



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ADAPTIVNÍ ZOSTŘOVÁNÍ OBRAZU

ADAPTIVE IMAGE SHARPENING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

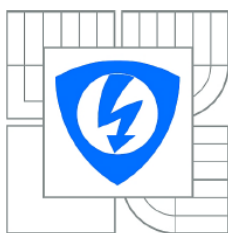
ROMAN JAKUBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Ing. JIŘÍ JAN, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Roman Jakubíček
Ročník: 3

ID: 119710
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Adaptivní zostřování obrazu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte princip konvoluční filtrace obrazů a speciálně s podstatou ostření obrazu konvolučními operátory. Zaměřte se zejména na zostřující operátory s možností řízení stupně ostřední. Vytvořte program pro zostřování libovolného obrazu s volitelnými možnostmi:

1. s isoplanárním volitelným stupněm zostření,
2. s adaptivním stupněm zostření s volitelnou závislostí na lokálním rozptylu obrazu. Program musí zajistit zobrazení jak vstupního, tak zostřeného obrazu a snadné vizuální porovnání výsledků více variant. Komentujte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] JAN, J. Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů (kap. 14). VUTIUM Brno, 2002.
- [2] JAN, J. Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration (kap. 4 a 9). CRC Taylor & Francis, 2006.
- [3] MATLAB - Image Processing Toolbox (on-line manuál).

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Jan, CSc.

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je rozбором problému a technickou zprávou k vytvořenému programu pro zvýraznění obrazů. Hlavním cílem celého procesu zpracování obrazu je adaptivní zostřování dosažené aplikací prostorově variantního lokálního konvolučního operátoru. Prostorová variantnost masky a tím stupeň ostření je určován místní směrodatnou odchylkou jasových hodnot v obraze. Rozhodnutí o ostření může být binární nebo spojitě.

V první části je uvedena stručná teorie k tématu. Ta je nezbytná pro další kapitoly této práce, které pojednávají o realizaci programu, popisují jednotlivé algoritmy, včetně blokových schémat a uživatelského prostředí a hodnotí dosažené výsledky včetně ukázek. V poslední kapitole se věnuji variantnosti obrázků a jejímu vlivu na kvalitu zostření a natavení parametrů procesu.

Klíčová slova: Digitální zpracování obrazů, ostření obrazů, adaptivní ostření.

Abstract

This thesis is the analysis of the problem and technical report that supports a computer program for enhancement image. The main objective of picture processeng is adaptive sharpening, which is obtained by the application of a local convolutional operator. The decision on the degree of sharpening at individual pixels is based on the value of the local standard deviation of brightness. The degree of sharpening can take binary or continuous values.

The first part of the report briefly discusses the theory of adaptive image sharpening. Knowledge of this theory is necessary for understanding the remaining chapters, which describe the individual algorithms including flows-diagrams, implementation of the program and graphical enviroment and also assess the achieved results, including demonstration on examples. The last section of the report deals with variability of images and it's influence on settings parameters of sharpening.

Key words: Digital image processing, image sharpening, adaptive sharpening.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAKUBÍČEK, R. *Adaptivní zostřování obrazu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s., 1 příl. Vedoucí bakalářské práce Prof. Ing. Jiří Jan, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Adaptivní zostřování obrazu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Janu, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod	6
2. Teoretický základ	6
2.1. Obrazová data	6
2.2. Konvoluce	7
2.3. Hrana	8
2.4. Zpracování 2D signálů	9
2.5. Zvýraznění obrazu	9
3. Realizace programu	13
3.1. Prostředí Matlab®	13
3.2. Realizace 2D konvoluce	13
3.3. Adaptivita	16
3.3.1. Binární rozhodnutí	17
3.3.2. Spojité rozhodnutí	21
3.4. Parametry procesu zostření	24
3.4.1. Míra zostření	24
3.4.2. Rozhodnutí o adaptivitě	27
3.4.3. Práh rozhodnutí	27
3.4.4. Oblast výpočtu směrodatné odchylky	28
4. Popis algoritmů	29
4.1. Smer_odchyl.m	29
4.2. Prah.m	29
4.3. Ridici_matice.m	30
4.4. Sharpening.m	31
4.5. Sharp.m	32
4.6. Blokové schéma datového toku a zpracování	33
5. Uživatelské rozhraní	34
5.1. Hlavní menu	34
5.2. Nastavení prahu	37
5.3. Schéma grafického prostředí	38
6. Výsledky a hodnocení	39
Závěr	43
Použitá literatura	44
Příloha: Uživatelský manuál	

1. Úvod

Při procesu zobrazení různými modalitami dochází k transformaci primárního parametru scény na výsledný parametr obrazu, včetně jeho souřadnicového systému. Během něj může dojít vlivem nelinearity přenosu ke snížení prostorové rozlišovací schopnosti.

Jedním z nejdůležitějších parametrů kvality obrazu je jeho ostrost. Zvýšením ostroty dosahujeme zlepšení psychosenzorického vjemu pozorovatele, přesnost obrazové analýzy či klasifikace, a zvýšení výtěžnosti lékařské diagnostiky. Existuje více možností, jak zlepšit ostrost obrazu. Některé umožňují zdůraznit vysoké frekvence a jiné zvyšují hranové derivace diferenčními operátory. Cílem všech metod je zvýraznění hran a detailů. Lidské oko vnímá obraz s vyšším hranovým kontrastem jako ostřejší. Při aplikaci těchto metod (lokálních operátorů) není potřeba znát mechanismus vzniku zkrácení obrazu.

Vytvořený program v rámci bakalářské práce konvoluje lokální operátor pro zvýraznění hran v originální oblasti digitalizovaných obrazů. Uživateli umožňuje interaktivně měnit míru zostření a při adaptivitě také určit prostorovou variantnost lokálního operátoru jednotlivých pixelů nastavením prahů. K dispozici je možnost binárního nebo spojitého rozhodnutí zostření.

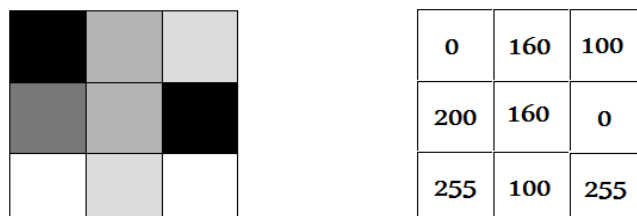
V této práci jsou popsány jednotlivé funkce programu pro pochopení funkčnosti a principu adaptivního zostření obrazů, což je cílem projektu. Je zde mnoho ukázek a výsledků programu pro názorné vysvětlení vlivu parametrů ostření při správném i nevhodném nastavení.

2. Teoretický základ

2.1. Obrazová data

Obrazem je myšlena každá vizuální scéna, která je získána procesem zobrazení transformováním předmětového prostoru do prostoru obrazového. Matematickým modelem 2D obrazu je obrazová funkce dvou proměnných $f(x, y)$, kde x a y jsou prostorové souřadnice v jednotlivých bodech obrazu a hodnota f je úměrná jasu v těchto bodech. Barevné obrazy se vyznačují třemi jasovými složkami r , g , b , které odpovídají barevným pásmům frekvence viditelného spektra.

Pro práci s počítačem je nutné obrazy nebo scénu při akvizici digitalizovat vzorkováním a kvantováním amplitud. Základní plošné (2D) elementy nazýváme pixely, které mají nejčastěji tvar čtverce. Výsledkem je digitalizovaný obraz, který je reprezentován dvourozměrným polem diskretní funkce $f(i, j)$, kde indexy jsou souřadnice pixelů a hodnoty těchto prvků odpovídají jasu. [3], [4]



Obrázek 1: Jasová reprezentace pixelu ve výřezu obrazu 3x3 pixely

Nejčastěji se hodnota dané obrazové funkce při obrazové diskretizaci kvantuje 8 bity, což odpovídá 256 odstínům šedi. Pro vizuální účely je tento počet dostačující, protože lidské oko je schopno rozeznat jen 50 úrovní odstínů šedé.

2.2. Konvoluce

Konvoluce je matematická operace, která zpracovává dvě posloupnosti. Toho se využívá v číslicových systémech, které přetváří vstupní diskretní posloupnost $x(n)$ na jinou výstupní diskretní posloupnost $y(n)$. Konvoluci, jako matematický operátor značíme $*$, a je definována jako:

$$y = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \cdot h(n - k) \quad (1)$$

kde $h(n)$ je impulsní charakteristika a $x(n)$ vstupní posloupnost.

U dvourozměrných diskretních signálů systém používá 2D konvoluci, kde vstupním signálem rozumíme matici hodnot a impulsní charakteristiku PSF váhovou matici o určitých rozměrech. Lokální konvoluční operátor (maska) je otočená PSF o 180°. Ve dvou rozměrech má konvoluce tvar:

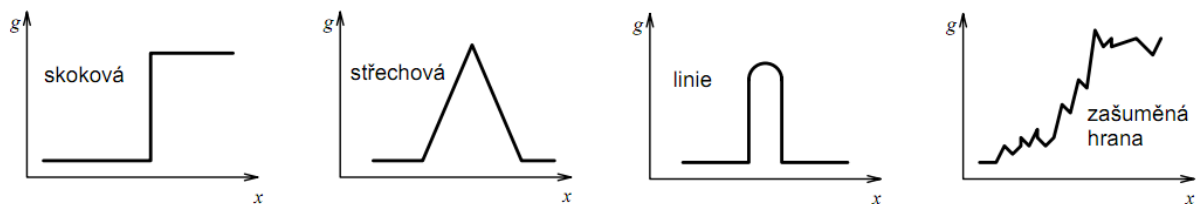
$$y(m, n) = \sum_{k=m-L/2}^{m+L/2} \sum_{l=n-L/2}^{n+L/2} x(k, l) \cdot h(k - m, l - n) \quad (2)$$

kde m, n jsou souřadnice bodu, L jsou rozměry masky.

Konvoluční operátory se velmi často používají při zpracování digitálních obrazů, jako je segmentace, vyhlazování, redukce šumu nebo zostřování. [1]

2.3. Hrana

Hranu v obraze lze definovat jako diskontinuitu obrazové funkce neboli určitou oblast, kde se výrazně mění hodnota jasu pixelů. Je dána vlastnostmi obrazového elementu a jeho okolí a popisuje rychlost změny a směr největšího růstu obrazové funkce $f(x, y)$. Jedná se o přechod z určité hodnoty jasu na jinou hodnotu nebo oddělení stejných či podobných hodnot určitou oblastí s výrazně rozdílným parametrem. Směr přechodu je definovaný jako kolmý směr gradientu ψ . [4]



Obrázek 2: Nejčastější typy hran vyobrazené jako 1D řez obrazem, [6]

Cílem je mít strmost hrany a rozdíl jasového skoku co největší. Potom se může hrana jevit jako dostatečně ostrá. Gradient neboli rychlost změny jasu je počítána jako první derivace obrazové funkce dané oblasti. Pokud tato hodnota přesáhne určitý stanovený práh, lze ji považovat za hranu.

2.4. Zpracování 2D signálů

Zpracováním můžeme rozumět vytvoření nového signálu (posloupnosti), který je v nějakém smyslu lepší nebo výhodnější než původní signál. Charakteristické je tím, že vstup i výstup je signál. Do zpracování obrazů zařazujeme metody:

- Výběr užitečné složky ze směsi
- Syntéza kombinovaných signálů
- Eliminace šumu
- Odstranění zkreslení signálů

Můžeme sem zařadit i restaurace signálů, což je metoda zpracování, kde je podmínkou mít apriorní informace o charakteru a parametrech zkreslení i šumu.

Nejčastější způsob zpracování dvojrozměrných signálů je aplikace operátorů. Mohou být jak bodové, tak lokální. Bodové se nejčastěji používají ke globální transformaci kontrastu, pseudobarvení šedotónových obrazů nebo transformaci barev. My se budeme zabývat lokálními operátory, které umožňují zpracovávat vstupní bod v obraze v závislosti na jeho okolí. Nazýváme je také maskové operace podle vztahu v rovnici (3).

$$g_{mn} = \sum_{i=-M}^M \sum_{k=-M}^M h(i, k, m, n) f_{m+i, n+k} \quad (3)$$

Maska, nejčastěji o velikosti 3x3 je položena na vstupní matici tak, aby její střed splynul s bodem o souřadnicích m, n a hodnota výstupního prvku o těchto souřadnicích se vypočte jako lineární kombinace pokrytých prvků vstupu, vážených hodnotami masky. Jde o lineární konvoluční operaci.

Maskové operace nemusí být jen lineární. Příkladem je velmi užitečný 2D mediánový filtr, který pracuje s určitými hodnotami, které jsou vybrané maskou a statisticky zpracované (seřazené podle velikosti) nehlédě na uspořádání prvků do dvou rozměrů. [1], [2]

2.5. Zvýraznění obrazu

Zvýrazněním rozumíme proces, který vede ke zlepšení psychosenzorického vjemu pozorovatele. Operace je aplikována všude tam, kde se předpokládá vizuální analýza nebo

interpretace obrazu. Často může docházet k degradaci obrazové kvality v procesu akvizice, přenosu nebo vizualizace obrazových dat. Je důležité správně rozhodnout, jakou úpravu obrazu zvolit, aby došlo k žádoucímu zvýraznění některých vlastností obrazu.

Zostřující operátory mají charakter horní propusti, která zvyšuje podíl složek s vyššími frekvencemi, které nesou nejčastěji informaci o detailech a hranách. Ovšem šum je také určen vysokými frekvencemi a proto je třeba zostřovat jen do jisté míry, aby nedošlo k nevhodnému zhoršení poměru signálu k šumu.

V našem případě používáme lineární konvoluční operátory pro lokální zvýraznění kontrastu, při kterém dochází k přepočtu hodnot jasu pixelu v závislosti na hodnotách sousedních pixelů dané masky, která se plynule pohybuje po obraze; tzv. plovoucí okno. Lokální operátor nám musí prohlubovat lokální maximum a minimum. Jednou z možností je aplikace Laplaceova operátoru a jeho odečtení od původního obrazu. [1], [2]

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ nebo } \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

(4) Laplaceův operátor

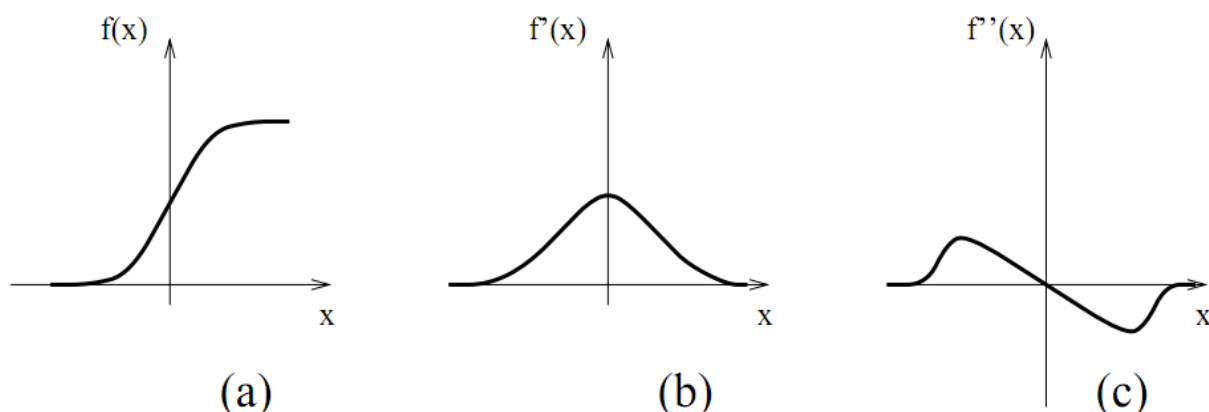
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix};$$

(5) Odečtení Laplaceova operátoru od původního obrazu; ostřicí maska [2]

Laplacian u spojitých signálů vychází z druhých parciálních derivací jasových hodnot. U plynule rostoucích jasových funkcí $f(x, y)$ je v příslušném okolí Laplaceán $\nabla^2 f(x, y)$ nulový a to právě v místech, kde velikost gradientu $\nabla f(x, y)$ je maximální. V derivaci gradientu toho maximum prochází nulou, což nazýváme anglicky *Zero-crossings*.

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (6)$$

Laplacian pro spojité signály, jako parciální derivace gradientu, kde x a y jsou souřadnice kartézského souřadného systému.



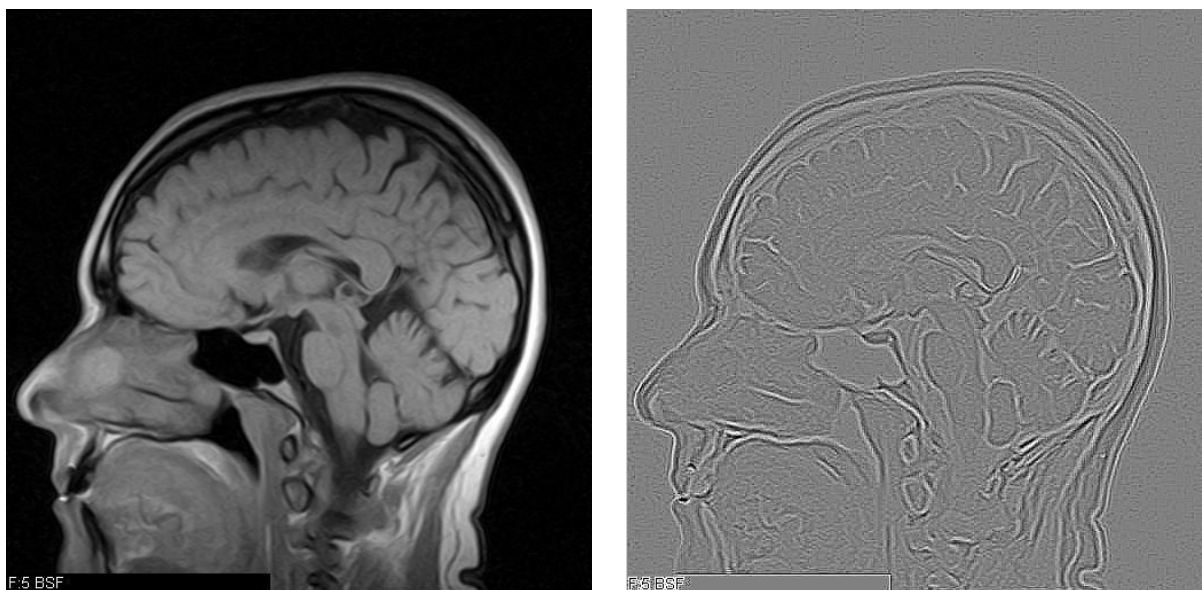
Obrázek 3: Gradient (b) a laplacian (c) 1D funkce (a), [6]

Obrázek 3 zobrazuje tři průběhy jednorozměrných funkcí. Průběh *a* zobrazuje funkci interpretující hranu, *b* je průběhem její první derivace a druhou derivaci znázorňuje graf *c*. Průchodem nulou u průběhu *c* (tzv. zero-crossings) docílíme zvýšení lokálního kontrastu na hranách, ovšem musíme tuto funkci posunout do kladných hodnot. U 8 bitů úrovní šedi je nutné posunutí o 128 úrovní. Tím při nulovém Laplacianu je odstín šedi 128 a na hranách je maximum (bílá) a minimum (černá).



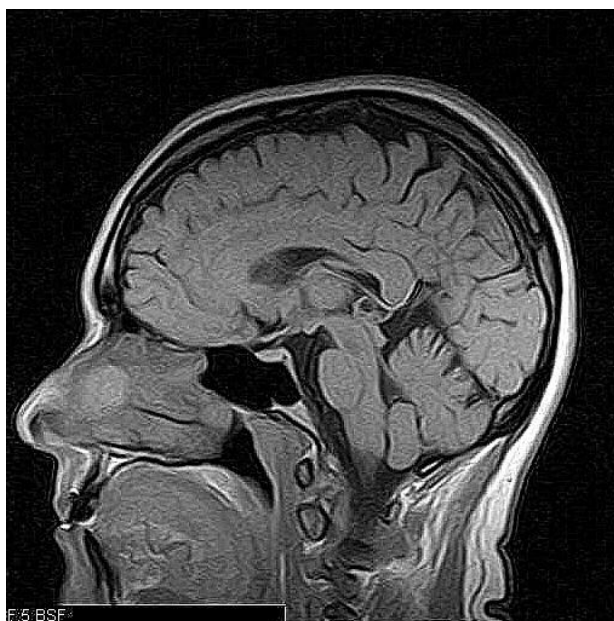
Obrázek 4: Zobrazení druhé derivace hrany ve výřezu Laplacianu

Operátory typu Laplacianu umožňují aproximovat diferenciální operátor druhého řádu. Dosahuje se toho aplikací masky, která je součtem všech druhých derivací v obraze. Výsledkem po aplikaci tohoto operátoru na originál je obraz zobrazující oblasti výrazných změn jasu v obraze (Obrázek 4), které odečteme od původního obrazu, a tím docílíme prohloubení lokálních maxim a minim. Obrázek se potom jeví jako ostřejší, díky zvýraznění vysokých prostorových frekvencí. Problémem je zvýšení kontrastu všech pixelů a tím i zvýraznění šumu. To je ovšem nežádoucí jev, který lze odstranit nastavením adaptivity pomocí prostorově variantního maskového operátoru. [3], [4], [6]



Obrázek 5: Originální obraz (nalevo) a Laplacian (napravo)

Na obrázku 5 vpravo můžeme vidět výsledek po aplikaci Laplaceova lokálního operátoru (vzorec 4), a pro možnost vizualizace jsou hodnoty jednotlivých pixelů posunuty o polovinu dynamiky, tzn. při 8 bitech přičteme hodnotu 128. (Obrázek 5 vlevo).



Obrázek 6: Plně zostřený obraz bez adaptivity

Od původního obrazu odečteme vzniklý obraz po aplikaci Laplaceova operátoru a dostaneme zostřený obraz (viz Obrázek 6).

3. Realizace programu

Program umožňující adaptivní zostření obrazů je realizován v programovacím prostředí MATLAB® Version 7.9.0.529 (R2009b) s rozšířením knihovny o Image Processing Toolbox, které je důležité pro správnou funkčnost programu.

3.1. Prostředí Matlab®

Interaktivní prostředí MATLAB je vhodný pro inženýrské a vědecké výpočty a vizualizaci dat. Jeho základním datovým prvkem je matice, což je vhodné pro vytvoření programu na zpracování obrazu a jeho zvýraznění. Součástí je i nadstavba Image Processing Toolbox, který nabízí .m soubory pro snadnou práci s obrázky, jako je třeba načtení nebo zobrazení. Pro zpracování je k dispozici i příkaz pro 2D konvoluci (který v tomto projektu je nepoužitelný, viz kap. 3. 2.), filtraci nebo přímo pro zpracování obrazu. [5]

MATLAB umožňuje zpracovat jednotlivé vytvořené funkce do grafického prostředí, které je uživatelsky přístupnější a jednodušší než příkazový řádek a dovoluje tím i méně zkušeným uživatelům PC práci s vytvořeným programem pro adaptivní zostřování obrazu.

Pro načtení obrazu program využívá interní příkaz z knihovny MATLABu® *imread*, který umožňuje importovat různé formáty obrazů do paměti, ve formě matic v datovém typu *uint8*. Pro zpracování hodnot v matici matematickými operacemi je nutné převést datový typ na *double*. U barevných obrazů je vytvořena matice trojrozměrná, kdy třetí rozměr je dán třemi barvami r, g, b. Při zostřování je nutné zpracovat všechny 3 matice jednotlivých barev.

3.2. Realizace 2D konvoluce

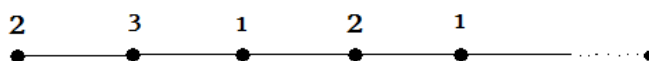
Po získání obrazových dat a uložení do paměti je cílem konvolovat vstupní data s lokálním operátorem, jehož impulsní charakteristika je otočená maska o 180°. Interní příkaz *conv2* knihovny v Matlabu® není vhodný pro použití kvůli nemožnosti vytvoření adaptivity ostření. Do této funkce vstupují pouze matice obrazových dat a impulsní charakteristika a nelze během výpočtu dvourozměrné konvoluce měnit hodnoty prvků lokálního operátoru pro dosažení prostorové adaptivity. Proto je použit algoritmus vlastní tvorby, což odstraní tento

problém a umožní aplikovat prostorově variantní masku a dokonce dosahuje lepších výsledků z hlediska rychlosti a snadnosti výpočtu 2D konvoluce než příkaz z knihovny Matlabu®.

U Matlabu®, jako programového prostředí a skriptovacího programovacího jazyka, není vhodné používat mnohonásobné, či rozsáhlé cykly, bez kterých se konvoluční zpracování obrazu neobejde. Proto není možné cykly zcela odstranit, ale můžeme je eliminovat a to na jednu smyčku s počtem opakování, které odpovídá počtu prvků v lokálním operátoru. Při velikosti masky 3×3 proběhne během konvoluce 9 cyklů u jedné matice dat dané barvy. Pro umožnění této eliminace je potřeba pracovat s celou maticí, tj. s celým obrazem.

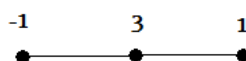
Pro lepší představu a pochopení uvádím vysvětlení na jednorozměrném signálu s impulsní charakteristikou o délce třech vzorků.

Je dán vstupní signál $x(n)$



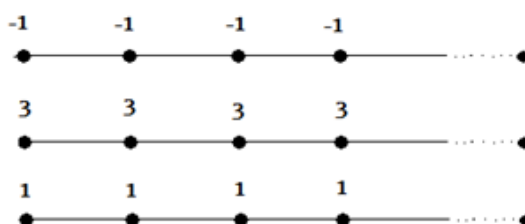
Obrázek 7: vstupní signál $x(n)$

a impulsní charakteristika $h(n)$



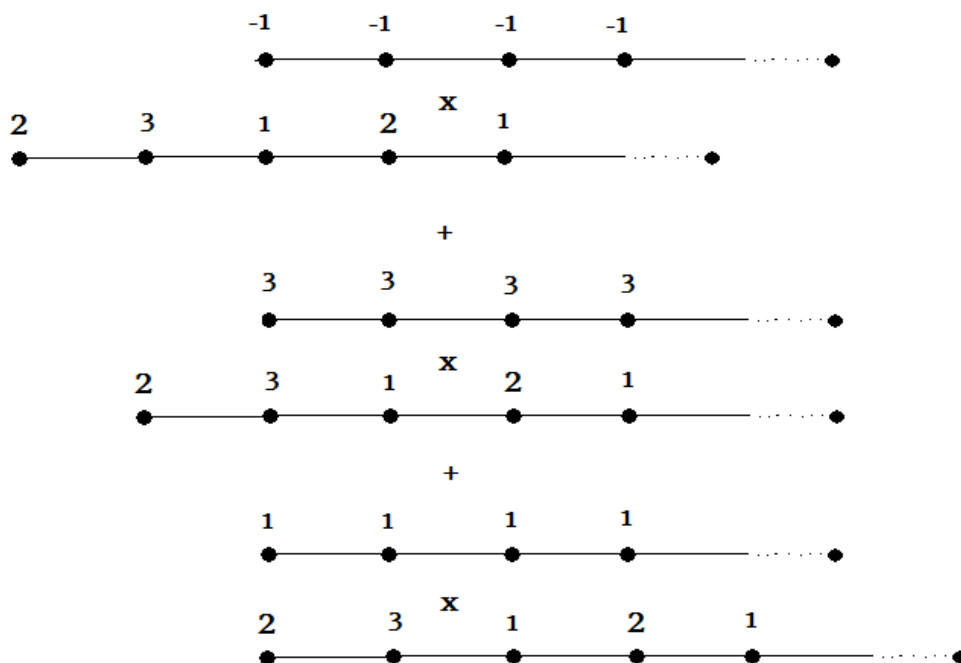
Obrázek 8: Impulsní charakteristika $h(n)$

Vstupní signál o délce n chceme konvolovat s danou impulsní charakteristikou. K dosažení tohoto procesu musíme provést tři cykly a to postupně pro každý prvek impulsní charakteristiky. V každém cyklu hodnotou impulsní charakteristiky vynásobíme jedničkový vektor (důležité pro pozdější řešení adaptivity). Vzniknou tři vektory $R_{1,2,3}(n)$ o stejné délce jako vstupní signál $x(n)$.



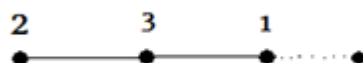
Obrázek 9: Vzniklé vektory R prvku impulsní charakteristiky

Nyní vynásobíme člen po členu vektor daného prvku impulsní charakteristiky a k němu vhodně posunutý originální signál. Výsledná konvoluce je dána součtem těchto třech nově vzniklých vektorů, jak lze pozorovat na obrázku níže.



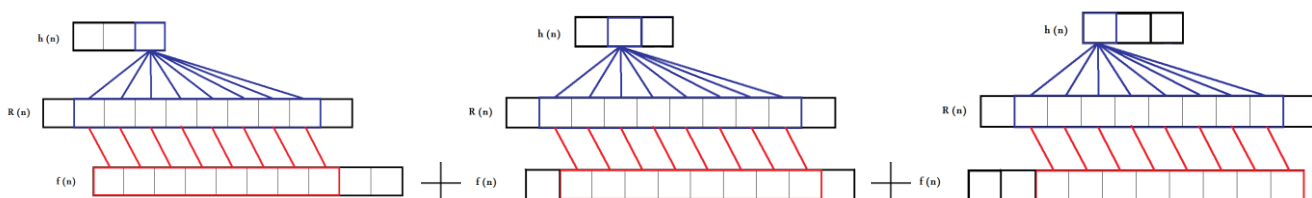
Obrázek 10: Ukázka konvoluce konkrétního 1D signálu

Výsledkem tohoto příkladu je výstupní signál $y(n)$ vzniklý konvolucí $h(n)$ se vstupním signálem $x(n)$.



Obrázek 11: Výsledný konvolovaný signál $y(n)$

Jiná možnost vysvětlení principu výpočtu konvoluce je grafické znázornění jednorozměrného signálu.



Obrázek 12: Grafické znázornění konvoluce 1D signálu

Na obrázku 8 lze vidět, jaké je posunutí původního signálu proti vektoru R , který byl vytvořený z určitého prvku impulsní charakteristiky. Čáry spojující jednotlivé prvky znázorňují násobení člen po členu.

Obdobného výsledku dosáhneme i v dvourozměrném prostoru při stejném způsobu výpočtu konvoluce, což se velmi těžko popisuje či graficky znázorňuje.

$$y = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n h(k, l) .* R .* X_{k,l} \quad (7)$$

Rovnice (7) popisuje výpočet dvourozměrné konvoluce lokálního operátoru h o rozměrech m, n se vstupním obrazem X , který je vhodně posunutý vzhledem k indexovanému prvku masky h . Maska h je prostorově variantní v závislosti na hodnotě směrodatných odchylek, které jsou standardizované v řídicí matici R (viz kapitola 3.3).

3.3. Adaptivita

Při zpracování obrazových dat za cílem zvýraznění dochází k úpravě každého pixelu v obrazu. Pro lepší psychosenzorický vjem zостření je vhodné zpracovávat jen ty pixely, kde se nachází hrana, kterou zvýrazníme. V oblasti mimo větší difference jasových hodnot, což je oblast mimo hranu, není nutné zvýraznění. Při zостření těchto oblastí lokálně zvýšeným kontrastem dochází ke zvýraznění šumu a jiných nežádoucích složek a tím ke znehodnocení obrazu.

Abychom byli schopni zajistit adaptivitu, je nezbytně nutné zjistit pozici hran použitím některých způsobů detekce a tyto oblasti zvýraznit. Jedna z možností je použití výpočtu první parciální derivace (gradientu) nebo některé ze statistických výpočtů, jako je např. rozptyl (nebo směrodatná odchylka). U ostatních pixelů, které v dané oblasti vykazují jen malé odchylky jasových hodnot, bude docházet ke zvýraznění s menší úrovní zостření nebo nulovou. Pro každý pixel musíme znát jeho hodnotu míry zостření získanou na základě rozhodnutí podle parametrů zadané uživatelem při vytváření řídicí matice.

Program používá binárního i spojitě rozhodnutí, kdy na základě směrodatné odchylky okolních jasových hodnot v dané oblasti (interně nastavena na 9x9 pixelů, ale je možnost interaktivně měnit velikost oblasti) je vytvořena řídicí matice nabývající hodnot v intervalu

$<0, 1>$. Tato matice vstupuje spolu s původním obrazem do funkce 2D konvoluce a zajišťuje dosažení adaptivity.

3.3.1. Binární rozhodnutí

Řídící matice v tomto případě obsahuje pouze jedničky a nuly a tím určuje, zda zostřít či ne. I při nulovém zostření dochází ke konvoluci a to daného pixelu s maskou pro původní obraz.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

V rovnici (8) je lokální operátor vytvářející původní obraz.

Na základě prahu rozhodnutí nastaveného uživatelem je převedena matice odchylek na binární řídící matici. Pixel řídící matice, kde je větší směrodatná odchylka jasové hodnoty než stanovený práh, má hodnotu jedna. V místech s nižší hodnotou zůstává nula.

$$\begin{bmatrix} 0 & 135 & 149 \\ 60 & 90 & 210 \\ 20 & 250 & 190 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Matice (9) nám ukazuje jasové hodnoty obrazu ve výřezu 3x3.

$$\begin{bmatrix} 1 & 6770 & 1 \\ 933 & 6549 & 967 \\ 1 & 14233 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Matice směrodatných odchylek jasových hodnot matice (10).

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ukázka binární matice (11), která vznikla prahováním matice směrodatných odchylek a to hodnotou 950, což odpovídá 6,7 % z maximální hodnoty. Tato hodnota odpovídá častému empiricky zjištěnému nastavení prahu při zpracování obrazů. Konečná řídící matice vzniká vynásobením hodnoty míry zostření a binární matice. Nyní řídící matice určuje souřadnice a míru zostření jednotlivých prvků v matici (pixelů).

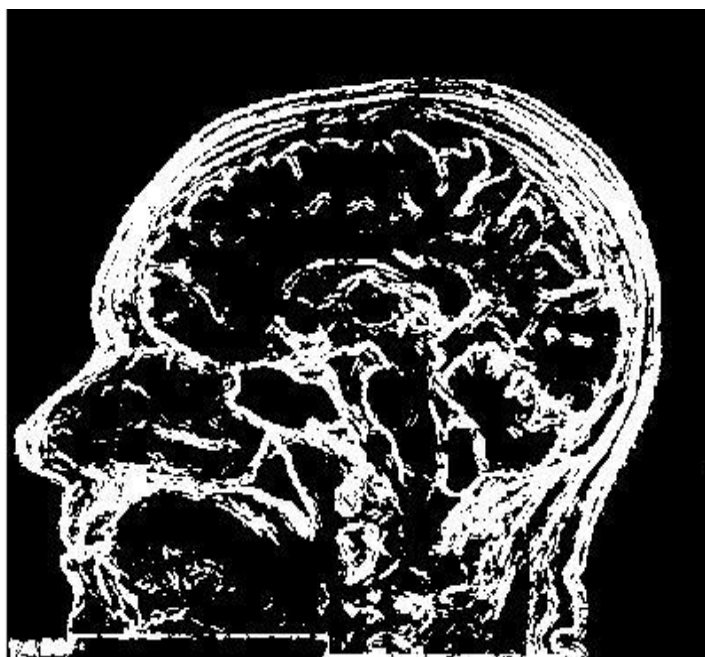
$$\begin{bmatrix} 0 & 9 & 0 \\ 0 & 9 & 9 \\ 0 & 9 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Upravená řídicí matice (12) pro výpočet konvoluce prostředních elementů lokálního operátoru. Pro okolní prvky masky vzniká řídicí matice (13) s hodnotou okolí, tj. záporná jednička.

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

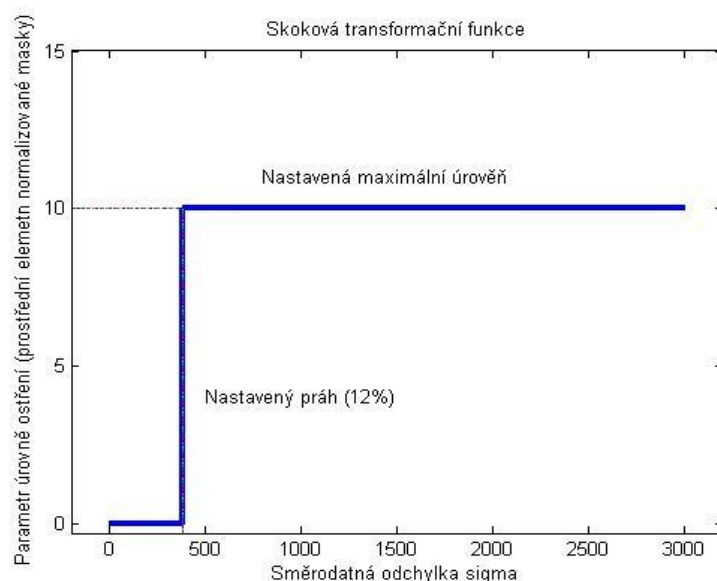
Na základě těchto řídicích matic probíhá konvoluce daného obrazu, kdy je jednoznačně určeno, zda ostřit či ne.

Pro lepší představu nastavení prahu je k dispozici možnost grafického zobrazení řídicí matice pro daný obraz. Převod matice směrodatných odchylek na řídicí podle skokové transformační funkce odpovídající parametrům od uživatele je zajištěn funkcí k tomu určené, která je pospána v kapitole 4.3 `Ridici_matice.m`



Obrázek 13: Grafické znázornění řídicí matice s určitým prahem u MRI snímku hlavy

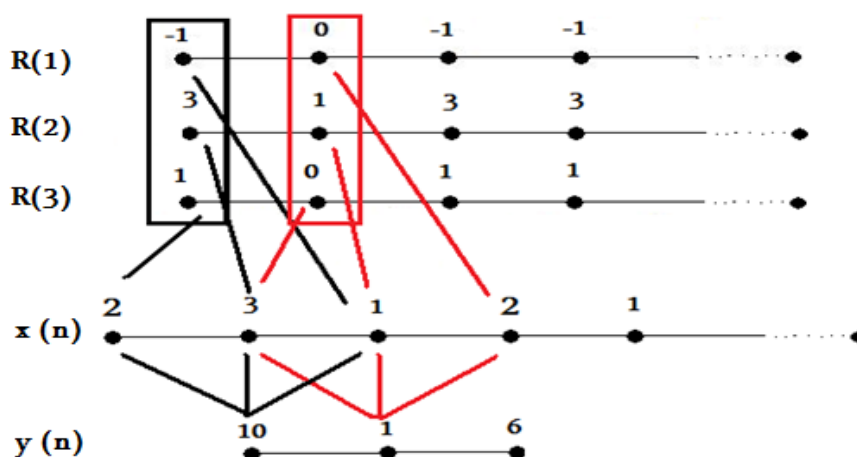
Na obrázku (Obrázek 13) bílá barva pixelu značí zostření maximální hodnotou nastavenou uživatelem a černá konvoluci pixelu s maskou pro původní obraz.



Graf 1: Transformační funkce pro převod směrodatné odchylky na řídicí matici při binárním rozhodnutí s určitou mírou zostření

Prostorová variantnost lokálního operátoru pro adaptivní ostření dle řídicí matice je docílena pomocí násobení prvku impulsní charakteristiky a řídicí maticí. U nulového prahu dochází k zvýraznění všech pixelů, kde řídicí matice je tvořena jedničkami. Dvourozměrná konvoluce je zajištěna výpočtem uvedeným v kapitole 3.2. Realizace 2D konvoluce. Pokud je nastaven určitý práh pro binární rozhodnutí, obsahuje matice jedničky a nuly, jako informaci o zostření u každého pixelu.

Vrátíme se k příkladu, který je uveden v kapitole 3.2 Realizace 2D konvoluce u jednorozměrného signálu.



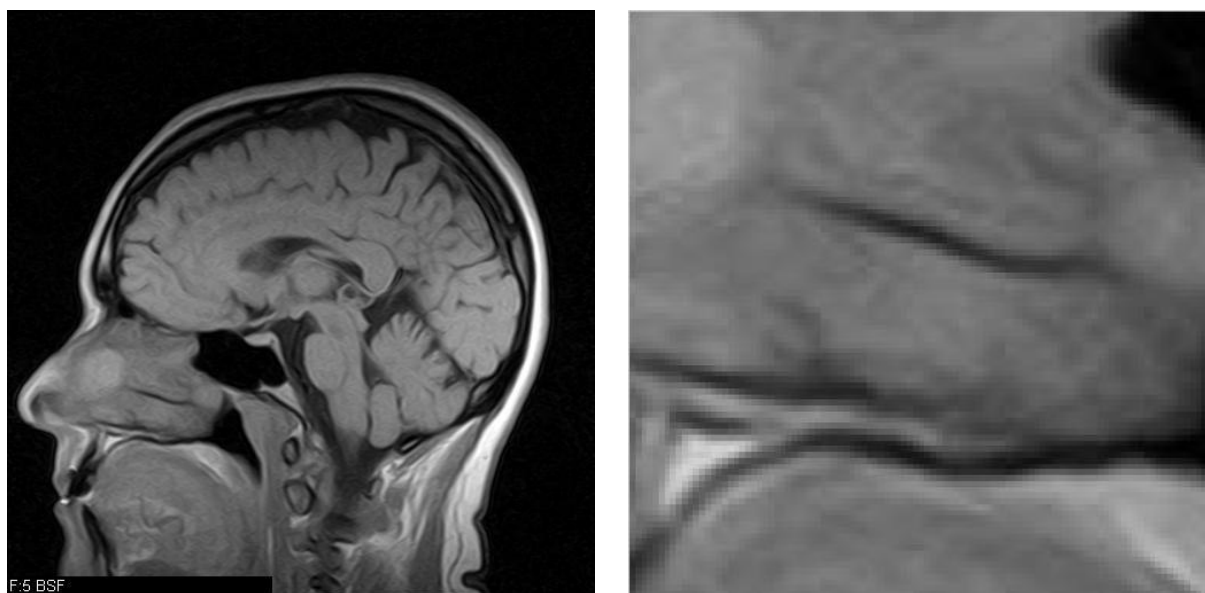
Obrázek 14: Grafické zobrazení výpočtu adaptivní 1D konvoluce popsané níže

Vektory R na obrázku 14 jsou řídicí vektory a jejich indexy (1, 2, 3) určují prvek impulsní charakteristiky.

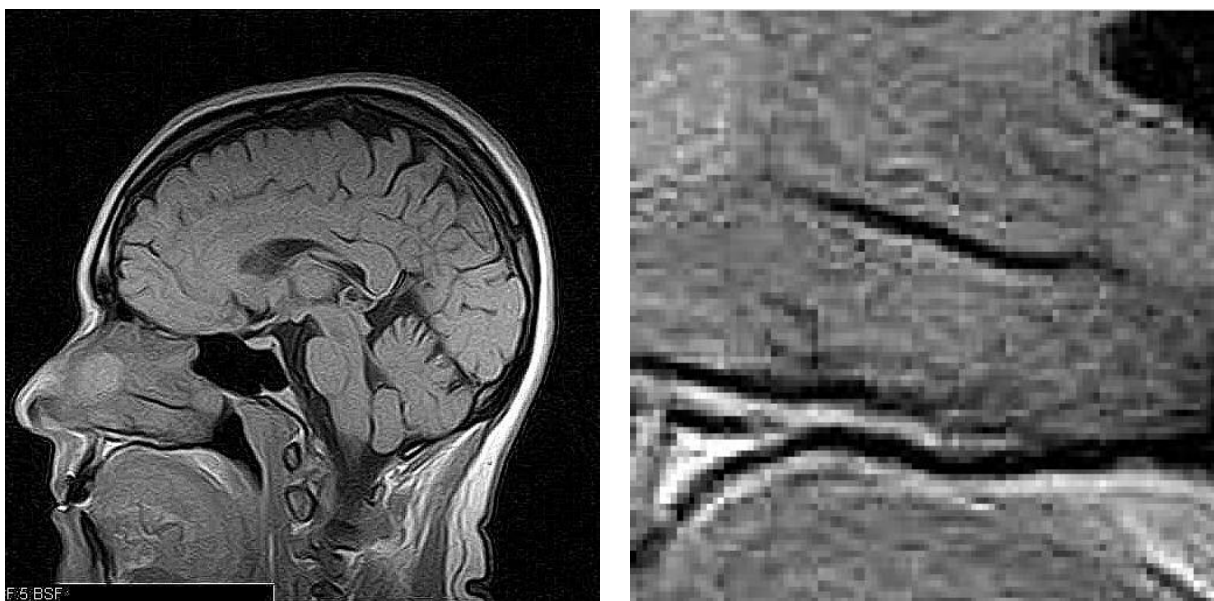
Na obrázku 14 lze vidět, že vznikly tři vektory R (pro každý vzorek impulsní charakteristiky), jejichž sloupce dohromady tvoří $h(n)$ na indexech určených pro konvoluci, tzn. na místě jedničky v řídicím vektoru. Součtem daných prvků signálu $x(n)$, které násobíme vhodně posunutými vektory R , docílíme adaptivní filtrace signálu.

Vytvoření lokálního operátoru pro původní obraz je docíleno násobením prvku $h(n)$ a od jeho hodnoty odečtenou jedničkou, s prvkem řídicí matice. Nakonec k prostřednímu vzorku přičteme jedničku. Tím pádem dojde k navýšení o jedničku u hodnot prvku impulsní charakteristiky ve vektoru $R(2)$, proto je nutné při vytváření tohoto vektoru odečíst jedničku od prostředního vzorku impulsní charakteristiky $h(n)$.

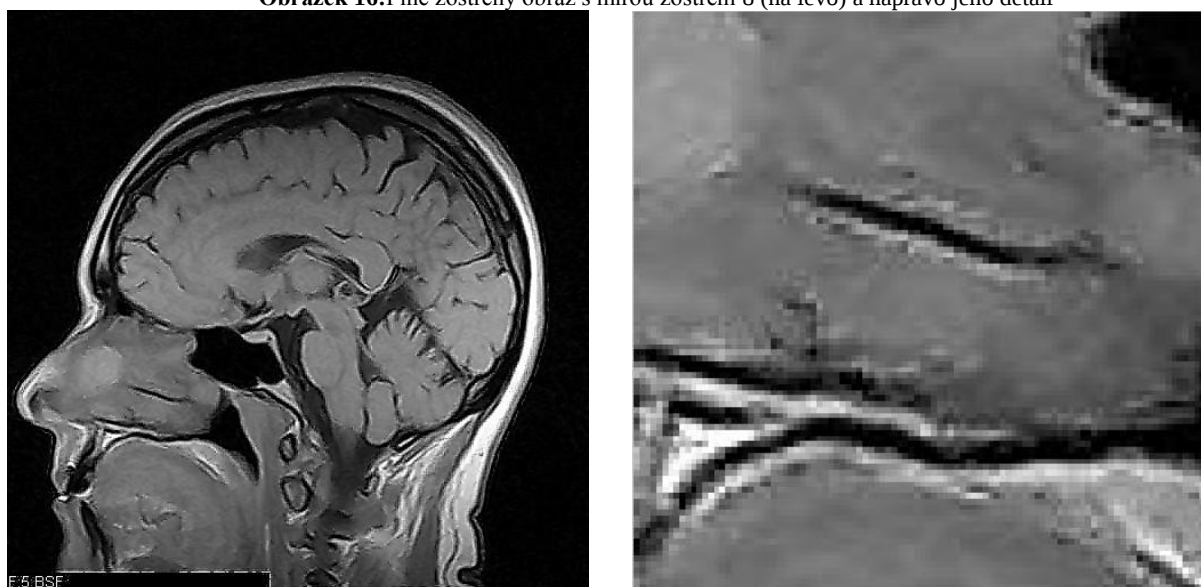
Vlivem adaptivity dochází k úpravě zostřeného snímku, jak lze vidět na Obrázku 18. Nastavením určitého prahu docílíme toho, že některé pixely mimo oblast velkých směrodatných odchylek nejsou zvýrazněny, což zlepšuje kvalitu obrázku a neumožňuje nežádoucí zvýraznění šumových složek obrazu.



Obrázek 15: Nalevo originální obraz, napravo jeho detail horního patra dutiny ústní



Obrázek 16: Plně zostřený obraz s mírou zostření 8 (na levo) a napravo jeho detail



Obrázek 17: Adaptivně zostření obrázků (nalevo) s binárním rozhodnutím (práh 0.4%, míra zostření 8) a jeho detail (napravo)

Hodnota prahu je pro uživatele přepočítána na procenta a vyjadřuje procento z maximální hodnoty směrodatné odchylky, která se v daném obraze nachází. To umožňuje snadnou reprodukovatelnost vhodného zostření u různých obrazů a tím standardizaci celého procesu.

3.3.2. Spojité rozhodnutí

Jak lze pozorovat na Obrázku 17, došlo k adaptivnímu zostření dle binárního rozhodnutí. Na přechodu mezi hranou a pozadím, kde dochází ke změně lokálního operátoru, vznikl ostrý přechod ze zostřeného pixelu na původní. To může působit jako rušivý element

a ze subjektivního hlediska dojde ke zlepšení ostrosti a psychosenzorického vjemu pozorovatele, ale ostré přechody binární adaptivity snižují kvalitu celkového působení zostřeného obrazu. Aplikací prostorově variantního operátoru se spojitým rozhodnutím docílíme plynulého přechodu ze zostřované oblasti na pixely bez zvýraznění.

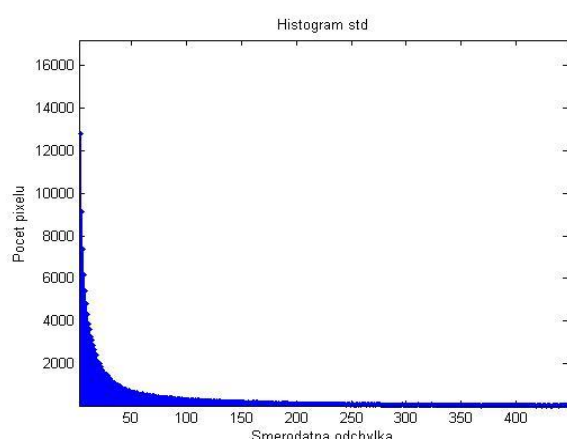
Při znalosti průměrné hodnoty a mediánu směrodatných odchylek v obraze zjistíme, že není možné použít lineárně závislou transformační funkci při převodu hodnot směrodatných odchylek na hodnoty řídící matice, určující míru zostření. Zde uvádím statistické hodnoty pro ukázkou, jaké hodnoty std se vyskytují v obraze MRI hlavy (Obrázek 15).

Průměrná hodnota: 149,3

Medián: 13,9

Maximální hodnota: 17 249

Z těchto parametrů lze vypočítat, že interval hodnot směrodatných odchylek daných pixelů, které je potřeba zvýraznit maximální nastavenou úrovní zostření, je hodně velký. Ovšem zastoupení v obraze je minimální (pouze na hranách). Nejčastější hodnota směrodatné odchylky je velmi malá oproti maximu vyskytující se v obraze.

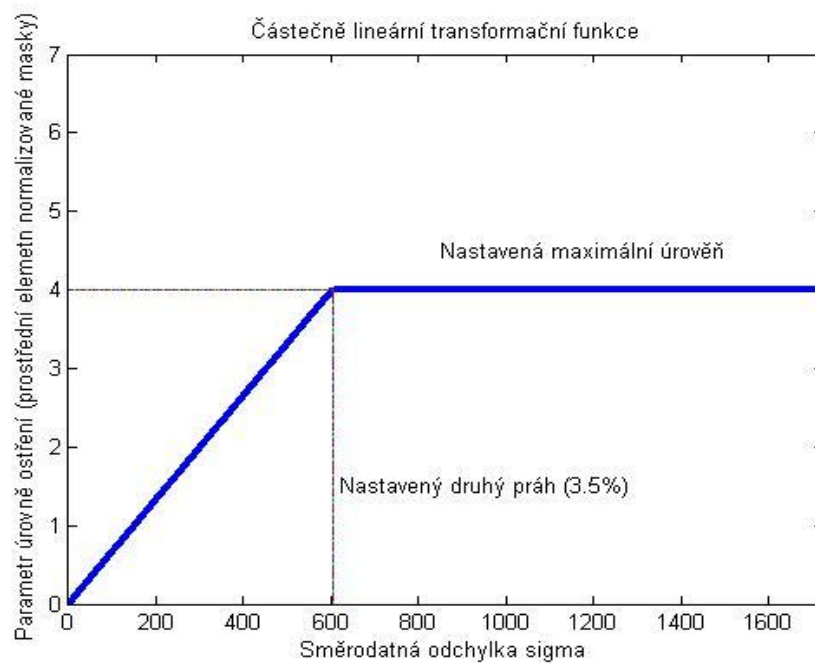


Graf 2: Histogram hodnot směrodatných odchylek ořezaný o vysoké hodnoty

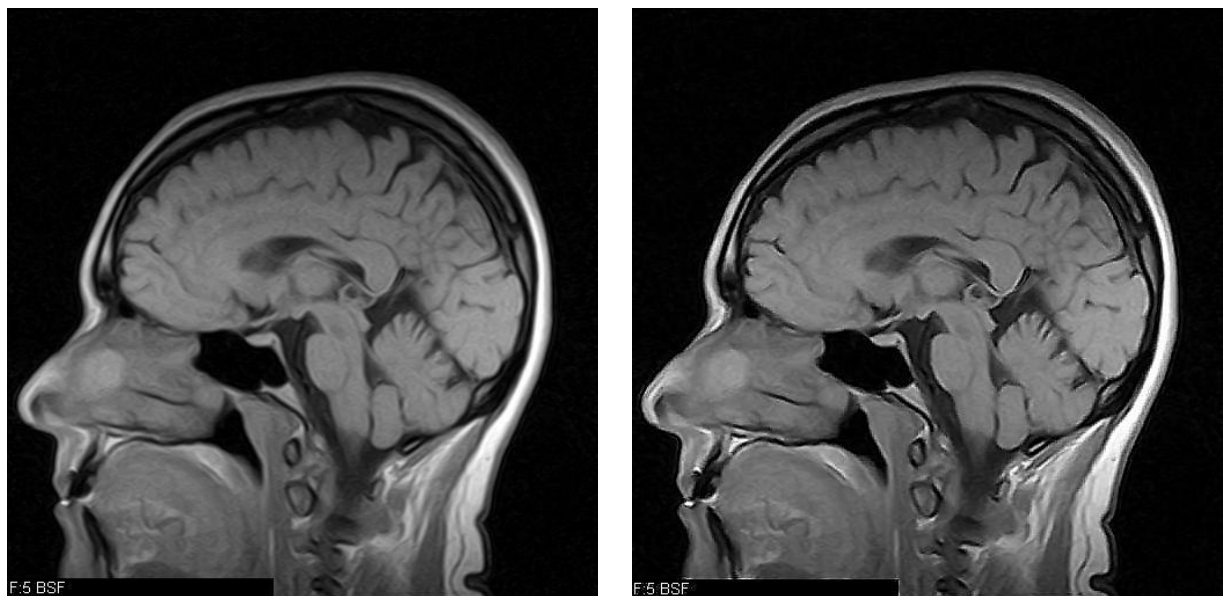
nejlépe volit nulový.

Na grafu 2 vidíme zastoupení jednotlivých hodnot směrodatných odchylek v obraze. Zde lze vidět, že není vhodné lineární rozhodnutí, proto program využívá částečně lineární transformační křivku mezi dvěma prahy. Pixely s hodnotou směrodatné odchylky (std) menší než první práh budeme konvolovat nulovou mírou zostření, ale to většinou není vhodné, proto první práh je

Experimentálním zostřením obrazu (Obrázek 15) jsem zjistil, že je vhodné nastavit druhý práh na 3,5 % z maximální směrodatné odchylky a od této hodnoty zpracovávat obraz maximální nastavenou úrovní a to až do největší hodnoty std (viz Graf 3).

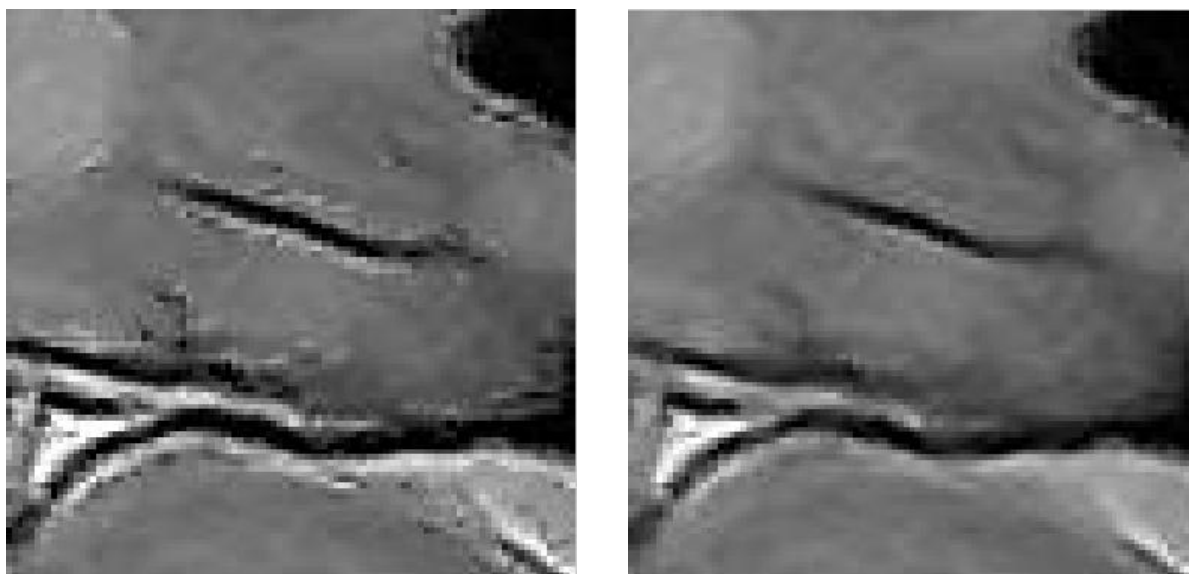


Graf 3: Transformační funkce pro spojitě rozhodnutí při adaptivním zostření



Obrázek 18: Ukázka adaptivně zostřeného obrazu MRI se spojitým rozhodnutím dle transformační funkce v grafu 2 (napravo originál a nalevo zvýrazněný obraz)

Na adaptivně zostřeném obrázku (Obrázek 18) může pozorovat jemné zvýraznění hran, kde okolní oblasti jsou buď minimálně, nebo vůbec nezostřeny. Dle svého subjektivního hodnocení je snímek vhodně zostřen a obsahuje jen minimální množství rušivých elementů vzniklých procesem zvýraznění.



Obrázek 19: Porovnání výřezů adaptivně zostřených snímků - Binární (nalevo), spojité (napravo)

Na obrázku (Obrázek 19) adaptivně zostřeném dle spojitěho rozhodnutí (napravo) můžeme pozorovat hladké přechody ze zvýrazněných oblastí na pixely nezměněné (původní).

3.4. Parametry procesu zostření

Pro dosažení kvalitních výsledků zostření může uživatel interaktivně měnit několik parametrů ovlivňující celý proces zpracování a docílit tím požadovaného zvýraznění.

3.4.1. Míra zostření

Velikost hodnoty prvků lokálního operátoru výrazně ovlivňují míru zostření. Zvyšováním prostředního elementu a následnou úpravou okolí definované oblasti masky dochází ke zvýšení úrovně ostření prohloubením lokálních minim a maxim jasových hodnot. Ke zvýraznění hran dochází v malé míře již při zvýšení o jednu desetinu.

Možnost zvolit míru ostření je nezbytné v rámci variability charakteristik různých obrázků a frekvenční rozsah určující množství rozeznatelných detailů. U každého obrázku je nutno volit individuální míru zostření závislou na subjektivním pocitu uživatele.

Možnost nastavit tento parametr je docílena změnou prostředního elementu daného lokálního operátoru pro zostření. Tím se změní poměr mezi hodnotou prvku, pro který se počítá konvoluce (prostřední prvek masky) a okolím, které je dáno rozměrem masky a které ovlivňuje konečný výsledek (viz graf 4).

$$\frac{1}{K-8} * \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & K & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad K \in (8, \infty) \quad (14)$$

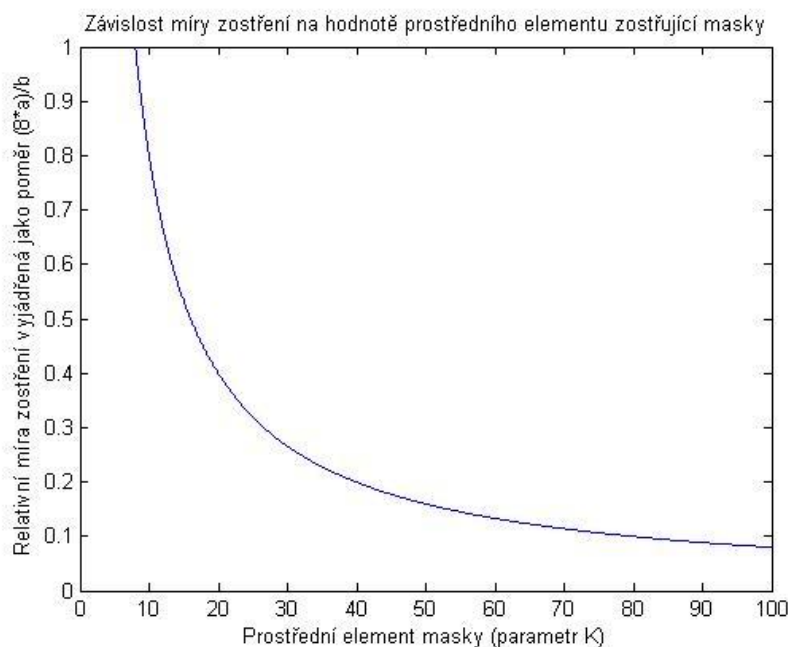
Rovnice 14 ukazuje výpočtu lokálního operátoru, kde K je parametr míry zостření. Vynásobením masky prvním členem v rovnici získáme standardizovaný lokální operátor. Aby nedocházelo ke změně jasu obrazu, musí být součet prvků konvolučního operátoru roven jedné. Toho je docíleno vzorcem 15 pro prostřední element na základě znalosti okolního prvku.

$$b = -(8 * a) + 1 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} a & a & a \\ a & b & a \\ a & a & a \end{bmatrix} \quad (16)$$

Kde a je hodnota okolního prvku masky a b hodnota prostředního elementu masky.

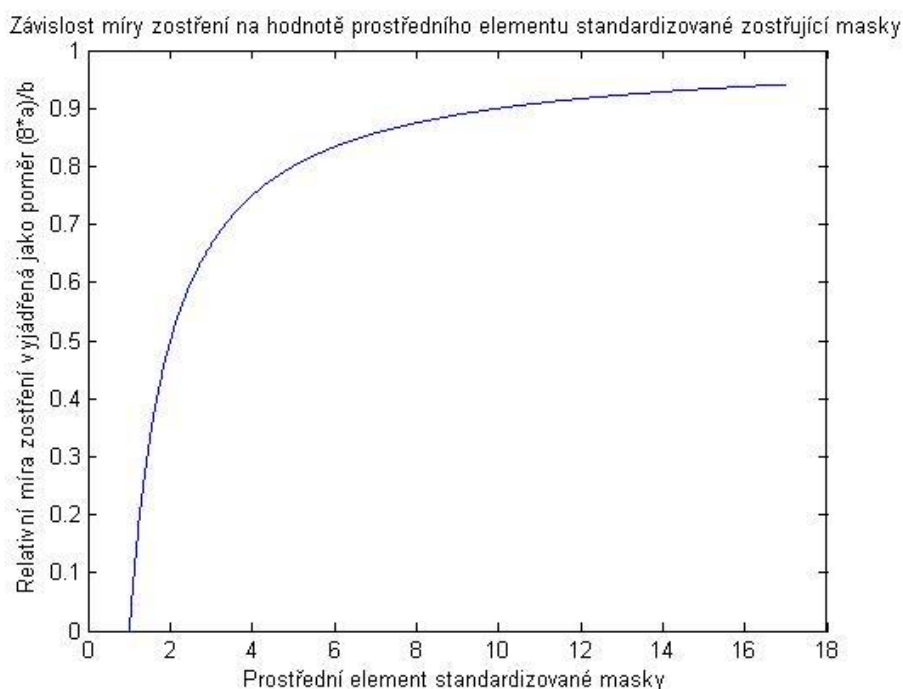
Míru zостření můžeme objektivně vyjádřit jako poměr osminásobku hodnoty okolního prvku a hodnoty prostředního elementu, což nám umožňuje možnost grafického srovnání závislosti nastaveného parametru a konečné míry zостření.



Graf 4: Závislost poměru $a*8/b$ vyjadřující relativní míru zостření na nastaveném parametru K

Se zvyšující se hodnotu prostředního elementu lokálního operátoru se exponenciálně snižuje relativní míra zостření vyjádřená jako poměr okolního a prostředního prvku (graf 4).

Naproti tomu u standardizované masky dochází zvyšováním hodnoty prostředního elementu k exponenciálnímu růstu poměru prvků zostřující masky (viz graf 5).



Graf 5: Závislost poměru $a \cdot 8 / b$ vyjadřující relativní míru zostření na hodnotě prostředního elementu standardizovaného lokálního operátoru pro zostření

Ukázka lokálních operátorů s různou mírou zostření jak v původním tvaru (rovnice 17 a 18), tak i jako standardizovaná zostřující maska (rovnice 19 a 20).

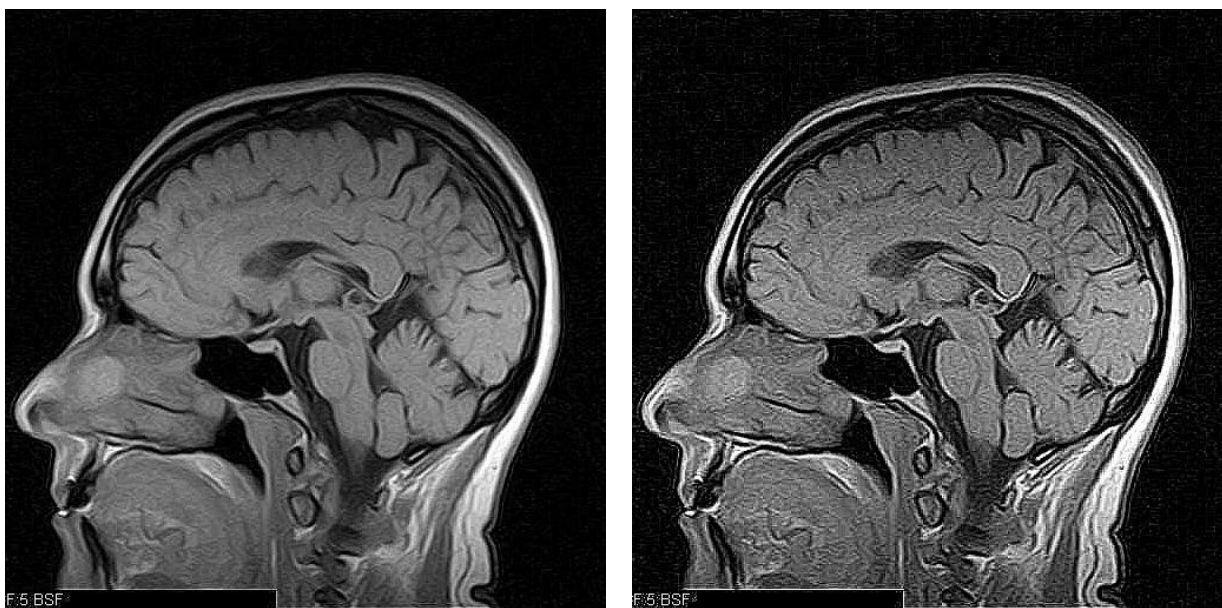
$$\left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 10 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\left(\frac{2}{3}\right) \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 + \frac{2}{3} & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 5 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} -1.5 & -1.5 & -1.5 \\ -1.5 & 13 & -1.5 \\ -1.5 & -1.5 & -1.5 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Po aplikaci těchto lokálních operátorů na vstupní obraz dochází ke zvýraznění hran a to rozdílnou mírou, jak můžeme pozorovat na obrázku 20.



Obrázek 20: Aplikace různých úrovní ostření pomocí prostorově invariantních masek 17 (vlevo) a 18 (vpravo)

Nalevo Obrázku 20 je původní MRI snímek plně zostřen pomocí prostorově invariantního lokálního operátoru z rovnice 17 a napravo z rovnice 18, kde můžeme pozorovat mnohem intenzivnější zvýraznění hran než v obraze nalevo (Obrázek 20).

3.4.2. Rozhodnutí o adaptivitě

Mimo aplikaci prostorově invariantního lokálního operátoru pro zostření umožňuje program i adaptivní zvýraznění hran v závislosti na hodnotách místní směrodatné odchylky daných pixelů v obraze.

Zda ostřit či ne daný pixel je u binární adaptivity dáno skokovou transformační funkcí vytvořené na základě hodnoty prahu získaného od uživatele. Při lineárním rozhodnutí je míra zostření pro jednotlivé pixely určena pomocí částečně lineární transformační funkce, kde je nutné volit dva prahy hodnot směrodatných odchylek, mezi nimiž je lineární přechod mezi oblastí bez zvýraznění a s maximální hodnotou zostření. Princip adaptivity je blíže popsán v kapitole 3.3 Adaptivita.

3.4.3. Práh rozhodnutí

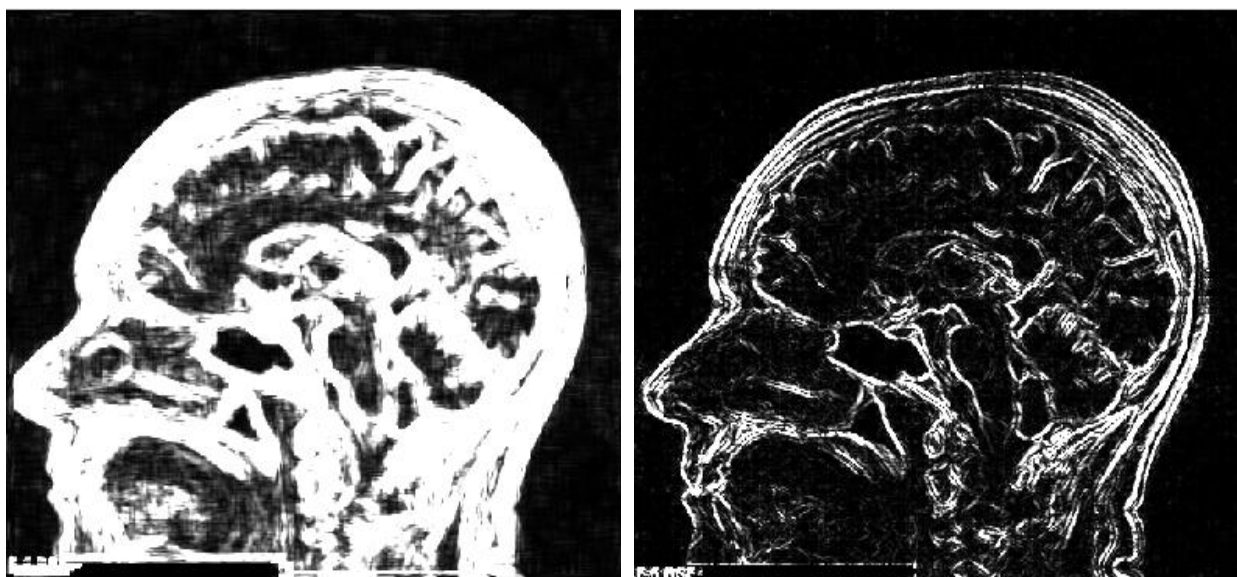
Pro vytvoření transformační funkce je potřeba znát prahovou hodnotu směrodatné odchylky, v případě spojitého rozhodnutí dvě prahové hodnoty. Jsou udávány v procentech z maximální hodnoty směrodatné odchylky celého obrazu a to z důvodu standardizace procesu zvýraznění při nastavení parametru u odlišných obrazů.

Procentuální hodnoty pro dosažení vhodné binární adaptivity jsou velmi malé, řádově desítky procenta. To je způsobeno nerovnoměrným zastoupením určitých hodnot směrodatných odchylek v obraze (viz graf 2 – histogram směrodatných odchylek, kapitola 3.3.2). U spojitěho rozhodnutí o prostorové variantnosti jsou nejčastěji nastaveny hodnoty druhého prahu vyšší než u binárního, řádově jednotky procent. První práh je obvykle vhodné volit nulový, ale v určitých případech může nabývat i hodnotu několika desítek procenta.

3.4.4. Oblast výpočtu směrodatné odchylky

K docílení prostorově variantního lokálního operátoru pro zostření je potřeba zjistit hodnoty směrodatných odchylek jasových hodnot jednotlivých pixelů. Defaultně je pro tyto výpočty nastavena oblast výpočtu 9x9 pixelů. Ovšem je možnost interaktivně měnit tuto oblast na základě apriorních znalostí o obraze (velikost) nebo aposteriorních informací získaných během procesu zvýraznění.

Všeobecně platí, že čím větší rozlišení snímku, tím je vhodnější volba větší oblasti pro výpočet směrodatné odchylky (std). Množství a velikost detailů má taky vliv na volbu hodnoty tohoto parametru.



Obrázek 21: Srovnání řídicích matic spojitěho rozhodnutí o adaptivitě s rozdílnými hodnotami oblasti výpočtu směrodatných odchylek (nalevo 15x15 pixelů, napravo 3x3 pixely)

Při výběru správného nastavení je vhodné se opírat o velikosti rozpoznatelných detailů v obraze (počet pixelů) a nepřekračovat tuto hodnotu. Při nastavení vysoké hodnoty tohoto parametru dochází ke ztrátě informace o menších detailech a tím i o vhodné prostorové variantnosti masky.

4. Popis algoritmů

Jednotlivé funkce programu jsou spolu propojeny v hlavní funkci *Sharp.m* a jsou zpracované v grafické podobě v souboru *Sharp.fig*. Využitý je ještě jeden grafický soubor *Prah.fig*, který se otevírá jako náhled pro řídicí matici při nastavování prahu při adaptivitě. Celý program je rozdělen do základních funkcí potřebných pro realizaci adaptivního zostřování, přehlednost a praktičnost celkového algoritmu.

4.1. Smer_odchyl.m

Ihned po načtení a uložení obrázku do datového typu *double* dochází k volání této funkce, jejímž výstupem je matice směrodatných odchylek σ a maximální hodnota σ v obraze. Funkce pracuje s černobílým obrázkem, proto je hned na začátku převeden na jednu matici odstínů šedi příkazem *rgb2gray*. Tato matice je jediným vstupem do funkce. Nyní pomocí interního příkazu *std* v dané oblasti (defaultně nastavená na 9 hodnot) sloupců a řádků počítána směrodatná odchylka pro jednotlivé pixely. Kvůli rychlejšímu výpočtu je počítána jako součin směrodatných odchylek v řádcích a ve sloupcích.

Vzniklá matice směrodatných odchylek je potřebná pro zajištění prostorově variantní masky při rozhodnutí o míře zostření a je použita pro všechny barvy obrazu. Pokud bychom měli matice pro všechny barvy, docházelo by u některých pixelů k nerovnováze jasových hodnot daných barev a tím ke ztrátě informace o primárním parametru, což se projeví barevným zkreslením obrazových dat.

4.2. Prah.m

Tahle funkce je aktivní pouze při volbě adaptivního zostření. Při použití prostorově invariantní masky není potřeba volit práh pro vytvoření řídicí matice, ale funkce *smer_odchyl.m* proběhne již na začátku algoritmu a matice směrodatných odchylek je připravena pro případný požadavek adaptivity.

Směrodatné odchylky každého obrazu se od sebe liší jak rozsahem hodnot tak i jejich zastoupení v obraze. Proto je potřeba standardizovat získané data a to pomocí převodu matice transformační funkcí, která je vytvořena na základě nastavených hodnot od uživatele a přepočítáním vznikne řídicí matice. U spojitého rozhodnutí se volí prahy dva. Problematické

je stanovit optimální hodnotu prahu binárního i spojitého rozhodnutí. Uživatelsky přívětivější je procentuální vyjádření prahu z maximální hodnoty odchylky v obraze. Nastavením prahu na 100% dochází k zostření pouze pixelů s maximální hodnotou (minimální počet).

K vytvoření řídicí matice je využita skoková transformační funkce (Graf 3.1) dle nastavení parametrů. V případě binárního rozhodnutí je to v programu realizováno jako jednoduchá podmínka nerovnosti hodnot odchylky s prahem. Při uživatelské změně prahu dojde k otevření souboru *Prah.m* a k přepočtu řídicí matice v další funkci a tím k dalším úpravám v procesu zostření.

Pro usnadnění práce s programem je nastavování prahu zpracováno i v dalším grafickém prostředí mimo hlavní program a umožňuje grafické znázornění výsledku nastavení prahu. Slouží jako zobrazení pro vytvořenou řídicí matici a možnost interaktivně měnit prahy.

4.3. **Ridici_matice.m**

Během nastavování prahu je volána tato funkce pro vytvoření řídicí matice. Vstupem je matice směrodatných odchylek a jejich maximum z funkce *smr_odchyl.m* a dále hodnoty prahu nastavené uživatelem a informace o způsobu adaptivity. Při požadavku aplikování prostorově invariantní masky jsou ve funkci nastavené hodnoty prahů nastaveny na nulovou hodnotu. Tím dochází k úplnému zostření všech pixelů. Při binárním rozhodnutí o adaptivitě je zadaná prahová hodnota nastavena i u druhého prahu a tím zajistíme binární rozhodnutí pro míru zostření. Důležité je nezapomenout přepočítat hodnotu prahu z procent na hodnotu směrodatné odchylky.

Na začátku je vytvořena nulová řídicí matice o stejných rozměrech jako vstupní obraz. Do ní jsou vloženy jedničky a to na souřadnice pixelů, kde se nachází hodnoty vyšší než druhý práh. U binárního rozhodnutí je vytváření řídicí matice dokončeno, která je poslána do výpočtu konvoluce. Kdežto u spojitého musíme ještě zajistit lineární závislost hodnot míry zostření mezi prvním a druhým prahem.

Je nutno vytvořit pomocnou matici o stejné velikosti jako řídicí, která bude obsahovat pouze jedničky na souřadnicích pixelů s hodnotou směrodatné odchylky v intervalu mezi oběma prahy. Tuto matici vydělíme druhým prahem, jehož hodnota je snížena právě o hodnotu prvního prahu a to proto, abychom dostali interval hodnot začínající nulou a konče rozdílem

obou prahů. Pomocnou matici nyní vynásobíme s maticí směrodatných odchylek a tím dostaneme v pomocné matici na pozicích pixelů, které budeme zostřovat s určitou mírou zostření, hodnoty v intervalu $<0, 1>$. Konečná řídicí matice je vytvořena součtem pomocné matice a binární řídicí matice.

V rovnici 21 je vyjádřen obecný popis transformační funkce charakteru částečné lineární funkce pro spojitě rozhodnutí.

$$R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pro } \sigma > 2.\text{práh} \\ \frac{\text{Sigma}(x, y) - 1.\text{práh}}{2.\text{práh} - 1.\text{práh}} & \text{pro } 1.\text{práh} < \sigma < 2.\text{práh} \\ 0 & \text{pro } \sigma < 1.\text{práh} \end{cases} \quad (21)$$

kde R je vytvořená řídicí matice, $\text{sigma} (\sigma)$ je hodnota směrodatné odchylky dané souřadnice v matici.

4.4. Sharpening.m

Funkce pro vlastní konvoluci lokálního operátoru v procesu adaptivního zostření je klíčová k dosažení cíleného zvýraznění hran v obraze. Jako vstup je originální obraz, nastavený parametr maximální úrovně ostření a řídicí matice pro adaptivní rozhodnutí o míře zostření. Výstupem je upravený obraz se zvýšenou ostrostí a je poslán na grafické rozhraní k zobrazení uživateli

Při zavolání funkce je jako první přepočítána hodnota míry zostření podle vzorce pro výpočet prostředního elementu (vzorec 13), aby nedocházelo k změně jasových hodnot. V celém procesu konvoluce budeme používat jen dvě hodnoty lokálního operátoru a to hodnotu prostředního elementu normalizované masky a hodnotu prvku pro okolní pixely určené maskou. To nám umožňuje symetrie ostřicího lokálního operátoru.

$$a = -(8 * b) + 1 \quad (22)$$

Kde b je prostřední prvek lokálního operátoru a a je hodnota prvku pro okolní pixely jedničku, kterou zde přičítáme je v algoritmu přičtena až později z důvodu možnosti

zajištění adaptivity, kde u pixelů s požadovanou mírou zostřením potřeba vytvořit masky pro původní obraz.

Dalším krokem je již samotná 2D konvoluce původního obrazu s určenými hodnotami lokálního operátoru pro zostření obrazu, která je pospána v kapitole 3.2.

Ukázka zdrojového kódu samotného procesu 2D konvoluce

```
for i = 1:v      % index radku masky;

    for j = 1:w  % index sloupce masky

        xpart = obrUN(v-i+1:x-i+1, w-j+1:y-j+1,:); %posunuti orig. obrazu
                                                % x a y jsou rozmery obrazu

        if i==2&j==2
            mpart=ridici(2:x-1,2:y-1,:).*b;      % vypocet prostredniho
                                                elementu masky
            mpart=mpart+1;                        % pricteni jednicky
        else
            mpart=ridici(2:x-1,2:y-1,:).*a;      % vypocet okolnich prvku
                                                masky
        end

        obrSH = obrSH + xpart.* mpart;           % soucet vysledku po nasobeni
                                                ridici matice s posunutym
                                                obrazem
    end
end
```

V každém cyklu je vytvořen posunutý obraz *xpart* na základě pozice prvku lokálního operátoru a řídicí matice *mpart* vynásobená daným prvkem operátoru. Pokud se jedná o prostřední element masky, což zajišťuje vložená podmínka, je k matici přičtena jednička (viz kapitola 3.2). Výsledný obraz *obrSH* je dán součtem součinů *xpart* a *mpart* z jednotlivých cyklů a poté je poslán na grafické prostředí k zobrazení a následnému možnému porovnání výsledku s původním obrazem.

4.5. Sharp.m

Tento souborem je M-file pro soubor grafického rozhraní souboru *Sharp.fig*, kde jsou volány a zpracovávány jednotlivé funkce programu, odezvy tlačítek a nastavování parametrů. Umožňuje uživateli interaktivně pracovat s hlavním panelem programu a ovládat tak proces adaptivního zostřování obrazu.

Po načtení obrazu jsou postupně volány funkce potřebné pro proces v určitém pořadí. Jsou to m-file soubory pospané v podkapitolách výše, které jsou důležité pro výpočet

směrodatné odchylky, vytvoření řídicí matice a samotná konvoluce obrazu. Při každé změně parametrů dochází ihned k zopakování celého procesu zvýraznění. Ovšem z důvodu zatíženosti programu, je opakována jen ta část procesu, která byla danou změnou nastavení ovlivněna.

4.6. Blokové schéma datového toku a zpracování

Propojení jednotlivých funkcí je zobrazeno ve Schématu 1., který zobrazuje průběh procesu adaptivního zostřování. Vstupem je jen originální obraz, jakož to data pro zpracování. Jako input od uživatele je úroveň ostření, adaptivita, práh a oblast pro výpočet směrodatné odchylky. Jedním z výstupů je i maximum směrodatných odchylek, které je použito pro úpravu prahů, které jsou uživatelem nastavené v procentech. Výsledkem jsou výstupní data zostřeného obrazu zobrazené uživateli v okně programu.

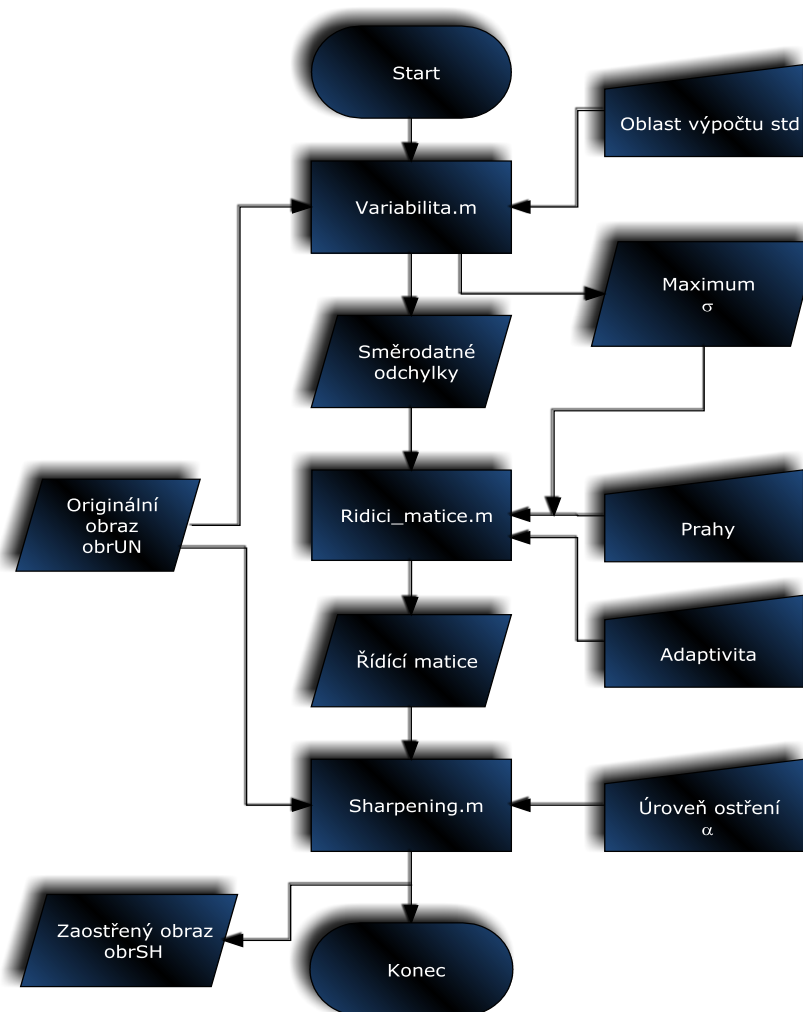


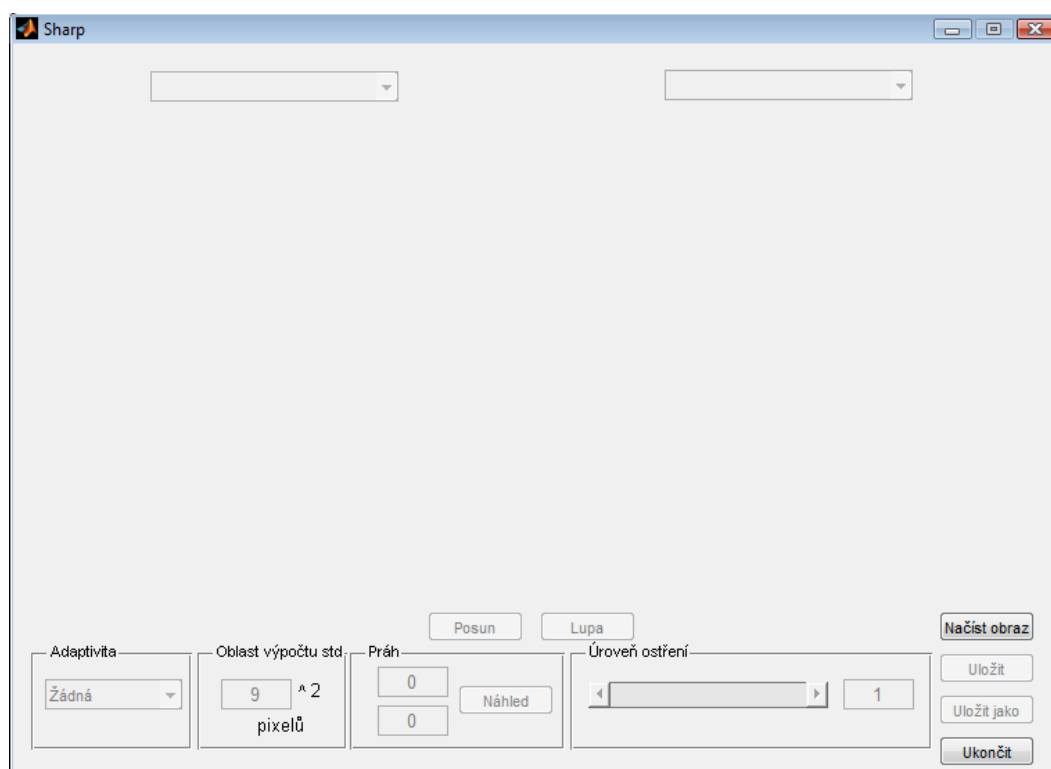
Schéma 1: Datový tok a průběh procesu zvýraznění

5. Uživatelské rozhraní

Programovací prostředí Matlab® umožňuje zpracovat jednotlivé funkce v grafickém rozhraní zvaném GUI. To poskytuje možnost práce průměrného uživatele PC s vytvořeným programem. Lze vytvářet tlačítka, posuvníky, editorové okna pro text a tím interaktivní uživatelské prostředí pro snadné ovládání celého procesu. V programu jsou použity dva soubory grafického prostředí a to hlavní menu a nastavení prahu adaptivity se zobrazením řídicí matice.

5.1. Hlavní menu

Po spuštění programu se otevře soubor grafického prostředí *Sharp.fig*, který má podobu hlavního okna pro zpracování obrazu. Jediné aktivní tlačítko je načíst obraz a samozřejmě tlačítko ukončit, které je aktivní vždy a ukončí celý proces a zavře všechna aktivní okna programu.



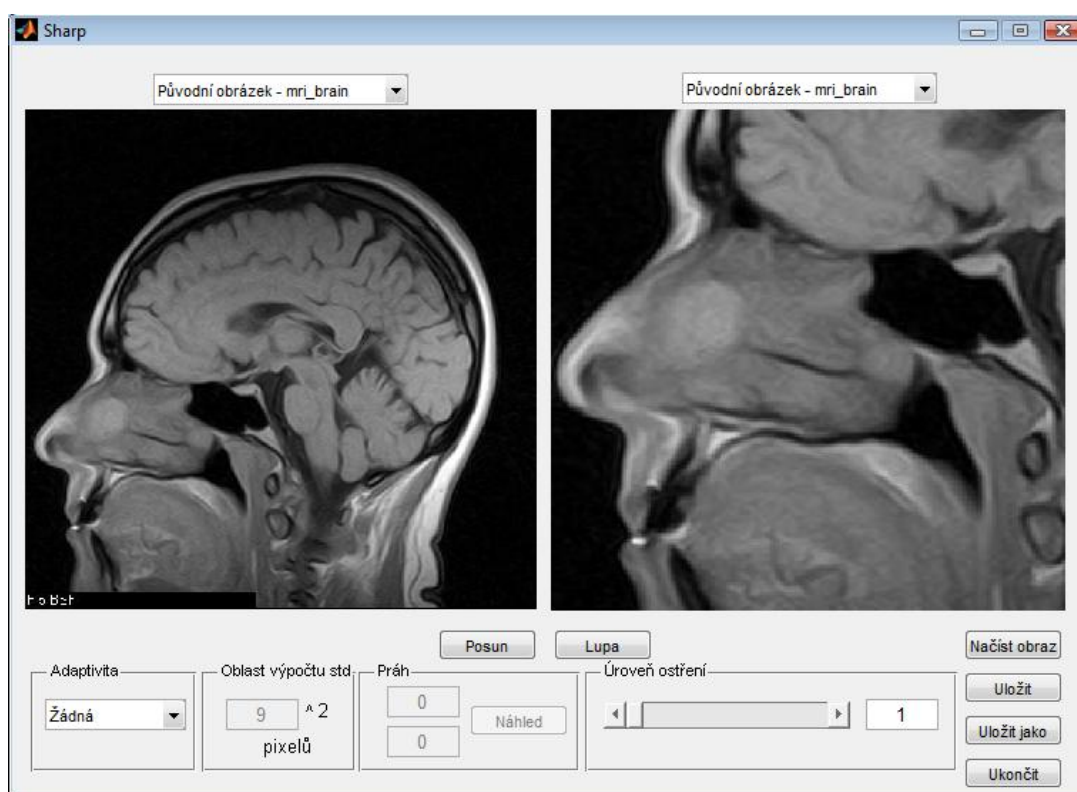
Obrázek 22: Hlavní okno programu po spuštění

Největší část hlavního okna tvoří prostor pro zobrazení dvou obrazů a to načteného a zpracovaného, čehož je dosaženo pomocí grafického pole *axes*. Jeho velikost je pevně

stanovena a načtený obrázek je přizpůsoben rozměrům tohoto pole. To je velká výhoda oproti použití nového otevření *figure*, které se přizpůsobí naopak velikosti obrazu a také je obtížná práce na ploše monitoru s více okny. Nevýhodou axes je velké zmenšení celého obrazu a upravení rozměrů a proto může dojít k deformaci, která je ovšem jenom při zobrazení a rozměry jsou jinak zachovány. Proto se obrázek může jevit jak zploštění či roztáhlý.

Tlačítko *Načíst obraz* otevře průzkumníka paměti počítače a vybídne k výběru obrázku pro další zpracování. Tímto získá informaci o názvu souboru a jeho pozici v paměti počítače a pomocí příkazu *imread* z knihovny Image Processing Toolbox načte data. Proto je nezbytné mít nainstalovaný tento toolbox pro správné fungování programu. Defaultně je formát načítaného obrazu nastaven na *JPEG*, ale Matlab podporuje mnoho dalších formátů, které lze bez problému načíst a zpracovat.

Čas načtení je proměnlivý v závislosti na velikosti obrázku. Jako první jsou počítány směrodatné odchylky jasových hodnot volanou funkcí *směr_odchyl.m*, což může trvat řádové vteřiny, u menších snímků pouhé desetiny sekundy. Až poté se načtený obrázek zobrazí a aktivují se ostatní tlačítka, které umožní další práci s obrazem.



Obrázek 23: Hlavní okno po načtení obrazu s demonstrací funkce lupy

Pro lepší vizualizaci výsledků zpracování obrazu je k dispozici lupa, která umožňuje přiblížit obraz ve stejném měřítku (Obrázek 23), nebo zobrazit výřez o uživatelem zadaných rozměrech. Tlačítko *Posun* umožňuje posouvat okno zobrazení a usnadňuje orientaci v obraze a zobrazení požadovaného místa při určitém přiblížení.

Defaultně je nastavený prostorově invariantní lokální operátor pro zostření obrazů. Míru zostření je možné nastavovat interaktivním posuvníkem s přednastavenými hodnotami nebo přímo číselným vyjádřením v editorovém okně. Udaná hodnota může překročit i limit posuvníku, což je ošetřeno tak, že na posuvníku bude nastavena pouze jeho maximální limitní hodnota. Hodnota zobrazená uživateli vyjadřuje hodnotu prostředního prvku standardizovaného lokálního operátoru. Při změně tohoto parametru dochází ke konvolučnímu zostření načteného obrazu a zobrazení v levém grafickém poli hlavního okna.

Možnost změny adaptivity lokálního operátoru je realizována pomocí pop-up menu s výběrem daného rozhodnutí (binární nebo spojitě) o míře zostření. U binární adaptivity je možnost nastavit pouze jeden práh a u spojitě jsou aktivní prvky pro ovládání obou prahů. Nastavení velikosti oblasti pro výpočet směrodatné odchylky je aktivní pouze při nastavené prostorově variantní masce.

Další důležitou funkcí pro správnou interpretaci výsledků procesu zvýraznění je možnost uložení a zobrazení více verzí zpracování daného obrazu. Výběr obrazu, který chce uživatel zobrazit je realizován jako pop-up menu s názvy uložených obrazů.

Po stisknutí tlačítka *Uložit* dochází k dočasnému uložení obrazu ve formátu .mat. Poté je uživatel vyzván k zadání jména toho obrazu. Nyní má uživatel možnost zobrazení uložených obrazů a to jak v levém tak v pravém grafickém poli hlavního okna. To umožňuje porovnání více variant zpracování při různém nastavení parametrů celého procesu zvýraznění.

Zpracováván je vždy načtený původní obraz bez ohledu na to, jaký obraz je v hlavním okně zobrazen. Ukládá se vždy obraz, který je výstupem z algoritmu zvýraznění původního obrazu při nastavení určitých parametrů zpracování. Původní obraz je ukládán automaticky hned při načtení.

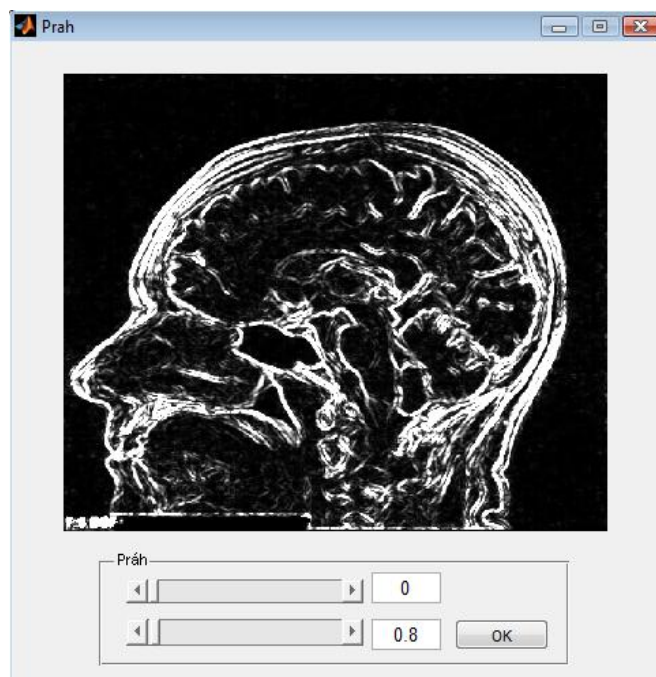


Obrázek 24: Hlavní okno s demonstrací možností uložení a následného zobrazení obrazů s více variantami zostření

Další dostupná funkce pro větší možnosti práce s obrazy, které lze uživatelsky efektivně využít, umožňují uložení obrazu na paměť počítače v podporovaném formátu, který je ve zdrojovém kódu programu nadefinovaný pro formát .jpg. Uložit lze na jakékoli místo na interní či externí paměti. Uživatel je vyzván k výběru jednoho z uložených obrazů ve formátu .mat a k místu určeného k uložení.

5.2. Nastavení prahu

Uživatel nastavuje hodnotu prahu, což je procentuální vyjádření z maximální směrodatné odchylky jasových hodnot. Toto číslo ovšem nevypovídá názorně o vhodném nastavení, proto je graficky zobrazena vytvořena řídicí matice nabývající hodnot v intervalu $<0, 1>$. Tlačítko v hlavním menu *Náhled* v panelu *Práh* volá nové grafické okno souboru *Prah.fig* s posuvníky a editorovými okny pro nastavení hodnoty prahů. Při každé změně této hodnoty dochází k výpočtu nové řídicí matice a k jejímu zobrazení v grafickém poli.



Obrázek 25: Grafické okno pro nastavení prahů a zobrazení řídicí matice

Na obrázku 25 lze vidět grafické okno s názorným zobrazením řídicí matice pro obrázek z předchozí ukázky hlavního menu (obrázek 24). Nulové hodnoty matice jsou vyobrazeny černě a tyto pixely budou konvolovány s maskou pro původní obraz. Nenulové hodnoty řídicí matice určující míru zostření daného bodu jsou zobrazeny jako pixely s určitým odstínem šedi. Uživatel, díky tomu může subjektivně nastavit nejvhodnější hodnotu prahů.

5.3. Schéma grafického prostředí

Každé tlačítko v grafickém prostředí volá nějaké funkce a spouští další řetězec událostí, abychom docílili zostření obrazu a jeho zobrazení uživateli.

Schéma zobrazuje cyklus jednotlivých tlačítek a jim příslušející volaná funkce. Ve sloupci napravo je standardní proces zvýraznění zmíněný již ve schématu 1 v předešlé kapitole. Každý možný zásah uživatelem zasahuje do jiné části procesu zpracování a zobrazení, které je potřeba změnit, ale část procesu zůstává beze změny. Proto je z důvodů rychlejšího výpočtu část procesu vynechána a přepočítávají se jen ty části, které jsou změnou vyvolanou uživatelem ovlivněny.

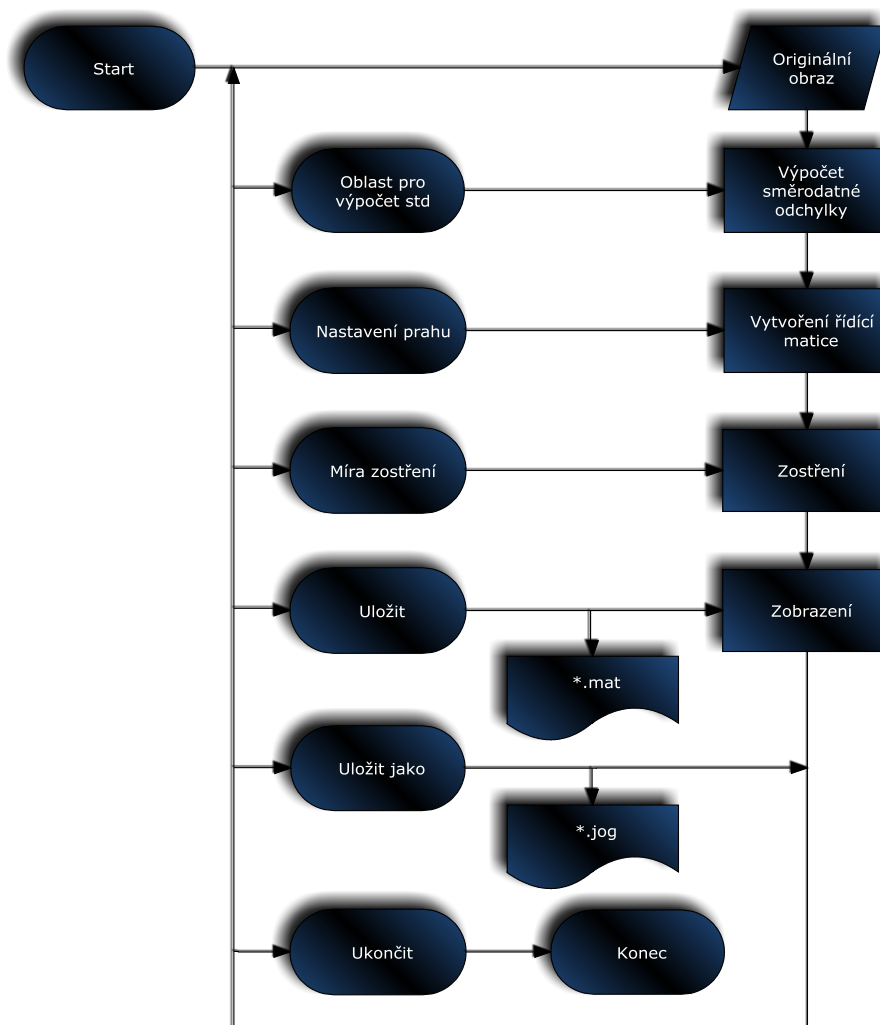
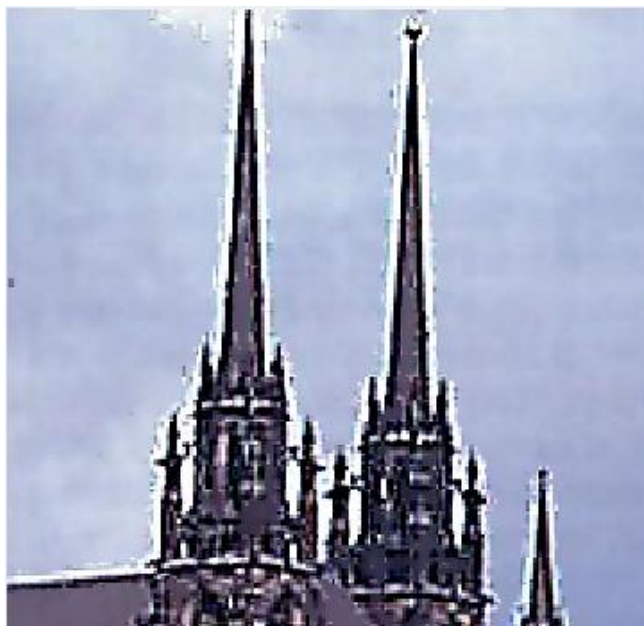


Schéma 2: Schéma grafického prostředí hlavního menu

6. Výsledky a hodnocení

Proces zvýraznění hran konvolučními lokálními operátory dosahuje efektivních výsledků jen při vhodném nastavení daných parametrů. Při nesprávném nastavení obrázků působí nepřírozně (podobnost obrázkům na starých pohlednicích) a objevují se různé artefakty, které kazí dojem kvalitního ostrého obrazu.

Jedním z takových vzniklých artefaktů je „Halo effect“, který vzniká při nadměrném nastavení úrovně ostření (viz Obrázek 26).



Obrázek 26: Ukázka efektu svatozáře při vysoké úrovni zostření s binární adaptivitou (práh=10, míra zostření =17)

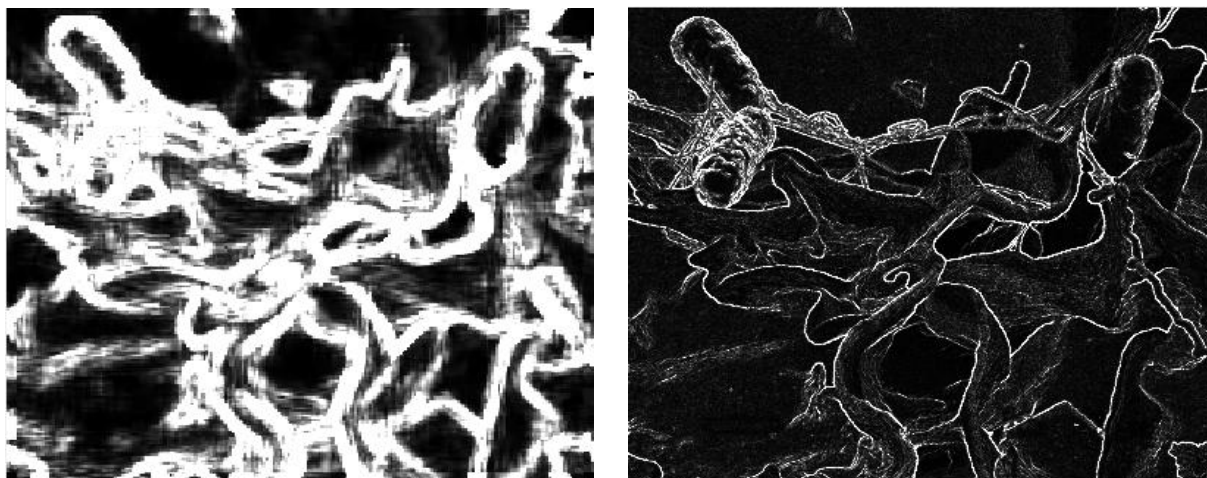
Jeví se jako bílá oblast vedle hrany, která byla zvýrazněna. Vzniká tam, kde je přechod jasu na mnohem světlejší odstín. Dochází také k výraznému zvýraznění šumu, což lze eliminovat na plochách mimo hranu použitím adaptivního ostření.

Na obrázku 27 můžeme vidět zostření obrázku (CT snímek dutiny hrudní) při překročení nastavené míry zostření. Dochází k přestření a zvýraznění všech pixelů v obraze i mimo hranu. Výrazně je zvýšen poměr signál k šumu, což snižuje prostorovou rozlišovací schopnost a celkové psychosenzorické působení obrazu na uživatele.



Obrázek 27: Ukázka aplikace velké míry zostření (napravo) původního CT snímku (nalevo), a tím ke zvýraznění šumu

Velký vliv na nastavení parametrů a tím i na celý proces zvýraznění má velikost obrázku. Při velkém rozlišení je potřeba při adaptivitě nastavit větší oblast pro výpočet směrodatné odchylky, protože jednotlivé detaily v obraze jsou zastoupeny více pixely.

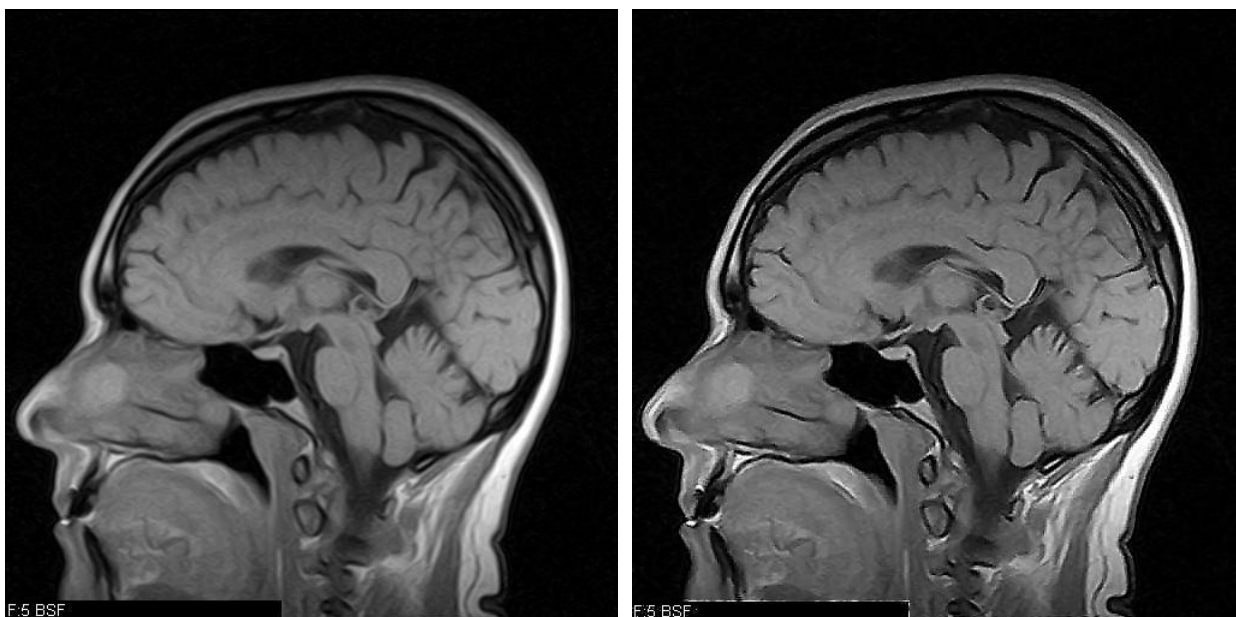


Obrázek 28: Zobrazení řídicí matice při stejném prahu a oblasti pro výpočet směrodatné odchylky u různě velikých obrázků

Na obrázku 28 máme dva obrazy s rozdílným rozlišením. Nalevo 246 x 206 kde dostačuje oblast pro výpočet směrodatné odchylky (std) 9 x 9 pixelů, kdežto u obrázku s vyšším rozlišením (2100 x 1761 pixelů) není tato velikost oblasti dostačující. Zobrazeny jsou pouze detaily a tenké hrany, které při zostření ruší celkový dojem a není dosaženo kvalitního zvýraznění. Proto je nutné zvětšit oblast pro výpočet std.

Malým experimentem s vytvořeným programem jsem nenašel rozdílnosti při nastavení parametrů ostření mezi barevným a černobílým obrazem. Stejný obraz v odstínech šedi i ve třech barvách jsem dle subjektivního hodnocení k dosažení kvalitního zvýraznění zostřil stejnými parametry.

Vhodné nastavení parametrů je klíčem k dosažení kvalitního zostření a požadované kvality obrázku. Správné nastavení se nejčastěji hodnotí psychosenzoricky, ale bylo by možné použít i některé statistické analýzy a na základě určitých znalostí vyhodnotit vhodnost nastavení.



Obrázek 29: Nalevo originální obraz a napravo vhodně zostřený obraz (adaptivně se spojitým rozhodnutím, práh=0, práh 2 = 1 a míra zostření je 7)

Při zpracování prostorově invariantním lokálním operátorem dochází k zostření všech pixelů a tím k nepřiliš kvalitnímu zostření. Aplikací prostorově variantní masky snadno docílíme lepšího psychosenzorického vjemu a nedochází ke znehodnocení daného snímku. Nastavování parametrů při procesu zvýraznění je čistě na uživateli, který vidí hned výsledek zpracování a dle svého subjektivního pocitu může interaktivně měnit zadané parametry k dosažení dostatečné ostrosti obrazu.

Závěr

U adaptivního zostřování obrazů jde o zlepšení psychosenzorického vjemu a usnadnění možnosti analýzy či interpretace obrazových dat. Proto celkové hodnocení je závislé na subjektivním pocitu, který může být u každého člověka odlišný na základě variability citlivosti zrakového systému, nebo jen na tom, co se jedinci líbí více. Závisí také na druhu snímku, jeho rozměrech, velikosti, rozptylu nebo průměrné jasové hodnoty (viz kapitola 6).

Některé obrázky, kde je vysoká hodnota šumové složky (nemusí být na celkovém pohledu viditelná), lze jen stěží efektivně zaostřit. Zpracováním dochází k zvýraznění šumu již při malé úrovni zostření a tím ke znehodnocení obrazových dat. Vhodné by bylo použití nejprve jiného procesu zpracování obrazových dat, jako vyhlazení nebo redukce šumu a po té aplikaci zostřujících procesů.

Program je schopen načíst jakýkoli obrázek, černobílý i barevný, jehož maximální možná velikost je dána pamětí počítače. Nabízí měnit tři různé parametry pro dosažení kvalitního výsledku a to úroveň ostření, prahu binárního nebo spojitého rozhodnutí pro adaptivitu a velikost oblasti pro výpočet směrodatné odchylky. Zpracování v grafickém prostředí je uživatelsky příznivější a ulehčuje práci s programem.

Použitá literatura

- [1] JAN, J. Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration - Concepts and Methods. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2006. 760 s. ISBN: 0-8247-5849- 8.
- [2] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. Brno: VUTIUM Brno, 2002. 427 s. ISBN: 80-214-1558- 4.
- [3] FRIBERT, Miroslav. Základy zpracování obrazu. Pardubice: Universita Pardubice, 2006. 104 s. ISBN 80-7194-901-9, 55-771-06.
- [4] HALOUNOVÁ, Lena. Zpracování obrazových dat. Praha: ČVUT - Česká technika, únor 2009. 102 s. ISBN 978-08-01-04253-3.
- [5] HORA, Petr; Heringová, Blanka. MATLAB: Díl 1 – Práce s programem [online]. [cit. 2011-04-25]. H-S, 1995.
Dostupné z WWW: <<http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/mvs/tutorial.pdf>>
- [6] HLAVÁČ, Václav. Hledání hran [online]. [cit. 2011-04-25]. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze katedra kybernetiky, Centrum strojového vnímání. Dostupné z WWW: <<http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/33zsl1zima2005/slidy/DetekceHran.pdf>>

Použité obrázky

- [1] MRI brain, Dostupné z WWW:
<http://intellectualcurrency.files.wordpress.com/2011/02/mri_brain.jpg>
- [2] Salmonella, Rocky Mountain Laboratories, NIAID, NIH, Dostupné z WWW:
<<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/SalmonellaNIAID.jpg>>

Uživatelský manuál

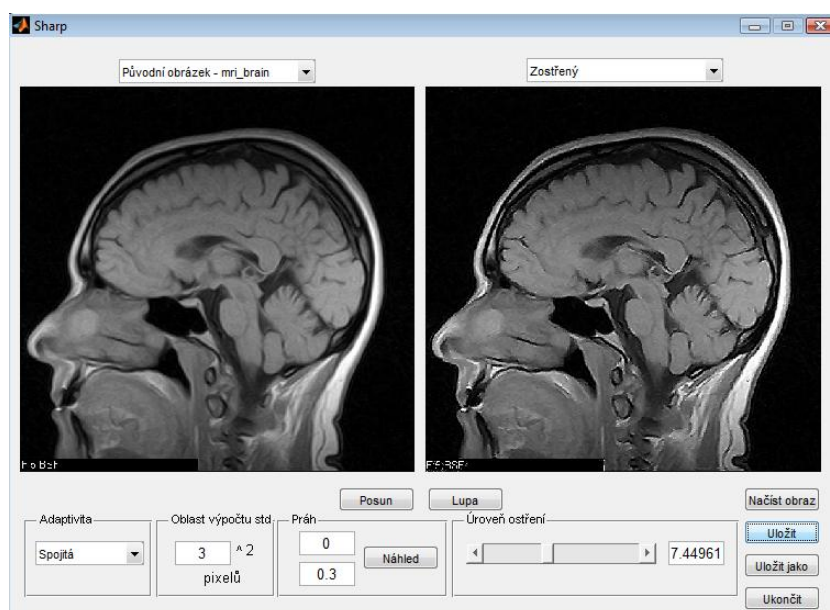
Tento dokument slouží jako manuál k vytvořenému programu pro adaptivní zostřování obrazů v rámci bakalářské práce. Program je zpracován v programovacím prostředí Matlab® a pro snadnější práci s ním je upraven do grafického rozhraní. Ke správné funkčnosti je potřeba mít doinstalován Image Processing Toolbox.

Základní funkce

- Načtení libovolného obrazu
- Zostřování s volitelným isoplanárním stupněm zostření
- Zostřování s adaptivním stupněm zostření
- Zobrazení vstupního a zostřeného obrazu
- Možnost vizuální porovnání více variant
- Uložení zostřeného obrazu do paměti počítače ve formátu JPEG s příponou .jpg

Hlavní menu

Hlavní menu se otevře ihned po spuštění programu. Skládá se z grafických polí pro zobrazení vstupního i zostřeného obrazu a tlačítek pro ovládání programu a k nastavení parametrů celého procesu zvýraznění.



Obrázek 30: Hlavní menu po načtení a zostření obrazu

Načtení obrazu

Program umožňuje načíst a zpracovat černobílé i barevné obrazy v mnoha formátech v závislosti na možnostech Matlabu®. Jedny z nejpoužívanějších formátů, které jsou pro načtení podporovány, jsou JPEG, TIFF, BMP, ICO, PNG aj. Velikost obrazu je omezena RAM pamětí počítače.

Ovládání a tlačítka Hlavního menu

Snadné ovládání programu je zajištěné vytvořeným grafickým prostředím.

- *Načíst* – načtení souboru (defaultní formát je JPEG s příponou .jpg)
- *Uložit* – dočasné uložení zpracovaného obrazu ve formátu .mat pro možnost vícenásobného zobrazení. Po ukončení programu jsou tyto data smazány.
- *Uložit jako* – uložit obraz ve formátu JPEG do paměti počítače.
- *Adaptivita* – možnost nastavení adaptivního zostření a jeho rozhodnutí.
- *Oblast pro výpočet std* – nastavení rozměru čtvercové masky pro výpočet směrodatných odchylek jasových hodnot v obraze.
- *Prah* – nastavení prahů pro rozhodnutí o adaptivitě.
- *Náhled* – grafické zobrazení matice řídící adaptivitu a možnost interaktivního nastavování prahů.
- *Úroveň zostření* – interaktivní nastavení míry zostření obrazu.
- *Lupa* – přiblížení nebo zobrazení určitého výřezu obrazu při zobrazení v grafickém poli.
- *Posun* – posouvá daný výřez při přiblížení po obraze.
- *Ukončit* – zavře a ukončí celý program.

Doporučený postup práce s programem

1. Spuštění souboru Sharp.m
2. Načtení obrazu z paměti počítače
3. Nastavení míry zostření
4. Nastavit adaptivitu, oblast pro výpočet std a prahy
5. Zobrazení náhledu řídící matice pro danou nastavenou oblast a prahy
6. Uložit/Uložit jako/Ukončit/Načíst

Výsledky procesu zostření

Zpracovaný obraz je možno uložit do paměti programu a po té zpětně zobrazit a porovnávat s jinými variantami zostření. Ukládá se vždy výchozí obraz získaný z posledního zpracování původního obrazu. Po tomto uložení je může uživatel uložit do paměti svého počítače ve formátu JPEG. Obrazy uložené do paměti programu jsou po ukončení programu vymazány.

Dalším postupem může být interpretace a vizualizace výsledků více variant, načtení nového obrazu nebo ukončení programu.

Limity nastavitelných hodnot

- Práh – procentuální vyjádření (0 až 100)
- Úroveň zostření – Hodnota prostředního prvku standardizovaného lokálního operátoru
 - Rozsah posuvníku (1 až 17)
 - Editorové okno (1 až ∞)
- Oblast pro výpočet std – rozměr čtvercové masky (3 až čtvrtina menšího rozměru obrázku)

Řešení problémů

- Chyba při spuštění – pravděpodobně si neodpovídají verze Matlabu
- Chyba při načtení obrazu – program pravděpodobně nepodporuje vybraný typ formátu daného souboru nebo není nainstalován potřebný toolbox.
- Chyba při zpracování obrazu – nadměrná velikost načteného obrazu, kde limit je dán pamětí počítače.
- Při změně parametru nedošlo ke změně výstupního obrázku – v některých případech po změně parametru je potřeba znovu navolit míru zostření (aktualizovat posuvník kliknutím).