

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



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Radiometrická kalibrace obrazového systému
(Radiometric Calibration of Image Acquisition System)

Bc. JAKUB PAROULEK

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

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Paroulek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **392768**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Radiometrická kalibrace obrazového systému

Název diplomové práce anglicky:

Radiometric Calibration of Image Acquisition System

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami radiometrické kalibrace obrazových systémů
2. Vybrané metody po dohodě s vedoucím práce implementujte
3. Proveďte radiometrickou kalibraci all-sky monitoru William (<http://william.multimediatech.cz/>)
4. Využijte kalibrovaný obrazový systém pro měření světelného znečištění

Seznam doporučené literatury:

- [1] Zotti, Georg. "Measuring light pollution with a calibrated high dynamic range all-sky image acquisition system." DARKSKY2007??th European Symposium for the Protection of the Night Sky, Bled, Slovenia. 2007.
[2] Duriscoe, Dan M., Christian B. Luginbuhl, and Chadwick A. Moore. "Measuring night-sky brightness with a wide-field CCD camera." Publications of the Astronomical Society of the Pacific 119.852 (2007): 192.
[3] Debevec, Paul E., and Jitendra Malik. "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs." ACM SIGGRAPH 2008 classes. ACM, 2008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Stanislav Vitek Ph.D., 13137

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

,

Datum zadání diplomové práce: **26.09.2016** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Diplomová práce zahrnuje různé metody vytvoření převodní charakteristiky fotoaparátů, která je důležitá k vytvoření HDR obrazu. Pomocí této křivky byla provedena radiometrická kalibrace monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM. Tato metoda byla implementována v programovém prostředí MATLAB, následně bylo provedeno měření jasu noční oblohy – světelného znečištění.

Annotation

The diploma thesis includes various methods of creating the conversion characteristics of cameras that is important for HDR image creation. Using this curve, the radiometric calibration of the whole WILLIAM sky monitoring system was performed. This method was implemented in the MATLAB program environment, followed by measurements of the brightness of the night sky - light pollution.

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

30. 12. 2017

podpis:

Poděkování

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

OBSAH:

1. Úvod	8
2. RADIOMETRICKÉ A FOTOMETRICKÉ VELIČINY	9
2.1. RADIOMETRICKÉ VELIČINY	10
2.1.1. ZÁŘIVÝ TOK	10
2.1.2. ZÁŘIVOST	10
2.1.3. INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ (RESP. OZAŘOVÁNÍ)	10
2.1.4. ZÁŘ	10
2.1.5. DÁVKA OZÁŘENÍ (EXPOZICE)	10
2.2. FOTOMETRICKÉ VELIČINY	11
3. EXPOZICE	12
3.1. RYCHLOST ZÁVĚRKY (EXPOZIČNÍ ČAS)	12
3.2. CLONA	12
3.3. CITLIVOST SNÍMAČE (ISO)	13
3.4. EXPOZIČNÍ HODNOTA (EXPOSURE VALUE, EV)	14
3.5. PŘEEXPOZICE A PODEXPOZICE	15
4. DYNAMICKÝ ROZSAH	16
4.1. DYNAMICKÝ ROZSAH SCÉNY	16
4.2. DYNAMICKÝ ROZSAH SENZORU (FOTOAPARÁTU)	17
4.3. DYNAMICKÝ ROZSAH DISPLEJŮ	18
5. HIGH DYNAMIC RANGE (HDR)	19
5.1. VYTVOŘENÍ HDR OBRAZU	19
5.1.1. LDR FOTOAPARÁT	19
5.1.1.1. SIMULTÁNNÍ POUŽITÍ VÍCE SNÍMAČŮ	19
5.2. MULTI-EXPOZICE VS. SINGLE SHOT	19
5.3. FUNKCE ODEZVY FOTOAPARÁTU – CAMERA RESPONSE FUNCTION (CRF)	20
5.4. OBJEKTIVNÍ METODA ZJIŠTĚNÍ CRF	20
5.4.1. OECF S OBJEKTIVEM	21
5.4.1.1. VÝPOČET PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY	22
5.5. SUBJEKTIVNÍ METODY ZJIŠTĚNÍ CRF A NÁSLEDNÁ REKONSTRUKCE HDRI	23
5.5.1. METODA MANNA A PICARDA	23
5.5.2. METODA DEBEVECA A MALIKA	25
5.5.3. METODA MITSUNAGA A NAYARA	27
5.5.4. METODA ROBERTSONA, BORMANA A STEVENSONA	29
5.5.5. METODA GROSSBERGA A NAYARA	31
5.6. VYTVOŘENÍ MAPY OSVĚTLENÍ A JASŮ	34

5.6.1.	MAPA OSVĚTLENÍ.....	34
5.6.2.	MAPA JASŮ HDR OBRAZU	34
5.7.	VYUŽITÍ HDR	34
6.	SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ.....	35
6.1.	MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ OBLOHY	36
6.1.1.	BORTLEOVA STUPNICE	36
6.1.2.	JASOMĚR – SQM	37
6.1.3.	DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT	38
7.	ZPRACOVÁNÍ.....	39
7.1.	POŘÍZENÍ DAT PRO KALIBRACI	39
7.1.1.	SEKVENCE SNÍMKŮ – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA	39
7.1.2.	SEKVENCE SNÍMKŮ – KALIBRACE JASU	40
7.2.	URČENÍ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU	40
7.2.1.	OBJEKTIVNÍ METODA	41
7.2.2.	METODA DEBEVEC A MALIK	42
7.3.	URČENÍ SKUTEČNÉHO JASU	43
7.3.1.	DOPOČET VÝSLEDNÉ JASOVÉ KŘIVKY	44
7.4.	PŘÍSTROJ SPECTRASCAN® PR-740.....	45
8.	VÝSLEDKY	47
8.1.	PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY	47
8.2.	KALIBRACE ALL-SKY MONITORU WILLIAM	49
8.3.	POROVNÁNÍ VYPOČTENÝCH HODNOT S PŘÍSTROJEM SPECTRASCAN®	51
8.4.	MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ.....	52
8.4.1.	SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ PRAHA A OKOLÍ X NOVÝ ZÉLAND.....	52
8.5.	MONITOROVÁNÍ NOČNÍ OBLOHY V PRAZE	54
9.	ZÁVĚR.....	58
	SEZNAM TABULEK.....	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64
	CELKOVÝ POČET STRAN	67

1. ÚVOD

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval kolorimetrickou kalibrací multiviewu videosekvencí (mnozí to znají více pod názvem 3D filmy – videa), i když tato 3D technologie se v poslední době vzhledem k tlaku na výrobce spotřební elektroniky dostala do stádia klinické smrti. Spotřebitelé přestali mít o 3D televize zájem. Důvod byl nejspíše prostý: aby měli správný vjem obrazu, museli si nasadit speciální 3D brýle (aktivní, či pasivní), ale to pro ně nebylo pohodlné. Výrobci spotřební elektroniky sice spotřebitelům poté nabídli i 3D obrazovky, ke kterým nebyly zapotřebí brýle, ale ty byly cenově dražší. Také proto nyní 3D technologii postupně vytlačuje nová technologie, a to HDR (High Dynamic Range neboli vysoký dynamický rozsah).

Při pozorování HDR obrazu (jak u videa, tak fotografií) je zcela evidentní, jaký je rozdíl mezi klasickým obrazem a HDR. HDR má o dost živější obraz. Zvyšuje kontrastní poměr mezi nejsvětlejším a nejtmavším bodem scény, rozšiřuje barevný prostor a to vše přispívá k realističtější a přirozenější reprodukci obrazu.

Tento HDR obraz se dá vytvořit několika způsoby. Právě těmi se zabývám ve své diplomové práci. Jejím cílem je najít a porozumět různým způsobům vytvoření obrazu HDR a provést radiometrickou kalibraci obrazových systémů tak, aby se poté mohly využít například k měření světelného znečištění. Základním prvkem HDR je převodní charakteristika fotoaparátu, díky které lze zjistit skutečný jas na snímku, a proto se v práci touto převodní charakteristikou více zabírám.

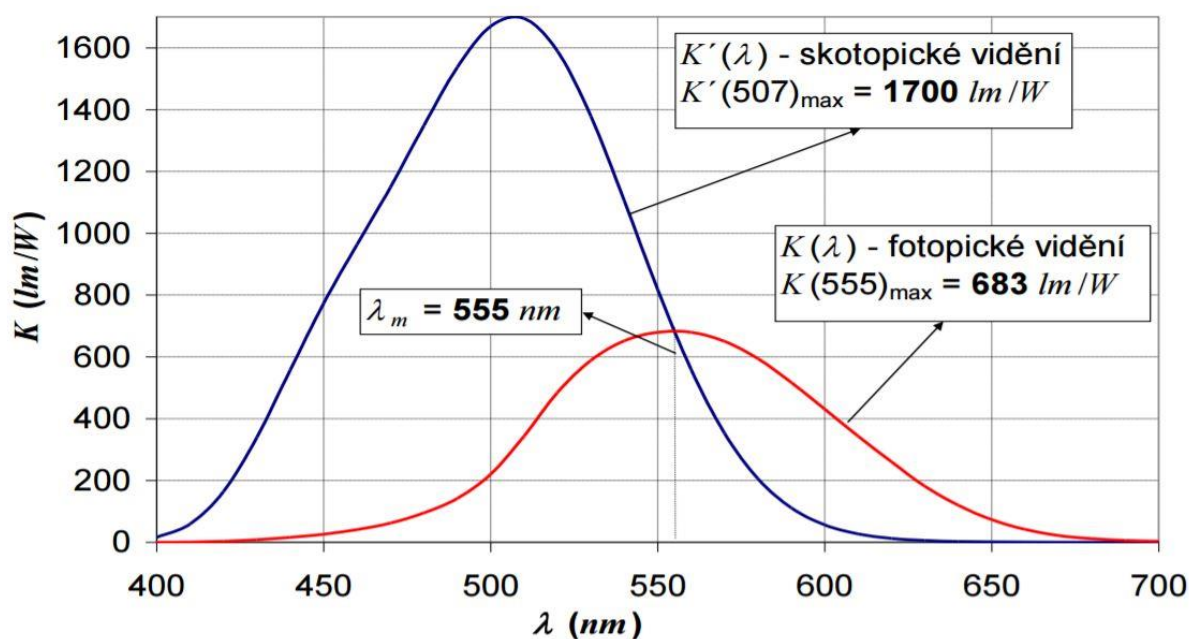
Ve své diplomové práci jsem se zároveň soustředil na aplikaci kalibrovaného obrazového systému při měření světelného znečištění, které v současné době zažívá velký progres. Působí mnoho organizací usilujících o maximální potlačení světelného znečištění. Ať už vzhledem k nepříznivému vlivu na člověka či zvířata, nebo kvůli snížené možnosti kvalitního astronomického pozorování noční oblohy.

2. RADIOMETRICKÉ A FOTOMETRICKÉ VELIČINY

Radiometrické veličiny se používají pro popis vyzařování a přenášení energie pomocí elektromagnetického záření všeho druhu. Když je vlnová délka záření ve viditelném spektru, tak je popsána fotometrickými veličinami. Fotometrické veličiny jsou prakticky radiometrické veličiny, které jsou vázány na fungování vizuálního systému člověka (závislé na spektrální odezvy lidského vidění), a proto jsou fotometrické veličiny omezeny pouze na záření, které lze vidět lidským zrakem. [1]

$$F_v = K(\lambda) \int_{\lambda} R_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

Rovnice (2.1), která popisuje vztah mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami, kde F_v je fotometrická veličina, R_e je radiometrická veličina, λ je vlnová délka, $V(\lambda)$ je relativní spektrální odezva lidského vidění a $K(\lambda)$ je konstanta maximální citlivosti.



Obrázek 2.1 – Spektrální citlivost lidského oka (fotopické a skotopické vidění)

Maximální citlivosti při denním (fotopickém) vidění je konstanta $K(\lambda) = 683 \text{ lm/W}$ a při nočním (skotopickém) vidění je $K(\lambda) = 1700 \text{ lm/W}$.

2.1. RADIOMETRICKÉ VELIČINY

2.1.1. ZÁŘIVÝ TOK

Zářivý tok ϕ_e udává výkon přenášený zářením (energie vyzářená zdrojem za jednotku času). Jednotkou je watt [W].

2.1.2. ZÁŘIVOST

Zářivost I_e je dána podílem zářivého toku $d\phi_e$ a velikosti prostorového úhlu $d\Omega$. Jednotkou je watt na steradián [$W \cdot sr^{-1}$].

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega} \quad (2.2)$$

2.1.3. INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ (RESP. OZAŘOVÁNÍ)

Intenzita vyzářování M_e (resp. ozařování E_e) je dána podílem zářivého toku $d\phi_e$ a plošného obsahu dS . Jednotkou je watt na metr čtvereční [$W \cdot m^{-2}$].

$$M_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad \left(E_e = \frac{d\phi_e}{dS} \right) \quad (2.3)$$

2.1.4. ZÁŘ

Zář L_e (neboli plošná zářivost) je definovaná podílem zářivostí dI_e , tj. elementární plošky o obsahu dS zdroje v tomto směru, a průmětu plošného elementu do roviny kolmé k danému směru. Jednotkou je watt na metr čtvereční na steradián [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$].

$$L_e = \frac{dI_e}{dS} \quad (2.4)$$

$$\text{v obecném směru: } L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos\alpha} \quad (2.5)$$

2.1.5. DÁVKA OZÁŘENÍ (EXPOZICE)

Dávka ozáření udává intenzitu ozařování E_e za jednotku času t .

$$H_e = E_e \cdot t \quad (2.6)$$

Více o radiometrických veličinách najdete zde [2].

2.2. FOTOMETRICKÉ VELIČINY

V tabulce 2.1 jsou vidět jaké radiometrické veličiny odpovídají fotometrickým veličinám.

RADIOMETRICKÉ VELIČINY		FOTOMETRICKÉ VELIČINY	
veličina	jednotka	veličina	jednotka
zářivý tok ϕ_e	W	světelný tok ϕ	lumen (lm)
zářivost I_e	$W \cdot sr^{-1}$	svítivost I	kandela (cd)
zář L_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	jas L	$cd \cdot m^{-2}$
intenzita vyzařování M_e	$W \cdot m^{-2}$	světlení (intenzita světlení) M	$lm \cdot m^{-2}$
intenzita ozáření E_e	$W \cdot m^{-2}$	osvětlení (intenzita osvětlení) E	lux (lx)
expozice (dávka ozáření) H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	expozice H	$lx \cdot s$

Tabulka 2.1 – Vztahy radiometrických a fotometrických veličin (vlastní)

3. EXPOZICE

Expozice je pojem, který označuje množství dopadajícího světla z fotografované scény na snímač (senzor, film...) fotoaparátu. Se správnou expozicí souvisí tři prvky nastavení fotoaparátu, kterými jsou rychlost závěrky (expoziční čas), nastavení clony a citlivost snímače na světlo (ISO). [3]

Výpočet expozice H je dán vztahem, kde E je osvětlení a t_{exp} je doba expozice:

$$H = E \cdot t_{exp} \tag{3.1}$$

Jestli se mění osvětlení během expoziční doby, vypočítáme expozici jako

$$H = \int_0^t E dt \tag{3.2}$$

3.1. RYCHLOST ZÁVĚRKY (EXPOZIČNÍ ČAS)

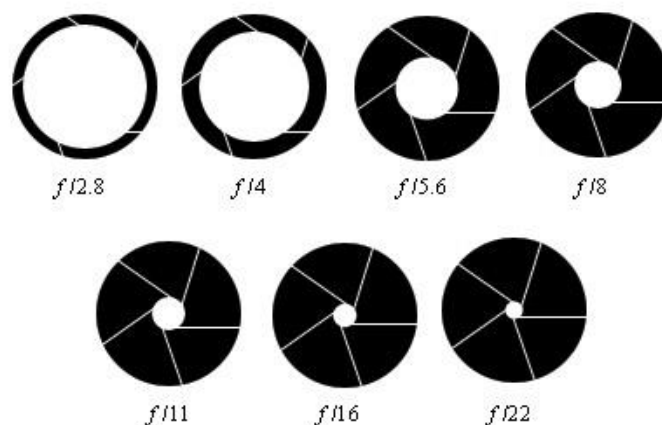
Rychlost závěrky je doba, po kterou dopadá světlo na snímač. Čím je tato doba kratší, tím dopadne na snímač méně světla. Udává se v sekundách [s].

30	15	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	→							
												→	1/125	1/250	1/500	1/1000	1/2000	1/4000	1/8000

Tabulka 3.1 – Expoziční časy [s] (krok 1 EV)

3.2. CLONA

Clona reguluje velikost otvoru, kterým prochází světlo na snímač (ovlivňuje tak množství světla, které dopadá na snímač). Uvádí se pomocí clonového čísla. Čím je toto číslo větší, tím je menší otvor pro průchod světla.



Obrázek 3.1 – Clona

Clonové číslo je poměr ohniskové vzdálenosti k průměru štěrby objektivu. Značí se písmenem f .

1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32	45
---	-----	---	-----	---	-----	---	----	----	----	----	----

Tabulka 3.2 – Clonová řada (krok 1 EV)

Clonová řada je zvolena tak, aby při změně clonového čísla o jeden stupeň clona propustila dvakrát více či dvakrát méně světla (například z $f/2,8$ na $f/4$ se propustí dvakrát méně světla).

Clona má velký vliv na hloubku ostrosti. Při potřebě větší ostrosti fotografie v popředí i v pozadí fotografovaného objektu zvolíme větší clonové číslo (například při zachycení krajiny). Když zvolíme menší clonové číslo, bude ostrý fotografovaný objekt a popředí i pozadí bude rozmazané.

3.3. CITLIVOST SNÍMAČE (ISO)

Citlivost snímače se udává v jednotkách ISO a označuje, jak je snímač citlivý na světlo. Čím vyšší citlivost, tím stačí ke správné expozici menší množství světla. Základní hodnotou citlivosti je ISO 100, při které je digitální šum minimální. Při snížených světelných podmínkách se hodnota zvyšuje, aby se snímek mohl správně exponovat, ale toto zvýšení je na úkor šumu. [4]

ISO je zkratka z angličtiny pro Mezinárodní organizaci pro normalizaci (International Organization for Standardization). ISO číslo je dáno dle normy ISO 5800 z roku 1987 (ČSN 66 6625).

3.4. EXPOZIČNÍ HODNOTA (EXPOSURE VALUE, EV)

Expoziční hodnota je rovna nule při exponování snímku s nastavením fotoaparátu na clonové číslo 1, rychlost závěrky 1 vteřina a citlivost snímače ISO 100. [5]

„Sousední hodnoty EV mění faktor světla 2x (na polovinu nebo dvojnásobek). Zvýšení expozice o 1 EV zdvojnásobí množství světla dopadající na senzor nebo film, zatímco snížení expozice o 1 EV ho sníží na polovinu. Z uvedeného vyplývá, že expozice má opět logaritmický charakter, což perfektně odpovídá lidskému vnímání světla.“ [6]

HODNOTA EV (ISO 100)		CLONOVÉ ČÍSLO									
		1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22
EXPOZIČNÍ ČAS [s]	8	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
	4	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
	2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1/4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1/8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1/15	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1/30	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1/60	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1/125	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1/250	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1/500	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

Tabulka 3.3 – Hodnoty EV pro různé nastavení expozice

Výpočet expoziční hodnoty je dán vztahem

$$EV = \log_2 \frac{f^2}{t_{exp}}, \quad (3.3)$$

kde f je clonové číslo a t_{exp} je doba expozice.

3.5. PŘEEXPOZICE A PODEXPOZICE

Při špatném nastavení expozice na fotoaparátu vznikají fotografie, které jsou buď příliš tmavé, nebo příliš světlé. Říkáme jim, že jsou podexponované, nebo přeexponované. Žádný fotograf nechce vytvořit tyto druhy snímků (pokud to není umělecký záměr). Na obrázku 3.2 jsou ukázány rozdíly těchto v porovnání se správně exponovaným snímkem.



Obrázek 3.2 – Ukázka podexpozice a přeexpozice – uprostřed je správně exponovaný snímek

V RGB vyjádření je přepal představen jako bílý bod RGB (255,255,255) a naopak RGB (0,0,0) je černý bod.

Pro úpravy digitální fotografie je vždy lepší, když se omylem snímek mírně podexponuje než obráceně. Protože při přeexponování se ztrácí kresba fotografie a vzniká jednolitá bílá barva.

4. DYNAMICKÝ ROZSAH

Dynamický rozsah (Dynamic Range) je poměr mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou dané fyzikální veličiny. Každý den můžeme vidět okolo sebe mnoho scén, které mají velký dynamický rozsah. Tyto scény se nedají věrně zaznamenat digitálním fotoaparátem na jeden snímek tak, jak je ve skutečnosti vidíme. (Lidské oko v jedné scéně má dynamický rozsah 11-15 EV, zato běžný digitální fotoaparát má 6-7 EV). [6] Například si představme scénu zapadajícího slunce za horu, kterou budeme chtít zachytit. Budeme si muset vybrat, zda bude na fotografii vidět obloha s obrysem hory nebo přесvícená obloha s horou, na které jsou vidět detaily (stromy, domy...). To vše závisí na různém nastavení doby expozice atd.

Dynamický rozsah se vypočítá jako:

$$DR = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad [-] \quad (4.1)$$

V obraze můžeme dynamický rozsah rozdělit na:

4.1. DYNAMICKÝ ROZSAH SCÉNY

Dynamický rozsah scény neboli kontrast scény je poměr mezi nejtmaší a nejsvětleší místem fotografie. Udává se v jednotkách EV. [8]

Při fotografování lze dynamický rozsah scény zjistit například tak, že si bodově změříme expozici nejsvětlejšího bodu (obloha, světlo...) a od této EV hodnoty odečteme hodnotu nejtmašího bodu (stín, tmavý předmět v popředí...).

Scéna, zdroj	Rozsah jasů	cd/m ²	Expoziční rozsah EV
Plný rozsah od Slunce po světlo hvězd	1 000 000 000 000:1	10 ⁻³ – 10 ⁹	40
Plný rozsah lidského oka po adaptaci	100 000 000:1	10 ⁻³ – 10 ⁹	27
Tmavý interiér s výhledem na jasné světlo	5 000 – 10 000:1	10 ⁻² – 10 ⁵	12–14

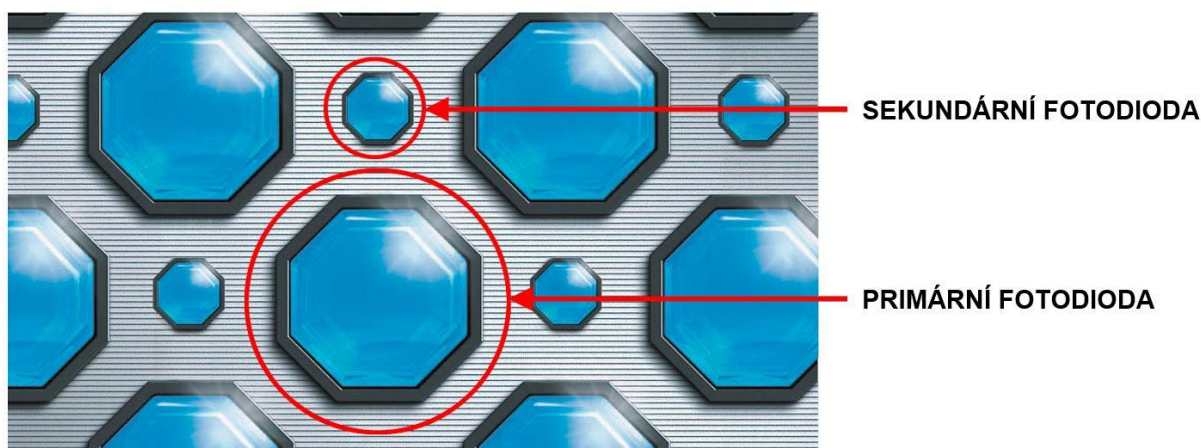
Tabulka 4.1 - Dynamický rozsah zdrojů světla a zařízení (Freeman)

4.2. DYNAMICKÝ ROZSAH SENZORU (FOTOAPARÁTU)

Scéna, zdroj	Rozsah jasů	Expoziční rozsah EV
Lidský zrak v jednom pohledu bez adaptace	10 000:1	13–14
Černobílý negativní film	10 000:1	13–14
Typická DSLR při základní citlivosti	500:1	9

Tabulka 4.2 – Dynamický rozsah (Freeman)

Jak je patrné z tabulky 4.2 [9], tak černobílý negativní film je schopen zachytit rozsah jasů, který je podobný tomu, co dokáže lidský zrak na jeden pohled. Černobílý negativ totiž reaguje nelineárně na dopadající světlo stejně jako lidský zrak. Digitální sensorové snímače při přetečení světlocitlivé buňky nedokážou zaznamenat žádné další jemné odstíny (bude pixel čistě bílý – může způsobovat blooming). Výrobci fotoaparátů proto začali konstruovat senzory s vyšším dynamickým rozsahem jako je například senzor Fujifilm Super CCD SR. Jak je vidět na obrázku 4.1, CCD senzor je vytvořen ze světlocitlivých elementů, který mají osmiúhelníkový tvar. Fotodioda se skládá z primární a sekundární fotodiody. Primární fotodioda je větší a citlivější, a proto změří dopadající světlo s lepší přesností. Její citlivost je nastavena na užší rozsah expozic. Na rozdíl od primární fotodiody má sekundární fotodioda o dost menší plochu, ale je nastavena na širší dynamický rozsah intenzit světla. Zaznamená tak hodnoty světla, které jsou mimo rozsah primární fotodiody (například když je primární fotodioda naplněna na 60 procent, tak menší dioda jen na 10 procent). Díky této modifikaci systému fotodiód má Fujifilm Super CCD SR 4x vyšší dynamický rozsah než je u obvyklého složení senzoru. [10]



Obrázek 4.1 – Světlocitlivé fotodiody senzoru Fujifilm Super CCD SR

Další možností zvýšení dynamického rozsahu senzoru je současné použití více senzorů v jednom fotoaparátu. Tato metoda je popsána v podkapitole 5.1.1.1.

4.3. DYNAMICKÝ ROZSAH DISPLEJŮ

Scéna, zdroj	Rozsah jasů	Expoziční rozsah EV
LCD monitor	350:1	8–9
CRT monitor	200:1	7–8
Velmi kvalitní fotonapír	100:1	7
Papír běžný	50:1	5–6

Tabulka 4.3 – Dynamický rozsah monitorů a papíru (Freeman)

Při porovnání tabulek dynamických rozsahů lze vidět veliký rozdíl jasů, který dokážeme ze scény zpracovat posléze interpretovat. [9]

5. HIGH DYNAMIC RANGE (HDR)

Nyní se věnujme High Dynamic Range neboli vysokému dynamickému rozsahu. Jak již z názvu vyplývá, že jde o technologii, při které se snímá či reprodukuje vysoký dynamický rozsah obrazu. Věrněji se reprodukuje obraz, který vidíme lidským okem.

(Někdy se také u obrazu používá HDRI - High Dynamic Range Imaging - vysoký dynamický rozsah zobrazení)

5.1. VYTVOŘENÍ HDR OBRAZU

Existuje mnoho způsobů, jak se dá vytvořit HDR obraz, ať už uměle grafickou cestou nebo zaznamenáním reálné scény pomocí digitálních fotoaparátů. V současné době stále není možné pořídit obraz s dynamickým rozsahem stejným jako vidí lidské oko. Ale můžeme se k tomu alespoň co nejvíce přiblížit.

5.1.1. LDR FOTOAPARÁT

Pomocí klasického digitálního fotoaparátu (LDR – Low Dynamic Range) se vytvoří HDR obraz tak, že se zachytí ta samá scéna několika jdoucími fotografiemi za sebou s různě nastavenou expozicí. Sloučením této sekvence snímků dostaneme HDR obraz.

Postup vytvoření je následující:

- zachycení scény sekvencí snímků s různě nastavenou expozicí (předpokládáme bez pohybu fotoaparátu či scény)
- stanovení charakteristické křivky fotoaparátu
- výpočet mapy osvětlení a jasů
- vytvoření HDR obrazu sloučením fotografií na základě mapy osvětlení

5.1.1.1. SIMULTÁNNÍ POUŽITÍ VÍCE SNÍMAČŮ

Jedná se o fotoaparát, jehož speciální optika rozděluje paprsky přicházejícího světla na více snímačů. Dynamický rozsah je určen počtem senzorů. Velkou nevýhodou toho snímání je, že při větším počtu senzorů se snižuje objem dopadající světlo a také, že sestavení tohoto fotoaparátu je velmi náročné.

5.2. MULTI-EXPOZICE VS. SINGLE SHOT

Velkými nevýhodami metody snímání LDR fotoaparáty jsou, že fotoaparát by měl být zafixován na stativu, na scéně by se nemělo nic změnit (žádný pohyb) a že sloučení

fotografií je velmi výpočtově náročné pro program. Výhodou je, že HDR obraz dokážeme vytvořit z výstupu z běžných CMOS a CCD snímačů digitálních fotoaparátů.

5.3. FUNKCE ODEZVY FOTOAPARÁTU – CAMERA RESPONSE FUNCTION (CRF)

Charakteristická křivka odezvy fotoaparát prakticky znázorňuje poměr příchozí světla dopadajícího na snímač fotoaparátu a hodnoty pixelů výsledného obrazu. Neboli závislost zaznamenané hodnoty na osvětlení – reakce snímacího prvku na expozici. Tato křivka je nedílnou součástí rekonstrukce HDR obrazu.

Lidské oko a fotoaparát mají odlišnou křivku odezvy. Fotoaparát má odezvu lineárního charakteru, což znamená, že když dopadá na snímač světlo s dvojnásobným počtem fotonů, tak se tento objekt jeví jako dvojnásobně jasnější. Lidské oko má ale odezvu spíše logaritmického charakteru, tudíž oko má pozdější saturaci (dvojnásobek fotonů neznamena dvojnásobně jasnější světlo).

Křivka funkce odezvy se aplikuje ke zjištění radiance map (v překladu do češtiny: schéma osvětlení). Při správné aplikaci křivky odezvy zjistíme intenzity světla jednotlivých částí fotografované scény, nikoliv kolik světla zachytil snímač. Schéma osvětlení se nadále používá k vytvoření HDR fotek (High Dynamic Range).

Pro zjištění funkce odezvy fotoaparátu existuje mnoho metod. Jednou z nich je objektivní metoda založená na měření snímací soustavy, při které je potřeba mít speciální vybavení jako je kalibrační obrazec, luxmetr, rovnoměrné osvětlení atd. Další metody se definují subjektivním určením charakteristické křivky pomocí více fotografií, které jsou pořízeny s různou expozicí.

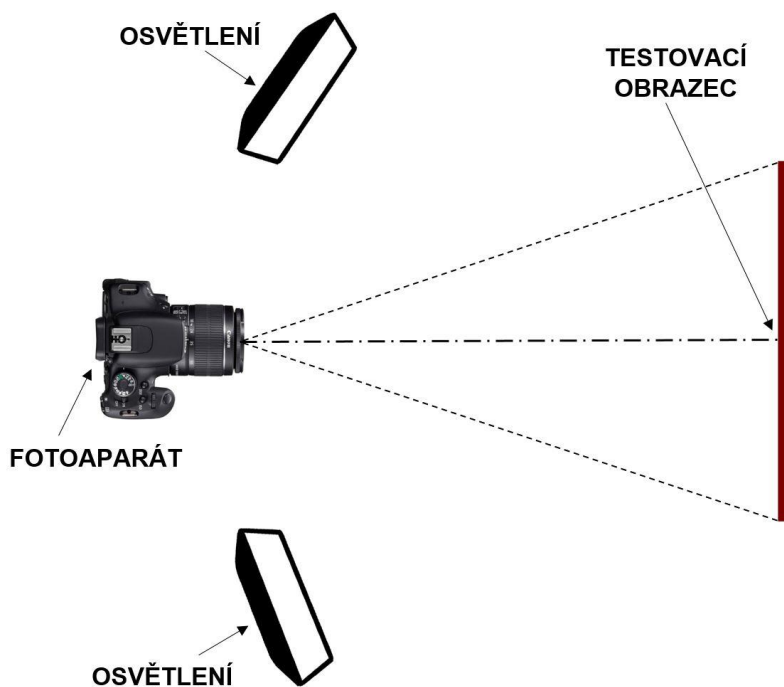
5.4. OBJEKTIVNÍ METODA ZJIŠTĚNÍ CRF

Objektivní metoda zjištění charakteristické křivky digitálního fotoaparátu se také označuje jako převodní charakteristika opto-elektronické převodní funkce (OECF – Opto-electronic Conversion Function). Tato převodní charakteristika udává, jak obrazový snímač přenáší dopadající světlo na elektrický signál. Obdobně jako senzimetrická křivky u fotoaparátu na film, která popisuje, jak reaguje světlocitlivý materiál na dopadající světlo (zčernání).

Měření převodní charakteristiky digitálních fotoaparátů je dáno mezinárodní normou ISO 14524. Tento standard popisuje měření OECF pro digitální fotoaparáty s nasazeným objektivem a měření, kdy se objektiv sundá.

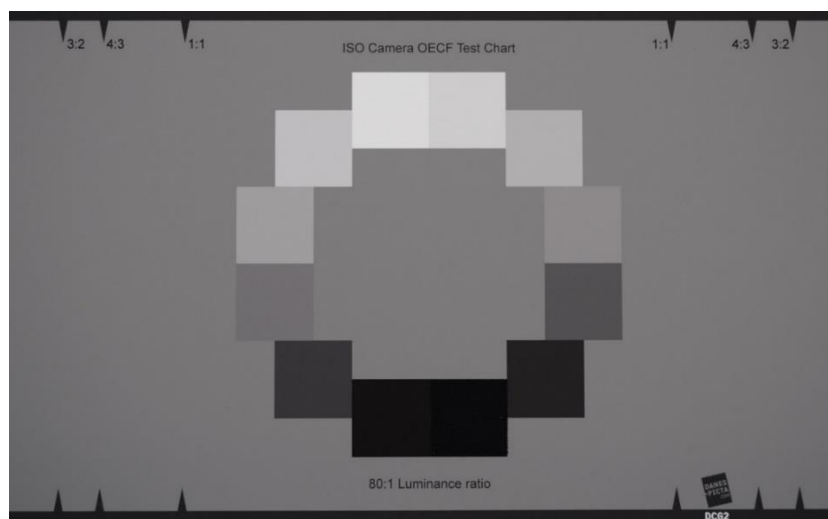
5.4.1. OECF S OBJEKTIVEM

Postup měření pro digitální fotoaparáty s objektivem jako součástí snímací soustavy je následující. Základní schéma uspořádání měření je vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 – Uspořádání pracoviště pro měření OECF

Důležitým prvkem měření je testovací obrazec ISO 14524 (ukázka testovací obrazce je vidět na obrázku 5.2), který má 12 odrazných štítků s přesně definovanou odrazivostí, který je nasvícen rovnoměrným osvětlením s patřičným spektrálním složením. Testovací obrazec je snímán digitálním fotoaparátem se zafixovanou polohou (přípevněn na stativu) a nastavení vyvážení bílé je závislé na použitém osvětlení.



Obrázek 5.2 – Testovací obrazec ISO pro měření OECF digitálního fotoaparátu

5.4.1.1. VÝPOČET PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY

Při známém osvětlení testovacího obrazce E , můžeme vypočítat jas jednotlivých štítků dle rovnice (5.1).

$$L_i = \frac{10^{-D_i} \cdot E}{\pi} \quad (5.1)$$

D_i je přitom optická hustota jednotlivých štítků, který je uveden v kalibračním protokolu příslušného testovacího obrazce.

Osvětlení obrazového snímáče E_i při správném osvětlení se vypočítá podle vztahu

$$E_i = 0,65 \frac{L_i}{F_e^2}, \quad (5.2)$$

kde L_i je jas odrazného štítku v cd/m^2 a F_e je efektivní clonové číslo objektivu, který lze spočítat podle rovnice

$$F_e = \left(\frac{1}{M} + 1 \right) \cdot F, \quad (5.3)$$

kde F je clonové číslo a M udává poměr mezi výškou testovací předlohy a výškou jejího obrazu v rovině obrazového snímáče.

M můžeme přibližně určit pomocí ohniskové vzdálenosti objektivu f a vzdálenosti fotoaparátu od testovacího obrazce l .

$$M = \frac{f + 1}{f} \quad (5.4)$$

Výsledná převodní charakteristika se vynáší do grafu, kde na ose x je logaritmus expozice H_i (výpočet expozice je dán rovnicí (3.1)) a na ose y je příslušná úroveň obrazových bodů. [11]

5.5. SUBJEKTIVNÍ METODY ZJIŠTĚNÍ CRF A NÁSLEDNÁ REKONSTRUKCE HDRI

Rozdělení subjektivních metod zjištění převodní charakteristiky podle jejich objevitelů [12] :

5.5.1. METODA MANNA A PICARDA

Steve Mann a Rosalind W. Picard odvodili charakteristickou křivku ze dvou různě exponovaných fotografií (A a B). Nejdříve se vybere relativně tmavý bod z fotky A s hodnotou f_0 a souřadnicemi (x_0, y_0) . Neznáme skutečné množství světla q_0 , díky kterému vznikla na fotce hodnota f_0 . Funkce f mapuje neznámé množství světla q_0 na hodnotu f_0 .

Můžeme napsat rovnici

$$f_0 = f(q_0) \quad (5.5)$$

pro bod $A(x_0, y_0)$.

Vyhledá se odpovídající pixel na fotografii B a to $B(x_0, y_0)$. Fotografie B byla pořízena s k expozicí, a proto tento bod má hodnotu:

$$f(kq_0) = B(x_0, y_0) = f(q_1) \quad (5.6)$$

Na fotografii A se naleznou souřadnice pixelu $A(x_1, y_1)$, který má hodnotu $f(q_1)$. Takže máme

$$A(x_1, y_1) = f(q_1) \quad (5.7)$$

Odpovídající pixel $B(x_1, y_1)$ na fotografii B má hodnotu $f(q_2)$.

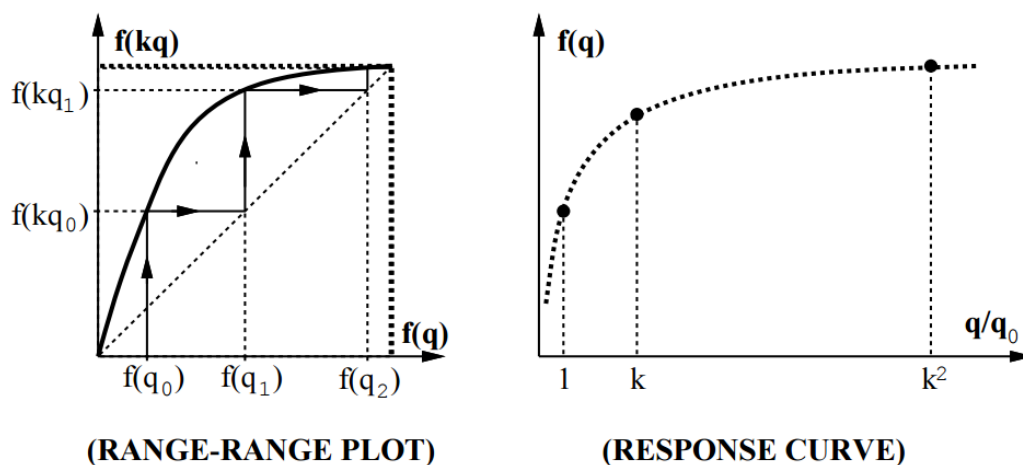
Máme tedy rovnici:

$$f(q_2) = f(kq_1) = f(k^2q_0) \quad (5.8)$$

Pokračováním této metody dostaneme nelinearitu obrazového snímače v bodech:

$$f(q_0), f(kq_0), f(k^2q_0) \dots, f(k^nq_0) \quad (5.9)$$

Nyní se mohou vynést charakteristiky viz obrázek 5.3.



Obrázek 5.3 – Křivka odezvy

Algoritmus pro modelování charakteristické křivky odezvy je:

$$f(q) = \alpha + \beta q^\gamma, \quad (5.10)$$

v našem případě

$$B = k^\gamma A. \quad (5.11)$$

Parametry z fotografického filmu:

α ... minimální hustota světla

β ... škála

γ ... kontrast filmu

Více o této metodě naleznete v [13].

5.5.2. METODA DEBEVECA A MALIKA

Tato metoda je založena na pořizení minimálně dvou fotografií se stejným obsahem, ale s jinou expoziční dobou. Předpokládáme, že při pořizování více fotografií se nezměnilo osvětlení na scéně, tudíž hodnoty jasu E_i jsou konstantní. Hodnoty pixelů jsou označeny Z_{ij} , kde i je prostorový index a j je index expozice s expozičním časem Δt_j .

Nyní se může napsat rovnice pro funkci odezvy:

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (5.12)$$

Při předpokladu, že f je monotónní, se může tato rovnice přepsat jako:

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j \quad (5.13)$$

Po zlogaritmování obou stran přirozeným logaritmem se dostane:

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (5.14)$$

Pro zjednodušení se definuje

$$g = \ln f^{-1}, \quad (5.15)$$

poté se bude moct rovnice (5.14) přepsat do tvaru:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (5.16)$$

V těchto rovnicích je známo Z_{ij} . Neznámá je hodnota E_i a funkce g , o které předpokládáme, že je hladká a monotónní (hladké funkce jsou funkce, které mají spojitě parciální derivace podle všech proměnných).

$$0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (5.17)$$

Kde N je počet pixelů, P je počet fotografií, Z_{min} a Z_{max} jsou největší a nejmenší hodnoty pixelů. Hodnota λ se volí podle očekávaného šumu.

Funkce g je hladká a při minimalizaci zajistí lepší spojení funkce tato rovnice:

$$g''(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1) \quad (5.18)$$

Za účelem získání realističtější odezvové funkce se zavádí několik omezení.

První je

$$g\left(\frac{Z_{min}+Z_{max}}{2}\right) = 0, \quad (5.19)$$

kde $Z_{min} = 0$ a $Z_{max} = 255$. Dále se zavádí váhová funkce $w(z)$, která lépe předvídá základní tvar odezvové funkce (zdůrazní se středová část křivky oproti oběma krajům).

$$w(z) \begin{cases} z - Z_{min} & \text{for } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{for } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (5.20)$$

Nyní už můžeme napsat rovnici (5.17) takto:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2\} + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z)g''(z)]^2 \quad (5.21)$$

K zajištění dobrého výsledku této metody by měla platit rovnice:

$$N(P - 1) > (Z_{max} - Z_{min}) \quad (5.22)$$

Jakmile známe hodnotu Δt_j , tak se rovnice zjednoduší takto:

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (5.23)$$

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (5.24)$$

Více o této metodě naleznete v [14].

5.5.3. METODA MITSUNAGA A NAYARA

Tato metoda je založena na odvození polynomiální aproximace charakteristické křivky.

$$g(z) = \sum_{p=0}^P c_p z^p \quad (5.25)$$

Stejně jako v Mannově a Picardově metodě se využívá poměr expozice mezi dvěma po sobě následujícími fotografiemi S_k a S_{k+1} . Jednou z výhod této metody je, že tento algoritmus umožňuje odhadnout poměr expozic (pokud je nevíme).

Poměr expozic je definován jako

$$R_{k,k+1} = \frac{w\Delta t_k}{w\Delta t_{k+1}} \quad (5.26)$$

Po dosazení

$$w_{ij}\Delta t_k = f^{-1}(z_{ij,k}), \quad (5.27)$$

bude rovnice (5.26) vypadat takto:

$$R_{k,k+1} = \frac{f^{-1}(z_{ij,k})}{f^{-1}(z_{ij,k+1})} \quad (5.28)$$

Dále se upraví vztah (5.28) na rovnici:

$$f^{-1}(z_{ij,k}) - R_{k,k+1}f^{-1}(z_{ij,k+1}) = 0 \quad (5.29)$$

Substitucí

$$f^{-1}(z) = g(z) = \sum_p c_p z^p \quad (5.30)$$

můžeme napsat rovnici chybové funkce ε jako

$$\varepsilon = \sum_{(ij)k} \left[\sum_p c_p z_{ij,k}^p - R_{k,k+1} \sum_p c_p z_{ij,k+1}^p \right]^2 \quad (5.31)$$

Kde indexy (ij) probíhají přes obrazové pixely, p jsou koeficienty polynomiální aproximace odezvové funkce a k je expozice.

Derivace chybové funkce (5.31) podle koeficientů odezvové funkce má být rovna nule.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_p} = 0 \quad (5.32)$$

Když je $f(1) = 1$, získáme další omezení pro tento lineární systém a to:

$$c_p = 1 - \sum_p c_p \quad (5.33)$$

Iterační schéma je následující: v každém kroku n se přechází poměr expozičních odhadů $R_{k,k+1}^{(n-1)}$ využívá k výpočtu další sady koeficientů $c_p^{(n)}$. Tyto koeficienty jsou dále použity k aktualizaci odhadů

$$R_{k,k+1}^{(n)} = \sum_{(ij)} \frac{\sum_p c_p^{(n)} z_{ij,k}^p}{\sum_p c_p^{(n)} z_{ij,k+1}^p} \quad (5.34)$$

Kde počáteční poměr expozice $R_{k,k+1}^{(0)}$ je zadán uživatelem u vstupu.

Algoritmus má podmínku konvergence:

$$|f^{(n)}(z) - f^{(n-1)}(z)| < \epsilon, \forall z \quad (5.35)$$

Více o této metodě naleznete v [15].

5.5.4. METODA ROBERTSONA, BORMANA A STEVENSONA

Metoda opakovaně zlepšuje odhad funkce odezvy f na bázi obrazových bodů $d_{ij,k}$ a využívá tento odhad k vypočítání lepší aproximace hodnot ozáření w_{ij} .

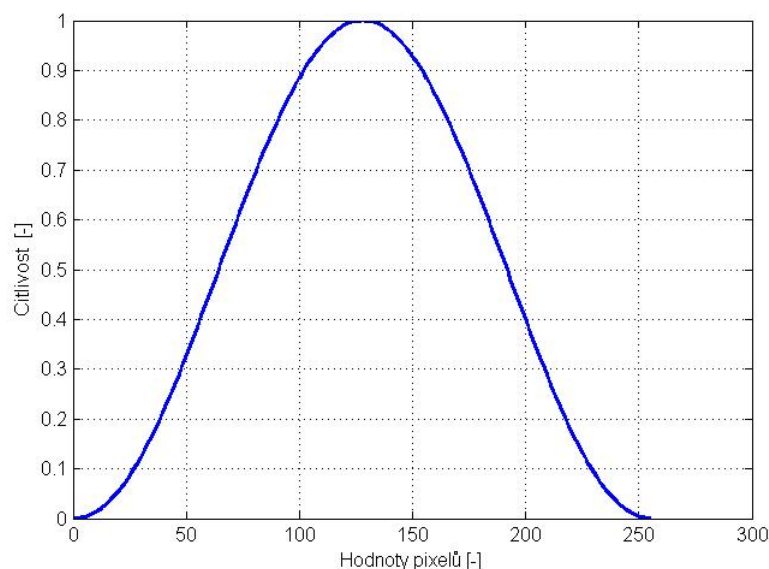
Inverzní funkce odezvy je definována hodnotami I_m , které jsou nezávislé náhodné veličiny, a které se můžou odhadnout na základě maximální pravděpodobnosti. Ale jsou závislé na neznámém záření w_{ij} , a proto se musí odhadovat současně. Hledaná funkce, která by měla být co nejmenší je:

$$O(I, w) = \sum_{(i,j),k} \sigma(m)(I_m - w_{ij}\Delta t_k)^2 \quad (5.36)$$

Funkce odezvy fotoaparátu má vždy největší citlivost uprostřed neboli u hodnot obrazových bodů od 0 do 255 bude tato největší citlivost na 128.

Proto se využívá Gaussova funkce $\sigma(m)$, která je rovna u rozsahu od 0 do 255 (8 bitová data):

$$\sigma(m) = \exp\left(-4 \frac{(m - 2^{n-1})^2}{(2^{n-1})^2}\right) = \exp\left(-4 \frac{(m - 127,5)^2}{(127,5)^2}\right) \quad (5.37)$$



Obrázek 5.4 – Váhovací funkce $\sigma(m)$

Rovnice (5.38) se minimalizuje k neznámé w při dání gradientu $\nabla O(w)$ rovno nule.

$$O(I, w) = \sum_{(i,j),k} \sigma(m)(I_m - w_{ij}\Delta t_k)^2 \quad (5.38)$$

$$w_{ij}^* = \frac{\sum_k \sigma(m)\Delta t_k I_m}{\sum_k \sigma(m)\Delta t_k^2} \quad (5.39)$$

V počátečním kroku se I_m hodnoty počítají pomocí f , protože f by měla být lineární. Dalším krokem se opakuje f vzhledem k w_{ij} . Opět se minimalizuje hlavní rovnice, ale nyní k neznámému I . Řešení je dáno:

$$I_m^* = \frac{1}{\text{kard}(\Omega_m)} \sum_{((i,j),k) \in \Omega_m} w_{ij}\Delta t_k \quad (5.40)$$

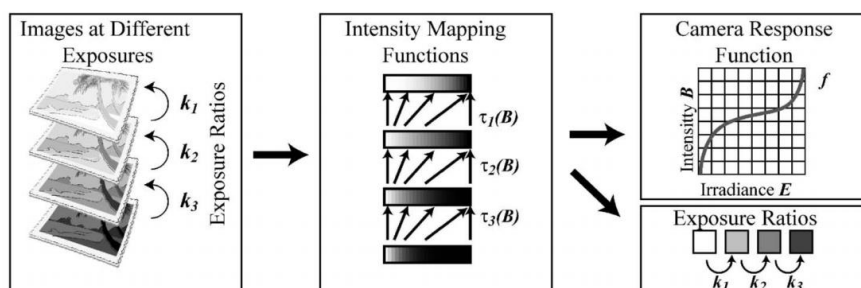
kde $\Omega_m = \{((i,j),k) : d_{ij,k} = m\}$.

Zkratka kard je kardinalita množiny (nebo také mohutnost množiny), která nám dá počet prvků v množině.

Více o této metodě naleznete v [16].

5.5.5. METODA GROSSBERGA A NAYARA

Odhad CRF funkce je založen na využití histogramu (nepoužívají se přímo hodnoty obrazových bodů z fotografií). Hlavní výhodou je, že histogramy shrnují všechny informace fotografie dohromady, tudíž se zvyšuje odolnost při pohybu s kamerou nebo při pohybu scény. Tato metoda využívá dvou stejných fotografií, které jsou rozdílné pouze v nastavení expozice.



Obrázek 5.5 – metoda Grossberga a Nayara – (fotografie s různou expozicí (expoziční kroky), ze kterých se zjistí mapovací funkce intenzity, poté už budeme znát odezovou funkci fotoaparátu)



Obrázek 5.6 – Vývojový diagram jasů

Odezvová funkce fotoaparátu je dána:

$$B = f(E) , \tag{5.41}$$

kde E je ozáření a B je měřená hodnota na snímači.

Máme dvě fotografie stejné scény s různě nastavenými expozicemi e_1 a e_2 a konstantu $k = \frac{e_2}{e_1}$:

$$\frac{E_1}{e_1} = \frac{E_2}{e_2} \rightarrow E_2 = kE_1 \tag{5.42}$$

Hledáme inverzní odezovou funkci $g := f^{-1}$:

$$g(B_1) = kg(B_2) \tag{5.43}$$

Ideální případ pro mapovací funkci intenzity je:

$$B_2 = \tau(B_1) := g^{-1}(kg(B_1)) \tag{5.44}$$

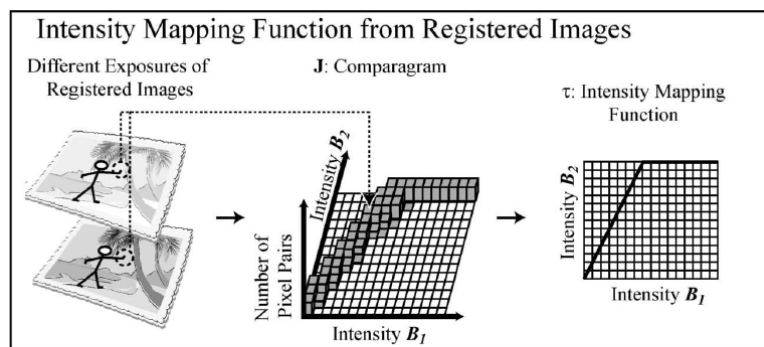
Odhad mapovací funkce intenzity:

$$g(B_2) = g(\tau(B_1)) = kg(B_1) \quad (5.45)$$

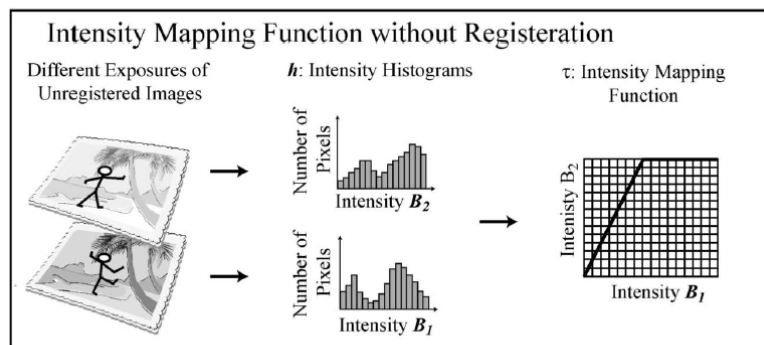
Mapovací funkce intenzity $\tau: [0,1] \rightarrow [0,1]$ je definována jako funkce, která koreluje naměřenými hodnotami jasu dvou různě exponovaných snímků. Dále je také definovaná v několika diskrétních bodech nahromaděných v histogramu H:

$$\tau(d) = H_2^{-1}(H_1(d)) \quad (5.46)$$

$$H_1(\tau(B_2)) = H_2(B_2) \quad (5.47)$$



(a)



(b)

Obrázek 5.7 – a) nalezení mapovací funkce intenzity ze scénově stejných fotografií s různou expozicí (jeden bod má intenzitu B_1 na první fotografii a k té souhlasí intenzita B_2 z druhé fotografie)

b) nalezení mapovací funkce intenzity ze scénově lehce odlišných fotografií (pohyb člověka) s různou expozicí (nejprve se vypočítají histogramy a poté se určí mapovací funkce intenzity)

Abychom zachovali analogii, tak funkce τ se vypočítá jako (mezi dvěma odpovídajícími tóny ve dvojici snímků):

$$d_{ij,1} = f(w_{ij}\Delta t_1) \quad d_{ij,2} = f(w_{ij}\Delta t_2) \quad (5.48)$$

$$d_{ij,1} = f\left(\frac{f^{-1}(d_{ij,2})}{\Delta t_2}\Delta t_1\right) = f(\gamma f^{-1}(d_{ij,2})), \text{ kde } \gamma = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \quad (5.49)$$

$$d_{ij,1} = f\left(\gamma f^{-1}(d_{ij,2})\right) = \tau(d_{ij,2}). \quad (5.50)$$

Více o této metodě naleznete v [17,17b].

5.6. VYTVOŘENÍ MAPY OSVĚTLENÍ A JASŮ

5.6.1. MAPA OSVĚTLENÍ

Výpočet mapy osvětlení pro jednotlivé snímky je závislý na převodní charakteristice fotoaparátu a na vztahu mezi osvětlením a expozicí. [18]

Nejprve se určí expozice daného místa podle vzorce

$$H_{mn} = f^{-1}(Z_{mn}), \quad (5.51)$$

kde f je převodní charakteristika fotoaparátu a Z je hodnota pixelu v daném prostoru mn .

Vydělením hodnoty expozice expozičním časem t získáme mapu osvětlení E_{mn} pro daný snímek.

$$E_{mn} = \frac{H_{mn}}{t} \quad (5.52)$$

5.6.2. MAPA JASŮ HDR OBRAZU

Pro každý LDR snímek se vypočítá mapa osvětlení, ze kterých se poté váženým průměrem určí mapa osvětlení HDR snímku.

$$E_{HDR_{mn}} = \frac{\sum_{k=1}^N w(Z_{mn}(k))E_{mn}(k)}{\sum_{k=1}^N w(Z_{mn}(k))} \quad (5.53)$$

Mapa jasů $L_{HDR_{mn}}$ HDR obrazu je dána vztahem mezi osvětlením $E_{HDR_{mn}}$ a světelností objektivu C .

$$L_{HDR_{mn}} = \frac{E_{HDR_{mn}}}{C} \quad (5.54)$$

5.7. VYUŽITÍ HDR

Pomocí HDR technologie dokážeme snímat obraz za velmi složitých světelných podmínek. Využití HDR technologie můžeme najít v mnoha oblastech. Například v automobilové průmyslu využila firma OmniVision HDR senzory (OV10620) k lepší detekci jízdního pruhu (pro udržení auta ve správném směru jízdy), k inteligentním světlometům (stmívání, pokud naproti jede další auto) nebo k lepší detekci deště (spuštění stěračů u aut). [19] Existuje opravdu mnoho využití HDR technologie. Dále se budu zabývat využití HDR v měření světelného znečištění.

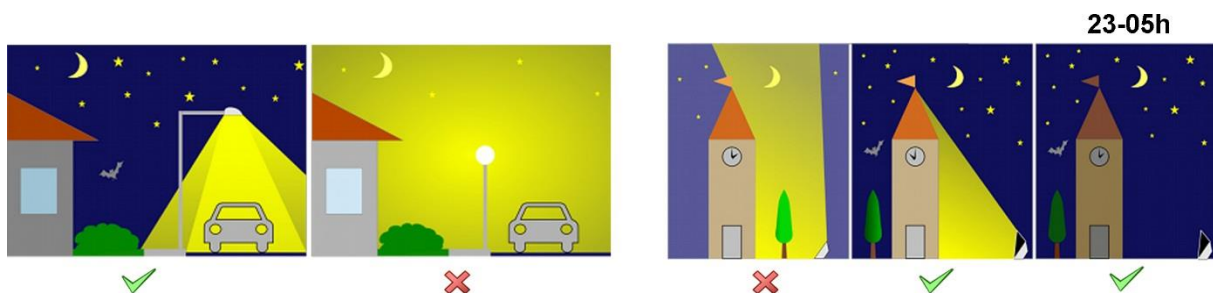
6. SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ

Světelné znečištění (v anglickém názvu Light Pollution) je pojem, který nemá přesnou definici. Dalo by se vyjádřit jako souhrn všech negativních jevů umělého osvětlení. Hlavními znaky světelného znečištění je například pronikání světla do příbytků, osvětlení míst, které není žádoucí, oslnění a závojový jas oblohy (označován také jako světelný smog). [20]

Negativní účinky světelného znečištění:

- vyšší spotřeba elektrické energie
- ovlivňování ekosystému
- zdravotní rizika pro člověka
- horší bezpečnost provozu (oslnění řidiče reklamními poutači)
- zvýšení jasů oblohy (ztráta viditelnosti hvězd)

Korigováním světelného znečištění se dají všechny tyto negativní účinky potlačit.



Obrázek 6.1 – Příklady správného a špatného veřejného osvětlení (svetelneznecesteni.cz)



Obrázek 6.2 – Satelitní snímek nočního osvětlení Evropy vyzářeného do vesmíru (NASA)

6.1. MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ OBLOHY

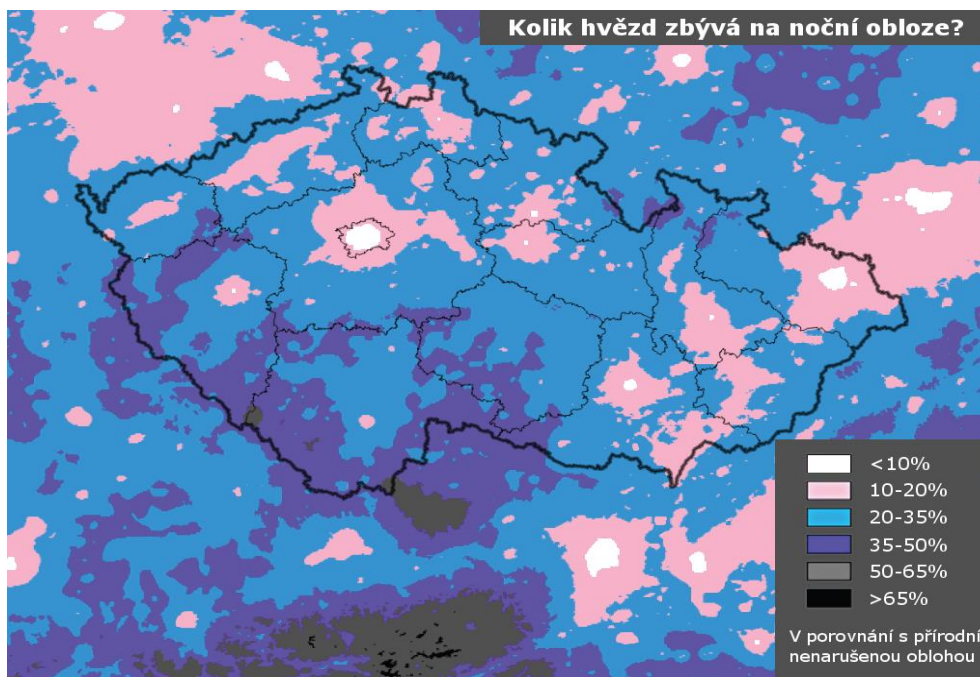
Subjektivní metoda měření je založena na vizuálních schopnostech pozorovatele – prostým okem viditelné hvězdy (MHV – mezní hvězdná velikost). U různých pozorovatelů se tento údaj může lišit, protože je závislý na zkušenostech a dobrého vidění pozorovatele (ostrosti vidění, vady oka...)

6.1.1. BORTLEOVA STUPNICE

Americký astronom John E. Bortle vytvořil stupnici o devíti bodech, která mapuje tmavost oblohy. Bortleova stupnice je založena na viditelnosti či neviditelnosti některých úkazů nebo objektů na noční obloze. [21,22]

Stupeň	Popis
1	Vynikající, skutečně tmavá obloha - jas oblohy je $\approx 21,7$ MSA - zvířetníkové světlo, protisvit a zodiakální pás jsou viditelné
2	Skutečně tmavá obloha - jas oblohy je $\approx 21,6$ MSA - letní Mléčná dráha je velmi strukturovaná, M33 je dobře viditelná
3	Venkovská obloha - jas oblohy je $\approx 21,5$ MSA - světelné znečištění je viditelné podél obzoru (mraky lehce nasvícené)
4	Venkovská/příměstská obloha - jas oblohy je $\approx 21,3$ MSA - Mléčná dráha vysoko nad obzorem je působivá (bez struktury a postrádá detaily)
5	Příměstská obloha - jas oblohy je $\approx 20,8$ MSA - jsou vidět jenom náznaky zvířetníkového světla, Mléčná dráha je slabá nebo neviditelná
6	Světlá příměstská obloha - jas oblohy je $\approx 20,0$ MSA - žádné známky zvířetníkového světla, Mléčná dráha je patrná pouze v zenitu
7	Příměstská/městská obloha - jas oblohy je $\approx 19,0$ MSA - obloha má šedivý nádech, mraky jsou jasně nasvícené
8	Městská obloha - jas oblohy je $\approx 18,0$ MSA - obloha září šedobílou nebo oranžovou barvou, některé hvězdy známých souhvězdí nejsou viditelné
9	Obloha uvnitř velkoměsta - jas oblohy je $< 17,5$ MSA - celá obloha je jasně osvětlená a to i v zenitu, slabší souhvězdí (Rak nebo Ryby) nejsou vidět vůbec

Tabulka 6.1 – Bortleova stupnice – ukázka



Obrázek 6.3 – Simulace vzhledu zimní oblohy pro stupně 9, 7, 5 a 3.

(zdroj: http://svetelnezneisteneni.cz/wp-content/uploads/2015/02/viditelne_hvezdy.png)

Na obrázku 6.3 je mapa České republiky, na které je vidět, kolik procent hvězd lze spatřit na obloze (nejméně hvězd může pozorovatel spatřit v centrech velkých měst – právě kvůli velkému světelném znečištění)

Objektivní metody měření jsou závislé na kalibrovaných přístrojích:

6.1.2. JASOMĚR – SQM

SQM (Sky Quality Meter – v překladu měřič kvality oblohy) od firmy Unihedron je přístroj, který měří jas oblohy. Výsledek měření je dán v jednotkách MSA (magnituda na úhlovou čtvereční vteřinu, $[mag \cdot arsec^{-2}]$). [23]



Obrázek 6.4 – SQM – L přístroj (<http://www.unihedron.com/projects/sqm-l/>)

Přepočítání jasů oblohy z $[mag \cdot arsec^{-2}]$ na $[cd \cdot m^{-2}]$ je dán vztahem:

$$[cd \cdot m^{-2}] = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{(-0,4 \cdot [mag \cdot arsec^{-2}])} \quad (6.1)$$

6.1.3. DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT

Světelné znečištění je možné změřit pomocí zkalibrovaného obrazového systému, například prostřednictvím digitálního fotoaparátu. [24] Na rozdíl od měření světelného znečištění pomocí jasoměru SQM má toto měření velkou výhodu v tom, že v blízkosti měření mohou být pouliční lampy a také v tom, že nevyžaduje omezený výhled na oblohu. [30]

Jedna z metod kalibrace digitálního fotoaparátu k měření jasů oblohy je založena na známé hvězdné velikosti (magnitudě) určitých hvězd, kde se pomocí známého jasů hvězd určí skutečný jas oblohy. [31]

V této práci je navržena další metoda kalibrace pomocí testovacího obrazce ISO 14524.

7. ZPRACOVÁNÍ

Pro zpracování této práce byly použity dva digitální fotoaparáty od různých firem ke srovnání radiometrické kalibrace. **Nikon D5100**, který je součástí monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM, a jako referenci k tomuto fotoaparátu jsem si vybral **Canon 600D**.

7.1. POŘÍZENÍ DAT PRO KALIBRACI

7.1.1. SEKVENCE SNÍMKŮ – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA

Pro určení převodní charakteristiky byl nasnímán obrazec ISO 14524 sekvencí snímků s různě nastavenou dobou závěrky (fixní hodnoty clony $f/5.6$ a ISO 100) a s konstantním osvětlení E kalibračního obrazce. Celá sekvence byla nasnímána do JPEG a RAW formátu.



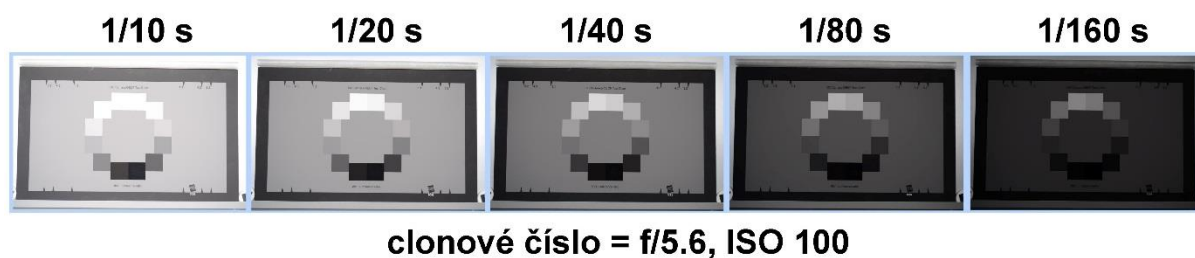
Obrázek 7.1 – Fotka pracoviště – snaha o rovnoměrné osvětlení obrazce

Rovnoměrné osvětlení obrazce bylo obtížné zajistit, a proto pro přesnější hodnoty bylo změřeno osvětlení pro každý odrazný štítek pomocí digitálního luxmetru DX-100.



Obrázek 7.2 – Digitální luxmetr DX-100

EXPOZIČNÍ ČAS:

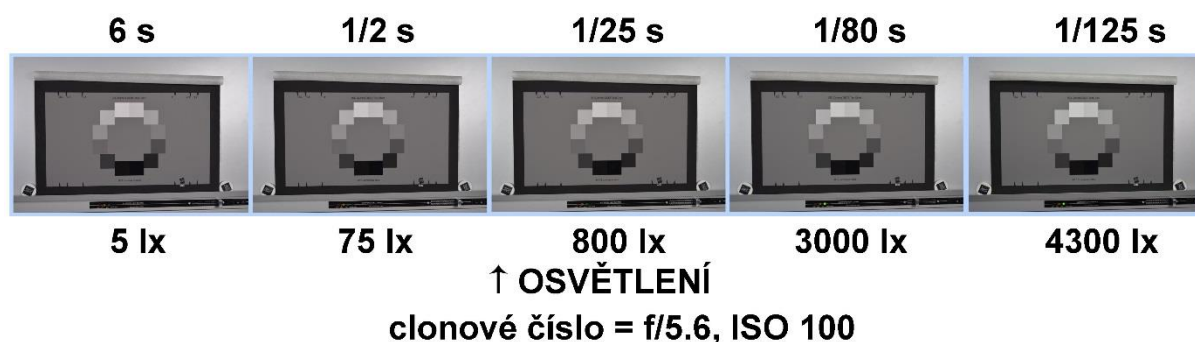


Obrázek 7.3 – Ukázka sekvence snímků

7.1.2. SEKVENCE SNÍMKŮ – KALIBRACE JASU

Pro určení skutečného jasů v závislosti na změně osvětlení byla pořízena sekvence snímků, při které se měnilo osvětlení testovacího obrazce. Rozestavení pracoviště bylo stejné jako v předešlé podkapitole Sekvence snímků – převodní charakteristika. Postupně se zvyšovalo osvětlení od úplné tmy do maximálního osvětlení, které šlo v zatemněném studiu vytvořit. Hodnoty osvětlení E byly od 0 lx do 4300 lx. Digitální fotoaparáty si automaticky nastavovaly hodnotu délku expozice k fixním hodnotám clony f/5.6 a ISO 100 v závislosti na určitém osvětlení. Celá sekvence byla nasnímána do JPEG a RAW formátu.

EXPOZIČNÍ ČAS:



Obrázek 7.4 – Ukázka sekvence snímků pro kalibraci jasů

7.2. URČENÍ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU

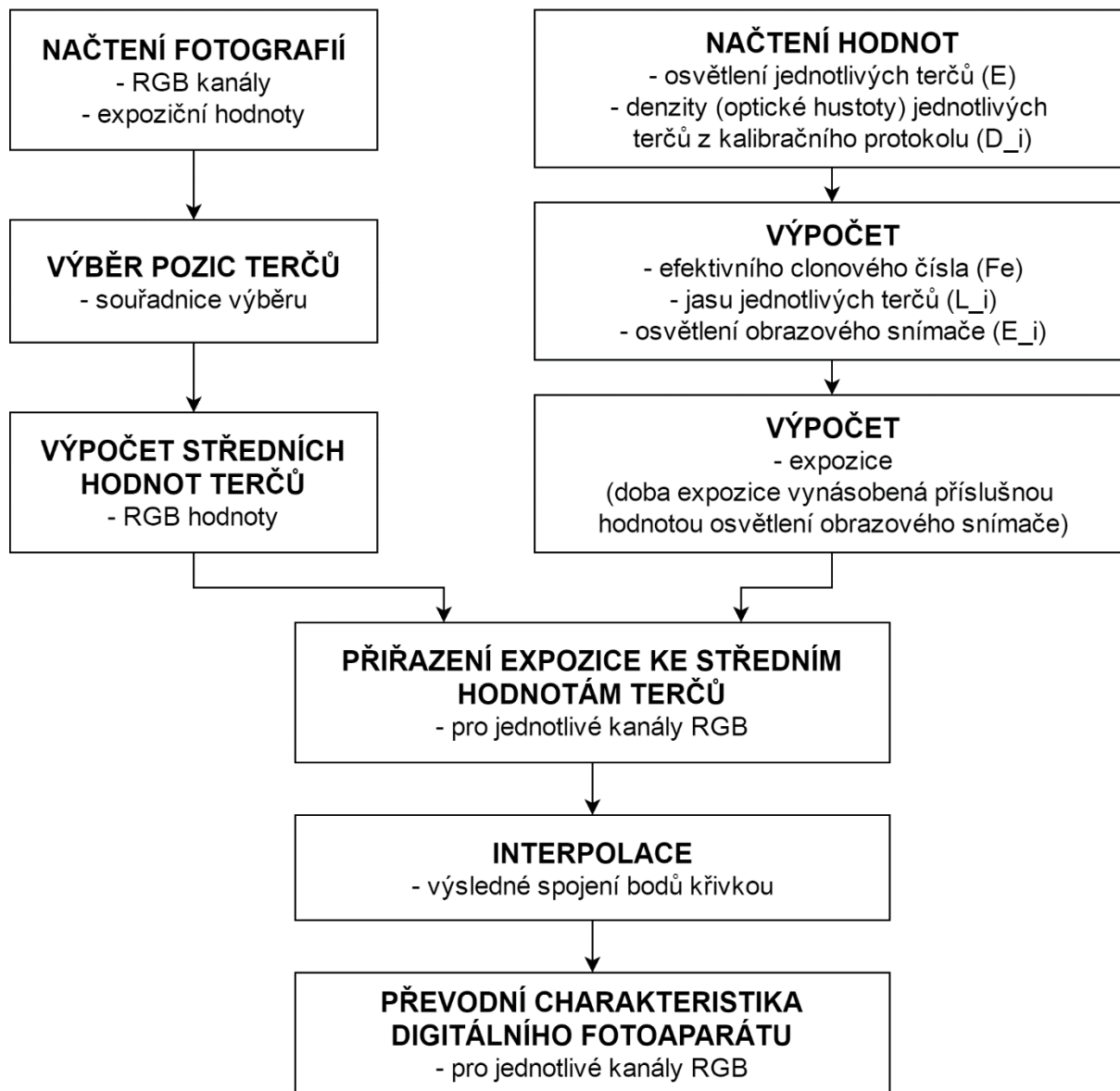
K určení převodní charakteristiky lze dojít subjektivní nebo objektivní cestou. Objektivní metoda musí splnit speciální podmínky (rovnoměrné osvětlení s vhodným spektrem) a mít potřebné vybavení jako je kalibrovaný testovací obrazec, luxmetr.

Naopak u subjektivní metody dle P. Debeveca a J. Malika je zapotřebí mít pouze libovolnou sekvenci snímků s různě nastavenou expozicí (například -1 EV, 0 EV, +1 EV).

Pro lepší srovnání výsledných charakteristik se využily stejné sekvence u obou metod.

7.2.1. OBJEKTIVNÍ METODA

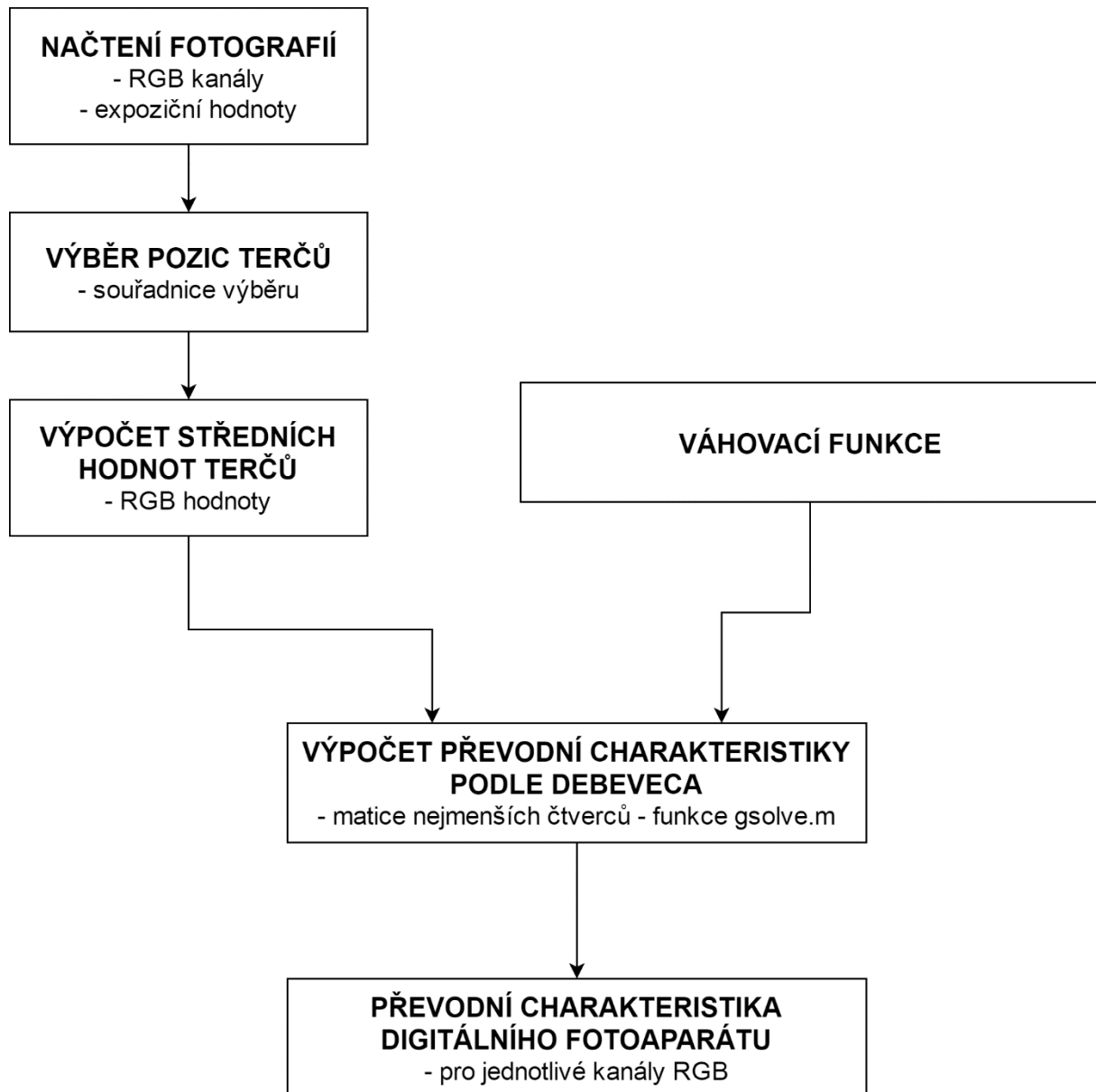
Objektivní metoda určení převodní charakteristiky byla implementována do programového prostředí MATLAB. Pro tuto metodu byla využita sekvence snímků, která je popsána v podkapitole 7.1.1. Na obrázku 7.5 je znázorněn postup výpočtu.



Obrázek 7.5 – Implementace výpočtu převodní charakteristiky objektivní metodou

7.2.2. METODA DEBEVEC A MALIK

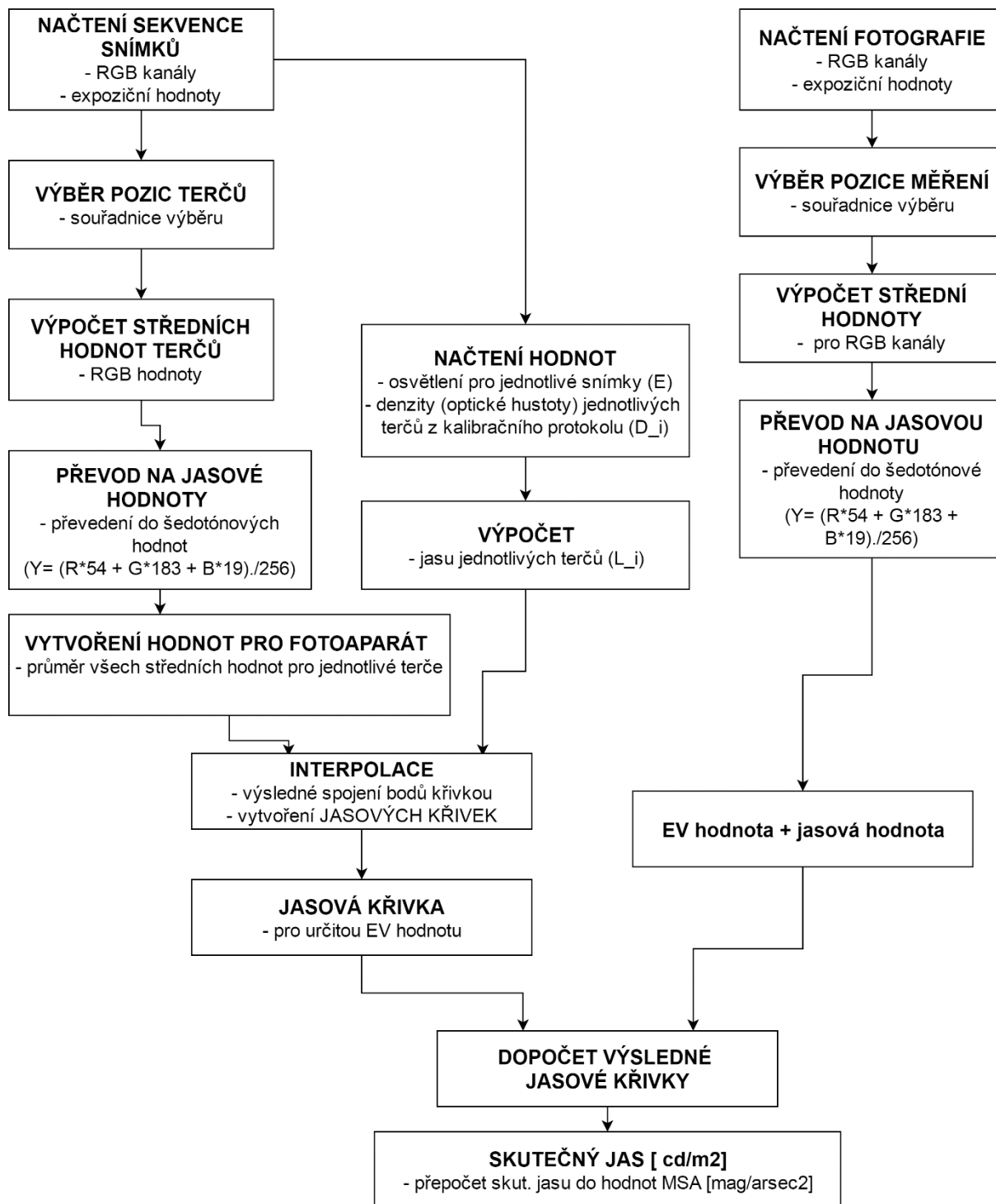
Metoda podle P. Debeveca a J. Malika, jak určit převodní charakteristiky, byla implementována do programového prostředí MATLAB. Pro tuto metodu byla využita stejná sekvence snímků, která je popsána v podkapitole 7.1.1. Postup výpočtu je vyobrazen na obrázku 7.6.



Obrázek 7.6 – Implementace výpočtu převodní charakteristiky subjektivní metodou

7.3. URČENÍ SKUTEČNÉHO JASU

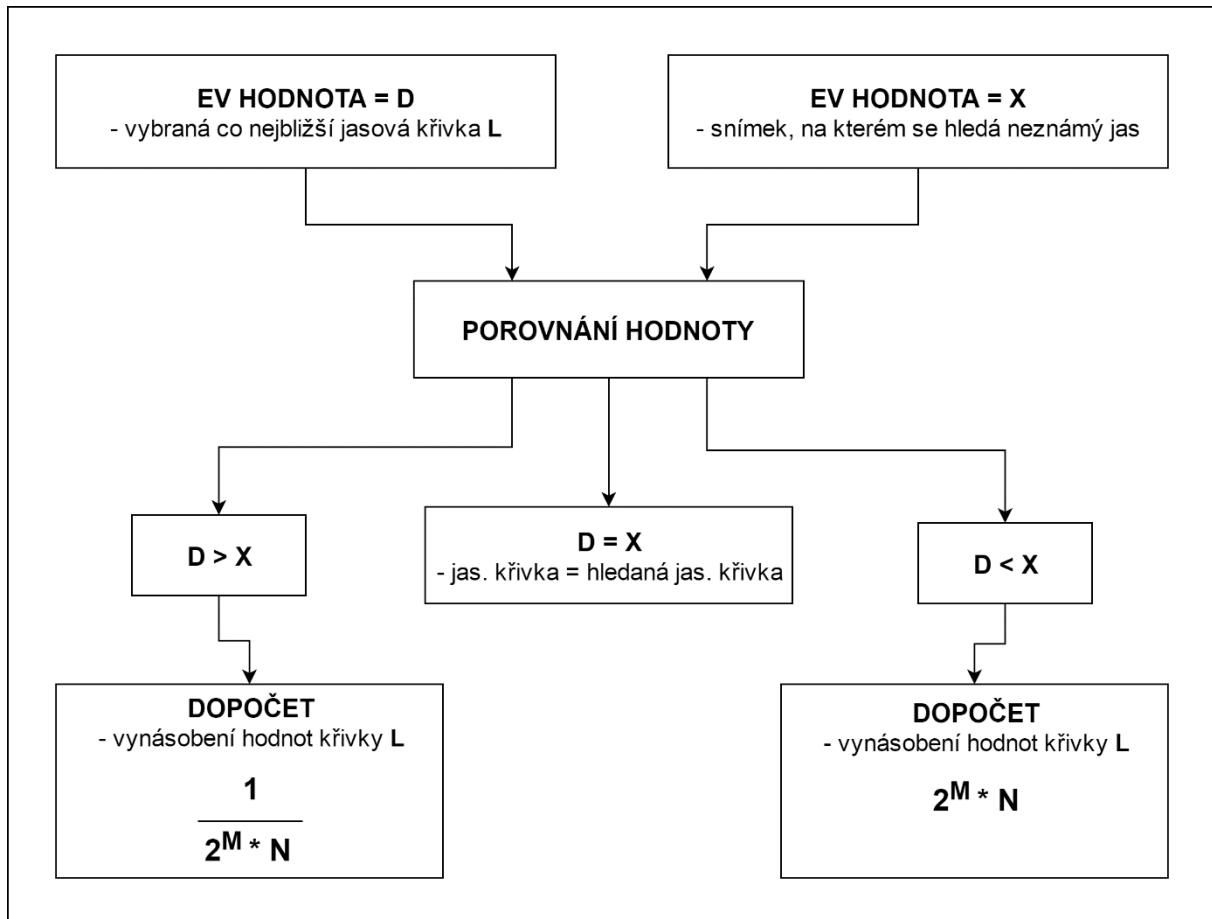
Z předchozích metod máme zkalibrované hodnoty vybraných fotoaparátů. Ale pro přesnější výsledky se pro určení skutečného jasů využila sekvence snímků s postupným zvyšování osvětlení (podkapitola 7.1.2), u kterých se stejným způsobem vytvořily kalibrační hodnoty pro jednotlivé expozice.



Obrázek 7.7 – Implementace výpočtu skutečného jasů z fotografie pro kalibrovaný fotoaparát

7.3.1. DOPOČET VÝSLEDNÉ JASOVÉ KŘIVKY

Tento blok je velice důležitý pro určení skutečné jasové křivky (popřípadě skutečné hodnoty jasů). Na obrázku 7.7 z předchozí podkapitoly je vidět, že blok *Dopočet výsledné jasové křivky* je závislý na určené kalibrační jasové křivce a na EV hodnotě fotografie, na které hledáme skutečný jas oblohy (světelné znečištění).



Obrázek 7.8 – Blok *Dopočet výsledné jasové křivky*

7.4. PŘÍSTROJ SPECTRASCAN® PR-740

Pro porovnání vypočtených hodnot jasu byl použit profesionální spektrometr SpectraScan® PR-740 od firmy Photo Research. Tento přístroj dokáže velmi přesně změřit skutečný jas – přesnost měření jasu je $\pm 2\%$, spektrální rozsah je 380 - 780 nm. Pomocí hledáčku se zamíří přístroj na měřenou plochu a provede se měření. [25]



Obrázek 7.9 – SpectraScan®

Tento přístroj sloužil jako reference k vypočteným hodnotám jasu a také následně pro přesnější kalibraci fotoaparátu Nikon D5100, kde se využily přesně změřené hodnoty jasu jednotlivých štítků testovaného obrazce. Tudíž se jas jednotlivých štítků nepočítal dle rovnice 5.1, ale rovnou se použily hodnoty změřené přístrojem SpectraScan®.



Obrázek 7.10 – Obraz v hledáčku přístroje (označení místa měření)

Pro srovnávací měření se využil výhled z fakultní učebny, ze kterého se zároveň provádělo měření jasu ploch pomocí přístroje SpectraScan a zaznamenání na fotoaparát. Ukázka dvou testovacích snímků je vidět na obrázku 7.11 a 7.12. Na těchto obrázcích je zvýrazněná část (žlutým čtvercem), která byla měřena. Výsledky tohoto měření jsou v následující kapitole 8.3.



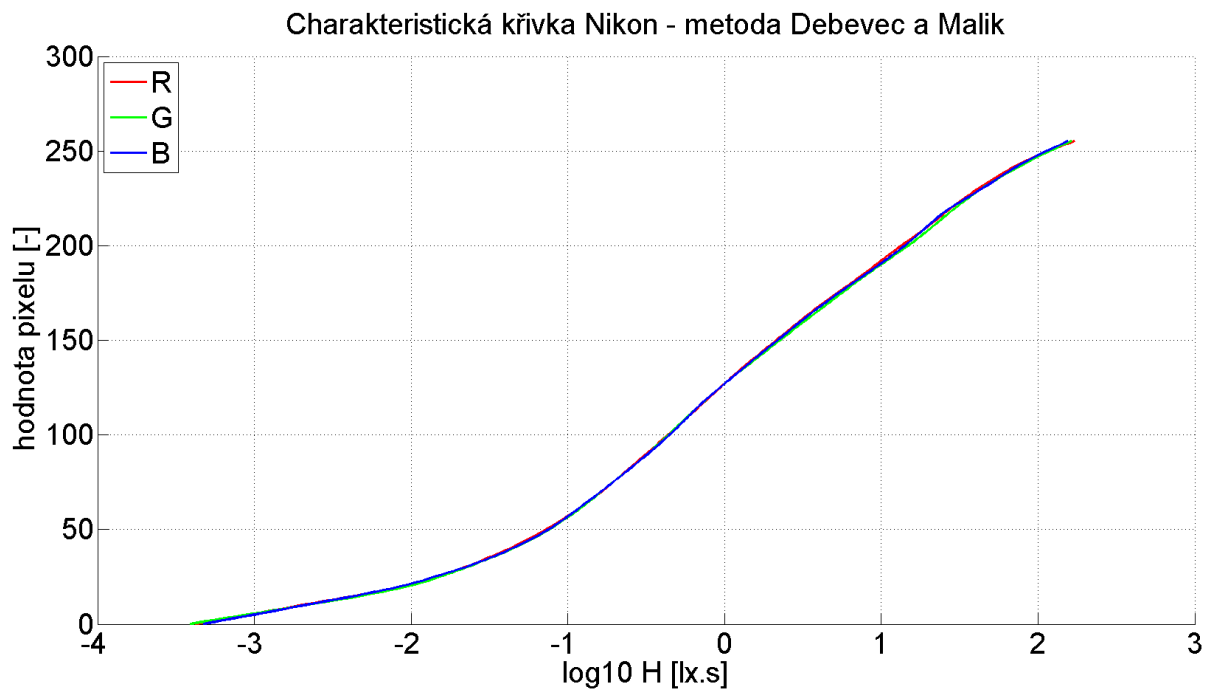
Obrázek 7.11 – Budova Fakulty elektrotechnické ČVUT



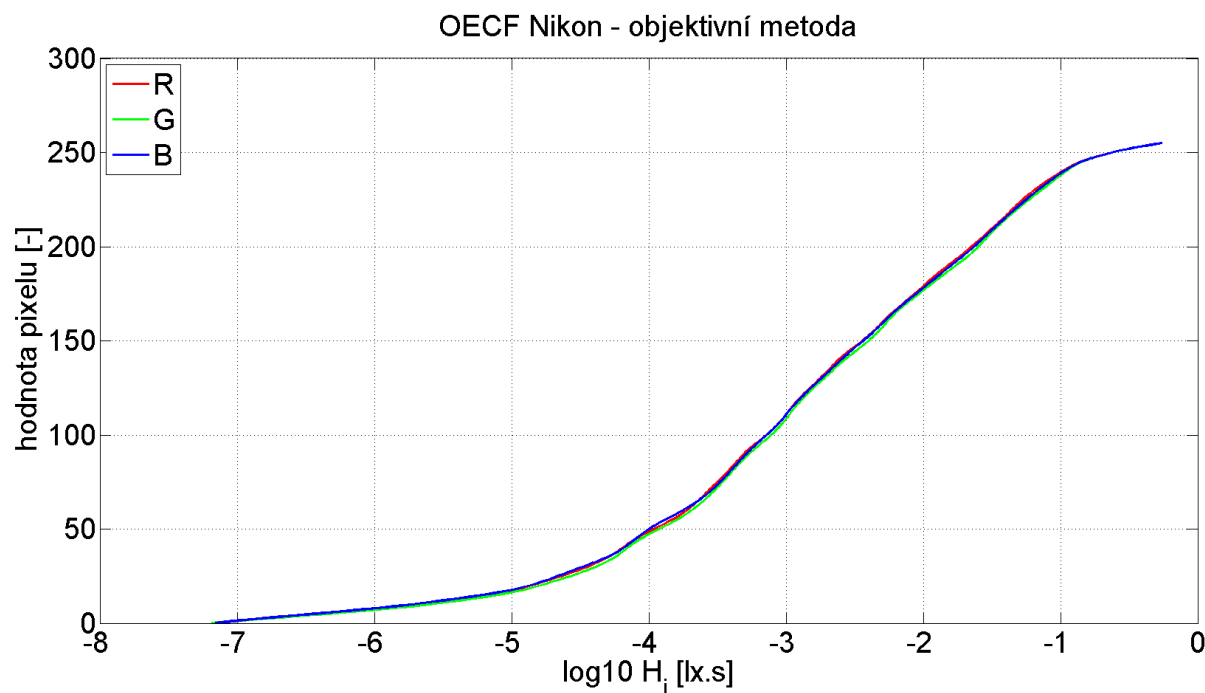
Obrázek 7.12 – Bok domu na Vítězném náměstí

8. VÝSLEDKY

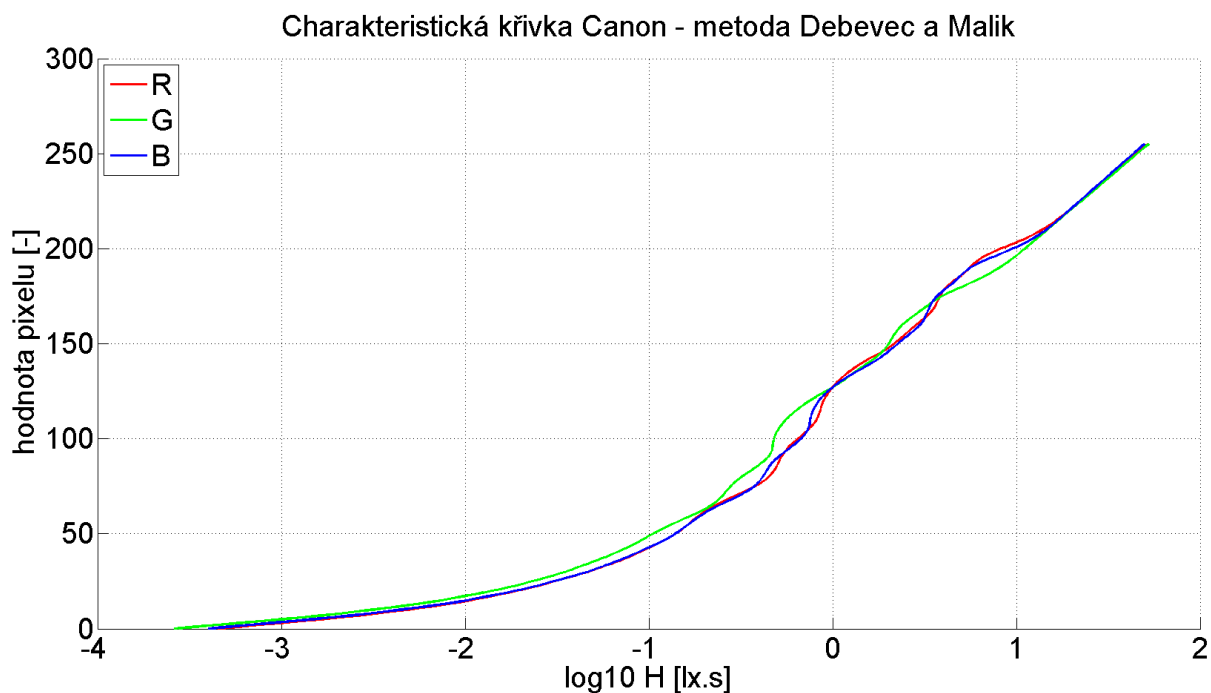
8.1. PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY



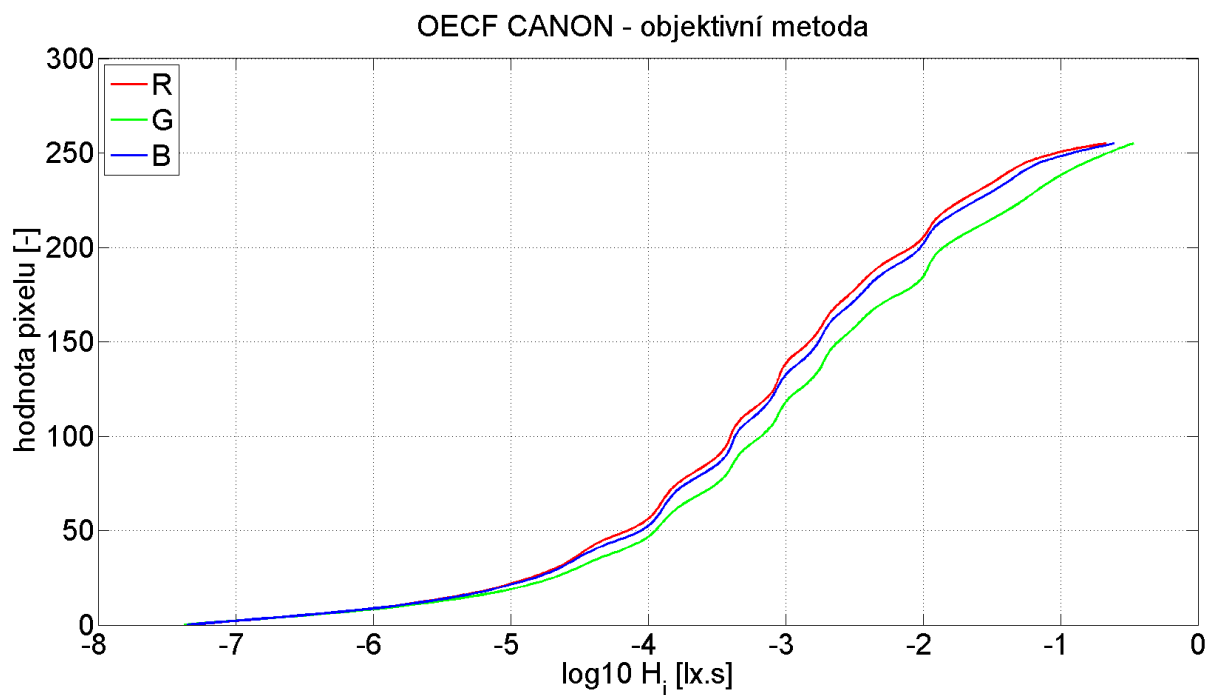
Obrázek 8.1 – Převodní charakteristika Nikonu D5100 (metoda Debeveca a Malika)



Obrázek 8.2 – Převodní charakteristika Nikonu D5100 (objektivní metodou)



Obrázek 8.3 – Převodní charakteristika Canonu 600D (metoda Debeveca a Malika)



Obrázek 8.4 – Převodní charakteristika Canonu 600D (objektivní metodou)

Převodní charakteristiky fotoaparátu Nikon D5100 a Canon 600D byly určeny ze sekvencí pěti snímků, které byly odstupňovány krokem 1EV. Když porovnáme obě charakteristiky (vytvořené subjektivní a objektivní metodou), lze vidět, že tvarově jsou velice podobné. Posun charakteristiky na ose x je dán tím, že v subjektivní metodě dle Debeveca a Malika je normován střed charakteristiky do nuly.

U charakteristik určené z fotoaparátu Canon 600D lze vidět mírné zvlnění, které může být způsobeno špatným nastavením vyvážením bílé na fotoaparátu.

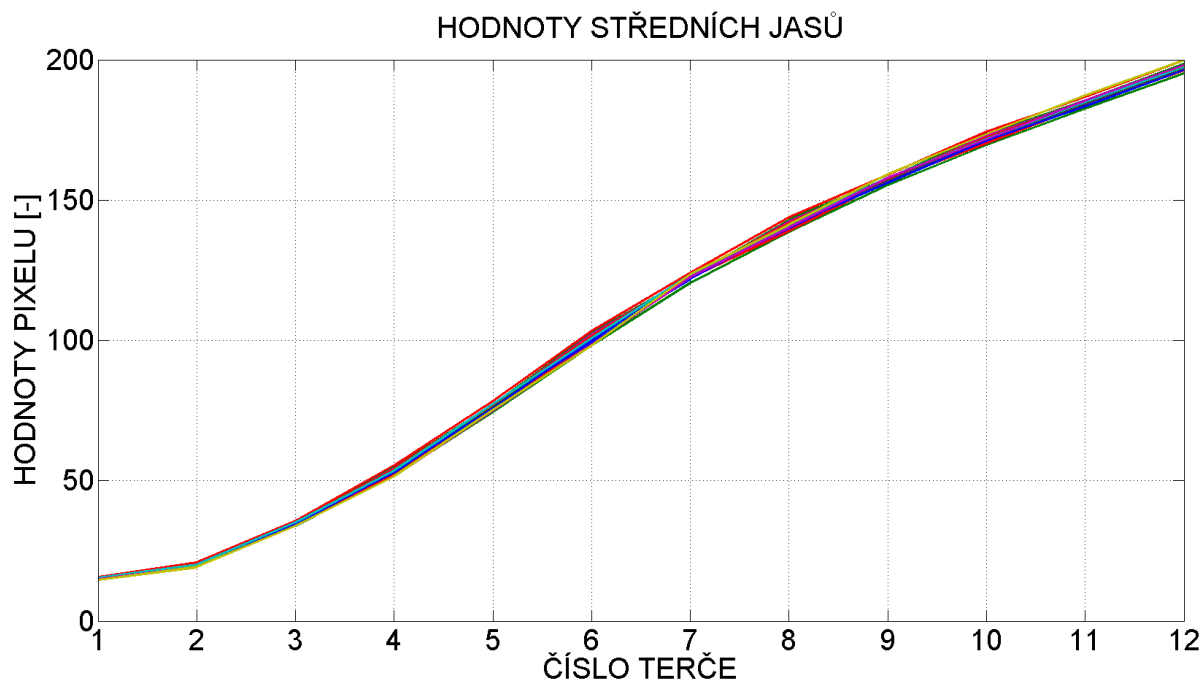
Odchytky charakteristik obou fotoaparátů mohou být způsobeny parazitními světly, chybou testovacího obrazce či chybou propustností objektivu.

8.2. KALIBRACE ALL-SKY MONITORU WILLIAM

Pro radiometrickou kalibraci obrazového systému bylo zapotřebí najít střední hodnoty jasů pro každý terč kalibrovaného obrazce. K tomu se použila sekvence dvaceti snímků s postupným zvyšováním osvětlení (viz podkapitola 7.1.2). Pro každý snímek se vypočítala střední jasová hodnota pro každý terč a ta se poté zprůměrovala z celé sekvence snímků. V tabulce 8.1 jsou uvedené výsledné kalibrační hodnoty jasů pro oba fotoaparáty.

JAS	TERČ	NIKON D5100	CANON 600D
		JASOVÉ HODNOTY [-]	
	1	15	15
	2	20	22
	3	35	40
	4	53	64
	5	77	94
	6	101	122
	7	123	151
	8	141	172
	9	157	192
	10	172	207
	11	185	220
	12	198	231

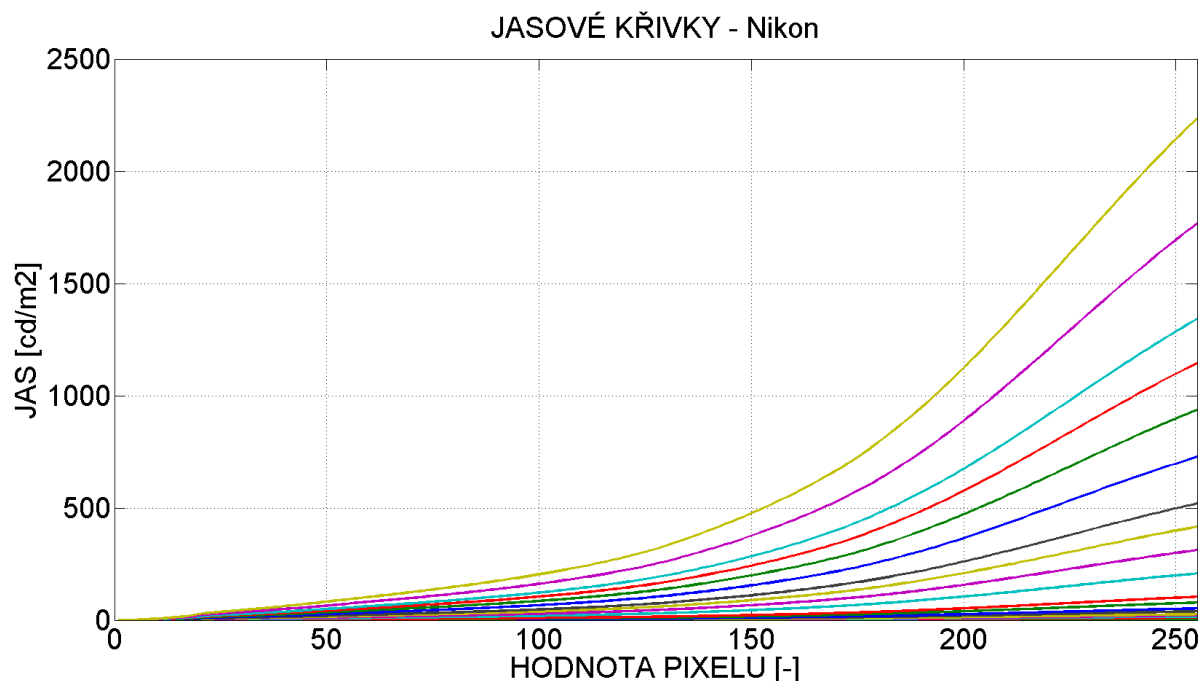
Tabulka 8.1 – Porovnání jasových hodnot fotoaparátů – kalibrační hodnoty



Obrázek 8.5 – Porovnání středních hodnot jasu pro všechny snímky (Nikon D5100)

Jak je vidět na obrázku 8.5, střední hodnoty jasu jsou velice podobné (pro dvacet snímků), a proto při průměrování těchto hodnot nastane minimální chyba.

Z kalibračních hodnot jasu se dále vytvořily jasové křivky, ze kterých se poté bude určovat skutečný jas oblohy. Na obrázku 8.6 jsou vyneseny jasové křivky – závislost hodnoty jasu na skutečném jasu udávan v kandelách na metr čtverečný.



Obrázek 8.6 – Jasové křivky pro každý snímek sekvence – pro každou EV hodnotu jedna křivka (Nikon D5100)

8.3. POROVNÁNÍ VYPOČTENÝCH HODNOT S PŘÍSTROJEM SPECTRASCAN®

Porovnání vypočtených hodnot s hodnotami, které byly změřeny pomocí přístroje SpectraScan®.

	NIKON D5100		
	SPECTRASCAN® [cd/m ²]	Vypočtený jas [cd/m ²]	Rozdíl vypočtených hodnot od naměřených [-]
Tráva	1124	956,34	17,53%
Bok domu	1464	1254,53	16,70%
FEL	218,1	201,06	8,48%

Tabulka 8.2 – Porovnání vypočteného jasu s hodnotou naměřenou spektrometrem

V tabulce 8.2 je zřejmé, že vychází celkem velké rozdíly vypočtených hodnot od naměřených hodnot. Tato velká odchylka byla dána nepřesným výpočtem skutečného jasu jednotlivých štítků testovacího obrazce (dle rovnice 5.1). A proto se použily pro následující měření přesně naměřené hodnoty jednotlivých štítků pomocí spektrometru.

	NIKON D5100		
	SPECTRASCAN® [cd/m ²]	Vypočtený jas [cd/m ²]	Rozdíl vypočtených hodnot od naměřených [-]
Tráva	1124	1084,00	3,69%
Bok domu	1464	1460,80	0,22%
FEL	218,1	225,73	-3,38%

Tabulka 8.3 – Porovnání vypočteného jasu s hodnotou naměřenou spektrometrem po úpravě kalibrace

Z této tabulky 8.3 je evidentní, že rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami jsou tak malé, že **radiometrická kalibrace fotoaparátu proběhla správně**. Odchytky mohou být způsobeny změnou osvětlení během pořízení materiálu (například slunce mohlo vyjít zpoza mraků), nesprávným zaokrouhlením hodnot při výpočtu, nebo nepřesností měřicího přístroje. Další odchylku mohlo zapříčinit špatný výběr části obrazu, která byla měřena spektrometrem.

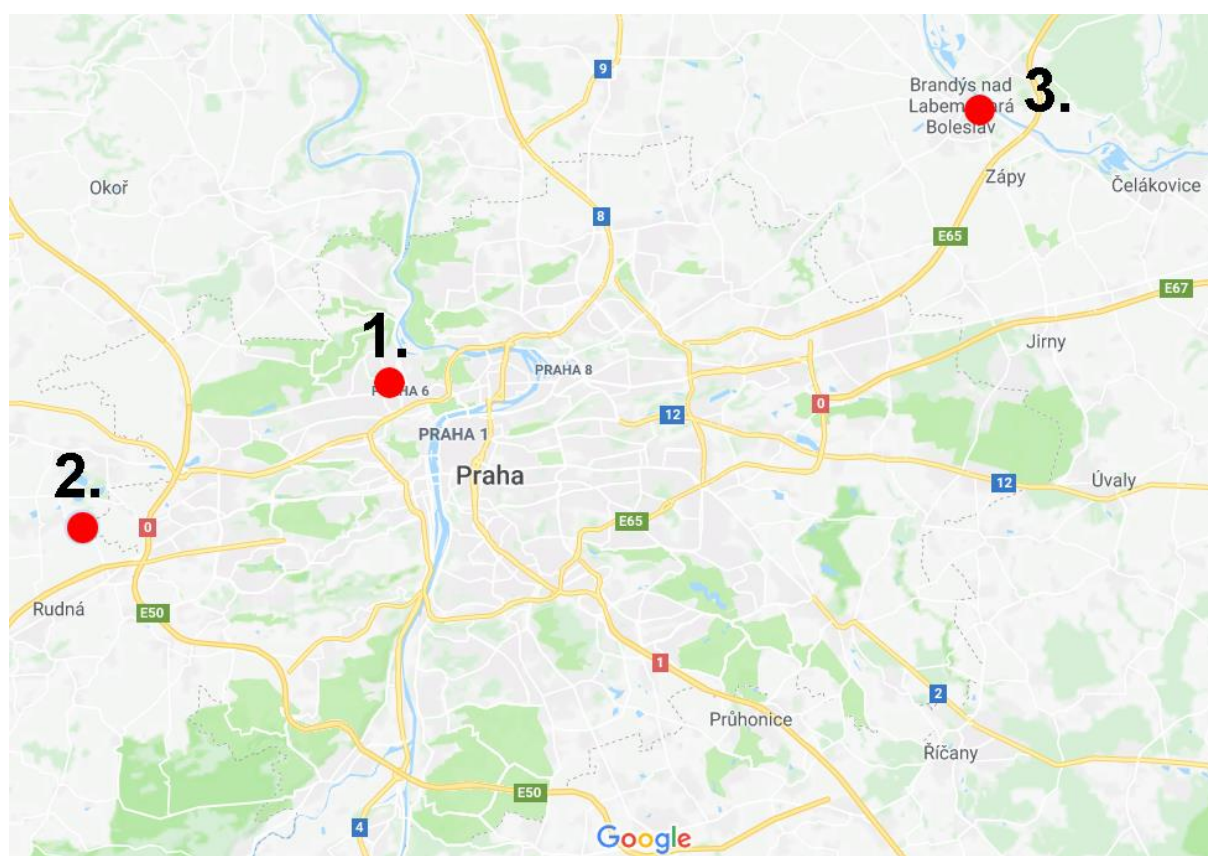
8.4. MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ

Kalibrovaný obrazový systém využijeme pro měření světelného znečištění.

8.4.1. SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ PRAHA A OKOLÍ X NOVÝ ZÉLAND

V této části jsou výsledky měření světelného znečištění (jasu oblohy) na různých místech na Zemi. Porovnáme zde světelné znečištění v Praze a okolí se světelným znečištěním, které se vyskytuje na Novém Zélandu.

Pro Prahu se použila fotografie z monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM (tudiž z fotoaparátu Nikon D5100) a pro okolí Prahy se zaznamenala obloha na referenční fotoaparát Canon 600D. Místa fotografování noční oblohy jsou znázorněna na obrázku 8.7.

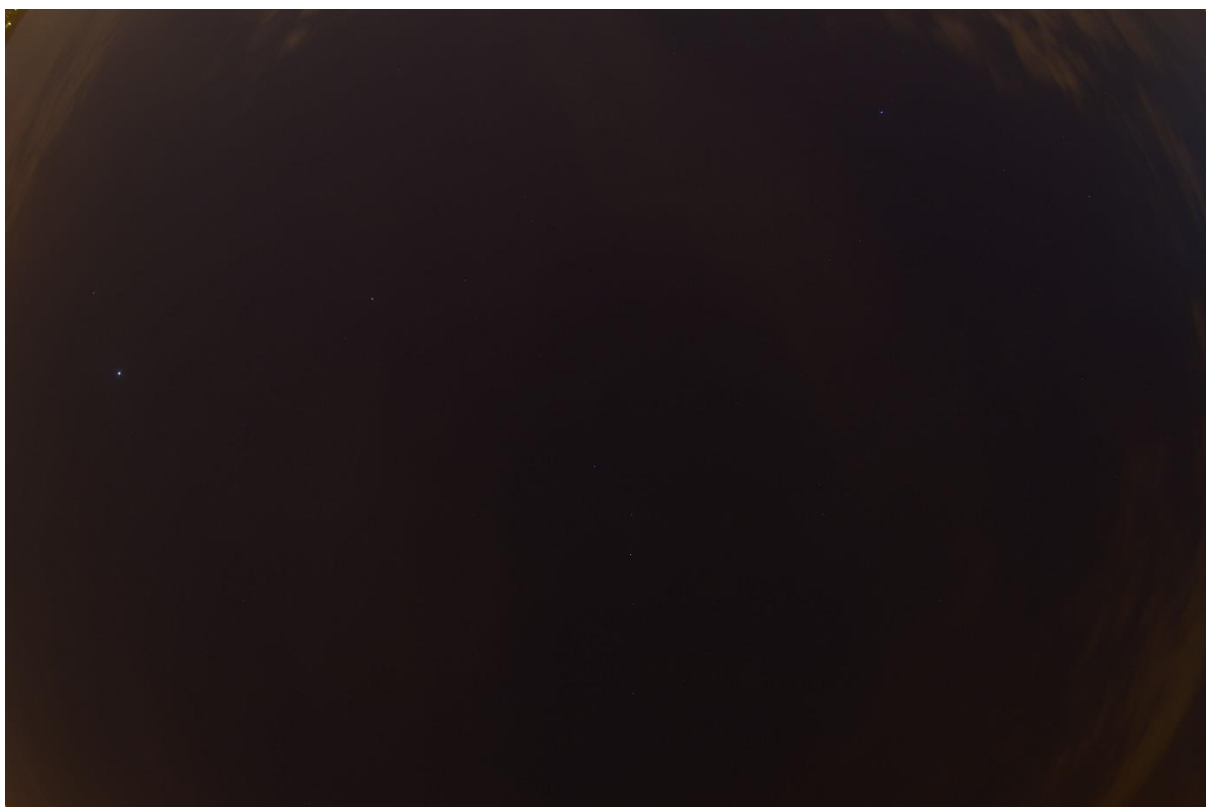


Obrázek 8.7 – Mapa míst, kde byla zaznamenána noční obloha (<https://maps.google.com/>)

Fotografie noční oblohy z Nového Zélandu byla pořízena na fotoaparát Canon 700D, který má stejné technické parametry (snímač, objektiv atd.) jako má referenční Canon 600D, a proto tyto fotoaparáty považujeme za srovnatelné. To znamená, že pro Canon 700D byla použita stejná radiometrická kalibrace jako pro Canon 600D. Fotografie noční oblohy z Nového Zélandu byla pořízena z místa, které lze vidět na obrázku 8.8.



Obrázek 8.8 – Místo pořízení fotografie na Novém Zélandu (<https://maps.google.com/>)



Obrázek 8.9 – Ukázka fotografie noční oblohy z monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM na střeše Fakulty elektrotechnické ČVUT (místo č. 1.)

Další fotografie noční oblohy z jednotlivých míst naleznete v příloze B.

MÍSTO	JAS OBLOHY [cd/m ²]	JAS OBLOHY [mag/arcsec ²]
1. Praha 6 - Dejvice	0,00662	18,03
2. Chýně	0,00346	18,74
3. Brandýs nad Labem	0,01406	17,21
4. Nový Zéland	0,00071	20,46

Tabulka 8.4 – Měření jasů oblohy na různých místech

Výsledky měření jasů noční oblohy vidíte v tabulce 8.4. Snímky byly zachyceny v odlišné roční době, čímž může být způsobena menší odchylka. Fotografie noční oblohy v Brandýse nad Labem byla pořízena v centru města u pouličního osvětlení, a proto nejspíš vyšel jas oblohy vyšší. Oproti fotografii z Nového Zélandu, kde je dle měření nejmenší světelné znečištění.

Při porovnání výsledků z Prahy 6 a z Chýně lze vidět, že čím dál se snímá noční obloha od středu města, tím je výsledný jas menší.

8.5. MONITOROVÁNÍ NOČNÍ OBLOHY V PRAZE

Pro vyhodnocení jasů noční oblohy v Praze se využila data z kalibrovaného obrazového systému WILLIAM (viz místo č. 1). Byly vybrány dva dny, kdy byla čistá obloha (bez mraků).

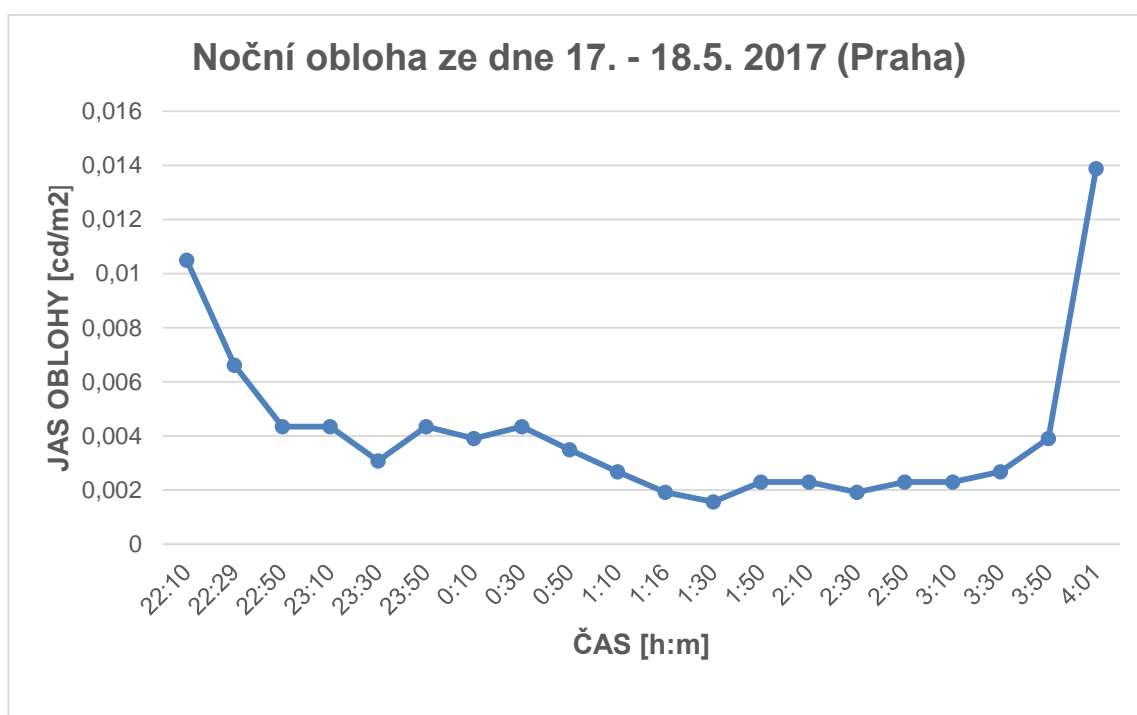
22:10	22:29	22:50	23:10
23:30	23:50	0:10	0:30
0:50	1:10	1:16	1:30
1:50	2:10	2:30	2:50
3:10	3:30	3:50	4:01

Obrázek 8.10 – Noční obloha ze 17. – 18. 5. 2017 nad budovou ČVUT (s časem pořízení)

Datum: 17.5. - 18.5. 2017		
ČAS	JAS OBLOHY [cd/m ²]	JAS OBLOHY [mag/arsec ²]
22:10	0,01050	17,53
22:29	0,00662	18,03
22:50	0,00434	18,49
23:10	0,00434	18,49
23:30	0,00307	18,86
23:50	0,00434	18,49
0:10	0,00391	18,60
0:30	0,00434	18,49
0:50	0,00349	18,73
1:10	0,00268	19,01
1:16	0,00192	19,38
1:30	0,00156	19,60
1:50	0,00229	19,18
2:10	0,00229	19,18
2:30	0,00192	19,38
2:50	0,00229	19,18
3:10	0,00229	19,18
3:30	0,00268	19,01
3:50	0,00391	18,60
4:01	0,01389	17,23

Slunce:
západ 20:42
východ 5:13

Tabulka 8.5 – Výsledky měření jasu noční oblohy nad budovou ČVUT



Obrázek 8.11 – Graf průběhu jasu noční oblohy

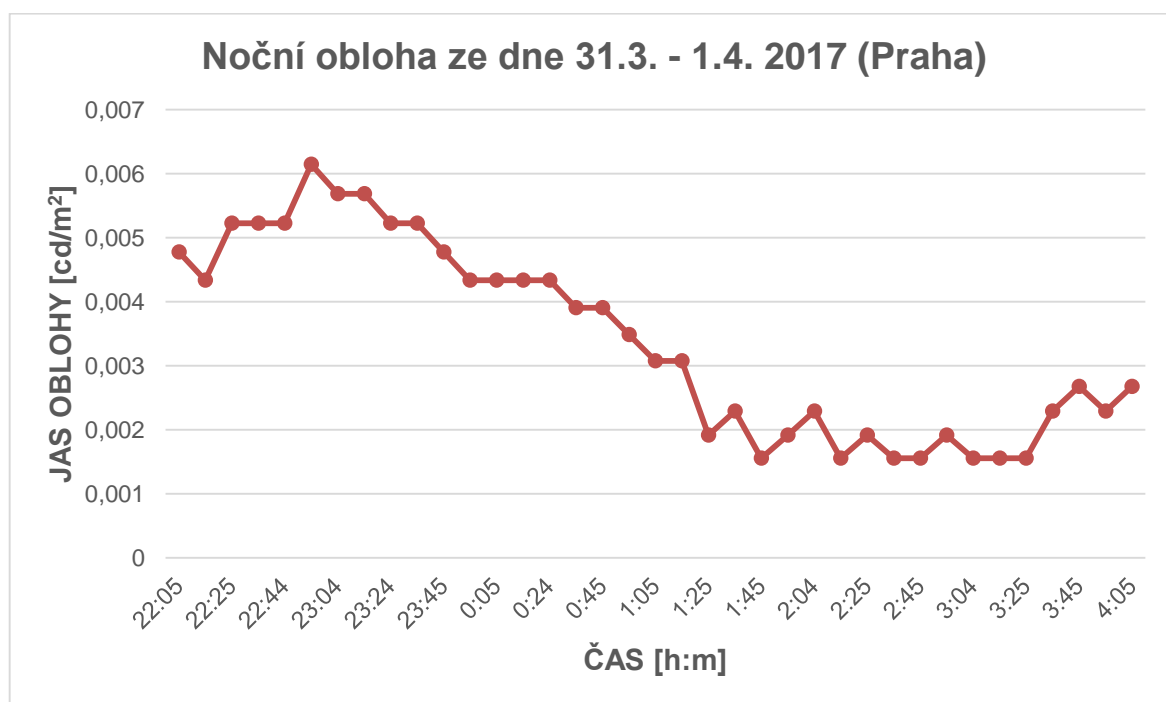
Datum: 31. 3. - 1. 4. 2017

ČAS	JAS OBLOHY [cd/m ²]	JAS OBLOHY [mag/arsec ²]
22:05	0,00478	18,39
22:14	0,00434	18,49
22:25	0,00523	18,29
22:35	0,00523	18,29
22:44	0,00523	18,29
22:54	0,00615	18,11
23:04	0,00568	18,20
23:14	0,00568	18,20
23:24	0,00523	18,29
23:35	0,00523	18,29
23:45	0,00478	18,39
23:55	0,00434	18,49
0:05	0,00434	18,49
0:15	0,00434	18,49
0:24	0,00434	18,49
0:35	0,00391	18,60
0:45	0,00391	18,60
0:55	0,00349	18,73
1:05	0,00307	18,86
1:15	0,00307	18,86
1:25	0,00192	19,38

ČAS	JAS OBLOHY [cd/m ²]	JAS OBLOHY [mag/arsec ²]
1:35	0,00229	19,18
1:45	0,00156	19,60
2:00	0,00192	19,38
2:04	0,00229	19,18
2:15	0,00156	19,60
2:25	0,00192	19,38
2:35	0,00156	19,60
2:45	0,00156	19,60
2:55	0,00192	19,38
3:04	0,00156	19,60
3:15	0,00156	19,60
3:25	0,00156	19,60
3:35	0,00229	19,18
3:45	0,00268	19,01
3:55	0,00229	19,18
4:05	0,00268	19,01

Slunce:
západ 19:30
východ 6:42

Tabulka 8.6 – Výsledky měření jasu noční oblohy nad budovou ČVUT (31. 3. – 1. 4. 2017)



Obrázek 8.12 – Graf průběhu jasu noční oblohy

Měření jasů probíhalo v zenitu oblohy, tudíž se na fotografii vybrala střední čtvercová plocha, ze které se vypočítal aritmetický průměr z hodnot pixelů a následně se dle převodní charakteristiky určil skutečný jas.

Při porovnání výsledků je patrné, že jas noční oblohy lehce klesá po půlnoci a dále po jedné hodině ráno. To je evidentně zapříčiněno tím, že se po půlnoci jak kvůli světelnému znečištění, tak kvůli snížení spotřeby elektrické energie zhasíná architektonické osvětlení významných budov (například osvětlení Pražského hradu se vypíná v jednu hodinu ráno).

[28]

9. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit fungující metodu radiometrické kalibrace monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM a tuto metodu implementovat v programovém prostředí MATLAB. Dalším cílem bylo využití kalibrovaného obrazového systému při měření světelného znečištění.

Na začátku práce jsem se zabýval různými metodami určení převodní charakteristiky obrazového systému, která je základním prvkem pro vytvoření HDR obrazu. Dvě z metod (objektivní metodu a metodu Debeveca a Malika) jsem otestoval na dvou konvenčních digitálních fotoaparátech. Na fotoaparátu Nikon D5100, který je součástí obrazového systému WILLIAM, a na fotoaparátu Canon 600D.

Pro radiometrickou kalibraci byla použita převodní charakteristika určená objektivní metodou, díky které se získaly kalibrační hodnoty pro oba fotoaparáty. Ty se určily pomocí sekvence dvaceti snímků s postupným zvyšováním osvětlení.

V následující části práce jsem porovnával vypočtené hodnoty s hodnotami naměřenými pomocí spektrometru SpectraScan® PR-740. Mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami vycházely velké rozdíly. Proto jsem spektrometr použil při počátečním kroku kalibrace k přesnějšímu určení jasů jednotlivých štítků testovacího obrazce. Tento krok napomohl ke zpřesnění radiometrické kalibrace obrazového systému.

Kalibrovaný obrazový systém se následně využil k měření světelného znečištění. Nejprve jsem porovnával jas noční oblohy v Praze a okolí s noční oblohou na Novém Zélandu. Jas noční oblohy na Novém Zélandu vyšel přibližně o jeden řád menší, tudíž je možné konstatovat, že míra světelného znečištění je tam podstatně nižší.

Dále jsem kalibrovaný obrazový systém využil k určení jasů noční oblohy nad budovou ČVUT v průběhu dvou bezmračných večerů. Pro měření se využila data z kalibrovaného obrazového systému WILLIAM. Při porovnání obou křivek jasů je zřejmé, že po půlnoci jas oblohy začal lehce klesat a nejvíce se snížil po jedné hodině ranní. To je evidentně zapříčiněno tím, že se po půlnoci jak kvůli světelnému znečištění, tak kvůli snížení spotřeby elektrické energie zhasíná architektonické osvětlení významných budov.

Závěrem je možné také konstatovat, že po radiometrické kalibraci lze využít kterýkoli konvenční digitální fotoaparát k celkem přesnému měření skutečného jasů bez použití drahých měřících přístrojů.

Dalším námětem by mohlo být provedení radiometrické kalibrace pomocí šestnáctibitových snímků, které jsem ve své práci nemohl použít kvůli velké výpočetní náročnosti. Podstatně by se tím však zvýšil rozsah hodnot jasů. A to proto, že osmibitové snímky mají rozsah

hodnot [0-255] na rozdíl od šestnáctibitových snímků, které mají rozsah hodnot [0-65535]. Mělo by se tím dojít k lepší radiometrické kalibraci, a tudíž i k přesnějším výsledkům měření skutečného jasů na snímku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ INFORMACÍ:

[1] REINHARD, Erik. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting. 2nd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, c2010, xviii, 650 s. ISBN 978-0-12-374914-7.

[2] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA Martin. Radiometrické veličiny. Encyklopedie fyziky. [online]. 2006 – 2016 [cit. 2016-12-29].

Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>

[3] DAVIS, Harold. Expozice a světlo v digitální fotografii. Brno: Computer Press, 2008. Edice digitální fotografie. ISBN 978-80-251-2208-2.

[4] Ing. Roman Pihan. POROZUMĚNÍ SPRÁVNÉ EXPOZICI. FotoRoman: Fotografie a fototechniky. [online]. 2013 [cit. 2016-12-04].

Dostupné z: http://fotoroman.cz/tech1/exposure_basic.htm

[5] Ing. Roman Pihan. VŠE O SVĚTLE - 14. EV JEDNOTKY. FotoRoman: Fotografie a fototechniky. [online]. 2013 [cit. 2016-12-10].

Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo14ev.htm>

[6] Ing. Roman Pihan. POROZUMĚNÍ SPRÁVNÉ EXPOZICI. FotoRoman: Fotografie a fototechniky. [online]. 2013 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z:

http://fotoroman.cz/tech1/exposure_basic.htm

[7] FUČÍK, Karel. Dynamický rozsah digitálních fotoaparátů. Karf.cz: Landscape photography. [online]. 29. 5. 2008 [cit. 2016-12-04].

Dostupné z: <http://www.karf.cz/dynamicky-rozsah-digitalnich-fotoaparatu/>

[8] Ing. Roman Pihan. DYNAMICKÝ ROZSAH (KONTRAST) SCÉNY. FotoRoman: Fotografie a fototechniky. [online]. 2013 [cit. 2016-12-04].

Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/tech1/exposure_contrast.htm

[9] FREEMAN, Michael. Základy HDR: fotografie a vysoký dynamický rozsah. 1. vyd. Brno: Zoner Press, 2008, 160 s. Encyklopedie - grafika a fotografie. ISBN 978-80-86815-95-4.

[10] MACENAUER, Andrej. TECHNOLOGIE SUPER CCD SR. FotoAparát.cz: rádce fotografa. [online]. 18.02.2003 [cit. 2016-12-28].

Dostupné z: <https://www.fotoaparar.cz/clanek/76/technologie-super-ccd-sr-2183/>

[11] Převodní charakteristika digitálního fotoaparátu. Návod ke cvičení z předmětu Multimediální technika a televize. ČVUT. 2008.

[12] ASLA M. Sa, Paulo Cezar CARVALHO, Luiz VELHO, High Dynamic Range Image Reconstruction. 2007. ISBN: 1598295624

- [13] MANN, S., a PICARD, R. W. On being 'undigital' with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In Proceedings of IS&T's 48th Annual Conference (1995), pp. 442–448.
- [14] DEBEVEC, P. E. a J. MALIK. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In ACM SIGGRAPH, pages 369–378, 1997.
- [15] MITSUNAGA, T. a S. NAYAR, "Radiometric Self Calibration," IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (June 1999), Vol. 1, pp. 374–380.
- [16] ROBERTSON, M., S. BORMAN a R. STEVENSON, "Dynamic Range Improvement Through Multiple Exposures," Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing (Kobe, Japan, October 1999), Vol. 3, IEEE, pp. 159–163.
- [17] GROSSBERG, M. a S. NAYAR. What is the space of camera response functions? In IEEE CVPR, pages 602–9, 2003
- [17b] GROSSBERG, M. a S. NAYAR. Determining the Camera Response from Images: What is Knowable?, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 11, pp. 1455-1467, Nov. 2003.
- [18] ČERMÁK, Ondřej. Pokročilé metody zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Diplomová práce. ČVUT – Fakulta elektrotechnická. Leden, 2013.
- [19] OmniVision. OV10620 HDR product brief. OmniVision: <http://www.ovt.com/>. [online]. 29.12.2016 [cit. 2016-12-29].
Dostupné z: [http://www.ovt.com/uploads/parts/OV10620_PB_auto%20\(1.4\)_web.pdf](http://www.ovt.com/uploads/parts/OV10620_PB_auto%20(1.4)_web.pdf)
- [20] Světelné znečištění v kostce. Světelné znečištění. [online]. 29.12.2016 [cit. 2016-12-29].
Dostupné z: <http://svetelneznecisteni.cz/co-je-svetelne-znecisteni/svetelne-znecisteni-v-kostce/#LyXCite-unesco>
- [21] BORTLEOVA STUPNICE | Světelné znečištění. Světelné znečištění [online]. Copyright © 2017 Svetelneznecisteni.cz [cit. 10.05.2017].
Dostupné z: <http://svetelneznecisteni.cz/mapovani-tmy/bortleova-stupnice/>
- [22] BORTLE, John E. Gauging Light Pollution: The Bortle Dark-Sky Scale. Sky & Telescope | Astronomy News, Tools & Resources [online]. Copyright © [cit. 10.05.2017].
Dostupné z: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/light-pollution-and-astronomy-the-bortle-dark-sky-scale/>. 2006.
- [23] UNIHEDRON. Sky Quality Meter – L. <http://www.unihedron.com/>. [online]. 30.12.2016 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://unihedron.com/projects/darksky/cd/SQM-LE/SQM-LE_Users_manual.pdf

- [24] GEORG ZOTTI. Measuring Light Pollution with a Calibrated High Dynamic Range All-Sky Image Acquisition System. TU Wien: Institute of Computer Graphics and Algorithms Vienna University of Technology. [online]. October, 2007 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2007/zotti-2007-hdr/>
- [25] PR-740 / PR-745 SpectraScan Spectroradiometer | Photo Research Inc.. Home | Photo Research Inc. [online]. Copyright © Copyrights 2016 Photo Research, Inc. [cit. 02.11.2017]. Dostupné z: <http://www.photoresearch.com/content/spectrascan%C2%AEspectroradiometer-0>
- [26] VÍT, Vladimír. Televizní technika: Přenosové barevné soustavy. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 9788086056043.
- [27] Mezinárodní standard ISO, ISO 14524:1999(E) Photography - Electronic still-picture cameras – Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs).
- [28] Světelné znečištění a plýtvání elektrickou energií – Světelné znečištění. Světelné znečištění – sviťme s rozumem [online]. Copyright © SvetelneZnecisteneni.cz [cit. 06.12.2017]. Dostupné z: <http://svetelneznecisteneni.cz/co-je-svetelne-znecisteneni/plytvani-elektrickou-energi/>
- [29] KUŽELKA, Karel. Průzkum možností a tvorba HDR (HIGH DYNAMIC RANGE) snímků. Diplomová práce. ČVUT – Fakulta stavební. Leden, 2012.
- [30] FLANDERS, Tony. Measuring Skyglow - Sky & Telescope. Astronomy News, Tools & Resources [online]. Copyright © [cit. 30.12.2017]. Dostupné z: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-blogs/measuring-skyglow/>
- [31] HORÁLEK, Petr. Studium jasu oblohy. Bakalářská práce. Masarykova univerzita – Přírodovědecká fakulta. Brno, 2010.

SEZNAM TABULEK:

TABULKA 2.1 – VZTAHY RADIOMETRICKÝCH A FOTOMETRICKÝCH VELIČIN (VLASTNÍ)	11
TABULKA 3.1 – EXPOZIČNÍ ČASY [S] (KROK 1 EV)	12
TABULKA 3.2 – CLONOVÁ ŘADA (KROK 1 EV)	13
TABULKA 3.3 – HODNOTY EV PRO RŮZNÉ NASTAVENÍ EXPOZICE	14
TABULKA 4.1 - DYNAMICKÝ ROZSAH ZDROJŮ SVĚTLA A ZAŘÍZENÍ (FREEMAN).....	16
TABULKA 4.2 – DYNAMICKÝ ROZSAH (FREEMAN)	17
TABULKA 4.3 – DYNAMICKÝ ROZSAH MONITORŮ A PAPÍRU (FREEMAN)	18
TABULKA 6.1 – BORTLEOVA STUPNICE – UKÁZKA	36
TABULKA 8.1 – POROVNÁNÍ JASOVÝCH HODNOT FOTOAPARÁTŮ – KALIBRAČNÍ HODNOTY	49
TABULKA 8.2 – POROVNÁNÍ VYPOČTENÉHO JASU S HODNOTOU NAMĚŘENOU SPEKTORADIOMETREM.....	51
TABULKA 8.3 – POROVNÁNÍ VYPOČTENÉHO JASU S HODNOTOU NAMĚŘENOU SPEKTORADIOMETREM PO ÚPRAVĚ KALIBRACE	51
TABULKA 8.4 – MĚŘENÍ JASU OBLOHY NA RŮZNÝCH MÍSTECH.....	54

SEZNAM OBRÁZKŮ:

OBRÁZEK 2.1 – SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST LIDSKÉHO OKA (FOTOPICKÉ A SKOTOPICKÉ VIDĚNÍ)	9
(zdroj: Ing. Petr Žák, Ph.D.. ZÁKLADNÍ FOTOMETRICKÉ VELIČINY – přednáška (ČVUT-FEL). Energy Consulting Service, s.r.o.. [online]. 2013 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: http://www.ecservice.cz/seminarvo1/Prednaska-2_ZakladniFotometrickeVeliciny_Zak.pdf)	
OBRÁZEK 3.1 – CLONA.....	12
(zdroj: http://messphoto.weebly.com/APERTURE.HTML)	
OBRÁZEK 3.2 – UKÁZKA PODEXPOZICE A PŘEEXPOZICE – UPROSTŘED JE SPRÁVNĚ EXPONOVANÝ SNÍMEK.....	15
OBRÁZEK 4.1 – SVĚTLOCITLIVÉ FOTODIODY SENZORU FUJIFILM SUPER CCD SR	17
(zdroj: vlastní + https://www.dpreview.com/reviews/fujifilms5pro)	
OBRÁZEK 5.1 – USPOŘÁDÁNÍ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ OECF.....	21
OBRÁZEK 5.2 – TESTOVACÍ OBRAZEC ISO PRO MĚŘENÍ OECF DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU.....	21
OBRÁZEK 5.3 – KŘIVKA ODEZVY.....	24
OBRÁZEK 5.4 – VÁHOVACÍ FUNKCE ΣM	29
OBRÁZEK 5.5 – METODA GROSSBERGA A NAYARA – (FOTOGRAFIE S RŮZNOU EXPOZICÍ (EXPOZIČNÍ KROKY), ZE KTERÝCH SE ZJISTÍ MAPOVACÍ FUNKCE INTENZITY, POTÉ UŽ BUDEME ZNÁT ODEZVOVOU FUNKCI FOTOAPARÁTU).....	31
(zdroj: [17b])	
OBRÁZEK 5.6 – VÝVOJOVÝ DIAGRAM JASU	31
OBRÁZEK 5.7 – A) NALEZENÍ MAPOVACÍ FUNKCE INTENZITY ZE SCÉNOVĚ STEJNÝCH FOTOGRAFIÍ S RŮZNOU EXPOZICÍ (JEDEN BOD MÁ INTENZITU B1 NA PRVNÍ FOTOGRAFII A K TĚ SOUHLASÍ INTENZITA B2 Z DRUHÉ FOTOGRAFIE) B) NALEZENÍ MAPOVACÍ FUNKCE INTENZITY ZE SCÉNOVĚ LEHCE ODLIŠNÝCH FOTOGRAFIÍ (POHYB ČLOVĚKA) S RŮZNOU EXPOZICÍ (NEJPRVE SE VYPOČÍTÁJÍ HISTOGRAMY A POTÉ SE URČÍ MAPOVACÍ FUNKCE INTENZITY).....	32
(zdroj: [17b])	

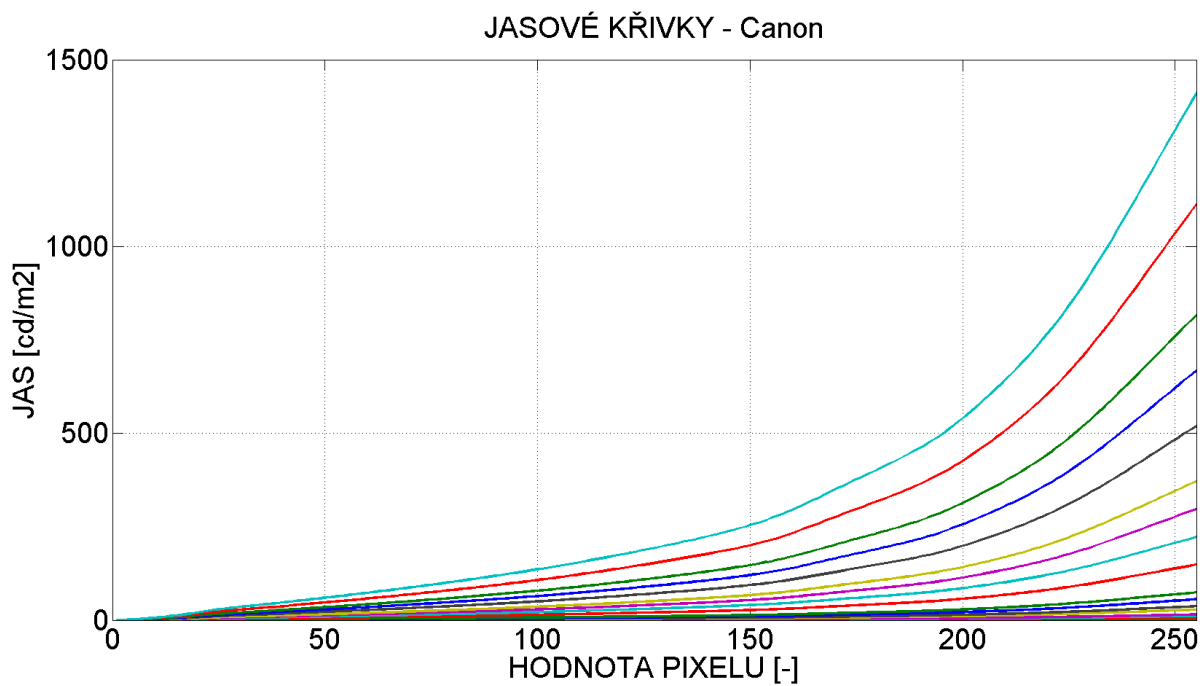
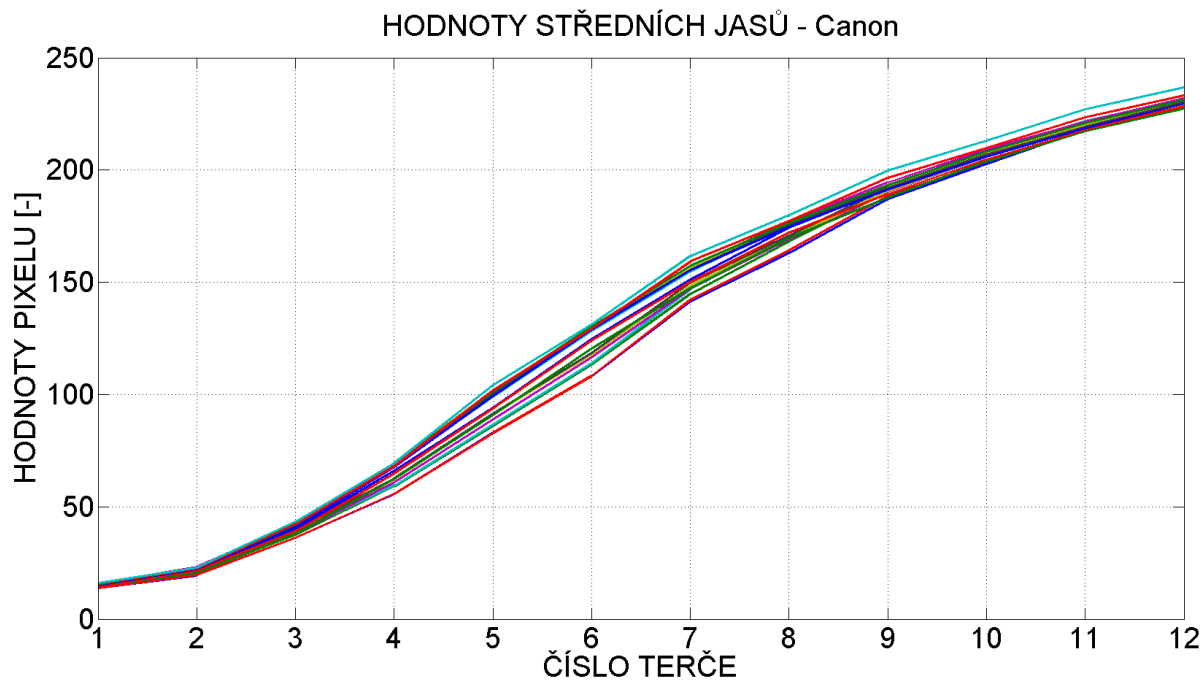
OBRÁZEK 6.1 – PŘÍKLADY SPRÁVNÉHO A ŠPATNÉHO VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ.....	35
(zdroj: http://svetelneznecistení.cz/)	
OBRÁZEK 6.2 – SATELITNÍ SNÍMEK NOČNÍHO OSVĚTLENÍ EVROPY VYZÁŘENÉ DO VESMÍRU	35
(zdroj: NASA)	
OBRÁZEK 6.3 – SIMULACE VZHLEDU ZIMNÍ OBLOHY PRO STUPNĚ 9, 7, 5 A 3.....	37
OBRÁZEK 6.4 – SQM – L PŘÍSTROJ.....	37
(zdroj: http://www.unihedron.com/projects/sqm-l/)	
OBRÁZEK 7.1 – FOTKA PRACOVIŠTĚ – SNAHA O ROVNOMĚRNÉ OSVĚTLENÍ OBRAZCE.....	39
OBRÁZEK 7.2 – DIGITÁLNÍ LUXMETR DX-100	39
OBRÁZEK 7.3 – UKÁZKA SEKVENCE SNÍMKŮ.....	40
OBRÁZEK 7.4 – UKÁZKA SEKVENCE SNÍMKŮ PRO KALIBRACI JASU.....	40
OBRÁZEK 7.5 – IMPLEMENTACE VÝPOČTU PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY OBJEKTIVNÍ METODOU...41	
OBRÁZEK 7.6 – IMPLEMENTACE VÝPOČTU PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY SUBJEKTIVNÍ METODOU .42	
OBRÁZEK 7.7 – IMPLEMENTACE VÝPOČTU SKUTEČNÉHO JASU Z FOTOGRAFIE PRO KALIBROVANÝ FOTOAPARÁT.....	43
OBRÁZEK 7.8 – BLOK DOPOČET VÝSLEDNÉ JASOVÉ KŘIVKY	44
OBRÁZEK 7.9 – SPECTRAScan®	45
(zdroj: http://www.photoresearch.com/CONTENT/SPECTRAScan%C2%AE-SPECTRORADIOMETER-0)	
OBRÁZEK 7.10 – OBRAZ V HLEDÁČKU PŘÍSTROJE (OZNAČENÍ MÍSTA MĚŘENÍ)	45
OBRÁZEK 7.11 – BUDOVA FAKULTY ELEKTROTECHNICKÉ ČVUT	46
OBRÁZEK 7.12 – BOK DOMU NA VÍTĚZNÉM NÁMĚSTÍ	46
OBRÁZEK 8.1 – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA NIKONU D5100 (METODA DEBEVECA A MALIKA) ...47	
OBRÁZEK 8.2 – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA NIKONU D5100 (OBJEKTIVNÍ METODOU).....47	
OBRÁZEK 8.3 – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA CANONU 600D (METODA DEBEVECA A MALIKA)48	
OBRÁZEK 8.4 – PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA CANONU 600D (OBJEKTIVNÍ METODOU)	48
OBRÁZEK 8.5 – POROVNÁNÍ STŘEDNÍCH HODNOT JASU PRO VŠECHNY SNÍMKY (NIKON D5100)...50	
OBRÁZEK 8.6 – JASOVÉ KŘIVKY PRO KAŽDÝ SNÍMEK SEKVENCE – PRO KAŽDOU EV HODNOTU JEDNA KŘIVKA (NIKON D5100)	50
OBRÁZEK 8.7 – MAPA MÍST, KDE BYLA ZAZNAMENÁNA NOČNÍ OBLOHA	52
(zdroj: https://www.google.cz/maps)	
OBRÁZEK 8.8 – MÍSTO POŘÍZENÍ FOTOGRAFIE NA NOVÝM ZÉLANDU	53
(zdroj: https://www.google.cz/maps)	
OBRÁZEK 8.9 – UKÁZKA FOTOGRAFIE NOČNÍ OBLOHY Z MONITOROVACÍHO SYSTÉMU CELÉ OBLOHY WILLIAM NA STŘEŠE FAKULTY ELEKTROTECHNICKÉ ČVUT (MÍSTO Č. 1.)	53
OBRÁZEK 8.10 – NOČNÍ OBLOHA ZE 17. – 18. 5. 2017 NAD BUDOVOU ČVUT (S ČASEM POŘÍZENÍ)	54
OBRÁZEK 8.11 – GRAF PRŮBĚHU JASU NOČNÍ OBLOHY.....	55
OBRÁZEK 8.12 – GRAF PRŮBĚHU JASU NOČNÍ OBLOHY.....	56

SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA A.....	65
PŘÍLOHA B.....	66
PŘÍLOHA C.....	67

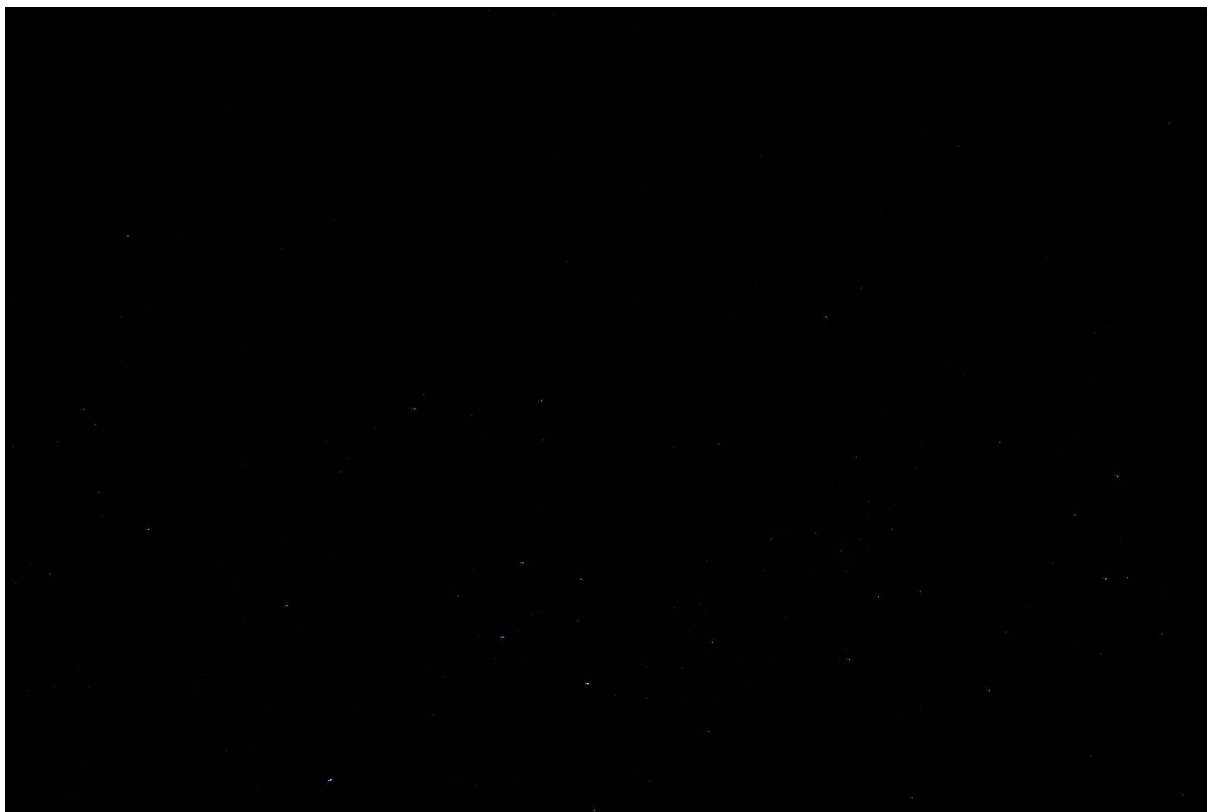
PŘÍLOHA A

Hodnoty středních jasů a jasové křivky pro Canon viz kapitola 8.2.



PŘÍLOHA B

Snímek z Nového Zélandu (místo č. 4) z fotoaparátu Canon 700D (zdroj: Michaela Tatrová):



Snímek z Chýně (místo č. 2) z fotoaparátu Canon 600D:



PŘÍLOHA C

Přiložené CD obsahuje:

- elektronickou podobu diplomové práce ve formátu PDF (DP_Jakub_Paroulek.pdf)
- skripty s kódem kalibrace v MATLABu:

(ve složce: *Charakteristiky* naleznete vytvoření převodních charakteristik

ve složce: *Mereni_svetelneho_znecistení* naleznete kalibraci obrazového systému a výpočet skutečného jasu na fotografii)

- fotografie noční oblohy (fotografie ze dvou nocí z monitorovacího systému celé oblohy WILLIAM ve formátu JPEG)