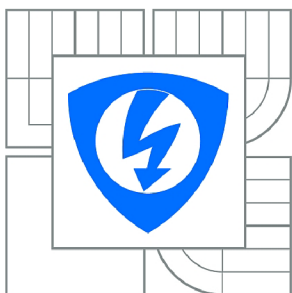


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# **MODERNÍ PROSTŘEDKY PRO DIGITÁLNÍ SNÍMÁNÍ SCÉNY**

MODERN METHODS FOR DIGITAL SCENE CAPTURING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

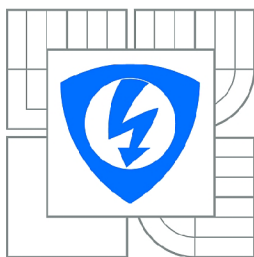
**Bc. PETR NOVÁČEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. PETR PETYOVSÝ**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Kybernetika, automatizace a měření

**Student:** Bc. Petr Nováček

**ID:** 134572

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Moderní prostředky pro digitální snímání scény**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je zdokumentovat a implementovat některé moderní metody snímání scény umožňující pořízení kvalitnějších dat, než jaké umožňují konvenční snímací metody.

1. Provedte literární průzkum věnovaný moderním metodám snímání scény.
2. Zvolte vhodné metody, kterým se budete dále věnovat a definujte u těchto metod jejich možnosti i omezení.
3. Vytvořte vhodnou scénu a pro zvolené metody pořiďte databázi dat nasnímané scény.
4. Navrhněte vlastní algoritmy pro zpracování pořízených dat.
5. Implementujte vlastní algoritmy pro zpracování dat pořízených danou metodou snímání.
6. Demonstrujte výsledné snímky pro každou ze zvolených metod.
7. Zhodnoťte dosažené výsledky, srovnajte vhodnost použití jednotlivých metod, navrhněte možná vylepšení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BRADSKI, G.; KAEHLER, A.: Learning OpenCV, O'Reilly, 2008, ISBN 978-0-596-51613-0.  
[2] SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd Edition, Thomson 2007, ISBN 049508252X.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 18.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Petyovský

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

# Abstrakt

Tato práce se zabývá porovnáním konvenčních a moderních metod digitálního snímání scény. Cílem práce je porovnání snímání pomocí senzorů CMOS s Bayerovou maskou a Foveon X3 Merrill a následné navržení algoritmů pro vytvoření snímků kombinujících přednosti obou senzorů.

Nejprve se práce zabývá představením a popisem metod a postupů vedoucích k pořízení záznamu scény. Další část práce se zabývá vytvořením galerie testovacích snímků a porovnáním obou senzorů na základě snímků této galerie. Dále jsou v práci navrženy algoritmy pro fúzi dat umožňující vytvořit snímky kombinující přednosti zvolených senzorů. Poslední část práce se věnuje zhodnocení výsledků.

# Abstract

The thesis composes conventional and modern methods for digital scene capturing. The target of the thesis is a comparison of CMOS with Bayer mask and Foveon X3 Merrill sensors followed by a design of algorithms for image fusion which can combine advantages of the both sensor types.

The thesis starts with an introduction and a description of methods and processes leading to scene capturing. The next part deals with capturing a gallery of test images and with a comparison of both sensors based on the gallery images. Further there are algorithms designed for image fusion which can combine advantages of the selected sensors. The last part of the thesis is devoted to an evaluation of results and of the used algorithms.

# Klíčová slova

pořízení scény, CCD senzor, CMOS senzor, Bayerova maska, Foveon X3, snímání světelného pole, stereoskopie, automatické ostření, barevný obraz, IQA algoritmy, přenos barev

# Keywords

scene capturing, CCD sensor, CMOS sensor, Bayer mask, Foveon X3, light field capturing, stereoscopy, autofocus, color image, IQA algorithms, color transfer

## **Bibliografická citace**

NOVÁČEK, P. Moderní prostředky pro digitální snímání scény. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 114 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Petyovský.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Moderní prostředky pro digitální snímání scény“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně <https://helpx.adobe.com/photoshop/camera-raw.html> možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: .....

.....  
(podpis autora)

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Petru Petyovskému za vedení práce, ochotu při konzultacích a mnoho cenných rad. Také bych rád poděkoval panu prof. RNDr. Pavlu Tománkovi, CSc. za konzultaci a hlubší náhled do fyzikální optiky. Velmi rád bych poděkoval také rodičům za podporu ve studiu.

© Petr Nováček, 2015

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

# Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>  | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>Technologie snímání</b>                         | <b>9</b>  |
| 2.1      | Snímací senzory . . . . .                          | 10        |
| 2.1.1    | CCD senzor . . . . .                               | 11        |
| 2.1.2    | CMOS senzor . . . . .                              | 13        |
| 2.1.3    | Srovnání CCD a CMOS senzorů . . . . .              | 15        |
| 2.2      | Barevná fotografie . . . . .                       | 16        |
| 2.3      | Senzor Foveon X3 . . . . .                         | 20        |
| 2.4      | Snímání světelného pole . . . . .                  | 24        |
| 2.5      | Pořízení 3D obrazu . . . . .                       | 29        |
| 2.5.1    | Stereoskopie . . . . .                             | 29        |
| 2.5.2    | Měření hloubky scény . . . . .                     | 34        |
| <b>3</b> | <b>Automatické zaostřování</b>                     | <b>36</b> |
| 3.1      | Detekce fáze . . . . .                             | 37        |
| 3.1.1    | Detekce fáze pomocí AF modulu . . . . .            | 38        |
| 3.1.2    | Detekce fáze pomocí snímacího čipu . . . . .       | 41        |
| 3.2      | Detekce kontrastu . . . . .                        | 42        |
| <b>4</b> | <b>Pořízení testovacích snímků</b>                 | <b>45</b> |
| 4.1      | Použité fotoaparáty . . . . .                      | 45        |
| 4.1.1    | Nastavení fotoaparátů . . . . .                    | 46        |
| 4.2      | Ostatní zařízení a pomůcky . . . . .               | 47        |
| 4.3      | Optické kalibry a snímané scény . . . . .          | 48        |
| 4.3.1    | Optické kalibry a textura . . . . .                | 49        |
| 4.3.2    | Modelová a přirozená scéna . . . . .               | 50        |
| <b>5</b> | <b>Algoritmy pro zpracování pořízených snímků</b>  | <b>51</b> |
| 5.1      | Hodnocení kvality obrazu . . . . .                 | 51        |
| 5.1.1    | Algoritmy pro hodnocení kvality obrazu . . . . .   | 51        |
| 5.1.2    | Porovnání a výběr vhodných IQA algoritmů . . . . . | 54        |
| 5.2      | Předzpracování pořízených snímků . . . . .         | 55        |
| 5.2.1    | Převod snímků ze surových dat . . . . .            | 55        |
| 5.2.2    | Zarovnání snímků . . . . .                         | 57        |
| 5.3      | Fúze snímků . . . . .                              | 59        |
| 5.3.1    | Kombinace rozdílů kanálů v prostoru RGB . . . . .  | 60        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.3.2    | Skládání kanálů v prostoru YCbCr . . . . .           | 62        |
| 5.3.3    | Histogram Matching . . . . .                         | 62        |
| 5.3.4    | Přenos barev mezi snímky . . . . .                   | 63        |
| <b>6</b> | <b>Návrh a implementace aplikace</b>                 | <b>66</b> |
| 6.1      | Převod z RAW dat a předzpracování snímků . . . . .   | 66        |
| 6.2      | Hodnocení kvality snímků . . . . .                   | 66        |
| 6.3      | Fúze snímků . . . . .                                | 67        |
| 6.4      | Uživatelské rozhraní aplikace . . . . .              | 67        |
| <b>7</b> | <b>Výsledky porovnání senzorů a hodnocení snímků</b> | <b>68</b> |
| 7.1      | Optické kalibry, textura a snímané scény . . . . .   | 68        |
| 7.1.1    | Barevný optický kalibr . . . . .                     | 68        |
| 7.1.2    | Optické frekvenční kalibry a textura . . . . .       | 70        |
| 7.1.3    | Modelová a přirozená scéna . . . . .                 | 74        |
| 7.2      | Výsledky fúze snímků . . . . .                       | 75        |
| 7.2.1    | Věrnost podání barev . . . . .                       | 75        |
| 7.2.2    | Textura a scény . . . . .                            | 75        |
| <b>8</b> | <b>Závěr</b>   | <b>78</b> |
| <b>A</b> | <b>Obsah příložených DVD</b>                         | <b>87</b> |
| <b>B</b> | <b>Manuál k aplikaci</b>                             | <b>88</b> |
| <b>C</b> | <b>Obrázky</b>                                       | <b>90</b> |
| <b>D</b> | <b>Grafy a tabulky</b>                               | <b>98</b> |

# Kapitola 1

## Úvod

V dnešní době rychlého technologického rozvoje je počítačové vidění a zpracování obrazu součástí velkého množství aplikací a člověk se s ním setkává téměř na každém kroku. Uplatnění nalézá například v zabezpečovací technice, navigaci, řízení průmyslových provozů, v mnoha oblastech kontroly, ať už v průmyslu nebo například v dopravě a také ve filmu a fotografii.

Jedním z velmi důležitých faktorů, které ovlivňují kvalitu záznamů kamer a fotoaparátů, je samotné pořízení obrazu. Lidé se snahou zaznamenat obraz zabývají už stovky let a mnoho z dnes využívaných konceptů a metod má základy v nápadech a teoriích, které byly prezentovány například už v 19. století. Vývoj záznamu obrazu je tak protkán mnoha důležitými milníky a zajímavými objevy, bez nichž bychom si dnes už naše životy dokázali jen stěží představit. Velmi výrazným obdobím je pak druhá polovina 20. století, která přinesla prudký rozvoj počítačových věd, což vedlo i k digitalizaci záznamu obrazu.

Tato diplomová práce se bude zabývat metodami digitálního snímání scény, které jsou dnes používané v drtivé většině aplikací. Především pak metodami, které přinesla poslední dvě desetiletí. Většina těchto moderních metod byla popsána nebo navržena a prezentována během minulých dvou století, avšak vzhledem k současnému technologickému pokroku je bylo možné přenést do praxe až v dnešní době.

Cílem první části práce je popsat jak konvenční, tak moderní metody pořízení obrazu. Tato teoretická část práce bude zaměřena především na samotný záznam obrazu a automatické zaostřování fotoaparátů.

Další část práce se pak bude věnovat porovnání senzoru CMOS s Bayerovou maskou, využitému ve fotoaparátu Nikon D3100, a doposud nepříliš rozšířenému, modernímu senzoru Foveon X3 Merrill, využívanému ve fotoaparátu Sigma DP2. Pro porovnání fotoaparátů bude pořízena galerie testovacích snímků a dále budou navrženy a prezentovány algoritmy pro předzpracování snímků umožňující následné porovnání kvality snímků. Pro porovnání kvality budou využity algoritmy IQA (Image Quality Assessment). Dále v práci budou navrženy a prezentovány algoritmy umožňující vylepšení snímků z obou testovaných senzorů za účelem získání snímků, kombinujících přednosti obou těchto senzorů.

Poslední část práce je pak věnována výsledkům porovnání senzorů a prezentaci snímků vytvořených algoritmy pro jejich vylepšení.



## Kapitola 2

# Technologie snímání

V historii fotografie [1] je možné najít velké množství zajímavých objevů a milníků. Dnešní teorie digitálních fotografií se v mnoha ohledech inspiruje poznatky starými více než století, jako například fotografickým filmem nebo šedotónovou fotografií.

Jednou z vůbec prvních dochovaných fotografií (Obr. 2.1) je černobílá fotografie Josepha Nicéphorea Niépce, která zobrazuje pohled z okna jeho bytu. V roce 1826 dokázal při pořízení této fotografie jako první člověk spojit tehdejší poznatky o dírkové kameře a o látkách, které se dokáží měnit, pokud jsou vystaveny působení viditelného světla.



Obrázek 2.1: Pohled z okna J. N. Niépce v Le Gras [2]

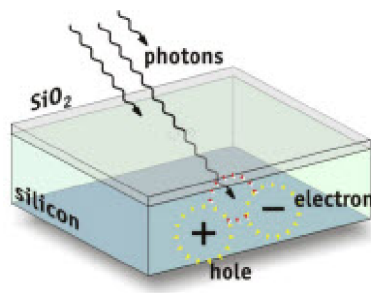
Tato kapitola se v první části bude zabývat konvenčními metodami digitálního pořízení obrazu, které jsou v dnešní době využívány v naprosté většině aplikací. Druhá část kapitoly se pak bude věnovat metodám moderním, které na rozdíl od konvenčních v praxi existují relativně krátkou dobu a jsou zatím využívány ve velmi omezené míře.

Jako konvenční metody pořízení digitální scény můžeme označit ty postupy, které umožňují jak pořízení binárních, šedotónových, tak i barevných obrazů. První senzor pro digitální pořízení šedotónové scény byl CCD senzor, vyvinutý již před 45 lety. Od té doby je věnováno vývoji tohoto odvětví značné úsilí, které vyústilo ve vývoj CMOS senzoru a metod pořízení barevné fotografie překrytím senzoru barevnou maskou, což umožňuje přiřadit jednotlivým pixelům senzoru barevnou informaci.

Moderní metody pořízení scény umožňují stejně jako ty konvenční záznam šedotónového či barevného obrazu, ovšem k pořízení obrazu využívají odlišné postupy, které jsou sice teoreticky známy velmi dlouhou dobu, ovšem až technologie posledních dvou desetiletí umožňují jejich zavedení do praxe. První z těchto metod je senzor Foveon X3, který je inspirován záznamem scény na barevný film a k pořízení barevného obrazu využívá absorpci světla v křemíkovém substrátu. Další metodou je pak snímání světelného pole, které umožňuje zaznamenat scénu s celým rozsahem hloubky ostrosti a výslednou hloubku určit až po pořízení fotografie. Poslední metodou, která bude popsána v této kapitole je pořízení 3D obrazu, které prochází v posledních letech intenzivním rozvojem a je mu věnován stále větší prostor na poli filmu i fotografie.

## 2.1 Snímací senzory

Při zachycení digitálního obrazu [3] pomocí fotoaparátu nebo kamery dochází k průchodu světla skrze objektiv a následně jeho dopadu na obrazový senzor, který se skládá z určitého počtu obrazových bodů, zvaných pixely. Každý pixel pak, s využitím fotoelektrického jevu (Obr. 2.2), zaznamenává množství světla (fotonů), které na něj dopadá. Dopadající světlo vygeneruje jemu odpovídající množství párů elektron-díra, přičemž čím více světla na pixel dopadá, tím více těchto párů je v pixelu generováno. Elektrický náboj na jednom pixelu je následně převeden na napětí a dále pomocí A/D převodníku na číslo charakterizující množství dopadeného světla na tento pixel.



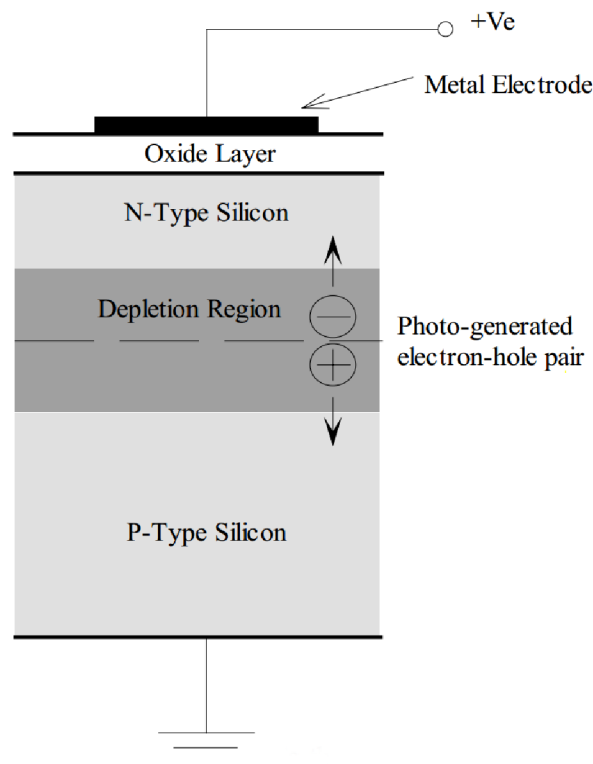
Obrázek 2.2: Princip fotoelektrického jevu [4]

V současné době jsou k záznamu obrazu ve většině aplikací využívány technologie senzorů CCD (Charge-coupled Device) nebo CMOS (Complementary Metal-oxide Semiconductor). Tyto obrazové senzory zaznamenávají množství dopadajícího světla bez informace o barvě. Výstupem je tedy monochromatický obraz. Pro pořízení barevných obrazů je nutné před sensor umístit barevný filtr, který ke každému pixelu propustí jen světlo dané barvy (dané vlnové délky). Pořízení barevných obrazů je popsáno v následující podkapitole (Kap. 2.2).

### 2.1.1 CCD senzor

Tento senzor [5] byl vynalezen Willardem Boylem a Georgem Smithem z Bellových laboratoří v USA již roku 1970, při výzkumu v té době využívaných, magnetických bublinových pamětí. CCD senzory se vyrábějí ve variantách lineárních senzorů nebo senzorů představující 2D pole. Jeden z prvních senzorů typu 2D pole, který byl vyroben v roce 1974, měl rozlišení 100 x 100 pixelů. V dnešní době se přitom využívají CCD senzory s rozlišením až okolo 10 000 x 10 000 pixelů.

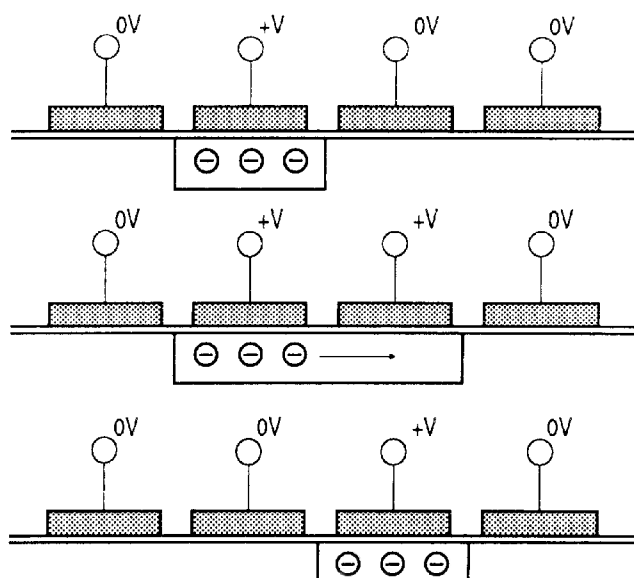
CCD senzory jsou integrované obvody, kde jednotlivé pixely představují MOS (metal-oxide-semiconductor) kondenzátory (Obr. 2.3). MOS kondenzátory běžně sestávají z vrstvy substrátu křemíku typu P (P-Type Silicon) a vrstvy substrátu křemíku typu N (N-Type Silicon). Na substrátu křemíku typu N je umístěna vrstva oxidu křemíku (Oxide Layer) a na ní je pak umístěna kovová elektroda (Metal Electrode).



Obrázek 2.3: MOS kondenzátor [5]

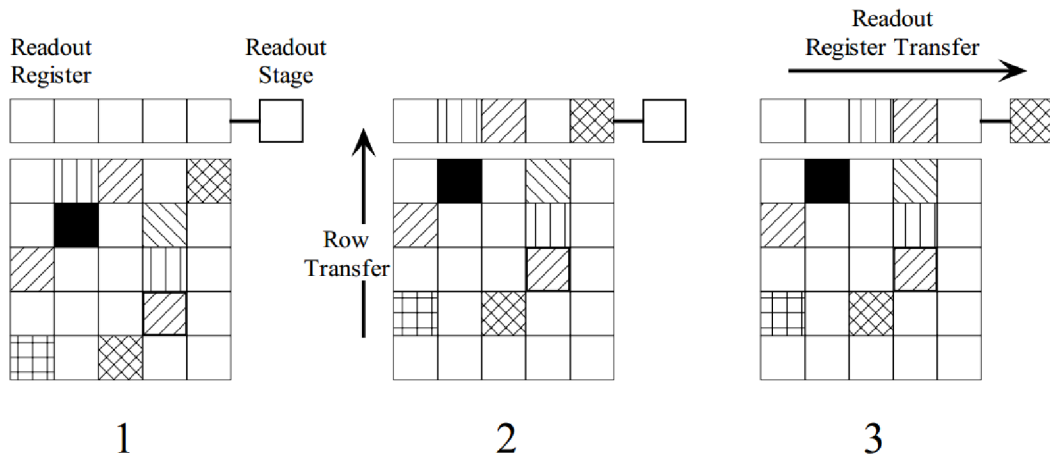
Při přivedení kladného napětí na P-N přechod kondenzátoru dojde k vytvoření potenciálové jámy v oblasti substrátu křemíku typu N. Při dopadu fotonů na P-N přechod jsou vygenerovány páry elektron-díra a vlivem přiloženého kladného napětí jsou elektrony posunovány směrem k elektrodě přes vrstvu křemíku typu N a jsou zachyceny potenciálovou jámou. Takto vzniklý záporný náboj je úměrný množství dopadajících fotonů.

Po uplynutí doby expozice (nebo též doby integrace) je náboj zachycený v potenciálových jámách převeden mimo senzor (vyčten) a digitalizován. Proces vyčtení náboje z jednotlivých pixelů senzoru se dělí na dvě fáze. První fází je posun nábojů po senzoru k registru, druhou částí je pak vyčtení registru a digitalizace hodnot z něj vyčtených.



Obrázek 2.4: Posun náboje mezi pixely CCD senzoru [6]

Registr pro vyčtení nábojů ze senzoru je tvořen, stejně jako pixely senzoru, z MOS kondenzátorů, pouze s tím rozdílem, že tyto kondenzátory jsou zakryté vrstvou zajišťující, že na ně nebude dopadat žádné světlo. Posun nábojů po senzoru k registru pak probíhá vždy po celých řádcích. Jak bylo řečeno, na pixel, který drží v potenciálové jámě náboj, je přiváděno kladné napětí. Kladné napětí je následně přivedeno i na vedlejší pixel, přes který bude posun náboje probíhat (pro první řádek pixelů je to přímo registr). Část náboje se takto rozprostře přes dva pixely a odpojením kladného napětí od původního pixelu dojde k přenosu zbytku náboje na následující pixel, jak znázorňuje obrázek (Obr. 2.4). Tento proces pak řídí tzv. pixel clock, tedy hodinový signál, určující svou náběžnou a sestupnou hranou, kdy jsou na kterém pixelu platná data.



Obrázek 2.5: Princip získání dat z CCD senzoru [5]

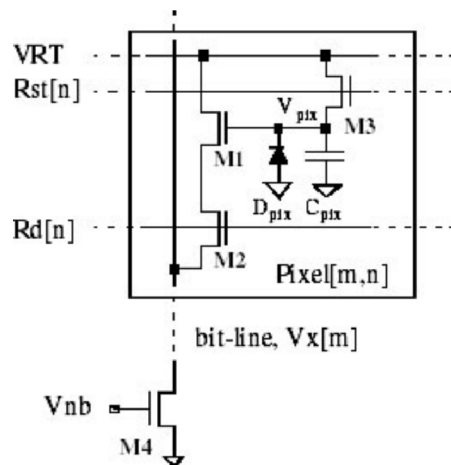
Po přesunu celého řádku pixelů do registru jsou jednotlivé pixely z registru postupně přesunuty do A/D převodníku a digitalizovány, jak lze vidět na obrázku (Obr. 2.5).

Postup přesunu řádků do registru a jejich následné vyčtení a digitalizace je tožný jak pro řádkové, tak pro 2D CCD senzory. Jediným rozdílem je, že v případě řádkového senzoru je pro jeho celé vyčtení nutný přesun pouze jeho jednoho řádku do registru a jeho následná digitalizace, zatímco u 2D senzoru je nutné postupně vyčíst a digitalizovat všechny řádky pixelů.

### 2.1.2 CMOS senzor

Senzor typu CMOS byl vynalezen roku 1963 Frankem Marionem Wanlassem [7, 8] ve společnosti Fairchild Semiconductor a následně patentován v roce 1967. Vzhledem k výrazně složitější struktuře integrovaných obvodů však bylo možné tyto senzory komerčně vyrábět až mnohem později než CCD senzory. První komerční CMOS senzory byly vyrobeny v roce 1993 v Jet Propulsion Laboratory [5].

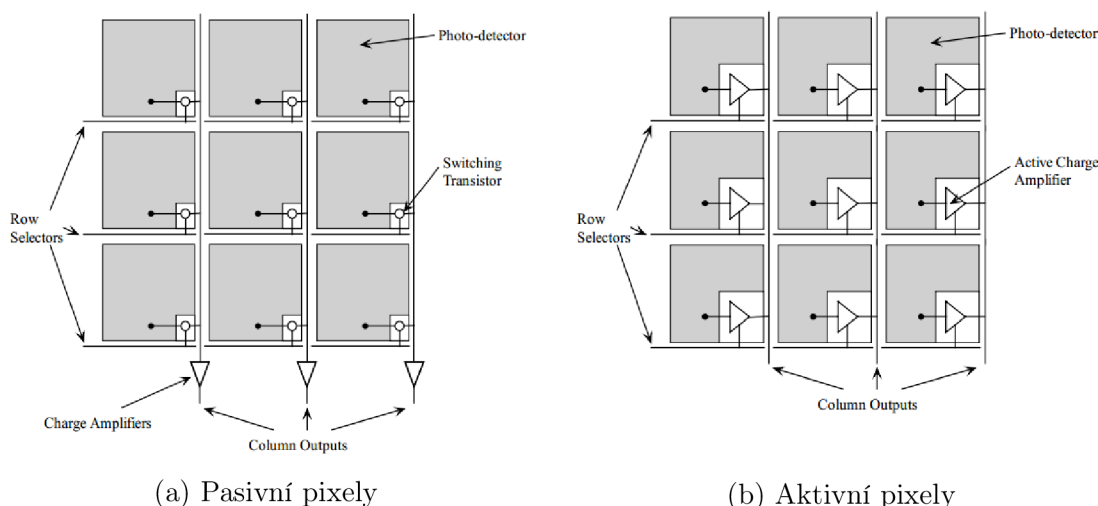
CMOS senzor [5] je obdobně jako CCD senzor tvořen polem fotocitlivých prvků (pixelů), které jsou schopny přeměňovat dopadající světlo na elektrický signál. Existuje několik variant pixelů CMOS senzorů. Jedna z možných je zobrazena na obrázku (Obr. 2.6), kde je pixel tvořen integrovaným obvodem s fotodiodou, kondenzátorem a třemi tranzistory.



Obrázek 2.6: Aktivní pixel CMOS senzoru [5]

Před začátkem expozice (integrace) obrazu na senzoru je u tohoto typu pixelu kondenzátor nabit na určitou známou hodnotu napětí. Při začátku integrace je pak sepnut obvod tranzistorem M3 a kondenzátor se začne vybíjet přes fotodiodu. Úbytek napětí je pak úměrný množství světla dopadajícímu na fotodiodu. Po uplynutí integrační doby je zbývající náboj kondenzátoru vyčten a digitalizován.

Pixely CMOS senzorů jsou dvojího druhu a to pasivní pixely (Obr. 2.7a) a aktivní pixely (Obr. 2.7b), přičemž na senzoru se vždy vyskytuje pouze jeden typ. Pasivní pole pixelů má nábojový zesilovač pouze na výstupu každého sloupce pixelů, zatímco pole aktivních pixelů má nábojový zesilovač uvnitř každého pixelu. Pasivní pixely tak obsahují pouze jeden tranzistor (oproti třem tranzistorům u aktivních pixelů), tedy menší počet součástí citlivých na světlo. Mají tak větší činitel plnění (Fill Factor - poměr mezi fotocitlivou plochou pixelu a celkovou plochou pixelu) každého pixelu a tím také menší šum. U aktivních pixelů lze problému s citlivostí tranzistorů na světlo předcházet umístěním mikročocky před každý pixel. Mikročocka pak směřuje dopadající světlo pouze na fotodiodu daného pixelu.



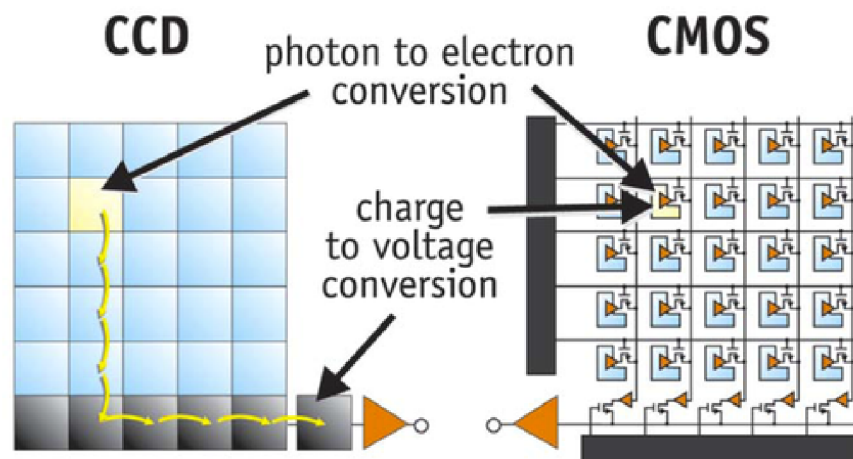
Obrázek 2.7: Pole pixelů CMOS senzoru [5]

Senzor složený z pole aktivních i pasivních pixelů lze vyčítat stejným způsobem. Pro postupnou volbu vyčítaného řádku je přiveden na řádky pole hodinový signál a pomocí přepínacího tranzistoru je pak náboj z řádku pixelů, zvoleného hodinovým signálem, přesunut na výstup sloupců pole. Výstupy sloupců jsou pak připojeny na výstupní registr a dále, obdobně jako u CCD senzoru, je náboj digitalizován.

### 2.1.3 Srovnání CCD a CMOS senzorů

Výhodou CCD senzoru je větší odstup signál-šum oproti CMOS senzoru. Na rozdíl od CCD senzoru však CMOS umožňuje vyčtení nikoliv pouze celého pole senzoru, ale jen jeho zvolené části [5]. Vyčíst zvolenou část pole (nebo i jen jeden pixel) je možné díky přivedení hodinového signálu pouze na zvolené řádky a následnému vynechání adres nechtěných pixelů od začátku a konce ve výstupním registru. Vyčítáním pouze žádané části senzoru je pak možné výrazně navýšit rychlost čtení dat ze senzoru.

Další výhodou CMOS senzorů je možnost integrace A/D převodníků do každého pixelu pole a takto vyčítat již digitalizované hodnoty ve výstupním registru je multiplexovat a dále tak zvýšit rychlost čtení dat ze senzoru (Obr. 2.8). Lze také integrovat na čip senzoru další mikroobvody (dnes například používané on-chip kamery a fotoaparáty). Takto vznikají velmi malá zařízení dle požadavků konkrétní aplikace s výrazně menší spotřebou a velikostí, než by byly srovnatelná zařízení využívající CCD senzor. Zvýšení rychlosti čtení CCD senzoru lze dosáhnout použitím vysokorychlostních CCD senzorů, které mají velké množství paralelních zesilovačů a A/D převodníků. Ani tak však ve srovnatelné velikosti senzoru nedosahují rychlostí CMOS senzorů, které mají zesilovač i A/D převodník v každém pixelu. Tyto CMOS senzory pracují na paralelních výstupech v digitální oblasti a proto dochází na výstupních kanálech k daleko menšímu rušení než u vysokorychlostních CCD senzorů, které v digitální oblasti nepracují a mezi jejich paralelními výstupy tak dochází k většímu rušení [4].



Obrázek 2.8: Srovnání vyčítání CCD a CMOS senzoru [9]

Pokud mají senzory zaznamenávat infračervené záření (Near Infrared - NIR; vlnová délka 700 nm až 1000 nm) blízké viditelnému spektru, je nutné zesílit jejich absorpční vrstvu, tedy vrstvu umožňující přeměnu fotonů na páry elektorn-díra. Toto zesílení absorpční vrstvy je nutné proto, že fotony NIR prochází hlouběji do substrátu křemíku, kde jsou poté absorbovány [4]. Většina CMOS senzorů je konstruována pro záznam viditelné části spektra a naopak je snahou, aby NIR záření bylo zaznamenáváno co nejméně a co nejméně tak ovlivňovalo výsledný obraz. Zesílení absorpční vrstvy senzoru je ovšem nutné kompenzovat přivedením vyššího předpětí na jednotlivé pixely, které má ve výsledku negativní vliv na funkci integrovaných obvodů v jednotlivých pixelech CMOS senzoru. Vzhledem k tomu je pro záznam NIR záření výhodnější použít CCD senzor. Protože výstupy CCD senzoru nejsou digitální, lze rozšířit absorpční vrstvu a zvýšit předpětí pixelu s výrazně menšími negativními vlivy na obvody uvnitř senzoru.

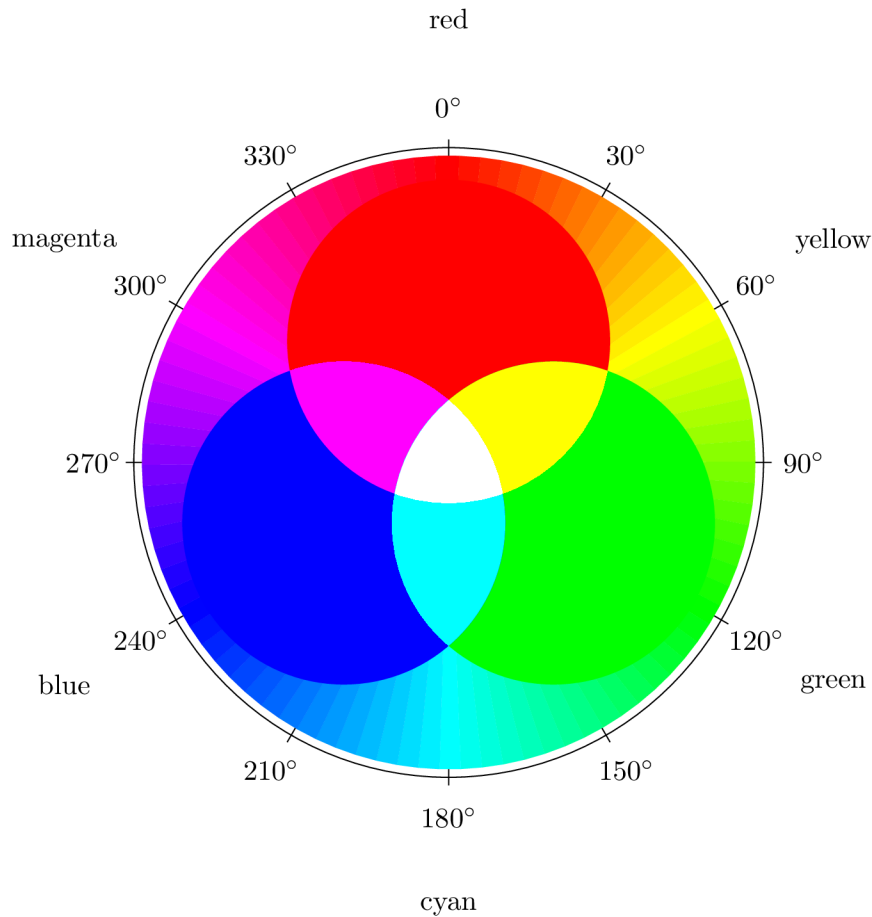
Naopak u ultrafialového (Ultraviolet - UV) záření dochází k absorpci fotonů velice blízko povrchu senzoru [4]. Sensory pro jeho záznam tedy nad svým povrchem nesmí mít žádné další vrstvy (oxidy křemíku, kovy), které by bránily průniku fotonů UV záření do absorpční vrstvy senzoru. Sensory pro záznam viditelné části spektra pak mají pro dosažení stabilní odezvy senzoru na UV záření naopak upravený povrch absorpční vrstvy (jak CCD tak CMOS) tak, aby se zabránilo průniku fotonů UV záření do absorpční vrstvy senzoru. Toho lze dosáhnout například dopováním vrstvy křemíku molekulami boru nebo přidáním silnější vrstvy oxidu křemíku před absorpční vrstvou senzoru [4].

## 2.2 Barevná fotografie

Už v roce 1860 James Clerk Maxwell popsal myšlenku barevného trojúhelníku, s jehož pomocí je možné pokrýt spektrum barev. Tento barevný trojúhelník (Obr.



2.9) tvoří barvy červená (R - 700 nm), zelená (G - 546,1 nm) a modrá (B - 435,8 nm) [10].



Obrázek 2.9: Barevný prostor RGB a míchání barev [11]

O rok později pak tuto myšlenku demonstroval v praxi jako zachycení tří totožných scén, každou přes jiný barevný filtr a následnou reprodukci barevné fotografie s využitím tří projektorů. V roce 1873 pak Hermann Wilhelm Vogel zaznamenal výrazný posun ve vývoji barevné fotografie. Rozšířil spektrální citlivost fotografických emulzí, které byly do té doby citlivé pouze na modré světlo. Zde lze nalézt paralelu s rokem 1973, kdy byla rozšířena spektrální citlivost CCD čipů, které byly do té doby citlivé převážně na červené světlo.

Jedna z prvních dochovaných barevných fotografií (Obr. 2.10) pochází z roku 1911 a pořídil ji Sergei Mikhailovich Prokudin-Gorskii. K pořízení této fotografie použil Prokudin-Gorskii systém popsany Maxwellem s využitím trojitě expoziční scény a RGB filtrů. Na pravé straně fotografie lze vidět expoziční pro jednotlivé barevné složky, jejichž překrytím a zobrazením přes filtr dané barvy vznikla výsledná barevná fotografie.



Obrázek 2.10: Fotografie Mohammeda Alima Khana [12]

Dalším milníkem ve vývoji byla snaha Ducose du Haurona o rozdělení svazku optických paprsků tak, aby bylo možné všechny tři snímky jednotlivých barevných složek zachytit v jeden okamžik. Jeho další zásluhou byl vývoj barevných mozaik, za účelem zachycení pouze jednoho barevného obrazu. Stejnou myšlenkou se zabýval také John Joly, který mozaiku tvořil pomocí RGB mikroproužků inkoustu. Kolem roku 1904 pak bratři Lumierové nahradili tyto mikroproužkové mozaiky náhodnými RGB mozaikami. Zde je opět možné nalézt paralelu s vývojem CCD čipů v 90-tých letech minulého století. V tomto období totiž CCD čipy začaly využívat specifickou Bayerovu mozaiku (masku), kterou v roce 1976 představil Bryce Bayer.

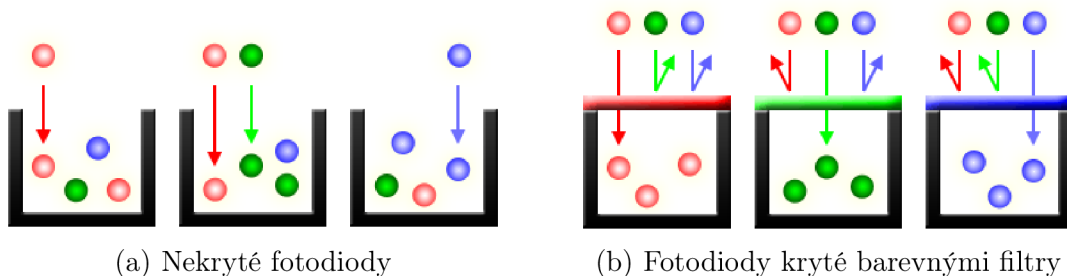
První barevný digitální fotoaparát byl použit v roce 1966 pro snímkování povrchu Měsíce. Tento fotoaparát používal k záznamu obrazu snímací elektronku Vidicon s kruhovým RGB filtrem.

Pokud se chceme zaměřit na principy pořízení barevných fotografií, je nutné si uvědomit, že fotocitlivé senzory snímacích čipů jsou z principu své funkce pouze monochromatické. Jak již bylo popsáno v předešlé části této kapitoly, lze „barevnosti“ fotografií dosáhnout třemi způsoby [13]:

- pořízením třech různých fotografií, každé s jedním z RGB barevných filtrů (z důvodu nutnosti eliminace pohybu využíváno především v laboratorních podmínkách)
- pořízením snímku pomocí jednoho snímacího čipu překrytého barevnou maskou
- rozdělením svazku přicházejících paprsků na tři části a pořízením tří snímků (každý přes jeden z RGB filtrů)

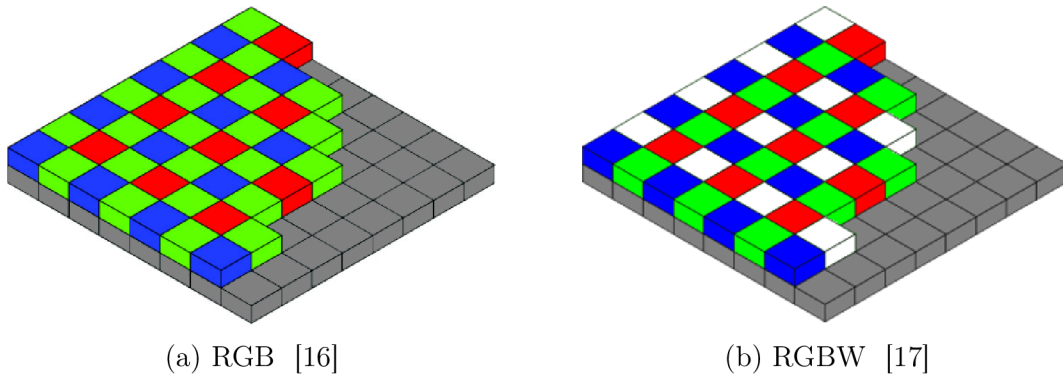
Drtivá většina dnešních fotoaparátů využívá variantu jednoho snímacího senzoru, který je překryt barevnou maskou. Každá fotodioda senzoru je překryta filtrem, který propustí pouze světlo takové vlnové délky, která odpovídá jedné barvě (R, G nebo B). Tuto situaci ilustruje obrázek (Obr. 2.11b), ze kterého je patrné, že na takto překryté fotodiody dopadá pouze světlo právě takových vlnových délek, které propustí filtr nad ní. Toto řešení ovšem přináší zmenšení odstupů signál-šum senzoru, protože filtry vždy zachytí a odstraní 2/3 dopadajícího signálu. Pokud by nebyly nad fotodiodami umístěny barevné filtry (Obr. 2.11a), pak by na každou fotodiodu dopadalo světlo všech vlnových délek a výstup by byl použitelný pouze pro vytvoření monochromatického obrazu.

Využívají se dvě varianty umístění barevného filtru na fotodiodě. První z nich je hybridní filtr, který je umístěn na krycím sklíčku před fotodiodou. Druhou variantou je pak monolitický filtr, který je umístěn přímo na fotodiodě, tedy přímo na křemíkovém čipu.



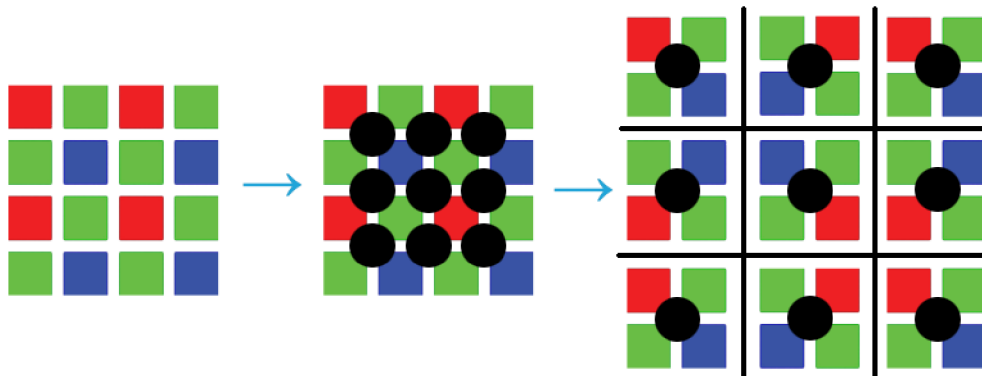
Obrázek 2.11: Srovnání principu záznamu světla [14]

Nejpoužívanější variantou masky filtru je v dnešní době Bayerova maska [15], případně z ní odvozené masky, přičemž existuje mnoho variant uspořádání barevných filtrů. Jednou, z od Bayerovy masky odvozených masek, je například RGBW maska, která obsahuje navíc ještě pixely, před kterými nejsou umístěny barevné filtry. Těchto bílých (W - white) pixelů, zachycujících celé barevné spektrum světla (tedy zaznamenávajících pouze intenzitu dopadajícího světla) se využívá proto, aby bylo možné zvětšit odstup signál-šum senzoru, který je velmi snížen odfiltrováním 2/3 dopadajícího signálu u RGB masky. Na obrázku (Obr. 2.12a) jsou šedě znázorněny fotodiody snímacího čipu a nad nimi jsou barevně znázorněny filtry Bayerovy masky. Jak je vidět na obrázku, maska obsahuje větší množství zelených filtrů než modrých a červených. Tento nepoměr je způsoben faktem, že lidské oko je nejcitlivější na zelenou barvu, méně citlivé na červenou a nejméně citlivé na modrou barvu.



Obrázek 2.12: Ukázka možných uspořádání Bayerovy masky

Pokud chceme z obrazu zachyceného přes barevnou masku (například Bayerovu) získat výstupní barevný obraz, je nutné každý pixel výstupního obrazu interpolovat z několika pixelů masky odpovídajícím okolí polohy pixelu ve výstupním obraze. Hovoříme pak o tzv. demosaicingu. Možností interpolace výstupních pixelů a jejich modifikací je velké množství. Jedno z možných řešení znázorňuje obrázek 2.13, kde černé body představují pixely výstupního barevného obrazu, z nichž každý nese informaci o všech třech zaznamenaných barvách. Jak je vidět na obrázku, pro výpočet jednoho pixelu výstupního bodu jsou vždy potřeba dva zaznamenané pixely zelené barvy a jeden červený a modrý pixel.



Obrázek 2.13: Princip interpolace na pixely výsledného obrazu

Podrobnější popis interpolačních algoritmů lze nalézt v literatuře [18, 19, 20].

## 2.3 Senzor Foveon X3

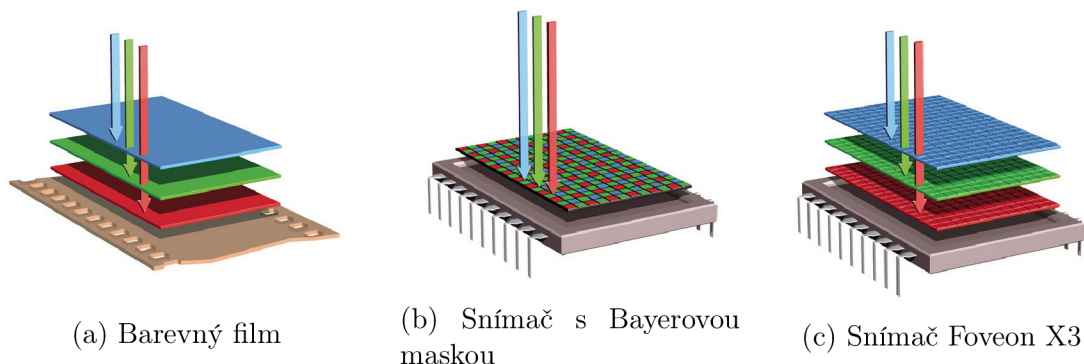
Od počátků barevné digitální fotografie [1, 21] jsou k zachycení scény využívány snímače překryté filtrem Bayerovy masky (Obr. 2.14b) nebo masek z ní vycházejících. Jak bylo uvedeno v předešlém textu (Kap. 2.2), je každý pixel takového snímače pokryt filtrem jedné barvy (červené, zelené nebo modré) a propouští pouze světlo

takových vlnových délek, které odpovídá barvě filtru (Obr. 2.11b). Lze tedy říci, že každá fotodioda zaznamená zhruba pouze třetinu světla, jenž na ni ve skutečnosti dopadá. Další nepřesnosti pak způsobuje interpolace obrazových bodů výstupního obrazu při převodu ze surových dat zaznamenaných senzorem. Tyto dva hlavní problémy pak značně snižují citlivost snímače a zhoršují citlivost a přesnost barev výstupního obrazu. Vlivem těchto zkreslení mohou také v obraze vznikat artefakty, především pak v okolí výraznějších hran.

Jako jedno z možných řešení se nabízí záznam obrazu na médium, které by mělo vrstvy pro záznam jednotlivých barev uspořádané nad sebou. Takové médium představila společnost Kodachrome roku 1935, když uvedla barevný film (Obr. 2.14a), který měl toto uspořádání fotocitlivých vrstev. Bylo tedy otázkou času, než se toto uspořádání pokusí napodobit některý výrobce snímacích čipů.

S takovýmto řešením senzoru přišla roku 2002 společnost Foveon (dnes vlastněná společností Sigma). Jejich senzor Foveon X3 Merrill (Obr. 2.14c) je třívrstvý snímáči senzor využívající polopropustný křemíkový substrát. Svě jméno tento senzor nese po dnes již zesnulém Richardu B. Merrillovi, který byl jedním z jeho autorů [22].

Hlavním přínosem tohoto senzoru je, že na rozdíl od snímačů využívajících Bayerovu masku, dokáže v každém pixelu snímat jasovou hodnotu všech RGB složek. Z tohoto důvodu dokáže tento senzor zaznamenat reálnější podání barev.



Obrázek 2.14: Srovnání principu záznamu světla [23]

Princip záznamu obrazu na vícevrstvé médium (ať už film nebo digitální senzor) vychází z toho, že různé vlnové déky světla dokáží při dopadu na překážku (v našem případě křemíkový polovodič) projít do různé hloubky a stejně tak jsou různě pohlcovány [24].

Rozdíl mezi světelným tokem  $\Phi_0$  dopadajícím na křemíkový polovodič a světelným tokem  $\Phi(x)$  v hloubce  $x$  v polovodiči je definován vzorcem (2.1), kde  $\alpha$  je absorpční koeficient daného substrátu.

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (2.1)$$

Hodnoty tohoto koeficientu mohou být určeny podle vzorce (2.2), kde  $I(x)$  je absorpční intenzita světla v hloubce  $x$  a  $I_0$  je intenzita při vstupu do substrátu.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.2)$$

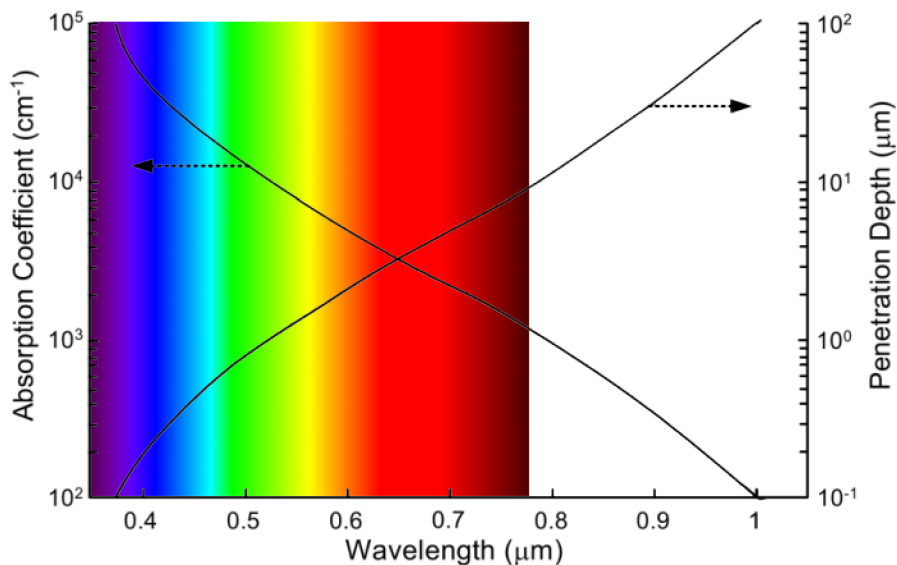
Dle vzorce (2.3) pak lze určit hloubku průniku  $x^*$ , která je definována jako hloubka, při níž světelný tok  $\Phi(x^*)$  dosáhne hodnoty  $e^{-1}$ , což odpovídá 37 % ze vstupního světelného toku  $\Phi_0$ .

$$\Phi(x^*) = \Phi_0 e^{-1} \quad (2.3)$$

Vzájemná závislost mezi koeficientem absorpce materiálu a hloubky průniku je definována vzorcem (2.4).

$$x^* = \alpha^{-1} \quad (2.4)$$

Průběh těchto parametrů ve vztahu k vlnové délce světla znázorňuje graf (Obr. 2.15), kde na ose  $x$  je vynesena vlnová délka světla, na ose  $y$  vlevo pak koeficient absorpce světla a na ose  $y$  vpravo hloubka průniku světla. Na tomto grafu je vidět, že s rostoucí vlnovou délkou má světlo větší hloubku průniku a naopak menší absorpční koeficient, a je tedy méně pohlcováno materiálem. Největší hloubku průniku a nejmenší absorpční koeficient má pak infračervené světlo, jehož vlnová délka se pohybuje do hodnoty 1000 nm.

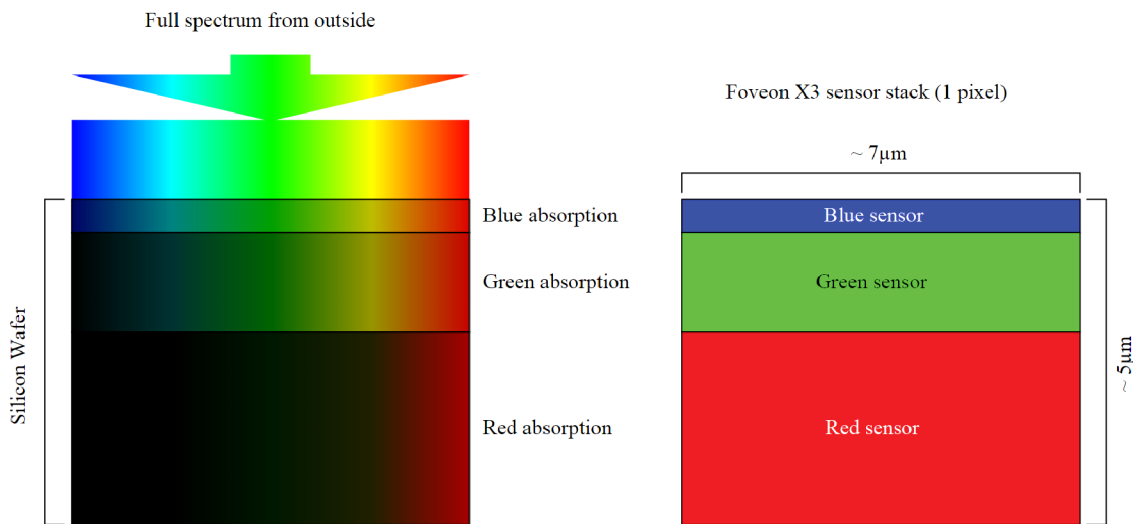


Obrázek 2.15: Závislost koeficientu absorpce a hloubky průniku na vlnové délce světla při dopadu na křemíkový polovodič [24]

Z hloubky průniku a hodnoty absorpčního koeficientu křemíkového polovodiče lze odvodit pořadí barevných RGB vrstev jednotlivých pixelů. V tomto případě slouží jako barevný filtr sám křemíkový substrát. Pixel senzoru Foveon X3 je na obrázku (Obr. 2.16), kde je patrné také pořadí jednotlivých barevných vrstev.

Nejvýše leží modrá vrstva. Na tuto vrstvu dopadá světlo všech vlnových délek, jak je patrné z obrázku (Obr. 2.16). Tato vrstva pak sama působí jako barevný filtr a odstraní světlo nejnižších vlnových délek (tedy světlo, jehož vlnová délka je

menší než přibližně 440 nm - odpovídá modré barvě). Zbylé světlo pak prochází dále, kde je zaznamenáno zelenou vrstvou, která dále odstraní světlo středních vlnových délek (vlnová délka menší než přibližně 550 nm - odpovídá zelené barvě). Zbylé světlo je pak zaznamenáno poslední, červenou vrstvou. V obrázku (Obr. 2.16) je pak ponecháno původní označení společnosti Sigma pro jednotlivé vrstvy „sensor”, i když z hlediska funkce se jedná spíše o „absorber”.



Obrázek 2.16: Absorbce světla na jednom pixelu senzoru Foveon X3 [25]

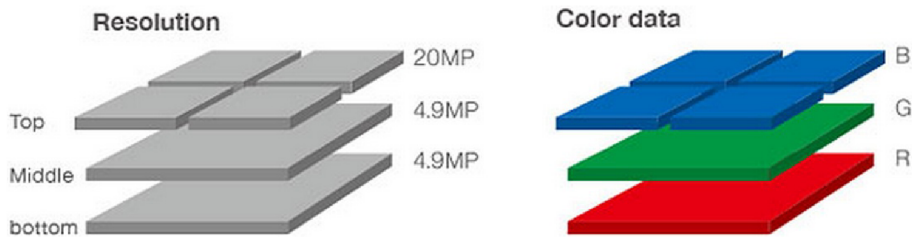
Je patrné, že jednotlivé barevné vrstvy nezaznamenávají pouze vlnové délky barvy, jež jim odpovídá (jako senzory využívající Bayerovu masku), ale kombinace světla takových vlnových délek, které na jednotlivé vrstvy dopadají. Modrá vrstva zaznamenává informaci o celém spektru světla, zelená vrstva pak informaci o kombinaci zelené, žluté až červené barvy a červená vrstva pak kombinaci žluté a červené barvy. K informacím zaznamenaným tímto pixelem tedy nelze přistupovat běžným způsobem, jako k běžnému RGB pixelu, ale pro získání pixelu výstupního obrazu z těchto surových dat je nutná jejich úprava. Tato úprava vychází z dále uvedených principů [26].

Na základě informací z jednotlivých vrstev lze usoudit, kolik světla daných vlnových délek bylo v dopadajícím paprsku, přičemž hodnota jasů dopadajícího světla je zaznamenána pouze horní (modrou) vrstvou. Další dvě vrstvy (zelená a červená) pak slouží pouze k rozpoznání množství dané barvy v paprsku. Pokud světlo projde až na poslední červenou vrstvu, lze z její hodnoty usuzovat, jaké množství je v daném paprsku světla blízkému červené barvě. Následně lze z hodnoty informace střední, zelené vrstvy (s přihlédnutím k hodnotě červené vrstvy) zjistit, kolik světla vlnových délek blízkých zelené barvě paprsek obsahoval. Posledním krokem je pak určení, kolik modré barvy takový paprsek obsahoval (opět s přihlédnutím k hodnotám zelené a červené vrstvy).

Tímto způsobem lze tedy zjistit množství světla v oblasti viditelného spektra, jež v daných barvách dopadlo na senzor. Následným přepočtem těchto surových dat

lze poté určit běžný výstupní barevný obraz (tedy takový, který obsahuje jasovou informaci o červené, zelené a modré jasové složce). Rozlišení takového snímku je pak 15 *Mpx* [26] pro první generaci snímačů Foveon X3.

V roce 2014 společnost Sigma ohlásila novou generaci čipu Foveon X3 nesoucí název Quattro. Tento název vychází z úprav, kterými senzor prošel. Rozlišení horní vrstvy bylo zvýšeno na 20 *Mpx* a rozlišení dvou následujících vrstev naopak sníženo na zhruba 5 *Mpx*, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 2.17).



Obrázek 2.17: Uspořádání vrstev pixelů senzoru Foveon X3 Quattro [27]

Pod každou čtveřicí modrých snímačů leží jeden zelený a červený. Touto úpravou bylo dosaženo vyššího rozlišení výstupního obrazu (dáno vrchní vrstvou) na 20 *Mpx*. Vzhledem k větší ploše jednotlivých snímačů spodních dvou vrstev došlo také ke zvětšení odstupu signál-šum senzoru [27]. Tato úprava ovšem neměla, jak by se dalo předpokládat, negativní vliv na zaznamenávané detaily v oblastech zeleného a červeného světla, protože informaci o detailech nese pouze vrchní vrstva (jejíž rozlišení bylo zvětšeno) a spodní vrstvy dávají informaci o zastoupení jednotlivých barevných složek.

Současná generace senzoru Foveon X3 tedy nedosahuje tak vysokých rozlišení, jako senzory využívající Bayerovu masku (běžně až kolem 40 *Mpx*), ale dosahuje věrnějšího podání barev, výrazně menšího množství artefaktů a větších detailů obrazu. Jednou z velkých nevýhod první generace senzoru (Merrill) byl vysoký šum při horších světelných podmínkách - větších hodnotách ISO oproti sensorům s Bayerovou maskou. Množství šumu bylo novou generací čipu (Quattro) značně sníženo, nicméně pořád obsahuje větší množství šumu než senzory s Bayerovou maskou [27], obzvláště pak ve tmavých částech obrazu.

## 2.4 Snímání světelného pole

Od samých počátků fotografie spojuje všechny fotografy snaha o dobré zaostření jejich snímků. Dosáhnout co nejvyšší ostrosti snímků ovšem nebylo nikdy snadné a není snadné ani dnes při použití moderních metod automatického ostření. Při snaze o dobré zaostření se vyskytují tři zásadní problémy [28].

Prvním problémem je nemožnost přeastřit fotografii po jejím pořízení. Tento problém je velmi častý, ať už z důvodu špatného odhadu či volby fotografa při pořizování snímků nebo kvůli nepřesnému zaostření vlivem nedokonalosti ostřicích metod.

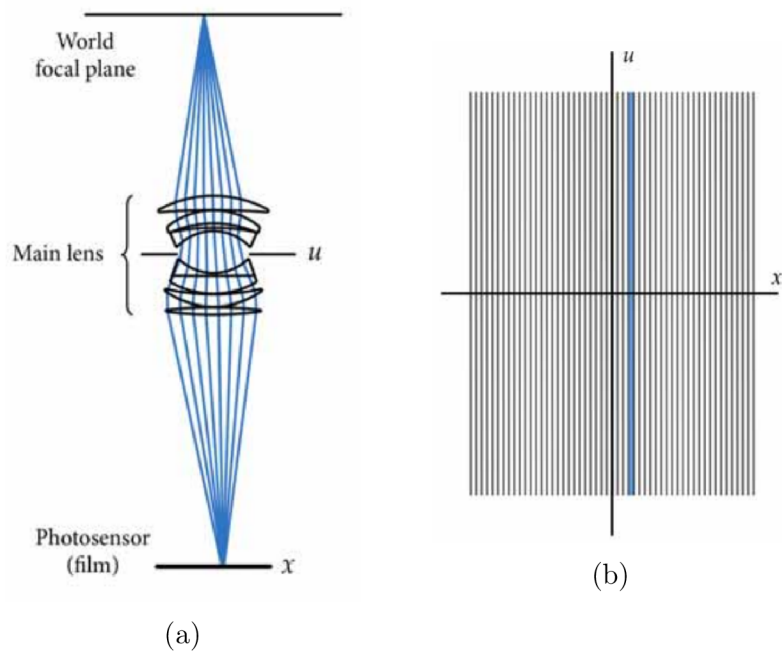


Druhým problémem je určení hloubky ostrosti. Hloubka ostrosti je udávána parametrem zvaným clonové číslo (otevření clony) a v praxi znamená, že čím menší clonové číslo, tím více se projevuje rozmazání objektů vzdalujících se od zaostřené roviny scény. Problémem tedy je volba správné hloubky ostrosti pro danou fotografii.

Třetím problémem je chromatická vada (Chromatic Aberation) objektivu. Tato vada vzniká, ve složitějších soustavách čoček (typicky objektivěch) vlivem závislosti rozdílných ohniskových vzdáleností jednotlivých čoček v závislosti na vlnové délce světla. Jinak řečeno, každá čočka láme jednotlivé vlnové délky světla jinak a při výstupu optických paprsků světla ze soustavy čoček se tyto paprsky neprotnou v jednom bodě, ale jsou mírně rozptýleny.

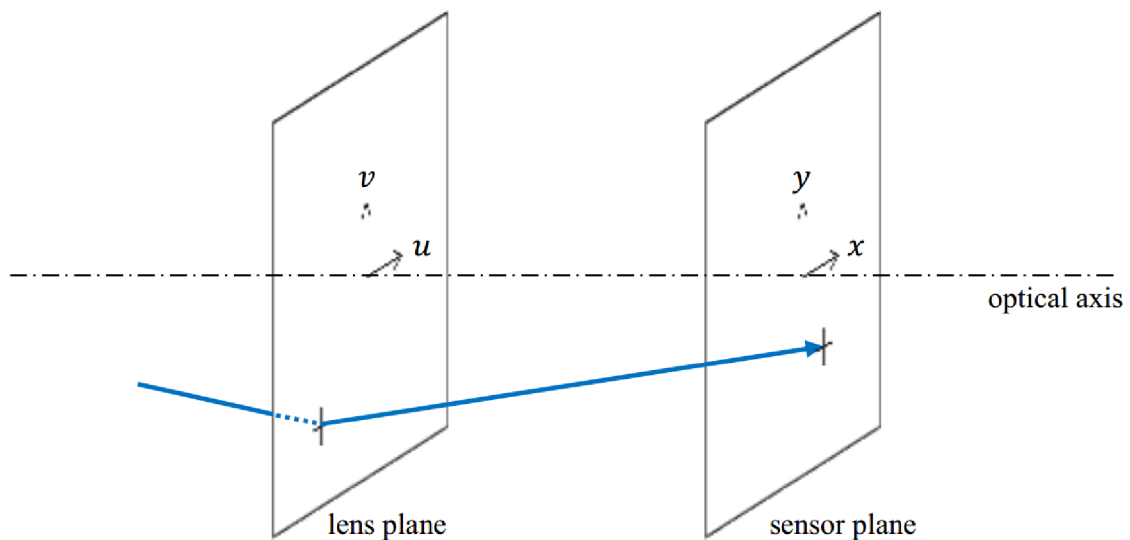
Jedním z možných řešení těchto tří problémů je digitální snímání světelného pole (Digital Light Field Photography) [28, 29]. Patent týkající se konceptu fotografie světelného pole pochází již z roku 1903 od F. E. Ivese. Ovšem až v dnešní době pokročila technologie natolik, aby bylo možné tyto modely a teoretické návrhy aplikovat v praxi a vyrobit fotoaparát schopný světelné pole snímat.

Dnešní konvenční fotoaparáty zaznamenávají vlivem projekce scény na obrazový senzor (rovina  $x, y$ ) pouze 2D obraz a ztrácí tak informaci o prostoru. Každý pixel zde zaznamenává světlo, dopadající na něj ze všech směrů, jak je vidět na obrázku (Obr. 2.18). Obrázek (Obr. 2.18a) znázorňuje optické paprsky (modrá barva) vycházející z jednoho bodu scény. Tyto paprsky prochází celou plochou objektivu (Main Lens - rovina  $u, v$ ) a následně jsou objektivem opět usměrněny do jednoho bodu (v případě optimálního zaostření) na obrazovém senzoru (Photosensor - rovina  $x, y$ ). Obrázek (Obr. 2.18b) představuje diagram optických rovin  $x$  a  $u$ . Jedná se o 2D řez optickou soustavou, kde osa  $x$  odpovídá počtu pixelů obrazového senzoru v řádku a osa  $u$  pak odpovídá šířce objektivu v řezu (osy  $y$  a  $v$  jsou kolmé k rovině obrázku). Na diagramu je tedy znázorněna modrá úsečka jejíž výška odpovídá šířce objektivu (v ose  $u$ ) a jednomu pixelu (v ose  $x$ ).



Obrázek 2.18: Průchod světla konvenčním fotoaparátem - 2D řez [28]

Fotoaparáty pro záznam světelného pole (jinak též zvané plenoptické fotoaparáty) dokáží zaznamenávat navíc směr optického paprsku (4D obraz). Každý pixel tedy zaznamenává nejen množství světla které na něj dopadá, ale také směr, ze kterého dané světelné paprsky přicházejí. Směr je v tomto případě definován dvěma body v různých rovinách (Obr. 2.19). První je rovina objektivu ( $u, v$ ), druhá pak rovina senzoru ( $x, y$ ).



Obrázek 2.19: Směr světelného paprsku - 2 roviny [29]

Světelné pole v rovině senzoru je pak definováno jako funkce  $L_F(x, y, u, v)$ , která udává množství světla procházejícího rovinou objektivu (v bodě  $u, v$ ) a dopadajícího na rovinu senzoru (v bodě  $x, y$ ). Celkovou velikost ozáření jednoho pixelu pak lze určit dle vzorce (2.5):

$$E_F(x, y) = \frac{1}{F^2} \iint L_F(x, y, u, v) \cos^4 \theta \, du \, dv \quad (2.5)$$

kde  $E_F(x, y)$  představuje celkové množství světla dopadajícího na bod  $(x, y)$ ,  $F$  je vzdálenost mezi výstupní čočkou objektivu a senzorem a  $\theta$  je úhel dopadajícího paprsku. Člen  $\cos^4 \theta$  pak bývá označován jako parametr optické vinětace.

Pro záznam světelného pole se využívají fotoaparáty, které mají před senzorem umístěnu soustavu mikročoček. Tato soustava představuje rovinu senzoru tak, jak byla popisována v předchozí části textu, a reálný senzor je umístěn za ní. Za každou mikročočkou je umístěno množství fotodiod obrazového senzoru, které odpovídá velikosti mikročočky s ohledem na velikost samotných fotodiod. V dnešních fotoaparátech je to zhruba 100x100 až 200x200 fotodiod za každou mikročočkou. Na rozdíl od konvenčních fotoaparátů, kde je rozlišení určeno počtem fotodiod obrazového senzoru, zde výsledné rozlišení udává množství mikročoček.

Princip záznamu světelného pole je tedy následující. Světelné paprsky prochází objektivem fotoaparátu a následně soustavou mikročoček. Každá mikročočka pak usměřňuje tyto paprsky dle úhlu pod kterým na ni dopadají na určité fotodiody obrazového senzoru za ní. Dle souřadnic těchto fotodiod za danou čočkou lze následně určit úhel dopadu paprsků na mikročočku. Tímto způsobem je zaznamenáno světelné pole scény, u kterého lze libovolně přeastřovat na různé ohniskové vzdálenosti. K tomuto přeastření slouží zpětná rekonstrukce obrazového pole a z ní určení ostrosti jednotlivých optických svazků. Detailnější popis přeastření viz. literatura [28].

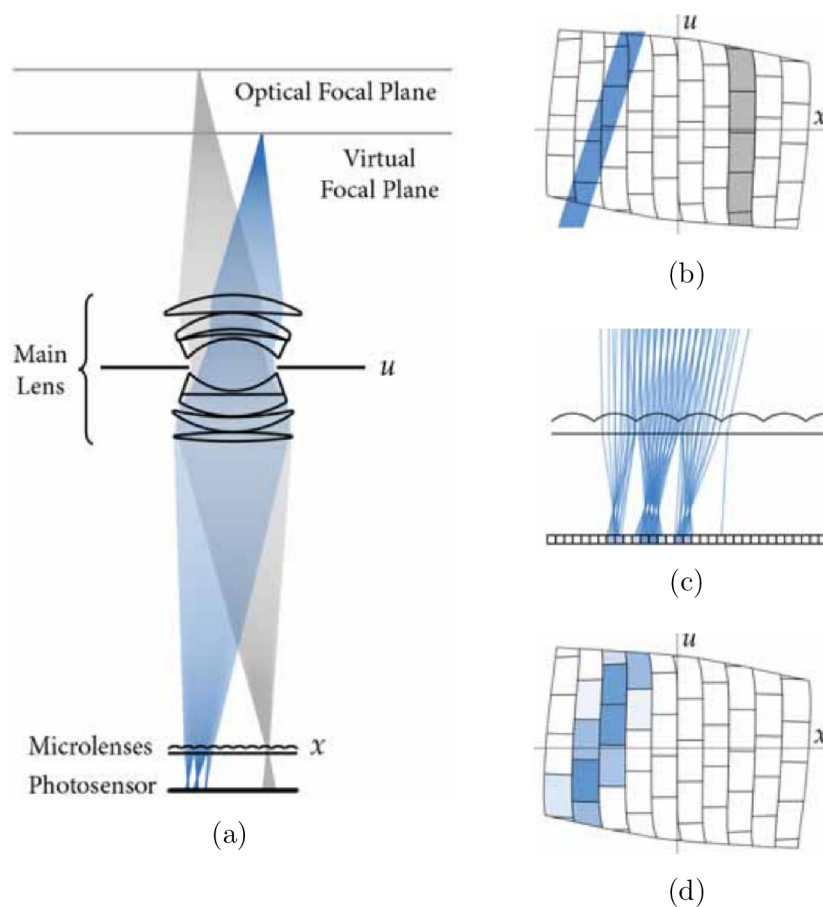
Při popisu záznamu světelného pole budeme pro zjednodušení uvažovat, že optické paprsky vychází z pouze jednoho bodu pořizované scény, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 2.20a) - šedý svazek. Diagram (Obr. 2.20b) znázorňuje situaci při dopadu paprsků na soustavu mikročoček před senzorem. Jedno okno rastru tohoto diagramu odpovídá jedné mikročočce (ve 2D řezu) a představuje svazek paprsků dopadající na jednu fotodiodu snímacího čipu. Šířka oken rastru (sloupců) odpovídá velikosti mikročočky a výška jednotlivých oken rastru pak šířce svazku dopadajícího na danou mikročočku při průchodu objektivem (osa  $u$  roviny objektivu  $u, v$ ). Na tomto diagramu je v porovnání s diagramem (Obr. 2.18b) patrné zkreslení (obzvláště v horní a spodní části). Toto zkreslení je dáno optickým zkreslením objektivu, kde je zkreslení největší právě u obvodu objektivu - na vnějších stranách (tedy přeneseno do 2D řezu právě v horní a spodní části tohoto diagramu).

Jednotlivé sloupce rastru tohoto diagramu pak vypovídají o záznamu směru přecházejících paprsků. Každá mikročočka opticky řadí paprsky podle úhlu, pod kterým na ni dopadly. Úhel dopadu jednotlivých optických paprsků na rovinu soustavy mikročoček tedy lze odvodit ze souřadnic fotodiody obrazového senzoru, na kterou byly tyto paprsky příslušnou mikročočkou usměrněny.

Pokud bychom sečetli jasové hodnoty dané příspěvky všech šedě označených oken rastru ve sloupci diagramu (Obr. 2.20b), dostaneme jeden pixel výstupního 2D

obrazu. Takto získaný obraz pak odpovídá zachycenému optickému poli při zaostření na reálnou ostřicí rovinu (Optical Focal Plane).

Pokud budeme chtít zachycené optické pole přeostrřit na zvolenou ostřicí rovinu (Virtual Focal Plane) a získat tomu odpovídající výstupní obraz, je nutné toto přeostrření přepočítat. Této situaci odpovídá obrázek (Obr. 2.20a) - modrý svazek a situace na soustavě mikročoček je znázorněna na obrázku (Obr. 2.20b) - modrý svazek. Tento modrý svazek, na rozdíl od původně zachyceného šedého svazku, neodpovídá rastru danému soustavou mikročoček a proto je nutné přepočítat příspěvky jednotlivých oken rastru. Tyto příspěvky jednotlivých oken jsou znázorněny na obrázku (Obr. 2.20d). Detail světelných paprsků mezi soustavou mikročoček a senzorem při přeostrření je znázorněn na obrázku (Obr. 2.20c), kde je patrné seřazení optických paprsků podle úhlu dopadu na soustavu mikročoček.



Obrázek 2.20: Záznam světelného pole [28]

Jak je patrné z textu, fotoaparáty pro záznam světelného pole mají velkou výhodu oproti konvenčním v možnosti zvolit ostřicí rovinu až po pořízení fotografie. Lze je také využít například při tvorbě fotografií s velkou hloubkou ostrosti. Nevýhodou těchto fotoaparátů je ovšem poměrně malé rozlišení výsledných 2D fotografií (například fotoaparát Lytro Illum má rozlišení zhruba 4 Mpx).

V dnešní době vyrábí komerční fotoaparáty pro záznam světelného pole společ-

nosti Raytrix<sup>1</sup> a Lytro<sup>2</sup>.

## 2.5 Pořízení 3D obrazu

Zpracování trojrozměrného obrazu, tedy obrazu, který obsahuje kromě výšky a šířky navíc informace o hloubce pořízené scény, je dnes hojně využíváno v mnoha aplikacích, počínaje 3D mikroskopií a konče 3D kinosály. Pořízení, zpracování a projekce 3D obrazu je neustále se rozvíjející oblast počítačového vidění. Vzhledem k její popularitě jí lze předpovídat dynamický rozvoj i v následujících letech. Přitom principy stereoskopie, která slouží jako základ pro dnešní 3D zpracování obrazu byly popsány již v roce 1838 profesorem experimentální filosofie na King's College v Londýně, Charlesem Wheatstonem [30]. Aplikace zpracování 3D obrazu lze rozdělit do dvou základních kategorií. První kategorií je pasivní bezkontaktní snímání scény, jehož nejvýznamnějším zástupcem je stereoskopie, která zachycuje scénu prostřednictvím dvou, vedle sebe stojících kamer či fotoaparátů ve dvou rozměrech a s ohledem na jejich vzájemnou vzdálenost a úhel který svírají jejich optické osy poté rekonstruuje hloubku scény. Druhou kategorií je aktivní bezkontaktní snímání scény, které představuje měření hloubky scény, přímo se zaměřující na přesné měření vzdálenosti hranic objektů od kamery nebo senzoru, který je buď statický, nebo se pohybuje po předem definované trajektorii kolem snímaného objektu. Dalšími variantami jsou pak metody kombinující výše zmíněné nebo například rekonstrukce 3D obrazu z 2D snímků, pomocí korespondencí bodů na jednotlivých snímcích.

### 2.5.1 Stereoskopie

Stereoskopie se snaží při záznamu scény napodobit lidské prostorové vidění, u něhož jako médium zachycující obraz slouží oči, které jsou umístěny v jedné horizontální rovině a určité vzdálenosti (u dospělých lidí průměrně 6 cm) od sebe [31, 32]. Stereoskopie se tedy zabývá trojrozměrným viděním, jako výsledkem rozdílnosti dvou 2D obrazů jednoho objektu, pořízených pod rozdílným úhlem a s rozdílnou perspektivou. Následně spojení těchto obrazů je pak nazýváno binokulární zobrazení. Jedná se o bezkontaktní pasivní metodu pořízení 3D snímku.

Pro pořízení stereoskopických snímků se ve většině případů využívají dva fotoaparáty, které musí mít totožnou expozici, vyvážení bílé, ohniskovou vzdálenost objektivu, synchronizované ostření a co nejpodobnější geometrii optických členů objektivu. Jejich výstup je pak pomocí plano-stereoskopického displeje zobrazen tak, že každé oko vidí obraz zachycený jedním fotoaparátem. Výsledný 3D efekt pak vznikne v lidském mozku, stejně jako při běžném lidském vnímání.

První stereoskopické fotografie (Obr. 2.21) pořídil již v roce 1850 francouzský optik a vynálezce Jules Duboscq [33], jenž se stal také prvním producentem stereoskopů. Duboscquovy stereoskopy a stereoskopické fotografie pak získaly velkou pozornost (zaujaly i anglickou královnu Viktorii) o rok později, na výstavě v Londýně.

---

<sup>1</sup>Dostupné z: <http://raytrix.de/index.php/home.htm>

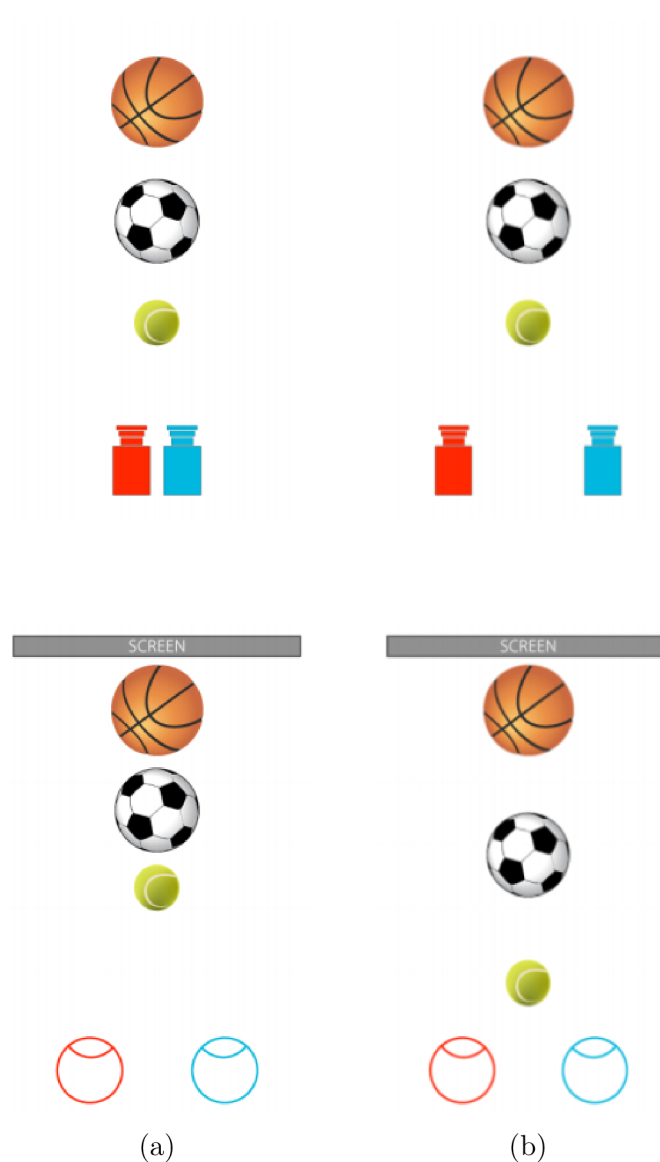
<sup>2</sup>Dostupné z: <https://www.lytro.com/>



Obrázek 2.21: Jedna z prvních Duboscquových stereofotografií Les trois grâces [34]

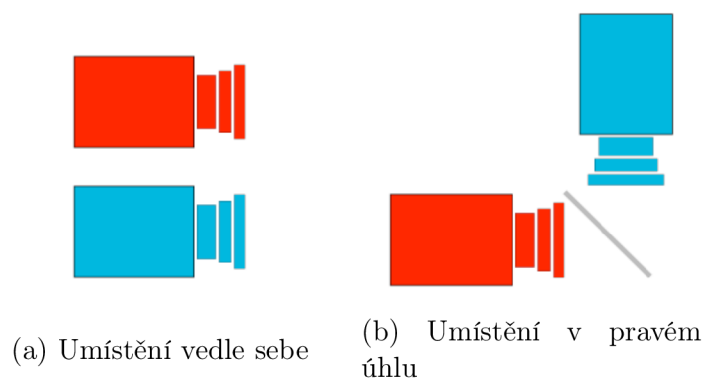
První komerčně dostupný digitální stereoskopický fotoaparát (FinePix Real 3D W1) byl pak sestrojen až v roce 2009 společností Fujifilm [35]. Fotoaparát měl dva totožné objektivy s rozsahem ohniskových vzdáleností 35 mm - 105 mm (ekvivalent 35 mm), každý o rozlišení 10 Mpx.

**Interaxiála** je pojem označující vzdálenost mezi dvěma fotoaparáty pořizujícími stereoskopickou fotografii. Zaznamenaná hloubka scény je pak úměrná velikosti interaxiály. Pokud je interaxiála malá (Obr. 2.22a), pak je i zaznamenaná hloubka scény malá. S rostoucí velikostí interaxiály (Obr. 2.22b) pak roste i velikost zaznamenané hloubky scény.



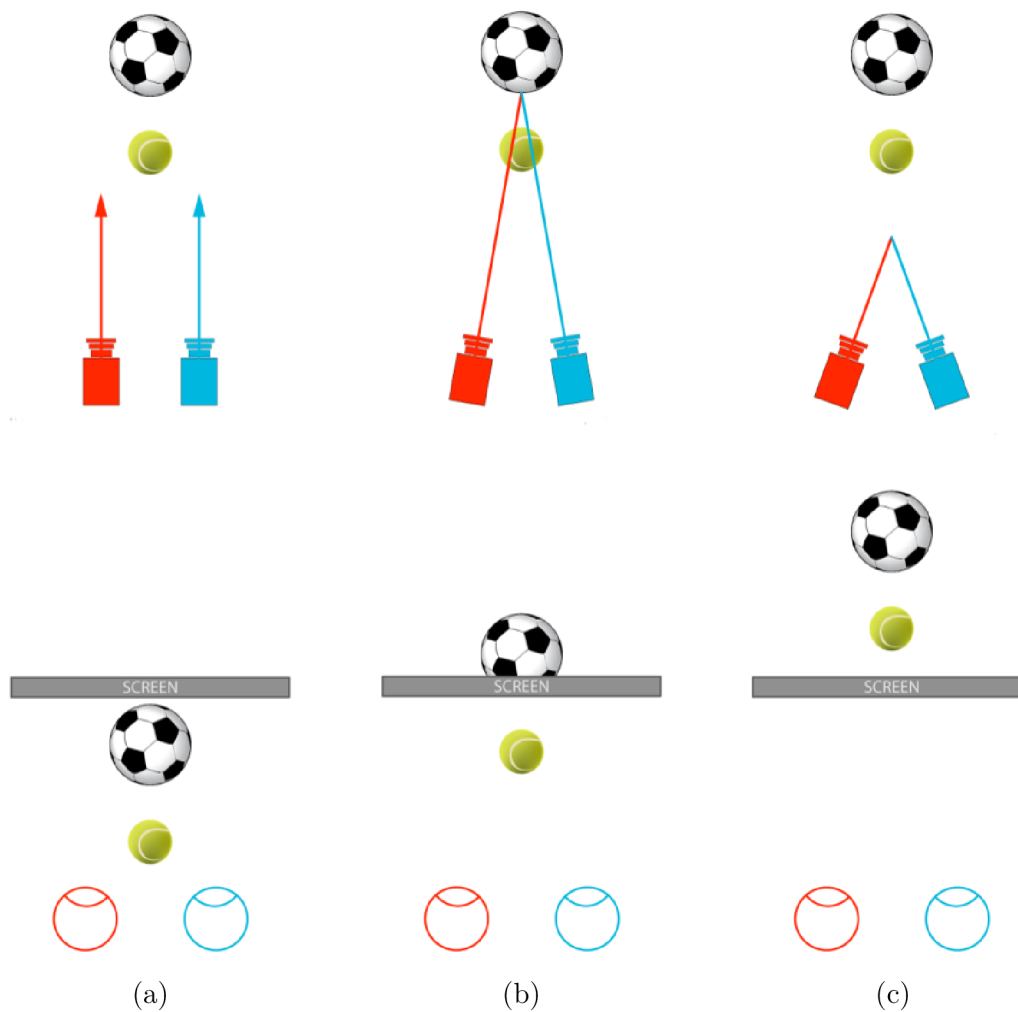
Obrázek 2.22: Velikost interaxiály (nahore) a zaznamenaná hloubky scény (dole) [31]

Pro pořízení snímků se střední a velkou velikostí interaxiály je možno využít paralelní uspořádání fotoaparátů (Obr. 2.23a). Vzhledem k velikosti fotoaparátu a objektivu však toto uspořádání není vhodné pro snímky pořizované s malými velikostmi interaxiály. Pro tyto případy je tedy nutné využít složitější uspořádání, například s dělením optického paprsku (Obr. 2.23b), kdy je jeden fotoaparát vůči druhému pootočen o  $90^\circ$  a mezi objektivy fotoaparátů je umístěno polopropustné zrcadlo, které přicházející optické paprsky rozdělí na dva svazky, jeden pro každý fotoaparát.



Obrázek 2.23: Pozice fotoaparátů pro stereoskopické snímání [31]

**Konvergence**, neboli úhel, který spolu svírají optické osy fotoaparátů je dalším důležitým parametrem stereozáznamu. Průsečík optických os je pak bod konvergence.

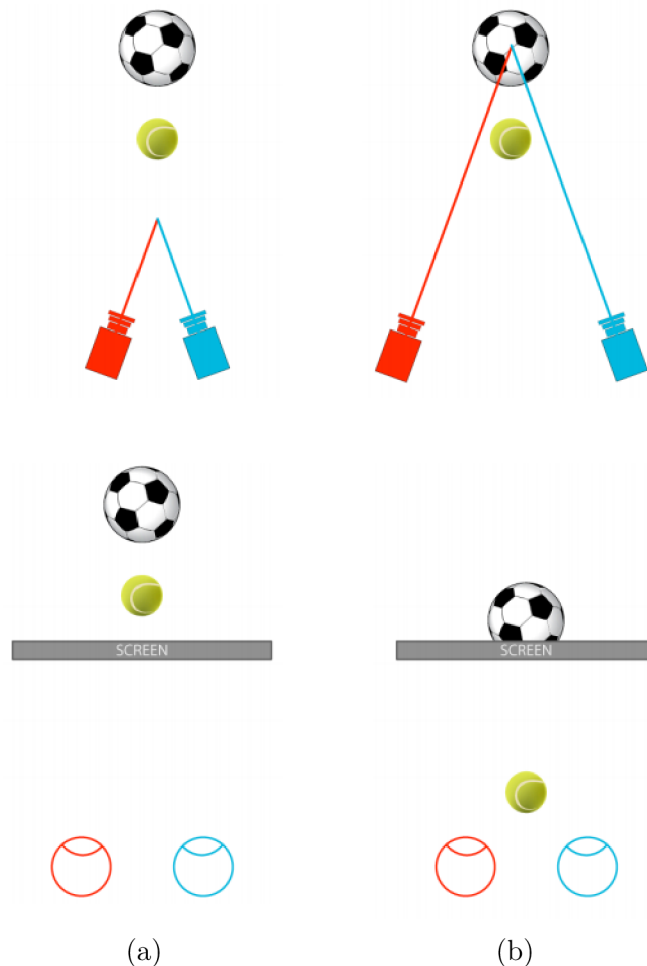


Obrázek 2.24: Velikost konvergence (nahore) a umístění snímaných objektů v prostoru při projekci (dole) [31]



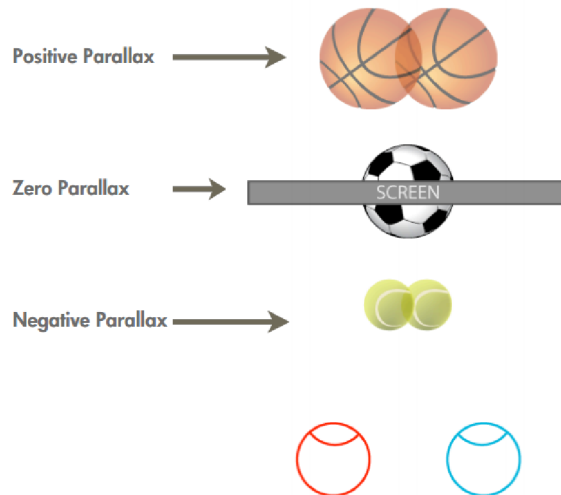
Tento parametr ovlivňuje umístění snímaných objektů v prostoru před nebo za zobrazovací rovinou. V případě, že jsou optické osy fotoaparátů rovnoběžné (Obr. 2.24a) nebo se protnou až za snímaným objektem, je při projekci snímaný objekt umístěn před zobrazovací rovinou. Pokud je bod konvergence optických os přímo na objektu (Obr. 2.24b), je pak i objekt umístěn přímo na zobrazovací rovině. V případě umístění bodu konvergence před snímaným objektem (Obr. 2.24c) je pak při projekci objekt umístěn za zobrazovací rovinou.

**Kombinací změny interaxiály a konvergence** je pak možné ovlivnit jak hloubku pořízené scény tak umístění objektů ve 3D prostoru. Obrázek (Obr. 2.25a) znázorňuje situaci, kdy je interaxiála malá a bod konvergence je umístěn před snímaným objektem. Při následném zobrazení je potom hloubka scény malá a snímaný objekt je zobrazen za zobrazovací rovinou. Obrázek (Obr. 2.25b) pak ilustruje opačnou situaci, interaxiála je velká a bod konvergence je umístěn na snímaném objektu. Při zobrazení je potom hloubka scény velká a snímaný objekt je umístěn přímo na zobrazovací rovině.



Obrázek 2.25: Znázornění zobrazovaného 3D prostoru (dole) při změně interaxiály a konvergence (nahore) [31]

**Při zobrazování stereo snímků** ve 3D prostoru na obrazovce je nutné dodržet správné umístění obrazů pro levé a pravé oko (Obr. 2.26). V případě, že je objekt umístěn v zobrazovací rovině se jedná o nulovou paralaxu, tedy obraz pro levé i pravé oko je umístěn na stejné pozici. V případě, že je objekt umístěn za zobrazovací rovinu obrazovky, se jedná o pozitivní paralaxu a obraz pro levé oko je posunut doleva a obraz pro pravé oko pak doprava. Negativní paralaxa pak popisuje situaci, kdy je zobrazovaný objekt umístěn před zobrazovací rovinou a obraz pro levé oko je posunut doprava, pro pravé oko pak doleva.



Obrázek 2.26: Znázornění paralaxy [31]

## 2.5.2 Měření hloubky scény

Jedná se o aktivní bezkontaktní metody, které dnes k měření hloubky scény v drtivé většině případů využívají laserové nebo infračervené (IR) paprsky. Při záznamu scény je vytvořena bod po bodu hloubková mapa, jejíž každý pixel nese informaci o vzdálenosti mezi senzorem a korespondujícím bodem scény [36]. Tyto metody umožňují 3D záznam scény přímo, bez použití algoritmů počítačového vidění. Využití lze najít například v navigaci robotů, prostorové rekonstrukci objektů, interakci člověka se zařízením a mnoha dalších oblastech.

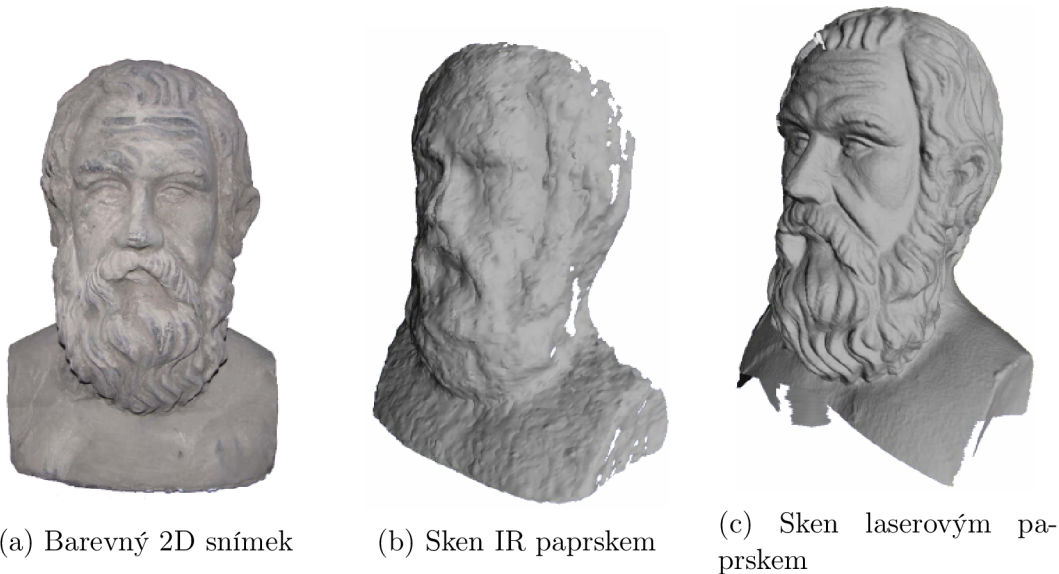
Používanými metodami pro měření vzdálenosti jsou shodně pro oba typy paprsků triangulace, měření fázového rozdílu a nejpoužívanější metodou je pak měření doby letu paprsku (Time of Flight). [37, 38].

**Měření vzdálenosti pomocí triangulace** funguje na následujícím principu. Ve známé vzdálenosti od sebe jsou umístěny emitor paprsků a detektor paprsků. Emitor vysílá paprsek směrem k objektu, jehož vzdálenost od senzoru měříme. Detektor pak zaznamenává paprsky, které se od objektu odrazily. Pomocí známé vzdálenosti detektoru a emitru, tedy i úhlu, pod nímž se paprsek od objektu odrazil lze následně určit vzdálenost objektu. Výstupem této metody je pak mapa hloubky scény,

kteřá ovšem neobsahuje informace o barvách. Další variantou umožňující zachytit jak barevný obraz, tak hloubkovou mapu scény je pak využití detektoru vzdálenosti (například laserového) a barevnou kameru [38]. Detektor vzdálenosti promítne bod na objekt, jenž je snímán barevnou kamerou. Tento bod lze pak jednoduše detekovat ve snímaném obraze a tak ke konkrétnímu bodu obrazu přiřadit vzdálenost zaznamenanou laserovým senzorem.

**Měření fázového rozdílu mezi paprsky** určuje vzdálenost k objektu na základě porovnání fází paprsku vyslaného směrem k objektu a paprsku odraženého od objektu. Tato metoda se používá především pro přesné měření velmi malých vzdáleností.

**Měření doby letu paprsku** pak funguje na principu vyslání časově modulovaného pulzu paprsků směrem k objektu a měření doby, po kterou paprsek letěl k objektu a odražen od něj zpět k snímači, jímž je zachycen. Na základě rychlosti letu paprsku a doby letu pak lze určit vzdálenost mezi senzorem a objektem. Na rozdíl od měření fázového rozdílu je tato metoda výhodná především pro měření středních a delších vzdáleností.



Obrázek 2.27: Srovnání kvality metod záznamu scény [39]

Laserový paprsek [39, 38], označovaný jako LADAR (LAsER Detection And Ranging) je pro snímání 3D scény využíván ve specializovaných aplikacích, vzhledem ke své přesnosti, náročnosti na znalosti obsluhy a ceně těchto zařízení. Jeho výhodou je pak také fakt, že není viditelný v brýlích nočního vidění a proto je vhodný pro využití ve vojenských aplikacích.

IR paprsky, označované jako LIDAR (LIght Detection And Ranging) [39, 38] se pak využívají v těch aplikacích, které nekladou takové nároky na přesnost měření a neumožňují financování dražších měřicích zařízení.

Srovnání kvality 3D záznamu scény je znázorněno na obrázku (Obr. 2.27).

# Kapitola 3

## Automatické zaostřování

Velmi důležitým parametrem pro kvalitu pořizované scény je ostrost. Automatické ostření (AF) je funkce fotoaparátů, která umožňuje automatický posuv čoček objektivu tak, aby zobrazovaný obraz byl co nejostřejší. Za ostrý obraz se považuje takový, kdy světelné paprsky vycházející z jednoho bodu scény prochází čočkami objektivu a následně se na snímacím čipu fotoaparátu sbíhají v jediném bodě. Využívají se aktivní a pasivní metody AF, a také jejich kombinace označovaná jako hybridní metody AF. Pohyb čoček je realizován pomocí motoru, v dnešní době je v drtivé většině případů využíván piezoelektrický motor.

Pro AF je výhodné znát vzdálenost od záznamového zařízení k zobrazovanému objektu. Aktivní metody AF [40] představují skupinu metod, která využívá měření této vzdálenosti na základě fyzikálních jevů jako je šíření infračerveného světla, ultrazvuku apod. Výhodou těchto metod je to, že dokáží pracovat i za velmi ztížených světelných podmínek, tedy za situace, kdy není možné na záznamovém zařízení spolehlivě rozeznat objekt, na který chceme zaostřit. Nevýhodou je odrazivost na průhledných objektech a tím pádem velké problémy při měření vzdálenosti průhledné překážky (například sklo), a také neschopnost ostřit na velmi malé vzdálenosti (například při makrofotografii). Další nevýhodou je pak nutnost přidání externího senzoru nebo soustavy senzorů, pomocí které bude vzdálenost měřena a tím vzrůstající cena zařízení.

Tyto metody zastupují v dnešní době především systémy využívající k měření vzdálenosti infračervené světlo, dříve pak také ultrazvuk. Využívá se zde principů triangulace nebo doby letu paprsku (Time of Flight) [41].

Infračervené světlo je dnes také využíváno u většiny externích blesků k přisvícení temné scény, kde pasivní ostřicí metody nejsou schopny zaostřit na fotografovaný objekt. Po tomto přisvícení jsou pak k zaostření použity metody detekce fáze nebo kontrastu.

Pasivní metody AF [42] na rozdíl od aktivních pracují pouze s pořizovaným obrazem a ostrost objektů odvozují z informací zaznamenaných v obraze. Nepoužívají tedy žádné metody přímého měření vzdálenosti a tím pádem nemají narozdíl od metod aktivních problémy s odrazy na průhledných objektech, ani nevyžadují připojení externího senzoru. Jejich použití ovšem vyžaduje lepší světelné podmínky a dostatečně kontrastní přechody mezi hranami objektů. Pasivní metody AF jsou používány v drtivé většině fotoaparátů určených pro běžné, nenáročné uživatele.

Mezi pasivní metody se řadí především systémy detekce fáze a detekce kontrastu.

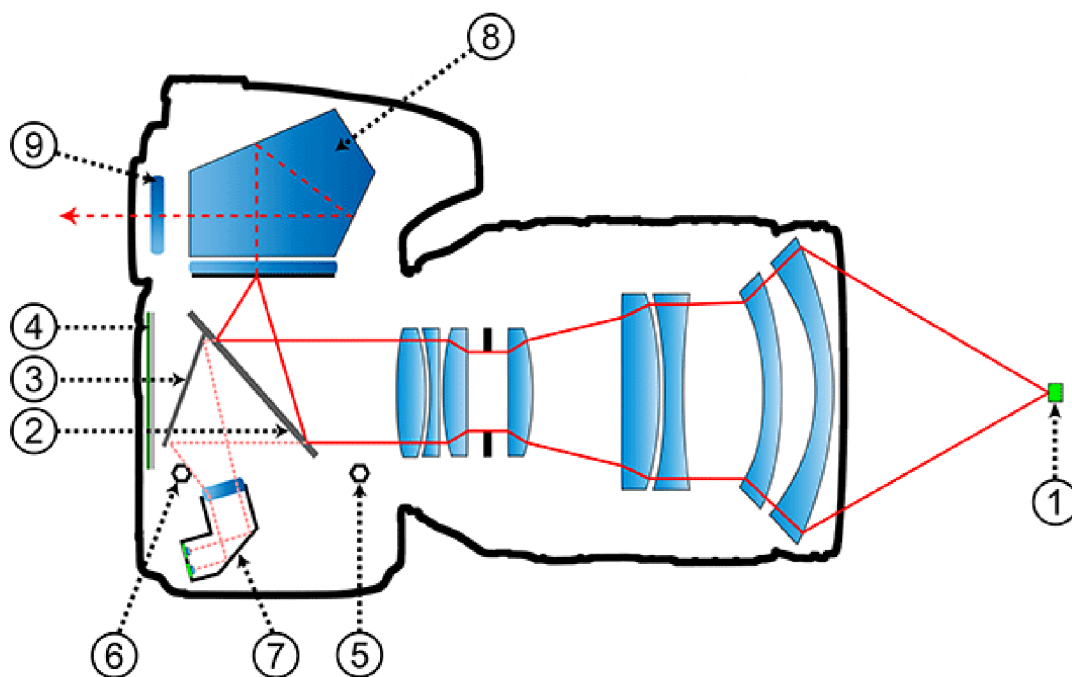
Jako hybridní metody se označují takové systémy, které využívají kombinace některých z předešlých metod.

V první řadě se jedná o kombinace pasivních metod [43]. Detekce fáze se zde využívá kvůli její rychlosti za dobrých světelných podmínek a detekce kontrastu potom za horších světelných podmínek, kde by detekce fáze nebyla schopná spolehlivě fungovat. Tuto variantu využívají v dnešní době především kompaktní fotoaparáty s výměnnými objektivy, tedy fotoaparáty, které se řadí nad klasické kompaktní fotoaparáty, ale ještě nedosahují kvalit zrcadlových fotoaparátů.

Druhou variantou hybridních systémů AF je kombinace aktivních a pasivních metod. Tato varianta využívá přednosti pasivních systémů, bezproblémového ostření skrze průhledné předměty, s výhodami aktivních systémů, schopností ostřit i za velmi špatných světelných podmínek, kdy již není v zachycovaném obraze možné rozlišit objekty a jejich hrany pomocí obrazové analýzy. Tento hybridní systém AF je především kvůli svojí ceně využíván u profesionálních zrcadlových fotoaparátů nejvyšších kategorií.

### 3.1 Detekce fáze

Výhodou této pasivní metody AF je fakt, že pro získání informace o tom, jak má být optimálně zaostřeno není nutné během samotného procesu ostření s ostřicími čočkami pohybovat (jako například při využití detekce kontrastu). Oproti detekci kontrastu je tedy tato metoda výrazně rychlejší, pro správnou funkci však potřebuje dostatečně dobré světelné podmínky. Systém automatického ostření využívající detekce fáze [44, 45] je používán u většiny dnešních jednookých zrcadlových fotoaparátů a kompaktních fotoaparátů vyšší třídy [46]. Využívají se zde dvě varianty, a to využití AF modulu (zrcadlové fotoaparáty) a využití upraveného snímacího čipu fotoaparátu, jenž mohl vzniknout díky pokroku při výrobě snímacích čipů. Kompaktní fotoaparáty neobsahují oproti zrcadlovým fotoaparátům (Obr. 3.1) zrcadlo a konstrukce jejich těla je tak výrazně jednodušší. Světelné paprsky dopadají přímo na čip fotoaparátu, neobsahují optický hledáček a ani AF modul pro detekci fáze. Náhled pořizované scény i automatické ostření tak probíhá pouze na základě obrazu pořízeného snímacím čipem.



Obrázek 3.1: Schéma zrcadlového fotoaparátu [45]

Popis jednotlivých částí schématu (Obr. 3.1):

1. Zdroj světelných paprsků
2. Hlavní polopropustné zrcadlo
3. Sekundární polopropustné zrcadlo
4. Snímací senzor fotoaparátu
5. Excentrický pin pro nastavení hlavního zrcadla
6. Excentrický pin pro nastavení sekundárního zrcadla
7. AF modul pro detekci fáze
8. Hranol optického hledáčku
9. Optický hledáček

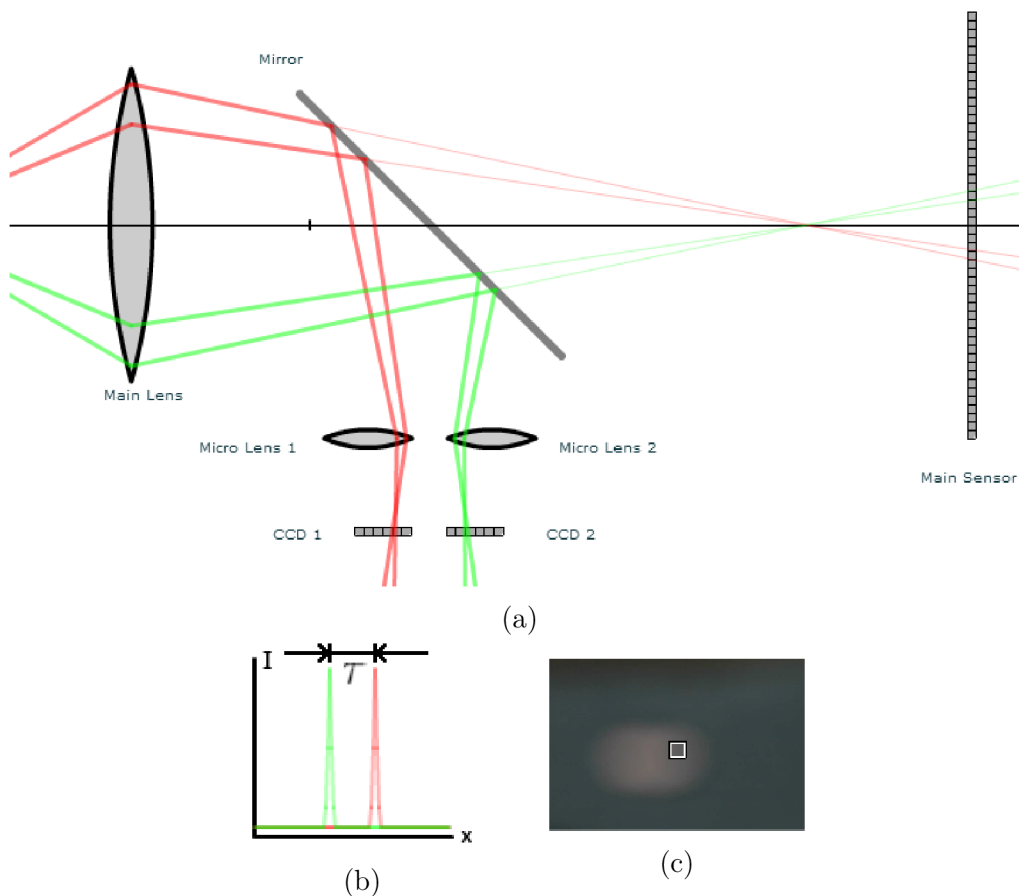
### 3.1.1 Detekce fáze pomocí AF modulu

Dnešní zrcadlové fotoaparáty (Obr. 3.1) obsahují velké množství ostřicích bodů, z nichž každý využívá dvojici mikročoček a velmi tenkých čipů (povětšinou řádkových), které jsou umístěny v AF modulu fotoaparátu. Pro zjednodušení budeme nyní uvažovat, že optické paprsky vycházejí pouze z jednoho bodu scény. Obrázek (Obr.

3.2a) pak znázorňuje průchod optických paprsků skrze objektiv (Main Lens) do těla fotoaparátu, kde jsou paprsky pomocí polopropustného zrcadla (Mirror) rozděleny na část, která je odražena do AF modulu (soustava čoček a AF čipů) a na část, která je odražena do hledáčku nebo jako v případě tohoto obrázku prochází na hlavní čip fotoaparátu (Main Sensor). Z bodu zachycované scény je vyfiltrována horní (zde znázorněna červeně) a spodní (zde znázorněna zeleně) hrana. Tyto světelné paprsky hran jsou následně pomocí mikročoček nasměrovány na AF čipy. Oba tyto čipy tedy zaznamenávají stejný obraz vycházející z jednoho bodu zachycované scény. V případě uvažovaného zjednodušení, kdy optické paprsky vychází pouze z jednoho bodu scény je vzájemný posun obrazů možné odvodit pouze na základě pozice na čipech, na kterou optické paprsky dopadly. V případě reálné scény, která je tvořena velkým množstvím takovýchto bodů, je nutné posuzovat celý řádkový obraz zaznamenaný AF čipy. Vzájemný posun obrazů z obou AF čipů je následně po zpracování mikroprocesorem určen například pomocí algoritmu křížové korelace, dle vzorce (3.1)

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot y(n - \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n + \tau) \cdot y(n) \quad (3.1)$$

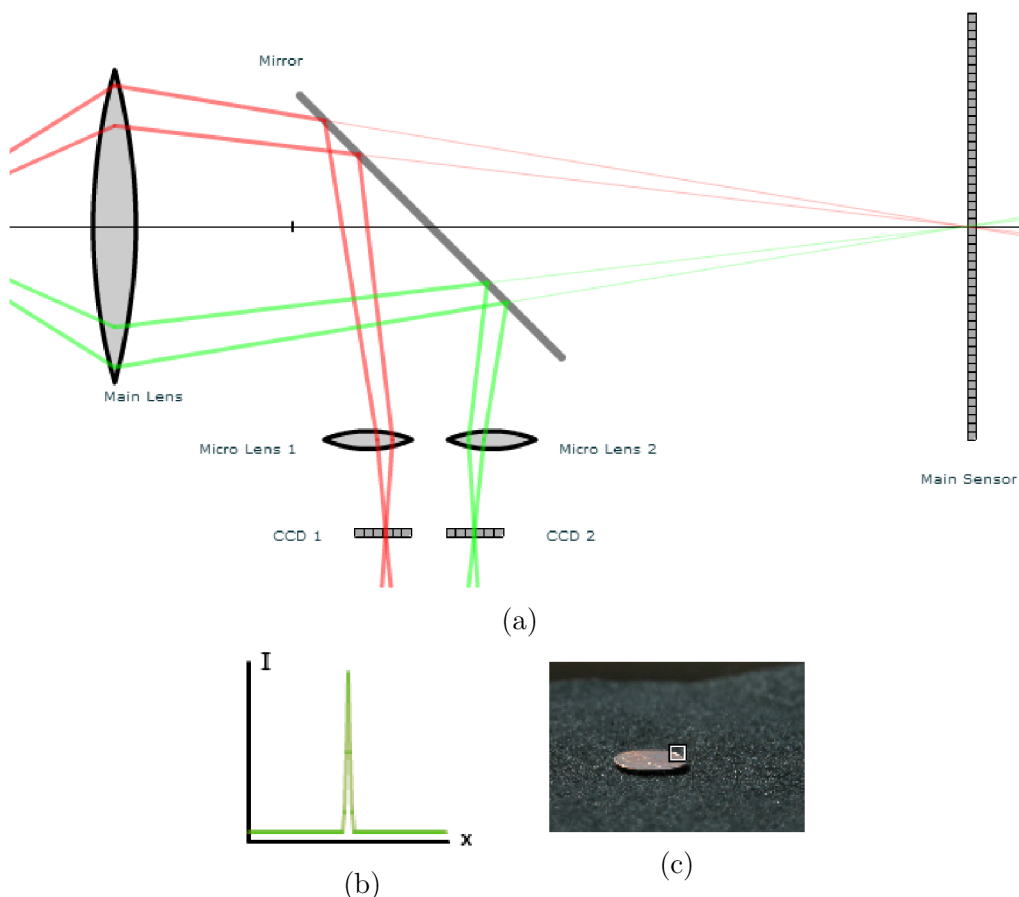
kde  $x(n)$  a  $y(n)$  jsou řádkové obrazy o délce  $n$  a  $\tau$  je velikost fázového posunu mezi nimi.



Obrázek 3.2: Princip detekce fáze - zaostřeno před senzor [47]

Na obrázku (Obr. 3.2a) je znázorněno zaostření před hlavní čip, kdy usměrněné paprsky bodu scény procházející na AF čipy dopadají s určitým posuvem od středu AF čipů. Obrázek (Obr. 3.2c) znázorňuje takto zachycenou scénu, čtverec v něm potom ostříčí bod. Této situaci odpovídá graf (Obr. 3.2b), kde vodorovná osa představuje pozici na čipu, kam dopadají optické paprsky a na svislé ose je vynesena výstup z čipů (hodnota obrazové funkce). Zde se lokální maxima obou průběhů nepřekrývají, ale zaujmají vůči sobě posuv  $\tau$ . Tento posuv je úměrný vzdálenosti, o kterou je nutné čočky objektivu přesunout, aby bylo dosaženo optimální ostrosti pro daný bod obrazu. Směr pohybu ostřicích čoček je pak odvozen z pozic lokálních maxim průběhů v grafu na vodorovné ose. Zde mohou nastat tři situace:

- překrytí lokálních maxim - zaostřeno na senzor
- horní (červená) hrana vpravo a spodní (zelená) vlevo - zaostřeno před rovinu čipu - nutno pohybovat s ostřicími čočkami směrem od hlavního senzoru
- spodní (zelená) hrana vpravo a horní (červená) vlevo - zaostřeno za rovinu čipu - nutno pohybovat s ostřicími čočkami směrem k hlavnímu senzoru



Obrázek 3.3: Princip detekce fáze - zaostřeno na senzor [47]

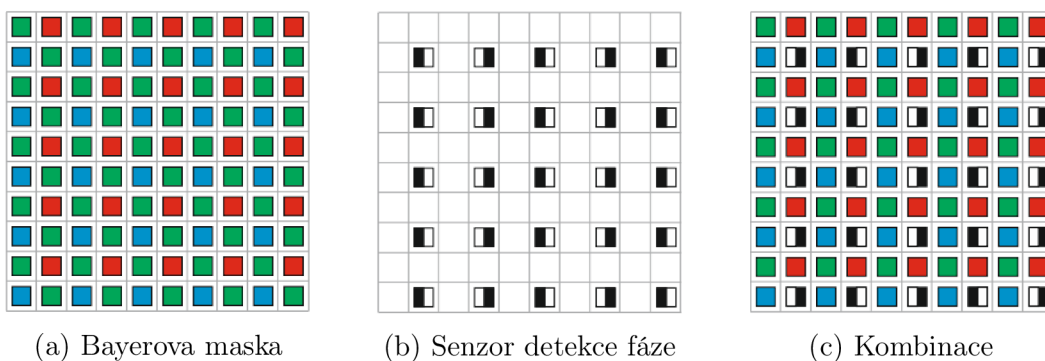
Na obrázku (Obr. 3.3a) je znázorněna situace, kdy je obraz zaostřen na hlavní čip a osy odražených a usměrněných paprsků horní a spodní hrany bodu scény



dopadají na střed AF čipů. Na grafu (Obr. 3.3b) je vidět, že se v tomto případě průběhy překrývají a nezaujmají vůči sobě žádný posuv a na obrázku (Obr. 3.3c) je znázorněna takto zachycená scéna.

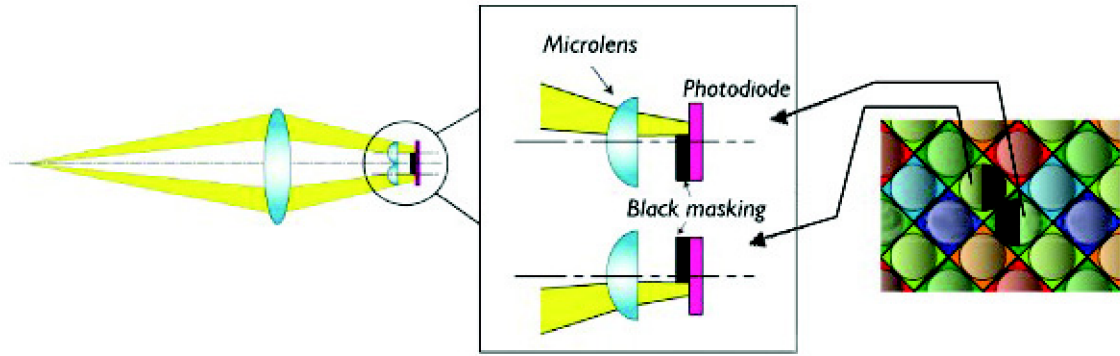
### 3.1.2 Detekce fáze pomocí snímacího čipu

Automatické ostření pomocí detekce fáze s využitím hlavního snímacího čipu [48] funguje na podobném principu jako s využitím AF modulu. Upravený snímací čip (Obr. 3.4c) obsahuje kromě RGB pixelů (Obr. 3.4a) uspořádaných do Bayerovy masky navíc ještě senzory detekce fáze (Obr. 3.4b), které obsahují z poloviny maskované pixely, jež jsou vždy využívány ve dvojicích. Tyto pixely jsou prokládány na pozice části zelených pixelů Bayerovy masky, kterých je na čipu největší množství



Obrázek 3.4: Porovnání obrazových senzorů [48]

Pokud budeme pro zjednodušení uvažovat, stejně jako v minulém případě, pouze s jedním bodem jako se zdrojem optických paprsků, je princip velmi podobný detekci fáze pomocí AF modulu. Jak je vidět na obrázku (Obr. 3.5), optické paprsky obrazu bodu scény prochází přes ostřicí čočky (objektiv), následně jsou paprsky z horní a spodní části obrazu usměrněny pomocí mikročoček na dvojici z poloviny maskovaných fotodiód. Fotodióda snímající horní hranu je maskována ze spodní poloviny a fotodióda snímající spodní hranu je maskována z horní poloviny. Takto je zajištěno, že obě fotodiody snímají pouze jim určenou část optických paprsků scény. Fázový posuv obrazů zaznamenaných dvojicí fotodiód je pak určen obdobně jako v případě využití AF modulu, pouze s tím rozdílem, že v tomto případě je nutné přihlídnout k vzájemnému posuvu umístění dvojice fotodiód na čipu.



Obrázek 3.5: Princip senzorů detekce fáze [47]

## 3.2 Detekce kontrastu

Pasivní metoda AF pomocí detekce kontrastu [49] se v dnešní době používá především u levnějších „kompaktních“ fotoaparátů, u fotoaparátů integrovaných do telefonů a u jednookých zrcadlovek v režimu živého náhledu („Live Preview“), tedy za situace kdy nelze použít AF detekci fáze, protože zrcadlo musí být odklopeno a světlo musí dopadat přímo na hlavní čip fotoaparátu. Tento typ AF lze využít pro jeden, či více bodů z pořizované scény. Na rozdíl od metody detekce fáze není v tomto případě počet „ostřicích bodů“ limitován žádnou částí hardware a je možné využít libovolný počet bodů v různých částech pořizovaného obrazu. Výstup analýz těchto ostřicích bodů je vhodné navzájem kombinovat za účelem dosažení optimální ostrosti celého pořizovaného obrazu. Tato metoda využívá obrazové analýzy k získání informace o ostrosti hran v obraze. V tomto případě nelze využít samotnou maximální hodnotu obrazové funkce, protože nelze určit hranici, při které lze již obraz považovat za zaostřený. Je proto vhodné využít například výpočet velikosti gradientu, dle vzorce (3.2) [50], v okolí ostřicího bodu a tím získání údajů o strmosti obrazové funkce v daném bodě. Pomocí vzorce (3.3) pak lze určit směr hrany - úhel, který svírá s osou  $x$ .

$$|\nabla g(i, j)| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\frac{\partial g}{\partial y}}{\frac{\partial g}{\partial x}}\right) \quad (3.3)$$

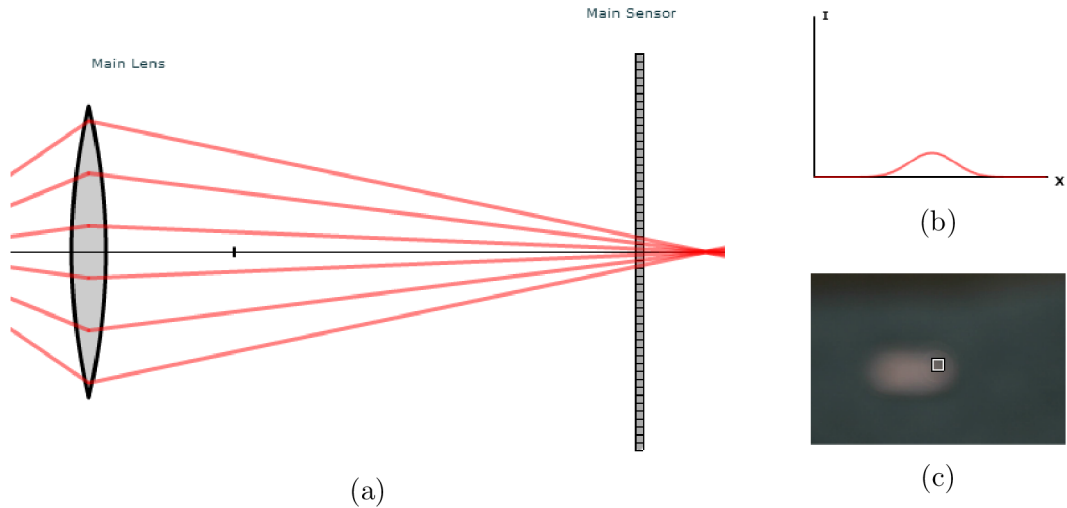
kde  $i$  a  $j$  jsou souřadnice zkoumaného bodu a  $\partial x$  a  $\partial y$  představují změnu ve směru osy  $x$  a osy  $y$ .

Vzhledem k výpočetní náročnosti parciálních derivací, lze využít například aproximaci pomocí diferencí danou vzorcí (3.4)

$$\begin{aligned} \Delta_i g(i, j) &= g(i, j) - g(i - 1, j) \\ \Delta_j g(i, j) &= g(i, j) - g(i, j - 1) \end{aligned} \quad (3.4)$$

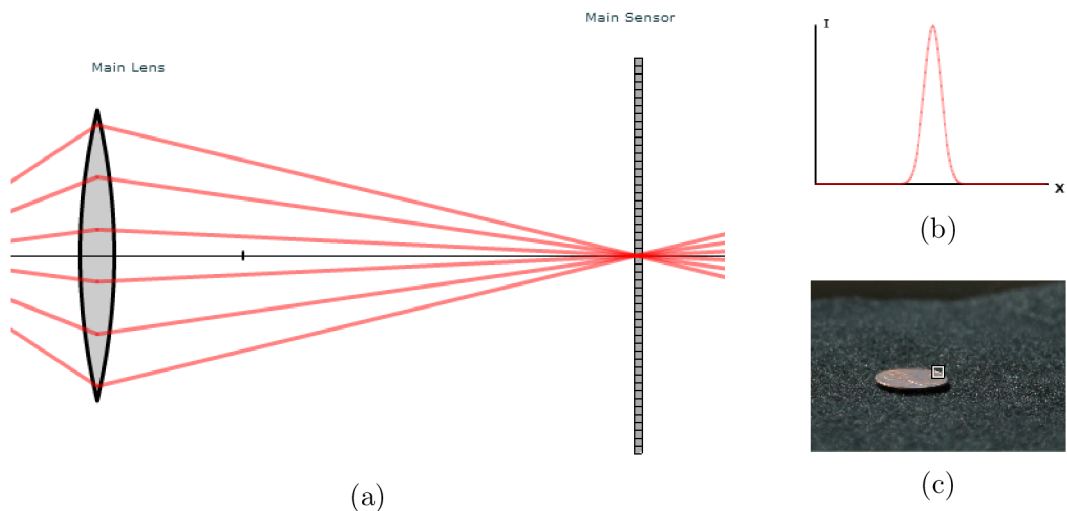
kde  $\Delta_i$  je difference ve směru indexu  $i$  (osy  $x$ ) a  $\Delta_j$  je difference ve směru indexu  $j$  (osy  $y$ ).

Za zaostřený obraz pak lze považovat takový, který dosáhne předem určené hodnoty gradientu obrazové funkce.



Obrázek 3.6: Princip detekce kontrastu - zaostřeno za senzor [51]

Na obrázku (Obr. 3.6a) je znázorněn princip metody detekce kontrastu. Optické paprsky zde prochází objektivem (Main Lens) a jsou jím směřovány na čip fotoaparátu (Main Sensor). V tomto případě je obraz zaostřen za rovinu čipu fotoaparátu. Tomu odpovídá graf (Obr. 3.6c) znázorňující 1D část obrazové funkce v okolí ostřicího bodu. Funkce je v tomto případě velmi plochá a hodnota gradientu této funkce by tedy byla nízká. Obrázek (Obr. 3.6b) znázorňuje takto zachycenou scénu.



Obrázek 3.7: Princip detekce kontrastu - zaostřeno na senzor [51]

Pro srovnání lze na obrázku (Obr. 3.7a) vidět situaci, kdy je obraz (Obr. 3.6c)

zaostřen na čip fotoaparátu. Obrazová funkce (Obr. 3.6b) je v tomto případě strmá, gradient obrazové funkce v okolí daného ostřicího bodu bude tedy výrazně vyšší než v předešlém případě.

Výhodou této metody AF oproti detekci fáze je především menší cena. Další výhodou je možnost zpracování informací pouze z malé části obrazu v okolí ostřicího bodu. Nevýhodou je ovšem její rychlost, protože při ostření je nutné pohybovat ostřicími čočkami na obě strany, pořizovat snímky a hledat v nich rostoucí hodnotu gradientu obrazové funkce. Tato metoda je tedy výrazně pomalejší než detekce fáze, je ovšem použitelná za horších světelných podmínek, než detekce fáze.

# Kapitola 4

## Pořizení testovacích snímků

Tato kapitola se bude věnovat metodám pořízení testovacích snímků, použitým zařízením, pomůckám a variantám snímaných objektů. Pro pořízení testovacích snímků byly zvoleny dva fotoaparáty. Prvním byla jednooká digitální zrcadlovka používající senzor CMOS s Bayerovou maskou a druhým pak kompaktní fotoaparát se senzorem CMOS Foveon X3 Merrill. V první části kapitoly budou popsány použité fotoaparáty a další použitá zařízení, v další části pak použité optické kalibry a tvorba modelové scény, jejíž fotografie budou společně se snímky optických kalibrů a přirozené scény použity pro hodnocení kvality snímků a zmíněných senzorů.

### 4.1 Použité fotoaparáty

Jako zástupce konvenčních fotoaparátů byla použita jednooká digitální zrcadlovka Nikon D3100 (sériové číslo: 6578817) s objektivem Nikkor 18-105 mm f/3.5-5.6 DX (sériové číslo: 33996419) (Obr. 4.1a) a jako zástupce moderních, doposud běžně nerozšířených fotoaparátů, pak kompaktní fotoaparát Sigma DP2 Merrill (sériové číslo: 90409299) (Obr. 4.1b).



(a) Nikon D3100 + Nikkor 18-105 mm  
DX

[52]



(b) Sigma DP2 Merrill

[53]

Obrázek 4.1: Použité fotoaparáty

Oba fotoaparáty využívají pro záznam obrazu senzor CMOS [54, 55] (Kap. 2.1.2), Nikon D3100 využívá Bayerovu masku (rozlišení  $4608 \times 3072$  *pixelů*) (Kap. 2.2),

Sigma DP2 pak senzor Foveon X3 (rozlišení  $4704 \times 3136$  *pixelů*) (Kap. 2.3). Oba snímací senzory jsou pak formátu Advanced Photo System type-C (APS-C) s totožným crop factorem  $1,5\times$  pro přepočítání na formát kinofilmového pole ( $36 \times 24$  *mm*).

Objektivy byly vybrány s ohledem na dostupné možnosti tak, aby jejich optické parametry byly co nejpodobnější. Fotoaparát Sigma DP2 Merrill má vestavěný pevný objektiv s ohniskovou vzdáleností  $30$  *mm* (po přepočtu na velikost kinofilmového políčka  $45$  *mm*), pro fotoaparát Nikon D3100 byl pak zvolen objektiv Nikkor 18-105 *mm*  $f/3.5-5.6$  DX, jehož ohnisková vzdálenost byla nastavena na  $30$  *mm* [56, 57]. Nejmenší expoziční čas u fotoaparátu Nikon D3100 činí  $1/4000$  *s*, u fotoaparátu Sigma DP2 Merrill pak  $1/2000$  *s*.

Pro automatické ostření oba shodně využívají metodu detekce kontrastu [55, 58] (Kap. 3.2).

#### 4.1.1 Nastavení fotoaparátů

Snímané objekty byly během pořizování testovacích snímků osvětleny zářivkovým světlem (Příloha D.7), halogenovým reflektorem (Příloha D.8) a venkovní scéna pak denním světlem (Příloha D.9). Vyvážení bílé barvy bylo u obou fotoaparátů nastaveno totožně, a to na zářivkové osvětlení (studené světlo) pro objekty snímáné pod zářivkovým osvětlením, na žárovkové osvětlení (teplé světlo) pro objekty snímáné pod halogenovým reflektorem a na sluneční světlo u snímání přirozené (venkovní) scény. Fotoaparáty byly během snímání nastaveny do režimu priorit clony. Clona pak byla na obou fotoaparátech nastavena totožná  $f/5.6$ , případně  $f/16$ . Expoziční čas fotoaparát počítal automaticky s ohledem na osvětlení snímáných objektů a ostatní nastavení fotoaparátů. Hodnota ISO byla volena ručně v rozsahu totožném pro oba fotoaparáty od ISO 100 do ISO 6400. Následující tabulka (Tab. 4.1) pak popisuje detailní nastavení fotoaparátů při snímání jednotlivých objektů. Jedná se o závislost expozičního času za daného typu osvětlení a hodnotě clony na hodnotě ISO nastavené ve fotoaparátu.

| obr.          | osvětlení | clona |       | ISO [-]                          | 100 | 200 | 400  | 800  | 1600 | 3200 | 6400 |
|---------------|-----------|-------|-------|----------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 1,2,3,4,5,6,7 | zářivka   | f/5.6 | Nikon | expoziční čas [s <sup>-1</sup> ] | 15  | 30  | 80   | 160  | 320  | 640  | 1250 |
|               |           |       | Sigma |                                  | 20  | 40  |      |      |      |      |      |
| 7             | halogen   |       | Nikon |                                  | 30  | 60  | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 |
|               |           |       | Sigma |                                  | 40  | 80  | 160  | 320  | 640  | 1250 |      |
| 8             | slunce    | f/16  | Nikon |                                  | 320 | 640 | 1250 | 2500 | —    | —    | —    |
|               |           |       | Sigma |                                  | 400 | 800 | 1600 | 2000 | —    | —    | —    |
| 9             |           | f/16  | Nikon |                                  | 80  | 160 | 320  | 640  | 1250 | 2500 | —    |
|               |           |       | Sigma |                                  | 125 | 250 | 500  | 1000 | 1600 | 2000 | —    |

| obr. | název                                    |
|------|--|
| 1    | Barevný kalibr (Příloha C.1)             |
| 2    | Siemensovy hvězdy - malé (Příloha C.5)   |
| 3    | Siemensova hvězda - velká (Příloha C.4)  |
| 4    | Foucaultovy obrazce (Příloha C.2)        |
| 5    | Lineární frekvenční kalibr (Příloha C.3) |
| 6    | Umělá scéna (Příloha C.7)                |
| 7    | Textura (Příloha C.6)                    |
| 8    | Přirozená scéna 1 (Příloha C.8)          |
| 9    | Přirozená scéna 2 (Příloha C.9)          |

Tabulka 4.1: Nastavení fotoaparátů během pořízení testovacích snímků

Při snímání každé sady fotografií (začínající fotografií ISO 100 a končící fotografií ISO 6400) bylo před snímáním první fotografie nastaveno automatické ostření, aby mohly fotoaparáty optimálně zaostřit a následně bylo přepnuto na manuální ostření proto, aby byla celá sada fotografií nasnímána se zaostřením do stejné vzdálenosti a fotoaparáty nepřeoströvaly při snímání každé fotografie.

Každá fotografie pak byla zaznamenána 3x v co nejkratším možném časovém úseku po sobě.

## 4.2 Ostatní zařízení a pomůcky

Fotoaparáty byly během snímání (Obr. 4.3) upevněny ve stativu Manfrotto 055XPROB (sériové číslo: 6164843) se dvěma stativovými hlavami Manfrotto 804RC2. Během pořizování testovacích snímků byla pomocí Digitálního luxmetru PU 550 (sériové číslo: 9734682) (Obr. 4.2) od výrobce Metra Blansko měřena intenzita světla, dopadajícího na snímané objekty.

Pro měření spektrálních charakteristik byl použit spektrální analyzátor Ocean Optics USB 4000 (sériové číslo: USB4C03099) a aplikace pro zpracování měření Overture v1.0.1. Pro orientační měření vzdálenosti fotoaparátů od snímaných ob-



Obrázek 4.2: Luxmetr PU 550 [59]



Obrázek 4.3: Fotografie pracoviště během pořizování testovacích snímků

jektů byl použit běžný rolovací metr a pro pořízení snímků skrze barevné filtry pak filtry Roscolux barvy červené<sup>1</sup>, zelené<sup>2</sup> a modré<sup>3</sup>.

### 4.3 Optické kalibry a snímané scény

Kvalita pořízených snímků bylo hodnocena podle několika kritérií. Prvním byla věrohodnost podání barev, dalším pak určení, který fotoaparát dokáže zaznamenat větší prostorové frekvence vyskytující se v obraze. Dále bylo posuzováno množství a kvalita detailů, které jsou fotoaparáty schopny zaznamenat. Pro posouzení rozdílů mezi snímky fotoaparátů byla také vytvořena modelová scéna a pořízeny venkovní fotografie za denního světla.

Během pořízení testovacích snímků bylo kvůli posouzení stálosti osvětlení měřeno osvětlení aktuálně snímaných objektů. Jednotlivá měření jsou zanesena v tabulce (Tab. 4.2), chyba jednotlivých měření pak v příloze (Příloha D.1).

<sup>1</sup>Dostupné z: <https://www.rosco.com/images/filters/cinewel/4690.jpg>

<sup>2</sup>Dostupné z: <https://www.rosco.com/images/filters/cinewel/4460.jpg>

<sup>3</sup>Dostupné z: <https://www.rosco.com/images/filters/cinewel/4230.jpg>



| obr. | typ světla | ISO [-] | 100   | 200   | 400   | 800   | 1600  | 3200 | 6400 |
|------|------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 1    | zářivka    | E [K]   | 674   | 675   | 678   | 677   | 676   | 675  | 695  |
| 2    |            |         | 704   | 693   | 690   | 698   | 700   | 702  | 704  |
| 3    |            |         | 705   | 702   | 695   | 697   | 701   | 701  | 698  |
| 4    |            |         | 613   | 613   | 599   | 614   | 603   | 602  | 613  |
| 5    |            |         | 632   | 630   | 633   | 628   | 629   | 631  | 632  |
| 6    |            |         | 632   | 633   | 633   | 634   | 631   | 634  | 632  |
| 7    |            |         | 671   | 670   | 669   | 668   | 682   | 673  | 674  |
| 7    | halogen    |         | 3040  | 3020  | 3050  | 3030  | 3030  | 3040 | 3030 |
| 8    | slunce     |         | 67200 | 66600 | 66800 | 66900 | —     | —    | —    |
| 9    |            | 66100   | 67200 | 67100 | 66800 | 66200 | 65900 | —    |      |

| obr. | název                                    |
|------|--|
| 1    | Barevný kalibr (Příloha C.1)             |
| 2    | Siemensovy hvězdy - malé (Příloha C.5)   |
| 3    | Siemensova hvězda - velká (Příloha C.4)  |
| 4    | Foucaultovy obrazce (Příloha C.2)        |
| 5    | Lineární frekvenční kalibr (Příloha C.3) |
| 6    | Umělá scéna (Příloha C.7)                |
| 7    | Textura (Příloha C.6)                    |
| 8    | Přirozená scéna 1 (Příloha C.8)          |
| 9    | Přirozená scéna 2 (Příloha C.9)          |

Tabulka 4.2: Hodnoty osvětlení během pořízení testovacích snímků, měřeno pomocí Luxmetru PU 550

### 4.3.1 Optické kalibry a textura

Pro posouzení kvality snímků pořízených senzorem s Bayerovou maskou a senzorem Foveon X3 bylo vybráno několik optických kalibrů.

Prvním aspektem, na nějž se zaměřilo zkoumání sensorů je věrohodnost podání barev. Pro tento účel byl zvolen optický kalibr v podobě barevné tabulky<sup>4</sup> s definovanými barvami. Ukázka tabulky je v příloze (Příloha C.1) společně se specifikacemi jednotlivých barevných ploch tabulky (Příloha D.10).

Další posouzení kvality snímků bylo provedeno na frekvenčních kalibrech, umožňujících porovnat senzory s ohledem na největší prostorové frekvence, které jsou schopny zaznamenat. Prostorová frekvence je, na rozdíl od frekvence časové udávané v hertzech (Hz), udávána v počtu čar na metr. Tyto kalibry pak charakterizují, jak husté čáry dokáže digitální snímací sensor zachytit.

Pro toto posouzení byl zvolen optický kalibr Foucaultových frekvenčních obrazců, jehož ukázka je v přílohách (Příloha C.2). Jelikož Foucaultovy frekvenční obrazce jsou od sebe odděleny a nenavazují na sebe, byl zvolen také lineární frekvenční kalibr s postupně se měnící frekvencí pruhů, jehož ukázka je taktéž v přílohách (Příloha C.3). Dále pak byla nasnímána jedna velká Siemensova hvězda o průměru

<sup>4</sup>Dostupné z: <http://www.danes-picta.com/>

18 *cm* obsahující 144 párů segmentů (Příloha C.4) a čtyři malé Siemensovy hvězdy o průměru 5 *cm* obsahující 72,48, 36 a 24 párů segmentů (Příloha C.5).

Posledním kritériem byla schopnost senzorů zaznamenat detaily společně s barvami. K tomuto účelu byl nasnímán barevný froté ručník, obsahující na svém povrchu velmi výraznou texturu. Jeho ukázkou lze nalézt v přílohách (Příloha C.7).

Během snímání těchto objektů byla zaznamenána vzdálenost senzoru od snímané plochy kalibrů, na kterou bylo ostřeno. Zaznamenané hodnoty jsou zaneseny v tabulce (Tab. 4.3).

Všechny fotografie kalibrů a textury byly nasnímány s nastavením clony na  $f/5.6$  totožně pro oba fotoaparáty a osvětleny byly zářivkovým světlem, textura pak také halogenovým reflektorem, jak je uvedeno v tabulce (Tab. 4.2).

| název                                    | vzdálenost [cm] |
|--|-----------------|
| Barevný kalibr (Příloha C.1)             | 71              |
| Siemensovy hvězdy - malé (Příloha C.5)   | 53              |
| Siemensova hvězda - velká (Příloha C.4)  | 53              |
| Foucaultovy obrazce (Příloha C.2)        | 59              |
| Lineární frekvenční kalibr (Příloha C.3) | 59              |
| Textura (Příloha C.6)                    | 59              |

Tabulka 4.3: Tabulka vzdáleností snímaných kalibrů od senzoru fotoaparátu

### 4.3.2 Modelová a přirozená scéna

Další oblastí vybranou pro posouzení kvality použitých senzorů jsou kromě syntetických optických kalibrů také reálné objekty. Proto byla vytvořena jedna umělá scéna v laboratoři, osvětlená zářivkovým světlem, a dále nasnímány dvě sady snímků scén venkovních, osvětlených denním světlem.

Umělá scéna byla vytvořena pomocí několika objektů umístěných do vzdáleností v rozsahu 75 – 100 *cm* od senzorů fotoaparátů a dále umístěním barevných papírů různých odstínů a barev seřazených dle barevného spektra. Při snímání této umělé scény byly oba fotoaparáty zaostřeny na barevnou a výrazně texturovanou figurku dinosaura, umístěnou v levé přední části scény ve vzdálenosti 76 *cm* od senzorů fotoaparátů. Nastavení clony bylo pak na obou fotoaparátech totožné  $f/5.6$ . Ukázkou této scény pak lze nalézt v přílohách (Příloha C.7).

Při pořizování snímků venkovní přirozené scény byly pořizeny dvě sady snímků. První venkovní scéna byla zaznamenána s nastavením clony u obou fotoaparátů  $f/5.6$ , aby bylo možné srovnávat hloubku ostrosti se snímky pořizovanými v laboratoři. Takto nízká clona však v kombinaci s velkým množstvím světla (Tab. 4.2) nedovolovala zaznamenat snímky s hodnotou ISO vyšší než 800, protože právě u hodnoty ISO 800 dosáhl fotoaparát Sigma DP2 svého nejmenšího expozičního času (Tab. 4.1). Aby mohly být zachyceny snímky s vyšší hodnotou ISO než 800 i u venkovní scény, byla druhá sada snímků zaznamenána s nastavením clony  $f/16$ . Tato úprava nastavení clony pak dovolila, s ohledem na nejrychlejší časy závěrek fotoaparátů, pořídít snímky do nastavení hodnoty ISO 3200. Ukázky obou venkovních scén lze rovněž najít v přílohách (Příloha C.8)(Příloha C.9).

# Kapitola 5

## Algoritmy pro zpracování pořízených snímků

Tato kapitola bude věnována přípravě na porovnání výstupů CMOS senzoru s Bayerovou maskou a CMOS senzoru Foveon X3 Merrill. První část kapitoly pak bude věnována algoritmům pro hodnocení kvality obrazu, které budou pro hodnocení využity, druhá část pak algoritmům a postupům, které byly použity pro přípravu a předzpracování testovacích snímků a poslední část se pak bude věnovat algoritmům pro fúzi dat snímků, vedoucím ke kombinaci výstupů obou senzorů za účelem získání snímku kombinující výhody obou senzorů.

### 5.1 Hodnocení kvality obrazu

V posledních letech se do popředí zájmu vědců dostal proces nazývaný se Hodnocení kvality obrazu (Image Quality Assessment - IQA) [60]. Cílem IQA je představit výpočetně jednoduché a snadno použitelné nástroje pro hodnocení a měření kvality obrazů a videa. Aplikace těchto nástrojů nachází uplatnění v oblastech počítačového vidění, medicíny, multimédií a mnoha dalších.

Cílem je, aby systémy využívající IQA byly v hodnocení kvality obrazu schopny nahradit lidského pozorovatele a stejně jako on dokázaly rychle a kvalitně posoudit a ohodnotit kvalitu obrazu.

#### 5.1.1 Algoritmy pro hodnocení kvality obrazu

IQA algoritmy můžeme rozdělit do tří skupin podle využití referenčního obrazu [60]. První skupinou jsou algoritmy nevyužívající pro hodnocení referenční obraz (No-Reference IQA - NR-IQA), druhou pak algoritmy, které využívají části referenčního obrazu, respektive využívají pro hodnocení příznaky extrahované z referenčního obrazu. Třetí skupinou jsou pak algoritmy, které k hodnocení kvality využívají celý referenční obraz.

## Mean Squared Error (MSE)

Tento algoritmus [60] určuje střední kvadratickou odchylku posuzovaného obrazu od obrazu referenčního. Jeho výhodou je velmi jednoduchý výpočet, avšak je velmi málo podobný lidskému hodnocení kvality obrazu. Vypočítat ho lze podle vzorce (5.1).

$$MSE(f, g) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - g(x, y)]^2 \quad (5.1)$$

Kde  $f(x, y)$  je posuzovaný obraz,  $g(x, y)$  je referenční obraz,  $x$  je index řádku daného pixelu,  $y$  je index sloupce daného pixelu a  $M \times N$  je velikost těchto obrazů (počet pixelů). U tohoto algoritmu platí, že čím je výsledná hodnota menší, tím větší je podobnost mezi obrazy.

## Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

Algoritmus PSNR [60] je principem podobný MSE, které rozšiřuje. Lze jej určit podle vzorce (5.2), který je možné zjednodušit na vztah (5.3).

$$PSNR(f, g) = 10 \log_{10} \left( \frac{(2^B - 1)^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - g(x, y)]^2} \right) dB \quad (5.2)$$

$$PSNR(f, g) = 10 \log_{10} \left( \frac{(2^B - 1)^2}{MSE(f, g)} \right) dB \quad (5.3)$$

Parametr  $B$  značí počet bitů jednotlivých pixelů v obraze. Výstup algoritmu nabývá hodnot  $\geq 0$ , kde 0 značí totožné vstupní obrazy. Vzhledem k tomu, že tento algoritmus vychází z MSE, je i PSNR velmi málo podobný lidskému hodnocení. S ohledem na to, že výstupní hodnota algoritmu MSE se nachází ve jmenovateli, platí u tohoto algoritmu, že čím je výsledná hodnota větší, tím podobnější jsou si vstupní obrazy.

## Universal Quality Index (UQI)

Index kvality obrazu [61] srovnává změnu (zmenšení) korelace hodnoceného obrazu s obrazem referenčním a jejich jasové a kontrastní rozdíly. Lze jej určit podle vzorce (5.4)

$$UQI(f, g) = \frac{4\sigma_{fg}\mu_f\mu_g}{(\sigma_f^2 + \sigma_g^2)(\mu_f^2 + \mu_g^2)} \quad (5.4)$$

kde  $\mu_f$  a  $\mu_g$  značí střední hodnotu hodnoceného a referenčního obrazu,  $\sigma_f$  je směrodatná odchylka hodnoceného obrazu,  $\sigma_g$  je směrodatná odchylka referenčního obrazu a  $\sigma_{fg}$  značí křížovou kovarianci mezi oběma obrazy a lze ji určit podle vzorce (5.5).

$$\sigma_{fg} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \mu_f)(g_i - \mu_g) \quad (5.5)$$

UIQ nabývá hodnot -1 až +1, kde nejlepší je hodnota +1, při které platí, že hodnocený a referenční obraz jsou totožné.

Tato metoda je v porovnání s MSE a PSNR podobnější lidskému hodnocení obrazu.

### Structural Similarity Index (SSIM)

Lidský zrakový systém je zaměřen na získávání informací ze strukturální rozdílnosti obrazu. Tento algoritmus [60] se toto snaží napodobit a posuzuje závislosti mezi hodnotami jednotlivých pixelů v obraze, ve kterých lze nalézt silnou závislost na hodnotách pixelů, ležících v jejich okolí. Algoritmus SSIM porovnává jasovou, kontrastní a strukturální složku referenčního a hodnoceného obrazu. Lze jej určit podle vzorce (5.6)

$$SSIM(f, g) = [l(f, g)]^\alpha \cdot [c(f, g)]^\beta \cdot [s(f, g)]^\gamma \quad (5.6)$$

kde  $l(f, g)$  je jasová složka, vztah (5.7),  $c(f, g)$  je kontrastní složka, vztah (5.8),  $s(f, g)$  je strukturální složka, vztah (5.9),  $f$  značí hodnocený obraz,  $g$  značí referenční obraz a  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  a  $\gamma > 0$  jsou konstanty, udávající váhu jednotlivých složek.

$$l(f, g) = \frac{2\mu_f\mu_g + C_1}{\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1} \quad (5.7)$$

$$c(f, g) = \frac{2\sigma_f\sigma_g + C_2}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2} \quad (5.8)$$

$$s(f, g) = \frac{\sigma_{fg} + C_3}{\sigma_f\sigma_g + C_3} \quad (5.9)$$

Parametry  $\mu_f$  a  $\mu_g$  značí střední hodnotu hodnoceného a referenčního obrazu,  $\sigma_f$  a  $\sigma_g$  pak jejich směrodatnou odchylku, křížovou kovarianci  $\sigma_{fg}$  lze opět určit podle vzorce (5.5). Konstanty  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  pak slouží k úpravě výrazů, v případě, že jsou výrazy  $\mu_f^2 + \mu_g^2$ ,  $\sigma_f^2 + \sigma_g^2$  nebo  $\sigma_f\sigma_g$  příliš blízké hodnotě 0, přičemž jsou určeny jako  $C_1 = (K_1L)^2$ ,  $C_2 = (K_2L)^2$ ,  $C_3 = \frac{C_2}{2}$ , kde  $K_1 \ll 1$ ,  $K_2 \ll 1$  a  $L$  je dynamický rozsah hodnot jednoho pixelu (například pro 8-bitový šedotónový obraz platí  $L = 255$ ).

Výstup tohoto algoritmu pak stejně jako u UQI nabývá hodnot 0 až 1, kde hodnota 1 charakterizuje totožné vstupní obrazy.

### Edge Strength Similarity (ESSIM)

Index ESSIM [60] je založen na faktu, že lidské vnímání obrazu je citlivější na směr v obraze udávaný silnějšími hranami. Pro zesílení hran v obraze je možné použít například high-pass filtr a následně hrany v obraze pomocí gradientního operátoru (Sobelův, Prewittové, apod.) detekovat. Detekce hran probíhá ve vertikálně-horizontálním směru a v obou diagonálách. Větší ze dvou takto získaných hodnot je následně pro každý bod obrazu určena jako síla hrany v tomto bodě. Index ESSIM je pak určen podle vzorce (5.10)

$$ESSIM(f, g) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E(f, i)E(g, i) + C}{(E(f, i))^2 + (E(g, i))^2 + C} \quad (5.10)$$

kde  $f$  značí hodnocený obraz,  $g$  pak referenční obraz,  $N$  je celkový počet pixelů v obraze,  $E(f, i)$  značí sílu hrany  $i$ -tého pixelu v hodnoceném obraze a  $E(g, i)$  pak sílu hrany  $i$ -tého pixelu v referenčním obraze. Parametr  $C$  pak udává měřítko a je určen jako  $C = (BL)^2$ , kde  $B$  je konstanta a  $L$  udává dynamický rozsah síly hrany. Hodnocení kvality obrazu pomocí indexu ESSIM je stejně jako pomocí SSIM velmi podobné lidskému hodnocení. Výstup nabývá stejných hodnot jako v případě indexu SSIM.

### 5.1.2 Porovnání a výběr vhodných IQA algoritmů

S ohledem na různé vlastnosti jednotlivých IQA algoritmů byl k dalšímu použití vybrán algoritmus SSIM, který ve všech testovaných případech vykazoval nejlepší výsledky a dokázal nejlépe vyhodnotit všechny testované snímky. V příloze jsou umístěny grafy porovnání jednotlivých IQA algoritmů při posuzování věrohodnosti barvy optického kalibru - barevné tabulky pro barvu teplá žluť. Při posuzování podobnosti obrazů byla pro jednotlivé algoritmy vždy použita stejná měřítko grafů, aby byla usnadněna orientace a výsledky byly na první pohled srovnatelné.

Jak je vidět na obrázku (Příloha D.2b), může výstup algoritmu MSE v některých případech mnohonásobně převýšit výstupy na ostatních testovaných obrazech, porovnání ve stejném měřítku grafů je pak značně zkresleno nahuštěním hodnot na ostatních grafech (Příloha D.2b) a malé odchylky pak nelze rozeznat.

Vzhledem k tomu, že v algoritmu PSNR je výstup algoritmu MSE umístěn ve jménovateli, způsobují zde velmi malé a velké hodnoty výstupu MSE opačný efekt. Tedy, že velká hodnota MSE způsobí ve výstupu algoritmu PSNR zhuštění bodů do jedné oblasti (Příloha D.3b) a velmi malá hodnota MSE pak výrazné zvýšení hodnoty PSNR (Příloha D.2a), přičemž ve stejném měřítku grafů je opět velmi problematické nalézt relevantní informace.

Z těchto důvodů byly z dalšího zpracování tyto dva algoritmy vyloučeny.

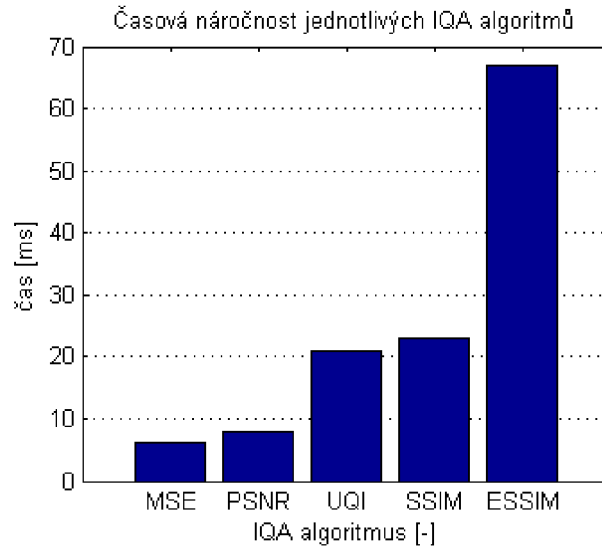
Algoritmus UQI je svým výpočtem i průběhy velmi podobný algoritmu SSIM, pouze s tím rozdílem, že nekoriguje velmi nízké nebo nulové střední hodnoty a směrodatné odchylky. Toto způsobí, že pokud je jedna z porovnaných ploch syntetická (testované plochy originálních hodnot barevné tabulky) nebo jednodušší, dosahují směrodatné odchylky nulových, respektive velmi nízkých hodnot a výstup algoritmu UQI je pak buď nulový (Příloha D.4) nebo velmi zkreslený a blízký nulovým hodnotám.

Oproti UQI koriguje algoritmus SSIM svými koeficienty  $C_x$  tyto nulové nebo velmi nízké hodnoty směrodatných odchylek a středních hodnot. Proto jsou jeho výstupy oproti UQI stabilnější a umožňují rozlišení obrazů i za těchto situací (Příloha D.5).

Algoritmus ESSIM pak při výpočtu používá hranové operátory, což způsobuje, že v některých případech nedokáže správně rozlišit jednodušší nebo syntetické barevné plochy testovaných obrazů, jak je vidět na obrázku (Příloha D.6b). V případě, že

se tato vlastnost algoritmu neprojeví, je pak jeho výstup velmi podobný výstupu algoritmu SSIM, jak lze srovnat na obrázcích (Příloha D.6a) a (Příloha D.5a).

Průměrná časová náročnost algoritmů je pak vynesena v grafu (Obr. 5.1).



Obrázek 5.1: Časová náročnost jednotlivých IQA algoritmů, průměr z 1008 výpočtů, velikost obrazu 400x400 px, měřeno na CPU Intel Core i3-330M

S ohledem na všechny tyto vlastnosti a nedostatky algoritmů bylo rozhodnuto, že v další práci bude využíván především algoritmus SSIM, který vykazoval nejstálější výsledky a dokázal testované obrazy posuzovat nejspolehlivěji.

## 5.2 Předzpracování pořízených snímků

Tato podkapitola bude věnována procesu, kterým musí surová data ze senzorů projít, aby bylo možné je následně hodnotit pomocí IQA algoritmů a provádět fúzi obrazových dat mezi snímky obou senzorů. K tomuto je nutné převést a ořezat snímky na stejné rozlišení, protože výstupní snímky ze senzorů mají rozlišení různá. Zároveň je nutné zarovnat snímky tak, aby se na stejných souřadnicích v obou snímcích nacházely tytéž objekty.

V první části se tato podkapitola bude zabývat získáním obrazových dat z RAW snímků, v druhé části pak zarovnáním snímků přes sebe a v poslední části převodem těchto snímků na stejné rozlišení.

### 5.2.1 Převod snímků ze surových dat

Oba použité fotoaparáty ukládají RAW data ze senzorů do specifických formátů, navržených jejich výrobcem. U fotoaparátu Nikon D3100 je to formát Nikon Electronic

Format (NEF)<sup>1</sup>, u fotoaparátu Sigma DP2 pak formát X3F<sup>2</sup>.

Formát NEF je v dnešní době hojně používaný, s ohledem na rozšíření fotoaparátů společnosti Nikon, a proto nepředstavuje velký problém jej dekodovat. K dekodování formátu NEF byla použita aplikace Nikon ViewNX 2 (verze 2.10.3)<sup>3</sup> od společnosti Nikon a knihovna LibRAW (verze 0.16.0-r1)<sup>4</sup>. S ohledem na to, že aplikace Nikon ViewNX 2 aplikuje po dekodování obrazových dat přídatné filtry pro odstranění šumu a zostření snímku, které v nastavení nelze vypnout, byl tento formát RAW dat v další práci dekodován pouze pomocí knihovny LibRAW, při použití vyvážení bílé barvy nastavené ve fotoaparátu bez dalších dodatečných úprav a filtrací obrazu.

Dekodování formátu X3F od společnosti Sigma však v dnešní době představuje problém. Tento formát není příliš rozšířený, stejně jako fotoaparáty Sigma se senzorem Foveon X3. Společnost Sigma neposkytuje technické specifikace tohoto formátu. Existuje několik nástrojů schopných tento formát dekodovat, ovšem kvalita jejich výstupů není příliš velká.

Prvním z těchto nástrojů je aplikace Sigma Photo Pro (verze 6.2.1)<sup>5</sup> od výrobce, která však obdobně jako aplikace Nikon ViewNX 2 velmi výrazně dodatečně obrazové filtry, které není možné v nastavení vypnout. Tyto filtry jsou obzvláště patrné při vyšší hodnotě ISO, kdy je zaznamenáno větší množství šumu. V takovém případě tyto filtry velmi zkreslí barvy a snímek znehodnotí, jak lze vidět na obrázku (Obr. 5.2b).

Další možností je pak využít RAW konvertoru od společnosti Adobe. Adobe DNG Converter (verze 8.8)<sup>6</sup> má být podle dokumentace<sup>7</sup> schopen formát X3F dekodovat, ovšem při pokusu o jeho načtení jej nedokázal rozeznat a hlásil jej jako nepodporovaný.

Knihovna dcrw<sup>8</sup> představuje další možnost dekodování formátu X3F. Dcrw ovšem nedokáže tento RAW formát korektně dekodovat, jak je vidět na obrázku (Obr. 5.2d). Vzhledem k této chybě byl kontaktován autor knihovny David Coffin, s žádostí o informace týkající se této chyby a samotného dekodování formátu X3F. David Coffin odpověděl, že dekodování formátu X3F v knihovně dcrw je implementováno na základě reverzního inženýrství programu Photo Sigma Pro a chyby při převodu RAW dat u fotoaparátu Sigma DP2 Merrill si je vědom, nicméně její oprava není v současnosti z důvodu nedostatku informací možná. Dále pak uvedl, že společnost Sigma poskytuje informace týkající se formátu X3F pouze smluvním partnerům na základě podepsání dohody o mlčenlivosti (NDA).

Dále je možno využít knihovnu LibRAW, která emuluje knihovnu dcrw, ovšem s určitými úpravami procesu dekodování RAW fotografií. Ani tato knihovna však nedokázala korektně dekodovat formát X3F (Obr. 5.2c).

S ohledem na kvalitu dekodovaných snímků RAW formátu X3F bylo přistoupeno

---

<sup>1</sup>Dostupné z: [https://nikoneurope-cz.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/14723](https://nikoneurope-cz.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/14723)

<sup>2</sup>Dostupné z: <http://www.sigma-sd.com/SD15/technology-capability.html>

<sup>3</sup>Dostupné z: [https://support.nikonusa.com/app/answers/detail/a\\_id/19357](https://support.nikonusa.com/app/answers/detail/a_id/19357)

<sup>4</sup>Dostupné z: <http://www.libraw.org/>

<sup>5</sup>Dostupné z: <http://www.sigma-global.com/en/download/cameras/sigma-photo-pro/>

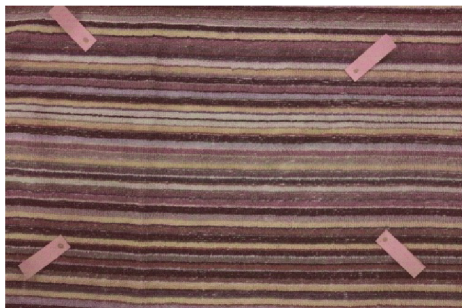
<sup>6</sup>Dostupné z: <http://www.adobe.com/support/downloads/detail.jsp?ftpID=5888>

<sup>7</sup>Dostupné z: <https://helpx.adobe.com/photoshop/camera-raw.html>

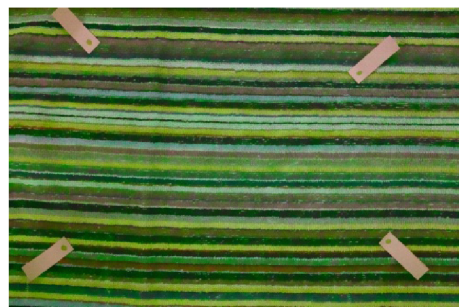
<sup>8</sup>Dostupné z: <https://www.cybercom.net/~dcoffin/dcrw/>



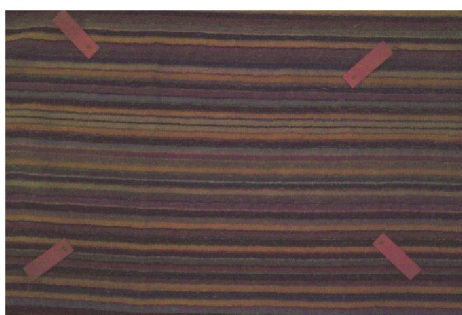
k vyčtení JPG snímku (Obr. 5.2a), který ukládá fotoaparát Sigma do souboru X3F a který se nejvíce podobá snímku reálně zachycenému a zobrazovanému na displeji fotoaparátu. Dále byly tedy zpracovávány tyto JPG snímky vyčtené z X3F souborů pomocí knihovny LibRAW.



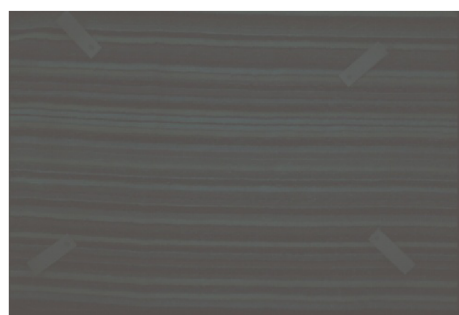
(a) JPG snímek uložený fotoaparátem do X3F



(b) Sigma Photo Pro



(c) Knihovna LibRAW



(d) Knihovna dcraw

Obrázek 5.2: Ukázka výstupu po dekodování z RAW formátu x3f, Textura, zářivkové osvětlení, ISO 6400

## 5.2.2 Zarovnání snímků

Vzhledem k tomu, že oba použité senzory mají různá rozlišení výstupních obrazů a snímky mohou být pořízeny s mírně odlišným úhlem, posunem či natočením, je před samotným zpracováním těchto snímků nutné je přes sebe správně zarovnat a ořezat tak, aby v obou snímcích zůstaly pouze platné obrazové body a nikoli prázdná místa vzniklá transformací obrazu během jejich zarovnání.

K transformaci jednoho obrazu na druhý je použita perspektivní transformace [62], schopná kompenzovat rotaci, perspektivu a lineární zkreslení, ovšem neovlivňující geometrické zkreslení objektivů, jako například soudkovitost nebo poduškovitost.

Vstupem algoritmu jsou dva obrazy. První z nich je považován za vzor (Obr. 5.3a) a druhý vstupní obraz (Obr. 5.3b) je pak transformován na tento vzor.



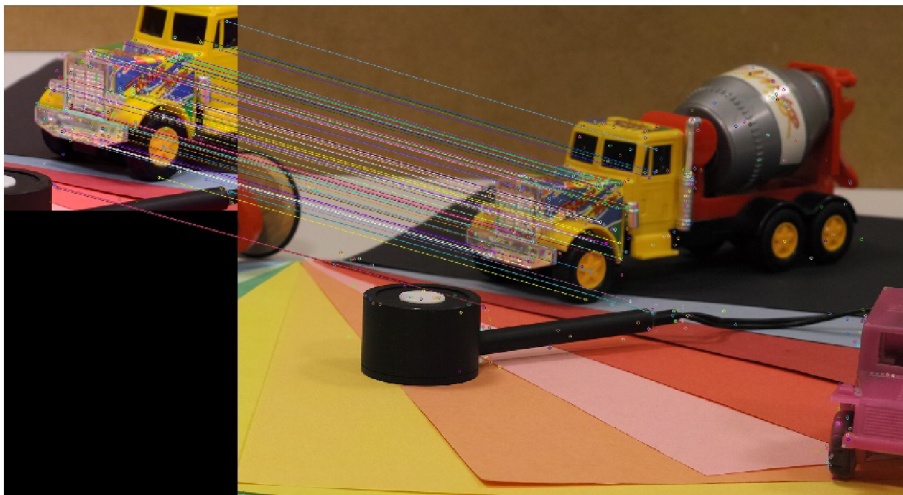
(a) Vzor, Nikon, ISO 100, 560x493 px



(b) Vstup, Sigma, ISO 100, 1619x1191 px

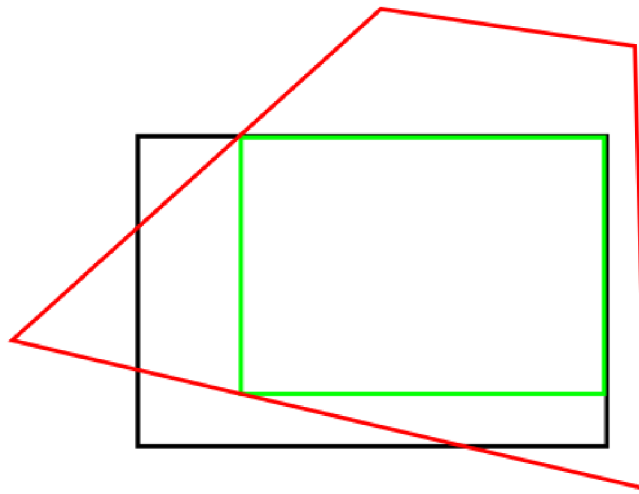
Obrázek 5.3: Ukázka zarovnání snímků - vstupní data

K výpočtu transformační matice jednoho obrazu na druhý jsou využity souřadnice spárovaných význačných bodů v obrazech. Význačné body v obou obrazech jsou nalezeny pomocí algoritmu Speeded Up Robust Features (SURF) [63]. Pro nalezené význačné body jsou vypočítány vektory SURF deskriptorů a na jejich základě jsou následně vypočítány Euklidovské vzdálenosti mezi jednotlivými body. Z takto určených vzdáleností mezi dvojicemi bodů je určena nejmenší vzdálenost a následně jsou vybrány pouze ty dvojice bodů, jejichž vzájemná Euklidovská vzdálenost mezi vektory deskriptorů je menší než trojnásobek této nejmenší vzdálenosti. Samotná transformační matice pro perspektivní transformaci je pak vypočtena ze souřadnic takto získané sady dvojic význačných bodů. Ukázka spárování význačných bodů je na obrázku (Obr. 5.4).



Obrázek 5.4: Ukázka spárování význačných bodů nalezených na vstupních obrazech

Druhý vstupní obraz je následně transformován pomocí transformační matice a z obou obrazů je následně vyříznuta jejich největší možná platná část tak, aby oba obrazy obsahovaly pouze ty obrazové body, které nesou platné jasové hodnoty a nikoli prázdná místa, která vznikla transformací. V optimálním případě je pak pouze oříznut transformovaný obraz na velikost totožnou se vzorem a vzor je ponechán beze změny. Princip výřezu ze vzorového a druhého vstupního obrazu je pak na obrázku (Obr. 5.5), kde černá barva představuje vzorový obraz, červená barva vstupní obraz po transformaci a zelená barva pak totožné výřezy z obou těchto obrazů, které jsou výstupem algoritmu.



Obrázek 5.5: Princip ořezu snímků po transformaci

Při úpravách snímků byl pro každou sadu snímků ručně vytvořen vzor, který byl následně použit pro transformace tak, aby byly snímky transformovány do požadovaných a vždy stejných rozměrů a perspektiv. Vzory použité pro transformace jsou umístěny v přílohách na přiloženém DVD 1 (Příloha A).

### 5.3 Fúze snímků

Při srovnání snímků ze senzoru využívajícího Bayerovu masku (Nikon D3100) a senzoru Foveon X3 Merrill (Sigma DP2) je patrné, že oproti senzoru Foveon X3 jsou snímky z fotoaparátu Nikon D3100 méně ostré a to vlivem demosaicingu Bayerovy masky. Jak je patrné z obrázku (Obr. 5.6), snímky fotoaparátu Nikon ovšem mají živější barvy než snímky fotoaparátu Sigma DP2. Toto potvrzuje i anketa mezi třiceti respondenty, kde 90% dotázaných uvedlo, že se jim více líbí barvy fotoaparátu Nikon D3100 a také je považují za živější.



(a) Nikon D3100



(b) Sigma DP2 Merrill

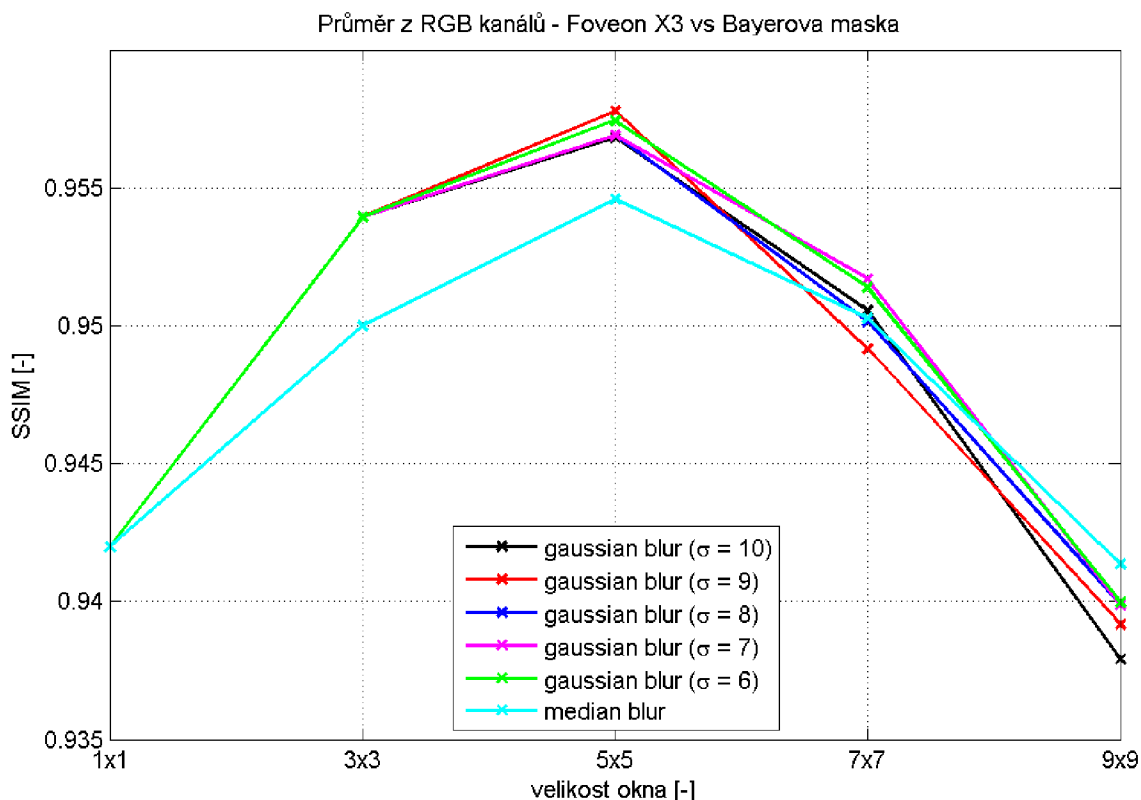
Obrázek 5.6: Výřez z testovacího snímku - textura, ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 200x200 px

Na základě těchto skutečností pak vzniká požadavek na vytvoření snímků obsahujících detaily z fotoaparátu Sigma DP2 a živé barvy z fotoaparátu Nikon D3100. Tento princip lze demonstrovat na koncepci fotoaparátu, obsahujícího jak senzor CMOS s Bayerovou maskou tak senzor Foveon X3. Tento fotoaparát by pak mohl mít pouze jeden objektiv a takto by bylo možné předejít problému, kdy jsou oba pořízené snímky vlivem dvou objektivů geometricky deformovány různě.

Cílem této podkapitoly je představení algoritmů schopných fúze obrazových dat snímků z obou senzorů mezi sebou a získání výsledného snímku, obsahujícího detaily snímku z fotoaparátu Sigma DP2 a barvy z fotoaparátu Nikon D3100.

### 5.3.1 Kombinace rozdílů kanálů v prostoru RGB

Cílem tohoto algoritmu je získání rozdílů jednotlivých obrazových bodů v každém z RGB kanálů snímku z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a z fotoaparátu Nikon D3100. Aby byly rozdíly jasových hodnot obrazových bodů co nejméně zkreslené rozdílem v ostrosti fotografií, je snímek z fotoaparátu SigmaDP2 Merrill rozostřen tak, aby se co nejvíce podobal snímku z fotoaparátu Nikon D3100. Pro tento účel bylo testováno gausovské (použita funkce `GaussianBlur` z knihovny `OpenCV`) a mediánové (použita funkce `medianBlur` z knihovny `OpenCV`) rozostření, přičemž výsledky obou rozostření porovnané pomocí algoritmu `SSIM` se snímek z fotoaparátu Nikon D3100 jsou vyneseny v grafu (Obr. 5.7). Tento graf znázorňuje závislost hodnoty `SSIM` na velikosti okna použitého pro oba typy rozostření a gausovské rozostření s různou velikostí koeficientu  $\sigma$ . Jak je z grafu patrné, nejvyšší podobnost vykazují obě rozostření pro velikost okna  $5 \times 5$  pixelů. Detailní porovnání koeficientů  $\sigma$  pak lze najít v příloze (Příloha D.1). Z tohoto grafu zároveň vyplývá, že funkce `GaussianBlur` z knihovny `OpenCV` zaokrouhluje vstupní hodnoty  $\sigma$  na celá čísla.



Obrázek 5.7: Srovnání rozostření snímků v závislosti na velikosti okna

Srovnání obou rozostření při velikost okna  $5 \times 5 \text{ pixelů}$  je pak pro přehlednost zaneseno v tabulce (Tab. 5.1). Z grafu (Obr. 5.7) a tabulky (Tab. 5.1) je pak patrné, že nejpodobnější snímku z fotoaparátu Nikon D3100 je snímek rozostřený pomocí gaussovského rozostření s velikostí okna  $5 \times 5 \text{ pixelů}$  a hodnotou koeficientu  $\sigma$  rovnu 9.

| typ rozostření   | gaussovské |          |         |         |         | medián  |
|------------------|------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma$ [-]     | 10         | 9        | 8       | 7       | 6       |         |
| hodnota SSIM [-] | 0.956824   | 0.957777 | 0.95688 | 0.95688 | 0.95743 | 0.95457 |

Tabulka 5.1: Srovnání rozostření, velikost okna  $5 \times 5$ , průměr z RGB kanálů

Takto jsou tedy k dispozici tři snímky. Prvním je snímek z fotoaparátu Nikon (označen  $N$ ), druhým pak původní snímek z fotoaparátu Sigma (označen  $S$ ) a třetím pak tento snímek rozostřený (označen  $S^G$ ).

Výsledný (fúzovaný) snímek lze pak určit podle vztahu (5.11)

$$I_k(x, y) = S_k(x, y) + (N_k(x, y) - S_k^G(x, y)) \quad (5.11)$$

kde  $I_k$  značí nový obraz pro  $k$ -tý kanál (z RGB),  $x$  je index řádku daného pixelu,  $y$  je index sloupce daného pixelu,  $S_k$  značí  $k$ -tý kanál snímku z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill,  $S_k^G$  pak  $k$ -tý kanál tohoto snímku rozostřeného pomocí gaussovského rozostření a  $N_k$  značí  $k$ -tý kanál snímku z fotoaparátu Nikon D3100.

### 5.3.2 Skládání kanálů v prostoru YCbCr

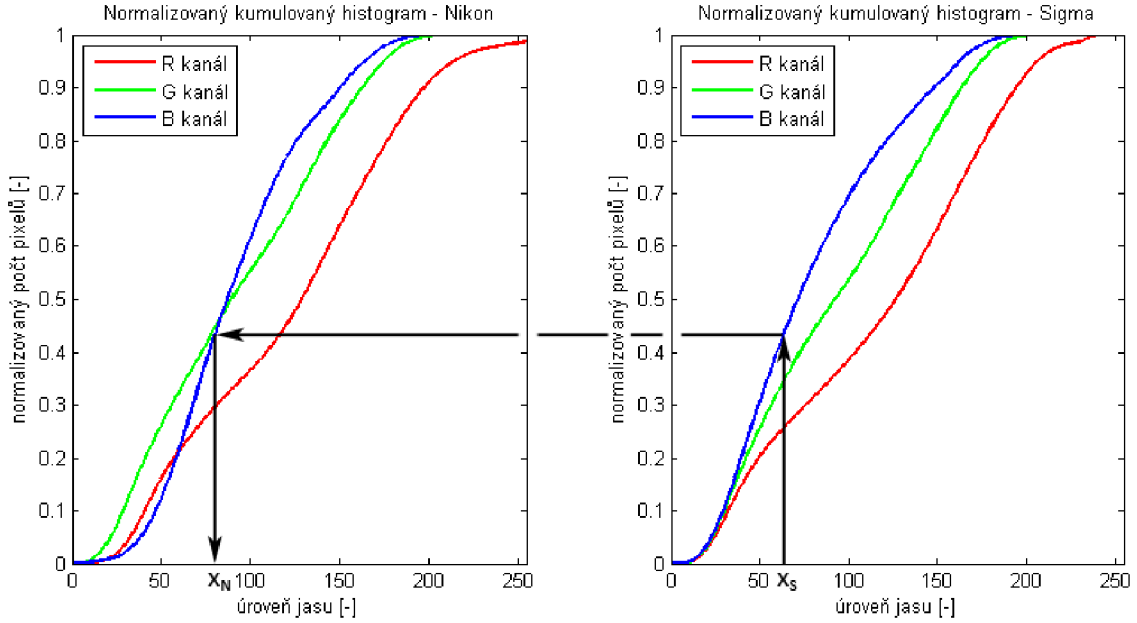
Další algoritmus využívá barevného prostoru YCbCr [64] formátu 4:4:4. Barevná komponenta Y značí jasovou složku, nesoucí detaily a texturu, Cb a Cr pak barevné složky, představující chromatickou složku rozdílu modré (Cb) a červené (Cr) barvy. Tento barevný prostor byl vyvinut pro použití ve videotechnice, kde umožňoval přenášet menší množství dat při zachování dostatečné kvality, tak, že Y kanál je přenášen celý, ale barevné kanály Cb a Cr jsou přenášeny komprimovaně. Vzniklo tak několik formátů, například 4:2:2, který říká, že pro každé dva obrazové body kanálu Y v horizontální ose je přenesen pouze jeden obrazový bod v kanálu Cb a Cr, nebo 4:4:4, která přenáší ve všech kanálech plný počet obrazových bodů. Takováto komprese barevných kanálů je výhodná především s ohledem na fakt, že lidské oko je citlivější na detaily (tedy hrany v obraze), ale méně citlivé na barvy. V dnešní době je barevný prostor YCbCr využíván také v obrazovém formátu JPG.

Tento algoritmus pak k vytvoření výstupního obrazu využívá prosté kombinace Y kanálu ze snímku fotoaparátu Sigma DP2 Merrill, tedy přenesení jeho detailů, a Cb a Cr kanálů ze snímku z fotoaparátu Nikon D3100 pro přenesení jeho barev.

### 5.3.3 Histogram Matching

Algoritmus Histogram Matching [65] využívá k určení nového výstupního obrazu kumulované histogramy obou vstupních snímků, tedy snímku z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a snímku z fotoaparátu NikonD3100. V tomto případě jsou hodnoty kumulovaných histogramů normalizovány na hodnoty od 0 do 1. Takto normalizovaný kumulovaný histogram je vypočten pro každá barevný kanál (RGB) zvlášť.

Jasová hodnota obrazového bodu v každém z barevných kanálů snímku z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill pak slouží jako index na x-ose kumulovaného histogramu tohoto snímku. K hodnotě tohoto indexu je následně nalezena nejbližší hodnota v kumulovaném histogramu snímku z fotoaparátu Nikon D3100 a index na ose x této hodnoty je následně prohlášen za novou hodnotu obrazového bodu v daném kanále výstupního snímku. Tento postup ilustruje obrázek (Obr. 5.8), kde  $x_S$  představuje index kumulovaného histogramu snímku z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill (jasovou hodnotu obrazového bodu vstupního obrazu) a  $x_N$  pak index kumulovaného histogramu snímku z fotoaparátu Nikon D3100 (novou hodnotu obrazového bodu výstupního obrazu) pro daný barevný kanál.



Obrázek 5.8: Ukázka získání nové jasové hodnoty obrazového bodu pro modrý kanál

### 5.3.4 Přenos barev mezi snímky

Cílem přenosu barev mezi snímky je přenést pouze barvy z jednoho obrazu do druhého, se zachováním jeho textur a detailů. Tento přenos se provádí v barevném prostoru  $l\alpha\beta$  [66, 67]. Pro samotný přenos jsou pak použity algoritmy popsané v poslední části této podkapitoly.

#### Převod z RGB do $l\alpha\beta$ barevného prostoru

Převod obrazu z RGB barevného prostoru do prostoru barev  $l\alpha\beta$  probíhá přes barevný prostor XYZ a následně LMS [67]. Po roznásobení transformační matice mezi prostory  $RGB \rightarrow XYZ$  a transformační matice mezi prostory  $XYZ \rightarrow LMS$  můžeme provést převod  $RGB \rightarrow LMS$  podle vztahu (5.12)

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

pro rovnoměrnější rozložení dat v barevném prostoru LMS je vhodné jednotlivé složky normalizovat na rozsah hodnot 1 – 2 a následně zlogaritmovat podle vztahu (5.13)

$$I'_k(x, y) = \log_{10} \left( \frac{I_k(x, y) - \min}{\max - \min} + 1 \right) \quad (5.13)$$

kde  $I'_k$  značí novou hodnotu k-tého kanálu (z LMS),  $x$  je index řádku daného pixelu,  $y$  je index sloupce daného pixelu,  $I_k$  značí původní hodnotu k-tého kanálu,

$min$  pak značí minimum z hodnot všech tří kanálů původního obrazu  $I$  a  $max$  jejich maximální hodnotu.

Převod z takto upraveného prostoru L'M'S' do  $l\alpha\beta$  prostoru pak můžeme provést pomocí vztahu (5.14)

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0.5774 & 0.5774 \\ 0.4082 & 0.4082 & -0.8165 \\ 0.7071 & -0.7071 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

### Převod z $l\alpha\beta$ do RGB barevného prostoru

Zpětný převod obrazu z barevného prostoru  $l\alpha\beta$  do prostoru RGB je ekvivalentní zpětnému postupu převodu do prostoru  $l\alpha\beta$  [67]. Nejdříve je podle vztahu nutné převést obraz z prostoru  $l\alpha\beta$  do prostoru L'M'S'.

$$\begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0.4082 & 0.7071 \\ 0.5774 & 0.4082 & -0.7071 \\ 0.5774 & -0.8165 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Následně je provedena denormalizace a odlogaritmování hodnot podle vztahu (5.16)

$$I_k(x, y) = (max - min) \cdot 10^{(I'_k(x,y)-1)} + min \quad (5.16)$$

kde  $I_k$  značí hodnotu k-tého kanálu denormalizovaného obrazu (z LMS),  $x$  a  $y$  jsou indexy daného pixelu,  $I'_k$  značí hodnotu k-tého kanálu (z L'M'S') a  $min$  a  $max$  jsou hodnoty minima a maxima použité při normalizaci.

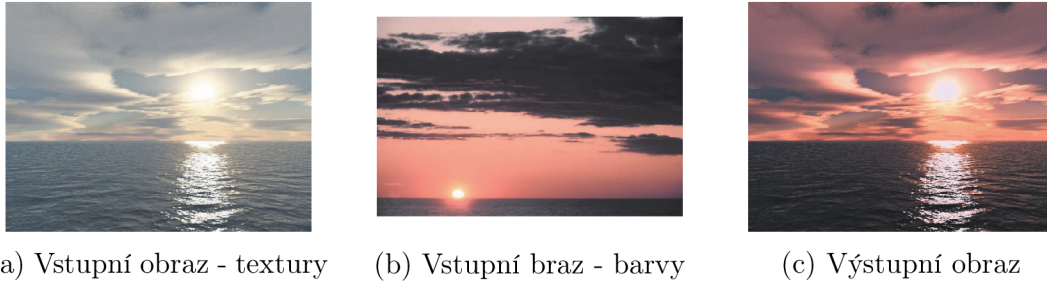
Z barevného prostoru LMS do RGB je pak přechod možný pomocí vztahu (5.17)

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

### Přenos barev mezi obrazy

Algoritmus přenosu barev mezi obrazy [67] umožňuje vytvoření nového obrazu (Obr. 5.9c) spojením detailů a textur z jednoho zdrojového obrazu (Obr. 5.9a) a barev a barevných tónů z obrazu druhého (Obr. 5.9b). Jako vstupní obraz poskytující texturu a detaily byl použit obraz z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a jako vstupní obraz poskytující barvy a barevné tóny byl použit obraz z fotoaparátu Nikon D3100.





Obrázek 5.9: Přenos barev mezi obrazy [67]

Tento algoritmus je použit na vstupní obrazy, převedené do barevného prostoru  $l\alpha\beta$ . Výstupní obraz je pak rovněž v barevném prostoru  $l\alpha\beta$  a pro správné zobrazení je nutné jej převést zpět do barevného prostoru RGB. Samotný přepočítání vstupních obrazů na obraz výstupní je pak možné provést pomocí vztahu (5.18)

$$S'_k(x, y) = \frac{\sigma_{S_k}}{\sigma_{N_k}} (S_k(x, y) - \mu_{S_k}) + \mu_{N_k} \quad (5.18)$$

kde  $S'_k$  značí hodnotu  $k$ -tého kanálu výstupního obrazu,  $x$  je index řádku daného pixelu,  $y$  je index sloupce daného pixelu,  $S_k$  pak značí hodnotu  $k$ -tého kanálu vstupního obrazu poskytujícího texturu a detaily,  $\mu_{S_k}$  a  $\mu_{N_k}$  jsou střední hodnoty  $k$ -tého kanálu vstupního obrazu poskytujícího texturu a vstupního obrazu poskytujícího barvy,  $\sigma_{S_k}$  a  $\sigma_{N_k}$  jsou pak směrodatné odchylky  $k$ -tého kanálu těchto dvou obrazů.

# Kapitola 6

## Návrh a implementace aplikace

Aplikace obsahuje několik knihoven. První knihovna implementuje algoritmy pro převod snímků z RAW dat a předzpracování snímků, druhá algoritmy pro hodnocení kvality snímků, třetí pak algoritmy pro fúzi snímků a poslední pak implementuje uživatelské rozhraní.

Aplikace je implementována v jazyce C++ s využitím knihoven STL<sup>1</sup>, OpenCV<sup>2</sup>, LibRAW<sup>3</sup> a boost<sup>4</sup>.

### 6.1 Převod z RAW dat a předzpracování snímků

Tato knihovna obsahuje třídy `LoadRAW` a `ImgProc`. Třída `LoadRAW` slouží k de-kódování souborů NEF a k vyčtení JPG náhledu ze souboru X3F, k čemuž využívá knihovnu `LibRAW`. Tato třída pak oba typy obrazů převede na objekt `cv::Mat`, tedy matici obrázku knihovny `OpenCV`, který je využíván v dalších částech aplikace.

Dále tato knihovna obsahuje třídu `ImgProc`, která se stará o základní obecné operace s obrazem. V této třídě jsou implementovány například algoritmy pro perspektivní transformaci a zarovnání snímků nebo pro výpočet histogramů snímků.

### 6.2 Hodnocení kvality snímků

Hodnocení kvality snímků je implementováno v další knihovně, ve třídě `IQA`. Tato třída obsahuje implementace v práci uvedených algoritmů pro Image Quality Assessment (Kap. 5.1.1), tedy algoritmu MSE, PSNR, UQI, SSIM a ESSIM. Dále pak implementuje jejich podpůrné algoritmy jako výpočet křížové kovariance (pro SSIM) mezi obrazy a filtraci obrazů pomocí hranových detektorů (pro ESSIM).

---

<sup>1</sup>Dostupné z: <http://www.cplusplus.com/reference/stl/>

<sup>2</sup>Dostupné z: <http://opencv.org/>

<sup>3</sup>Dostupné z: <http://www.libraw.org/>

<sup>4</sup>Dostupné z: <http://www.boost.org/>

## 6.3 Fúze snímků

Obrazovou fúzi snímků zastřešuje třída `ImgFusion`. Tato třída implementuje samotné algoritmy pro obrazovou fúzi uvedené v práci (Kap. 5.3) a algoritmy pro převod obrazu z RGB barevného prostoru do prostoru  $l\alpha\beta$  a zpět.

## 6.4 Uživatelské rozhraní aplikace

Pro snadné použití aplikace bylo implementováno konzolové uživatelské rozhraní. Toto rozhraní umožňuje volbu jednoho z módů aplikace. Na výběr je dekodování RAW snímků, zarovnání a ořez snímků, výpočet IQA mezi dvěma snímky nebo fúze dvou snímků. Aplikace využívá parser parametrů `program_options` z knihovny `boost`, který se také stará o nastavení a kontrolu parametrů aplikace. Samotné nastavení parametrů aplikace je pak implementováno ve třídě `Application`.

# Kapitola 7

## Výsledky porovnání senzorů a hodnocení snímků

Tato kapitola bude věnována porovnání snímků pořízených testovanými fotoaparáty Nikon D3100 a Sigma DP2 Merrill, dále hodnocení pořízených testovacích snímků a poslední část pak bude věnována hodnocení výsledků algoritmů pro fúzi snímků.

Pro účely této práce byla pořízena galerie testovacích snímků, čítající dohromady zhruba 450 snímků. Celková velikost těchto snímků v RAW formátu se pohybovala okolo 20 GB, po převodu snímků do bezstrátového a snadno čitelného formátu TIF pak zhruba 10 GB.

Z těchto dat bylo získáno velké množství výstupů, z nichž byly vybrány ty nejrelevantnější a nejzajímavější, které budou dále prezentovány.

### 7.1 Optické kalibry, textura a snímané scény

Tato část kapitoly se bude nejdříve zabývat prezentací výsledků porovnání podání barev testovaných fotoaparátů, dále pak porovnáním ostroty a celkové kvality výstupů fotoaparátů.

Objektiv Nikkor 18-105 mm f/3.5-5.6 DX použitý na fotoaparátu Nikon D3100, vykazuje geometrické zkreslení typu soudek, především v okrajích fotografií. Proto budou v této kapitole v některých případech použity pro hodnocení pouze výřezy ze snímků tak, aby toto geometrické zkreslení, způsobené objektivem, nevnášelo chyby do hodnocení senzoru fotoaparátu.

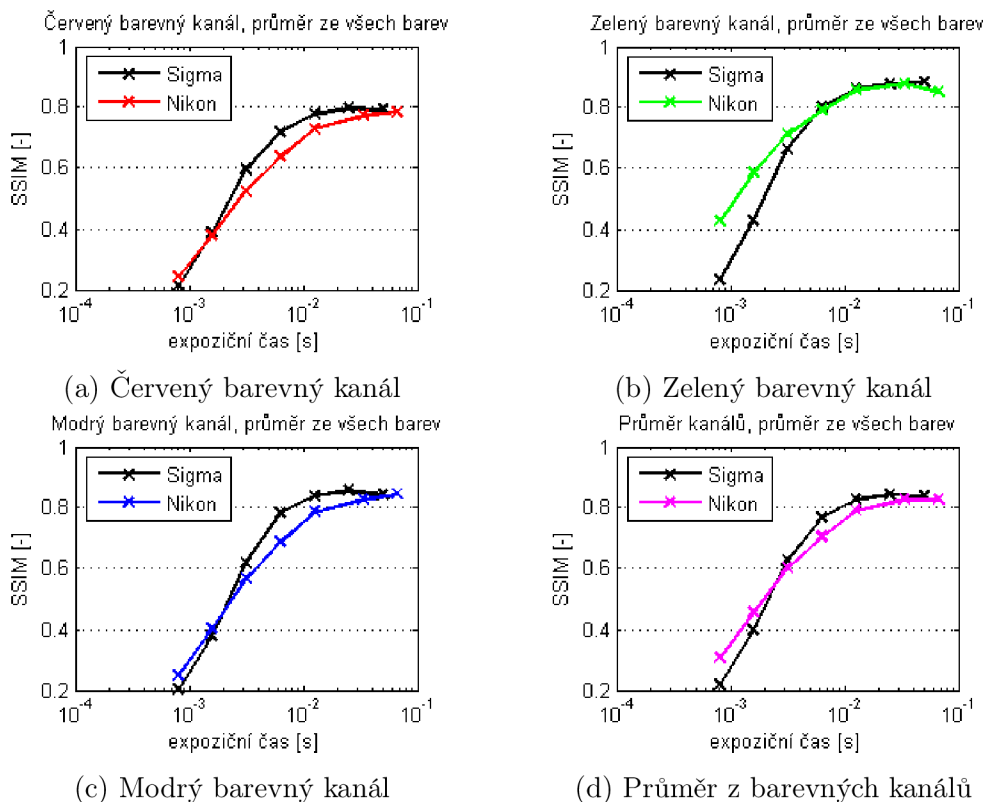
#### 7.1.1 Barevný optický kalibr

Podání barev bylo posuzováno na základě snímků barevné tabulky (Příloha C.1), jejíž skutečné hodnoty jasových složek jednotlivých barevných kanálů byly známy (Příloha D.10). V přílohách byly (vzhledem ke své velikosti) umístěny grafy ukazující barevnou věrohodnost, určenou indexem SSIM v závislosti na expozičním čase (respektive hodnotě ISO), při kterém byly snímky pořízeny. Jednotlivé pozice grafů věrohodnosti podání barev Fotoaparátu Nikon D3100 (Příloha D.11) a Sigma DP2 Merrill (Příloha D.12) pak odpovídají pozicím barev v barevné tabulce (Příloha C.1)

a také pozicím v grafech, ukazující originální hodnoty RGB (Příloha D.10). Další grafy (Příloha D.13) pak ukazují aritmetické průměry z hodnot RGB kanálů a srovnávají vedle sebe oba fotoaparáty. Odpovídající si hodnoty ISO a expozičních časů je pak možné nalézt v tabulce (Tab. 4.1).

Z těchto grafů je pak patrné, že se zmenšujícím se expozičním časem (tedy s rostoucí hodnotou ISO) a rostoucím množstvím šumu v obraze klesá věrohodnost podání barev u obou fotoaparátů. Je možné si také všimnout, že u barev, jejichž originální jasová hodnota jednoho barevného kanálu je nulová nebo velmi blízká nule (například tyrkysová modř a azurová pro červený kanál nebo žlutá pro modrý kanál) se u obou fotoaparátů projevuje vstup šumu do tohoto barevného kanálu a jeho vlivem je pak jasová hodnota tohoto kanálu značně zkreslena, což vede k hodnotám indexu SSIM velmi blízkým nule. Dále je také možné si všimnout, že u posledního řádku tabulky, který představuje barvy od bílé po černou, tedy od barev s vysokou saturací jasu v barevných kanálech až po velmi nízké hodnoty jasu, dosahuje věrnějšího podání barev fotoaparát Sigma DP2 Merrill pro ty barvy, které obsahují větší množství jasu v jednotlivých kanálech (tedy pro barvy bílá, šedá 1 a šedá 2) oproti tomu fotoaparát Nikon D3100 pak dosahuje věrnějšího podání u těch barev, které obsahují menší množství jasu, tedy se v nich více projevuje šum, který je do značné míry eliminován při demosaicingu obrazových bodů z Bayerovy masky. Tyto poslední řádky tabulky jsou pak doplněny o rozptyly jasových hodnot jednotlivých barevných ploch reprezentovaných krabicovými grafy pro hodnotu ISO 100 (Příloha D.14) a ISO 3200 (Příloha D.15).

Výpočtem aritmetického průměru z věrohodnosti všech barevných ploch v tabulce pak byly získány grafy (Obr. 7.1) srovnávající celkovou věrohodnost podání barev obou fotoaparátů v jednotlivých barevných kanálech a graf průměru těchto tří barevných kanálů (Obr. 7.1d). Z těchto grafů je patrné, že fotoaparát Sigma DP2 Merrill dosahuje tak, jak bylo předpokládáno v teoretické části práce (Kap. 2.3), věrnějšího podání barev, ovšem pouze na vysokých hodnotách expozičního času (tedy nízkých hodnotách ISO) a to průměrně o 3 %. Při klesající hodnotě expozičního času (rostoucí hodnotě ISO) se pak projevuje jeho větší náchylnost k záznamu šumu a v podání barev se věrohodnějším stává fotoaparát Nikon D3100 a to průměrně o 7,5 %.



Obrázek 7.1: Grafy věrohodnosti podání jednotlivých barevných kanálů a celkové věrohodnosti, aritmetický průměr ze všech barev (Příloha C.1), zářivkové osvětlení

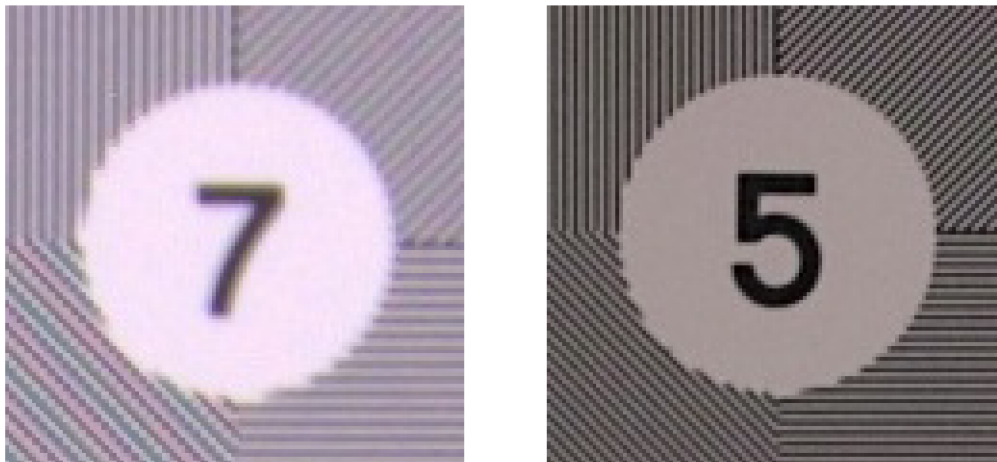
## 7.1.2 Optické frekvenční kalibry a textura

Pro zjištění, který fotoaparát je schopen zaznamenat v obraze větší prostorové frekvence, byly využity snímky Foucaultových obrazců, lineárního frekvenčního kalibru a Siemsenových hvězd. Dále bylo také zjišťováno, jaké množství detailů jsou fotoaparáty schopny zaznamenat, což úzce souvisí s možnostmi zaznamenávat vysoké prostorové frekvence v obraze. Pro tento účel pak posloužila výrazná textura, tedy nasnímaný barevný froté ručník.

### Foucaultovy obrazce

Pro určení, který fotoaparát dokáže v obraze zaznamenat vyšší prostorové frekvence byl využit kalibr obsahující Foucaultovy obrazce (Příloha C.2). Pro oba fotoaparáty byly určeny ty obrazce s co nejhustším obsahem čar, ve kterých bylo ještě možné čáry správně rozeznat. Pro fotoaparát Nikon D3100 to byl obrazec označen číslem 7 (Obr. 7.2a), pro fotoaparát Sigma DP2 Merrill pak obrazec označen číslem 5 (Obr. 7.2b). Z těchto zjištění vyplývá, že fotoaparát Sigma DP2 Merrill je schopen zobrazit vyšší prostorové frekvence, než fotoaparát Nikon D3100. Zároveň je také možné si u fotoaparátu Nikon D3100 povšimnout, že u vodorovné čáry (pravá dolní část) a u diagonální čáry (pravý horní roh) se projevuje větší rozmazání než u horizontálních čar a čar diagonály v opačném směru. Toto může být způsobeno například použitím nesymetrického okna při demosaicingu Bayerovy masky, tedy

okna, které zaujímá více obrazových bodů na výšku než na šířku.



(a) Nikon D3100 - výřez z obr. č.7

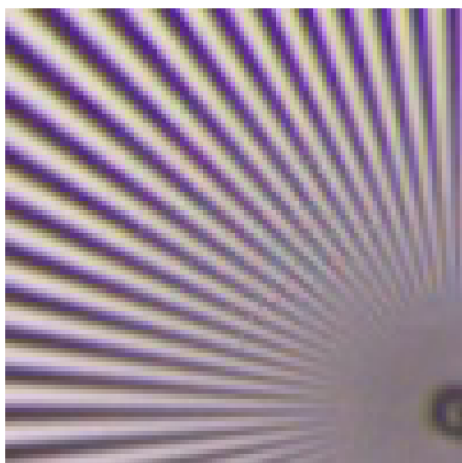
(b) Sigma DP2 Merrill - výřez z obr. č.5

Obrázek 7.2: Výřez z Foucaultových obrazců (Příloha C.2) - největší rozlišitelná prostorová frekvence, ISO 100, zářivkové osvětlení

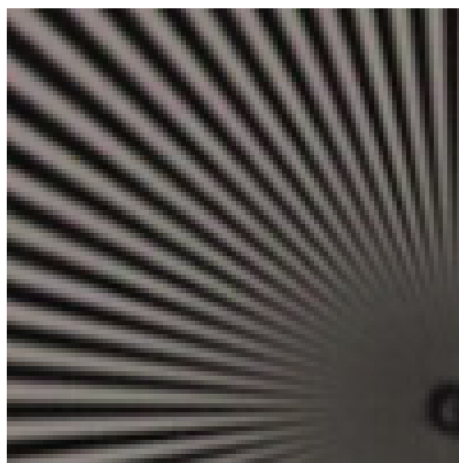
Pro srovnání byla do příloh umístěna ukázka Foucaultových obrazců označených číslem 6 (Příloha C.10), tedy těch, které jsou umístěny mezi obrazci s maximální prostorovou frekvencí, již jsou schopny fotoaparáty zaznamenat.

### Siemensovy hvězdy a Lineární optický kalibr

Dále byly srovnány Siemensovy hvězdy o průměru 5 *cm* (Obr. 7.3), obsahující 48 párů segmentů, a o průměru 18 *cm*, obsahující 144 párů segmentů. Na základě těchto obrazců nelze dostatečně průkazně rozhodnout, který fotoaparát je (případně které jejich části) dokázal zaznamenat s větším množstvím detailů. Jak je ovšem patrné z výřezu snímku z fotoaparátu Nikon D3100 (Obr. 7.3a), projevila se u jeho objektivu výrazná optická vada. Touto vadou je chromatická aberace, která zkreslila hrany čar Siemensových hvězd a zanesla do nich nádech fialové barvy.



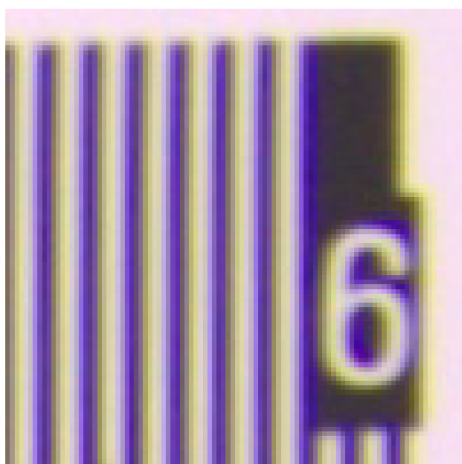
(a) Nikon D3100



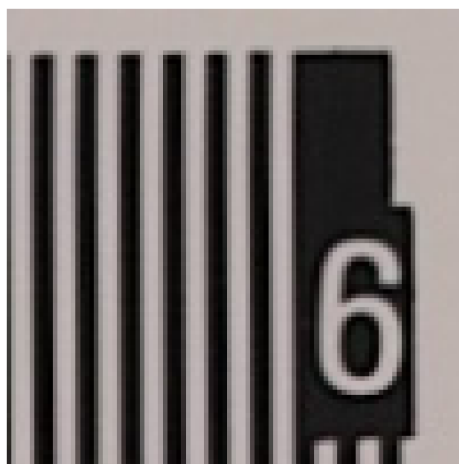
(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek 7.3: Porovnání výřezu Siemsenovy hvězdy (Příloha C.5) - 48 párů segmentů, ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 100x100 px

U tohoto porovnání fotoaparátů byl dále nasnímán lineární frekvenční kalibr (Příloha C.3). Z porovnání výřezu snímků pro oba fotoaparáty (Obr. 7.4) je pak opět u snímku z fotoaparátu Nikon D3100 výrazná chromatická aberace, je zde ovšem možno jasně rozlišit, že fotoaparát Sigma DP2 Merrill dokázal zaznamenat snímek ostřeji.



(a) Nikon D3100



(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek 7.4: Porovnání výřezu lineárního frekvenčního kalibru (Příloha C.3), ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 100x100 px

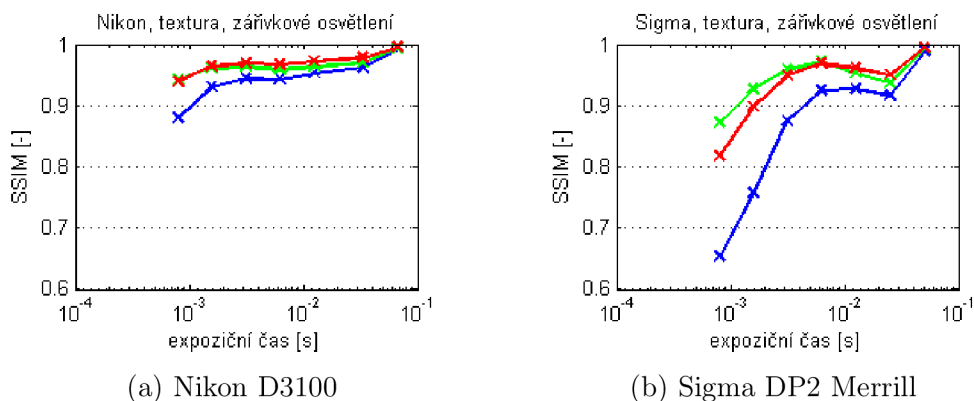
Tento kalibr byl také nasnímán přes barevné filtry barvy červené, zelené a modré, uvedené v kapitole (Kap. 4.2). Tyto barevné snímky byly následně převedeny do odstínů šedi, aby nebyl optický vjem zkreslován náchylností očí k určité barvě. Výřezy z takto upravených snímků jsou pak umístěny v přílohách (Příloha C.11). Ze snímků lze vyvodit, že fotoaparát Nikon D3100 zaznamenal nejostřeji snímek přes zelený filtr (Příloha C.11b), což může být způsobeno především tím, že Bayerova maska obsahuje zhruba polovinu obrazových bodů zelené barvy. Fotoaparát Sigma DP2 Merrill



pak zaznamenal nejostřeji snímek pořízený přes modrý filtr (Příloha C.11f), což lze opět přisoudit vlastnostem senzoru, v tomto případě faktu, že vrstva zaznamenávající modrou barvu leží na senzoru nejvýše a tak je schopna zaznamenat největší množství detailů a nejmenší množství šumu. Ze snímků (Příloha C.11e) a (Příloha C.11d) je patrné, že čím je vrstva na senzoru Foveon X3 níže, tím menší kontrast má fotografie pořízená přes barevný filtr barvy zaznamenávané touto vrstvou.

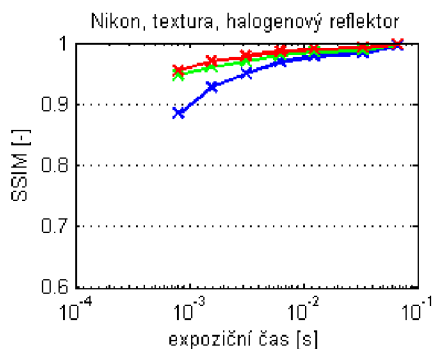
## Hodnocení textury

Pro posouzení množství zaznamenaných detailů ve snímcích byla použita také výrazná barevná textura (barevný froté ručník). Jak už bylo prezentováno na obrázku (Obr. 5.6), je z těchto snímků jasně patrné, že fotoaparát Sigma DP2 Merrill zaznamenal výrazně větší množství detailů, než fotoaparát Nikon D3100. Byly také vytvořeny grafy (Obr. 7.5) ukazující pokles kvality snímku při záznamu pod zářivkovým osvětlením (Příloha D.7) s klesajícím expozičním časem fotoaparátů (respektive rostoucí hodnotou ISO), které byly porovnávány vůči snímku pořízenému při hodnotě ISO 100, tedy tomu, který lze považovat za nejkvalitnější. Z těchto grafů je pak patrné, že menší pokles kvality snímků, vykazoval fotoaparát Nikon D3100, průměrně 4 % oproti průměrnému poklesu 8,5 % u fotoaparátu Sigma DP2 Merrill. Důvodem je pak především menší množství šumu, zaznamenaného ve fotografiích s klesajícím expozičním časem.

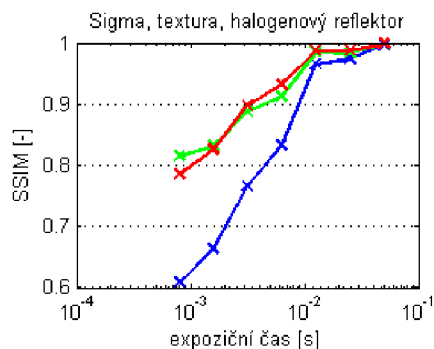


Obrázek 7.5: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, SSIM index, textura (Příloha C.6), zářivkové osvětlení, RGB kanály

Stejné grafy poklesu kvality snímku s klesajícím expozičním časem pak byly zpracovány také pro snímky (Obr. 7.6) zaznamenané při osvětlení textury halogenovým reflektorem (Příloha D.8). Průměrný pokles kvality snímku u fotoaparátu Nikon D3100 zde byl 2,9 %, u fotoaparátu Sigma DP2 Merrill pak 11,2 %. Je ovšem možné si všimnout toho, že v rozsahu ISO 100 - 400 je úbytek kvality snímku při osvětlení textury halogenovým reflektorem výrazně menší než při osvětlení textury zářivkovým světlem.



(a) Nikon D3100

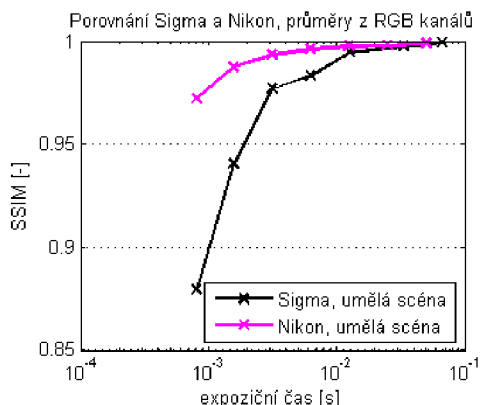


(b) Sigma DP2 Merrill

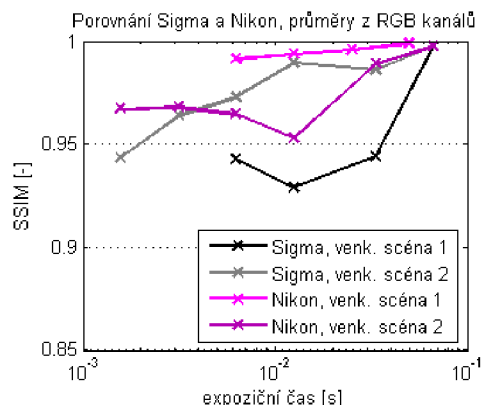
Obrázek 7.6: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, SSIM index, textura (Příloha C.6), osvětlení halogenovým reflektorem, RGB kanály

### 7.1.3 Modelová a přirozená scéna

Pro posouzení fotoaparátů z hlediska běžného používání byla nasnímána umělá scéna osvětlená zářivkovým světlem a dvě venkovní scény osvětlené světlem denním. Graf (Obr. 7.7) zobrazuje srovnání růstu kvality snímků pro umělou scénu a graf (Obr. 7.8) pak zobrazuje stejnou závislost pro scény venkovní (porovnáváno vždy se snímkem dané sady pořízeným při hodnotě ISO 100).



Obrázek 7.7: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, SSIM index, umělá scéna (Příloha C.7), aritmetické průměry z RGB kanálů



Obrázek 7.8: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, SSIM index, venkovní scény (Příloha C.8)(Příloha C.9), aritmetické průměry z RGB kanálů

Z grafu (Obr. 7.7) je patrné, že fotoaparát Nikon D3100 vykazoval průměrně menší úbytek kvality snímku (0,8 %) s klesajícím expozičním časem (rostoucí hodnotou ISO) než fotoaparát Sigma DP2 Merrill (3,3 %). Z grafů lze dále usoudit, že pokles kvality umělé scény pro malé expoziční časy je menší než pokles kvality pro venkovní scény. Zde je ovšem nutné poznamenat, že snímání venkovních scén může být, i přes snahu pořídit fotografie v co nejtěsnějším sledu za sebou, zkruseno na

první pohled velmi špatně rozeznatelnými vnějšími vlivy. Takovými vlivy jsou například mírná změna osvětlení daná pohybem mraků nebo pohyb objektů (především listů stromů a trávy) vlivem větru.

## 7.2 Výsledky fúze snímků

Tato podkapitola se bude věnovat hodnocením algoritmů pro fúzi snímků. V první části bude posuzována věrnost podání barev snímků upravených těmito algoritmy, v druhé kapitole pak kombinace přenosu detailů ze snímků fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a barev ze snímků fotoaparátu Nikon D3100.

### 7.2.1 Věrnost podání barev

Pro posouzení věrnosti podání barev jednotlivých algoritmů byly tyto algoritmy aplikovány na snímky kalibru barevné tabulky. Výsledné grafy pak byly s ohledem na svou velikost umístěny do příloh. Byly porovnány jednotlivé barevné kanály pro všechny barvy tabulky, tedy kanál červený (Příloha D.16), zelený (Příloha D.17) a modrý (Příloha D.18). Dále byl vypočítán aritmetický průměr z těchto barevných kanálů a výsledek byl opět vyneseno do grafů (Příloha D.19).

Z těchto grafů je patrné, že co se týče věrohodnosti podání barev, dopadly nejhůře snímky upravené algoritmem Histogram Matching (Kap. 5.3.3). Tento algoritmus byl oproti ostatním horší zhruba o 7 %. Dále je také patrné, že v posledním řádku (tedy v porovnání bílé až černé barvy s postupně klesajícími jasovými hodnotami kanálů) se s klesající hodnotou jasu jednotlivých kanálů ve věrohodnosti podání barev výrazně zhoršuje algoritmus pro přenos barev mezi snímky (Kap. 5.3.4). Jeho celková barevná věrohodnost je pak oproti ostatním horší zhruba o 4 %. Algoritmus pro kombinaci rozdílů mezi barevnými RGB kanály (Kap. 5.3.1) a algoritmus pro kombinaci kanálů v prostoru YCbCr (Kap. 5.3.2) si z hlediska barevné věrohodnosti vedly zhruba stejně dobře a pohybovaly se vždy na rozmezí hodnot věrohodnosti barev původních snímků.

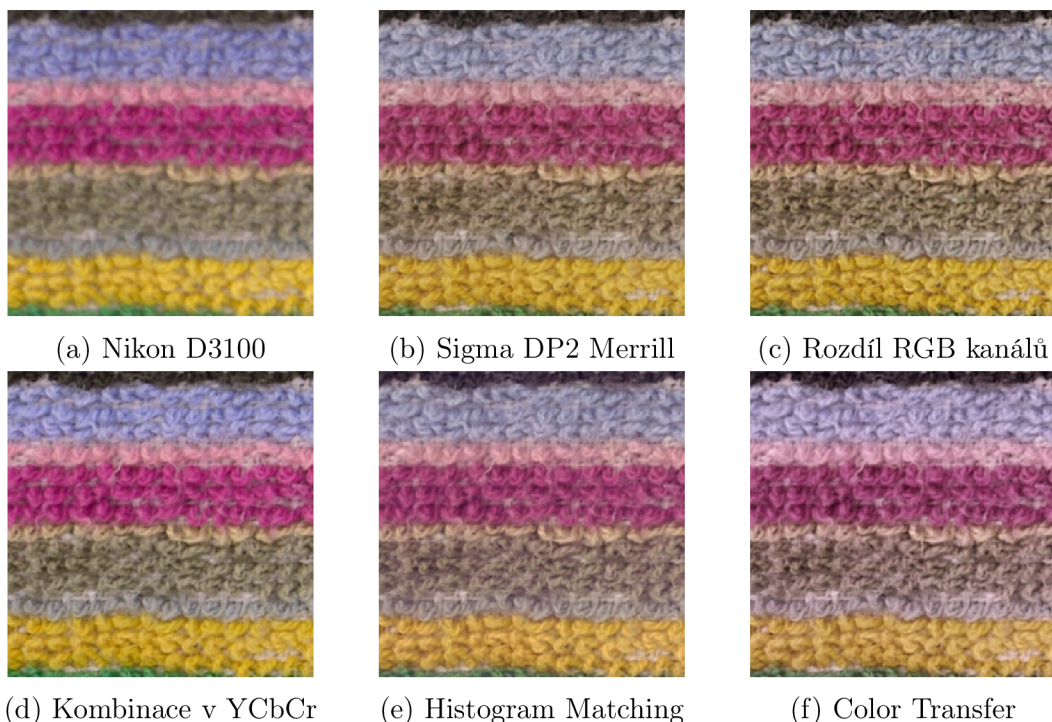
### 7.2.2 Textura a scény

Pro vizuální posouzení výstupů algoritmů pro fúzi snímků jsou zde v práci prezentovány výřezy snímků textury (Obr. 7.9) a výřezy snímků z jedné venkovní scény (Příloha C.12). Zvětšená verze obrázku (Obr. 7.9) je umístěna v příloze (Příloha C.13).

Na obou sadách snímků je patrné, že nejlepších výsledků dosáhly algoritmy kombinace rozdílů mezi barevnými RGB kanály (Kap. 5.3.1), kombinace kanálů v prostoru YCbCr (Kap. 5.3.2) a algoritmus pro přenos barev mezi snímky (Kap. 5.3.4). V porovnání těchto tří algoritmů byl pak nejúspěšnější algoritmus kombinace rozdílů mezi barevnými RGB kanály. Algoritmus kombinace kanálů v prostoru YCbCr sice přenesl barvy snímku fotoaparátu Nikon D3100 věrněji než algoritmus kombinace rozdílů mezi barevnými RGB kanály, ovšem jeho celkový kontrast nedosahoval tak kvalitních výsledků, jako druhý zmíněný a detaily ze snímku fotoaparátu Sigma DP2 Merrill nedokázal přenést dostatečně kvalitně. Algoritmus pro přenos barev

mezi snímky pak do snímků přenáší především dominantní barvy a pokud nejsou všechny části obrazů barevně vyvážené, obrazy zkreslí a přenesou do nich právě dominantní barvy. Ve snímcích textury (Obr. 7.9f) je tak patrný vliv dominantní růžové barvy (i když byl algoritmus aplikován na celý obraz, nikoli na výřez), u venkovní scény (Příloha C.12f) je to pak vliv barev šedé (budovy) a modré (obloha). Algoritmus Histogram Matching (Kap. 5.3.3) dosáhl výsledků nejméně kvalitních (průměrně o 6 % horších než ostatní algoritmy), protože vnášel do snímků šedou a ty se pak pro oči stávaly méně lákavé a sytost jejich barev klesala.

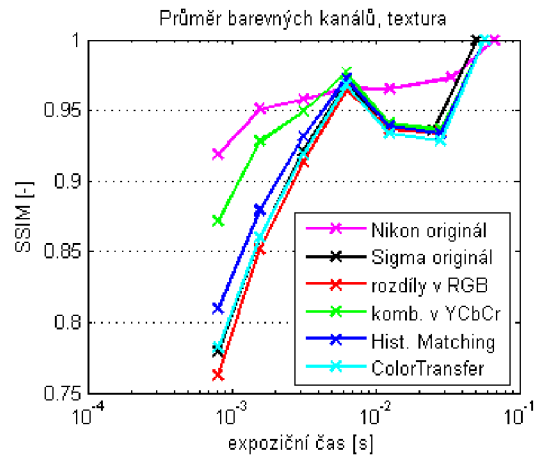
Pro podložení těchto závěrů byla provedena anketa mezi třiceti respondenty, kteří porovnávali kvalitu výstupů těchto čtyř algoritmů. Respondenti řadili výstupní snímky podle kvality od nejlepšího po nejhorší, přičemž toto pořadí pak bylo přepočítáno na počet bodů pro každý algoritmus tak, že za umístění na prvním místě byly přičteny čtyři body, za umístění na druhém místě tři body, na třetím pak dva body a na čtvrtém jeden bod. Ze součtu bodů pro všechny algoritmy (300) byla následně určena procentuální úspěšnost každého algoritmu. Výsledky ankety jsou uvedeny v příloze (Příloha D.2). Z výsledků ankety pro výřez textury (Obr. 7.9) pak vyplynulo, že výstupy algoritmu kombinace rozdílů mezi barevnými RGB kanály byly hodnoceny jako nejkvalitnější pro 32 % dotázaných, výstupy algoritmu pro přenos barev mezi snímky pro 25 % dotázaných, pro kombinaci kanálů v prostoru YCbCr pak pro 24 % dotázaných a pro algoritmus Histogram Matching pak pouze pro 19 % dotázaných. Výsledky ankety (Příloha D.2) pro výřez venkovní scény (Příloha C.12) pak vykazovaly téměř totožné celkové výsledky jako předešlé.



Obrázek 7.9: Porovnání výřezu originálních snímků a snímků po obrazové fúzi, textura (Příloha C.6), ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 300x300 px

Podle grafu porovnání růstu kvality snímků (Obr. 7.10) pak vykazují nejmenší

úbytek kvality snímků s klesajícím expozičním časem snímky upravené algoritmem kombinace barevných kanálů v prostoru YCbCr (asi o 3 % menší než ostatní algoritmy). Toto je způsobeno tím, že tento algoritmus využívá barevné kanály ze snímku fotoaparátu Nikon D3100, jenž při nízkých expozičních časech (vysokých hodnotách ISO) zaznamená výrazně méně šumu než Sigma DP2 Merrill. Ostatní algoritmy pak vykazují hodnoty téměř totožné a ovlivněné především kvalitou snímků z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill.



Obrázek 7.10: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, textura (Příloha C.6), SSIM index, originální a fúzované snímky, aritmetické průměry z RGB kanálů

# Kapitola 8

## Závěr

Tato práce se zabývá metodami pro digitální snímání scény, zpracováním pořízených dat a porovnáním jejich kvality. V práci jsou popsány digitální snímací senzory (Kap. 2.1) CCD a CMOS spolu s Bayerovou maskou, mozaikou barevných filtrů, určujících jaké vlnové délky světla daný obrazový bod senzoru zaznamená. Dále je popsán moderní senzor Foveon X3 (Kap. 2.3), který byl do praxe uveden v nedávné době. Další část práce je věnována pořízení záznamu světelného pole (Kap. 2.4) a stereoskopii (Kap. 2.5) pro pořízení 3D obrazu. Práce dále popisuje dnes používané metody ostření fotoaparátů s využitím detekce kontrastu (Kap. 3.2) a detekce fáze (Kap. 3.1), které jsou velmi důležité pro získání kvalitních, ostrých snímků. K porovnání metod pořízení scény jsou pak využity algoritmy pro hodnocení kvality obrazu (Kap. 5.1.1) (Image Quality Assessment).

Na základě zadání byl pro porovnání vybrán senzor CMOS s Bayerovou maskou, jenž využívá fotoaparát Nikon D3100 a senzor Foveon X3 Merrill, využívaný v druhém testovaném fotoaparátu Sigma DP2 Merrill. Těmito fotoaparáty byla následně pořízena galerie testovacích snímků (Kap. 4), čítající dohromady asi 450 snímků surových dat vyčtených ze senzoru (RAW). Tyto snímky představovaly zhruba 20 GB dat, která bylo nutné zpracovat. Během pořízení snímků byla sledována stálost osvětlení a byly využity i barevné filtry pro zjištění, jak dokáží senzory zachytit dané vlnové délky světla.

RAW snímky z fotoaparátu Nikon D3100 byly konvertovány (Kap. 5.2.1) pomocí knihovny LibRAW. U RAW snímků z fotoaparátu Sigma DP2 Merrill nebylo možné snímky s pomocí dostupných nástrojů a knihoven dostatečně kvalitně zkonvertovat a proto byl využit JPG snímek, uložený fotoaparátem do RAW snímku, který byl pro účely práce dostatečně kvalitní. Dále byly navrženy algoritmy pro zarovnání snímků (Kap. 5.2.2) z obou fotoaparátů na sebe a převod na stejné rozlišení. Toto předzpracování snímků bylo nutné, protože předpokladem pro vstupy dalších algoritmů je, že snímky mají totožné rozlišení a obsahují také totožnou scénu. Použité senzory mají ovšem různé rozlišení zaznamenaných snímků a vzhledem k tomu, že každý senzor je využit v jiném fotoaparátu, osazeném jiným objektivem, byly rozdílné i úhly, pod kterými byly snímány objekty zaznamenány. Pro porovnání kvality snímků pak byl využit algoritmus používající metriku Structural Similarity Index (SSIM).

Porovnání fotoaparátů z hlediska věrohodnosti barev (Kap. 7.1.1) ukázalo, že

Sigma DP2 Merrill dosahuje pro vyšší expoziční časy (v rozsahu hodnot ISO 100 - 800) větší věrohodnosti barev a to průměrně o 3 % (maximálně 6,5 %). Pro nižší expoziční časy (pro ISO větší než 800) pak dosahuje větší věrohodnosti podání barev Nikon D3100 a to průměrně o 7,5 % (maximálně 9 %).

Testovací snímky optických frekvenčních kalibrů (Kap. 7.1.2) pak jednoznačně dokázaly, že fotoaparát Sigma DP2 Merrill zaznamená v obraze vyšší prostorové frekvence než fotoaparát Nikon D3100, a tedy, že dokáže zaznamenat větší detaily a snímky pořídít s větší ostroty.

Anketa mezi třiceti respondenty pak ukázala, že navzdory větší věrohodnosti barev u fotoaparátu Sigma DP2 Merrill se barvy snímků fotoaparátu Nikon D3100 u 90 % dotázaných jeví jako lepší a živější. Tato anketa tedy prokázala, že vzhledem k lidskému vnímání barevnosti snímků obou fotoaparátů má z hlediska další práce význam zabývat se fúzí snímků těchto fotoaparátů za účelem získání barev ze snímků fotoaparátu Nikon D3100 a kontrastu (detailů/ostroty) ze snímků fotoaparátu Sigma DP2 Merrill.

Porovnání závislosti kvality snímků na expozičním čase (hodnotě ISO) pak ukázalo, že fotoaparát Nikon D3100 vykazuje průměrný pokles kvality 4 % (nejvíce 8 % pro nejmenší expoziční čas) u snímků textury a 0,8 % (nejvíce 3 % pro nejmenší expoziční čas) u snímků umělé scény, fotoaparát Sigma DP2 Merrill pak 8,5 % (nejvíce 22 % pro nejmenší expoziční čas) u snímků textury a 3,3 % (nejvíce 12 % pro nejmenší expoziční čas) u snímků umělé scény.

Pro získání detailů ze snímků fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a barev z fotoaparátu Nikon D3100 byly navrženy čtyři algoritmy pro fúzi snímků (Kap. 5.3). Těmito algoritmy byly algoritmus kombinace rozdílů kanálů v prostoru RGB (Kap. 5.3.1), algoritmus skládání kanálů v prostoru YCbCr (Kap. 5.3.2), Histogram Matching (Kap. 5.3.3) a algoritmus pro přenos barev mezi snímky (Kap. 5.3.4).

Z posouzení věrohodnosti barev výstupů algoritmů fúze snímků (Kap. 7.2.1) vyplývá, že věrohodnost barev algoritmů kombinace rozdílů kanálů v prostoru RGB, kombinace kanálů YCbCr a přenosu barev mezi snímky dosahuje přibližně stejné kvality a pohybuje se mezi kvalitou snímků fotoaparátu Sigma DP2 Merrill a Nikon D3100. Výstup algoritmu Histogram Matching pak dosahuje oproti ostatním v průměru o 6 % horší věrohodnost podání barev.

Třicet dotázaných respondentů pak uvedlo (Kap. 7.2.2), že z jejich subjektivního pohledu dosahují nejlepšího celkového dojmu výstupy algoritmu kombinace rozdílů kanálů v prostoru RGB (za nejlepší označen v 32 %), na druhém místě pak skončily výstupy algoritmů kombinace kanálů v prostoru YCbCr a přenosu barev mezi snímky (za nejlepší označeny čtvrtinou dotázaných) a na posledním místě se umístily výstupy algoritmu Histogram Matching (označeny za nejlepší v průměru v 16 %).

Součástí práce je aplikace (Kap. 6) implementovaná v jazyce C++ s využitím knihoven STL, LibRAW, OpenCV a boost. Tato aplikace obsahuje implementace všech algoritmů použitých v práci. S ohledem na fakt, že nejsou známy detailní specifikace senzorů, byly algoritmy pro zpracování snímků navrženy tak, aby byly co nejvíce obecné. Tyto algoritmy (vyjma algoritmů pro dekodování formátů NEF a X3F) je tedy možné použít na libovolnou dvojici snímků bez ohledu na senzor, jímž byly pořízeny. Veškeré zpracování snímků pak probíhalo pouze prostřednictvím v práci popsaných algoritmů.

Prostor pro vylepšení práce vidím v hlubší analýze dekodování formátu X3F a úpravě algoritmů knihoven tak, aby bylo možné tento formát správně dekodovat a využít tak snímek bez komprese. Dále pak v návrhu dalších algoritmů obrazové fúze. Návrh těchto algoritmů by pak měl směřovat především k výstupům, které by z hlediska vnímání zrakem dosahovaly lepší kvality, než v práci prezentované algoritmy.



# Literatura

- [1] HUBEL, P. M., LYON, R. F. Eyeing the Camera: into the Next Century, cit. 26. 11. 2014. Dostupné z: [http://www.foveon.com/files/CIC10\\_Lyon\\_Hubel\\_FINAL.pdf](http://www.foveon.com/files/CIC10_Lyon_Hubel_FINAL.pdf).
- [2] View from the Window at Le Gras (Saint-Loup-de-Vareennes, France) by J. N. Niécepe. [online], cit. 22. 12. 2014. Dostupné z: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/View\\_from\\_the\\_Window\\_at\\_Le\\_Gras%2C\\_Joseph\\_Nic%C3%A9phore\\_Ni%C3%A9pce.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/View_from_the_Window_at_Le_Gras%2C_Joseph_Nic%C3%A9phore_Ni%C3%A9pce.jpg).
- [3] CCD and CMOS sensor technology. AXIS Communications, [online], 2010., cit. 27. 12. 2014. Dostupné z: [http://www.axis.com/files/whitepaper/wp\\_ccd\\_cmos\\_40722\\_en\\_1010\\_lo.pdf](http://www.axis.com/files/whitepaper/wp_ccd_cmos_40722_en_1010_lo.pdf).
- [4] CCD vs. CMOS. [online]., cit. 27. 12. 2014. Dostupné z: <https://www.teledynedalsa.com/imaging/knowledge-center/appnotes/ccd-vs-cmos/>.
- [5] TAYLOR, S. A. CCD and CMOS Imaging Array Technologies. Xerox Research Centre Europe, Cambridge, UK, 1998., cit. 27. 12. 2014. Dostupné z: <http://research.microsoft.com/pubs/80353/ccd.pdf>.
- [6] Charge transfer in a three-phase CCD. [online], cit. 27. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.pixcellent.com/Image9.gif>.
- [7] WANLASS, F. M. Low Stand-By Power Complementary Field Effect Circuitry Patent (3,356,858). United States Patent Office, 1967., cit. 28. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US3356858>.
- [8] RIEZENMAN, M. J. Wdass's CMOS circuit. IEEE Spectrum, May, 1991., cit. 28. 12. 2014. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=83438>.
- [9] Srovnání senzorů CCD a CMOS. [online], cit. 28. 12. 2014. Dostupné z: <http://diit.cz/data/images/66857.png>.
- [10] HLAVÁČ, V. ŠONKA, M. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992. 249 s. ISBN 80-85424-67-3.
- [11] The RGB Color Model. [online], cit. 25. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.texample.net/tikz/examples/rgb-color-mixing/>.

- [12] A photograph of Mohammed Alim Khan (1911) by S. M. Prokudin-Gorskii. [online], cit. 2. 12. 2014. Dostupné z: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Rgb-compose-Alim\\_Khan.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Rgb-compose-Alim_Khan.jpg).
- [13] ŠONKA, M. HLAVÁČ, V. BOYLE, R. Image Processing, Analysis and Machine Vision. Toronto: Thomson Learning, 2008. 829 s. ISBN 0-495-24438-4.
- [14] Digital Camera Sensors. [online], cit. 30. 11. 2014. Dostupné z: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>.
- [15] BAYER, B. E. Color imaging array Patent (3,356,858). United States Patent Office, 1976., cit. 28. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US3971065>.
- [16] RGB Bayerova maska. [online], cit. 30. 11. 2014. Dostupné z: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Bayer_pattern_on_sensor.svg).
- [17] RGBW Bayerova maska. [online], cit. 30. 11. 2014. Dostupné z: <http://diit.cz/data/images/70109.png>.
- [18] LOSSON, O. MACAIRE, L. YANG, Y. Comparison of color demosaicing methods. HAL archives-ouvertes, cit. 22. 12. 2014. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00683233/document>.
- [19] MALVAR, S. H. HE, L. CUTLER, R. High-Quality Linear Interpolation for Demosaicing of Bayer-Patterned Color Images. International Conference of Acoustic, Speech and Signal Processing, 2004., cit. 1. 12. 2014. Dostupné z: [http://research.microsoft.com/pubs/102068/Demosaicing\\_ICASSP04.pdf](http://research.microsoft.com/pubs/102068/Demosaicing_ICASSP04.pdf).
- [20] KIMMEL, R. Demosaicing: Image Reconstruction from Color CCD Samples. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 8, No. 9, 1999., cit. 1. 12. 2014. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=784434>.
- [21] HUBEL, P. M. Foveon Technology and the Changing Landscape of Digital Cameras, cit. 26. 11. 2014. Dostupné z: [http://www.foveon.com/files/CIC13\\_Hubel\\_Final.pdf](http://www.foveon.com/files/CIC13_Hubel_Final.pdf).
- [22] The vision and passion of Dick Merrill. [online], cit. 3. 12. 2014. Dostupné z: <http://blog.sigmaphoto.com/2012/the-vision-and-passion-of-dick-merrill/>.
- [23] Foveon X3/Color Film/Mosaic Comparison Diagram. [online], cit. 2. 12. 2014. Dostupné z: [http://www.foveon.com/files/X3\\_Film\\_Color.jpg](http://www.foveon.com/files/X3_Film_Color.jpg).
- [24] LI, F. NATHAN, A. CCD Image Sensors in Deep-Ultraviolet: Degradation Behavior and Damage Mechanisms. Springer, 2006. 244 s. ISBN 978-3642061523.
- [25] Color absorption in silicon and the Foveon X3 sensor. [online], cit. 2. 12. 2014. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Absorption-X3.svg>.

- [26] SOUČEK, J. Foveon X3 Quattro aneb jak s 5MPix snímačem vyfotit 20 megapixelů. Dostupné z: <http://diit.cz/clanek/foveon-x3-quattro-rozliseni>.
- [27] Sigma Questions and Answers Part II: Does Foveon's Quattro sensor really out-resolve conventional 36-megapixel chips? [online], cit. 3. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.imaging-resource.com/news/2014/04/08/sigma-qa-part-ii-does-foveons-quattro-sensor-really%20doutresolve-conventional>.
- [28] NG, R. Digital Light Field Photography. Dissertation Thesis, 2006., cit. 26. 11. 2014. Dostupné z: <https://www.lytro.com/downloads/resources/renng-thesis.pdf>.
- [29] KUČERA, J. Computational photography of light-field camera and application to panoramic photography. Master Thesis, 2014., cit. 26. 11. 2014. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/120166917/?lang=cs>.
- [30] WHEATSTONE, CH. Contributions to the Physiology of Vision - Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Bino-cular Vision. Royal Society of London, Vol. 128, pp. 371 - 394 (1838), cit. 30. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.stereoscopy.com/library/wheatstone-paper1838.html>.
- [31] REEVE, S. FLOCK, J. Basic Principles of Stereoscopic 3D. [online], cit. 29. 12. 2014. Dostupné z: [http://www.sky.com/shop/\\_PDF/3D/Basic\\_Principles\\_of\\_Stereoscopic\\_3D\\_v1.pdf](http://www.sky.com/shop/_PDF/3D/Basic_Principles_of_Stereoscopic_3D_v1.pdf).
- [32] LEE, CH. SONG, H. CHOI B. HO, Y. 3D Scene Capturing using Stereo-scopic Cameras and a Time-of-Flight Camera. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 57, No. 3, August 2011, cit. 29. 12. 2014. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6018896>.
- [33] BRENNI, P. 19th Century French Scientific Instrument Makers. Bulletin of Scientific Instrument Society, No. 51 (1996), cit. 30. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.uvm.edu/~dahammon/museum/Soleil-Duboscqhistory.pdf>.
- [34] Les trois grâces stereophoto by Louis Jules Duboscq-Soleil. [online], cit. 30. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.artnet.de/k%C3%BCnstler/louis-jules-duboscq-soleil/les-trois-gr%C3%A2ces-PARdAiWQuTe6Z7GVjwesyg2>.
- [35] Fujifilm Launches a Pioneering Digital 3D System. Fujifilm Press Center News, 2009, cit. 30. 12. 2014. Dostupné z: [http://www.fujifilmusa.com/press/news/display\\_news?newsID=879782](http://www.fujifilmusa.com/press/news/display_news?newsID=879782).
- [36] HANSARD, M. LEE, S. CHOI, O. HORAUD, R. P. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications. Springer, 2013. 96 s. ISBN 978-1-4471-4658-2.

- [37] 3D Scanning Technical Information. 3D Scan Company, Atlanta, GA. [online], 2012, cit. 7. 1. 2015. Dostupné z: <http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/>.
- [38] MOONS, T. GOOL, L. V. VERGAUWEN M. 3D Reconstruction from Multiple Images. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, Vol. 4, No. 4 (2008), pages 287–398, cit. 29. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.ee.oulu.fi/research/imag/courses/Sturm/moons09.pdf>.
- [39] CUI, Y. SCHUON, S. CHAN, D. THRUN, S. THEOBALT, CH. 3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera. Stanford University, MPI Informatik and Augmented Vision., cit. 7. 1. 2015. Dostupné z: [http://ai.stanford.edu/~schuon/sr/cvpr10\\_scanning.pdf](http://ai.stanford.edu/~schuon/sr/cvpr10_scanning.pdf).
- [40] HAPARNAS, Z. How does a digital camera active auto focus work. [online], 2009., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <http://www.picturecorrect.com/tips/active-auto-focus-digital-photography/>.
- [41] BROWN, G. How Autofocus Cameras Work. [online]., cit. 29. 12. 2014. Dostupné z: <http://electronics.howstuffworks.com/autofocus2.htm>.
- [42] XU, X. WANG, Y. TANG, J. ZHANG, X. LIU, X. Robust Automatic Focus Algorithm for Low Contrast Images Using a New Contrast Measure. Sensors 2011, 11. ISSN 1424-8220., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: [www.mdpi.com/1424-8220/11/9/8281/pdf](http://www.mdpi.com/1424-8220/11/9/8281/pdf).
- [43] STENSVOLD, M. Hybrid AF. [online], 2012., cit. 22. 11. 2014. Dostupné z: <http://www.dpmag.com/cameras/slrs/hybrid-af.html#.VHCPBJCG9vQ1>.
- [44] LEVOY, M. Autofocus: phase detection. [online], 2011., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <http://courses.cs.washington.edu/courses/cse131/12sp/applets/autofocusPD.html>.
- [45] MANSUROV, N. How Phase Detection Autofocus Works. [online], 2012., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <https://photographylife.com/how-phase-detection-autofocus-works>.
- [46] LEVOY, M. Autofocus (AF). Course slides, 2009., cit. 26. 11. 2014. Dostupné z: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-09/lectures/autofocus-21apr09.pdf>.
- [47] WILLETT, N. Autofocus: phase detection applet. [online], 2011., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <http://courses.cs.washington.edu/courses/cse131/12sp/applets/autofocusPD.html>.
- [48] ŚLIWIŃSKI, P. WACHEL, P. A Simple Model for On-Sensor Phase-Detection Autofocusing Algorithm. Journal of Computer and Communications, 2013, 1, pages 11-17., cit. 23. 11. 2014. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2013.16003>.

- [49] LEVOY, M. Autofocus: contrast detection. [online], 2011., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <http://courses.cs.washington.edu/courses/cse131/12sp/applets/autofocusCD.html>.
- [50] KALOVÁ, I. Předzpracování obrazu. Přednáška předmětu Počítačové vidění 2013/14, cit. 23. 11. 2014. Dostupné studentům VUT FEKT.
- [51] WILLETT, N. Autofocus: contrast detection applet. [online], 2011., cit. 19. 11. 2014. Dostupné z: <http://courses.cs.washington.edu/courses/cse131/12sp/applets/autofocusCD.html>.
- [52] Photo of Nikon D3100 + 18-105mm DX lens. [online], cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: [http://www.conrad-electronic.co.uk/medias/global/ce/9000\\_9999/9500/9550/9555/955511\\_LB\\_00\\_FB.EPS\\_1000.jpg](http://www.conrad-electronic.co.uk/medias/global/ce/9000_9999/9500/9550/9555/955511_LB_00_FB.EPS_1000.jpg).
- [53] Photo of Sigma DP2 Merrill. [online], cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: [http://www.ephotozine.com/articles/sigma-dp2-merrill-sample-photo-gallery-19830/images/666-ssigma-dp2-merrill-3\\_1344517315.jpg](http://www.ephotozine.com/articles/sigma-dp2-merrill-sample-photo-gallery-19830/images/666-ssigma-dp2-merrill-3_1344517315.jpg).
- [54] Nikon D3100 technické specifikace. [online], cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: [http://www.nikon.cz/cs\\_CZ/product/digital-cameras/slr/consumer/d3100](http://www.nikon.cz/cs_CZ/product/digital-cameras/slr/consumer/d3100).
- [55] Sigma DP2 Merrill Specifications. [online], cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: <http://www.sigma-dp.com/DP2Merrill/specifications.html>.
- [56] GOLDSTEIN, M. Sigma DP2 Merrill Review. [online], 2012., cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: [http://www.photographyblog.com/reviews/sigma\\_dp2\\_merrill\\_review/image\\_quality/](http://www.photographyblog.com/reviews/sigma_dp2_merrill_review/image_quality/).
- [57] Nikon 18-105mm VR lens review. [online], cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: <http://www.kenrockwell.com/nikon/18-105mm.htm>.
- [58] HANNEMYR, G. Nikon DSLR Focusing. [online], 2008., cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: [http://dpanswers.com/content/nikon\\_af.php](http://dpanswers.com/content/nikon_af.php).
- [59] Photo of Luxmeter PU 550. [online], cit. 19. 4. 2015. Dostupné z: <http://storage.merici-opticke-pristroje.cz/contentcontext/Luxmetr-PU-550-1173.png>.
- [60] JOY, K. R. GOPALAKRISHNA SARMA, E. Recent Developments in Image Quality Assesment Algorithms. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, July 2014. Vol. 65 No.1. ISSN 1992-8645., cit. 8. 1. 2015. Dostupné z: <http://www.jatit.org/volumes/Vol65No1/20Vol65No1.pdf>.
- [61] WANG, Z. BOVIK, C. A. A Universal Image Quality Index. IEEE Signal Processing Letters, March 2002., cit. 28. 3. 2015. Dostupné z: [https://ece.uwaterloo.ca/~z70wang/publications/quality\\_2c.pdf](https://ece.uwaterloo.ca/~z70wang/publications/quality_2c.pdf).
- [62] WREN, R. CH. Perspective Transform Estimation. [online], cit. 27. 4. 2015. Dostupné z: <http://xenia.media.mit.edu/~cwren/interpolator/>.

- [63] BAY, H. TUYTELAARS, T. GOOL, L. V. SURF: Speeded Up Robust Features. [online], cit. 27. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
- [64] KEITH, J. Video Demystified - A Handbook for the Digital Engineer 3ed. LLH Technology Publishing, 2001. 759 s. ISBN 1-878707-56-6.
- [65] BOURKE, P. Histogram Matching. [online], cit. 20. 4. 2015. Dostupné z: [http://paulbourke.net/texture\\_colour/equalisation/](http://paulbourke.net/texture_colour/equalisation/).
- [66] RUDERMAN, L. D. CROIN, W. T. CHIAO, CH. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding. J. Opt. Soc. Am. A /Vol. 15, No. 8 /August 1998, cit. 19. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.cs.virginia.edu/~jdl/bib/color/ruderman98.pdf>.
- [67] REINHARD, E. ASHIKHIM, M. GOOCH, B. SHIRLEY, P. Color Transfer between Images. IEEE Computer Graphics and Applications, September/October 2001, cit. 19. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.cs.tau.ac.il/~turkel/imagepapers/ColorTransfer.pdf>.

# Příloha A

## Obsah příložených DVD

Na příložených DVD se nachází tato adresářová struktura:

### DVD 1

#### Dokumenty

Novacek\_Petr\_2015.pdf text práce ve formátu pdf

#### Aplikace

src zdrojové kódy aplikace

video video ukázka funkčnosti aplikace

Galerie snímků galerie vybraných testovacích snímků (formát tif)

Vzory snímků vzory použité pro zarovnání pořízených snímků

### DVD 2

#### RAW snímky

vybrané RAW snímky

Nikon D3100

fotooprát Nikon D3100 (formát NEF)

Sigma DP2 Merrill

fotooprát Sigma DP2 Merrill (formát X3F)

# Příloha B

## Manuál k aplikaci

### Potřebné nástroje

Ke kompilaci aplikace jsou nutné následující nástroje a aplikace (verze pod níž byla aplikace vyvíjena a testována je vždy uvedena v závorce):

- GCC nebo kompatibilní překladač s podporou C++11 (4.8.3)
- knihovna OpenCV (2.4.9)
- knihovna LibRAW (0.16.0-r1)
- knihovna boost (1.55.0-r2)
- qmake
- make

Aplikace byla vyvíjena a testována v distribuci Gentoo s jádrem Linux (3.18.1).

### Překlad aplikace

Pro překlad aplikace je nutné zkopírovat adresář `src` z příloženého DVD 1 do PC a následně pomocí příkazů `qmake` a `make` provést překlad:

```
$ qmake  
$ make
```

### Ovládání aplikace

Aplikace je ovládána zadáním parametrů v příkazové řádce. Výpis všech dostupných parametrů včetně jejich popisu je uveden v tabulce (B.1). Tento výpis je zobrazen po zadání parametru `--help` nebo pokud je aplikace spuštěna bez parametrů.

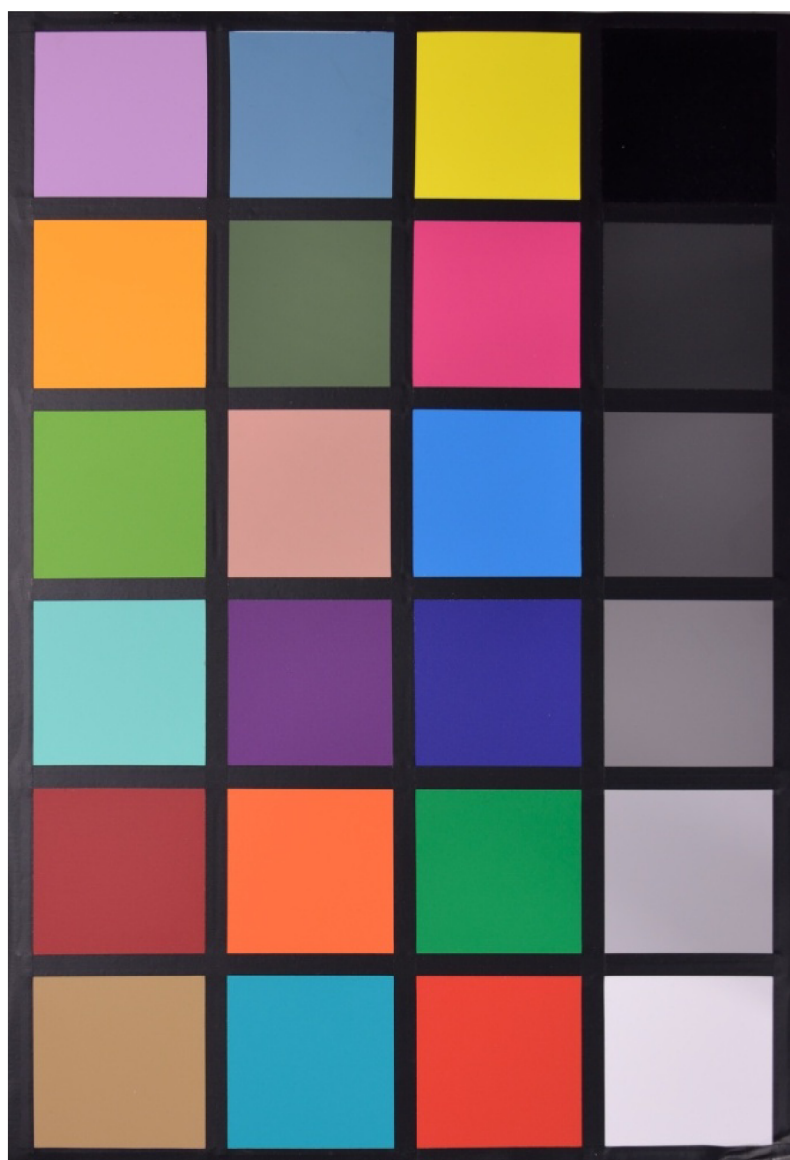


|                      |  |
|----------------------|--|
| Generic options:     |  |
| --help               | Show help message  |
| --action arg         | Available actions:<br>raw2img/alignImages/calciQA/makeFusion   |
| raw2img options:     |  |
| --imgType arg        | Type of file which can be converted: NEF/X3F   |
| --src arg            | Source file<br>(available formats are X3F or NEF)  |
| --out arg            | Output file<br>(available formats are jpg, png and tif)  |
| alignImages options: |  |
| --srcA1 arg          | Source file of first image (pattern)<br>(available formats are jpg, png and tif)                                       |
| --srcA2 arg          | Source file of second image<br>(this image will be transformed to pattern)<br>(available formats are jpg, png and tif) |
| --treshold arg       | Treshold for the keypoint detector<br>(value could be from 100 to 15000 approx,<br>larger value means less keypoints)  |
| --outA1 arg          | Output for first file<br>(available formats are jpg, png and tif)  |
| --outA2 arg          | Output for second file<br>(available formats are jpg, png and tif)   |
| CalcIQA options:     |  |
| --iqaType arg        | Type of IQA algorithm<br>(available are MSE, PSNR, UQI, SSIM or ESSIM)   |
| --srcIQA1 arg        | Source file of first image.<br>(available formats are jpg, png and tif)  |
| --srcIQA2 arg        | Source file of second image.<br>(available formats are jpg, png and tif)   |
| makeFusion options:  |  |
| --fusionType arg     | Type of Fusion algorithm<br>(available are rgbDiff, yCbCrComb,<br>histMatch or colorTrans)                             |
| --srcF1 arg          | Source file of first image (colors)<br>(available formats are jpg, png and tif)  |
| --srcF2 arg          | Source file of second image (texture/details)<br>(available formats are jpg, png and tif)                              |
| --outF arg           | Output file<br>(available formats are jpg, png and tif)  |

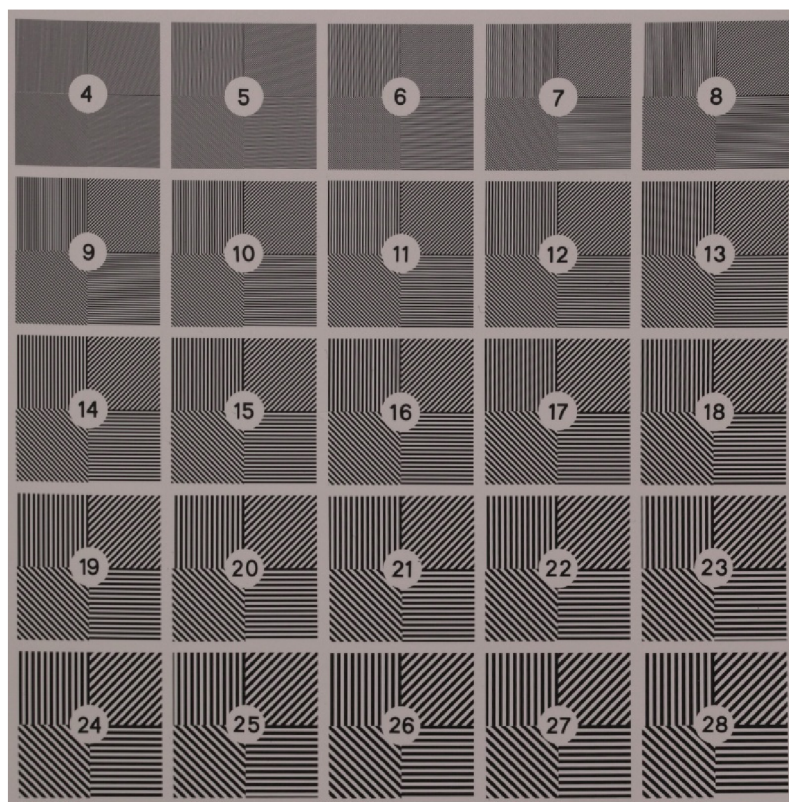
Tabulka B.1: Výpis všech dostupných parametrů aplikace a jejich popis

# Příloha C

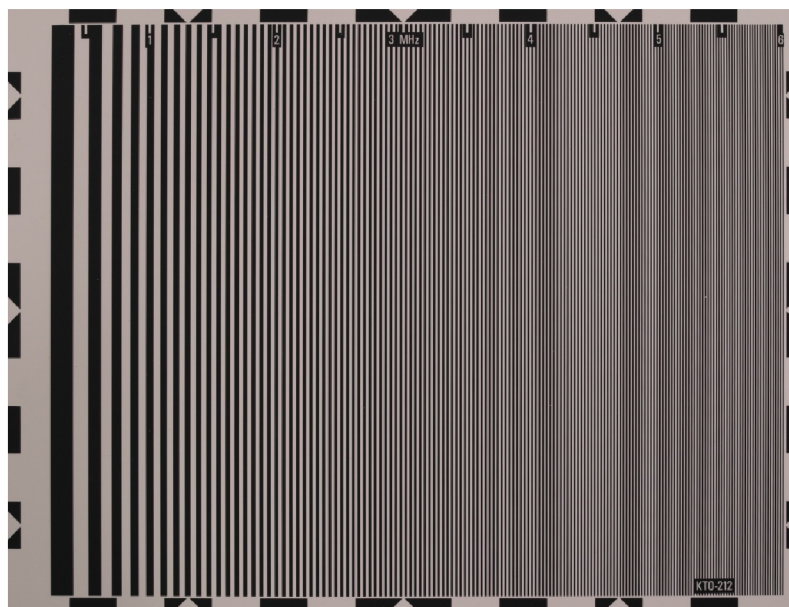
## Obrázky



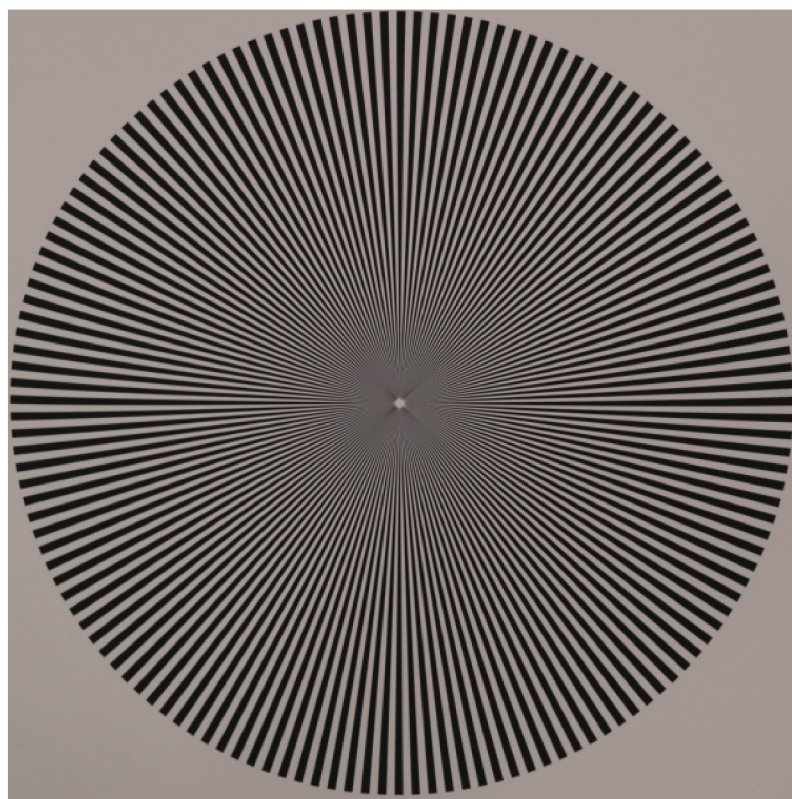
Obrázek C.1: Ukázka: Optický kalibr - barevná tabulka



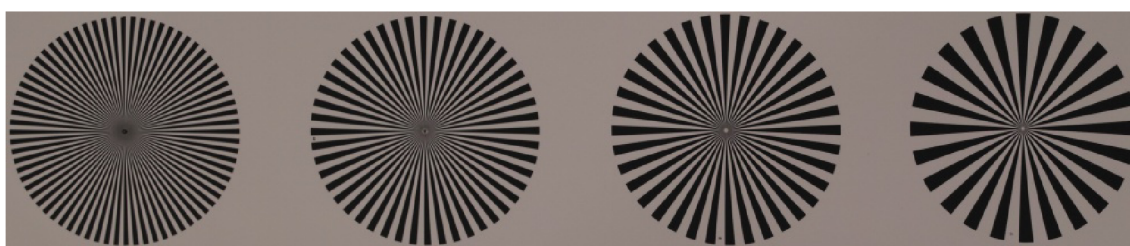
Obrázek C.2: Ukázka: Optický kalibr - Foucaultovy obrazce



Obrázek C.3: Ukázka: Optický kalibr - lineární, frekvenční



Obrázek C.4: Ukázka: Optický kalibr - Siemensova hvězda, 144 párů segmentů, průměr 18 cm



Obrázek C.5: Ukázka: Optický kalibr - Siemensovy hvězdy, 72, 48, 36 a 24 párů segmentů, průměr 5 cm



Obrázek C.6: Ukázka: Textura - barevný froté ručník



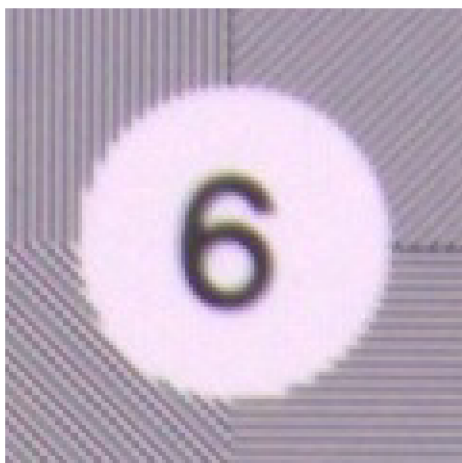
Obrázek C.7: Ukázka: Umělá scéna



Obrázek C.8: Ukázka: Přirozená scéna 1



Obrázek C.9: Ukázka: Přirozená scéna 2

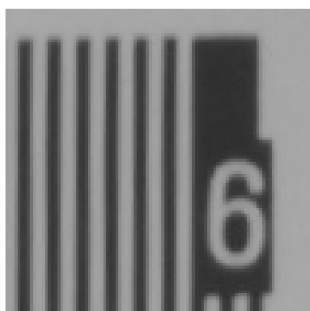


(a) Nikon D3100

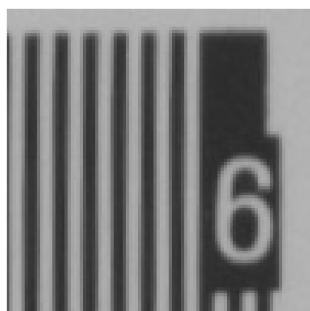


(b) Sigma DP2 Merrill

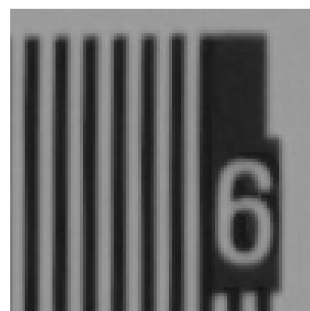
Obrázek C.10: Výřez z Foucaultových obrazců (Příloha C.2) - srovnání frekvenčního obrazce ležícího mezi největšími rozlišitelnými prostorovými frekvencemi, ISO 100, zářivkové osvětlení



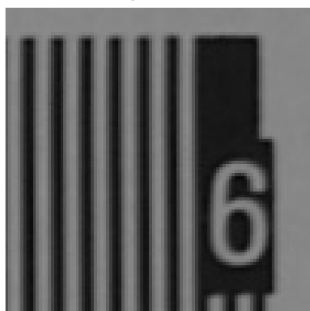
(a) Nikon D3100 - pořízeno přes červený filtr



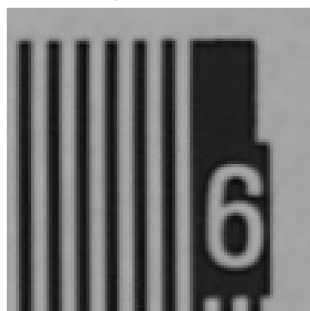
(b) Nikon D3100 - pořízeno přes zelený filtr



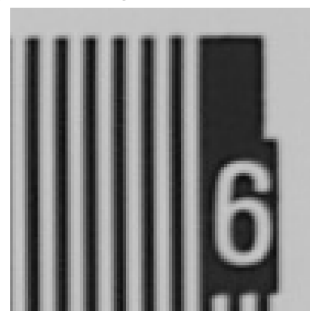
(c) Nikon D3100 - pořízeno přes modrý filtr



(d) Sigma DP2 Merrill - pořízeno přes červený filtr

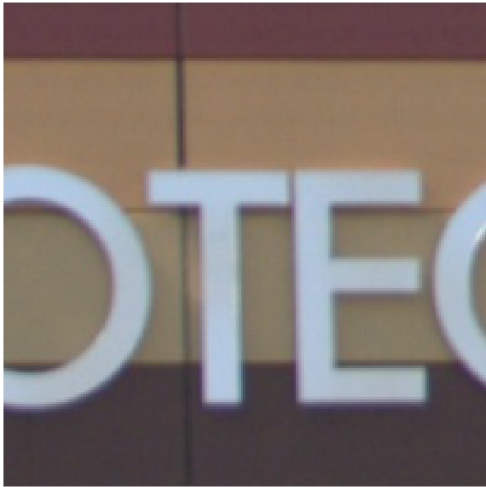


(e) Sigma DP2 Merrill - pořízeno přes zelený filtr

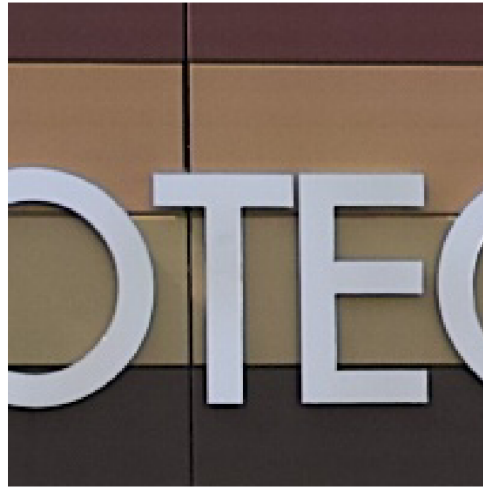


(f) Sigma DP2 Merrill - pořízeno přes modrý filtr

Obrázek C.11: Porovnání výřezu lineárního frekvenčního kalibru (Příloha C.3) - převedeno do odstínů šedi, ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 100x100 px



(a) Nikon D3100



(b) Sigma DP2 Merrill



(c) Rozdíl RGB kanálů



(d) Kombinace YCbCr kanálů



(e) Histogram Matching



(f) Color Transfer

Obrázek C.12: Porovnání výřezu originálních snímků a snímků po obrazové fúzi, venkovní scéna 1 (Příloha C.8), ISO 100, denní světlo, výřez 200x200 px

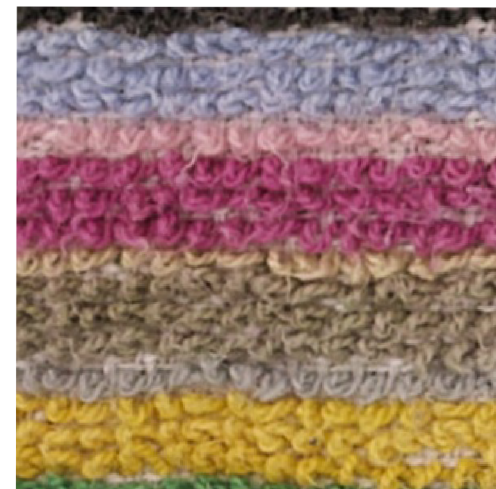




(a) Nikon D3100



(b) Sigma DP2 Merrill



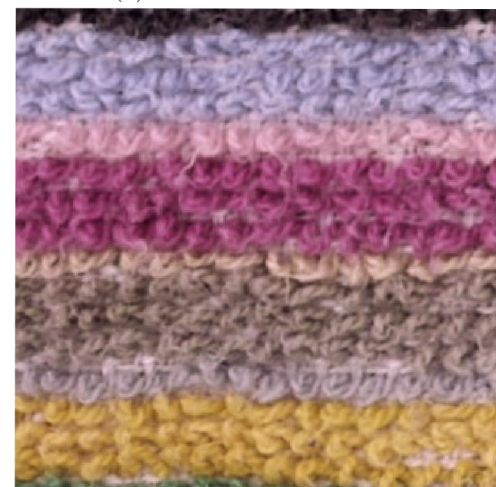
(c) Rozdíl RGB kanálů



(d) Kombinace YCbCr kanálů



(e) Histogram Matching

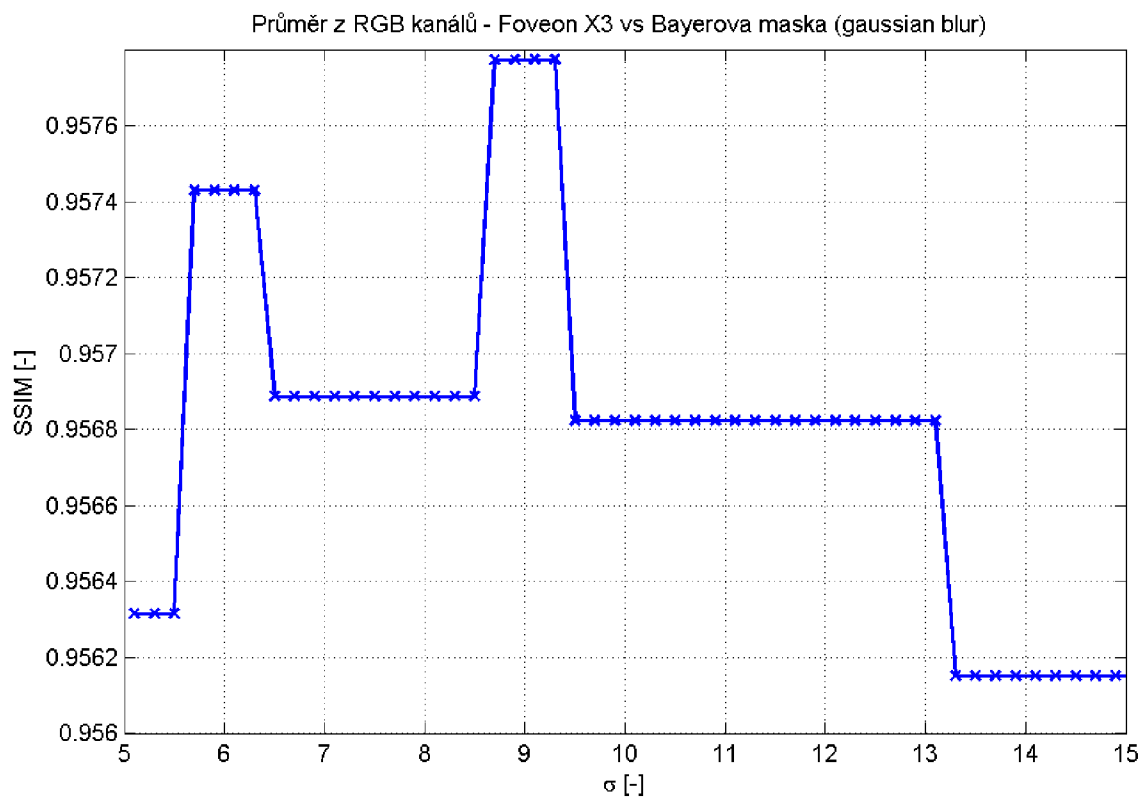


(f) Color Transfer

Obrázek C.13: Zvětšené porovnání výřezu originálních snímků a snímků po obrazové fúzi (Obr. 7.9), textura (Příloha C.6), ISO 100, zářivkové osvětlení, výřez 300x300 px

# Příloha D

## Grafy a tabulky



Obrázek D.1: Srovnání rozostření snímků v závislosti na hodnotě  $\sigma$ , textura (Příloha C.6), ISO 100, gaussovské rozostření, použita funkce `GaussianBlur` z knihovny `OpenCV`

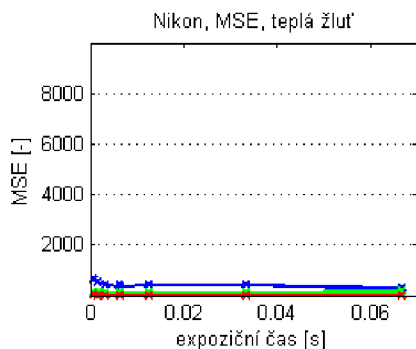
| obr. | rozsah | ISO [-] | 100        | 200        | 400        | 800        | 1600       | 3200       | 6400     |
|------|--------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 1    | 2k     | E [lx]  | 674±17     | 675±17     | 678±17     | 677±17     | 676±17     | 675±17     | 695±17   |
| 2    |        |         | 704±17     | 693±17     | 690±17     | 698±17     | 700±17     | 702±17     | 704±17   |
| 3    |        |         | 705±17     | 702±17     | 695±17     | 697±17     | 701±17     | 701±17     | 698±17   |
| 4    |        |         | 613±16     | 613±16     | 599±16     | 614±16     | 603±16     | 602±16     | 613±16   |
| 5    |        |         | 632±16     | 630±16     | 633±16     | 628±16     | 629±16     | 632±16     | 632±16   |
| 6    |        |         | 632±16     | 633±16     | 633±16     | 634±16     | 631±16     | 634±16     | 632±16   |
| 7    |        |         | 671±17     | 670±17     | 669±17     | 668±17     | 682±17     | 673±17     | 674±17   |
| 7    | 20k    |         | 3040±130   | 3020±130   | 3050±131   | 3030±130   | 3030±130   | 3040±130   | 3030±130 |
| 8    | 100k   |         | 67200±1172 | 66600±1166 | 66800±1168 | 66900±1169 | —          | —          | —        |
| 9    |        |         | 66100±1161 | 67200±1172 | 67100±1171 | 66800±1168 | 66200±1162 | 65900±1159 | —        |

| obr. | název                                    |
|------|--|
| 1    | Barevný kalibr (Příloha C.1)             |
| 2    | Siemensovy hvězdy - malé (Příloha C.5)   |
| 3    | Siemensova hvězda - velká (Příloha C.4)  |
| 4    | Foucaultovy obrazce (Příloha C.2)        |
| 5    | Lineární frekvenční kalibr (Příloha C.3) |
| 6    | Umělá scéna (Příloha C.7)                |
| 7    | Textura (Příloha C.6)                    |
| 8    | Přirozená scéna 1 (Příloha C.8)          |
| 9    | Přirozená scéna 2 (Příloha C.9)          |

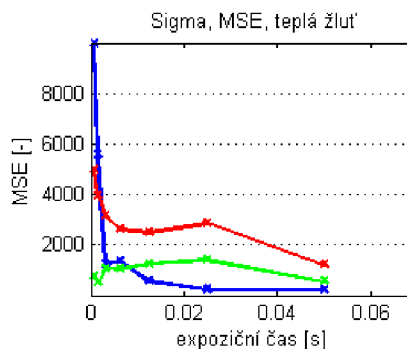
Tabulka D.1: Naměřené hodnoty s kvantifikací chyby měření osvětlení během snímání testovacích snímků ( $\pm(1\% \text{ z měřené hodnoty} + 0,5\% \text{ z měř. rozsahu})$ ), měřeno pomocí Luxmetru PU 550

| počet výskytů<br>v pořadí | textura (Příloha C.13) |       |                |                | venkovní scéna 1 (Příloha C.12) |       |                |                |
|---------------------------|------------------------|-------|----------------|----------------|---------------------------------|-------|----------------|----------------|
|                           | rozdíl RGB             | YCbCr | Hist. Matching | Color Transfer | rozdíl RGB                      | YCbCr | Hist. Matching | Color Transfer |
| 1.                        | 16                     | 8     | 1              | 5              | 17                              | 5     | 0              | 8              |
| 2.                        | 9                      | 5     | 4              | 12             | 7                               | 13    | 3              | 7              |
| 3.                        | 1                      | 7     | 16             | 6              | 2                               | 10    | 7              | 11             |
| 4.                        | 4                      | 10    | 9              | 7              | 4                               | 2     | 20             | 4              |
| body [-]                  | 97                     | 71    | 57             | 75             | 97                              | 81    | 43             | 79             |
| body [%]                  | 32                     | 24    | 19             | 25             | 32                              | 27    | 14             | 26             |

Tabulka D.2: Výsledky ankety - tabulka četnosti výskytu výstupů jednotlivých algoritmů v daném pořadí dle dojmu respondentů (od nejlepšího po nejhorší), následný přepočítání pořadí na body a na celkovou úspěšnost v procentech, body za pořadí: 1. místo 4b, 2. místo 3b, 3. místo 2b, 4. místo 1b, 30 respondentů

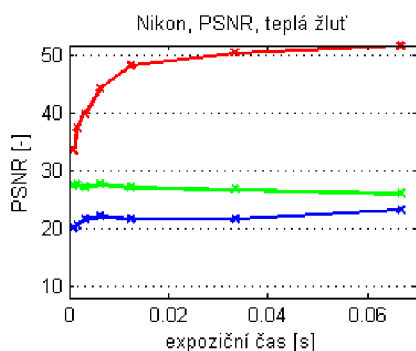


(a) Nikon D3100

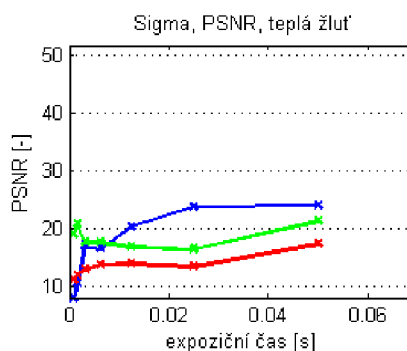


(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek D.2: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, algoritmus MSE (menší hodnota je lepší), barevný optický kalibr (Příloha C.1), RGB kanály, barva teplá žlutá

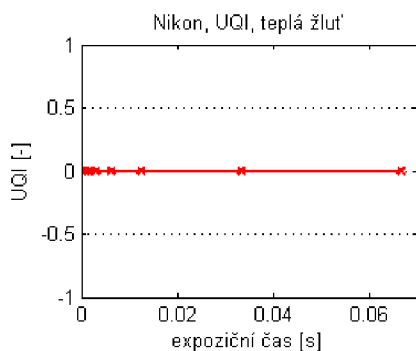


(a) Nikon D3100n

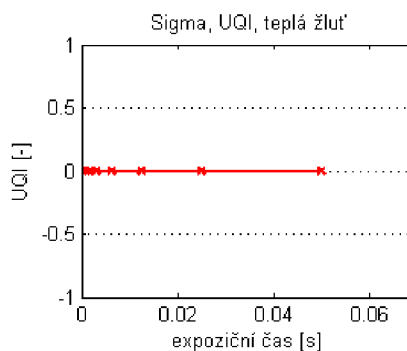


(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek D.3: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, algoritmus PSNR (větší hodnota je lepší), barevný optický kalibr (Příloha C.1), RGB kanály, barva teplá žlutá

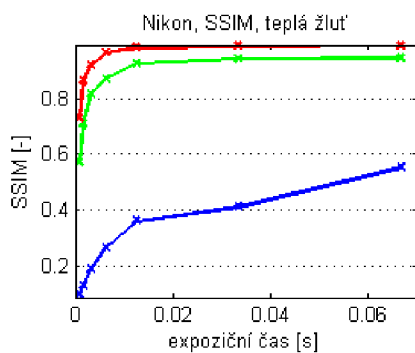


(a) Nikon D3100

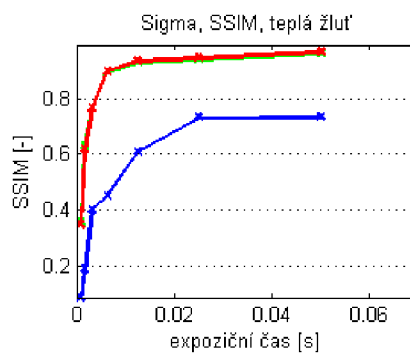


(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek D.4: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, algoritmus UQI (větší hodnota je lepší), barevný optický kalibr (Příloha C.1), RGB kanály, barva teplá žlutá

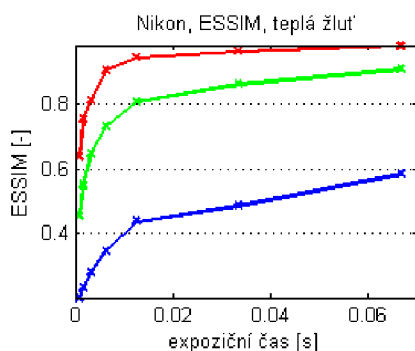


(a) Nikon D3100

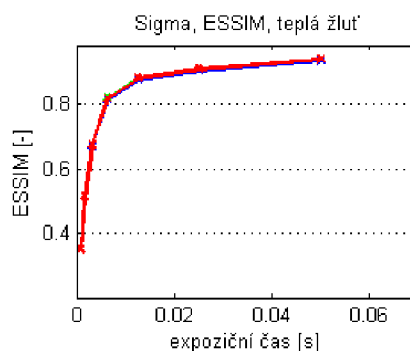


(b) Sigma DP2 Merrill

Obrázek D.5: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, algoritmus SSIM (větší hodnota je lepší), barevný optický kalibr (Příloha C.1), RGB kanály, barva teplá žlut'

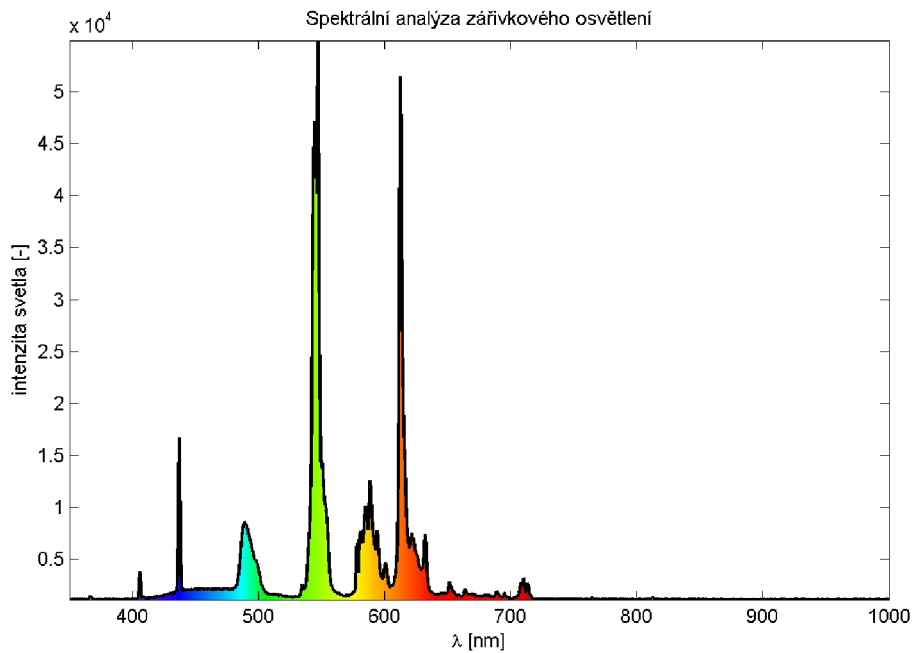


(a) Nikon D3100

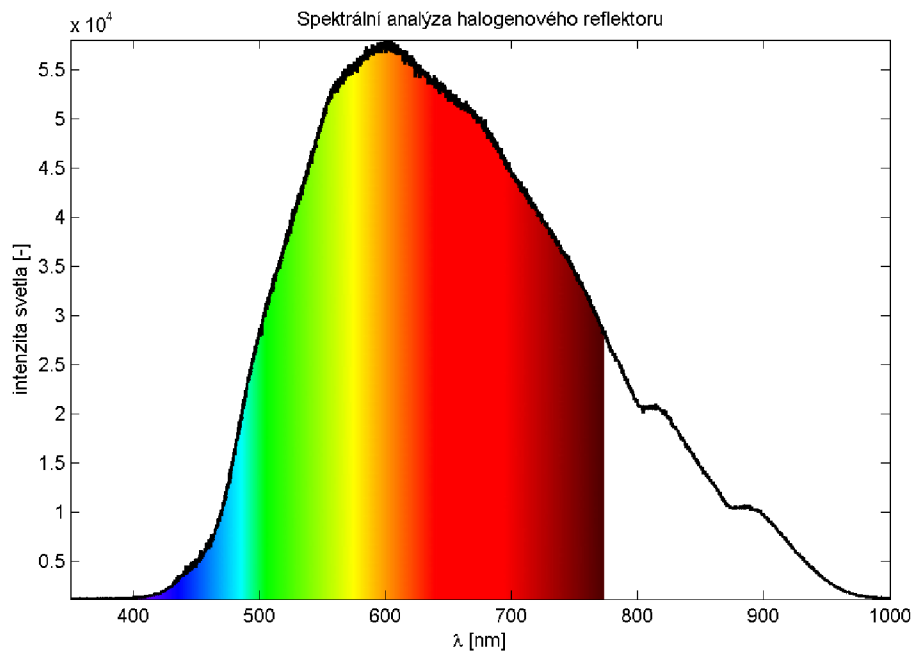


(b) Sigma DP2 Merrill

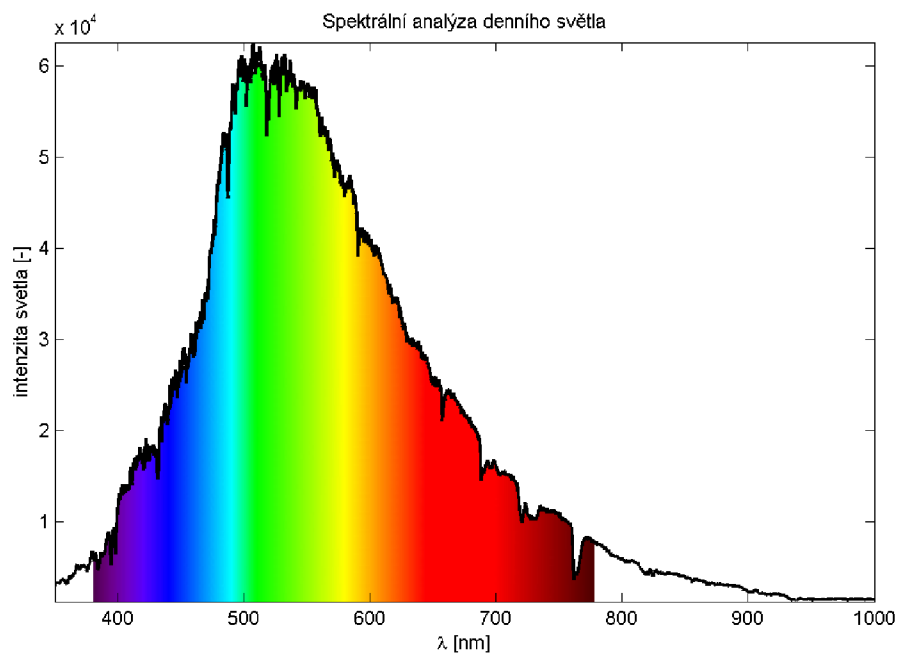
Obrázek D.6: Graf růstu kvality snímku v závislosti na expozičním čase, algoritmus ESSIM (větší hodnota je lepší), barevný optický kalibr (Příloha C.1), RGB kanály, barva teplá žlut'



Obrázek D.7: Spektrální analýza zářivkového osvětlení, měřeno pomocí analyzátoru Ocean Optics USB 4000, průměr z 10ti vzorků, bez vyhlazování

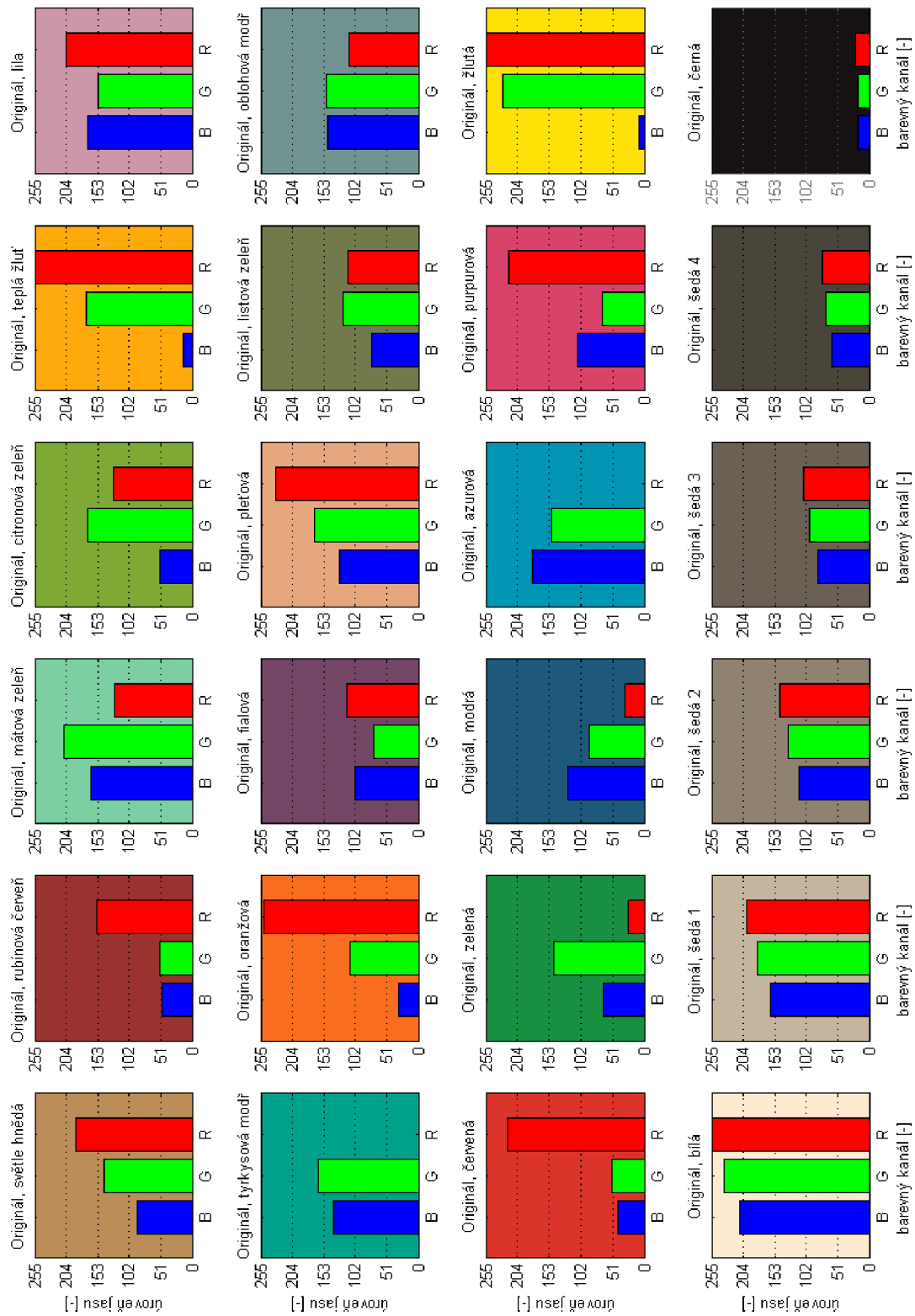


Obrázek D.8: Spektrální analýza halogenového reflektoru, měřeno pomocí analyzátoru Ocean Optics USB 4000, průměr z 10ti vzorků, bez vyhlazování

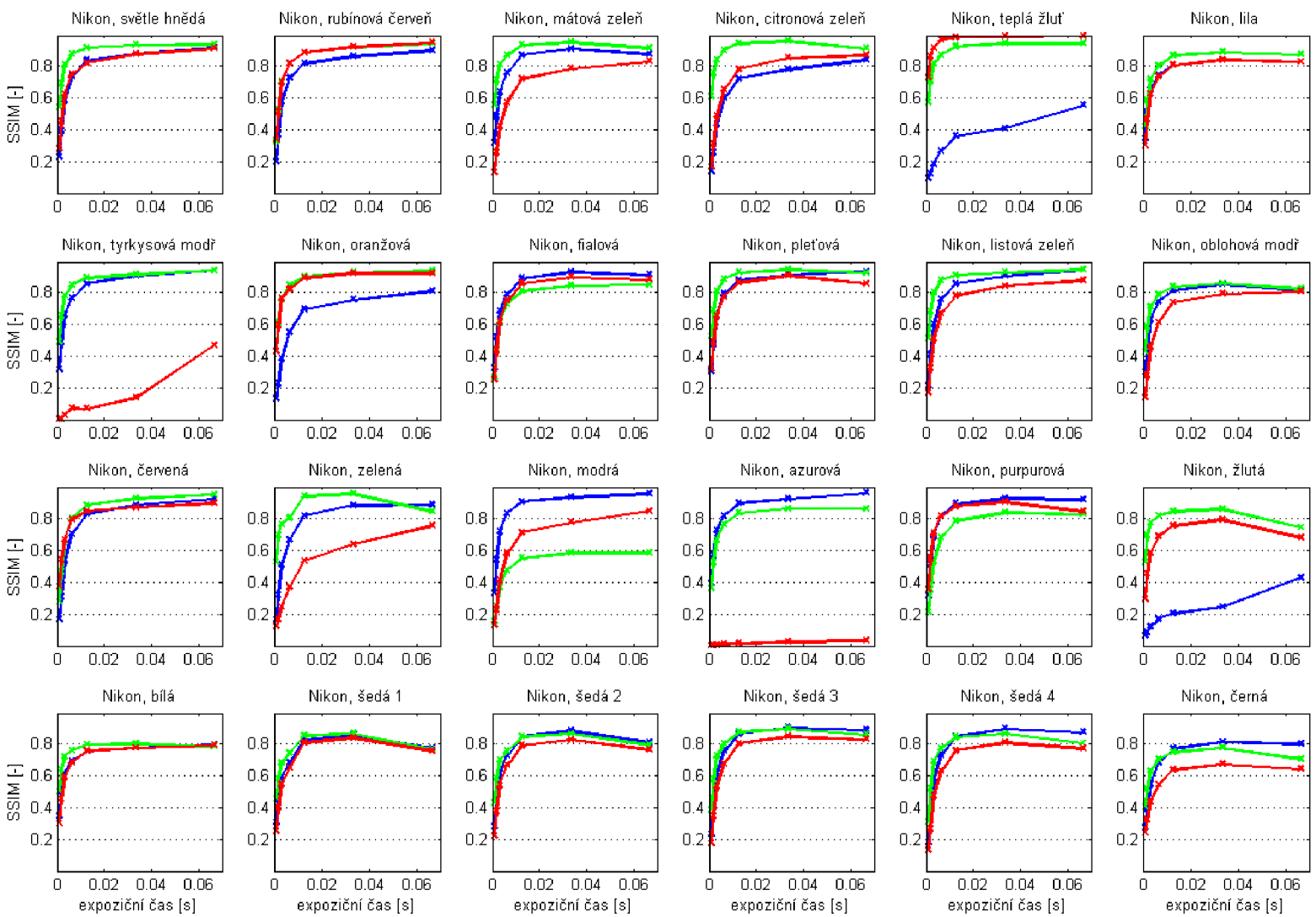


Obrázek D.9: Spektrální analýza denního světla, měřeno pomocí analyzátoru Ocean Optics USB 4000, průměr z 10ti vzorků, bez vyhlazování

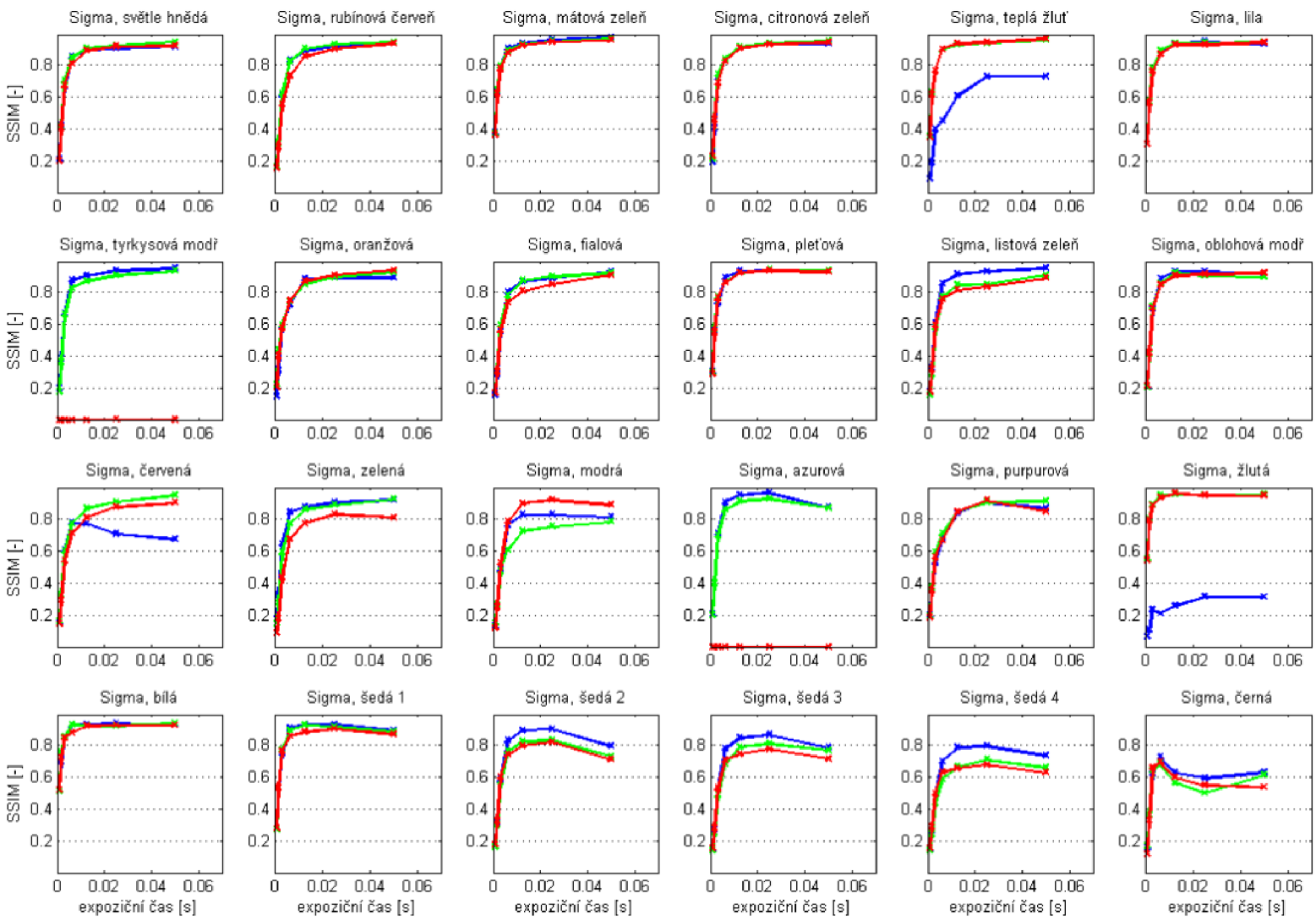




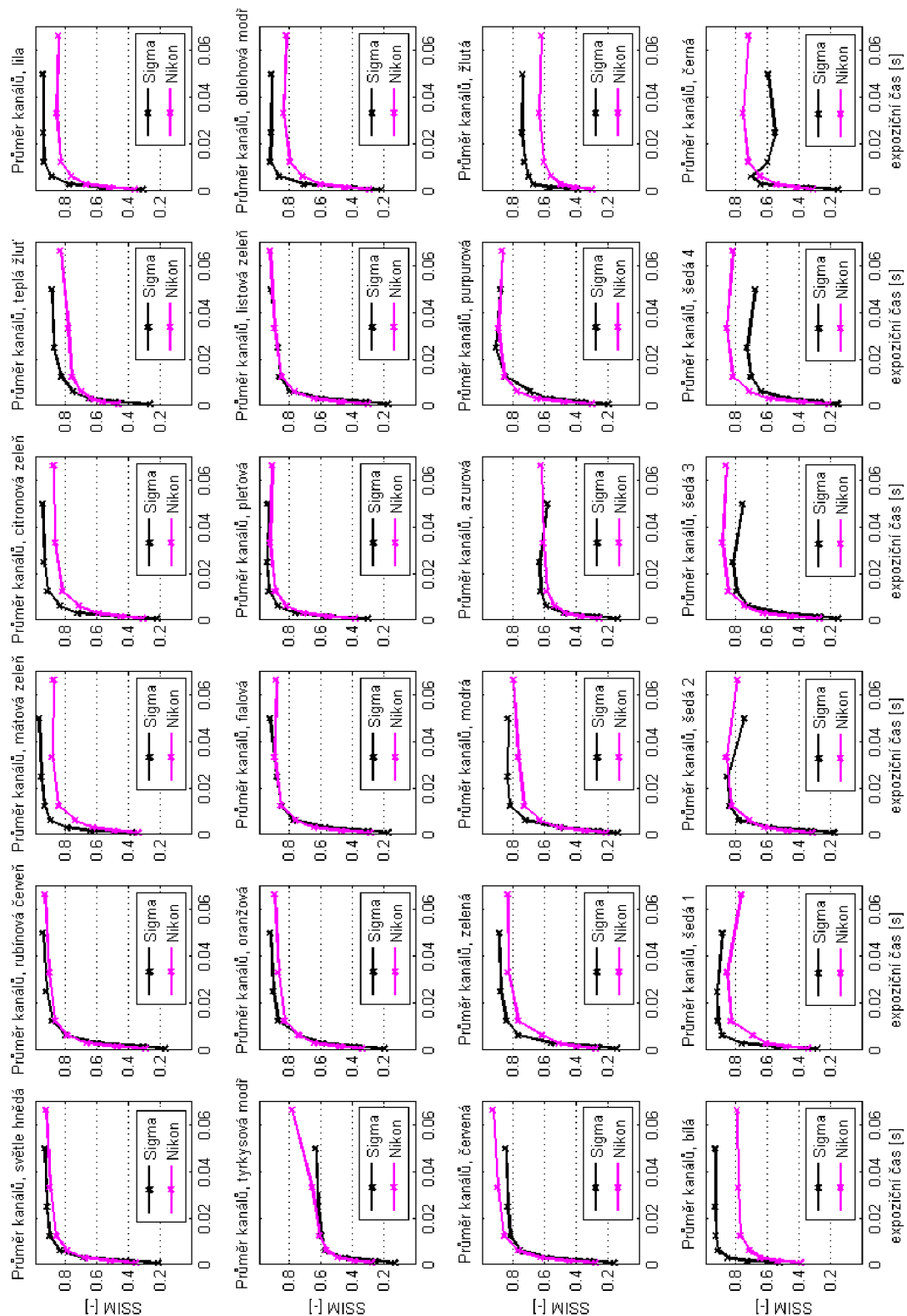
Obrázek D.10: Originální RGB hodnoty barevných ploch barevné optické tabulky(Příloha C.1)



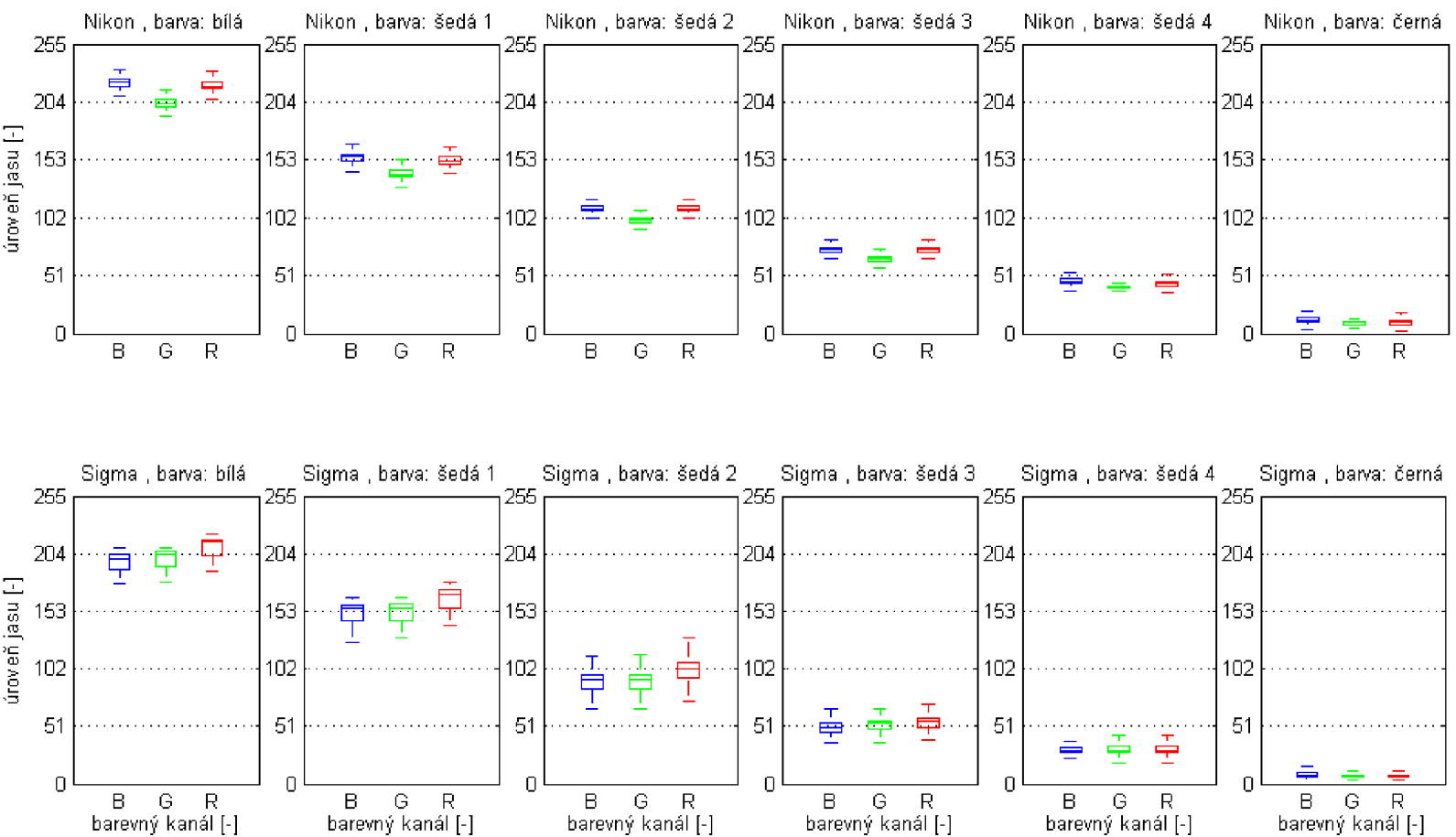
Obrázek D.11: Nikon D3100 - podání barev(Příloha C.1), průměr ze tří snímků, SSIM index podání RGB kanálů v závislosti na expozičním čase



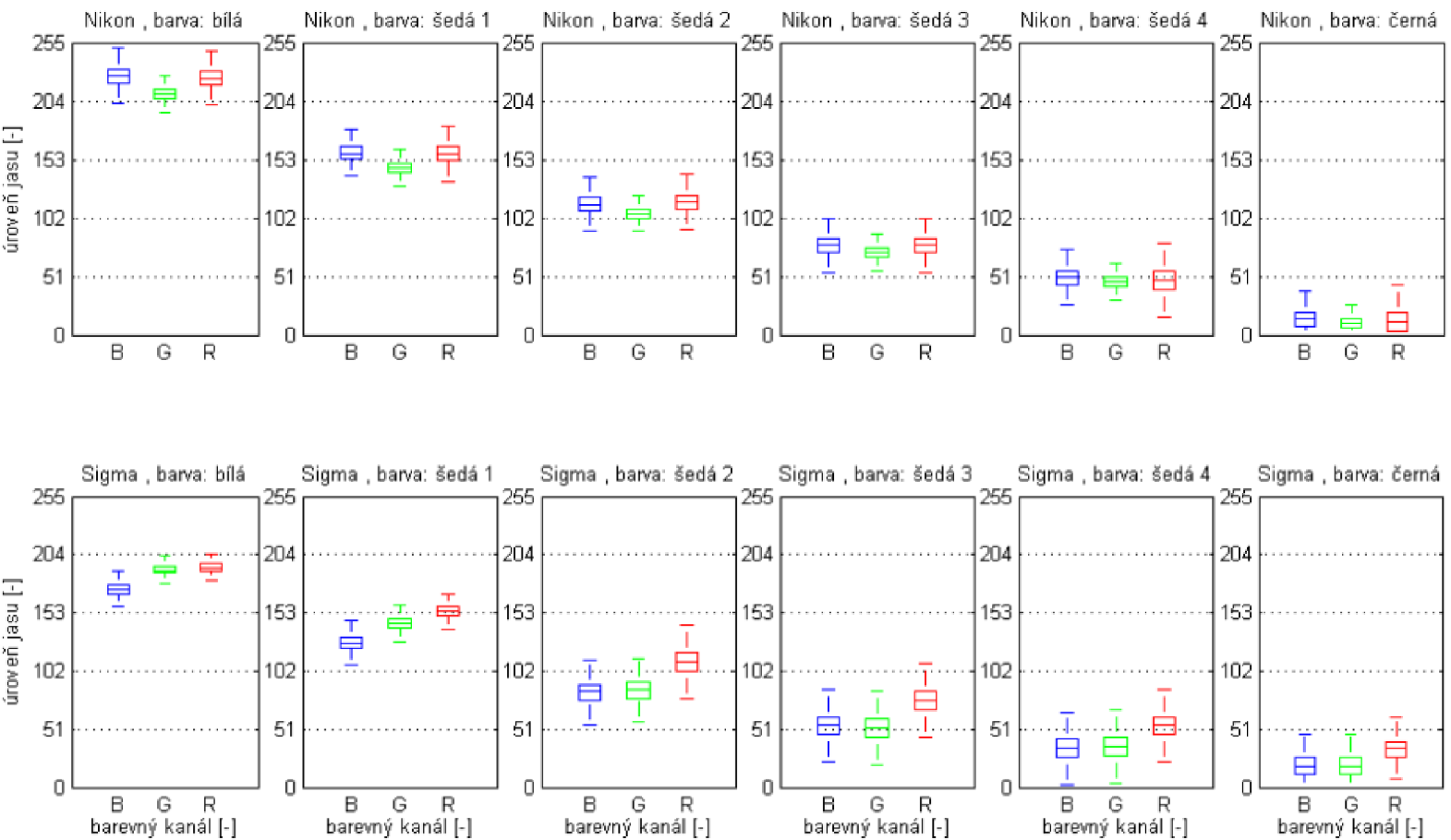
Obrázek D.12: Sigma DP2 Merrill - podání barev (Příloha C.1), průměr ze tří snímků, SSIM index podání RGB kanálů v závislosti na expozičním čase



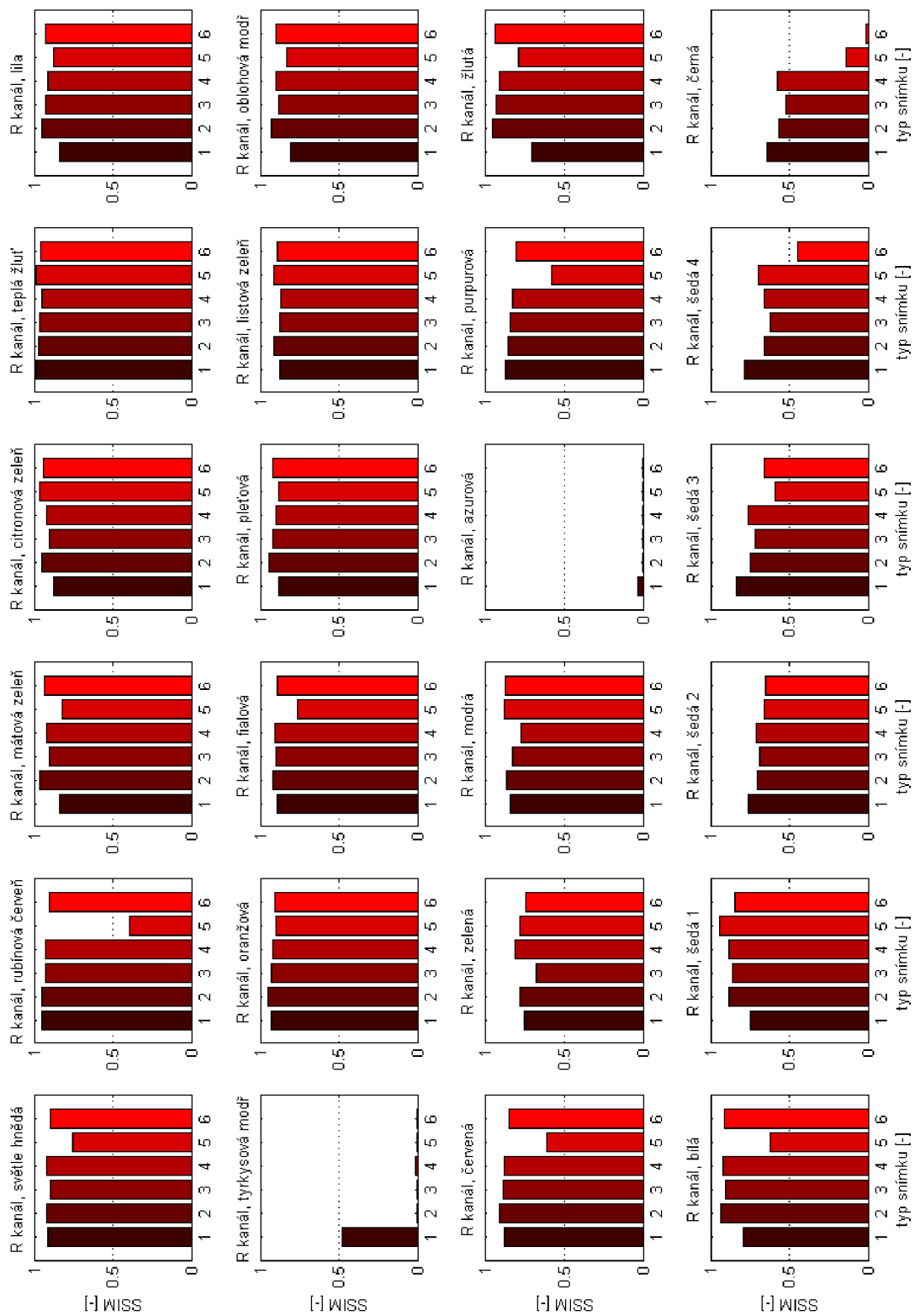
Obrázek D.13: Nikon D3100 a Sigma DP2 Merrill - podání barev(Příloha C.1), průměr ze tří snímků a z RGB kanálů, SSIM index podání barev v závislosti na expozičním čase



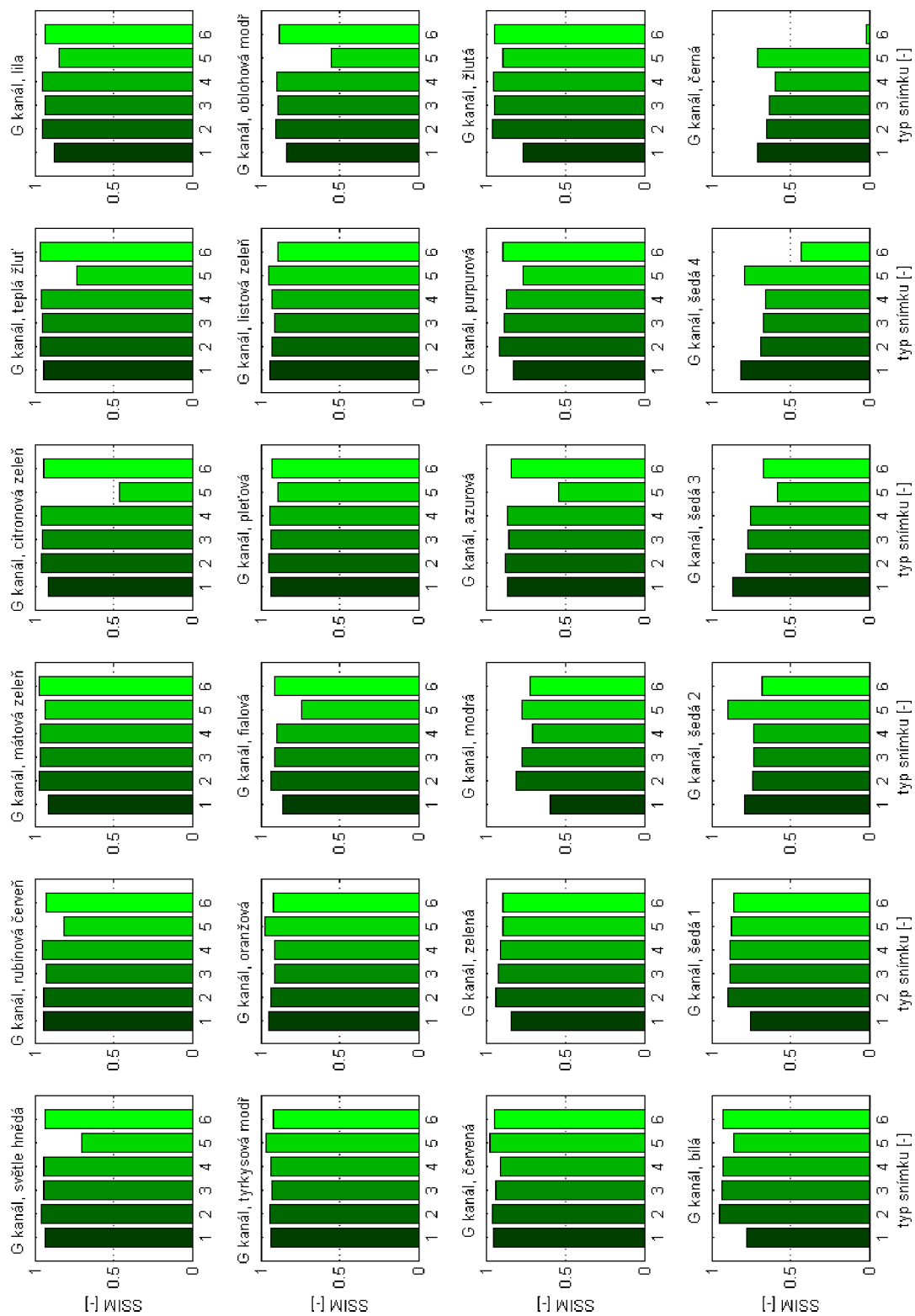
Obrázek D.14: Rozptyly jasových hodnot RGB kanálů, Nikon D3100 a Sigma DP2 Merrill, průměr ze tří snímků, ISO 100, bílá až černá barva(Příloha C.1)



Obrázek D.15: Rozpířily jasových hodnot RGB kanálů, Nikon D3100 a Sigma DP2 Merrill, průměr ze tří snímků, ISO 3200, bílá až černá barva (Příloha C.1)

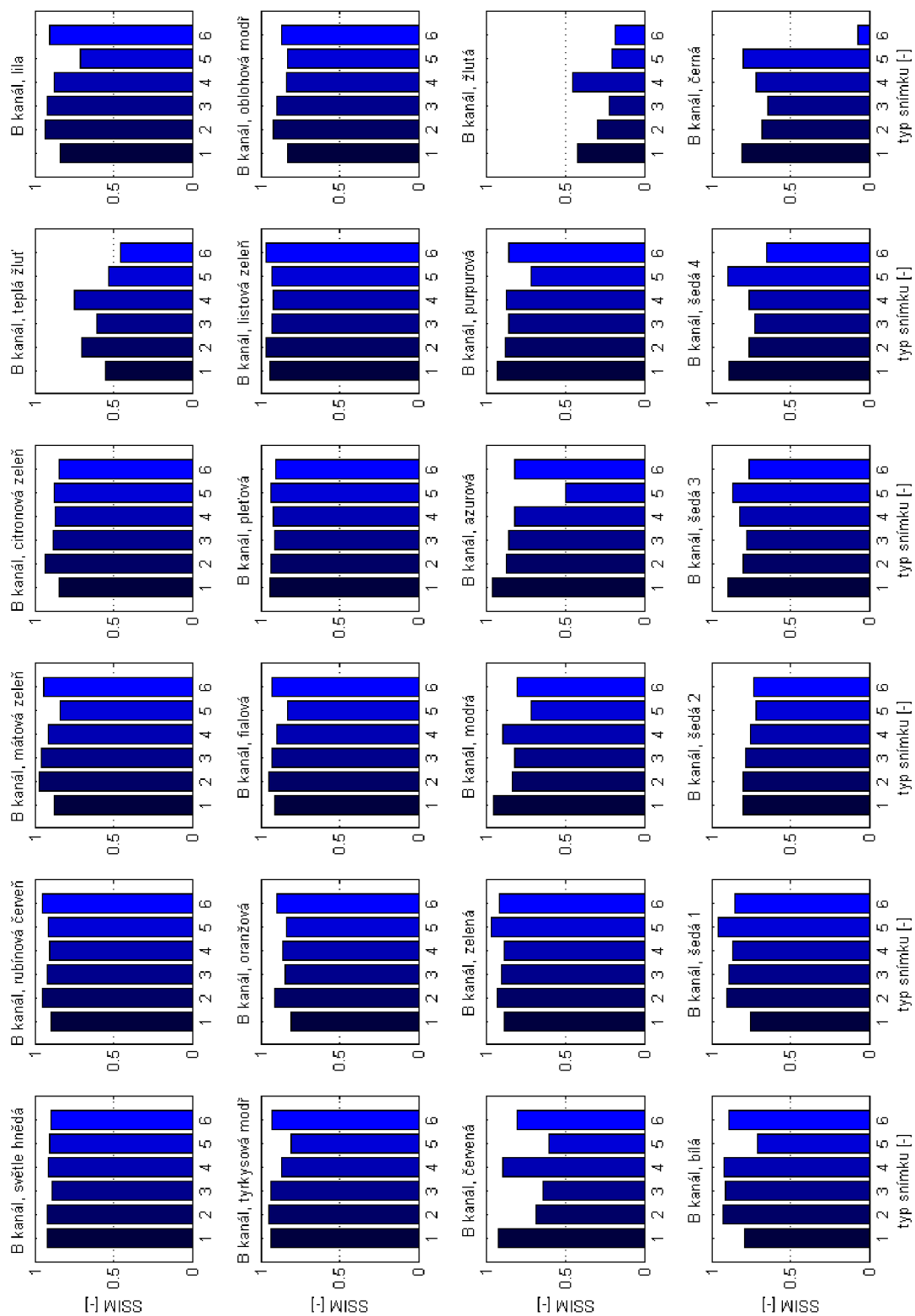


Obrázek D.16: Srovnání podání barev(Příloha C.1) - obrazová fúze, červený kanál, SSIM index, ISO 100, (1 - Nikon, 2 - Sigma, 3 - rozdíl barev v RGB, 4 - kombinace YCbCr, 5 - Histogram Matching, 6 - Color Transfer)

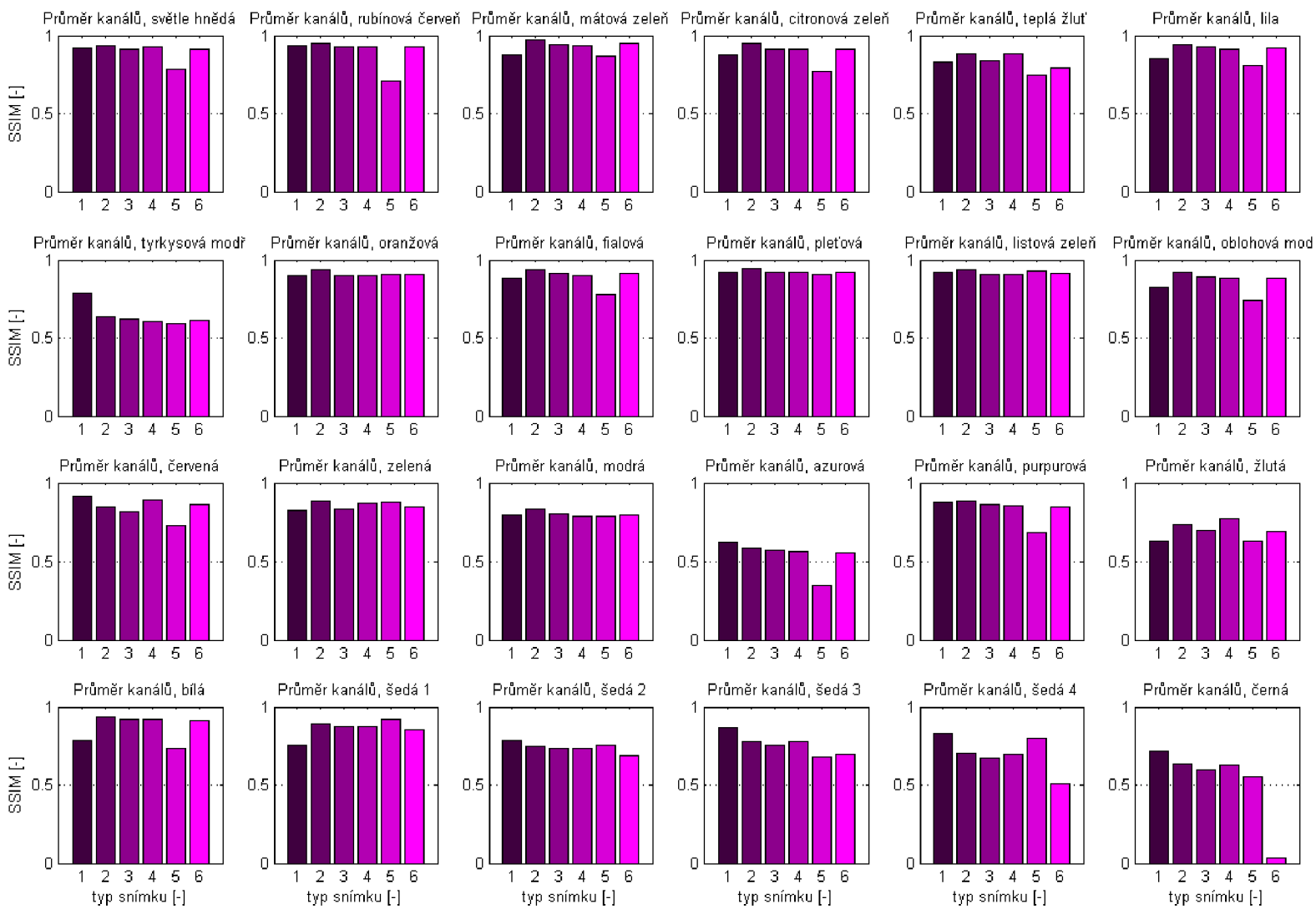


Obrázek D.17: Srovnání podání barev(Příloha C.1) - obrazová fúze, zelený kanál, SSIM index, ISO 100, (1 - Nikon, 2 - Sigma, 3 - rozdíl barev v RGB, 4 - kombinace YCbCr, 5 - Histogram Matching, 6 - Color Transfer)





Obrázek D.18: Srovnání podání barev(Příloha C.1) - obrazová fúze, modrý kanál, SSIM index, ISO 100, (1 - Nikon, 2 - Sigma, 3 - rozdíl barev v RGB, 4 - kombinace YCbCr, 5 - Histogram Matching, 6 - Color Transfer)



Obrázek D.19: Srovnání podání barev (Příloha C.1) - obrazová fúze, aritmetický průměr RGB kanálů, SSIM index, ISO 100, (1 - Nikon, 2 - Sigma, 3 - rozdíl barev v RGB, 4 - kombinace YCbCr, 5 - Histogram Matching, 6 - Color Transfer)