

小波图像压缩编码与小波图像 阈值降噪的研究

作 者：胡海平

专 业：电磁场与微波技术

导 师：莫玉龙



上海大学出版社

Y302
2002

2002 年上海大学博士学位论文

小波图像压缩编码与小波图像 阈值降噪的研究

作 者： 胡海平
专 业： 电磁场与微波技术
导 师： 莫玉龙

上海大学出版社
· 上海 ·

N533
Z307
2002

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

The Study on Wavelet Image Coding and Wavelet Thresholding for Image Denoising

Candidate: Hu Haiping

Major: Electromagnetics Field and Microwave
Technology

Supervisor: Prof. Mo Yulong

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：宣国荣	教授，同济大学	200092
委员：王汝笠	教授，上海技术物理研究所	200083
胡光锐	教授，上海交通大学	200030
彭瑞仁	教授，上海大学	200072
张兆扬	教授，上海大学	200072
导师：莫玉龙	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

宣国荣	教授, 同济大学	200092
王汝笠	教授, 上海技术物理研究所	200083
施鹏飞	教授, 上海交通大学	200030

评议人名单:

张立明	教授, 复旦大学	200433
林家骏	教授, 华东理工大学	200237
王成道	教授, 华东师范大学	200062
方 勇	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

基于小波变换的图像压缩和小波图像阈值降噪的研究涉及到数学、信息技术和计算机等多种学科。论文选题在前沿性、创新性和跨学科等方面具有重要的学术意义和应用价值。

论文在深入研究和剖析 Daubechies 小波基性能基础上,构造了一个适应于图像压缩的基于人的视觉系统的紧支双正交对称小波基,这种小波图像压缩后重建图像的视觉效果比 Daubechies9/7 小波好,并且计算的复杂度低。同时还构建了一种压缩性能好,其 PSNR 比 Daubechies9/7 有所提高的适合于比特最优分配的双正交小波基。在小波图像阈值降噪方面,提出了自适应贝叶斯降噪的方法,并提出将图像压缩与图像降噪结合在一起来进行噪声图像压缩的新方法。

论文立论正确、论证充分,内容详实、条理清晰、文笔流畅,学风严谨,实验实验数据可靠。表明胡海平同学具有扎实的理论基础和系统的专业知识,独立科研工作能力强。

在答辩中能正确地回答问题,答辩委员会认为该论文达到博士学位论文水平。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过胡海平同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **宣国荣**

2002 年 11 月 11 日

摘 要

本文首先综述了作者对小波图像压缩和小波图像阈值降噪的主要研究成果. 然后简要论述了与论文有关的小波变换的基本理论, 包括小波函数的性质、第二代小波与小波提升算法以及多小波变换等, 对于小波变换的卷积算法与提升算法的内在联系进行了探讨, 又对紧支撑正交小波和双正交小波的构造方法进行了研究. 在此基础上提出与人的视觉系统的调制转移函数相近似的紧支撑双正交小波和近似与正交小波的紧支撑双正交小波的构造方法, 并对这些小波的压缩性能进行了分析. 最后, 在对小波阈值的图像降噪原理进行分析的基础上, 提出了一种改进的贝叶斯图像降噪方法, 并将小波图像压缩和图像降噪结合在一起, 来实现对噪声图像进行压缩的同时对它进行降噪.

论文的主要创新点包括:

(1) 构造了一个基于人的视觉系统的紧支撑双正交小波, 该紧支撑双正交小波与人的视觉系统的调制转移函数 (MTF) 相似. 同时我们还分析了该小波的压缩性能, 并将它与 Daubechies 9/7 小波进行了比较. 实验的结果表明, 在相同的压缩比条件下, 采用该小波压缩后的图像的视觉效果比采用 Daubechies 9/7 小波压缩后的图像好, 同时该小波变换的计算复杂度比 Daubechies 9/7 小波要低 1/3 左右.

(2) 构造出了滤波器长度为 9/7 的适合于比特最优分配的近似与正交小波的紧支撑双正交小波, 这一小波是利用小波系数量化噪声的均方误差与重建图像的均方误差之间的关系, 使得小波系数量

化噪声的均方误差与重建图像的均方误差相一致的原则来构造的. 实验的结果表明采用该小波进行图像压缩时, 其压缩性能与 Daubechies 9/7 小波相当, 甚至超过 Daubechies 9/7 小波.

(3) 提出了一种改进的贝叶斯降噪方法, 该方法与其它小波阈值降噪方法不同的是采用的阈值是随着小波系数变化而变化, 而一般的方法的阈值是针对某一子带或整个图像的, 我们所提出的这种方法有很好的自适应性, 因而其降噪效果比一般的降噪方法要好.

(4) 对多小波图像阈值降噪进行了研究, 提出一种新的适合于非临界预处理的多小波变换的噪声估计方法. 实验的结果表明采用这种新的噪声估计方法来进行图像的降噪时, 其降噪效果比单小波阈值降噪效果好.

(5) 将小波图像压缩和小波阈值降噪结合在一起, 对噪声图像进行压缩使得在对图像压缩的同时, 实现对图像的降噪.

关键词 小波图像编码, 人的视觉系统, 小波阈值降噪, 紧支撑双正交小波, 提升算法, 多小波变换

Abstract

The wavelet image coding and wavelet threshold denoising for image are studied in the dissertation. The first, we introduce the wavelet transform, the property of wavelet, second generation wavelet, the lifting scheme and multiwavelet, and we analyse the relationship of convolutional wavelet transform with lifting scheme. The second, we investigate the method of constructing compactly supported orthonormal wavelet and compactly supported biorthogonal wavelet, and construct a wavelet approximating the modulation transfer function of HVS and a compactly supported biorthogonal wavelet approximating the compactly supported orthonormal wavelet. We also study on the coding performance of these wavelet. At last, we investigate the wavelet threshold denoising for image, and present a improved Bayes denoising for image. We also combine the wavelet image coding with image denoising based on wavelet threshold, the noising image is compressed, the noise is de-noised at the same time.

The achievements of the dissertation include:

(1) A compactly supported biorthogonal wavelet, which approximate to modulation transfer function for HVS, are constructed. The compactly supported biorthogonal wavelet is constructed under synthesis scaling function is known. We compare the constructed wavelet with Daubechies 9/7, the comparative result indicates the visual effect of compressed image by the constructed wavelet is better than one of compressed image by Daubechies 9/7 under the same

bitrate, and its computational load is $1/3$ less than Daubechies 9/7.

(2) A compactly supported biorthogonal wavelet is reconstructed based on the relation between mean square error of wavelet coefficient and of reconstructed image. The wavelet is fit to optimal bit allocation by unifying two mean square error, and approximate to orthonormal wavelet. the length of the corresponding filter bank are 9 and 7. The experimental results indicate that the coding performance of the wavelet is competitive or superior to Daubechies 9/7.

(3) A improved wavelet Bayes threshold denosing is presented. Because the threshold depends on the wavelet coefficient, but other threshold only depend on the subband, the denoising performance of the improved method is superior to one of other method.

(4) The performance of multiwavelet denoising is investigated, a new method that estimate the size of noise is presented, the method is adopted to multiwavelet transform for non-critically sampled prefilter. Our results indicate that the denoising performance of multiwavelet is superior compared to single wavelet.

(5) Noising image is compressed and denoised by integrating Wavelet coding with wavelet threshold denoising together.

Key words wavelet image coding, human visual system, wavelet threshold denoising, compactly supported biorthogonal wavelet, lifting scheme, multiwavelet transform

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 小波图像压缩和降噪研究的意义	1
1.2 小波图像压缩和降噪的研究动态	3
1.3 论文研究的内容和编排	6
第二章 小波分析理论	9
2.1 小波变换的定义	9
2.2 多分辨率分析、镜像滤波器组和小波函数的关系	15
2.3 第二代小波分析	24
2.4 小 结	39
第三章 用于图像压缩的小波基的构造	40
3.1 图像压缩过程中小波基选取与性能评价	41
3.2 Daubechies 紧支撑正交小波基的构造	46
3.3 具有线性相位的紧支撑双正交小波基的构造	49
3.4 基于滤波器组设计的小波基的构造方法	52
3.5 基于人的视觉特征的小波基的构造	58
3.6 近似于正交小波的紧支撑双正交小波基的构造	62
3.7 小 结	67
第四章 小波图像压缩方法的研究	68
4.1 引 言	68
4.2 基于小波变换的图像压缩方法的概述	73
4.3 嵌入零树小波方法	76

4.4 基于上下文的小波编码	79
4.5 算术编码概述	83
4.6 JPEG-2000 静止图像压缩标准	85
4.7 新构造小波基压缩性能的比较	97
4.8 小 结	103
第五章 基于小波收缩阈值的图像降噪的研究	104
5.1 基于小波收缩阈值降噪的一般方法	104
5.2 基于小波收缩阈值的图像降噪方法	119
5.3 改进的贝叶斯降噪方法	123
5.4 基于多小波阈值的图像降噪的研究	127
5.5 噪声图像压缩的研究	138
5.6 小 结	141
第六章 总结和展望	142
6.1 论文工作的回顾	142
6.2 尚需解决的问题和今后的研究工作	143
参考文献	145
致 谢	160

第一章 绪 论

1.1 小波图像压缩和降噪研究的意义

由于小波变换具有经典 Fourier 变换所不具有的空间 - 频率的局部性, 因此自 20 世纪 80 年以来, 小波作为一个很重要的分析工具, 已被广泛应用于图像处理、物理学、计算机视觉和非线性科学等各个领域. 小波在图像处理方面的应用主要有: ①图像压缩; ②边缘检测; ③图像降噪. 在本论文我们将主要研究的是小波图像压缩和降噪.

图像压缩是信息处理领域的重要技术. 图像压缩的目的是为了在图像存储过程中减少所占有的空间或在图像传输的过程中减少所占用的带宽. 图像压缩主要有无损压缩和有损压缩两类, 在图像压缩的过程中, 一般所采用的方法是首先采用预测编码、变换编码、矢量量化编码、分形编码和模型基编码等方法来减少图像的相关性, 然后采用统计编码来进行编码. 由于变换编码具有很好的图像去相关性性能, 同时它的计算的复杂性比矢量量化编码、分形编码和模型基编码小, 因此变换编码已成为图像压缩的主要方法. 在变换编码中, 主要采用的变换有 DCT 变换、K-L 变换和小波变换. K-L 变换与图像本身有关, 不同的图像所采用的 K-L 变换不同, 因而其变换过程很复杂. 在 DCT 变换编码过程中采用的是分块变换的方法, 所以重建后的

图像具有分块效应. 而小波变换编码除了具有很好的压缩性能和与人的视觉系统较好地匹配外, 还可以使图像压缩按分辨率和图像质量的方式进行渐进式的编码, 因此在最新制定的静止图像压缩标准 JPEG2000 中采用了小波变换的方法. 尽管在国内外有不少的学者对小波图像压缩进行了大量的研究, 但基于小波变换的图像压缩还有许多问题没有得到解决, 例如在小波图像压缩过程中, 如何选择小波基、变换后小波系数的怎样编码将更加有效以及如何利用人的视觉系统的特征来进行图像的压缩等问题.

图像降噪作为图像处理的另一重要分支, 虽然有很多的降噪方法, 但传统的降噪方法大多是采用低通滤波的方法, 这种方法在降噪的同时, 去掉了图像中高频信息(例如图像边缘). 为了克服这种方法的不足, D. L. Donoho 和 M. Johnstone 等人根据小波能有效紧地表示信号的特性, 最早提出了一种小波收缩阈值的降噪方法.

这种方法首先假设 $y_i = f(t_i) + \sigma \varepsilon_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中 y_i 是指信号的观察值, $f(t_i)$ 表示的是原始信号, 其中的 $\varepsilon_i \sim N(0,1)$ 为 Gaussian 白噪声, 这里 σ 指的是噪声强度; 然后采用以下步骤:

- (1) 对观察值 $\{y_i\}_{i \in N}$ 进行小波变换, 其小波系数为 $w_{j,k}$;
- (2) 估计变换后的噪声强度 $\hat{\sigma}$, 通常采用 $\hat{\sigma} = \text{Median}(w_{1,k}) / 0.6745$ 来估算变换后的噪声强度, 这里 $w_{1,k}$ 表示的是第一层小波分解系数;

- (3) 采用非线性收缩阈值函数 $\delta_\lambda^s = \text{sgn}(w)(w - \lambda)_+$ 对小波系数 $w_{j,k}$ 进行阈值处理, 阈值后的小波系数为 $\hat{w}_{j,k}$, 这里 λ 为阈值

参数;

(4) 对 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波逆变换, 求得信号 $f(t_i)$ 的估计值 $\hat{f}(t_i)$.

基于小波收缩阈值的降噪方法是利用小波变换的能量紧性和高斯白噪声在小波变换后一致分布的特征, 这种降噪方法能达到最大均方误差最小意义上的最优效果, 该方法在对进行图像降噪的同时, 还能很好地保留图像中的高频信息. 在基于小波收缩阈值的降噪方法中, 影响图像降噪效果主要有两个因素: 一是阈值参数的选取; 第二是小波基的选择问题. 在已有的选取阈值参数和小波基的方法中, 大多数方法是针对一维的信号, 虽然也有一些方法适合于二维图像的降噪, 但自适应性较差, 例如阈值参数仅与噪声的大小或子带有关, 而与小波系数无关. 因此如何选取阈值参数和小波基仍是一个值得研究的课题.

1.2 小波图像压缩和降噪的研究动态

1.2.1 小波基的构造

小波基的构造可追溯到 1910 年 Haar 基概念的提出, 但随后有关小波基并没有被人们所关注, 直到 1984 年, 法国地球物理学家 Morlet 在分析地震波的局部性质时, 发现传统的 Fourier 变换难以达到要求, 因此将小波的概念引入到信号分析对地震波数据进行分析. 1986 年, Meyer 构造出具有一定衰减的光滑函数 ψ , 其二进制伸缩与平移函数序列 $\{\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) : j, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成 $L^2(\mathbf{R})$ 的规范正交基, 从此开始了小波研究的热潮.

1988 年 Daubechies 构造出了紧支撑正交小波以及 Mallat 将计算机视觉领域的多尺度分析与小波结合在一起, 提出了

Mallat 塔式分解/重构算法后,使得小波研究进入了一个崭新的发展阶段.虽然紧支撑正交小波具有正交性,但它(除 Haar 基外)并不具有线性相位,因此 Cohen、Daubechies 和 Feauveau 将正交条件放宽,构造出了具有线性相位的紧支撑双正交小波基;同时 Vetterli 和 Herley 采用了镜像滤波器组的方法也构造出了紧支撑双正交小波.为了保证所压图像的质量,图像变换中对相位要求很高,变换过程中引用非线性相位,将会导致图像质量的退化,这样紧支撑双正交小波就成为图像变换的首选小波基.另一方面传统意义上的小波存在一定局限性:第一,小波的构造依赖于 Fourier 变换;第二,在紧支撑条件下正交性与线性相位不能共存,人们提出了第二代小波和多维小波(也称多小波)的概念.最早提出第二代小波这一概念的是 Sweldens,他利用的一种不依赖于 Fourier 变换的提升方法,构造出了第二代小波,使传统意义上小波得到了推广,同时又使得小波变换能采用一种更加实用的提升算法来实现.多小波概念的提出主要是为了解决在紧支撑条件下正交性与线性相位不能共存的这一对矛盾,虽然在多小波这一对矛盾得到了解决,但由于多小波的各个尺度函数在频域上的不平衡性,因此要对不具有平衡性的多小波进行平衡化,或在多小波变换之前进行预滤波,目前多小波变换已被应用到了图像压缩等领域中.随着小波理论的不段完善,小波的发展已进入了一个较为成熟的阶段,但还有一些问题没有得到解决,例如不同的应用中何种小波更加有效仍是一个被关注的焦点.

1.2.2 基于小波变换的图像编码

图像压缩作为最早应用小波变换的一个领域,小波图像压