

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Diplomová práce

Zaostřování digitálních fotografií

Plzeň, 2007

Jiří Jansa

ZADÁNÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 27. 8. 2007

Jiří Jansa

Title: Image sharpening and deblurring in digital photography

Author: Jiří Jansa, jurri@wo.cz

Department: Department of Computer Science and Engineering

Supervisor: Ing. Petr Lobaz, lobaz@kiv.zcu.cz

Abstract:

The work deals with application of image sharpening and deblurring methods in common digital photography. This paper mainly concerns image restoration techniques currently used in medicine and astronomy. Unlike sharpening filters these methods try to reconstruct the original undisturbed image. Suitable methods are implemented in application software. The work also describes a detailed parametric image degradation model. Considered degradation is digital camera out-of-focus lens blur and simple motion blur. The experiments show a comparison between results of image restoration techniques and results of commonly used image sharpening methods. Impact of using proposed blur model instead of a simple disk model is studied in these experiments.

Keywords: deblurring, deconvolution, image restoration, bokeh, PSF

OBSAH

1 Úvod	6
2 Teoretická část	7
2.1 Digitální fotografie	7
2.2 Zkreslení obrazu	9
2.3 Konvoluce	14
2.4 Doostřovací filtr	16
2.5 Metody restaurace obrazu	17
2.6 Problém restaurace barevného obrazu	24
2.7 Evoluční algoritmy	25
3 Realizační část	26
3.1 Parametrický model zkreslení obrazu	26
3.2 Aplikace metod restaurace obrazu	34
3.3 Genetický výběr parametrů zkreslení	43
3.4 Programová realizace	44
3.5 Diskuse výsledků	46
3.6 Ponaučení	50
4 Závěr	51
Přehled zkratk a značení	52
Literatura a zdroje informací	53
Přílohy	55
Obrazová příloha A	56
Obrazová příloha B	57
Obrazová příloha C	60
Konfigurace testovacího stroje	62
Uživatelský manuál	63
Obsah přiloženého CD	69

1 ÚVOD

Žádný pořízený snímek není dokonale ostrý. Mnohé fotografie postihuje závažná nedokonalost, například rozmazání pohybem či špatné zaostření objektivu. Takto pořízené snímky fotografové buď nemohou použít vůbec, nebo se snaží najít nějaký způsob, jak snímek vyostřit. Nejběžnějším způsobem je doostřovací filtr, který hrany objektů optickým klamem degraduje tak, aby se lidskému zraku jevily ostřejší. Zcela odlišným přístupem, využívaným převážně v lékařství nebo v astronomii, je restaurace obrazu – snaha o obnovení původního obrazu na základě apriorní znalosti jeho zkreslení.

Pro úspěch restaurace je nutno znát dostatečně dobře vlastnosti degradace obrazu. Běžně používaný model je uniformní kruhové rozostření. Cílem této práce je návrh detailního parametrického modelu zkreslení a ověření, zda může výrazně ovlivnit výsledek restaurace. Dalším cílem této práce je prozkoumat použití restauračních metod v běžné fotografii se zaměřením na estetické vlastnosti obrazu. Navržený model zkreslení a restaurační metody jsou programově realizovány. Pro usnadnění hledání optimální hodnoty parametrů je navržen jednoduchý evoluční algoritmus.

Teoretická část této práce je věnována popisu vzniku obrazu ve fotoaparátu {2.1}, druhům a vlastnostem zkreslení {2.2}, nastínění metod doostřování {2.4} a restaurace {2.5}, problematice barevných obrazů {2.6} a část kapitoly zmiňuje genetické algoritmy {2.7}. Realizační část v sobě zahrnuje návrh detailního parametrického modelu zkreslení {3.1}, aplikaci vybraných metod restaurace {3.2} a návrh jednoduchého interaktivního genetického algoritmu pro snadnější nalezení optimálních parametrů {3.3}. Dále popisuje programovou realizaci navržených postupů {3.4} a v odstavci {3.5} jsou diskutovány dosažené výsledky.

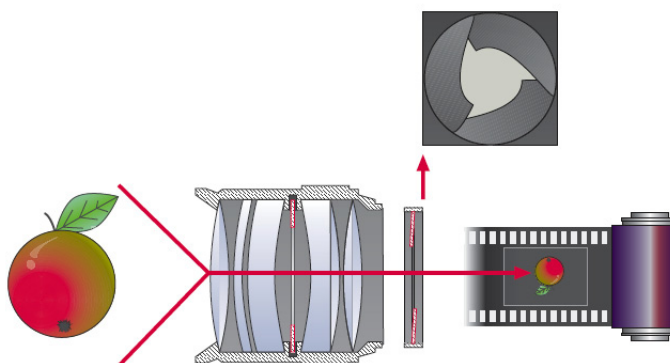
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 DIGITÁLNÍ FOTOGRAFIE

Jedním ze stále se rozmáhajících fenoménů dnešní doby je fotografie. S klesající cenou a rostoucí kvalitou běžných fotoaparátů roste množství poloamatérských a amatérských fotografů. Tyto přístroje i jejich uživatelé mívají nedostatky, které způsobují, že pořízené fotografie nejsou vždy správně zaostřené. Před popisem hlavního tématu práce – doostřováním fotografií – je nutné popsat vznik obrazu a jeho zkreslení.

V klasickém filmovém fotoaparátu se záznam fotografie utváří *expozicí* fotografické vrstvy filmu. Expozice je proces vystavení světlocitlivé vrstvy účinkům světelného záření po určitou dobu. Světlo se odráží od scény před aparátem. Před dopadem na film prochází *objektivem*. Soustava čoček v objektivu paprsky usměrní a zaostří do roviny filmu. Za objektivem nebo uvnitř něj se nachází *clona*, která zastavuje průchod veškerého světla mimo otvor v jejím středu. Poslední součástí důležitou pro vznik fotografie je *závěrka*, která zabraňuje osvětlení filmu mimo okamžik fotoografování. Celá soustava je ve zjednodušené podobě vyobrazena na obrázku 2.1.1.

V digitálních fotoaparátech vzniká světlo podobně, ale místo světlocitlivé vrstvy filmu je účinkům světla vystaven elektronický senzor, například CCD snímač. Ten je osazen miliony polovodičů. Každý z nich zaznamenává množství světla, které



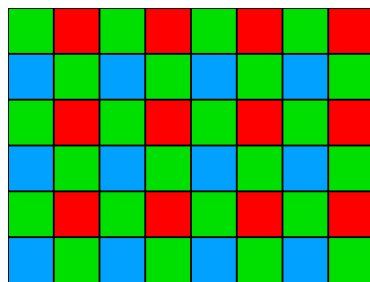
Obr. 2.1.1 – Soustava fotoaparátu. Zleva: snímáný objekt, čočky, clona, obraz v rovině filmu. Obrázek je převzat z příručky firmy Olympus [1].

na něj dopadá. Naměřené hodnoty digitální fotoaparát uloží v paměti jako soubor hodnot jasu obrazu. Výsledná digitální fotografie je diskrétní aproximací obrazu snímané scény. Lze ji popsat jako dvourozměrnou matici jasů, tzv. *pixelů*, o velikosti $M \times N$. Každá hodnota pixelu je funkcí množství světla, které dopadlo na plochu odpovídajícího polovodičového čipu.

Digitalizace se neprojevuje jen v rozdělení obrazu do diskrétních pixelů. Diskrétní jsou i samotné hodnoty pixelů, nejčastěji interpretované osmi nebo šestnácti bity. Naměřené množství světla je pak vyjádřeno omezeným souborem hodnot a dojde k zaokrouhlení a při přeexponování snímku i k ořezání hodnot.

Dosud bylo popisováno snímání obrazu černobílého. Barevné fotografie se pořizují v zásadě dvěma metodami. Zejména v poloprofesionálních a profesionálních televizních kamerách, u kterých nevádí větší velikost, hmotnost a cena přístroje, se využívá tzv. *tříčipového uspořádání*. Obraz u tohoto uspořádání prochází soustavou polopropustných zrcadel se zabarvenými filtry a pro každý barevný kanál (červený R, zelený G a modrý B) je v přístroji jiný snímač. Dostupnější variantou, kterou používají i digitální fotoaparáty, je tzv. *jednočipové snímání*. Snímač v přístroji má na jednotlivých pixelech naneseny barevné filtry. Ty jsou v Bayerově uspořádání, které ukazuje obrázek 2.1.2. Hodnoty se ze snímače načtou běžným způsobem a teprve pak jsou přepočítány na barevné hodnoty jasu jednotlivých pixelů. Barevný obraz může být popsán podobně jako černobílý, pro každý pixel bude více hodnot (jedna pro každý barevný kanál, v případě RGB tři).

V dnešní době je digitální obraz samozřejmostí. Filmové fotoaparáty z amatérského trhu téměř zmizely a používají je především jen profesionálové ve specializovaných oblastech. Tato práce se zabývá výhradně digitální fotografií, i když navrhované metody mohou být úspěšně použity i na digitalizované fotografie pořízené jinak.



Obr. 2.1.2 – Bayerův filtr pro RGB, uspořádání barevných složek na CCD čipu.

2.2 ZKRESLENÍ OBRAZU

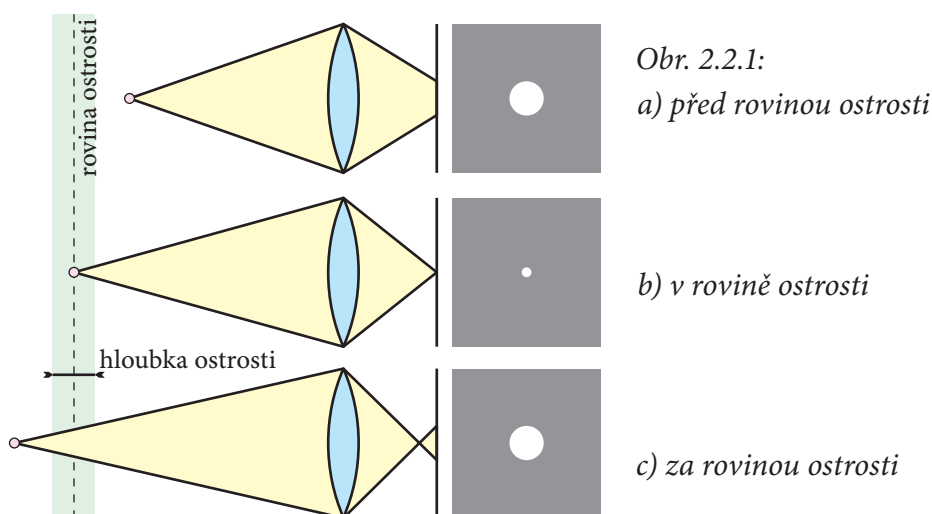
Jak již bylo naznačeno, pořizované fotografie nejsou dokonalé. Často trpí především *špatným zaostřením, pohybovým rozmazáním a šumem*. V následujících odstavcích jsou tyto tři typy degradace obrazu a příčiny jejich vzniku blíže popsány.

2.2.1 Objekt mimo rovinu ostrosti

K prvnímu typu zkreslení dochází, když je snímán objekt mimo *rovinu ostrosti*. Pro tento typ degradace se používá také anglický termín *out of focus*. Objekt je tedy zaostřen na určitou vzdálenost. Právě rovina kolmá na směr pohledu objektivu v této vzdálenosti se nazývá rovina ostrosti. Světlý bod v této rovině se po průchodu čočkou jeví jako ostrý bod v rovině snímače (obr. 2.2.1b). Objekt v rovině ostrosti je na fotografii zaostřený správně a hrany nejsou rozmazané.

Jiná situace nastane, je-li objekt mimo rovinu ostrosti (obr. 2.2.1a a 2.2.1c). Světlý bod se promítne jako neostrý kruh, tzv. *rozptylový kroužek (circle of confusion)*. Na fotografii je tímto kroužkem rozostřen celý snímáný objekt, podle vzdálenosti od roviny ostrosti. Je-li tato vzdálenost malá, rozostření se výrazně neprojeví. Čím je bod od roviny dále, tím větší je rozptylový kroužek. Rozsah vzdáleností rovin, mezi kterými je rozostření ještě přijatelné, se nazývá *hloubka ostrosti (depth of field)*.

Rozptylový kroužek je skutečně kruhového tvaru jen za určitých podmínek, pojem „kroužek“ pak může být poněkud zavádějící. Pro tvar rozostření je lepší používat

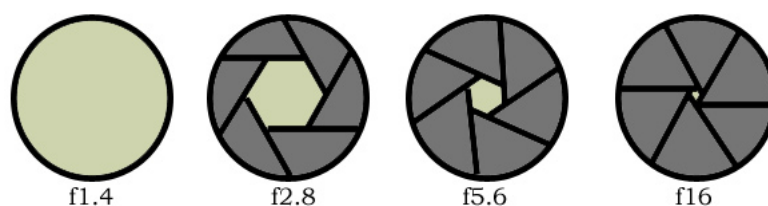


ustálený fotografický termín *bokeh* (mírně zkomolený japonský výraz *boke* «ぼけ» pro «být hloupý», «být mimo»). Někdy se tento termín užívá i ve smyslu celkového vizuálního vlivu rozostření na pozadí fotografie. Tvar je možné přímo pozorovat i v hotových fotografiích v rozostřených oblastech s ostře kontrastujícím bodem světla. Tento bod se pak promítne ve tvaru bokeh. V teoretických úvahách převládá označení *impulsní odezva filtru* (*impulse response*) nebo *bodová rozptylová funkce* (*Point spread function, PSF*). V této práci termín bokeh vyjadřuje speciální případ impulsní odezvy pro rozostření objektu mimo rovinu ostrosti.

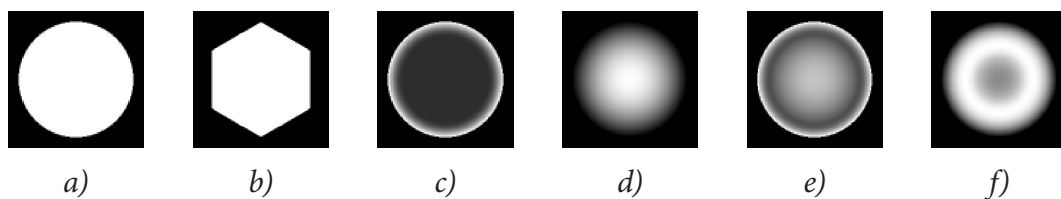
Tvar rozostření ovlivňuje pouze objektiv fotoaparátu. Kromě soustavy jeho čoček má vliv i tvar clony. V moderních fotoaparátech je clona vyrobena jako kroužek s lamelami po obvodu (obr. 2.2.2). Je-li clona plně otevřena, bude bokeh plně nebo téměř kruhový (obr. 2.2.3a), protože lamely vůbec nezasahují do průchodu světla. Při zúžené cloně se projeví tvar a počet lamel. Je-li otvor například šestiúhelníkový (obr. 2.2.3b), bokeh se projeví také jako šestiúhelník. Typické clony mívají pět, šest nebo sedm lamel. Někdy jsou lamely zakřiveny tak, aby se otvor ve cloně více blížil kruhu.

Soustava čoček ovlivňuje bokeh jiným způsobem. U většiny objektivů je tvar bokeh rovnoměrně vyplněný kruh, jde o tzv. *neutrální bokeh* (obr. 2.2.3a) s konstantním profilem, jen na okrajích se postupně snižuje. Zejména zrcadlové objektivy produkují tzv. *špatný bokeh* (obr. 2.2.3c), který může kvůli svým velmi ostrým okrajům v nezaostřených oblastech působit značně rušivě. Pro fotografie ideální, tzv. *dobrý bokeh* (obr. 2.2.3d), je tvar blíže odpovídající Gaussovu rozostření. Tento typ však dokáže produkovat jen málokterý objektiv. V praxi se lze běžně setkat s mezičlánkem uvedených tří typů.

Paprsky světla vstupující okolo středu čočky bývají zaostřeny v hustějším svazku než ty okrajové. Jev se nazývá *sférická aberace*. Komplexní soustavy čoček se ji snaží minimalizovat. Některé objektivy ale mají úmyslně slabou korekci sférické aberace, aby se bokeh na rozostřeném pozadí vylepšil. Toto opatření má i své stinné stránky,



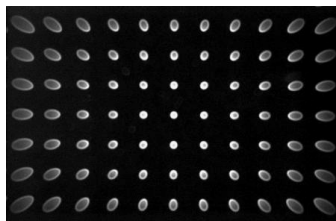
Obr. 2.2.2 – Clona s lamelami. Vlevo plně otevřená, vpravo zavřená.



Obr. 2.2.3 – Typy bokeh: a) neutrální; b) mnohoúhelníkový; c) špatný; d) dobrý; e) a f) s korekcí sférické aberace.

bokeh na rozostřeném popředí má opačný profil než na pozadí a je velmi rušivý. Soustava čoček s korekcí může dokonce produkovat bokeh podobný obrázku 2.2.3e, kde je světlo více soustředěno jak ve středu, tak na okraji, a na druhé straně roviny ostrosti má opačný profil (obr. 2.2.3f).

Rozostření není ve všech oblastech fotografie stejné. Vlivem zakřivení čočky jsou tvary rozostření na okraji obrazu mírně protažené (obr. 2.2.4). Tento jev se nazývá *astigmatismus*. Rovina ostrosti je totiž ve skutečnosti zakřivená plocha. U běžných fotoaparátů a u fotografií z větší vzdálenosti je však tento jev zanedbatelný a bokeh lze považovat za prostorově invariantní.



Obr. 2.2.4 – Astigmatismus (zde extrémní). Tvar bokeh není stejný v celém obraze.

Bokeh má tedy tvar stejný jako otvor clony a jeho velikost závisí na vzdálenosti bodu od roviny ostrosti. Rozlišujeme podle profilu tři typy bokeh – dobrý, neutrální a špatný. U některých rozostření je více světla soustředěno ve středu i na okrajích, u jiných tomu může být naopak. Bokeh rozostřeného pozadí má opačný profil než bokeh rozostřeného popředí.

2.2.2 Pohybové rozmazání

Degradace obrazu *pohybovým rozmazáním* (*motion blur*) se dle původce dělí na dva typy – pohyb objektivu vzhledem ke scéně a pohyb objektu uvnitř nehybné scény. V praxi se pak setkáváme s kombinací obou typů. Pro danou oblast obrazu, kde

se rozmazání projevuje, lze popsat oba typy stejným způsobem, neboť vzájemný pohyb objektu pozorovatele i pozorovaného je pouze jeden. Tvar rozmazání, v principu podobný bokeh, nemusí a často není stejný v celé snímané scéně. V případě, kdy se pohybuje pouze pozorovatel, kolmo ke směru pohledu a dostatečně daleko od pozorovaného statického objektu, lze říci, že rozostření bude prostorově málo proměnlivé. Tomuto speciálnímu případu je věnován následující popis.

Rozostření pohybem nezpůsobují čočky, závisí na délce závěrky a rychlosti pohybu. Jak bylo řečeno, v principu se bokeh podobá – lze jej taktéž popsat jako PSF.

Čím delší je závěrka a čím rychlejší je vzájemný pohyb, tím více se přesune obraz objektu na snímači fotoaparátu. V případě přímého pohybu s konstantní rychlostí se obraz přesune na snímači po úsečce a v každém okamžiku dopadne na aktuální bod dráhy dávka fotonů. Impulsní odezva má tedy tvar tenké linie ve směru pohybu a je po celé délce stejně jasná. Délka linie je dána vztahem:

$$l = vt, \tag{2.2.1}$$

kde t je čas otevřené závěrky a v relativní rychlost pozorovatele a objektu. Šířka linie odpovídá šířce ostrého bodu světla.

Kromě nastíněného úzce vymezeného rozmazání lze obecněji popsat rozmazání křivkou, která popisuje dráhu paprsku na snímači. Ani intenzita křivky obecně není konstantní. Citlivost senzoru není časově stálá, jak alternuje napájecí proud. Není-li pohyb konstantní, budou na křivce oblasti s větší koncentrací paprsků. Dokonce je rozmazání spojeno i s bokeh – právě proto, že obraz nikdy není zaostřen ideálně.

Většinou je příčina rozmazání právě v dlouhé závěrce. Nezkušený fotograf není schopen udržet fotoaparát bez třesu rukou déle než 1/30 s. Jiné rozmazání může způsobit fotoaparátu na stativu náhlý poryv větru. Levné stativy a fotoaparáty trpí i rozmazáním, které způsobilo jemné cvaknutí spouště. Z tohoto a jiných důvodů také platí, že nejlepší fotoaparáty mají velké rozměry i hmotnost, jsou stabilnější.

2.2.3 Šum

Kromě rozostření trpí pořízený obraz i vlivem šumu. Ve větší či menší míře je jím postižena každá fotografie. Šum vzniká především na snímacím čipu, ale může být způsoben například i uložením souboru s obrazem.

Protože čip je elektronická součástka, je zatížen *elektrickým šumem*. Je způsoben elektrony, které emituje zahřívající se hardware fotoaparátu. Při delších expozicích kontaminuje „skutečný“ signál větší množství elektronů. S vyšší citlivostí (ISO) senzoru a vyšším napájením se uvolňuje více elektronů. Naopak při velmi krátkých expozicích slabých zdrojů světla nedokáže malé množství fotonů statisticky vyvážit průměrnou hodnotu a vychyluje ji. Vzniká tím tzv. *výstřelový šum* (*shot noise*). To nicméně není případ běžné fotografie.

Délka expozice a citlivost čipu ovlivňuje míru šumu. K popisu jeho vlastností lze využít teorie náhodných čísel, kdy šum považujeme za náhodnou veličinu. Protože jde o součet mnoha „náhodně“ emitovaných fotonů a elektronů, modeluje tento šum náhodná veličina s *Poissonovým rozdělením*. Poissonovo rozdělení se pro velký počet čísel přibližuje *Gaussovu (normálnímu) rozdělení*, šum stačí modelovat jako náhodnou veličinu s normálním rozdělením s hustotou:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2.2)$$

kde μ je střední hodnota šumu a σ^2 rozptyl jeho rozdělení.

Šum vznikající na senzoru označíme jako *bílý aditivní Gaussův šum*. Bílý proto, že spektrum šumu je ploché a ovlivňuje tak všechna frekvenční pásma rovnoměrně. Aditivní proto, že je přičten k hodnotě pixelu. Tento typ lze navíc považovat za *nekorelovaný*, tedy nezávislý na měřeném obraze, protože vzniká samostatně v měřícím přístroji. Jde ovšem pouze o ideální případ.

Jiný typ šumu, který ovlivňuje digitální fotografii, je způsoben diskretizací hodnot obrazu – tzv. *kvantizační šum*. Hodnoty naměřené na snímači se uloží do souboru jako sada čísel (nejčastěji osmi až šestnáctibitových). Naměřené hodnoty jsou při ukládání zaokrouhleny – ztratí se část informace z obrazu. V konečném důsledku není možné mít dokonale přesný obraz, pokud počet fotonů v některém pixelu přesahuje rozlišení hodnot. Do určité míry je však tento šum zanedbatelný a s použitím přesnějšího vyjádření hodnot pixelu, například formátu RAW s až dvanáctibitovou přesností, jeho vliv rychle klesá.

Další typ degradace, který lze chápat i jako jistou formu šumu, vzniká při ztrátové kompresi obrazu. Chyby jsou dobře pozorovatelné například u vysoce komprimovaných obrázků JPEG. Naštěstí v dnešní době drtivá většina fotoaparátů umožňuje ukládat obraz bezztrátově.

Při velmi dlouhých expozicích se nejen u starších nebo nekvalitních fotoaparátů projevují i tzv. *vypálené pixely* (*hot pixels*). Takové pixely mají, zejména na nočních snímcích, nesmyslně vysokou hodnotu, protože někdy čip vykazuje náboj, i když na něj nedopadá světlo. Tento impulsní šum se projeví jako velmi řídké se objevující vysvícené pixely, vždy na stejných místech u různých fotografií ze stejného přístroje. Některé přístroje umí tento šum potlačovat úplným vynecháním příslušného pixelu (*pixel mapping*).

2.3 KONVOLUCE

V dalších částech práce bude využíván matematický popis rozostření *konvolucí*. Tento termín je zapotřebí nejprve vysvětlit. Teorie je částečně převzata z Bartschova sborníku matematických vzorců [2] a z publikace Jiřího Jana [3].

Konvoluce dvou spojitých jednorozměrných funkcí, značená symbolem \oplus , je matematický operátor:

$$f_1(t) \oplus f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau. \quad (2.3.1)$$

Operaci lze chápat jako *klouzavý průměr* (*moving average*) jedné funkce vážený druhou funkcí.

Konvoluce je *komutativní*:

$$f_1(t) \oplus f_2(t) = f_2(t) \oplus f_1(t) \quad (2.3.2)$$

a *asociativní*:

$$[f_1(t) \oplus f_2(t)] \oplus f_3(t) = f_1(t) \oplus [f_2(t) \oplus f_3(t)]. \quad (2.3.3)$$

Podstatnou vlastnost konvoluce vyjadřuje *věta o obrazu konvoluce*, někdy také nazývaná *konvoluční teorém*:

$$F_1(p) F_2(p) = L\{f_1(t)\} L\{f_2(t)\} = L\{f_1(t) \oplus f_2(t)\}, \quad (2.3.4)$$

kteřá praví, že konvoluce v originální oblasti je rovna násobení v oblasti Laplaceovy transformace.

Uvažujeme-li Fourierovu transformaci, je konvoluce dvou spojitých signálů rovna násobení ve frekvenční oblasti. Frekvenční oblast má cirkulační vlastnosti, funkce

se po obou stranách periodicky opakují. Vlastnost lze utlumit rozšířením okrajů funkcí, například nulovými hodnotami.

Obdobně lze popsat *diskrétní konvoluci*, která je k popisu rozostření digitální fotografie vhodnější. Vztah (2.3.1) v diskrétní verzi:

$$f(m) \oplus g(m) = \sum_n f(n) g(m - n). \quad (2.3.5)$$

Opět platí komutativnost i asociativita a věta o obrazu konvoluce.

Diskrétní konvoluci lze vyjádřit i vektorově:

$$\mathbf{f} \oplus \mathbf{g} = \mathbf{G}\mathbf{f}, \quad (2.3.6)$$

kde \mathbf{f} a \mathbf{g} jsou sloupcové vektory hodnot diskrétních funkcí a \mathbf{G} je matice vytvořená z \mathbf{g} tak, aby součin matice a vektoru měl za výsledek konvoluci z (2.3.5). Matice \mathbf{G} je v Toeplitzově formě (každý řádek matice je posunutý a převrácený vektor \mathbf{g}). První řádek skalárním součinem s \mathbf{f} má za výsledek hodnotu konvoluce v prvním bodě, další, posunutý o jednu pozici, v druhém bodě atd.

Teorii lze upravit i pro dvourozměrné obrazy a jejich zkreslení. Zkreslení pak bude představováno impulsní odezvou, vektorem \mathbf{h} , původní obraz vektorem \mathbf{x} a zkreslený obraz vektorem \mathbf{y} . Podoba vztahu (2.3.6) se nezmění, ale je zapotřebí každou matici obrazu roztáhnout do příslušného sloupcového vektoru. V matici \mathbf{G} budou mít Toeplitzovu formu její bloky. Vznikne z impulsní odezvy \mathbf{h} převrácené podél obou os, tedy natočené o 180 stupňů. Ve stejném smyslu lze konvoluci zobecnit pro libovolné množství rozměrů.

Chceme-li provést konvoluci ve frekvenční oblasti, stačí v souladu s konvolučním teorémem použít dvourozměrnou *diskrétní fourierovu transformaci* (DFT) originálu a otočeného PSF, určit jejich Hadamardův součin (po složkách) a výsledek zpětně transformovat do originální oblasti.

Výpočetní náročnost dvourozměrné konvoluce v prostorové oblasti, daná počtem P prvků filtru a N pixelů obrazu, je $\mathcal{O}(PN)$. Ve frekvenční oblasti je dána složitostí algoritmu DFT – $\mathcal{O}(N \log N)$.

2.4 DOOSTŘOVACÍ FILTR

Běžnou praxí v úpravě digitálních fotografií je použití *doostřovacího filtru* (*unsharp mask*), který nedávno rozkoumal a jako zásuvný modul pro Adobe® Photoshop® [4] implementoval Milan Pixa ve své bakalářské práci [5]. Jak se zmiňuje, filtr není schopen vnést do obrazu nové detaily, pouze zesiluje stávající. Takový filtr obraz degraduje. Důvodem, proč se i přesto používá, je právě zesílení detailů – lidský pozorovatel je subjektivně lépe vnímá a snáze obrazu porozumí. Dobré výsledky lze ale získat jen u slabě rozostřených obrazů, s větším rozostřením se absence detailů silněji projeví.

Zesílení detailů ovlivňuje profil hran v obraze. V ideálním případě ostré hrany je tento profil skokový. Rozostřená hrana je naopak plynulý přechod mezi hodnotami. Namísto jeho vyrovnaní dojde při doostření k zesílení propasti mezi hodnotami podél středu hrany. Jde o optický klam, oko pak vnímá hranu ostřejší, než je ve skutečnosti.

Principem filtrace je tedy zesílení detailů. Ty jsou definovány jako rozdíl původního obrazu y a rozostřeného obrazu y_s , který vznikne konvolucí s jádrem Gaussova rozostření g :

$$\Delta y = y - y_s = y - (y \oplus g). \quad (2.4.1)$$

Výsledkem doostření je pak nový obraz \hat{y} se zesílenými detaily:

$$\hat{y} = y + \Delta y. \quad (2.4.2)$$

Jádro rozostření – matice o rozměrech $N \times N$, N je liché celé číslo – je dáno předpisem z teorie pravděpodobnosti:

$$g_{ij} = g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.4.3)$$

kde $x = j - \frac{N-1}{2}$, $y = \frac{N-1}{2} - i$ jsou kartézské souřadnice prvku matice a σ^2 rozptyl odpovídajícího Gaussova (normálního) rozdělení.

Teoreticky jsou všechny hodnoty Gaussova rozostření nenulové a měl by být k výpočtu rozostření v každém bodě použit celý obraz. V praxi stačí omezit velikost na $2\lceil 3\sigma \rceil + 1$, kde $\lceil \cdot \rceil$ je zaokrouhlení směrem od nuly. Mimo rozsah jsou hodnoty rozostření téměř nulové a chyba vzniklá jejich vynecháním je zanedbatelná.

Pixa ve své práci [5] popisuje kromě parametru σ^2 ještě další – míru doostření α a práh účinku doostření β . Míra doostření se projeví ve vztahu (2.4.2), kde úpravou vznikne:

$$\hat{y} = y + \alpha \Delta y. \quad (2.4.4)$$

Práh účinku filtru β zajišťuje, že se v obraze zesílí pouze dostatečně silné detaily. Jeho zakomponováním do (2.4.4) a dosazením z (2.4.1) obdržíme konečnou podobu filtrace obrazu:

$$\hat{y} = \begin{cases} y + \alpha [y - (y \oplus g)] & \text{pro } |y - (y \oplus g)| \geq \beta \\ y & \text{jinak} \end{cases}. \quad (2.4.5)$$

Navržený filtr principiálně odpovídá například vestavěnému doostřovacímu filtru zmiňované aplikace Adobe® Photoshop®. Kromě Gaussova rozostření lze používat jakýkoliv low-pass filtr (dolnofrekvenční propust), včetně tvarů bokeh.

2.5 METODY RESTAURACE OBRAZU

2.5.1 Model zkreslení

Proces restaurace obrazu je *snaha o obnovení originálu* ze snímku porušeného nějakým zkreslením a šumem. Ve většině případů lze proces modelovat lineárním rozostřením a aditivním bílým Gaussovým šumem:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2.5.1)$$

kde vektory \mathbf{y} , \mathbf{x} a \mathbf{n} představují v tomto pořadí zkreslený obraz se šumem, originál a aditivní šum. Matice \mathbf{H} představuje lineární zkreslení a pro obraz o rozměrech $N \times N$ nabývá rozměru $N^2 \times N^2$. Matice \mathbf{H} má v případě konvolučního zkreslení blokovou Toeplitzovu formu. Každý řádek matice, který se při součinu aplikuje na obraz \mathbf{x} , představuje zkreslení v jednom bodě obrazu.

Problém restaurace obrazu zahrnuje aplikaci inverzního procesu, kterým obdržíme odhad neznámého originálního obrazu \mathbf{x} na základě modelu zkreslení (2.5.1). Jde o problém *nedostatečně podmíněný (ill-posed)*, malá změna v datech způsobí velkou změnu výsledku.

Vztah (2.5.1) lze vyjádřit u prostorově neměnného zkreslení v originální oblasti konvolucí:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{x} \oplus \mathbf{h}) + \mathbf{n}, \quad (2.5.2)$$

kde \mathbf{y} , \mathbf{x} a \mathbf{n} představují postupně zkreslený obraz se šumem, originál a aditivní šum. Vektor \mathbf{h} je konvoluční jádro zkreslení.

Díky konvolučnímu teorému (2.3.4) můžeme (2.5.2) vyjádřit ve frekvenční oblasti:
$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) + N(\omega), \quad (2.5.3)$$

kde Y , X a N je v tomto pořadí frekvenční charakteristika zkresleného obrazu se šumem, originálu a aditivního šumu pro danou frekvenci ω . Frekvenční charakteristika zkreslení je H .

Zkreslení se tedy sestává ze dvou složek – rozostření a šumu. Podle jejich povahy se úkol restaurace obrazu dělí na dva typy. Pokud převládá šum, jde o úlohu *zlepšení poměru signálu k šumu*. Přebývá-li naopak rozostření, nazýváme úlohu restaurace *dekonvolucí*. Neznáme-li navíc dostatečně dobře zkreslení, jde o tzv. *slepu dekonvoluci*. Tato práce se výhradně zabývá úlohou dekonvoluce se známou povahou zkreslení.

2.5.2 Přímá inverze

První a nejjednodušší metodou je naivní přístup k dekonvoluci, tzv. *přímá inverze*, také nazývaná prostou dekonvolucí. Jejím předpokladem je, že ve zkreslení silně převažuje vliv rozostření. Při nízké úrovni šumu lze zkreslení dané modelem (2.5.3) napravit restauračním systémem prostého *inverzního filtru*, jehož impulsní odezva je převrácenou hodnotou odezvy zkreslujícího systému:

$$M(\omega) = \frac{1}{H(\omega)}, \quad (2.5.4)$$

takže odhad \hat{X} spektra originálu X bude:

$$\hat{X}(\omega) = M(\omega)Y(\omega) = \frac{1}{H(\omega)}[H(\omega)X(\omega) + N(\omega)] = X(\omega) + \frac{N(\omega)}{H(\omega)}. \quad (2.5.5)$$

Z výsledku jasně vyplývá, že odhad bude zatížen šumem N zesíleným převrácenou hodnotou členu H . Bude-li se hodnota H blížit nule, ve výsledku začne převažovat

velmi zesílený šum. Tato metoda je tedy vhodná pouze pro velmi omezený okruh šumem nezátížených obrazů. V ideálním případě nulového šumu, absolutní přesnosti výpočtů a absence nulových hodnot frekvenční charakteristiky zkreslujícího systému lze perfektně zvrátit účinek zkreslení. Prostý inverzní filtr je však značně nestabilní a prakticky nepoužitelný.

2.5.3 Pseudoinverze

V případech, kdy je inverzní filtr nepoužitelný, lze použít tzv. *pseudoinverzní filtry*. Tyto filtry se snaží nějakým způsobem stabilizovat filtr inverzní. Příčinou potíží, kterou pseudoinverze opravuje, jsou extrémní hodnoty frekvenční charakteristiky.

Jedna z možností úpravy filtru, kterou popisuje Jan [3], je dána frekvenční charakteristikou:

$$M_{pseud1}(\omega) = \begin{cases} 1/H(\omega) & \text{pro } |H(\omega)| \geq \varepsilon \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (2.5.6)$$

kde ε je vhodně zvolená mez amplitudy frekvence. Tato úprava z restaurovaného obrazu úplně odstraní frekvenční složky s nízkou úrovní amplitudy – včetně jejich fáze. To by mohla být menší chyba, než připustit vliv zesíleného šumu.

Abychom neztratili fázovou informaci ve frekvencích s malou hodnotou $H(\omega)$, nabízí se jiná úprava, opět podle Jana[1]:

$$M_{pseud2}(\omega) = \begin{cases} 1/H(\omega) & \text{pro } |H(\omega)| \geq 1/\xi \\ (1/\xi) \exp[i \arg(1/H(\omega))] & \text{jinak} \end{cases} \quad (2.5.7)$$

kde ξ je vhodně zvolená reálná konstanta. Výhodou této úpravy je, že u malých složek pouze limituje amplitudu inverzního filtru na $1/\xi$ a fázi zachovává. Nachází-li se však ve frekvenční charakteristice zkreslení nulový bod, fázová informace je stále ztracena.

Z obou variant vyplývá, že perfektní restaurace obrazu za přítomnosti nulových bodů frekvenční charakteristiky zkreslení nebo neznámého šumu není možná.

2.5.4 Wienerova dekonvoluce

Tato metoda je založena na filtraci profesora Norberta Wienera. Tu už ve 40. letech minulého století navrhl k potlačování šumu v signálech. Wienerův filtr je odvozen od PSF a poměru šumu k signálu (*noise-to-signal ratio*, *NSR*). Jak jsem již naznačil, za přítomnosti šumu není možné dokonale zrekonstruovat původní obraz. Cílem *Wienerovy dekonvoluce* je nalézt takový filtr, který obnoví obraz tak kvalitní, jak je to za daných podmínek možné. Co ale „tak, jak je možné“ znamená?

Můžeme změřit chybu restaurace. Definujme ji jako *střední kvadratickou odchylku* (*mean squared error*, *MSE*) restaurace od originálu:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i)^2, \quad (2.5.8)$$

v níž N je počet bodů obrazu, originál je \mathbf{x} , restaurovaný obraz $\hat{\mathbf{x}}$ a index označuje i -tý jasový bod obrazu.

Wienerova filtrace je pak postup nalezení takového Wienerova filtru, který MSE minimalizuje. Tento filtr pak restauruje obraz optimálně.

Wienerův filtr ve frekvenční oblasti odvodil Jan [3] takto:

$$M_{\text{wvr}}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} \frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + \frac{S_{\text{nn}}(\omega)}{S_{\text{xx}}(\omega)}} = \frac{1}{H(\omega)} \frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + \text{NSR}(\omega)}, \quad (2.5.9)$$

a vystupuje v něm H jako frekvenční charakteristika zkreslení (pro danou frekvenci ω) a NSR modeluje poměr šum/signál pro danou frekvenci. Protože stanovení NSR pro každou frekvenci by bylo obtížné, je možné využít skutečnosti, že u běžných fotografií je rozložení NSR ve frekvencích relativně ploché. To znamená, že poměr můžeme nahradit konstantním NSR pro všechny frekvence ω :

$$M_{\text{wvr}}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} \frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + \text{NSR}}. \quad (2.5.10)$$

Za povšimnutí stojí vlastnosti (2.5.10). Bude-li se NSR blížit nule (obraz bez šumu), bude se Wienerův filtr přibližovat k prostému inverznímu filtru (2.5.4). Obecně platí, že čím vyšší je daný NSR , tím hladší bude řešení. Vyhlazeny ale budou i hrany.

2.5.5. Vázaná dekonvoluce

Odlíšně koncipovaná metoda je *vázaná dekonvoluce (constrained deconvolution)*. Na rozdíl od Wienerova filtru nepodmiňuje restauraci minimalizací MSE. Při dekonvoluci dochází k podstatnému zhoršení poměru signálu k šumu. Tato metoda se snaží zachovat původní výkon šumu v obnoveném obraze. Hledá aproximativní postup potlačení zkreslení, který tuto úroveň nezvyšuje. Vychází z modelu (2.5.1). Definujeme tzv. *reziduuum* \mathbf{r} jako rozdíl, závislý na odhadu originálu $\hat{\mathbf{x}}$:

$$\mathbf{r}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{y} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}. \quad (2.5.11)$$

Podmínkou restaurace je, aby energie rezidua byla stejná jako energie šumu pozorovaného signálu:

$$G(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{r}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{r}(\hat{\mathbf{x}}) = \varepsilon, \quad (2.5.12)$$

kde ε je energie šumu. Podle (2.5.11) je šum reziduem příslušným k originálu, proto originál splňuje podmínku (2.5.12). Řešení je ale nekonečně mnoho, musíme vybrat takové, které splní další podmínku. Touto podmínkou je *hladkost řešení*. Musí být minimalizována míra druhé diference v obraze:

$$F(\hat{\mathbf{x}}) = \sum_i (\hat{\mathbf{x}}_{i-1} - 2\hat{\mathbf{x}}_i + \hat{\mathbf{x}}_{i+1})^2 = \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{C}^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} \rightarrow \min, \quad (2.5.13)$$

kde pro vstupní obraz rozměru $N \times N$ matice \mathbf{C} o rozměru $N^2 \times N^2$ je bloková Toeplitzova matice (podobně jako matice \mathbf{H}) zkonstruovaná z dvourozměrné aproximace diskrétního laplaciánu:

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.5.14)$$

Podstatou metody je tedy nalezení odhadu $\hat{\mathbf{x}}$, který minimalizuje kritérium (2.5.13) a zachovává podmínku (2.5.12). Úlohu lze řešit Lagrangeovou metodou neurčitých koeficientů. Zavedeme Lagrangeův funkcional:

$$L(\hat{\mathbf{x}}) = F(\hat{\mathbf{x}}) + \lambda(G(\hat{\mathbf{x}}) - \varepsilon) \rightarrow \min, \quad (2.5.15)$$

který bude minimalizován, pokud:

$$\frac{\partial L(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}_i} = \frac{\partial F(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}_i} + \lambda \frac{\partial G(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}_i} = 0, \quad \forall i. \quad (2.5.16)$$

Po provedení derivací lze vzniklé rovnice uspořádat do vektorové rovnice:

$$\hat{\mathbf{x}} = [\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \frac{1}{\lambda} \mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y}. \quad (2.5.17)$$

Koeficient λ je nutno určit tak, aby byla splněna i poslední, nelineární rovnice.

Filtraci lze provést i ve frekvenční oblasti. Výsledná vazba, převzatá od Jana [3], má jistou podobnost s Wienerovým filtrem:

$$\hat{X}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} \frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + \frac{1}{\lambda}|C(\omega)|^2}. \quad (2.5.18)$$

Parametr λ tak plní podobnou úlohu jako NSR u Wienerova filtru. Čím nižší bude jeho hodnota, tím hladší obdržíme řešení.

2.5.6 Moderní metody

Hledání kvalitních restauračních metod v současné době stále pokračuje. Vycházejí opět z modelu zkreslení (2.5.1). Většinou se snaží nedostatečně podmíněný problém restaurace regularizovat, proto se obecně nazývají *regularizační metody*. Základní metodou je *Tichonovova regularizace*, která se snaží poskytnout řešení (2.5.1) minimalizací tzv. *účelové funkce (cost function)*:

$$J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \alpha\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2 \quad (2.6.1)$$

kde \mathbf{x} , \mathbf{y} a \mathbf{H} představují v tomto pořadí zkreslený obraz, originál a maticové vyjádření zkreslující funkce, \mathbf{C} je *regularizační operátor* (hornofrekvenční propust) a *regularizační parametr* α určuje poměr mezi oběma složkami. Operátor $\|\cdot\|$ vyjadřuje normu vektoru. V závislosti na α pak obdržíme hladké či hrubé řešení (2.5.1). Složka $\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2$ vynucuje věrnost řešení vzhledem k originálu a stabilizační funkcionál $\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2$ ovlivňuje hladkost řešení.

Hledání nových metod se odvíjí od (2.6.1), přičemž předmětem debat jsou různé formy regularizačního operátoru a parametru, druhy použitých norem či samotný tvar účelové funkce. Řešení je pak hledáno iterativními postupy a nemalé úsilí je věnováno studiu jejich konvergence.

Mezi metody výběru regularizačních parametrů patří například *zobecněná křížová validace (generalised cross validation, GCV)*, *L-křivka (L-curve)* a metody založené na principu *totální variace (total variation, TV)*. Řadu metod prozkoumali ve své zprávě [6] Brantál a Šroubek.

Obecným výběrem regularizačního funkcionálu se zabývají Kang a Katsaggelos [7]. Navrhují jeho formu:

$$J(\mathbf{x}, \alpha(\mathbf{x})) = \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \alpha(\mathbf{x})\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2 \quad (2.6.2)$$

s funkcí $\alpha(\mathbf{x})$ přímo úměrnou věrnosti řešení a nepřímo kritériu hladkosti:

$$\alpha(\mathbf{x}) = \frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2}{(1/\gamma) - \|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2}. \quad (2.6.3)$$

Parametr γ hlídá konvexnost funkcionálu, měl by splňovat $\gamma < (1/\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2)$. Autoři ve svém článku navrhují:

$$\frac{1}{\gamma} = 2\|\mathbf{y}\|^2. \quad (2.6.4)$$

Regularizační operátor \mathbf{C} vytvořili z laplaciánu (2.5.14). Výpočet řešení je pak dán iterací:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + [\mathbf{H}^T \mathbf{y} - (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \alpha(\mathbf{x}_k) \mathbf{C}^T \mathbf{C})]. \quad (2.6.5)$$

Díky konvexitě funkcionálu je minimum globální a řešení lze nalézt pro jakýkoliv počáteční odhad. Nicméně autoři experimentálně ukázali, že pro rychlou konvergenci je lepší použít:

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{H}^T \mathbf{y}. \quad (2.6.6)$$

Metodu Kanga a Katsaggelose rozšířili Xue, Liu a Fan [8]. Zavedli účelovou funkci ve tvaru:

$$J(\mathbf{x}, \alpha(\mathbf{x})) = \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \alpha(\mathbf{x})\|\mathbf{C}_{local} \mathbf{x}\|^2, \quad (2.6.7)$$

ve které byl globální regularizační operátor nahrazen lokálním.

V obraze se nejprve odhadnou směry hran a podle nich se pro daný bod použijí příslušné směrové diference. Důsledkem takového opatření je pak zmenšená chyba v okolí hran objektů. Hladkost je totiž v tomto případě dána pouze rozdílem ve směru hrany, nikoliv skokem intenzity hrany samotné.

Kromě výše zmíněných existuje celá řada metod, které se liší v oblastech aplikace. Některé jsou vhodné pro astronomii, jiné pro lékařství, mikroskopii nebo pro rozpoznávání obrazu. Jejich aplikace v běžné digitální fotografii však ve velké míře zkoumána není.

2.6 PROBLÉM RESTAURACE BAREVNÉHO OBRAZU

Metody dosud uvedené popisovaly pouze restauraci šedotónového obrazu. Lze tyto metody použít i na barevný obraz?

Naivním přístupem je restaurace každého barevného kanálu odděleně. Takovým způsobem se ale ztratí vazba mezi jednotlivými kanály. Výsledkem jsou nepěkné barevné pruhy, zejména v okolí hran objektů. Vznikají nepřesným překrytím hran v různých barevných kanálech.

Jak se zmiňuje Leah Barová ve své práci [9], oddělené restaurování kanálů není efektivní a je zapotřebí barvy nějakým způsobem *sdužit* (*color coupling*). V jiné své práci [10] dokonce označuje sdužování barev za klíčové pro úspěšnou restauraci.

Jednou z možností je interpretace obrazu jako dvourozměrné plochy v pětirozměrném prostoru. Bod RGB obrazu pak bude mít souřadnice $\{x, y, r, g, b\}$, kde x a y jsou jeho souřadnice v obraze a r, g, b hodnoty jeho barevných složek. Kanály budou nejen vzájemně sdužené, ale budou mít i vazbu na své umístění v obraze. Restaurace pak může probíhat s kritériem hladkosti povrchu. Restaurovaný obraz je, podle použité metody, hladký a hrany jsou kvalitní a nenarušené. Celou situaci je ovšem těžké si představit a do hry vstupují i poměrně složitá odvození, proto se tento text pěti rozměry i přes jeho výhody dále zabývat nebude.

Odlišným a výrazně jednodušším způsobem, který ale nepodává tak dobré výsledky, je provedení restaurace v jiném barevném prostoru. Cílem převodu barev je *dekorelace* barevných složek, tedy snaha o odstranění jejich vzájemné závislosti. V běžném RGB obraze se například přechod z nějaké světlé barvy do jejího tmavého odstínu projeví jako přechod v červeném kanále R, zeleném G i v modrém kanále B. V tomto případě jsou kanály R, G a B vzájemně silně korelovány. V systému HSB by se tentýž obraz projevil jako přechod v kanálech S (saturace) a B (světlost), zatímco konstantní by byl kanál H (odstín). Barevný odstín je v tomto případě na ostatních nezávislý a v restaurovaném obraze budou chyby méně zjevné.

Je zřejmé, že ne každý barevný systém je vhodný. Brantál a Šroubek ve výzkumné zprávě [6] doporučili barevné systémy HSB a HSI nebo barevné dekompozice Karhunen-Loeve a Otha.

2.7 EVOLUČNÍ ALGORITMY

Třída *evolučních algoritmů* zahrnuje procesy hledání přesného nebo přibližného řešení optimalizačního nebo vyhledávacího problému. Jde, v případě této práce, o způsob nalezení vhodných parametrů zkreslení a restaurace, na jejichž základě je obraz optimálně restaurován.

Název se odvíjí od podobnosti s evolucí. V každé generaci kandidátů jsou vybráni ti, kteří nejlépe splňují podmínku hledání. Výběr provádí tzv. *selektor* – subjekt, který změří kvalitu kandidáta a vybere ty nejlepší jako základ nové generace. Noví kandidáti jsou zvoleni mutací či zkřížením předešlých vybraných. Vytvoření nové generace provádí tzv. *inovátor* – subjekt, který kříží nebo mění vlastnosti kandidátů a vytváří tak nové.

Algoritmy rozdělujeme vzhledem k míře zahrnutí člověka do procesu evoluce na tři podtypy, jak je uvedeno v přehledové tabulce. Úmyslně uvádí i analogii s přírodní evolucí:

Systém	Sekvence	Inovátor	Selektor
Přírodní výběr	Nukleotidy	Příroda	Příroda
Umělý výběr	Nukleotidy	Příroda	Člověk
Genetické inženýrství	Nukleotidy	Člověk	Člověk
Genetický alg. založený na člověku	Data	Člověk	Člověk
Interaktivní genetický algoritmus	Data	Počítač	Člověk
Genetický algoritmus	Data	Počítač	Počítač

S každou generací se parametry blíží k řešení problému. Je-li změna oproti minulé generaci dostatečně malá, výběr končí.

3 REALIZAČNÍ ČÁST

3.1 PARAMETRICKÝ MODEL ZKRESLENÍ OBRAZU

3.1.1 Špatně zaostřený objektiv

Kvalita restaurace se odvíjí od kvality odhadu zkreslující funkce. Stěžejní částí této práce je návrh *parametrického modelu* špatného zaostření objektivu. V teoretické části byl pro rozostření zaveden termín bokeh. Jeho hlavními rysy jsou poloměr, počet a zakřivení lamel clony a profil rozptylu. Rozostření je třeba interpretovat jako matici hodnot rozptylové funkce \mathbf{h} ze vztahu (2.5.2). Zkreslený obraz vznikne konvolucí originálního obrazu \mathbf{x} rozptylem \mathbf{h} . Cílem této části práce je určit hodnoty prvků matice \mathbf{h} o rozměrech $P \times P$ jako funkci jejich souřadnic:

$$\mathbf{h}_{ij} = \mathbf{h}[x, y] = f(x, y) \quad (3.1.1)$$

kde $x = j - \frac{P-1}{2}$, $y = \frac{P-1}{2} - i$ jsou kartézské souřadnice prvků, P je liché celé číslo. Matici lze chápat i jako digitální obraz skutečného (spojitého) bokeh daných rozměrů. Ve smyslu tohoto výkladu budou dále prvky matice označovány i jako pixely.

V případě kruhového rozostření je PSF kruh o poloměru r se středem v $\mathbf{h}[0, 0]$. Jinak je tomu u bokeh, v němž se projevuje počet lamel clony. Tvar je pak pravidelný mnohoúhelník s těžištěm v $\mathbf{h}[0, 0]$, jehož hrany představují lamely. Počet lamel označíme N , kde $N \geq 3$. U mnohoúhelníku lze vyložit pojem poloměru více způsoby. Může to být například poloměr kružnice opsané r_{max} nebo vepsané r_{min} . Pro tento model jsem zvolil aritmetický průměr obou poloměrů:

$$r_{mean} = \frac{r_{max} + r_{min}}{2}. \quad (3.1.2)$$

Užití střední hodnoty je praktické a zaručí, že mnohoúhelník bude mít přibližně stejný plošný obsah jako kruh stejného poloměru nebo jako mnohoúhelník s jiným počtem hran. To je důležité u experimentálního výběru počtu hran – uživatel jistě nebude chtít po každé úpravě počtu lamel upravovat ještě poloměr.

Abychom mohli pracovat se zadaným r_{mean} , je nutné odvodit vztahy pro r_{min} a r_{max} na něm závislé. Uvažujme nejprve případ zadaného poloměru kružnice opsané. Pro poloměr kružnice vepsané pak platí vztah:

$$r_{min} = r_{max} \cos\left(\frac{\pi}{N}\right). \quad (3.1.3)$$

Dosazením do vztahu (3.1.2) obdržíme vztah pro výpočet r_{mean} při zadaném r_{max} :

$$r_{mean} = \frac{1}{2} r_{max} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)\right]. \quad (3.1.4)$$

Odvozením z tohoto vztahu a dosazením do (3.1.3) získáme hledané vztahy:

$$\begin{aligned} r_{max} &= 2r_{mean} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)\right]^{-1} \\ r_{min} &= 2r_{mean} \left[1 + \cos^{-1}\left(\frac{\pi}{N}\right)\right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

Rozměry matice \mathbf{h} musí pojmout všechny body mnohoúhelníku. Vždy budou liché, aby těžiště mohlo být umístěno přesně do středu pixelu $\mathbf{h}[0, 0]$. Podmínku splňují rozměry $P \times P$ pro:

$$P = 2 \lceil r_{mean} \rceil + 1, \quad (3.1.6)$$

kde operátor $\lceil \cdot \rceil$ je zaokrouhlení kladného reálného čísla směrem od nuly.

Mnohoúhelníkový nebo kruhový tvar PSF napovídá, že by mohl být generován některými zavedenými a rychlými algoritmy pro *rasterizaci*. Ty však samy o sobě neumožňují aplikaci profilu rozostření. Prioritou výpočtu impulsní odezvy není rychlost a kvalita zobrazení, ale matematická přesnost.

K tomuto účelu je pro výpočet (kruhového) rozostření lepší využít *polární soustavy souřadnic*. Transformace z souřadnic z (3.1.1) na polární je dána vztahy:

$$\begin{aligned} r_{polar} &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi_{polar} &= \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{aligned} \quad (3.1.7)$$

kde r_{polar} je vzdálenost bodu od počátku souřadnic a $\varphi_{polar} \in \langle 0, 2\pi \rangle$ je úhel spojnice bodu a počátku od osy x . Profil bokeh bude funkcí vzdálenosti bodu od počátku souřadnic v těžišti.

Polární souřadnice nelze přímo použít u mnohoúhelníkového tvaru. Lze je ale upravit a vytvořit *polygonální souřadnice*. Vzdálenost bodu r_{polar} nahradí střední poloměr $r_{polygon}$ mnohoúhelníku, na jehož hraně bod leží, se středem v těžišti. Ani úhel

φ_{polygon} nemusí být stejný jako u polárních souřadnic, neboť do modelu vstupuje kromě počtu hran N i natočení $\varphi_0 \in \langle 0, 2\pi \rangle$. Při $\varphi_0 = 0$ na kladné poloose x leží střed hrany N -úhelníku, tedy úhlově π/N rad od vrcholu. Důvod tohoto opatření je zmíněn v odstavci {3.1.2}.

Nyní definujme transformaci z polárních souřadnic na polygonální. Úhel je pouze pootočený o φ_0 a o polovinu úhlové šířky jedné lamely. Je však dobré zajistit, aby jeho hodnoty opět ležely v intervalu $\langle 0, 2\pi \rangle$:

$$\varphi_{\text{polygon}} = \left(\varphi_{\text{polar}} + \varphi_0 + \frac{\pi}{N} \right) \bmod 2\pi. \quad (3.1.8)$$

Odvození vztahu pro r_{polygon} je složitější. Využijeme již známého φ_{polygon} a r_{polar} . Z nich lze určit poloměr r_H vepsané kružnice mnohoúhelníku, na jehož hraně daný bod leží. Ten závisí na vzdálenosti bodu od vrcholu, přesněji na rozdílu jeho souřadnice φ_{polygon} a souřadnice φ_H nejbližšího středu hrany H :

$$r_H(\varphi_{\text{polygon}}) = r_{\text{polar}} \cos^{-1}(\varphi_{\text{polygon}} - \varphi_H). \quad (3.1.9)$$

Je-li nejbližší střed k -té hrany, $k = 0, 1, \dots, (N - 1)$, platí:

$$k(\varphi_{\text{polygon}}) = \left\lfloor \frac{1}{2\pi} N \varphi_{\text{polygon}} \right\rfloor, \quad (3.1.10)$$

kde operátor $\lfloor \cdot \rfloor$ je zaokrouhlení kladného reálného čísla směrem k nule, a úhlová vzdálenost nejbližšího středu hrany je:

$$\varphi_H(\varphi_{\text{polygon}}) = \frac{2\pi}{N} \left[\frac{1}{2} + k(\varphi_{\text{polygon}}) \right]. \quad (3.1.11)$$

Známe-li poloměr r_H kružnice vepsané, jeho přepočtení na střední poloměr je jednoduché, stačí úměrně zvětšit jeho hodnotu v poměru ke střednímu poloměru:

$$r_{\text{polygon}} = \frac{r_{\text{mean}}}{r_{\text{min}}} r_H = \frac{r_{\text{mean}}}{r_{\text{min}}} r_{\text{polar}} \cos^{-1} \left[\varphi_{\text{polygon}} - \varphi_H(\varphi_{\text{polygon}}) \right]. \quad (3.1.12)$$

Vztahy (3.1.8) a (3.1.12) určují transformaci polárních souřadnic na polygonální. Ani ty však nestačí, protože dalším parametrem modelu je zakřivení lamel ρ , $\rho \in \langle 0, 1 \rangle$. Při $\rho = 0$ bude tvar PSF mnohoúhelníkový a naopak při $\rho = 1$ bude kruhový. Polygonální souřadnice je možné transformovat na *hybridní souřadnice* váženým průměrem polárních a polygonálních souřadnic:

$$r_{\text{hybrid}} = (1 - \rho) r_{\text{polygon}} + \rho r_{\text{polar}} = r_{\text{polygon}} + \rho (r_{\text{polar}} - r_{\text{polygon}}). \quad (3.1.13)$$

Druhá souřadnice φ_{hybrid} zůstane rovna φ_{polygon} .

Dosazením (4.7) a (4.12) do (4.8) a (4.13) obdržíme transformaci kartézských souřadnic na hybridní:

$$r_{\text{hybrid}}(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \left[\rho + (1 - \rho) \frac{r_{\text{mean}}}{r_{\text{min}} \cos(\varphi_{\text{hybrid}} - \varphi_H)} \right], \quad (3.1.14)$$

$$\varphi_{\text{hybrid}}(x, y) = \left[\arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \varphi_0 \right] \bmod 2\pi$$

kde:

$$\varphi_H = \frac{2\pi}{N} \left(\frac{1}{2} + \left\lfloor \frac{1}{2\pi} N \varphi_{\text{hybrid}} \right\rfloor \right). \quad (3.1.15)$$

Transformace do hybridních souřadnic nám umožňuje snadno definovat matici \mathbf{h} rozostření s kruhovým až polygonálním tvarem. Vzorec (3.1.1) můžeme přepsat do podoby:

$$h_{ij} = f(r_{\text{hybrid}}(x, y)). \quad (3.1.16)$$

Abychom snížili velikost matice, můžeme upravit (3.1.6) v duchu přepočtu na hybridní souřadnice (3.1.13). Nové rozměry $P' \times P'$, potřebné pro nenulové pixely, jsou dány:

$$P' = 2 \left\lceil r_{\text{max}} + \rho(r_{\text{mean}} - r_{\text{max}}) \right\rceil + 1. \quad (3.1.17)$$

Nyní už můžeme definovat profilovou funkci $p(r_{\text{hybrid}})$, která přiřadí hodnotu PSF v závislosti na hybridní vzdálenosti od těžiště. Ta musí umět modelovat různé typy bokeh – špatný, neutrální a dobrý – i deformaci způsobenou korekcí aberace.

Jako dostačující parametry profilové funkce jsem vybral prohnutí α a sílu prstence β_h dané šířky β_w na okraji profilu ($r_{\text{hybrid}} \rightarrow r_{\text{mean}}$). Je-li $r_{\text{hybrid}} \notin \langle 0, r_{\text{mean}} \rangle$, hodnota profilové funkce je nulová.

Speciální případy *aliasovaných pixelů*, které plochu PSF obsahují jen částečně, lze řešit aproximací objemu pod plochou PSF uvnitř pixelu – například průměrem hodnot profilu okolních subpixelů vhodného rozlišení. Protože celkový vliv aliasu s rostoucím poloměrem klesá, lze pro úsporu času zvolit menší rozlišení pro větší poloměr a naopak. Za aliasované pixely lze považovat např. ty, v jejichž osmiokolí se nacházejí pixely uvnitř i mimo žádaný poloměr.

Nyní definujme jednotlivé složky profilové funkce. Složka p_α bude nabývat hodnot z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ s parametrem $\alpha \in \langle -1, 1 \rangle$. Modeluje vydutost čočky – dobrý nebo

špatný bokeh – kvadratickou závislostí na relativní vzdálenosti od těžiště vzhledem k zadanému střednímu poloměru:

$$p_\alpha(r) = \begin{cases} (1 - \alpha) + \alpha \left(\frac{r}{r_{mean}}\right)^2 & \text{pro } \alpha > 0 \wedge r \leq r_{mean} \\ 1 + \alpha \left(\frac{r}{r_{mean}}\right)^2 & \text{pro } \alpha \leq 0 \wedge r \leq r_{mean} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1.18)$$

Druhá složka p_β je určena šířkou $\beta_w \in \langle 0, 1 \rangle$ a nabývá hodnot z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Parametr určuje relativní vzdálenost od r_{mean} , kde má prstenec na okraji vliv. Půjde opět o kvadratickou závislost:

$$p_\beta(r) = \begin{cases} \left(1 + \frac{1}{\beta_w} \frac{r - r_{mean}}{r_{mean}}\right)^2 & \text{pro } \beta_w > 0 \wedge r \in \langle (1 - \beta_w)r_{mean}, r_{mean} \rangle \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1.19)$$

Využijeme i poslední parametr $\beta_h \in \langle -1, 1 \rangle$ řídící míru vlivu prstence. Substitucí $r_{rel} = r/r_{mean}$, váženým součtem a úpravou funkcí (3.1.18) a (3.1.19) obdržíme plný předpis pro výpočet hodnoty profilu:

$$p(r_{rel}) = \begin{cases} (1 - \beta_h)p_\alpha(r_{rel}) + \beta_h p_\beta(r_{rel}) & \text{pro } r_{rel} \in \langle 0, 1 \rangle \wedge \beta_h > 0 \\ p_\alpha(r_{rel}) + \beta_h p_\beta(r_{rel}) & \text{pro } r_{rel} \in \langle 0, 1 \rangle \wedge \beta_h \leq 0 \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1.20)$$

$$p_\alpha(r_{rel}) = \begin{cases} (1 - \alpha) + \alpha r_{rel}^2 & \text{pro } \alpha > 0 \\ 1 + \alpha r_{rel}^2 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1.20)$$

$$p_\beta(r_{rel}) = \begin{cases} \frac{\beta_h}{\beta_w^2} (r_{rel} + \beta_w - 1)^2 & \text{pro } \beta_w > 0 \wedge r_{rel} > (1 - \beta_w) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

kde

$$r_{rel} = \frac{r}{r_{mean}}. \quad (3.1.21)$$

Impulsní odezva rozostření má nyní tvar a hodnoty, které však nejsou správně omezené. Vyskytnou-li se záporné hodnoty, jsou nesmyslné a vynulujeme je. Aby PSF neměnila jas obrazu, je třeba hodnoty normalizovat a splnit podmínku:

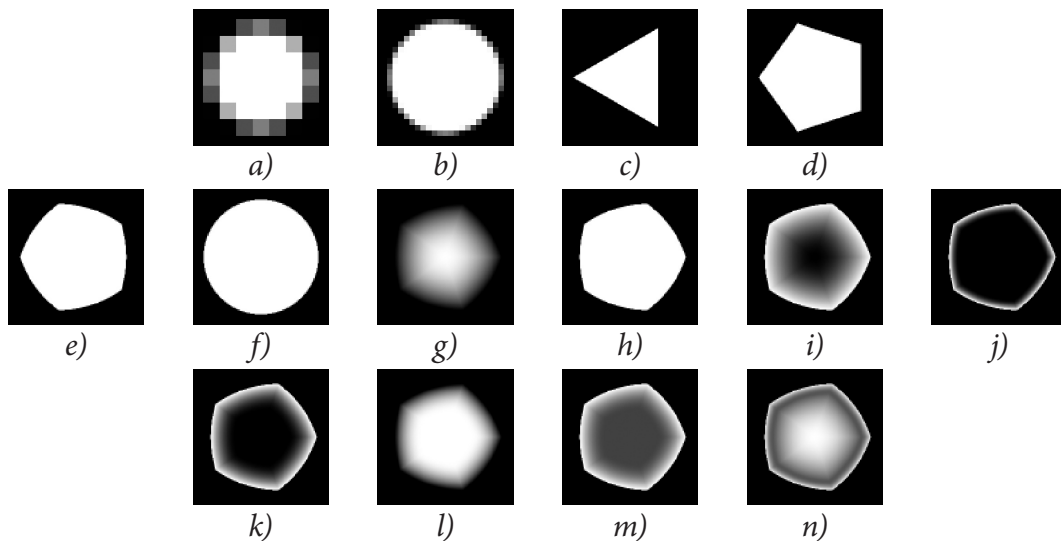
$$\sum_{i,j} \mathbf{h}_{ij} = 1. \quad (3.1.22)$$

Odvození vztahů je složité, parametry si zaslouží shrnutí (a ukázkou na obr. 3.1.1):

- $r_{mean} \geq 0$ – střední poloměr kružnice opsané a vepsané tvaru bokeh;
- $N = 3, 4, 5, \dots$ – počet lamel clony, tvar bokeh bude N -úhelníkový;
- $\rho \in \langle 0, 1 \rangle$ – zakřivení lamel, s $\rho = 0$ je tvar N -úhelník, s $\rho = 1$ kruh;
- $\varphi_0 \in \langle 0, 2\pi \rangle$ – natočení bokeh podle těžiště;
- $\alpha \in \langle -1, 1 \rangle$ – vydutost bokeh, pro $\alpha < 0$ budou paprsky soustředěny ve středu, pro $\alpha > 0$ na okraji a $\alpha = 0$ způsobí plochý profil;
- $\beta_w \in \langle 0, 1 \rangle$ – šířka prstence okolo bokeh, s $\beta_w = 0$ se neobjeví žádný prstenec a s $\beta_w = 1$ bude prstenec zasahovat do celé PSF;
- $\beta_h \in \langle -1, 1 \rangle$ – míra vlivu prstence, pro $\beta_h = 0$ se nebude projevovat vůbec a pro $\beta_h = 1$ bude tvořit bokeh pouze prstenec.

Hodnoty PSF jsou vypočteny následovně:

1. Kartézské souřadnice ze vztahu (3.1.1) se pře počtou na hybridní souřadnice definované ve (3.1.14).
2. Z hybridní vzdálenosti od těžiště r_{hybrid} se v každém bodě PSF vypočte jeho hodnota z (3.1.20). Hodnoty aliasovaných pixelů se odhadnou průměrem hodnot subpixelů.
3. Případné záporné hodnoty se vynulují a impulsní odezva se normalizuje tak, aby splňovala podmínku (3.1.22).



Obr. 3.1.1 – Vygenerované PSF: a) $r_{mean} = 3$; b) $r_{mean} = 7$;
c) $N = 3$; d) $N = 5, \rho = 0$; e) $\rho = 0,5$; f) $\rho = 1$; g) $\alpha = -1, \varphi_0 = 180^\circ$;
h) $\alpha = 0$; i) $\alpha = 1$; j) $\beta_w = 0,2, \beta_h = 1$; k) $\beta_w = 0,5$; l) $\beta_h = -1$; m) $\beta_h = 0,75$;
n) $\alpha = -1, \beta_w = 0,2, \beta_h = 0,5$.

Do modelu jsem původně zvažoval zakomponování Gaussova rozostření (konvolucí s vypočteným PSF), nicméně po provedených experimentech bylo zjištěno, že do restaurovaného obrazu přináší nepěkné artefakty a vliv na výsledek má pouze rušivý. Důvodem by mohl být i fakt, že Gaussovo rozostření má i ve frekvenční oblasti gaussovský průběh. Velké množství téměř nulových bodů pak při inverzi způsobuje úměrně velké zesílení mnohých nechtěných frekvencí. Je sice částečně kompenzováno pseudoinverzními a jinými metodami, ale k restauraci skutečného obrazu Gaussovo rozostření přesto není vhodné.

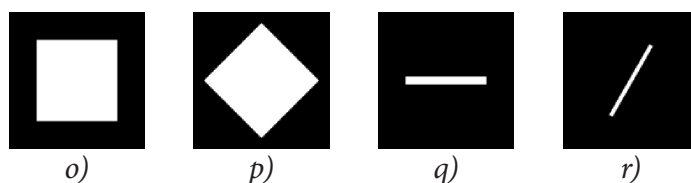
V části s experimentálními výsledky porovnávám výsledky spojené s navrženým modelem a s běžným kruhovým modelem.

3.1.2 Rozmazání pohybem

V případě rozmazání pohybem není nutné navrhovat nový model. Stačí zobecnit model definovaný pro špatné zaostření i pro tento případ. Omezíme se však pouze na lineární rozmazání – vzájemný pohyb konstantní rychlostí po přímce kolmé ke směru pohledu objektivu. Takový model pro menší pohybová rozostření stačí. Jiné druhy rozmazání nebudou řešeny, neboť se práce zaměřuje především na rozostření objektivu.

Definujme dva parametry rozmazání: $\gamma \in (0, 1)$ jako míru směřovaného zploštění funkce a úhel $\varphi_z \in \langle 0, 2\pi \rangle$, který svírá normálová osa (kolmá ke směru zploštění), s osou x . Účinky parametru γ jsou demonstrovány na obrázku 3.1.2.

Díky natočení PSF, kdy při $\varphi_0 = 0$ na kladné poloose x leží střed hrany mnohoúhelníku, lze oba parametry sjednotit a použít pouze jeden. Model rozmazání pak bude použitelný pro mnohoúhelníky se sudým počtem hran, zejména pro čtverec. Z něj se zploštěním stane obdélník a plynule přejde i do tenké linie pro malé hodnoty γ . Naopak pro $\gamma = 1$ bude model odpovídat předchozímu pro rozostření objektivu.



Obr. 3.1.2 – Vygenerované PSF pro pohybové rozostření: a) $N = 4$, $\varphi_0 = 0^\circ$, $\gamma = 1$; b) $\varphi_0 = 45^\circ$, $\gamma = 1$; c) $\varphi_0 = 0^\circ$, $\gamma = 0,1$; d) $\varphi_0 = 60^\circ$, $\gamma = 0,05$.

Jak ale docílit zploštění? Opět se nabízí řešení transformací souřadnic. Nyní budou transformovány kartézské souřadnice x a y ze vztahu (3.1.1). Jejich upravené hodnoty x_z a y_z pak budou vstupovat do vztahu (3.1.14) pro transformaci na hybridní souřadnice a další postup bude u obou modelů shodný.

Chceme-li zploštit tvar bokeh podél osy y na γ -násobek jeho výšky, je nutné souřadnici y nepřímou úměrně parametru γ zvětšit. Menší hodnota pak bude odpovídat většímu poloměru mnohoúhelníku a v konečném důsledku v tomto směru profilová funkce vytvoří užší tvar.

Obdobně zapracujeme i směr zploštění daný úhlem kolmým k φ_0 . Souřadnice nejprve otočíme o tento úhel rotační transformací na nové hodnoty x_{rot} a y_{rot} . Nyní stačí zmenšit souřadnici y_{rot} jako ve zjednodušeném případě a následně rotovat souřadnice zpět. Výsledkem je směrované zploštění bokeh.

Rotace souřadnic je dána vztahy:

$$\begin{aligned}x_{rot} &= x \cos \varphi_0 - y \sin \varphi_0 \\y_{rot} &= x \sin \varphi_0 + y \cos \varphi_0\end{aligned}\tag{3.1.23}$$

Zpětná transformace souřadnic, doplněná o zvětšení souřadnice y_{rot} je posledním potřebným krokem ke zobecnění modelu pro pohybové rozostření:

$$\begin{aligned}x_z &= x_{rot} \cos \varphi_0 + \frac{1}{\gamma} y_{rot} \sin \varphi_0 \\y_z &= -x_{rot} \sin \varphi_0 + \frac{1}{\gamma} y_{rot} \cos \varphi_0\end{aligned}\tag{3.1.23}$$

3.1.3 Šum

Zkreslení obrazu je kromě PSF dáno i typem šumu, který znečišťuje obraz. Pro případ fotografií se lze omezit pouze na bílý aditivní Gaussův šum. Vliv kvantizačního šumu je zanedbatelný. Restaurace za přítomnosti vypálených pixelů by vyžadovala úpravu metod, například při regularizaci je pro tento šum vhodné nahradit normy jiným druhem. Vypálené pixely nebudou uvažovány, neboť nejsou – na rozdíl od Gaussova šumu – u skutečných fotografií všudypřítomné. Předmětem práce také není náprava zkreslení vlivem ztrátové komprese.

3.2 APLIKACE METOD RESTAURACE OBRAZU

Tato část práce se zabývá výběrem a aplikací dříve popsaných metod na restauraci poškozeného obrazu. První odstavec se zabývá požadavky, dle kterých jsou metody vybrány. Následuje popis aplikace metod ve frekvenční oblasti a řešení okrajových podmínek. Jednotlivé vybrané metody jsou poté upřesněny a jsou vyčteny jejich parametry. Zbývající odstavce jsou věnovány utlumení výsledku restaurace a také zvolenému řešení problematiky barevných obrazů.

3.2.1 Výběr metod

Vybrat z velkého množství konkrétní metody nebyl snadný úkol. Po prostudování návrhů mnohých autorů jsem vybral ty, které měly dobré prezentované výsledky nebo byly zajímavé, nebyly specializované (například pro astronomii) a byly v principu jednoduché a dostatečně dobře popsané, aby mohly být snadno programově implementovány a nebyly výpočetně náročné. Záměrně byly vynechány i metody slepé dekonvoluce, protože povahu zkreslení lze díky navrženému parametrickému modelu považovat za poměrně dobře známou. Požadavek jednoduchosti se odvíjí od zaměření této práce na parametrický model zkreslení. Práce, které jej splňovaly, nešlo vždy dobře rozpoznat. Jak se později ukázalo, regularizační metody jsou takovým případem. Konkrétní důvody selhání jsou uvedeny u příslušné metody.

K implementaci jsem vybral Wienerovu filtraci (nejběžnější používanou metodu), vázanou dekonvoluci (pro její podobnost s Wienerovou dekonvolucí) a také jednu moderní metodu – Kangovu a Katsaggelosovu [7]. Přestože se poslední z metod projevila jako problematická, byla nakonec z části implementována. Ostatní metody byly buď příliš složité, nebo zaměřené na specifickou oblast použití a dalo se předpokládat, že jsou pro ostření fotografií nevhodné. Pro srovnání byl implementován i doostřovací filtr, který obraz nerestauruje a pseudoinverzní metody.

3.2.2 Aplikace metod ve frekvenční oblasti

Jak bylo dříve řečeno, konvoluci je možné interpretovat jako násobení ve frekvenční oblasti. Většina metod využívá vlastnosti konvolučního teorému (2.3.4) a samotná restaurace probíhá ve frekvenční oblasti. Obraz je zapotřebí do této oblasti převést a definovat i zpětnou transformaci. Tento způsob filtrace má svá omezení. Nelze

využít prostorově proměnlivé rozostření, zkreslení musí být stejné v každém bodě obrazu. Problém restaurace se tedy omezuje pouze na invariantní rozostření, které sice nemodeluje skutečnost úplně věrně, ale ve většině případů postačí.

K převodu do frekvencí je využita *diskrétní fourierova transformace (discrete fourier transform, DFT)*, v praxi vypočtená dobře známým algoritmem *rychlé fourierovy transformace (fast fourier transform, FFT)*. Rychlá fourierova transformace zaručí složitost algoritmů konvoluce a dekonvoluce $\mathcal{O}(N \log N)$.

U jednorozměrné sekvence délky N je DFT stejně dlouhou sekvencí s prvky:

$$X_k = \text{DFT}_k(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, \quad k, n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.2.1)$$

v níž e je základ přirozeného logaritmu a i je imaginární jednotka.

Zpětná operace má zaměněné znaménko v exponentu a je normalizována:

$$x_n = \text{IDFT}_n(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N}kn}, \quad k, n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.2.2)$$

Platí, že obě operace provedené za sebou jsou identitou:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \text{IDFT}[\text{DFT}(\mathbf{x})] \\ X &= \text{DFT}[\text{IDFT}(X)] \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

Rozšíření pro dvourozměrné obrazy je prosté. Operace se nejprve aplikuje na řádky obrazu a poté na sloupce mezivýsledku (na pořadí nezáleží). V normalizaci IDFT se projeví oba rozměry. Dvourozměrné operace označíme $\text{DFT}_{2\text{D}}$ a $\text{IDFT}_{2\text{D}}$.

Obraz ve frekvenční oblasti je charakterizován komplexními čísly c . Je vhodné je interpretovat jako vektory. Absolutní hodnota komplexního čísla, délka jeho vektoru, se zde nazývá *amplituda*. Úhel, který svírá komplexní vektor s reálnou osou, se nazývá *fáze*. Pro výpočet inverzního filtru je nutné znát převrácenou hodnotu tohoto komplexního čísla:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{a + bi} = \frac{a}{|c|^2} - \frac{bi}{|c|^2}. \quad (3.2.4)$$

Aplikaci filtru \mathbf{h} na obraz \mathbf{x} vyjadřuje vztah se součinem po složkách:

$$\mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{h}) = \text{IDFT}_{2\text{D}}[\text{DFT}_{2\text{D}}(\mathbf{x}) \cdot \text{DFT}_{2\text{D}}(\mathbf{h})]. \quad (3.2.4)$$

3.2.3 Okrajové podmínky

Metody restaurace obrazu založené na filtraci ve frekvenční oblasti předpokládají, že je obraz *periodický* – v obraze na sebe protějšší okraje navazují. To ovšem není případ fotografií a nespojitosti je nutné řešit vhodnými okrajovými podmínkami. I u ostatních metod je třeba podmínky řešit, protože obraz mimo vyfotografovanou oblast není znám a na okrajích tak nelze úspěšně aplikovat filtr.

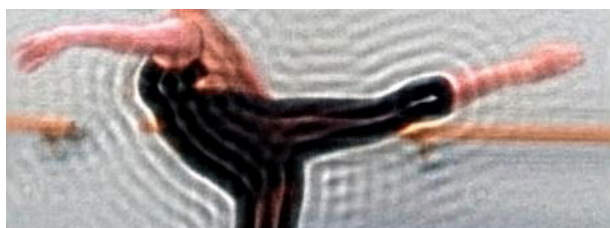
Fourierova transformace má cirkulační vlastnosti. Při restauraci pak ostrý přechod způsobí nepěkné artefakty, tzv. *Gibbsův fenomén* (znázorněn na obrázku 3.2.1). Gonzalez et al. navrhují v publikaci [11] překonat tento problém *zkosením okrajů* (*edge taper*). Principem je náhrada hodnot na okraji obrazu y hodnotami z modelu rozostření (2.5.1) při daném rozostření h hodnotami rozostřeného obrazu $y \oplus h$. Váhy této náhrady jsou dány autokorelací $h \oplus h$. Před restaurací tak bude obraz mít okraje plynule navazující, po restauraci obrazu budou na okrajích ostré přechody. Tento způsob řešení okrajových podmínek způsobuje malé slití protilehlých okrajů, ale oproti neošetřeným okrajům je výsledek nesrovnatelně lepší.

V případě nefrekvenčních filtrů je možné neznámé hodnoty doplnit nulami nebo opakovanými či zrcadlenými okrajovými pixely. Pro účel restaurace postačí pixely opakovat, výsledek je dostatečně kvalitní.

3.2.4 Doostřovací filtr

Pro předvedení rozdílu mezi restauračními metodami a doostřovacím filtrem byl implementován filtr podle Pixy [5] se dvěma rozdíly.

Prvním rozdílem jsou okrajové podmínky. Pixa používá zrcadlené pixely, navržený filtr pouze opakované. Rozdíl není velký, projeví se jen v blízkosti okrajů obrazu.



Obr. 3.2.1 – Gibbsův fenomén

Druhým rozdílem je použití odlišného rozostřovacího filtru. Zatímco Pixova verze doostřování odčítá obraz s Gaussovo rozostřením, pro doostřovací filtry běžným, v navrženém doostřování figuruje obraz rozostřený na základě parametrického modelu zkreslení.

U experimentálních výsledků diskutuji, zda právě druhé opatření vede k nějakému zlepšení. Protože je doostřování nepoužitelné pro větší rozostření, lze očekávat, že ke značnému zlepšení nedojde, snad jen s jedinou výjimkou – malým pohybovým rozostřením. To je s navrhovanou úpravou kompenzováno pouze ve směru rozmazání a teoreticky tak může oproti klasickému doostřovacímu filtru podat lepší výsledky.

Nejtěžší operací je konvoluční rozostření obrazu, složitost algoritmu je $\mathcal{O}(PN)$. Obraz 256×256 pixelů s jádrem 11×11 se na testovacím stroji zpracoval za 150 ms.

Parametry metody jsou:

- míra doostření α – udává míru zesílení detailů,
- práh β – limituje doostření pouze pro dostatečně silné detaily,
- model rozostření \mathbf{h} .

3.2.5 Pseudoinverze

Naivní metodou restaurace obrazu je pseudoinverze. Její výhoda spočívá v tom, že je jednoduchá a navíc umožní předvést výhody Wienerova a jiných sofistikovanějších filtrů.

Dvě dříve zmiňované metody pseudoinverze produkují rozdílné výsledky. První metoda ničí fázovou informaci filtru, kde jsou podprahové amplitudy, druhá pouze limituje amplitudu inverzního filtru. Fázová informace je ztracena u obou metod v případě, že se ve frekvenční charakteristice filtru nalézají nulové body.

Okrajové podmínky jsou řešeny zkosením okrajů. Nejtěžší operací je převod obrazu do frekvenční oblasti, složitost algoritmu je $\mathcal{O}(N \log N)$. Obraz 256×256 pixelů se na testovacím stroji zpracoval za 300 ms.

V části s experimentálními výsledky pseudoinverzi nediskutuji. Její nevýhody jsou již dostatečně popsány v teorii, implementována byla pouze jako vedlejší produkt.

Parametry metod jsou:

- tvrdá mez amplitudy ε – hodnoty amplitudy rozostření pod touto hranicí produkují nulové body v restauračním filtru,
- měkká mez amplitudy ξ – u druhé varianty pseudoinverzního filtru limituje amplitudy inverzního filtru na převrácenou hodnotu tohoto parametru,
- model rozostření \mathbf{h} .

3.2.6 Wienerův filtr

Metoda Wienerovy dekonvoluce je hojně používaná. Oproti naivním metodám má zásadní výhodu – zohledňuje přítomný šum. Přestože neznáme přesnou povahu šumu ve fotografii, lze ji alespoň odhadnout a popsat poměrem signálu k šumu (SNR) či jeho převrácenou hodnotou – poměrem šumu k signálu (NSR). Hodnota ovlivňuje hladkost řešení, a tak je poměr záměrně volným parametrem restaurace.

Aby byly ošetřeny i nulové body, je Wienerův filtr zkombinován s pseudoinverzí. Nulové body v rozostření se promítnou jako nulové body v restaurovaném obraze. Dále je omezena i amplituda restauračního filtru.

Okrajové podmínky jsou řešeny zkosením okrajů. Nejtěžší operací je převod obrazu do frekvenční oblasti, složitost algoritmu je $\mathcal{O}(N \log N)$. Obraz 256×256 pixelů se na testovacím stroji zpracoval za 350 ms.

V části s experimentálními výsledky diskutují rozdíly mezi výsledky Wienerovy a vázané dekonvoluce.

Parametry metody jsou:

- tvrdá mez amplitudy ε – stejná funkce jako u pseudoinverzního filtru,
- měkká mez amplitudy ξ – stejná funkce jako u pseudoinverzního filtru,
- poměr šum/signál NSR – ovlivňuje hladkost řešení,
- model rozostření \mathbf{h} .

3.2.7 Vázaná dekonvoluce

Vázaná dekonvoluce také zohledňuje přítomný šum, ale jiným způsobem. Jejím cílem je nezvýšit jeho úroveň. Hladkost dekonvoluce řídí parametr λ . Jan ve své knize [3] ukázal, že optimální hodnotu parametru lze ve frekvenční oblasti vypočítat přímo. Pro zachování možnosti subjektivního výběru hladkosti restaurace však jeho hodnotu ponechávám proměnlivou.

Aby mohly být ošetřeny i nulové body, je i vázaná dekonvoluce zkombinována s pseudoinverzí. Nulové body v rozostření se promítnou jako nulové body v restaurovaném obraze. Omezena je i amplituda restauračního filtru.

Okrajové podmínky jsou řešeny zkosením okrajů. Nejtěžší operací je převod obrazu do frekvenční oblasti, složitost algoritmu je $\mathcal{O}(N \log N)$. Obraz 256×256 pixelů se na testovacím stroji zpracoval za 350 ms.

V části s experimentálními výsledky diskutuji rozdíly mezi výsledky Wienerovy a vázané dekonvoluce.

Parametry metody jsou:

- tvrdá mez amplitudy \mathcal{E} – stejná funkce jako u pseudoinverzního filtru,
- měkká mez amplitudy ξ – stejná funkce jako u pseudoinverzního filtru,
- parametr λ – ovlivňuje hladkost řešení,
- model rozostření \mathbf{h} .

3.2.8 Metoda Kang et al.

V současnosti je dekonvoluce nejčastěji řešena regularizačními metodami, proto jsem chtěl jednu z nich zahrnout do své práce. Původně byla jako vhodný kandidát vybrána metoda Xue et al. ze článku [8], která se prokazovala pěknými vizuálními výsledky a neobsahovala na první pohled mnoho složité teorie. Po pochopení základního principu této metody se ale její praktická implementace ukázala jako tvrdý oříšek. Dosažené výsledky vůbec neodpovídaly prezentovaným. Vydal jsem se tedy hledat jádro problému u metody, která byla té předchozí předlohou – ze článku [7] Kanga a Katsaggelose. Bohužel, ani v tomto případě se mi nepodařilo dosáhnout kýžených výsledků. Po zvážení množství času a úsilí vynaloženého na implementaci regularizační metody jsem se rozhodl ukončit práci na jejím ladění. K posouzení

míry vlivu detailnosti modelu na výsledek jistě postačuje i praxí ověřená Wienerova filtrace. Není problém porovnávat méně dobré výsledky se špatnými u jednodušších metod podobně jako dobré s méně dobrými u kvalitnějších metod.

Vraťme se ale k problému implementace a okolnosti, které podnítily rozhodnutí ji nedokončovat. Podle daných vzorců jsem v matematické aplikaci MATLAB® [12] naprogramoval metodu regularizace s lokálním regularizačním operátorem. Ten byl zvolen v souladu s teorií ze článku [8]. I samotný iterativní postup výpočtu odpovídal teorii. Simuloval jsem příklad ze článku, čtvercové rozostření stejné velikosti na stejném standardním testovacím obrázku „Lena“. K rozostřenému obrazu byl přidán šum stejného charakteru. U příkladu však nebyl uveden přesný postup hledání směrů hran a chyběl i průběh regularizačního parametru α v jednotlivých iteracích. Když výsledky vizuálně neodpovídaly prezentovaným ani po provedení jiného počtu iterací, vyzkoušel jsem frekvenční variantu metody a na části obrazu i variantu s Toeplitzovou maticí s nadějí, že odhalím příčinu chyby. Výsledky byly stejné jako v předchozím případě.

V domnění, že by problémy mohly být způsobeny nevhodným způsobem hledání směru hran, jsem opustil metodu Xue et al. a pokusil jsem se implementovat metodu Kanga a Katsaggelose. Ta je jednodušším případem bez směřování hran a byla navíc mnohem lépe popsána. Autoři nezapomněli ani na průběh parametru α , a tak jsem měl mnohem lepší možnost srovnávat. Po naprogramování a výpočtu ale výsledky opět nebyly uspokojivé, ba dokonce velmi podobné předešlým.

Ukázalo se, že zatímco v mém algoritmu začínal parametr α na hodnotách v řádu 10^{-4} , v originální metodě se hodnota pohybovala o tři řády výš. Problém tedy vězí v nesprávném určení parametru α . Ten je dán vzorcem (2.6.3).

Otázkou je, zda neměly být hodnoty obrazu normalizovány tak, aby ležely v $\langle 0, 1 \rangle$. To ale nemůže být příčina, neboť normalizace se projevuje stejně v děliteli i ve jmenovateli a vzájemně se vykrátí. Ani úmyslné experimentální zvětšení nepomohlo, ba naopak destabilizovalo řešení. Stejně tak nepomohla normalizace vektorů na jednotkovou velikost.

Pokusy o dosažení správných výsledků pokračovaly mnoho týdnů. V průběhu té doby jsem studoval relevantní materiály a experimentoval. Po marných pokusech jsem se rozhodl kontaktovat autory článku [8]. Odeslal jsem email s žádostí o pomoc, ale Xue už na bretaňské univerzitě není a odpověď od Liu dosud nepřišla.

Protože vynaložené úsilí nebylo úměrné výsledkům, předkládám algoritmus takový, jaký šlo za daných okolností implementovat. Kvůli malým hodnotám je řešení příliš ostré, regularizační operátor nemá dostatečný vliv. Metoda přesto pomalu konverguje k řešení. Pro velmi malá rozostření je zapotřebí řádově deset iterací, pro větší řádově sto. Výpočet se striktně drží vzorců uvedených v části {2.5.6}, s iteracemi podle (2.6.5). Čím více se provede iterací, tím hrubší je odhad originálu a šum více zesílen.

Přestože je metoda nedokonalá, podává pro malá rozostření dobré výsledky a pro tyto případy bude zahrnuta i v jejich diskusi, v níž metodu porovnávám s Wienerovým filtrem. Bylo nezbytné vysvětlit všechny okolnosti její odlišnosti od popisovaných regularizačních metod.

Na rozdíl od předchozích se tato metoda neaplikuje ve frekvenční oblasti. Okrajové podmínky jsou řešeny opakováním pixelů. Nejtěžší operací je konvoluční rozostření obrazu v každé iteraci (celkem K), složitost algoritmu je $\mathcal{O}(KN \log N)$. Obraz 256×256 pixelů s jádrem 11×11 a 15 iteracemi se na testovacím stroji zpracoval za 6 s.

Parametry metody jsou:

- počet iterací K ,
- model rozostření \mathbf{h} .

3.2.9 Prahování a míra účinku filtru

Aplikací metody na originální obraz při daném rozostření získáme restaurovaný obraz. Někdy nelze mít ostré hrany a zároveň jemné přechody v plochých oblastech obrazu. Tím trpí zejména frekvenční metody, které tlumí vysoké frekvence v celém obraze. Zlepšení se nabízí v podobě prahování výsledku podle hran originálu.

Lidské oko nevnímá kontrast lineárně. Můžeme využít lokální *Weber-Fechnerův kontrast*, zmiňovaný ve článku V. Brajoviče [13], který lépe modeluje vjem obrazu:

$$\mathbf{c}_w(\mathbf{x}) = \frac{|\mathbf{C}\mathbf{x}|}{\mathbf{x} + \eta} \quad (3.2.5)$$

kde \mathbf{x} je nerestaurovaný obraz, filtr \mathbf{C} je vytvořen například z laplaciánu a η určuje minimální úroveň schopnou způsobit vjem.

Bude-li kontrast větší než mez τ , bude ve spojeném obraze použita hodnota restaurovaného obrazu. Bude-li menší, smíchá se původní a restaurovaný obraz úměrně vnímanému kontrastu. S druhým parametrem, mírou restaurace μ , můžeme celý postup vyjádřit vztahy:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{mix} &= (1 - \mu)\mathbf{x} + \mu\mathbf{x} \\ \mathbf{x}_{thresh} &= \begin{cases} [1 - \frac{1}{\tau} \mathbf{c}_w(\mathbf{x})]\mathbf{x} + \frac{1}{\tau} \mathbf{c}_w(\mathbf{x})\mathbf{x} & \text{pro } |\mathbf{c}_w(\mathbf{x})| < \tau \\ \mathbf{x} & \text{jinak} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

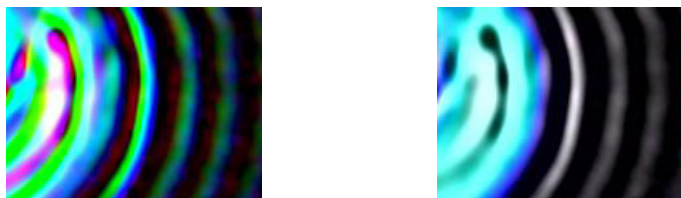
Pro výpočet kontrastu jsem použil jako základ Sobelův gradient, který je méně citlivý na šum. Kontrast jsem navíc průměroval v osmiokolí každého pixelu.

V části s experimentálními výsledky diskutuji vizuální účinky popsaného tlumení výsledků.

3.2.10 Barevný obraz

Teoretická část zahrnovala i popis problematiky restaurace barevného obrazu. Brantál a Šroubek [6] navrhovali provedení restaurace v jiném barevném prostoru. Jejich varianta nicméně zpracovává každý kanál zvlášť.

Navrhované metody jsou zpracovávány v barevném prostoru Yuv (intenzita Y a dvě chromatické složky). Restaurace po složkách nepřinesla zlepšení, na reálných datech dokonce docházelo k barevným posuvům. Zvolil jsem omezení restaurace pouze na kanál Y, a to ze dvou důvodů. U fotografií se můžeme smířit s tím, že se neobnoví barevná informace. Například kompresní formát JPEG chromatické složky obrazu degraduje, aby se zlepšila míra komprimace, a ztráta se výrazně neprojeví. Druhým důvodem je zmenšení náročnosti restaurace. Zpracováván bude jen jeden kanál.



Obr. 3.2.2 – Barevné artefakty: vlevo po složkách RGB, vpravo pouze v kanále Y.

3.3 GENETICKÝ VÝBĚR PARAMETRŮ ZKRESLENÍ

Parametry zkreslení jsou sice známy, ale jen z části. Například víme, že rozostření objektivu má přibližně tři až pět pixelů poloměr, šest lamel a bokeh není špatný. Modely odpovídající takovému popisu však mohou při restauraci podávat různé kvalitní výsledky. Pomoci při určení přesnějších parametrů modelu mohou právě genetické algoritmy.

Měřit kvalitu snímků strojově zatím není možné. Fotografie obecně, na rozdíl od astronomických snímků, jsou velmi různorodé. Lze tedy použít pouze interaktivní genetické algoritmy. Protože má člověk tendenci upřednostňovat jednoduché řešení, musí i algoritmus být jednoduchý. Každý parametr bude vybírán samostatně. Navržený algoritmus je inspirován *binárním vyhledáváním*.

Vstupní parametry – prvotní velikost kroku $\Delta\tau_0$ a prvotní hodnota τ_0 hledaného parametru τ – jsou subjektivně zvoleny člověkem před začátkem genetického výběru. Hodnota hledaného parametru v i -té generaci τ_i generuje obraz $\hat{x}(\tau_i)$.

V každé generaci budou vytvořeni tři kandidáti s krokem i -té generace $\Delta\tau_i$, kde i opět označuje číslo generace a $j = 0, 1, 2$ číslo kandidáta v jejím rámci:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{i0} &= \hat{x}(\tau_i - \Delta\tau_i) \\ \hat{x}_{i1} &= \hat{x}(\tau_i) \\ \hat{x}_{i2} &= \hat{x}(\tau_i + \Delta\tau_i)\end{aligned}\tag{3.3.1}$$

Jeden z nich vybere člověk jako nejlepší. Na základě toho se určí parametry další generace:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{i0}: \quad \tau_{i+1} &= \tau_i - \Delta\tau_i \\ \hat{x}_{i1}: \quad \Delta\tau_{i+1} &= \frac{1}{2} \Delta\tau_i \\ \hat{x}_{i2}: \quad \tau_{i+1} &= \tau_i + \Delta\tau_i\end{aligned}\tag{3.3.2}$$

Kandidát \hat{x}_{i0} je vytvořen na základě menšího parametru, například menšího poloměru rozostření. Je-li vybrán, hledaný výsledek leží ve směru zmenšené hodnoty. Není důvod měnit krok, zřejmě zatím člověku pro výběr stačí. Stejným způsobem je řešen případný výběr většího parametru – kandidáta \hat{x}_{i2} . V případě kandidáta \hat{x}_{i2} , který je stejný jako vybraný kandidát z minulé generace, je zřejmě krok moc velký, protože jím získáme jen horší výsledky. Krok je tedy snížen a je vytvořena nová generace. Poloviční krok zajišťuje dostatečně rychlou konvergenci k libovolně umístěnému řešení.

Výběr končí ve chvíli, kdy člověk nenalezne podstatný rozdíl mezi třemi kandidáty. Krok je již tak malý, že nemá vliv na výsledek a aktuální hodnotu parametru lze považovat za optimální odhad hledané hodnoty.

3.4 PROGRAMOVÁ REALIZACE

Původní zadání vyžadovalo implementaci vhodné metody jako zásuvného modulu standardní aplikace. Během práce bylo zjištěno, že výsledky jsou pro doostřování skutečných fotografií nepraktické, a tak jsem se s vedoucím DP dohodl, že bude stačit externí aplikace v některém vyšším programovacím jazyce. Tento nedostatek je kompenzován propracovanějším modelem zkrvení, implementací všech vybraných metod, sdružováním barev a genetickými algoritmy.

Pro vývoj aplikace jsem zvolil programovací jazyk Java SE 5.0 [14] pro objektovou orientaci, kvalitu dokumentace, nezávislost na platformě a opětovnou použitelnost kódu. Jako vývojové prostředí jsem posloužil Eclipse SDK 3.1.1 [15], který je standardním nástrojem pro vývoj Java aplikací. Manuál k aplikaci a popis konfigurace testovacího stroje jsou uvedeny v příloze. Médium s aplikací a jejím zdrojovým kódem je také přiloženo k diplomové práci.

3.4.1 Použité algoritmy a třídy

Vývoj zahrnuje mnoho postupů a kódu, který je společný pro více aplikací. Díky zapouzdřenosti balíků a tříd v Javě lze použít na více místech stejný kód a jeho integrace je rychlou záležitostí. Ve výjimečných případech jsem pro některé (z hlediska práce nedůležité nebo nezajímavé postupy) zvolil převzetí kódu od jiných autorů. Převzaté části jsou v popisu balíků a tříd jasně označeny. Není-li řečeno v popisu jinak, jsem výhradním autorem obsaženého kódu.

V průběhu práce jsem implementoval vlastní algoritmus FFT, nicméně ve známější radix-2 mutaci. Tato dovoluje aplikaci FFT pouze na sekvence délky mocniny dvou. Existuje samozřejmě i rychlý způsob výpočtu FFT pro libovolné rozměry sekvence. Je komplikovaný, a tak jsem se rozhodl do práce zakomponovat spolehlivý a rychlý balík `fftpack` [16], který je poskytován volně k šíření. Jde o jednorozměrnou transformaci, dvourozměrná verze nad ní musela být dopsána.

Druhou a poslední nevlastní částí kódu je dialog výběru souboru s funkcí náhledu. Balík je převzatý z Java Tutorial [17] a upravený pro vyvíjenou aplikaci. Pro výběr obrazu je náhled vhodnější.

3.4.2 Balíky a třídy

Balíky a třídy jsou pojmenovány a umístěny podle konvencí Javy. Zdrojové kódy se nalézají v adresáři src kořenového adresáře aplikace. Struktura:

- ☛ app – Hlavní balík aplikace, obsahuje spouštěcí třídu:
 - ☛ Hlavní – třída se vstupním bodem programu.
- ☛ app.gui – Aplikační GUI:
 - ☛ ActionListener – třída GUI se zpracováním událostí,
 - ☛ Nahled – prvek GUI s výběrem čtvercové oblasti obrazu,
 - ☛ VykreslenyObraz – náhledové okno obrazu.
- ☛ app.gui.exceptions – Výjimky načítání obrázků.
- ☛ app.parameters – Třídy pro předávání parametrů mezi třídami:
 - ☛ GenParameter – parametr s genetickým výběrem hodnoty,
 - ☛ PoleObrazu – cílové náhledy, kam má vlákno vykreslovat výsledky,
 - ☛ ProgressMeter – měření postupu výpočtu,
 - ☛ RestorationParams – parametry restaurace.
- ☛ app.threads – Vlákna, která provádějí přepočty a překreslování:
 - ☛ FullPreviewThread – vlákno pro náhled restaurace celého obrazu,
 - ☛ ProgressTimerTask – úloha pro časované obnovování postupu,
 - ☛ RecalculateThread – vlákno pro přepočet restaurace části obrazu,
 - ☛ RepaintRunner – rutina pro překreslování náhledů,
 - ☛ RestorationThread – vlákno provádějící restauraci obrazu,
 - ☛ SaveThread – vlákno s ukládající výsledek restaurace do souboru,
 - ☛ WaitAndRepaintThread – počká na dokončení a překreslí obraz.
- ☛ imutil – Pomůcky zpracování obrazu (FFT, dekonvoluce apod.):
 - ☛ Fft2 – třída s metodami dvourozměrné FFT,
 - ☛ HybridCoordsTransformer – převodník hybridních souřadnic,
 - ☛ MatrixUtil – pomocné metody pro práci s maticemi,
 - ☛ Methods – třída s restauračními metodami,
 - ☛ PsfUtil – metody pro generování a práci s PSF.
- ☛ imutil.exceptions – Výjimky zpracování obrazu.
- ☛ app.gui.imagefc – Dialog souborů s náhledem, převzato ze [17].
- ☛ ca.uol.aig.fftpack – Jednorozměrná FFT, převzato z [16].

3.5 DISKUSE VÝSLEDKŮ

3.5.1 Měření kvality výsledků

Zaměřením této práce je zjištění využitelnosti restauračních metod v běžné digitální fotografii. Kvalitu restaurace z hlediska estetiky ovšem není možné nijak změřit. Výsledky budou hodnoceny na základě hladkosti a věrnosti originálu a celkového vzhledu.

3.5.2 Vliv modelu zkreslení

Jako testovací obrázek byl použit cameraman.png, který je k nalezení na příloženém CD. Vliv modelu zkreslení je testován na umělém rozostření, aby byl k dispozici přesný popis zkreslujícího systému. Rozostřený obraz byl vždy porušen Gaussovým šumem s parametry $\mu = 0$ a $\sigma^2 = 10^{-4}$. Použitý výřez originálu je na obrázku 3.5.1. Použitá metoda je Wienerova s $NSR = 0,005$.

Jako první byl vyzkoušen obraz rozostřený neutrálním kruhovým bokeh s $r = 5$. Na obrázku 3.5.2 jsou výřezy z restaurací neutrálním, špatným a dobrým bokeh s poloměry, pro které byly obdrženy nejlepší výsledky. Stejným postupem byly získány výřezy na obrázcích 3.5.3 pro špatný bokeh a 3.5.4 pro dobrý bokeh.

Z výsledků je zřejmé, že tvar PSF má významný vliv na restauraci. Zatímco neutrální bokeh lze restaurovat i dobrým bokeh, špatný bokeh nelze restaurovat jiným a dobrý bokeh podává stejně špatné (hladké) výsledky se všemi základními typy modelů, a to včetně původního. Nejlépe se obnoví obraz porušený špatným rozostřením. Snad proto, že ve frekvenční oblasti má ze tří modelů nejvíce zastoupeny vysoké frekvence.



Obrázek 3.5.1
Výřez originálu.



Obrázek 3.5.2 – Rozostření je neutrální, kruh $r = 5$. Restaurováno: a) špatný bokeh, kruh $r = 4$; b) původní rozostření; c) dobrý bokeh, kruh $r = 6$.



Obrázek 3.5.3 – Rozostření špatné, kruh $r = 5$. Restaurováno: a) původní rozostření; b) neutrální bokeh, kruh $r = 6$; c) dobrý bokeh, kruh $r = 8$.



Obrázek 3.5.4 – Rozostření je dobré, kruh $r = 5$. Restaurováno: a) špatný bokeh, kruh $r = 3$; b) dobrý bokeh, kruh $r = 4$; c) původní rozostření.

Druhá zkouška modelu ověří smysluplnost zavedení počtu lamel a polygonálního tvaru PSF. Opět bude bokeh o poloměru $r = 5$, neutrální – trojúhelníkového tvaru na obrázku 3.5.5 a pětiúhelníkového na obrázku 3.5.6.

Zde je již důležitost správného modelu, který zahrnuje i počet lamel, přinejmenším sporná. Trojúhelníkové rozostření je extrémní případ, oba další modely při jeho restauraci selhaly. Tvar trojúhelníku je výrazně odlišný od ostatních. Od šestiúhelníku směrem k více lamelám, navíc i zakřiveným, jistě jako model postačí kruh, nechce-li uživatel velmi přesné výpočty. Na obrázku 3.5.6 je mezi pětiúhelníkem a kruhem ještě znatelný rozdíl.

Ostatní parametry přinesly velmi malé zlepšení, které se při experimentech výrazně neprojevilo a nemá smysl je uvádět. Důležitý je pouze typ bokeh a případně počet lamel (rozdíl je patrný ještě u šesti lamel, větší počet už je velmi podobný kruhu).

3.5.3 Pohybové doostření

U pohybového doostření se očekává jediný pozitivní výsledek, a to zlepšení restaurace při malém pohybovém rozostření. Na obrázcích 3.5.7a a 3.5.7b jsou porovnány výsledky doostření obrázku pohybem s $r_{hybrid} = 3$, čtyřmi lamelami a čtvrtinovou šířkou. Doostření stejným PSF je na obrázku 3.5.7a a jeho protějškem je doostření z Adobe® Photoshop®, které je založené na Gaussovu rozostření. Výsledky ukazují,

že doostření pouze ve směru pohybu podává mnohem lepší výsledek, přesně podle očekávání. Výrazná je změna textury na pozadí obrazu. Nové detaily do obrazu navržená varianta přesto nepřinesla.



Obrázek 3.5.5 – Rozostření je neutrální, trojúhelník $r = 5$. Restaurováno: a) neutrální bokeh, kruh $r = 4,5$; b) původní rozostření; c) pětiúhelníkový bokeh $r = 4,5$.



Obrázek 3.5.6 – Rozostření je neutrální, pětiúhelník $r = 5$. Restaurováno: a) neutrální bokeh, kruh $r = 5$; b) trojúhelníkový bokeh $r = 6$; c) původní rozostření



Obrázek 3.5.7 – Doostření pohybového rozmazání: a) PSF se zohledněním směru pohybu; b) Gaussovým rozostřením z Adobe® Photoshop®.

3.5.4 Porovnání metod

Výsledky, z nichž vychází porovnání metod, jsou pro umělé rozostření v obrazové příloze A a pro skutečné v příloze B. Společně s výsledky navržených metod jsou uvedeny i výsledky srovnávacího software – FocusFixer [18] a Focus Magic [19], komerčních zásuvných modulů do aplikace Adobe® Photoshop®.

Wienerova dekonvoluce je oproti vázané dekonvoluci hladší a stabilnější v přítomnosti šumu. Je lepší i při velkém rozostření. Oproti ostatním metodám však trpí větší ztrátou detailů. Hladkost lze totiž vynutit právě obětováním detailů – zvýšením předpokládaného NSR. Celkový vzhled je uspokojující pro malá rozostření.

Vázaná dekonvoluce silně trpí přítomností šumu. Při větším rozostření se v obraze objevuje velmi hrubé zrno, jak je vidět například v příloze B mezi ušima kočky. Má ale i silnou stránku. Oproti Wienerově filtraci podává lepší výsledky při menším rozostření (zhruba do $r = 3$). Celkový vzhled je uspokojující pro malá rozostření.

Kangova metoda slibuje velmi dobré výsledky, ale v současné implementaci jich nedosahuje. Je stejně odolná proti šumu jako Wienerův filtr a podává ostřejší obraz než vázaná dekonvoluce. Obnovila i více detailů než srovnávací software, na úkor zesílení šumu. Silnou nevýhodou je výpočetní náročnost iterací. Výsledky nelze považovat za směrodatné, jde o metodu, kterou se nepodařilo plně implementovat.

Ani jedna z metod nepodala dostatečně dobré výsledky pro velká rozostření (např. Wienerova dekonvoluce v příloze C). Srovnávací software má hladší výsledky, ale hrany lépe vyostřují navržené metody.

3.5.5 Tlumení výsledků

V obrazové příloze B a C jsou výsledky restaurace prahovány. Na obrázcích s úrovní prahu 0 % jsou jasně vidět rušivé Gibbsovy artefakty. Už při prahu 10 % artefakty mizí. Je to však na úkor detailů v obraze. Na obrázku kočky a modelu jsou při bližším pohledu znatelná roztřepení okrajů – ta plynou z nedostatečného vyhlazení prahovacího kritéria. Na obrázku baletky je kontrast tak silný, že artefakty nešlo zcela potlačit, hrana je silně zvýrazněna. Prahování s kritériem vypočteným z rozostřeného originálu se ztratí i některé detaily, které v původním obraze nebyly

dostatečně zřetelné. Na obrázku modelu je na přeexponovaném oděvu patrné, že Gibbsovy artefakty vznikají i vlivem těchto oblastí.

3.6 PONAUCENÍ

Práci jsem obětoval mnoho času a úsilí. Výsledek nebyl takový, jaký jsem čekal, uvedené metody nejsou vhodné pro restauraci dobrou po estetické stránce. Zjistil jsem, že restaurace obrazu je poměrně čerstvě se rozvíjející oblast vědy a panuje v ní dosud značná roztržitost. Mnoho metod je věnováno specifickému účelu – jako je astronomie, mikroskopie, lékařství – a většina metod je tak nepoužitelná pro účel ostření běžných fotografií. Mnoho metod stále patří jen úzkému kruhu zasvěcených numerických matematiků.

Poučil jsem se z chyb, kterých jsem se během práce dopustil. Hlavní chybou bylo přílišné lpění na jedné metodě. Místo velmi dlouhé a téměř marné snahy o implementaci Kangovy a Katsaggelosovy metody (ačkoliv při každém pokusu se zdálo, že je úspěch na dosah) jsem měl upřít svou pozornost k jiným metodám, nebo se zaměřit více na klasické metody.

4 ZÁVĚR

Práce si kladla za cíl prozkoumat možnosti restaurace obrazu v běžné digitální fotografii a implementovat jednu pokročilou metodu. Během práce bylo zjištěno, že problematika restaurace je hluboká a není snadné pokročilé metody úspěšně používat. Mnoho metod patří do úzkého okruhu problémů jako jsou astronomická pozorování, mikroskopie a lékařství.

Byly implementovány dvě klasické metody doostřování – Wienerova dekonvoluce a vázaná dekonvoluce, společně s nimi pro srovnání pseudoinverze a standardní doostřovací filtr. Z části byla implementována i regularizační metoda. U fotografií se pro malá rozostření (do poloměru tří pixelů) jeví jako dobrá kterákoliv z těchto metod, s výjimkou pseudoinverzních filtrů. Pro velká rozostření pak z estetického hlediska selhávají všechny. Obraz trpí nepříjemnými artefakty v okolí ostrých přechodů intenzity a zesíleným šumem. Doostřovací filtr neumí informace obnovit.

Klasické metody byly naprogramovány v samostatné aplikaci v jazyce Java. Původní zadání vyžadovalo implementaci zásuvného modulu do standardního editoru, ale po domluvě bylo od požadavku upuštěno, protože výsledky metod nejsou praktické. Aplikace obsahuje i jednoduchý interaktivní genetický algoritmus, aby usnadnila hledání hodnot parametrů.

Hlavním přínosem mé práce je prozkoumání možnosti použití detailního modelu zkreslení. Z experimentů vyšlo najevo, že podstatný je pouze typ a poloměr bokeh a případný malý počet nezakřivených lamel clony. Navržený model tak může doznat podstatného zjednodušení, aniž by výrazně utrpěla kvalita restaurace. Druhotným přínosem je omezení barevných artefaktů obrazu restaurací v barevném prostoru Yuv s omezením na kanál Y. Neobnovená barevná informace není výrazná ztráta, podobně jako u komprese JPEG. Dalším přínosem je také aplikace prahování, které zohledňuje vnímání obrazu člověkem.

Pro případné navazující práce doporučuji tři oblasti zájmu. První je studium regularizačních a jiných moderních metod (nejlépe ve spolupráci s katedrou matematiky). Druhou je návrh předzpracování, zpracování a dopracování obrazu takových, aby fotografie esteticky vyhovovaly a neobsahovaly artefakty (například ve spolupráci s Ústavem umění a designu). Poslední doporučovanou možností je návrh genetického algoritmu, který by uměl hledat optimální parametry PSF bez člověka.

PŘEHLED ZKRATEK A ZNAČENÍ

ZKRATKY

CCD	zařízení s vázanými náboji, <i>charge-coupled device</i>
CD	kompaktní disk, <i>compact disc</i>
DFT	diskrétní Fourierova transformace, <i>discrete Fourier transform</i>
DP	diplomová práce
FFT	rychlá Fourierova transformace, <i>fast Fourier transform</i>
GCV	zobecněná křížová validace, <i>generalised cross-validation</i>
GUI	grafické uživatelské rozhraní, <i>graphical user interface</i>
HSB	barevný systém tón, saturace, světlost, <i>hue, saturation, brightness</i>
HSI	barevný systém tón, saturace, intenzita, <i>hue, saturation, intensity</i>
IDFT	inverzní DFT, inverse <i>discrete Fourier transform</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JPEG	formát <i>Joint Photographic Experts Group</i>
MSE	střední kvadratická odchylka, <i>mean squared error</i>
NSR	poměr šum/signál, <i>noise-to-signal ratio</i>
PSF	bodová rozptylová funkce, <i>point spread function</i>
RGB	barevný systém červená, zelená, modrá, <i>red, green, blue</i>
SDK	nástroj pro vývoj software, <i>software development kit</i>
SE	<i>Standard Edition</i>
SNR	poměr signál/šum, <i>signal-to-noise ratio</i>
TV	totální variace, <i>total variation</i>

POUŽITÉ ZNAČENÍ

(1.2.3)	odkaz na vzorec v textu
{1.2.3}	odkaz na část textu
[1]	odkaz na literaturu, zdroj informací nebo stránku projektu
<i>hloubka ostrosti</i>	důležitý termín nebo termín, který bude záhy vysvětlen
<i>depth of field</i>	termín v původním jazyce, nejčastěji v angličtině
cameraman.png	název souboru, třídy nebo programu

LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ

- [1] Olympus Imaging Europa GmbH. *Frequently Asked Questions on Digital Photography* [online]. Publikováno 20. 10. 2006 [cit. 27. 8. 2007].
URL: »http://www.olympus-europa.com/consumer/208_faqs.cfm«
- [2] BARTSCH, Hans-Jochen. *Matematické vzorce*. Druhé vydání Praha: SNTL, 1987. 832 s.
- [3] Jan, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. Druhé vydání Brno: VUTIUM, 2002. 427 s. ISBN 80-214-1558-4.
- [4] Adobe Systems, Inc. *Adobe® Photoshop®*. Ver. 9.0 CS2. Komerční licence.
URL: »<http://www.adobe.com/products/photoshop/family/>«
- [5] PIXA, M. *Doostřování obrázků*. Plzeň, 2007. 34 s. Bakalářská práce na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Katedra informatiky a výpočetní techniky. Vedoucí bakalářské práce Petr Lobaz.
- [6] BRANTÁL, ŠROUBEK. *Vícekanálová slepá dokonvoluce vektorových obrazů*. (Interní publikace DAR – ÚTIA 2007/3) ÚTIA AV ČR, Praha 2007, 95 s.
- [7] KANG, KATSAGGELOS. General choice of the regularization functional in regularized image restoration. In *IEEE Trans. Image Processing*, 4:594–602, 1995. ISSN 1057-7149.
- [8] XUE, LIU, FAN. Iterative Image Restoration using a Non-Local Regularization Function and a Local Regularization Operator. In *IEEE The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*, 3:766–769, 2006.
ISBN 0-7695-2521-0, ISSN 1051-4651.
- [9] BAR, BROOK, SOCHEN, KIRYATI. Deblurring of Color Images Corrupted by Impulsive Noise. In *IEEE Transactions on Image Processing Volume 16*, 4:1101–1111, 2007. ISSN 1057-7149.

- [10] BAR, BROOK, SOCHEN, KIRYATI. *Color Image deblurring* [online]. Publikováno 10. 5. 2007 [cit. 27. 8. 2007].
URL: »<http://www.ece.umn.edu/users/barxx002/presentations/color.pdf>«
- [11] GONZALEZ, WOODS, EDDINS. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 2004. 609 s. ISBN 0-13-008519-7.
- [12] The MathWorks, Inc. *MATLAB*®. Ver. 7.1. Komerční licence.
URL: »<http://www.mathworks.com/products/matlab/>«
- [13] BRAJOVIC, V. Brightness Perception, Dynamic Range and Noise: a Unifying Model for Adaptive Image Sensors. In *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04)*, 2:189–196, 2006. ISSN 1063-6919.
- [14] Sun Microsystems, Inc. *Java™ 2 Platform Standard Edition 5.0*.
URL: »<http://java.sun.com/javase/>«
- [15] The Eclipse Foundation. *Eclipse SDK 3.1.1*.
URL: »<http://www.eclipse.org>«
- [16] ZHANG, B. *jfftack*. Poslední revize 2. 7. 2007.
URL: »<http://netlib.sandia.gov/fftack/>« [cit. 27. 8. 2007]
- [17] Sun Microsystems, Inc. *The Java™ Tutorials*. Poslední revize 1. 8. 2007.
URL: »<http://java.sun.com/docs/books/tutorial/index.html>« [cit. 27. 8. 2007]
- [18] FixerLabs. *FocusFixer*. Ver. 1.4.0. Komerční licence.
URL: »http://www.fixerlabs.com/EN/photoshop_plugins/focusfixer.htm«
- [19] Acclaim Software Ltd. *Focus Magic*. Komerční licence.
URL: »<http://www.focusmagic.com/>«

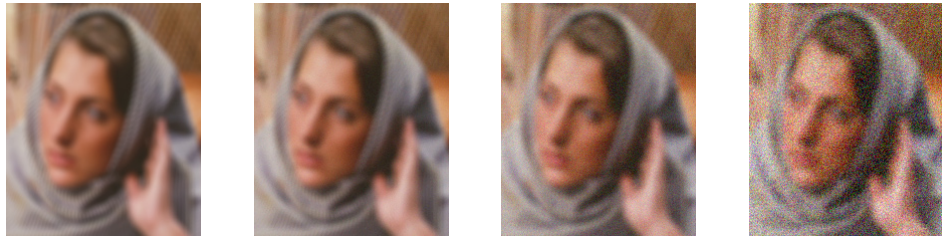
PŘÍLOHY

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA A

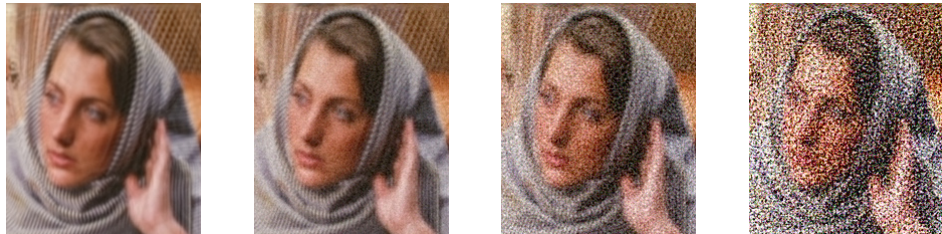
Vyobrazeno: a) výřez originálu; v řadách vedle sebe kvantizační šum, rozptyl 10^{-4} , 10^{-3} a 10^{-2} ; b) rozostřený obraz, kruhové jádro $r = 5$; c) Wienerova filt., NSR = 0,005; d) vázaná dekonvoluce, $\lambda = e^4$; e) Kangova metoda, 100 iterací; f) srovnávací software FixerLabs FocusFixer.



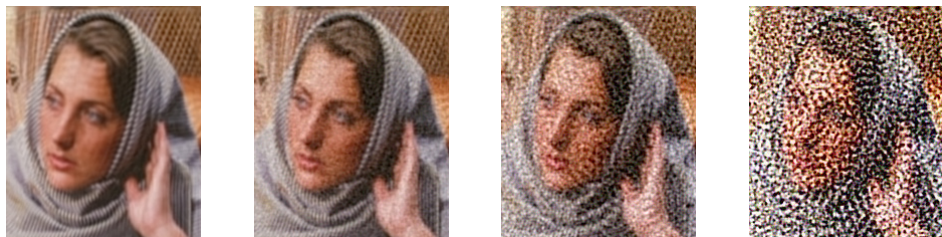
b)



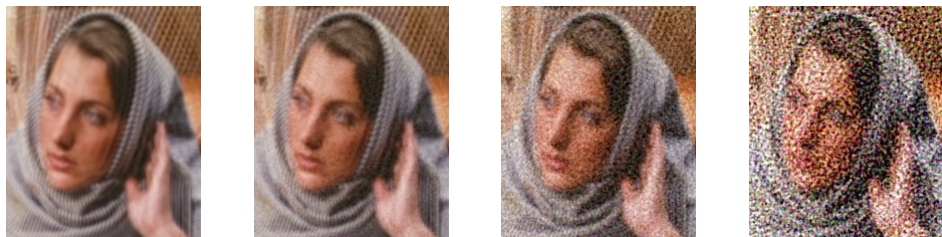
c)



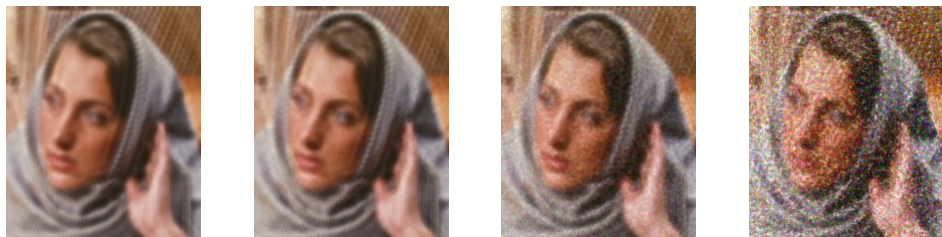
d)



e)



f)



OBRAZOVÁ PŘÍLOHA B

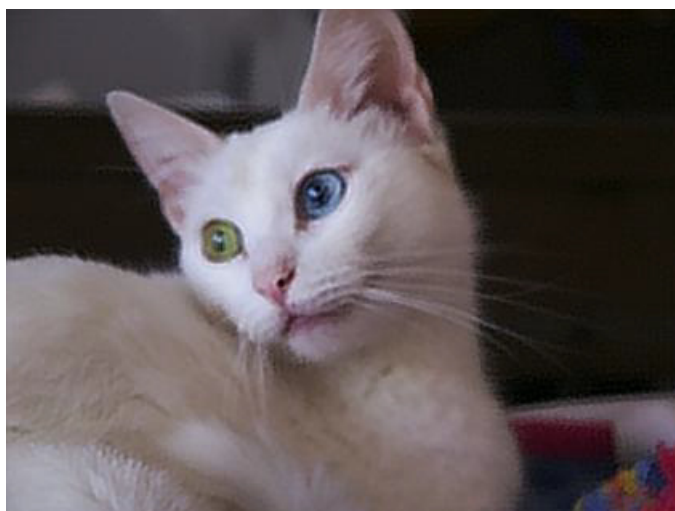
Příklad doostření reálné fotografie. Navržené metody jsou srovnávány se software FocusLabs FocusFixer. Na prvním listě originál a Wienerova dekonvoluce, na druhém listě vázaná dekonvoluce a Kangova metoda, na třetím listě srovnávací software FixerLabs FocusFixer a druhý srovnávací software Focus Magic.



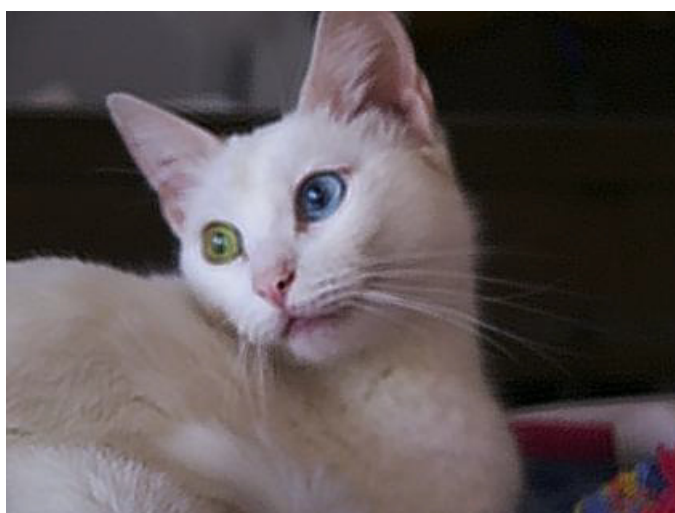
a) Původní rozostřená fotografie kočky, pořízená fotoaparátem Minolta Dimage 7. Obrázek byl před restaurací zmenšen.



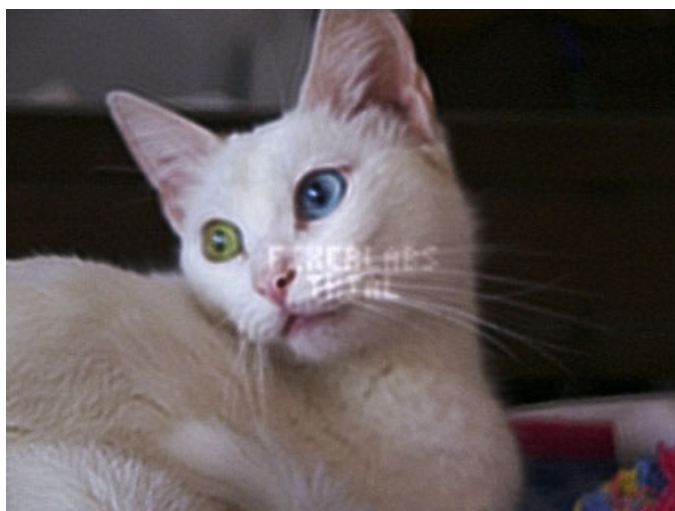
b) Restaurovaný obraz metodou Wienerovy dekonvoluce. Parametry NSR = 0,04, neutrální kruhový bokeh $r = 2,8$, práh účinku 12,8 %.



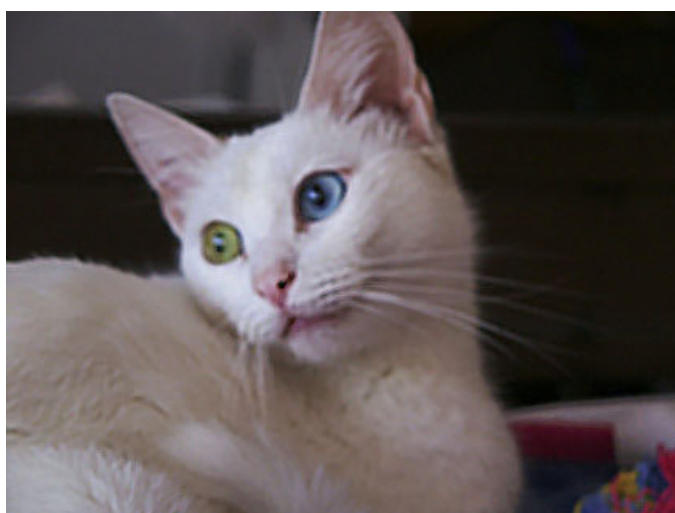
*c) Restauovaný obraz metodou vázané dekonvoluce.
Parametry $\lambda = e^{4,5}$, neutrální kruhový bokeh $r = 2,8$, práh účinku 11,2 %.*



*d) Restauovaný obraz Kangovou metodou.
Sto iterací, neutrální kruhový bokeh $r = 2,8$, práh účinku 7,8 %.*



e) Srovnávací software FixerLabs FocusFixer. Použita byla pouze trial verze, proto se zobrazuje bílý nápis. Poloměr 4,0.



f) Srovnávací software FocusMagic. Průměr 5,0.

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA C

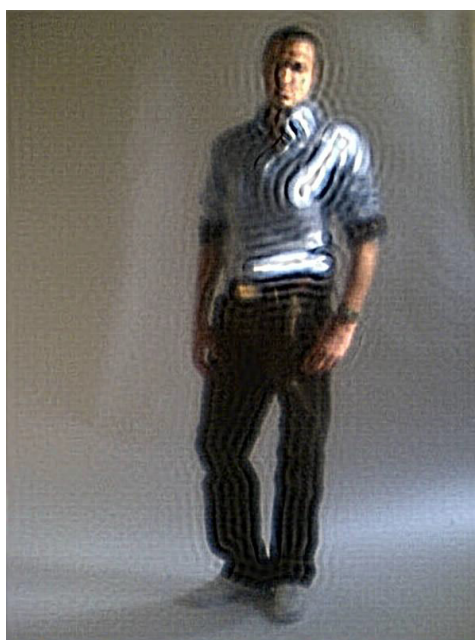
Příklady doostření silněji rozostřené reálné fotografie s prahováním. Použitá metoda je v obou případech Wienerova dekonvoluce s parametry $NSR = 0,005$ a kruhovým rozostřením $r \approx 8$. Na prvním listě je obrázek baletky, na druhém model.



a) Prahování 0 %.



b) Prahování 10 %.



c) Prahování 0 %.



d) Prahování 10 %.

KONFIGURACE TESTOVACÍHO STROJE

Procesor:	AMD Athlon™ 64 3000+ (1,81 GHz)
Operační paměť:	1 GB
Grafická karta:	ATI Radeon™ X600, 256 MB
Operační systém:	Microsoft Windows® XP Professional SP2
Matematická aplikace:	MATLAB® 7.1
Grafický editor:	Adobe® Photoshop® 9.0 CS2 „Space Monkey“
Sazba:	Adobe® InDesign® 3.0 CS
Vývojové prostředí:	Eclipse SDK 3.1.1
Prostředí Java:	Java™ 2 SE 5.0

UŽIVATELSKÝ MANUÁL

Systemové požadavky

Operační systém:	MS Windows® XP (s vlastním překladem libovolný OS)
Verze Java:	JRE 5.0 a vyšší
Operační paměť:	512 MB a více
Rozlišení obrazovky:	1024 × 768 a vyšší
Místo na disku:	10 MB a více
Nastavení systému:	systemová proměnná PATH nastavena pro adresář Javy

Seznam souborů a adresářů

Aplikace se na přiloženém CD nachází v adresáři aplikace. Struktura:

- ☛ [dir] src – Adresář se zdrojovými soubory programu.
 - ☛ manifest.txt – Soubor manifest pro překlad programu.
- ☛ imrestore.jar – Předkompilovaná aplikace pro Windows® XP.
- ☛ make.bat – Dávka pro překlad programu.
- ☛ run-win.bat – Dávka pro spuštění aplikace s větší dostupnou pamětí.

Spuštění a překlad

Spuštění aplikace je možné trojím způsobem. Prvním je přímé vyvolání souboru `imrestore.jar`. Je-li k tomuto typu souboru správně přiřazena Java, aplikace se spustí. Druhým způsobem je vyvolání souboru `run-win.bat`. Za stejných podmínek, používáte-li navíc prostředí Windows, spustí dávka aplikaci s vyšší kvótou pro spotřebu paměti (maximum zvýší na 512 MB, základní paměť na 64 MB). Posledním způsobem je přímé vyvolání z příkazové řádky spouštěcími soubory Javy, kde si uživatel může zvolit mj. vlastní nastavení paměti.

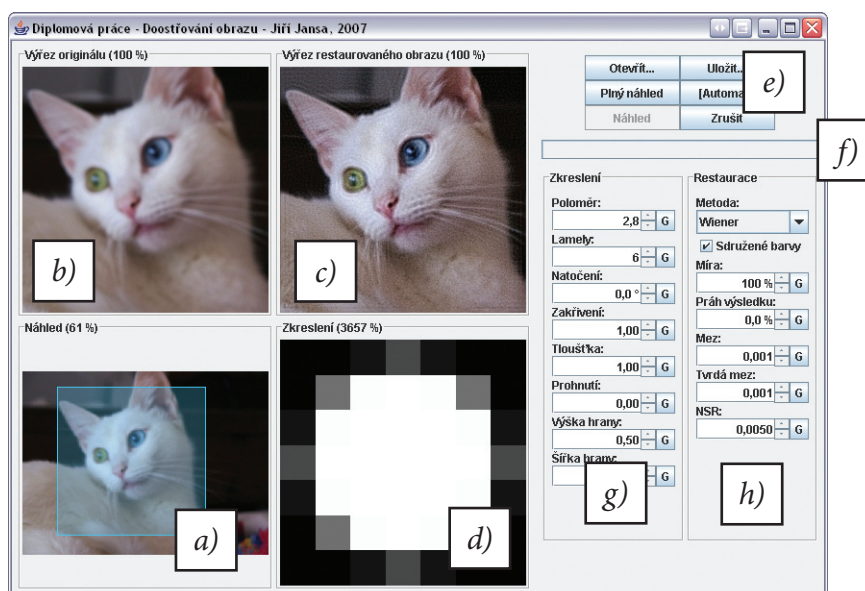
Překlad aplikace je připraven dávkově pro prostředí Windows. Spuštěním dávky `make.bat` se nejprve vytvoří překlady tříd, pak se vše zabalí do souboru JAR a již nepotřebné třídy se opět vymažou. Pro manuální překlad je třeba přeložit vše v adresáři `src`. Hlavní (spouštěcí) třídou je `app.Hlavní` (umístěná ve zdrojovém adresáři dle konvencí Javy). Soubor manifestu obsahuje definici spouštěcí třídy.

Uživatelské prostředí aplikace

Po spuštění aplikace se objeví hlavní okno (obr. 1). Dělí se do čtyř částí – *obrazy*, *tlačítka ovládání*, *parametry zkreslení* a *parametry restaurace*.

V části s obrazy se nachází čtyři náhledy – výřez původního obrazu a výřez restaurovaného obrazu, náhled celého obrazu s výběrem výřezu a zkreslující funkce. V závorce za popisem náhledu je uvedeno procentuální zvětšení zobrazení oproti originálu. Náhled celého obrazu je ze čtyř obrazů jediný ovladatelný. Po kliknutí na něj se v místě kurzoru nastaví nová pozice výřezu. Je-li čtverec (označující výřez) modrý, aplikace nepracuje, je-li červený, aplikace právě vypočítává restaurovaný výřez obrazu. Postup výpočtu je zobrazen i ve stavovém pruhu pod tlačítky ovládání. Výřez má rozměry 256×256 pixelů.

Tlačítka ovládání jsou: *Otevřít*, *Uložit*, *Plný náhled*, *[Automat.]*/*[Manuál]*, *Přepočítat* a *Zrušit*. Tlačítko *Otevřít* vyvolá dialog souboru k otevření (obr. 2) a tlačítko *Uložit* vyvolá podobný dialog pro uložení souboru. Dialog má i funkci náhledu pro lepší orientaci v souborech. Uložení souboru po výběru umístění vyžaduje přepočet restaurace celého obrazu (stav jejího postupu se zobrazuje v novém okně), který může trvat i několik desítek sekund (v závislosti na velikosti obrazu a zvolené metodě restaurace). Chcete-li jen vidět výsledek restaurace celého obrazu, použijte tlačítko



Obr. 1 – Základní GUI aplikace: a) náhled originálu s výběrem výřezu; b) výřez originálu; c) restaurovaný výřez; d) PSF; e) tlačítka ovládání; f) stavový pruh; g) parametry PSF; h) parametry restaurace.

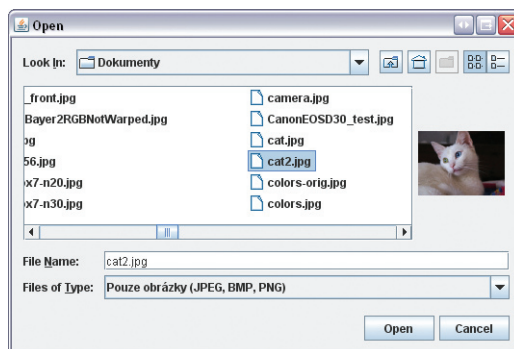
Plný náhled. Na pozadí se provede výpočet restaurace (stav jejího postupu se opět zobrazuje v novém okně) a poté se otevře náhledové okno obsahující pouze celý obraz v originální velikosti. Je-li metoda náročná a přepočítání malých náhledů trvá dlouhou dobu, lze vypnout automatický náhled tlačítkem *[Automat.]*/*[Manuál]*. Pokud je tlačítko ve stavu *[Automat.]*, obrazy se přepočítávají pravidelně. Je-li ve stavu *[Manuál]*, musí se přepočítání provést ručně tlačítkem *Přepočítat*.

Parametry zkreslení umožňují změnit tvar PSF. To se vždy přepočítá automaticky. Tlačítka s písmenem „G“ vyvolají genetický výběr daného parametru (popsáno dále v návodu). Obsahuje-li hodnota parametru jednotky (např. stupně), je nutné při editaci dodržet formát zápisu. Hodnoty lze plynule měnit malými šipkami vedle editačního pole, nebo v režimu editace šipkami nahoru a dolů na klávesnici.

Parametry zkreslení:

- ☛ *Poloměr* – Střední poloměr PSF. Nulová hodnota vytvoří jediný pixel.
- ☛ *Lamely* – Počet lamel clony. Neprojeví se při plném zakřivení.
- ☛ *Natočení* – Natočení PSF. Základní jednotka je úhlový stupeň.
- ☛ *Zakřivení* – Zakřivení lamel clony.
- ☛ *Tloušťka* – Upravuje zúžení PSF. Plná hodnota znamená normální tvar.
- ☛ *Prohnutí* – Prohnutí nebo vyboulení PSF. Definuje špatný (1), neutrální (0) a dobrý (-1) bokeh.
- ☛ *Výška hrany* – Výška hrany na okraji PSF. Může být i záporná. Je-li je šířka hrany nulová, neprojeví se.
- ☛ *Šířka hrany* – Šířka hrany na okraji PSF. Je-li je výška hrany nulová, neprojeví se.

Parametry restaurace umožňují změnit způsob restaurace obrazu. Tlačítka „G“ opět vyvolávají genetický výběr daného parametru (popsáno dále v návodu). Pokud



Obr. 2 – Dialog otevření souboru s náhledem.

hodnota parametru obsahuje jednotky (např. stupně), je nutné při editaci dodržet formát zápisu. Hodnoty lze plynule měnit malými šipkami vedle editačního pole, nebo v režimu editace šipkami nahoru a dolů na klávesnici.

Parametry restaurace:

- ❖ *Metoda* – Použitá metoda pro restauraci. *Pseudo 1* a *Pseudo 2* jsou pseudo-inverzní varianty, *Wiener* je Wienerova dekonvoluce, *Vázaná dekonv.* je pro vázanou dekonvoluci, *Doostř. filtr* je standardní doostřovací filtr používající PSF, *Kang et al.* je iterativní regularizační metoda (časově velmi náročná).
- ❖ *Sdružené barvy* – Je-li zaškrtnuto, provádí se restaurace pouze v kanále intenzity (Y z Yuv). Pokud není zaškrtnuto nebo je obraz šedotónový, provede se restaurace po složkách.
- ❖ *Míra* – Míra účinku restaurace v procentech.
- ❖ *Práh výsledku* – Prahování výsledku podle hran originálu.
- ❖ *Tvrdá mez* – Tvrdá mez amplitudy, pod kterou se frekvence ztratí. Není pro doostřovací filtr a Kangovu metodu.
- ❖ *Mez* – Měkká mez amplitudy, na kterou se frekvence limitují. Není pro doostřovací filtr, pseudoinverzi v první variantě a Kangovu metodu.
- ❖ *NSR* – Poměr šumu k signálu. Pouze pro Wienerův filtr.
- ❖ *Lambda* – Parametr vázané dekonvoluce (zadáva se exponent, hodnota je pak příslušnou mocninou Eulerova čísla). Pouze u vázané dekonvoluce.
- ❖ *Míra doostření* – Míra účinku doostření. Pouze pro doostřovací filtr.
- ❖ *Práh doostření* – Nejmenší hodnota doostření, pod kterou se změna úplně ignoruje. Pouze pro doostřovací filtr.
- ❖ *Iterace* – Počet iterací, pouze u Kangovy metody.

Pokud použijete genetické algoritmy k výběru parametrů, otevře se okno genetického výběru (obr. 3). Zde se nachází tři obrázky (s popiskem). Levý horní je výsledek restaurace s aktuální hodnotou parametru. Spodní obrázek je pro hodnotu o daný krok zmenšenou (lze nastavit v editačním poli). Pravý obrázek je výsledek se zvětšenou hodnotou. Kliknutím na obrázek vyberte ten, který podává nejlepší výsledky. Je-li to pravý nebo spodní obrázek, hodnota parametru se změní. Zvolíte-li aktuální hodnotu parametru jako nejlepší, zmenší se krok. Ve všech případech se po kliknutí obrazy přepočtou. Není-li znatelný rozdíl mezi třemi nabízenými obrázky, výběr parametru je dokončen.



Obr. 3 – Okno genetického výběru.

Nastane-li nestandardní situace, mohou se objevit chybová hlášení a upozornění:

- ❖ *Chyba čtení* – Soubor se nepodařilo otevřít.
- ❖ *Nedostatek paměti* – Při načítání nebo zpracování došla paměť. Přiřadte programu větší kvóty.
- ❖ *Chyba formátu* – Načítaný soubor má nevhodný formát nebo je poškozen.
- ❖ *Nevhodný počet kanálů* – Obraz není šedotónový nebo RGB.
- ❖ *Není co zobrazit* – Plný náhled se nepodařilo vygenerovat.
- ❖ *Není co uložit* – Restaurovaný obraz se nepodařilo vygenerovat a uložit.
- ❖ *Chyba zápisu* – Nastala chyba při zápisu souboru.
- ❖ *Chyba zpracování* – Při zpracování došlo k interní chybě aplikace.

Podporované grafické formáty jsou JPEG, PNG a BMP, pokud jsou šedotónové nebo v barevném systému RGB.

Doporučení ke zpracování obrazu:

- ❖ Obraz doostřujte se sdruženými barvami. Pouze v případě, že se v obraze nacházejí čistě barevné přechody (hrana není dána intenzitou), je vhodné sduřování vypnout.
- ❖ Z obrazu před doostřováním odstraňte šum, například aplikací Noise Ninja nebo Neat Image.
- ❖ Výběr parametrů PSF provádějte v pořadí: průměr, prohnutí, zakřivení, počet lamel. Další parametry slouží k jemnému doladění výsledku. V případě pohybového rozostření je určující ještě natočení a tloušťka.

- ❖ Odladte parametry PSF s metodou Wiener. Pak vyzkoušejte i ostatní metody a prahování, abyste zjistili, co poskytuje lepší výsledek.
- ❖ Probíhající operaci můžete ukončit tlačítkem Zrušit, trvá-li moc dlouho.
- ❖ Objevují-li se ve výsledku silně kontrastní pásy a vlny, je pravděpodobné, že je poloměr PSF příliš velký.
- ❖ Metodu Kang et al. lze použít pouze pro malá rozostření a malé rozměry obrazu. Při větších rozměrech je tato metoda časově velmi náročná.
- ❖ Pro pohybové rozostření používejte čtverec, nulové zakřivení a malou tloušťku.

OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- ❖ [dir] aplikace – Kořenový adresář aplikace (programové realizace).
 - ❖ [dir] src – Adresář se zdrojovým kódem programu.
 - ❖ imrestore.jar – Spustitelný JAR soubor s přeloženou aplikací.
 - ❖ make.bat – Dávka na překlad aplikace (Windows).
 - ❖ run-win.bat – Dávka na spuštění aplikace s větší pamětí (Windows).
- ❖ [dir] obrazy – Adresář s testovacími obrazy.
 - ❖ [dir] ostatni – Různé obrazy k vyzkoušení.
 - ❖ [dir] restaurace – Obrazy použité v dokumentaci.
 - ❖ baletka.jpg – Obrázek „Baletka“.
 - ❖ barb_512x512.bmp – Obrázek „Barbara“.
 - ❖ cameraman.png – Obrázek „Kameraman“.
 - ❖ cat2.jpg – Obrázek „Kočka“ (zmenšený).
 - ❖ model.jpg – Obrázek „Model“.
- ❖ [dir] pluginy – Srovnávací zásuvné moduly do Adobe Photoshop.
 - ❖ [dir] Focus Magic – Instalátor zásuvného modulu Focus Magic.
 - ❖ [dir] FocusFixer – Instalátor zásuvného modulu FocusFixer.
- ❖ dp.pdf – Elektronická verze tohoto dokumentu.