

# Možnosti metody Analýza textury pro hodnocení MR obrazu

Daniel Jiráček



Autoreferát dizertační práce k získání vědecké hodnosti Ph.D.  
Summary of thesis for Degree of Doctor of Philosophy in Biophysics

Jméno: Daniel Jirák  
Název dizertační práce: Možnosti metody Analýza textury  
pro hodnocení MR obrazu  
Oborová rada: 11 – Lékařská biofyzika  
Školitel: Ing. Milan Hájek CSc., DrSc.

Dizertační práce byla vypracována v distančním studijním programu  
1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy na pracovišti Institutu klinické a  
experimentální medicíny (IKEM), oddělení MR-ZRIR, v Praze.

Předseda komise pro obhajobu dizertačních prací ve vědním oboru  
Lékařská biofyzika:

Prof. RNDr. František Vítek, DrSc.

## Obsah

1. Cíle dizertační práce.....	4
2. Úvod .....	5
3. Výsledky práce .....	6
3.1. Výsledky studie na fantomech.....	6
3.2. Výsledky studie TA lidských jater .....	9
3.2.1. TA lidských jater in vitro .....	9
3.2.2. TA lidských jater in vivo.....	10
3.2.3. Výsledky studie TA lýtkového svalu .....	12
3.2.4. Výsledky studie TA jablek měřených v průběhu dozrávání a skladování.....	13
4. Závěr .....	14
5. Summary .....	16
6. Literatura .....	20
7. Vlastní publikační aktivita .....	21
7.1. Články v impaktovaných časopisech týkající se tématu dizertační práce .....	21
7.2. Ostatní publikace týkající se tématu dizertační práce .....	21
7.3. Ostatní články v impaktovaných časopisech.....	22
7.4. Aktivní účast na konferencích s abstraktem .....	22
7.4.1. Přednášky a postery týkající se tématu dizertační práce .....	22
7.4.2. Ostatní přednášky a postery .....	23

## 1. Cíle dizertační práce

Cílem této práce bylo aplikovat metodu analýzy textury (*TA*) pro vyhodnocování obrazů z magnetické rezonance (*MR*) a zhodnotit zavedení *TA* do klinické praxe.

Jednotlivé dílčí úkoly byly:

- 1) vyvinout fantom vhodný pro *TA* a *MR* zobrazování, který je biochemicky a mechanicky stabilní
- 2) optimalizovat výběr texturních parametrů charakterizujících danou texturu
- 3) aplikovat metodu *TA* při hodnocení *MR* obrazů.

## 2. Úvod

Textura představuje distribuci signálu obrazové informace dané jasem, kontrastem a barvou v obrazové matici tvořené obrazovými body, tzv. pixely. Každé vizuální vyhodnocování textury je zatíženo kromě metodických chyb (např. vliv šumu) i nedokonalým lidským vnímáním (omezená kontrastní citlivost zraku) a subjektivními chybami, které lze částečně eliminovat pomocí matematicko-statistických metod, které dokáží lépe klasifikovat rozdílné struktury a popsat digitální obraz kvantitativně, což je jejich největší předností. Jednou z těchto metod je analýza textury (*TA*).

*TA* je metoda, která používá matematických parametrů pro popis obrazů. V této práci jsme využívali statistický přístup pro vyhodnocování *MR* obrazů [1, 2]. Jelikož lidské oko nedokáže vnímat texturní informaci popsanou některými texturními parametry [3], mohla by *TA* dodat hodnocení *MR* snímků komplexnější charakter.

První část dizertační práce se zabývala metodikou hodnocení *MR* obrazů, kde se optimalizoval výběr texturních parametrů a způsob klasifikace textury. Pro tyto účely bylo nutné vyrobit fantom, který by byl vhodný pro *MR* zobrazování a *TA*. V druhé části práce se výsledky získané při analýze fantomů aplikovaly v klinických studiích (hodnocení snímků cirhotických jater, atrofických svalů lýtky) a analýze potravin (porovnání různých odrůd jablek).

### 3. Výsledky práce

#### 3. 1. Výsledky studie na fantomech

Byl vyvinut nový typ fantomu s nodulární strukturou určený pro *MR* zobrazování a *TA*. Výroba tohoto *PSAG* fantomu z polystyrénových (*PS*) kuliček ponořených do agaru (*AG*) je jednoduchá a levná. Změnou průměru polystyrénových kuliček lze připravit fantomy s různou strukturou. Relaxační časy *T1* a *T2* jsou v rozmezí relaxačních časů biologických tkání [4] a mohou se snadným způsobem měnit pomocí různé hustoty *PS* kuliček v agaru nebo přidáním kontrastní látky.

*PSAG* fantomy byly měřeny na experimentálním stroji Bruker Biospec 4.7 T *T2* váženou sekvencí. Jejich stabilita se testovala po dobu 12 měsíců. *MR* snímky se analyzovaly programem MaZda, který počítal texturní parametry [5]. Pro klasifikaci textury byly parametry vybrány automatickými technikami implementovanými v programu MaZda (Fisherova technika -  $F_{koeff}$ , kombinovaná pravděpodobnost chyby klasifikace a průměrná korelace koeficientů mezi parametry - *POE*) [6, 7] nebo manuálním výběrem, který jsme navrhli a je založen na existenci invariantních parametrů. Nejprve se sledovaly změny u vybraných *TA* parametrů. T-test ( $p < 0.01$ ) potvrdil neměnnost parametrů během dlouhodobého experimentu, to znamená, že struktura fantomů se nezměnila. Separace textur *F1* (průměr *PS kuliček* 2.00 - 3.15 mm) a *F2* (průměru 1.25 - 2.00 mm) byla vždy 100% úspěšná a rozdíl hodnot stejných parametrů pro různé textury byl vždy víc než 30%. Pro klasifikaci textur byly použity přímá analýza (*RAW*) a lineární diskriminační analýza (*LDA*) implementované v programu MaZda. Výsledky byly ověřeny na datech měřených experimentálním přístrojem SMIS 7 T a také v tomto případě byla klasifikace textur 100% správná.

V multicentrické studii byly porovnávány *PSAG* fantomy se třemi různými texturami *F1*, *F2* a *F3* (průměr 0.80 - 1.25 mm) měřené na různých klinických *MR* přístrojích (síla magnetického pole 1-1.5 T). Výsledky klasifikace se na jednotlivých pracovištích lišily (tab. 1). Klasifikace podle *TA* parametrů vybraných automaticky byla přesnější než u manuálního výběru.

Sada <i>TA</i> parametrů	<i>MR1</i> [%]	<i>MR2</i> [%]	<i>MR3</i> [%]	<i>MR4</i> [%]	<i>MR5</i> [%]	<i>MR1-5</i> [%]
$F_{koef}$ <i>RAW</i>	8.0	0.0	10.7	12.6	19.6	40.5
$F_{koef}$ <i>LDA</i>	13.3	0.6	13.8	13.2	22.9	51.1
<i>POE</i> <i>RAW</i>	6.8	0.0	46.5	30.2	21.6	45.2
<i>POE</i> <i>LDA</i>	16.1	0.6	28.9	21.1	25.1	-
Man.výběr <i>RAW</i>	41.4	39.9	60.4	54.7	49.3	50.3
Man.výběr <i>LDA</i>	45.8	41.5	50.9	55.0	56.7	56.3

**Tabulka 1.** Klasifikace separací *PSAG* fantomů *F1*, *F2* a *F3* v multicentrické studii na různých klinických pracovištích *MR1-5*. Data byla standardizována a klasifikace provedena pomocí *RAW* a *LDA* metod pro každý jednotlivý *MR* přístroj a pro data ze všech přístrojů dohromady. V procentech je uvedena chyba klasifikace, pouze v jednom případě u klasifikace dat ze všech *MR* přístrojů pomocí *LDA* podle *TA* parametrů vybraných metodou *POE* software nebyl schopen spočítat chybu klasifikace (floating point error). Proto jsme použili jinou klasifikační metodu, nelineární diskriminační analýza určila chybu klasifikace 45.3 %.

Na klinickém tomografu Siemens Vision 1.5 T v IKEM byl testován vliv rozlišení na schopnosti separovat rozdílné struktury *PSAG* fantomů. 100% úspěšná separace byla dosažena pro rozlišení 0.43x0.45 mm na jeden pixel, velice dobré výsledky byly dosaženy také pro rozlišení 0.77x0.90 mm na jeden pixel. Nejméně přesná klasifikace byla u dat měřených s rozlišením 1.53x1.80 mm na jeden pixel, především při použití

manuálně vybraných *TA* parametrů, kde se chyba pohybovala kolem 63% (tab. 2).

Rozlišení	$F_{koeff}$	$F_{koeff}$	<i>POE</i>	<i>POE</i>	Man.výběr	Man.výběr
	<i>RAW</i>	<i>LDA</i>	<i>RAW</i>	<i>LDA</i>	<i>RAW</i>	<i>LDA</i>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0.43x0.45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.77x0.90	2.5	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0
1.53x1.80	7.7	2.6	23.1	7.7	61.5	64.7

**Tabulka 2.** Vliv rozlišení na separaci *PSAG* fantomů *F1*, *F2* a *F3*. Experiment byl proveden na klinickém pracovišti *MR1*. Data byla standardizována a klasifikace provedena pomocí *RAW* a *LDA* metod podle *TA* parametrů vybraných manuálním výběrem nebo pomocí automatických metod  $F_{koeff}$  a *POE*. V procentech je uvedena chyba klasifikace.

Studie na *PSAG* fantomech prokázala, že fantomy jsou minimálně 12 měsíců stabilní, při dostatečném rozlišení *MR* obrazů mají dobrou separovatelnost a reprodukovatelnost a poskytují dostatečný signál pro *MR*. Techniky automatického výběru *TA* parametrů ( $F_{koeff}$  a *POE*) a následné klasifikace *RAW* a *LDA* technikami jsou citlivé na velmi malé rozdíly intenzit mezi jednotlivými pixely (vliv šumu, který je vždy přítomen v *MR* obraze, lokální nehomogenity atd.). Tímto způsobem je možné separovat dokonce i stejné textury. Proto jsou vhodnější pouze pro separaci rozdílných struktur. Z tohoto důvodu jsme vyvinuli algoritmus založený na výběru invariantních parametrů, který umožňuje klasifikovat na rozdíl od automatických technik i stejné textury.



## 3.2. Výsledky studie TA lidských jater

Pomocí TA byly porovnávány optické (makroskopické) a MR snímky lidských jater *in vitro*. Dále se pomocí texturních parametrů klasifikovala zdravá a cirhotická játra měřená MR *in vivo*, což bylo hlavním cílem této práce.

### 3.2.1. TA lidských jater *in vitro*

Nejprve jsme se zabývali porovnáním MR a optických snímků jater. Cílem bylo odpovědět otázku, zda texturní parametry popisují optické a MR snímky stejným způsobem a zda existuje korelace mezi TA parametry obou typů snímků. Hypotéza předpokládala lineární závislost texturních parametrů vypočtených z optických a MR snímků.

Vzorky cirhotických a zdravých jater byly měřeny na MR spektrometru Bruker Biospec 4.7 T pomocí T2 (spin echo) a T2\* vážené sekvence (gradient echo). Optické snímky byly pořízeny digitálním fotoaparátem Camedia C-4040 Z (Olympus, Germany) ve formátu JPEG. Optické a MR snímky byly analyzovány stejným způsobem jako při analýze PSAG fantomů.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo použitím gradientní sekvence, kde správnost separace zdravých a cirhotických jater byla 100% úspěšná. Důvodem je velká citlivost gradientní sekvence na lokální nehomogenity magnetického pole, které se v cirhotických játrech díky uzlovité přestavbě jaterní tkáně vyskytují ve velké míře. U MR snímků měřených spinechovou sekvencí a optických snímků chyba klasifikace nepřesáhla 12%.

V dalším kroku jsem studovali vztah mezi texturními parametry optických a MR snímků zdravých jater. Korelace žádného TA parametru nebyla statisticky signifikantní. Texturní parametry vypočtené z optických a MR snímků tedy nepopisují texturu stejným způsobem.

### 3.2.2. TA lidských jater in vivo

Pomocí metody TA jsme se snažili odlišit zdravá a cirhotická játra měřená MR *in vivo* u pacientů v různých klinických stádiích a kontrolní skupiny dobrovolníků. Cílem bylo najít takové parametry, které nejlépe popisují texturu lidských jater měřených *in vivo* a porovnat přesnost klasifikace různými statistickými metodami. Pacienti byli rozděleni do tří skupin A, B, C (nejtěžší) podle stupně jaterní cirhózy charakterizované CPS (Child-Pugh score) [8]. MR vyšetření bylo provedeno na celotělovém tomografu Siemens Vision 1.5 T na pracovišti IKEM. Pro analýzu textury byly použity T2 vážené MR obrazy naměřené spinechovou sekvencí se zadřením dechu, které byly následně analyzovány v programu MaZda. Protože jsme předpokládali separaci různých textur (zdravá a cirhotická játra), byly texturní parametry určené pro klasifikaci vybrány pouze automatickými technikami ( $F_{koeff}$  a POE), které jak ukázala studie na fantomech, jsou pro separaci rozdílných struktur vhodné. Klasifikace textury byla provedena RAW a LDA analýzou.

Nejdříve se zkoumala schopnost TA odlišit všechny cirhotické pacienty od zdravých kontrol. Separace byla poměrně úspěšná, chyba klasifikace se pohybovala kolem 8%. Průměrná chyba separace každé skupiny pacientů zvláště s kontrolami se pohybovala v rozsahu 10%. Nejpřesnější klasifikace byla dosažena mezi kontrolami a skupinou pacientů v nejtěžším klinickém stadiu ve skupině C (2%). Výsledky ukazují, že automatické metody výběru pacientů a klasifikace umožňují rozlišit kontrolní data od dat pacientů v jednotlivých skupinách A, B a C a jsou dostatečně senzitivní (tab.3).

Naopak separace všech skupin pacientů dohromady a kontrol byla velice nepřesná, jak bylo potvrzeno další analýzou zabývající se pouze separací pacientů seřazených do jednotlivých skupin A, B, C. Je to mimo jiné dáno tím, že jednotlivé stupně jaterní cirhózy plynule přechází mezi sebou. Nejsou zde žádné skokové změny ve smyslu funkčnosti jater, což odpovídá i pozvolným morfologickým změnám. Proto se často data v

jednotlivými skupinách A, B, C překrývají, a to negativně ovlivňuje úspěšnost správné separace (tab.3).

Studie *TA* lidských jater *in vivo* prokázala, že metodou analýzy textury lze odlišit cirhotická a zdravá játra. Játra zobrazená na *MR* snímcích je možné popsat sadou texturních parametrů, které byly vybrány automatickými selektivními metodami  $F_{koef}$  a *POE*. Větším počtem dat pacientů a kontrol ve skupinách by se měla zlepšit separovatelnost. Pro reálné klinické aplikace analýzy textury pro hodnocení cirhotických jater je nezbytné klást důraz na zvětšení specifity metody.

	<i>RAW</i>		<i>LDA</i>	
	$F_{koef}$ [%]	<i>POE</i> [%]	$F_{koef}$ [%]	<i>POE</i> [%]
Kontroly vs. pacienti (A, B, C)	7.2	7.2	8.1	11.7
Pacienti - A vs. pacienti - B vs. pacienti - C vs. kontroly	62.2	56.8	57.7	55.0
Pacienti - A vs. pacienti - B vs. pacienti - C	58.3	62.5	56.3	46.9
Pacienti - A vs. kontroly	27.6	13.8	6.9	6.9
Pacienti - B vs. kontroly	12.8	12.8	25.5	10.6
Pacienti - C vs. kontroly	10.8	1.5	15.4	6.2

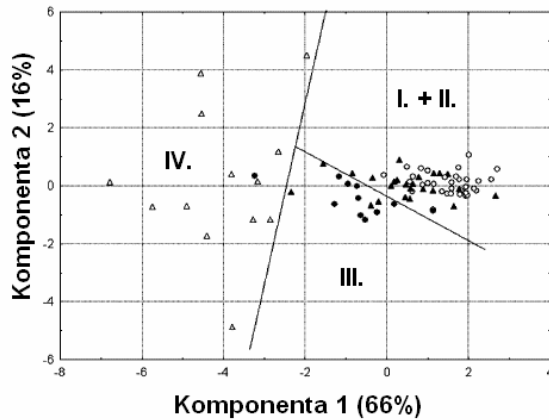
**Tabulka 3.** Klasifikace pacientů a zdravých dobrovolníků pomocí *RAW* a *LDA* metod. Data byla standardizována a výběr *TA* parametrů byl proveden automatickými technikami  $F_{koef}$  a *POE*. V procentech je uvedena chyba klasifikace.

### 3.2.3. Výsledky studie TA lýtkového svalu

Cílem této práce bylo popsat morfologické změny svalových onemocnění texturními parametry a porovnat klasifikaci TA se standardním radiologickým hodnocením zdravých a patologických lýtkových svalů.

T1 vážené MR obrazy naměřené na celotělovém stroji Siemens Vision 1.5 T na pracovišti IKEM byly rozděleny do čtyř skupin podle radiologického hodnocení postižení svalů a toto rozdělení bylo porovnáno s výsledky TA. Pro popis textury lýtkových svalů byly TA parametry vybrány algoritmem založeným na invariantních parametrech.

Tyto TA parametry klasifikovaly skupinu pacientů a kontrol s 80% shodou s radiologickým hodnocením (obr.1). Studie prokázala, že TA může odlišit zdravou a postiženou tkáň a může pomoci objektivně popsat změny ve svalech při jeho dlouhodobém sledování. Analýza textury je tedy použitelným nástrojem pro orientační hodnocení stupně postižení svalů.



Obrázek 1. Analýza PCA všech kontrol a pacientů. Analýza přiřadila jednotlivé subjekty do stejné skupiny I.- IV. (I. kontrola, IV. nejvíce postižené svaly) jako radiologové. Skupiny I. a II. nebylo možné od sebe oddělit, protože se jejich data překrývala.

### 3.2.4. Výsledky studie TA jablek měřených v průběhu dozrávání a skladování

Cílem této práce bylo analyzovat *MR* obrazy jablečných odrůd Idared, Redspur a Topaz metodou *TA* a najít korelaci mezi texturními parametry a fyzikálně chemickými parametry (např. tuhost, obsah sušiny, celková acidita).

*MR* obrazy ovoce byly naměřeny v různou dobu zrání a skladování na experimentálním *MR* spektrometru Bruker Biospec 4.7 T. Po naměření *MR* obrazů *T2* váženou sekvencí se provedl fyzikální a chemický rozbor jablek [9]. *MR* snímky se analyzovaly programem MaZda.

Pro odlišné odrůdy jablek byly zjištěny signifikantní rozdíly *TA* parametrů, fyzikálních a chemických parametrů. Mezi některými *TA*, chemickými a fyzikálními parametry byly nalezeny signifikantní korelace během zrání a skladování ovoce (tab. 4). Dynamiku změn některých texturních parametrů během zrání a skladování bylo možno popsat polynomickými funkcemi a byla rozdílná pro různé jablečné odrůdy.

Tato studie ukázala, že kvantitativní analýza *MR* obrazů jablek pomocí *TA* parametrů může pomoci charakterizovat jednotlivé odrůdy.

	<i>TA</i> Šikmost	<i>TA</i> Pločnost	<i>TA</i> SumAvg (0,3)	<i>TA</i> SumEnt (0,5)
Obsah sušiny	- 0.17	- 0.18	0.40	0.36
Tuhost dužiny	0.01	0.03	- 0.27	- 0.16

**Tabulka 4.** Koeficienty korelace mezi vybranými chemickými, fyzikálními a *TA* parametry pro odrůdu Idared. Signifikantní hodnota korelačního koeficientu je 0.21 pro hladinu spolehlivosti > 99%.

## 4. Závěr

V této práci byly analyzovány *MR* obrazy fantomů, jablek, lýtkových svalů a jater pomocí *TA*. Dosažené výsledky lze shrnout do několika bodů:

- Pro potřeby optimalizace algoritmu výběru texturních parametrů a klasifikace textury byl vyvinut nový typ fantomu. Tento *PSAG* fantom byl podroben dlouhodobému testování, při kterém byla prokázána jeho stabilita po dobu minimálně 12 měsíců. *PSAG* fantom je vhodný pro *MR* zobrazování i pro aplikace *TA*, protože poskytuje dostatečný *MR* signál a umožňuje simulovat různé nodulární textury.
- Ukázali jsme vliv rozlišení na přesnost klasifikace textury pomocí *TA*. Při dostatečném rozlišení metoda *TA* prokázala dobrou separovatelnost různých struktur na *MR* obrazech. Dostatečné rozlišení je i nutnou podmínkou pro potenciální použití *TA* v klinické aplikaci, v opačném případě naše studie neukazuje velký přínos pro zavedení *TA* v klinickém vyšetřování.
- Byl úspěšně testován program *MaZda* určený pro analýzu *MR* obrazů. Tento program, vyvíjený v rámci projektů *COST B11* a *B21* [10, 11], kterých jsme se zúčastnili, plně dostačuje pro statistickou texturní analýzu *MR* obrazů. Implementované klasifikační metody a techniky pro výběr parametrů byly aplikovány v experimentálních i klinických studiích.
- Byl navržen algoritmus výběru invariantních texturních parametrů, které nesou obrazovou informaci. Tento algoritmus se uplatní především v případech, kdy není známa *a priori* informace o textuře, což je častý případ analyzovaných dat v praxi. Algoritmus byl testován ve studii *TA* na fantomech a lýtkových svalech.
- Prokázali jsme, že metodou *TA* lze hodnotit stupeň postižení lýtkových svalů.

- Prokázali jsme, že metodou *TA* lze odlišit cirhotická a zdravá játra, nicméně specifická metody je nízká, což brání rozšíření této metody do klinické praxe. Je možné předpokládat, že s větším rozlišením se zvedne i specifická *TA* při hodnocení *MR* snímků cirhotických jater, což by umožnilo častější využití metody *TA* v klinické praxi.
- Pomocí *TA* jsme charakterizovali jednotlivé odrůdy jablek.

## 5. Summary

The evaluation of clinical magnetic resonance (*MR*) images is influenced by errors (subjective evaluation, noise, etc.). It is possible to eliminate these errors by using certain mathematical and statistical methods. One of these methods is texture analysis (*TA*), which can describe images quantitatively by computed texture parameters.

The aim of this thesis was to analyze *MR* images of various subjects (phantoms, apples, calf muscles, livers) by *TA* and to evaluate its possible use in clinical practice. The main tasks of the thesis were:

- 1) to develop a new phantom suitable for *TA* and *MR* imaging that is biochemically and mechanically stable
- 2) to optimize an algorithm for *TA* parameter selection and classification
- 3) to apply *TA* in evaluating *MR* images.

The first methodical part of the thesis deals with the optimization of texture parameter selection and texture classification. For this purpose a new type of phantom was developed. This *PSAG* phantom, with a nodular structure from polystyrene spheres (*PS*) placed into agar (*AG*), is suitable for *MR* imaging and for *TA* because it produces a strong *MR* signal and because its *T1* and *T2* relaxation times are in the range of biological tissue and can be easily modified by employing various densities of *PS* spheres or by the addition of a contrast agent. Measurements of *PSAG* phantoms using an experimental Bruker Biospec 4.7 T *MR* spectrometer confirmed their stability for at least 12 months.

*MR* images were analyzed by the program MaZda, which computes about 300 texture parameters [5]. Automatic techniques (Fisher coefficient  $F_{coef}$ , the combined probability of classification error and average correlation coefficients between features *POE*) [6, 7] and a manual algorithm based on invariant texture parameters selected *TA* parameters for image classification, which was done by Raw analysis (*RAW*) and Linear discriminant analysis (*LDA*). *TA* was able to successfully separate



phantoms with different diameters of *PS* spheres. The results were verified by data obtained with an experimental SMIS 7 T *MR* machine.

The possible separation of different structures at the limits of resolution using *TA*, measured by a standard sequence with the standard parameters used in clinical examinations, was investigated using five clinical *MR* scanners. These multicenter studies should prove whether *MR* experiments are comparable among various *MR* centers equipped with different *MR* hardware and software. The classification differed (0-60%). The reason was insufficient resolution, as shown by tests conducted at various resolutions with a 1.5 T Siemens Vision clinical *MR* scanner at the Institute for Clinical and Experimental Medicine (IKEM).

The study of phantoms showed that the automatic selection of texture parameters and subsequent classification is overly sensitive to very small differences in pixel intensities (the influence of noise, local inhomogeneity etc), and therefore it is possible to separate even identical textures. These techniques are suitable for the classification of different textures. The algorithm of invariant parameters was developed as a potential method for classifying both the same and different textures.

In the second part of thesis, we apply the results of the phantom study to clinical studies (cirrhotic liver, diseased calf muscle) and food analysis (comparison of apple varieties).

The *TA* of the liver was divided into two parts. The first part dealt with the analysis of liver tissue measured *in vitro*. We tried to find a correlation between the *TA* parameters obtained from optical and *MR* images. *MR* measurements of liver tissue *in vitro* were performed using the experimental Bruker Biospec 4.7 T *MR* spectrometer, while optical images were obtained by a Camedia C-4040 Z Olympus digital camera. *TA* was able to successfully separate healthy and cirrhotic liver. The best results (100% correct classification) were achieved using data measured by an *MR* gradient echo sequence because this type of sequence is sensitive to any inhomogeneities present in cirrhotic tissue. No statistically significant correlation among *TA* parameters obtained from optical and *MR* images was found.

We classified cirrhotic and healthy liver measured *in vivo* by the 1.5T Siemens Vision at IKEM, using a  $T_2$  weighted breath-hold sequence. The aim was to find  $TA$  parameters that would characterize human liver tissue. The patients were divided into groups A, B and C according to their clinical stage (defined by the Child-Pugh Score) [8]. Images were analyzed by the MaZda program,  $TA$  parameters were selected only by automatic techniques ( $F_{koeff}$  a  $POE$ ) on the basis of the results from the phantom study, and classification was done using the  $RAW$  and  $LDA$  methods.

All the statistical methods employed were able to differentiate between controls and patients, both altogether and within each group. The classification error varied around 8%. The separation of all patient groups from one another and from controls was not accurate because the data of the patients in the different groups overlapped.

We have shown that texture analysis can be successfully used for separating cirrhotic patients from healthy volunteers. The automatic selection of  $TA$  parameters and automatic classification methods are robust and fast. Increasing the numbers of patients and controls improves the classification power of  $TA$ . We hypothesize that higher resolution will increase the ability to separate patients in different clinical stages, mainly for early and mild cirrhosis, and the specificity of  $TA$ . The rapid development of  $MR$  imaging techniques allows us to achieve very high resolution, but the measurement time is still long for routine measurements. However, it is expected that the conventional clinical imaging protocol will be sufficiently shorter in the near future, so problems with low resolution should decrease.

The aim of  $TA$  of calf muscle was to describe the morphological changes in diseased muscle by texture parameters and to compare  $TA$  classification with standard radiological evaluation.  $T_1$  weighted  $MR$  images were obtained on the 1.5 T Siemens Vision in IKEM and were divided into four groups according to the radiologist's assessment; this division was compared with the  $TA$  results. The  $TA$  parameters were obtained with the program MaZda and selected by the algorithm of invariant parameters and were successfully used for describing calf muscle texture. The results of the

classification by *TA* were in 80% agreement with the categorization made by the radiologists.

We demonstrated that texture analysis of muscles can be used as a tool for the objective evaluation of *MR* images and that the results correlate well with the clinical status of patients.

The aim of the *TA* of *MR* images of the apple varieties Idared, Redspur and Topaz during ripening and storage was to determine the correlation between *TA* parameters and physical-chemical parameters. The apples were measured using the Bruker Biospec 4.7 T experimental *MR* machine, and the *MR* images were analyzed by the program MaZda.

All varieties differ significantly in their physical-chemical parameters and few distinctive *TA* parameters were found. A significant correlation was found between acidity and a few texture parameters. The dynamics of changes in the *TA* parameters during maturation and storage were described by polynomial functions. The *TA* parameter correlation obtained from *MR* images can be used for characterizing fruit ripening.

We demonstrated that *TA* is able to separate different textures in *MR* images of various tissues, and therefore this method can be a useful tool as a complement for complex *MR* evaluation, especially in unclear cases.

## 6. Literatura

1. Castellano G, Bonilha L, Li LM, Cendes F. Texture analysis of medical images. *Clin Radiol*. 2004; 59(12):1061-9
2. Haralick R. Statistical and Structural Approaches to Texture. *Proc.IEEE*. 1979; 67(5):786-804
3. Julesz B. Experiments in the Visual Perception of Texture. *Scientific American* 1975; 232(4):34-43
4. Mathur-De Vre R, Grimee R, Parmentier F, Binet J. The use of agar gel as a basic reference material for calibrating relaxation times and imaging parameters. *Magn Reson Med* 1985; 2(2):176-179
5. Materka A, Strzelecky M, Szczypinski P. Texture Analysis Software MaZda. 2002. Available: <http://www.eletel.p.lodz.pl/cost/download.html> – MaZda user's manual
6. Mucciardi A, Gose E. A comparison of seven techniques for choosing subsets of pattern recognition properties. *IEEE Trans Comput* 1971; 20:1023-1031
7. Shurmann J. Pattern classification. New York: John Wiley and Sons, 1996, p 264-269
8. Pugh RNH, Murray-Lyon IM, Dawson JL, Pietroni MC, Williams R. Transection of the oesophagus for bleeding oesophageal varices. *Br J Surg* 1973; 60:646–649
9. Knee M, Smith SM. Variation in quality of apple fruits stored after harvest on different dates. *Journal of Horticultural Science*. 1989; 64(4):413–419
10. <http://www.uib.no/costb11/>
11. [http://www.die.upm.es/costb21/frame\\_main.html](http://www.die.upm.es/costb21/frame_main.html)

## 7. Vlastní publikační aktivita

### 7.1. Články v impaktovaných časopisech týkající se tématu dizertační práce

1. Jiráček D, Dezortová M, Taimr P, Hájek M, Texture analysis of human liver. J Magn Reson Imaging 2002; 15(1):68–74, **IF: 2.410**
2. Jiráček D, Dezortová M, Hájek M. Phantoms for texture analysis of MR images. Long-term and multi-center study. Med Phys 2004; 31(3):616-622, **IF: 2.305**
3. Létal J, Jiráček D, Šuderlová L, Hájek M. MRI 'texture' analysis of MR images of apples during ripening and storage. Lebensm-Wiss U-Technol 2003; 36:719-727, **IF: 1.026**
4. Skoch A, Jiráček D, Vyhnánovská P, Dezortová M, Fendrych P, Rolencová E, Hájek M. Classification of calf muscle MR images by texture analysis. Magma 2004; 16(6):259-67, **IF: 1.836**

### 7.2. Ostatní publikace týkající se tématu dizertační práce

1. Jiráček D, Dezortová M, Taimr P, Hájek M. Texture Analysis of Cirrhotic Liver. Progress in Liver Cirrhosis Research, Nova Science Publishers, Inc., 400 Oser Avenue, Suite 1600, Hauppauge, NY 11788, 2005, kapitola do knihy
2. Jiráček D, Dezortová M, Hájek M. Phantoms for texture analysis of MR images. Texture Analysis for Magnetic Resonance Imaging, ISBN: 80-903660-0-7, v tisku, kapitola do knihy
3. Jiráček D, Dezortová M, Hájek M. The Basics of Magnetic Resonance. Texture Analysis for Magnetic Resonance Imaging, ISBN: 80-903660-0-7, v tisku, kapitola do knihy

### **7.3. Ostatní články v impaktovaných časopisech**

1. Jirak D, Kriz J, Herynek V, Andersson B, Girman P, Burian M, Saudek F, Hajek M.

MRI of transplanted pancreatic islets. Magn Reson in Medicine 2004; 52(6):1228-33, **IF 3,468**

2. Herynek V, Burian M, Jirak D, Liscak R, Namestkova K, Hajek M, Sykova E. Metabolite and diffusion changes in the rat brain after Leksell Gamma Knife irradiation. Magn Reson Med 2004; 52(2):397-402, **IF 3,468**

3. Kriz J, Jirák D, Girman P, Berková Z, Zacharovova K, Honsova E, Lodererova A, Hajek M, Saudek F. Magnetic resonance imaging of pancreatic islets in tolerance and rejection. Transplantation 2005; 80(11):1596-1603, **IF 3,568**

4. Koblas T, Girman P, Berkova Z, Jirak D, Kriz J, Dovolilova E, Zacharovova K, Hajek M, Saudek F. Magnetic resonance imaging of intrahepatically transplanted islets using paramagnetic beads. Transplant Proc. 2005; 37(8):3493-5, **IF 0,511**

### **7.4. Aktivní účast na konferencích s abstraktem**

#### **7.4.1. Přednášky a postery týkající se tématu dizertační práce**

1. Létal J, Jirák D, Šuderlová L, Hájek M. Texture Analysis of Apples during Long-term Storage. EuroConference: Modern Analytical Methods for Food and Beverages Authentication 2000, Lednice, A18

2. Jirák D, Dezortová M, Taimr P, Hájek M. Texture Analysis of Human Liver. 17<sup>th</sup> Annual Science Meeting ESMRMB 2000, Paris, Magma 11 (Suppl 1) 141:342

3. Jirák D, Hájek M, Herynek V, New Type of Phantom for Texture Analysis based on polystyrene and Agar Gel. 17<sup>th</sup> Annual Science Meeting ESMRMB 2000, Paris, Magma 11 (Suppl 1) 286:655

4. Létal J, Jirák D, Suderlová L, Hájek M. Differentiation of Texture Parameters of NMR Images and Dynamics of T2 relaxation Times During

Storage of Apple. International Conference "Improving Postharvest Technologies of Fruits, Vegetables and Ornamentals" 2000, Murcia, n.325

5. Jiráček D, Dezortová M, Taimr P, Hájek M. Automatic Classification of Texture Analysis and 31P MRS Parameters of Cirrhotic Liver. ISMRM-ESMRMB Joint Annual Meeting 2001, Glasgow, in Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. 9 (2001):2031

6. Letal J, Jiráček D, Golias J, Suderlova L, Hajek M. Texture analysis of MR images of apricots during ripening. Computational techniques in food engineering; International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) 2002, Barcelona, n.201

7. Škoch A, Jiráček D, Harantová P, Dezortová M, Fendrych P, Rolencová E, Hájek M. Texture Analysis of Calf Muscle MR Images. 20<sup>th</sup> Annual Science Meeting ESMRMB 2003, Rotterdam, Magma 16 (Suppl 7): S449

#### **7.4.2. Ostatní přednášky a poster**

1. Náměstková K, Liščák R, Herynek V, Burian M, Jiráček D, Hájek M, Brožek G, Mareš V, Syková E. Learning, MRI and structural changes of the rat hippocampus 1 to 12 months after irradiation with the Leksell gamma knife. 4th Conference of Czech Neuroscience Soc., 2001, Praha, n.414

2. Herynek V, Burian M, Jiráček D, Liščák R, Náměstková K, Hájek M, Syková E. Metabolite and Diffusion Changes in the Rat Brain after Leksell Gamma Knife Irradiation. 10th Sci Meeting ISMRM 2002, Honolulu, in: Proc Intl Soc Mag Reson Med 10(2002):959

3. Jiráček D, Herynek V, Náměstková K, Burian M, Liščák R, Syková E, Hájek M. Lesion Evolution Observed by MRI Volumetry in the Rat Brain after Leksell Gamma Knife Irradiation. 19<sup>th</sup> Annual Science Meeting ESMRMB 2002, Cannes, Magma 15 (Suppl 1) 185:385

4. Herynek V, Jiráček D, Burian M, Hájek M. Age Dependence of T1 and T2 Relaxation Times in the Rat Brain. 19<sup>th</sup> Annual Science Meeting ESMRMB 2002, Cannes, Magma 15 (Suppl 1) 52:118

5. Herynek V, Trunečka P, Havlíčková J, Jiráček D, Burian M, Mergentál H, Filip K, Hájek M. Animal Models of Cirrhosis: A relaxometry study of the rat

- brain. 11th Sci Meeting ISMRM 2003, Toronto, in Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. 11 (2003):1977
6. Herynek V, Trunecka P, Havlíčková J, Jiráček D, Burian M, Mergentál H, Filip K, Hájek M. Manganese concentration increase in the rat brain caused by hepatic encephalopathy. Sixt IBRO, World Congress of Neuroscience 2003, Prague, n.2324
7. Namestkova K, Jiráček D, Herynek V, Liscak R, Hajek M, Sykova E. Radiosurgical lesion of the rat hippocampus using the Leksell Gamma knife: Relation between radiation dose and functional and structural damage. Sixt IBRO, World Congress of Neuroscience 2003, Prague, n.3373
8. Jiráček D, Kříž J, Herynek V, Andersson B, Girman P, Burian M, Saudek F, Hájek M. MRI of transplanted pancreatic islets. A preliminary in vitro study. 20<sup>th</sup> Annual Sci Meeting ESMRMB 2003, Rotterdam, Magma 16 (Suppl 7): S340
9. Kříž J, Jiráček D, Girman P, Andersson B, Saudek F, Hájek M. Magnetic resonance imaging of transplanted pancreatic islets. 23rd Workshop of the Study Group on Artificial Insulin and Islet Transplantation (AIDPIT) of the European Association for the Study of Diabetes (EASD) 2004, Igls, Acta diabetologica. 2003, 40(4):206
10. Jiráček D, Kriz J, Herynek V, Andersson B, Girman P, Saudek F, Hajek M. MRI of transplanted pancreatic islets. 12th Sci Meeting ISMRM 2004, Kyoto, in Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. 12 (2004):1742
11. Jiráček D, Namestkova K, Burian M, Vorisek I, Sykova E, Hajek M. Proton spectra in aged rats: correlation with learning abilities. 12th Sci Meeting ISMRM 2004, Kyoto, in Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. 12 (2004):2038
12. Herynek V, Jendelová P, Glogarová K, Urdzíkova L, Jiráček D, Hájek M, Syková E. Magnetic labeling of human bone marrow stromal cells and their imaging after transplantation: an in vivo animal study. 12th Sci Meeting ISMRM 2004, Kyoto, in: Proc Intl Soc Mag Reson Med 11(2004):161
13. Herynek V, Trunečka P, Havlíčková J, Jiráček D, Burian M, Mergentál H, Filip K, Jegorov A, Hájek M. Portocaval anastomosis as a model of liver failure: manganese deposition in the rat brain. 21st Ann Meeting ESMRMB 2004, Copenhagen, MAGMA Electronic suppl. 1,16:295



14. Kríž J, Jiráček D, Girman P, Andersson B, Saudek F, Hájek M. Magnetic resonance imaging of transplanted pancreatic islets. 23rd Workshop of the Study Group on Artificial Insulin Delivery, Pancreas and Islet Transplantation (AIDPIT) of the European Association for the Study of Diabetes (EASD) 2004, Igl; In: Acta Diabetologica. 2003; 40(4):206
15. Kríž J, Jiráček D, Honsová E, Girman P, Dovolilová E, Berková Z, Lodererová A, Saudek F, Hájek M. Značení Langerhansových ostrůvků Resovistem. 6. kongres České transplantční společnosti 2004. Praha, In: Transplantace orgánů a tkání. Sborník abstrakt,.P03
16. Kríž J, Jiráček D, Honsová E, Girman P, Dovolilová E, Berková Z, Lodererová A, Saudek F, Hájek M. Diagnostika rejekce allogenních Langerhansových ostrůvků potkana pomocí magnetické rezonance. 6. kongres České transplantční společnosti 2004, Praha, In: Transplantace orgánů a tkání. Sborník abstrakt, O32
18. Jiráček D, Kríž J, Honsová E, Girman P, Dovolilová E, Berková Z, Lodererová A, Saudek F, Hájek M. In vivo zobrazení transplantovaných Langerhansových ostrůvků u potkana. 6. kongres České transplantční společnosti 2004, Praha, In: Transplantace orgánů a tkání. Sborník abstrakt, O33
19. Jiráček D, Girman P, Berková Z, Herynek V, Kríž J, Burian M, Saudek F, Hájek M. MRI of pancreatic islets labeled by Dynabeads. 13th Sci Meeting ISMRM 2005, Miami Beach, in: Proc Intl Soc Mag Reson Med 13(2005):2632
20. Jiráček D, Kríž J, Honsová E, Berková Z, Herynek V, Girman P, Saudek F, Hájek M. MRI of acute rejection of transplanted pancreatic islets. 13th Sci Meeting ISMRM 2005, Miami Beach, in: Proc Intl Soc Mag Reson Med 13(2005):362
21. Jiráček D, Slais K, Vorisek I, Burian M, Sykova E, Hajek M. 1H MR spectroscopy of hippocampus in aged rats and after chronic application of corticosterone. 22nd Ann Meeting ESMRMB 2005, Basle, In: MAGMA DOI: 10.1007/s10334-005-0002-2, n.330
22. Kriz J, Jirak D, Honsova E, Girman P, Berkova Z, Lodererova A, Zacharovova K, Koblas T, Hajek M, Saudek F. Magnetic resonance imaging

- of transplanted pancreatic islets in tolerance and rejection. 10th world congress of IPITA 2005, Geneva, In: Abstract book: OP-074
23. Berková Z, Jiráček D, Kříž J, Girman P, Dovolilova E, Zacharovova K, Koblas T, Hajek M, Saudek F. The impact of islet labeling with superparamagnetic nanoparticles for magnetic resonance imaging on islet vitality. 10th world congress of IPITA 2005, Geneva, In: Abstract book: PS-086
24. Girman P, Kriz J, Jirak D, Berkova Z, Dovolilova E, Zacharovova K, Koblas T, Hajek M, Saudek F. Magnetic resonance imaging of intrahepatally transplanted islets using paramagnetic beads. 10th world congress of IPITA 2005, Geneva, In: Abstract book:OP-075
25. Jiráček D, Voříšek I, Syková E, Hájek M. Quantitative 1H MRS in the rat hippocampus after global ischemia. 14th Sci Meeting ISMRM 2006, Seattle, in: Proc Intl Soc Mag Reson Med 14(2006):2714
26. Jiráček D, Berková Z, Girman P, Kříž J, Burian M, Saudek F, Hájek M. MRI Method for visualizing pancreatic islets by magnetic resonance developed at IKEM. Imaging the Pancreatic Beta Cell in Health and Disease, 3rd Workshop 2006, Washington DC, in Abstract book