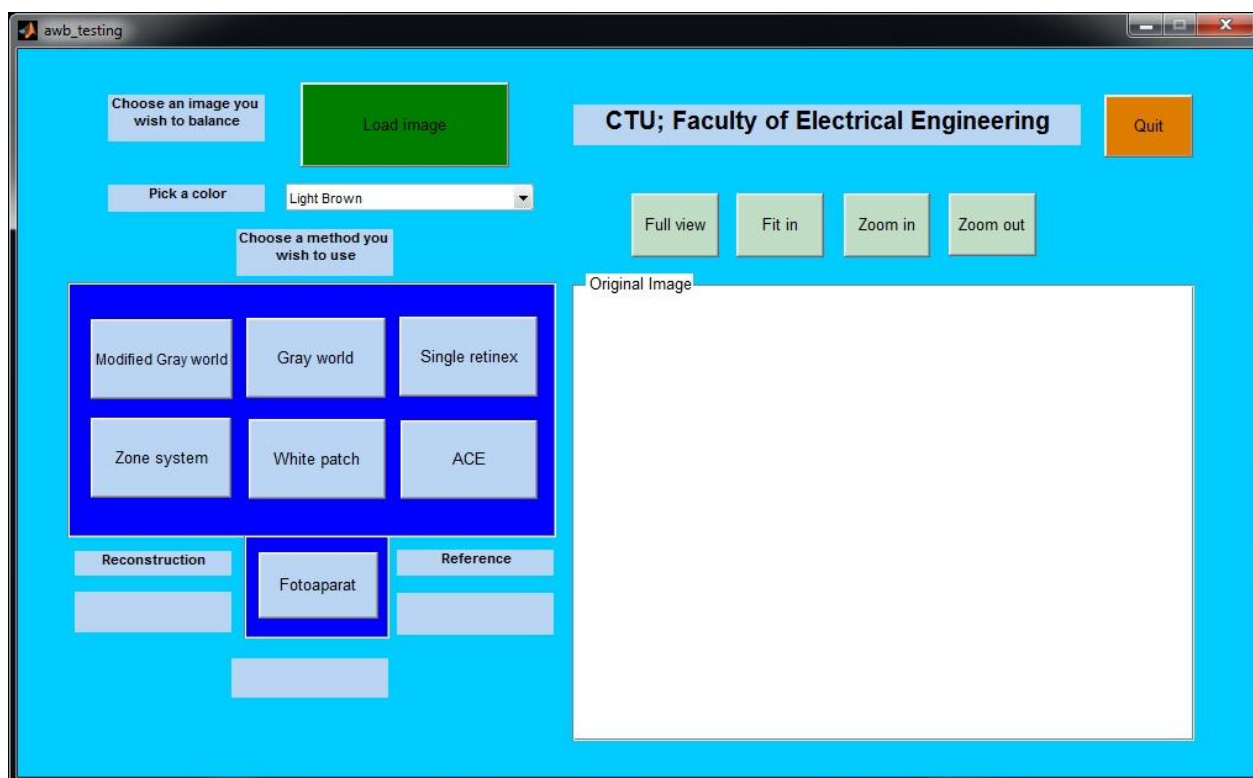
$$L(x) = \frac{R(x) - \min R}{\max(R) - \min R}$$

Tím je zajištěno, že ACE bude zjednodušeným modelem lidského zraku.

3 Praktická část

Algoritmy, které budou testovány, budou dvě verze Gray World, Single Retinex, White Patch, Automatic Color Enhancement a Zone System. Budou se realizovat dva experimenty. Výstupem prvního bude porovnání účinnosti jednotlivých algoritmů. Ve druhém experimentu se budou testovat algoritmy, které jsou využívány komerčními fotoaparáty.

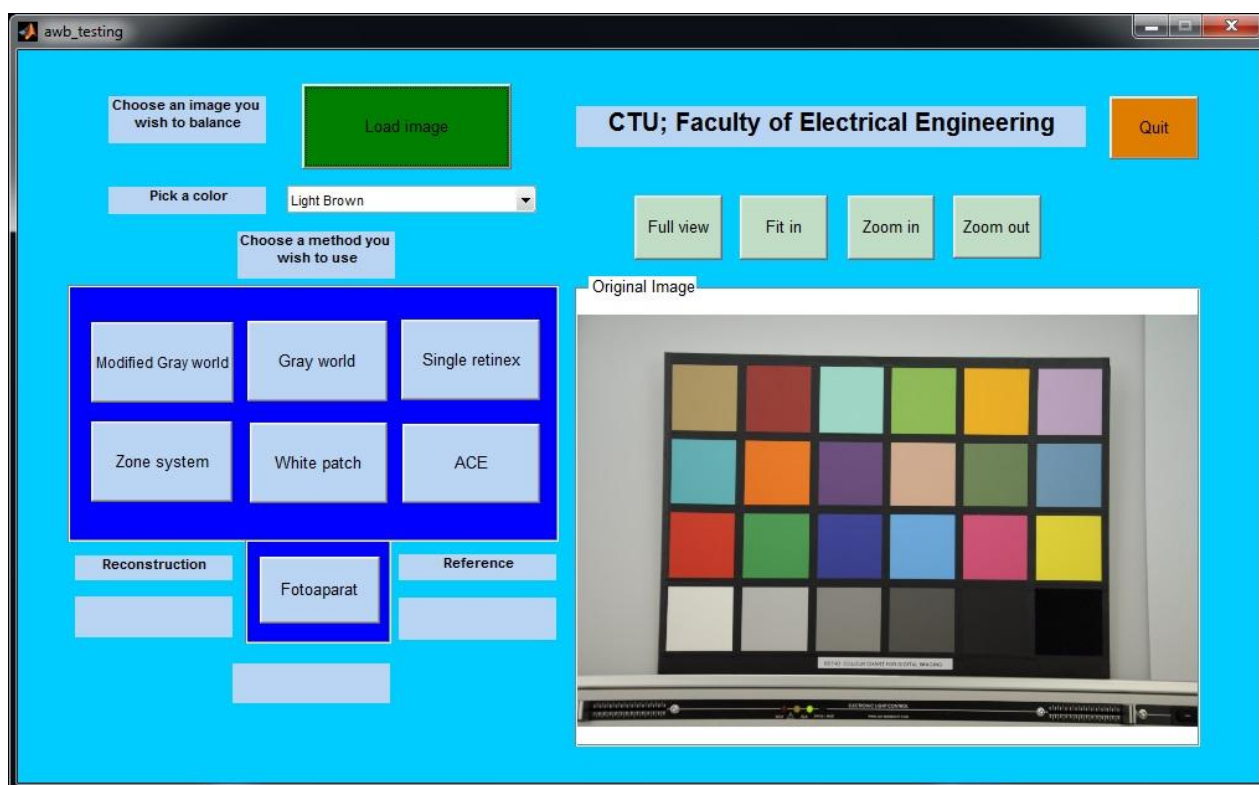
K vyhodnocení experimentů - porovnání účinnosti vybraných algoritmů pro vyvážení bílé a srovnání účinnosti algoritmů používaných komerčními fotoaparáty - bude použito grafické rozhraní implementované autorem práce v Matlabu nazvané awb_testing.m.



Obrázek 17 Grafické rozhraní awb_testing.m

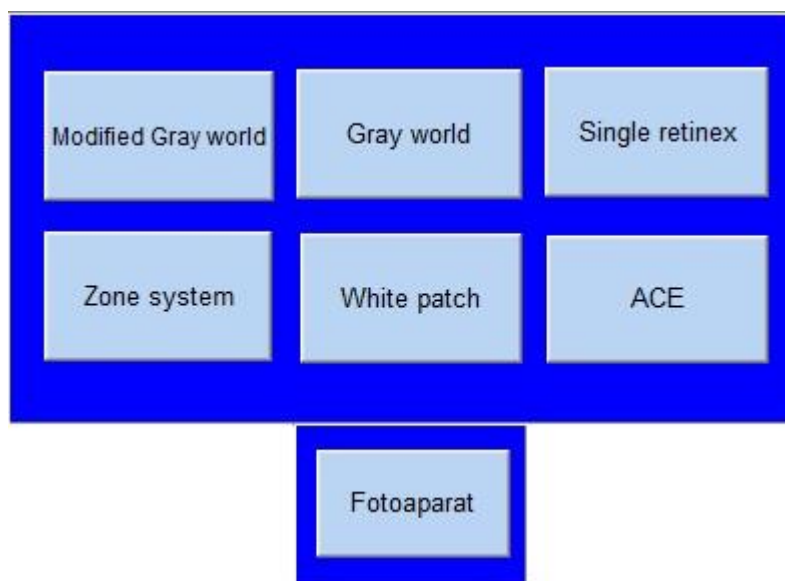
Toto GUI je speciálně upravené pro testování snímků s ColorCheckerem ve scéně. Po spuštění daného programu se objeví okno prostředí, kde je umístěno tlačítko "Load image" jako první shora. Jeho stlačením vyskočí další okno, ve kterém uživatel zvolí požadovaný snímek před korekcí. Když je snímek vybrán, objeví se, pro kontrolu, v pravé části programu s názvem "Original image" (obrázek 18). Tento snímek je možné libovolně

přibližovat, oddalovat, roztáhnout do celého předurčeného podokna grafického prostředí nebo zobrazit jeho skutečnou velikost. Tyto funkce jsou reprezentovány tlačítky nad panelem "Original image" a jsou nazvány "Full view" pro skutečnou velikost, "Fit in" pro roztážení do okna a "Zoom in" a "Zoom out" pro přibližování respektive oddalování.



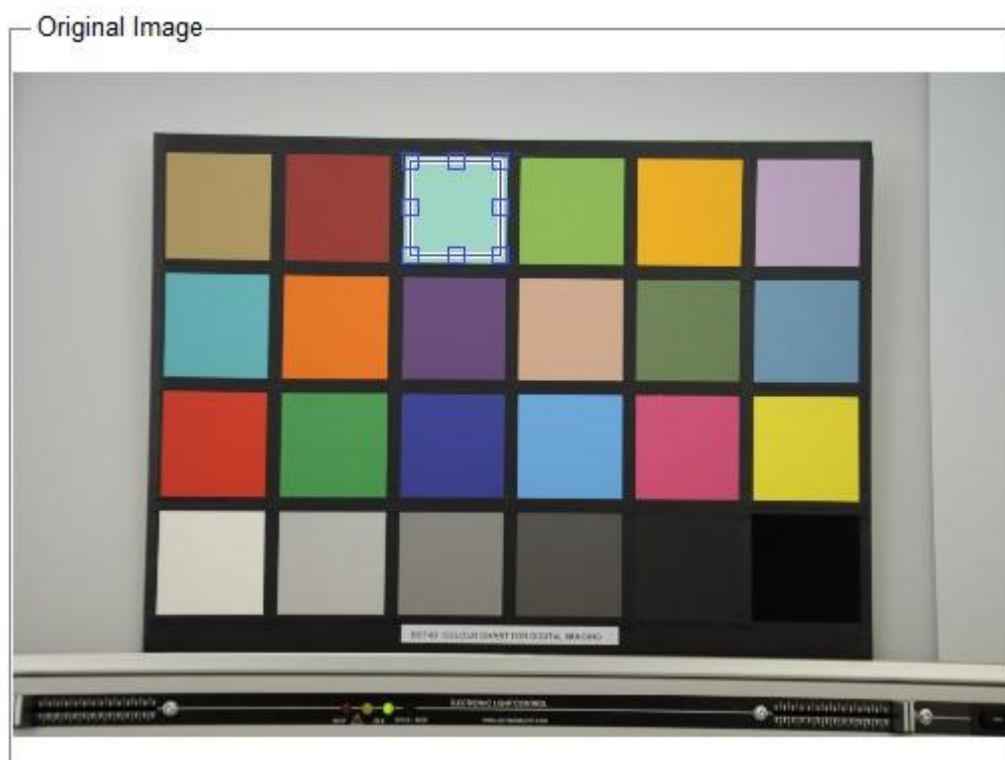
Obrázek 18 Zobrazení načteného obrázku

Poté, co je snímek načten, musí uživatel vybrat pomocí pop-up menu jednu z 24 barev, které ColorCheker obsahuje, a kterou chce uživatel testovat. Zvolením barvy se načtou souřadnice daného barevného pole v barevném prostoru Lab definované výrobcem. Následně si uživatel vybere metodu, kterou požaduje otestovat, v panelu se všemi algoritmy. V tomto panelu je 7 tlačítek, kde 6 z nich představuje jinou vybranou metodu. Poslední tlačítko "Fotoaparát" je pak určeno pro 2. experiment a jeho funkcí je pouze zjistit chybu již vyváženého obrázku od správných hodnot.



Obrázek 19 Panel v GUI `awb_testing.m`

Uživatel si tedy zvolí jednu metodu a po zmáčknutí tlačítka se objeví opět původní obrázek v okně "Original image", nicméně nyní je v něm možné vybrat libovolnou část scény. Pro správnost experimentu je nutné, aby uživatel vybral stejné barevné pole, které si předtím zvolil v pop-up menu. Výběr probíhá označením políčka čtyřúhelníkovým obrazcem, který zabírá největší možnou plochu pole, avšak nezasahuje do okolí.

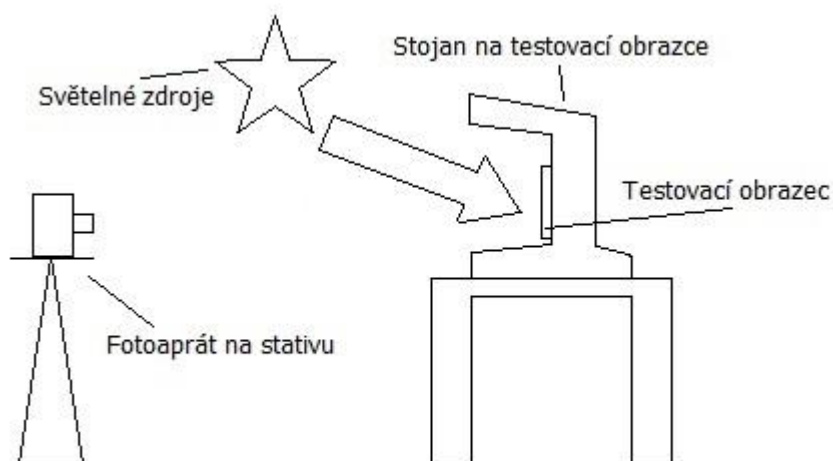


Obrázek 20 Příklad správného výběru barevného pole

Když je uživatel spokojen se svým výběrem, dvojklikem na levé tlačítko myši výběr potvrdí a okamžitě se objeví obrázek vybraného políčka z původního snímku, rekonstruovaného snímku a samotný rekonstruovaný (vyvážený) snímek. Pod panelem s metodami vyvážení bílé je pole, které říká výslednou odchylku (Euklidovskou vzdálenost) Lab souřadnic rekonstrukce od správných hodnot souřadnic daných výrobcem. Jako poslední jsou pak políčka, která ukazují souřadnice vybraného pole rekonstruovaného snímku a souřadnice pole ColorCheckeru. Důležité pro testování je vybrání barevného pole v pop-up menu a následné dodržení zvolené barvy při výběru barevného pole. Špatným výběrem barevného pole se celý experiment znehodnotí, jelikož souřadnice Lab rekonstruovaného snímku budou zkresleny o barevné hodnoty okolních polí.

3.1 1. Experiment

K dispozici je pro experiment 1 fotoaparát Nikon D70, kterým se budou pořizovat testovací snímky. Dále se sestaví testovací aparát. Na stativu připevněný fotoaparát se postaví před testovací tabulku. Testovací tabulka je upevněna ve stojanu v úrovni fotoaparátu. Schéma pracoviště je na obrázku 21.



Obrázek 21 Schéma pracoviště

Následně se pořídí testovací snímek za takových světelných podmínek, které silně nezkrasí výstupní fotografie, aby s nimi bylo možné dále pracovat bez jakýchkoli komplikací. Při tomto focení bylo využito pouze světelného zdroje ve formě denního světla. K dalšímu zpracování je použit snímek ve formátu NEF, tedy "syrová" neupravená obrazová data. Tento snímek se nahraje do programu Adobe Photoshop CS. 3, ve kterém

se jednoduchou funkcí změny barevné teploty světelného zdroje nastaví různé světelné podmínky. Pro účely tohoto experimentu se zvolil krok 1000K v rozsahu od 2000K do 9000K. Ve zmíněném programu se teplota 2000K jeví, jako silný modrý odstín přes obrázek. Naproti tomu teploty kolem 10 000K působí červeným nádechem. To znamená, že hodnoty neodpovídají definici barevné teploty. Ve výsledku tedy vznikne 8 testovacích snímků s rozdílným barevným nádechem. Na tyto snímky se pak aplikují algoritmy pro vyvážení bílé v grafickém prostředí pod názvem `awb_testing.m`. Před tímto řešením bylo pro změnu barevné teploty využito reálných světelných zdrojů, konkrétně žárovky, zářivky a denního svitu. Nicméně v tomto případě bylo od tohoto postupu upuštěno z důvodu nedostatečného množství variací barevné teploty a velmi obtížného zajištění uniformního rozložení světla na scéně. Úpravou snímků v programu Adobe Photoshop CS. 3 bylo efektivně nasimulováno potřebné množství barevných teplot a zvolením světelného zdroje denního světla bylo docíleno nejrovnoměrnějšího rozložení osvětlení scény, které bylo možné v daných podmínkách dosáhnout.

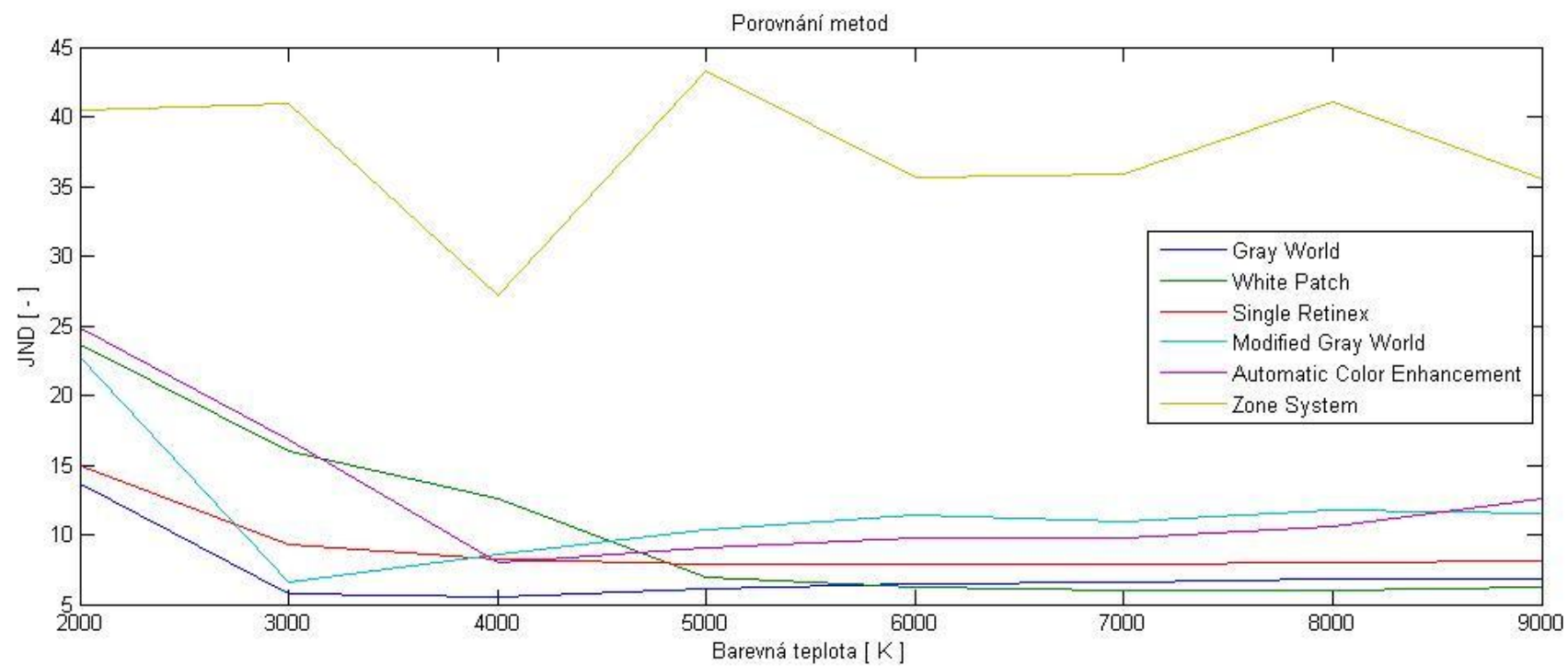
Výsledky jsou prezentovány na následujících obrázcích. Graf porovnání metod na obrázku 22 ukazuje průměrnou účinnost algoritmů v JND vůči barevné teplotě. To znamená, že euklidovské vzdálenosti, odečtené z GUI `awb_testing`, byly převedeny na jednotky právě postřehnutelného rozdílu jejich podělením konstantní hodnotou 2,3, jak říká definice. Průměrné účinnosti bylo dosaženo součtem odchylek barevných polí na každé teplotě a podělením jejich počtem, tedy 24. Z grafu je zřejmé, že metoda Zone System naprosto selhává při vyvážení bílé. Do snímků přidává zelený nebo růžový odstín, čímž jsou snímky úplně znehodnoceny (viz sety snímků). Odchylka se od správných hodnot pohybuje mezi 27 a 45 JND v celé barevné škále a je bezpečné tvrdit, že metoda je nefunkční. Dalším algoritmem, který je prakticky nepoužitelný, je Automatic Color Enhancement. Ačkoliv vzhledem k výsledkům, prezentovaným v grafu 22, by se mohlo usoudit, že metoda je relativně funkční, ve skutečnosti je výsledný obrázek výrazně zkreslen. Při pohledu na graf je dále jasné, že největší problémy mají všechny ostatní algoritmy při nízkých barevných teplotách, konkrétně na 2000K. Metody Gray World a Single Retinex mají hodnotu právě postřehnutelného rozdílu 14 respektive 15, zbylé se pohybují mezi 20 a 25 JND. Při zvýšení barevné teploty o 1000K se účinnost prudce zlepšuje a algoritmy Single Retinex, White Patch a Gray World se dostávají na hodnoty mezi 6 až 8 JND pro zbylé barevné teploty až k 9000K, Modified Gray World s Automatic Color Enhancement jsou o jednotky JND méně výkonné, když jejich průměrná odchylka sahá k 12 JND. White Patch, který selhal při vyvažování modrého nádechu v obrázku,

vykázal nejlepší účinnost při červeném zbarvení snímku.

Dále jsou na obrázcích 23 až 30 prezentovány sety snímků, vždy pro jednu barevnou teplotu (2000K – 9000K). Zde jsou vidět výsledné obrázky testovacích snímků upravované implementovanými algoritmy. Jak napovídá graf na obrázku 22, v celkovém pohledu jsou nejméně kvalitní výsledky při 2000K, kdy jsou všechny obrázky výrazně ovlivněny barevnými nedokonalostmi. Modified Gray World, Gray World a Single Retinex jsou velmi tmavé a White Patch má minimální vliv na modrý odstín původního obrázku, což znamená, že upravený obrázek je stále zbarven modře. Jak již bylo uvedeno, Zone System zahalil fotografii do silného růžového odstínu a Automatic Color Enhancement znehodnotil světle modrými, bílými a fialovými fragmenty. Na dalších hodnotách barevné teploty se účinnost postupně zlepšuje. Nicméně White Patch má stále problémy s modrým nádechem původních snímků a dobré účinnosti dosahuje až při barevné teplotě 5000K, kdy je kontaminace modrou téměř vyloučena. Je možné si povšimnout, že Modified Gray World, který od ostatních algoritmů mírně vybočil směrem k vyšším hodnotám JND, přidává do upraveného snímku velmi světlou složku. Tato složka bílého zbarvení ve snímku výrazně ovlivňuje hodnocení, jelikož je promítnuta do souřadnic Lab obrázku. Naproti tomu Single Retinex má tendence do korektované fotografie přidat složky černé barvy a výstupní snímek působí tmavším dojmem. Celkově jsou ve snímcích upravené Single Retinexem barevná pole zbarveny poměrně sytě. Zajímavé je další pozorování chování algoritmu Zone System. Červená složka zasahuje snímky ovlivněné barevnou teplotou o hodnotách 2000K, 3000K, 5000K, 7000K a 8000K. Snímky s barevnou teplotou 4000K, 6000K a 9000K jsou zasaženy zeleným odstínem. Intenzita obou odstínů se mění a na snímcích s barevnou teplotou 3000K, 4000K, 5000K, 7000K a 8000K je rozeznatelná focená scéna. Na zbylých snímcích je to velmi obtížné. Automatic Color Enhancement reaguje přímo na zbarvení testovaného snímku, když při barevných teplotách 2000K – 4000K (modrý nádech v obrázcích) převládá ve výsledných snímcích modrá barva, při teplotách 5000K a 6000K se objevuje zelený odstín a při teplotách 7000K – 9000K (červený nádech v testovacích obrázcích) jsou obrázky kontaminované rudou až hnědou barvou.

V přílohách 6.1 a 6.2 je možné vidět další zpracované výsledky. Příloha 6.1 ukazuje vliv jednotlivých algoritmů na fotografie venkovních scén bez testovacího obrazce ovlivněných vybranými barevnými odstíny. Všechny algoritmy fungují podobným způsobem, jako při jejich aplikování na testovací snímky pořizované ve studiu a s ColorCheckrem v obraze, kromě algoritmu Single Retinex. Jím upravené fotografie

jsou silně negativně ovlivněny tmavými odstíny a výsledek je možné kvalifikovat jako naprosto neuspokojivý, ač tomu předchází hodnocení na základě grafického znázornění účinnosti, nenasvědčovalo. Příloha 6.2 obsahuje grafy účinnosti algoritmů pro vybraná barevná pole. Prezentovány jsou barvy red – červená, green – zelená, blue – modrá, cyan – azurová, magenta – purpurová, yellow – žlutá a black - černá, což jsou základní barvy barevného prostoru RGB a barvy používané při tisku CMYK.



Obrázek 22 Graf porovnání účinnosti metod

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



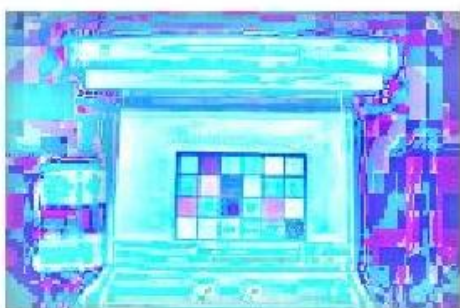
Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 23 Set snímků - 2000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 24 Set snímků - 3000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 25 Set snímků - 4000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 26 Set snímků - 5000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 27 Set snímků - 6000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 28 Set snímků - 7000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 29 Set snímků - 8000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 30 Set snímků - 9000K

3.2 2. Experiment

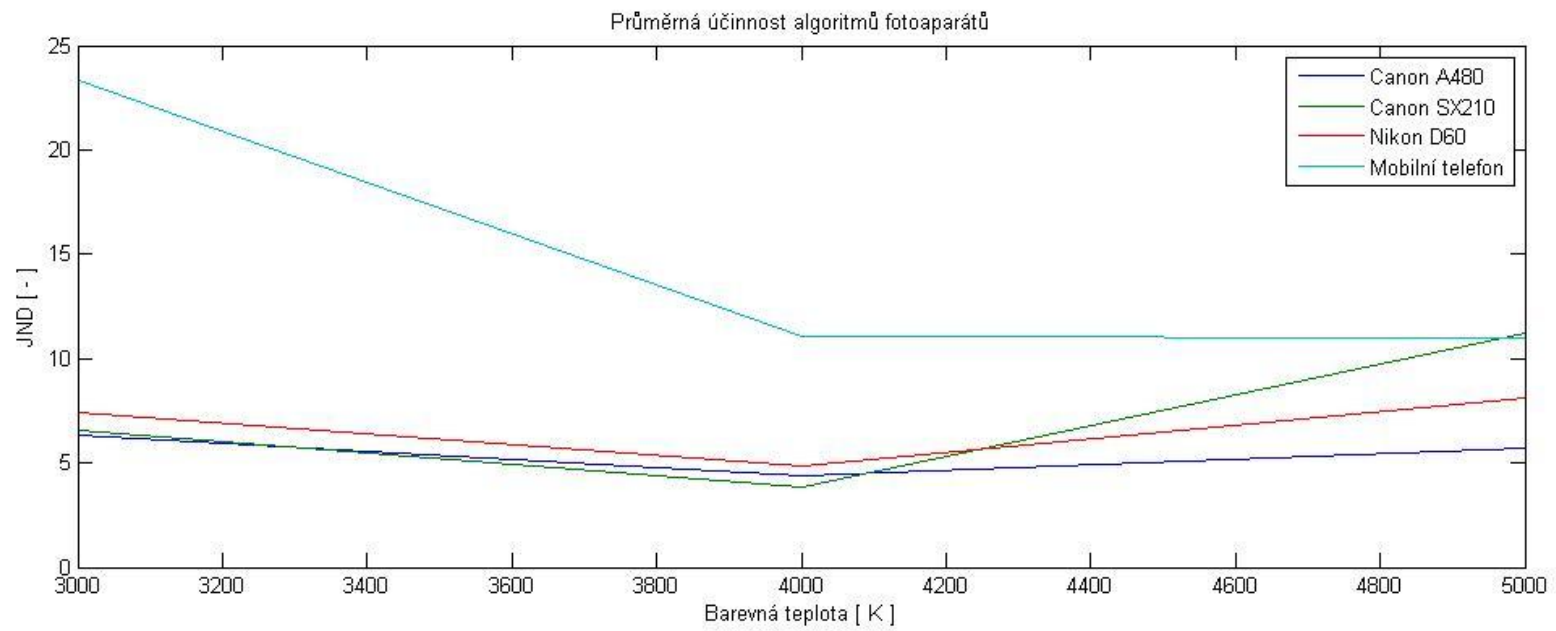
Ve druhém experimentu se budou testovat algoritmy, které používají k postprocessingu dostupné fotoaparáty. Jednotlivé přístroje se opět připevní na stativ a bude se snímat stejná testovací tabulka, jako v prvním experimentu. Schéma je na obrázku 21. Nyní je však potřeba pracovat s výstupními fotografiemi v daném formátu, které fotoaparáty používají (nejčastěji jpg). Tyto snímky jsou již ovlivněny vnitřními vyvažovacími algoritmy daných zařízení, které se pak budou porovnávat se správnými hodnotami od výrobce ColorCheckeru. Nyní nejsou k dispozici RAW data, nemůže se tak využít simulované změny barevné teploty v Adobe Photoshop CS. 3 a je tedy potřeba využít externí světelné zdroje s rozdílnou barevnou teplotou. Těmi jsou ty samé, které byly v prvním experimentu zahrnuty – žárovka a zářivka a zdroj, kterého již bylo využito – denní světlo.

K dispozici jsou zařízení Nikon D60, dva kompaktní fotoaparáty Canon A480 a SX210 a mobilní telefon Samsung Galaxy Mini. V menu všech přístrojů se nastaví postupně režim vyvážení bílé pro denní svit (5000K), pro osvětlení žárovkou (3000K), zářivkou (4000K) a režim automatický a pořídí se testovací snímky. Nyní hodnoty barevné teploty odpovídají teplotám z definice. Celkem tedy vznikne 24 obrázků (12 pro určité režimy vyvážení bílé a 12 pro automatický režim). Ty se opět postupně testují pomocí awb_testing.m. Nyní je nutné použít tlačítko "Fotoaparát". Po jeho stisknutí se opět provede výběr předtím zvolené barvy a v políčkách s výsledky se zobrazí celková chyba snímku od správných hodnot a souřadnice barevných políček. V tomto případě se už snímek s upraveným obrázkem neobjeví, jelikož je pracováno s obrázkem již upraveným. Takže probíhá pouze vyhodnocení účinnosti aplikovaného algoritmu.

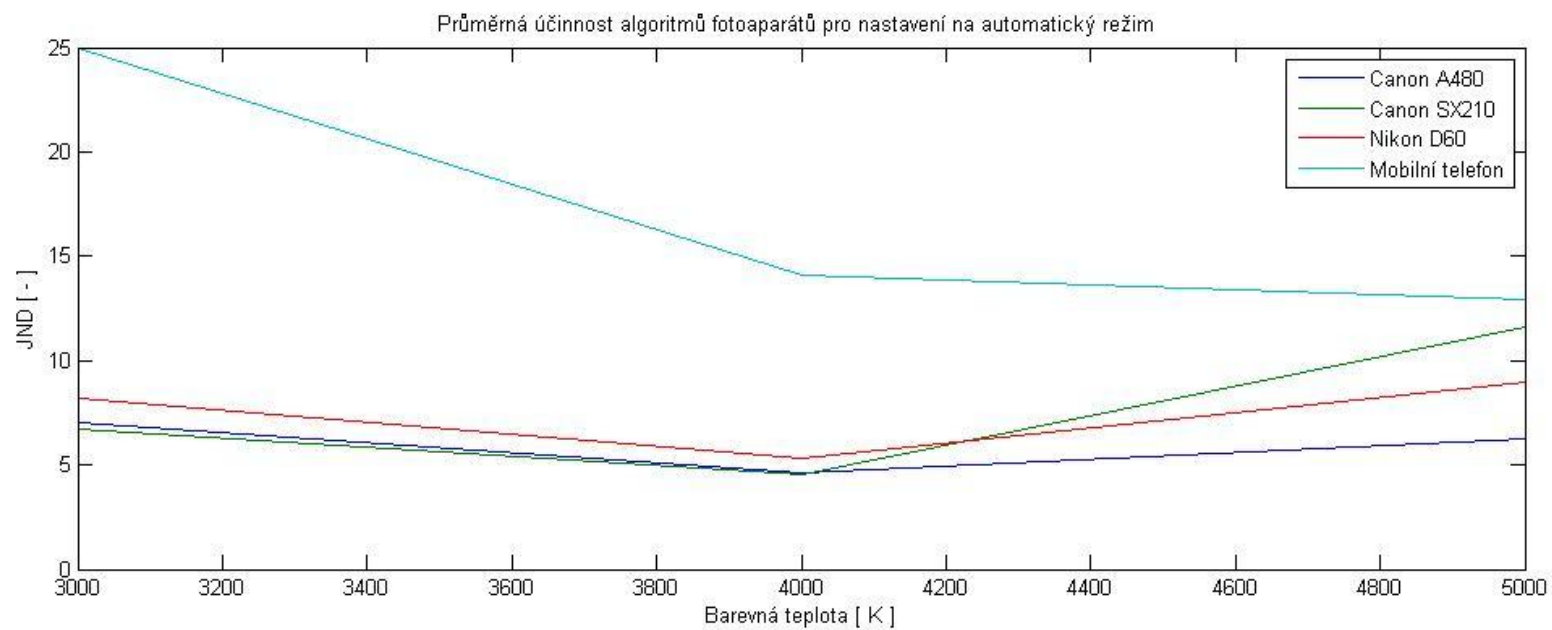
Na obrázku 31 je graf porovnání průměrné účinnosti algoritmů fotoaparátů, které bylo dosaženo stejným způsobem, jako v prvním experimentu. Při osvětlení o teplotě 3000K, tedy žárovkou, je výstupní snímek z mobilního telefonu nejméně uspokojivý, když chyba vyšla téměř 24 JND. Fotografie je stále kontaminovaná červeným nádechem (viz obrázek 35 "žárovka"). Hodnoty právě postřehnutelného rozdílu ostatních fotoaparátů jsou vyrovnané a pohybují se mezi 6 a 8 JND. Focení při zářivkovém osvětlení vykázalo zlepšení u všech algoritmů. Velmi podobně vyvažují aparáty Canon při výsledcích pohybujících se kolem 4 JND a Nikon, který zaostává o pouhý 1 JND. Takové hodnoty se dají považovat z uživatelského pohledu za velmi kvalitní. Mobilní telefon, ač již s lepším

výsledkem, než na 3000K, je stále pozadu s 11 JND. Vyvažování bílé za denního svitu vyšlo nejméně uspokojivě (~11 JND) opět pro mobilní telefon a také pro Canon SX210, nicméně to je způsobeno tmavým testovacím snímkem. Výstupní snímek z Nikonu D60 je zabarven zelenomodrým odstínem (8 JND), a tak nejlépe dopadl algoritmus Canonu A480. Celkově je nejúspěšnější právě kompakt Canon A480. Pokud by však testovací snímek pro denní svit z Canonu SX210 nebyl zahalen tmavým odstínem, byl by jeho výsledek srovnatelný s Canonem A480. Algoritmus Nikonu D60 je také vcelku kvalitní, avšak mobilní telefon, jelikož není prvoplánově určen pro pořizování kvalitních fotografií, na fotoaparáty nestačí.

Graf na obrázku 32 zobrazuje stejné porovnání účinnosti vyvažování bílé, avšak pro nastavení automatického režimu. V celkovém pohledu na daný graf je možné odečíst, že automatický algoritmus v podstatě zachovává podobný tvar charakteristik při všech použitých světelných zdrojích a jen nepatrně zaostává za režimy určenými pro konkrétní barevné teploty okolních světelných podmínek.



Obrázek 31 Graf porovnání účinnosti pro jednotlivé světelné zdroje



Obrázek 32 Graf porovnání účinnosti pro automatický režim

Žárovka



Zářivka



Denní svit



Obrázek 33 Snímky z Canonu A480

Žárovka



Zářivka



Denní svit



Obrázek 34 Snímky z Nikonu D60

Žárovka



Zářivka



Denní svit



Obrázek 35 Snímky z mobilního telefonu Samsung

Žárovka



Zářivka



Denní svit



Obrázek 36 Snímky z Canonu SX210

4 Závěr

Mým cílem v této diplomové práci bylo vypracovat přehled metod vyvážení bílé a vybrané metody následně implementovat v programovém prostředí Matlab. Dále bylo zapotřebí navrhnout metodu objektivního porovnání implementovaných metod a nakonec dané srovnání provést a diskutovat jeho výsledky.

Pro přehlednou práci s implementovanými algoritmy jsem navrhl a zprovoznil grafické prostředí v Matlabu. To je primárně určeno pro měřicí účely při práci se snímky, na kterých je ve scéně testovací tabulka ColorChecker. Nicméně, v případě, že uživatel nechce nebo nepotřebuje využít možnosti zjistit numerickou odchylku testovaného snímku od správných hodnot daných výrobcem ColorCheckru, je možné přeskočit krok výběru barevného pole tím, že se v libovolném místě původního snímku provede dvojklik myši a upravený snímek zvolenou metodou se také zobrazí. Pouze se neprovede výpočet odchylky. Pro její určení ve formě Euklidovské vzdálenosti jsem použil prostor Lab, který svou linearitou zajišťuje relevantní údaje. Při tvorbě grafů jsem pak data převedl na více vhodný údaj právě postřehnutelného rozdílu.

Testovací snímky jsem pořizoval ve studiu na katedře radioelektroniky a následně i v kampusu Českého Vysokého Učení Technického. Při snímání ve studiu bylo zapotřebí co nejdokonaleji zajistit rovnoměrné rozložení osvětlení scény, aby byly výsledky zkruseny nejmenší možnou měrou. Toho jsem docílil pouze z části, jelikož zářivka a žárovka zanechaly na snímcích viditelně světlejší místa. Uniformitu jsem byl schopen zajistit pouze při denním svitu. Řešením pro zářivkové a žárovkové osvětlení by mohlo být například matné plexisklo, jehož předřazením před světelné zdroje by došlo k požadovanému efektu rozložení osvětlení. Avšak pro 1. experiment by stále nevznikl dostatečný počet testovacích snímků, takže úprava snímků v programu Adobe Photoshop CS. 3 bylo pro měření nejvhodnějším postupem. Aplikovat by se mohlo pro 2. experiment, kde stejná úprava jako v předešlém případě, není možná.

Z výsledků, které jsou prezentovány v praktické části a přílohách, je jasné, že z hlediska uživatele je nejméně použitelná metoda Zone System následována Automatic Color Enhancementem a Single Retinexem. Gray World a jeho modifikace a White Patch pak vykázaly účinnost, se kterou lze dále pracovat. Zone System halí upravené snímky do odstínů růžové a zelené barvy v různé intenzitě a tím zcela znehodnocuje daný obrázek. Původně byl tento algoritmus vyvinut pro práci s šedotónovými obrázky a na práci s barevnými kanály je tak velmi citlivý. ACE výstupní obrázky barevně zkrusluje. Avšak

zobrazení barevných polí je vcelku kvalitní (viz graf na obrázku 22, kde ACE výrazně nevybočuje od ostatních algoritmů). Spolu s tím výrazně zvyšuje kontrast fotografie. Důkazem jsou obrázky 23 – 30, na kterých je u ACE zřetelně rozeznatelná židle v pozadí a u ostatních algoritmů je buď úplně schovaná ve stínu, nebo viditelná jen velmi málo. Problémem implementace ACE je výrazná těžkopádnost, která zapříčiňuje potřebu dlouhého výpočetního času. Snímky jsem byl nucen výrazně zmenšit rozměrově, tedy až na velikosti kolem 200x100 pixelů. Tyto rozměry zajistily výpočet do několika minut, s většími rozměry se úměrně zvyšoval požadovaný čas pro výpočet až nad únosnou mez. Single Retinex vyvažoval uspokojivě studiové snímky, při úpravě venkovních snímků ale selhal a obrázky příliš ztmavil, čímž je kompletně znehodnotil. White Patch si příliš nevěděl rady se snímky zasaženými modrým odstínem, nicméně směrem k červenému nádechu se jeho účinnost zvyšovala. Modified Gray World obrázky velmi zesvětloval, proto je závislost barevné teploty na JND (viz obrázek 22) nepříliš příznivá v porovnání s ostatními algoritmy, ale čistě z uživatelského hlediska jsou snímky uspokojivé kvality. Gray World vyvažoval uspokojivě po celou barevnou škálu, až na silně modré zbarvení fotografie. Na této barevné teplotě neuspěl algoritmus žádný. V tabulce níže jsou prezentována data průměrné výkonnosti algoritmů.

Barevná teplota [K]	GW	MGW	SR	WP	ZS	ACE
2000	13,69	22,78	15,01	23,67	40,52	24,88
3000	5,77	6,63	9,33	16,06	40,97	16,86
4000	5,58	8,62	8,19	12,62	27,19	8,00
5000	6,07	10,37	7,89	6,97	43,34	9,07
6000	6,41	11,37	7,84	6,19	35,64	9,72
7000	6,60	10,94	7,90	5,99	35,89	9,72
8000	6,81	11,72	7,98	6,02	41,11	10,58
9000	6,86	11,49	8,07	6,29	35,53	12,55

Tabulka hodnot jednotlivých algoritmů v JND

Ve druhém experimentu jsem porovnával účinek algoritmů, které využívají různé fotoaparáty. Zde se na výsledcích, jak již bylo zmiňováno, výrazně podepsalo nerovnoměrné rozložení osvětlení. Pokud by bylo zajištěno uniformní osvětlení, výsledky by měly o poznání větší vypovídající hodnotu. Z daných hodnot je celkově možné říci, že je v zásadě lhostejno, zda uživatel při focení zvolí v menu vyvážení pro určité osvětlení nebo ponechá automatický režim. Automatický režim sice vykázal méně kvalitní účinnost vyvažování bílé, ale rozdíl je zanedbatelný.

Kromě setů snímků v příloze 6.1 a grafů v příloze 6.2 jsou další výsledky ke zhlédnutí na přiloženém médiu. Obsahuje grafické vyjádření zbylých barevných polí i další sety snímků venkovních scén. V práci jsem detailně nahlédl do problematiky spojené s úpravou reprezentace barev v obraze, konkrétně v digitální fotografii. Získal jsem obsáhlý teoretický základ pro daný obor a osvojil jsem si metody pro vyhodnocení účinnosti vyvažovacích algoritmů. Pro další pokračování v tomto tématu by bylo zajímavé zkoumat algoritmy Zone System, Automatic Color Enhancement a Single Retinex. Lokalizováním problému a jeho odstraněním by mohly vzniknout další účinné metody vyvážení bílé. Dále by se zdokonalilo grafické rozhraní a 2. experiment by se provedl s rovnoměrně nasvětlenou scénou.

5 Zdroje

- [1] Marko Tkalčič, Jurij F. Tasič; Eurocon; Color spaces - perceptual, historical and applicational background; 2003
- [2] Gernot Hoffmann; CIE color space; 2013;
<http://www.fho-empden.de/~hoffmann/ciexyz29082000.pdf>
- [3] prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.; FEL ČVUT; přednášky A2M37OBT; 2004
- [4] Jan Kaiser, Emil Košťál; FEL ČVUT; Srovnání kolorimetrických zkrácení snímacích soustav XYZ a RGB; 2003
- [5] Precise color communication; Color control from reception to instrumentation
<http://www2.konicaminolta.eu/eu/Measuring/pcc/en/index.html>
- [6] <http://www.imatest.com/docs/colorcheck/>
- [7] Su Wang, Yewei Zhang, Peng Deng, Fuqiang Zhou; Fast automatic white balancing method by color histogram stretching; 2011
- [8] Jinlong Lin; An automatic white balance method based on edge detection; 2006
- [9] Denis Nikitenko, Michael Wirth, Kataline Trudel; Applicability of white-balancing algorithms to restoring faded colour slides: an empirical evaluation; 2008
- [10] Jong-Il Park, Junmo Kim; Computer Vision - ACCV 2012 Workshops, revised selected papers, part I; 2012
- [11] Jean-Michel Morel, Ana Belem Petro, Catalina Sbert; Fast implementation of color constancy algorithms; 2009
- [12] Arjan Gijsenij, Theo Gevers, Joost van de Weijer; Computational Color Constancy: Survey and Experiments; 2011

- [13] Dany Pascale; RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker; 2006
- [14] Adobe System Incorporated; Adobe RGB (1998) Color Image Encoding; 2005
<http://www.adobe.com/digitalimag/pdfs/AdobeRGB1998.pdf>
- [15] Danes-picta.com, BST4, Colour Rendition Chart For Digital Imaging, Instruction Paper
- [16] Bruce Fraser, Understanding Digital Raw Capture, 2004
http://www.adobe.com/digitalimag/pdfs/understanding_digitalrawcapture.pdf
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/JPEG>
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Exchangeable_image_file_format
- [19] Yu-Yi Liao, Jzau-Sheng Lin, Shen-Chuan Tai; Color Balance Algorithm With Zone System In Color Image Correction; 2009
- [20] Pascal Getreuer; Automatic Color Enhancement (ACE) and its Fast Implementation; 2012
- [21] Marc Ebner; Color Constancy; 2007
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/File:CIE1931_rgxy.png
- [23] <http://www.sform.biz/ColorTxt/LabSys.jpg>

6 Přílohy

6.1 Příloha 1

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 37 Funkce algoritmů při 2000K

Přvodní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 38 Funkce algoritmů při 3000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



ACE



Zone System



Obrázek 39 Funkce algoritmů při 5000K

Původní snímek



White Patch



Single Retinex



Modified Gray World



Gray World



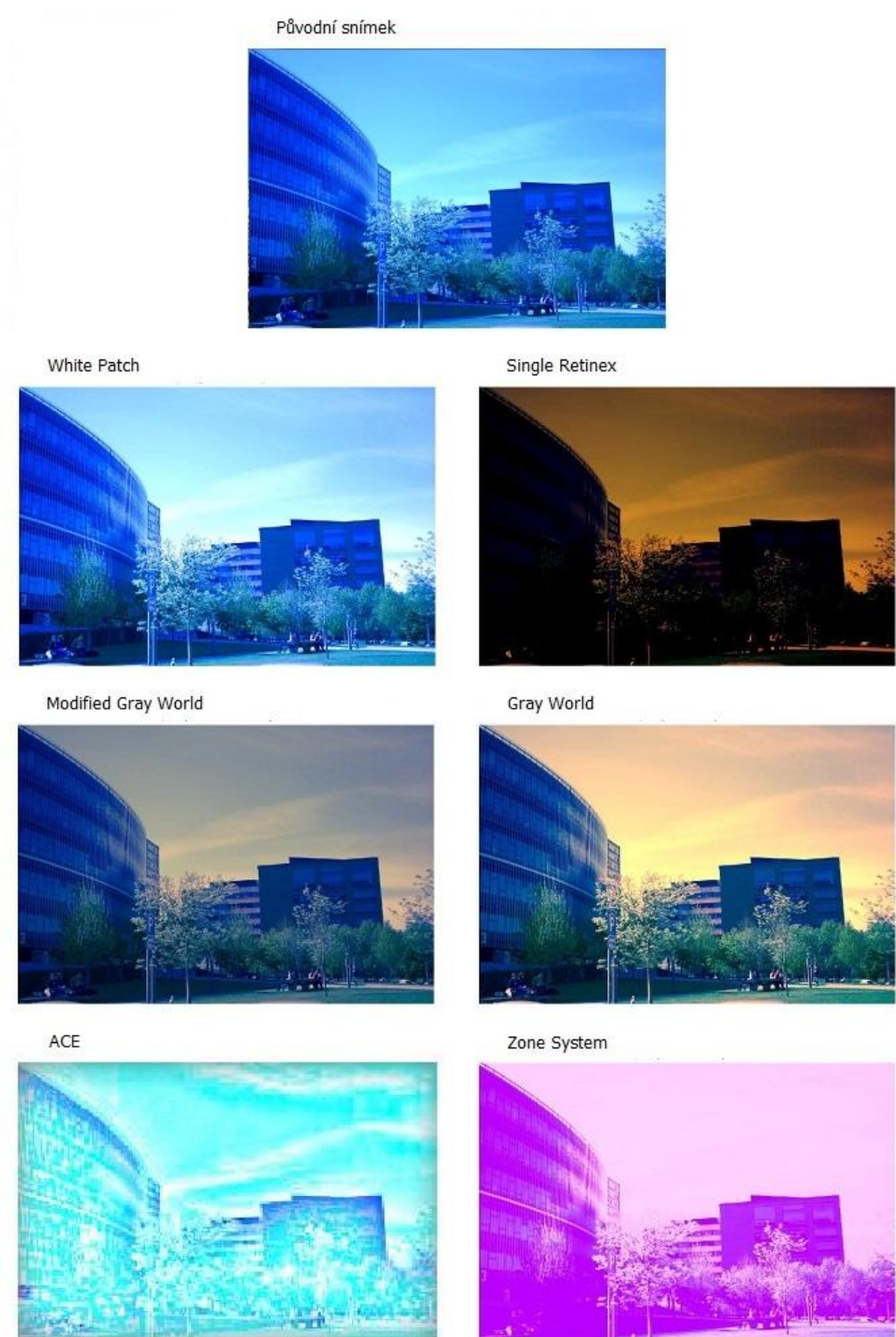
ACE



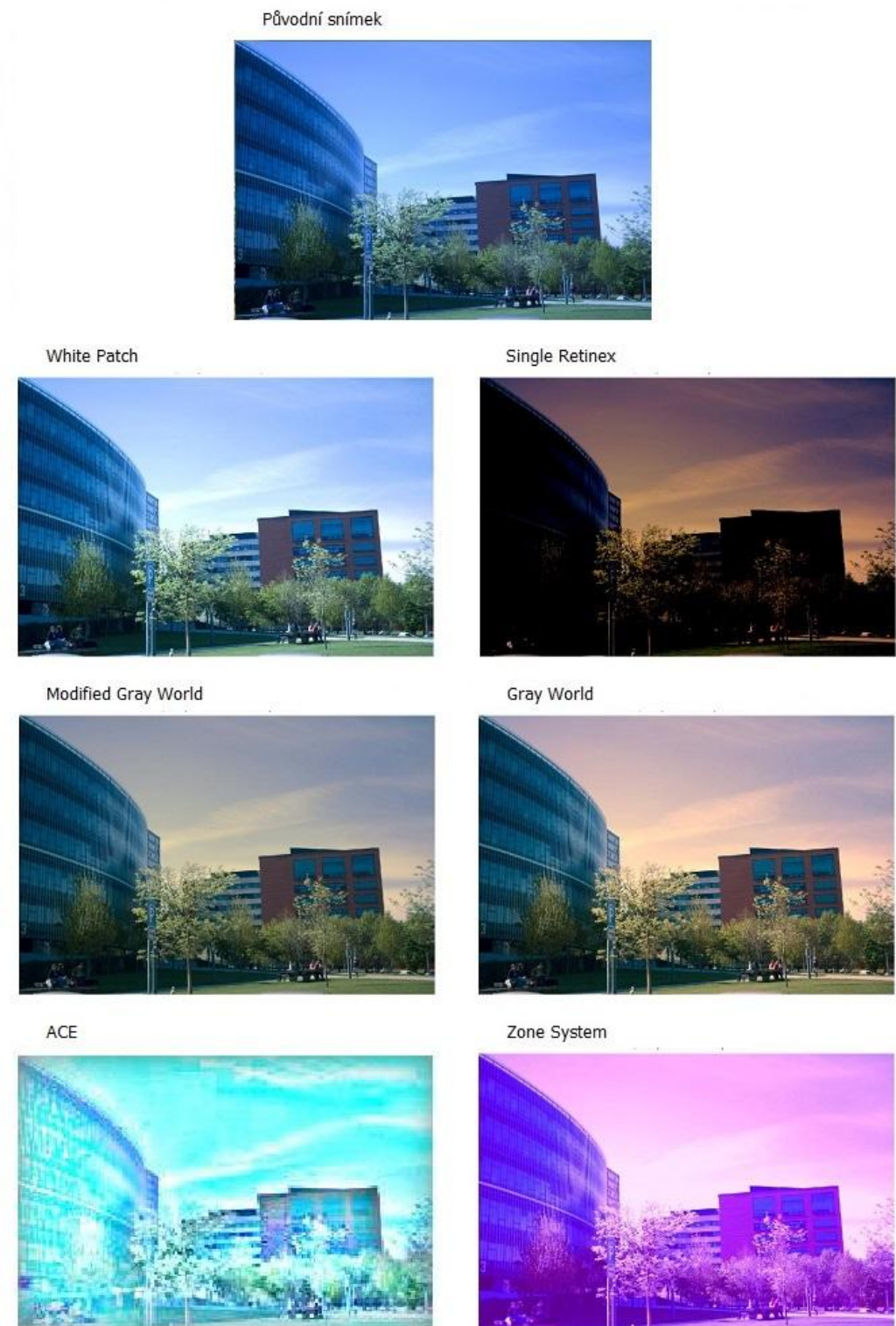
Zone System



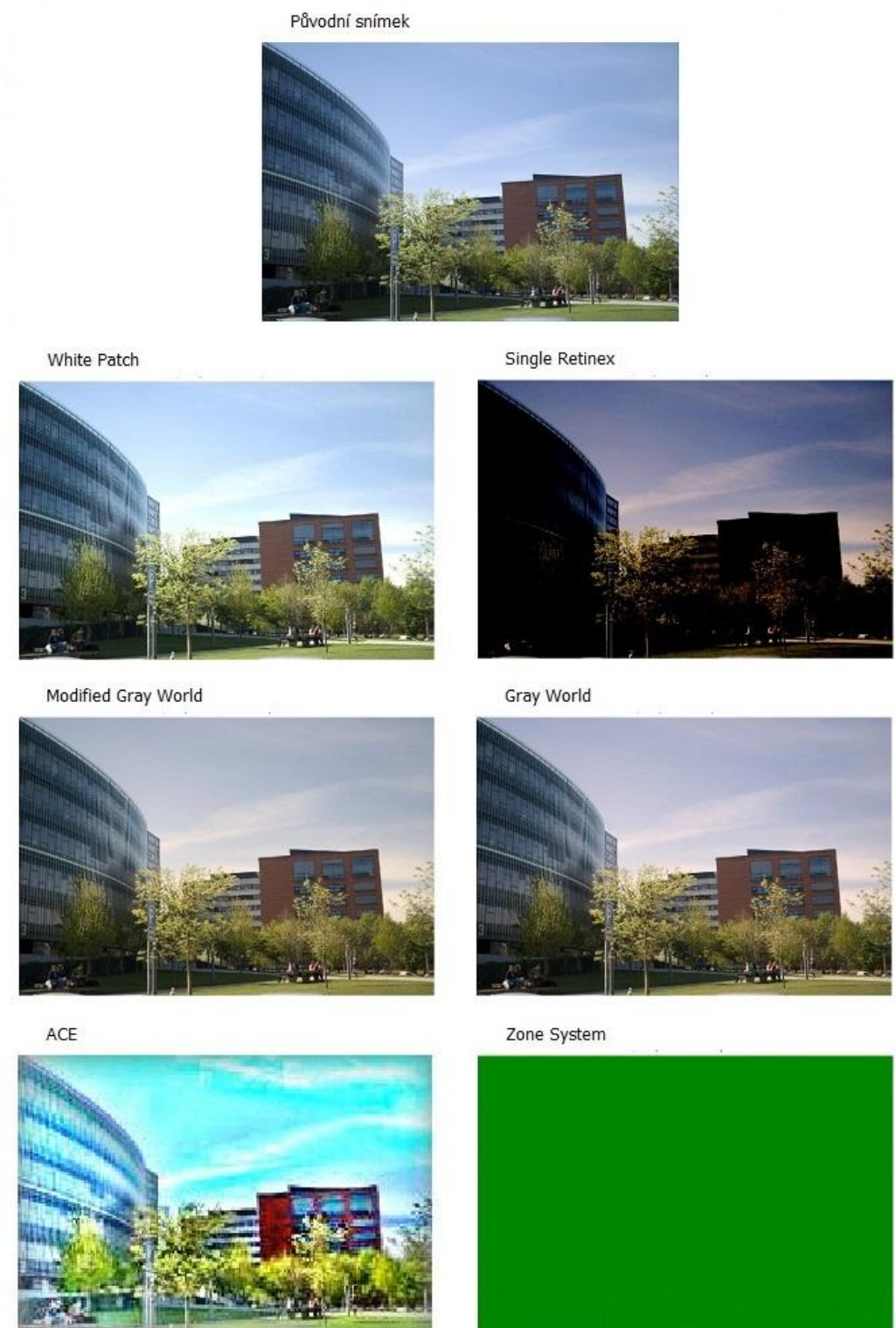
Obrázek 40 Funkce algoritmů při 9000K



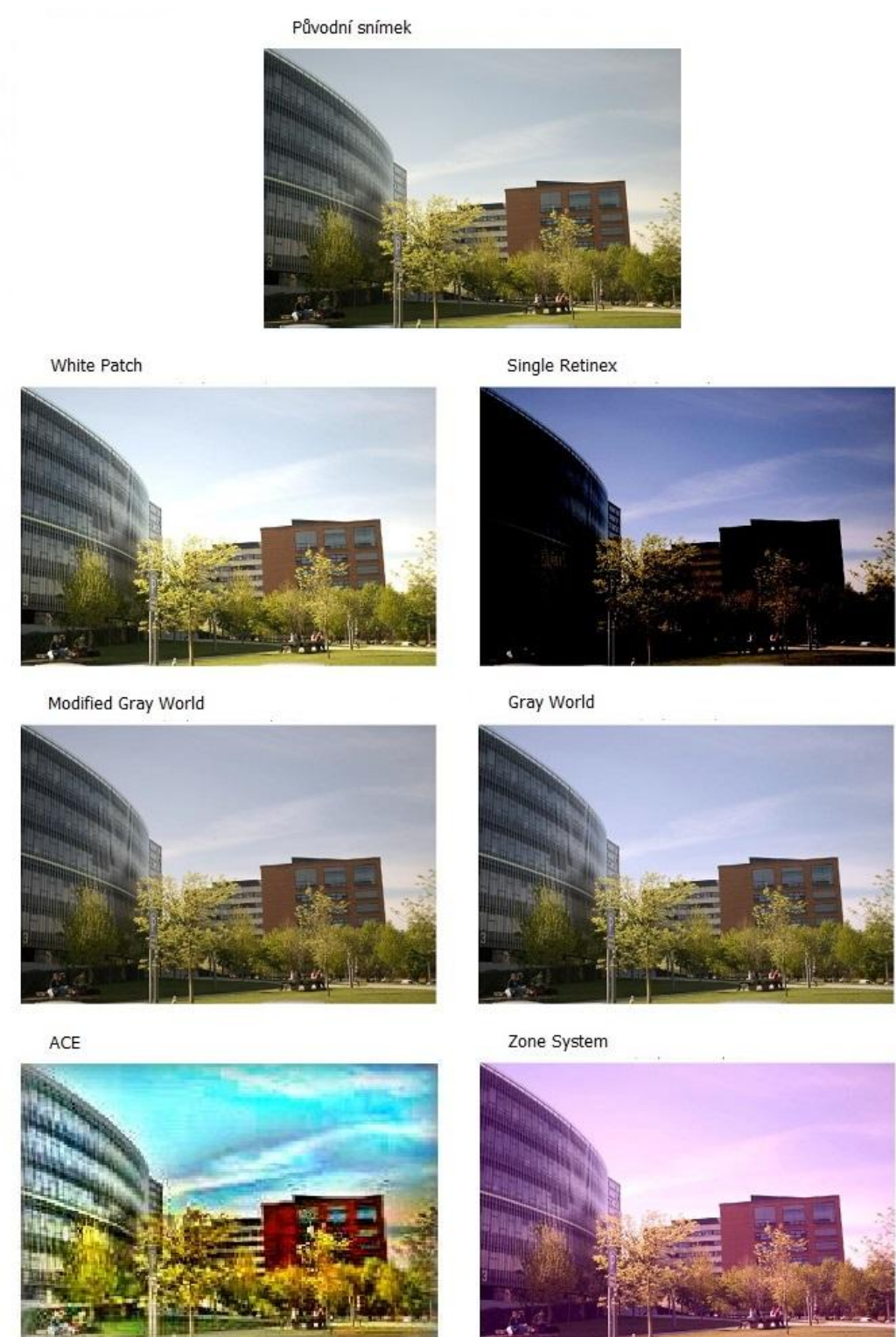
Obrázek 41 Funkce algoritmů při 2000K



Obrázek 42 Funkce algoritmů při 3000K

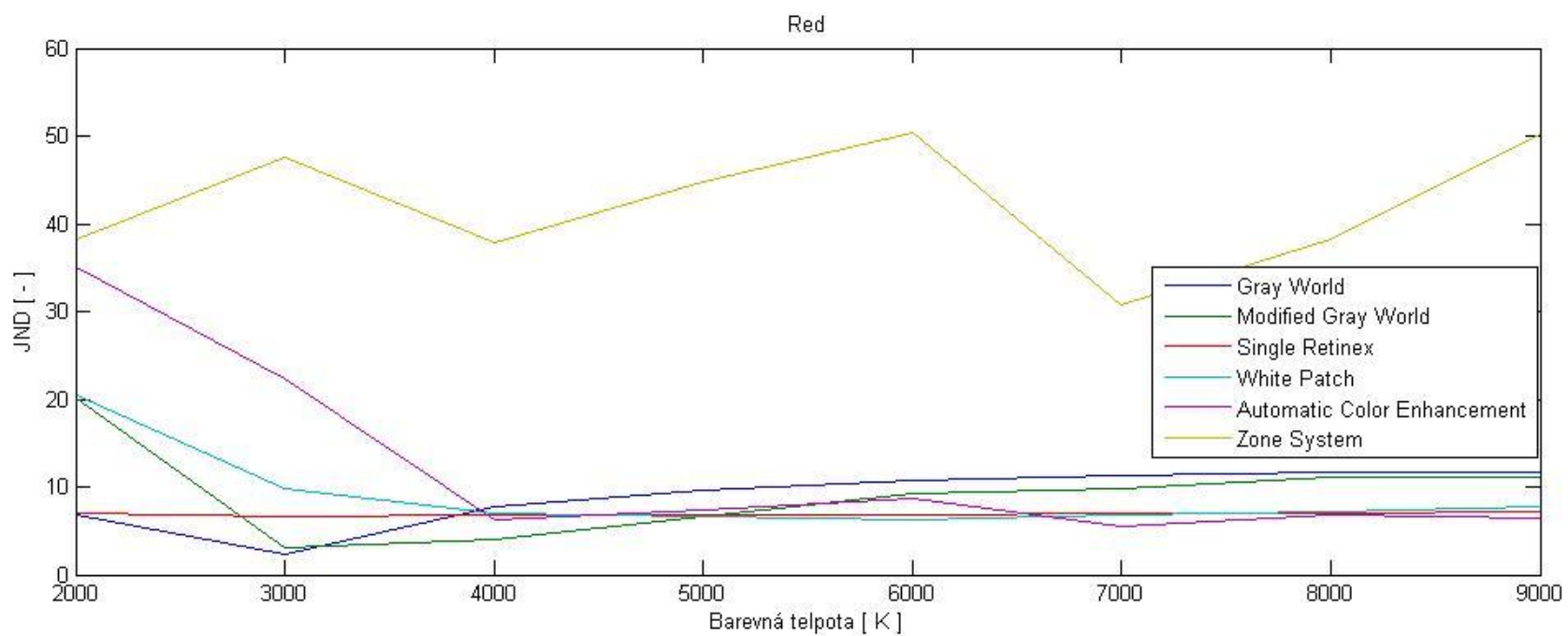


Obrázek 43 Funkce algoritmů při 5000K

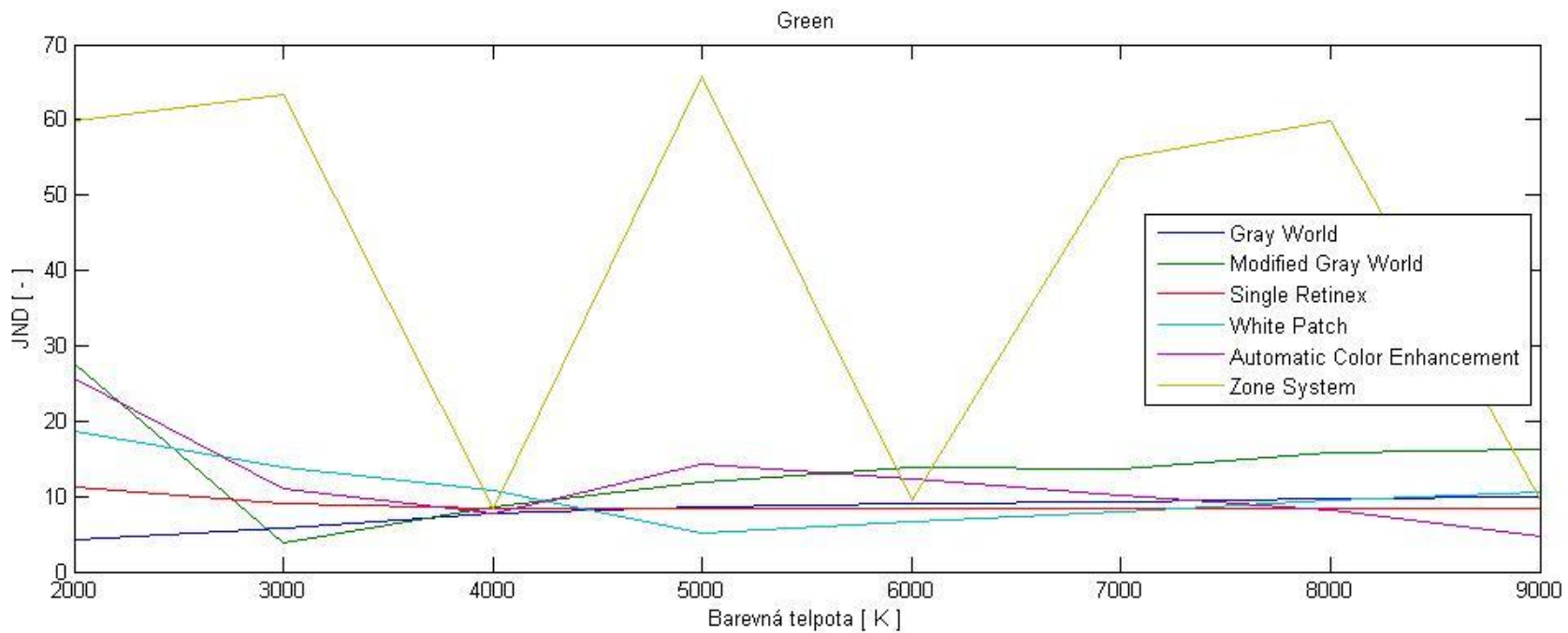


Obrázek 44 Funkce algoritmů při 9000K

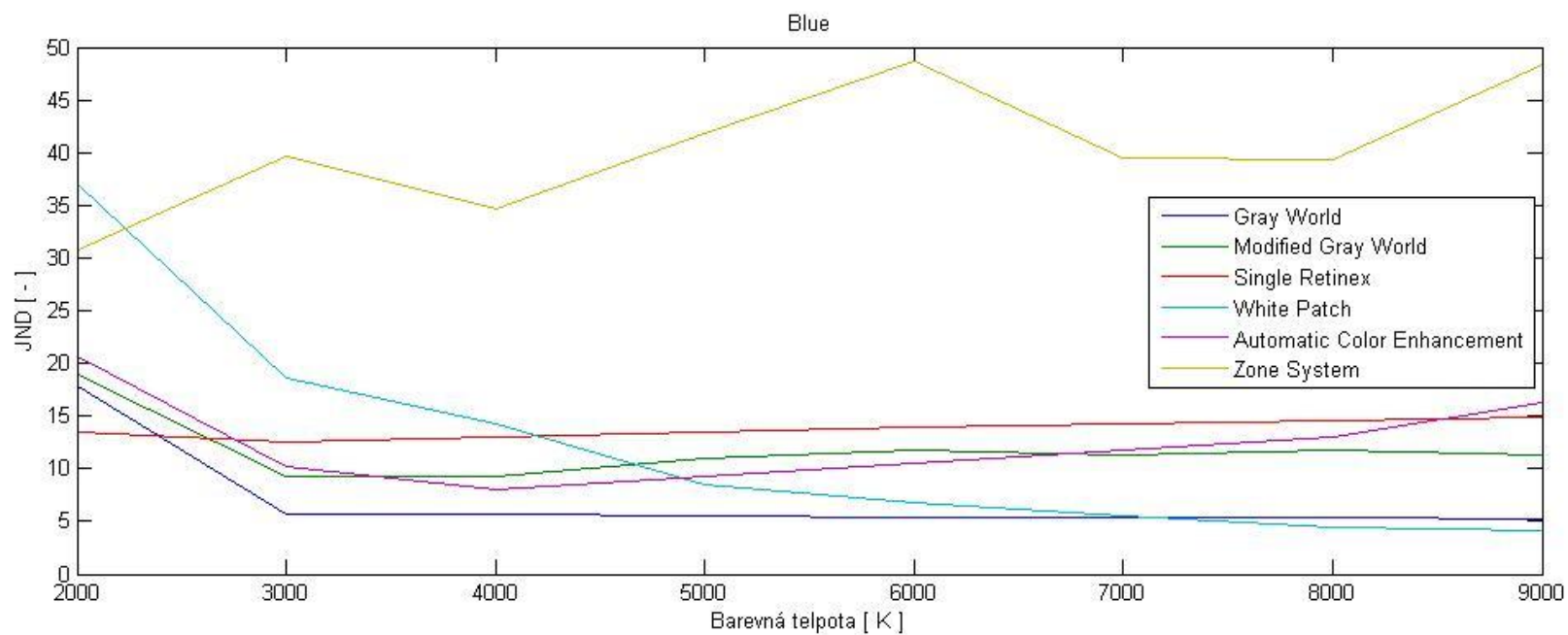
6.2 Příloha 2



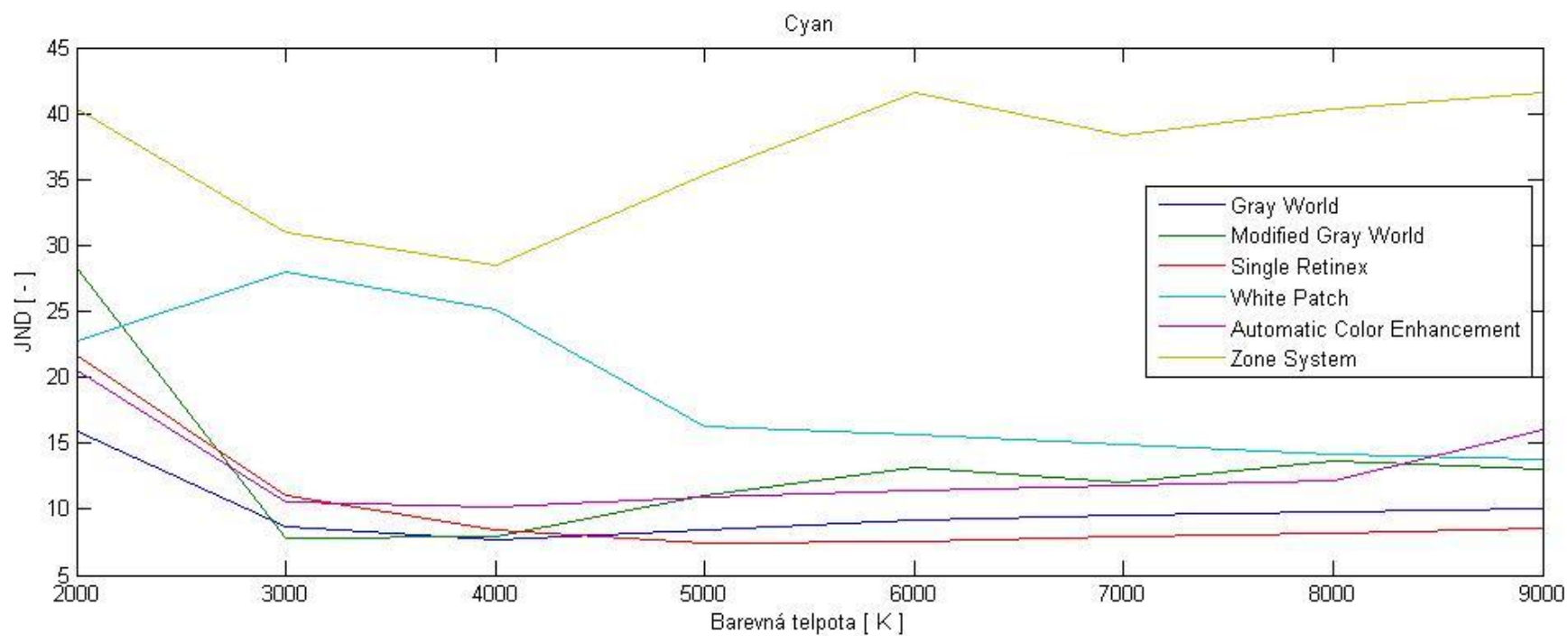
Obrázek 45 Red



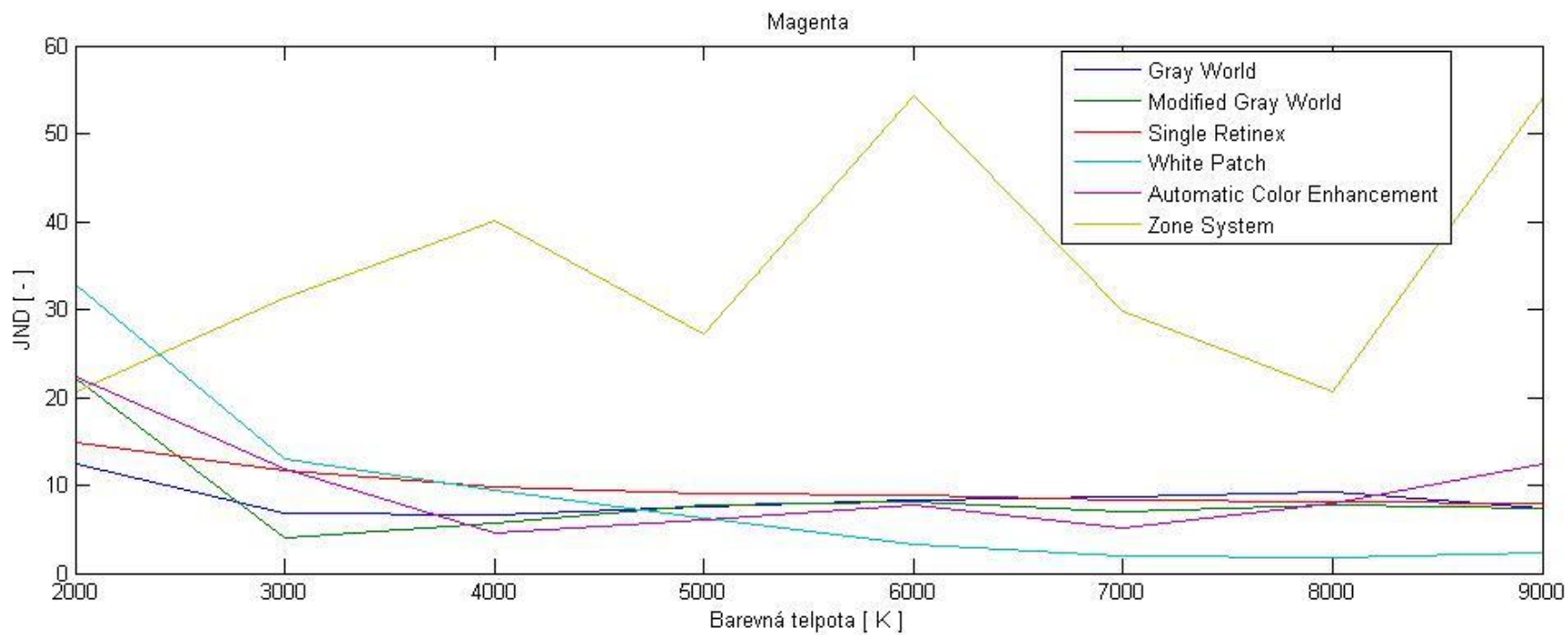
Obrázek 46 Green



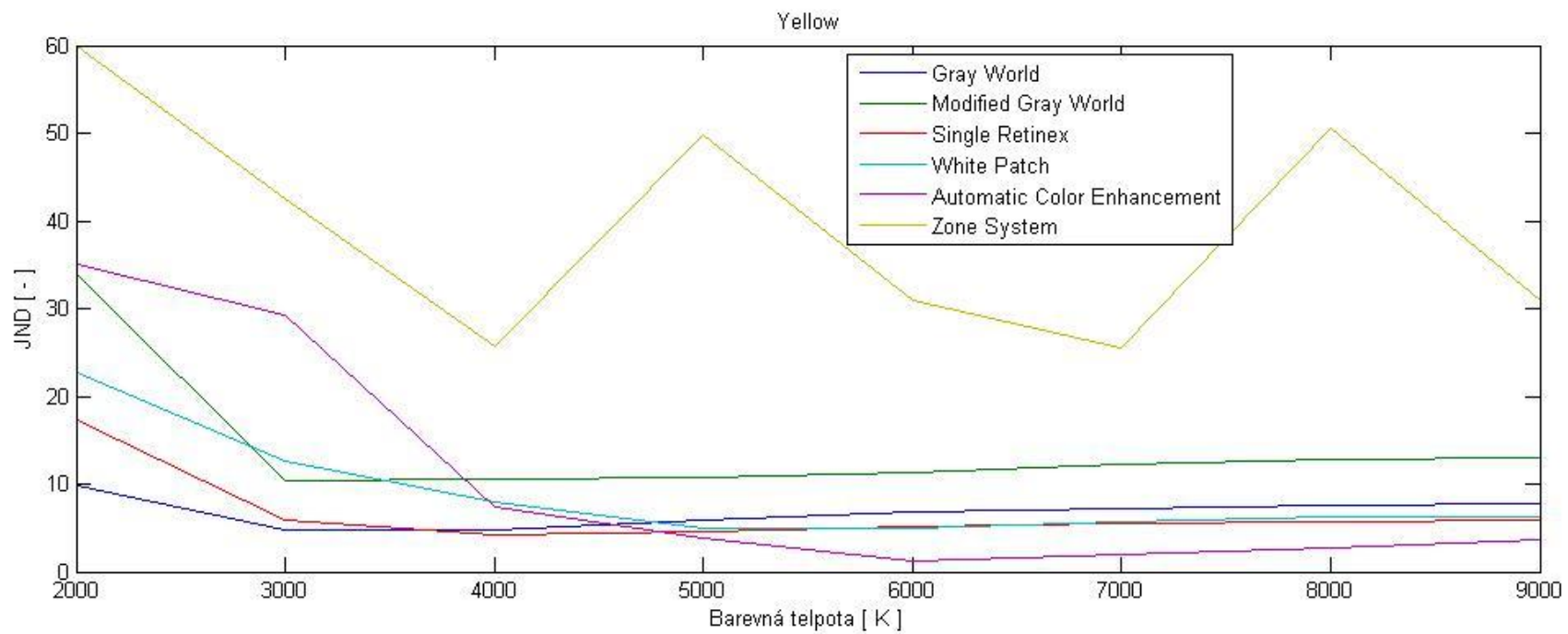
Obrázek 47 Blue



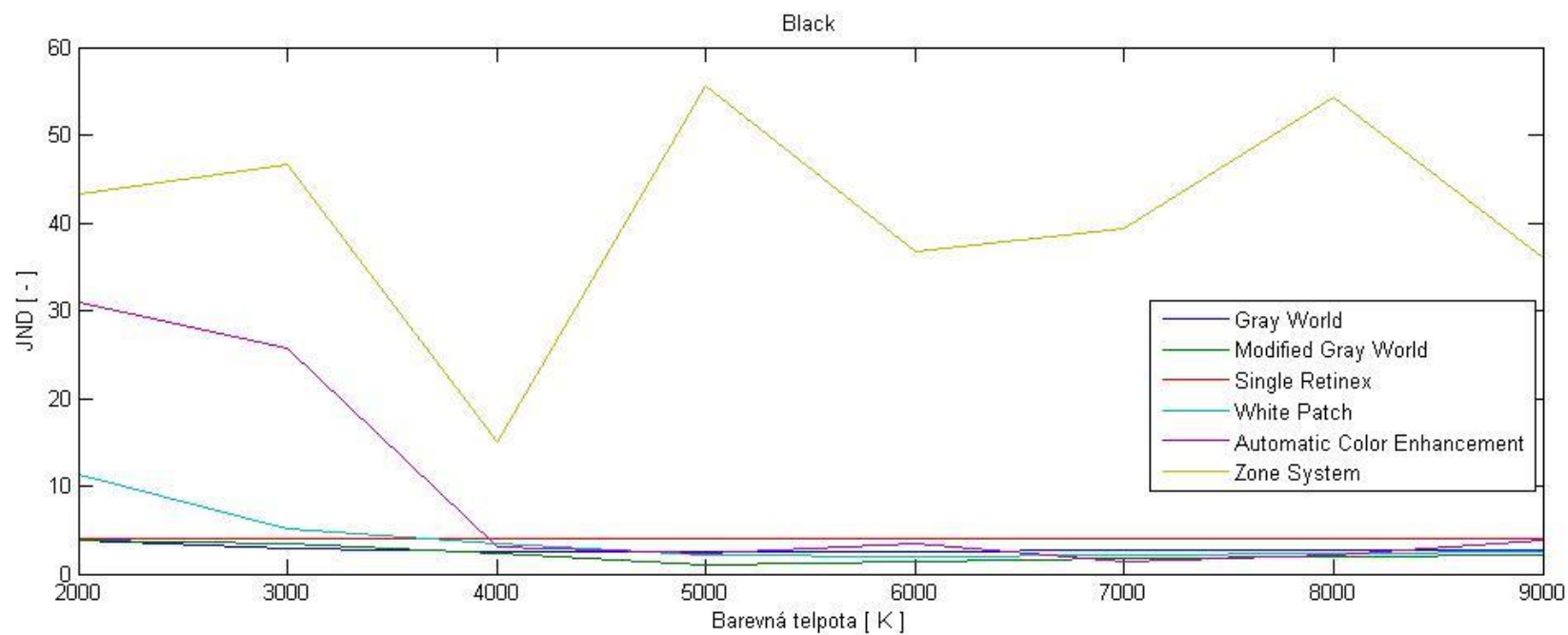
Obrázek 48 Cyan



Obrázek 49 Magenta



Obrázek 50 Yellow



Obrázek 51 Black