

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

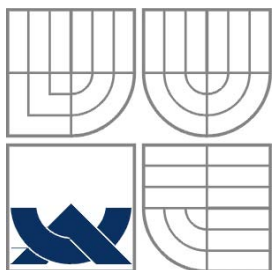
STONE-MAPPING PRO HDR OBRAZY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

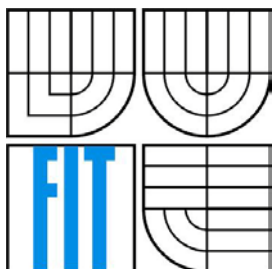
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. IVAN NEJEZCHLEB

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

## TONE-MAPPING PRO HDR OBRAZY

TONE-MAPPING HDR IMAGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. IVAN NEJEZCHLEB

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MICHAL SEEMAN

BRNO 2009

## **Zadání diplomové práce**

Řešitel: **Nejezchleb Ivan, Bc.**

Obor: Počítačová grafika a multimédia

Téma: **Tone-mapping pro HDR obrazy**

Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Prostudujte dostupnou literaturu.
2. Navrhněte postup tone-mappingu pro HDR pomocí bilaterálního filtru.
3. Implementujte metodu z bodu 2.
4. Porovnejte výstup s literaturou.

Literatura:

- Žára, J., Beneš, B., Felker, P.: Moderní počítačová grafika, Computer Press, 1998.
- Dle pokynu vedoucího.

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- Body 1 a 2 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

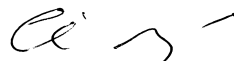
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Seeman Michal, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 22. září 2008

Datum odevzdání: 26. května 2009

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
612 66 Brno, Božetěchova 2



---

doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## **Abstrakt**

Tato práce se zaměřuje na problematiku obrazu s vysokým dynamickým rozsahem (High Dynamic Range, HDR). Stručně popisuje jeho vytváření a uchovávání. Hluběji se zabývá technikami umožňujícími zobrazení HDR obrazu na současných zobrazovacích zařízeních, která jsou jinak pro přímou projekci HDR scén nevhodná. Tento proces je nazýván tone-mapping. Obecně je popsán jeho princip a vlastnosti. V práci je představeno několik konkrétních metod tone-mappingu, z nichž je vyzvednut především tone-mappingový operátor využívající bilaterální filtrace.

## **Klíčová slova**

fotografie, vysoký dynamický rozsah, nízký dynamický rozsah, bilaterální filtr, mapování tonality, operátor mapování tonality, komprese dynamického rozsahu, expozice, gama korekce, haló efekt

## **Abstract**

This thesis focuses on the high dynamic range (HDR) imaging problematic. It describes process of capturing and storage of HDR images in brief. Main part of thesis deals with techniques of how to display HDR images on common visual display devices, which are not able to represent them directly. This process is called tone-mapping. It is firstly described in general and than the text focuses on several techniques of tone-mapping, mainly on tone-mapping using bilateral filtering.

## **Keywords**

photography, high dynamic range, low dynamic range, bilateral filter, tone-mapping, tone-mapping operator, dynamic range compression, exposure, gamma correction, halo effect

## **Citace**

Nejezchleb Ivan: Tone-mapping pro HDR obrazy. Brno, 2009, diplomová práce, FIT VUT v Brně.

# Tone-mapping pro HDR obrazy

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Seemana.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Ivan Nejezchleb  
26. 5. 2009

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mě při vytváření této práce podpořili. Především děkuji mému vedoucímu Ing. Michalovi Seemanovi za jeho odborné i pedagogické vedení, které velkou měrou přispělo k dokončení této práce. Dále bych pak poděkoval své přítelkyni za morální podporu v časech nejtěžších a svým rodičům za poskytnutí toho nejjistějšího zázemí, jakého se mi mohlo dostat.

© Ivan Nejezchleb, 2009.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

1	Úvod.....	3
2	Světlo, dynamický rozsah, barvy.....	5
2.1	Měření světla ve scéně .....	5
2.1.1	Radiometrie.....	5
2.1.2	Fotometrie.....	6
2.1.3	Expozice .....	8
2.2	Dynamický rozsah .....	9
2.3	Barvy.....	10
3	HDR obraz.....	12
3.1	Motivace pro užívání HDR obrazu .....	12
3.2	Vytváření HDR obrazu .....	13
3.2.1	Tvorba HDR obrazu kombinací LDR snímků .....	13
3.2.2	Přímé snímání HDR obrazu.....	17
3.3	Formáty pro ukládání .....	18
3.3.1	HDR .....	19
3.3.2	TIFF.....	20
3.3.3	EXR.....	21
3.4	Zobrazování HDR scén .....	22
3.4.1	HDR displeje.....	22
3.4.2	HDR tisk.....	23
3.4.3	Zobrazování na LDR displejích .....	24
4	Tone-mapping.....	25
4.1	Požadavky na tone-mapping.....	25
4.2	Metody tone-mappingu a jejich rozdělení .....	26
4.2.1	Globální TMO.....	28
4.2.2	Lokální TMO .....	28
5	Bilaterální filtr .....	31
5.1	Princip bilaterálního filtrování.....	31
5.2	TMO s využitím bilaterálního filtru.....	33
6	Aplikace Bilateral filter TMO .....	36
6.1	Požadavky na aplikaci.....	36
6.2	Návrh aplikace.....	37
7	Implementace .....	39
7.1	Uživatelské rozhraní .....	39

7.1.1	Načítání HDR obrazu .....	40
7.1.2	Podpora vláken.....	41
7.1.3	Možnosti vykreslovacího plátna .....	42
7.2	Bilaterální filtr .....	42
7.3	Korekce barev.....	44
8	Srovnávací testy.....	46
8.1	Referenční aplikace.....	46
8.1.1	Aplikace Qtpfsgui .....	46
8.1.2	Aplikace Tone Mapping .....	47
8.2	Metodika testů .....	47
8.3	Výsledky testů .....	49
9	Závěr .....	51
	Literatura .....	52
	Seznam obrázků .....	56
	Seznam příloh .....	57

# 1 Úvod

Svět kolem nás je barevný. Bylo tedy vždy snahou člověka tento barevný svět zachytit tak, jak jej svými očima vnímal. V současné době je tato snaha dovedena téměř k dokonalosti a barevné zachycení reality nás provází každým dnem v podobě fotografií našich blízkých na pracovním stole, filmů vysílaných v televizi a v mnoha dalších podobách. Stejným problémem, jakým byly v dřívějších dobách barvy, se však nyní stává světlo. Přesněji jeho rozdílná intenzita v různých částech snímané scény. Tento rozdíl mezi nejsvětějšími a nejtmašími oblastmi scény se označuje jako dynamický rozsah scény. A motivace k zdokonalování technologií je opět stejná: zachytit to, co vidí naše oko.

Při pohledu pouhým okem nás ani nenapadne, jak komplikované světelné podmínky v okolním světě panují. Tento fakt plyne z vlastností našeho vidění, v tomto případě ze schopnosti vnímat kontrastní scény až do poměru  $1:10^{10}$  [1] absolutního rozsahu, což pokrývá i ty nejkontrastnější scény kolem nás. Naproti tomu záznamová zařízení jako klasické a digitální fotoaparáty a kamery takto široký dynamický rozsah ve scéně nejsou schopny zachytit, a proto obrazy jimi pořízené jsou v tomto ohledu nedokonalé. Z celého rozsahu jasu scény jsou schopny zaznamenat jen určitou část, přibližně poměr jasů  $1:500 - 1:1000^1$  [2]. Je pak jen na autorovi snímku, jaký dynamický rozsah scény je ochoten obětovat, a detaily z této oblasti jsou pak nenávratně ztraceny. Takto vzniklý obraz nazýváme obrazem s nízkým dynamickým rozsahem (low dynamic range, LDR). LDR obrazy jsou právě ty, které nás v současné době všude obklopují a o nichž se řada z nás domnívá, jak jsou reálné.

Jak již bylo řečeno, skutečné scény okolního světa mají zpravidla dynamický rozsah velký, a proto se i jejich obraz označuje termínem obraz s vysokým dynamickým rozsahem (high dynamic range, HDR). Soubor technik zabývajících se záznamem, uchováváním, editací, úpravou a zobrazováním takovýchto obrazů se souhrnně označuje termínem zpracování obrazu s vysokým dynamickým rozsahem (high dynamic range imaging, HDRI). Všechno úsilí v této oblasti dnes směřuje ke zdokonalení manipulace s takovými daty a rozšíření jejich užití v praxi.

Cílem celé práce je uvést neznalého čtenáře do problematiky HDRI. Seznámit ho se základními pojmy a problémy. Poté jeho pozornost soustředit na problematiku zobrazení HDR obrazu na současných displejích a s tím spojený proces tone-mappingu. K tomu slouží i vytvořená aplikace implementující jeden z tone-mappingových operátorů.

V druhé kapitole je popsán vztah HDR obrazu k lidskému vidění. Je zde uveden princip reprezentace obrazu a barev v digitální podobě a jsou definovány veličiny popisující světelné poměry ve scéně a jejich vliv na formát používaný pro ukládání HDR obrazů.

---

<sup>1</sup> hodnota závisí na typu světlocitlivého média (kinofilm, digitální snímač) a také na typu přístroje (kapesní aparát, jednooká zrcadlovka)



Třetí kapitola se zaměřuje na základní aspekty HDR naznačené výše. První podkapitola popisuje současné i budoucí využití HDR obrazu a problémy, které je nutné v těchto souvislostech řešit. Obraz je nejprve nutné vytvořit (kapitola 3.2), k čemuž existuje v současné době již několik postupů. Vytvořený obraz je poté třeba uchovat. Uložen je v digitální podobě a ve vyhovujícím datovém formátu. V současnosti používané HDR formáty, jejich vlastnosti a vzájemné rozdíly popisuje kapitola 3.3. Hlavním důvodem pro získávání obrazů reality je jejich následné zobrazení, ať už v digitální podobě na obrazovce počítače či televizoru, nebo jejich výtisk na pevné médium. Touto problematikou v souvislosti s HDR obrazem se zabývá kapitola 3.4. Zde se také poprvé zmiňuje termín tone-mappingu se zobrazováním spojený.

Vztah tone-mappingu k HDR obrazu a použití pro zobrazování takových scén je náplní kapitoly 4. Je zde zmíněn obecný přístup a dále je popsáno několik metod mapování tónů, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody.

Pro popis bilaterálního filtru využitého v jedné z metod tone-mapping je vyhrazena kapitola 5. Bilaterální filtr je významný pro svoje vlastnosti, odolnosti vůči chybám a rychlost, s jakou modifikuje obraz. Kapitola 5.1 této práce se zaměřuje na popis bilaterálního filtru, jeho základního principu, kladných i záporných vlastností. Navazující podkapitola představuje metodu tone-mappingu založenou na použití bilaterálního filtru zvanou rychlý bilaterální filtr. Uvádí princip této varianty a prezentuje její výsledky.

Kapitola 6. popisuje proces návrhu aplikace implementující tone-mapping s využitím bilaterálního filtrování. Navazující kapitola 7 pak její implementaci včetně podrobnějšího popisu jednotlivých modulů.

Součástí této práce je také srovnání vytvořené aplikace s referenčními programy. Popisu těchto programů, metodice testování a souhrnu výsledků je věnován text kapitoly 8.

Závěrečná kapitola celého textu sumarizuje základní fakta obsažená v této práci, nastiňuje možnosti softwarové aplikace umožňující tone-mapping HDR obrazu s využitím bilaterálního filtrování. Dále vyhodnocuje přínos této práce a navrhuje možná vylepšení a pokračování.

## 2 Světlo, dynamický rozsah, barvy

Bez světla by nebyl obraz. Světlo je elementárním předpokladem pro jakékoli snímání reality. Stejně jako člověk je v úplné tmě slepý i fotoaparát potřebuje k pořízení snímku světlo. Množství světla, jeho rozložení ve scéně a jeho vliv na vnímání barev jsou aspekty silně ovlivňující obraz scény. Popisem těchto veličin a jejich vztahem k lidskému vnímání se zabývají následující kapitoly.

### 2.1 Měření světla ve scéně

Měřením veličin popisujících vlastnosti světla jako druhu elektromagnetického záření se zabývá vědní obor radiometrie. Radiometrie se zabývá absolutními veličinami. Obdobné veličiny, avšak z pohledu jejich působení na lidské oko, zkoumá fotometrie [3]. Z tohoto důvodu jsou fotometrické veličiny podstatnější, protože snahou HDRI je přiblížit se schopnostem a limitům lidského oka co nejvíce.

Schopnost lidského oka vnímat světlo je dána jeho fyziologickou stavbou. Světlo odražené od povrchů těles ve scéně prochází čočkou oka, jeho množství je regulováno zornicí. Následně světlo dopadá na zadní stěnu oka, sítnici. Sítnice obsahuje 2 druhy světlocitlivých buněk. Tyčinky jsou citlivé na světlo a umožňují vidění i za zhoršených světelných podmínek. Čípky jsou buňky citlivé méně, ale umožňují barevné vidění. Čípky se dělí do tří skupin, z nichž každá je citlivá na světlo jiné vlnové délky. Jejich podíl na vnímání barev je detailněji zmíněn v kapitole věnované barevnému vidění.

#### 2.1.1 Radiometrie

Světlo je elektromagnetické záření. Lze k němu přistupovat jako k vlnění nebo jako toku částic. Světlo jako vlna se prostorem šíří rychlostí  $c$ , pro niž platí vztah

$$c = f \cdot \lambda, \text{ kde } f \text{ je frekvence vlnění a } \lambda \text{ je vlnová délka světla.} \quad (2.1).$$

Světlo jako záření přenáší prostorem energii. Radiometrie definuje veličiny popisující tuto energii a její šíření v čase a prostoru. Souhrn těchto veličin a jejich jednotek je obsažen v tabulce 2.1. Tyto veličiny však pro fotografii a popis vnímání světla nemají velký význam.

Světlo jako proud částic je tvořeno fotony, elementárními nabitými částicemi. Energie  $E$  fotonu je definována

$$E = h \cdot f, \text{ kde } h \text{ je Planckova konstanta}^2 \text{ a } f \text{ frekvence.} \quad (2.2).$$

---

<sup>2</sup> Planckova konstanta  $h=6.62606896 \cdot 10^{-34}$ , byla poprvé zavedena M. Planckem jako konstanta vyzařovacího zákona černého tělesa

Fotony mohou být emitovány, odrazeny, propuštěny, pohlceny. Fotony putují prostorem po přímočarých drahách, dokud se nestřetnou s povrchem nějakého tělesa. Jejich interakce při tomto střetu se podílí na tom, jak takový povrch vnímáme. Rozhodující je přitom především distribuce odraženého světla. Matné povrchy odrážejí rovnoměrně světlo do všech směrů. Naproti tomu povrchy lesklé odrážejí většinu světla jen jedním směrem. Jas těchto odlesků pak téměř dosahuje hodnot jasu světelného zdroje a může být příčinou nárůstu dynamického rozsahu scény. K zachycení takovýchto povrchů je pak nutné použití HDR obrazu.

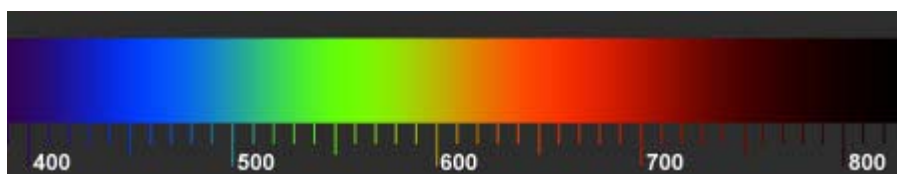
Veličina	Jednotka	Definice
Energie záření	J (Joule)	$Q_e$
Zářivý tok	$J \cdot s^{-1} = W$ (Watt)	$P_e = \frac{dQ_e}{dt}$ , kde $t$ je čas
Intenzita vyzařování	$W \cdot m^{-2}$	$M_e = \frac{dP_e}{dS_e}$ , kde $S_e$ je plocha zdroje
Ozáření (expozice)	$W \cdot m^{-2}$	$E_e = \frac{dP_e}{dS_e}$ , kde $S_e$ je plocha detektoru
Zářivost	$W \cdot sr^{-1}$	$I_e = \frac{dP_e}{d\omega}$ , kde $\omega$ je prostorový úhel
Měrná zářivost	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$L_e = \frac{d^2 P_e}{dA \cos \theta d\omega}$ , kde $A$ je plocha zdroje, $\omega$ je prostorový úhel a $\theta$ je úhel směru vyzařování

Tabulka 2.1: Radiometrické veličiny [4][5]

## 2.1.2 Fotometrie

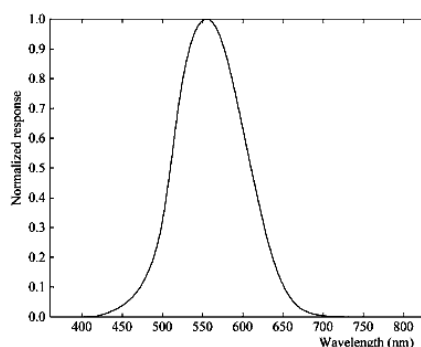
Radiometrie popisuje záření všech vlnových délek. Naproti tomu fotometrie se zabývá pouze spektrem viditelným pro člověka. Měření fotometrických veličin se nezakládá na údajích fyzikálních přístrojů, ale na světelném vjemu oka [5]. Lidské oko je citlivé na vlnové délky v rozmezí přibližně<sup>3</sup> od 400 – 700 nm [6]. Tento okem viditelný výsek elektromagnetického spektra zachycuje obr. 2.1.

<sup>3</sup> tyto hodnoty platí, pokud za hranice přijmeme ty vlnové délky, při nichž klesne citlivost na 1% své maximální hodnoty



Obrázek 2.1: Světelné spektrum viditelné pro člověka [7]

Na různé vlnové délky v tomto rozsahu je navíc oko citlivé jinak. Zanedbáme-li rozdíly mezi jednotlivými lidmi, lze tuto vnímavost různých vlnových délek aproximovat jedinou funkcí fotopické světelné účinnosti  $V(\lambda)$  (obr. 2.2), standardizovanou komisí CIE<sup>4</sup> [4]. Fotometrické veličiny zahrnují tuto křivku do svých definic a tím zohledňují vnímání člověka.



Obrázek 2.2: Graf funkce fotopické<sup>5</sup> světelné účinnosti [4]

Fotometrické veličiny shrnuje tab. 2.2. Pro problematiku HDR je z nich nejvýznamnější jas. Jas představuje vnímání kvantity světla, představuje míru, jak světlý se nám daný povrch jeví. Hodnotu jasu lze vypočíst z měrné zářivosti

$$L_v = \int_{400}^{700} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2.3) [4].$$

Význam jasu pro HDRI spočívá ve faktu, že reflektuje hranice viditelného spektra vlnových délek. Vlnové délky mimo tento rozsah nejsou člověkem viditelné, a proto ani není nutné je zaznamenávat, uchovávat a manipulovat s nimi. Mnoho tone-mappingových operátorů z jednotlivých barevných složek obrazu vypočte jeho jas a manipulují s touto hodnotou. Odráží tak větší citlivost oka na hodnoty jasu než na hodnoty jednotlivých barev. O vztahu vlnových délek k barvám a o souvislosti mezi barvami a jasem pojednává kapitola 2.3.

<sup>4</sup> *Commission Internationale de l'Éclairage* (angl. The International Commission on Illumination). Organizace zaštiťující celosvětovou spolupráci a výměnu informací v oborech týkajících se světla, osvětlení, barev, vidění a obrazu

<sup>5</sup> Fotopické vnímání je vnímání za dobrých světelných podmínek a podílejí se na něm receptory zvané čípkky, viz. dále

Veličina	Jednotka	Definice
Světelný tok	cd.sr = lm (lumen)	$P_v$ Celkový světelný výkon emitovaný ze zdroje, šířící se prostředím nebo absorbovaný detektorem
Světelná energie	lm.s	$Q_v$ Celková světelná energie emitovaná ze zdroje, šířící se prostředím nebo absorbovaná detektorem
Světlení (Intenzita osvětlení)	lm.m <sup>-2</sup>	$M_v$ Světelný výkon generovaný z jednotky plochy zdroje
Osvětlení	lm.m <sup>-2</sup> = lx	$E_v$ Výkon světelného toku dopadající na jednotku plochy detektoru
Svítilivost	lm.sr <sup>-1</sup> = cd	$I_v$ Výkon světla generovaný z bodového izotropního zdroje do jednotkového prostorového úhlu
Jas	cd. m <sup>-2</sup>	$L_v$ Výkon světla generovaný z jednotky plochy povrchu zdroje do jednotkového prostorového úhlu

Tabulka 2.2: Fotometrické veličiny [5]

### 2.1.3 Expozice

Světlo ve fotografii je měřeno poněkud zjednodušeně. Jedinou podstatnou veličinou, která světlo ve scéně popisuje, je jeho množství a k němu vztažená expozice. Fotografickou expozici ovlivňují pouhé 3 faktory – expoziční čas, clona a ISO citlivost.

Absolutní množství světla na scéně udává expoziční hodnota (angl. exposure value, EV). Každý bod scény má jiné EV – jiný jas. Pro stanovení správné expozice je nutné stanovit průměrné EV scény. Na tuto hodnotu bude potom nastavena expozice. Clona v objektivu fotoaparátu určuje velikost otvoru, kterým prochází světlo, a tím jeho množství. Expoziční čas udává, po jakou dobu je světlocitlivý materiál (kinofilm, digitální snímač) vystaven působení dopadajícího světla. ISO citlivost udává citlivost snímače na světlo. 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 logaritmický charakter, což odpovídá lidskému vnímání světla.

EV = 0 znamená expozici časem 1 vteřina při cloně f/1 a ISO = 100, kdežto např. EV = 11 znamená expozici časem 1/30 při cloně f/8 a ISO = 100. Čím větší EV, tím je na scéně více světla. Expoziční hodnoty je možné vyjádřit jako dvojkový logaritmus expozičního času, druhé mocniny clonového čísla a ISO:

$$EV = \log_2\left(\frac{a^2}{t}\right) - \log_2\left(\frac{ISO}{100}\right) = 2 \cdot \log_2 a - \log_2 t - \log_2\left(\frac{ISO}{100}\right) \quad (2.4),$$

kde  $a$  je clonové číslo a  $t$  je expoziční čas v sekundách [8].

## 2.2 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah scény, kontrast, je poměrem mezi nejjasnějším a nejtmačejším bodem scény. Je to z pohledu problematiky HDR rozhodující vlastnost scény. Určení dynamického rozsahu scény je klíčové pro rozhodnutí, zda lze daný obraz zachytit technikami běžnými, či je nutné použít HDR snímání.

Ve fotografii se k vyjádření dynamického rozsahu scény využívají již uvedené expoziční stupně. Pomocí interního expozimetru fotoaparátu se změří expozice nejjasnějšího a nejtmačího místa scény, z naměřených hodnot se vypočtou (rovnice 2.4) hodnoty odpovídající EV a jejich odečtením se získá dynamický rozsah scény. Vztah mezi kontrastem uvedeným jako poměr jasů a vyjádřením pomocí EV.

$$\text{kontrast scény 1 EV} = \text{kontrast } 1:2, \text{ tedy např. } 11 \text{ EV} = 1:2^{11}$$

Lidské vnímání jasů má to specifikum, že přírůstek jasů nevnímáme lineárně. Rovnoměrný přírůstek jasů fyzikálního světla vnímá člověk subjektivně jako logaritmický přírůstek intenzity světla [9].

Jak bylo řečeno v úvodu, dynamický rozsah reálných scén dosahuje vysokých hodnot. Několik příkladů společně s dynamickými rozsahy běžných záznamových a zobrazovacích zařízení je uvedeno v Tabulka 2.3.

Scéna, zdroj	Rozsah jasů	Expoziční rozsah EV
Plný rozsah od Slunce po světlo hvězd	1 000 000 000 000 : 1	40
Plný rozsah lidského oka po adaptaci [1], [4]	100 000 000 : 1	27
Tmavý interiér s výhledem na jasné světlo	5 000-10 000 : 1	12-14
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
LCD monitor	350 : 1	8-9
CRT monitor	200 : 1	7-8
Velmi kvalitní fotografický papír	100 : 1	7
Papír běžný	50 : 1	5-6

Tabulka 2.3: Dynamický rozsah zdrojů světla a zařízení<sup>6</sup> [10]

Při porovnání uvedených hodnot je patrné, jak velké světelné rozdíly v okolním světě panují a jak omezené jsou schopnosti současných snímačů a možných výstupů obrazu. Současné fotoaparáty

---

<sup>6</sup> Dynamický rozsah se u řady zařízení neuvádí a jeho měření je problematické, proto nelze uváděné hodnoty považovat za dokonale přesné. Jiné prameny uvádí hodnoty nepatrně odlišné

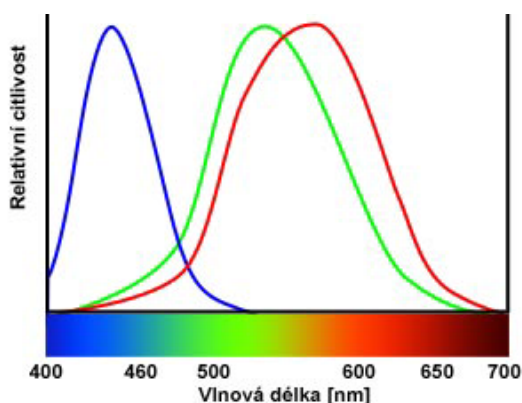
tedy dle nastavené expozice snímají pouze omezený výsek<sup>7</sup> celkového dynamického rozsahu scény. Oblasti s jasnem mimo tuto část ztrácí kresbu a jsou pod/přeexponované<sup>8</sup>. Manuálním nastavením expozice fotoaparátu fotograf určuje, jaký úsek dynamického rozsahu scény bude zachycen korektně, vždy však jde o kompromis.

Vjem jasů scény utváří především osvětlení scény a odrazivost povrchů v ní. Tyto dvě složky jsou nezávislé a jsou nositelkami vlastních dynamických rozsahů. Dva různé povrchy osvětlované totožným zdrojem světla mají dynamický rozsah nejvýše 1:30 [9]. Naproti tomu dynamický rozsah způsobený různorodým osvětlením je mnohonásobně větší. Tento fakt využívají některé tone-mappingové metody ke snížení dynamického rozsahu scény a kompresi zaměřují na složku osvětlovací. Odrazivou složku obsahující významné detaily scény ponechávají.

## 2.3 Barvy

Barva není vlastností světla, ale je produktem lidského vnímání. Barevné vidění lidského oka je umožněno díky výše zmíněným čípkům, fotoreceptorům, které mají odlišné odezvy na různé vlnové délky světla. Dle této odezvy na různé vlnové délky dělíme čípky do tří skupin<sup>9</sup>. Tyto fotoreceptory reagují na dopadající světlo a produkují nervový (elektrický) signál. Tento signál je veden do mozku a zde je zpracován. Obdobný proces probíhá i na snímačích fotoaparátů.

Běžné světlo dopadající na scénu obsahuje záření o mnoha vlnových délkách, je tzv. achromatické. Toto světlo po odrazu od objektů dopadá na sítnici oka, kde stimuluje čípky. Ty dle svého typu mají odlišné spektrální odezvy na jednotlivé vlnové délky. Funkce spektrální citlivosti čípků jsou vyobrazeny na obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Funkce spektrálních odezev tří druhů čípků [7]

<sup>7</sup> Samozřejmě existují i scény s dynamickým rozsahem stejným nebo menším než jakým disponuje záznamové zařízení. V takových případech je tento rozsah zaznamenán kompletně

<sup>8</sup> Všechny hodnoty nižší než minimum mají hodnotu minima, vyšší než maximum mají hodnotu maxima

<sup>9</sup> Schopnost vidět tři základní barvy se označuje jako trichromatismus

Je patrné, že každý typ čípků je nejcitlivější při jiné hodnotě vlnové délky. Vlnové délky maxim těchto funkcí odpovídají přibližně modré, zelené a červené barvě. Tyto barvy označujeme za primární a tvoří základ nejrozšířenějšího barevného modelu RGB<sup>10</sup>. Z grafu je také zjevné, že se spektrální citlivosti všech tří typů překrývají. Proto monochromatické světlo o jedné vlnové délce budí odezvu u všech tří typů čípků. Složením těchto tří odezev dostaneme celkový vjem jasu<sup>11</sup> a také toto skládání umožňuje vnímat i barvy jiné než primární.

Barva objektu ve scéně je tedy odvislá od vlnové délky, jakou má světlo tímto objektem odražené a dopadající na lidskou sítnici. Tuto vlnovou délku určují dva faktory. Prvním z nich je zdroj světla osvětlujícího objekt. Druhým faktorem je povrch objektu. Ten je charakteristický mimo jiné tím, jaké vlnové délky světla odráží. Vjem barvy objektu pro lidské oko je tedy kombinací obou.

Dva stejné předměty odrážející jiné vlnové délky dopadajícího světla tedy oko vnímá různě. Problematičtější je případ, kdy dva stejné objekty osvětlují dva různé zdroje světla. Dle výše uvedeného bychom měli tyto dva předměty vnímat také s odlišnou barvou. Lidské vnímání však využívá tzv. chromatickou adaptaci [11]. Tato vlastnost umožňuje lidskému vnímání potlačit vliv osvětlení na vnímanou barvu předmětu, a proto se člověku bílý kus papíru jeví bílým ve světle svíčky stejně jako v záři poledního slunce. Naproti tomu záznamová zařízení jako fotoaparát podobou adaptační schopnost nemají. Je nutné proto zapojit techniku, která provede úpravu pořízených dat. Tento úkon se označuje jako „vyvážení bílé“. Detaily této problematiky jsou nad rámec tématu této práce<sup>12</sup>. Důvodem pro zmínění tohoto jevu je fakt, že oproti LDR snímků u HDR obrazu je tato náprava jednoduchá a nepřináší žádnou degradaci obrazu.

---

<sup>10</sup> Angl. pojmenování barev red, green, blue - RGB

<sup>11</sup> Hodnotu jasu z hodnot jednotlivých primárních barev vypočteme jejich lineární kombinací

$L = 0,2126.R + 0,7152.G + 0,0722.B$

<sup>12</sup> Detaily viz. literatura [4], [12]



## 3 HDR obraz

Aspekty motivující k využívání HDR obrazu byly zevrubně představeny v předcházejících kapitolách. HDRI si klade za cíl zachytit veškeré<sup>13</sup> světlo ve scéně a umožnit tak uložit všechny detaily scény. Existenci HDR dat ve všech jejích fázích popisují následující kapitoly.

### 3.1 Motivace pro užívání HDR obrazu

Z kapitoly pojednávající o dynamickém rozsahu vyplývá, že současné fotoaparáty a kamery nejsou schopné zaznamenat dynamický rozsah většiny reálných scén. Papír ani displeje nejsou schopny tento dynamický rozsah zobrazit. Proč se tedy rozvojem HDRI zabývat?

Technický pokrok je nepředvídatelný. Problémy, které se dnes jeví neřešitelné, mohou být za několik málo let považovány za triviální. Z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost i oblasti HDRI. Metody, umožňující zachytit celý rozsah HDR scény i s dnešními nedokonalými snímači, jsou již známy. Záznam HDR dat tedy není překážkou. Problém nepředstavuje ani uchovávání těchto data.

Uplatnění HDR obrazu nalezneme především v počítačové grafice. Prvním případem použití je vytváření syntetických scén, popř. začleňování syntetických objektů do záběrů reálné scény (např. při vytváření filmových triků) [13]. Počítačové modelování se provádí pomocí moderních metod globálního osvětlení. Ty zkoumají světelné poměry na scéně a vytvářejí interakce mezi objekty scény, jejich okolím a světly ve scéně. Snaží se tak co nejvíce napodobit skutečné chování světla v reálné scéně. Z tohoto důvodu i syntetické scény vyžadují zapojení technik HDRI, neboť i tento uměle tvořený svět obsahuje velké světelné kontrasty.

Dalším užitím HDR v oblasti počítačové grafiky a modelování scén jsou mapy okolí (angl. environmental map). Na povrchu předmětu s vysokou odrazivostí se zobrazuje jeho okolí. Toto okolí obsahuje i zdroje světla. Jejich odrazy na povrchu tělesa dosahují téměř stejného jasu jako zdroje samotné. Takovéto reflexe zvyšují neúměrně dynamický rozsah, který by před zobrazením musel být oříznut. Řešením je vytvořit HDR texturu, zachycující okolí objektu s celým dynamickým rozsahem. Tato textura po nanesení na objekt vytváří dojem odrazu okolí na povrchu objektu [13].

Z výhod HDRI těží také oblast zpracování obrazu. Díky tomu, že hodnoty bodů obrazu nejsou ořezány na hodnoty minima a maxima zobrazitelného rozsahu, mohou operace nad obrazem prováděné použít skutečnou zaznamenanou hodnotu a nedochází k chybám. Tato výhoda je patrná např. při hledání korespondujících bodů na několika snímcích, úpravě barevného podání snímku [4]

---

<sup>13</sup> Pojem „veškeré“ zde vyjadřuje takové světlo, které je schopen vnímat člověk. Nikoli veškeré elektromagnetické vlnění

nebo při změně saturace barev. Debevec a Malik [14] ukazují výhody HDR obrazu na efektu pohybového rozmazání.

Se zpracováním obrazu souvisí i problematika vizualizace medicínských dat. HDRI zde poskytuje prostor pro úpravu a vizualizaci těchto dat se zachováním mnohem většího množství informací, což je v tomto oboru klíčovým aspektem.

Ryze praktické uplatnění by použití HDR kamer našlo v oblasti bezpečnostních a dohledových systémů. Ty by pak zaznamenávaly mnohem větší množství detailů scény i za měnících se světelných podmínek. Například rozpoznání obličeje pachatele nebo registračního čísla automobilu by pak bylo mnohem snazší.

V neposlední řadě se HDR snímání uplatňuje v běžné fotografii. Zde umožňuje zachytit neopakovatelné okamžiky a scénérie bez nutnosti kompromisů. Množství detailů ve všech částech scény nemusí být z důvodu překročení dynamického rozsahu nijak omezováno. Ve spojení s technikami tvorby panoramat pak lze takové fotografie použít jako dokonalou dokumentaci světa kolem nás a vytvářet z nich virtuální alba, dokonale zachycující dané místo.

## 3.2 Vytváření HDR obrazu

Tato kapitola popisuje možnosti vytváření HDR obrazu. V současné době se nabízí několik odlišných metod.

HDR obrazy lze vytvářet prostředky počítačové grafiky. Metody jako radiostita pracující s globálním osvětlením scény vytváří světelné poměry renderovaných scén stejně kontrastní jako ve skutečném světě. Tato problematika je popsána např. v [15], [16] a nadále se jí v této kapitole nevěnuji.

Druhým přístupem je záznam skutečné scény. K tomuto účelu jsou využívány buď konvenční záznamová zařízení jako digitální fotoaparát, nebo se používají speciální kamery. Tento přístup je popsán v následujících kapitolách.

### 3.2.1 Tvorba HDR obrazu kombinací LDR snímků

Tuto metodou se ve své práci zabývají Debevec a Malik [14]. K vytvoření HDR obrazu je použita sekvence snímků téže scény. Tyto snímky se navzájem liší svou expozicí. Vzhledem k tomu, že tyto snímky jsou pořízeny konvenčním aparátem, dle volby expozice zachycují pouze část celého dynamického rozsahu scény. Díky tomu, že jejich expozice je pro každý snímek jiná, jsou schopny tyto snímky společně pokrýt celý dynamický rozsah scény. Jejich skládání však není triviální. Celý proces popisují následující odstavce.

Pokud fotografujeme scénu, vytváříme digitální snímek zaznamenávající hodnoty jasu. Tyto hodnoty však zřídka představují skutečné měření relativního osvětlení scény. Například pokud má

jeden pixel<sup>14</sup> obrazu dvakrát vyšší hodnotu než jiný, je nepravděpodobné, že byl tento bod vystaven dvojnásobnému osvětlení. Existuje totiž většinou neznámá nelineární funkce záznamového zařízení, která určuje vztah mezi osvětlením místa ve scéně a hodnotou odpovídajícího pixelu obrazu [14]. Tato nelinearita u kinofilmových aparátů spočívá v charakteristice filmového materiálu a v procesu vytváření pozitivního snímku z negativu. U digitálních aparátů je nelinearita zavedena jednak uměle výrobcem, aby snímací čip svou charakteristikou odpovídal nelinearitě zobrazovacích zařízení a choval se obdobně jako klasický film, a jednak omezeným dynamickým rozsahem čipu. Problematické je především přeexponování, kdy všechny body s osvětlením vyšším než je snímáč schopný zachytit jsou namapovány na společnou maximální hodnotu obrazu. Dalším nelineárním zásahem do obrazu je převod z 12bitové<sup>15</sup> reprezentace, se kterou pracují analogově digitální převodníky, do 8bitového rozsahu, se kterým pracují zobrazovací zařízení [14].

Debevec a Malik prezentují postup, jak vypočítat nelineární funkci záznamového zařízení. Jejich metoda vychází z vlastnosti záznamových zařízení zvaných zvané reciprocita. Princip reciprocity říká, že hodnota expozice  $X$ , kterou získáme jako součin hodnoty osvětlení  $E$  a času expozice  $\Delta t$ ,

$$X = E \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

je dána pouze tímto součinem a nezávisí na hodnotách jednotlivých složek. Dvojnásobným prodloužením času expozice při polovičním osvětlení tak dostaneme tutéž hodnotu expozice. Odhlédneme-li od nelinearity zpracování, samotný snímací čip se chová lineárně. Hodnoty náboje na snímáči odpovídají absolutnímu počtu dopadnutých fotonů za určitý čas, což je předpokladem pro využití reciprocity [14].

Pokud pomocí uvedené metody zjistíme charakteristickou funkci zařízení  $f$ , která udává hodnotu pixelu obrazu  $Z$  na základě expozice  $X$  daného pixelu

$$Z = f(X) \quad (3.2).$$

Poté postačí najít funkci  $f^{-1}$  inverzní k  $f$  a jsme schopni vypočítat hodnotu expozice ze zaznamenané hodnoty pixelu

$$X = f^{-1}(Z) \quad (3.3).$$

Jakmile známe hodnotu expozice a expozičního času, jsme schopni určit hodnotu ozáření, potažmo osvětlení scény

$$E = \frac{X}{\Delta t} \quad (3.4).$$

---

<sup>14</sup> Pixel je nejmenší jednotka obrazu. Je definován svou polohou v obraze a svou barvou a jasem

<sup>15</sup> U některých digitálních fotoaparátů, především jednookých zrcadlovek, jsou AD převodníky dokonce 14bitové

I při omezeném rozsahu hodnot expozice, které je čip schopen zaznamenat, tedy můžeme získat velký rozsah z nich spočtených hodnot osvětlení tím, že budeme pořizovat snímky stejné scény s různými časy expozice [14].

Změna expozice změnou hodnoty clony se v tomto případě nepoužívá, neboť s sebou přináší i změnu hloubky ostrosti<sup>16</sup> a ta by působila rušivě. Stejně tak se nevyužívá změna ISO citlivosti snímače, protože snímač má pro každou citlivost jinou charakteristickou křivku a navíc navyšování citlivosti zvyšuje výskyt digitálního šumu v obraze. Ten znehodnocuje zaznamenaná data a přináší nepřesnosti do hodnot pixelů.

Detailní popis metody určení charakteristické funkce záznamového zařízení a všech aspektů ovlivňující výpočet je obsažen v [14].

Poté, co je určena charakteristická funkce zařízení a její inverze, lze snadno z hodnoty pixelu v obraze vypočítat hodnotu osvětlení korespondujícího bodu ve scéně. Tuto hodnotu je nejvhodnější vypočítat z hodnot všech snímků série. Napomůže to redukci vlivu šumu, ale především to umožní zrekonstruovat kompletní HDR obraz zaznamenané scény. Hodnotu osvětlení bodu  $i$  vypočteme jako

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_{ij})}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (3.5),$$

kde  $E_i$  je osvětlení bodu obrazu na  $i$ -té pozici,  $w$  je váhová funkce, viz. níže, a  $g = \ln f^{-1}$  je přirozený logaritmus inverzní charakteristické funkce.  $P$  je počet snímků série [14].

Hodnotu  $E_i$  by bylo možno ze všech snímků spočítat jako aritmetický průměr všech hodnot. Do tohoto průměru by však v takovém případě zasahovaly i hodnoty v tomto bodě z těch snímků série, na kterých tyto body jsou pod/přeexponované. Proto se zavádí váhová funkce  $w$ , které zohledňuje hodnotu pixelu v rozmezí  $Z_{\min} - Z_{\max}$  (zpravidla 0 – 255).

$$w(z) = z - Z_{\min} \quad \text{pro } z \leq \frac{1}{2}(Z_{\min} + Z_{\max})$$

$$w(z) = Z_{\max} - z \quad \text{pro } z > \frac{1}{2}(Z_{\min} + Z_{\max}) \quad (3.6).$$

Díky této váhové funkci do výpočtu osvětlení bodu zasahují vyšší měrou ty pixely, které byly exponovány korektně a jejich hodnota nebyla oříznuta [14].

Podstatné pro tuto metodu získávání HDR dat jsou vlastnosti snímané scény. Vzhledem k faktu, že je nutné nasnímat sérii snímků se stejným obsahem, musí být scéna statická a také fotoaparát musí být nehybný. Pokud dojde k nepatrným pohybům, lze použít metody pro zarovnání snímků uvedené například v [4]. Stejný zdroj uvádí i způsoby pro odstranění „duchů“ vzniklých

---

<sup>16</sup> Hloubka ostrosti je oblast před a za zaostřeným bodem, která se na fotografii ještě jeví ostře. Právě clona je nejpodstatnějším parametrem určujícím hloubku ostrosti

pohybujícími se objekty ve scéně. Navíc by během snímání nemělo docházet k přílišným změnám světelných poměrů ve scéně, což by do metody zaneslo chybu.

Počet snímků série je závislý na schopnostech použitého snímače. Přesné určení počtu snímků a odstupu expozičních časů je popsáno v [14]. Z pohledu fotografa neznalého dokonale charakteristiky použité snímací techniky je vhodné použít postup popsany v [10] s využitím histogramu pořízených snímků.



Obrázek 3.1: Ukázka vstupních snímků metody (nahore). 3 snímky jsou pořízeny s rozestupem 2 EV. Dole HDR obraz vzniklý jejich složením a poté přizpůsobený k zobrazení na běžném monitoru [4]

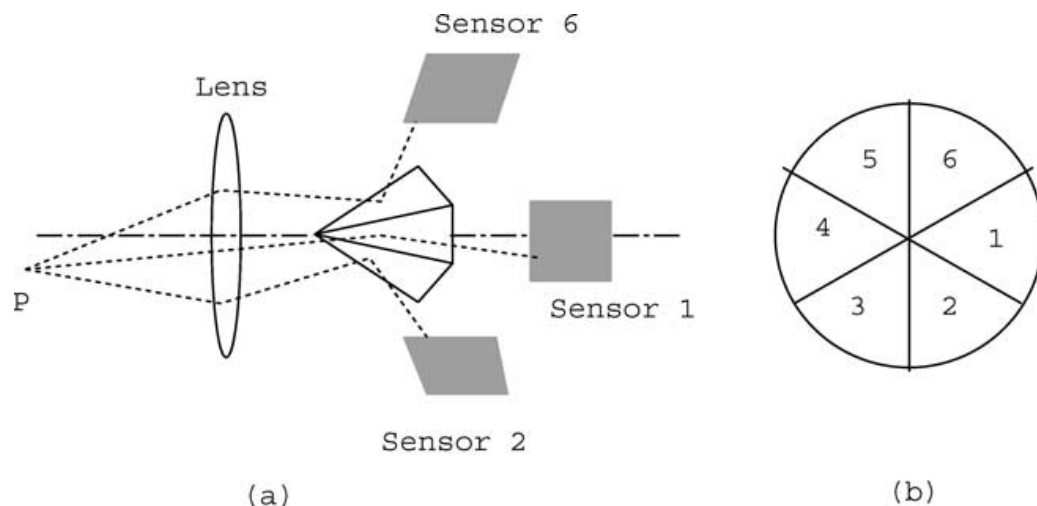
## 3.2.2 Přímé snímání HDR obrazu

Předchozí metoda skládání LDR snímků je časově náročná a klade omezení na snímanou scénu. Z tohoto důvodu probíhá intenzivní vývoj snímacích zařízení s vysokým dynamickým rozsahem. V současné době se již objevují snímací zařízení, jejichž dynamický rozsah se přibližuje potřebám snímání HDR scén, avšak jejich masivnímu rozšíření brání jejich cena a nepohodlnost používání. Z existujících řešení budou v následujícím textu popsána dvě.

### 3.2.2.1 Aggarwal a Ahuja – tříčipová HDR kamera

Toto zařízení popsali a vyvinuli M. Aggarwal a N. Ahuja [17]. Jde o zařízení svým principem navazující na metodu skládání série LDR obrazů do HDR snímku. Rychlost vytváření HDR dat je tak vysoká, že zařízení je schopné natáčet HDR videosekvence s rychlostí 30 snímků za sekundu.

Toto zařízení využívá několika běžných CCD<sup>17</sup> čipů. Zkonstruovaný prototyp obsahuje snímače tři, avšak dle návrhu jich může být i více. Základem návrhu je myšlenka rozdělení paprsku procházejícího objektivem kamery na nezávislé svazky. Ty jsou nasměrovány na jednotlivé snímače, kde vytvoří obrazy snímané scény, viz. obr. 3.2.



Obrázek 3.2: (a) Objektiv, zrcadlová pyramida a uspořádání senzorů pro snímání několika záběrů scény současně. (b) Rozdělení clonového otvoru na části odpovídající jednotlivým senzorům [17]

Rozdílné expozice na snímačích je dle návrhu autorů možné dosáhnout několika způsoby. Prvním z nich jsou odlišné expoziční časy. Toto řešení se však nejeví ideálním. Rozdílné expoziční časy v kombinaci s měnící se scénou způsobují, že obrazy na jednotlivých snímačích jsou odlišné a nelze je dokonale spojit. Druhou metodou je zapojení neutrálních šedých filtrů o různých propustnostech. Tyto se předřadí snímačům a způsobí tak odlišné expozice na jednotlivých čipech. Poslední navrhovanou metodou je vychýlení zrcadlového jehlanu mimo osu objektivu se zachováním rovnoběžnosti. Změnou rozdělení clonového otvoru na nepoměrně velké části dojde k požadovanému

<sup>17</sup> charge-coupled device, technologie výroby obrazových senzorů

omezení dopadajícího světla ne jednotlivé snímače. U sestrojeného prototypu byla zvolena druhá možnost změny expozic.

Nasnímané obrazy jsou v dalším procesu spojeny do jednoho HDR snímku způsobem odvozeným od metody uvedené výše. Pro podrobnosti a konstrukční detaily nahlédněte do [17].

### 3.2.2.2 SpheronVR – SpheroCamHDR

SpheronVR ([www.spheron.com](http://www.spheron.com)) je německá společnost, která vyvinula HDR kameru dosahující vysokého dynamického rozsahu a vysokého rozlišení pořízených snímků.

SpheroCam HDR je zařízení snímající sférické panoramatické snímky s rozlišením  $13000 \times 5300$  pixelů. Dynamický rozsah pořízených záběrů může dosahovat hodnot až  $1:10^8$ . Tato kamera používá ke snímání řádkový CCD senzor, který díky otáčení kamery pořídí snímek celé scény v horizontálním rozsahu  $360^\circ$ . Tento způsob snímání však přináší i problémy. Ty způsobuje především čas, který je nutný ke vzniku snímku. Dle dynamického rozsahu scény a zvoleného rozlišení obrazu může dosáhnout až 30 minut [4].

Snímky pořízené tímto zařízením jsou optimální pro použití v počítačové grafice a modelovacích technikách založených na fotografiích reálných scén<sup>18</sup>.

## 3.3 Formáty pro ukládání

S rozvojem metod vytváření HDR snímků vyvstala potřeba sjednoceného způsobu, jak taková data ukládat. Běžné souborové formáty pro LDR obrazy ukládají o snímané scéně jen tolik informací, kolik jsou schopny současné displeje zobrazit. K tomu jim postačuje 8 bitů na jeden barevný kanál obrazového bodu<sup>19</sup>. Tyto formáty bychom mohli označit za „orientované na výstup“ [18]. Výhodou těchto formátů je fakt, že před zobrazením nemusíme s obrazem nijak manipulovat. Navíc se neplýtvá prostředky na ukládání informací, které nelze zobrazit. Nevýhodou je, že tyto obrazy nejsme schopni zobrazit v lepší kvalitě na dokonalejších displejích, které se případně v budoucnu objeví. Stejně tak nezaznamenání barev a jasů mimo schopnosti nynějších displejů limituje zpracování a úpravu takových snímků [18].

Formáty „orientované na scénu“ mají odlišný přístup. Jejich cílem je uchovat původní zaznamenané hodnoty barev a jasů scény, jak nejvěrněji je to možné. Zobrazení pak vyžaduje mapování hodnot pixelů do rozsahu zobrazitelného příslušným displejem. Tato operace se nazývá tone-mappingem a věnuje se jí kapitola 4. Výhodou přesunutí těchto omezení zaznamenaných hodnot až před proces jejich zobrazení je skutečnost, že můžeme taková data korektně zobrazit na libovolném

---

<sup>18</sup> Image-based rendering and lighting. Český překlad není ustálený

<sup>19</sup> Jeden pixel se tvoří ze tří barevných kanálů a případně jednoho kanálu průhlednosti.  $3 \cdot 8 = 24$  a tedy rozšířený sRGB barevný prostor využívá 24 bitů pro popis jednoho pixelu

dnešním i budoucím displeji. Plného rozsahu zaznamenaných hodnot se využije i k dokonalejším úpravám obrazu.

Hlavním úkolem formátů orientovaných na scénu je nalezení způsobu, jak efektivně uložit hodnoty v celém rozsahu, který nás zajímá. Přesně touto problematikou se zabývají i formáty pro ukládání HDR obrazu [18].

Obdobně jako v oblasti LDR obrazu vzniklo formátů pro ukládání HDR dat několik. Každý z nich nalézá uplatnění v závislosti na požadovaných vlastnostech. Tabulka 3.1 obsahuje přehled tří nejvyužívanějších formátů. Jejich detailnější popis je obsažen v následujícím textu. Vzájemné srovnání zájemci naleznou v [18], [4].

Formát	Kódování	Komprese <sup>20</sup>
HDR	RGBE	LRE
	XYZE	LRE
TIFF	IEEE RGB	-
	LogLuv24	-
	LogLuv32	LRE
EXR	half RGB	PIZ, ZIP

Tabulka 3.1: Přehled souborových formátů pro HDR obrazy [4]

### 3.3.1 HDR

G. Ward navrhl v 90. letech minulého století HDR formát jako součást projektu *Radiance*, fyzikálně orientovaného renderovacího systému. Formát HDR (.hdr) využívá kódování RGBE. Jak naznačuje tato zkratka, kódování používá 1 byte pro mantisu červeného kanálu, 1 byte pro mantisu zeleného kanálu a 1 byte pro mantisu modrého kanálu. Poslední písmeno E značí exponent společný pro všechny tři kanály. Ten je representován hodnotou posledního 4. bytu (obrázek 3.3). Bitová hloubka je tedy 32 bitů na pixel.



Obrázek 3.3: Význam bitů v RGBE kódování [4]

RGBE kódování nepodporuje záporné hodnoty barevných složek a nepokrývá tak celou škálu viditelných barev. Lze použít kódování XYZE a dosáhnout tak možnosti zaznamenat celý viditelný barevný gamut. Převod barevného prostoru RGB na XYZ je popsán v [4].

<sup>20</sup> Vysvětlení jednotlivých zkratk a principů těchto kompresních metod lze nalézt v [19]



HDR soubor obsahuje textovou hlavičku následovanou informacemi o rozlišení a orientaci obrazu. Za těmito údaji jsou uložena obrazová data komprimovaná LRE kompresí. LRE komprese vede k úspoře přibližně 25% velikosti souboru. Data jsou tak stejně velká jako s nekomprimovaným 24bitovým RGB kódováním [4]. Tento formát dosahuje přesnosti zaznamenaných barev kolem 1%<sup>21</sup> a umožňuje zachytit dynamický rozsah až  $1:10^{76}$  [18].

Z uvedených vlastností HDR formátu vyplývá několik záporů. Zachytitelný dynamický rozsah je zbytečně rozsáhlý na úkor přesnosti. Stejně tak při kódování XYZE jsou neefektivně kódovány i nereálné barvy. Krok kvantizace blízký hodnotě 1% vede v jistých případech k viditelnému proužkování<sup>22</sup> v obraze [18]. Přesto je tento formát jedním z nejrozšířenějších především díky široké podpoře v komerčních aplikacích.

### 3.3.2 TIFF

Tagged Image File Format (.tiff, .tif) je jedním ze souborů pro ukládání rastrového obrazu. Pro popis obrazových dat nabízí 3 kódování.

Prvním z nich je 32bitový IEEE *float*, datový typ běžně používaný pro hodnoty desetinných čísel. Pro popis barevných kanálů pixelu je tedy využito  $3 \cdot 32$  bitů. Dynamický rozsah pokrytý touto reprezentací je téměř  $1:10^{79}$ . Nevýhodou tohoto kódování je jeho extrémní velikost souborů. Ty jsou až 3krát větší než stejná data ve formátu RGBE. Navíc tato data nelze účinně komprimovat [4].

Z požadavků na úspornější velikosti souborů vzniklo kódování LogLuv. Princip kódování je stejný pro obě varianty a vychází z logaritmické citlivosti oka na jasové změny obrazu. Z obrazových dat je vypočtena intenzitní jasová složka Y a chromatičnost v barevném kódování CIE (u,v)<sup>23</sup>. Jasová složka je poté logaritmicky kvantována. Detaily výpočtu lze nalézt v [4]. Uspořádání bitů pro 24bitovou i 32bitovou verzi LogLuv kódování představuje obrázek 3.4.



Obrázek 3.4: Význam bitů v LogLuv kódování pro 24bitovou a 32bitovou variantu [4]

Varianta tohoto kódování s 24 bity na pixel dosahuje kvantizačního kroku 1,1% a je schopna zachytit dynamický rozsah  $1:10^{4,8}$ . LogLuv s 32 bity na pixel dokáže při relativním kroku 0,3% zaznamenat rozsah jasů až  $1:10^{38}$  [4]. 32 bitovou variantu kódování lze rovněž komprimovat pomocí LRE komprese. Průměrná účinnost komprese se pohybuje kolem 40% [4].

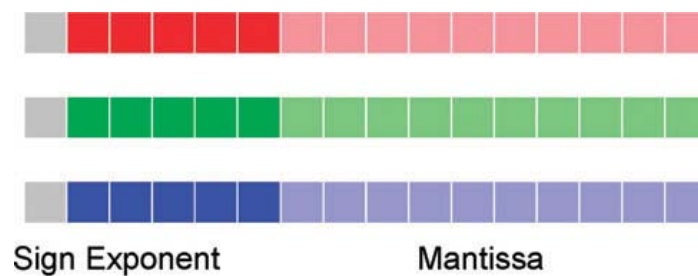
<sup>21</sup> Při kvantizaci jasu, tak jak ji provádí kódování, je nutné udržet hodnotu kroku pod 1%, jinak hrozí, že kvantizační kroky budou viditelné pro člověka

<sup>22</sup> Angl. banding

<sup>23</sup> Detaily viz. např. [4]

### 3.3.3 EXR

Formát OpenEXR (.exr) vyvinula v roce 2002 společnost Industrial Light & Magic. Ta jej do té doby používala jako interní formát využívaný při produkci digitálních vizuálních efektů [18]. Tento obrazový formát pracuje s datovým typem *half*<sup>24</sup>. Grafické znázornění významu jednotlivých bitů je zachyceno na obrázku 3.5. Formát EXR podporuje také běžný 32 bitový *float*.



Obrázek 3.5: Význam bitů ve formátu EXR. Jednotlivé barevné složky pixelu uložené jako datový typ *half* [4]

Datový typ *half* může reprezentovat i záporné hodnoty barevných primitiv, a proto EXR formát pokrývá celé viditelné barevné spektrum. Jím zaznamenaný dynamický rozsah může být až  $1:10^{10.7}$ . Dosahovaná relativní přesnost tohoto formátu dat je 0,1%, což je hluboko pod hranicí, kterou by mohl člověk rozeznat [18]. Tato vysoká přesnost umožňuje značnou manipulaci s obrazem, aniž by se projevil artefakty. To ve spojení s hardwarovou podporou, kterou tento formát má u hlavních výrobců grafických karet, předurčuje jeho využití v počítačové grafice [4].

Pro práci s tímto formátem byla uvolněna knihovna napsaná v jazyce C++. Ta umožňuje data v tomto formátu číst, zapisovat, podporuje ukládání obrazu v různých velikostech nebo třeba pouze výřez obrazu. Data uložená ve formátu EXR lze komprimovat metodami ZIP a PIZ (průměrná účinnost přibližně 60%).

Formát EXR také kromě základních barevných kanálů můžeme uložit například alfa kanál nebo kanál odpovídající z-bufferu, popř. jiná uživatelsky definovaná data [4]. To souvisí s jeho širokým využitím v oblasti filmových triků a počítačových her.

---

<sup>24</sup> Datový typ *half* je obdobou typu *float*, od kterého se odlišuje počtem bitů. Skládá se z 1 znaménkového bitu, 5 bitů exponentu a mantisy na 10 bitech. Rozsah datového typu je  $6 \cdot 10^{-8} - 6,5 \cdot 10^4$  [20]

## 3.4 Zobrazování HDR scén

S rostoucím zájmem o HDR obraz rostla i potřeba zobrazovat tato data. Velký rozdíl mezi maximálním dynamickým rozsahem zachycených scén a limitovanými možnostmi jej zobrazit na současných zobrazovacích zařízeních (kapitola 2.2) vedl k několika návrhům řešení.

První možností je vývoj zcela nových displejů. Jejich technologii je nutné navrhnout tak, aby byly schopny zobrazit dynamický rozsah i těch nejkонтрастnějších scén. Tato technologická výzva vedla ke vzniku několika zařízení, jejichž vlastnosti splňují požadavky na HDR displeje. Představení těchto zobrazovacích zařízení je obsaženo v následující kapitole.

Snahou je HDR obraz nejen zobrazovat na displejích, ale některé aplikace jej vyžadují v tištěné podobě. Stručným popisem stavu vývoje na poli vytváření HDR tisků se zabývá podkapitola 3.4.2.

Problematiku HDR zobrazování uzavře podkapitola nastiňující kroky nutné k zobrazení HDR obrazů na současných LDR displejích.

### 3.4.1 HDR displeje

Primárním zájmem je získat možnost zobrazovat HDR obrazy přímo bez nutnosti předzpracování. K tomuto cíli se nejvíce přiblížily zařízení, jejichž návrh je popsán v [21].

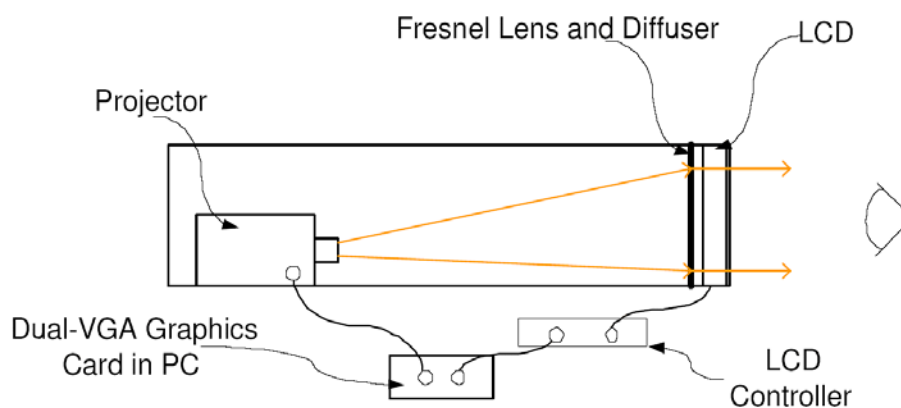
Autoři těchto návrhů ve spolupráci s firmou Sunnybrook Technologies představili dvě řešení využívající stejnou myšlenku, ale lišící se v použité technologii. Princip obou zařízení spočívá ve využití LCD panelu jako optického filtru s proměnlivým přenosem k modulaci vysoce intenzivního obrazu s nízkým rozlišením.

Jako zdroj světla je v prvním případě zvolen dataprojektor. DLP dataprojektor tvořící zdroj světla a zároveň první modulátor byl zbaven barevné čočky z důvodu zvýšení jeho jasů. Jeho světlo osvětluje skrze Fresnelovu čočku zadní stěnu LCD panelu. Fresnelova čočka zapříčiní, že paprsky z projektoru jsou po průchodu skrze ni rovnoběžné a zvyšuje tak jas obrazu. LCD panel byl zbaven konvenčního podsvětlení a dalších vrstev na zadní stěně, aby jím mohlo světlo projektoru volně procházet. Procházející světlo je modulováno LCD kontrolérem a je vytvářen výsledný obraz. Schéma celého návrhu zachycuje obrázek 3.6.

Výsledná sestava dosahuje výborných obrazových vlastností. Naměřený dynamický rozsah přesahuje 50 000:1. Maximální jas tohoto displeje se pak blíží ke 2700 cd/m<sup>2</sup>. Výsledný obraz díky nepřesnostem v zarovnání obrazu projektoru a struktury LCD monitoru trpěl moaré efektem<sup>25</sup>. Ten byl odstraněn mírným rozmazáním obrazu dataprojektoru a kompenzací tohoto rozmazání v LCD panelu [21].

---

<sup>25</sup> Moaré je efekt vznikající při překrývání dvou pravidelných obrazců, jež jsou si podobné (mají stejnou frekvenci), ale nejsou dokonale vyrovnány což vede ke vzniku interferenčních obrazců



Obrázek 3.6: Schéma technologie HDR displeje navrženého v [21]

Tento návrh má však několik nevýhod. Celá sestava je značně rozměrná. Dataprojektor ve snaze dosáhnout co nejvyššího jasu má značnou energetickou spotřebu a trpí zahříváním. V neposlední řadě je překážkou v rozšíření tohoto řešení jeho cena [21].

Ve snaze omezit zmíněné problémy vytvořili Seetzen a kol. druhý návrh HDR displeje, který nahrazuje dataprojektor polem LED diod. Ty jsou uspořádány v hexagonální síti bezprostředně za LCD panelem. Toto řešení je mnohem kompaktnější, neboť není zapotřebí Fresnelova čočka ani rozměrný projektor. Každá z diod je individuálně řízená a její světlo závisí na zobrazovaném obraze. Proto se sníží i energetické nároky zařízení, neboť v tmavých scénách mají diody menší spotřebu energie.

Toto řešení dosahuje obdobného dynamického rozsahu jako předchozí. Maximální jas je však ještě vyšší, a to  $8500 \text{ cd/m}^2$ . Krom snížení energetických nároků a přehřívání soustavy se snížila i cena, která však zůstává stále vysoká v poměru k běžným LCD monitorům [21].

HDR displeje založené na představené technologii s podsvětlením pomocí LED diod jsou nyní komerčně nabízeny společností Dolby Laboratories.

### 3.4.2 HDR tisk

Uložit HDR obraz na pevné médium, na kterém by jej bylo možné prohlížet, je obtížný úkol. Z údajů uvedených v tabulce 2.3 vyplývá, že běžné fotografické papíry toho nejsou schopny.

Limity tisku na pevné médium jsou dány především tím, že maximální jas obrazu na papíře je dán světlem, které se od papíru odráží. Displeje disponují vlastním světelným zdrojem, zajišťujícím jejich podsvícení. Ten jim zajišťuje jejich výhodu v porovnání s tiskem na papír. Ve stinných partiích obrazu naopak dochází k opačnému problému. Dnešní inkousty používané k tisku nejsou schopny pohltit všechno světlo na výtisk dopadající a navodit tak obraz dokonale černého bodu. Tím se snižuje dynamický rozsah v tmavých partiích [4].

V oblasti tisku HDR obrazu tedy vzniká stejná potřeba jako u konvenčních displejů. Před zobrazením snímku s vysokým dynamickým rozsahem je nutné tento rozsah nejprve zredukovat.

### 3.4.3 Zobrazování na LDR displejích

Navzdory prudkému rozvoji HDR displejů je stále nejčastějším zobrazovacím zařízením běžný LDR displej. Jeho dynamický rozsah je však natolik malý, že přímé zobrazování HDR obrazů je nemyslitelné.

Zobrazení HDR snímku na běžném monitoru musí předcházet komprese jeho dynamického rozsahu. Tato komprese však musí zachovat co nejvěrnější podobu se zaznamenanou reálnou scénou. Toho lze dosáhnout, akceptuje-li metoda této komprese vlastnosti lidského vnímání a podřídí se jim. Oko je totiž velmi citlivé na lokální hodnoty a změny kontrastu a méně citlivé na celkový absolutní jas scény, přičemž tento může být vhodně snížen [22]. Tato konverze jasů reálné scény na hodnoty jasu zobrazitelné na LDR displeji se nazývá tone-mapping. Popis tohoto procesu, jeho principů a dosažitelných výsledků je obsažen v následujících kapitolách.

# 4 Tone-mapping

Proces tone-mappingu je v současné situaci jednou z nejdiskutovanějších otázek. To vyplývá z faktu, že potřeba zobrazovat HDR data je vysoká jak v kruzích vědeckých, tak i v oblasti širšího využití. Rozvoj a rozšíření nových technologií výroby HDR displejů v současné době není na dostatečné úrovni, a proto je problematika tone-mappingu intenzivně zkoumána. Bez této techniky totiž není možné zobrazovat HDR obrazy na současných LDR zobrazovacích zařízeních.

Původně byl tone-mapping fotografickou technikou. Při té se změnou vyvolávacího procesu pro světlá a tmavá místa scény snažili fotografové zachytit celý dynamický rozsah zaznamenaný na filmovém negativu přenést jej do výsledné fotografie [4].

Metody tone-mappingu (někdy také nazývány jako operátory tone-mappingu, TMO) by měly splňovat jistá kritéria, aby byly považovány za kvalitní. Tyto požadavky a problémy, vznikající při jejich porušení, shrnuje kapitola 4.1.

Intenzivní rozvoj v oblasti tone-mappingu dokládá velké množství prezentovaných metod. Jejich základní rozdělení a popis principu vybraných metod je obsahem kapitoly 4.2.

## 4.1 Požadavky na tone-mapping

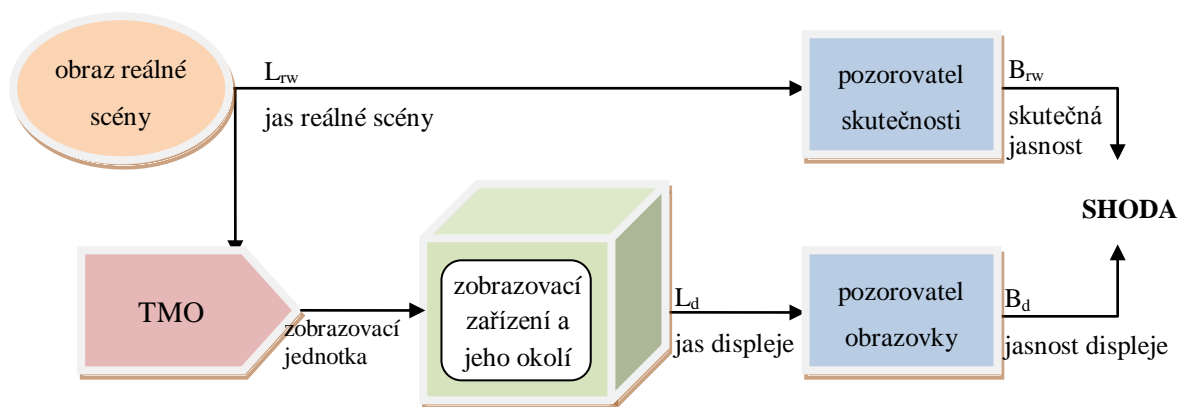
Obecně si tvůrci jednotlivých TMO definovali svá vlastní kritéria kvality a požadavky na jimi vyvíjené metody. Tento fakt také zapříčinil komplikovanější srovnávání kvalit jednotlivých metod navzájem. Lze samozřejmě měřit čas, který potřebují metody ke komprimaci obrazu, ale tento aspekt není relevantní v otázce kvality výstupu jednotlivých TMO. Řešení tohoto problému nabízí např. Yoshida a kol. v [23].

Obecně je úkolem tone-mappingu taková komprese jasů reálné scény, aby tato byla zobrazitelná na LDR displeji. Hlavním požadavkem je, aby vnímání této scény (jasů, kontrastu a barev) bylo totožné pro pozorovatele skutečné scény i pozorovatele jejího obrazu na zobrazovacím zařízení [22]. Tento požadavek zachycuje schematicky obrázek 4.1.

Dalším definovaným kritériem TMO je zachování viditelnosti. Ta je definována následovně: „Jste schopni vidět objekt v reálné scéně jen a jen tehdy, pokud jej můžete vidět na displeji. Objekty nemizí v pře/podexponovaných oblastech a v středních tónech se neztrácejí detaily [22].“

Tyto dva základní požadavky jsou často protichůdné a mnoho metod se zaměřuje jen na jeden z nich, popř. volí kompromisní řešení k oběma těmto požadavkům. Vzhledem k jejich rozšíření se těmito požadavky budu řídit ve své práci i já.

Obecně by měla metoda tone-mappingu fungovat na celé škále vstupních obrazů bez ohledu na jejich dynamický rozsah. V této souvislosti je také nutné korektní chování v případě zobrazování obrazu s nízkým dynamickým rozsahem, který je možné zobrazit bez komprese jasů.



Obrázek 4.1: Hlavní problém tone-mappingu: zajistit shodné vnímání reálné i zobrazované scény [24]

## 4.2 Metody tone-mappingu a jejich rozdělení

Základní úkol tone-mappingu je redukovat (namapovat) široký rozsah jasů zachycený v HDR obraze na omezený rozsah zobrazitelný běžným displejem. K řešení tohoto problému se nabízejí se dva možné přístupy.

Pokud budeme vytvářet mapování nezávislé na poloze pixelu na obrázku, mluvíme o globálních metodách komprese. Tato skupina metod vyniká svojí rychlostí a jednoduchostí, protože si stačí předpočítat převodní tabulku a aplikovat ji na hodnoty jednotlivých pixelů. Nevýhodou je často nedostatečná komprese. Hlavně v případě, že HDR data pokrývají víceméně celý dynamický rozsah, je zachování lokálního kontrastu velmi problematické [25].

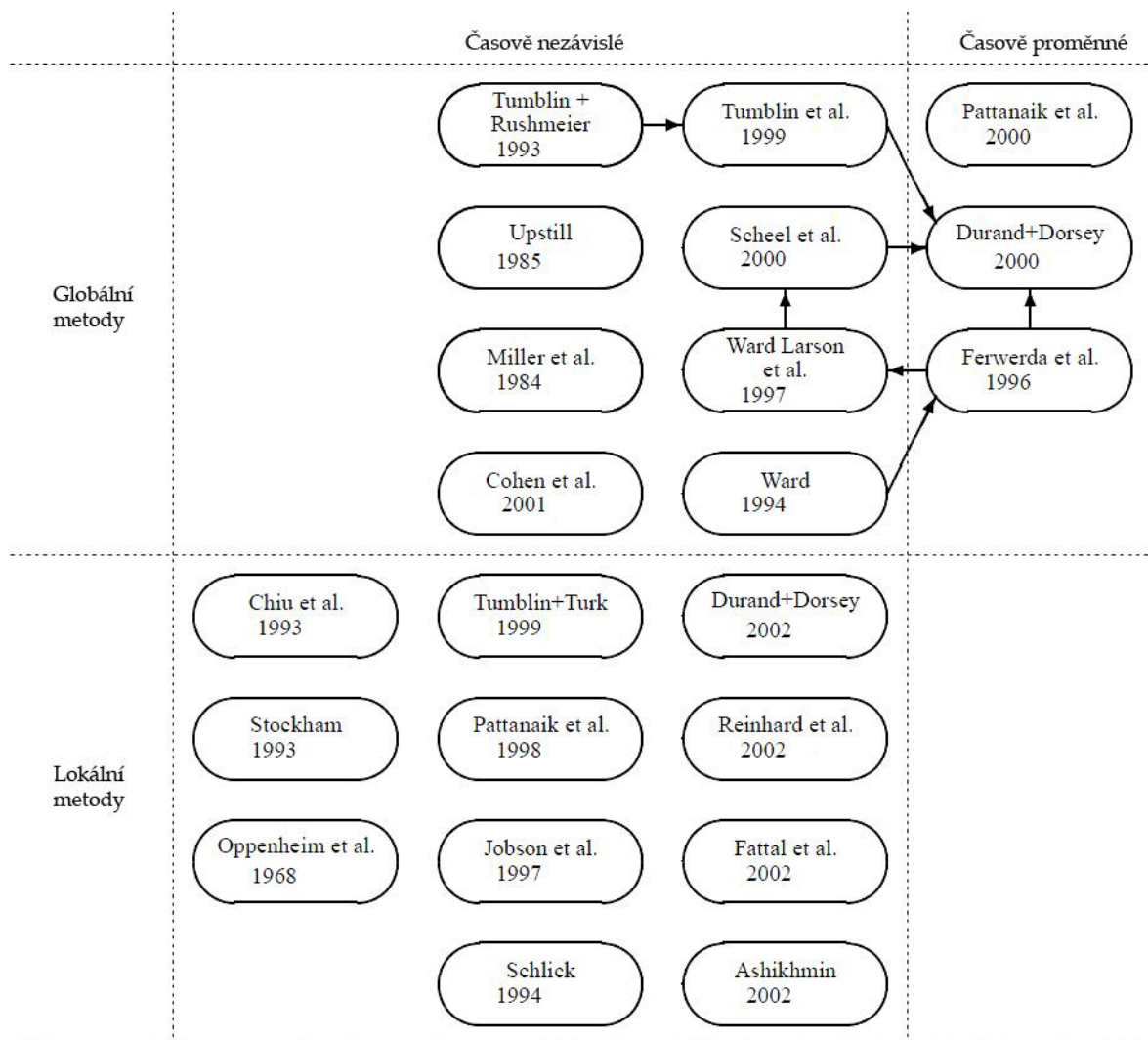
Druhou možností je snažit se najít mapování, které určitým způsobem zohledňuje polohu pixelu v obraze. Mapovací funkce se pak mění v závislosti na charakteristikách různých částí obrazu. Takové metody nazýváme lokální metody tone-mappingu. Hlavní výhodou těchto metod je fakt, že lokální adaptace mapovací funkce zpravidla vede ke značnému vylepšení lokálního kontrastu výsledku a tím dodržení požadavku viditelnosti. Mezi nevýhody této skupiny metod pak patří především výpočetní složitost a možnost vzniku všemožných artefaktů, způsobených právě lokálními variancemi mapování [25].

Dalším hlediskem, podle kterého lze TMO rozlišovat, je princip, na kterém jsou založeny. Z tohoto hlediska je dělíme na empiricky založené a směřované na lidské vnímání. Empirické operátory se zaměřují na splnění kritérií jako dostatečné komprese dynamického rozsahu, zachování detailů či vyvarování se artefaktům. Metody založené na lidském vnímání se snaží vytvářet obrazy, které jsou vizuálním napodobením vzhledu scény [26]. Toto dělení metod je méně časté.

Okrajově se metody TMO dělí také na statické a dynamické [26], neboli časově nezávislé a proměnné v čase [27]. Tímto dělením se odlišují metody navrhované pro zpracování statických dat a metody pro mapování záběrů videosekvencí. TMO pro videosekvence jsou předmětem výzkumu posledních let, neboť je snaha vytvářet nejen působivé fotografie, ale i filmy. Hlavní zájem na

vytvoření kvalitního dynamického TMO mají především filmová studia a producenti, protože by jim nabídl další prvek, jak přilákat diváka na co nejrealističtější vyhlížející filmy. Pozornost je na dynamické TMO upřena především proto, že jejich návrh je komplikovanější o fakt, že musí produkovat časově stabilní výsledky. Jeden snímek videa po zpracování nesmí být výrazně odlišný od snímků okolních i přesto, že tyto byly nasnímány za odlišných světelných podmínek.

Přehled základních metod publikovaných do konce roku 2002 je obsažen na obrázku 4.2 i s rozdělením na globální a lokální TMO a vyznačením menšinové skupiny časově proměnných metod tone-mappingu.



Obrázek 4.2: Přehled vývoje metod tone-mappingu [27]



## 4.2.1 Globální TMO

Nejjednodušší mapování tonality je lineární mapování, které mapuje rozsah jasů scény do rozsahu mezi 0 a 255<sup>26</sup>. Pokud jsou namísto hodnot jasu mapovány na stejný rozsah hodnoty logaritmu jasu, je toto mapování označováno za logaritmické lineární mapování. Lineární mapování se téměř nepoužívá, neboť jeho použití vede k neúměrnému ztmavení celého obrazu, ztrátě kontrastu a tím i detailů. To je způsobeno tím, že běžně je v obrazu obsaženo jen malé procento velmi jasných bodů, které však lineární mapování považuje za zcela relevantní a zbývající hodnoty je nuceno namapovat do velmi omezeného rozsahu hodnot.

Další metody jsou založené na úpravě histogramu obrazu. K těm se řadí např. metoda Larsona Warda [22]. Ten svoji metodu zaměřil na zlepšení viditelnosti detailů ve výsledném obraze. Toho dosáhl zohledněním větší citlivosti lidského vnímání na relativní rozdíly oblastí obrazu než na absolutní hodnoty jasů. Dynamický rozsah vstupního obrazu je redukován pomocí ekvalizace histogramu. Silně je komprimován kontrast oblastí obrazu, které na histogramu leží v řídké zaplněných oblastech s přihlédnutím k nebezpečí nechtěného navýšení kontrastu v ostatních oblastech scény. Tato metoda je dále doplněna o model popisující oslnění oka, citlivost na barvy a zrakovou ostrost. Detaily tohoto TMO nalezne zájemce v [22].

Příkladem dynamické globální metody je metoda prezentovaná v [28]. Tato metoda je založena na modelu lidského vnímání. Ten vychází z psychofyzických experimentů a modelu vnímání jasu. Při činnosti tohoto TMO je zohledňován především časový průběh adaptace lidského oka při změnách osvětlení scény. Právě rychlost této adaptace se promítá do tone-mappingu videa a interaktivních HDR aplikací. Metoda může být rozdělena do dvou modelů: modelu vizuální adaptace a modelu vizuálního vnímání. Na základě zkoumání adaptace lidského vidění byly odvozeny signály, které metoda používá k modifikaci každého pixelu obrazu. Pro dokonalé zachycení vzezření scény definuje uživatel referenční bílou a černou barvu. Model vnímání poté přepočítá hodnoty bodů v závislosti na těchto referenčních hodnotách. Spojením těchto modelů v jeden systém je utvořena metoda, která mění vzhled scény s ohledem na vizuální adaptaci v závislosti na čase [23].

Přehled mnoha dalších metod a jejich základních principů lze nalézt v [27].

## 4.2.2 Lokální TMO

Lokální změna mapovací funkce je vázána u každé metody na jinou vlastnost obrazu. Zajímavou metodou je TMO publikovaný v článku „Photographic Tone Reproduction for Digital Images“ [29], jehož autory je Erik Reinhard a kolektiv.

---

<sup>26</sup> 0 a 255 jsou hodnoty minimálního a maximálního jasu zachytitelného na 8 bitech vyhrazených pro hodnotu jednoho pixelu obrazu v běžných obrazových formátech

Jak už sám název napovídá, tato metoda staví na principu používaném při vyvolávání fotografií již po mnoho let. Tato technika se nazývá „dodging and burning“, česky pak „nadržování a vykrývání“. Princip spočívá v prodlužování osvětlení negativu v tmavých oblastech, aby se v nich vykreslily detaily, a v zakrývání oblastí světlých, aby se zabránilo ztrátě detailů přeexponováním. Obdobný princip autoři navrhli pro digitální data.

V prvním kroku metody se musí nastavit požadovaná průměrná světlost výsledného obrázku. K tomu slouží hodnota key scény. Ta udává, zda je scéna celkově subjektivně světlá (high-key), normální nebo tmavá (low-key). Hodnota key normální scény je dle autorů volena jako 0,18<sup>27</sup>. Při zvolené hodnotě key přepočítáme světlost vztahem

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y) \quad (4.1),$$

kde  $a$  je zvolená hodnota klíče,  $\bar{L}_w$  je průměrný jas scény a  $L_w(x, y)$  je hodnota zpracovávaného pixelu.

Metoda dále minimalizuje vliv malých, ale velmi světlých míst. Rovnice operátoru má pak tvar

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (4.2).$$

Výpočet tímto způsobem zaručuje, že malé světlosti jsou poděleny hodnotou 1, zatímco velké budou zmenšeny přibližně faktorem  $\frac{1}{L}$ . Tím je zaručeno, že všechny hodnoty jasů jsou nyní zobrazitelné v rozsahu displeje. To však nemusí být žádoucí a ve snaze zachytit množství detailů je dovoleno, aby některé hodnoty překročily zobrazitelnou mez

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left( 1 + \frac{L(x, y)}{L^{white}} \right)}{1 + L(x, y)} \quad (4.3),$$

kde  $L^{white}$  je nejnižší hodnota jasu, která bude namapována jako maximální hodnota zobrazitelná na displeji (čistě bílá barva).

Takto vyjádřený globální TMO je úspěšný ve většině případů. Pro jeho zlepšení v situacích s opravdu vysokým dynamickým rozsahem je do metody zanesen již zmiňovaný princip lokálního nadržování a vykrývání. V rámci této metody jde na tento efekt nahlížet jako na lokální určování hodnoty key pro každý pixel.

Autoři ve své práci vysvětlují volbu tvaru a správné velikosti okolí zkoumaného bodu. Po přidání tohoto lokálního okolí do výpočtu lze mapovací funkci metody vyjádřit jako

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + V_1(x, y, s_m(x, y))} \quad (4.4),$$

---

<sup>27</sup> Tato hodnota odpovídá středně šedé barvě, dle vnímání pozorovatelem

kde  $V_1(x, y, s_m(x, y))$  značí průměrný jas v okolí velikosti  $s_m$  právě zpracovávaného pixelu. Pokud je zpracovávaný pixel tmavý, pak je jeho hodnota nižší než průměrná světlost okolí a výsledná hodnota zlomku je menší než hodnota zlomku před úpravou v lokální metodu. Tím dojde k zesílení lokálního kontrastu. V případě, že je průměrná světlost v okolí menší než světlost pixelu, je hodnota pixelu komprimována méně. V každém případě je ale lokální kontrast zesílen [29].

Jiný přístup lokální metody představují ve své práci Fattal, Lischinski and Wermann [30]. Jejich metoda je výpočetně efektivní a konceptuálně jednoduchá. Na základě hodnot gradientů v obraze se jejich metoda zaměřuje na komprese oblastí s vysokými hodnotami gradientů. Ty představují absolutní hodnoty jasů, na které člověk není příliš citlivý. Naproti tomu nízké hodnoty gradientů znamenají lokální malé změny jasů, které představují jemné detaily, jako například textury. Na tyto změny jasu je lidské vnímání citlivé a ty jsou metodou ponechány. Metoda nebere v potaz dokonalou přesnost vzniklého obrazu k skutečnému vnímání scény, ale nabízí rychlé a efektivní řešení tone-mappingu [27].

Na podobné myšlenky oddělení absolutních hodnot osvětlení a lokálních změn kontrastu je založena i následující metoda. K oddělení těchto složek využívá bilaterálního filtrování. Jejím popisu a návrhu implementace se věnuje následující kapitola.

## 5 Bilaterální filtr

Filtrování je jednou ze základních operací ve zpracování obrazu a v oblasti počítačového vidění. Obecně je filtr funkce, předepisující bodu na určité pozici ve výstupním obrazu hodnotu na základě hodnot bodů v obraze vstupním. Filtry lze rozdělit na bodové, lokální a globální. Jedním z obrazových filtrů lokálních je i bilaterální filtr.

Bilaterální filtrování (BF) je operací používanou pro vyhlazování obrazu s ponecháním kontrastních hran. Metoda je jednoduchá, neiterativní a lokální. Kombinuje hodnoty pixelů v závislosti na jejich blízkosti v prostoru a podobnosti hodnoty. Při této kombinaci jsou upřednostňovány hodnoty prostorově blízké a hodnotou podobné. Pro barevné obrazy je možné filtr aplikovat na každou barevnou složku zvlášť. Výhodnější je však oddělit barevnou informaci od jasové a dále filtrovat pouze jasovou složku. Lze také napodobit lidské vnímání a použít raději CIE-Lab<sup>28</sup> barevný model a rozmazat pouze barevné složky obrazu a jasovou zachovávající hrany ponechat [31].

Bližší popis bilaterálního filtru a způsobu jeho použití pro tone-mapping HDR obrazu je obsažen v následujících podkapitolách.

### 5.1 Princip bilaterálního filtrování

Bilaterální filtr je řešením problému vyhlazování spojitých regionů se současným zachováním kontrastních hran. Tohoto výsledku bylo dosaženo kombinací závislosti prostorové (polohy bodu v obraze) a závislosti mezi hodnotami obrazových bodů. Tento filtr je lokální a jeho princip pro filtrování obrazu popsali Tomasi a Manduchi v [31].

Prostorová blízkost bodů obrazu je vyjádřena pomocí dolní propusti. Jejím prostřednictvím se spočítá vážený průměr v okolí daného bodu. Váha se vzdáleností neklesá lineárně, ale pokles je definován Gaussovou funkcí. Tento princip sleduje myšlenku, podle které je velmi pravděpodobné, že hodnoty obrazových bodů v blízkém okolí budou velmi podobné, a proto je možné je průměrovat. S rostoucí vzdáleností však tato pravděpodobnost klesá. Při výpočtu průměru je odstraněn šum, který narušoval hodnoty počítaných bodů [31].

Tento přístup pomalé změny hodnot obrazových bodů však selhává v okamžiku, kdy se do výpočtu zahrnou hrany. Průměrováním jsou totiž silně rozmazány a kvalita výsledného obrazu klesá. Je tedy nutné vyhlazovat spojité regiony a přitom se vyhnout rozmazání hran. Lze použít několik přístupů. Hojně používaným je anizotropní difúze. Tento filtr zjišťuje pro každý bod obrazu lokální

---

<sup>28</sup> Barevný model popisující hodnotu pixelu pomocí jedné hodnoty jasu a dvou hodnot definujících barvu. Viz. např. [32]

změny v jeho okolí a jejich gradienty a na základě těchto informací určí okolí, ze kterého bude počítán průměr. Algoritmus je založen na řešení parciální derivací, a proto je jeho výpočet nutně iterativní. Z tohoto faktu také plyne největší nevýhoda tohoto filtru, jeho nízká efektivita [31].

Bilaterální filtr problém s kontrastními hranami překonává díky zapojení druhé váhovací funkce, která zohledňuje podobnost hodnot zpracovávaných pixelů. I tato funkce určuje váhy hodnot pixelů na základě Gaussovy funkce.

Výsledná hodnota pixelu výstupního obrazu je tedy dána jako normalizovaná suma váhovaných hodnot všech pixelů z okolí ve vstupním obraze, přičemž váha je dána hodnotou vzdálenostní funkce a hodnotou podobnostní funkce

$$J_s = \frac{1}{\sum_{i \in \Omega} w(s, i) g(I_s, I_i)} \sum_{i \in \Omega} w(s, i) g(I_s, I_i) I_i \quad (5.1),$$

kde  $w$  je vzdálenostní váhovací funkce,  $g$  je podobnostní váhovací funkce a  $\Omega$  značí všechny pixely z okolí bodu. Parametry funkce  $w$  jsou polohy bodů v obraze, hodnoty jasu v těchto bodech jsou pak použity jako parametry funkce  $g$ . V tomto vyjádření vystupují sumy, neboť obraz je uvažován jako diskrétní pravoúhlá mříž bodů. V [31] autoři pracují s obrazem jako spojitou funkcí, a proto v jejich vyjádření vystupují integrály.

V konkrétním vyjádření bilaterálního filtru dle [31] jsou jako váhovací funkce použity Gaussovy funkce. Pak je hodnota funkce  $w$  dána

$$w(s, i) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{d(s, i)}{\sigma_d} \right)^2} \quad (5.2),$$

kde  $d(s, i) = d(s - i) = |s - i|$  je Euklidovská vzdálenost mezi polohou bodu  $s$  a bodu  $i$ . A  $\sigma_d$  je rozptyl této Gaussovy funkce.

Podobnostní funkce  $g$  je vyjádřena jako Gaussova funkce následovně

$$g(I_s, I_i) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\delta(I_s, I_i)}{\sigma_r} \right)^2} \quad (5.3),$$

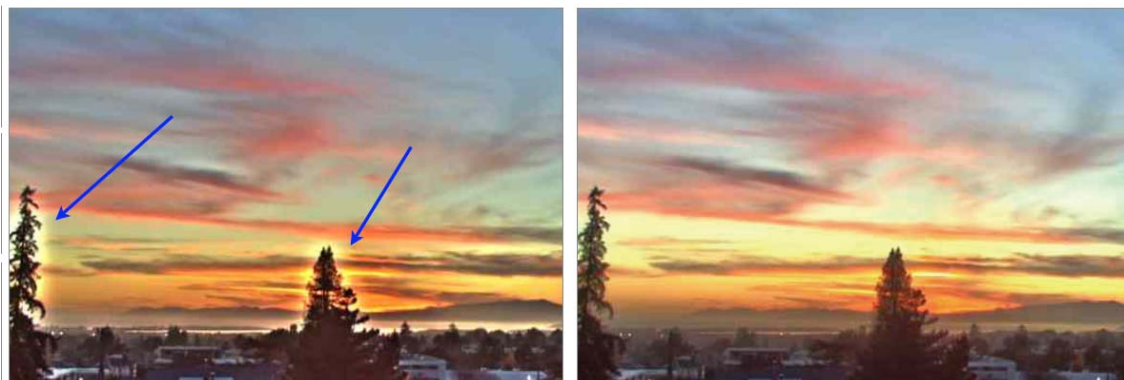
kde  $\delta(I_s, I_i) = \delta(I_s - I_i) = |I_s - I_i|$  je rozdíl mezi hodnotou bodu  $s$  a bodu  $i$ . A  $\sigma_r$  je rozptyl této Gaussovy funkce.

Pro barevné obrazy se filtr aplikuje nejčastěji na jasovou složku obrazu, vypočtenou z jeho barevných složek s ohledem na urychlení. Je však možné použít bilaterální filtr i na jednotlivé kanály, aniž by se zvýšilo riziko, že rozmazáním budou do obrazu zaneseny falešné barvy. Tomu zabrání váhování podle podobnosti hodnot. Autoři také zmiňují vhodnost použití barevného modelu CIE-Lab, s jehož využitím se do procesu filtrování zaneše aspekt popisující lidského vnímání.

Hodnoty  $\sigma_d$  a  $\sigma_r$  jsou nastavitelnými atributy tohoto filtru. Vysoká hodnota  $\sigma_d$  rozmazává značně obraz, neboť do váženého průměru jsou zahrnuty hodnoty pixelu i ze vzdáleného okolí. Hodnota tohoto parametru musí být přizpůsobena při změně měřítka upravovaného obrazu. Hodnota

parametru  $\sigma$ , určuje, jak moc odlišné hodnoty pixelů se ještě budou na průměrování podílet. Tento atribut ovlivňuje zachování kontrastních detailů obrazu. Pro zachování konzistentních výsledků je nutné jej přizpůsobit, pokud dojde k úpravě kontrastu vstupního obrazu. Ukázky výstupu při různém nastavení těchto parametrů lze nalézt v citovaném článku [31].

Význam bilaterálního filtru pro TMO je klíčový v tom ohledu, že na rozdíl například od běžného rozmazání Gaussovskou funkcí, bilaterální filtr nerozmazává kontrastní hrany a zabraňuje tak tvorbě „halo efektu“. Tento efekt je pro většinu lokálních TMO typický, avšak u bilaterálního filtru je pro běžné nastavení parametrů téměř dokonale potlačen. Názornou ukázkou obsahuje obrázek 5.1.



Obrázek 5.1: Rozdíl mezi konvenčním rozmazáním a rozmazáním pomocí bilaterálního filtru. Vyznačeny světlé kontury tzv. „halo efektu“

## 5.2 TMO s využitím bilaterálního filtru

Autory tohoto TMO jsou F. Durand a J. Dorsey [33]. Tato metoda využívá výše zmíněný bilaterální filtr k dekompozici HDR obrazu na dvě vrstvy.

Vstupem metody je HDR obraz, v článku vytvořený skládáním LDR snímků, obrázek 5.2 (viz. kapitola 3.2.1). Tato metoda HDR obraz rozdělí do základní (bázové) vrstvy obsahující globální osvětlení scény s pomalými změnami a detailní vrstvy, která obsahuje vysokofrekvenční změny jasu uchovávající detaily scény. Barevná informace obrazu je zcela oddělena (obrázek 5.3).

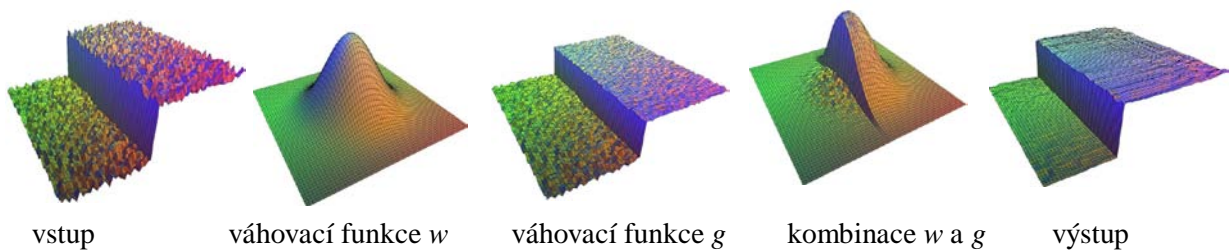


Obrázek 5.2: Vstupní HDR obraz složený z různě exponovaných LDR snímků [33]



Obrázek 5.3: Obrazy jednotlivých vrstev, vytvořených ze vstupního obrazu. Základní vrstva, detailní vrstva, oddělená barevná informace [33]

Bázová základní vrstva vytvořená použitím bilaterálního filtru obsahuje pomalé změny jasu (nízké frekvence) a ponechává si vysoce kontrastní hrany. Proces jejího vytvoření z vstupního obrazu zachycuje sekvence na obrázku 5.4. Takto modifikovaná vrstva je poté odečtena od původního obrazu, čímž je vytvořena vrstva detailní. Ta obsahuje jemné detaily scény, na které je lidské vnímání citlivé. Kompresi dynamického rozsahu je provedena jen na báze vrstvě čímž dojde k snížení absolutních hodnot jasů obrazu. Po tomto mapování je vytvořen finální obraz spojením upravené báze vrstvy a detailní vrstvy.



Obrázek 5.4: Princip bilaterálního filtru - vytvoření báze vrstvy [33]

V [33] autoři dále představují možnosti urychlení bilaterálního filtrování. K tomu využívají dvou způsobů: aproximace Gaussovy funkce v jasové oblasti linearizací po částech a podvzorkování obrazu v prostorové oblasti.

První optimalizace diskretizuje množinu možných hodnot intenzity do několika hodnot  $i^j$ . Pro každou z těchto hodnot je poté spočten lineární filtr

$$J_s^j = \frac{1}{k^j(s)} \sum_{i \in \Omega} w(s, i) g(i^j, I_i) I_i = \frac{1}{k^j(s)} \sum_{i \in \Omega} w(s, i) H_i^j \quad (5.4)$$

a

$$k^j(s) = \sum_{i \in \Omega} w(s, i) g(i^j, I_i) = \sum_{i \in \Omega} w(s, i) G^j(i) \quad (5.5).$$

Pro vstupní hodnotu pixelu  $I_s$  jsou určeny dvě nejbližší hodnoty  $i^j$ . Výsledná výstupní hodnota pixelu  $s$  je pak dána lineární interpolací mezi hodnotami  $J_s^j$  pro tyto dvě nejbližší  $i^j$ . To odpovídá linearizaci po částech originálního bilaterálního filtru.

Druhé navržené urychlení bilaterálního filtrování je zmenšení zpracovávaného obrazu. Durand a Dorsey ukazují, že až na finální interpolaci mohou být všechny operace filtrování provedeny na podvzorkovaném obraze. K podvzorkování používají autoři algoritmus nejbližšího souseda, který nemodifikuje histogram obrazu a je výpočetně nejméně náročný. Snížení výpočetní náročnosti po aplikování obou optimalizací je shrnut v citovaném článku.

Ke kompresi báze vrstvy je využito mapování v logaritmické doméně. Redukční poměr je zvolen dle uživatelského kriteria. Celkový jas snímku a tento kontrast, na který je redukována základní vrstva, jsou jedinými parametry metody, které umožňují ve svém návrhu autoři modifikovat. Velikosti rozptylů váhovacích Gaussových funkcí po několika testech nastavili autoři na konstantní hodnoty, které podávaly nejlepší výsledky.

Výsledná metoda tvoří poměrně robustní a rychlý TMO. Tone-mapping s využitím bilaterálního filtru netrpí tzv. „halo efektem“ vytváření barevných „duchů“ u kontrastních hran, čemuž zabráňuje zapojení podobnostní funkce v jasové oblasti. Tato metoda patří k těm, které se zaměřují na uchování viditelnosti detailů scény. Perceptuální věrnost vytvořeného obrazu je kompromisem a metoda nevyužívá žádného modelu lidského vidění a vnímání. Jeho dalším vylepšením může být volba jiné kompresní metody jasů báze vrstvy nebo začlenění modelu lidského vnímání [33].



## 6 Aplikace Bilateral filter TMO

Aplikace Bilateral filter TMO (BF TMO) implementuje TMO využívající bilaterální filtr. Cílem aplikace je nabídnout snadné rozhraní pro manipulaci s HDR obrazem, kompresi jeho dynamického rozsahu pomocí tone-mappingu a ukládání výsledného LDR obrazu. Pro účely této práce je doplněno měření rychlosti výpočtu a prvky pro snadné nastavování klíčových parametrů celého procesu.

Pro její názornost jsem zvolil základní variantu filtru bez jeho urychlovacích optimalizací. Tato varianta je sice nejpomalejší, ale její implementace je tou nejzákladnější a nabízí vhodnou příležitost pro porovnání s implementacemi jiných autorů, především projektem Qtpfsgui a jeho podčásti PfsTMO Grzegorza Krawczyka a implementací původních autorů bilaterálního TMO. Požadavky na aplikaci, jejich rozbor a návrh řešení obsahují následující kapitoly.

### 6.1 Požadavky na aplikaci

Základní operace, které by měl program provádět, jsou znázorněny na obrázku 6.1. Je patrné, že celá aplikace není nikterak složitá a celý proces se skládá ze sekvence několika kroků.

Aplikace by měla poskytovat přehledné uživatelské rozhraní, umožňující snadné načítání zdrojového obrazu v některém z datových formátů uvedených v kapitole 3.3. Pro vnitřní reprezentaci obrazových dat je nutné navrhnout datovou strukturu, která by umožňovala rychlý přístup k jednotlivým pixelům obrazu a jejich jasovým i barevným údajům. Vzhledem k faktu, že výpočet bilaterálního filtru je poměrně pomalý, je kladen důraz na zrychlení všech ostatních kroků, a proto je výhodné maximum možných informací o obraze uložit již při jeho otevření a nevypočítávat je až při činnosti filtru.

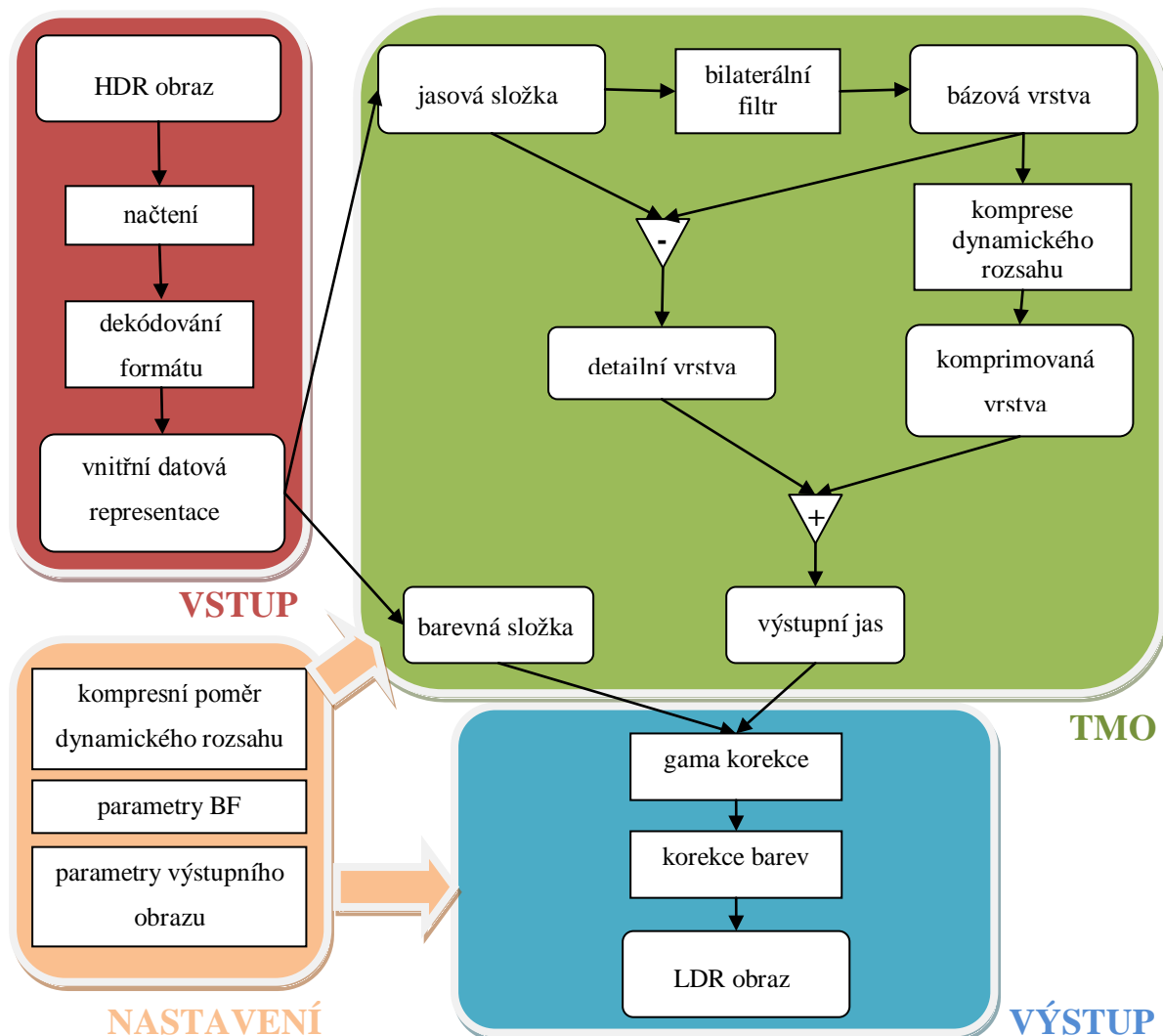
Dalším požadavkem je pohodlné nastavení parametrů bilaterálního filtru. S tím souvisí použití standardních ovládacích prvků v uživatelském rozhraní aplikace a maximální dodržení zavedených konvencí v ovládání okenních aplikací.

S časovou náročností výpočtu bilaterálního filtru souvisí také nutnost informovat uživatele o jeho výpočtu. Je také nutné, aby program i během výpočtu stále reagoval na události. V případě příliš dlouhého výpočtu by měl uživatel mít možnost výpočet, popř. celou aplikaci, korektně ukončit a uvolnit všechny zdroje využívané programem.

Výsledný obraz by měl být zobrazen formou náhledu, pro jeho kontrolu před uložením. Tento náhled by měl zobrazovat plnohodnotně obrázky s libovolnou velikostí a měl by umožňovat použití přibližování a oddalování pro lepší kontrolu výsledku.

Vytvořená aplikace bude využita k provedení srovnávacích testů s jinými implementacemi. Z tohoto důvodu by měla nabízet přidanou funkčnost se zaměřením právě na tuto problematiku, kterou běžný uživatel nevyužije. Nejvíce potřebné je zobrazení doby trvání výpočtu, což umožní

přesnější srovnání výkonnosti jednotlivých implementací. Dále je vhodným doplněním možnost exportu jednotlivých vrstev, ze kterých je výsledný obraz skládán (vrstva bázový, detailní, barevná informace). Tyto obrázky najdou využití při obrazové dokumentaci činnosti a výsledků aplikace.



Obrázek 6.1: Popis činnosti aplikace

## 6.2 Návrh aplikace

Výše uvedené požadavky jasně naznačují, že aplikace bude implementována jako okenní aplikace s uživatelským rozhraním a grafickým výstupem výsledného obrazu. Jádro aplikace by však mělo být napsáno tak, aby bylo možné použít je po mírné modifikaci i jako aplikaci pro příkazový řádek, která by byla vhodná, pokud by se předpokládalo použití programu jako součásti komplexního řetězce zpracování obrazu.

Rozhraní aplikace uživateli umožňuje nastavení základních atributů bilaterálního filtru tak, jak jsou popsány jeho autory. To by mělo uživateli poskytnout plnou kontrolu nad vzhledem výstupu. Na

druhou stranu je aplikace navržena co nejjednodušeji, aby nedocházelo k frustraci uživatele z množství možností. Výhodou jsou poznatky autorů metody o optimální volbě výchozích hodnot parametrů. Tyto jsou nastaveny jako výchozí a jsou vyhovující ve většině situací.

Návrh jádra TMO, bilaterálního filtru a celého procesu modifikace vstupního HDR obrazu na LDR obraz je totožný s popisem tohoto TMO z kapitoly 5 a částečně je zachycen i na obrázku 6.1. Detailnější popis je obsažen v kapitole věnující se implementaci.

Pro uložení jednotlivých vrstev obrazu a jeho parametrů je vytvořena třída `HdrImage`. Metody této třídy jsou navrženy pro modifikování jednoho pixelu, neboť je vhodné omezit počet průchodů obrazem při jeho úpravách. Proto je v průběhu jednoho průchodu nad obrazem vykonáváno maximální možné množství operací. Komplikací jsou pouze metody využívající statistických hodnot z obrazu. Ty se totiž musí vypočítat ještě před započítáním samotného filtrování a vyžadují jeden průchod obrazem navíc.

# 7 Implementace

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, jako součást této práce byl implementován program, který realizuje TMO s bilaterálním filtrováním. Je vytvořen v objektově orientovaném programovacím jazyce C++ s využitím Microsoft .NET Framework platformy. Je tedy primárně určen pro operační systém Microsoft Windows.

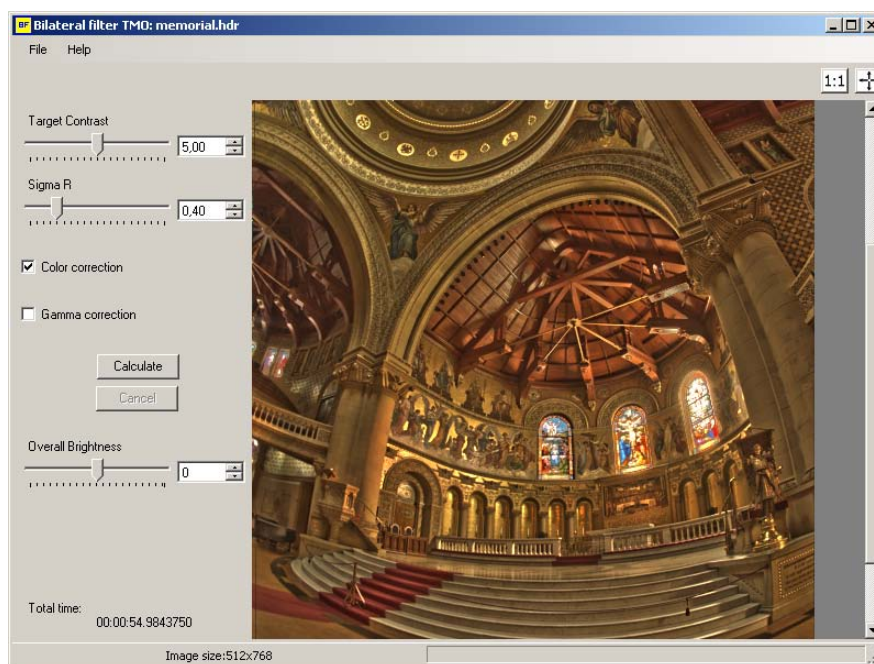
Okomentované zdrojové kódy i samotný přeložený program je přiložen na datovém médiu. Uživatelský manuál je pak jednou z příloh práce.

V následujících kapitolách je popsána implementace jednotlivých komponent aplikace, které byly uvedeny v průběhu analýzy požadavků.

- Uživatelské rozhraní sloužící k načítání vstupních obrázků, nastavování parametrů TMO a kontrole výstupu.
- Bilaterální filtr jako hlavní součást TMO.
- Korekce barev představující významnou úpravu výsledného LDR obrazu, významně přispívající k jeho realistickému vzhledu.

## 7.1 Uživatelské rozhraní

Na základě výše uvedených požadavků jsem vytvořil uživatelské rozhraní aplikace. Je sestaveno ze základních komponent obsažených v .NET platformě. Ty představují pro uživatele rutinní ovládání známé i z ostatních programů.



Obrázek 7.1: Uživatelské rozhraní aplikace Bilateral Filter TMO

Struktura aplikace vychází ze základních metodologií vytváření uživatelského rozhraní. V horní části je obsaženo menu, s jehož pomocí uživatel načítá vstupní HDR obraz, ukládá výstupní LDR obraz, ukládá jednotlivé vrstvy vzniklé při tone-mappingu, zobrazuje nápovědu k programu a ukončuje běh aplikace.

Plocha okna aplikace je rozdělena na levou část s ovládacími prvky a pravou část s náhledem výstupního obrazu. Pro zadávání parametrů bilaterálního filtru jsem zvolil takové prvky, jež umožňují snadnou kontrolu nad vstupními hodnotami, které může uživatel zadat. Tím je zajištěno snadné ovládání a správné fungování bilaterálního filtru s optimální kvalitou výstupního obrazu.

## 7.1.1 Načítání HDR obrazu

Vytvořená aplikace podporuje vstup v datovém formátu .hdr, který reprezentuje HDR obrazy v kódování RGBE (viz. kapitola 3.3.1). Tento formát jsem zvolil především z důvodu jeho rozšířenosti mezi fotografickou veřejností. To je způsobeno jeho širokou podporou v grafických editačních programech jako je Adobe Photoshop, či v programech pro tvorbu HDR obrazů, např. Photomatix společnosti HDRsoft.

Pro uživatele je načtení vstupního obrazu rutinní operací jako v jakékoli jiné aplikaci. Menu *File* obsahuje volbu *Open*. Po její aktivaci je zobrazen dialog pro výběr umístění vstupního souboru. Obsah složek je filtrován dle přípony souborů, a proto jsou uživatelovi zobrazeny jen soubory .hdr.

Po potvrzení souboru je tento nutné dekodovat z RGBE kódování a převést do vnitřní struktury programu. K tomu jsem ve své aplikaci využil knihovnu z Photomatix SDK 1.0 [34], která je ve funkčně limitované verzi zdarma. Tato knihovna obsahuje několik funkcí pro načítání, dekodování, zpracovávání hlavičky souborů a další. Ve své aplikaci jsem použil pouze funkce pro načtení hlavičky hdr souboru a jeho načtení:

```
int pm_io_info_rgbe (char *inputFile, int *rgbeSize)
int pm_io_read_rgbe (int width, int height,
                    char *inputFile, unsigned char* rgbeData)
```

Použití knihovny je v případě .NET platformy mírně komplikované. Aplikace BF TMO je napsána formou spravovaného (managed) kódu, který však není plně kompatibilní se standardním jazykem C++ a není tak možné přímo volat nativní funkce obsažené v knihovně. Další problém představují nekompatibilní datové typy a také linkování knihovny Photomatix k programu. Tyto problémy řeší atribut `DllImport`. Jeho pomocí je aplikace informována o vstupních bodech knihovny pro volání funkcí a postačí pak tuto knihovnu umístit do adresáře programu. Nekompatibilitu datových typů je v složitějších případech nutné řešit pomocí obalovacího kódu (tzv. wrapperů). V případě aplikace BF TMO stačilo pouhé převedení datového typu `String` na řetězec znaků, což je triviální.

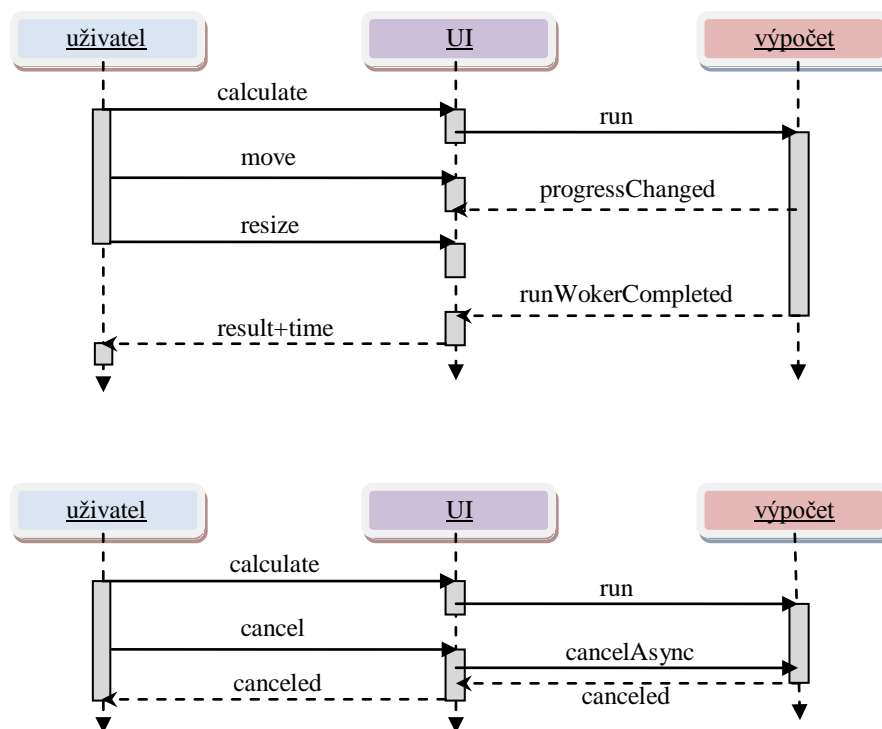
Data získaná voláním knihovnických funkcí jsou pouze dekomprimována z LRE komprese. Je nutné provést jejich převod na desetinné hodnoty dle [35]. Poté jsou data uložena do vnitřní struktury představující HDR obraz a připravena pro další zpracování programem.

## 7.1.2 Podpora vláken

Bilaterální filtr je výpočetně náročnou operací. Z tohoto důvodu jsem se ve své aplikaci rozhodl pro využití vláken. To umožní výpočet umístit do samostatného vlákna, které běží na pozadí. Uživatelské rozhraní je tak schopno reagovat na vnější události i v čase výpočtu. Tento přístup brání zablokování uživatelského rozhraní nedostatkem výpočetních prostředků.

V aplikaci nevytvářím nová vlákna a nemanipuluji s nimi přímo, ale k vykonávání náročného výpočtu využívám komponentu `BackgroundWorker`. Manipulace s ní je intuitivní a spočívá v definici vykonávané činnosti, způsobu oznamování průběžného stavu výpočtu a akci vykonané po dokončení výpočtu.

Komponenta po svém spuštění vytvoří nové vlákno, v jehož rámci je proveden výpočet bilaterálního filtru. Toto vlákno nesmí přímo přistupovat k prvkům uživatelského rozhraní, což by způsobilo pád celé aplikace. Je proto nutné ještě před jeho spuštěním uložit hodnoty parametrů do vnitřních proměnných třídy `HdrImage` spolu s obrazovými daty. Běh vlákna je ukončen buď po dokončení výpočtu, nebo na vyžádání uživatele při stisknutí tlačítka `Cancel`. Možné průběhy programu jsou zachyceny na diagramu 7.2.



Obrázek 7.2: Běh programu při celém výpočtu (nahore) a při přerušení uživatelem (dole)

Během výpočtu je nutné o jeho průběhu informovat uživatele. Mohl by totiž nabýt dojmu, že aplikace přestala reagovat. Toto je prováděno prostřednictvím metody `ProgressChanged` komponenty `BackgroundWorker`, která jako jediná umožňuje interakci s uživatelským rozhraním. Jejím vykonáním je inkrementován ukazatel průběhu činnosti v dolním okně aplikace. Tato metoda je volána po zpracování jednoho řádku obrazu. Tuto hodnotu jsem testováním zvolil jako vhodný kompromis mezi příliš častým oznamováním průběhu, které přepínáním kontextu mezi vlákny nadměrně zpomaluje celou aplikaci, a méně častou informací o stavu výpočtu, která je pro uživatele nedostatečná.

### 7.1.3 Možnosti vykreslovacího plátna

Pravá strana okna aplikace obsahuje náhled na výsledný LDR obraz. To umožňuje uživateli kontrolu před uložením do výstupního souboru a případné opakování výpočtu s jinými parametry. Velikost náhledu je dána velikostí hlavního okna aplikace, která může být libovolně měněna.

Náhled nabízí dva režimy:

- Zobrazení obrázku ve skutečné velikosti, tzv. 1:1.
- Zobrazení v poměru pro maximální pokrytí plochy náhledu

První uvedený režim je vhodný pro detailnější kontrolu jednotlivých oblastí obrazu. Při zobrazení rozměrného obrázku v menším okně náhledu lze pro navigaci po celé ploše obrazu použít buď zobrazené postníky po stranách okna, nebo při stisknutí pravém tlačítku myši posouvat obrázkem v náhledovém okně.

Druhý režim nalezne uplatnění při kontrole celkové tonality a kontrastu výstupu. Mezi oběma režimy lze přepínat stiskem příslušného tlačítka v pravém horním rohu okna programu.

## 7.2 Bilaterální filtr

Implementovaný TMO rozkládá vstupní obraz na dvě vrstvy. Bázová vrstva odpovídá osvětlení scény a je vytvořena filtrováním obrazu bilaterálním filtrem. Odečtením bázové vrstvy od původního obrazu získáme vrstvu detailní, která odpovídá odrazivosti scény. K snížení dynamického rozsahu obrazu se zkomprimuje bázová třída, zatímco detailní je ponechána bez úpravy. Opětným sečtením bázové a detailní vrstvy získáváme výstupní LDR obraz.

Proces filtrování ve své aplikaci provádím nad jasovou složkou obrazu, kterou vypočtu z jeho barevných kanálů. Po provedení tone-mappingu pak opět provedu přepočet obrazu černobílého na barevný.

Princip TMO s využitím bilaterálního filtrování detailněji popisuje následující úsek pseudokódu doplněný o komentáře jednotlivých kroků (všechny uvedené logaritmy jsou počítány se základem 10):

```
//výpočet jasové složky z barevných kanálů obrazu
input intensity= 0.3*R+0.6*G+0.1*B;
//uložení poměrů barev vůči celkovému jasu
r=R/input intensity;
g=G/input intensity;
b=B/input intensity;
//výpočet báze bilaterálním filtrováním vstupního obrazu
log(base)=Bilateral(log(input intensity));
//výpočet detailní vrstvy odečtením báze od obrazu
log(detail)=log(input intensity)-log(base);
//výpočet kompresního faktoru pro kompresi dynamického rozsahu
//target contrast je uživatelem zadaný parametr
compressionfactor=log(target contrast)/(max(log(base))-min(log(base)));
//normalizační faktor
absolute_scale=-max(log(base))*compressionfactor;
//výstupní intenzita
log(output intensity)=log(base)*compressionfactor+log(detail)+absolute_scale;
//rekonstrukce barevné informace
R output = r*10^(log(output intensity));
G output = g*10^(log(output intensity));
B output = b*10^(log(output intensity));
```

Stručný popis naznačuje, že TMO se skládá z jednoduchých operací. Bližší popis implementace se zaměří na bilaterální filtr.

Jak bylo výše uvedeno, bilaterální filtr kombinuje dvě chovací funkce

- Vzdálenostní funkce – prostorová
- Podobnostní funkce – jasová

Ve své implementaci jsem obě dvě váhovací funkce implementoval jako Gaussovské funkce. Výraz určující hodnotu jasu ve vznikající báze vrstvě je pak definován jako

$$J_s = \frac{1}{k} \sum_{i \in \Omega} e^{-\frac{(s-i)^2}{2\sigma_s^2}} e^{-\frac{(I_s-I_i)^2}{2\sigma_r^2}} I_i, \text{ kde } k = e^{-\frac{(s-i)^2}{2\sigma_s^2}} e^{-\frac{(I_s-I_i)^2}{2\sigma_r^2}} \quad (7.1).$$

Pro urychlení běhu algoritmu jsem hodnoty Gaussovských funkcí nepočítal přímo a pro vstup z celého intervalu, ale pro zadané parametry sigma jsem předpočítal hodnoty funkce jen na omezeném intervalu rozsahu (-3 sigma, 3 sigma). Prostorové jádro Gaussovské funkce jsem



implementoval jako dvourozměrné pole s velikostí odvozenou od zadané sigmy. Obdobně jsou v aplikaci předpočítány hodnoty jednorozměrné Gaussovy funkce pro rozdíly hodnot jasů. Ty jsou pak opět uloženy v poli. Funkce tyto hodnoty nemusí za běhu počítat, ale vrací pouze obsah patřičného prvku pole.

Základní postup popsaného TMO jsem dále doplnil volitelnými kroky, jako jsou gama korekce či korekce barev.

## 7.3 Korekce barev

Základním principem všech TMO je redukce dynamického rozsahu obrazu a mapování reálného rozsahu do rozsahu zobrazitelného na LDR displejích. Tato komprese však ve výsledném obraze způsobuje změnu barevného podání. Korekcí této barevné chyby se zabývá několik prací. Já jsem ve své aplikaci implementoval korekční funkci popsanou v [36]. V této práci její autoři provedli množství experimentů pro zjištění míry zkreslení barev a odvození vztahu mezi redukčním poměrem dynamického rozsahu a korekčním členem pro úpravu barev.

V původním popise TMO je barevná informace uložena ve formě poměru mezi jasnem pixelu a hodnotou barevného kanálu

```
r=R/input intensity;  
g=G/input intensity;  
b=B/input intensity;
```

Po provedení komprese dynamického rozsahu je výsledný obraz zpětně obarven inverzní formulí

```
R output = r*output intensity;  
G output = g*output intensity;  
B output = b*output intensity;
```

Toto představuje běžný způsob, který však způsobuje zmíněné zkreslení barev. Dle poznatků z [36] je vztah mezi kompresním poměrem kontrastu a korekčním koeficientem barevného odstínu nelineární. Vyplývá také, že malé redukci kontrastu odpovídají malé změny barevné tonality výstupu a naopak. Tento vztah mezi kompresním koeficientem  $c$  a barevným korekčním koeficientem  $s$  autoři práce vyjádřili jako

$$s(c) = \frac{(1 + k_1)c^{k_2}}{1 + k_1c^{k_2}} \quad (7.3).$$

Hodnoty  $k_1$  a  $k_2$  spočítali pro jednotlivé korekční metody jako konstanty na základě svých experimentů. Takto spočítaný korekční koeficient je využit při výpočtu barevné informace výstupního obrazu.

Autoři článku nabízí několik alternativních korekčních výpočtů. Pro lokální TMO, jakým je bilaterální filtr, přichází v úvahu pouze dva z nich.

První uváděnou barevnou korekci autoři definují jako

$$C_{out} = \left( \frac{C_{in}}{I_{in}} \right)^s I_{out} \quad (7.3),$$

kde  $C_{out}$  resp.  $C_{in}$  symbolizují jeden barevný kanál výstupního, resp. vstupního obrazu a  $I_{out}, I_{in}$  představují výstupní a vstupní intenzitu pixelu. Tento korekční výpočet má tu vlastnost, že pozměňuje intenzitu výsledného pixelu.

Tento efekt se snaží autoři potlačit v alternativním korekčním výpočtu

$$C_{out} = \left( \left( \frac{C_{in}}{I_{in}} - 1 \right) s + 1 \right) I_{out} \quad (7.4),$$

který se vyhýbá posunu intenzity pixelu. Jeho vlastností je však pozměnění odstínu barev, především u červených a modrých bodů.

Ve své implementaci jsem zapojil obě varianty barevné korekce. Na základě testů nad množinou různých obrazů jsem poté zvolil výpočet z rovnice 7.3, který podával realističtější výstupy. Hodnoty konstant  $k_1$  a  $k_2$  pro výpočet korekčního koeficientu jsem rovněž přejal z citovaného článku.



Obrázek 7.3: Ukázka výstupu z aplikace BF TMO bez a s korekcí barev

## 8 Srovnávací testy

Požadavkem zadání této práce je porovnání výsledků mnou implementovaného TMO s literaturou. Provedl jsem tedy srovnání s dvěma programy, které také implementují TMO s využitím bilaterálního filtru. Porovnával jsem především časovou náročnost filtrování, neboť kvalitativní srovnání je velmi subjektivní a vyžadovalo by zapojení množství respondentů do experimentu.

Následující text popisuje referenční programy a modifikace na nich provedené pro účely testování. Navazující podkapitoly dále obsahují metodiku testů a vyhodnocení jejich výsledků.

### 8.1 Referenční aplikace

Pro porovnání výsledků mnou implementované aplikace jsem zvolil dvě různorodé aplikace. Srovnání s jiným TMO by bylo poměrně náročné a jak dokazuje literatura, stejně nepodává příliš exaktní výsledky. Zaměřil jsem se proto na programy, které obsahují přímo TMO s využitím bilaterálního filtrování. Předpokladem tak bylo, že výsledky si budou velmi podobné.

Z velkého množství dostupných aplikací jsem se zaměřil na programy distribuované společně se zdrojovým kódem. Předpokládal jsem totiž nutnost drobných úprav a také jsem ocenil možnost nahlédnutí do kódu z důvodu kontroly korespondence mezi slovním popisem programu autory a skutečně probíhajícím výpočtem.

Pro porovnání jsem zvolil dvě aplikace. První je aplikace s grafickým uživatelským rozhraním implementující základní bilaterální filtrování bez urychlovacích optimalizací. Tato slouží pro porovnání výkonu mé aplikace. Druhý program pochází přímo od tvůrců TMO s využitím bilaterálního filtrování a implementuje řadu urychlení. Tuto aplikaci jsem zvolil pro demonstraci významu těchto vylepšení na zvýšení celkové časové výkonnosti tohoto TMO.

#### 8.1.1 Aplikace Qtpfsgui

Program Qtpfsgui [37] je open source aplikace s grafickým uživatelským rozhraním, která má sloužit k ucelené práci s HDR obrazy. Její funkcionality je založena na původně konsolových nástrojích pokrývajících všechny dílčí úkoly spojené s vytvářením, zpracováním a zobrazováním HDR obrazů. Uživatelské rozhraní je vytvořeno s použitím knihovny Qt, která je platformě přenositelná. Aplikace je dostupná pro operační systém Microsoft Windows, Mac OS a většinu linuxových distribucí.

Pro své porovnání jsem si ze zdrojových kódů sestavil vlastní spustitelné soubory pro platformu Windows. Využil jsem k tomu projekt MinGW, port GNU C překladače pro prostředí MS Windows. A program MSYS, který nabízí příkazovou řádku, interpret příkazů a kolekci nástrojů pro portování open source projektů na platformu Windows. Dostupné binární soubory jsem nepoužil z důvodu nutnosti úprav aplikace.

Qtpfsgui obsahuje dvě implementace bilaterálního filtru. Podmíněným překladem jsem použil variantu bez optimalizací, abych umožnil přímě srovnání se svou aplikací. Qtpfsgui by tak mělo podávat přibližně stejné výkonnostní výsledky. Také jsem do programu přidal kód pro přesnější zjišťování času trvání výpočtu.

## 8.1.2 Aplikace Tone Mapping

Autory tohoto programu jsou Sylvain Paris a Frédo Durand. Druhý jmenovaný je jedním z autorů rychlého bilaterálního filtru. Implementace vychází z [33], ale navíc přidává vlastní optimalizace bilaterálního filtru popsané v [38], provádí gama korekci výsledného obrazu a nezabývá se nápravou hran.

Zdrojové kódy programu jsou k dispozici na domovské stránce autorů [39]. K jejich překladu včetně nutných knihoven jsem využil Microsoft Visual Studio 2005. Do původního kódu jsem opět přidal funkce pro přesnější měření délky běhu programu.

Na rozdíl od mého programu BF TMO a aplikace Qtpfsgui dokáže aplikace Tone Mapping pracovat pouze se soubory ve formátu .exr. Vytvořil jsem proto pro její testování oddělenou sadu obrázků v tomto formátu. Jde o zcela identické snímky, které byly pouze převedeny v editoru Adobe Photoshop z formátu .hdr do formátu .exr.

## 8.2 Metodika testů

Jak již bylo řečeno, porovnání své aplikace vůči referenčním programům jsem zaměřil především na jejich časovou výkonnost. K tomuto účelu jsem také referenční aplikace pozměnil a dosáhl tak přesnějších výsledků měření času výpočtu.

Zájemce o porovnání kvality výstupu si může prohlédnout obrázky vytvořené všemi třemi aplikacemi v příloze této práce. Tyto obrázky představují jen výběr z celé testovací sady a byly vytvořeny s co nejvíce podobnými nastaveními pro jednotlivé programy.

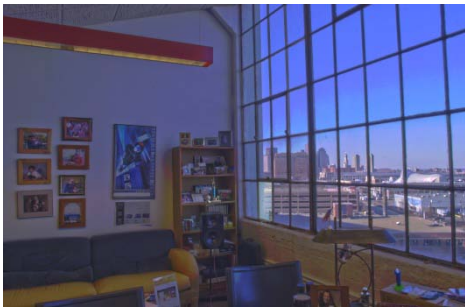
Testy jsem prováděl na stolním počítači vybaveném procesorem Intel Core2Duo E6550 s kmitočtem 2,33GHz a 2GB operační paměti. Instalovaným operačním systémem byl Microsoft Windows XP SP3.

Pro porovnání mnou vytvořené aplikace s referenčními programy jsem vytvořil sadu obrázků, které pokrývají široký rozsah rozměrů. Zachycují různorodé scény s odlišnými světelnými podmínkami. Jde jak o záběry interiérů tak exteriérů. Pro svou aplikaci BF TMO a aplikaci Qtpfsgui jsem tyto snímky uložil ve formátu .hdr. Pro program Tone Mapping jsem je nekonvertoval do formátu .exr. Přehled těchto obrázků předkládá obrázek 8.1.

Z principu bilaterálního filtru vyplývá, že největší vliv na rychlost filtrování, pokud odhlédneme od způsobu implementace výpočtu Gaussovy funkce, má především rozměr obrázku a rozměr prostorového jádra filtru. Základní varianta je pomalá z důvodu provádění konvoluční

filtrace obrazu jádrem filtru. Toto jsem zohlednil ve svém testování a u všech tří aplikací jsem vždy nastavil shodný parametr  $\sigma_R$  udávající velikost prostorového jádra filtru. Moje aplikace a program Tone Mapping tuto hodnotu počítají jako procentuální poměr z kratší strany vstupního obrazu, kdežto aplikace Qtpfsgui tento parametr přijímá jako volitelný od uživatele. Nastavoval jsem ho tedy u této aplikace ručně na nejbližší možnou hodnotu odpovídající  $\sigma_R$ , kterou si vypočetly ostatní programy samočinně.

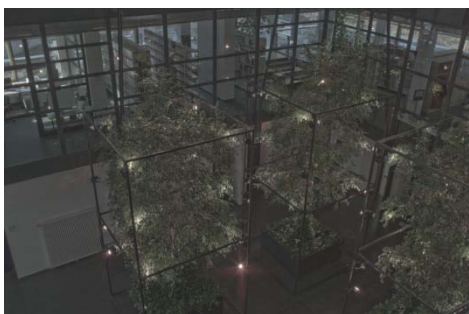
Pro každý ze snímků testovací sady (obrázek 8.1 - 8.7) jsem provedl jeho filtraci pětkrát po sobě se stejným nastavením parametrů a poté jsem pro něj vypočetl průměrný čas vykonávání v dané aplikaci. Tento postup jsem opakoval ve všech třech aplikacích a výsledky zanesl do tabulky a grafů obsažených v následující kapitole.



Obrázek 8.1: Office  
2000 × 1312 pixelů



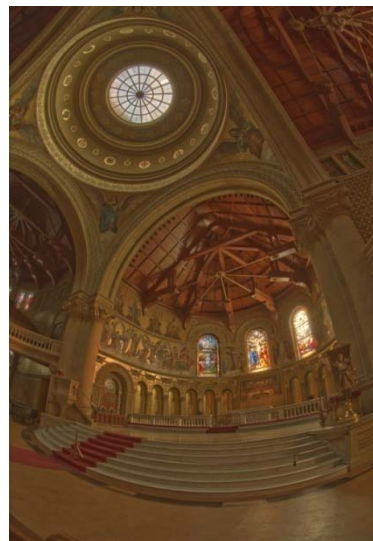
Obrázek 8.3: Forest path  
2048 × 1536 pixelů



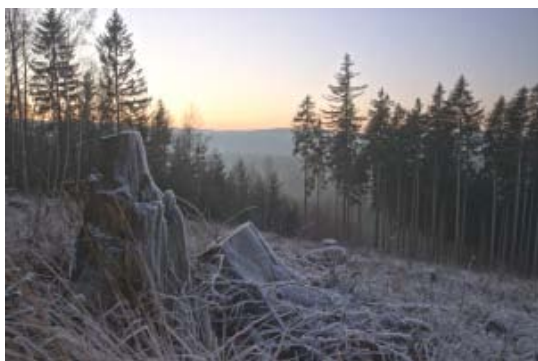
Obrázek 8.4: Atrium  
1024 × 676 pixelů



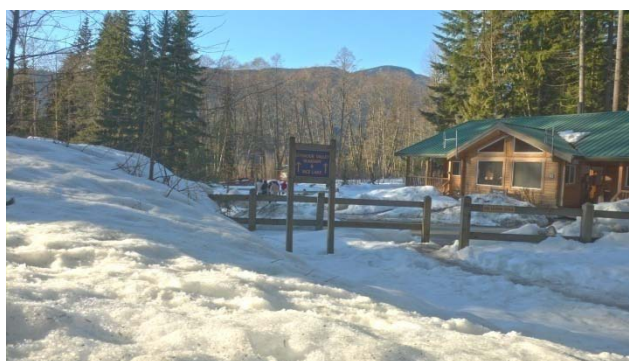
Obrázek 8.2: Design center  
656 × 1000 pixelů



Obrázek 8.5: Memorial  
512 × 768 pixelů



Obrázek 8.6: Stump  
300 × 200 pixelů



Obrázek 8.7: Seymour park  
3840 × 2160 pixelů

## 8.3 Výsledky testů

Výsledky naměřené během srovnávacích testů jsou zaneseny do tabulky 8.1. Přímé porovnání časové náročnosti jednotlivých aplikací znázorňuje také graf 8.1. Vzhledem k hodnotám dosahovaných aplikací Tone mapping jsem zvolil pro časovou osu z důvodu názornosti logaritmické měřítko.

	BF TMO	Qtpfsgui 1.9.2	Tone mapping
Stump	0,497s	0,647s	0,131s
Memorial	19,325s	23,387s	0,634s
Design center	43,238s	56,465s	1,047s
Atrium	49,284s	1min 9,400s	1,119s
Office	11min 44,025s	16min 59,892s	3,891s
Forest path	21min 32,646s	28min 28,102s	5,350s
Seymour park	1h 44min 20,453s	2h 33min 48,196s	12,291s

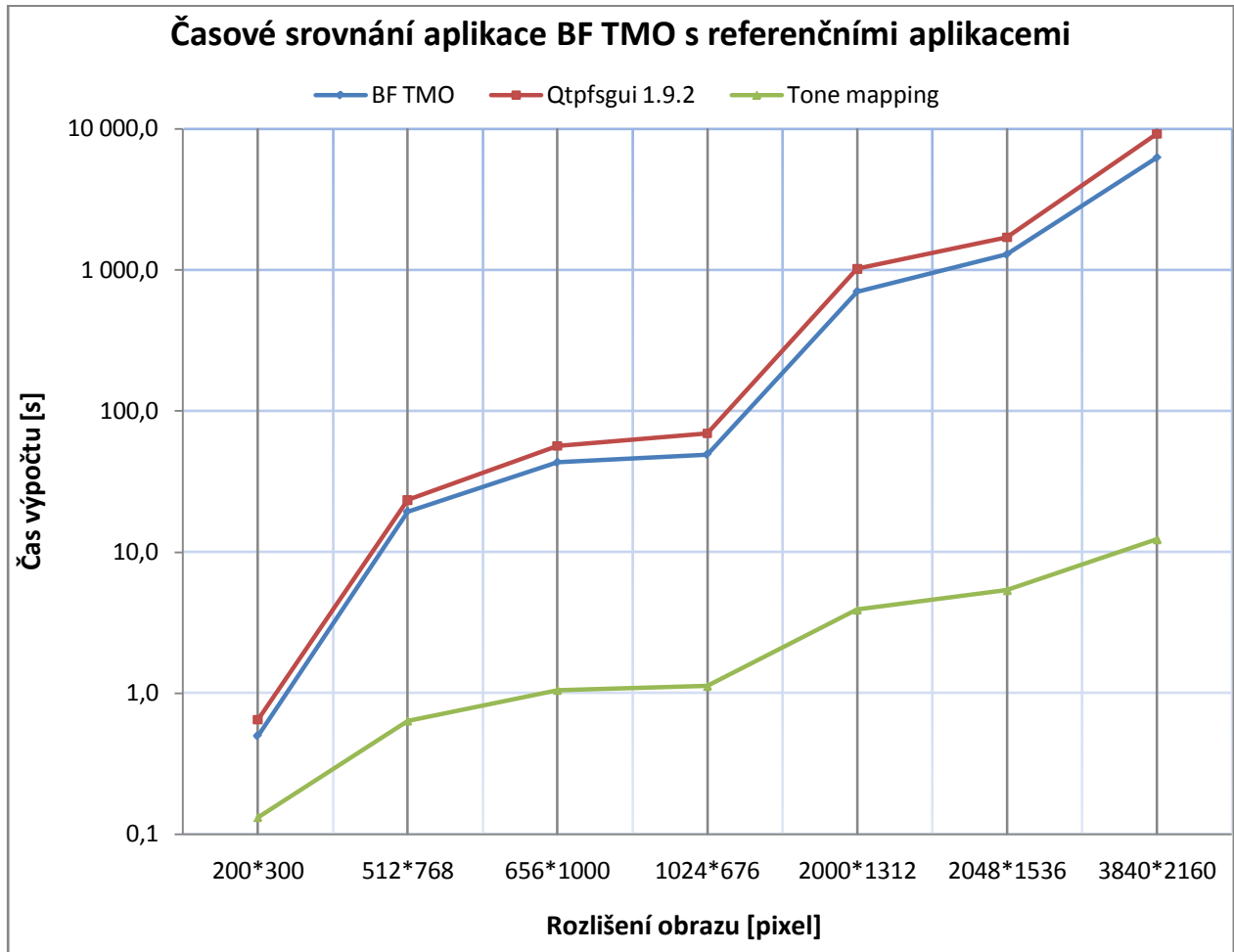
Tabulka 8.1: Výsledky srovnání časové výkonnosti jednotlivých aplikací

Z uvedených hodnot vyplývají dva závěry. Vzájemné srovnání mé aplikace a aplikace Qtpfsgui, které implementují základní variantu bilaterálního filtru, vyznívá ve prospěch mnou vytvořeného programu. Naměřené hodnoty udávají průměrný nárůst výkonu až o 35% nad výkonem aplikace Qtpfsgui<sup>29</sup>.

Druhým závěrem vyplývajícím z provedených testů je extrémní přínos zavedení optimalizací do výpočtu bilaterálního filtru. Tyto optimalizace u testovaného programu přináší zrychlení, které

<sup>29</sup> Nutno podotknout, že tato implementace bilaterálního filtru není v programu Qtpfsgui primární a program v běžné instalaci používá bilaterální filtr urychlený. Předpokládám tedy, že testovaná varianta není plně odladěna

s rostoucí velikostí zpracovávaného obrazu dosahuje až 500 krát rychlejšího provádění než aplikace BF TMO. Časová náročnost výpočtu základního bilaterálního filtru roste přibližně kubicky. Naproti tomu časová složitost rychlého bilaterálního filtru je přibližně lineární. To dokazuje, jak významné je pro TMO s využitím bilaterálního filtru zavádění optimalizací výpočtu bazové vrstvy bilaterálním filtrováním.



Graf 8.1: Časové srovnání aplikace BF TMO s referenčními aplikacemi

## 9 Závěr

Text této práce naznačuje, jak je oblast HDRI komplikovaná. Překotný rozvoj probíhající v této problematice má ve všech oblastech společnou motivaci, a to vyrovnat schopnosti současných obrazových zařízení se schopnostmi lidského vidění.

Aby mohl text této práce vzniknout, bylo nejprve nutné splnit první bod požadovaný v zadání. Literatura vztahující se k této tematice je poměrně dostupná a aktuální.

Úvod do problematiky HDR, motivace k jejímu využití a témata s tím spojená jsou popsány v kapitolách 2 a 3. Procesem zobrazování HDR obrazu na běžných displejích se zabývá kapitola 3. Ve 4. kapitole je popsáno rozdělení TMO a jsou zde uvedeni typičtí zástupci pro jednotlivé třídy TMO. Text kapitoly 5 se detailněji zaměřuje na TMO využívající bilaterální filtrování.

Na teoretický popis navazuje analýza, návrh a implementace tohoto TMO. Nejvýznamnější aspekty tohoto procesu jsou shrnuty v kapitolách 6 a 7.

V další části práce bylo provedeno porovnání časové náročnosti mnou vytvořené aplikace vůči referenčním programům. Průběh a výsledky těchto testů obsahuje kapitola 8. Ke kvalitativnímu zhodnocení výsledků může zájemce použít výstupy všech tří srovnávaných aplikací uvedených v příloze práce.

Cílem této práce bylo nastínit problematiku HDRI se zaměřením na proces zobrazení HDR obrazu na LDR displejích, prostudovat k tomu sloužící proces tone-mappingu a poté navrhnout a implementovat vybraný tone-mappingový operátor (TMO). Tento cíl byl splněn ve všech ohledech.

Přínosem této práce je vytvoření uceleného náhledu do problematiky HDRI, seskupení zdrojů k dané tematice a vytvoření plnohodnotné implementace TMO, která podává výsledky srovnatelné s referenčními programy. V rámci srovnávacích měření je také jednoznačně prokázán nárůst výkonu TMO zapojením optimalizací výpočtu bilaterálního filtru.

Prostor pro další rozvoj této práce se nabízí především v oblasti akcelerace bilaterálního filtru. Dva způsoby jsou naznačeny přímo v této práci a přesně popsány v [33]. Dalším možným vylepšením vytvořené aplikace je přidání podpory i ostatních formátů HDR obrazu. Vhodnou modifikací jádra vytvořené aplikace by mohla být přeměna na plugin do některého z existujících grafických editorů.



# Literatura

- [1] FERWERDA, J. A. *Elements of early vision for computer graphics*. In *Computer Graphics and Applications*, IEEE [online]. 2001, vol. 21, is. 5., s. 22-33. [cit. 2009-01-01]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=946628&isnumber=20481>>. ISSN 0272-1716.
- [2] PIHAN, R. *Expozice : Dynamický rozsah a kontrast scény* [online]. 30. 3. 2006 [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <[http://www.fotografovani.cz/art/fozak\\_df/rom\\_expozice4.html](http://www.fotografovani.cz/art/fozak_df/rom_expozice4.html)>.
- [3] *Radiometrie* [online]. 2008 [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Radiometrie>>.
- [4] REINHARD, E, et al. *High Dynamic Range Imaging : Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)*. Cox T.; Cox Ch., Henley S. San Francisco : Morgan Kaufman, 2005. 495 s. ISBN 0125852630, 97801.
- [5] KAŠPÁREK, J. *Fotometrické a radiometrické veličiny* [online]. Presentace. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS/fotometrie.ppt>>.
- [6] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika, Díl 4. Elektromagnetické vlny, Optika, Relativita, Vyd. 1*. Dub P., Komrska J., Lencová B, Musilová J., Obdržálek J. a Štrunc M. Brno : VUTIUM, 2000. 170 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [7] PIHAN, R. *Barva a vyvážení bílé: Barva a její obraz v PC* [online]. 29. 6. 2006 [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <[http://www.fotografovani.cz/art/fozak\\_df/rom\\_color1.html](http://www.fotografovani.cz/art/fozak_df/rom_color1.html)>.
- [8] PIHAN, R. *Porozumění správné expozici* [online]. 8. 3. 2007 [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <[http://www.fotoroman.cz/techniques2/exposure\\_basic.html](http://www.fotoroman.cz/techniques2/exposure_basic.html)>.
- [9] PELIKÁN, J., SOCHOR, J. *Barva a barevné vidění* [online]. Presentace. 15. 3. 2000 [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.fi.muni.cz/usr/sochor/M4730/barvy/sld001.htm>>.
- [10] FREEMAN, M. *Základy HDR : Fotografie a vysoký dynamický rozsah*. Kristián, P.; Beneš, K., Suk, L. Brno : Zoner Press, 2008. 160 s. ISBN 978 80 86815 95 4.
- [11] DRAKOS, N. *Chromatic adaptation* [online]. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www2.cmp.uea.ac.uk/Research/compvis/ChromaticAdaptation/>>.
- [12] HIRAKAWA, K., PARKS, T. V. *Chromatic adaptation and white-balance problem*. In *International Conference Image Processing*, IEEE 2005. ICIP 2005. 2005, vol. 3, s. III- 984-7. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.accidentalmark.com/research/papers/Hirakawa05WBICIP.pdf>>. ISBN: 0-7803-9134-9

- [13] DEBEVEC, P. E. *Rendering Synthetic Objects into Real Scenes : Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography*. In *SIGGRAPH 98*. 1998. 10 s. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.debevec.org/Research/IBL/debevec-siggraph98.pdf>>.
- [14] DEBEVEC, P. E., MALIK, J. *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*. In *SIGGRAPH 97*. 1997. 10 s. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.debevec.org/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>>.
- [15] DEVLIN, K. et al. *Tone reproduction and physically based spectral rendering*. In *State of the Art Reports*. Eurographics 2002. The Eurographics Association. 2002. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.cs.bris.ac.uk/Tools/Reports/Ps/2002-devlin-0.pdf>>.
- [16] LUKSCH, Ch. *Realtime HDR Rendering*. [Bachelor Thesis]. Institute of Computer Graphics and Algorithms, TU Vienna. Vienna 2007. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <[http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2007/Luksch\\_2007\\_RHR/Luksch\\_2007\\_RHR-RealtimeHDR%20.pdf](http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2007/Luksch_2007_RHR/Luksch_2007_RHR-RealtimeHDR%20.pdf)>.
- [17] AGGARWAL, M., AHUJA, N. *Split Aperture Imaging for High Dynamic Range*. *International Journal of Computer Vision*. 2004, vol. 58, is. 1., s. 7-17. [cit. 2009-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/u362jw86183t2632/fulltext.pdf>>. ISSN:0920-5691
- [18] WARD, G. *High Dynamic Range Image Encodings* [online]. [cit. 2009-01-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/Encodings.pdf>>.
- [19] DRÁBEK, V. *Kódování a komprese dat KKO: Studijní opora*. Brno. 2008. [cit. 2009-01-03]. Dostupný z WWW: <<https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/course-files-st.php/course/KKO-IT/texts/KKO08-KOMPLET.pdf>>.
- [20] *Technical Introduction to OpenEXR* [online]. 2006. [cit. 2009-01-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.openexr.com/TechnicalIntroduction.pdf>>.
- [21] SEETZEN, H., et al. *High Dynamic Range Display Systems*. In *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH2004)*. 2004. 9 s. [cit. 2009-01-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.cs.ubc.ca/~heidrich/Projects/HDRDisplay/Seetzen:2004:HDR.pdf>>.
- [22] WARD, G., RUSHMEIER, H., PIATKO, C. *A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes*. In *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions* [online]. 1997, vol. 3, is. 4, s. 291 – 306. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel3/2945/14100/00646233.pdf?temp=x>>.
- [23] YOSHIDA A., et al. *Perceptual Evaluation of Tone Mapping Operators with Real-World Scenes*. *Conference of Human vision and electronic imaging*. 2005. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mpi-inf.mpg.de/resources/hdr/TMO/EI5666-13.pdf>>.
- [24] TUMBLIN, J., RUSHMEIER, H. *Tone Reproduction for Realistic Images*. In *Computer Graphics and Applications, IEEE* [online]. 1993, vol. 13, is. 6, s. 42 – 48. [cit. 2009-01-04].

Dostupný z WWW:

<<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/ie11/38/6448/00252554.pdf?arnumber=252554>>.

- [25] HAVLENA, M. *Pořizování HDR dat*. [Diplomová práce]. 2005. Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://mida.wz.cz/hdr/files/Text.pdf>>.
- [26] IRAWAN, P., FERWERDA, J. A., MARSCHNER, S. R. *Perceptually Based Tone Mapping of High Dynamic Range Image Streams*. Eurographics Symposium on Rendering 2005. 2005. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.cis.rit.edu/jaf/publications/EGSR05-hdr.pdf>>.
- [27] DEVLIN, K. *A review of tone reproduction techniques*. Technical Report CSTR-02-005, Department of Computer Science, University of Bristol, 2002. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.cs.bris.ac.uk/Tools/Reports/Ps/2002-devlin-1.pdf>>.
- [28] PATTANAIK, S. N., et al. *A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display*. In *SIGGRAPH 98*. 1998, s. 287-298. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <[http://www.cis.rit.edu/jaf/publications/sig98\\_paper.pdf](http://www.cis.rit.edu/jaf/publications/sig98_paper.pdf)>. ISBN:0-89791-999-8.
- [29] REINHARD, E., et al. *Photographic Tone Reproduction for Digital Images*. In *SIGGRAPH 2002*. 2002, s. 267-276. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <[http://www.cis.rit.edu/jaf/publications/sig02\\_paper.pdf](http://www.cis.rit.edu/jaf/publications/sig02_paper.pdf)>. ISBN: 0730-0301, 1-58113-521-1.
- [30] FATTAL, R., LISCHINSKI, D., WERMAN, M. *Gradient Domain High Dynamic Range Compression*. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2002, vol. 21, is. 3, s. 249-256. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.cs.huji.ac.il/~werman/Papers/hdrc.pdf>>. ISSN:0730-0301.
- [31] TOMASI, C., MANDUCHI, R. *Bilateral Filtering for Gray and Color Images*. In *International Conference on Computer Vision*. Washington : IEEE Computer Society. 1998, s. 839.
- [32] *Technical Guides: Color models – CIE Lab*. Adobe Systems Incorporated [online]. 21. 3. 2001. [6. 1. 2009] <[http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe\\_tg/models/cielab.html](http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/cielab.html)>
- [33] DURAND, F., DORSEY, J. *Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images*. In *SIGGRAPH 2002*. 2002, s. 257-266. [cit. 2009-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://people.csail.mit.edu/fredo/PUBLI/Siggraph2002/DurandBilateral.pdf>>. ISBN: 0730-0301 , 1-58113-521-1.
- [34] *High Dynamic Range Imaging Library - Photomatix Software Development Ki*. [online]. 2006. [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.hdrsoft.com/download/sdk.html>>.
- [35] WALTER, B. *RGBE Image Format Specifications* [online]. 1998. [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.graphics.cornell.edu/online/formats/rgbe/>>.
- [36] MANTIUK, R., et. al. *Color correction for tone mapping*. In *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS)*. 2009, vol. 28, is. 3. [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <[http://zgk.wi.ps.pl/color\\_correction/data/color\\_correction.pdf](http://zgk.wi.ps.pl/color_correction/data/color_correction.pdf)>.

- [37] *Qtprfsgui*. [online]. 2009. [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW:  
<<http://qtprfsgui.sourceforge.net/>>.
- [38] PARIS, S., DURAND, F. *A Fast Approximation of the Bilateral Filter using a Signal Processing Approach*. In *International Journal of Computer Vision*. 2009, vol. 81, is. 1, s. 25-52. [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW:  
<[http://people.csail.mit.edu/sparis/publi/2006/eccv/Paris\\_06\\_Fast\\_Approximation.pdf](http://people.csail.mit.edu/sparis/publi/2006/eccv/Paris_06_Fast_Approximation.pdf)>.  
ISSN: 0920-5691 (tisk) 1573-1405 (online).
- [39] PARIS, S., DURAND, F. *Fast Bilateral Filtering: Tone Mapping Source Code* [online]. 2006. [cit. 2009-05-20]. Dostupné z WWW:  
<[http://people.csail.mit.edu/sparis/code/src/tone\\_mapping.zip](http://people.csail.mit.edu/sparis/code/src/tone_mapping.zip)>.

# Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Světelné spektrum viditelné pro člověka [7].....	7
Obrázek 2.2: Graf funkce fotopické světelné účinnosti [4] .....	7
Obrázek 2.3: Funkce spektrálních odezev tří druhů čípků [7].....	10
Obrázek 3.1: Ukázka vstupních snímků metody (nahore). 3 snímky jsou pořizeny s rozestupem 2 EV. Dole HDR obraz vzniklý jejich složením a poté přizpůsobený k zobrazení na běžném monitoru [4] .....	16
Obrázek 3.2: (a) Objektiv, zrcadlová pyramida a uspořádání senzorů pro snímání několika záběrů scény současně. (b) Rozdělení clonového otvoru na části odpovídající jednotlivým senzorům [17].....	17
Obrázek 3.3: Význam bitů v RGBE kódování [4] .....	19
Obrázek 3.4: Význam bitů v LogLuv kódování pro 24bitovou a 32bitovou variantu [4] .....	20
Obrázek 3.5: Význam bitů ve formátu EXR. Jednotlivé barevné složky pixelu.....	21
Obrázek 3.6: Schéma technologie HDR displeje navrženého v [21] .....	23
Obrázek 4.1: Hlavní problém tone-mappingu: zajistit shodné vnímání reálné i zobrazované scény [24] .....	26
Obrázek 4.2: Přehled vývoje metod tone-mappingu [27].....	27
Obrázek 5.1: Rozdíl mezi konvenčním rozmazáním a rozmazáním pomocí bilaterálního filtru. Vyznačeny světlé kontury tzv. „halo efektu“ .....	33
Obrázek 5.2: Vstupní HDR obraz složený z různě exponovaných LDR snímků [33] .....	34
Obrázek 5.3: Obrazy jednotlivých vrstev, vytvořených ze vstupního obrazu. Základní vrstva, detailní vrstva, oddělená barevná informace [33] .....	34
Obrázek 5.4: Princip bilaterálního filtru - vytvoření bazové vrstvy [33] .....	34
Obrázek 6.1: Popis činnosti aplikace .....	37
Obrázek 7.1: Uživatelské rozhraní aplikace Bilateral Filter TMO.....	39
Obrázek 7.2: Běh programu při celém výpočtu (nahore) a při přerušení uživatelem (dole).....	41
Obrázek 7.3: Ukázka výstupu z aplikace BF TMO bez a s korekcí barev .....	45
Obrázek 8.1: Office .....	48
Obrázek 8.2: Design center.....	48
Obrázek 8.3: Forest path.....	48
Obrázek 8.5: Atrium.....	48
Obrázek 8.4: Memorial.....	48
Obrázek 8.6: Stump.....	49
Obrázek 8.7: Seymour park .....	49

# Seznam příloh

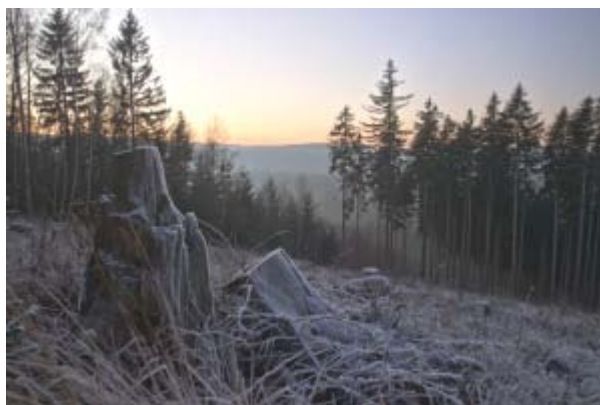
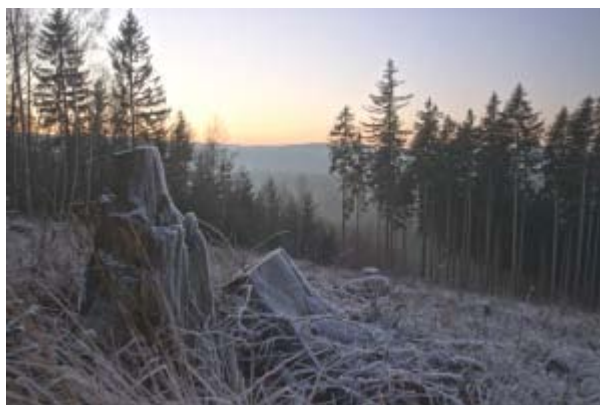
1. Výstup z aplikace BF TMO, Qtpfsgui a Tone mapping
2. Uživatelská příručka aplikace Bilaterální filtr TMO
3. CD

# Výstup z aplikace BF TMO, Qtpfsgui a Tone mapping

Výstupy aplikací jsou uváděny v pořadí:

1. Aplikace BF TMO
2. Aplikace Qtpfsgui
3. Aplikace Tone mapping

Stump.hdr



Memorial.hdr









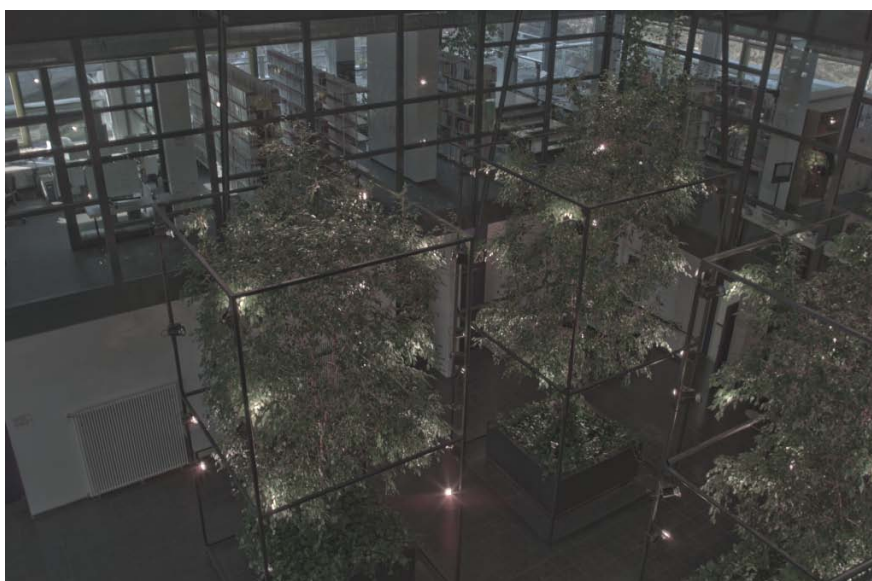
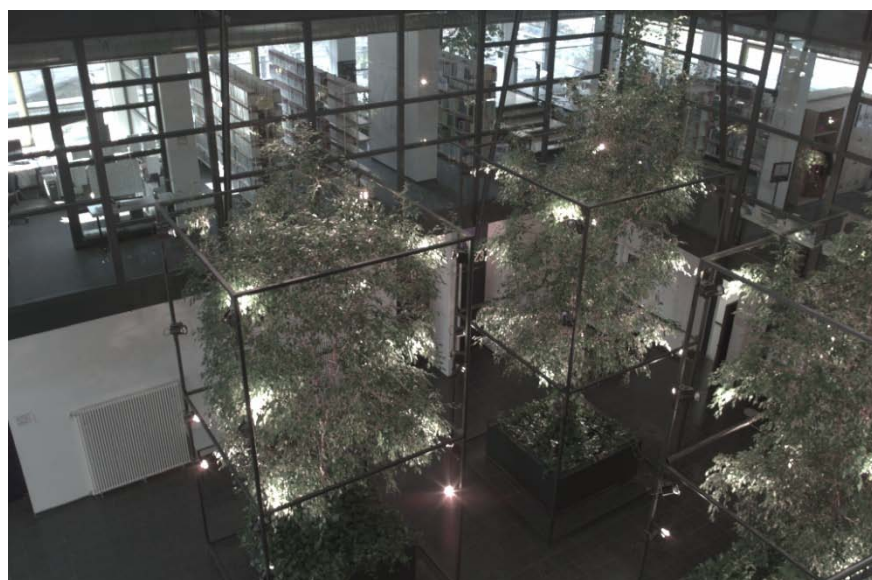
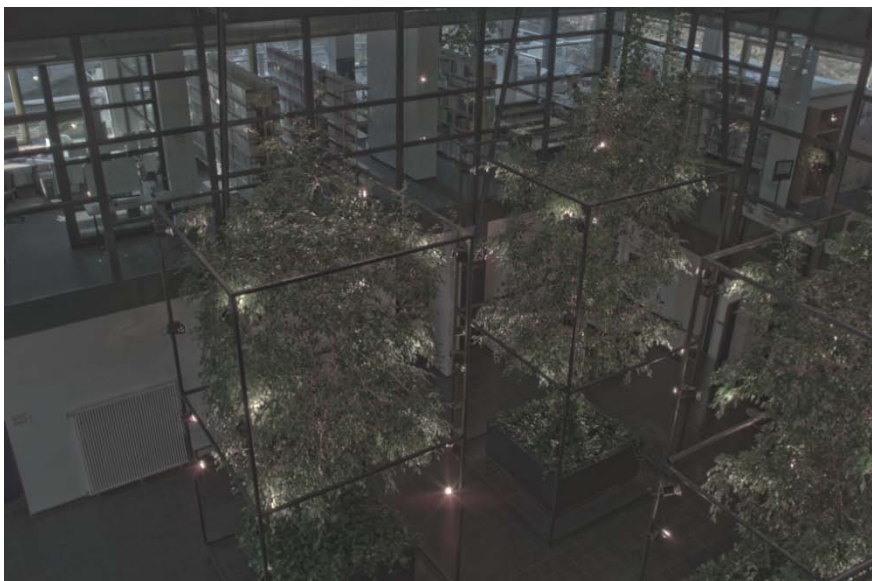
Design center.hdr



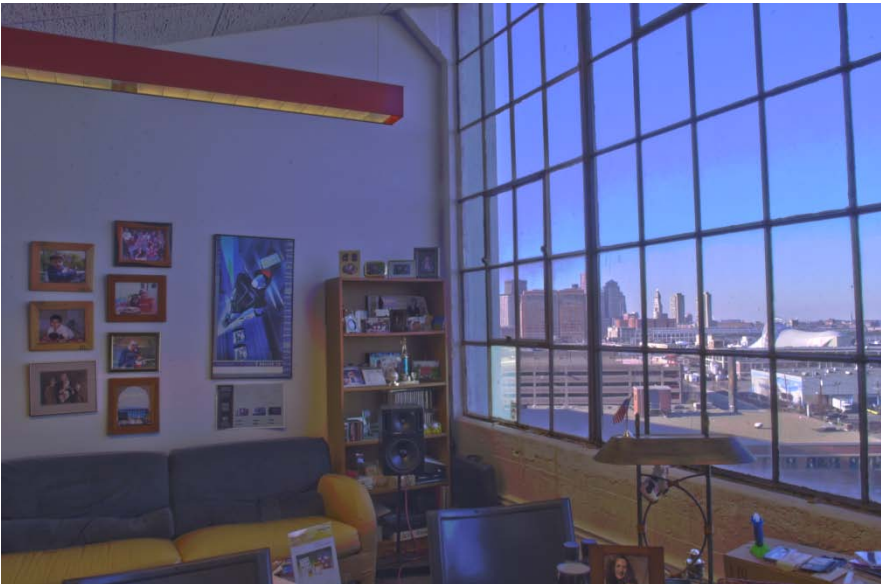
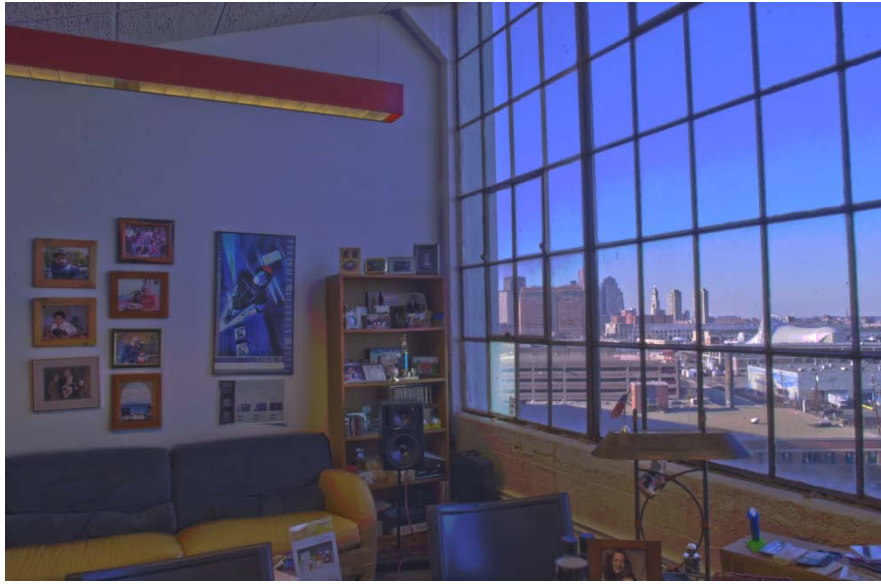




Atrium.hdr



Office.hdr



Forest path.hdr





Seymour park.hdr



# Uživatelská příručka aplikace Bilaterální filtr TMO

Autor: Bc. Ivan Nejezchleb

xnejez06 AT stud.fit.vutbr.cz

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií

2009

Aplikace Bilaterální filtr TMO (BF TMO) vznikla jako součást diplomové práce autora. Jde o okenní aplikaci napsanou v jazyce C++ s využitím platformy .NET Framework. Tato aplikace implementuje tone-mappingový operátor využívající bilaterální filtr. Slouží k převodu HDR obrázků ve formátu .hdr na běžné snímky s nízkým dynamickým rozsahem. Tyto lze ukládat ve formátu .bmp, .jpg a .png a dále je zpracovávat v oblíbeném grafickém editoru .

## Instalace

Aplikaci BF TMO není nutné instalovat. Postačuje umístit spustitelný soubor *tone mapping.exe* a knihovnu *Photomatix.dll* do libovolného adresáře.

## Ovládání aplikace

Okno aplikace je rozděleno na hlavní menu, levou část s ovládacími prvky, pravou náhledovou část a dolní informační řádek. Postup zpracování snímku je v několika krocích popsán v následujícím textu.

V levé části okna programu se nachází několik ovladačů pro nastavení základních parametrů převodu:

- Posuvník *Target Contrast* – hodnota určuje, jak kontrastní bude v globálu výsledný snímek. Vyšší hodnota znamená kontrastnější, ale také tmavější snímek. Hodnota nižší vytvoří snímek rovnoměrně světlý s množstvím drobných detailů, ale tonálně plochý. Doporučená hodnota tohoto parametru je přibližně 5 pro obrázky bez gama korekce a 50 pro snímky s gama korekcí.
- Posuvník *Sigma R* – tento parametr ovlivňuje množství a ostrost jemných detailů v obraze. Čím vyšší tato hodnota bude, tím výraznější budou jemné detaily v obraze. S vysokými hodnotami tohoto parametru však narůstá riziko vzniku světlých kontur kolem kontrastních hran. Výchozí hodnota pro tento ovladač je 0.4.
- Volba *Color Correction* – přepínač ovlivňující, zda je na výsledný obraz uplatněna korekce barev nebo ne. Tato volba je defaultně zapnuta a je doporučena převážně v případě velmi nízké hodnoty parametru *Target Contrast*.

- Volba *Gamma Correction* – tato volba udává, zda bude výsledný obraz nelineárně kompenzován, tak aby odpovídal vnímání oka. Způsobuje změnu jasu i mírnou změnu barevnosti výsledku. Snižuje mírně celkový kontrast výstupu. Ve výchozím nastavení je tato volba vypnutá, ale její použití se doporučuje v kombinaci s vyššími hodnotami *Target Contrast*. Hodnotu kompenzačního faktoru udává vybraná volba v příslušném seznamu.
- Posuvník *Overall Brightness* – tato volba se uplatňuje až na výsledný obraz a nijak neovlivňuje samotný převod. Ovladač slouží k nastavení celkového jasu snímku. Kladné hodnoty snímek zesvětlí, záporné hodnoty jej ztmaví. Výchozí hodnota je nulová.

Pro načtení vstupního souboru zvolte v hlavním menu aplikace položku *File* a následně volbu *Open*. Zobrazí se dialog pro procházení adresářovou strukturou, který umožňuje výběr požadovaného souboru. Svoji volbu potvrdíte stiskem tlačítka *OK*.

Zvolený snímek se začne převádět s nastavenými parametry. Tento proces lze kdykoli přerušit stiskem tlačítka *Cancel*. Opětovné spuštění převodu obstarává tlačítko *Calculate*. Proces převodu je poměrně pomalý a zvláště u rozměrných obrázků trvá i několik desítek minut. O průběhu převodu jste informováni prostřednictvím dolního stavového řádku.

Po provedení převodu je výsledný snímek zobrazen v pravé náhledové části okna aplikace. Lze si jej prohlédnout v jeho skutečné velikosti, nebo jej zmenšit, aby vyplnil náhledovou plochu.

Výsledek odpovídající očekávání lze uložit v hlavním menu aplikace. Menu *File* a volba *Save As LDR* vyvolá dialog pro určení lokace, jména a typu ukládaného souboru.

Pro zájemce, kteří se zajímají blížeji o dílčí výsledek filtrování, jsou v menu *File* volby *Save Base layer* a *Save Detail Layer*. Ty umožňují uložit tyto dílčí obrázky do souboru typu *.png*. Primárním účelem bylo zkoumání výstupu filtru při psaní související diplomové práce.

## CD

Příložené CD obsahuje text této práce v elektronické podobě, zdrojové kódy vytvořené aplikace, sadou obrázku, na kterých bylo prováděno testování, a složky s výstupy z jednotlivých aplikací.