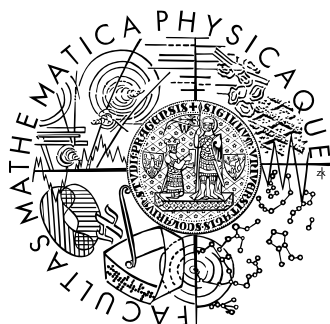


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Radek Fürbach

Metody lokalizace rozdílů v různých modálitách malířských děl

Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Jan Blažek

Studijní program: Teoretická informatika

Praha 2012

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Mgr. Janu Blažkovi za hodnotné rady.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 6.12.2012

.....

Název práce: Metody lokalizace rozdílů v různých modálitách malířských děl

Autor: Radek Fürbach

Katedra: Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Jan Blažek

e-mail vedoucího: gimli@matfyz.cz

Abstrakt:

Práce se zabývá analýzou malířských děl za účelem zjištění použitých malířských technik. Konkrétně se zaměřuje na lokalizaci podkladových kreseb na základě porovnání snímků pořízených ve spektrech s rozdílnou penetrační hloubkou. Definuje problém spojený se zachycením porovnávaných snímků v různých spektrech. Specifikuje metody, které určují závislost mezi částmi spektra (převážně RGB a IR) a na základě zjištěné závislosti aproximují převod mezi těmito částmi spektra (*Projekce červené složky spektra*, *Intenzita barvy*, *Vážený průměr složek spektra*, *Tabulkový přepočít*, *Lineární regrese*, *PCA analýza* a *Hranová dekompozice*). Práce též popisuje obecnější problémy znesnadňující řešení dané úlohy, jako je šum, nerovnoměrné osvětlení a sčítání stejného typu záření. Problémy jsou v práci důkladně rozebrány. Navrhujeme *Výpočet parametrů osvětlení pomocí neuronové sítě*, *Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním*, *Aproximace intenzity osvětlení polynomem* a *Aproximace intenzity osvětlení metodou TWMMJ* pro potlačení nerovnoměrného osvětlení. Definuujeme metody *Odhadnutí z hranové dekompozice* a *Lokální metoda nejmenších čtverců* řešící sčítání stejného typu záření. Dále popisujeme *Gaussov filtr*, *Průměrování*, *Mediánový filtr*, *Konzervativní vyhlazení* a *Průměrování s mezí* pro odstranění šumu. Navržené metody jsou experimentálně porovnány.

Klíčová slova:

zpracování obrazu, multimodální data, rozdílly v obraze, oblast zájmu, malba;

Title: Methods for Localization of Image Differences in Different Modalities of Paintings

Author: Radek Fürbach

Department: Department of Software Engineering

Supervisor: Mgr. Jan Blažek

Supervisor's e-mail: gimli@matfyz.cz

Abstract:

The work focuses on the analysis of paintings to determine the painting techniques. Specifically, it focuses on the localization of the underdrawing by comparing images taken in the spectra with different penetration depth. Defines the problem associated with the capture of the compared images in different spectra. Specifies methods that determine the dependence between two parts of the spectrum (mainly RGB and IR) and based on the dependence approximates conversion between these two parts of the spectrum (*Red spectral component projection, Colour intensity, Weighted average of spectral components, Table conversion, Linear regression, PCA analysis and Edge decomposition*). Work also describes more general problems that complicate solving tasks, such as noise, non-uniform illumination and adding the same type of radiation. Problems at work are thoroughly analyzed. We design a *Calculation of illumination parameters using a neural network, Approximation of illumination by blur, Polynomial approximation of illumination and TWMJ approximation of illumination* for suppressing non-uniform illumination. Define methods *Estimation by edge decomposition* and *Local least squares method* solving adding the same type of radiation. In addition, we describe the *Gaussian filter*, the *Averaging, Median filter, Conservative smoothing* and *Trimmed Averaging* for noise removal. The proposed methods are experimentally compared.

Keywords:

image processing, multimodal data, image differences, region of interest, painting;

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod..... | 1 |
| Kapitola 1 Analýza problému | 4 |
| 1.1 Typ záření..... | 5 |
| 1.2 Smíchání vrstev | 5 |
| 1.3 Osvětlení | 6 |
| 1.4 Sčítání intenzit stejného typu záření různého původu..... | 6 |
| 1.5 Šum | 6 |
| 1.6 Rozdílné pozadí snímků | 7 |
| Kapitola 2 Potlačení vlivu typu záření | 8 |
| 2.1 Obecná aproximace funkce RGBtoIR..... | 11 |
| 2.1.1 Projekce červené složky spektra | 11 |
| 2.1.2 Intenzita barvy..... | 11 |
| 2.1.3 Vážený průměr složek spektra | 12 |
| 2.2 Konkrétní aproximace funkcí RGBtoIR a IRtoRGB | 12 |
| 2.2.1 Tabulkový přepočít..... | 13 |
| 2.2.2 Lineární regrese..... | 15 |
| 2.3 Funkce RGBtoX a IRtoX | 17 |
| 2.3.1 PCA analýza..... | 17 |
| 2.3.2 Hranová dekompozice..... | 18 |
| Kapitola 3 Kompenzace rozdílů v osvětlení snímků | 19 |
| 3.1 Normalizace | 19 |
| 3.1.1 Min-max normalizace | 20 |
| 3.1.2 Normalizace podle střední hodnoty a rozptylu | 21 |
| 3.1.3 Multiplikativní normalizace střední hodnoty | 22 |
| 3.2 Potlačení nerovnoměrného osvětlení | 23 |
| 3.2.1 Model intenzity záření dopadající na umělecké dílo..... | 27 |
| 3.2.2 Způsob určení parametrů pro výpočet intenzity záření..... | 32 |
| 3.2.3 Použití neuronových sítí pro výpočet intenzity záření..... | 33 |
| 3.2.4 Nastavení vah neuronové sítě..... | 35 |
| 3.3 Aproximace intenzity osvětlení ze snímku | 35 |
| 3.3.1 Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním..... | 36 |
| 3.3.2 Aproximace intenzity osvětlení polynomem | 36 |
| 3.3.3 Aproximace intenzity osvětlení metodou TWMJ | 37 |
| Kapitola 4 Potlačení sčítání fluorescence a odrazu bílého světla..... | 39 |
| 4.1 Odhadnutí z hranové dekompozice..... | 40 |
| 4.2 Lokální metoda nejmenších čtverců..... | 41 |
| Kapitola 5 Potlačení šumu..... | 43 |
| 5.1 Gaussův filtr | 43 |
| 5.2 Průměrování | 43 |
| 5.3 Mediánový filtr..... | 44 |
| 5.4 Konzervativní vyhlazení | 44 |
| 5.5 Průměrování s mezí..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| Kapitola 6 Experimenty | 45 |
| 6.1 Popis experimentů..... | 45 |
| 6.2 Porovnání metod na odstranění šumu | 46 |
| 6.2.1 Výsledky experimentů | 48 |
| 6.2.2 Vyhodnocení | 50 |
| 6.3 Porovnání metod odstraňujících nerovnoměrné osvětlení..... | 51 |
| 6.3.1 Výsledky experimentů | 53 |
| 6.3.2 Vyhodnocení | 57 |
| 6.4 Výpočet koeficientů metody váženého průměru složek spektra..... | 57 |
| 6.5 Porovnání metod potlačujících vliv různého typu záření..... | 60 |
| 6.5.1 Výsledky experimentů | 61 |
| 6.5.2 Vyhodnocení | 63 |
| Závěr | 64 |
| Literatura | 66 |
| Přílohy | 68 |
| A Postup hledání podkladových kreseb obrazu Ukřižování | 68 |
| B Obsah přiloženého CD | 69 |

Úvod

Metodiky materiálového průzkumu se zabývají analýzou výtvarného díla za účelem určení použitého materiálu a použitých malířských technik. Výsledky získané touto analýzou pomáhají určit původ díla, identifikovat autora či určit stáří uměleckého díla. Informace o použitých materiálech rozhodují o postupu při konzervování a restaurování.

Metody materiálového průzkumu lze rozdělit do tří skupin [1]:

- Neinvazivní metody

Jedná se o zkoumání uměleckého díla bez odebrání vzorku. Hlavním charakterem takové metody je, že umělecké dílo během materiálového průzkumu neutrpí žádné viditelné poškození.

- Nedestruktivní analýzy

Tyto metody již vyžadují odběr vzorku ze zkoumaného díla. Vzorek se při zkoumání nezničí a lze ho dále archivovat. Odebírá se jich minimální množství (velikost vzorku je cca 2x2 mm).

- Mikroanalytické metody

Při mikroanalytické metodě se musí odebrat vzorek uměleckého díla, který se použitím metody znehodnotí.

V diplomové práci se zaměříme na analýzu z infračervených (IR) a ultrafialových (UV) snímků. Jedná se o neinvazivní metodu, při níž se pořídí snímky uměleckého díla ve viditelném, IR a UV spektru. IR záření má větší penetrační hloubku [2] a tudíž je vhodné pro zjištění podkladových kreseb a maleb. Při porovnání se snímkem zachycujícím viditelné spektrum lze například získat informace o použité malířské technice, přemalovaných částech či odchylkách mezi konečným uměleckým dílem a původním nákresem. UV záření má naopak velmi malou penetrační hloubku [3] a proto je jeho použití vhodné pro rozlišení starých a nových vrstev na základě fluorescence. Navíc při dopadu UV záření na zoxidovaná barviva (pojem barvivo v diplomové práci používáme ve smyslu látky složené z pigmentu organického i anorganického a pojiva) často dochází k fluorescenci, kdy materiál při absorpci UV

záření vyzařuje viditelné světlo. UV záření tedy lze použít jak k získání informace o vlastnosti fluorescence materiálu (odfiltrováním odraženého UV záření), tak k určení spektrální odrazivosti svrchní vrstvy (odfiltrováním viditelné části spektra).



(A) viditelný snímek



(B) infračervený snímek



(C) ultrafialový snímek



(D) snímek zachycující fluorescenci

Obr. 1: Ukázkové snímky téhož uměleckého díla

Snímky pro tuto práci jsme pořídili upraveným fotoaparátem Canon 50D a 500D. Úprava fotoaparátu spočívá v odstranění ochranného filtru čipu za účelem možnosti snímání infračerveného záření. Infračervené snímky byly pořízeny skrz cut-off filtry s propustností vlnových délek větších než 720 nm nebo 950 nm. Viditelné snímky a snímky zachycující fluorescenci byly získány pomocí band-pass filtru propouštějícího vlnové délky v rozsahu 400-680 nm. Ultrafialové snímky byly pořízeny skrz band-pass filtr propouštějící vlnové délky 250-390 nm. Pro snímání byl použit objektiv Canon EF-S 17-55/2,8 IS USM. Snímek UV spektra může být významně ovlivněn použitím skleněné optiky. V práci ale tato data použita nejsou (zde pouze pro ilustraci).

Cílem práce je navrhnout a implementovat algoritmy pro hledání a zobrazení odlišností mezi pořízenými snímky. Vstupní snímky zachycují stejnou scénu v různých vlnových spektrech. Snímky budeme považovat za zregistrované, ale mohou zobrazovat různě osvětlené umělecké dílo. Ideálním výsledkem je obraz znázorňující odlišnosti jednotlivých snímků.

Restaurátor při zpracovávání nástěnných maleb či obrazů hledá rozdíly mezi pořízenými snímky. Navržený (a implementovaný) algoritmus by jej měl automaticky upozornit na významnější rozdíly.

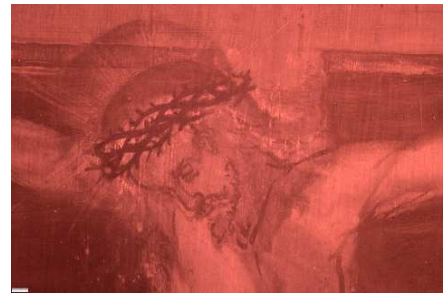
Kapitola 1

Analýza problému

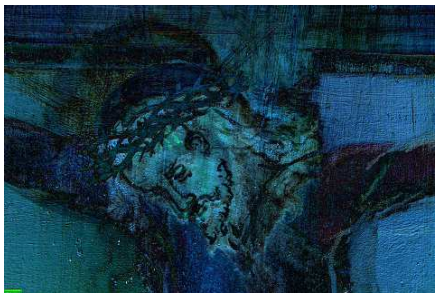
Zpracování multimodálních snímků naráží na problémy spojené s modalitou jednotlivých dat. Z tohoto důvodu nestačí k nalezení rozdílů příslušných vrstev pouze jednoduché vzájemné odečtení snímků (viz **Obr. 1.1**).



(A) snímek ve viditelném spektru



(B) infračervený snímek



(C) rozdíl snímků po normalizaci



(D) výsledek práce

Obr. 1.1: Znázornění příkladu vstupu úlohy (A) a (B), klasický rozdíl vstupních snímků po normalizaci (C) a výsledek práce (D). Postup dosažení výsledku práce uveden v příloze A.

Kromě problémů zmíněných výše se objevují i jiné problémy, jež je nutné řešit:

- Typ záření
- Smíchání vrstev
- Osvětlení
- Sčítání intenzit stejného typu záření různého původu
- Šum
- Rozdílné pozadí snímků

1.1 Typ záření

Za účelem zobrazení hlubších vrstev uměleckého díla používáme infračervené záření s větší penetrační hloubkou [2]. To zapříčiňuje, že na snímku je sice zachycena hlubší vrstva, ale tato vrstva je zachycena v infračerveném spektru, na rozdíl od svrchní vrstvy, která je zachycena ve viditelném či ultrafialovém spektru. Rozdíl pořizovaných snímků pak není určen pouze rozdílným barvivem příslušných vrstev, ale je zároveň i ovlivněn rozdílem odrazivosti barviv pro různé typy záření.

| | |
|---------------------------|------------------------|
| infračervená část spektra | viditelná část spektra |
|---------------------------|------------------------|

(A) svrchní vrstva uměleckého díla

| | |
|---------------------------|------------------------|
| infračervená část spektra | viditelná část spektra |
|---------------------------|------------------------|

(B) hlubší vrstva uměleckého díla

Obr. 1.2: Znamé části spekter (šedá barva) na příkladu porovnání infračerveného a viditelného snímku svrchní vrstvy (A) a hlubší vrstvy (B)

1.2 Smíchání vrstev

Infračervené záření má větší penetrační hloubku [2] a dokáže zachytit hlubší vrstvy, jeho propustnost do spodní vrstvy je ale ovlivněna materiálem, kterým prochází. Například přítomnost olova v barvivech způsobuje téměř 100% nepropustnost (informace o podkresbách v takovém případě chybí nebo je odfiltrována odšumovacím algoritmem). Hlinky naopak v organických pojivech propouští infračervené záření dobře. Z toho vyvozujeme, že infračervený snímek zachycuje

z části hlubší vrstvu a z části svrchní vrstvu. Poměr těchto dvou částí může být pro každý typ barviva naprosto rozdílný. Bohužel složení barviv ze samotného snímku nejsme schopni zjistit a ani pro tuto úlohu neznáme vhodný algoritmus. Z tohoto důvodu se v práci dále nezabýváme problémem smíchání vrstev. Přimíchání svrchní vrstvy může zmenšit nebo úplně potlačit velikost rozdílu v dané oblasti. Algoritmy založené na hledání závislostí mezi vstupními snímky (viz **Kapitola 2.2**) nejsou tímto vlivem negativně ovlivněny.

1.3 Osvětlení

Snímky uměleckých děl jsou převážně pořizovány „in situ“ (uvnitř kostelů nebo v jiných místnostech s nedostatkem osvětlení). Proto je u pořizování snímků zapotřebí umělecké dílo nasvítit dodatečnými reflektory. Tyto reflektory ale nemusí osvětlovat umělecké dílo rovnoměrně a v horším případě mohou dokonce na snímku vytvořit odlesk reflektoru (zvláště pokud je obraz dodatečně přelakován). Pokud jsou srovnávané snímky odlišně osvětlené, pak se toto rozdílné osvětlení může projevit do rozdílu snímků.

1.4 Sčítání intenzit stejného typu záření různého původu

Projevuje se pouze ve snímcích zachycující UV fluorescenci. Vliv spočívá ve sčítání viditelného světla odraženého od uměleckého díla s viditelným světlem vyzářeným při absorpci ultrafialového záření důsledkem fluorescence. Tyto snímky se pořizují ideálně pouze s ultrafialovým osvětlením. Při pořizování snímků za světla se používají silnější ultrafialové reflektory. Přesto viditelné světlo odražené od uměleckého díla často tvoří nezanedbatelnou část (z důvodu nedostatečného zatemnění).

1.5 Šum

Šum může výrazně ovlivnit výsledky některých algoritmů. Už v procesu snímání je třeba pracovat tak, aby šumu bylo na snímcích minimum. Silně zašuměný obraz nelze zpracovávat standardními metodami, jako jsou například hranové detektory, segmentace, registrace apod.

1.6 Rozdílné pozadí snímků

Umělecká díla na infračervených snímcích mívají často černá pozadí z důvodu nedostatečného osvětlení. Naopak ve viditelném snímku často bývají předměty (například stoly, držáky, stěny atd.) v pozadí dobře vidět. Rozdílnost pozadí se projeví do výsledného rozdílu obrazů a také výrazně ovlivní algoritmy založené na statistické analýze. Naší nejvhodnější metodou k odstranění tohoto vlivu je oříznutí snímku na oblast zachycující pouze umělecké dílo.



(A) viditelný snímek



(B) infračervený snímek

Obr. 1.3: Pozadí dvou snímků téhož uměleckého díla ve viditelném (A) a infračerveném (B) spektru

Kapitola 2

Potlačení vlivu typu záření

Abychom multimodální snímky mohli porovnat, je třeba transformovat data (hodnoty pixelů) do stejného prostoru hodnot (RGB, Intensity, PCA či jiného). Svrchní vrstva je zachycena ve viditelném spektru, zatímco vnitřní vrstva je zachycena v infračerveném spektru (znázorněno na **Obr. 1.2**). Při hledání rozdílů jednotlivých vrstev je vhodné mít obě vrstvy zaznamenané ve stejném spektru. V opačném případě nemůžeme snímky mezi sebou porovnávat, protože viditelné světlo je určeno vektorem (R, G, B) , zatímco infračervené záření je určeno hodnotou IR (viz **Definice 2.1**).

Na základě vlastností použitých algoritmů (viz níže) se bez újmy na obecnosti v práci omezuje pouze na potlačení vlivu typu záření mezi viditelným a infračerveným snímkem. Potlačení vlivu typu záření mezi viditelným a ultrafialovým snímkem provádíme obdobnými algoritmy.

Tato kapitola se nevztahuje na porovnávání viditelného snímku a snímku zachycující fluorescenci, protože oba snímky jsou zachycené ve viditelném spektru. Problematiku fluorescence rozebereme v Kapitole 4.

Definice 2.1:

R – hodnota červeného barevného kanálu

G – hodnota zeleného barevného kanálu

B – hodnota modrého barevného kanálu

IR – hodnota infračerveného barevného kanálu (průměr hodnot červeného, zeleného a modrého barevného kanálu zaznamenaných senzorem přes infračervený filtr)

Vliv různého typu záření modelujeme následovně:

Definice 2.2:

$$PictureVis(x, y) = pRGB(LayerOut(x, y))$$

$$PictureIR(x, y) = pIR(LayerIn(x, y))$$

kde:

$LayerIn(x, y)$ – Odezva vnitřní vrstvy v prostoru (R, G, B, IR) na souřadnicích $[x, y]$

$LayerOut(x, y)$ – Odezva vnější vrstvy v prostoru (R, G, B, IR) na souřadnicích $[x, y]$

$pRGB((IR, R, G, B)) = (R, G, B)$ – Projekce všech zmíněných barevných kanálů do červeného, zeleného a modrého barevného kanálu.

$pIR((IR, R, G, B)) = IR$ – Projekce všech zmíněných barevných kanálů do infračerveného barevného kanálu.

$PictureVis(x, y)$ – Červený, zelený a modrý barevný kanál viditelného snímku na souřadnicích $[x, y]$ určené vektorem (R, G, B) .

$PictureIR(x, y)$ – Infračervený barevný kanál infračerveného snímku na souřadnicích $[x, y]$ určený hodnotou IR .

V modelu předpokládáme, že propustnost filtrů v oříznuté části spektra je zanedbatelná. Dále předpokládáme, že spektra viditelného a infračerveného snímku se vzájemně nepřekrývají.

Pro porovnání je ideální prostory obou snímků rozšířit do společného prostoru (R, G, B, IR) dopočítáním hodnot v chybějících dimenzích. Rozdílné oblasti pak lze lokalizovat klasickým odečtením snímků od sebe. Dopočítání všech chybějících informací může být ale obtížné, v našem případě si proto vystačíme s převodem snímků do „libovolného“ jednotného prostoru. Zvolený prostor by měl ale splňovat vlastnost, že rozdílné oblasti vrstev budou zobrazeny na snímcích rozdílně a shodné oblasti vrstev budou zobrazeny na obou snímcích shodně (převod by měl co nejlépe zachovat míru korelace obou snímků).

Definujeme proto transformující funkce:

- Transformaci $RGBtoIR$ vypočítávající IR z vektoru (R, G, B) . Rozdíl vstupních snímků pak bude proveden v prostoru IR .
- Transformace $IRtoRGB$ inverzní k funkci $RGBtoIR$. Příslušný rozdíl pak bude proveden v prostoru (R, G, B) .
- Dvojici transformací $RGBtoX$ a $IRtoX$ převádějící IR a vektor (R, G, B) do jiného společného prostoru X . Rozdíl pak bude proveden ve zvoleném prostoru X .

Bohužel v obecném případě nelze zaručit jakoukoliv závislost mezi viditelnou částí spektra a infračerveným zářením. Z tohoto důvodu transformace $RGBtoIR$ a $IRtoRGB$ obecně nemusejí mít vlastnost funkce (stejně hodnotě x je přiřazeno více různých funkčních hodnot $f(x)$) a proto je nutné počítat s funkcemi pouze aproximující převod mezi IR a vektorem (R, G, B) .

Předpokládáme, že větší část obrazu (tj. 70 – 100%) lze aproximační funkcí $RGBtoIR$ korektně převést. Transformující obraz bude tedy ze 70% v pořádku. V případě opačného převodu obrazu aproximační funkcí $IRtoRGB$ nemůžeme v námi požadované míře správnost zaručit.

V této práci jsme aproximace rozdělili na *konkrétní aproximace* a *obecné aproximace*.

Konkrétní aproximace jsou aproximace vytvořené na základě nalezených závislostí mezi vstupními snímky. Jejich platnost se vztahuje pouze na snímky, pro které byly vytvořeny, v ostatních případech nemusí dosahovat dobrých výsledků.

Obecné aproximace jsou aproximace nezávislé na vstupních snímcích a lze je používat v obecném případě.

2.1 Obecná aproximace funkce RGBtoIR

Obecné aproximace jsou aproximace nezávislé na vstupních snímcích. K získání aproximace funkce *RGBtoIR* není potřeba jakékoliv konkrétní informace o vstupních datech.

Dále se budeme zabývat algoritmy:

- Projekce červené složky spektra
- Intenzita barvy
- Vážený průměr složek spektra

2.1.1 Projekce červené složky spektra

Projekce červené složky je jedna z nejjednodušších aproximací funkce *RGBtoIR*. Za hodnotu infračerveného barevného kanálu dosazujeme hodnotu červeného barevného kanálu. Červený barevný kanál jsme zvolili na základě faktu, že červené světlo má nejbližší vlnovou délku k vlnové délce infračerveného záření. Z předpokladu spojitosti odezvy (pro jednotlivé vlnové délky) je pravděpodobné, že červený kanál aproximuje infračervený kanál nejlépe ze všech dostupných barevných kanálů. Pro aproximaci ultrafialového barevného kanálu existuje obdobná metoda projekce modré složky. I přes svoji jednoduchost a silné předpoklady vlastnosti funkce odezvy dosahuje tato aproximace dobrých výsledků (viz **Kapitola 6.2.1**).

Výpočet:

$$IR = R$$

2.1.2 Intenzita barvy

Základní princip spočívá v aproximaci hodnoty infračerveného barevného kanálu intenzitou barvy [4]. Intenzita barvy se rovná průměru hodnot jednotlivých barevných kanálů.

Výpočet:

$$IR = \frac{R + G + B}{3}$$

2.1.3 Vážený průměr složek spektra

Tato aproximace je velmi podobná *intenzitě barvy*. Jednotlivé barevné kanály jsou navíc váženy koeficienty. Protože červené světlo má bližší vlnovou délku k vlnové délce infračerveného záření než ostatní složky, měla by hodnota červeného barevného kanálu mít větší podíl na výpočtu hodnoty infračerveného barevného kanálu než ostatní barevné kanály.

Výpočet:

$$IR = a \cdot R + b \cdot G + c \cdot B$$

Nevýhoda váženého průměru spočívá v obtížnosti získání vhodných koeficientů. Koeficienty můžeme vypočítat pomocí lineární regrese [5] buď z vytvořeného vzorníku barviv nebo z velkého počtu již analyzovaných uměleckých děl. Na základě experimentu (viz **Kapitola 6.4**) jsme vypočetli parametry $(a, b, c) = (0,884; -0,648; 0,719)$. Analýza barviv ve vědecké publikaci zatím chybí. Pro výpočet jsme nepoužili dostatečný počet uměleckých děl, aby se jednalo o obecně věrohodný výsledek (během výpočtu jsme neměli k dispozici ani vzorník barviv ani velký počet již analyzovaných děl). Přesto tato aproximace dosáhla dostatečných výsledků (viz **Kapitola 6.5.1**).

2.2 Konkrétní aproximace funkcí RGBtoIR a IRtoRGB

Konkrétní aproximace jsou aproximace vytvořené na základě nalezených závislostí mezi vstupními snímky. Jejich platnost se vztahuje pouze na snímky, pro které byly vytvořeny. V ostatních případech nemusí dosahovat dobrých výsledků.

Hlavní myšlenka spočívá v nalezení funkce aproximující výpočet vektoru hodnot určitých barevných kanálů z vektoru hodnot jiných barevných kanálů na základě odpovídajících dvojic $(PictureSP1(x, y), PictureSP2(x, y))$, například výpočet hodnoty infračerveného barevného kanálu z hodnot červeného, zeleného a modrého barevného kanálu na základě odpovídajících dvojic $((IR), (R, G, B))$.

Definice 2.3:

$PictureSP1(x, y)$ – Hodnoty určitých barevných kanálů na souřadnicích $[x, y]$ reprezentované m -rozměrným vektorem $SP1$.

$PictureSP2(x, y)$ – Hodnoty jiných barevných kanálů na souřadnicích $[x, y]$ reprezentované n -rozměrným vektorem $SP2$.

V úvahu by se měly vzít pouze dvojice z oblastí snímků, kde se obě vrstvy shodují. V těchto oblastech snímky zachycují záření odražená od stejného barviva. V oblastech, kde se vrstvy neshodují, snímky zachycují záření od různých barviv. Tyto dvojice jsou nevhodné, protože nepopisují závislost částí spekter v rámci jednoho barviva.

Jelikož nelze zjistit, v jakých oblastech se vrstvy shodují, berou se v úvahu dvojice z celého snímku. Pro nalezení správných funkcí musí platit předpoklad, že oblasti, kde se vrstvy neshodují, tvoří malou část celkové plochy snímku. A tudíž vliv těchto oblastí na nalezení správných funkcí není velký.

Použité metody:

- Tabulkový přepoččet
- Lineární regrese

2.2.1 Tabulkový přepoččet

Tabulkový přepoččet je jedna z nejjednodušších *konkrétních aproximací*. Výpočet vektoru $SP1$ je dán hodnotou v n -rozměrné tabulce na pozici určené prvky vektoru $SP2$. Pro použití *tabulkového přepočtu* je nutné předpokládat, že prvky vektoru $SP2$ jsou celá čísla z určitého pevného rozsahu. Tento předpoklad splňuje většina rastrových formátů. V ostatních případech je nutné před použitím této aproximace vektor $SP2$ kvantizovat (transformovat do celých čísel).

Výpočet:

$$SP1 = T[SP2]$$

$T[]$ – n -rozměrná tabulka obsahující vektory $SP1$

n – dimenze vektoru $SP2$

Hodnoty tabulky na pozicích $SP2$ jsou určeny průměrem po složkách všech vektorů $SP1$ vyskytujících se ve dvojici s vektorem $SP2$. Hodnoty tabulky na ostatních pozicích nejsou definovány.

Hodnoty tabulky:

$$U_{SP2} = \langle (i, j) | PictureSP2(i, j) = SP2 \rangle$$

pokud ($|U_{SP2}| > 0$), pak:

$$T[SP2] = \frac{1}{|U_{SP2}|} \cdot \sum_{(i, j) \in U_{SP2}} PictureSP1(i, j)$$

pokud ($|U_{SP2}| = 0$), pak:

$$T[SP2] = null$$

Parametry $PictureSP1$ a $PictureSP2$ vysvětleny v **Definice 2.3**.

Mezi největší nevýhody *tabulkového přepočtu* patří velká citlivost na šum a nerovnoměrné osvětlení. To způsobuje, že stejné barvivo je na snímku zobrazeno prostřednictvím několika velmi podobných vektorů $SP2$. Další nevýhodou je velikost rozdílu hodnot sousedních buněk, která umožní dvěma téměř stejným vektorům $SP2$ přiřadit naprosto rozdílné vektory $SP1$. Předpokládáme, že tabulka by měla reprezentovat spojitou funkci v diskrétních bodech. Velký rozdíl v sousedních hodnotách ukazuje na nespojitost (tudíž chybu aproximace). Obě zmíněné nevýhody mohou dohromady zapříčinit, že barvivo, kterému odpovídá určitý vektor $SP2$, může být přiřazeno několik naprosto různých vektorů $SP1$, což je velmi nežádoucí jev, protože zobrazení vektoru $SP2$ na vektor $SP1$ by mělo být jednotné v celém snímku.

Podobnost hodnot sousedících buněk lze zlepšit zprůměrováním hodnot v tabulce s hodnotami okolních buněk. Čím větší poloměr okolí, tím jsou hodnoty sousedících buněk více podobné. Bohužel toto průměrování zvyšuje časovou náročnost ($O(\text{poloměr}^n)$).

Další nevýhodou této metody je velká paměťová náročnost. Protože tabulka obsahuje velmi málo platných hodnot, lze paměťovou náročnost snížit zvolením vhodné datové struktury uchovávající dvojice ($SP1$, $SP2$). To ovšem opět vede k zvýšení časové náročnosti.

2.2.2 Lineární regrese

Lineární regrese [5] vyjadřuje závislost určité veličiny na jedné nebo více dalších veličinách. Toto vyjádření je určeno prostřednictvím lineární funkce. Neznámé parametry (koeficienty) jsou určeny na základě vstupních dat.

Tato *konkrétní aproximace* používá lineární regresi pro vyjádření vztahu všech prvků složek vektoru $SP1$ na složkách vektoru $SP2$. Vztah je modelován prostřednictvím násobení matice A a přičtení vektoru B .

Výpočet:

$$SP1 = A \times SP2 + B$$

A – matice typu $m \times n$

B – m -rozměrný vektor

m – dimenze vektoru $SP1$

n – dimenze vektoru $SP2$

Ekvivalentní zápis:

$$SP1 = (A | B) \times (SP2 | 1)$$

$(A|B)$ – matice typu $m \times (n + 1)$ vzniklá z matice A přidáním sloupce určeným vektorem B

$(SP2,1)$ – $(n + 1)$ -rozměrný vektor vzniklý z vektoru $SP1$ přidáním prvku 1.

Výpočet matice $(A|B)$ provádíme metodou nejmenších čtverců [6]. Tato metoda minimalizuje součet čtverců vzdáleností mezi skutečnou a aproximovanou hodnotou. Matici $(A|B)$ volíme tak, aby se minimalizovala chybová funkce:

$$E = \sum_x \sum_y \|(A|B) \times (PictureSP2(x, y), 1) - PictureSP1(x, y)\|^2$$

Parametry $PictureSP1$ a $PictureSP2$ vysvětleny v **Definice 2.3**.

Nevýhodou metody nejmenších čtverců je, že vstupní data musí být lineárně nezávislá. V našem případě lineární nezávislost vstupních dat znamená, že žádný barevný kanál (v rámci celého snímku) nesmí jít vyjádřit pomocí lineární kombinace ostatních barevných kanálů. Pokud jsou vstupní data lineárně závislá, je možné snímek transformovat prostřednictvím PCA analýzy (viz **Kapitola 2.3.1**) nebo přidat několik imaginárních pixelů narušujících platnost lineární závislosti. Například pokud R lze v celém snímku vyjádřit lineární kombinací G a B , pak přidáním pixelu $(R, G, B) = (1, 0, 0)$ zrušíme platnost lineární závislosti (v rámci celého snímku).

Metodu lze zobecnit tím, že místo vektoru $SP2$ můžeme modelovat vektor $SP1$ vektorem SPX , který obsahuje jak prvky $SP2$ tak i jejich mocniny do k -tého řádu. Zobecnění přesahuje rámec diplomové práce, proto se jím dále nezabýváme. Navíc původní metoda přináší dostatečně dobré výsledky.

2.3 Funkce $RGBtoX$ a $IRtoX$

$RGBtoX$ a $IRtoX$ jsou funkce převádějící snímky z prostoru IR a (R, G, B) do jednotného zvoleného prostoru X . Forma jednotlivých funkcí závisí na zvoleném prostoru X .

Zvolené přístupy:

- PCA analýza
- Hranová dekompozice

2.3.1 PCA analýza

PCA analýza je ortogonální transformace [7], která přepisuje vstupní n -rozměrná data do ortogonální souřadné soustavy. Vstupní data jsou vycentrována a natočena tak, že největší rozptyl dat je ve směru první osy. Každá další osa určuje směr největšího rozptylu, který je kolmý na všechny předchozí osy. Běžným použitím je zmenšení počtu dimenzí vstupního prostoru zanedbáním několika souřadnic s nejmenším rozptylem dat. Další vlastností PCA transformace je, že transformovaná data jsou nekorelovaná.

PCA analýza je zde použita pro normalizaci obou snímků. Hlavní nevýhodou této metody konkrétně v porovnávání infračerveného a viditelného snímku je jedno-rozměrnost dat infračerveného snímku. PCA na infračerveném snímku neprovádíme. Při transformaci viditelného snímku pomocí PCA bereme v úvahu první složku.

2.3.2 Hranová dekompozice

Provedení detekce hran na jednotlivých snímcích se nabízí jako vhodná metoda pro vzájemné porovnání. Ačkoliv nelze zaručit jakoukoliv závislost mezi infračerveným a viditelným spektrem, je časté, že hrana na rozhraní dvou různých barviv se objeví v obou zaznamenaných spektrech (viz **Obr. 2.1**). V každém spektru však může být rozdíl hodnot barevných kanálů dvou barviv na rozhraní jinak veliký.



(A) viditelný snímek



(B) infračervený snímek



(C) hranová dekompozice vid. snímku



(D) hranová dekompozice infra. snímku

Obr. 2.1: Hranová dekompozice viditelného a infračerveného snímku. Pro získání hranové dekompozice byl použit Robinsonův detektor hran [8].

Hlavní nevýhodou metody je velká citlivost na správnou registraci snímků

Kapitola 3

Kompenzace rozdílů v osvětlení snímků

Umělecká díla jsou při pořizování snímků často nasvícena dodatečnými reflektory. Jedná se především o snímky pořízené v infračerveném a ultrafialovém spektru. Pro správné nalezení rozdílů mezi zkoumanými vrstvami je vhodné mít umělecké dílo nasvícené v obou snímcích stejně. Pokud je umělecké dílo osvětleno rovnoměrně (na každou část dopadá stejná intenzita záření), pak pro odstranění rozdílného osvětlení stačí oba snímky znormalizovat (viz **Kapitola 3.1**). Pokud je ale umělecké dílo osvětleno nerovnoměrně nebo pokud je dokonce na snímku zobrazen odlesk od reflektoru, pak je potřeba nerovnoměrné osvětlení nejprve potlačit.

3.1 Normalizace

Normalizace slouží k převedení snímků do jednotného formátu. Jedná se především o převedení snímků do stejné světlosti. Normalizaci lze provést jak pro každý barevný kanál zvlášť tak jednotě pro všechny barevné kanály.

Definice 3.1:

PictureNorm(x,y) – Vektor hodnot barevných kanálů normalizovaného snímku na souřadnicích $[x, y]$.

Picture(x,y) – Vektor hodnot barevných kanálů původního snímku na souřadnicích $[x, y]$.

Použité algoritmy normalizace:

- Min-max normalizace
- Normalizace podle střední hodnoty a rozptylu
- Multiplikatívni normalizace střední hodnoty

3.1.1 Min-max normalizace

Hlavní myšlenka *min-max normalizace* spočívá v převedení snímků do stejných rozsahů hodnot barevných kanálů tak, aby si maximální a minimální hodnoty odpovídaly. Pro jednotnou normalizaci si musí odpovídat minima a maxima (přes všechny pixely na snímku) průměrů (přes všechny barevné kanály) hodnot barevných kanálů:

pokud ($Min_1 \neq Max_1$):

$$PictureNorm(x, y) = \frac{Max_2 - Min_2}{Max_1 - Min_1} \cdot (Picture(x, y) - Min_1) + Min_2$$

pokud ($Min_1 = Max_1$) \wedge ($Min_1 \neq 0$):

$$PictureNorm(x, y) = \frac{Min_2 + Max_2}{2 \cdot Min_1} \cdot Picture(x, y)$$

pokud ($Min_1 = Max_1 = 0$):

$$PictureNorm(x, y) := 0$$

kde:

$$Min_1 = \min_x \min_y \left(\frac{1}{|C|} \cdot \sum_{c \in C} Picture(x, y)_c \right)$$

$$Max_1 = \max_x \max_y \left(\frac{1}{|C|} \cdot \sum_{c \in C} Picture(x, y)_c \right)$$

Min_2 - nové minimum

Max_2 - nové maximum

C - množina zkoumaných barevných kanálů

Parametry $Picture$ a $PictureNorm$ vysvětleny v **Definice 3.1**.

Za nevýhodu min-max normalizace můžeme považovat to, že celý výpočet závisí pouze na dvou pixelech (pixely zachycující nejmenší a největší hodnotu barevných

kanálů). Tento problém lze řešit úpravou algoritmu, nám však postačuje metoda v této podobě.

3.1.2 Normalizace podle střední hodnoty a rozptylu

Cílem algoritmu je, aby každý snímek měl stejnou střední hodnotu a rozptyl. Normalizace sjednotí distribuční funkce (pokud se na hodnotu barevných kanálů díváme jako na náhodnou veličinu). Pro jednotnou normalizaci si musí odpovídat průměry (přes všechny barevné kanály) středních hodnot a rozptylů (přes všechny pixely na snímku) hodnot barevných kanálů:

Pokud ($Var_1 > 0$):

$$PictureNorm(x, y) = \sqrt{\frac{Var_2}{Var_1}} \cdot (Picture(x, y) - Avg_1) + Avg_2$$

Pokud ($Var_1 = 0$):

$$PictureNorm(x, y) = (Picture(x, y) - Avg_1) + Avg_2$$

kde:

$$Avg_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_x \sum_y Picture(x, y)_c$$

$$Avg_1 = \frac{1}{|C|} \cdot \sum_{c \in C} Avg_c$$

$$Var_1 = \frac{1}{N \cdot |C|} \cdot \sum_{c \in C} \sum_x \sum_y (Picture(x, y)_c - Avg_c)^2$$

Avg_2 – nová střední hodnota

Var_2 – nový rozptyl

N – počet pixelů

C – množina zkoumaných barevných kanálů

Parametry $Picture$ a $PictureNorm$ vysvětleny v **Definice 3.1**.

3.1.3 Multiplikatívni normalizace střední hodnoty

Multiplikatívni normalizace střední hodnoty transformuje vstupní snímky tak, že výsledné snímky mají stejnou střední hodnotu. Pro jednotnou normalizaci si musí odpovídat středních hodnoty (přes všechny pixely na snímku) průměrů (přes všechny barevné kanály) hodnot barevných kanálů:

Pokud ($Avg_1 \neq 0$):

$$PictureNorm(x, y) = \frac{Avg_2}{Avg_1} \cdot Picture(x, y)$$

Pokud ($Avg_1 = 0$):

$$PictureNorm(x, y) = Picture(x, y)$$

kde:

$$Avg_1 = \frac{1}{N \cdot |C|} \cdot \sum_x \sum_y \sum_{c \in C} Picture(x, y)_c$$

Avg_2 – nová střední hodnota

N – počet pixelů

C – množina zkoumaných barevných kanálů

Parametry *Picture* a *PictureNorm* vysvětleny v **Definice 3.1**.

Metoda předpokládá, že intenzita osvětlení dopadajícího na umělecké dílo ovlivňuje pořízený snímek pouze multiplikatívně (viz **Definice 3.3**). Proto je tato normalizace čistě multiplikatívního charakteru.

3.2 Potlačení nerovnoměrného osvětlení

Předpokládáme, že barva pigmentu je určena jeho spektrální odrazivostí $\mathcal{R}(\lambda)$, která je definována jako poměr intenzity záření $I_{\mathcal{R}}(\lambda)$ odraženého od povrchu objektu k intenzitě záření $I_0(\lambda)$ dopadajícího na objekt [9]. Z toho vyplývá, že intenzita záření zaznamenaná na pořízeném snímku je rovna intenzitě záření dopadajícího na umělecké dílo vynásobená odrazivostí uměleckého díla v daném bodě a daném směru (pozorovatele).

Výslednou hodnotu barevného kanálu modelujeme integrálem přes všechny vlnové délky součinu odrazivosti, intenzity záření a citlivosti zaznamenávajícího čipu:

Definice 3.2:

$$Channel(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} Sensibility(\lambda) \cdot Reflectance(x, y, \lambda) \cdot Intensity(x, y, \lambda) \cdot d\lambda$$

$Channel(x, y)$ – Hodnota barevného kanálu na souřadnicích $[x, y]$.

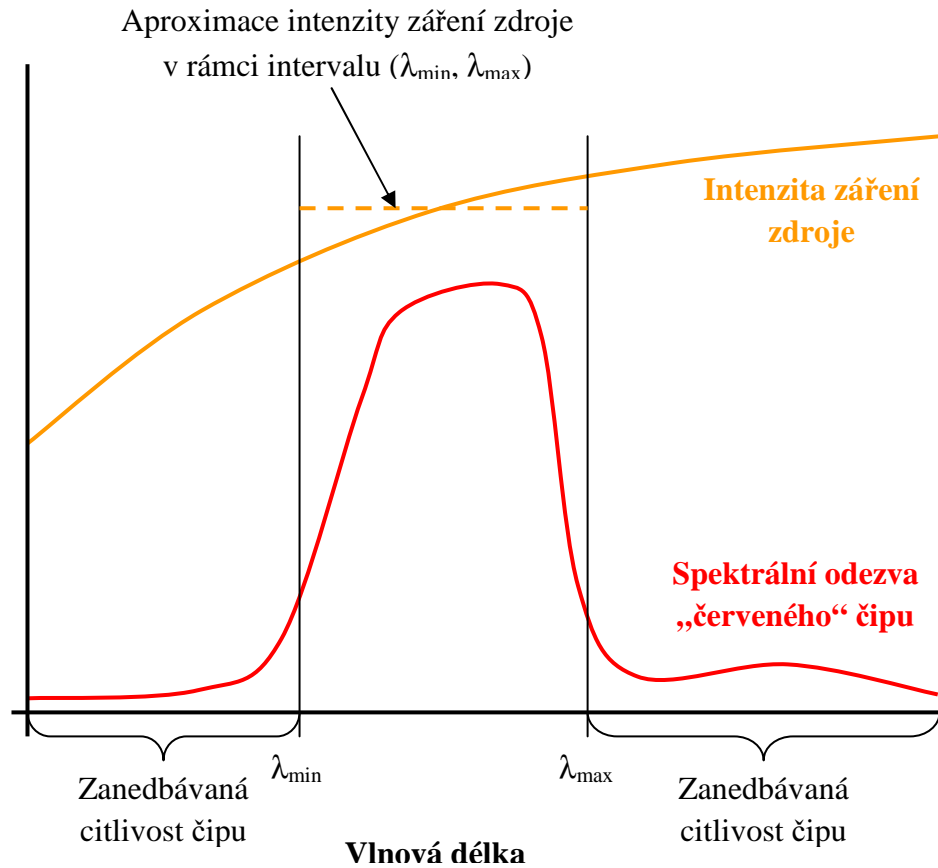
$Sensibility(\lambda)$ – Citlivost čipu na záření o vlnové délce λ .

$Reflectance(x, y, \lambda)$ – Odrazivost uměleckého díla na záření o vlnové délce λ na souřadnicích $[x, y]$.

$Intensity(x, y, \lambda)$ – Intenzita záření o vlnové délce λ dopadající na souřadnice $[x, y]$.

Čip zachycující přes námi používaný filtr (viz **Úvod**) červený barevný kanál má vysokou citlivost na záření o vlnových délkách v blízkosti červené vlnové délky (cca 570-720 nm). Pro ostatní vlnové délky má tak malou citlivost, že ji zde budeme zanedbávat. Budeme tedy uvažovat existenci λ_{\min} a λ_{\max} takových, že citlivost čipu na vlnovou délku mimo rozsah $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ je rovna nule. Dále se v našem případě omezíme na situaci, kdy je intenzita záření v rámci intervalu $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ konstantní vůči vlnové délce λ . Stejný předpoklad a omezení budeme uvažovat i u ostatních barevných kanálů. Ovšem každý barevný kanál c může mít různé hodnoty $\lambda_{c,\min}$, $\lambda_{c,\max}$. Hodnotu barevného kanálu c tedy můžeme aproximovat:

$$Channel(x, y)_c = Intensity(x, y, \lambda_{c,\min}) \cdot \int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot Reflectance(x, y, \lambda) \cdot d\lambda$$



Obr. 3.1: Znázornění zanedbávané citlivosti čipu mimo interval (λ_{\min} , λ_{\max}) a aproximace intenzity záření v rámci uvažovaného intervalu.

Vliv nerovnoměrného osvětlení na pořízený snímek modelujeme následovně:

Definice 3.3:

$$Picture(x, y) = Layer(x, y) \circ Intensity(x, y)$$

$Picture(x, y)$ – Vektor hodnot barevných kanálů pořízeného snímku na souřadnicích $[x, y]$, například (R, G, B) (viz **Definice 2.1**). Hodnota vektoru na c -té pozici je rovna hodnotě $Channel(x, y)_c$.

$Intensity(x, y)$ – Intenzita záření dopadajícího na souřadnice $[x, y]$ určená vektorem. Hodnota vektoru na c -té pozici je rovna hodnotě $Intensity(x, y, \lambda_{c,\min})$.

$Layer(x, y)$ – Vektor hodnot barevných kanálů na souřadnicích $[x, y]$ na snímku, který by byl pořízen za konstantního osvětlení (vůči souřadnicím $[x, y]$). Hodnota vektoru na c -té pozici je rovna:

$$\int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot Reflectance(x, y, \lambda) \cdot d\lambda$$

$Layer$ nazveme vzhledem uměleckého díla.

„ \circ “ – Násobení vektorů po složkách.

Definujeme charakter osvětlení jako multiplikatívni vliv.

U snímku zachycujícího fluorescenci je model složitější. K odraženému viditelnému světlu se navíc přičítává viditelné světlo vyzářené při absorpci ultrafialového záření důsledkem fluorescence. Přičemž intenzita vyzářeného viditelného světla závisí na excitačním spektru, intenzitě a vlnové délce ultrafialového záření. Excitační spektrum je definováno jako závislost intenzity fluorescence na vlnové délce při konstantní vlnové délce absorbovaného světla [10]. Výslednou hodnotu barevného kanálu u snímku zachycujícího fluorescenci modelujeme podle následujícího vzorce:

Definice 3.4:

$$Channel(x, y)_c = Intensity(x, y, \lambda_{c,\min}) \cdot \int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot Reflectance(x, y, \lambda) \cdot d\lambda + \\ + \int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot \int_{\lambda_{c,\min}}^{\infty} Intensity(x, y, \lambda_{UV}) \cdot ExSpec(x, y, \lambda_{UV}, \lambda) \cdot d\lambda_{UV} \cdot d\lambda$$

$ExSpec(x, y, \lambda_{Ab}, \lambda_{Ex})$ – Intenzita excitovaného záření vlnové délky λ_{Ex} při absorpci záření vlnové délky λ_{Ab} na souřadnicích $[x, y]$.

Pokud se omezíme na situaci, kdy je umělecké dílo osvětlováno ultrafialovým zářením o vlnových délkách v určitém intervalu ($\lambda_{UV,\min} - \lambda_{UV,\max}$) a v rámci tohoto intervalu je intenzita ultrafialového záření konstantní vůči vlnové délce, pak můžeme výslednou hodnotu barevného kanálu aproximovat:

$$Channel(x, y)_c = Intensity(x, y, \lambda_{c,\min}) \cdot \int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot Reflectance(x, y, \lambda) \cdot d\lambda + \\ + Intensity(x, y, \lambda_{UV,\min}) \cdot \int_{\lambda_{c,\min}}^{\lambda_{c,\max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot \int_{\lambda_{UV,\min}}^{\lambda_{UV,\max}} ExSpec(x, y, \lambda_{UV}, \lambda) \cdot d\lambda_{UV} \cdot d\lambda$$

Vliv nerovnoměrného osvětlení u fluorescenčních snímků pak modelujeme následovně:

Definice 3.5:

$$Picture(x, y) = Layer(x, y) \circ IntensityVIS(x, y) + IntensityUV(x, y) \cdot Fluoresc(x, y)$$

IntensityVIS(x, y) – Intenzita viditelného záření dopadajícího na souřadnice $[x, y]$ určená vektorem. Hodnota vektoru na c -té pozici je rovna hodnotě *Intensity*($x, y, \lambda_{c, \min}$).

IntensityUV(x, y) – Intenzita ultrafialového záření dopadajícího na souřadnice $[x, y]$ určená skalárem. Hodnota je rovna *Intensity*($x, y, \lambda_{UV, \min}$).

Fluoresc(x, y) – Vektor hodnot barevných kanálů na souřadnicích $[x, y]$ na snímku, který by byl pořízen za konstantního ultrafialového záření (vůči souřadnicím $[x, y]$) s nulovým viditelným zářením. Hodnota vektoru na c -té pozici je rovna:

$$\int_{\lambda_{c, \min}}^{\lambda_{c, \max}} Sensibility(\lambda)_c \cdot \int_{\lambda_{UV, \min}}^{\lambda_{UV, \max}} ExSpec(x, y, \lambda_{UV}, \lambda) \cdot d\lambda_{UV} \cdot d\lambda$$

Fluoresc nazveme vlastností fluorescence.

Layer(x, y) – viz **Definice 3.3**

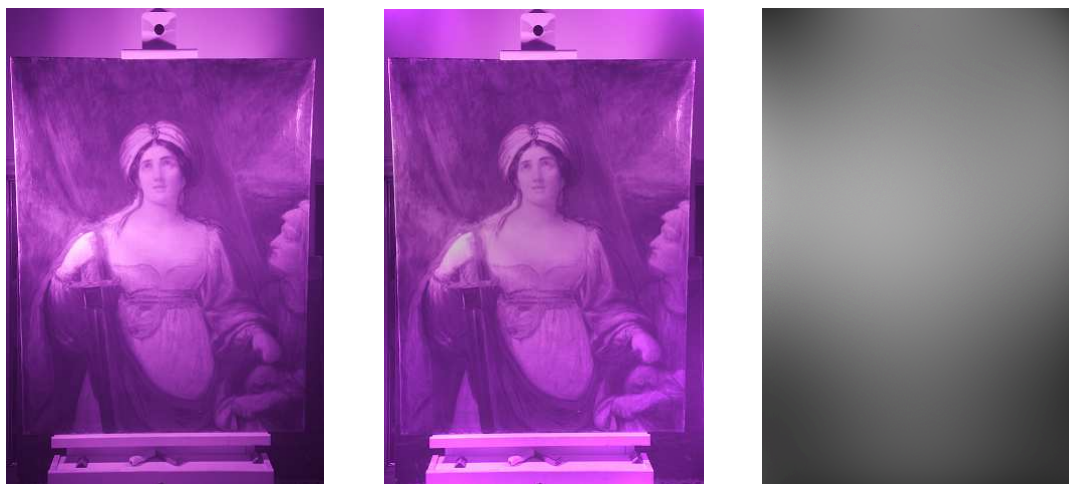
„ \circ “ – Násobení vektorů po složkách.

Odstranění nerovnoměrného osvětlení je v tomto modelu obtížné. Existuje zde vysoký počet stupňů volnosti a neznáme žádný algoritmus na věrohodný odhad obou intenzit záření. Na základě této skutečnosti se dále nezabýváme odstraněním nerovnoměrného osvětlení u snímků zachycující fluorescenci.

U infračervených snímků je jev fluorescence zanedbatelný a proto se neuvažuje. Pro zjištění tohoto faktu byl proveden experiment. Umělecké dílo bylo osvětleno viditelným světlem a po dlouhou expoziční dobu se zaznamenávalo infračervené světlo vyzářené při absorpci viditelného světla důsledkem fluorescence. Zachycená fluorescence byla tak malá, že při běžné expoziční době (při které se pořizovaly

vstupní snímky) by byla pod 2 % intenzity infračerveného záření. U viditelných a ultrafialových snímků jev fluorescence zanedbáváme díky volbě osvětlení a filtru.

Cílem potlačení nerovnoměrného osvětlení je z pořízeného snímku *Picture* získat vzhled uměleckého díla *Layer*. Za tímto účelem zjišťujeme intenzitu záření dopadajícího na dílo *Intensity*. Vzhled uměleckého díla určujeme vydělením po složkách pořízeného snímku *Picture* zjištěnou intenzitou *Intensity*.



(A) Původní snímek

(B) Upravený snímek

(C) Intenzita záření

Obr. 3.2: Příklad odhadnuté intenzity záření (C) ze vstupního snímku (A) a následný výpočet vzhledu uměleckého díla (B)

Jedním z nejlepších způsobů, jak zjistit intenzitu záření, je vložit bílou desku do místa, kde je snímáné umělecké dílo a pořídit snímek se stejnými světelnými podmínkami jako při pořízení snímku zachycujícího umělecké dílo. Hlavní nevýhoda této metody spočívá v manipulaci s bílou deskou (díla mají rozdílnou velikost), ve zvolení materiálu bílé desky (drobné 3D nerovnosti) a následným nastavováním parametrů focení (clona, čas, zaostření atd.), které navyšují manuální práci a časovou náročnost.

3.2.1 Model intenzity záření dopadající na umělecké dílo

Pokud je umělecké dílo osvětleno více zdroji záření (což je typické u větších děl), pak lze výslednou intenzitu záření popsat jako součet intenzit záření jednotlivých zdrojů. Můžeme předpokládat, že umělecké dílo bylo osvětleno nekoherentními zdroji záření, proto interferenci světla zanedbáváme. Ačkoliv interference světla nastává i mezi nekoherentními zdroji, je v tomto případě interferenční jev tak rychlý, že jej nelze postřehnout běžným fotoaparátém [11]. Umělecké dílo bylo při pořízení

snímku osvětleno několika reflektory a okolním rozptýleným světlem. Předpokládáme, že nerovnoměrnost osvětlení rozptýleného světla byla tak malá, že ji lze zanedbat. Výsledná intenzita záření dopadajícího na určitou plochu se rovná součtu intenzit záření všech reflektorů dopadajících na tutéž plochu plus intenzita okolního rozptýleného záření.

Definice 3.6:

$$Intensity(x, y) = \sum_i^{Rf} ReflectorIntensity_i(x, y) + AmbientIntensity$$

$ReflectorIntensity_i(x, y)$ – intenzita záření i -tého reflektoru dopadajícího na souřadnice $[x, y]$ určené vektorem stejného typu jako u $Intensity(x, y)$.

$AmbientIntensity$ – Intenzita okolního rozptýleného záření určená vektorem stejného typu jako u $Intensity(x, y)$.

Rf – počet reflektorů

Dále předpokládáme, že reflektor je bodový zdroj záření, který vyzařuje v každém směru stejné záření (intenzity záření všech vlnových délek jsou stejné v každém směru). Potom intenzitu ozáření plochy v bodě B modelujeme (viz **Obr. 3.3**):

Definice 3.7:

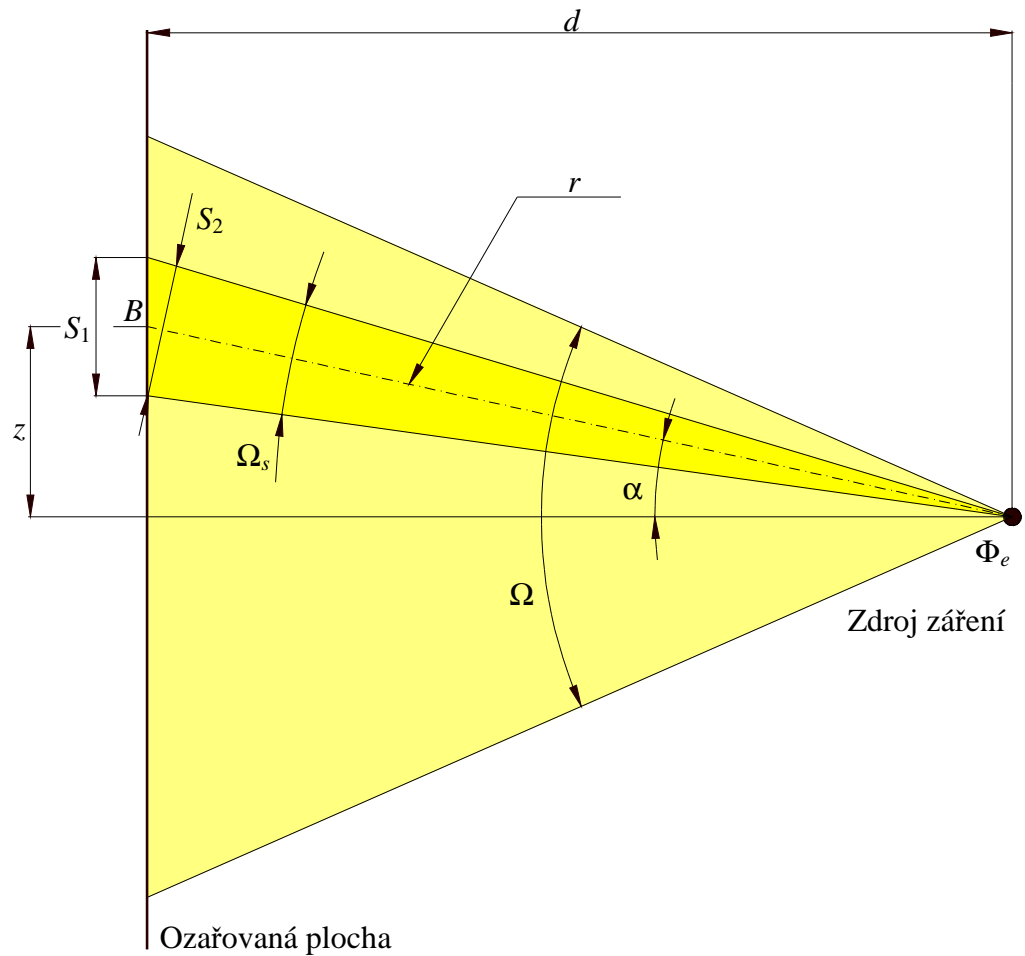
$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \cdot \frac{d}{(d^2 + z^2)^{3/2}}$$

Φ_e – zářivý tok zdroje

Ω – prostorový úhel, v kterém zdroj vyzařuje

d – vzdálenost plochy od zdroje záření

z – vzdálenost bodu B od průsečíku plochy s kolmicí spuštěné ze zdroje záření



Obr. 3.3: Výpočet intenzity záření v bodu B (popis parametrů viz **Definice 3.7**).

Předpoklad: Plocha S_1 je tak malá oproti vzdálenosti d , že nekulovitost plochy S_2 můžeme zanedbat.

Intenzita ozařování je definována jako zářivý tok dopadající na jednotku plochy [12]. Potom intenzita ozáření E_e plochy S_1 je rovna podílu zářivého toku Φ_{eS_1} dopadajícího na plochu S_1 a obsahu plochy S_1 .

$$E_e = \frac{\Phi_{eS_1}}{S_1} \quad (1)$$

Vzhledem k předpokladu, že zdroj vyzařuje v každém směru (v rámci úhlu Ω) stejnou intenzitu, pak poměr zářivého toku vyzařovaného v určitém úhlu a velikosti příslušného úhlu je vždy stejný. Z toho plyne, že zářivý tok Φ_{eS_1} dopadající na plochu S_1 je roven celkovému zářivému toku Φ_e vynásobenému poměrem prostorových úhlů Ω a Ω_s .

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S_1} \cdot \frac{\Omega_s}{\Omega} \quad (2)$$

Dle goniometrických funkcí platí:

$$\cos(\alpha) = \frac{d}{r} = \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

Podle vzorce na výpočet kulovité plochy platí:

$$S_2 = r^2 \cdot \Omega_s \quad (4)$$

Z předpokladu, že plocha S_1 je malá oproti vzdálenosti d , zde zanedbáváme nekulovitost plochy S_2 . Ze vzorců (3) a (4) tedy plyne:

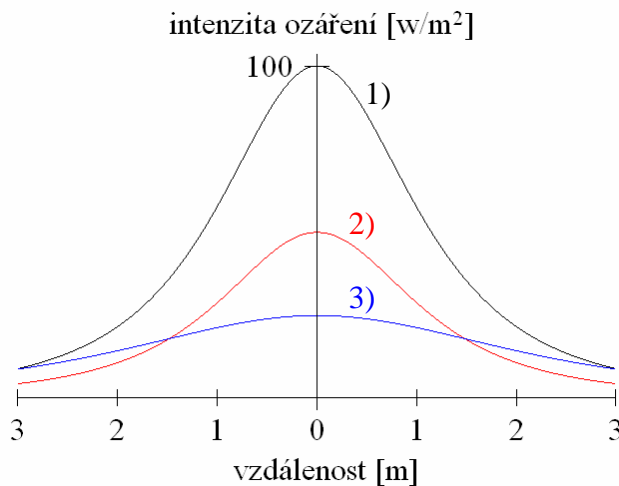
$$\Omega_s = S_1 \cdot \frac{d}{r^3} \quad (5)$$

Ze vzorců (2) a (5) dále plyne:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \cdot \frac{d}{r^3} \quad (6)$$

Rozepsáním poloměru r podle Pythagorovy věty dostáváme výsledný tvar vzorce:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \cdot \frac{d}{(d^2 + z^2)^{3/2}}$$



Hodnoty fyzikálních veličin:

1) $\Phi_e = 100 \text{ w}$, $\Omega = 1 \text{ sr}$, $d = 1 \text{ m}$

2) $\Phi_e = 50 \text{ w}$, $\Omega = 1 \text{ sr}$, $d = 1 \text{ m}$

3) $\Phi_e = 100 \text{ w}$, $\Omega = 1 \text{ sr}$, $d = 2 \text{ m}$

Obr. 3.4: Graf závislosti intenzity ozáření E_e na vzdálenosti z .

Vzorec můžeme dále zobecnit pro výpočet intenzity záření určité vlnové délky.
Pro vlnovou délku λ definujeme:

$$E_e(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Omega} \cdot \frac{d}{(d^2 + z^2)^{3/2}}$$

$\Phi_e(\lambda)$ – zářivý tok o vlnové délce λ

$E_e(\lambda)$ – intenzita ozáření o vlnové délce λ

Pokud průnik plochy s kolmicí spuštěné ze zdroje záření leží na souřadnicích $[k, l]$ a bod B leží na souřadnicích $[x, y]$, pak

$$z^2 = (x - k)^2 + (y - l)^2$$

Pro „téměř plochá“ umělecká díla (například obrazy, malby atd.) intenzitu záření i -tého reflektoru dopadající na dané dílo popsujeme vzorcem:

Definice 3.8:

$$\text{ReflectorIntensity}_i(x, y) = \text{IntCoef}(d_i, k_i, l_i, x, y) \cdot I_i$$

$\text{IntCoef}(d_i, k_i, l_i, x, y)$ – Koeficient zesílení intenzity záření dopadající v bodě $[x, y]$.
Zohledňuje vzdálenost osvětleného okolí bodu od zdroje a odchylku kolmice plochy od směru šíření světla:

$$\text{IntCoef}(d_i, k_i, l_i, x, y) = \frac{d_i}{(d_i^2 + (x - k_i)^2 + (y - l_i)^2)^{3/2}}$$

I_i – Intenzita záření i -tého reflektoru v prostorovém úhlu Ω určená vektorem intenzit záření zvolených vlnových délek (stejného typu jako u $\text{Intensity}(x, y)$):

$$I_i = (\Phi_{ei} / \Omega_i)$$

$[k_i, l_i]$ – souřadnice průniku osvětlované plochy s kolmicí spuštěnou z i -tého zdroje záření

d_i – vzdálenost i -tého zdroje záření od osvětlované plochy

Definice 3.9:

Výsledný tvar intenzity záření dopadajícího v bodě $[x, y]$ popisujeme:

$$Intensity(x, y) = \left(\sum_{i=1}^{Rf} IntCoef(d_i, k_i, l_i, x, y) \cdot I_i \right) + AmbientIntensity$$

Parametry vzorce vysvětleny v **Definice 3.6** a **Definice 3.8**.

3.2.2 Způsob určení parametrů pro výpočet intenzity záření

Pro výpočet výsledné intenzity podle modelu (viz **Definice 3.9**) musíme znát počet reflektorů, jejich rozmístění, zářivý výkon, úhel a intenzitu okolního rozptýleného osvětlení. Tyto parametry se dají zadat uživatelem nebo se mohou odhadnout na základě vstupního snímku.

- Zadání uživatelem

Způsob zadání parametrů uživatelem v sobě zahrnuje pro každé pořízení snímku nutnost vyměřit a zaznamenat všechny parametry zdrojů světla pro budoucí zpracování. Ačkoliv tento způsob je velmi přesný, je zřejmé, že je nevhodný z důvodů navýšení práce a časové náročnosti pořizování snímků.

- Odhadnutí na základě vstupního snímku

Parametry zde volíme tak, aby vypočtená intenzita záření podle zmíněného modelu na souřadnicích $[x, y]$ vyšla co nejbližší k hodnotě barevného kanálu pořízeného snímku na stejných souřadnicích. Předpokládáme, že světlé oblasti snímku jsou více nasvíceny než tmavší oblasti snímku. Bohužel ne vždy je tento předpoklad splněn a navržená metoda tak může nesprávně považovat světlejší oblasti uměleckého díla za více osvětlené. Další nevýhoda spočívá ve zvolení příliš velkého počtu zdrojů záření (reflektorů). Čím vyšší počet zdrojů je zadán, tím vyšší je počet stupňů volnosti pro výpočet intenzity záření. Výsledná intenzita pak napodobuje snímek více do detailu. Zatímco pozvolné gradienty jsou tvořeny z velké části osvětlením, detaily (ostré hrany) jsou tvořeny převážně odezvou uměleckého díla. Pro odstranění tohoto problému je vhodné shora omezit počet zdrojů.

3.2.3 Použití neuronových sítí pro výpočet intenzity záření

Model výpočtu intenzity záření (viz **Definice 3.9**) obsahuje velký počet parametrů, které mohou (ale často nejsou) být známé. Nyní navrheme postup pro odhad těchto parametrů. Cílem je na základě pořízeného snímku nalézt takové parametry zdrojů záření, které minimalizují chybovou funkci.

Definice 3.10:

$$Error = \sum_x \sum_y \left\| Picture(x, y) - \left(\sum_{i=1}^R (IntCoef(d_i, k_i, l_i, x, y) \cdot I_i) + AmbientIntensity \right) \right\|^2$$

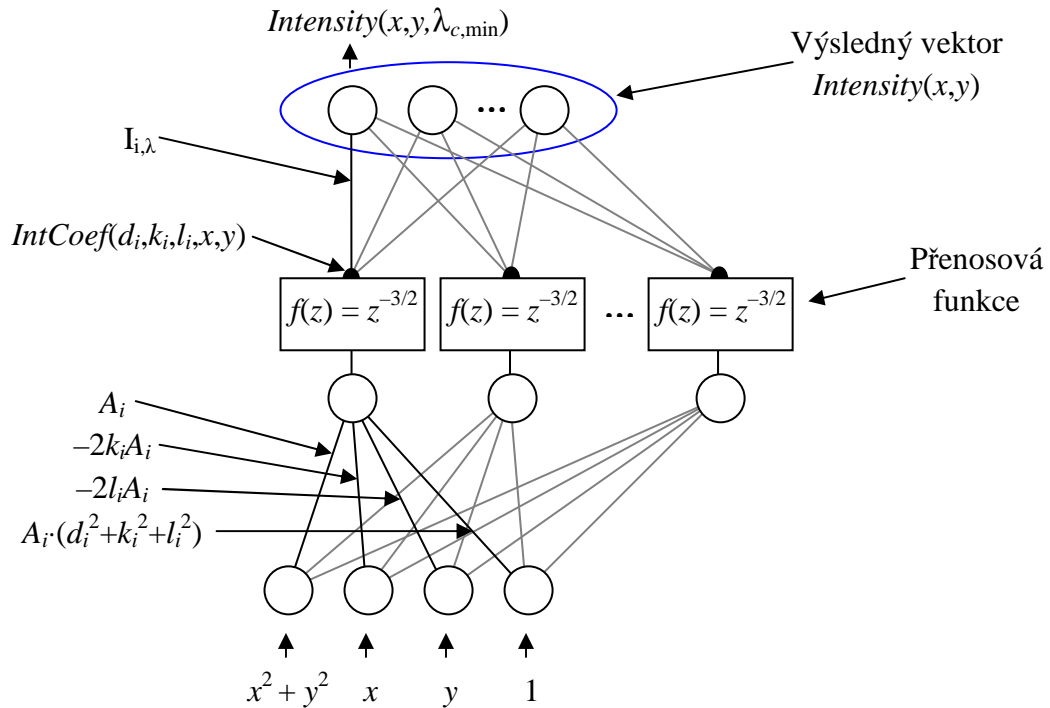
Error – Značí střední kvadratickou chybu výsledné intenzity od intenzity pořízeného snímku.

Parametry vzorce vysvětleny v **Definice 3.3**, **Definice 3.6** a **Definice 3.8**.

Protože neznáme rychlý algoritmus, který by dokázal tyto parametry vypočítat přímo z pořízeného snímku, řešíme tento problém pomocí metod umělé inteligence. Smíříme se se suboptimálním řešením v několika krocích. Z metod umělé inteligence jsme zvolili neuronovou síť [13], protože existuje vhodná architektura, která odpovídá výpočtu vzorce pro intenzitu záření (viz **Definice 3.9**).

Vstupem neuronové sítě jsou souřadnice $[x, y]$ a výstupem je vektor intenzit záření zvolených vlnových délek $Intensity(x, y, \lambda_{c, \min})$ (viz **Definice 3.3**) dopadajících na umělecké dílo v příslušných souřadnicích. Parametry zdrojů záření jsou určeny prostřednictvím vah synaptických spojů po naučení neuronové sítě. Neuronovou síť učíme ze vstupního snímku. Učícími vzory jsou souřadnice $[x, y]$ a naměřené intenzity záření v příslušných souřadnicích.

Architekturu jsme zvolili tak, aby výpočet neuronové sítě odpovídal výpočtu vzorce na určení intenzity záření (viz **Definice 3.9**).



Obr. 3.5: Architektura neuronové sítě

Funkci $IntCoef()$ ze vzorce pro výpočet intenzity záření (viz **Definice 3.9**) můžeme také zapsat způsobem:

$$IntCoef(d_i, k_i, l_i, x, y) = \frac{d_i}{(x^2 + y^2 - 2k_i x - 2l_i y + d_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^{3/2}}$$

Pokud označíme ($A_i = (d_i)^{-2/3}$), pak:

$$IntCoef(d_i, k_i, l_i, x, y) = \frac{1}{(A_i \cdot (x^2 + y^2 - 2k_i x - 2l_i y + d_i^2 + k_i^2 + l_i^2))^{3/2}}$$

Vstup neuronové sítě (souřadnice $[x, y]$) kódujeme do čtyř vstupních neuronů. Hodnoty vstupních neuronů pro souřadnice $[x, y]$ jsou:

$$(x^2 + y^2, x, y, 1).$$

Váhy spojů mezi vstupní vrstvou a i -tým neuronem první vrstvy jsou:

$$(A_i, -2A_i k_i, -2A_i l_i, A_i \cdot (d_i^2 + k_i^2 + l_i^2))$$

Přenosová funkce všech neuronů v první vrstvě je:

$$f(z) = z^{-3/2}$$

Prahy neuronů v první vrstvě jsou zde reprezentovány silou spoje mezi vstupním neuronem s hodnotou 1 a příslušným neuronem v první vrstvě. Dle vzorce pro výpočet hodnoty neuronu [13] vyplývá, že hodnota i -tého neuronu v první vrstvě je rovna funkční hodnotě $IntCoef(d_i, k_i, l_i, x, y)$. Počet neuronů v první vrstvě je roven počtu reflektorů osvětlujících umělecké dílo. Počet výstupních neuronů je roven počtu zvolených vlnových délek. Hodnota j -tého neuronu pak určuje intenzitu záření j -té vlnové délky. Síla spoje mezi i -tým neuronem první vrstvy a j -tým neuronem výstupní vrstvy je rovna hodnotě j -tého prvku vektoru I_i . Práh výstupních neuronů je roven intenzitě rozptýleného záření příslušných vlnových délek. Přenosová funkce výstupních neuronů je identita ($f(x) = x$). Výstup neuronové sítě pro souřadnice $[x, y]$ odpovídá funkční hodnotě $Intensity(x, y)$.

3.2.4 Nastavení vah neuronové sítě

Cílem nastavení vah neuronové sítě je pro všechny vstupy minimalizovat velikost chyby mezi očekávaným a skutečným výstupem. Protože pro každý vstup neuronové sítě je znám očekávaný výstup, nabízí se zde použít pro nastavení vah algoritmus zpětné propagace [13] [14]. Jako konkrétní variantu algoritmu zpětné propagace jsme zde zvolili variantu Super SAB [14] která urychluje proces učení.

Platnost neuronové sítě se vztahuje pouze ke snímku, na kterém byla naučena (nezáleží nám na generalizační schopnosti). Cílem učení v našem případě je minimalizace chybové funkce *Error* (viz **Definice 3.10**). Všechny pixely v celém snímku tvoří trénovací data.

3.3 Aproximace intenzity osvětlení ze snímku

Nevýhodou popisu intenzity záření (viz **Kapitola 3.2.1**) je omezení na scény osvětlené statickými bodovými zdroji záření. Snímky uměleckých děl bývají někdy pořizovány dlouhou expozicí (kvůli odstranění šumu) a osvětlovány pohyblivými světly (kvůli snaze dosáhnout rovnoměrnějšího osvětlení). Na snímky pořízené tímto způsobem navržený model nestačí. Stále budeme předpokládat, že osvětlení ovlivňuje snímek multiplikativně a funkce intenzity osvětlení je spojitá a pozvolně se měnící (její derivace má malé absolutní hodnoty).

Nerovnoměrné osvětlení budeme aproximovat pomocí:

- rozmazání
- polynomu
- metody TWMJ

3.3.1 Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním

Hlavní myšlenka této metody spočívá v předpokladu, že funkce osvětlení je spojitá a pozvolně se měnící. To znamená, že ostré hrany jsou vždy tvořeny vzhledem uměleckého díla, zatímco pozvolné gradienty můžou být tvořeny jak vzhledem díla, tak nerovnoměrným osvětlením. Cílem metody je rozmazáním obrazu odstranit ostré hrany a výsledek prohlásit za nerovnoměrné osvětlení. Pro rozmazání obrazu volíme průměrování okolí. Poloměr rozmazání volíme v řádech stovek pixelů.

Hlavní nevýhodou je, že kromě nerovnoměrného osvětlení odstraňuje i gradienty tvořené uměleckým dílem. Je vhodné stejnou operaci udělat na obou srovnávaných snímcích (přestože jeden z nich nemusí podléhat nerovnoměrnému osvětlení) pro odstranění stejných gradientů na obou snímcích. Pro hledání podkladových kreseb (které tvoří ostré hrany) tato nevýhoda nemá vliv. Mezi velké výhody patří rychlost výpočtu.

3.3.2 Aproximace intenzity osvětlení polynomem

Modeluje intenzitu osvětlení jako polynom dvou proměnných N-tého řádu. Výhoda oproti předchozí metodě je, že takto modelovaná funkce je „hladší“ (její derivace má menší absolutní hodnoty) a tudíž neodstraňuje gradienty tvořené vzhledem uměleckého díla v takové míře jako předchozí metoda.

$$Intensity(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i-j,j} \cdot x^{i-j} \cdot y^j$$

Argumenty $a_{i,j}$ se zjišťují metodou minimálních čtverců [6] tak, aby výsledný polynom byl co nejpodobnější vstupnímu snímku.

3.3.3 Aproximace intenzity osvětlení metodou TWMJ

Název metody TWMJ je zde zvolen podle jejích autorů (Tasdizen, Whitaker, Marc a Jones). Modeluje intenzitu osvětlení polynomem dvou proměnných N-tého řádu jako předchozí metoda. Předpokládá, že funkce intenzity záření neobsahuje strmé hrany. Složení gradientů snímku rozděluje do tří částí:

- Gradienty a hrany objektu
- Gradienty šumu
- Gradienty intenzity záření

Postup metody je složený ze dvou kroků:

- Odstranění šumu Gaussovým filtrem (viz **Kapitola 5.1**)
- Výpočet parametrů polynomu

V našem případě jsme pro výpočet intenzity osvětlení implementovali pouze druhý krok metody. První krok je implementován odděleně s ostatními algoritmy pro odstranění šumu.

Parametry polynomu $a_{i,j}$ se vypočítávají tak, aby si co nejvíce odpovídaly gradienty snímku s gradienty polynomu. Výpočet parametrů je tedy ovlivněn jak gradienty tvořenými intenzitou záření, tak gradienty tvořenými vzhledem uměleckého díla *Layer*. Na rozdíl od předchozích metod tato aproximace potlačuje vliv vzhledu uměleckého díla na výpočet intenzity osvětlení tím, že každý pixel je ve výpočtu vážený hodnotou „ w “ závislou na velikosti přechodu hrany.

Výpočet váhy „ w “:

$$w(x, y) = \exp\left(-\frac{\|Edge(x, y)\|}{u^2}\right)$$

kde:

$$\exp(x) = e^x$$

$Edge(x, y)$ – Hranová dekompozice snímku $Picture(x, y)$ provedená pomocí Robinsonova detektoru hran [8].

u – Parametr určující závislost velikosti váhy na velikosti přechodu hrany. Čím nižší je parametr u , tím více se budou zanedbávat pixely s velkým přechodem hrany.

Výpočet parametrů polynomu je zde proveden metodou nejmenších čtverců minimalizující chybu:

$$Error = \sum_x \sum_y w(x, y) \left(\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right)$$

$f(x, y)$ – Pořízený snímek $Picture(x, y)$.

$I(x, y)$ – Aproximovaná intenzita $Intensity(x, y)$.

$w(x, y)$ – Hodnota váhy pixelu na souřadnicích $[x, y]$.

Metoda TWMJ je více popsána v [15].

Kapitola 4

Potlačení sčítání fluorescence a odrazu bílého světla

Snímky s UV fluorescencí zachycují část viditelného světla odraženého od uměleckého díla z důvodu nedokonalého zatemnění. Světelné podmínky nejsou zcela kontrolovatelné. Vzhled uměleckého díla $Layer$ (viz **Definice 3.3**) ve viditelném spektru je znám z viditelného snímku, ale není známo s jakou intenzitou je tato informace přidána do snímku zachycujícího fluorescenci.

Vztah popisujeme následovně:

Definice 4.1:

$$PictureF(x, y) = a \cdot Layer(x, y) + IntensityUV(x, y) \cdot Fluoresc(x, y)$$

$$PictureVIS(x, y) = Layer(x, y) \circ IntensityVIS(x, y)$$

$PictureF(x, y)$ – Vektor hodnot červeného, zeleného a modrého barevného kanálu pořízeného snímku (zachycujícího fluorescenci) na souřadnicích $[x, y]$.

$PictureVIS(x, y)$ – Vektor hodnot červeného, zeleného a modrého barevného kanálu viditelného snímku na souřadnicích $[x, y]$.

$Layer(x, y)$ – Vzhled uměleckého díla (viz **Definice 3.3**).

$Fluoresc(x, y)$ – Vlastnost fluorescence uměleckého díla (viz **Definice 3.5**).

$IntensityVIS(x, y)$ a $IntensityUV(x, y)$ – Intenzita viditelného a ultrafialového záření (viz **Definice 3.5**).

a – Parametr určující s jakou intenzitou je odražené viditelné světlo přidáno k fluorescenci.

„ \circ “ – Násobení vektorů po složkách.

Cílem je ze snímku zachycujícího fluorescenci $PictureF$ odfiltrovat vzhled uměleckého díla $Layer$. Za tímto účelem nejprve z viditelného snímku $PictureVIS$ zjišťujeme potlačení nerovnoměrného osvětlení (viz **Kapitola 3.2**) vzhled uměleckého díla $Layer$. Následně ze snímku $PictureF$ a vypočteného vzhledu $Layer$

zjišťujeme parametr a . Odfiltrování pak provedeme klasickým odečtením po složkách a -násobku vzhledu uměleckého díla od snímku zachycujícího fluorescenci. Nakonec u výsledného snímku potlačíme nerovnoměrné osvětlení $IntensityUV$ (viz **Kapitola 3.2**).

Omezujeme se na situaci, kdy při pořizování snímku zachycujícího fluorescenci bílé světlo dopadá na umělecké dílo rovnoměrně (ultrafialové záření může dopadat nerovnoměrně).

Parametr a odhadujeme pomocí těchto metod:

- Odhadnutí z hranové dekompozice
- Lokální metoda nejmenších čtverců

4.1 Odhadnutí z hranové dekompozice

Parametr a je určen průměrem přes všechny pixely poměrů velikostí přechodů hran snímku zachycujícího fluorescenci a vzhledu uměleckého díla $Layer$.

Výpočet:

$$a = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_x \sum_y \left(\frac{dxEdgeF(x, y)}{dxEdgeVIS(x, y)} + \frac{dyEdgeF(x, y)}{dyEdgeVIS(x, y)} \right)$$

$dxEdgeF(x, y)$ – Horizontální hranová dekompozice $PictureF(x, y)$ provedená prostřednictvím masky $(-1, 1)^T$ reprezentovaná vektorem (R, G, B) (viz **Definice 2.1**).

$dyEdgeF(x, y)$ – Vertikální hranová dekompozice $PictureF(x, y)$ provedená prostřednictvím masky $(-1, 1)$ reprezentovaná vektorem (R, G, B)

$dxEdgeVIS(x, y)$ – Horizontální hranová dekompozice $Layer(x, y)$ provedená prostřednictvím masky $(-1, 1)^T$ reprezentovaná vektorem (R, G, B) .

$dyEdgeVIS(x, y)$ – Vertikální hranová dekompozice $Layer(x, y)$ provedená prostřednictvím masky $(-1, 1)$ reprezentovaná vektorem (R, G, B) .

N – počet pixelů

Dělení velikostí přechodů hran (vektorů) je prováděno po složkách.

Úspěšnost metody je ovlivněna počtem hran a gradientů obsažených ve vlastnosti fluorescence uměleckého díla *Fluorescence*. Čím méně hran a gradientů obsahuje vlastnost fluorescence, tím více je metoda úspěšnější.

Výhodou algoritmu je rychlost výpočtu ($O(N)$).

Nevýhodou je citlivost na šum. V místech bez hran jsou hrany tvořeny pouze šumem (náhodně). Tuto nevýhodu lze potlačit nezahrnutím pixelů s malou hodnotou do výpočtu parametru.

Také existují oblasti, v kterých se hrana vyskytuje pouze na jednom snímku. Poměr hran v příslušných oblastech je buď příliš malý (skoro nulový) nebo příliš velký (jde k nekonečnu). Opět je vhodné tyto oblasti nezahrnovat do výpočtu parametru.

4.2 Lokální metoda nejmenších čtverců

Tato metoda pro okolí všech pixelů zjišťuje metodou nejmenších čtverců lineární vztah mezi snímkem zachycujícím fluorescenci a vzhledem uměleckého díla *Layer* (v rámci daného okolí). Neboli pro každé okolí U hledá parametry a_U a b_U tak, aby se v daném okolí minimalizovala chyba E_U :

$$E_U = \sum_{(x,y) \in U} \| \text{Picture}F(x,y) - a_U \cdot \text{Layer}(x,y) - b_U \|^2$$

Hledaný parametr a je určen průměrem hodnot a_U přes všechny okolí U :

$$a = \frac{1}{N} \cdot \sum_U a_U$$

N – počet pixelů

Velikost okolí volíme tak, aby fluorescence na U byla přibližně konstantní (cca desítky pixelů). Metodu lze rozšířit tak, že každé a_U přispěje do výpočtu parametru a vahou závislou na rozptylu hodnot fluorescence v rámci okolí U . Čím větší rozptyl, tím menší váhu by měl parametr a_U .



(A) snímek ve viditelném spektru



(B) snímek zachycující fluorescenci



(C) odhadnutí z hranové dekompozice



(D) lokální metoda nejmenších čtverců

Obr. 4.1: Zobrazení vstupních snímků (A), (B) a výsledných fluorescenčních snímků po odečtení a -násobku viditelné složky za použití metod *odhadnutí z hranové dekompozice* (C) a *lokální metody minimálních čtverců* (D).

Kapitola 5

Potlačení šumu

Tato kapitola popisuje různé metody pro odstranění šumu. Šum je nežádoucí dodatečná informace, která je přidána k původnímu snímku [16].

Použité metody:

- Gaussův filtr
- Průměrování
- Mediánový filtr
- Konzervativní vyhlazení
- Průměrování s mezí

Tyto metody pro účely práce plně postačují, proto jsme se složitějšími metodami více nezabývali.

5.1 Gaussův filtr

Gaussův filtr je nejběžnějším konvolučním filtrem [16] s maskou určenou prostřednictvím Gaussovy funkce. To znamená, že výsledná hodnota na souřadnicích $[x, y]$ je určena váženým průměrem hodnot z okolí (v této práci používáme čtvercové okolí). Váha hodnoty je rovna funkční hodnotě Gaussovy funkce. Metoda dobře potlačuje Gaussův šum, ale zároveň vede k rozmazání snímku a potlačení hran.

5.2 Průměrování

Metoda odstraňuje šum průměrováním hodnot s hodnotami okolních buněk. Průměrování je velmi podobné Gaussovu filtru. Stejně jako u Gaussova filtru průměrování dobře potlačuje Gaussův šum, rozmazává snímek a potlačuje hrany. Rychlost výpočtu můžeme optimalizovat tím, že k výpočtu průměru okolí příslušné buňky použijeme již spočítaný průměr okolí sousední buňky.

5.3 Mediánový filtr

Mediánový filtr je velmi podobný průměrování, místo průměru hodnot okolních buněk je hodnota určena mediánem hodnot okolních buněk. Metoda oproti průměrování zachovává hrany, bohužel však potlačuje tenké čáry.

5.4 Konzervativní vyhlazení

Konzervativní vyhlazení je metoda, která potlačuje hodnoty lišící se od hodnot okolních buněk. Pokud je hodnota buňky v rozsahu hodnot okolních buněk, pak se hodnota buňky nemění. Pokud je hodnota buňky menší než minimum rozsahu hodnot okolních buněk, pak je nahrazena tímto minimem. Ve zbylém případě je hodnota buňky nahrazena maximem hodnot okolních buněk. Metodu lze zobecnit tak, že hodnota buňky je upravena do rozsahu k -té nejmenší až k -té největší hodnoty okolních buněk (parametr k označujeme jako úroveň vyhlazení).

5.5 Průměrování s mezí

Tato metoda je velmi podobná klasickému průměrování. Jediný rozdíl spočívá v tom, že se neprůměrují všechny hodnoty z okolních buněk, ale pouze ty hodnoty, které se neliší od hodnoty centrální buňky více než o určitou mez. Hlavní výhodou metody oproti klasickému průměrování a mediánovému filtru je ta, že zachovává jak hrany, tak tenké čáry.

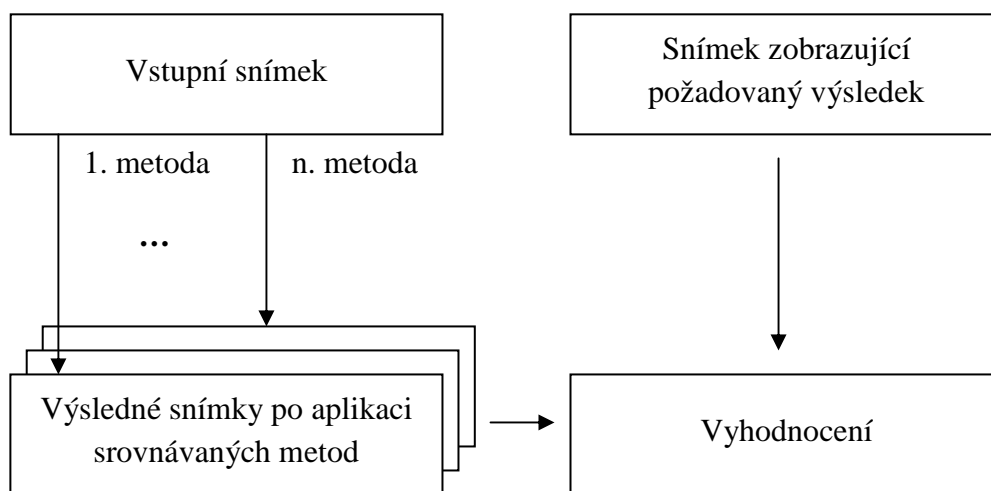
Kapitola 6

Experimenty

Všechny zmíněné algoritmy z předchozích kapitol jsme testovali. Výsledky a postup testování rozebereme níže.

6.1 Popis experimentů

Vstupem experimentů je *vstupní snímek*, *snímek zobrazující požadovaný výsledek* a sada porovnávaných metod. Experimenty jsou provedeny tak, že na *vstupní snímek* se postupně aplikují porovnávané metody a výsledné snímky jsou srovnávány se *snímek zobrazujícím požadovaný výsledek*. Výstupem experimentů jsou vyhodnocení provedená na základě předchozích srovnání.



Obr. 6.1: Průběh experimentu

Snímek zobrazující požadovaný výsledek je nutným vstupem experimentu. Ne vždy lze tento snímek získat, proto jsme ho často nahrazovali snímkem aproximujícím požadovaný výsledek, přičemž při aproximaci nebyla použita žádná z porovnávaných metod (aby se nejednalo o zatížený test).

Všechny snímky použité v experimentech mají 24 bitovou reprezentaci barvy. Hodnota každého barevného kanálu (červené, zelené a modré) je z rozsahu (0 – 255).

Provedené analýzy:

- Porovnání metod na odstranění šumu
- Porovnání metod odstraňujících nerovnoměrné osvětlení
- Výpočet koeficientů váženého průměru složek spektra
- Porovnání metod potlačujících vliv různého typu záření

Netestované metody:

- Potlačení sčítání fluorescence a odrazu bílého světla

Práce měla k dispozici pouze jeden fluorescenční snímek a navíc postrádala *snímek zobrazující požadovaný výsledek*. Z důvodu tohoto nedostatku dat jsme nebyli schopni srovnat navržené algoritmy. Výsledné snímky po aplikaci metod byly bez srovnání zobrazeny na konci příslušné kapitoly (viz **Kapitola 4**).

6.2 Porovnání metod na odstranění šumu

Protože jsme neměli zařízení schopné pořídit snímek dokonale bez šumu, museli jsme se spokojit se snímkem s co nejmenší hodnotou šumu. Šum v tomto případě jsme potlačili snímáním scény za dlouhé expozice s nízkou citlivostí ISO. *Vstupní snímek* byl pořízen s citlivostí 1600 ISO, zatímco *snímek zobrazující požadovaný výsledek* byl pořízen s citlivostí 100 ISO.

Oba snímky byly pořízené ve viditelném spektru za stejného osvětlení, proto zde zanedbáváme vlivy: různý typ záření, různé osvětlení, smíchání vrstev a sčítání stejného typu záření (viz **Kapitola 1**). Oba snímky ale mohou mít různou světlost z důvodu různého nastavení ISO a clony. Předpokládáme, že intenzita osvětlení dopadající na umělecké dílo ovlivňuje snímek pouze multiplikativně (viz **Definice 3.3**). Proto jsme pro sjednocení světlostí obou snímků zvolili metodu *multiplikativní normalizace střední hodnoty* (viz **Kapitola 3.1.3**).

Porovnání metod na odstranění šumu jsme rozdělili do tří experimentů:

- První experiment porovnával metody na pořízených snímcích po normalizaci (bez dalších úprav). Parametry *vstupního snímku*:

Rozptyl požadované informace: 799,66

Rozptyl šumu: 34,35

Rozptyl velikosti přechodu hran požadované informace: 18,02

- Druhý experiment porovnával metody na snímcích s vyšší ostroť. Vyšší ostroť byla dosažena zmenšením rozměrů snímku na polovinu. Tím se zvětšily gradienty na dvojnásobek (plyne z derivace spojité funkce $(f(2x))' = 2 \cdot f'(2x)$). *Snímek zobrazující požadovaný výsledek* byl v tomto případě získán zmenšením původního snímku na polovinu. *Vstupní snímek* byl vytvořen ze zmenšeného snímku *zobrazujícího požadovaný výsledek* přičtením výřezu původního šumu (nezmenšeného). Aditivní šum byl vypočten z rozdílu původních snímků. Parametry *vstupního snímku*:

Rozptyl požadované informace: 816,58

Rozptyl šumu: 38,02

Rozptyl velikosti přechodu hran požadované informace: 69,42

- Třetí experiment porovnával úspěšnost metod při větší intenzitě šumu. *Snímek zobrazující požadovaný výsledek* byl stejný jako v předchozím experimentu. Oproti tomu *vstupní snímek* obsahoval dvojnásobnou intenzitu šumu než v předchozím experimentu. Parametry *vstupního snímku*:

Rozptyl požadované informace: 799,66

Rozptyl šumu: 137,40

Rozptyl velikosti přechodu hran požadované informace: 18,02

Porovnávané metody:

- Gaussův filtr
- Průměrování
- Mediánový filtr
- Průměrování s mezí
- Konzervativní vyhlazení

6.2.1 Výsledky experimentů

Výsledky experimentů jsou zobrazeny v tabulkách udávajících úspěšnost porovnávaných metod. Úspěšnost metod je zde vyjádřena prostřednictvím střední kvadratické chyby hodnot pixelů *výsledného snímku* a *snímku zobrazující požadovaný výsledek*:

$$E(Result) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{(x,y)} \|Picture(x, y) - Result(x, y)\|^2$$

Picture(x, y) – hodnota pixelu *snímku zobrazujícího požadovaný výsledek* na souřadnicích $[x, y]$ určená vektorem (R, G, B) (viz **Definice 2.1**).

Result(x, y) – hodnota pixelu *výsledného snímku* na souřadnicích $[x, y]$ určená vektorem (R, G, B) .

N – počet pixelů

Chyby *výsledných snímků* jsou v tabulkách uváděny relativně v procentech vůči chybě *vstupního snímku*:

$$RelativeE(Result) = \frac{E(Result)}{E(Input)}$$

Result – výsledný snímek

Input – vstupní snímek

V tabulce jsou u každé metody tučně zvýrazněny výsledky s nejmenší relativní chybou. Červeně jsou označeny výsledky s větší chybou, než je chyba vstupního snímku.

Tabulka 6.1: Výsledky prvního experimentu porovnávaných metod (A) a (B). Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků k chybě vstupního snímku.

(A) chyba Gaussova filtru, průměrování a mediánového filtru

| velikost filtru | Gaussův filtr | | | | | | Průměr | Medián |
|-----------------|---------------|-------------|------|------|------|------|--------------|--------------|
| | rozptyl | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| 3x3 | 54,0 | 51,3 | 50,5 | 50,1 | 49,9 | 49,8 | 49,6 | 59,6 |
| 5x5 | 44,8 | 40,4 | 40,4 | 40,9 | 41,3 | 41,6 | 44,7 | 48,1 |
| 7x7 | 44,1 | 41,2 | 45,4 | 49,7 | 53,2 | 55,9 | 75,4 | 70,1 |
| 9x9 | 44,1 | 41,8 | 49,0 | 57,4 | 64,9 | 71,2 | 121,4 | 108,9 |

(B) chyba průměrování s mezí a konzervativního vyhlazení

| velikost filtru | Průměrování s mezí | | | | | Konzervativní vyhlazení | | | |
|-----------------|--------------------|------|------|------|--------------|-------------------------|------|------|-------------|
| | velikost meze | | | | | úroveň vyhlazení | | | |
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 3x3 | 93,5 | 75,7 | 54,3 | 50,1 | 49,7 | 95,8 | 88,3 | 77,4 | 59,6 |
| 5x5 | 90,0 | 70,5 | 49,0 | 44,7 | 44,5 | 97,0 | 92,6 | 88,5 | 83,6 |
| 7x7 | 88,9 | 69,8 | 56,1 | 62,6 | 70,0 | 97,9 | 95,0 | 92,3 | 89,2 |
| 9x9 | 88,9 | 70,9 | 65,2 | 85,0 | 104,1 | 98,6 | 96,6 | 94,7 | 92,6 |

Tabulka 6.2: Výsledky druhého experimentu porovnávaných metod (A) a (B). Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků k chybě vstupního snímku.

(A) chyba Gaussova filtru, průměrování a mediánového filtru

| velikost filtru | Gaussův filtr | | | | | | Průměr | Medián |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | rozptyl | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| 3x3 | 85,6 | 89,6 | 91,1 | 91,9 | 92,3 | 92,6 | 95,2 | 96,8 |
| 5x5 | 97,0 | 124,2 | 138,4 | 146,5 | 151,8 | 155,4 | 175,9 | 163,3 |
| 7x7 | 98,3 | 138,7 | 167,3 | 186,1 | 198,9 | 208,1 | 262,2 | 241,6 |
| 9x9 | 98,3 | 141,5 | 177,1 | 203,5 | 223,1 | 237,9 | 332,7 | 305,4 |

(B) chyba průměrování s mezí a konzervativního vyhlazení

| velikost filtru | Průměrování s mezí | | | | | Konzervativní vyhlazení | | | |
|--------------------|--------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|------|-------------|------|
| | velikost meze | | | | | úroveň vyhlazení | | | |
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 3x3 | 99,7 | 94,4 | 89,9 | 92,4 | 94,3 | 95,5 | 90,1 | 87,1 | 96,8 |
| 5x5 | 96,7 | 88,3 | 94,8 | 123,8 | 150,3 | 96,7 | 93,1 | 90,1 | 87,8 |
| 7x7 | 95,2 | 85,5 | 98,2 | 146,9 | 197,0 | 97,8 | 95,1 | 92,9 | 90,9 |
| 9x9 | 94,7 | 84,7 | 101,1 | 162,2 | 228,6 | 98,4 | 96,6 | 94,9 | 93,4 |

Tabulka 6.3: Výsledky třetího experimentu porovnávaných metod (A) a (B). Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků k chybě vstupního snímku.

(A) chyba Gaussova filtru, průměrování a mediánového filtru

| velikost filtru | Gaussův filtr | | | | | | Průměr | Medián |
|--------------------|---------------|-------------|------|------|------|------|-------------|-------------|
| | rozptyl | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| 3x3 | 58,8 | 57,4 | 57,1 | 56,9 | 56,8 | 56,8 | 56,9 | 62,7 |
| 5x5 | 52,5 | 51,8 | 53,0 | 54,1 | 54,8 | 55,3 | 59,0 | 59,5 |
| 7x7 | 52,0 | 51,8 | 55,4 | 58,4 | 60,7 | 62,5 | 74,1 | 71,9 |
| 9x9 | 52,0 | 51,8 | 56,4 | 60,8 | 64,5 | 67,5 | 88,9 | 84,6 |

(B) chyba průměrování s mezí a konzervativního vyhlazení

| velikost filtru | Průměrování s mezí | | | | | Konzervativní vyhlazení | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|-------------|------|-------------------------|------|------|-------------|
| | velikost meze | | | | | úroveň vyhlazení | | | |
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 3x3 | 98,8 | 93,1 | 76,5 | 64,9 | 59,7 | 93,8 | 84,3 | 73,1 | 62,7 |
| 5x5 | 97,4 | 88,2 | 67,6 | 56,8 | 54,5 | 95,6 | 89,8 | 84,2 | 78,2 |
| 7x7 | 96,6 | 86,1 | 63,9 | 54,5 | 56,2 | 97,0 | 93,1 | 89,2 | 85,2 |
| 9x9 | 96,2 | 85,4 | 63,0 | 54,8 | 59,1 | 97,9 | 95,3 | 92,7 | 89,9 |

6.2.2 Vyhodnocení

Výsledky experimentů ukázaly velkou závislost úspěšnosti metod na intenzitě šumu a dané informace. Pokud snímek obsahoval strmé hrany a byl méně zašuměný, pak bylo odstranění šumu obtížnější než u silně zašuměných snímků s pozvolnými gradienty (vztaženo relativně vůči velikosti intenzity šumu). Obecně dobře dopadly metody *Gaussův filtr* a *průměrování s mezí*. Přičemž parametry obou metod závisely na charakteru šumu a požadované informaci. Ve více zašuměných snímcích s pozvolnými gradienty měly úspěch i metody *průměrování* a *mediánový filtr*. *Konzervativní vyhlazení* sice nemělo velkou úspěšnost, ale zato jeho použití nikdy nevedlo ke zhoršení chyby (u všech testovaných parametrů). Navíc jeho úspěšnost

byla velmi podobná ve všech třech experimentech. Proto je *konzervativní vyhlazení* vhodné použít na málo zašuměné snímky se strmými hranami, kde ostatní metody nedopadají dobře.

6.3 Porovnání metod odstraňujících nerovnoměrné osvětlení

Analýza porovnává několik metod na odstranění nerovnoměrného osvětlení. *Vstupní snímek* zobrazuje určitou scénu nerovnoměrně osvětlenou. *Snímkem zobrazujícím požadovaný výsledek* zachycuje stejnou scénu osvětlenou rovnoměrně.

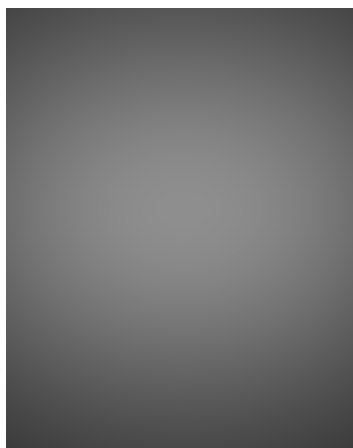
Za účelem dosažení co největší rovnoměrnosti jsme vybrali snímek pořízený uvnitř ateliéru. Nerovnoměrnost osvětlení u *vstupního snímku* byla docílena vynásobením pořízeného snímku maskou určující intenzitu záření v každém bodě. Šum jsme potlačili nízkou citlivostí ISO během pořizování snímku za dlouhé expozice. Oba snímky jsou ve viditelném spektru. Proto zde zanedbáváme následující vlivy: různý typ záření, smíchání vrstev a sčítání stejného typu záření (viz **Kapitola 1**).

Porovnání metod na odstranění nerovnoměrného osvětlení jsme rozdělili do tří experimentů:

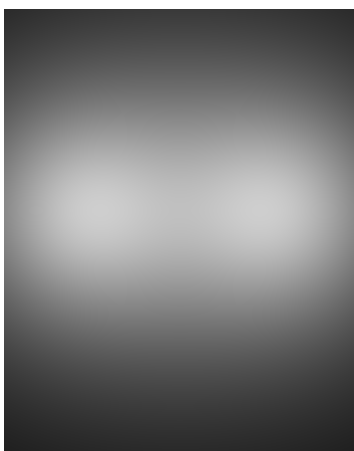
- První experiment srovnával metody na nerovnoměrném osvětlení způsobeném dvěma bodovými zdroji záření. Oba zdroje záření vyzařovaly stejnou intenzit červeného, zeleného a modrého světla.
- Druhý experiment porovnával úspěšnost metod na více nerovnoměrném osvětlení. Velikost nerovnoměrnosti určujeme velikostí rozptylu (přes všechny pixely) intenzit světla dopadajícího na snímek. Porovnání metod jsme opět provedli na nerovnoměrném osvětlení způsobeném dvěma zdroji záření. Oba zdroje záření byly o polovinu vzdálenosti blíže k obrazu.
- Třetí experiment porovnával metody na náhodném spojitým hladkém nerovnoměrném osvětlení. Cílem experimentu bylo popsat závislost úspěšnosti metod na odchýlení intenzity světla od předpokládaného modelu (viz **Definice 3.9**).



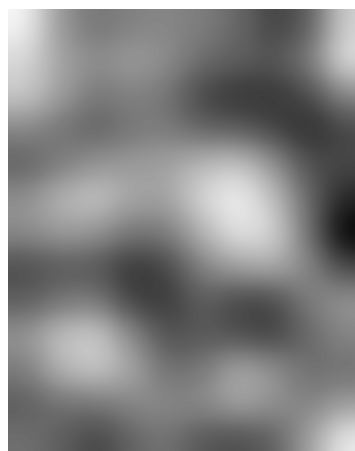
(A) původní obraz



(B) maska 1. experimentu



(C) maska 2. experimentu



(D) maska 3. experimentu

Obr. 6.2: Původní obraz a masky použité v jednotlivých experimentech

Porovnávané metody:

- Výpočet parametrů osvětlení pomocí neuronové sítě
- Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním
- Aproximace intenzity osvětlení polynomem
- Aproximace intenzity osvětlení metodou TWMJ

6.3.1 Výsledky experimentů

Výsledky experimentů jsou zobrazeny v tabulkách udávajících úspěšnost porovnávaných metod. Úspěšnost metod je zde vyjádřena stejným způsobem jako v předchozím experimentu (viz **Kapitola 6.2.1**).

Chyby výsledných snímků jsou v tabulkách uváděny v procentech relativně vůči chybě normalizovaného *vstupního snímku*. *Vstupní snímek* byl normalizován metodou *multiplikativní normalizace střední hodnoty* (viz **Kapitola 3.1.3**).

Výpočet chyby:

$$RelativeE(Result) = \frac{E(Result)}{E(Input)}$$

Result – výsledný snímek

Input – normalizovaný *vstupní snímek*

E – absolutní chyba snímku (viz **Kapitola 6.2.1**)

V tabulce jsou u každé metody tučně zvýrazněny výsledky s nejmenší relativní chybou. Červeně jsou označeny výsledky s chybou větší, než je chyba *vstupního snímku*.

Tabulka 6.4: Výsledky prvního experimentu jednotlivých metod (A), (B), (C) a (D). Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků k chybě vstupního snímku.

(A) chyba výpočtu parametrů osvětlení neuronovou sítí

| počet iterací | | Neuronové sítě | | | |
|---------------|---------|---------------------|----------------|--------------|--------|
| | | Počet zdrojů světla | | | |
| | | 1 | 2 | 4 | 8 |
| 100 000 | průměr | 92,64 | 111,31 | 37,45 | 36,76 |
| | rozptyl | 2,98 | 1605,21 | 23,77 | 4,62 |
| 200 000 | průměr | 95,81 | 91,97 | 37,18 | 40,52 |
| | rozptyl | 6,56 | 823,96 | 53,78 | 17,47 |
| 500 000 | průměr | 106,87 | 66,08 | 33,41 | 48,36 |
| | rozptyl | 12,14 | 513,76 | 45,46 | 113,50 |
| 1 000 000 | průměr | 118,37 | 61,66 | 32,82 | 38,19 |
| | rozptyl | 5,93 | 521,53 | 18,40 | 34,16 |
| 2 000 000 | průměr | 124,73 | 56,87 | 37,14 | 45,85 |
| | rozptyl | 2,25 | 414,99 | 47,74 | 97,18 |

(B) chyba aproximace parametrů osvětlení metodou TWMJ

| Parametr u | Aproximace TWMJ | | | |
|--------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| | řád polynomu | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 1 | 59,43 | 66,34 | 79,33 | 107,71 |
| 2 | 86,96 | 103,53 | 118,88 | 156,08 |
| 3 | 107,53 | 124,12 | 139,65 | 179,35 |
| 4 | 118,82 | 134,24 | 149,72 | 190,47 |

(C) chyba aproximace parametrů osvětlení polynomem

| Aproximace polynomem | |
|----------------------|---------------|
| řád polynomu | |
| 2 | 563,66 |
| 4 | 184,52 |
| 6 | 232,45 |
| 8 | 366,02 |

(D) chyba aproximace parametrů osvětlení rozmazáním

| Aproximace rozmazáním | |
|-----------------------|---------------|
| velikost filtru | |
| 50x50 | 349,31 |
| 100x100 | 245,95 |
| 200x200 | 115,03 |
| 500x500 | 59,55 |

Tabulka 6.5: Výsledky druhého experimentu jednotlivých metod (A), (B), (C) a (D).
 Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků
 k chybě vstupního snímku.

(A) chyba výpočtu parametrů osvětlení neuronovou sítí

| počet iterací | | Neuronové sítě | | | |
|---------------|---------|---------------------|--------|--------|--------------|
| | | Počet zdrojů světla | | | |
| | | 1 | 2 | 4 | 8 |
| 100 000 | průměr | 40,34 | 71,61 | 51,58 | 42,65 |
| | rozptyl | 0,05 | 591,76 | 118,90 | 19,53 |
| 200 000 | průměr | 43,56 | 65,78 | 42,46 | 39,87 |
| | rozptyl | 0,36 | 351,88 | 45,96 | 3,87 |
| 500 000 | průměr | 59,66 | 52,13 | 41,17 | 34,25 |
| | rozptyl | 0,16 | 236,14 | 38,64 | 4,04 |
| 1 000 000 | průměr | 61,31 | 44,25 | 32,71 | 25,98 |
| | rozptyl | 0,75 | 188,96 | 62,30 | 1,35 |
| 2 000 000 | průměr | 60,63 | 45,64 | 40,09 | 30,10 |
| | rozptyl | 0,52 | 293,63 | 232,58 | 57,61 |

(B) chyba aproximace parametrů osvětlení metodou TWMJ

| Parametr u | Aproximace TWMJ | | | |
|--------------|-----------------|-------|--------------|-------|
| | řád polynomu | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 1 | 52,20 | 19,27 | 18,85 | 24,74 |
| 2 | 92,66 | 26,52 | 26,02 | 35,48 |
| 3 | 109,68 | 32,18 | 31,32 | 41,93 |
| 4 | 117,01 | 35,60 | 34,35 | 45,51 |

(C) chyba aproximace parametrů osvětlení polynomem

| Aproximace polynomem | |
|----------------------|---------------|
| řád polynomu | |
| 2 | 374,95 |
| 4 | 50,94 |
| 6 | 85,34 |
| 8 | 131,33 |

(D) chyba aproximace parametrů osvětlení rozmazáním

| Aproximace rozmazáním | |
|-----------------------|--------------|
| velikost filtru | |
| 50x50 | 75,07 |
| 100x100 | 52,34 |
| 200x200 | 26,46 |
| 500x500 | 55,53 |

Tabulka 6.6: Výsledky třetího experimentu jednotlivých metod (A), (B), (C) a (D). Tabulky zobrazují v procentech poměr střední kvadratické chyby výsledných snímků k chybě vstupního snímku.

(A) chyba výpočtu parametrů osvětlení neuronovou sítí

| počet iterací | | Neuronové sítě | | | |
|---------------|---------|---------------------|---------------|--------|--------|
| | | Počet zdrojů světla | | | |
| | | 1 | 2 | 4 | 8 |
| 100 000 | průměr | 225,70 | 181,74 | 161,24 | 161,22 |
| | rozptyl | 36,44 | 382,70 | 242,89 | 110,60 |
| 200 000 | průměr | 199,54 | 164,58 | 160,75 | 166,88 |
| | rozptyl | 15,62 | 111,79 | 87,09 | 286,36 |
| 500 000 | průměr | 174,96 | 148,13 | 159,91 | 173,95 |
| | rozptyl | 10,53 | 119,67 | 241,22 | 97,12 |
| 1 000 000 | průměr | 166,66 | 146,62 | 150,56 | 158,17 |
| | rozptyl | 9,58 | 131,56 | 24,36 | 105,52 |
| 2 000 000 | průměr | 164,55 | 156,32 | 157,53 | 161,54 |
| | rozptyl | 4,99 | 168,20 | 159,55 | 154,66 |

(B) chyba aproximace parametrů osvětlení metodou TWMJ

| Parametr u | | Aproximace TWMJ | | | |
|--------------|--------|-----------------|--------|--------------|---|
| | | řád polynomu | | | |
| | | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 1 | 109,56 | 85,71 | 77,17 | 59,04 | |
| 2 | 119,53 | 102,90 | 96,10 | 96,37 | |
| 3 | 123,96 | 111,56 | 103,91 | 111,84 | |
| 4 | 125,98 | 115,57 | 107,35 | 118,79 | |

(C) chyba aproximace parametrů osvětlení polynomem

| Aproximace polynomem | |
|----------------------|---------------|
| řád polynomu | |
| 2 | 169,16 |
| 4 | 118,09 |
| 6 | 148,58 |
| 8 | 229,93 |

(D) chyba aproximace parametrů osvětlení rozmazáním

| Aproximace rozmazáním | |
|-----------------------|--------------|
| velikost filtru | |
| 50x50 | 133,28 |
| 100x100 | 102,53 |
| 200x200 | 85,31 |
| 500x500 | 102,26 |

6.3.2 Vyhodnocení

Výsledky experimentů ukázaly závislost úspěšnosti metod na charakteru osvětlení. Úspěšnost metod klesala se zvyšujícím se odchýlením intenzity světla od předpokládaného modelu (viz **Definice 3.9**) a se zmenšující se nerovnoměrností (rozptyl intenzity přes všechny pixely) osvětlení. Nejlépe si vedla *aproximace intenzity osvětlení metodou TWMJ*, která měla výborné výsledky ve všech experimentech. Ukázalo se, že metoda dosahovala lepších výsledků v případech, kdy byly hrany s vyšším přechodem více zanedbávané (hodnoty parametrů u byly nižší). *Výpočty parametrů osvětlení pomocí neuronové sítě* měly dobré výsledky v situacích podobných předpokládanému modelu osvětlení. V obecnějším měřítku ale nedosahovaly takové úspěšnosti, jako ostatní algoritmy. Z výsledků dále vyplynulo, že u neuronové sítě dochází ke stavu přeučení. Tento jev můžeme potlačit rozdělením dat na trénovací a validační. Stále dobře ještě dopadla *aproximace intenzity osvětlení rozmazáním*. Naopak jednoznačně nejhůř si vedla *aproximace intenzity osvětlení polynomem*, která měla často větší chybu než původní snímek.

6.4 Výpočet koeficientů metody váženého průměru složek spektra

Kapitola popisuje výpočet koeficientů potřebných pro *vážený průměr složek spektra* (viz **Kapitola 2.1.3**). Koeficienty lze vypočítat prostřednictvím lineární regrese buď z vytvořeného vzorníku barviv nebo z velkého počtu již analyzovaných uměleckých děl. Čím více uměleckých děl je použito k výpočtu, tím obecněji a věrohodněji koeficienty popisují závislost mezi viditelným a infračerveným spektrem.

Bohužel jsme neměli k dispozici ani vzorník barviv, ani dostatečný počet již analyzovaných snímků. Proto jsme výpočet provedli na snímcích zobrazující pouze čtyři umělecká díla (viz **Obr. 6.3**, **Obr. 6.4**, **Obr. 6.5** a **Obr. 6.6**). Věrohodnost parametrů je sice nízká, ale přesto tato metoda dosáhla dobrých výsledků v dalším experimentu (viz **Kapitola 6.5.1**).

Dle charakteru osvětlení každého snímku a výsledků z předchozího experimentu jsme pro každý snímek zvolili vhodnou metodu na odstranění nerovnoměrného osvětlení. Šum jsme opět potlačili nízkou citlivostí ISO během pořizování snímku za dlouhé expozice. Všechny snímky byly normalizovány *multiplikativní normalizací střední hodnoty*.

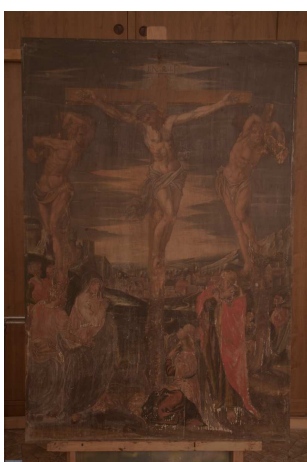


(A) viditelný snímek

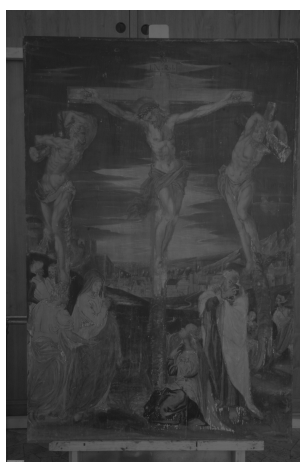


(B) infračervený snímek

Obr. 6.3: *Dáma s turbanem* ve viditelném (A) a infračerveném (B) spektru

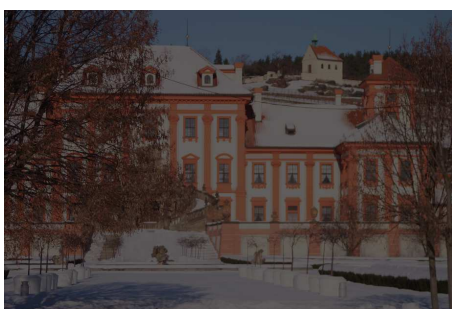


(A) viditelný snímek

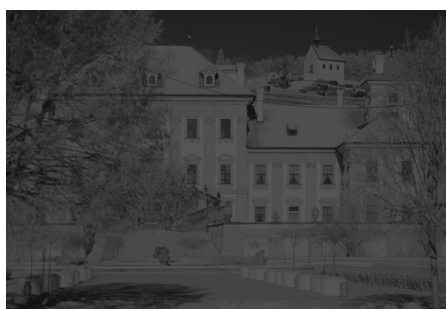


(B) infračervený snímek

Obr. 6.4: *Ukřižování* ve viditelném (A) a infračerveném (B) spektru

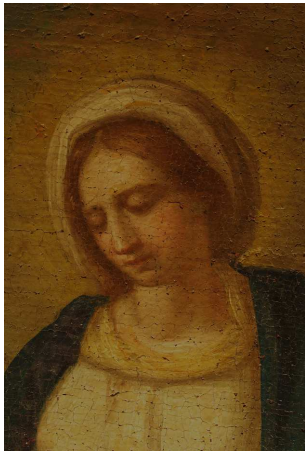


(A) viditelný snímek



(B) infračervený snímek

Obr. 6.5: *Trójský zámek* ve viditelném (A) a infračerveném (B) spektru



(A) viditelný snímek

(B) infračervený snímek

Obr. 6.6: *Madona* ve viditelném (A) a infračerveném (B) spektru

Tabulka 6.7 Koeficienty jednotlivých složek získané metodou nejmenších čtverců ze vstupních snímků.

| snímky | koeficienty jednotlivých složek | | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|--------------|
| | červená | zelená | modrá |
| Dáma s turbanem | 0,835 | -1,698 | 2,385 |
| Ukřižování | 0,933 | -0,450 | 0,141 |
| Trójský zámek | 1,110 | -0,220 | -0,081 |
| Madona | 0,658 | -0,224 | 0,432 |
| průměr | 0,884 | -0,648 | 0,719 |
| rozptyl | 0,027 | 0,376 | 0,958 |

Výsledný tvar metody *váženého průměru složek spektra* lze na základě této analýzy popsat:

$$IR = 0,884 \cdot R - 0,648 \cdot G + 0,719 \cdot B$$

Význam parametrů IR , R , G a B (viz **Definice 2.1**).

Velikost rozptylu jednotlivých koeficientů v tabulce poukazuje na nízkou věrohodnost výsledného tvaru metody. Experiment ukazuje, že bez hlubší znalosti použitých barviv a jejich vlastností nelze aproximační metody používat.

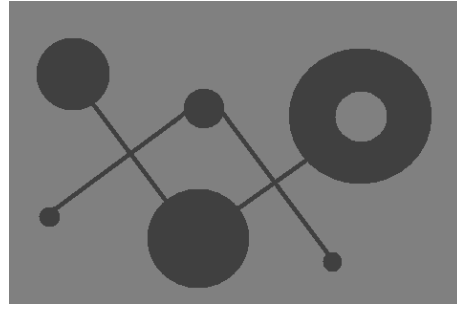
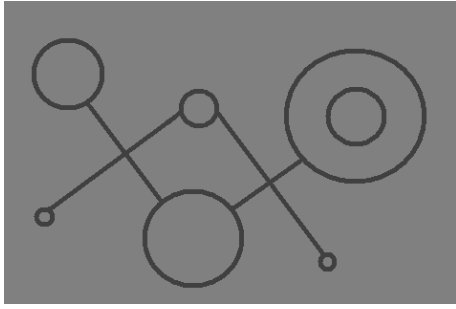
6.5 Porovnání metod potlačujících vliv různého typu záření

Cílem analýzy je porovnat několik metod na odstranění vlivu různého typu záření. *Vstupním snímkem* je určitá scéna zachycená ve viditelném spektru. *Snímkem zobrazující požadovaný výsledek* je stejná scéna zaznamenaná v infračerveném spektru. Oba snímky musí zobrazovat stejnou informaci. Buď zaznamenaná část uměleckého díla neobsahuje žádné přemalby a podkladové kresby, tudíž svrchní vrstva je totožná s hlubší vrstvou. Nebo svrchní vrstva musí být dostatečně nepropustná z důvodu popsaného ve *Smíchání vrstev* (viz **Kapitola 1.2**).

Za účelem dosažení co největší rovnoměrnosti jsme vybrali snímek pořízený uvnitř ateliéru. Šum jsme potlačili nízkou citlivostí ISO během pořizování snímku za dlouhé expozice. *Výsledné snímky a snímek zobrazující požadovaný výsledek* jsme normalizovali metodou *multiplikativní normalizací střední hodnoty*.

Porovnávání metod aproximující funkci *RGBtoIR* jsme rozdělili do tří experimentů:

- První experiment porovnával *obecné aproximace RGBtoIR* na zmíněných snímcích.
- Druhý experiment porovnává *konkrétní aproximace RGBtoIR*. *Vstupními snímky* byly viditelný snímek a infračervený snímek, do kterého byly uměle přidány podkladové kresby. *Snímkem zobrazujícími požadovaný výsledek* byl infračervený snímek (bez přidání podkladových kreseb). Cílem konkrétních aproximací je na základě nalezených závislostí mezi *vstupními snímky* převést viditelný *vstupní snímek* do infračerveného spektra tak, aby neobsahoval přidané podkladové kresby.
- Třetí experiment popisuje závislost úspěšnosti metod na velikosti plochy podkladových kreseb. Provedení experimentu bylo totožné jako u předchozího experimentu. Jediným rozdílem byla velikost plochy přidaných podkladových kreseb. V druhém experimentu tvořily podkladové kresby 6,27 % plochy celého snímku. V třetím experimentu plocha podkladových kreseb zabírala 21,39 % celkové plochy.



(A) podkladové kresby 2. experimentu

(B) podkladové kresby 3. experimentu

Obr. 6.7: Přidané podkladové kresby použité u druhého a třetího experimentu.

Porovnávané metody:

- Projekce červené složky
- Intenzita barvy
- Vážený průměr složek spektra
- PCA analýza
- Tabulkový přepočít (3-rozměrná tabulka o velikosti $256 \times 256 \times 256$)
- Lineární regrese

6.5.1 Výsledky experimentů

Výsledky experimentů jsou zobrazeny v tabulkách udávající úspěšnost porovnávaných metod. Úspěšnost metod je zde vyjádřena prostřednictvím tří hodnot. První hodnota udává chybu v oblastech, kde nebyly přidány podkladové kresby, druhá hodnota udává chybu v oblastech přidáných podkladových kreseb a třetí hodnota je určena celkovou chybou. Chyba je určena středním kvadratickým rozdílem výsledné a požadované hodnoty pixelu:

$$E_1(Result) = \frac{1}{|A|} \cdot \sum_{(x,y) \in A} \|Picture(x,y) - Result(x,y)\|^2$$

$$E_2(Result) = \frac{1}{|B|} \cdot \sum_{(x,y) \in B} \|Picture(x,y) - Result(x,y)\|^2$$

$$E_3(Result) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{(x,y)} \|Picture(x,y) - Result(x,y)\|^2$$

$Picture(x, y)$ – hodnota pixelu snímku zobrazujícího požadovaný výstup na souřadnicích $[x, y]$ určená vektorem (R, G, B) (viz **Definice 2.1**).

$Result(x, y)$ – hodnota pixelu výsledného snímku na souřadnicích $[x, y]$ určená vektorem (R, G, B) .

A – množina souřadnic (x, y) , kde infračervený snímek neobsahuje přidané podkladové kresby

B – množina souřadnic (x, y) , kde infračervený snímek obsahuje přidané podkladové kresby

N – počet pixelů

Oproti předchozím experimentům není chyba v tabulkách uvedena relativně. Všechny snímky jsme normalizovali *multiplikativní normalizací střední hodnoty*. U *obecných aproximací* se uvádí pouze chyba E_3 . Jelikož *obecné aproximace* jsou nezávislé na vstupním infračerveném snímku, proto poloha a množství podkladových kreseb nemá vliv na úspěšnost metod.

Tabulka 6.8 výsledky prvního experimentu

| porovnávané metody | chyba |
|---------------------------------|-------|
| Projekce červené složky spektra | 109,5 |
| Intenzita barvy | 186,8 |
| Vážený průměr složek spektra | 135,1 |
| PCA analýza | 407,6 |

Tabulka 6.9 výsledky druhého experimentu.

| porovnávané metody | chyba ve shodných oblastech | chyba v rozdílných oblastech | celková chyba |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| Lineární regrese | 88,10 | 76,85 | 87,4 |
| Tabulkový přepočít | | | |
| poloměr rozmazání 0 | 46,20 | 615,88 | 81,9 |
| poloměr rozmazání 5 | 74,56 | 73,32 | 74,5 |
| poloměr rozmazání 10 | 81,88 | 73,57 | 81,4 |
| poloměr rozmazání 20 | 95,19 | 79,08 | 94,2 |
| poloměr rozmazání 30 | 111,15 | 90,07 | 109,8 |
| poloměr rozmazání 40 | 133,76 | 108,93 | 132,2 |

Tabulka 6.10 výsledky třetího experimentu.

| porovnávané metody | chyba ve shodných oblastech | chyba v rozdílných oblastech | celková chyba |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| Lineární regrese | 115,99 | 85,11 | 109,4 |
| Tabulkový přepoččet | | | |
| poloměr rozmazání 0 | 114,22 | 719,33 | 243,6 |
| poloměr rozmazání 5 | 107,92 | 274,30 | 143,5 |
| poloměr rozmazání 10 | 108,10 | 214,12 | 130,8 |
| poloměr rozmazání 20 | 112,17 | 133,10 | 116,6 |
| poloměr rozmazání 30 | 128,17 | 105,48 | 123,3 |
| poloměr rozmazání 40 | 157,01 | 113,13 | 147,6 |

6.5.2 Vyhodnocení

Porovnávání konkrétních aproximací objevilo závislost velikosti chyby na velikosti plochy snímku, kde se svrchní vrstva liší od hlubší vrstvy. Čím je větší tato plocha, tím větší je chybovost metod. Mezi úspěšné metody se zařadily *lineární regrese*, *tabulkový přepoččet*, *projekce červené složky spektra* a *vážený průměr složek spektra*. Naopak špatně dopadla *PCA analýza*.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a implementovat algoritmy pro hledání odlišností mezi pořízenými snímky. V první kapitole jsme vymezili řešenou úlohu a na základě analýzy rozdělili úlohu do několika podúloh řešících potlačení vlivu jednotlivých negativních faktorů. V dalších kapitolách jsme formulovali několik obecných a vlastních metod pro potlačení vlivu definovaných negativních faktorů:

- Typ záření

Obecné metody: *Projekce červené složky spektra, Intenzita barvy, Vážený průměr složek spektra, Lineární regrese, PCA analýza, Hranová dekompozice;*

Vlastní metody: *Tabulkový přepočít;*

- Nerovnoměrné osvětlení

Obecné metody: *Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním, Aproximace intenzity osvětlení polynomem, Aproximace intenzity osvětlení metodou TWMMJ;*

Vlastní metody: *Výpočet parametrů osvětlení pomocí neuronové sítě;*

- Sčítání stejného typu záření

Vlastní metody: *Odhadnutí z hranové dekompozice a Lokální metoda nejmenších čtverců;*

- Šum

Obecné metody: *Gaussův filtr, Průměrování, Mediánový filtr, Konzervativní vyhlazení, Průměrování s mezí;*

U metody *Vážený průměr složek spektra* jsme navrhli způsob získání potřebných koeficientů, který jsme následně demonstrovali v experimentu na několika snímcích. Dále jsme vytvořili model výpočtu intenzity osvětlení plochy na základě rozmístění a dalších vlastností (světelného toku a prostorového úhlu vyzářování) zdrojů záření.

Všechny zmíněné metody jsme implementovali do programu a následně jsme provedli několik experimentů, ve kterých jsme implementované metody mezi sebou porovnali.

Výsledky práce jsou převážně teoretického charakteru. Zlepšení výsledků by mohlo přinést větší počet vzorových snímků, provedená analýza vzorových snímků odborníkem, vzorník barev, kvalitnější scanner atd.

Literatura

- [1] GRYGAR, Tomáš – BEZDIČKA, Petr – HRADIL, David, *Nové metody a témata v analýze malířských výtvarných děl: MODERNÍ MIKRO-ANALYTICKÉ METODY IDENTIFIKACE PIGMENTŮ*, Akademická laboratoř materiálového průzkumu malířských děl,
[online na http://www.techartis.cz/TA_2006/5_Grygar/5_Grygar.htm]
- [2] J. R. J. van Asperen de Boer, *Reflectography of Paintings Using an Infrared Vidicon Television System*, Studies in Conservation, 1969
- [3] CREAGH, D. C. – BRADLEY, D. A., *Radiation in art and archeometry*, Elsevier, 2000, ISBN 0444504877, 9780444504876
- [4] PLATANIOTIS, Konstantinos N. - VENETSANOPOULOS, Anastasios N., *Color Image Processing and Applications*, Springer, 2000, ISBN 3540669531, 9783540669531
- [5] AIKEN, Leona S. – WEST, Stephen G. – RENO, Raymond R., *Multiple regression: testing and interpreting interactions*, SAGE, 1991, ISBN 0761907122, 9780761907121
- [6] RAO, Calyampudi Radhakrishna – TOUTENBURG, Helge, *Linear models: least squares and alternatives*, Springer, 1999, ISBN 0387988483, 9780387988481
- [7] JOLLIFFE, I. T. , *Principal component analysis*, Springer, 2002, ISBN 0387954422, 9780387954424
- [8] UMBAUGH, Scott E., *Digital Imaging Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications With CVIPtools*, CRC Press, 2010, ISBN 143980205X, 9781439802052
- [9] NASSAU, Kurt, *The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color*, Wiley, 2001, ISBN 0471391069, 9780471391067
- [10] LAKOWICZ, Joseph R., *Principles of fluorescence spectroscopy*, Svazek 1 Springer, 2006, ISBN 0387312781, 9780387312781

- [11] BORN, Max – WOLF, Emil, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, CUP Archive, 2000, ISBN 0521784492, 9780521784498
- [12] WOAN, Graham, *The Cambridge Handbook of Physics Formulas*, Cambridge University Press, 2000, ISBN 0521575079, 9780521575072
- [13] ROJAS, R., *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer, 1996, ISBN 3-540-60505-3
- [14] BRASPENNING, Petrus J. – THUIJSMAN, F. – WEIJTERS, A. J. M. M., *Artificial neural networks: an introduction to ANN theory and practice*, Springer, 1995, ISBN 3540594884, 9783540594888
- [15] TASDIZEN, Tolga, et al. , *Automatic Correction of Non-uniform Illumination in Transmission Electron Microscopy Images*, [CD-ROM], Scientific Computing and Imaging Institute University of Utah, 2005
- [16] JAYARAMAN, *Digital Image Processing*, Tata McGraw-Hill Education, 2009, ISBN 0070144796, 9780070144798

Přílohy

A Postup hledání podkladových kreseb obrazu Ukřižování

Pro znázornění výsledku práce jsme provedli lokalizaci podkladových kreseb nad obrazem *Kristus*. Vstupem úlohy byl viditelný a infračervený snímek (viz **Obr. 1.1**). U obou snímků byl nejprve odstraněn šum zobecněnou metodou *Konzervativní vyhlazení* o průměru okolí tři pixelů s úrovní vyhlazení k rovnou dvěma. Následně jsme u obou snímků odstranily nerovnoměrné osvětlení pomocí *Aproximace intenzity osvětlení rozmazáním* o velikosti okolí 32 pixelů. Nová intenzita osvětlení (střední hodnota všech pixelů) byla nastavena na 128. Potom jsme oba snímky převedli do monochromu a následně od viditelného snímku odečetli infračervený snímek (nejedná se o absolutní rozdíl). Nakonec pro zvýraznění podkladových kreseb jsme snímek umocnily na druhou a opět provedli *konzervativní vyhlazení* se stejnými parametry jako na začátku.

B Obsah příloženého CD

K diplomové práci je přiložené CD, které obsahuje program s implementovanými metodami, zdrojový kód programu a samotný text této práce.

Příložené CD obsahuje čtyři adresáře:

- Diplomová práce

Adresář obsahuje text diplomové práce ve formátu PDF.

- Projekt

V tomto adresáři je uložený spustitelný program.

- Zdroj

Adresář obsahuje zdrojový kód programu. Zdrojový kód je psaný ve vývojovém prostředí Delphi 7 a je kompatibilní s operačním systémem Windows XP nebo novějším.

- Experimenty

V tomto adresáři jsou uloženy obrázky použité v experimentech.