计算机科学2001Vol 28№ 10

基于小波变换的方向滤波

Directional Filtering Using Wavelet Transform

耿茵茵 蔡安妮 孙景鳌 (北京邮电大学125信箱 北京100876)

Abstract In the images with local strong direction, there is often noise in other directions. To eliminate the noise, we propose a novel directional filtering method which takes advantage of directional selection ability of wavelet transform skillfully through rotating the image to be filtered and controls the times of rotation through direction quantization. This method employs only directional characteristics for denoising and there is no need to evaluate the frequency characteristics or statistical characteristics of signals and noise, which makes this method easy to implement. The experimental results on fingerprint image enhancement show good ability of this method.

Keywords Directional filtering, Wavelet transform Image enhancement

1. 引言

噪声是信号中任何不期望的成份,它的存在可能 模糊图像的一些重要特征,因此,降噪和增强是图像处 理中的一个重要问题。

近年来,基于小波变换的图像降噪方法因其突出 的优点而引起了人们的关注。在小波变换域内,可以单 独考察不同尺度、不同子带、不同方向的分解信号;经 过小波变换后,空域中的局部特性仍然能保留下来,许 多空域图像增强技术仍然能够很好地应用。

Mallet 和 Zhong^[1,2]较早利用了小波变换系数的 局部最大值来分析图像中的奇异点; Donoho 和 Johnstone^[1,4]提出了基于小波系数的非线性收缩三步降噪 法; 另一些研究者利用基于小波的多尺度边界集合,通 过直接或间接放大边界集合中的系数来突出图像边 界^[5,4];还有一些研究者采用小波门限的降噪方法,该 类方法通过保留门限之上的系数,消除门限之下的系 数来达到消弱噪声的目的,等等。

以上介绍的小波滤波方法可以较为有效地抑制某 些分布的噪声,并且能够较好地保留图像边界,但它们 都没有利用到小波变换的方向解析性,其滤波结果的 好坏也较大地依赖于门限的选取及图像中噪声的分布 特性和对信号、噪声特征的正确估计。Freeman 和 Adelson^[7]提出了可变向滤波器的概念,该滤波器采用 一组"基滤波器",能够自适应调整滤波方向; Laine 等 人^[8]沿用了"基滤波器"的概念并把它扩展到了小波变 换域,遗憾的是,这类滤波器是以连续形式给出的,将 其离散化并扩展到数字图像的滤波较为复杂。 本文提出了一种新的基于小波变换的方向滤波方 法。与在频率域中保留信号频带以内的信息而滤除信 号频带以外噪声的频域滤波思想相似,本方法借助于 小波变换域的方向解析性,在各子带中保留图像中各 局部主方向的信息而滤除其它方向的噪声。该方法不 但类似于可变方向滤波器,可以选择任意方向的信息, 而且针对离散化数字图像而设计,在整个滤波过程中 也不必考虑噪声的频率特性和统计特性,因而便于实 施。

2. 小波域方向分解

小波域方向分解的目的是要把图像分层分解为低 频图像和一系列不同方向的高频图像。这里我们使用 一维小波高通和低通分解滤波器,分别沿数字图像 g(x,y)的行和列进行分层二进制分解,"二进制分解" 是指在每一次图像与高通或低通分解滤波器卷积之 后,把各变换系数集以因子2下取样,因此可以用2'() \geq 0)来表示尺度,每沿行和列进行一次高通和低通分 解;)就增加1,由此,可以把尺度为2'的子空间中的图 像A.(x,y)分解为以下四个部分;

$$\begin{split} A_{j+1}(x,y) &= (low(x) * A_j(x,y)) * low(y) \\ D_{j+1}^{b}(x,y) &= (low(x) * A_j(x,y)) * high(y) \\ D_{j+1}^{b}(x,y) &= (high(x) * A_j(x,y)) * low(y) \\ D_{j+1}^{b}(x,y) &= (high(x) * A_j(x,y)) * high(y) \end{split}$$

其中,原图像 $g(x,y) = A_0(x,y); A_{j+1}(x,y)$ 由图像 A_i (x,y)分别经过水平和垂直方向的低通滤波器而得 到,因此代表尺度 2^{i+1} 空间中的低频分量; $D_{i+1}^i(x,y)$ 代表由 $A_i(x,y)$ 分别经过水平方向的高通滤波器和垂

• 65 •

直方向的低通滤波器而得到,从而在其中包含着沿垂 亘方向缓慢变化而沿水平方向迅速变化的分量,因此 $D^{*}_{+1}(x,y)$ 代表尺度: ¹¹空间中的垂直分量,同理可 知, $D^{*}_{+1}(x,y)$ 代表尺度: ¹¹空间中的水平分量,而 $D^{*}_{+1}(x,y)$ 是尺度: ¹¹空间中斜方向的分量。

原始图像 g(x,y)经过这种"金字塔"式的小波变 换之后,就被表示成一系列下词尺度下的子图像(A,, D¹,D²,D²)₂≥0),如图1所示。其中的每一个子图都包 含着特定的尺度和方向信息。



图1 小波分解子图

3. 滤波原理

"金字塔"式的小波分解虽然具有方向选择性,但 其方向选择性是非常有限的,在每一个尺度空间,图像 只能被分解成有限的3个方向,因此不能满足方向滤波 的需要。为了实现方向滤波,本文采用了以下步骤。

(1)方向量化 在线形纹理图像中,局部呈现出一致的方向性,而从总体上来看、图像的方向是连续的、 其取值范围为[0,π],为了减少计算时间和节约存储空间,需要首先对连续方向进行量化。这里我们采用了等 间距量化,并令量化间隔与图像中曲线的曲率成反比, 使方向变化越快的图像量化方向数越多,以保证滤波 过程中方向选择的准确度。

(2)标准化 设待滤波图像 g(x,y)的方向量化级数为 m,令:

$$\theta_i = \frac{\pi}{m} > (i-1) + \frac{\pi}{2m} \tag{2}$$

其中 ı ∈ [1, m], 将 g(x, y)依次旋转一0, 得到 m 幅旋 转图像 g, (x, y),则在 g, (x, y)中,第ℓ个量化方向就变 成了水平方向, 而这 m 次旋转过程即称为标准化过 程。经过标准化以后, 就可以在后续过程中把各量化方 向以同样的方式进行处理、

(3) 處處 对 $g_i(x,y)(i \in [1,m])$ 分别进行若干 层小波分解、得到 m 幅由不同尺度下3个不同方向的 分量及低频分量组成的变换域图像 $T_i(x,y)$ 、然后将 各 $T_i(x,y)$ 输入图2所示的方向选择滤波器。令 $T_i(x,y)$ (x,y)输入图2所示的方向选择滤波器。令 $T_i(x,y)$ 向选择滤波器输出 $L_i(x,y)$ 的各分量为: $(A1)_i$ D1⁴,

• 66 •

 $D1_{i}^{y}, D1_{i}^{y}|_{J} = 1, 2, 3..., y$,则 $J_{i}(x, y)$ 各分量与 $T_{i}(x, y)$ 各分量间的关系如下。

$$A 1'_{2} = A 0'_{2} \qquad D 1''_{2} = 0$$

$$D 1''_{2} = D 0''_{1} \qquad D 1''_{2} = 0$$

(3)

由(3)式可知,方向滤波器滤除了 T.(x,y)中各尺 度空间除水平方向之外的其它方向的分量,使滤波后 的 T.(x,y)中只包含不同尺度下的水平分量和一个低 频分量。

图2 方向选择滤波器

(4)增强及反变换 由于在信号重构之前放大小 波变换域的细节系数能够起到增强图像边界的作 用^[2]、因此为了进一步改善滤波后的图像质量,我们对 各 $L_{(x,y)}(t \in [1,m])$ 进行增强处理。令增强后的图 像为 $L_{(x,y)}$ 、其各分量为 $\{A2_{i}^{t}, D2_{i}^{t}, D2_{i}^{t}\}_{J}=1$ 、 2,…),则:

$$D2_{j}^{a} = a(2^{i})D1_{j}^{b} \qquad D2_{j}^{a} = D1_{j}^{a}$$

$$A2_{i}^{i} = Al_{j}^{a} \qquad D2_{j}^{a} = D1_{j}^{a}$$
(4)

其中缩放因子 $\alpha(2')$ 为尺度2' 的增函数、且有 $\alpha(2')>1$ ($j \ge 1$)。由(4)式可知 $f_i(x, y)$ ($i \in [1, m]$)是 $f_i(x, y)$ 的 水平分量得到增强后的结果。

(5)反变换 $J'_{i}(x,y)$ 经过小波反变换以后就成 为标准化的时域滤波图像<u> $B_{i}(x,y)$ </u>($i \in [1,m]$),再将各 <u> $g_{i}(x,y)$ 分别旋转 $\theta_{i}(\theta, 取值见(2)式),就得到 m 幅在</u>$ $量化方向上经过滤波的图像 <math>g_{i}(x,y)$ ($i \in [1,m]$)。</u>

(6) 耕秧 为了得到最后的方向滤波图像 G(x, y),必须根据原始图像的局部方向信息从各 g,(x,y) 中正确地提取出局部滤波图像进行拼接。为此,我们把 原始图像 g(x,y)划分成不重叠的 w * w 大小的块,并 计算每块的块方向。w 的取值应根据待滤波图像的纹 理宽度及方向变换快慢而定:w 应大于图像的局部纹 理宽度以保证能够正确估算出局部纹理方向;在此基 础上,w 又应取得尽可能小以保证块方向可以代表块 中绝大多数点的方向。

设原始图像 g(x,y)被划分成为 K * L 个 w * w 块、其中第 k 行第 l 列的块方向为 BlockDirection[k] [l](k∈[0,k),l∈[0,l),BlockDirection[K][L]∈[1, m]),则有:

 $G(k * w + o, l * w + p) = g_{BlockDreeDum[k][l]}(k * w + o, l * w + p)$ (5)

其中₀∈[0.w),p∈[0.w)。

至此,我们就得到了最后的滤波图像 G(x,y),综 上所述,整个滤波流程如图3。



图3 方向滤波流程

4. 实验结果

我们以一类具有局部一致方向性的图像一指纹图 像为样本进行了实验,指纹图像中不但纹理形态多样, 而且常常参杂着多种分布的噪声,其中一些噪声很难 用数学模型进行描述,因此该类图像具有典型的代表

性.

我们采用了512×512大小的待滤波图像,将该图 像分为64×64个8×8大小的块,并分别求出各块方向。 方向采用了8级量化,各量化方向如图4(P58),小皮变 换采用的小波基如表1,共进行了4层分解。

表1 小波基

	Ū	±1	±2	±3	±4	<u>=</u> 5	±6	± 7	±8	±9	±10	±μ
h(n)	0.542	0 307	- 0- 035	-0.078	0 023	0-030	-0 012	-0.013	0.006	0.006	-0 003	-0.003
g(n)	0.542	-0.307	- 0. 035	0 078	0. 023	-0 030	-0.012	0.013	0.006	-0.006	-0.003	0 NO 2

一个典型的滤波结果见图5(P58),其中图5(a)为 原始图像,图5(b)~5(i)为经过滤波增强后,各量化方 向上的滤波结果。由此可以看出,该滤波器具有很强的 方向选择性,某量化方向上的滤波结果只包含该方向 及其附近较小范围内的分量,从而抑制了其它方向上 的各类噪声。经过拼接后的滤波结果见图5(j)。与原始 图像相比较可以看出,滤波后的图像中纹线更加清晰, 沿纹线走向,灰度分布均匀,纹线粘连现象也有较大改 善。

取得上述滤波效果的原因是由于本方法通过旋转 待滤波图像,巧妙地利用了小波变换域的方向选择性, 与频域滤波将信号变换到频域相类似,本方法将图像 变换到小波域相当于把图像变换到了方向域,并通过 在方向域的方向选择滤波和系数增强,滤除方向带宽 之外的各类噪声,保留并增强方向带宽之内的信号分 量。另外,本方法采用了离散小波变换,可以直接作用 于离散数字图像,使得从时域到方向域的变换简单易 行。利用本方法进行滤波还可以避免对信号和噪声频 率特性和统计特性的估计,从而大大减少了滤波的复 杂程度,适用于具有局部一致方向性的各类图像,

参考文献

I Mallat S. Hwang W. L. Singularity detection and process-

ing with wavelets. IEEE Tran. on Info. theory, 1992, 38 (2)

- 2 Mallat S.Zhang S Characterization of signals from multiscale edges. IEEE Tran. Pattern anal and mach intell., 1992, 14(7)
- 3 Donobo D L. De-noising vea soft-thresholding. Tech. report.statistics.Stanford.1992
- 4 Donobo D L. Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. [Tech. Report]. statistics, Stanford, 1992
- 5 Laine A F. Schuler S. Fan J. Huda W. Mammographic feature enhancement by multiscale analysis IEEE Tran on Medical imaging, 1994.13(4):725~740
- 6 Lu J. Healy D M Jr. Weaver J B. Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation. Optical engineering (1994.33(7)):2151~2161
- 7 Freeman W T. Adelson E H. The design and use of steerable filters leee Trans. Pattern anal- machine intell , 1991.13,871~908
- 8 Laine A F, Chang Chun-Ming. De-noising via wavelet transforms using steerable filters. IEEE International symposium on circuits and systems.1995.3



图5 原始图像、各方向滤波图像及最终滤波图像

• 68 •