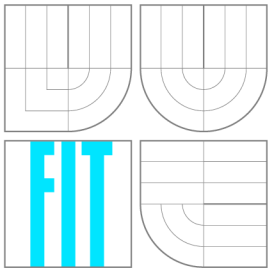


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

SKLÁDÁNÍ FOTOGRAFIÍ STEJNÉ SCÉNY S RŮZNOU EXPOZICÍ, HDR

MERGING OF DIFFERENT EXPOSURED PHOTOGRAPHS, HDR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VLADIMÍR ŠMIDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL SEEMAN

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2007/2008

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Šmida Vladimír**

Obor: Informační technologie

Téma: **Skládání fotografií stejné scény s různou expozicí, HDR**

Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Prostudujte dostupnou literaturu.
2. Navrhněte postup pro správné napojení histogramů i z více, než dvou fotografií.
3. Implementujte aplikaci pro automatickou detekci rozdílů expozic a pohodlné generování výsledných obrazů.
4. Porovnejte výsledky s technikou běžně používanou v amatérské fotografii.

Literatura:

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

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1, 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).

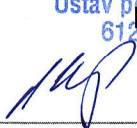
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo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

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

Datum zadání: 1. listopadu 2007

Datum odevzdání: 14. května 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
612 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Pavel Zemčík
vedoucí ústavu

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2 Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti:
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

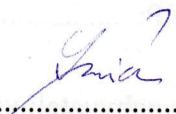
Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel


.....

Autor

**LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami

1. Pan

Jméno a příjmení: **Vladimír Šmida**
Id studenta: 78726
Bytem: Duklianska 10, 052 01 Spišská Nová Ves
Narozen: 27. 03. 1986, Spišská Nová Ves
(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta informačních technologií
se sídlem Božetěchova 2/1, 612 66 Brno, IČO 00216305
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....
(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
bakalářská práce

Název VŠKP: Skládání fotografií stejné scény s různou expozicí, HDR
Vedoucí/školitel VŠKP: Seeman Michal, Ing.
Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

tištěné formě	počet exemplářů: 1
elektronické formě	počet exemplářů: 2 (1 ve skladu dokumentů, 1 na CD)

Abstrakt

High Dynamic Range Imaging (HDRI) predstavuje expandujúcu sféru spracovania obrazu s netriviálnymi závislosťami k rôznym oborom ako syntéza obrazu, počítačové videnie, digitálna fotografia. Táto bakalárska práca sa zaoberá práve využitím HDRI v digitálnej fotografii. Konvenčné fotoaparáty dnes niesú schopné zaznamenať plný tonálny rozsah scény. Preto ak chceme zachytiť scénu s vysokým dynamickým rozsahom, musíme zvoliť nastavením expozície iba časť tónov, ktoré budú korektne zachytené. Ostatná časť fotografie ostáva bez kresby. Metódou predstavenou a implementovanou v rámci tejto práce je možné na základe viacerých rôzne exponovaných fotografií vytvoriť HDR obraz odrážajúci reálne hodnoty tónov.

Kľúčové slová

fotografia, HDR, expozícia, EV, adaptácia, dynamický rozsah, charakteristická funkcia odrazu, skladanie, tonálne rozlíšenie

Abstract

High Dynamic Range Imaging (HDRI) is an emerging field in image postprocessing with non-trivial relations to many different areas, such as image synthesis, computer vision, video and image processing, digital photography, special effects among others. This bachelor's thesis deals with the usage of HDRI in digital photography. Conventional digital cameras are not able to record the full tonal range of the scene. Therefore, if we want to capture a high dynamic range scene, by setting the exposure time we have to choose only a small range of tones which will be well depicted. The rest of the photograph will lose important detail. The method presented and implemented in the scope of this thesis enables us to create HDR picture with realistic values of tones out of several differently exposed photographs.

Keywords

photograph, HDR, exposition, EV, adaptation, dynamic range, merging, characteristic response function, tonal resolution

Citácia

Vladimír Šmida: Skládání fotografií stejné scény s různou expozicí, HDR, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2008

Skládání fotografií stejné scény s různou expozicí, HDR

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Michala Seemana.

Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Vladimír Šmida

16. května 2008

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Seemanovi, za užitočnú metodickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce.

Ďalej osobne ďakujem priateľke Baruške, ktorá je mojou nekonečnou motiváciou a chuťou do života.

V neposlednom rade ďakujem svojim rodičom, ktorí mi dovolili uzrieť svetlo sveta¹, za ich všestrannú podporu počas môjho štúdia.

© Vladimír Šmida, 2008.

Táto práca vznikla ako školské dielo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práca je chránená autorským zákonom a jej užitie bez udelenia oprávnenia autorom je nezákonné, s výnimkou zákonom definovaných prípadov.

¹Schopnosť vnímať obraz a rozlišovať jeho farby predstavuje prvý neodmysliteľný krok v tejto práci.

Obsah

1 Úvod	3
2 Reprezentácia farieb v digitálnom obraze	5
2.1 Viditeľné spektrum	5
2.2 Reprodukcia farieb	6
2.3 Prirodzená adaptácia	8
2.4 Expozícia	9
2.5 Dynamický rozsah	9
3 Návrh rekonštrukcie vysokého dynamického rozsahu	13
3.1 Vysoký dynamický rozsah	13
3.2 Metóda skladania fotografií	13
3.3 Analýza	14
3.4 Funkcia krivky odrazu	15
3.5 Klasifikácia	16
3.6 Algoritmus skladania fotografií	18
4 Realizácia	20
4.1 Detekcia rozdielu expozícií	20
4.2 Funkcia charakteristickej krivky odrazu	21
4.3 Preexponované, podexponované hodnoty	21
4.4 Váhová funkcia	22
4.5 Štruktúra algoritmu	23
4.6 Vizualizácia HDR obrazu	24
4.7 Reprezentácia HDR obrazu	24
5 Záver	26
Literatúra	29
Zoznam použitých skratiek a symbolov	30
A Ilustratívna ukážka vytvorených HDR fotografií	31
B Dátový nosič CD	33

Zoznam obrázkov

2.1	Rekonštrukcia svetelného signálu	6
2.2	Bayerova mriežka	7
2.3	Interpolácia pixelov	7
2.4	Jasová adaptácia	8
2.5	Dynamický rozsah scén	10
2.6	Korekcia expozície	11
2.7	Dynamický rozsah scény menší než tonálny rozsah snímača	11
2.8	Dynamický rozsah scény väčší než tonálny rozsah snímača	12
3.1	Zreťazený proces získania obrazu	16
3.2	Graf závislosti intenzity vzoriek od použitej expozície	17
3.3	Rekonštrukcia charakteristickej krivky odrazu	19
4.1	Detekcia rozdielu expozícií	21
4.2	Preexponované hodnoty červeného kanálu	22
4.3	Váha jednotlivých pixelov obrazu	22
4.4	Tone mapping	24
4.5	Screenshot aplikácie	25
A.1	Leguán; 8 zdrojových snímok	31
A.2	Vysoké Tatry; 2 zdrojové snímky	32

Kapitola 1

Úvod

Digitálna fotografia ako prostriedok realistickej reprodukcie scény prechádza v súčasnosti viacerými transformáciami. Trend dnešnej doby sa obracia hlavne v dodatočné spracovanie obrazu, ktorým sa kompenzujú technické nedostatky snímača fotoaparátu. Toto spracovanie predstavujú v praxi vstavané digitálne stabilizátory obrazu, nástroje na úpravu saturácie, tonalít, vyváženie bielej, vytiahnutie zachovalej kresby atď. Akokoľvek dodatočné spracovanie obrazu závisí vo veľkej miere na subjektívnom vnímaní jednotlivca, celý proces úpravy a napokon aj samotného poriadania snímku prechádza cez limitované možnosti súčasných zobrazovacích a snímacích zariadení. Tieto zariadenia pritom neustále podliehajú technologickému vývoju, a tak sa fotografia stáva odrazom doby, v ktorej bola vytvorená.

Metódy založené na ľudskom videní

Hranice ľudského videnia ostávajú na rozdiel od neustále sa vyvíjajúcich vizualizačných technológií vopred známe, nemenné. Práve na základe tohto faktu vznikajú nové metódy spracovania obrazu, ktoré si nekladú za cieľ realistickú vizualizáciu scény postavenú na súčasných technológiách, ale na možnostiach vnímania obrazu človekom. Tieto techniky sa označujú pojmom High Dynamic Range Imaging (HDRI), nakoľko hlavný problém u dnešných snímacích a zobrazovacích zariadeniach spočíva práve v reálnom zachytení a prezentovaní veľkého rozsahu jasov zastúpených v scéne vo forme svetiel a tieňov.

Cieľ práce

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou rekonštrukcie reálnej scény založenej na metódach HDRI, kde pomocou vstupných fotografií bežných konvenčných fotoaparátov vytvára obraz pokrývajúci vyšší dynamický rozsah scény. Informačný charakter takejto výslednej fotografie prevyšuje rámec súčasných možností vizualizačných zariadení.

Nakoľko nie je možné prezentovať dosiahnuté výsledky v nejakej názornej forme, sú všetky HDR fotografie z ilustratívnych dôvodov spätne namapované do zobraziteľného formátu. Metódy mapovania dynamického rozsahu obrazu pomocou tone mapping-ových operátorov (TMO) zasahujú nad rámec tejto bakalárskej práce, preto pri prezentácii výsledkov boli na HDR obrazy aplikované tone mapping-ové metódy tretích strán.

Práca si kladie za cieľ analyzovať aspekty spojené so zhotovením snímky, ktoré zohrávajú významnú úlohu pri návrhu samotných metód HDRI. Napokon s ohľadom na túto analýzu navrhujem a následne implementujem algoritmus skladania fotografií produkujúci výsledný HDR obraz. Vzhľadom na abstraktnosť celej témy, je implementácia algoritmu zaobalená

v aplikácii s grafickým užívateľským rozhraním, ktorá užívateľovi výrazne zjednodušuje celkový proces generovania a zobrazenia HDR snímku.

Dokument je logicky členený do piatich kapitol. Nasledujúca kapitola (2) predstavuje teoretický úvod k reprezentácii farieb, dôležitý k pochopeniu problematiky rekonštrukcie obrazu reálnej scény. Zobrazuje súčasné možnosti fotografickej reprodukcie obrazu a s ním spojené obmedzenia. Tretia kapitola (3) rozoberá metódu založenú na skladaní fotografií rovnakej scény, analyzuje jednotlivé hľadiská ovplyvňujúce samotnú metódu. Ďalšia kapitola (4) sa zaoberá praktickým návrhom a implementáciou algoritmu generujúceho HDR obraz. Tento návrh spätne zohľadňuje aspekty z kapitoly 3. V závere (5) porovnávam výsledné obrazy generované implementovaným algoritmom s technikami bežne používanými v amatérskej fotografii.

Kapitola 2

Reprezentácia farieb v digitálnom obraze

Obraz tvoria farby. Tak aj samotná reprodukcia scény závisí od zachytenia a následnej reprezentácie jej farieb.

Táto kapitola sa zaoberá hlavným nositeľom informácií o danej scéne – svetlom. Zobrazuje spôsob zachytenia týchto informácií konvenčnými fotografickými metódami inšpirovanými ľudským videním. Následne sa zaoberá prezentáciou týchto informácií vo forme obrazu. Na záver poukazuje na najväčšie problémy, s ktorými sa stretávame pri rekonštrukcii reálnych svetelných pomerov scény použitím zosnímaných dát. Kapitola sa vzťahuje čiste k tématu mojej bakalárskej práce a tak neodráža úplné poznatky z dôvodu rozsahu.

2.1 Viditeľné spektrum

Fyzikálne vlastnosti svetla môžeme popísať dvoma rôznymi modelmi. Kvantová optika definuje svetlo ako prúd fotónov, zatiaľ čo vlnová optika ho charakterizuje ako elektromagnetické vlnenie. K vysvetleniu vnímania svetla človekom použijem oba tieto modely, nakoľko spolu veľmi úzko súvisia.

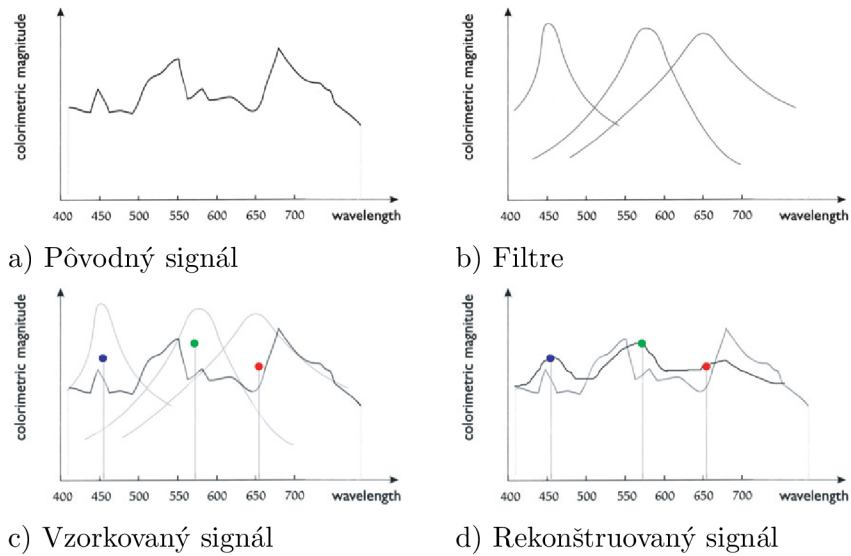
Svetelný zdroj vyžaruje fotóny v rozsahu určitých vlnových dĺžok. Energia každého fotónu závisí od jeho frekvencie podľa vzťahu $E = hf$, kde h predstavuje Planckovu konštantu. Odpovedajúcu vlnovú dĺžku λ dostaneme dosadením do vzťahu $\lambda = \frac{c}{f}$. Následne tak môžeme emitované svetlo charakterizovať jeho *spektrálnou distribúciou*, ktorá priraduje každej vlnovej dĺžke veľkosť jej energie, ako je zobrazené na obrázku 2.1a. Zdroj žiarenia, ktorý vyžaruje fotóny jednej vlnovej dĺžky nazývame *monochromatický*.

Fotocitlivé senzory sú charakterizované *spektrálnym odrazom* (obr. 2.1b). Ak je senzor vystavený svetlu s určitou spektrálnou distribúciou $C(\lambda)$, výsledná merateľná hodnota žiarenia w je daná práve funkciou spektrálneho odrazu $s(\lambda)$:

$$w = \int_{\lambda} C(\lambda)s(\lambda)d\lambda$$

Sietnica ľudského oka je tvorená svetlocitlivými bunkami – tyčinkami a čapíkmi. Tyčinky rozoznávajú intenzitu jasu¹, čapíky obsahujú tri typy fotosenzorov, každý so špecifickou

¹Základnou jednotkou jasu je kandela na meter štvorcový (cd/m^2). $1cd/m^2$ je jas zdroja, ktorého svietivosť na $1m^2$ zdanlivej plochy sa rovná 1 kandeľe. Zdanlivou plochou sa pri tom rozumie obsah priemetu skutočnej osvetlenej plochy do roviny kolmej ku smeru žiarenia.



Obrázok 2.1: Pôvodnú spektrálnu distribúciu emitovaného svetla zobrazuje obr. a), funkcie spektrálneho odrazu troch filtrov použitých na vzorkovanie vstupného signálu sú na obr. b), vzorkované hodnoty na obr. c) a výsledný rekonštruovaný signál je zobrazený na obr. d) [6].

krivkou spektrálneho odrazu. Svetelné senzory a emitory sa snažia na základe spektrálneho odrazu reprodukovat pôvodný signál (obr. 2.1c), váhu pri tom zohráva aj subjektívny vnem človeka. Interval vlnových dĺžok vnímaných ľudským okom je v rozsahu od 380 nm do 780 nm a označuje sa pojmom *viditeľné spektrum*.

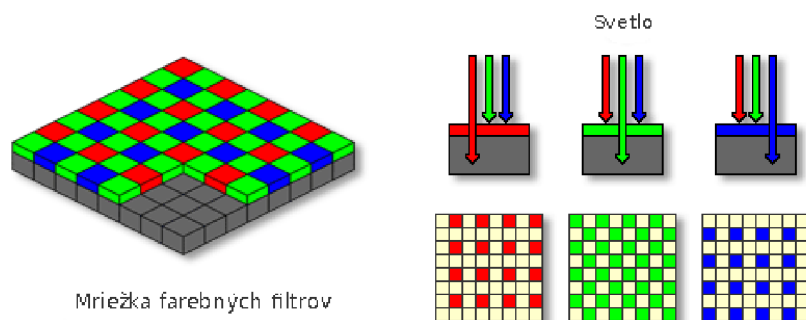
Spektrum emitovaného žiarenia teda spolu so spektrálnym odrazom definuje farbu vnímanú človekom.

2.2 Reprodukcia farieb

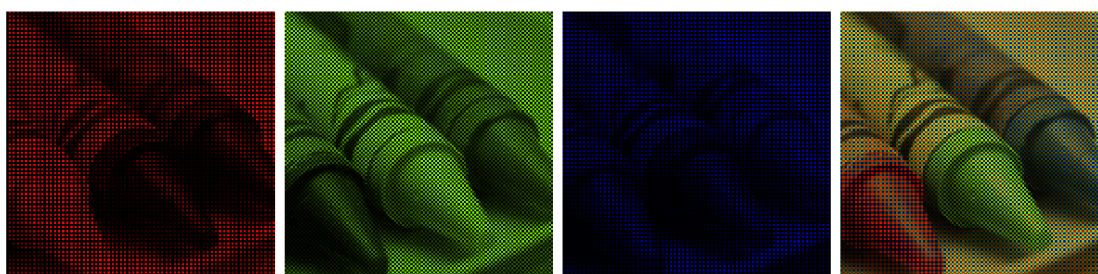
Vzhľadom k zameraniu tejto práce sa budem zaoberať len *digitálnou reprodukciou* obrazu, tá si prirodzene vyžaduje diskretnú resp. binárnu reprezentáciu. Práca fotoaparátu je inšpirovaná trichromatickým základom ľudského oka, pretože práve vnem človeka je určujúcim faktorom pri reprodukcii farieb.

Projekcia reálnej scény prechádza cez systém šošoviek a dopadá na svetlocitlivú zónu snímača zloženého z fotodiód. Fotodióda predstavuje monochromatické zariadenie, ktoré je schopné zaznamenať jas, no nie rozdiel medzi jednotlivými vlnovými dĺžkami svetla. Preto je povrch snímača pokrytý mriežkou červených, zelených a modrých filtrov (kanálov) tvoriacich RGB základ (obr. 2.2).

Prevedenie súvislého svetelného toku do číselnej hodnoty potrebnej pre digitálnu reprezentáciu obrazu sa dosahuje vzorkovaním. Fyzickú implementáciu diskreditácie vstupného signálu predstavujú fotodiódy snímača spolu s filtermi. Tie vzorkujú vstupný svetelný signál a reprodukovujú ho použitím svetelných obrazových emitov. Interpoláciou pixelov jednotlivých kanálov a následným zložením týchto kanálov tak dostaneme jednotný plnofarebný obraz (obr. 2.3).



Obrázok 2.2: Bayerova mriežka reprezentujúca mozaiku GRGB farebných filtrov zachytáva iba 25% červenej a modrej farby a 50% zelenej farby. Pomer zložiek odráža citlivosť ľudského oka na jednotlivé farby.



a) RGB kanály naľavo reprezentujú kompletný farebný obraz (napravo)



b) Výsledný obraz po interpolácii

Obrázok 2.3: Interpoláciou jednotlivých zložiek (a) doplníme chýbajúce pixely, a tak dostaneme výsledný obraz odrážajúci farebnú scénu (b).

Jedna zo základných charakteristík diskkrétnej reprezentácie obrazu je jej *rozlíšenie*. V prípade digitálnej fotografie sa jedná o dvojrozmerný súvislý farebný obraz, ktorý popisujeme dvoma reprezentáciami: *priestorovou* a *tonálnou*.

Priestorové rozlíšenie

Priestorové rozlíšenie charakterizuje počet pixelov, na ktoré bol signál vzorkovaný. Každý prvok senzora je zodpovedný za vzorkovanie vstupného spojitého svetelného toku a následne jeho uloženia do číselnej hodnoty. Trend posledných rokov, kedy bol na priestorové rozlíšenie

kladený veľký dôraz, dokazuje vývoj súčasných konvenčných digitálnych fotoaparátov. Merítkom kvality sa totiž považuje len počet obsiahnutých megapixelov (Mpx) v obraze.

Tonálne rozlíšenie

Z hľadiska uchovania informácií oveľa väčší význam predstavuje tonálne rozlíšenie, ktoré charakterizuje počet bitov reprezentujúcich každú farebnú zložku snímača. Tým určuje skupinu hodnôt, ktoré môže daná farba naberať. Štandardná používaná hĺbka je byte na pixel pre každý farebný kanál. To umožní vyjadriť až vyše 16 miliónov rôznych farieb. Táto diverzita je známa pod pojmom *true color*.

Stále ale ostáva iba 256 pre každú z červenej, zelenej a modrej komponenty každého pixelu, čo nestačí na reprezentovanie úplného farebného rozsahu, ktorý scéna ponúka. Ľudské oko avšak dokáže v priemere rozoznávať okolo 10 miliónov farieb [10], preto reprezentácia *true color* dosť stačuje.

2.3 Prirodzená adaptácia

V praxi ale vstupuje do role ďalší aspekt. Tým je prirodzená vlastnosť oka okamžite sa adaptovať aktuálnym svetelným podmienkam. Vizualný vnem istej farby daný povrchom predmetu závisí od jeho schopnosti odrážať svetlo naň dopadajúce. Preto ak sa svetelný zdroj pozvoľne zmení v inú farbu, pozorovateľ sa prispôsobí a naďalej vníma danú farbu rovnako, napriek tomu, že merané svetlo povrchu bude indikovať rozdielnu spektrálnu kompozíciu. Tento fenomén sa nazýva *chromatická adaptácia*.

Oko pritom disponuje aj ďalšou adaptáciou. Tou je *tonálna adaptácia*. Tá zabezpečuje, že ako sa dynamicky menia svetelné podmienky scény, mení sa aj citlivosť buniek ľudského oka. Rýchlosť adaptácie pritom závisí od smeru svetelného prechodu. Spozorovať to môžeme pri náhlom prechode zo svetla do tmy, kedy sme schopní vnímať okolie až po uplynutí určitej doby. Scitlivenie utlmených buniek totiž trvá oveľa dlhšie než ich znecitlivenie, napr. pri náhlom rozsvietení svetla sme schopní okamžite pozorovať scénu. Praktický príklad takejto jasovej adaptácie ovplyvňujúcej ľudské videnie je zobrazený na obrázku 2.4, kde rozsvietené stretávacie svetlá automobilu nám dovoľujú riadiť v noci. Za denného svetla sú pritom nepovšimnuteľné.

Svetlocitlivý senzor fotoaparátu touto vlastnosťou adaptácie nijako nedisponuje.



Obrázok 2.4: Napriek rovnako rozsvieteným svetlám automobilu v oboch obrázkoch je náš zrak na tieto svetlá menej citlivý za denného svetla než v noci.

2.4 Expozícia

Istú alternatívu k adaptácii človeka svetelným podmienkam predstavuje schopnosť fotodiód emitovať prijímaný konštantný svetelný tok. V praxi to vyžaduje vystavenie scény objektívu fotoaparátu na určitý expozičný čas, kde na záver je celkový elektrický náboj prevedený na číselnú hodnotu vyjadrujúcu *jas*. Maximálnu možnú hodnotu jasu, ktorú možno uchovať, vyjadruje tonálne rozlíšenie.

Počet dopadajúcich fotónov na snímač sa dá taktiež obmedziť regulovaním množstva svetla prechádzajúceho objektívom fotoaparátu (či už veľkosťou clony alebo ohniskovou vzdialenosťou). Obdobu predstavuje zrenička oka so schopnosťou meniť veľkosť svojho priemeru.

Z dôvodu reciprocity, kde je možné kompenzovať väčšie otvorenie clony skrátením expozičného času a naopak, bol zavedený pojem expozičia [12]. Tá zahŕňa ako proces vystavenia svetla dopadajúceho na senzor, tak aj jeho celkové množstvo. Vyjadruje sa pomocou absolútnej veličiny – expozičnej hodnoty E_V (Exposure Value).

Hodnota expozičie je definovaná ako nulová pri čase 1s a clone $f/1.0$. Meria sa na zápornej logaritmickej stupnici o základe 2 – zvýšenie o $1E_V$ teda odpovedá polovici prepusteného svetla, t.j. $0E_V$ je $1 : 1(2^0)$, $1E_V$ je $1 : 2(2^1)$, $2E_V$ je $1 : 4(2^2)$ $10E_V$ je $1 : 1.024(2^{10})$... E_V sa dá vyjadriť z expozičného času t a clonového čísla N pomocou vzťahu $E_V = \log_2 \frac{N^2}{t}$

2.5 Dynamický rozsah

Dôležitú vlastnosť fotoaparátu predstavuje *tonálny rozsah*, ktorý vyjadruje minimálny a maximálny prah senzora zaznamenávať jednotlivé dopadajúce fotóny. Reprezentácia jasu v obraze tak nezáleží len od tonálneho rozlíšenia, ale aj tonálneho rozsahu snímača, pričom:

- Tonálny rozsah predstavuje celkový interval intenzít, ktorý je senzor schopný zachytiť
- Tonálne rozlíšenie predstavuje hustotu vzoriek tónov v určitom intervale. Odráža plynulosť prechodu jednotlivých tónov.

Ľudské oko vďaka svojej prirodzenej vlastnosti adaptácie dokáže voči fotoaparátu zachytiť oveľa väčší tonálny rozsah, ktorý scéna ponúka. Tento rozsah intenzít svetla je označovaný pojmom dynamický rozsah.

Dynamický rozsah tak udáva predstavu o svetelných pomeroch v scéne. Je definovaný ako rozsah jasov prítomných v scéne a vyjadruje sa vo forme pomeru najvyššieho k najnižšiemu jas. Vo fotografickej praxi sa vyjadruje v jednotkách E_V . Každý bod scény má samozrejme inú E_V – iný jas. Preto tento dynamický obsah odráža rozdiel E_V najsvetlejšieho a E_V najtmavšieho miesta scény.

Pre stanovenie správnej expozičie je ale nutné stanoviť *priemernú* E_V scény. Na túto hodnotu bude nastavená expozičia.

Názorne uvádzam v tabuľke 2.1 orientačný² dynamický rozsah rôznych scén, snímacích čipov a zobrazovacích zariadení.

Ako už bolo spomenuté, digitálne snímače nie sú vždy schopné obsiahnuť celý dynamický rozsah scény, nakoľko tento rozsah závisí od daných svetelných podmienok. Preto počas zachytenia obrazu fotoaparátom, strácame veľa informácií o snímanej scéne.

²Nakoľko záleží od použitej metódy merania, zdroje informácií sa v uvádzaní dynamických rozsahov jednotlivých elementov mierne rozchádzajú.

Element	Kontrast	Dynamický rozsah
Slniečny deň, krajina zaliata slnkom	$> 1 : 100.000$	$> 16E_V$
Rozsah zdravého oka	$1 : 32.000$	$15E_V$
Čiernobiely negatív	$1 : 512$	$9E_V$
Farebný negatív	$1 : 64$	$6E_V$
Dia-pozitívny film	$1 : 32$	$5E_V$
Bežné digitálne čipy (CCD, CMOS)	$1 : 23 - 1 : 181$	$4,5 - 7,5E_V$
DSLR (CCD, CMOS)	$1 : 128 - 1 : 1440$	$7 - 10,5E_V$
Farebná fotografia z fotolabu	$1 : 256$	$8E_V$
Bežné LCD monitory	$1 : 300$	$8E_V$
Grafické LCD monitory	$1 : 1.000$	$10E_V$

Tabuľka 2.1: Rozdiely dynamického rozsahu medzi jednotlivými zariadeniami zachytávajúcimi a reprodukovajúcimi obraz v porovnaní s kontrastným výskytom tónov v reálnom živote

Na obrázku 2.5 sú ilustračne zobrazené scény rôzneho dynamického rozsahu, akokoľvek sa to na prvý pohľad nemusí zdať. Jasovo pôsobia rovnako, čo je ale spôsobené reguláciou expozície a spôsobom zobrazenia ³.

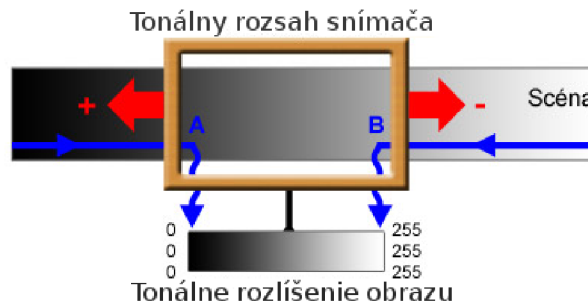


Obrázok 2.5: Jasové podmienky jednotlivých scén vyjadrujúce rôzny dynamický rozsah. Autor: <http://www.fotografvani.cz>

V praxi to znamená, že ak má scéna dynamický rozsah $15E_V$ a fotoaparát $5E_V$, tak expozimeter spriemeruje pomery tieňov a svetiel na 18% šedú, a tak nastaví exponovanie záberu približne na stred rozsahu. To značí, že z dynamického rozsahu scény $15E_V$ sa zaznamená len stredných $5E_V$. Svetlé časti scény, ktoré sú nad $10E_V$, budú namapované na senzore len ako prepálená biela bez kresby a tmavé časti pod $5E_V$ budú len ako čierny tieň bez kresby. Manuálnym určením expozície alebo v prípade automatickej expozície jej kompenzáciou môžeme určovať snímanú oblasť z celkového rozsahu scény. Tým meníme rozsah jasov, ktoré zaznamená fotoaparát (obr. 2.6).

Fotograf sa tak môže stretnúť s dvoma rôznymi situáciami, kedy je kontrast scény buď väčší alebo menší než tonálny rozsah snímača fotoaparátu.

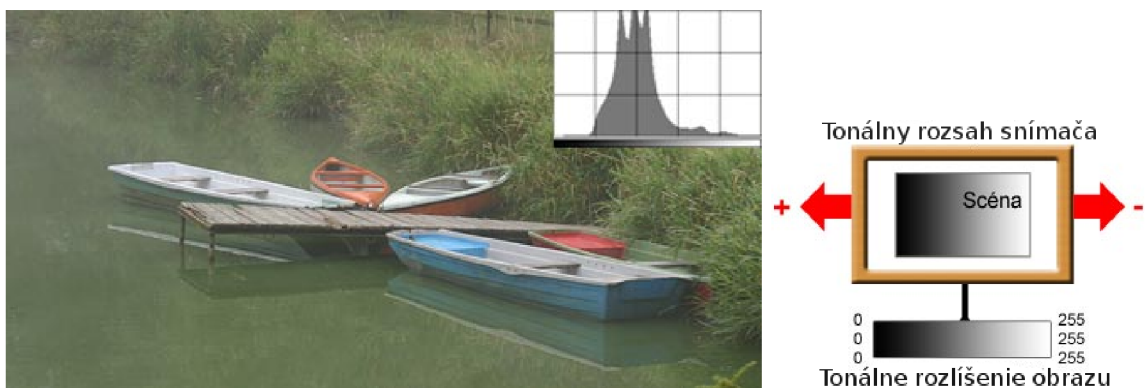
³Papier resp. súčasné zobrazovacie zariadenia taktiež nedokážu prezentovať vyšší dynamický rozsah scény.



Obrázok 2.6: Pri snímaní fotoaparátom sa úplný dynamický rozsah scény vždy namapuje do tonálneho rozsahu snímača. Stanovenie expozície definuje, ktorá časť z rozsahu scény bude hodnoverne zachytená snímačom.

Dynamický rozsah scény menší než tonálny rozsah snímača

Pre scény, kde je ich kontrast väčší než tonálny rozsah snímača, je charakteristické, že neobsahujú čiernu ani bielu farbu. Celkovo sú nevýrazné, bez kontrastov. V tomto prípade dokáže digitálny senzor kompletne pojmúť kontrast scény (obr. 2.7)



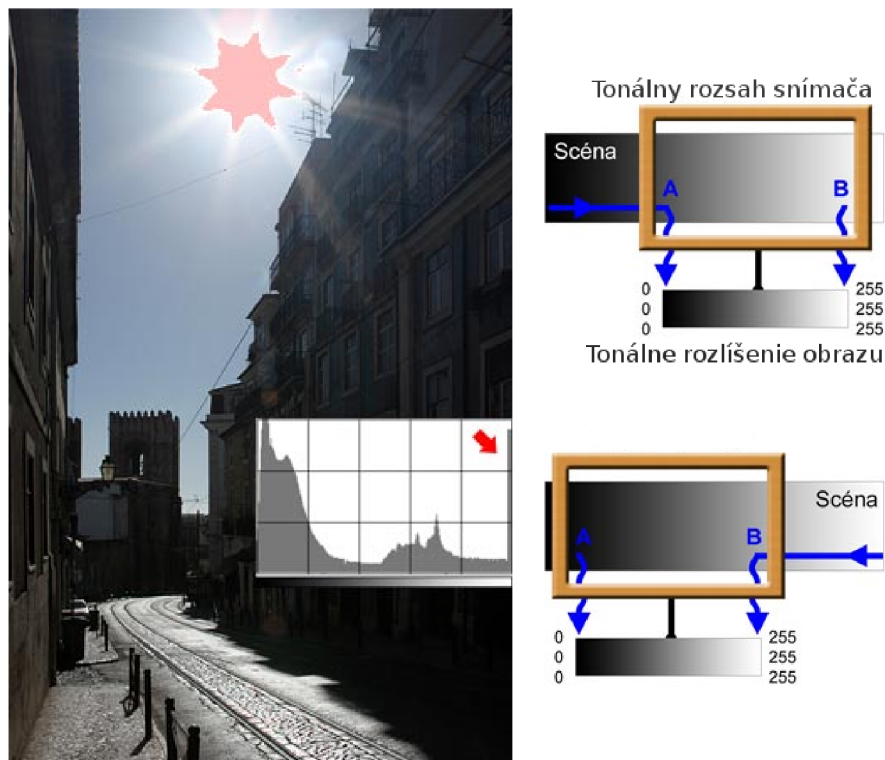
Obrázok 2.7: Snímka vľavo reálne odráža dynamický rozsah scény, ktorý kompletne pokrýva tonálny rozsah snímača (zobrazený vpravo). Autor: <http://www.fotografovani.cz>

Dynamický rozsah scény väčší než tonálny rozsah snímača

Z pohľadu fyzikálnych zákonov, príroda poskytuje nekonečný jasový rozsah. Jeho oba extrémny nachádzame vo vesmíre, kedy ďaleko od všetkých zdrojov svetelného žiarenia sa hodnota vyjadrujúca absolútny jas blíži k $-\infty$. Naopak, hviezdy o teplotách niekoľko desiat tisíc $^{\circ}\text{C}$ vyžarujú žiarenie, ktoré môže dosiahnuť aj niekoľko sto⁴ E_V [9].

Vzhľadom k tomu, že podmienky na Zemi sú pre život priaznivé, i jasový rozsah na nej vyskytujúcich sa rôznych scén je oveľa nižší. Napriek tomu v súčasnosti dochádza častejšie k javu, kedy snímač nie je schopný zachytiť plný dynamický rozsah scény. V tomto prípade

⁴Jas hviezd klesá so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od Zeme, preto napr. škrvny na slnku sa dajú bežne fotiť cez filtre, ktoré stmavujú len o niekoľko E_V .



Obrázok 2.8: Dynamický rozsah scény presiahol tonálny rozsah snímača. Autor: <http://www.fotografovani.cz>

sme donútení nastavením expozície rozhodnúť, či zachováme prekreslené tieňe alebo svetlá. Situáciu znázorňuje obrázok 2.8 zosnímaný proti slnku, kedy je jednoznačné, že úplný dynamický rozsah scény nebude zachytený. Priložený histogram prezrádza voľbu správnej expozície, ktorou bolo dosiahnuté zachovanie kresby v tieňoch a tým podstatná časť informácií bola zaznamenaná. Prepálenú časť predstavuje len samotné slnko.

Akokoľvek v oboch prípadoch vždy dochádza k nenávratnej strate informácií o reálnej scéne.

Kapitola 3

Návrh rekonštrukcie vysokého dynamického rozsahu

Digitálna fotografia ako prostriedok reprodukcie scény vychádza zo súčasných technologických možností snímačov fotoaparátov. Tie ale doposiaľ výrazne zaostávajú za možnosťami nášho zraku. Nesplňajú požiadavky realistického zobrazenia, nakoľko nesú len časť informácií popisujúcich reálnu scénu. Táto kapitola predstiera techniku získania relevantných informácií opisujúcich reálne svetelné pomery v scéne zo skupiny fotografií tejto scény. Návrh vychádza z matematickej formulácie problému rozobranej v článkoch [6] a [2].

3.1 Vysoký dynamický rozsah

Fotografia poriadená snímaním scény fotoaparátom predstavuje *obraz s nízkym dynamickým rozsahom (LDR)*, nakoľko zahrňuje len časť z celého tonálneho rozsahu scény.

V súčasnej dobe existujú dva diametrálne odlišné techniky, ktorými je možné dosiahnuť vytvorenie obrazu s tonálnym rozsahom približujúcim sa reálnej scéne. Prvá metóda predstavuje fyzikálne založenú simuláciu svetelnej scény v priestorovej syntaktickej scéne, napr. použitím rendrovacích metód ako radiozity a raytracingu [15]. Druhá technika využíva LDR fotografie bežných konvenčných fotoaparátov k rekonštrukcii scény.

Obrazy, ktoré odzrkadľujú reálne scény v rozsahu intenzít približujúcich sa samotným týmto scénam, nazývame *radiance maps* alebo *obrazy s vysokým dynamickým rozsahom – HDR*. (Nakoľko slovo „radiance maps“ nemá v súčasnosti slovenský ani český ekvivalent, budem naďalej v tejto práci väčšinou používať zaužívanú skratku HDR.)

Dnes už síce existujú profesionálnejšie digitálne fotoaparáty vybavené 10 alebo 12-bitovými A/D prevodníkmi schopnými dosahovať o niečo vyššie tonálne rozlíšenie cez proprietárne RAW¹ formáty. Akokoľvek 10 alebo 12 bitov surových dát ponúka približne ten samý rozsah ako 8-bitové formáty zahrňujúce gama-kompresiu, preto sú tieto RAW formáty považované stále za LDR.

3.2 Metóda skladania fotografií

Podstata rekonštrukcie dynamického rozsahu obrazu spočíva v spätnom získaní svetelnej mapy reálnej 3D scény použitím digitálneho fotoaparátu s prihliadnutím na limitujúce ob-

¹RAW obrazové formáty sú firemne, ba často aj modelovo špecifické súborové formáty obsahujúce nespracovaný výstup senzora fotoaparátu.

medzenia súčasnej technológie (analyzované v nasledujúcej podkapitole 3.3). Použitím digitálnej fotoaparátu sme totiž schopní merať pomery svetla zastúpeného v scéne. To ale so sebou prináša dva hlavné problémy:

1. Fotoaparát predstavuje snímacie zariadenie, nijako meracie. Meracie zariadenia sú kalibrované snímacie, preto pre získanie správnej spektrálnej krivky senzoru fotoaparátu je potrebná fotometrická kalibrácia.
2. Senzor fotoaparátu, ako už bolo spomínané v kapitole 2, operuje v limitujúcom rozsahu, preto je potrebné pre pokrytie plného dynamického rozsahu scény viacero expozícií.

Po správnej kalibrácii, je možné jednoznačne spočítať veľkosť žiarenia z nameranej hodnoty intenzity a odpovedajúcej expozície. Fotometrickú kalibráciu pritom nepredstavuje nič iné ako zostavenie charakteristickej funkcie odrazu snímača fotoaparátu, zodpovednú za číselné vyjadrenie prijímaného svetelného žiarenia.

Prakticky teda metóda skladania fotografií predstavuje vytvorenie HDR obrazu na základe spracovania určitého počtu snímok získaných niekoľkonásobným vyfotografovaním statickej scény pri použití rôznej expozície. Každá, rôzne exponovaná snímka zaznamenáva istý rozsah jasov, kde vyčítaním konkrétnej použitej expozície je možno špecifikovať, ktorú časť z tonálneho rozsahu scény pokrýva. Definovaním množiny takýchto snímok sme následne schopní rekonštruovať dynamické pomery scény.

Adekvátny počet vstupných LDR snímok potrebných k úplnej rekonštrukcii HDR dát závisí od dynamického rozsahu snímanej scény. Zosnímané snímky musia totiž pokryť úplný jasový rozsah scény. Tento stav kompletnej rekonštrukcie nie je ale vždy možné uskutočniť (napr. v prípade snímania proti slnku, kedy je nemožné zaznamenať hodnotu jas samotného slnka). Z toho dôvodu i samotné HDR obrazy nijako obecné nezahŕňujú úplné tonálne rozsahy všetkých možných scén. Vo väčšine prípadov sa k nim len približujú. Vzhľadom ale k tomu, že naše oko taktiež nedisponuje schopnosťou zachytiť takýto rozdiel jasov, pre potreby predstavy reálnej scény plne postačujú.

3.3 Analýza

Pred samotným návrhom algoritmu tvorby HDR je potrebné špecifikovať požiadavky na vstupné LDR snímky a taktiež analyzovať informačný charakter týchto dát. Tie sú zhrnuté do nasledujúcich bodov.

Statickosť

Viacnásobný, rôzne exponovaný obraz scény, ktorý si vyžaduje metóda skladania fotografií, nie je bežnými fotografickými technikami možné docieľiť v jednom momente. To má za následok obmedzenie na nemennosť ako scény, tak aj pohľadu pozorovateľa naň. V prípade pozorovateľa si to vyžaduje zaistenie fotoaparátu statívom, nemennosť scény počas celej doby snímania výrazne limituje využitie danej techniky na *statické scény*.

Isté uľahčenie manipulácii môže v súčasnosti priniesť vstavaná funkcia niektorých fotoaparátov, tzv. *“bracketing (BKT)”*, kedy sa automaticky posúva expozícia o 1 či $2E_V$ s každou poriadanou snímku.

Reprezentácia

Samotný návrh metódy ovplyvňuje fakt, kde pri skladaní rozdielne exponovaných fotografií nemáme žiadne špecifické znalosti o svetelných podmienkach v scéne. Jediné čo vieme je expozícia jednotlivých snímok a hodnoty pixelov, ktoré ich tvoria.

Duplicita

Veľkosť dát viacerých nezávislých diskretných hodnôt držiacich informácie o bodoch tvoriacich výsledný pixel je väčšia než veľkosť jednej hodnoty zahŕňajúcej tie samé informácie o danom bode. Spôsobuje to čiastočná duplicita dát u rôzne exponovaných snímkoch.

Relevantnosť

Nakoľko senzor operuje v obmedzenom tonálnom rozsahu, hodnoty predstavujúce jas pod spodnou hranicou tonálneho rozsahu snímača sú namapované do 0. Ekvivalentne hodnoty nad hornou hranicou rozsahu sú mapované do najvyššej možnej hodnoty, ktorú predstavuje tonálne rozlíšenie. Vzhľadom k tomu, že takéto preexponované resp. podexponované hodnoty nenesú takmer žiadne informácie o danej scéne, pri spätnom zhotovovaní spektrálnej krivky odrazu je potrebné ich vylúčiť, nakoľko by nežiadúco ovplyvňovali výsledok.

Šum

Pri návrhu algoritmu sa neberie do úvahy šum senzora fotoaparátu, ktorý môže viditeľne ovplyvniť výsledok v rôznom smere. Tento výraznejší šum je charakteristický pri fotografovaní za slabých svetelných podmienok, kedy nedostatok svetla kompenzujeme dlhším expozičným časom a taktiež zvýšením citlivosti senzora na dopadajúce fotóny svetla vo forme hodnoty ISO. Oba tieto fakty spôsobujú jemné kolísanie elektrónov vnútri senzora, ktoré následne odzrkadľuje vyskytujúci sa šum v obraze.

3.4 Funkcia krivky odrazu

Digitalizáciou obrazu počas procesu fotografovania dostávame dvojrozmerné pole hodnôt jasu pre každý farebný kanál. Tieto hodnoty jasu ale len ťažko odrážajú reálne hodnoty nameraného relatívneho žiarenia v scéne. Ku príkladu, ak je hodnota jedného pixelu dvojnásobne väčšia než hodnota druhého, je nepravdepodobné, že odráža dvojnásobne väčšie prijímané žiarenie. V skutočnosti je totiž hodnota pixelov reprezentujúcich obraz daná *nelineárnym mapovaním* vstupného žiarenia počas procesu digitalizácie obrazu.

Pretože hodnoty pixelu d_{ij} tvoriaceho obraz sú nelineárne závislé od hodnoty w_{ij} vyskytujúceho sa žiarenia v scéne, tak je dôležité zostaviť charakteristickú funkciu odrazu senzora f . Pomocou tejto funkcie sa špecifikuje *lineárna závislosť* rozdielne exponovaných d_{ij} hodnôt. Tak budú rozdielne exponované fotografie jednej scény predstavovať konzistentnú skupinu dát odrážajúcich svetelnú mapu scény, ktorá obsahuje komplexné informácie o hodnote jednotlivých jasov v scéne.

Skupina K rozdielne exponovaných fotografií scény, získaných vystavením senzora známou expozíciou Δt_k , nám dáva množinu $d_{ij,k}$ hodnôt pre každý pixel exponovaného obrazu na pozícii ij , kde k je index predstavujúci určitú expozíciu. Napriek tomu, že f predstavuje spojitú funkciu, merateľné môžu byť jej diskretné hodnoty zaznamenané senzorom.

Aktuálnu hodnotu, ktorá bude digitalizovaná tak predstavuje

$$z_{ij,k} = E_{ij,k} = w_{ij}\Delta t_k$$

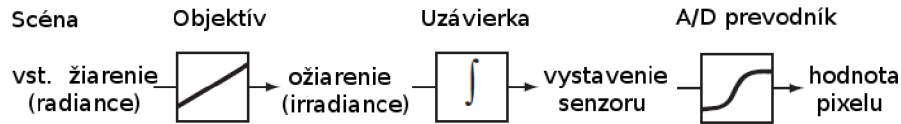
Digitalizačná funkcia je *diskrétna*, preto ak $z_{ij,k} \in [I_{m-1}, I_m)$, kde $[I_{m-1}, I_m)$ predstavuje interval žiarenia, potom $d_{ij,k} = \hat{f}(z_{ij,k}) = m$. Diskrétna funkcia odrazu \hat{f} je tak

$$\hat{f}(z) = \begin{cases} 0 & \text{pre } z \in [0, I_0) \\ m & \text{pre } z \in [I_{m-1}, I_m) \\ 2^n - 1 & \text{pre } z \in [I_{2^n-1}, \infty), \end{cases}$$

kde $m = 1, \dots, 2^n - 1$, s hodnotou n predstavujúcou tonálne rozlíšenie (viz. kapitola 2).

Monotónne rastúca funkcia f na celom svojom rozsahu implikuje nasledovné: $0 < I_0 < \dots < I_m < I_{2^n-1} < \infty$. Tak môžeme definovať *inverznú mapovaciu funkciu* $\hat{f}^{-1}(m) = I_m$, ktorou dostaneme odpovedajúce hodnotu z_{ij} . Hodnoty z , ktoré sú mapované do 0 predstavujú podexponované pixely, zatiaľ čo hodnoty mapované do $2^n - 1$ predstavujú preexponované.

Hodnoty žiarenia scény sú zachytené senzorom digitálneho fotoaparátu, ktorý ich následne prevedie do číselnej hodnoty intenzity d_{ij} pre každý pixel obrázku, daný pozíciou ij . Odpovedajúce žiarenie zo scény w_{ij} prechádza vnútri fotoaparátu trojstupňovým spracovaním zobrazeným na obrázku 3.1. Najprv obraz scény prechádza systémom šošoviek a uzávierkou, vystavujúc sa senzoru vo forme ožiarenia $E_{ij} = w_{ij}\Delta t$, kde Δt predstavuje danú expozíciu. Následne tak je ožiarenie zachytené senzorom, emitujúcim súvislé signály jednotlivých bodov tvoriacich obraz $z_{ij} = f(E_{ij}) = f(w_{ij}\Delta t)$. Na záver je výstup senzora digitalizovaný kvantovacím obvodom generujúcim diskkrétne číselné hodnoty pixelu $d_{ij} = \hat{f}(z_{ij})$



Obrázok 3.1: **Zreťazený proces získania obrazu** zobrazuje premenu vstupujúceho žiarenia zo scény v číselné hodnoty pixelov, za použitia predom neznámej nelineárnej mapovacej funkcie.

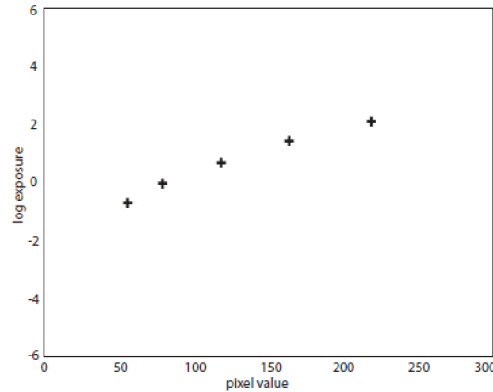
Vychádzajúc z vyvedených vzťahov, pre korektné (nemapované) určenie prijímaného žiarenia je tak potrebné vyjadriť spojitú funkciu odrazu f z hodnôt z alebo diskkrétne funkciu odrazu z hodnôt d .

3.5 Klasifikácia

K zostaveniu funkcie krivky odrazu je potrebné získať dostatočné množstvo relevantných hodnôt pixelov. Použitie rozličných spôsobov získania a spracovania dát vedie k rozličným metódam fotometrickej kalibrácie a k rekonštrukcii vysokého dynamického rozsahu.

Fotometrická kalibrácia predstavuje vytvorenie funkcie, ktorá zaistí, že nameraná hodnota bude odpovedať veľkosti prijímaného žiarenia zo scény. K tejto funkcii pritom musí byť možné vytvoriť jej inverznú funkciu. Takto sme pomocou hodnôt pixelov a zvážením použitej expozície schopní zostaviť odpovedajúcu svetelnú mapu scény.

Jednoduchým riešením vytvorenia krivky odrazu môže byť zosnímanie skupiny známeho žiarenia w . Z týchto dvojíc (w, d) dát je potom jednoduché zostaviť funkciu f . Obrázok 3.2 zobrazuje príklad vzorkovaných dát použitých ku kalibrácii.



Obrázok 3.2: Graf závislosti intenzity vzoriek od použitej expozície

Techniky využívajúce takéto referenčné hodnoty žiarenia sa označujú ako *metódy založené na kalibračnom grafe*. Procedúra kalibrácie závisí na rovnomernom osvetlení obrazu kalibračného grafu v kontrolovanom prostredí.

Vychádzajúc ale z analýzy v podkapitole 3.3, kedy pri snímkach nemáme žiadne informácie o svetelných podmienkach v scéne, sú tieto metódy pre rekonštrukciu dynamického rozsahu nepoužiteľné.

Pri metóde skladania fotografií rovnamej scény zohráva práve kľúčovú úlohu variácia expozícií Δt_k a hodnoty pixelov $d_{ij,k}$ odpovedajúce neznámemu konštantnému žiareniu $w_{ij,k}$. Takto dostaneme množinu dvojíc $(E_k, d_{ij,k})$, kde $E_k = w_{ij}\Delta t_k$ a $d_{ij,k} = f(E_k)$, čo sú v podstate vzorky funkcie odrazu fotoaparátu. Takto dostávame rovnaký informačný základ ako metódy založené na kalibračnom grafe. Nakoľko neznáme žiarenie je nemenné, ovplyvňuje výsledok jedine konštantným násobiteľom, a preto môže byť v tomto prípade zanedbané. Tak sme napokon *schopní zostaviť tabuľku reprezentujúcu funkciu odrazu*.

Základná myšlienka tohto postupu zvažuje hodnoty jedného pixelu (ij) . To si vyžaduje veľké množstvo snímkov použitých ku kalibrácii a navyše predstavuje neefektívnosť riešenia, nakoľko obraz má veľké množstvo pixelov vystavených rozličnému žiareniu.

Použitie informácií zo všetkých pixelov redukuje množstvo potrebných vstupných obrázkov a aproximuje funkciu presnejšie. To ale predstavuje najzložitejšiu úlohu, v ktorej sa líši väčšina existujúcich metód používaných k dosiahnutiu vysokého dynamického rozsahu skladaním fotografií.

Na základe uvedených skutočností môžeme *klasifikovať nasledujúce kritériá charakterizujúce metódu HDR*:

1. Typ použitej funkcie odrazu fotoaparátu
2. Štruktúra algoritmu
3. Stratégia výberu pixelov

Typ charakteristickej funkcie odrazu

Môžeme použiť parametrickú alebo neparametrickú reprezentáciu funkcie odrazu. Neparametrická reprezentácia predstavuje spomínanú diskretnú funkciu založenú na tabuľke vzoriek. Parametrická je väčšinou daná polynomicou funkciou vysokého rádu.

Štruktúra algoritmu

Počet výpočtových stupňov určuje štruktúru algoritmu. V prvom kroku môžeme stanoviť krivku odrazu a následne v druhom ju aplikovať na rekonštrukciu svetelnej mapy scény. Jednokroková metóda počíta krivku odrazu a svetelnú scénu v jednom kroku.

Stratégia výberu pixelov

Možeme zvoliť istú skupinu pixelov obrazu a predpokladať vzťah medzi hodnotou pixelu v sekvencii expozícií a daného bodu scény. Inú alternatívu predstavuje priamo práca s histogramami, kedy zvažujeme vzťah medzi určitým počtom najsvetlejších pixelov v každom obrázku.

3.6 Algoritmus skladania fotografií

Predstavme si skupinu hodnôt pixelov v obraze na pozíciách $d_{ij,k}$ s odpovedajúcou expozíciou Δt_k , kde k predstavuje index tejto expozície, čiže $k = 1, \dots, K$. Hodnota pixelu u týchto párov odpovedá konštantnému žiareniu dopadajúcemu na senzor určitý expozičný čas, čiže $(d_{ij,k}, w_{ij}\Delta t_k)$. Tieto hodnoty tak tvoria časť krivky odrazu, ktorá je ale ovplyvnená konštantou reprezentujúcou dopadajúce ustálené žiarenie w_{ij} . Dvojice možno vytvoriť pre každý bod obrazu, kedy takto dostaneme mnoho dielčích častí krivky odrazu. Problém nastáva vo vzájomnom napojení jednotlivých častí, keďže neznáme konštantné žiarenie je v jednotlivých častiach obrazu odlišné. Preto hlavným problémom ostáva zostavenie funkcie, ktorá zreparuje tieto časti v jednotnú súvislú krivku odrazu senzora.

Obrázok 3.3 zobrazuje spomínaný problém, ktorý zobrazuje tri rozdielne pozície pixelu v piatich expozíciách a ich následné spojenie vhodnou funkciou v súvislú monotónnu krivku $g(d_{ij})$.

Z tohoto dôvodu som pri návrhu algoritmu vychádzal z dvojkrokovej metódy HDR rekonštrukcie s neparametrickou reprezentáciou funkcie odrazu, predstavenou Debevecom a Malikom [5]. Tí vychádzajú zo skutočnosti, že funkcia krivky odrazu

$$d_{ij} = f(w_{ij,k}\Delta t_k) \quad (3.1)$$

je monotónna, preto je možné zostaviť funkciu jej inverznú:

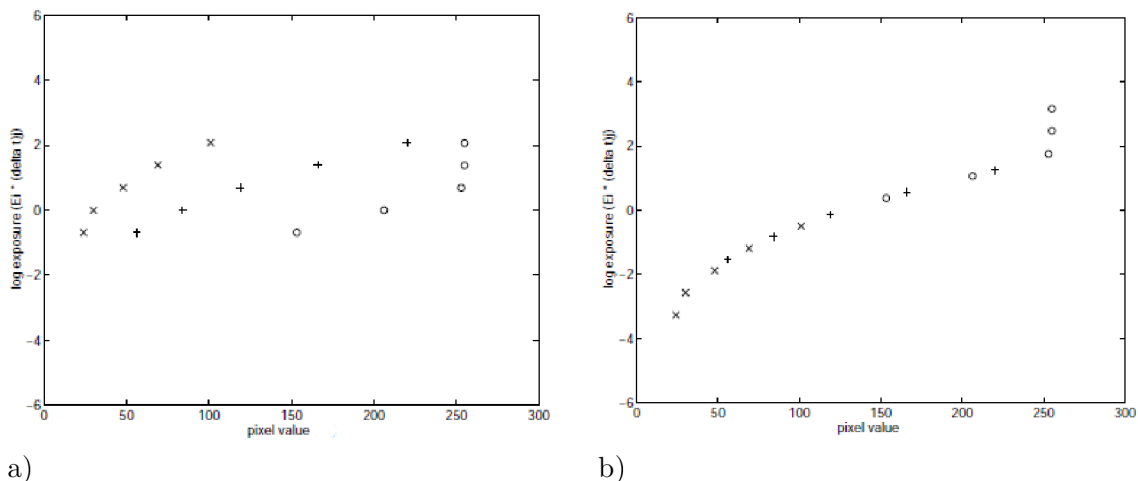
$$f^{-1}(d_{ij,k}) = w_{ij}\Delta t_k. \quad (3.2)$$

Zlogaritmovaním tejto rovnice dostaneme

$$\ln f^{-1}(d_{ij,k}) = \ln w_{ij} + \ln \Delta t_k. \quad (3.3)$$

Pre zjednodušenie definujeme funkciu $g = \ln f^{-1}(d_{ij,k})$, následne tak dostaneme

$$\ln w_{ij} = g(d_{ij,k}) - \ln \Delta t_k. \quad (3.4)$$



Obrázok 3.3: V a) symboly \times reprezentujú vzorky krivky odrazu získané z číselných hodnôt jedného pixelu z piatich rozličných expozícií nemennej scény. Obdobne tak symboly $+$ a \circ tvoria ďalšie dva pixely. Obrázok b) zobrazuje jednotnú plynulú monotónnu krivku, vytvorenú vertikálnym posuvom jednotlivých segmentov vzoriek. Obecná zvislá poloha výslednej krivky je nepodstatná, hlavná je len vzájomá poloha jednotlivých vzoriek.

Neznáme veličiny tak ostávajú w_{ij} a g , kde w je veľkosť skutočného žiarenia v scéne a g nepredstavuje nič iné ako charakteristickú funkciu odrazu. Fotometrickou kalibráciou na základe vzoriek obrazov rozdielne exponovaných, uvedenou bližšie v 3.4, môžeme zostaviť charakteristickú funkciu odrazu.

Z obrázka 3.3b) je jednoznačne rozoznateľná narastajúca strmosť krivky prechodom do jej extrémov. Tá odráža tendenciu senzora neodpovedajúco mapovať hodnoty žiarenia hraničiace s jeho rozsahom. Preto je potreba aplikovať vhodnú váhovú funkciu h , ktorá dá menšiu váhu pixelom s hodnotou vzdialujúcou sa od stredu rozsahu. Pre získanie mapy jasov scény sú totiž rozhodujúce korektne exponované hodnoty pixelov.

Výslednú hodnotu žiarenia v scéne tak dostávame aplikovaním váhovej funkcie do vzťahu 3.4 pre určitý konečný počet rôzne exponovaných snímkov:

$$\ln w_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K h(d_{ij,k})(g(d_{ij,k}) - \ln \Delta t_k)}{\sum_{k=1}^K h(d_{ij,k})}. \quad (3.5)$$

Implementáciou tejto funkcie s vhodným návrhom funkcie krivky odrazu, a taktiež váhovej funkcie sme schopní spočítať hodnotu jasov, ktorá odpovedá reálnemu žiareniu.

Kapitola 4

Realizácia

V predchádzajúcich kapitolách bolo popísané množstvo získaných informácií z rádiometrie, fotometrie a praktickej fotografie. Z týchto znalostí som následne vychádzal pri realizácii samotnej aplikácie.

Z celkového pohľadu je problematika tvorby HDR veľmi rozsiahla a netriviálna, predstavuje mnoho dielčích problémov od rekonštrukcie spektrálnej krivky odrazu až po mapovanie tónov. Tieto znalosti prirodzene nemožno vyžadovať od fotografa - užívateľa programu. Z toho dôvodu som sa pri práci držal pravidla, že vzniklá aplikácia by mala byť akousi abstraktnou nadstavbou nad celou problematikou získavania HDR obrazu, vyžadovať čo najmenej znalostí samotného užívateľa.

Pri tvorbe aplikácie som sa rozhodol využiť framework Qt [7], ktorý spĺňa moje požiadavky na prehľadné, intuitívne grafické užívateľské rozhranie a multiplatformnosť. Taktiež poskytuje kvalitnú nadstavbu práce s jednotlivými farebnými kanálmi LDR obrázkov. Za implementačný jazyk bol zvolený jazyk C++.

Kapitola oboznamuje čitateľa s postupom práce pri vytváraní aplikácie generujúcej HDR fotografiu na základe viacerých zdrojových snímok rovnakej scény s rôznou expozíciou. Realizácia je založená na analytickom a implementačnom riešení problémov vyplývajúcich z analýzy v predchádzajúcej kapitole (3).

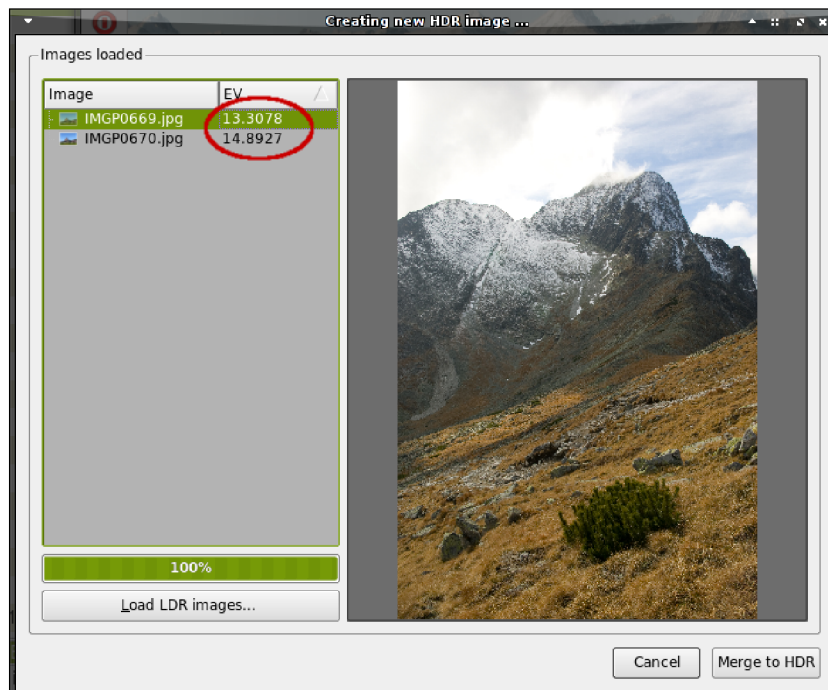
V nasledujúcich oddieloch je stručne popísaný priebeh práce, vychádzajúci z dosiaľ nazbieraných a v tejto práci spomínaných poznatkov.

4.1 Detekcia rozdielu expozícií

Hodnoty pixelov jednotlivých snímok sa u vstupných fotografiách rovnakej scény prirodzene líšia. Odrážajú totiž množstvo žiarenia dopadajúceho na senzor. Toto množstvo ovplyvňuje nastavenie clony, expozičného času ako aj citlivosti senzora, spolu popisujúcich expozíciu daného snímku. Pre začlenenie relatívnej hodnoty pixelu do absolútnej voči ostatným snímkom je potreba najprv detekovať a charakterizovať expozíciu.

Informácie o nastavení fotoaparátu, ktorým bola poriadaná snímka zahŕňa štandard EXIF, ktorý tvorí metadata väčšiny obrazových formátov [1]. V programe som použil knižnicu na manipuláciu s týmito metadatami zvanú `exiv2` [11]. Expozíciu charakterizujem zavedením veličiny E_V , ktorá zohľadňuje aspekty ovplyvňujúce hodnoty pixelov. Môj výpočet E_V hodnoty vychádza zo vzťahov popísaných v podkapitole 2.4.

Obrázok 4.1 zobrazuje dialógové okno aplikácie pre načítanie vstupných snímok. Expozičná hodnota E_V sa vypočíta a zobrazí spolu s načítanou fotografiou.



Obrázok 4.1: Dialógové okno pre načítanie vstupných LDR fotografií použitých k vygenerovaniu výsledného obrazu

4.2 Funkcia charakteristickej krivky odrazu

Snímaním scény za použitia viacerých expozícií bude mať každý jednotlivý obraz rozličné hodnoty pixelov správne exponovaných, ostatné budú pod alebo preexponované. Na základe experimentovania zo zostavením špecifickej spektrálnej krivky odrazu, kedy samotný proces kalibrácie trvá neúmernú dobu (vyše 3 minút) a výsledná nájdená krivka neprináša očakávané výsledky, rozhodol som sa implementovať preddefinovanú *lineárnu charakteristickú krivku odrazu*. Tá pri použití vhodnej váhovej funkcie zostavuje veľmi kvalitný odpovedajúci obraz.

4.3 Preexponované, podexponované hodnoty

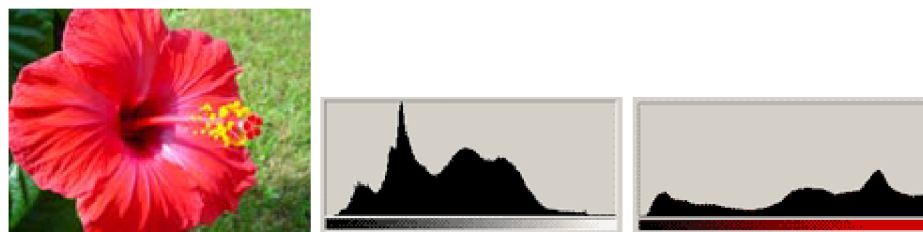
Počas návrhu aplikácie, presnejšie pri špecifikácii požiadavok na vstupné dáta, nemožno klásť žiadne obmedzenia na jednotlivé hodnoty pixelov. Vzhľadom k tomu, že senzory fotoaparátov disponujú malým tonálnym rozsahom, často dochádza k situácii, kedy hodnoty pixelov nenesú žiadne relevantné informácie o scéne. Tieto hodnoty by ale mohli ovplyvniť algoritmus v negatívnom smere, preto ich treba z úvahy úplne vylúčiť.

Detekcia preexponovaných alebo podexponovaných pixelov vychádzajúca z hodnoty jasu predstavuje triviálny problém. V praxi sa ale môžeme stretnúť s fotografiou, ktorej jednotlivé pixely sa nám aj po vyčítaní histogramu budú zdať korektné, napriek tomu že neodrážajú správne pomer zložiek jasu voči žiareniu dopadajúcemu zo scény na snímač.

Vychádzajúc z trichromatického základu fotoaparátov, bližšie špecifikovaného v kapitole 2, každý farebný kanál sa podieľa na výslednej intenzite I , určitou svojou váhou:

$I = 0,299R + 0,587G + 0,114B$. Tak môže ľahko nastať situácia, kedy dôjde k presiahnutiu tonálneho rozsahu snímača len v jednej farbe. Najčastejšie u minoritných zložiek - modrej prípadne červenj. Takýto príklad zobrazuje obrázok 4.2.

V aplikácii preto testujem *korektnosť jednotlivých farebných zložiek*, nie hodnotu celkovú hodnotu jasu pixelu.



Obrázok 4.2: Naľavo fotografia poriadaná za jasného slnečného počasia, v strede jasový histogram zobrazujúci korektnú expozíciu, vpravo histogram R zložky zobrazujúci preexponované hodnoty červeného kanálu. Autor: <http://www.fotoroman.cz>

4.4 Váhová funkcia

Obrázok 4.3 zobrazuje relevantnosť jednotlivých hodnôt obrazu k skutočnému relatívnemu žiareniu zastúpenému v scéne. Modrá farba vyžaduje použite dlhého expozičného času pre získanie relevantnej hodnoty jasu odpovedajúcej svetelným podmienkam reálnej scény. Zelená farba opisuje stredne dlhé expozičné časy a červená krátke. Z obrázka je tak názorne vidieť, že väčšina bodov tvorí zmes rôznych expozií, no len pár hodnôt závisí čiste na extrémnych expozičných časov (príliš dlhých alebo naopak krátkych). Keďže týchto pár hodnôt bude vo väčšine expozií obsahovať nerelevantné informácie, je potreba im patrične pripísať menšiu váhu.



Obrázok 4.3: Obrázky naľavo tvoria príklad sekvencie expozícií oddelených 2 f-rád. Vpravo je farebne zvýraznená závislosť korektné zachytených pixelov od použitej expozície. Modrá časť vyžaduje dlhé expozičné časy, zelená stredné a červená krátke. Väčšiu informačnú váhu pixelov tak predstavuje zelená farba.

Z toho dôvodu som zaviedol nasledovnú *váhovú funkciu*, ktorá pripisuje väčšiu váhu pixelom nachádzajúcim sa v strede rozsahu:

$$h(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{pre } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{pre } z \geq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}), \end{cases}$$

4.5 Štruktúra algoritmu

Aplikovaním HDR metódy získame hodnotu jasu pokrývajúcu vysoký dynamický rozsah scény. V digitálnej fotografii ale musíme uvažovať farebné fotografie, preto je potreba použiť uvedenú metódu výberu bodov jednotlivo pre každý farebný kanál pixelu. Hlavnú časť navrhnutého algoritmu generujúceho farebnú HDR fotografiu zo skupiny fotografií rovnakej scény s rozličnou expozíciou, ktorý som implementoval v aplikácii, čiastočne popisuje nasledujúci pseudokód:

```

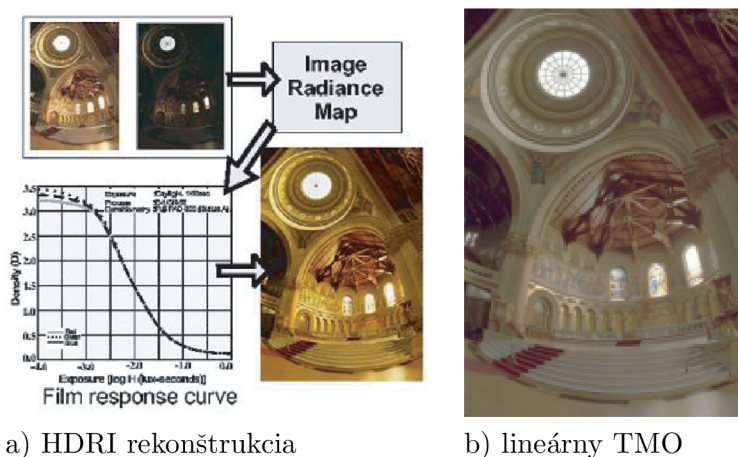
for each PIXEL_OBRAZU do begin
  vahaR = 0, vahaG = 0, vahaB = 0, vaha = 0;
  hranicaMax = max, hranicaMin = min;
  for each SNIMOK do begin
    R = VycitajHodnotu(Red);
    G = VycitajHodnotu(Green);
    B = VycitajHodnotu(Blue);
    expoSnimku = VypocitajExpoziciu();
    if ( R<min OR G<min OR B<min) AND expoSnimku>hranicaMin then
      podExpR = R; podExpG = G; podExpB = B; hranicaMin = expoSnimku;
    if ( R>max OR G>max OR B>max) AND expoSnimku<hranicaMax then
      preExpR = R; preExpG = G; preExpB = B; hranicaMax = expoSnimku;
  end //for each SNIMOK
  vahaPixelu = (aplVahovuFnc(R) + aplVahovuFnc(G) + aplVahovuFnc(B)) / 3;
  vahaR += vahaPixelu * aplFncOdrazu(R) / expoSnimku;
  vahaG += vahaPixelu * aplFncOdrazu(G) / expoSnimku;
  vahaB += vahaPixelu * aplFncOdrazu(B) / expoSnimku;
  sumVaha += vahaPixelu;
  if sumVaha = 0 then
    if hranicaMin > min then
      vahaR += aplFncOdrazu(podExpR) / expoSnimku;
      vahaG += aplFncOdrazu(podExpG) / expoSnimku;
      vahaB += aplFncOdrazu(podExpB) / expoSnimku;
      vaha = 1;
    if hranicaMax < max then
      vahaR += aplFncOdrazu(preExpR) / expoSnimku;
      vahaG += aplFncOdrazu(preExpG) / expoSnimku;
      vahaB += aplFncOdrazu(preExpB) / expoSnimku;
      vaha = 1;
  vyslednyR = vahaR/vaha;
  vyslednyG = vahaG/vaha;
  vyslednyB = vahaB/vaha;
end //for each PIXEL

```

4.6 Vizualizácia HDR obrazu

Hlavným problém u HDR snímok spočíva v ich zobrazení. Súčasné možnosti konvenčných zobrazovacích zariadení (CRT/LCD) alebo papierovej tlače totiž nedisponujú schopnosťou prezentácie celého tonálneho rozlíšenia HDR obrazu. Pri zobrazení vysoko kontrastného obrazu tak strácame veľké množstvo detailov. Preto potrebujeme pred zobrazením namaľovať jednotlivé tóny HDR obrazu. Celkový kontrast vysokého dynamického rozsahu musí byť redukovaný, zatiaľ čo lokálny kontrast, nesúci najhodnotnejšie informácie, by mal zostať zachovaný (obr. 4.4). Z toho dôvodu vznikla technika vychádzajúca z vizuálneho systému človeka, zvaná *tone-mapping* [4].

Nakoľko problematika tone mapping-u zasahuje nad rámec bakalárskej práce, rozhodol som sa využiť časti otvoreného balíku *pfstools* [14]. Ten zabezpečuje ako reprezentáciu HDR obrazu v pamäti, tak tiež jeho zobrazenie, mapovaním rozsahu tónov do zobraziteľného intervalu.



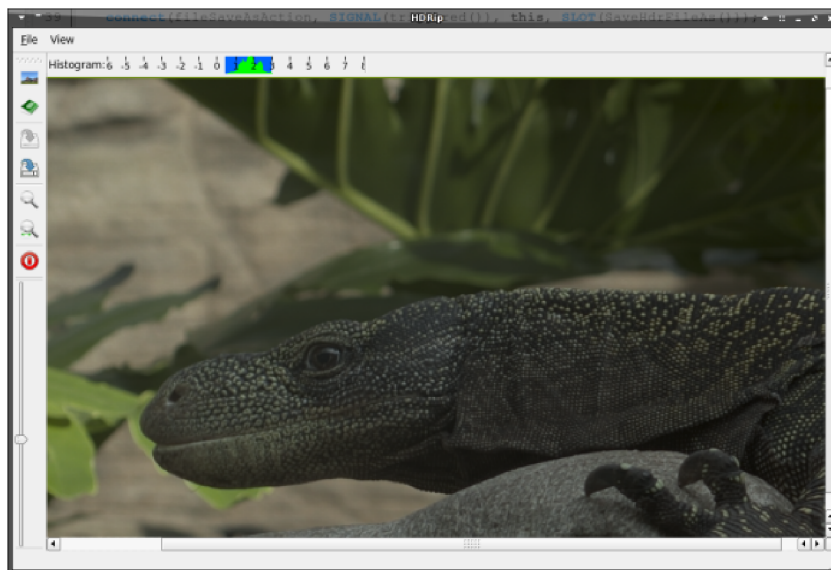
Obrázok 4.4: V a) rozdielne exponované LDR snímky jednej scény sú spracované za účelom dosiahnutia HDR svetelnej mapy. Pre vizualizáciu je tak následne na mapu aplikovaný tone-mappingový operátor (TMO). Viditeľný obraz b) je vizualizovaný aplikovaním lineárneho TMO.

4.7 Reprezentácia HDR obrazu

Reprezentácia HDR dát sa veľmi nelíši od bežnej reprezentácie obrazov. Zmenu prináša výskyt väčšieho rozsahu tónov, ktoré treba uchovať. Väčší tonálny rozsah si patrične vyžaduje väčšie tonálne rozlíšenie obrazu, ktoré dosiahneme navýšením počtu bitov pre každý farebný kanál. Existuje ale veľký rozdiel medzi navýšením tonálneho rozlíšenia a zväčšením rozsahu intenzity jasu zastúpeného v obraze. Môže totiž dôjsť k situácii, kedy zvýšenie tonálneho rozsahu neprinesie patričné zväčšenie rozsahu a naopak zaznamenaný vyšší dynamický rozsah sa nijako neprejaví pri menšom tonálnom rozlíšení. Preto je vhodné vždy zvážiť potrebu generovania a následného uchovania HDR obrazu vo vhodnom formáte.

Jednoduché navýšenie počtu bitov uchovávajúcich korešpondujúce hodnoty pixelov nemusí byť vhodné, nakoľko napríklad na reprezentovanie 30 stupňov magnitúdy¹ je potreba

¹Fotometrická veličina, udávajúca jasnosť objektu. V súčasných LDR fotografiách sa vyskytujú približne



Obrázok 4.5: Screenshot aplikácie

pri integerovej reprezentácii 100 bitov. Preto riešenie efektívnej reprezentácie HDR obrazov predstavuje použitie reálnych čísel s pohyblivou desatinnou čiarkou.

Číselný formát môže kódovať len diskkrétne veličiny, kvantovanie je tak nevyhnutné. Z toho dôvodu je rozhodujúcim faktorom HDR formátov kontrola chýb kvantovania vysokého rozsahu hodnôt. Existujú 2 hlavné spôsoby distribúcie chyby nad rozsahom hodnôt.

Na reprezentáciu obrazových dát aplikácia používa logaritmické kódovanie [8], ktoré je schopné udržať konštantnú relatívnu chybu nad celým rozsahom. Ako farebný model využíva CIE Luv farebný priestor [5], špecificky navrhnutý pre prácu s farebnými svetlami, čo presne korešponduje s obrázkami zachytenými fotoaparátom alebo grafickým rendrovacím programom. Aplikácia ukladá výsledky do 24-bitového HDR formátu LogLuv TIFF [3], ktorý využíva spomínané logaritmické kódovanie a CIE Luv farebný model.

dva stupne magnitúdy, pričom ľudské oko je schopné adaptovať sa magnitúde o veľkosti 10 stupňov [5].

Kapitola 5

Záver

Hlavné výhody nasadenia scény referenčných obrazov s vyšším dynamickým rozsahom spočívajú v ich nezávislosti na procese zobrazovania. Vhodne vytvorený HDR obraz pokrýva plný rozsah a citlivosť zraku človeka, preto spĺňa predpoklady svojho nasadenia vo virtuálnej realite s možnosťou plného využitia budúcich zobrazovacích technológií, ktoré nám zatiaľ nie sú známe.

Súčasná technika používaná v amatérskej fotografii

Vo fotografickej praxi má HDRI význam kvalitného archivátora. Fotografia, akokoľvek brilantne technicky zvládnutá, odráža svoju dobu. A tak masový nástup už dnes existujúcich HDR snímačov a HDR displejov môže priniesť novú éru digitálnej fotografie, v slabšej miere podobnú vynájdeniu farebného filmu.

Technika HDR, načrtnutá v tejto bakalárskej práci, predbieha nasadenie samotných HDR fotoaparátov a umožňuje už i v súčasnosti vytvoriť reálny obraz odzrkadľujúci scénu.

Súčasná bežne používaná fotografická technika skladania obrazu, zvané stacking (slovenský slangový ekvivalent „sendvičovanie“), sú založené na výbere korektne exponovaných častí obrazov a následne ich spájania do výslednej fotografie. Nakoľko sú postavené len na subjektívnom vneme človeka, nijako nezvyšujú tonálne rozlíšenie výstupnej fotografie a tiež odrážajú súčasnú zobrazovaciu možnosť, nemožno ich považovať za HDR fotografie.

U fotografie sa ale vždy pohybujeme v subjektívnej rovine, kde rozhodujúcim faktorom sa stáva práve subjektívny pocit pozorovateľa. Z toho dôvodu príkladám nižšie ukážky vytvorených HDR fotografií, na ktoré bola pre ilustratívne účely aplikovaná metóda tone mappingu.

Význam práce, motivácia

Cieľom práce bolo analyzovať metódy skladania fotografií rovnakej scény a na základe nich navrhnúť a implementovať aplikáciu generujúcu obraz so zvýšeným dynamickým rozsahom. Tento cieľ bol splnený.

Realizácia môže zo začiatku pôsobiť teoretickým dojmom. Je to spôsobené komplexnosťou témy okolo fotografického snímania obrazu a jeho následného spracovania. Počas práce bolo naštudované nespočetné množstvo literatúry okolo praktickej fotografie, vizuálneho systému človeka, teórie radiometrie, fotometrie, farebných modelov, až po výskumné práce v oblasti HDRI a tone mappingu.

Boli špecifikované a analyzované aspekty ovplyvňujúce snímanie scény a na základe nich navrhnutý postup pre správnu detekciu rozdielnych expozícií, ich vzájomné klasifikovanie pri tvorbe jednotnej svetelnej mapy scény.

Bol implementovaný algoritmus pre spracovanie teoreticky neobmedzeného počtu zdrojových fotografií, generujúci výsledný HDR snímok. Tento algoritmus bol zaobalený do aplikácie s intuitívnym užívateľským rozhraním, kde celý proces fotometrickej kalibrácie je užívateľovi transparentný. Z toho dôvodu umožňuje jednoduché generovanie HDR snímok, kde sa od užívateľa nevyžaduje odborná orientácia v danej problematike.

Je ale všeobecne známe, že žiaden vytvorený program nemožno hneď prehlásiť za hotový, na ktorom už nieje možné nič vylepšiť. Ani táto aplikácia nieje výnimkou, ba naopak svojimi možnosťami rozšírenia plne podporuje pravidlo.

Predovšetkým by bolo vhodné implementovať algoritmus pre určenie optimálnej vzájomnej polohy všetkých zdrojových snímok. Mnohokrát totiž nemožno ani použitím statívu a BKT snímania zaručiť statickosť citlivého objektívu. Ďalším prínosom môže byť odstránenie „duchov“, ktorých výskyt spôsobujú pohybujúce sa predmety snímanej scény.

Takýchto ďalších možných rozšírení existuje nespočetne mnoho, napr. redukcia šumu, odstránenie odlesku objektívu, export do ostatných HDR formátov ako HDR, EXR, PFS.

Celá problematika okolo spracovania obrazu založeného na vizuálnom systéme človeka prináša ohromujúce výsledky v posledných rokoch, získava stále viac na popularite. Sám som neodolal a začal spolupracovať na rozšírení jedného open-source programu zaoberajúceho sa problematikou HDRI.

Na záver si dovoľím citovať jedného vrcholného predstaviteľa maliarstva – Michelangela, ktorí v istom ponímaní sám svojimi kresbami tvoril obrazy s vyšším dynamickým rozsahom:

„Dokonalosť dosahujeme maličkosťami, ale dokonalosť sama nie je maličkosť.“

Literatúra

- [1] Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2. Technická zpráva, 2002, standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
URL <http://www.exif.org/Exif2-2.PDF>
- [2] DEBEVEC, P. E.; MALIK, J.: Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. In *SIGGRAPH 97*, Computer Science Division, University of California at Berkeley, 1997, s. 369–378.
- [3] HOLZER, B.: High Dynamic Range Image Formats. Vienna, Austria, 1997.
- [4] LARSON, G. W.; RUSHMEIER, H.; PIATKO, C.: A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Educational Activities Department, 1997, ISSN 1077-2626, s. 291–306.
- [5] REINHARD, E.; WARD, G.; PATTANAIK, S.; aj.: *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005, ISBN 0-12-585263-0.
- [6] SÁ, A. M.; CARVALHO, P. C.; VELHO, L.: *High Dynamic Range Image Reconstruction*. Morgan and Claypool Publishers, 2007, ISBN 1598295624.
- [7] Trolltech: Code Less, Create More – Trolltech. [online], 2008, [rev. 2008-04-28], [cit. 2008-04-30].
URL <http://trolltech.com>
- [8] Ward, G.: HDR Image Encodings. [online], 2008, [cit. 2008-04-29].
URL http://www.anyhere.com/gward/hdrenc/hdr_encodings.html
- [9] Fotografovani.cz - Digitální fotografie v praxi. [online], 2006, [cit. 2008-04-10].
URL <http://www.fotografovani.cz>
- [10] Cambridge in Colour. [online], 2007, [cit. 2008-04-14].
URL <http://www.cambridgeincolour.com>
- [11] Exiv2 - Image metadata library and tools. [online], 2008, [rev. 2008-03-06], [cit. 2008-04-25].
URL <http://www.exiv2.org>
- [12] Exposure value — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [online], 2008, [cit. 2008-04-30].
URL http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Exposure_value

- [13] HDR photo software plugin – Tone Mapping, Exposure Blending; HDR Imaging for photography. [online], 2008, [rev. 2008-03-28], [cit. 2008-04-13].
URL <http://www.hdrsoft.com>
- [14] pfstools for HDR processing. [online], 2008, [rev. 2008-02-08], [cit. 2008-04-25].
URL <http://www.mpi-inf.mpg.de/resources/pfstools>
- [15] ŽÁRA, J.; SOCHOR, B. B. J.; FELKEL, P.: *Moderní počítačová grafika*. Computer Press, 2005, ISBN 80-251-0454-0.

Zoznam použitých skratiek a symbolov

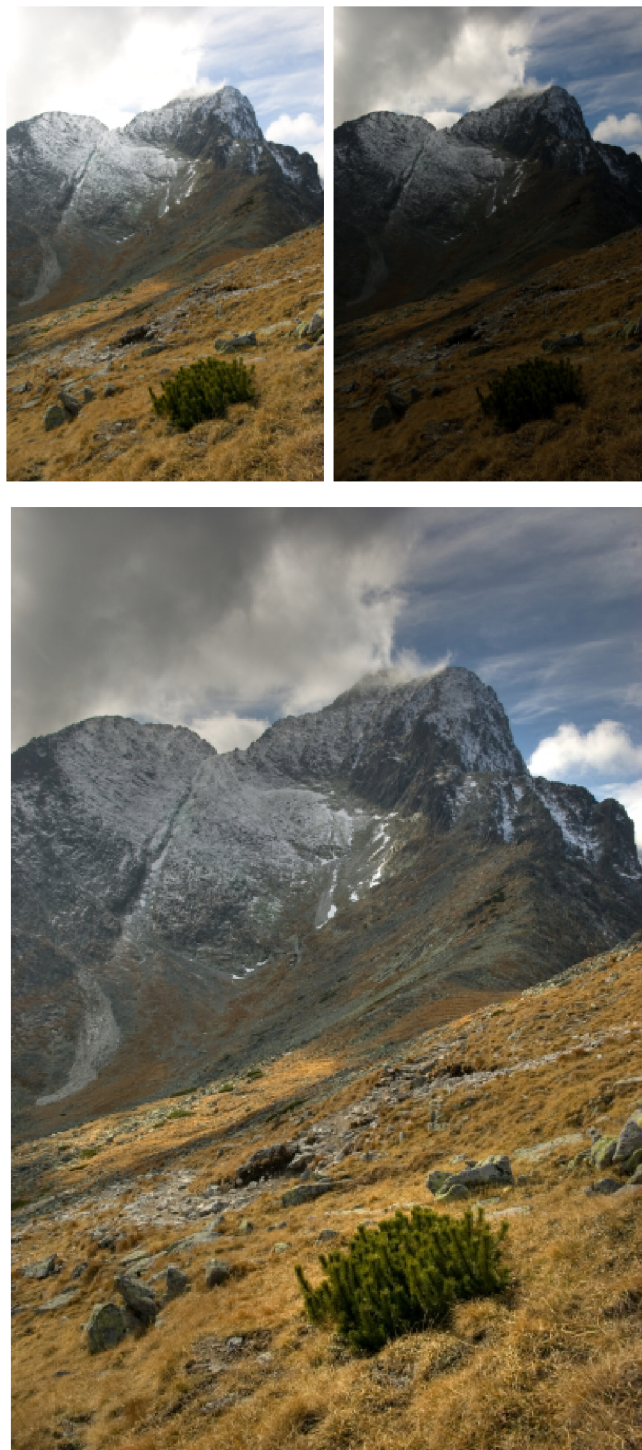
LDR	Low Dynamic Range
HDR	High Dynamic Range
HDRI	High Dynamic Range Imaging
E_V	Exposure Value
EXIF	Exchangeable Image File Format
RAW	surový obrazový formát
CRT	Cathode-Ray Tube
LCD	Liquid Crystal Display
TMO	Tone Mapping Operator
TIFF	Tagged Image File Format
CIE	International Commission on Illumination
BKT	Bracketing

Príloha A

Ilustratívna ukážka vytvorených HDR fotografií



Obrázok A.1: Leguán; 8 zdrojových snímkov, $f/6.3$, ISO 100, BKT s rozdielom $1E_V$



Obrázok A.2: Vysoké Tatry; 2 zdrojové snímky, $f/13.0$, ISO 100, BKT s rozdielom $1.5E_V$

Poznámka: Kvôli reprodukčným obmedzeniam prezentačných prostriedkov v oblasti tónov, bolo nutné pre prezentáciu výsledkov v textovej správe aplikovať na vygenerované HDR fotografie tone mapping-ovú metódu 3. strany [13]. Z tohto dôvodu uvedené fotografie v prílohe nazývam ilustratívnymi.

Príloha B

Dátový nosič CD

Obsah jednotlivých priečinkov:

`/prog` projekt s kompletnou implementáciou demonštračnej aplikácie

`/test` testovacie dáta – sady vstupných LDR fotografií

`/res1` výsledné vygenerované HDR fotografie, ktorých tonálny rozsah možno vidieť po otvorení v programe

`/mapp` spätne namapované HDR fotografie, možné korektne zobrazit' na konvenčnom monitore alebo vyvolať