



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**MOBILNÁ APLIKÁCIA PRE AKVIZÍCIU A ÚPRAVU  
HDR FOTOGRAFIÍ**

MOBILE APPLICATION FOR ACQUISITION AND EDITING HDR IMAGES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**PATRIK MICHALÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Doc. Ing. MARTIN ČADÍK, Ph.D.**

BRNO 2018

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

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2017/2018

**Zadání bakalářské práce**

Řešitel: **Michalák Patrik**

Obor: Informační technologie

Téma: **Mobilní aplikace pro akvizici a úpravu HDR fotografií**

**Mobile App for Acquisition and Processing of HDR Images**

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Seznamte se s problematikou zpracování HDR obrazu (akvizice, mapování tónů, deghosting).
2. Navrhněte a implementujte mobilní aplikaci pro akvizici a zpracování HDR snímků.
3. S aplikací experimentujte, posudte její vlastnosti, proveďte uživatelský experiment a diskutujte možnosti budoucího vývoje.
4. Dosažené výsledky prezentujte formou videa, plakátu, článku, apod.

Literatura:

- <http://cadik.posvete.cz/tmo/>
- dodá vedoucí práce

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2 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).

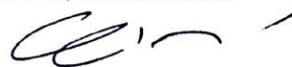
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo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

Vedoucí: **Čadík Martin, doc. Ing., Ph.D.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
602 00 Brno, Božetěchova 2



---

doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Hlavnou myšlienkou tejto práce je vytvoriť aplikáciu, ktorá by riešila nielen problémy generovania a spracovania HDR obsahu, ale zamerala sa aj na interakciu s užívateľom a poskytla mu viac možností v prehľadnom a minimalistickom rozhraní. V riešení bola použitá metóda generovania HDR obsahu kombinovaním LDR snímok s rôznou hodnotou času expozície. Vytvorené riešenie poskytuje užívateľovi mobilnú aplikáciu pre prácu s HDR fotografiou, štyri metódy mapovania tónov a rôzne nástroje, ktoré užívateľ pri práci potrebuje.

## Abstract

The goal of this paper is to create an application that solves HDR image processing problems and focuses to interactivity with the user, offering him more opportunities in clear and minimalistic graphic user interface. Application generate HDR content by merging a series of low dynamic range images with different exposure time values. The solution provides work with HDR photography, four tone mapping methods and various tools for user.

## Kľúčové slová

digitálna fotografia, spracovanie obrazu, mobilná aplikácia, vysoký dynamický rozsah, mapovanie tónov

## Keywords

digital photography, image processing, mobile application, high dynamic range, tone mapping

## Citácia

MICHALÁK, Patrik. *Mobilná aplikácia pre akvizíciu a úpravu HDR fotografií*. Brno, 2018. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Čadík, Ph.D.

# Mobilná aplikácia pre akvizíciu a úpravu HDR fotografií

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána docenta Ing. Martina Čadíka, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....  
Patrik Michalák  
4. mája 2018

## Podakovanie

Rád by som poďakoval pánovi docentovi Ing. Martinovi Čadíkovi, Ph.D. za odbornú pomoc, pripomienky a rady poskytnuté počas tvorby tejto práce. Taktiež ďakujem za podporu pri kvalifikácii a konečnej prezentácii práce na konferencii Excel@FIT 2018. Za úvodnú motiváciu a pomoc ďakujem Ing. Romanovi Tábimu, zásluhou ktorého už matematické funkcie nie sú až tak náročné.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická časť</b>	<b>3</b>
2.1	Svetlo . . . . .	3
2.2	Snímanie . . . . .	5
2.2.1	Parametre snímača . . . . .	6
2.3	Generovanie HDR . . . . .	8
2.3.1	Získanie krivky odozvy fotoaparátu . . . . .	9
2.4	Zobrazovanie HDR . . . . .	9
2.4.1	Operátory mapovania tónov . . . . .	10
2.5	Formáty HDR obsahu . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Existujúce riešenia</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Návrh a implementácia</b>	<b>17</b>
4.1	Užívateľské rozhranie . . . . .	19
4.2	Snímanie . . . . .	22
4.2.1	Nastavenie času expozície . . . . .	23
4.2.2	Zarovnanie . . . . .	25
4.3	Generovanie HDR obsahu . . . . .	26
4.3.1	Výber vzorky pixelov pre získanie krivky odozvy . . . . .	26
4.3.2	Získanie krivky odozvy fotoaparátu . . . . .	28
4.3.3	Vytvorenie funkcie žiarenia . . . . .	29
4.4	Prevod HDR obsahu na LDR . . . . .	29
4.4.1	Operátory mapovania tónov . . . . .	29
4.4.2	Zmenšenie náhľadového obrázku . . . . .	30
4.5	Ukladanie . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Merania a výsledky</b>	<b>33</b>
5.1	Výsledky operátorov mapovania tónov . . . . .	33
5.2	Porovnanie s existujúcimi aplikáciami . . . . .	34
5.3	Časová a priestorová zložitosť aplikácie . . . . .	37
5.4	Spätná väzba užívateľov . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>41</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Obsah CD</b>	<b>44</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Okolie, ktoré vnímame, má vysoký dynamický rozsah svetla a farieb. Tmavé miesta bez osvetlenia neobsahujú takmer žiaden jas a naopak scéna zameraná na zdroj svetla obsahuje priveľmi veľa jasů. Ľudské oko je schopné prispôbiť sa takýmto zmenám a pozorovať detaily aj na scéne s rozmanitým rozsahom jasů.

Väčšina digitálnych fotoaparátov a zobrazovacích zariadení však zachytávajú a zobrazujú farebné obrázky ako matice 24-bitových pixelov, v ktorých je obsiahnutých 8-bitov v rozsahu 0 až 255 pre každý farebný kanál. Preto sa digitálne fotoaparáty pokúšajú odhadnúť osvetlenie a automaticky nastaviť čas expozície tak, aby mal najdôležitejší aspekt scény čo najlepší dynamický rozsah a jas miest, ktoré sú príliš tmavé, alebo naopak príliš svetlé, je orezaný na hodnoty 0 a 255. Tento problém rieši HDR fotografia, avšak nie veľa bežných užívateľov si je vedomých, čo to vlastne HDR fotografia znamená a ako sa s ňou pracuje.

HDR fotografia umožňuje zachytiť veľkú časť rozsahu jasů reálneho sveta a následnú prácu s týmito dátami. Existuje viacero mobilných aplikácií, ktoré ponúkajú vytvorenie a spracovanie HDR fotografie. Veľa verejne dostupných aplikácií však používa iba filter aplikovaný na jednu fotografiu, ktorý zvýši kontrast farieb a detaily a tým sa snaží opticky vytvoriť efekt HDR. Na druhej strane sú aplikácie, ktoré vytvárajú HDR fotografiu skladaním série snímok s rôznymi nastaveniami času expozície. Tieto aplikácie však poväčšine užívateľovi neposkytujú dostatočne záživné užívateľské rozhranie, majú pre užívateľa veľmi obmedzené možnosti, alebo sa s nimi ťažko a neintuitívne pracuje.

Zameraním tejto práce je vytvoriť aplikáciu, ktorá by riešila nielen problémy generovania a spracovania HDR obsahu, ale zamerala sa aj na interakciu s užívateľom a poskytla mu viac možností ako bežná aplikácia. Každá scéna je niečím výnimočná a jednoduché východzie nastavenia hodnôt parametrov nedosiahnú vždy uspokojujúce výsledky.

## Kapitola 2

# Teoretická časť

### 2.1 Svetlo

Viditeľné svetlo je forma energie pohybujúca sa v priestore, vzájomne pôsobiaca s materiálmi, kde môže byť absorbovaná, lomená, odrazená alebo prenesená.

Ludské oko dokáže zachytiť svetlo, ktorého výsledkom je stimulovanie oka k vytvoreniu vizuálnych obrazov, závislých na vlnovej dĺžke. Vlnové dĺžky viditeľné ľudským okom majú hodnoty od 380 do 780 nm. [1]

#### Rádiometria

Veda zameraná na meranie svetla sa nazýva rádiometria. Pri meraní svetla nás zaujímajú jeho vlastnosti šírenia priestorom, vzduchom, vodou a materiálmi. Energiu meriame v čase, priestore alebo uhle.

**Ožiarenie** je množstvo energie dopadajúce na jedno miesto z rôznych zdrojov a smerov.

**Žiarenie zdroja** je energia vyžarujúca z jedného bodu do všetkých prístupných smerov.

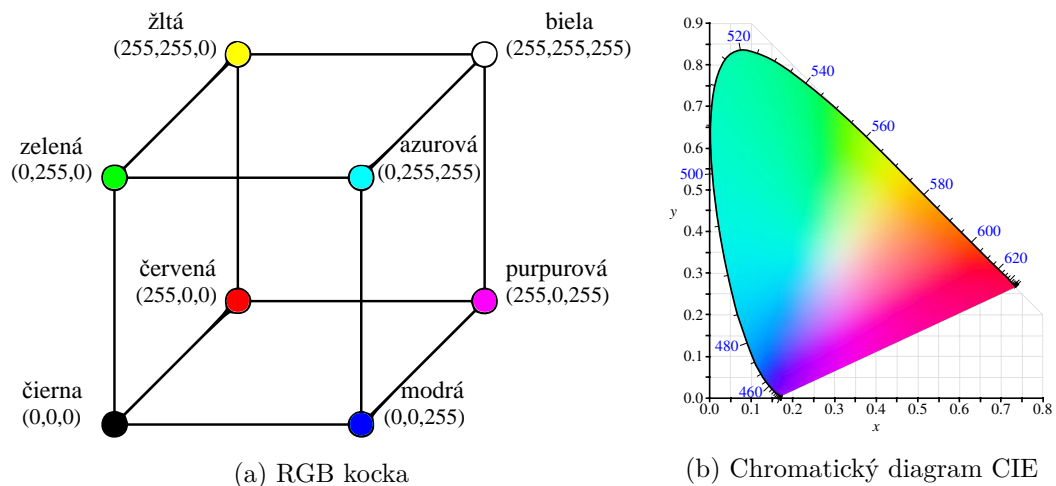
**Intenzita žiarenia** je energia vyžarovaná zo zdroja v jeden daný smer. Je meraná ako jednotka energie za jednotku času za jednotku uhlu smeru.

**Žiarenie** je energia dopadajúca na jedno miesto z určitého smeru a v určitom uhle. Je to množstvo energie prenášané za jednotku času za jednotku plochy a za jednotku smeru.



Obr. 2.1: Rádiometrické veličiny

Základným faktorom tvorby fotografie je svetlo dopadajúce na povrch z určitého smeru. Pri vytváraní fotografie sa uzávierka fotoaparátu na malý čas otvorí a prepustí do vnútra fotoaparátu svetlo. Tomuto času hovoríme čas expozície. Dĺžka expozičného času určuje, koľko svetla prenikne do tela fotoaparátu. Šošovka fotoaparátu obmedzuje smer, z ktorého



Obr. 2.2: Grafická reprezentácia farebných priestorov [1]

je svetlo prijímané. Senzor je rozdelený na malé oblasti pixelov, kde každá oblasť zaznamená svetlo pre danú plochu.

## Fotometria

Fotometria je odbor optiky, ktorý skúma svetlo z pohľadu jeho pôsobenia na ľudské vnímanie. Povrchy materiálov odrážajú svetlo a tým môžu pozmeniť jeho spektrálnu kompozíciu. Následne odrazené svetlo nesie informáciu zároveň o zdroji svetla osvetľujúceho povrch a o odrazivosti povrchu na danom mieste.

**Svietivosť** je základnou fotometrickou veličinou. Svietivosť vyjadruje množstvo svetelného toku vyslaného zdrojom do priestorového uhla a je analogická intenzite žiarenia.

**Osvetlenie** je definované ako svetelný tok dopadajúci na jednotku plochy a je analogické ožiareniu.

**Jas** je fotometrická veličina vyjadrujúca intenzitu svietivosti pre jednotku plochy v určitom smere.

Jas kladie prirodzené hranice viditeľnosti vlnových dĺžok, čo je dôležité pre HDR. Vlnové dĺžky nachádzajúce sa mimo rozsahu viditeľnosti nemusia byť zaznamenávané, ukladané a ani spracované. Základom väčšiny operátorov pre mapovanie tonality je počítačové extrahovanie hodnôt jasu každého pixelu podľa zložiek RGB pred zredukovaním dynamického rozsahu, pretože na vnímanie majú väčší vplyv rozdiely v rozsahu jasu ako kontrast farieb.

## Farebné priestory

Farebný model popisuje reprezentáciu farieb ako  $n$ -ticu číselných hodnôt. Farba je väčšinou reprezentovaná tromi alebo štyrmi farebnými zložkami. Farebný priestor určuje rozsah farieb pre viditeľné spektrum.



(a) podexponovaná scéna

(b) preexponovaná scéna

Obr. 2.3: Rozličné expozície rovnakej scény

## sRGB

Model RGB je založený na aditívnom miešaní primárnych farebných zložiek (červená, zelená a modrá), z ktorých každá stimuluje jeden z troch farebných receptorov ľudského oka. Kombináciami týchto troch farebných zložiek obsiahneme značnú časť farebného priestoru, ktorý je človek schopný vnímať. Žiaľ, neexistujú štandardy, ktoré by definovali aké hodnoty musia mať tieto základné farebné zložky, preto sa môžu rovnaké hodnoty RGB na rozličných obrazovkách mierne líšiť. Farebný priestor tohoto modelu je možné reprezentovať v tzv. RGB kocke (obr. 2.2a). Akýkoľvek bod v kocke predstavuje farbu zloženú z farebných kanálov reprezentovaných 8 alebo 16-bitovou hodnotou.

## CIE XYZ

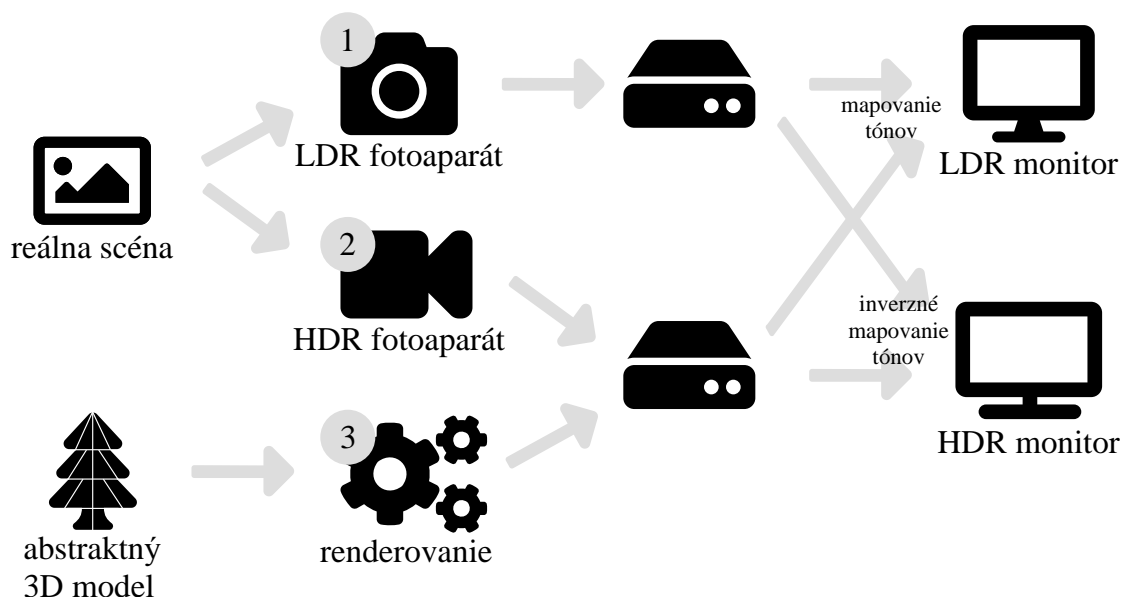
CIE XYZ je jedným z prvých matematicky definovaných farebných priestorov, ktorý je odvodený podľa vlastností ľudského oka. Každú farbu modelu je možné presne matematicky popísať. Jedným spôsobom je popísať množstvo trichromatických zložiek, označovaných ako X, Y a Z. Výsledok dostaneme integráciou spektrálneho farebného podnetu a trichromatických členov v celom rozsahu viditeľného spektra. Druhým spôsobom je vyjadriť tzv. trichromatické súradnice pomocou normových podielov.

V praxi sa využívajú na vyjadrenie chromatickosti farby iba zložky X a Y. V takom prípade je možné používať tzv. chromatický diagram (obr. 2.2b).

## 2.2 Snímanie

Je veľmi obtiažne zachytiť scénu (obr. 2.3), kde sú svetlé miesta mnohonásobne jasnejšie ako tmavé miesta scény. To znamená, že takáto scéna má vysoký dynamický rozsah. Rozličné nastavenia času expozície nám umožňujú vytvoriť fotografiu zachytávajúcu

- a) veľmi svetlé (obr. 2.3a) alebo
- b) veľmi tmavé oblasti (obr. 2.3b).



Obr. 2.4: Dostupné technológie generovania HDR

Na obrázku 2.4 sú zobrazené technológie, ktorými je možné snímať, generovať a zobrazovať scény s vysokým dynamickým rozsahom. Prvým problémom je zachytenie dynamického rozsahu scény. V súčasnosti existujú 3 metódy vytvárania HDR obsahu:

- kombinovaním LDR snímok s rôznou hodnotou času expozície (obr. 2.4 bod 1),
- zachytenie HDR scény špecializovaným hardvérom (obr. 2.4 bod 2),
- virtuálne prostredia pomocou fyzikálne založených rendererov (obr. 2.4 bod 3).

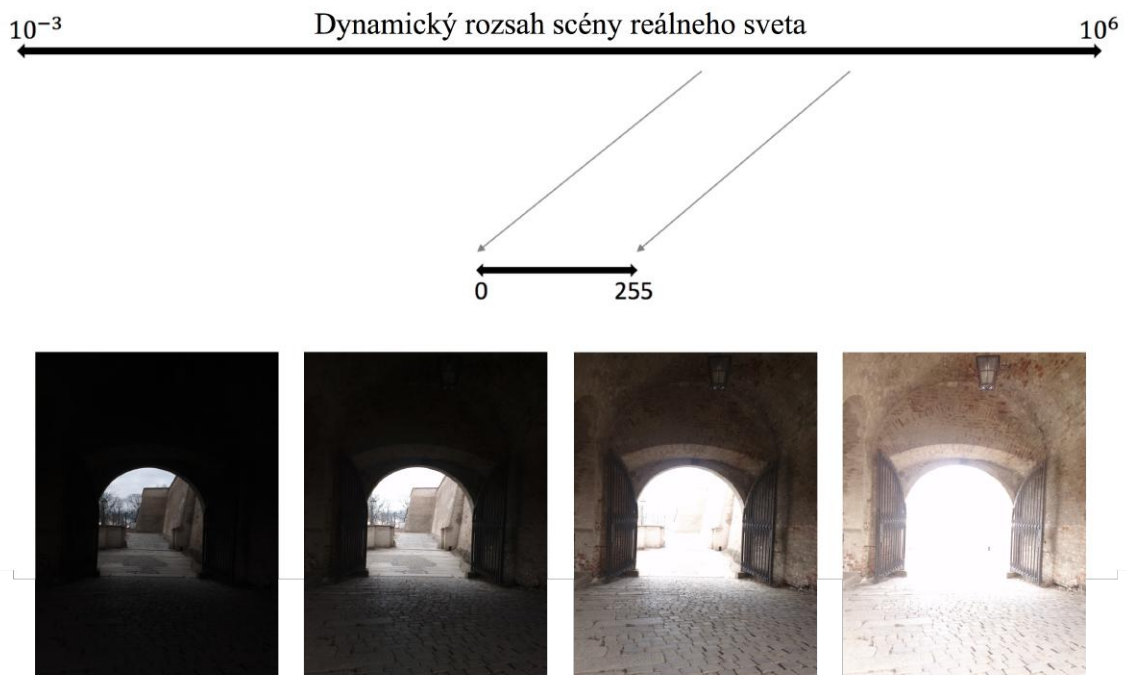
Kombinovanie viacerých snímok scény s rôznou hodnotou času expozície je pre svoju dostupnosť a nenáročnosť najviac využívanou metódou. Dynamický rozsah reálneho sveta v rozpätí  $10^{-3} \text{ cd/m}^2$  až  $10^6 \text{ cd/m}^2$  [1] je možné zachytiť na 8-bitov pre farebný kanál dekompozíciou tohoto rozsahu. Takto zachytíme detaily od najtmavšej, až po najsvetlejšiu oblasť tak, ako je vyznačené na obrázku 2.5.

### 2.2.1 Parametre snímača

Pred vytváraním fotografie s manuálnymi nastaveniami parametrov snímača je dobré poznať základné pojmy [6][1]:

**Expozícia** udáva celkové množstvo svetla dopadajúce na fotografické médium. Je závislá na čase expozície, clone a citlivosti ISO. Fotografia s nedostatočným množstvom svetla je podexponovaná a naopak fotografia s príliš veľkým množstvom svetla je preexponovaná.

**Expozičný čas** udáva dobu, počas ktorej je svetlocitlivý snímač vystavený dopadajúcemu svetlu. Čím je hodnota expozičného času vyššia, tým viac svetla sa prepustí do vnútra fotoaparátu a tým je snímka svetlejšia. Expozičný čas sa udáva v sekundách, prípadne v zlomkoch sekundy (8, 4, 2, 1, 1/2, 1/4...).



Obr. 2.5: Scéna zachytená snímkami s rôznymi hodnotami expozičného času

**Clona** vytvára otvor v objektíve, cez ktorý prechádza svetlo z vonkajšieho prostredia na svetlocitlivý snímač fotoaparátu. Čím je clonové číslo nižšie, tým viac svetla sa prepúšťa do vnútra fotoaparátu. Clona ovplyvňuje expozíciu, hĺbku ostrosti a kresbu objektívu.

**Citlivosť ISO** určuje mieru citlivosti snímača na dopadajúce svetlo. S rastúcou citlivosťou rastie miera šumu, ktorý sa prejavuje ako náhodne farebné pixely vo fotografii. Šum je zreteľnejší hlavne v tmavých oblastiach a prejavuje sa tiež pri dlhších expozíciách vplyvom zahrievania snímača.

**Hodnota expozície (EV)** je číslo, ktoré predstavuje kombináciu expozičného času a clonového čísla. Táto hodnota udáva určité množstvo zachyteného svetla zo scény pri pevne danej hodnote citlivosti ISO (obvykle ISO100). Pri kombinácii času expozície  $t$  a clonového čísla  $N$  je EV definované ako:  $EV = \ln_2 \frac{N^2}{t}$ .

**Snímač** fotoaparátu, alebo snímací čip, je umiestnený za objektívom a tvorí najdôležitejší prvok fotoaparátu. Dôležitými vlastnosťami snímačov fotoaparátu sú jeho rozmer (čím väčší rozmer, tým kvalitnejší výsledný obraz) a počet pixelov, z ktorých sa snímač skladá.

Snímače sa podľa technológie výroby delia na CCD<sup>1</sup> a CMOS<sup>2</sup>. Oba typy snímačov obsahujú maticu pixelov (senzorov), ktoré sú zložené zo subpixelov, vo väčšine prípadov usporiadaných do tzv. Bayerovej masky. Každý subpixel má priradený farebný filter, ktorý sa používa na filtrovanie dopadajúceho svetla a tým môže zaznamenať

<sup>1</sup>Charge-Coupled Device

<sup>2</sup>Complementary Metal Oxide Semiconductor

iba jednu farebnú zložku. Ak však na tento subpixel dopadne fotón, ktorého vlnová dĺžka reprezentuje inú farbu, akú je filter schopný prepustiť, stráca sa farebná informácia. CMOS čipy sú najpoužívanejším typom sensorov. Ich výroba je konštrukčne náročnejšia, ale majú nižšiu spotrebu energie a rýchlejší prenos dát. Dáta prenášajú z každého bodu samostatne, zatiaľ čo CCD po celých riadkoch.

## Rozdiel medzi LDR a HDR snímkami

Hlavný rozdiel medzi LDR<sup>3</sup> snímkami a snímkami HDR je v hodnotách pixelov. Hodnoty pixelov v HDR sú vo všeobecnosti spájané s jasom. Pixely nevyjadrujú presné hodnoty jasů, pretože fotoaparát má inú spektrálnu citlivosť ako ľudské oko, ale iba aproximujú fotometrické veličiny. Približná odchýlka od fotometrických meraní je v rozsahu od 10% pre achromatické (šedé) povrchy až po 30% pre farebné objekty [16].

## 2.3 Generovanie HDR

V úvode vysvetlíme význam premenných, ktoré budú použité nielen pri zápise rovníc, ale aj v zdrojovom kóde aplikácie:

- $P$  - počet obrázkov s rozličnou expozíciou,
- $N$  - počet pixelov v jednom obrázku,
- $Z_{ij}$  - hodnota pixelu, kde  $i$  je index pixelu a  $j$  index obrázku,
- $Z_{min}, Z_{max}$  - hodnota minima a maxima, ktorú môže pixel nadobudnúť,
- $\Delta t_j$  - expozičný čas pre  $Z_{ij}$ ,
- $w(Z_{ij})$  - váhová funkcia odstraňujúca presahujúce hodnoty.

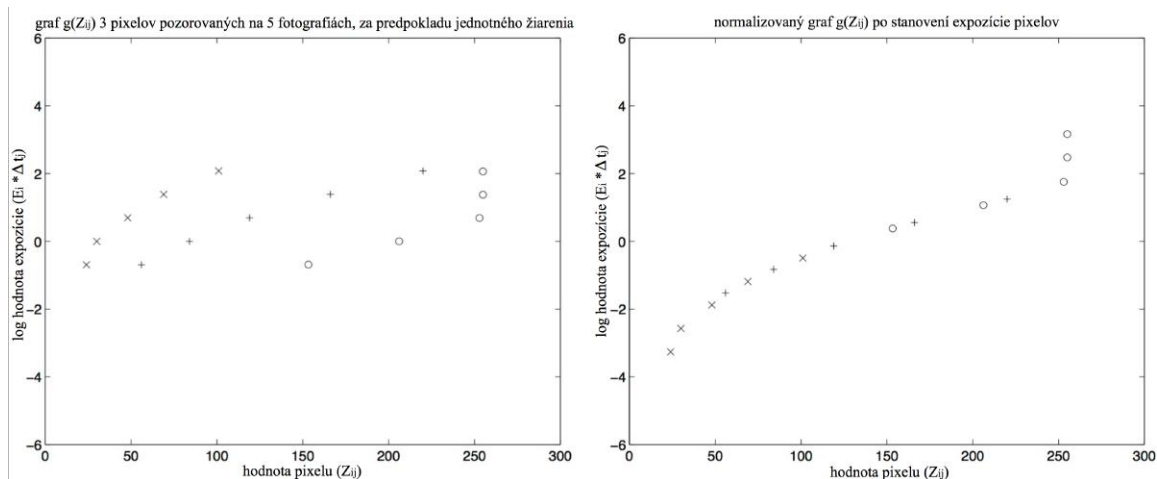
Ak by mal fotoaparát lineárnu odozvu, intenzita žiarenia  $E$  pre pixel na indexe  $i$  by mohla byť vytvorená kombináciou hodnôt, zaznamenaných pre každú expozíciu a pre každý farebný kanál ako

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^P \frac{1}{\Delta t_j} w(Z_{ij}) Z_{ij}}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} [1] \quad (2.1)$$

Avšak digitálne fotoaparáty nemajú lineárnu odozvu, ale všeobecnú funkciu nazývanú krivka odozvy fotoaparátu (CRF<sup>4</sup>). Predtým, ako sa bude generovať HDR obsah, je potrebné vyjadriť túto krivku odozvy. Na to slúži algoritmus od Paul E. Debeveca a Jitendra Malika, založený na využívaní fyzikálnej vlastnosti zobrazovacích systémov, ktorú nazveme reciprocita. Reciprocita vyjadruje reakciu svetlocitlivého materiálu ako inverzný vzťah medzi intenzitou svetla a času osvetlenia. Pri štandardnom rozsahu expozície je odozva fotoaparátu určená celkovou expozíciou definovanou ako intenzita  $\times$  čas. [1]

<sup>3</sup>low dynamic range

<sup>4</sup>Camera Response Function



Obr. 2.6: Normalizácia hodnôt  $Z_{ij}$  riešením rovnice 2.4 [2]

### 2.3.1 Získanie krivky odozvy fotoaparátu

Vstupom algoritmu sú fotografie vytvorené s rôznou dĺžkou času expozície  $\Delta t_j$ . Za predpokladu, že hodnoty intenzity žiarenia  $E_i$  pre každý pixel  $i$  sú konštanty, môžeme zapísať rovnicu reciprocity ako:

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) [2] \quad (2.2)$$

Keďže je funkcia  $f$  monotónna, potom je aj invertovateľná a rovnicu 2.2 môžeme zapísať ako  $f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$ . Pridaním prirodzeného logaritmu na obe strany získame  $\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$ . Následne si definujeme funkciu  $g = \ln f^{-1}$  a dostaneme súbor rovníc:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j [2] \quad (2.3)$$

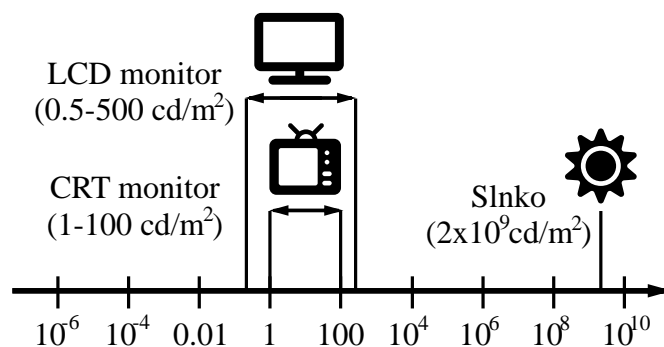
Cieľom algoritmu je pomocou metódy najmenších štvorcov vyjadriť funkciu krivky odozvy  $g$  a intenzitu žiarenia  $E_i$ , ktoré najlepšie vyhovujú súboru rovníc 2.3. Keďže rozsah hodnôt jasu je konečný, vyjadrujeme iba konečný počet hodnôt krivky odozvy  $g$ . Vyjadrením celočíselných hodnôt pixelov  $Z_{min}$  a  $Z_{max}$ , počtu polôh pixelu  $N$  a počtu fotografií  $P$ , definujeme problém ako hľadanie  $(Z_{max} - Z_{min})$  hodnôt pre  $g(Z)$  a  $N$  hodnôt pre  $\ln E_i$ , ktoré minimalizujú kvadratickú objektívnu funkciu:

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 [2] \quad (2.4)$$

Prvý term zabezpečuje, že riešenie vyhovuje súboru rovníc vyplývajúcich z rovnice 2.3 a druhý term zabezpečuje plynulosť funkcie  $g$ . Hodnota  $\lambda$  je váha plynulosti, relatívna k prvému termu a je zvolená podľa množstva šumu očakávaného v  $Z_{ij}$ .

## 2.4 Zobrazovanie HDR

HDR fotografie by mali verne vizuálne reprezentovať scénu, na ktorej sa nachádzajú. Hlavným problémom je, že úroveň intenzity jasu HDR fotografie môže prekročiť výstupnú úroveň reprodukovanej výstupným médiom (obr. 2.7). Rovnako aj kontrast môže presiahnuť



Obr. 2.7: Hodnoty jasů reálnego sveta v porovnaní s rozsahom jasů, ktorý možno zobrazovať na LCD a CRT monitoroch [12]

rozsah kontrastu zobrazovateľný médium. Táto skutočnosť platí ako pre tlač, tak aj pre zobrazovacie zariadenia.

Vzhľad scény závisí od úrovne osvetlenia a rozsahu kontrastu[14]. Za jasného dňa vzerá scéna viac farebne a kontrastnejšie. Pre reprodukovanie presného vizuálneho vzhľadu takejto scény nestačí iba jednoduchá kompresia, aby sa úroveň intenzity a rozsah kontrastu prispôbil limitom zobrazovacieho média.

Reprodukcia vizuálneho vzhľadu je primárnym cieľom pre mapovanie tónov. Aktuálne je otvoreným problémom výskumov definovanie a číselné vyjadrenie vizuálneho vzhľadu scény. Tieto výskumy zároveň podporujú vývoj farebných modelov.

## Mapovanie tónov

Mapovanie tónov je proces prevodu obrazu s vysokým dynamickým rozsahom na 8-bitový obraz pre farebný kanál, s cieľom zachovať čo najväčší počet detailov. Mapovanie tónov znižuje dynamický rozsah alebo kontrastný pomer celého záberu so zachovaním lokálneho kontrastu. [1]

Existuje viacero metód mapovania tónov a ich ciele môžu byť rozličné v závislosti od konkrétneho využitia. V niektorých prípadoch je hlavným cieľom vytvárať len esteticky príjemné obrázky, zatiaľ čo iné metódy reprodukujú čo najväčší počet obrazových detailov alebo maximalizujú kontrast obrazu. Cieľom vykresľovacích aplikácií môže byť dosiahnutie čo najväčšej zhody medzi skutočnou scénou a zobrazeným obrázkom, aj keď zobrazovacie zariadenie nedokáže reprodukovať celý rozsah hodnôt jasů.

### 2.4.1 Operátory mapovania tónov

Väčšina metód mapovania tónov sa zameriava na susediace pixely a s ich informáciami môže vykonať tónovanie, napríklad nastavením jasů vo vzťahu k susediacim pixelom. Jedným zo spôsobov je rozostriť oblasť, čo spriemeruje jas a potom túto informáciu použiť. [6] Rozostrenie sa neaplikuje na obrázok, iba sa využije k výpočtom.

V posledných rokoch boli vyvinuté rôzne metódy mapovania tónov, ktoré je môžeme rozdeliť do dvoch základných typov:

**Globálne operátory** (priestorovo jednotné) sú nelineárne funkcie založené na svetelných a iných globálnych premenných obrazu. Akonáhle je optimálna funkcia odhadnutá

podľa konkrétnej snímky, každý pixel v obraze je mapovaný rovnakým spôsobom, nezávisle od hodnoty okolitých pixelov v obraze. Tieto techniky sú jednoduché a rýchle, ale môžu spôsobiť stratu lokálneho kontrastu. [1]

**Lokálne operátory** (priestorovo sa meniace) sú nelineárnej funkcie, ktorých parametre sa menia v každom pixeli podľa vlastností získaných z okolitých oblastí. Inými slovami, efekt metódy sa mení pre každý pixel podľa vlastností obrazu na danom mieste. Tieto metódy sú zložitejšie ako globálne a môžu vytvárať artefakty, ako napríklad halo efekt alebo kontrastné obrisy a tým môže výstup metódy vyzeráť nerealisticky. Avšak poskytujú lepší výsledok, pretože ľudské vnímanie je citlivé hlavne na lokálny kontrast. [1]

Medzi najznámejšie metódy mapovania tónov patria:

**Bilaterálny filter** (Durand a Dorsey 2002) - lokálny operátor, ktorý zachováva detaily. Metóda sa pokúša zobraziť obrazy HDR rozložením obrazu na základnú vrstvu a vrstvu detailov. V základnej vrstve je kontrast skomprimovaný bilaterálnym filtrom, ktorý chráni hrany. [4]

**Fotografická reprodukcia** (Reinhard a spol. 2002) - tento operátor simuluje techniku "dodging and burning", ktorá bola používaná v počiatkoch fotografie a dovoľuje vytvárať rozličné expozície naprieč fotografiou. Lokálny operátor obsahuje aj jednoduchšiu globálnu verziu. [13]

**Logaritmické mapovanie** (Drago a spol. 2003) - metóda redukuje pomer kontrastu logaritmickou kompresiou hodnôt jasu, napodobňujúc ľudské vnímanie svetla. Zachováva detaily a kontrast scény. [3]

**Perceptuálny rámec pre kontrastné spracovanie HDR** (Mantiuk a spol.) - metóda vytvára rámec pre spracovanie obrazu v priestore vizuálnej odozvy, v ktorej kontrastné hodnoty priamo korelujú so svojou viditeľnosťou v obraze. Rámec zahŕňa transformáciu obrazu z jasového priestoru na pyramídu obrázkov s nízkym kontrastom a potom do priestoru vizuálnej odozvy. [11]

**Kompresia gradiendom** (Fattal a spol.) - metóda znižuje rozsah gradiendového poľa jasu. Obraz s nízkym dynamickým rozsahom je získaný riešením Poissonovej rovnice na modifikovanom gradiendovom poli. Metóda je schopná dobrej kompresie dynamického rozsahu, pričom zachováva jemné detaily a vyhýba sa bežným artefaktom. [5]

**Úprava histogramu** (Larson a spol. 1997) - cieľom operátora je vytvárať HDR fotografie, ktoré zachovávajú realističnosť scény. Obsahuje modely citlivosti človeka na kontrast, farby, ostrosť zraku a osvetlenie, podľa ktorých sa vytvárajú obrazy zodpovedajúce skúsenostiam diváka na skutočnej scéne. [1]

**Model iCAM** (Johnson a Fairchild 2003) - model vzhľadu obrazu, ktorý bol rozšírený pre zobrazovanie HDR obrázkov na displej. iCAM sa pokúša určiť perceptuálnu odozvu voči priestorovo zložitým podnetom a dokáže predvídať vzhľad HDR obrazu. [9]

**Lokálny model prispôsobenia očí** (Ledda a spol. 2004) - simuluje reakciu sietnice na jas, avšak v tomto prípade je proces úplne lokalizovaný, čo umožňuje dobrú kompresiu dynamického rozsahu. Tento model je podobný modelu Pattanaika a spol. z roku 2000. [10]

## 2.5 Formáty HDR obsahu

Po vygenerovaní HDR obsahu, sa môže vyžadovať jeho uloženie pre neskoršie úpravy a spracovanie. Vygenerovaný HDR obsah s hodnotami v desatinných číslach s pohyblivou rádovou čiarkou, zaberá 96 bitov pre pixel. Na uloženie takého obsahu, je vhodné obsah komprimovať do jedného zo zavedených formátov, uvedených v tabuľke 2.1. Veľa schém na komprimovanie HDR obsahu je založených na existujúcich štandardoch komprimovania LDR obrázkov. Cieľom kompresie HDR obrazu je reprezentácia hodnôt s pohyblivou rádovou čiarkou menším počtom bitov.

Formát	Kódovanie	Bity/pixel
HDR	RGBE	32
	XYZE	32
TIFF	IEEE RGB	96
	LogLuv24	24
	LogLuv32	32
EXR	Half RGB	48

Tabuľka 2.1: Zavedené formáty HDR obsahu [14]

### RGBE

Formát Radiance HDR (`.hdr`, `.pic`), je jeden z prvých formátov pre komprimovanie HDR obsahu. Súbor zakódovaný v tomto formáte je zložený z hlavičky so základnými informáciami o parametroch obrázku a komprimovaných dát. Pixel uložený vo formáte RGBE má 32 bitov (obr. 2.8). Prvých 24 bitov obsahuje jednotlivé farebné kanály v štandardnej forme hodnôt 0-255 (8 bitov). Posledných 8 bitov je vyhradených pre spoločný exponent. S ohľadom na to, že hodnoty RGB sú vo veľmi podobnom rozsahu, nie je potrebné ukladať exponent zvlášť pre každý farebný kanál. Exponent je vyjadrený z najjasnejšieho kanálu.

Obmedzením formátu RGBE je, že nemôže reprezentovať vysoko saturované farby v rámci farebného modelu sRGB. Pri konvertovaní takýchto farieb sa môže stať, že sa farebné zložky stanú zápornými. V takom prípade RGBE nemôže reprezentovať záporné hodnoty a niektoré informácie o farbe sa stratia. Riešením tohoto problému je využitie farebného modelu CIE XYZ a kódovanie XYZE. [1]



Obr. 2.8: Formát RGBE, s kódovaním 32 bitov pre pixel

### LogLuv

Kódovanie LogLuv (`.tif`, `tiff`), používa na vyjadrenie celého rozsahu jasu a farieb iba celé čísla. Kódovanie je založené na jave, že ľudské oko nie je rovnako citlivé na všetky úrovne jasu. Ak sa namiesto jasu použije jeho logaritmus, potom nezáleží na detekovateľných hodnotách prahu, ale konštantné celočíselné hodnoty môžu byť prijateľné pre aproximáciu prahu viditeľnosti ľudského oka. [14]

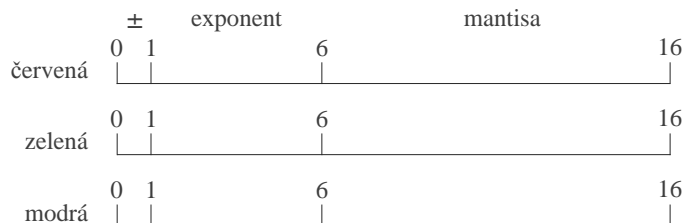
32-bitové kódovanie využíva 16 bitov pre hodnoty jasů a ďalších 16 bitov na reprezentáciu chrominancie (obr. 2.9).



Obr. 2.9: Formát LogLuv, s kódovaním 32 bitov pre pixel

## OpenEXR

EXtended Range formát<sup>5</sup> (.exr) implementovaný v C++ je od roku 2002 dostupný ako open source. Odvtedy sa stal štandardom pre mnoho aplikácií s HDR obsahom a neustále sa rozvíja aj vo filmovom priemysle. Hodnoty pixelov ukladá ako 16 alebo 32-bitové číslo s pohyblivou rádovou čiarkou alebo 32-bitové celé číslo. Základná verzia, ktorá využíva 16 bitov pre farebný kanál, obsahuje 1 znamienkový bit, 5 bitov pre exponent a 10 bitov pre mantisu (obr. 2.10). Formát podporuje bezstrátovú kompresiu a rozšíriteľnosť knižnice o vlastnú funkcionality. [14]



Obr. 2.10: Formát OpenEXR, s kódovaním 48 bitov pre pixel

<sup>5</sup><http://www.openexr.org>

## Kapitola 3

# Existujúce riešenia

Pre vytvorenie aplikácie, ktorá bude spĺňať požiadavky širokej škály užívateľov a bude obsahovať prakticky využiteľné funkcie je potrebné spraviť prieskum existujúcich riešení rovnako zameraných aplikácií dostupných na GooglePlay (pre Android) a iTunes (iOS). Nižšie je uvedený zoznam najstiahovanejších mobilných aplikácií pre jednotlivé OS, ich funkcie, výhody, nevýhody a chyby z užívateľského hľadiska.

### Android

**HDR Max - Photo Editor** (hodnotenie užívateľov 4.3/5) Na vytvorenie fotografie využíva natívnu aplikáciu Fotoaparát. Pri jednom spustení sa to ukázalo ako nevhodný spôsob, keďže sa po vytvorení fotografie neotvorila znova aplikácia. HDR fotografiu vytvára pomocou filtra aplikovaného na jednu fotografiu. Filter sa dá dokonca kombináciou s inými krokmi naniest viac krát, čo sa dá považovať za chybu. Upravovanie HDR je veľmi obmedzené. Aplikácia obsahuje štandardné úpravy vytvorenej fotografie (kontrast, jas, sýtosť, teplota a vyváženie farieb) a statické farebné filtre (obr. 3.1c). Okrem toho má aplikácia ešte širokú ponuku, niekedy zbytočných funkcií.

**Ultimate HDR Camera** (4.11/5) Fotografia sa vytvára v rozhraní aplikácie. Pre vytvorenie HDR formátu využíva kombináciu viacerých vytvorených fotografií s rôznym expozičným časom. Následne vytvorená HDR fotografia má obmedzené úpravy. Aplikácia je veľmi jednoduchá, ale užívateľa nezaujme svojím rozhraním (obr. 3.1d). Napriek tomu, výsledné snímky sú kvalitné zobrazenia scény s akýmkoľvek dynamickým rozsahom.

**Snapseed** (4.5/5) Vytvorenie fotografie nie je možné, aplikácia dokáže iba načítať uloženú fotografiu z galérie, na ktorú je možné aplikovať filter, ktorý vytvára HDR efekt. Aplikácia však zaujala svojou ponukou grafických nástrojov, z ktorých najzaujímavejšie sú napr. nastavenie kriviek, perspektívy, retro filtre, rozpoznávanie tváre a efekt zostrenia (obr. 3.1a). Aplikácia taktiež ponúka niekoľko málo farebných filtrov. Rozhranie je intuitívne, a veľmi dobre premyslené vzhľadom na komplikované nástroje a možnosti úprav. Nastavovanie intenzity jednotlivých filtrov a úprav je zaujímavé implementované - pre výber nástroja využíva potiahnutie prstom vertikálne a potiahnutím prstom do strán nastavujeme intenzitu úpravy. Z pohľadu užívateľa je to najzaujímavejšia aplikácia na GooglePlay.

**HDR Camera** (3.8/5) Fotografia sa vytvára v rozhraní aplikácie. Aplikácia vytvorí tri fotografie s rôznou expozíciou, čo trvá približne 5 sekúnd. Aplikácia je jedna z mála, ktorá nepoužíva na vytvorenie HDR filter. Po vytvorení HDR fotografie, nemá užívateľ žiadne ďalšie možnosti úprav. Užívateľ musí dostatočne rýchlo uložiť svoju výslednú fotografiu, pretože aplikácia sa svojvoľne prepína naspäť na domovskú obrazovku.

**HDR HQ** (3.9/5) HDR fotografiu vytvára pomocou filtra aplikovaného na jednu vytvorenú fotografiu. Obsahuje obmedzené úpravy vytvorenej fotografie (kontrast, jas, teplota farieb). Užívateľa však zaujme jednoduché a minimalistické rozhranie aplikácie (obr. 3.1b). Dôležitý nedostatok je však chýbajúce tlačidlo pre návrat z obrazovky úprav do hlavného menu.

**A Better Camera** (4.1/5) Aplikácia obsahuje rôzne možnosti fotografovania scény, medzi ktorými je aj možnosť vytvorenia HDR fotografie. HDR fotografiu vytvára pomocou troch fotografií s rôznou expozíciou a výsledok je pre užívateľa dostatočne uspokojivý. Vytvorenú fotografiu je možné upravovať pomocou externej aplikácie od rovnakého vývojára.

## iOS

**HDR** HDR efekt vytvára pomocou jedného z piatich filtrov a nastavením jeho intenzity. Rozhranie je jednoduché a pre užívateľa nezaujímavé.

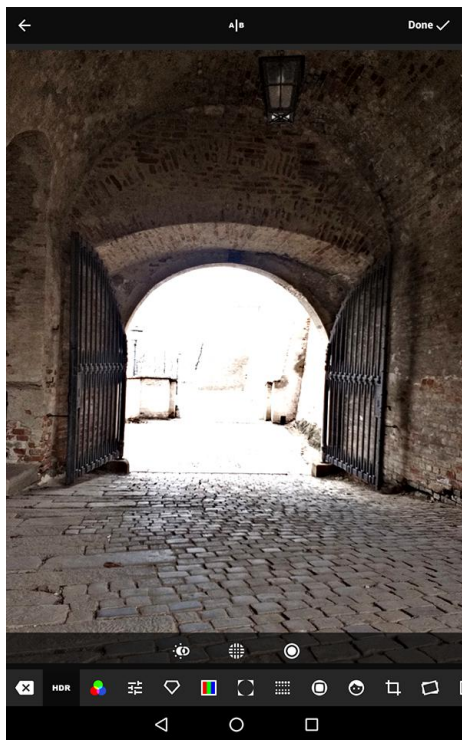
**HDR Camera** Aplikácia je totožná s Android aplikáciou HDR HQ, čo pridáva pozitívnu vlastnosť - multiplatformnosť. Obdobne teda ako HDR HQ na Androide má veľmi zaujímavé grafické rozhranie a zaujímavú ponuku úprav fotografie.

**HDR for Free** Vytvorenie fotografie nie je možné, aplikácia dokáže iba načítať uloženú fotografiu z galérie, na ktorú je možné aplikovať jeden zo štyroch filtrov vytvárajúcich HDR efekt. Výsledok je aj tak veľmi neuspokojivý - iba sa zvýši kontrast farieb. Grafické rozhranie aplikácie je veľmi chabé.

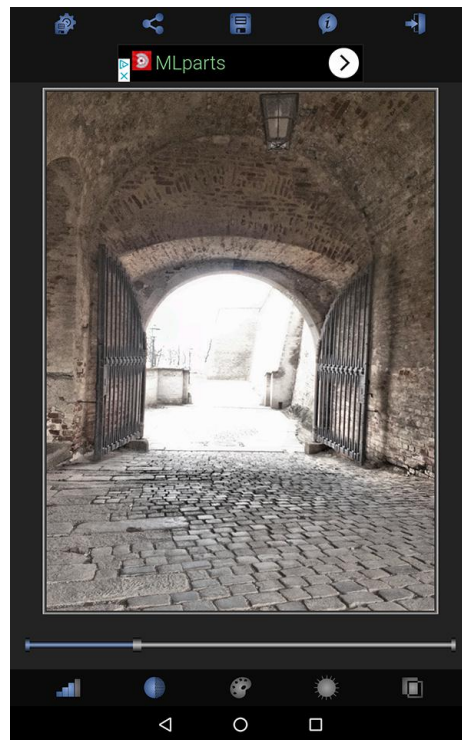
**Live HDR Camera** Fotografia sa vytvára v rozhraní aplikácie, kde užívateľ môže v reálnom čase sledovať výsledok pomocou filtra obrazu. Obraz však obsahuje množstvo šumu a po vytvorení fotografie užívateľ dostane fotografiu upravenú filtrom s množstvom šumu. Po vytvorení fotografie aplikácia neponúka žiadne ďalšie nastavenia a úpravy fotografie.

**Snapseed** Aplikácia obsahuje všetky možnosti úprav a nástrojov ako Android aplikácia Snapseed.

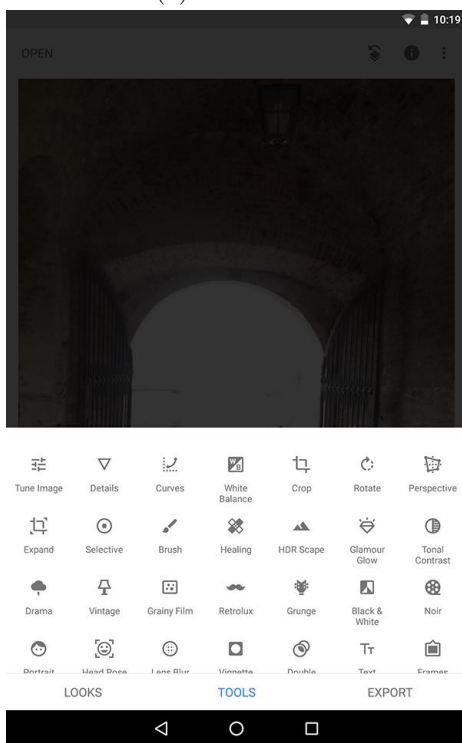
**Adobe Lightroom** Fotografia sa vytvára v rozhraní aplikácie, kde užívateľ môže nastavovať EV. HDR fotografiu následne vytvorí pomocou filtra. Užívateľovi ponúka štandardné úpravy a nastavenia, avšak rozhranie je veľmi ťažkopádne a neprehľadné.



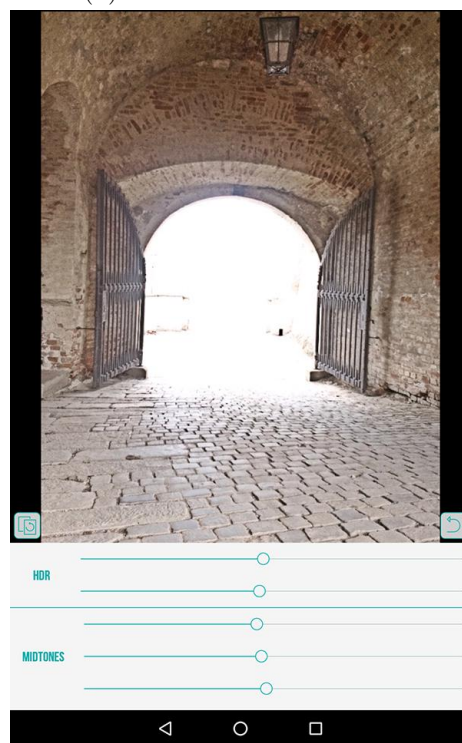
(a) HDR Max



(b) Ultimate HDR Camera



(c) Snapseed



(d) HDR HQ

Obr. 3.1: Uživatelské rozhrania podobných aplikácií

## Kapitola 4

# Návrh a implementácia

Výber technológií pre implementáciu časovo a priestorovo náročných algoritmov je dôležitá a často náročná časť práce. Vzhľadom k tomu, že natívna aplikácia fotoaparátu pre iOS podporuje vytváranie HDR fotografie, táto práca bude zameraná na platformu Android. Použité vývojové prostredie je Android Studio, ktoré poskytuje širokú škálu nástrojov pre editovanie kódu a zároveň ponúka tvorbu viziálneho návrhu grafického užívateľského rozhrania. Zvoleným programovacím jazykom je objektovo orientovaná Java. Pre riešenie náročných matematických a grafických operácií je použitá knižnica OpenCV. Knižnica je implementovaná v jazyku C++, čo znamená, že metódy sú v operačnom systéme Android vykonávané natívne a tým nám prináša výhodu v rýchlosti spracovania.

Aplikácia implementuje štandardný postup vytvárania HDR fotografie na základe spájania série snímok (obr. 4.1). Užívateľské rozhranie aplikácie poskytuje užívateľovi možnosti interaktivity pri vytváraní výslednej fotografie. Pre zarovnanie snímok je použitá metóda Median Threshold Bitmap od Grega Warda (viac v podkapitole 4.2.2). Využitím krivky odozvy zariadenia, ktorú dosiahneme metódou od Paula E. Debeveca a Jitendru Malika, popísanou v podkapitole 2.3 a váhovej funkcie, vygenerujeme HDR obsah, ktorý je sám o sebe nezobraziteľný. Vygenerovaný HDR obsah možno zobraziť pomocou operátorov mapovania tónov. Aplikácia implementuje celkovo štyri operátory mapovania tónov: globálny operátor Erika Reinharda, operátor Frederika Draga a lokálne operátory od Duranda a Mantiuka (podkapitola 2.4.1).

Zdrojový kód aplikácie je členený podľa architektonického vzoru model-view-controller, ktorý rozdeľuje aplikáciu do troch hlavných častí:

**Dátový model** uchováva dáta naprieč aplikáciou a operácie nad týmito dátami.

model	
— CameraCRF	..... Krivka odozvy zariadenia
— Exposures	..... Vybrané expozičné časy pre aktuálnu scénu
— ImageHDR	..... HDR obsah
— ImageLDR	..... Vytvorená fotografia
— TmoParams	..... Východzie hodnoty a prevod relatívnych hodnôt na absolútne

**Užívateľské rozhranie** umožňuje prezentáciu dát. V našom prípade **view** obsahuje triedy pracujúce s Android Fragmentmi (viac v podkapitole 4.1) a dialógovými oknami.

```

view
├── CameraFragment
├── EditDragoFragment
├── EditDurandFragment
├── EditMantiukFragment
├── EditReinhardFragment
├── FilesFragment
├── HomeFragment
├── SaveDialog
├── SettingsDialog
└── TmoFragment

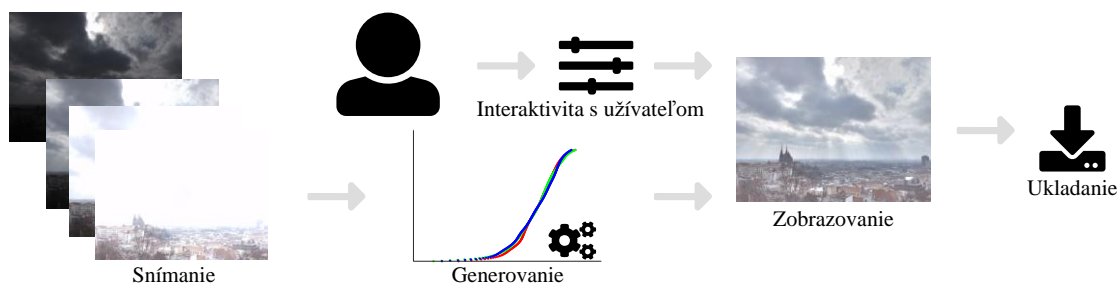
```

**Riadiaca logika aplikácie** riadi tok udalostí v programe a modifikuje dáta v dátovom modeli.

```

controller
├── camera
│   └── AlignImages .....Zarovnanie série fotografií
├── hdr
│   ├── CRFRecover ..... Získanie krivky odozvy zariadenia
│   ├── HDRController .....Kontrolér postupu vytvárania HDR obsahu
│   ├── HDRMerge ..... Generovanie HDR obsahu
│   └── SamplesSelector ..... Výber vzorky pixelov
├── tmo ..... Metódy operátov mapovania tónov
│   ├── TMODrago
│   ├── TMODurand
│   ├── TMOmantiuk
│   └── TMOReinhard
├── Convertor ..... Prevody medzi dátovými typmi
└── Storages ..... Správa úložísk zariadenia

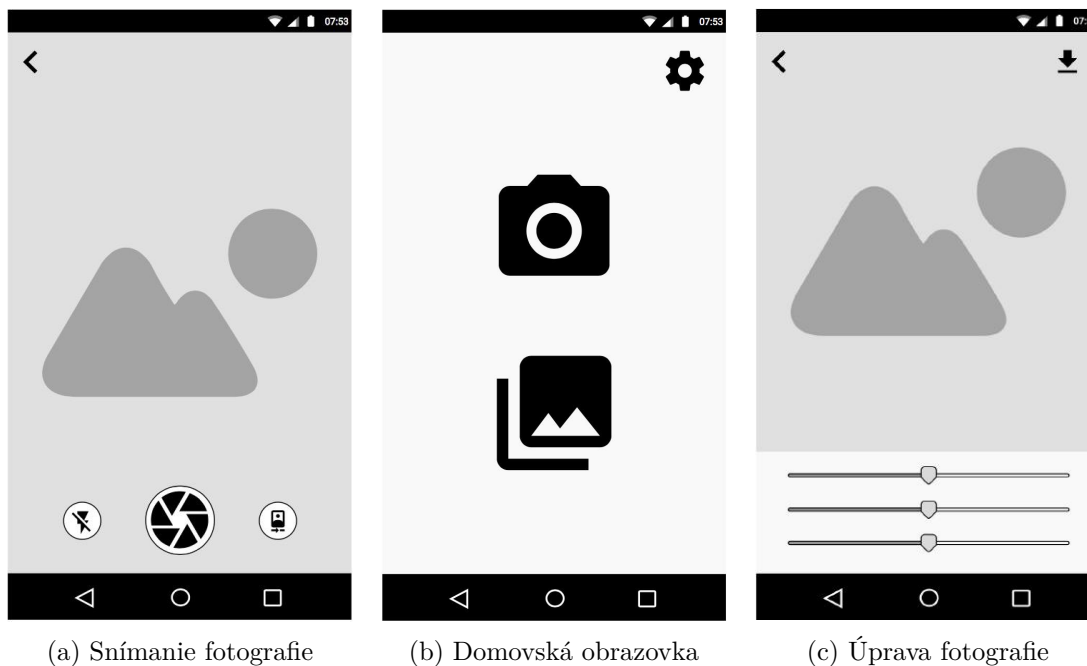
```



Obr. 4.1: Postup vytvárania HDR fotografie pomocou aplikácie

## 4.1 Uživatelské rozhranie

Aplikácia sa zameriava na širokú škálu užívateľov - od náročného fotografa až po technicky neskúsenú osobu, snažiacu sa vytvoriť čo naj dôveryhodnejší záber scény. Preto by mala aplikácia minimalistickým a intuitívnym spôsobom ponúkať všetky potrebné nástroje a možnosti, ktoré môže užívateľ využiť.



Obr. 4.2: Návrh obrazoviek užívateľského rozhrania

Obrazovka 4.2b je príkladom toho, že užívateľ môže mať všetko čo potrebuje, bez zbytočného zdĺhavého hľadania. Na vytvorenie HDR fotografie potrebujeme buď zachytiť aktuálnu scénu fotoaparátom, alebo načítať súbor s HDR obsahom.

Po zachytení scény na fotografiu (obr. 4.2a) alebo načítaní HDR obsahu a po spracovaní tohoto obsahu, má užívateľ na výber z rôznych techník mapovania tónov. Po výbere jednej z nich je užívateľovi poskytnutá možnosť upravovania fotografie (obr. 4.2c) do výslednej podoby pomocou prehľadnej ponuky nástrojov. Jednotlivé parametre sú spočiatku nastavené na vhodné východzie hodnoty, ktoré je možné po úpravách zresetovať. Na záver je možné

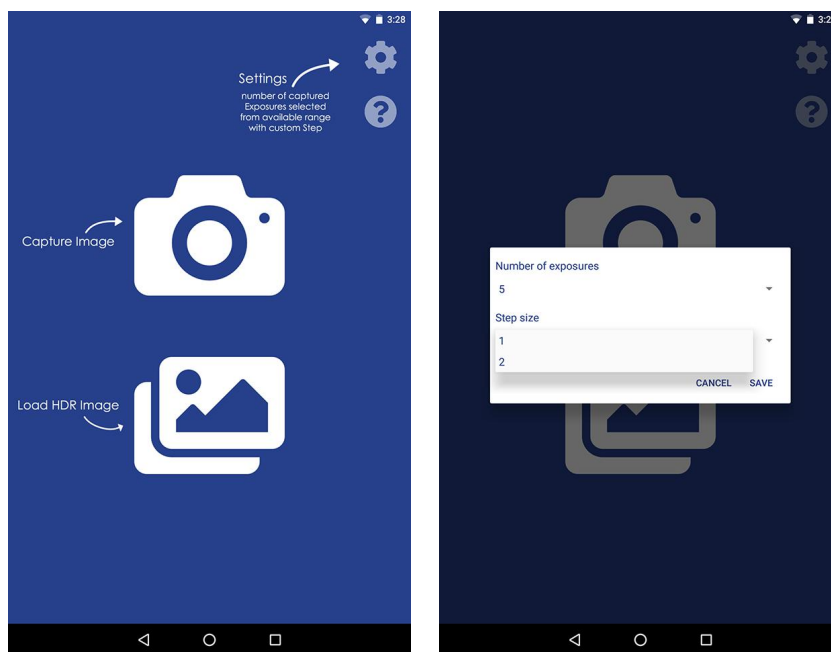
výsledok uložiť do galérie. Rozhranie musí ponúkať aj možnosť vrátiť sa o obrazovku späť, na čo aplikácie z prieskumu existujúcich riešení často zabúdajú.

Náhľadová ikona (obr. 4.3) je navrhnutá, aby zachytila hlavnú myšlienku aplikácie. Tri vrstvy s rozdielnými odtieňmi od najtmavšieho po najsvetlejší predstavujú fotografie zachytené s rôznym časom expozície. Ich prelínanie naznačuje, že sa tieto snímky spájajú do jednej HDR fotografie. Pôvodný čierno-biely návrh ikony časom nahradila varianta v primárnych farbách užívateľského rozhrania.



Obr. 4.3: Ikona aplikácie

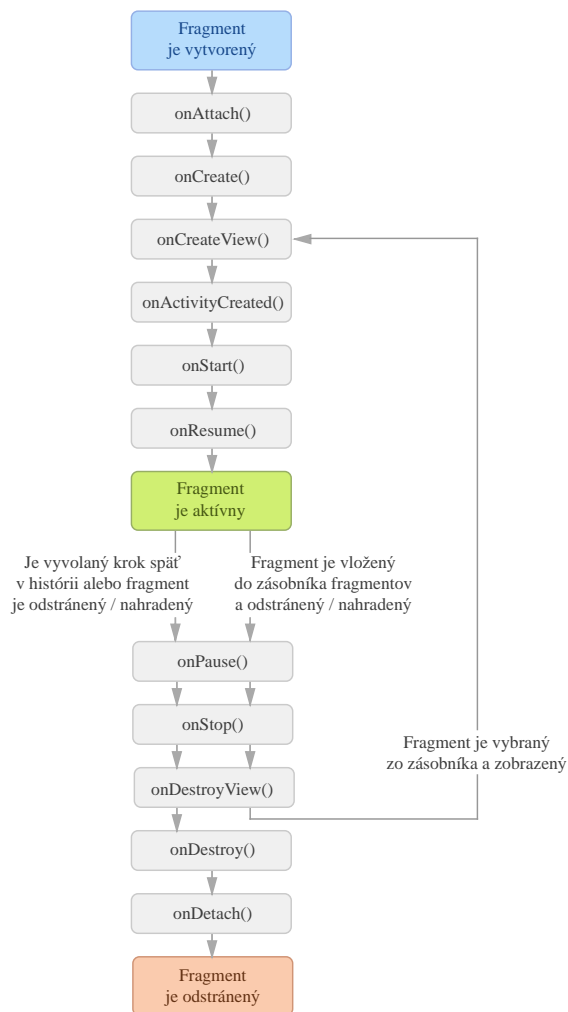
Z domovskej obrazovky (obr. 4.4a) je priamy prístup k nastaveniam aplikácie (obr. 4.4b). Nastavenia obsahujú možnosti definovania počtu vytvorených fotografií v jednej sérii a zvolenie kroku pre algoritmus vyberajúci vhodné časy expozície (podkapitola 4.2.1).



(a) Popis obrazovky

(b) Nastavenia aplikácie

Obr. 4.4: Domovská obrazovka



Obr. 4.5: Životný cyklus Fragmentu [7]

## Android Fragment

Jednotlivé obrazovky aplikácie sú vytvorené využitím Android Fragmentov. Fragment popisuje vymedzenú časť užívateľského rozhrania, ktorú je možné vkladať, alebo odobrať počas behu aktivity. V hlavnej obrazovke aktivity je definovaný `FrameLayout` container, do ktorého sa podľa situácie vkladajú obrazovky typu Fragment.

V triede `Main` aplikácie vkladáme jednotlivé obrazovky pomocou `FragmentManager` transakcií, ku ktorým vytvára prístup `FragmentManager`.

```

1 ExampleFragment newFragment = new ExampleFragment();
2
3 FragmentManager manager = getSupportFragmentManager();
4 FragmentTransaction transaction = manager.beginTransaction();
5
6 transaction.replace(R.id.fragment_container, newFragment);
7 transaction.addToBackStack(null);
8 transaction.commit();
  
```

Zásobník `BackStack` slúži na pohybovanie sa v histórii fragmentov aplikácie. To znamená, že ak užívateľ klikne na tlačidlo späť, zo zásobníka sa vyberie posledný aktívny fragment a zobrazí sa. Typ našej aplikácie tento zásobník nevyžaduje. Tlačidlá späť slúžia primárne na vrátenie sa na domovskú obrazovku, prípadne na obrazovku s výberom operátora mapovania tónov.

Vykreslenie obrazovky v rozhraní zabezpečuje objekt `LayoutInflater`. Prvky a rozloženie obrazovky je definované v jazyku XML.

```
1 public View onCreateView(LayoutInflater inflater, ViewGroup
   container, Bundle savedInstanceState) {
2     return inflater.inflate(R.layout.new_fragment, container, false)
3 }
```

## 4.2 Snímanie

Aplikácia generuje HDR obsah kombinovaním LDR fotografií s rôznou hodnotou času expozície. Snímanie fotografií je implementované nad aplikačným rozhraním `Camera2`<sup>1</sup> operačného systému Android. Aplikácii, pracujúcej s týmto rozhraním, musí byť užívateľom udelené povolenie `android.permission.CAMERA`.

Po inicializovaní obrazovky (obr. 4.2a) sa vytvorí inštancia `CameraManager`, ktorá poskytuje detekciu, charakterizáciu a pripojenie k dostupným `CameraDevices` [7]. Každá z `CameraDevices` obsahuje súbor vlastností a nastavení snímača, ku ktorým prístupujeme pomocou objektu `CameraCharacteristics`.

Následne je vytvorená `CameraCaptureSession`, ktorej zvolíme výstupnú oblasť `Surface`. Pre zobrazovanie scény v reálnom čase zobrazujeme na výstup stream záberov scény, ktorý dosiahneme nastavením opakovaného požiadavku o snímanie. `CaptureRequest` (požiadavok o snímanie) vytvárame nastavovaním parametrov objektu `CaptureRequest.Builder`. Pri zobrazovaní náhľadu užívateľovi využijeme automatické nastavenia parametrov snímania (`CONTROL_MODE_AUTO`). Do vytvoreného požiadavku o stream záberov scény vložíme callback `CaptureCallback`, ktorého metóda `onCaptureCompleted` vracia objekt typu `TotalCaptureResult`. Tento objekt obsahuje hodnoty konfigurácie snímača zariadenia, po vytvorení posledného snímku. Z tejto konfigurácie následne získavame hodnoty času expozície, ISO, clony a korekcie farieb, ktoré sú automaticky zvolené snímačom. Hodnoty ukladáme do premenných, ktoré neskôr použijeme pri manuálnych nastaveniach snímania. Keďže táto operácia nie je časovo ani priestorovo náročná a nenaruša plynulé zobrazenie streamu scény a taktiež hodnoty senzora sa menia vplyvom scény, sú tieto hodnoty nastavované v každom `CaptureCallback` po uskutočnení požiadavku o snímanie.

Ak užívateľ stlačí tlačidlo pre snímanie scény, je zastavené opakovanie požiadavku zobrazovania streamu. V tomto okamihu je potrebné vytvoriť sériu záberov scény, s manuálne nastavenými hodnotami parametrov. Dosiahneme to definovaním zoznamu požiadavkov o snímanie, ktoré budú mať špecifikované hodnoty parametrov. Pre nastavovanie vlastných parametrov, musí byť aktivovaný manuálny mód a to vypnutím `CONTROL_MODE`. Hodnoty parametrov ako citlivosť snímača (ISO) a clona sú nájdené ako najvhodnejšia kombinácia pre najlepší výsledok. Najdôležitejším parametrom je však dĺžka času expozície v nanosekundách, počas ktorého je snímač vystavený svetlu z prostredia scény. Zoznam požiadavkov o vytvorenie snímok s manuálnymi parametrami je poslaný do metódy `captureBurst()`.

<sup>1</sup><https://developer.android.com/reference/android/hardware/camera2/package-summary.html>

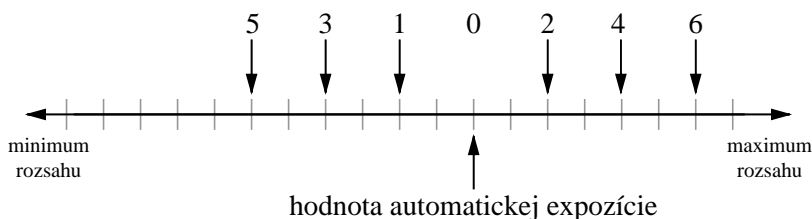
Zachytený snímok sa v callbacku `OnImageAvailableListener` spracuje a vloží do zoznamu k ostatným záberom danej scény.

#### 4.2.1 Nastavenie času expozície

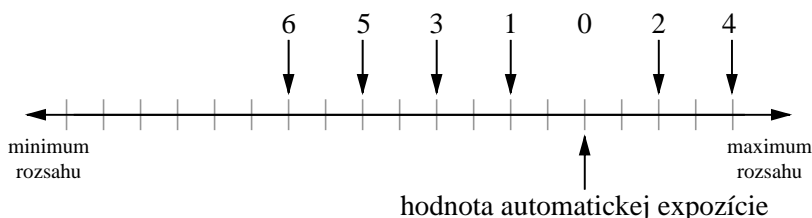
Ako už bolo spomínané, vybrané `CameraDevice` nám poskytuje vlastnosti snímača, popísané v `CameraCharacteristics` [7]. Odtiaľ získame aj rozsah povoleného expozičného času snímača `SENSOR_INFO_EXPOSURE_TIME_RANGE`. Tento rozsah využijeme pri výpočte expozičných časov, ktoré budú využité pri snímaní. V mnohých zdrojoch sa uvádzajú odporúčané časy expozície vyjadrené ako hodnoty geometrického radu - každý čas expozície je konštantným násobkom predchádzajúceho času.

Trieda `Exposures` pomocou postupne získaných informácií o rozsahu povoleného expozičného času snímača a automaticky zvolenej hodnoty času expozície v aktuálnej scéne vytvára zoznam vybraných expozičných časov pre manuálne nastavenia. Pri inicializovaní snímača zariadenia a získania rozsahu expozičných časov sú do zoznamu `range` postupne vkladané hodnoty času expozície v tvare  $2^n$  nanosekúnd. V okamihu, keď nastane stav manuálneho snímania scény, vytvorí sa zoznam vybraných expozičných časov, ktorých strednou hodnotou je hodnota automatickej expozície (obr. 4.6). Povolený rozsah expozičného času však nemusí umožňovať, aby prostrednou hodnotou bola práve táto hodnota (obr. 4.7). Pre riešenie týchto problémov bol vytvorený krátky algoritmus popísaný v pseudokóde 1.

Algoritmus vytvára zoznam hodnôt geometrického radu v tvare  $2^n$  *ns* v povolenom rozsahu. V tomto zozname sa zvolí hodnota najbližšia hodnote automatickej expozície ako prostredná hodnota a vo zvolenom kroku sa striedavo hľadajú hodnoty nižšie od strednej hodnoty a hodnoty vyššie. Algoritmus končí, ak konečný zoznam obsahuje zvolený počet expozičných časov, alebo ak nie je možné nájsť ďalšiu hodnotu.



Obr. 4.6: Vyhľadávanie vhodných hodnôt časov expozície s krokom 2 (čísla zobrazujú poradie nájdených hodnôt)



Obr. 4.7: Riešenie problému pri vysokej hodnote automatickej expozície

### Algoritmus 1: Výber expozičných časov

vstupy algoritmu:

**maxExpo** - maximálny počet expozícií

**krok** - krok pri výbere medzi expozičnými časmi v zozname **range**

**stredExpo** - hodnota automatickej expozície (najbližšia hodnota v tvare  $2^n$ )

inicializácia premenných:

**stredIdx** = index hodnoty **stredExpo** v zozname **range**

**mensiIdx** = **stredIdx** - **krok**

**vacsiIdx** = **stredIdx** + **krok**

**pocet** - počet hodnôt v zozname **exposures**

**vacsiaHodnota** - booleanovská hodnota značiaca, či sa bude vyhľadávať menšia, alebo väčšia hodnota času expozície

**najdene** - booleanovská hodnota značiaca či sa v predchádzajúcom cykle našla vhodná hodnota

vlož **stredExpo** do zoznamu **expoziecie**;

**while** *pocet* < *maxExpo* **do**

**if** *vacsiaHodnota* **then**

**if** *vacsiIdx* <= *najväčší index zoznamu range* **then**

      vlož hodnotu na indexe *vacsiIdx* zo zoznamu **range** do zoznamu **expoziecie**;

*najdene* nastav na true;

*vacsiIdx* inkrementuj o **krok**;

      inkrementuj *pocet*;

**else**

      ak sa v predchádzajúcom cykle nenašla vhodná hodnota - ukonči algoritmus;

*najdene* nastav na false;

**end**

*vacsiaHodnota* nastav na false;

**else**

**if** *mensiIdx* >= 0 **then**

      vlož hodnotu na indexe *mensiIdx* zo zoznamu **range** do zoznamu **expoziecie**;

*najdene* nastav na true;

*vacsiIdx* dekrementuj o **krok**;

      inkrementuj *pocet*;

**else**

      ak sa v predchádzajúcom cykle nenašla vhodná hodnota - ukonči algoritmus;

*najdene* nastav na false;

**end**

*vacsiaHodnota* nastav na true;

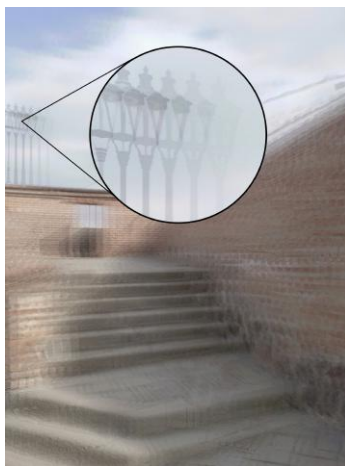
**end**

**end**

### 4.2.2 Zarovnanie

Jedným z predpokladov vytvárania HDR obsahu je statickosť zariadenia medzi fotografovaním jednotlivých expozícií. Profesionálny fotograf si za normálnych okolností pri vytváraní HDR fotografie nasadí fotoaparát na statív. Fotografovia používajú taktiež funkciu zvanú predsklopenie zrkadla (MLU<sup>2</sup>) pre zníženie ďalších vibrácií. Problémy so zarovnaním sú oveľa horšie, ak sú zábery fotografované fotoaparátom vo voľnej ruke, alebo ako v našom prípade - fotografovaním pomocou smartfónu či tabletu.

Nezarovnanie snímok použitých pri vytváraní HDR obrazu môže mať za následok vážne artefakty. Na obrázku 4.8 môžeme vidieť artefakty nazývané ghosting (duchovia), ktoré majú vplyv na výsledný obrázok. Ghosting nastáva aj v prípade, že sa na statickej scéne nachádza objekt, ktorý je voči scéne v pohybe.



Obr. 4.8: Problémy vznikajúce pri nezarovnaní snímok

### Median threshold bitmap

Pre zarovnanie vytvorených snímok je použitá metóda Grega Warda (2003), implementovaná v triede `AlignMTB` knižnice `OpenCV`.

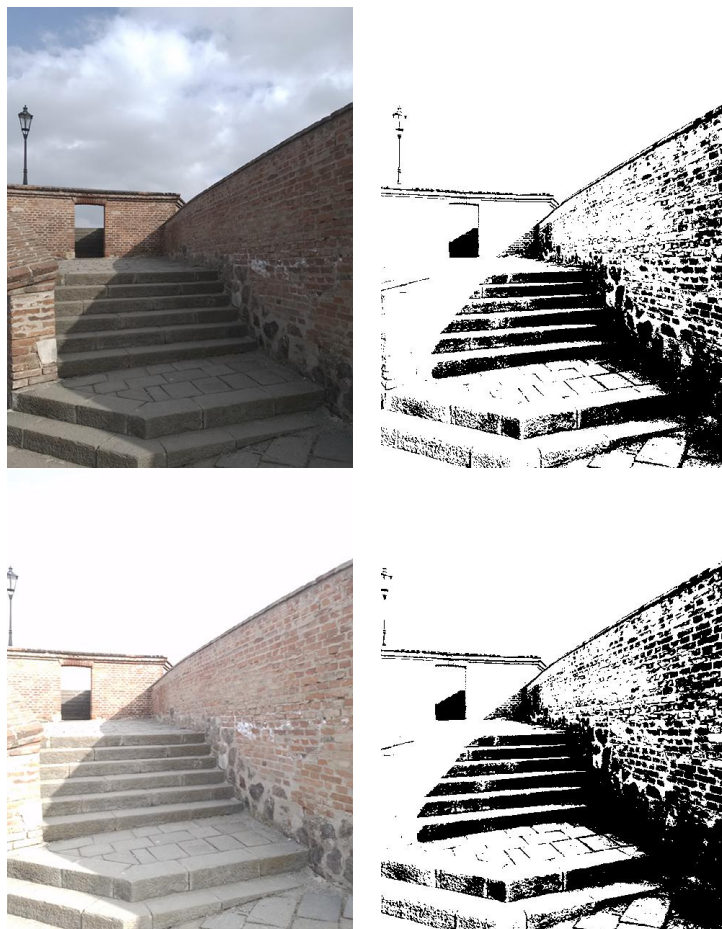
Vstupom metódy je zoznam vytvorených snímok, ktoré sú váženým priemerom prevedené na obrázky v stupňoch šedej. Podľa histogramu jasov obrázkov sa určí 8-bitová hodnota mediánu a vytvorí sa MTB obrázy, kde každý pixel, ktorý je jasnejší než medián, má hodnotu 1 a v opačnom prípade hodnotu 0 [15].

Metóda nepracuje s expozíciou snímok. Na obrázku 4.9 môžeme vidieť, že MTB obrázy sú pre rôzne expozície skoro identické. Obrázky naľavo predstavujú vybrané snímky zo série expozícií scény a napravo sú ich príslušné MTB obrázy.

Jeden zo zoznamu obrázkov je zvolený za referenčný obrázok, podľa ktorého sa určujú číselné offsety zvyšných obrázkov. Použitím XOR operátora môžeme na matici pixelov páru obrázkov jasne určiť offset nezarovnanosti na osiach  $x$  a  $y$ . Rýchlosť tejto metódy spočíva vo využívaní bitových operácií nad obrázkami, ktoré sú usporiadané v obrazovej pyramíde. Offset sa začína určovať na páre obrázkov s najnižším rozlíšením. Postupne sa prechádza k obrázkom s vyšším rozlíšením a počíta sa odchýlka predchádzajúceho offsetu vynáso-

---

<sup>2</sup>Mirror lock-up



Obr. 4.9: MTB obrazy vytvorené zo snímok z rozličným expozičným časom

beného dvomi, čo zodpovedá zmene rozlíšenia. Novovzniknuté oblasti obrazu sú vyplnené nulovými hodnotami.

### 4.3 Generovanie HDR obsahu

Potom, ako je fotoaparátom zariadenia zachytená séria snímok s rôznym expozičným časom, je potrebné tieto obrázky zlúčiť do jedného HDR obsahu. Celý algoritmus spájania série snímok je obsiahnutý v triede `HDRController`, ktorý dekomponuje problém do troch tried spomenutých v tejto kapitole. Pri zápise rovníc a v zdrojovom kóde aplikácie sa nachádzajú premenné, ktorých význam je stručne popísaný v kapitole 2.3.

#### 4.3.1 Výber vzorky pixelov pre získanie krivky odozvy

Pred generovaním samotného HDR obsahu si musíme vyjadriť krivku odozvy fotoaparátu a to riešením kvadratickej objektívnej funkcie 2.4. Teoreticky by sa na riešenie tejto rovnice mohol vziať každý pixel, každej expozície, ale to by bolo na výpočet veľmi časovo a priestorovo náročné. My však nepotrebujeme všetky dostupné pixely. Ak máme  $P$  fotografií po  $N$  pixelov, výsledná intenzita žiarenia  $E_i$  bude mať  $N$  hodnôt a krivka odozvy  $g$  ( $Z_{max} - Z_{min}$ )

hodnôt. Na úspešné vyriešenie rovnice nám stačí  $N(P-1) > (Z_{max} - Z_{min})[2]$  hodnôt. Tieto hodnoty však musíme vhodne vybrať zo sekvencie expozícií.

Medzi dostupné metódy výberu pixelov pre získanie krivky odozvy môžeme zaradiť:

**Vyhľadávanie vhodných oblastí** je metóda spomenutá v knihe od E. Reinharda [14].

Metóda vyberá vhodné oblasti pomocou vylučovania vzoriek - vhodná oblasť je jasnejšia ako akákoľvek oblasť z predchádzajúcich expozícií, neprekrýva žiadnu inú oblasť a má malú odchýlku v jase vlastných pixelov. Takto sa vyberá dostatočný počet oblastí od najjasnejšej po najtmavšiu expozíciu. V prípade, že tmavšie expozície nevyužívajú celý rozsah jasu je ťažké nájsť oblasti, ktoré sú jasnejšie ako na predchádzajúcej expozícií. To nejakým významne neovplyvní výsledok, ale je dôležité stanoviť limit pri vylučovaní oblastí na jednej expozícií, aby sa algoritmus nedostal do nekonečného cyklu.

**Výber pixelov pomocou histogramu** spočíva vo vytvorení histogramu hodnôt a počtu pixelov s týmito hodnotami pre jednotlivé expozície. Z každého histogramu boli následne vybrané hodnoty, ktoré pixely najčastejšie nadobúdali. Problémom metódy však je, že pri najtmavších expozíciách sú vybrané samé čierne pixely a pri svetlých expozíciách je to naopak. Kód zobrazuje tvorbu histogramu vytvoreného z jasovej zložky obrazu.

```
1 histogram = new int [256];
2
3 for (int i = 0; i < jasovaZlozka.length; i++) {
4     histogram[jasovaZlozka[i]] += 1;
5 }
```

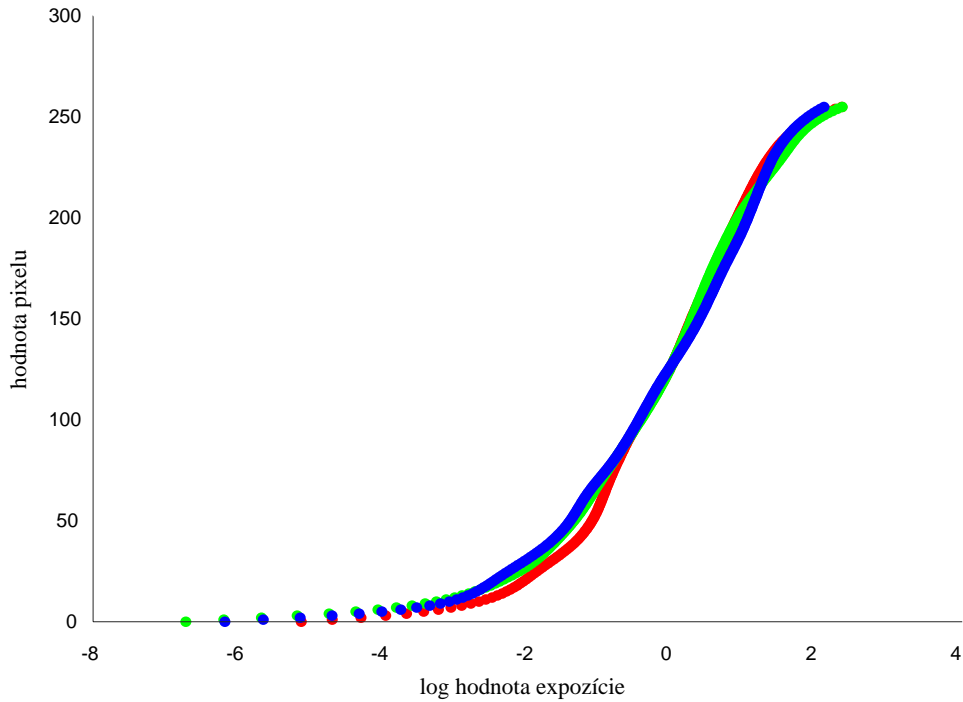
**Pravidelne usporiadané pixely** získame vybraním každého  $n$ -tého pixelu v určitom smere.

Vyberať je možné prechádzaním riadkov, stĺpcov alebo diagonál. Metóda je veľmi efektívna najmä pri vhodne zvolenom kroku

**Náhodný výber pixelov** je najjednoduchšou a často aj dostatočne efektívnou metódou.

Táto metóda je implementovaná v triede `SamplesSelector`, ktorá pri inicializovaní vyjadří potrebný počet hodnôt pixelov potrebných pre vyriešenie kvadratickej objektívnej rovnice.

```
1 List<Integer> vybraneIndexy = new ArrayList<>();
2 int i = 0;
3
4 while (vybraneIndexy.size() < velkostVzorky) {
5     // nahodny index pixelu
6     int index = (int) Math.floor(Math.random() * pocetPixelov);
7
8     if (!vybraneIndexy.contains(index)) {
9         // nahodne vybrany index nemame vo vybranych
10        for (int j = 0; j < pocetFotografii; j++) {
11            // ulozit pixel na vybranom indexe
12            vzorkaPixelov[i][j] = images.get(j).getPixel(index);
13        }
14        vybraneIndexy.add(index);
15        i++;
16    }
17 }
```



Obr. 4.10: Graf CRF kriviek jednotlivých farebných kanálov

Z dôvodu zamedzenia nežiadúcemu stavu, že bude viackrát náhodne vybraný práve jeden pixel (čo je pri počte pixelov na fotografii málo pravdepodobné), je definované pole vybraných indexov. Vhodný index je taký, ktorý sa nenachádza v poli už vybraných indexov.

### 4.3.2 Získanie krivky odozvy fotoaparátu

Ak máme vybrané dostatočné množstvo hodnôt, môžeme riešiť objektívnu kvadratickú rovnicu 2.4. Rovnica je doplnená o váhovou funkciu 4.1, pomocou ktorej dosiahneme, že hodnoty v okolí  $Z_{mid}$  budú mať väčšiu váhu ako hodnoty v okolí  $Z_{min}$  a  $Z_{max}$ .  $Z_{mid}$  je prostredná hodnota rozsahu hodnôt pixelu, vyjadrená ako  $Z_{mid} = \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})$ . Túto hodnotu je potrebné nastaviť na 0.

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min}, & \text{pre } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z, & \text{pre } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad [2] \quad (4.1)$$

Keďže aplikácia pracuje s farebnými obrázkami, musíme vyjadriť krivku odozvy  $g$  pre každý farebný kanál (obr. 4.10). Pridaním váhovej funkcie sa rovnica 2.4 z podkapitoly 2.3 upraví na tvar:

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P (w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j])^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z)g''(z)]^2 \quad [2] \quad (4.2)$$

Trieda `CRFRecover` implementuje riešenie tejto rovnice na základe ukážky `MATLAB` kódu od Paula E. Debeveca a J. Malika[2]. Kód bol debugovaný pomocou voľne šíriteľného soft-

véru GNU Octave<sup>3</sup> a následne implementovaný v Jave. Na záver je potrebné vykonať dekompozíciu vytvorených matíc. Dekompozícia je realizovaná pomocou metódy SVD<sup>4</sup>, z knižnice OpenCV.

### 4.3.3 Vytvorenie funkcie žiarenia

Ak už máme vyjadrenú krivku odozvy  $g$ , vieme ju použiť na prepočet hodnoty pixelu na relatívnu hodnotu žiarenia. Riešením rovnice 2.3 a pridaním váhovej funkcie 4.1 získame rovnicu:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} [2] \quad (4.3)$$

Na generovanie HDR obsahu potrebujeme vyjadriť  $\ln E_i$  pre každý pixel a každý farebný kanál. Vyjadrená hodnota pixelu v logaritmickej tvare sa musí upraviť na základný tvar  $E_i$  pomocou inverznej funkcie  $e^x$ . Na záver sú tieto hodnoty funkcie žiarenia zlúčené do matice `org.opencv.core.Mat` typu `CvType.CV_32FC3`, čo značí maticu 32-bitových hodnôt s pohyblivou rádovou čiarkou pre 3 farebné kanály. Tento algoritmus je implementovaný v triede `HDRMerge`.

## 4.4 Prevod HDR obsahu na LDR

Dostali sme sa do stavu, kedy máme vytvorený HDR obsah z  $n$  nasnímaných fotografií. Tento obsah je nutné vhodne užívateľovi prezentovať. Po vytvorení HDR obsahu sa preto zobrazí obrazovka, na ktorej je zoznam implementovaných operátorov mapovania tónov s ich náhľadom. Jednotlivé operátory mapovania tónov sú implementované pomocou knižnice OpenCV, ktorá poskytuje globálne operátory `Reinhard`, `Drago` a lokálne operátory `Durand` a `Mantiuk`.

### 4.4.1 Operátory mapovania tónov

Ak si užívateľ vyberie jeden zo zoznamu ponúkaných operátorov mapovania tónov, zobrazí sa obrazovka pre editovanie parametrov operátora. Obrazovka obsahuje posuvníky (`SeekBar`) parametrov, ktoré operátor umožňuje nastavovať na vstupe. Parametre majú definovaný svoj platný rozsah a východzie hodnoty pre optimálny výsledok, ktoré sú vymenované v `enum TmoParams`. Keďže parametre na vstupe metódy môžu mať rozličný rozsah v obore reálnych čísel, ale posuvník môže nadobudnúť iba hodnoty v rozsahu 0 - 100, musia sa tieto absolútne hodnoty prevádzať na relatívne hodnoty v rozsahu posuvníka. `enum TmoParams` obsahuje východzie hodnoty parametrov operátorov v absolútnom a relatívnom tvare a metódu na prevod relatívnej hodnoty zadanej užívateľom na posuvníku na absolútnu hodnotu pre vstup metódy. Viac o týchto parametroch je popísané v tabuľke 4.1.

Každý posuvník na obrazovke má vlastný callback `OnSeekBarChangeListener`, ktorý pri manipulovaní s posuvníkom vracia v metóde `onProgressChanged` objekt `SeekBar` s aktuálnymi nastaveniami posuvníka. Z tohoto objektu sme schopní vybrať hodnotu posuvníka v rozsahu 0 - 100, túto hodnotu previesť na absolútnu hodnotu pre metódu operátora mapovania tónov a nakoniec zobrazíť výsledný obrázok.

---

<sup>3</sup>[www.gnu.org/software/octave/](http://www.gnu.org/software/octave/)

<sup>4</sup>Singular-value decomposition

Parameter	Popis	Operátor	Rozsah	Východzia hodnota
gamma	hodnota gama korekcie	všetky operátory	1.0 - 3.0	2.2
saturation	hodnota sýtosti farieb	Drago, Durand, Mantiuk	0.0 - 4.0	1.0
scale	faktor kontrastu, ktorým sa násobí hodnota vizuálnej odozvy, čím sa komprimuje dynamický rozsah	Mantiuk	0.6 - 0.9	0.7
intensity	intenzita svetla vo výslednom obraze	Reinhard	-8.0 - 8.0	0.0
light adapt	prispôsobenie svetla (1 = adaptácia je počítaná iba z hodnoty pixelu)	Reinhard	0.0 - 1.0	0.0
color adapt	prispôsobenie farieb (1 = farebné kanály sú spracované nezávisle)	Reinhard	0.0 - 1.0	0.0
contrast	výsledný kontrast v logaritmickej mierke ( $\ln \frac{max}{min}$ hodnoty jasú výsledného obrazu)	Durand	0.0 - 8.0	4.0
sigma space	hodnota bilaterálneho filtra v súradnicovom priestore	Durand	0.0 - 4.0	2.0
sigma color	hodnota bilaterálneho filtra vo farebnom priestore	Durand	0.0 - 4.0	2.0
bias	hodnota pre funkciu bias	Drago	0.0 - 1.0	0.85

Tabuľka 4.1: Hodnoty a rozsahy parametrov operátorov mapovania tónov [8]

Okrem posuvníkov obsahuje obrazovka náhľadový obrázok a tlačidlá pre uloženie HDR obsahu a výslednej LDR fotografie, tlačidlo pre resetovanie nastavení posuvníkov na východzie hodnoty a tlačidlo pre otočenie náhľadového obrázku.

#### 4.4.2 Zmenšenie náhľadového obrázku

Operátory mapovania tónov sa pre náhľadové obrázky aplikujú na zmenšený HDR obsah. To zaručí menšiu časovú náročnosť zobrazenia obrazovky s operátormi mapovania tónov. Zmenšenie náhľadového obrázku je implementovaná pomocou metódy `resize` triedy `Imgproc` knižnice OpenCV, využitím bilineárnej interpolácie. Na obrazovke vybraného operátora mapovania tónov, kde je možné modifikovať vstupné parametre algoritmu, môže byť vďaka zmenšeniu zobrazovaný náhľad v reálnom čase bez väčších oneskorení.

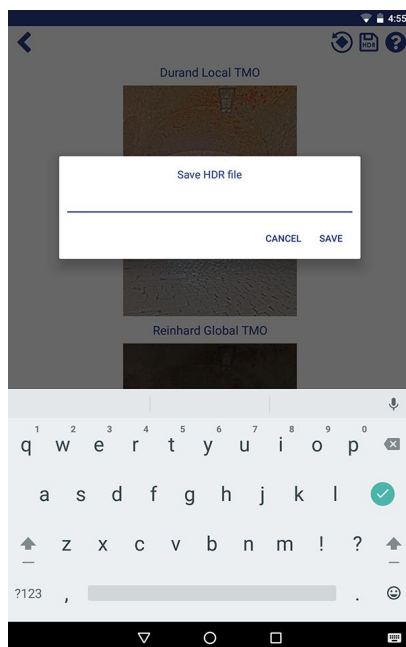
## 4.5 Ukladanie

V závere celého procesu vytvárania HDR fotografie musí byť užívateľ schopný uložiť si výsledok. Aplikácia ponúka uloženie nielen výslednej fotografie v štandardnom obrazovom formáte JPEG, ale aj uloženie HDR obsahu pre neskoršiu editáciu. V tomto prípade je HDR obsah komprimovaný kódovaním RGBE, ktorý je popísaný v podkapitole 2.5 Formáty HDR obsahu. Uloženie HDR formátu je veľkou výhodou, ktorú neponúka žiadna z aplikácií prieskumu. Užívateľ sa totiž nemusí práve nachádzať v situácii, kedy si nájde čas na vhodné prispôbenie výsledných parametrov LDR obrazu.

Kódovanie HDR obsahu je implementované prostredníctvom modulu `imgcodecs` knižnice OpenCV, konkrétne funkciou `imwrite`. Následné načítanie `.hdr` súboru sa vykonáva pomocou funkcie `imread`. Užívateľ môže k uloženým HDR súborom pristupovať kedykoľvek z domovskej obrazovky aplikácie kliknutím na tlačidlo "Load". Po zvolení tejto možnosti sa zobrazí obrazovka, ktorá obsahuje výpis (`ListView`) uložených `.hdr` súborov v zariadení užívateľa. Výberom jedného z ponúkaných súborov sa súbor načíta a zobrazí sa obrazovka pre editáciu HDR obsahu.

Pri vstupno-výstupných operáciách nad úložiskom zariadenia je potrebné získať cestu typu `java.io.File`. Na to slúži trieda `Storages`, ktorá obsahuje statické metódy pre získanie cesty, vrátane vytvorenia potrebných priečinkov a kontroly, či daná operácia neprepíše existujúci súbor.

Pri ukladaní HDR obsahu alebo LDR výslednej fotografie je užívateľ pomocou dialógového okna vyzvaný, aby do textového poľa vložil názov svojho nového súboru (obr. 4.11). Z hľadiska funkcionality, sa vytvorí nová inštancia triedy `SaveDialog`, ktorá je rozšírená o funkcionality triedy `DialogFragment`. V metóde `onCreateDialog` sa pomocou `AlertDialog.Builder` vytvoria komponenty rozhrania dialógového okna. Príponu ukladaného súboru nevolí užívateľ, ale je zvolená aplikáciou podľa formátu, v akom bude súbor uložený.



Obr. 4.11: Dialógové okno pre uloženie súboru vo formáte `.hdr`

## Úložiská Android zariadenia

System Android ponúka niekoľko možností pre uloženie dát aplikácie. Výber závisí od potrieb aplikácie, napríklad od objemu dát alebo od prístupnosti dát iným aplikáciám. Dostupné možnosti uloženia dát v zariadení sú [7]:

- Interné úložisko zariadenia - privátne súbory aplikácie v zariadení.
- Externé úložisko zariadenia - zdieľaný súborový systém zariadenia.
- Lokálne úložisko - ukladanie neobjemných dát typu kľúč, hodnota.
- Databázy - uloženie štruktúrovaných údajov do súkromnej SQLite databázy.

Pre ukladanie dát aplikácie je využité externé úložisko. Toto úložisko je vhodným miestom pre súbory, ktoré nevyžadujú omedzenia prístupu a pre súbory, ktoré majú byť zdieľané s inými aplikáciami alebo viditeľné pri prenose súborov do počítača. Výsledné HDR fotografie by mali byť prístupné aj pre iné aplikácie v zariadení a súbory formátu `.hdr` môžu vyžadovať viac pamäte, preto je ich vhodné ukladať do externého úložiska. Externé úložisko nemusí byť stále k dispozícii, keďže môže byť obsiahnuté na úložnom médiu ako napríklad SD karte. Aplikácii, pracujúcej s externým úložiskom, musia byť užívateľom udelené povolenia `WRITE_EXTERNAL_STORAGE` a `READ_EXTERNAL_STORAGE`.

V prípade, ak by aplikácia ukladala krivku odozvy fotoaparátu, ktorá je špecifická pre snímač zariadenia, dáta by sa uložili na interné úložisko. Interné úložisko zariadenia je k dispozícii nepretržite. Súbor je prístupný iba danej aplikácii a po odinštalovaní aplikácie systém odstráni všetky súbory aplikácie z interného úložiska.

## Kapitola 5

# Merania a výsledky

Na testovanie mobilnej aplikácie bolo zachytených 6 scén. Každú scénu tvorí 11 snímok od najtmavšej po najsvetlejšiu expozíciu. Scéna *brana* (obr. 5.1) je najlepším reprezentantom scény s vysokým dynamickým rozsahom a je použitá pri väčšine testovaní a porovnávaní. Scéna *brana* a scény *lavicka*, *park*, *petrov*, *schody*, *vyhliadka* sú vo formáte `.hdr` súčasťou odovzdávanej práce. Každá scéna je význačná rôznymi, pre prácu prínosnými vlastnosťami.

Pre vytváranie aplikácie, snímanie fotografií scén a záverečné testovanie je použitý tablet SHIELD NVIDIA s operačným systémom Android 7.0 Nougat. Fotoaparát tabletu má rozlíšenie 5 Mpx a vytvorené snímky rozmer  $1944 \times 2592$  px. Z pohľadu užívateľa sú bežné fotografie vytvárané týmto zariadením uspokojivé, ale nie dokonalé. Digitálny snímač nedokáže obsiahnuť taký rozsah farieb a jasu ako štandardný optický fotoaparát. Rozsah expozičného času snímača tabletu je od 33 600 ns do 356 732 928 ns.

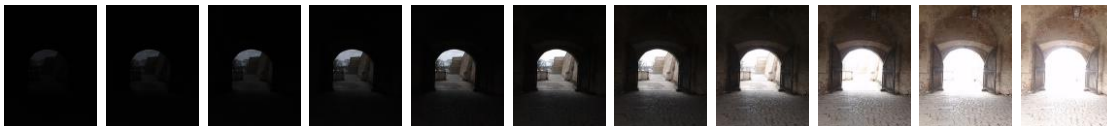
### 5.1 Výsledky operátorov mapovania tónov

Testované scény boli hodnotené a porovnávané pri použití rôznych nastavení pre štyri operátory mapovania tónov. Globálne operátory *Reinhard* a *Drago* neumožňujú na scéne s vysokým dynamickým rozsahom získať uspokojivý výsledok, kde by boli jasne viditeľné zároveň tmavé a svetlé oblasti. Na prvých dvoch obrázkoch 5.2 máme dobre viditeľnú svetlú časť scény, no keď chceme pridať jas aj na tmavej časti, svetlá časť sa preexponuje (tretí obrázok).

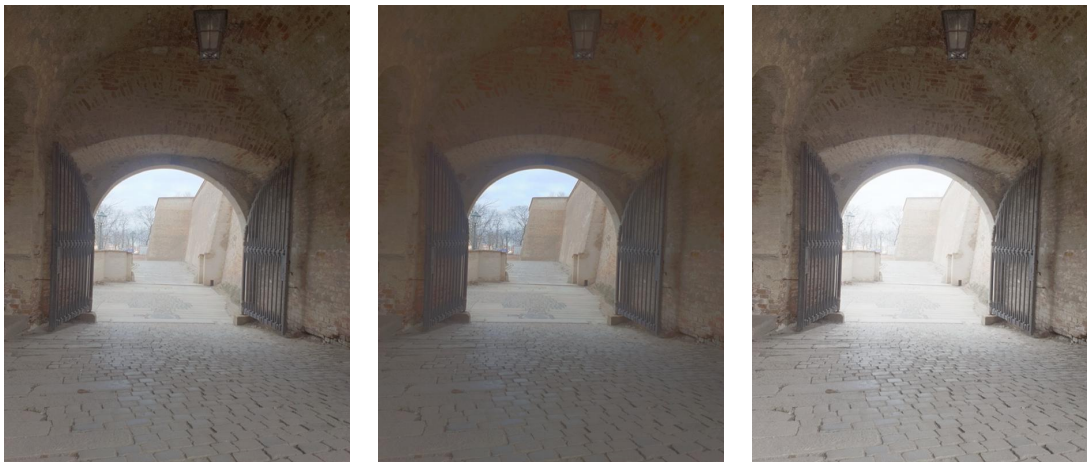
Operátor *Drago* dokáže scénu s vysokým dynamickým rozsahom spracovať o niečo lepšie. Jedinou užívateľom definovateľnou hodnotou je hodnota skreslenia (*bias*). Menšie hodnoty vytvárajú výrazne svetlejšie snímky. Pri hodnotách, ktoré sa blížia minimu rozsahu nastáva na svetlých častiach nežiadúci stav - inverzia tónov, zobrazená na treťom obrázku 5.3.

Lokálny operátor *Mantiuk* neponúka množstvo možností definovania vstupných parametrov. Aj preto možno užívateľ nedokáže nájsť vhodné hodnoty nastavení, ktoré pre svoju scénu s vysokým dynamickým rozsahom potrebuje (obr. 5.4).

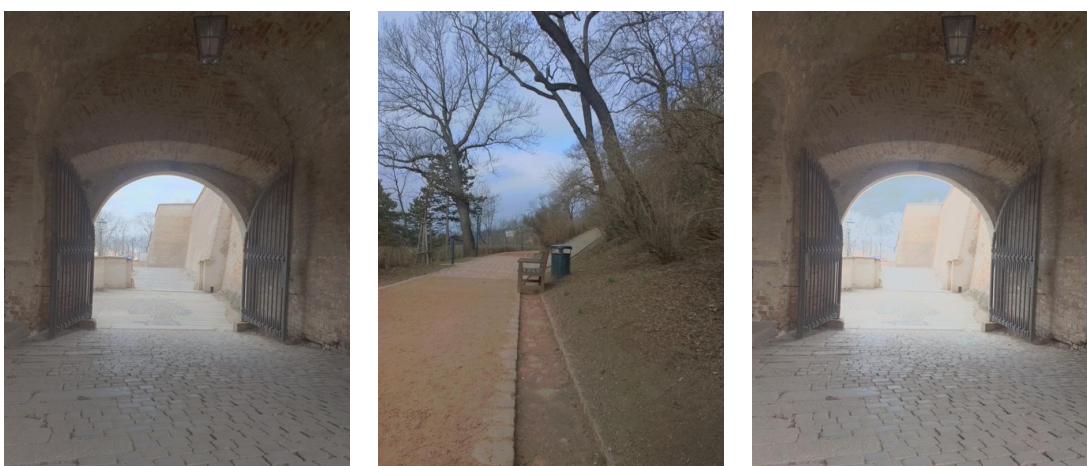
Najlepšie výsledky ponúka užívateľovi lokálny operátor *Durand*. Zo všetkých operátorov ponúka užívateľovi najviac možností editovania vstupných parametrov. Pomocou nastavenia kontrastu môže užívateľ dobre definovať pomer výsledných hodnôt jasu a tak vytvárať obrazy verne zobrazujúce scénu alebo obrazy s umeleckým efektom (obr. 5.6). Nastavovaním hodnôt bilaterálneho filtra `sigma color` a `sigma space` užívateľ zdôrazňuje detaily scény.



Obr. 5.1: Sériá 11 snímok scény *brana* zachytených s rôznym expozičným časom



Obr. 5.2: Výsledky mapovania tónov Reinhardovým operátorom



Obr. 5.3: Výsledky mapovania tónov operátorom Drago

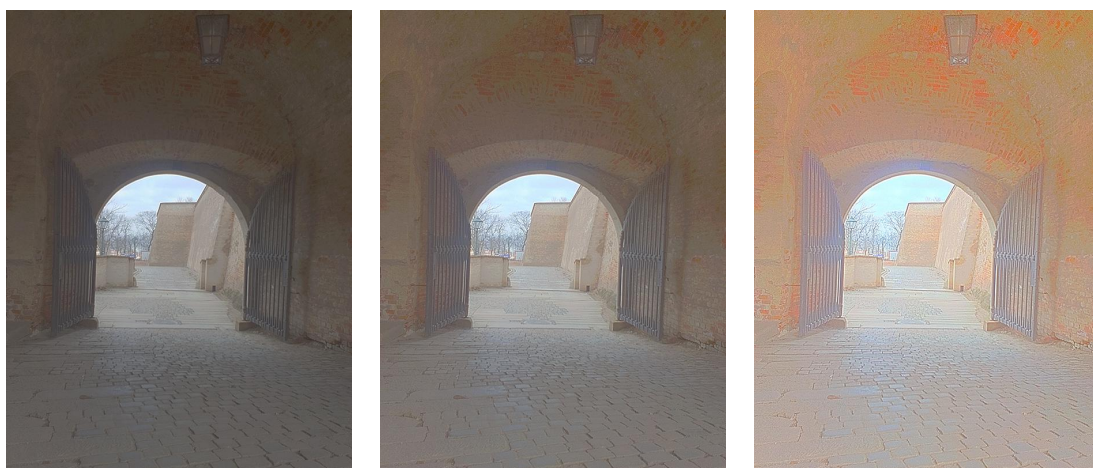
Pri vysokých hodnotách *sigma color* a zároveň *sigma space* nastáva na hrane svetlej a tmavej oblasti halo efekt. Operátor zahrnie pri výpočte blízko takejto hrany aj druhú stranu prechodu a zvýši kontrast naprieč hranou. Halo efekt je v profesionálnej fotografii považovaný za chybu pri zobrazovaní reálnej scény. Veľa amatérskych fotografov však považuje toto skreslenie ako súčasť umeleckého efektu fotografie.

## 5.2 Porovnanie s existujúcimi aplikáciami

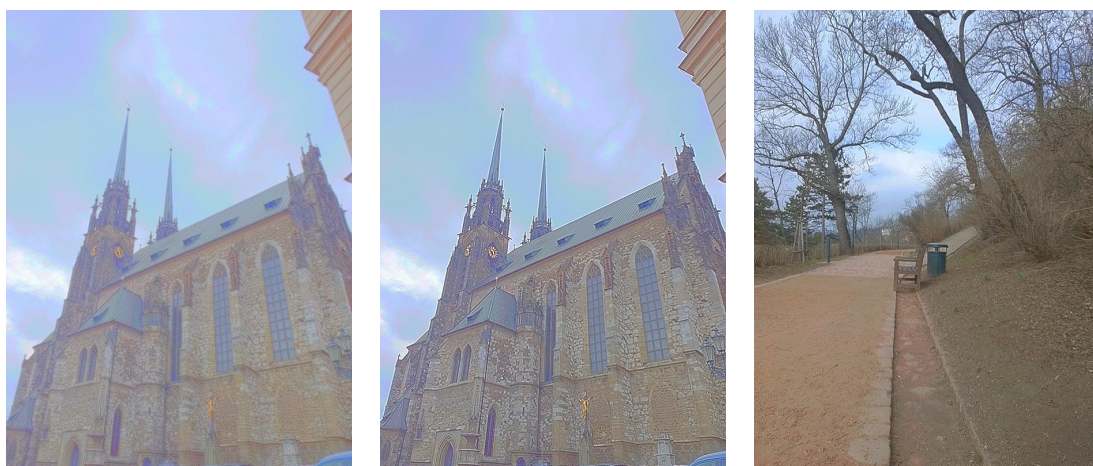
Ako už bolo spomínané v prieskume existujúcich riešení, veľa aplikácií používa na vytvorenie HDR efektu iba filter aplikovaný na jednu fotografiu, ktorý zvýši kontrast a detaily



Obr. 5.4: Výsledky mapovania tónov operátorom Mantiuk



Obr. 5.5: Výsledky mapovania tónov operátorom Durand



(a) Vyhladenie

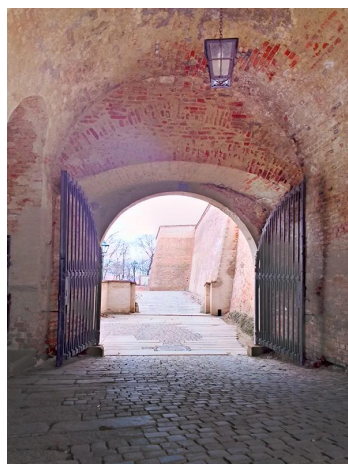
(b) Zvýraznenie detailov

(c) Verné zobrazenie scény

Obr. 5.6: Obrazy verne zobrazujúce scénu ale aj umelecké efekty



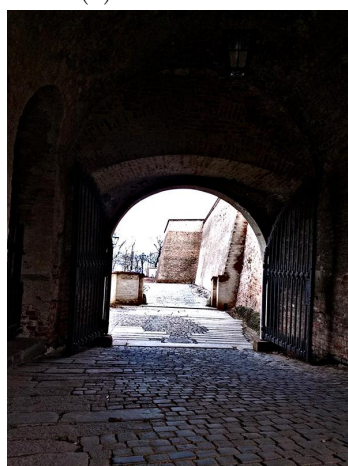
Obr. 5.7: Halo efekt spôsobený ostrým prechodom medzi zreteľne svetlou a tmavou oblasťou



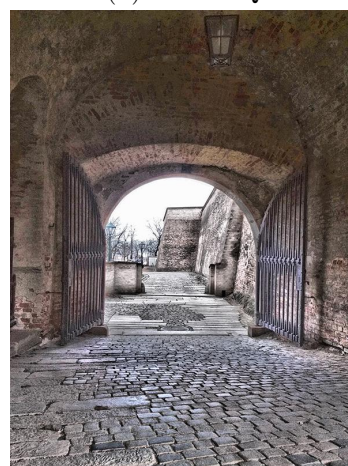
(a) HDR Camera



(b) HDR HQ



(c) HDR Max



(d) Ultimate HDR Camera

Obr. 5.8: Scéna brány zachytená voľne dostupnými HDR aplikáciami

fotografie. Bez preskúmania zdrojového kódu aplikácií je ťažké rozoznať či ide o 'pravé' HDR snímky alebo iba takúto napodobeninu. Z prieskumu aplikácií boli vybrané najzaujímavejšie riešenia, ktorými bola zachytená scéna *brana*.

Začneme najzaujímavejším výsledkom, ktorý vytvorila aplikácia Ultimate HDR Camera (obr. 5.8d). Na tomto obrázku môžeme vidieť jasného zástupcu fotografií, ktoré si užívateľ predstavuje pod pojmom "HDR fotografia". Okrem umeleckého zážitku, ktorý výsledná foto-

grafia ponúka zvýraznením detailov a farieb, môžeme vidieť, že fotografia kvalitne zobrazuje svetlé aj tmavé oblasti scény. To znamená, že vytvára viacero snímok s dostatočným rozsahom expozičného času. Z výsledku je rozpoznateľné, že sa jedná o lokálny operátor, ktorý okrem mapovania tónov pracuje aj s farbami a kontrastom fotografie. Podobný výsledok by sa nám pravdepodobne nepodarilo dosiahnuť v našej aplikácii, avšak treba poznamenať, že ani jedna z fotografií (obr. 5.8) nemá dostatočný dynamický rozsah na to, aby nepreexponovala oblohu v pozadí. Vo výsledkoch našej aplikácie sú vo všetkých operátoroch zachované farby oblohy.

Aplikácia HDR Camera (obr. 5.8a) ponúka taktiež uspokojivý výsledok, z ktorého možno usúdiť, že zahŕňa dostatočný dynamický rozsah scény a je použitý lokálny operátor. Pri bližšom pohľade však vidíme, že na obrázku sa nachádzajú škvrny - miesta, na ktorých sa stráca farebnosť. Príčina tohoto javu však nie je objasnená. Podobný výsledok sme schopný v našej aplikácii dosiahnuť Durandovým operátorom.

Aplikácie HDR HQ (obr. 5.8b) a HDR Max (obr. 5.8c) sú príkladom riešení, ktoré nezachytávajú väčší dynamický rozsah scény, ale snažia sa vytvoriť HDR efekt pomocou filtra.

### 5.3 Časová a priestorová zložitosť aplikácie

V rámci analýzy časovej a priestorovej zložitosti sa porovnávala rýchlosť a pamäťová náročnosť jednotlivých krokov procesu vytvárania HDR fotografie z rôzneho počtu snímok. Merali sa časy a alokovaná pamäť nielen celkov, ale aj ich podproblémov.

V tabuľke 5.1 vidíme, že algoritmus spomenutý v podkapitole 4.2.1, ktorý inicializuje zoznam expozičných časov, nezatažuje plynulý chod aplikácie. Výsledná doba vytvárania snímok samozrejme závisí od počtu snímaných fotografií a ich časov expozícií.

Počet snímok	3	5	7	9	11
Inicializácia snímača	$\simeq 400$ ms				
Inicializácia expozičných časov	<1 ms	<1 ms	<1 ms	1 ms	1 ms
Inicializácia požiadavku na snímanie	170 ms	180 ms	185 ms	190 ms	190 ms
Celková doba vytvárania snímok	760 ms 61 MB	1 050 ms 100 MB	1 320 ms 138 MB	1 585 ms 177 MB	1 825 ms 215 MB

Tabuľka 5.1: Časová a priestorová náročnosť vytvárania série snímok

Pri generovaní HDR obsahu sme sa zamerali na výber vzoriek pixelov, získavanie krivky odozvy a vytváranie funkcie žiarenia. Vo vlastnej implementácii algoritmu na generovanie HDR obsahu (tab. 5.2) najviac času spotrebovalo vytvorenie výslednej matice (okolo 15 sekúnd), ktorá by bola použiteľná pre ďalšie kroky vykonávané knižnicou OpenCV.

V tabuľke 5.3 môžeme vidieť, že knižnica OpenCV má dostatočne optimalizovaný algoritmus so skoro polovičnou spotrebou pamäte. Výhodou knižnice OpenCV je aj jej implementácia v jazyku C++, čo zaručuje výrazne rýchlejšiu prácu.

Tabuľka 5.4 ukazuje, že aplikovanie operátora mapovania tónov na zmenšený obrázok nám ušetrilo dostatok času na to, aby užívateľ videl výsledok v reálnom čase pri zmene vstupných parametrov. Originálny rozmer obrázku sa použije, až keď užívateľ zvolí možnosť

uloženia výslednej HDR fotografie vo formáte JPEG. V takomto prípade, sa ale čas ukladania (tabuľka 5.5) zvýši o čas aplikovania operátora mapovania tónov na originálny HDR obsah.

Počet snímok	3	5	7	9	11
Výber vzoriek pixelov	<1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	x
Získanie CRF	14 556 ms	9 314 ms	7 687 ms	6 941 ms	x
Vytvorenie funkcie žiarenia	26 039 ms	28 973 ms	29 931 ms	31 173 ms	x
Celková doba generovania HDR obsahu	40 495 ms 235 MB	38 285 ms 312 MB	37 619 ms 389 MB	38 115 ms 466 MB	x >550 MB

Tabuľka 5.2: Časová a priestorová náročnosť generovania HDR obsahu

Počet snímok	3	5	7	9	11
Získanie CRF	4 540 ms	5 283 ms	6 432 ms	7 264 ms	8 320 ms
Vytvorenie funkcie žiarenia	1 717 ms	2 786 ms	3 570 ms	4 330 ms	5 904 ms
Celková doba generovania HDR obsahu	6 512 ms 141 MB	8 349 ms 218 MB	10 392 ms 295 MB	12 292 ms 372 MB	15 094 ms 450 MB

Tabuľka 5.3: Časová a priestorová náročnosť generovania HDR obsahu knižnicou OpenCV

Operátor mapovania tónov	Mantiuk	Reinhard	Durand	Drago
Spracovanie obrázku s orig. rozmermi	1 299 ms	1 524 ms	1 423 ms	1 234 ms
Zmenšenie obrázku	<15 ms			
Spracovanie zmenšeného obrázku	73 ms	64 ms	72 ms	56 ms

Tabuľka 5.4: Časová náročnosť operátorov mapovania tónov

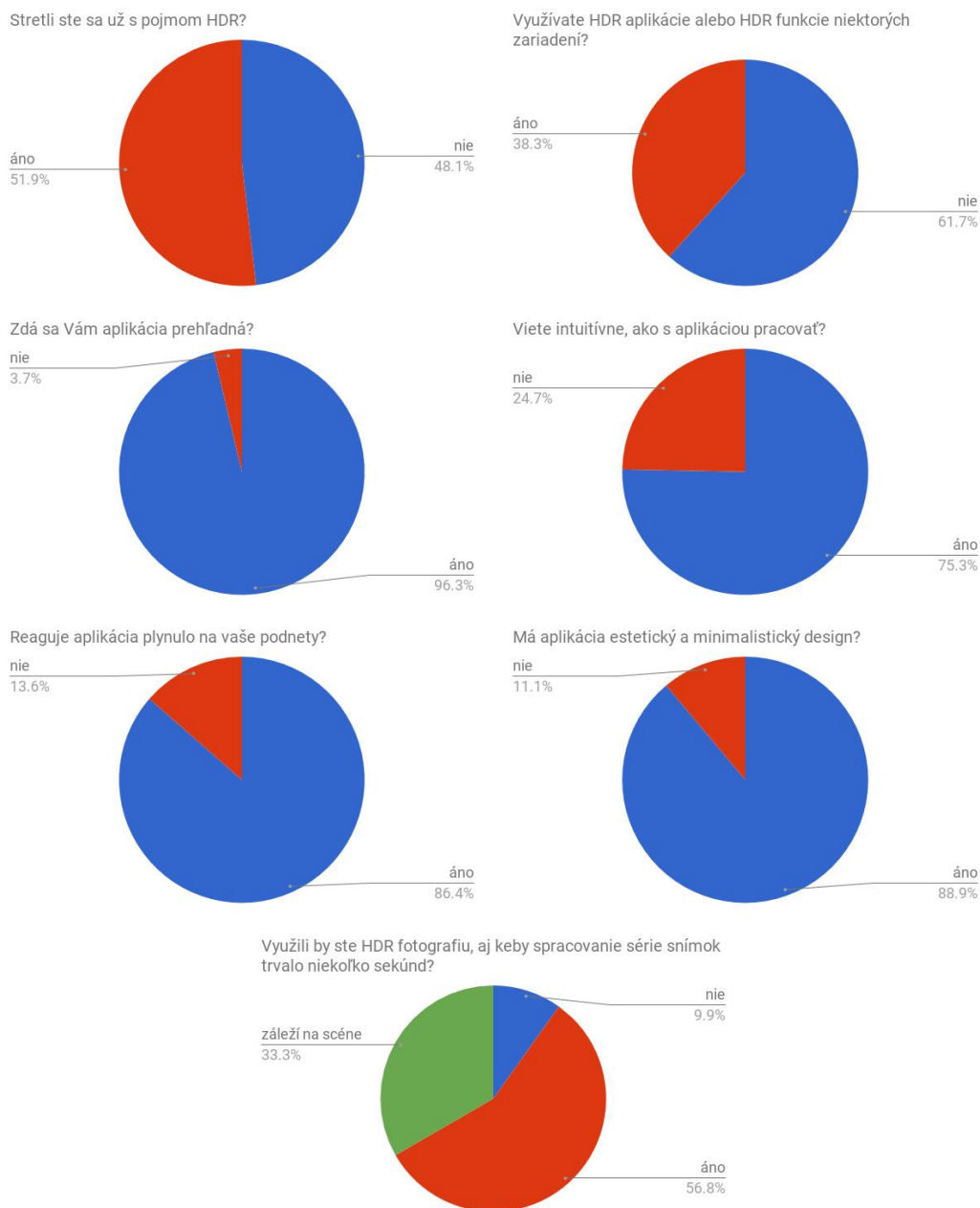
Operácia	časová náročnosť
Načítanie HDR obsahu	$\simeq$ 400 ms
Uloženie HDR obsahu	$\simeq$ 1 200 ms
Uloženie LDR snímky	$\simeq$ 520 ms

Tabuľka 5.5: Časová náročnosť vstupno-výstupných operácií

## 5.4 Spätná väzba užívateľov

Testovania intuitívnosti a estetickosti užívateľského rozhrania sa účastnilo 81 osôb rôznej vekovej kategórie. Užívateľom bolo poskytnuté zariadenie s aplikáciou a následne boli požiadaní o vyplnenie krátkeho dotazníka. Odpovede na povinné otázky s možnosťami výberu z *áno* alebo *nie* sú uvedené v grafoch 5.9.

Minimalistickosť aplikácie zaručuje jej prehľadnosť a ľahkú ovládateľnosť. V čase testovania užívateľov však aplikácia mala strohý, čierno-biely dizajn a to veľa užívateľov znepokojovalo. Radi by privítali záživnejšie a farebnejšie rozhranie. Avšak vzhľadom na ostatné



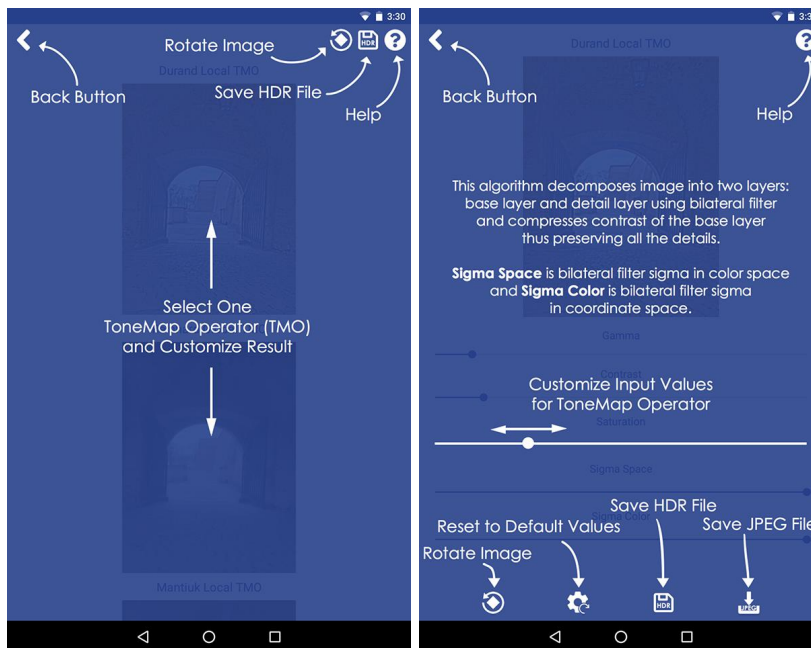
Obr. 5.9: Odpovede testovaných užívateľov

aplikácie s podobným zameraním, najmä aplikácie z prieskumu existujúcich riešení, obdržal strohý, minimalistický dizajn aplikácie pozitívne hodnotenia. Citujem odpoveď jedného respondenta:

*Aj napriek tomu, že aplikácia nesleduje najnovšie trendy mobilného dizajnu alebo pravidlá material designu, myslím, že je spracovaná lepšie ako veľký počet aplikácií v obchode Google Play.*

Pripomienka o záživnejšie rozhranie bola zapracovaná a dnes má aplikácia príjemný modrobieľy dizajn, ktorý pridáva na užívateľskom zážitku.

Najviac pripomienok mali užívatelia k tlačidlám v dolnom menu vybraného operátora. Aj napriek snahe vytvoriť ikony, najlepšie zobrazujúce svoju funkciu, je potrebné mať v aplikácii pomocnú obrazovku vysvetľujúcu význam jednotlivých prvkov užívateľského rozhrania. Spracovanie tohoto požiadavku je inšpirované trendami pomocných obrazoviek mobilných aplikácií (obrázky 5.10). Pomocné obrazovky jednotlivých operátorov mapovania tónov dokonca obsahujú krátky popis toho, ako daný algoritmus mapovania tónov funguje a čo znamenajú jednotlivé dôležité parametre.



Obr. 5.10: Vysvetlenie funkcionality jednotlivých prvkov aplikácie pomocnými obrazovkami

Ďalšie ohlasy boli venované tlačidlu pre zmenu orientácie obrázkov. Respondenti mali otázku, či nemôže aplikácia detekovať orientáciu obrázku a podľa toho nastaviť východzie otočenie. Obrázky obsahujú metadáta a taktiež aj záznam o orientácii obrázku. Avšak v tomto prípade sa obrázok spája z viaceru obrázkov a väčšina metadát sa stráca. Jednou z možností je zapisovať metadáta ručne do súboru. Druhá možnosť je poukázať na popredné komerčné, ale aj natívne aplikácie zariadení pre zobrazovanie obrazových súborov, ktoré obrázky orientované na výšku tiež vo východnom nastavení neotáčajú. Neprívetivosť otáčania obrázkov je nakoniec minimalizovaná pomocou globálneho stavu otočenia náhľadového obrázku, ktorý platí pre všetky obrazovky. Týmto sa vyhneme znovuotáčaniu náhľadového obrázku pri prechode medzi jednotlivými operátormi a ich prehľadom. Tento stav sa resetuje pri načítaní/vytvorení nového HDR snímku.

## Kapitola 6

# Záver

Hlavnou myšlienkou tejto práce je vytvoriť aplikáciu, ktorá by riešila nielen problémy generovania a spracovania HDR obsahu, ale zamerala sa aj na interakciu s užívateľom a poskytla mu viac možností v prehľadnom a minimalistickom rozhraní.

Výsledná analýza preukázala, že aj napriek množstvu mobilných aplikácií s rozmanitou funkcionalitou existuje priestor pre aplikácie, ktoré by ponúkali lepšie riešenie alebo užívateľsky prívetivejšie prostredie. Účelom je užívateľovi ponúknuť rozhranie s funkciami, ktoré potrebuje a dokáže sa v aplikácii ľahko a intuitívne pohybovať.

Aplikácia rieši tvorbu HDR fotografie vytvorením série snímok s rôznym nastavením expozičného času, ktoré sa následne zarovnajú metódou Median Threshold Bitmap od Grega Warda. Pre generovanie HDR obsahu je potrebná krivka odozvy fotoaparátu, ktorú získame algoritmom Paula Debeveca a Jitendru Malika. Využitím tejto krivky odozvy a váhovej funkcie sa vygeneruje HDR obsah, ktorý je sám o sebe nezobraziteľný. Obsah je možné zobrazíť pomocou operátorov mapovania tónov. Aplikácia implementuje celkovo štyri operátory: globálne operátory Reinharda a Draga a lokálne operátory od Duranda a Mantiuka. Výberom jedného z týchto operátorov aplikácia ponúka prispôbenie výsledného obrázku definovaním vstupných parametrov algoritmu. Zmeny sú aplikované na HDR obsah zmenšený bilineárnou interpoláciou, čo umožňuje náhľad výsledku v reálnom čase.

Keďže sa užívateľ nemusí vždy nachádzať práve v situácii, kedy môže editovať svoj HDR obrázok do výslednej podoby, aplikácia umožňuje uloženie HDR obsahu a jeho neskoršie načítanie. Túto možnosť nepodporuje žiadna aplikácia z prieskumu existujúcich riešení.

Táto práca položila základ pre vývoj prepracovanejších metód, ktoré možno v budúcnosti vytvoria komplexnú mobilnú aplikáciu s využiteľnosťou pre širokú škálu užívateľov. Jednou z možností ďalšej práce je obohatenie aplikácie o pokročilejšie grafické funkcie pre editáciu výsledného obrazu a vytvorenie kópie aplikácie pre ďalšie platformy.

# Literatúra

- [1] Banterle, F.; Artusi, A.; Debattista, K.; aj.: *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd., prvné vydání, 2011, ISBN 9781568817194.
- [2] Debevec, P.; Malik, J.: *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*. 1997.  
URL <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>
- [3] Drago, F.; Myszkowski, K.; Annen, T.; aj.: *Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes*.  
URL <http://resources.mpi-inf.mpg.de/tmo/logmap/logmap.pdf>
- [4] Durand, F.; Dorsey, J.: *Fast Bilateral Filtering for the Display of High-dynamic-range Images*. Červenec 2002, ISSN 0730-0301.  
URL <http://people.csail.mit.edu/fredo/PUBLI/Siggraph2002/DurandBilateral.pdf>
- [5] Fattal, R.; Lischinski, D.; Werman, M.: *Gradient Domain High Dynamic Range Compression*. Červenec 2002, ISSN 0730-0301.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566573>
- [6] Freeman, M.: *Fotografie a vysoký dynamický rozsah - základy HDR*. Zoner Press, 2008, ISBN 978-80-86815-95-4.
- [7] Google and Open Handset Alliance n.d.: *Android API Guide*. Accessed May 19, 2015.  
URL <http://developer.android.com/guide/index.html>
- [8] Itseez: *The OpenCV Reference Manual*. April 2014.  
URL <http://opencv.org>
- [9] Kuang, J.; Johnson, G. M.; Fairchild, M. D.: *iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering*. 2007.  
URL [http://www.rit-mcsl.org/StudentResearch/CIC15\\_iCAM06.pdf](http://www.rit-mcsl.org/StudentResearch/CIC15_iCAM06.pdf)
- [10] Ledda, P.; Santos, L. P.; Chalmers, A.: *A Local Model of Eye Adaptation for High Dynamic Range Images*. 2004.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/1029949.1029978>
- [11] Mantiuk, R.; Myszkowski, K.; Seidel, H.-P.: *A Perceptual Framework for Contrast Processing of High Dynamic Range Images*. Červenec 2006, ISSN 1544-3558.  
URL <http://people.mpi-inf.mpg.de/~mantiuk/papers/mantiuk05PercFwk.pdf>

- [12] Mantiuk, R., K.; Myszkowski, K.; Seidel, H.-P.: High Dynamic Range Imaging. 2016.  
URL <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/mantiuk15hdri.pdf>
- [13] Reinhard, E.; Stark, M.; Shirley, P.; aj.: Photographic Tone Reproduction for Digital Images. Červenec 2002, ISSN 0730-0301.  
URL [http://www.cmap.polytechnique.fr/~peyre/cours/x2005signal/hdr\\_photographic.pdf](http://www.cmap.polytechnique.fr/~peyre/cours/x2005signal/hdr_photographic.pdf)
- [14] Reinhard, E.; Ward, G.; Pattanaik, S.; aj.: *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., druhé vydání, 2010, ISBN 9780123749147.
- [15] Ward, G.: Fast, Robust Image Registration for Compositing High Dynamic Range Photographs from Handheld Exposures. 2003.  
URL <http://www.anywhere.com/gward/papers/jgtpap2.pdf>
- [16] Wüller, D.; Gabele, H.: The usage of digital cameras as luminance meters. 2007.  
URL [https://www.image-engineering.de/content/library/conference\\_papers/before\\_2009/luminance\\_meters.pdf](https://www.image-engineering.de/content/library/conference_papers/before_2009/luminance_meters.pdf)

# Príloha A

## Obsah CD

Súčasťou práce je aj priložené CD, ktoré obsahuje nasledujúce dáta:

CD	
	src ..... zdrojové súbory aplikácie
	README.md ..... návod na spustenie a popis zdrojových súborov
	scenes ..... série snímok testovacích scén
	hdr ..... .hdr súbory testovacích scén
	text ..... zdrojové súbory textovej časti práce
	build.apk ..... spustiteľná aplikácia