



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

POŘIZOVÁNÍ HDR OBRAZU ZE SEKVENCE SNÍMKŮ  
HDR IMAGE ACQUISITION FROM SEQUENCE OF IMAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ STANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN MUSIL

BRNO 2016

**Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií**

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2015/2016

**Zadání bakalářské práce**

Řešitel: **Staněk Jiří**

Obor: Informační technologie

Téma: **Požizování HDR obrazu ze sekvence snímků**  
**HDR Image Acquisition from Sequence of Images**

Kategorie: Zpracování obrazu

**Pokyny:**

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se HDR obrazů, hardware pro snímání více standardních snímků (LDR) s různou expozicí a postupy pro jejich skládání ve snímek s vysokým dynamickým rozsahem (HDR). Uvažujte statickou scénu.
2. Vyberte jeden z možných postupů pro složení více snímků do HDR obrazu a také několik operátorů pro tónování výsledného obrazu.
3. Proveďte návrh grafického programu demonstrujícího použití metod vybraných v předchozím bodě zadání na zadané sadě snímků. Program by měl umožňovat snadné přepínání použitých operátorů a případně změnu jejich parametrů.
4. Implementujte navržený program.
5. Diskutujte dosažené výsledky a navrhněte možné pokračování práce.

**Literatura:**

- Hoefflinger, B. "High-Dynamic-Range (HDR) Vision: Microelectronics, Image Processing." *Computer Graphics (Springer Series in Advanced Microelectronics)*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ (2007).
- Banterle, Francesco, et al. *Advanced high dynamic range imaging: theory and practice*. CRC Press, 2011.
- Reinhard, Erik, et al. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

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

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% 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: **Musil Martin, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2015

Datum odevzdání: 18. května 2016

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
612 05 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Tato bakalářská se zabývá získáváním obrazu s vysokým dynamickým rozsahem založeným na kompozici běžných digitálních fotografií. Na základě této metody skládání je implementován program s grafickým uživatelským rozhraním. Výsledná aplikace umožňuje uložit vytvořené obrazy s vysokým rozlišením nebo je převést na snímky, které jsou zobrazitelné na běžných displejích, pomocí tónového mapování.

## Abstract

This bachelor thesis deals with high dynamic range image acquisition based on composition of ordinary digital photographs. Using this composition method, a program with graphical user interface is implemented. This application is able to save created images with high dynamic range or convert them to figures that are displayable on common displays using tone mapping.

## Klíčová slova

vysoký dynamický rozsah, tónové mapování, fotografie, vícenásobná expozice, kompozice snímků

## Keywords

high dynamic range, tone mapping, photography, multiple exposure, image composition

## Citace

STANĚK, Jiří. *Pořizování HDR obrazu ze sekvence snímků*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Musil Martin.

# Požizování HDR obrazu ze sekvence snímků

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Musila a že jsem uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Jiří Staněk  
16. května 2016

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Musilovi za jeho ochotu, odborné vedení a věcné připomínky, které významně přispěly ke zvýšení kvality této bakalářské práce.

© Jiří Staněk, 2016.

*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

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Důležité pojmy a úvod do HDR</b>	<b>3</b>
2.1 Digitální reprezentace barev a HDR . . . . .	3
2.2 Vybrané pojmy z oboru fotografie . . . . .	4
2.3 Přehled principů pro zpracování HDR obrazu . . . . .	7
2.4 Pořizování HDR obrazů ze sekvence LDR snímků . . . . .	10
2.5 Tónové mapování . . . . .	12
<b>3 Specifikace zadání</b>	<b>16</b>
<b>4 Návrh a implementace aplikace</b>	<b>17</b>
4.1 Použité knihovny . . . . .	17
4.2 Grafické uživatelské rozhraní . . . . .	18
4.3 Implementace funkcionality . . . . .	19
<b>5 Zhodnocení výsledků</b>	<b>22</b>
5.1 Rychlost skládání fotografií . . . . .	22
5.2 Rychlost tónového mapování . . . . .	23
5.3 Specifika jednotlivých tónovacích operátorů . . . . .	23
<b>6 Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Literatura</b>	<b>30</b>
<b>Přílohy</b>	<b>32</b>
<b>A Obsah CD</b>	<b>33</b>

# Kapitola 1

## Úvod

I přesto, že dnes drtivá většina společnosti disponuje fotoaparátem, či jiným zařízením pro zachycování obrazové reality, stále nejsou běžně dostupné technologie, jež by umožňovaly pořizovat a reprodukovat realitu tak věrně, jako to dokáže lidské oko. Jedním z velkých omezení dnešních snímacích zařízení je špatná schopnost zachytit celý světelný rozsah fotografované scény. Aby nebylo nutné využívat velmi drahá zařízení s lepšími pořizovacími a zobrazovacími vlastnostmi, lze pořízené fotografie dodatečně zpracovat, což umožňuje z velké části obnovit dynamický rozsah světla původní scény a upravit ho tak, aby jej bylo možné zobrazit na běžných displejích.

Důvodů, proč využívat fotografie s vysokým dynamickým rozsahem, je hned několik. Jedná se zejména o zvýšení množství detailů, které fotografie mohou nést, díky čemuž vznikají snímky, jež se rozsahově blíží lidskému vidění. Dalším důvodem je menší omezení světelnými podmínkami při pořizování fotografií. Každý fotograf jistě zažil situaci, kdy kvůli špatným světelným podmínkám nedokázal pořídit kvalitní fotografii. Typickým příkladem je focení objektu proti slunci, kdy bude buď dobře vidět obloha a z objektu se stane tmavá silueta, nebo naopak bude kvalitně zachycen objekt, ale obloha bude přesvícená. Pokud ovšem bude tato scéna uložena jako fotografie s vysokým dynamickým rozsahem, budou rozeznatelné detaily ve všech částech snímku.

Tato práce popisuje techniku reprodukce scén s vysokým dynamickým rozsahem za použití běžně dostupných prostředků. Tato metoda staví na dodatečném zpracování, kdy je výsledný obraz složen ze sekvence pořízených fotografií. V kapitole 2 jsou popsány všechny náležitosti důležité pro pochopení problematiky dynamického rozsahu. Jde v zásadě o základní fotografické a grafické pojmy, které jsou velmi hojně používány v dalších částech tohoto textu, a je zde také objasněna problematika dynamického rozsahu. Také je zde vysvětlena metoda skládání obrazů a další techniky pro práci s obrazem s vysokým dynamickým rozsahem. Následují kapitoly 3 a 4, kde první z nich podrobně specifikuje zadání této práce a druhá popisuje dopodrobna návrh a implementaci výsledného programu. V kapitole 5 jsou zhodnoceny výsledky implementované aplikace. Závěrečná kapitola 6 shrnuje dosažené výsledky a popisuje směry, kterými by se mohlo pokračovat při dalším rozšíření práce.

## Kapitola 2

# Důležité pojmy a úvod do HDR

### 2.1 Digitální reprezentace barev a HDR

Pro pochopení problematiky vysokého dynamického rozsahu je třeba nejprve uvést důležité pojmy objasňující reprezentaci barev v digitálních systémech a základní termíny z oblasti fotografie. Je také nutné do hloubky vysvětlit dynamický rozsah fotografií, který je ústředním tématem této bakalářské práce.

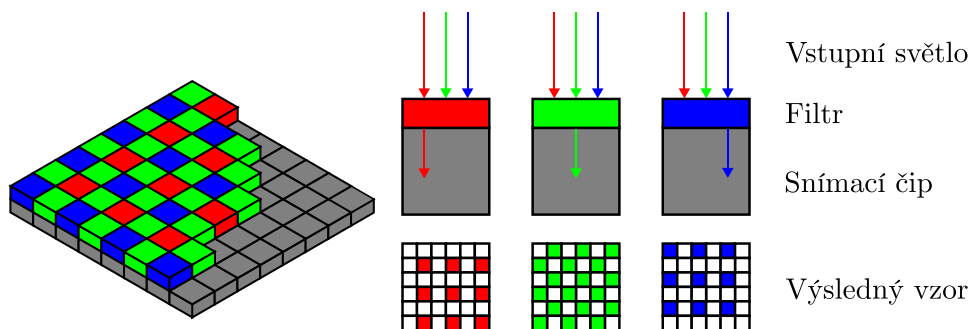
#### 2.1.1 Vnímání obrazové reality

Základním nositelem informace pro rekonstrukci obrazové reality je světlo. Lidské oko dokáže na základě světelných paprsků odražených od okolních objektů vnímat prostředí [12]. Obdobný princip využívají i klasické fotoaparáty, které pracují na principu osvětlování fotocitlivého filmu. Digitální aparáty oproti těm klasickým převádějí zachycený obraz do číslíkové podoby. Díky tomu můžeme s pořízenými snímky pracovat prostřednictvím výpočetní techniky, která umožňuje velmi efektivně obraz modifikovat. S příchodem digitálních fotoaparátů se tedy výrazně změnilo celé fotografické řemeslo, protože nedílnou součástí tohoto uměleckého odvětví se stala dodatečná úprava pořízených snímků pomocí nejrůznějších softwarových nástrojů.

#### 2.1.2 Digitální fotografie

Princip digitálního fotoaparátu vychází z konstrukce fotoaparátu klasického typu. Ten objektivem propustí při pořizování snímku požadované množství světla na film, jenž poté nese informace o fotografované scéně. Oproti klasickým aparátům není světlocitlivou plochou film, ale čip se snímačem světla. Na plochu senzoru dopadají světelné paprsky, jež byly propuštěny objektivem zařízení. Takto zachycený obraz je dále po jednotlivých obrazových bodech převeden na elektrický signál, jenž je následně analogově-číslíkovým převodníkem převeden do digitální reprezentace.

Protože je potřeba snímky ukládat do RGB barevného prostoru [1], se kterým pracuje drtivá většina dnešní výpočetní techniky, nachází se na světlocitlivé ploše snímače mřížka s filtry pro červenou, zelenou a modrou barvu, zvaná Bayerův filtr [3]. Tato mřížka obsahuje pro každý obrazový bod filtr propouštějící světlo o určité vlnové délce. Takto fungující Bayerova maska včetně jednotlivých barevných filtrů je schématicky zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 2.1: Schéma Bayerova filtru

Pokud není zachycené světlo dále modifikováno, hovoříme o tzv. *RAW* fotografii [14]. Ve většině případů fotoaparáty ve výchozím režimu neukládají pořízené snímky jako RAW, ale aplikují na obraz různé operace za účelem „vylepšení“ obrazu, proto je zpravidla nutné snímání do RAW manuálně zvolit v nastavení fotoaparátu.

Většina standardizovaných formátů používaných pro uložení klasických digitálních obrazových dat využívá kódování, které každému barevnému kanálu jednoho obrazového bodu přiřazuje 8 bitů. Z toho vyplývá, že každá barevná složka může nabývat pouze 256 různých úrovní. Takový rozsah se ovšem zdaleka nepřibližuje spektru lidského oka a množství informací, jež umožňuje reprezentovat, je pro vytvoření snímků s vysokým dynamickým rozsahem nedostatečné.

### Gamma korekce

Gamma korekce je funkce zajišťující nelineární změnu jasu obrazu [4]. Nejsvětlejší a nejtmavší body snímků zůstávají zachovány a mění se jas ostatních hodnot jasového spektra. Veličinou  $\gamma$  rozumíme exponent ve vztahu,

$$B_{new} = (B_{old})^\gamma \quad (2.1)$$

kde  $B_{new}$  je jasová hodnota nového pixelu po aplikaci exponentu  $\gamma$  na původní obrazový bod  $B_{old}$ . Tímto způsobem nedochází pouze k lineární skoku při stanovování nových hodnot, ale dochází k pozvolné změně.

## 2.2 Vybrané pojmy z oboru fotografie

Pojmy uvedené v této části budou v dalších kapitolách hojně používány, proto je nezbytné je definovat. Jedná se zejména o problematiku dynamického rozsahu a o důležité fotografické pojmy, které je nutné pochopit pro pořízení kvalitní série snímků za účelem jejich složení do jednoho snímku s vysokým dynamickým rozsahem.

### 2.2.1 Dynamický rozsah

Dynamickým rozsahem rozumíme poměr mezi nejsvětlejším a nejtmavším bodem snímku. Lidské oko vnímá realitu v mnohem větším dynamickém rozsahu, než dokáže zachytit dnešní snímací mechanismy [15]. Digitálním fotografím, jež byly pořízeny běžnými aparáty, říkáme



tzv. *LDR* (*low dynamic range*) snímky, tedy obrazy s nízkým dynamickým rozsahem. Optika fotoaparátu dokáže zachytit pouze omezený rozsah, což neumožňuje zachytit detaily v místech, které se světelností výrazněji liší od zvoleného expozičního rozsahu. Kvůli této skutečnosti se fotografům například nedoporučuje fotit tzv. „proti slunci“, protože tato kompozice vede k velké ztrátě detailů nejen v místech slunečné oblohy, ale také v tmavých oblastech.



Obrázek 2.2: Rozdíl mezi rozsahem oka a digitálního fotoaparátu

Z obrázku 2.2.1 je patrný rozdíl mezi dynamickým spektrem, jež dokáže zachytit lidské oko, a mezi rozsahem, který dokáže reprodukovat digitální fotoaparát, kde červený rámeček přibližně demonstruje rozsah optiky fotoaparátu. Princip reprodukce celého rozsahu je možný díky sérii více snímků, kde každý z nich je pořízen tak, aby pokrýval určitou část rozsahu. Podrobně je tato technika popsána v kapitole 2.4. Takto vzniklé obrazy označujeme příjívlastkem *HDR* (*high dynamic range*).

## 2.2.2 Expozice

Pro pořízení samotné fotografie je nutné provést expozici, neboli vystavení světlocitlivé plochy světelným paprskům ze snímané scény. Expoziční hodnota udává celkové množství světla, jež při vystavení snímač zachytí a určuje poměr mezi nejsvětlejším a nejtmaším bodem na snímku. Expoziční hodnoty se měří na záporné logaritmické stupnici o základu dva v absolutních jednotkách *exposure value*, zkráceně *EV*. Tuto hodnotu lze odvodit z clonového čísla  $N$  a z expozičního času  $t$ .

$$EV = 2 \log N - \log 2t \quad (2.2)$$

Celkovou expozici snímku ovlivňuje několik veličin, které je nutné správně zkombinovat pro dobré výsledky při pořizování fotografií [17].

- **Rychlost závěrky**

Prvním z důležitých principů při pořizování fotografií je proměnlivá rychlost závěrky, která řídí samotnou dobu vystavení světlocitlivé plochy snímače vůči objektivem vpuštěným světelným paprskům. Komponenta fotoaparátu, jež řídí délku intervalu dopadu světla na snímač, se nazývá závěrka. Ta funguje jako stínítko, které dokáže po stisknutí spouště fotoaparátu svým pohybem propustit světlo na požadovaně dlouhou dobu. Expoziční čas se udává v sekundách a jejich zlomcích. Při pořizování sekvence snímků pro rekonstrukci vysokého dynamického rozsahu je právě rychlost závěrky tím parametrem, který měníme pro dosažení požadované expozice pro každou fotografii ze série.

- **Přeexponování a podexponování**

Tyto dva termíny se používají pro charakterizaci výchylek od optimální expozice pro nejlepší možnou výslednou fotografii. Přeexponovaná fotografie vzniká tehdy, když

je snímač příliš dlouho vystaven pronikajícímu světlu a jasnější části snímků ztrácejí detaily. Naopak u podexponované fotografie je plocha snímače vystavena na nedostatečně dlouhou dobu oproti optimálnímu nastavení a detaily zanikají v tmavých místech.

Příklady tří různých expozičních nastavení stejné scény jsou uvedeny na následujícím obrázku, kde první snímek je pořízen s optimální expoziční. Druhý snímek byl oproti prvnímu pořízen s nižším expozičním časem a je tedy podexponován. Poslední snímek ze série je naopak oproti druhému zachycen s delší dobou vystavení oproti optimální expoziční, a proto je přexponovaný.



Obrázek 2.3: Srovnání tří fotografií s různými expozičními časy

Při pořizování klasických snímků s nízkým dynamickým rozsahem jsou odchylky od optimální expozice negativním jevem, nicméně v některých případech můžeme obrazy s různými expozičními nastaveními pořizovat záměrně. Takovým případem je například pořizování série snímků za účelem pozdějšího složení do obrazu s vysokým dynamickým rozsahem.

### 2.2.3 Clona objektivu a hloubka ostrosti

Clona objektivu má schopnost měnit velikost otvoru, kterým propouští na snímač světlo. Tato změna má přímý vliv na množství světla a clona tedy může regulovat množství světla, jež dopadne na snímač [9]. Velikost clony se dá matematicky vyjádřit rovnicí 2.3,

$$F = f/d \quad (2.3)$$

kde  $F$  je clonové číslo,  $f$  ohnisková vzdálenost objektivu a  $d$  průměr otvoru clony. Ze vztahu vyplývá, že čím menší je štěrbinová propouštějící světlo, tím vyšší je clonové číslo.

Clona má také přímý dopad na hloubku ostrosti pořízených fotografií, což je rozsah vzdáleností na scéně, které se na fotografii zdají lidskému oku ostré. Při velkém clonovém čísle roste hloubka ostrosti a naopak.

### 2.2.4 Citlivost ISO

Tato hodnota vyjadřuje citlivost snímače na dopadající světlo [18]. V praxi se ovšem nemění samotná citlivost snímacího mechanismu, ale mění se způsob zpracování přijatých světelných informací. Negativní vlastností vyšší citlivosti je větší množství šumu, které se projevuje z důvodu zesílení původních obrazových dat. Se zvětšováním ISO citlivosti tedy roste i zašumění výsledného snímku. Typicky se pro běžné focení používá ISO v rozmezí 100–800, i když dnešní digitální zrcadlovky dokáží snímat s citlivostí v řádu tisíců až desítek tisíc.

## 2.3 Přehled principů pro zpracování HDR obrazu

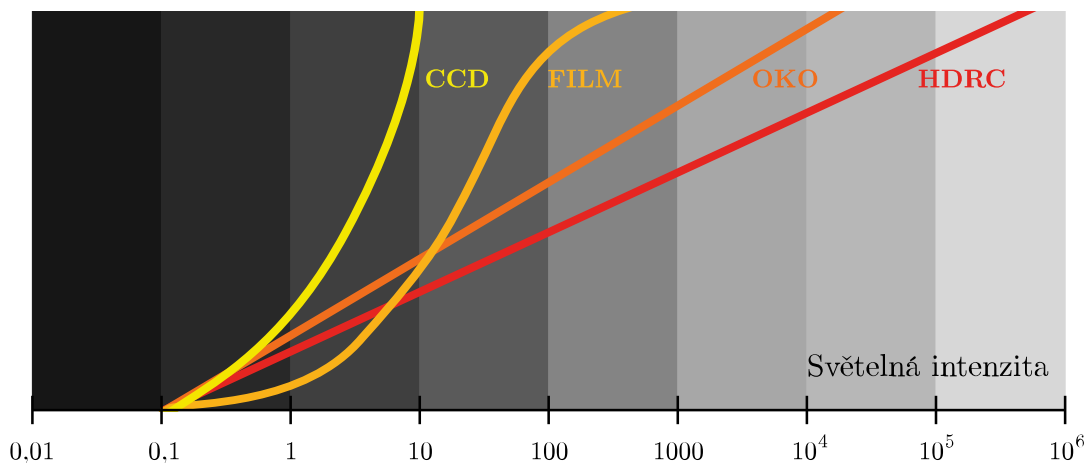
Zařízení umožňující pořizovat fotografie s vysokým dynamickým rozsahem v dnešní době již existují, nicméně pro běžné uživatele zatím nejsou příliš dostupná. Technologická náročnost takových přístrojů je vysoká a od tohoto faktu se také odvíjí jejich velmi nepříznivá cena. HDR obrazy lze ovšem vytvářet i pomocí běžně dostupných LDR prostředků softwarovou cestou díky dodatečnému zpracování. V následujícím textu budou popsány obě zmíněné technologie se zaměřením na druhou zmíněnou, tedy pořizování a zobrazování HDR obrazů za pomoci LDR prostředků.

### 2.3.1 Použití specializované techniky pro HDR obraz

Hlavním problémem specializovaných zařízení pro práci s obrazy s vysokým dynamickým rozsahem je jejich pořizovací cena. Ta je mnohonásobně vyšší oproti klasickým zařízením, a proto nejsou zařízení pracující přímo s HDR obrazem příliš rozšířená.

#### Pořízení HDR obrazů

V dnešní době již existují snímače, které dokáží nativně snímat scénu ve vysokém dynamickém rozsahu při jedné expozici. Oproti klasickým zachycovacím zařízením s nízkým dynamickým rozsahem přináší HDR snímače dvě hlavní změny. První z nich je zvýšení počtu bitů pro jednotlivé kanály, a tím pádem zvýšení počtu bitů pro každý konkrétní obrazový bod. Samotné zvýšení bitové hloubky ovšem nezajistí dynamické snímání. Lidské oko vnímá okolní světlo přibližně s logaritmickou citlivostí, zatímco klasické CCD a CMOS snímací čipy fungují s citlivostí lineární [19]. Vznikly tak snímače zvané souhrnně HDRC [2], které se zachycováním světla blíží logaritmické citlivosti, a tedy i lidskému oku. Porovnání křivek citlivostí na světlo ilustruje následující obrázek.



Obrázek 2.4: Srovnání citlivosti snímačů [2]

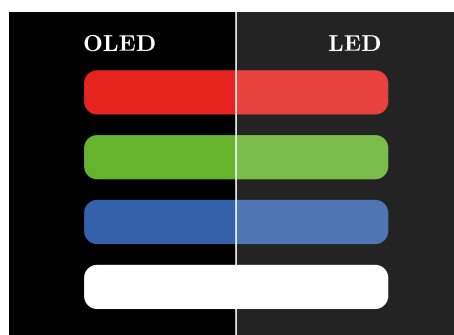
Na obrázku 2.4 je demonstrován rozdíl mezi citlivostí různých zachycovacích optik a jde vidět, že HDRC snímače dokáží světlo vnímat nejvěrněji. Jejich další výhodou oproti běžným zařízením s CCD a CMOS čipy je větší bitová hloubka, která umožňuje uložit snímek s mnohonásobně vyšší světelnou přesností a barevným kontrastem.

Pomineme-li cenu, největší aktuální nevýhodou je nízké rozlišení pořizovacích zařízení oproti klasickým LDR prostředkům. Zatímco dnešní digitální fotoaparáty snímají s rozlišením přes dvacet megapixelů, HDRC čipy v praxi nedosahují rozlišení ani jeden megapixel [2].

### Zobrazení HDR obrazů

Držitelem pomyslné první příčky v rozšířenosti na poli klasických displejů je stále technologie LCD. Ta funguje na bázi tekutých krystalů, které propouští požadované množství světla. Velký nedostatek LCD se spočívá v tom, že krystaly nedokáží nikdy průchodu světla úplně zabránit, což v kombinaci s typicky plošným podsvícením displejů způsobuje problém zobrazování sytě černé barvy.

Dnes již běžně dostupná technologie OLED využívá diodové osvětlení pro každý obrazový bod zvlášť, což umožňuje jednotlivé diody úplně vypnout a dosáhnout tak věrnou sytě černou barvu [13]. OLED panely jsou stále několikanásobně dražší v porovnání s konvenčními LCD zařízeními, ovšem během několika dalších let je očekáváno jejich postupné zlevňování.



Obrázek 2.5: Schématické vyobrazení rozdílu mezi OLED a LED panelem

Obrázek 2.5 schématicky vizualizuje rozdíl mezi oběma panely. Zatímco barvy zobrazované LED panelem působí „mdle“, OLED technologie umožňuje podávat výrazně kontrastnější výsledky a sytější černou barvu.

### 2.3.2 Použití LDR prostředků pro HDR obraz

Pro statické fotografie lze využít několika technik za účelem dosažení HDR obrazu. Pro tvorbu či zachycení pohyblivého obrazu ovšem tyto techniky nejsou příliš vhodné, a proto vznikají různá zařízení pro snímání ve vyšším dynamickém rozsahu, která byla okrajově popsána v předchozí podkapitole.

### Pořízení HDR obrazů

Běžně dostupné fotografické snímače s nízkým dynamickým rozsahem nedokáží rozeznat kontrastní detaily v místech s velmi rozdílnou světelností. Detaily scény jsou vždy zachovány jen v určitých částech fotografie. Pokud ovšem pořídíme sekvenci snímků statické scény ve stejném čase s různou expozicí, bude každá fotografie detailně zobrazovat jinou část scény podle zvolené délky vystavení. Složením takto pořízených fotografií můžeme rekonstruovat původní rozsah, protože díky různému expozičnímu stupni snímků jsou k dispozici detaily

ve všech oblastech scény. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi důležité téma pro tuto bakalářskou práci, bude tato problematika více přiblížena v sekci 2.4.

## Zobrazení HDR obrazů

I když se to tak na první pohled nemusí jevit, současné zobrazovací prostředky jsou relativně nedokonalé a neumožňují zobrazovat obraz s vysokým dynamickým rozsahem. Tento problém částečně řeší tzv. tónové mapování, jež dokáže namapovat obraz s vysokým dynamickým rozsahem na podobu, kterou dokáží dnešní dostupné displeje zobrazit. Tónové mapování funguje na principu komprese dynamického rozsahu podle určitého algoritmu a je jedním z předních témat této práce, proto je v sekci 2.5 věnováno jeho podrobnému popisu více prostoru.

### 2.3.3 Formáty HDR obrazů

Práce s HDR daty vyžaduje pokročilou aritmetiku, která umožňuje reprezentaci hodnot „za hranicí“ bílé barvy a zároveň musí poskytovat dostatečnou přesnost pro rozlišení malých nuancí ve spektru tmavých barev. Pro tento účel se nejvíce hodí aritmetika s plovoucí desetinnou čárkou, která disponuje výše uvedenými vlastnostmi. V následujících odstavcích jsou uvedeny vybrané formáty pro reprezentaci HDR obrazu. Podrobnější popis jednotlivých formátů a jejich specifik je uveden v článku *High Dynamic Range Image Encodings* [20].

- **Portable-Float-Map**

Portable-Float-Map neboli PFM je nejjednodušší formát pro ukládání HDR obrazů. Po jednoduché ASCII<sup>1</sup> hlavičce následují jednotlivé pixely reprezentovány třemi (RGB) hodnotami, jež jsou uloženy přímo pro každý obrazový bod jako standardní čísla s plovoucí desetinnou čárkou. Díky své jednoduchosti a absenci komprese je tento formát vhodný pouze pro malé obrazy, protože pro každý pixel je třeba vyhradit 12 bytů. Z toho vyplývá, že PFM obrazová data budou zabírat čtyřnásobný prostor oproti klasickému nekomprimovanému 24bitovému LDR obrazu.

- **TIFF Float**

Definice TIFF formátu neobsahuje pouze 8bitové a 16bitové barevné kanály, ale umožňuje také využívat aritmetiku s plovoucí desetinnou čárkou. Datová komprese není v tomto formátu podporována, což má za následek vysoké paměťové nároky pro ukládání obrazů tohoto typu. TIFF Float slouží jako základ pro další modifikace tohoto formátu a dvě nejpoužívanější varianty jsou uvedeny v této kapitole.

- **TIFF Pixar-log**

Tento formát umožňuje zakódování jednotlivých barevných kanálů do 11 bitů. Každá hodnota je uložena logaritmicky, což umožňuje pokrýt velkou část dynamického rozsahu. Logaritmická reprezentace hodnot navíc poskytuje výhodu konstantního poměru signálu a šumu napříč celým světelným spektrem. Data tohoto formátu jsou dále komprimována bezztrátovým ZIP algoritmem.

- **TIFF-SGI 24/32Bit LogLuv**

Formát TIFF-SGI LogLuv, který byl vyvinut společností Silicon Graphics, se snaží obejít problematickou kompresi klasických čísel s plovoucí desetinnou čárkou jiným

---

<sup>1</sup><http://asciitable.com/>

zakódováním hodnot. Jas je zakódován logaritmicky pomocí 10 (resp. 16) bitů. Informace o barvách jsou zkonvertovány do UV barevného rozsahu a uloženy jako dvě 7bitové (resp. 8bitové) hodnoty.

- **RGBE**

Velmi rozšířený formát, který je znám také jako Radiance HDR, používá příponu .hdr. Na začátku souboru je uložena jednoduchá rozšířitelná ASCII hlavička, po které následují obrazová data. Barva je zakódována jako 24bitová RGB hodnota, která je nezávislá na úrovni jasu. Čtvrtý a poslední byte pixelu obsahuje společný exponent všech tří barevných kanálů. Díky tomuto principu lze dosáhnout lepších kompresních vlastností oproti naivním formátům, jako je například TIFF Float.

- **OpenEXR**

OpenEXR je v posledních letech velmi populární formát. Hlavička souboru může obsahovat podrobné informace, jako např. pozici kamery a její nastavení a jiné parametry pro editační software. Pro kódování obrazových dat podporuje OpenEXR více metod. První z nich je kódování pomocí 32 bitů pro každý barevný kanál, kde může být využito buď bezznaménkové celočíselné aritmetiky, nebo aritmetiky s pohyblivou desetinnou čárkou. Druhou a více používanou variantou je 16bitové kódování, které sice snižuje dynamický rozsah, ale je pro praktické využití zpravidla dostatečné. Kromě klasických barevných kanálů lze přidat i kanály pro průhlednost, hloubku, či např. pro vektory povrchu. Další velkou výhodou formátu OpenEXR je fakt, že při použití bezztrátové komprese lze dosáhnout až 50% redukce dat.

## 2.4 Pořizování HDR obrazů ze sekvence LDR snímků

Jak již bylo několikrát zmíněno, klasické fotoaparáty s nízkým dynamickým rozsahem nedokážou pokrýt rozsah celé scény. Je tedy potřeba nasnímat scénu do několika snímků s různou expozicí, abychom byli schopni reprodukovat celé jasové spektrum. Typicky je potřeba pořádit alespoň tři snímky, z toho jeden s výchozí expozicí, jeden podexponovaný a jeden přeexponovaný. Snímky s nižší expozicí umožní vyniknout detailům v oblastech s vyšší intenzitou světla a naopak detaily v tmavých a stinných místech vyniknou na přeexponovaných fotografiích.

V první části této sekce jsou uvedeny základní praktiky, které je vhodné využívat při pořizování sekvence snímků. Druhá část pak detailně popisuje, jakým způsobem jsou snímky skládány do výsledného obrazu s vysokým dynamickým rozsahem.

### 2.4.1 Doporučení pro pořizování série LDR fotografií

Vzhledem k tomu, že vstupní série snímku je základem pro kvalitní výsledný HDR obraz, je nutné zmínit, jakým způsobem je vhodné fotografie pořizovat. Aby zachycené snímky splňovaly kvalitativní požadavky a byly dobře využitelné pro kompozici, musí fotograf dodržovat určitá pravidla.

Při samotném fotografování je potřeba zajistit stacionaritu scény a snímacího zařízení. Dosáhnout nehybnosti snímacího zařízení lze pomocí stativu, který zamezí pohybu během snímání jednotlivých fotografií. Další užitečnou pomůckou může být dálkové ovládání fotoaparátu, protože při manuálním stisku spouště dochází k drobné vibraci zařízení. Pokud není k dispozici dálkové ovládání, použití samospouště může být vhodnou alternativou. Je také

vhodné, aby snímky byly pořízeny v co nejkratším časovém intervalu, aby nedošlo v průběhu focení ke změně scény. K tomuto účelu nabízí většina kvalitních fotoaparátů funkci tzv. *autobacketingu* [10], jež umožňuje snímat sérii fotografií s různými parametry, přičemž v našem případě je vhodné měnit pouze expoziční čas. Většinou je dokonce možné přímo nastavit velikost expoziční odchylky a aparát vyfotí tři snímky s požadovanými vlastnostmi. Nepodporuje-li zvolený fotoaparát autobacketing, nebo pokud se rozhodneme sérii snímků pořizovat manuálně, je vhodné měnit pouze expoziční čas a ISO citlivost spolu s clonou ponechat na konstantní hodnotě pro všechny snímky.

Počet fotografií se odvíjí od dynamického rozsahu pořizované scény. Minimálně je potřeba pořídit tři snímky s různou expozicí, horní hranice však stanovena není. Vzhledem k tomu, že i tři fotografie dokáží dobře zachytit dynamiku scény, využívá se praxi nejčastěji tři až devíti snímků, protože větší množství obrazů zbytečně zvyšuje paměťové i výpočetní nároky, přičemž přináší pouze zanedbatelné vylepšení výsledků.

Je důležité, aby snímky byly pořízeny s odpovídajícím přeexponováním a podexponováním. Praxe ukázala, že pro velkou většinu fotografií stačí pouze tři fotografie s expozičním posunem 2 EV pro přeexponovaný snímek a -2 EV pro snímek podexponovaný. Čím větší expoziční rozdíly scéna obsahuje, tím více fotografií je žádoucí pořídit, aby byly zachovány kontrastní detaily napříč celou scénou. Kontrolu jednotlivých expozic lze provést například pomocí histogramu<sup>2</sup>. Při pořizování tří obrazů by histogram podexponovaného snímku měl obsahovat mezeru zprava, která znamená, že na fotografii nejsou zastoupeny nejsvětější odstíny. Analogicky lze postupovat při kontrole přeexponovaného snímku. Pokud mezery v histogramech chybí, je nutné zvětšit expoziční odchylku oproti původním fotografiím. Nejlepších výsledků bude dosaženo při použití RAW fotografií (viz 2.1.2), protože fotoaparáty mají tendenci pořízené snímky modifikovat a není tak zachována linearita zachyceného světla.

## 2.4.2 Kompozice snímků

Principem kompozice je stanovení hodnoty nového obrazového bodu vznikajícího HDR obrazu na základě příslušných pixelů všech fotografií ze série. Je nutné projít sérii snímků postupně po jednotlivých obrazových bodech a vypočítat hodnotu nového pixelu pro všechny body. Pro tuto bakalářskou práci byla zvolena kompoziční technika popsána v článku *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs* [7], která byla nazvána podle svých autorů, Paula Debevece a Jitendry Malika.

Metoda Debevece a Malika původně popisuje skládání HDR obrazu z fotografického filmu. Na hodnotu výsledného pixelu má vliv hodnota původních obrazových bodů, kdy pro každý příslušný bod ze série snímků je vypočítána nová hodnota podle následujícího vzorce.

$$\ln E_i = g(Z_{x,y}) - \ln \Delta t_j \quad (2.4)$$

Tuto rovnici můžeme také zapsat následovně.

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j]}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (2.5)$$

Z rovnice je patrné, že na hodnotu nového obrazového bodu mají vliv hodnoty původních bodů váhované pomocí váhové funkce, expoziční čas  $\Delta t$  a funkce odezvy fotoaparátu.

<sup>2</sup>Histogram je graf, který pro každý jas zleva od černé do bílé říká, jaká plocha fotografie (resp. kolik pixelů) ho má. Znázorňuje tedy rozložení jasů v obraze.



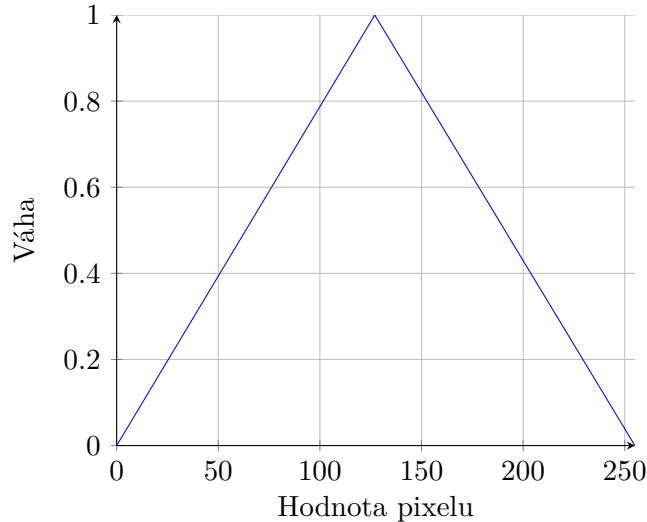
Vzhledem k tomu, že CCD a CMOS čipy běžných fotoaparátů pracují s lineární citlivostí, není třeba dopočítávat funkci odezvy. Fotoaparáty sice provádí drobné modifikace pořizovaných snímků, nicméně při použití RAW formátu je zajištěno uložení nezpracovaných dat nasnímaných s lineární citlivostí. Jsou-li tedy použité fotografie ve formátu RAW, je stanovování funkce odezvy redundantní. Funkce odezvy byla nutná zejména při reprodukci HDR obrazu z fotografických filmů, ale při použití prostředků s lineárním snímáním ji můžeme vypustit a celou rovnici linearizovat.

$$E_i = \sum_{j=1}^P \frac{w(Z_{ij}) \cdot Z_{ij}}{\Delta t_j} \bigg/ \sum_{j=1}^P w(Z_{ij}) \quad (2.6)$$

Pro tento program je použita váhová funkce, která je rovněž převzata ze stejného článku jako celá technika skládání, a je dána následující rovnicí.

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{pro } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{pro } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Pro lepší představu je vhodné uvést i graf váhové funkce.



Z grafu lze vyčíst, že funkce přiřazuje nejvyšší váhy bodům se střední expozicí. Naopak body přeexponované a podexponované budou mít váhu nejmenší. Účelem je tedy upřednostnění pixelů se správnou expozicí, zatímco body z okolí okraje světelného rozsahu fotografií budou téměř zanedbány. Pokud jsou tedy funkci poskytnuty fotografie pokrývající celý dynamický rozsah scény, výsledkem bude fotografie, jež bude uchovávat detaily i v místech, ve kterých by to nebylo při použití nízkého dynamického rozsahu možné.

## 2.5 Tónové mapování

Bežné prostředky nejsou schopny obrazy s vysokým dynamickým rozsahem zobrazit. Aby nebylo nutné pořizovat drahé displeje s HDR technologií, je potřeba převést spektrum HDR fotografie na rozsah, jenž je možné promítnout na klasických displejích. K tomuto účelu slouží technika zvaná *tónové mapování*. Existuje mnoho technik tónového mapování, jež pro převod používají různé algoritmy. Různé techniky mapování nazýváme tónovací



operátory a ty se vzájemně liší algoritmy, které využívají pro konverzi rozsahu. Nejobecněji je lze rozdělit do dvou skupin, na lokální a globální. Zatímco globální operátory mapují každý bod obrazu nezávisle na okolí pixelu, lokální operátory uvažují při výpočtu i okolí právě zpracovávaného bodu. Aplikace vyvinutá v rámci této bakalářské práce implementuje několik globálních operátorů.

- **Lineární operátor**

Lineární operátor [6] je tou nejjednodušší technikou, kterou lze pro mapování použít. Při výpočtu nových pixelů nelze měnit žádné proměnné parametry, jedná se pouze o prostou lineární kompresi rozsahu. Tento nezákladnější operátor neposkytuje v praxi většinou příliš kvalitní výsledky a je zde uveden zejména pro pochopení problematiky a z ilustračních důvodů. Všechny pixely obrazu jsou vynásobeny stejným koeficientem, který je stanoven podle pixelu s maximální luminancí v rámci celého HDR obrazu.

$$L_d(x, y) = c \cdot L_w(x, y) \quad (2.8)$$

- **Logaritmický operátor**

Dalším zástupcem z kategorie základních globálních operátorů je logaritmické mapování [6]. To pro výpočet nových obrazových bodů využívá logaritmickou funkci danou vzorcem:

$$L_d(x, y) = \frac{\log_{10}(p \cdot L_w(x, y) + 1)}{\log_{10}(q \cdot L_{wmax} + 1)} \quad (2.9)$$

Z rovnice lze vyčíst, že oproti lineárnímu operátoru můžeme využít dva parametry pro ovlivnění výsledného obrazu. Parametry  $p$  a  $q$  jsou konstanty voleny uživatelem a mohou nabývat hodnot  $p, q \in [1, \infty)$ .

- **Exponenciální operátor**

Jak napovídá název, tento operátor využívá pro mapování exponenciální závislost [6]. Uživatel má stejně jako v případě logaritmického operátoru možnost upravovat konstanty  $p$  a  $q$ , jež mohou být vybírány z rozsahu  $p, q \in [1, \infty)$ .

$$L_d(x, y) = 1 - \exp\left(-\frac{p \cdot L_w(x, y)}{q \cdot L_{wmax}}\right) \quad (2.10)$$

- **Reinhardův operátor**

Prvním z pokročilejších algoritmů je Reinhardův operátor, jež byl popsán v článku *Photographic Tone Reproduction for Digital Images* [16]. Tento způsob mapování je jedním z nejpoužívanějších, protože poskytuje velmi dobré výsledky.

Prvním krokem algoritmu je aproximace tzv. *klíče scény*. Klíč scény vyjadřuje celkovou světelnost obrazu. Dalo by se říct, že subjektivně tmavé fotografie budou mít nízkou hodnotu klíče, zatímco jasné fotografie budou mít hodnotu klíče vysokou. Vypočítáme jej jako podíl tzv. *klíčové hodnoty* a globální jasové váhy, kterou můžeme získat ze vzorce,

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp\left(\sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x, y))\right) \quad (2.11)$$

kde  $L_w(x, y)$  je luminance pixelu zohledňující globální scénu,  $N$  je celkový počet obrazových bodů fotografie.  $\delta$  je malá hodnota, jež zabraňuje singularitě<sup>3</sup> při výpočtu logaritmu, pokud se ve scéně objevují pixely s absolutně černou barvou, a tedy nulovou hodnotou. Nyní se nabízí vynásobit hodnoty všech pixelů klíčem, který spočítáme jako podíl klíčové hodnoty a globální jasové váhy. Typicky používané klíčové hodnoty jsou v rozsahu 0.09–0.72 a obecně mohou nabývat hodnot z intervalu  $a \in (0, 1)$ .

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y) \quad (2.12)$$

Předchozí vztah stále není konečný, problém nastává ve světlých částech snímku. Dřívější klasické fotoaparáty tento problém řešily kompresí nízkých a vysokých hodnot luminancí, moderní zařízení ovšem snímají celý rozsah lineárně. Tuto skutečnost Reinhardův operátor řeší rovnicí,

$$L_d(x, y) = \frac{L_w(x, y)}{1 + L_w(x, y)} \quad (2.13)$$

kde nízké jasové hodnoty zůstávají přibližně na svých hodnotách, zatímco pixely s vysokou luminancí jsou se blíží své inverzní hodnotě. Jmenovatel pravé části rovnice zajišťuje hladký přechod napříč dynamickým spektrem. Rovnice je dále rozšířena tak, aby obraz ve světlých místech neztrácel detaily.

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L_w(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L_w(x, y)} \quad (2.14)$$

Předchozí rovnice je v podstatě spojení lineárního mapování a rovnice 2.13.  $L_{white}$  je úroveň jasu, která bude namapována na čistě bílou barvu. V praxi se za  $L_{white}$  dosazuje hodnota pixelu scény s maximální luminancí. Tento postup zajišťuje zachování detailů v tmavých částech obrazu a potřebnou kompresi přeexponovaných míst.

- **Dragův operátor**

Dalším pokročilým globálním operátorem je Dragův operátor, jenž byl definován v článku *Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes* [8]. Tato technika mapování přímo vychází z logaritmického tónového mapování, jež je popsáno výše. Autoři článku uvádí, že zvolený základ logaritmů při mapování přímo ovlivňuje podobu výsledného obrazu. Hodnoty  $\log_{base}(L_w)$  pro  $base < 2$  se zvyšují příliš skokově, což činí kompenzaci expozice velmi náročnou. Snímky si zachovávají dobrý kontrast a detaily v tmavých oblastech, ale nejsou subjektivně dostatečně světlé. Naopak hodnoty  $\log_{base}(L_w)$  pro  $base > 10$  dokáží vysoký jas efektivně potlačit, ale za cenu ztráty kontrastních vlastností tmavých částí fotografie. Ani jeden z těchto postupů neposkytuje v praxi dobré výsledky, proto byl na jejich základě vytvořen operátor, jenž kombinuje jejich pozitivní vlastnosti.

Dragův operátor tedy využívá logaritmickou kompresi luminance, kdy pro každý pixel umožňuje měnit základ logaritmu  $base$ . Algoritmus využívá následující vztah pro výpočet logaritmu o libovolném základu.

<sup>3</sup>Singularitou rozumíme nedefinované chování, tedy dosažení hodnot, jež nespádají do definičního oboru funkce.

$$\log_{base}(x) = \frac{\log(x)}{\log(base)} \quad (2.15)$$

Pro hladký přechod mezi základy logaritmů je využita Perlin-Hoffertova [11] exponenciální funkce.

$$bias_b(t) = t^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \quad (2.16)$$

Algoritmus pro výpočet hodnot pixelů poté vypadá následovně.

$$L_d(x, y) = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)} \quad (2.17)$$

$L_{dmax}$  je maximální jasová hodnota, jež dokáže zobrazit daný displej. Typicky se používá hodnota  $100cd/m^2$ . Parametr  $b$  se ve většině případů volí mezi hodnotami 0,7 a 0,9, přičemž experimenty ukázaly, že univerzální hodnota 0,85 poskytuje velmi kvalitní výsledky.  $L_w$  a  $L_{wmax}$  jsou jasové hodnoty normalizovány váhovým koeficientem  $L_{wa}$ , jenž se vypočítá jako logaritmus průměrné hodnoty luminancí HDR snímku a je dále normalizován podle rovnice 2.18.

$$L_{wa} = \frac{L_w}{(1 + b - 0.85)^5} \quad (2.18)$$

## Kapitola 3

# Specifikace zadání

Informace uvedené v předchozí kapitole slouží jako základ pro návrh a vývoj aplikace s grafickým uživatelským rozhraním pro skládání HDR obrazů ze sekvencí klasických LDR snímků. Hlavním cílem této bakalářské práce je tedy vytvoření GUI aplikace, jejímž vstupem bude série LDR snímků a výstupem obraz s vysokým dynamickým rozsahem. V této kapitole jsou vymezeny požadavky na grafické uživatelské rozhraní a zároveň je zde definována očekávaná funkcionální aplikace, která bude implementována v rámci této práce.

### Požadavky na GUI

Program musí být navržen tak, aby i uživatel, který nemá žádné zkušenosti v oboru, dokázal bez problému aplikaci používat. Prostředí tedy musí být přehledné, dostatečně intuitivní a mělo by umožňovat snadné přepínání metod tónového mapování. Aplikace dále musí být schopna zobrazovat výsledky tónového mapování podle zvoleného operátoru a jeho případných parametrů. Pokud nastane při běhu programu chyba, měl by uživatel obdržet zprávu s popisem konkrétního problému, jenž způsobil chybu aplikace.

### Požadavky na funkcionální

Program musí umět načíst sérii snímků stejné scény s různou expozicí. Přípustné jsou minimálně tři fotografie. Načtené snímky jsou následně zkombinovány do jednoho obrazu s vysokým dynamickým rozsahem. Skládání obrazů bude využívat techniku Debevece a Malika. O určení váhy jednotlivých pixelů obrazů se postará váhová funkce, jež každému barevnému kanálu všech obrazových bodů fotografií přiřadí příslušnou váhu podle jeho hodnot.

Složený HDR snímek může uživatel uložit, nebo dále mapovat do zobrazitelného rozsahu na běžných displejích. Pro uložení byl vybrán formát Radiance HDRE (viz 2.3.3), jež umožňuje fotografie ukládat velmi kompaktně. K účelu zobrazení HDR obrazu slouží několik tónových operátorů. Ty umožňují převést dynamický rozsah původní HDR fotografie na obraz, jenž můžeme zobrazit na klasických obrazovkách. Implementovány budou základní i pokročilé tónové operátory. Pro různé obrazy se některé operátory hodí více či méně, proto musí mít uživatel možnost volby. Ze základních mapovacích operátorů budou implementovány lineární, logaritmický a exponenciální. Jako zástupci pokročilejších mapovacích metod byly zvoleny Reinhardův a Dragův operátor, které slibují kvalitní výsledky. Ty byly vybrány na základě stránky [5], která srovnává výsledky pokročilých mapovacích technik.

## Kapitola 4

# Návrh a implementace aplikace

Na začátku této kapitoly jsou probrány základní implementační náležitosti, jako například zvolený programovací jazyk, framework pro vývoj grafického uživatelského prostředí a také použité knihovny. Dále jsou popsány detaily návrhu a implementace uživatelského rozhraní s grafickou nástavbou. Poslední část této kapitoly se věnuje funkcionalitě.

Pro implementaci aplikace byl zvolen objektově orientovaný jazyk C++, který umožňuje využití knihovny OpenCV. Pro vývoj byl použit framework Qt<sup>1</sup> ve verzi 5.5, jenž umožňuje velmi efektivně implementovat grafické rozhraní aplikace. Tato kombinace byla vybrána zejména kvůli efektivitě a přenositelnosti výsledného programu. Aplikace byla vyvíjena na operačním systému Ubuntu 12.04 LTS<sup>2</sup>.

Qt sice poskytuje designér pro automatické generování uživatelského rozhraní, ovšem kód tohoto programu byl celý vytvořen manuálně. Designér sice umožňuje jednoduchý návrh prostředí, ale za cenu toho, že programátor ztrácí kompletní přehled o objektech tvořících grafické rozhraní. Z tohoto důvodu bylo raději zvoleno ruční psaní všech částí zdrojového kódu.

### 4.1 Použité knihovny

Aplikace využívá pro svůj běh tři knihovny. První z nich je otevřená multiplatformní knihovna OpenCV<sup>3</sup> ve verzi 3.1.0, jež poskytuje implementaci zejména pro oblast zpracování obrazu v reálném čase, a jsou využívány její funkce a struktury pro práci s rastrovou statickou grafikou. Díky nim je možné využívat matice pixelů, které dokáží pracovat s čísly s pohyblivou desetinnou čárkou, a není nutný manuální návrh struktur. Knihovna také umí načítat a ukládat snímky v různých formátech a není nutné je zpracovávat ručně.

Druhá knihovna, kterou program ke své činnosti využívá, se nazývá Easyexif<sup>4</sup>. Jde o velmi jednoduchou knihovnu, která slouží pro načítání metadat fotografií ve formátu JPEG.

Třetí použitou knihovnou je modul pro práci s formátem Radiance RGBE<sup>5</sup> od Bruce Waltera. Ten výrazně zjednodušuje práci s obrazy s vysokým dynamickým rozsahem. Umožňuje soubory načítat i ukládat. Zdrojový kód byl lehce upraven pro specifické použití v aplikaci. Přímo v kódu modulu je uvedeno, že knihovna slouží jako skelet, který si musí programátor modifikovat pro potřeby konkrétního programu.

---

<sup>1</sup><http://qt.io/>

<sup>2</sup><http://ubuntu.com/>

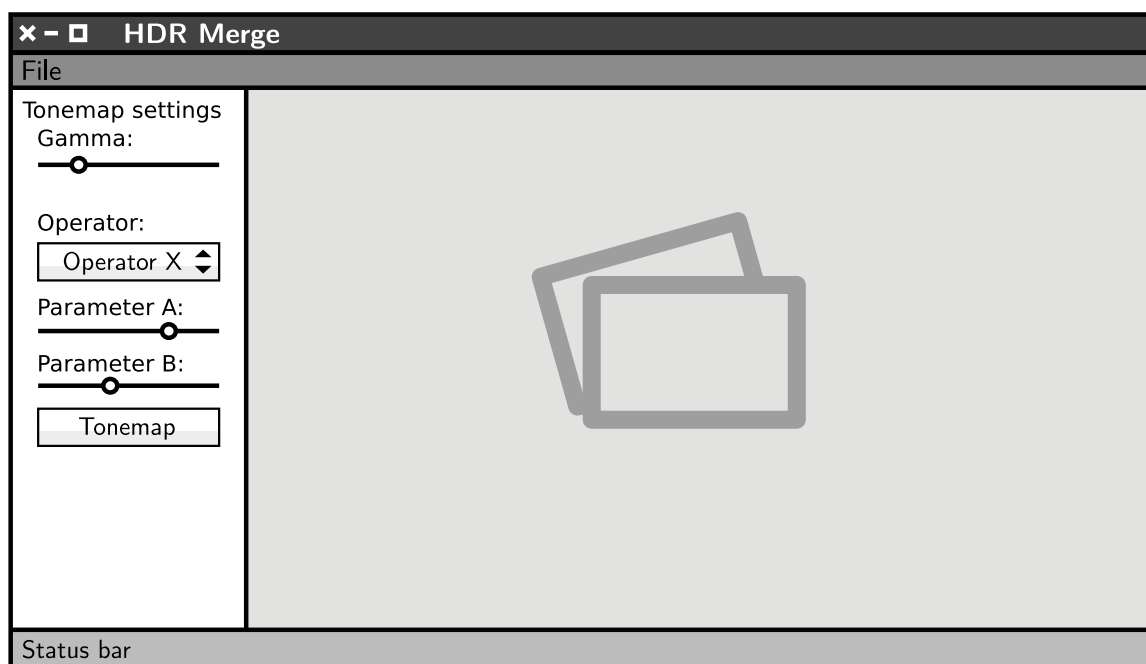
<sup>3</sup><http://opencv.org/>

<sup>4</sup><http://github.com/mayanklahiri/easyexif/>

<sup>5</sup><http://graphics.cornell.edu/~bjw/rgbe.html>

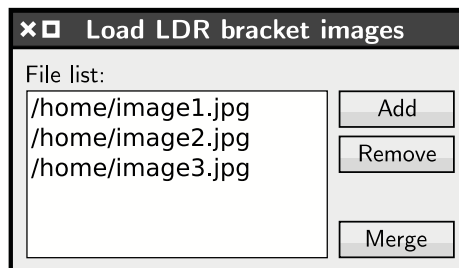
## 4.2 Grafické uživatelské rozhraní

Návrh grafického uživatelského rozhraní vychází z klasických editorů pro úpravu fotografií. Nejdůležitějším prvkem aplikace je hlavní okno programu, jež je rozděleno na dvě hlavní části. Levá část obsahuje panel s volbami tónového mapování. Zbylou část hlavního aplikačního okna tvoří velká plocha pro zobrazení výsledku mapování. Snímek zobrazený v této oblasti je možné přibližovat a oddalovat, což zvyšuje komfort při používání programu, zvláště při zkoumání detailů fotografií s vysokým rozlišením. Uživatel může fotografii přiblížit či oddálit až trojnásobně. Při vytvoření či otevření nového HDR snímku je obraz automaticky přeškálován tak, aby co nejefektivněji vyplnil příslušnou plochu. Na spodní části okna se nachází stavová lišta, která informuje uživatele o vykonávaných akcích a zobrazuje délku výpočetních operací.



Obrázek 4.1: Schéma hlavního okna

Jedno hlavní okno ovšem nepostačuje pro komfortní zážitek při používání programu. Je třeba uživatele informovat o chybových hlášeních a dalších událostech. Pro tyto účely slouží dialogová okna, jež jsou vyvolávána, aby náležitě informovala uživatele. Pro načítání fotografií s různou expozicí slouží taktéž dialogové okno, jež umožňuje přidat či odebrat fotografie.



Obrázek 4.2: Schéma dialogového okna pro výběr souborů

Implementace vychází z frameworku Qt. Hlavní okno je instancí třídy *QMainWindow*, dialogové okno pro načtení série fotografií je instancí třídy *QDialog*. Chybová hlášení a upozornění jsou uživateli zobrazovány instancemi třídy *QMessageBox*. Pokud skládání fotografií či tónové mapování trvá déle než tři vteřiny, je uživatel informován o průběhu pomocí okna typu *QProgressDialog*.

### 4.3 Implementace funkcionality

Je důležité, aby navržený program splňoval všechny požadavky, které definuje kapitola 3. Pro snadné pochopení fungování aplikace je vhodné nejprve uvést základní implementované třídy pro práci s fotografiemi. Jedná se o dvě třídy, kdy jedna reprezentuje snímky s nízkým a druhá s vysokým dynamickým rozsahem. Jedná se v principu o velmi podobné třídy, ovšem třída pro obrazy s vysokým dynamickým rozsahem poskytuje funkcionalitu pro skládání LDR obrazů.

- **Třída *LowImage***

Klasickou fotografii s nízkým dynamickým rozsahem zastupuje třída zvaná *LowImage*, která slouží ke dvěma hlavním účelům. Prvním z nich je práce se vstupními snímky, kde je třeba ověřit validitu nejen jednotlivých obrazů, ale i série jako celku. Druhým účelem je exportování obrazů jež vznikly jako výsledek tónového mapování. Nejdůležitějším prvkem třídy *LowImage* je bezpochyby objekt `cv::Mat`, jenž zastupuje obrazovou matici. Jedná se o základní datovou strukturu pro práci s rastrovou grafikou, kterou implementuje knihovna OpenCV. V případě LDR obrazů mohou jednotlivé barevné kanály obrazových bodů nabývat 256 různých hodnot, což odpovídá datovému typu `unsigned char`. Aby bylo možné výsledky tónového mapování vykreslit, je nutné zajistit konverzi mezi obrazovou maticí `cv::Mat` a objektem pro práci s obrazem frameworku Qt zvaným *QImage*. Tento převod je realizován pomocí metody `LowImage::getQImage()`. Export LDR obrazů zajišťuje metoda knihovny OpenCV s názvem `cv::imwrite`, která umožňuje jednoduše ukládat snímky v několika běžných formátech.

- **Třída *HighImage***

Obraz s vysokým dynamickým rozsahem zastupuje třída *HighImage*. K uložení obrazové matice je opět použit objekt `cv::Mat`, kde je obrazový bod reprezentován trojicí hodnot o 4bajtových hodnotách typu `float`, které reprezentují barevné kanály. Třída umí načítat i ukládat obrazy ve formátu RGBE, k čemuž je využita knihovna pro práci s RGBE soubory. Třída *HighImage* již neslouží pouze pro reprezentaci obrazů

s vysokým dynamickým rozsahem, ale její metody implementují i kompozici snímků. Skládání obrazů implementuje jeden z konstruktorů třídy, jenž jako parametr přebírá vektor odkazů na objekty typu `LowImage`.

### 4.3.1 Skládání obrazů

Aby bylo možné zahájit výpočet nových pixelů HDR obrazu, musí být splněno hned několik předpokladů. Prvním z nich je dostatek vstupních fotografií, přičemž minimálním počtem jsou tři. Druhým nezbytným kritériem je stejný rozměr všech snímků ze série. Poslední podmínkou je uložený expoziční čas v EXIF hlavičce každého vstupního obrazu, který je načten pomocí instance třídy `EXIFInfo`, kterou implementuje knihovna `Easyexif`. Pokud nejsou splněny tyto tři předpoklady, uživateli se zobrazí okno, které ho informuje o konkrétním problému.

Jsou-li zmíněná kritéria splněna, je zavolán konstruktor metody `HighImage` a jako parametr je předán vektor objektů typu `LowImage`. Následně proběhne výpočet nových pixelů HDR obrazu podle rovnice 2.6 a každý nově vypočítaný pixel je ihned „zapsán“ do vznikající matice. Váhová funkce je implementována pomocí pole hodnot, které je naplněno při spuštění kompozice. Použití tohoto principu zvyšuje efektivitu výpočtu a zjednodušuje implementaci případného rozšíření o další váhové funkce.

### 4.3.2 Tónové mapování

Kvůli snadné rozšiřitelnosti aplikace o další operátory tónového mapování vznikla třída `ToneMapping`, od které dědí všechny třídy reprezentující jednotlivé operátory. Pomyslným základem třídy `ToneMapping` je metoda `ToneMapping::map()`, kterou implementuje každý operátor rozdílně a která vždy vrací jako výsledek obraz s nízkým dynamickým rozsahem typu `LowImage`. Dále tato třída poskytuje metody pro gamma korekci (viz 2.1.2) a pro „ořez“ hodnot do požadovaného cílového rozsahu.

Samotné mapování zajišťují třídy pro jednotlivé operátory, které vždy vychází z rovnic uvedených v sekci 2.5. Při použití všech mapovacích technik je potřeba zjistit maximální přítomnou hodnotu luminance vstupního HDR snímku. K tomuto účelu slouží metoda třídy `HighImage` zvaná `HighImage::avgMaxLuminance()`, jež zapíše na ukazateli předané místo v paměti požadované hodnoty. Jak napovídá její název, dokáže vypočítat i průměrnou luminanci obrazu.

Při převodu HDR obrazů na obrazy s nízkým dynamickým rozsahem je postupováno vždy stejným postupem. Algoritmus prochází původní obraz pixel po pixelu a počítá hodnoty nových obrazových bodů, které spadají do rozsahu 0.0–1.0. Tento postup je nutné provést pro každý barevný kanál všech pixelů zvlášť, z čehož vyplývá, že pro každý obrazový bod fotografie je nutné provést tři výpočty podle zvoleného operátoru.

Některé parametry tónovacích operátorů mohou způsobit přesah tohoto rozsahu, proto je nutné přesahující hodnoty „oříznout“ do požadovaného rozsahu, k čemuž slouží metoda `ToneMapping::clamp()`. Výsledné hodnoty jsou dále podrobena gamma korekci a proběhne lineární převod do rozsahu pro standardní LDR snímek, kde každý barevný kanál může nabývat hodnoty 0–255.

### 4.3.3 Podporované formáty

Jediný vstupní formát LDR snímků pro kompozici akceptovaný aplikací je formát JPEG. Ten byl zvolen z důvodu jeho rozšířenosti, de facto každý komerční fotoaparát s ním umí



pracovat a běžné zrcadlovky dokáží ukládat RAW fotografie do JPEG souborů. Podpora více formátů by vyžadovala využití výrazně složitějších knihoven pro čtení metadat obrazů, kterou by uživatelé museli před používáním programu instalovat. Při exportu výsledků tónovacích operátorů může uživatel volit mezi formáty JPEG, BMP, PNG a TIFF.

Pro práci s obrazem s vysokým dynamickým rozsahem je podporován formát Radiance RGBE. Ten aplikace umožňuje načíst i uložit. Na načtené snímky lze dále použít tónové mapování.

## Kapitola 5

# Zhodnocení výsledků

Porovnávání operátorů je velmi subjektivní záležitostí a každému oku se zamlouvá jiný výsledný obraz, proto jsou v této kapitole popsány hlavní rozdíly mezi výslednými obrazy a zmíněny jejich výrazné charakteristiky. Ukázkové fotografie byly nafoceny digitální zrcadlovkou Canon EOS 450D. Série fotografií byly pořizovány v exteriérech i interiérech s různou intenzitou osvětlení, aby bylo možné operátory porovnat při mapování nejrůznějších scén. Při fotografování byly vždy dodržovány zásady popsané v sekci 2.4, které zaručují kvalitní výchozí série snímků s různou expozicí. Všechny výkonnostní testy proběhly na notebooku nižší střední třídy s procesorem Intel Core i5 2430M.

### 5.1 Rychlost skládání fotografií

Tato část textu se věnuje rychlostnímu aspektu algoritmu pro skládání fotografií. Hodnoty v tabulce 5.1 jsou aritmetickým průměrem několika časů potřebných pro složení snímků. Pro každou sekvenci bylo provedeno vždy dvanáct měření, přičemž nejnižší a nejvyšší zjištěné hodnoty nebyly brány v potaz, tudíž každá položka v tabulce je aritmetickým průměrem z deseti časů.

	<b>534x356 px</b>	<b>1068x712 px</b>	<b>2136x1424 px</b>	<b>4272x2848 px</b>
<b>3 snímky</b>	205 ms	815 ms	3601 ms	13575 ms
<b>5 snímků</b>	332 ms	1275 ms	5325 ms	21148 ms
<b>7 snímků</b>	451 ms	1835 ms	7775 ms	31137 ms
<b>9 snímků</b>	599 ms	2228 ms	9835 ms	42012 ms

Tabulka 5.1: Srovnání rychlosti kompozice sérií snímků

Z tabulky 5.1 lze vyčíst, že při zvyšování rozlišení vstupních obrázků lineárně roste čas potřebný pro sestavení HDR obrazu. Stejným způsobem ovlivňuje rychlost sestavení i počet výchozích snímků. Pro běžné fotografie, které nejsou vytvářeny za účelem tisku, a tedy nevyžadují příliš vysoké rozlišení, je rychlost skládání vcelku přijatelná.

## 5.2 Rychlost tónového mapování

	534x356 px	1068x712 px	2136x1424 px	4272x2848 px
<b>Lineární</b>	139 ms	535 ms	2125 ms	9335 ms
<b>Logaritmický</b>	192 ms	752 ms	2971 ms	12663 ms
<b>Exponenciální</b>	157 ms	618 ms	2480 ms	10503 ms
<b>Reinhardův</b>	260 ms	1020 ms	4411 ms	17225 ms
<b>Dragův</b>	301 ms	1205 ms	5005 ms	19680 ms

Tabulka 5.2: Srovnání rychlosti operátorů

Tabulka 5.2 srovnává rychlosti jednotlivých operátorů v závislosti na velikosti vstupního HDR obrazu. Opět bylo pro každou sekvenci provedeno dvanáct měření a byl vypočítán aritmetický průměr časů, se zanedbanými nejvyššími a nejnižšími naměřenými hodnotami. Je patrné, že čas strávený tónovým mapováním je lineárně úměrný rozlišení fotografie. Tato závislost platí pro všechny operátory. Nejrychlejším ze všech je podle očekávání operátor lineární, ten ovšem ale neposkytuje v drtivé většině případů příliš kvalitní výsledky. Nejpomalejším je operátor Dragův, který ovšem produkuje nejkvalitnější obrazy. Pro všechny mapovací techniky také platí, že jejich parametry nemají vliv na rychlost výpočtu.

## 5.3 Specifika jednotlivých tónovacích operátorů

V této části práce jsou srovnány všechny implementované operátory z pohledu běžného uživatele. U každé techniky mapování jsou popsány její charakteristické rysy. Výsledky každého operátoru jsou sice vnímány velmi subjektivně, nicméně na některá paradigmatata můžeme poukázat. Pro porovnání byly zvoleny následující snímky, kde snímek *a)* byl pořízen s automatickou expozicí a snímek *b)* (resp. *c)*) s expoziční odchylkou -2 (resp. +2) EV.



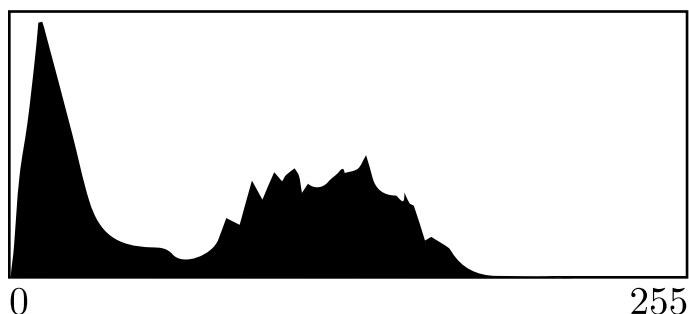
Obrázek 5.1: a) Výchozí expozice, b) Podexponovaný snímek, c) Přexponovaný snímek

### 5.3.1 Lineární operátor

V tomto případě jde o operátor vskutku základní. Stačí, aby se v histogramu fotografie objevila jediná hodnota, která výrazně vyčnívá nad ostatními, a výsledek mapování bude velmi tmavý. Jediný pixel tak může negativně ovlivnit kvalitu celého výsledného obrazu. Pokud je skok mezi nejvyšší hodnotou luminance a průměrnou hodnotou jasu velký, bude konečná fotografie tak tmavá, že vůbec nemusí být zřetelná vyfotografovaná scéna. Pokud ovšem vstupní fotografie neobsahuje příliš velké výkyvy expozičních hodnot, může být výsledek mapování přijatelný. Na histogramu výsledné ilustrační fotografie si můžeme všimnout zhuštění v oblasti nižšího jasu, což je typickým rysem lineárního tónového mapování.



Obrázek 5.2: Výsledek lineárního mapování



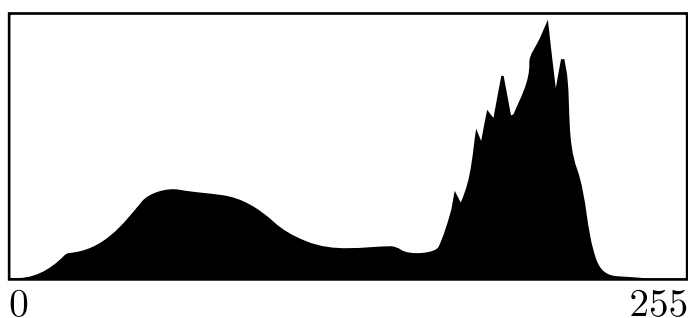
Obrázek 5.3: Histogram výsledku lineárního mapování

### 5.3.2 Logaritmický operátor

Výsledky logaritmického tónovacího operátoru jsou sice v drtivé většině případů lepší než u lineárního mapování, nicméně oproti pokročilejším operátorům jde stále o metodu, jež neprodukuje příliš kvalitní snímky. Parametry operátoru sice umožňují uživateli nastavovat konstanty rovnice 2.9, ty ovšem mění spíše celkový jas scény a kontrast původního HDR obrazů nebývá zachován. Výsledné snímky působí spíše nevýrazně, což je způsobeno právě ztrátou původního kontrastu. Histogram ukazuje, že oproti lineárnímu mapování přibylo jasnějších obrazových bodů a celkově je jas rozložen rovnoměrněji.



Obrázek 5.4: Výsledek logaritmického mapování



Obrázek 5.5: Histogram výsledku logaritmického mapování

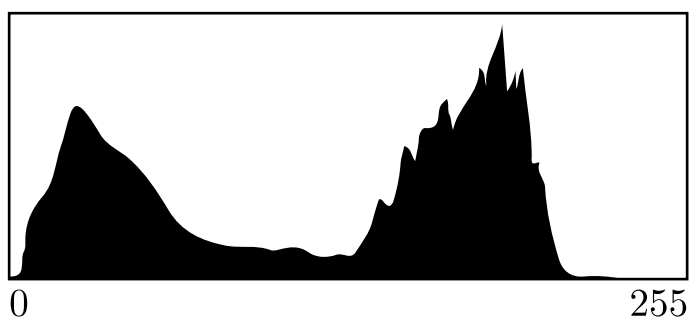


### 5.3.3 Exponenciální operátor

Exponenciální disponuje dobrými kontrastními výsledky, ale nedokáže příliš dobře komprimovat přeexponované části snímku. Jde však o velmi rychle pracující operátor a při správném nastavení parametrů lze pro některé typy scén nalézt jeho využití. Tato technika mapování se obecně hodí spíše pro světlejší fotografie, protože největší ztráty detailů můžeme pozorovat v podexponovaných oblastech.



Obrázek 5.6: Výsledek exponenciálního mapování



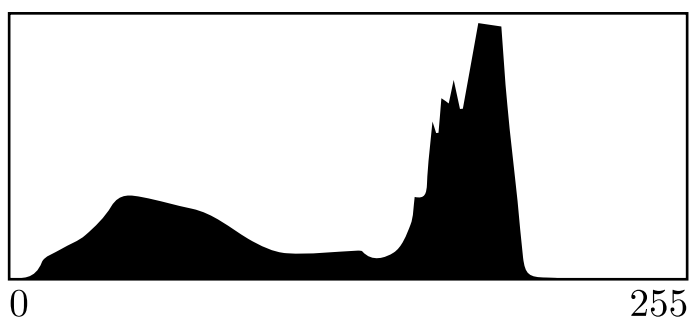
Obrázek 5.7: Histogram výsledku exponenciálního mapování

### 5.3.4 Reinhardův operátor

Nyní se dostáváme k pokročilejšímu Reinhardově operátoru. Ten oproti uvedeným výše poskytuje výrazně lepší výsledné snímky. Dokáže velmi kvalitně mapovat i scény s velkými luminiscenčními výkyvy, na kterých základní operátory pohořely. Dynamický rozsah je namapován velmi věrně a je docíleno zachování kontrastu v celém jasovém spektru. Histogramu výsledného snímku se nejvíce blíží exponenciálnímu mapování, což způsobeno tím, že Reinhardův operátor využívá pro výpočet taktéž exponenciální závislost.



Obrázek 5.8: Výsledek Reinhardova mapování



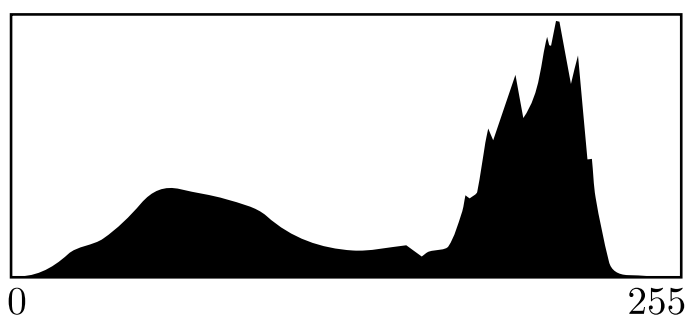
Obrázek 5.9: Histogram výsledku Reinhardova mapování

### 5.3.5 Dragův operátor

Dragův operátor poskytuje subjektivně nejlepší výsledky ze všech operátorů. Díky využití logaritmu o proměnlivém základu je docíleno rovnoměrné tonality napříč celým jasovým spektrem obrazu a tmavé i světlé části scény si zachovávají dobré kontrastní vlastnosti. Na histogramu je možné pozorovat podobnost se základním logaritmickým mapováním. Oproti Reinhardově operátoru dosahují oblasti z okrajů jasového spektra lepších výsledků nejen jasových, ale i kontrastních.



Obrázek 5.10: Výsledek Dragova mapování



Obrázek 5.11: Histogram výsledku Dragova mapování



# Kapitola 6

## Závěr

Cílem této práce bylo popsat tvorbu fotografií s vysokým dynamickým rozsahem s využitím techniky skládání sérií snímků. Problematika popsaná v tomto textu sloužila jako základ pro implementaci aplikace s grafickým uživatelským rozhraním. Zadání bylo splněno v plném rozsahu a oproti původním požadavkům vzniklo několik rozšíření implementovaného programu. Uživatel může vytvořit HDR obraz ze sekvence snímků a pomocí zvoleného operátoru tónového mapování jej zobrazit na běžném displeji či monitoru. Program byl napsán v objektově orientovaném jazyce C++ za použití knihoven pro práci s formátem RGBE, Easyexif a OpenCV. Pro vývoj grafického uživatelského prostředí byl zvolen framework Qt. Aplikace byla podrobena mnoha testům, které se zaměřovaly nejen na správnou funkčnost, ale také na jeho rychlost. V tomto textu byly porovnány výsledky jednotlivých operátorů, a to vizuální i rychlostní.

Aplikace byla oproti původnímu zadání rozšířena o několik funkcí. Vytvořené fotografie s vysokým dynamickým rozsahem má uživatel možnost uložit ve formátu Radiance RGBE a následně použít libovolné nástroje podporující práci se soubory tohoto formátu. Implementována byla také možnost tyto soubory otevřít a namapovat na zobrazitelný rozsah pomocí zvoleného operátoru. Výsledné obrazy tónového mapování lze exportovat v několika běžných formátech a je možné měnit jejich jas pomocí gamma korekce. Za zmínku také stojí přidaná funkce pro přibližování a oddalování mapovaných fotografií, která umožňuje pohodlnou práci s fotografiemi o nízkém nebo naopak o velmi vysokém rozlišení.

Aby program mohli v praxi používat fotografové, bylo by vhodné implementovat možnost měnit i ty parametry obrazu, které nesouvisí přímo s problematikou dynamického rozsahu. Tím je myšlena možnost upravovat například barevnou saturaci či kontrast. Pro lepší výsledky tónového mapování by bylo možné implementovat pokročilejší lokální tónové operátory, jež produkují „líbivější“ obrazy. Pokud by měla aplikace sloužit i amatérským fotografům, bylo by vhodné přidat funkcionalitu pro zarovnávání vstupních fotografií, protože zdaleka ne každý fotograf pořizuje vstupní série snímků podle doporučených pravidel.

Pokud by bylo cílem dosáhnout co největší efektivity, bylo by žádoucí, aby tónové mapování neprobíhalo vždy od základu pro celou fotografii. Nabízí se použití náhledu výsledků mapování, přičemž finální převod by proběhl až při ukládání výsledného snímku. Další implementační změnou, která by vedla k rychlejším výpočtům při skládání sekvence snímků i tónovém mapování, by mohlo být využití vlastních datových struktur pro práci s obrazy. OpenCV a jeho nástroje pro práci s maticemi sice implementaci výrazně zjednodušují, potřebný výpočetní čas se ovšem prodlužuje.

# Literatura

- [1] Color management: color spaces. [Online; citováno 23.3.2016].  
URL <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/color-spaces.htm>
- [2] HDRC<sup>®</sup> image sensors (High-Dynamic-Range CMOS). [Online; cit. 28.3.2016].  
URL <http://www.ims-chips.de/home.php?id=a3b15c1en>
- [3] The Bayer sensor strategy. [Online; citováno 27.3.2016].  
URL <http://www.red.com/learn/red-101/bayer-sensor-strategy>
- [4] Understanding gamma correction. [Online; citováno 28.3.2016].  
URL <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm>
- [5] Parameters for tone mapping operators. 2012, [Online; citováno 3.4.2016].  
URL <http://osp.wikidot.com/parameters-for-photographers>
- [6] Banterle, F.; Artusi, A.; Debattista, K.; aj.: *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. AK Peters (CRC Press), 2011, ISBN 978-1568817194.
- [7] Debevec, P. E.; Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *SIGGRAPH*, 1997.
- [8] Drago, F.; Myszkowski, K.; Annen, T.; aj.: Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes. *Computer Graphics Forum*, 2003, ISSN 1467-8659.
- [9] Macenauer, A.: Hloubka ostrosti a clona. 2002, [Online; citováno 25.3.2016].  
URL <https://www.fotoaparát.cz/clanek/227/hloubka-ostrosti-a-clona-lek-16-5015/>
- [10] Meyer, J.: Bracketing explained: what you need to know about maximising detail. 2012, [Online; citováno 28.3.2016].  
URL <http://www.techradar.com/how-to/photography-video-capture/cameras/bracketing-explained-what-you-need-to-know-about-maximising-detail-1321001>
- [11] Perlin, K.; Hoffert, E. M.: Hypertexture. *SIGGRAPH*, 1989.
- [12] Pihan, R.: Oko (a mozek) versus fotoaparát. [Online; citováno 23.3.2016].  
URL [http://www.fotoroman.cz/techniques2/light\\_eye\\_camera.htm](http://www.fotoroman.cz/techniques2/light_eye_camera.htm)
- [13] Pino, N.; Porter, J.: OLED TV: what you need to know. 2016, [Online; citováno 27.3.2016].  
URL <http://www.techradar.com/news/television/oled-tv-what-you-need-to-know-1056228>

- [14] Reichmann, M.: Understanding RAW Files Explained. 2011, [Online; citováno 3.4.2016].  
URL <https://luminous-landscape.com/understanding-raw-files-explained/>
- [15] Reinhard, E.: *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [16] Reinhard, E.; Stark, M.; Shirley, P.; aj.: Photographic Tone Reproduction for Digital Images. *SIGGRAPH*, 2002.
- [17] Rybář, J.: Jak zkombinovat ISO, čas a clonu? [Online; citováno 25.3.2016].  
URL <http://www.amaze.cz/kurz-fotografvani-15-iso-cas-clona/>
- [18] Srnec, K.: Citlivost ISO. 2013, [Online; citováno 25.3.2016].  
URL <http://www.ephoto.sk/fotoskola/clanky/zaciname-s-fotografvanim/citlivost-iso/>
- [19] Taylor, S. A.: CCD and CMOS Imaging Array Technologies: Technology Review. 1998, [Online; cit. 28.3.2016].  
URL <http://research.microsoft.com/pubs/80353/CCD.pdf>
- [20] Ward, G.: High Dynamic Range Image Encodings. [Online; cit. 2.4.2016].  
URL <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/Encodings.pdf>

# Přílohy

# Příloha A

## Obsah CD

- HDR Merge/ - zdrojové kódy implementované aplikace
- HDR images/ - složka s demonstračními obrazy s vysokým dynamickým rozsahem
- LDR brackets/ - Sekvence snímků s různou expozicí
- TM output/ - exportované obrazy, které vznikly jako výsledek tónového mapování
- Libraries/ - použité knihovny
- Text/ - zdrojové soubory textu práce