基于第二代 Curvelet 变换的低对比度图像增强

倪 雪,李庆武,陈小刚
NI Xue,LI Qing-wu,CHEN Xiao-gang

河海大学 计算机及信息工程学院,江苏 常州 213022
College of Computer and Information Engineering,Hohai University,Changzhou,Jiangsu 213022,China
E-mail:nixue1213@126.com

NI Xue,LI Qing-wu,CHEN Xiao-gang.Low contrast image enhancement based on second generation curvelet transform. Computer Engineering and Applications,2008,44(17):188-190.

Abstract: A novel low contrast image enhancement approach based on the second generation curvelet is proposed.It overcomes the shortcomings of conventional methods,such as sensitively to noise and local over-enhancement.Firstly,the source image is decomposed by Curvelet transform.Then a kind of nonlinear enhancing function is applied to enhance the image's global contrast in the low frequency subbands,and combining threshold denoising method with non-linear gain method to reduce the noise and enhance the details of image at each scale in the high frequency subbands.Finally,the enhanced coefficients are reconstructed to obtain enhanced image.Experimental results show that the proposed approach is superior to both histogram equalization and wavelet based contrast enhancement,it can preserve image edges and reduce the noise while enhancing contrast of the image,and also has good visual effect.

Key words: curvelet transform;wavelet transform;low contrast image;image enhancement;nonlinear function

摘 要:针对传统图像增强方法用于低对比度图像时,存在对噪声敏感、局部过增强等问题,提出了一种基于第二代 Curvelet 变换的增强方法。将图像进行多尺度多方向的 Curvelet 变换;引入分段非线性函数的思想,调整低频子带系数,提高图像整体的对比度;对各尺度的高频子带系数进行非线性加权,增强图像细节,并进行阈值降噪。实验表明,该方法优于常用的空间域直方图均衡化和小波域图像增强法,能有效地提高图像的对比度、降低噪声,并且较好地保留边缘信息,具有良好的视觉效果。

关键词: Curvelet 变换;小波变换;低对比度图像;图像增强;非线性增强函数
DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2008.17.056 **文章编号:**1002-8331(2008)17-0188-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391

1 引言

由于受环境、设备等因素的制约,实际采集的图像,例如雾天图像、水下图像等,往往具有对比度低、信噪比低、细节模糊等特点,使人眼的视觉分辨或机器识别较为困难,不利于图像的后续处理。图像增强技术就是提高图像的对比度,使处理后的图像比原始图像更适于人眼的视觉特性或机器识别。目前,图像增强的方法分为空间域处理和频域处理两大类。空间域处理是在原图像上直接进行数据运算,常见的处理方法有:线性拉伸、直方图均衡化[1]和反锐化掩模[2]等。对于实际低对比度图像,这些方法不可避免地会带来噪声的增大,局部区域出现过增强或增强不足的现象,导致细节信息丢失。频域处理方法主要有基于小波变换的增强方法[3]。该方法通过在变换域对小波系数的处理,提高图像的对比度、抑制噪声,但是会在边缘处引起失真。

小波变换反映信号的点奇异性,即反映奇异"点"的位置和特性,其基是各向同性(isotropy)的,很难精确地表达图像中边缘的方向。为了克服小波的这一局限性,1999 年 Candes E J 和 Donoho D L 提出了曲波(Curvelet)变换理论[4],也就是第一代 Curvelet 变换。与小波变换不同,除了尺度和位移参量,Curvelet 还增加了一个方向参量,具有更好的方向辨识能力。因此,Curvelet 对图像的边缘,如曲线、直线等几何特征的表达更加优于小波。但是,第一代 Curvelet 的数字实现比较复杂,需要经过子带分解、平滑分块、正规化和 Ridgelet 分析等一系列步骤,而且 Curvelet 金字塔的分解也带来了巨大的数据冗余量。因此,Candes E J 等又提出了实现更简单、更便于理解的快速 Curvelet 变换算法,即第二代 Curvelet 变换[5,6]。目前,对第二代 Curvelet 变换的研究刚刚起步,有关第二代 Curvelet 变换的实际应用[7,9]还不多见。

本文提出了一种基于第二代 Curvelet 变换的低对比度图像增强方法,利用 Curvelet 变换对图像几何特征更优的表达能

基金项目:江苏省社会发展科技项目(the Societal Development Research Project of Jiangsu Province,China under Grant No.BS2007058);河海大学科技创新基金(No.06B002-02);常州市国家高新区科技项目(No.XE120060408)。
作者简介:倪雪(1984-),女,工学硕士,主要研究方向为数字图像处理和小波分析及其应用;李庆武(1964-),男,副教授,主要研究方向为数字图像处理和小波分析及其应用;陈小刚(1971-),男,讲师,主要研究方向为光电技术。
收稿日期:2007-09-12 **修回日期:**2007-12-24

力，有效地提取原始图像的特征，较好地区分图像的边缘和噪声。实验表明，该方法优于常用的空间域直方图均衡化和小波域图像增强法，对低对比度图像具有很好的增强效果，提高图像的对比度，降低噪声，并且较好地保留边缘信息，具有良好的视觉效果。

2　Curvelet 变换

Curvelet 变换是一种新的图像多尺度几何分析工具，其构造思想是通过足够小的分块将曲线近似为直线来看待。第二代 Curvelet 变换在第一代 Curvelet 的基础上进行了改进，实现过程无需用到 Ridgelet，大大降低了数据的冗余度，提高了运算速度。在频域中，Curvelet 基支撑区间表现为“楔形”，如图 1 阴影部分所示。这种“楔形”支撑区间实际上是“方向”性的一种体现，因此称这种基具有“各向异性”。在楔形分块中，只有当逼近基与奇异性特征重叠，即其方向与奇异性特征的几何形状匹配时，才具有较大的 Curvelet 系数[5,6]。

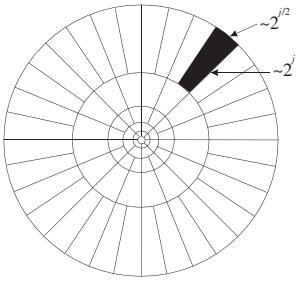


图 1　Curvelet 频率空间区域分块图

对于一个二次连续可微的目标函数 $f\in L^2(R^2)$，若设 f_m 是其重构函数，m 为系数数量，则 Curvelet 重构时逼近误差满足[5]：

$$\|f-f_m^C\|_{L2}^2\cong O((\log m)^3 m^{-2}) \tag{1}$$

而采用小波重构时，逼近误差满足式（2）：

$$\|f-f_m^W\|_{L2}^2\cong O(m^{-2}) \tag{2}$$

以上可以看出，Curvelet 变换较小波变换有着更好的逼近能力，能够对图像边缘进行最佳稀疏表示，即将图像的边缘，如曲线、直线特征用较少的大的 Curvelet 变换系数表示，克服了小波变换中传播重要特征到多个尺度上的缺点，变换后能量更加集中，更利于跟踪和分析图像的重要特征。

目前，第二代 Curvelet 变换的算法实现主要有两种[6]：USFFT 算法（Unequispased FFT）和 Wrapping 算法（Wrapping-based transform）。本文采用的是 Wrapping 算法，该方法先变换到频域，然后在频域中进行局部化，最后采用 2DIFFT 得到曲波系数。传统曲波算法为克服变换中的块效应，使用窗口重叠，实现的冗余度达：$16J+1$（J 为多尺度的级别），而基于 Wrapping 的 FDCT 算法的冗余度只有 2.8。

3　基于 Curvelet 变换的增强算法

与小波分解类似，图像经 Curvelet 分解为低频子带系数和不同尺度下的高频子带系数。小波分解每个尺度下只有水平、垂直、45°角三个方向子带图像，而 Curvelet 变换每个尺度下有多个方向的子带图像。图像增强的实现就是在变换域分别对低频子带和各尺度高频子带 Curvelet 系数进行加权处理。

3.1　非线性增强函数

为了实现对 Curvelet 系数的加权处理，引入了非线性函数[9]进行增强。函数定义如下：

$$MAG(x)=a*(sigm(c(x-b))-sigm(-c(x+b))) \tag{3}$$

其中，$a=\dfrac{1}{sigm(c(1-b))-sigm(-c(1+b))}$，$0<b<1$；$sigm(x)=\dfrac{1}{1+e^{-x}}$。$b$ 用来控制函数的分段点，c 控制曲线的增强速率。

3.2　低频系数调整

图像经 Curvelet 分解后的低频子带系数反映的是图像的基本信息，该部分关系到图像整体的对比度。因此，对低频系数的处理尤为关键，不能忽略。对于低对比度图像，其分解后的低频子带系数值相差甚小，为了实现增强效果，需要进行灰度值的拉伸。

本文对非线性函数进行了改进，提出了一种分段非线性函数。分段函数的优点是增强部分和衰减部分不相关联，可以根据图像本身特点随意调整其各自的曲率，克服了单个函数增强和衰减部分相互牵制的缺点。为了达到增强效果，可适当增大函数的幅度。公式如下：

$$wl=\begin{cases}S_1*MAG_1(x), & x\geqslant b\\ S_2*MAG_2(x), & x<b\end{cases} \tag{4}$$

其中，$x=abs(C_{1,1}(i,j))/\mathrm{Max}$，$b=(\dfrac{1}{M*N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}|C_{1,1}(i,j)|)/\mathrm{Max}$，$C_{1,1}$ 为低频子带系数，Max 为系数的最大绝对值，M，N 为系数矩阵的大小，S_1，S_2 是增幅倍数。为了保证分段点函数的连续性，取 $S_2=S_1*MAG_1|MAG_2(x=b)$。图 2 是 $b=0.5$；$c_1=5$；$c_2=15$ 时的分段非线性增强函数曲线，x 表示横坐标，wl 表示纵坐标。

3.3　高频系数调整

图像经 Curvelet 分解后的各尺度各方向的高频子带系数反映的是图像细节信息。与低频系数不同的是高频系数值偏小，并且包含噪声。对于实际图像，噪声方差 σ 未知，传统小波在第一层高频子带系数中估计 σ。而在 Curvelet 变换系数中大部分噪声处于最高子带，实验表明，在最高子带中对 σ 进行估计比较准确。采用经典公式[10]$\sigma=median(abs(C))/0.674\,5$。其中 C 为 *Curvelet* 分解后的最高频子带系数。为了增强过程中抑制噪声，阈值的选取也十分关键，文中取阈值 $T=\lambda\cdot\sigma$（σ 为噪声均方差），一般 $\lambda=3\sim4$。增强函数形式如下：

$$wh=\begin{cases}S*MAG(x), & x\geqslant T\\ 0, & x<T\end{cases} \tag{5}$$

其中 $x=abs(C_{m,n}(i,j))/(abs(C_{m,n}(i,j))+T)$，$m$，$n$ 为子带的分解层数。取 $b=0.5$；$c=10$；$T=0.4$，高频部分增强函数如图 3 所示。

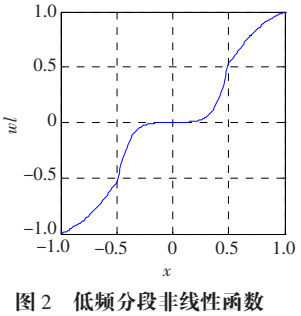


图 2　低频分段非线性函数

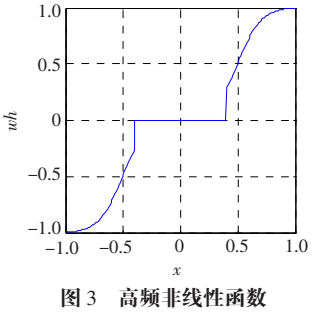


图 3　高频非线性函数

3.4　算法描述与流程图

（1）对原图像进行 Curvelet 变换，得到一系列低频和高频子带系数。

（2）对低频子带系数进行分段非线性增强；对各尺度高频

子带系数进行非线性加权处理、阈值降噪。

(3)对所有子带系数进行 Curvelet 逆变换,得到增强后的图像。

具体算法流程如图 4 所示。

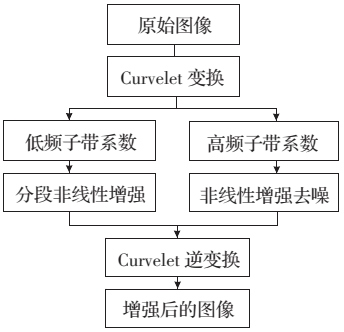
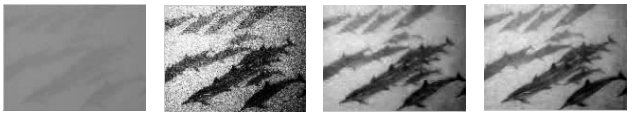


图 4 增强算法流程

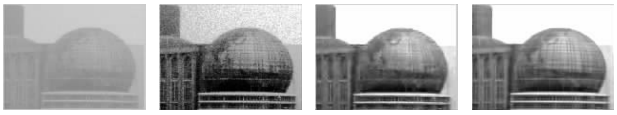
4 实验结果与分析

为了验证提出的基于第二代 Curvelet 变换增强方法对低对比度图像的有效性,分别选用了实际中常见的水下图像和雾天图像进行测试。为了方便比较,实验中把本文提出的增强函数分别作用于每个图像的 Curvelet 和 Wavelet 系数(选择'db4'小波进行 4 层分解)。图 5 和图 6 分别是两幅实验图采用直方图均衡化、小波增强法和 Curvelet 增强法后的结果比较。



(a)原始图像 (b)直方图均衡化 (c)Wavelet 增强 (d)Curvelet 增强

图 5 水下图像三种方法增强结果对比



(a)原始图像 (b)直方图均衡化 (c)Wavelet 增强 (d)Curvelet 增强

图 6 雾天图像三种方法增强结果对比

对含噪低对比度图像的增强,直方图均衡化的结果如图 5(b)、6(b)所示,该方法虽能提高图像整体的对比度,但噪声也被明显放大,局部出现过度增强现象,即图像局部表现为过黑或者过亮,导致细节部分丢失,影响图像的视觉效果。图 5(c)、图 6(c)是基于小波增强后的图像,该方法增强效果较好,提高了图像的对比度,同时也降低了噪声。但从图中可以明显看出,图像的目标边缘部分产生失真,细节不够清晰。图 5(d)、6(d)是本文算法增强后的图像,相比而言,Curvelet 增强方法更为有效。不仅消除了噪声的影响,而且增强后的图像目标轮廓清晰,细节信息被明显增强。如图 5(d)中鱼的边缘以及图 6(d)中球体上的曲线部分都十分光滑、清晰,这说明 Curvelet 对图像中的直线、曲线比小波有着更优的表示能力。

5 结论

提出了一种新的低对比度图像增强方法,充分利用了第二代 Curvelet 变换在边缘表示以及去噪方面的优势。引入了分段非线性函数的思想,分别对低频子带系数和各尺度高频子带系数处理,既提高了图像整体的对比度,又突出细节抑制噪声。结果表明,对低对比度图像,尤其是含噪图像的增强,经典的直方图均衡化效果不好,基于小波的增强算法可以提高图像的对比度,抑制噪声,但是对图像的边缘表示能力欠缺。相比之下,Curvelet 变换更具有优势。对于实际含噪图像的增强算法,目前还没有公认的定量指标来衡量。本文主要从主观效果上评判,如何确定合适的量化指标来评价还需要做进一步的探讨。

参考文献:

[1] Hummel R.Image enhancement by histogram transformation[J].Computer Graphics and Image Processing,1977,6:184-195.

[2] Chan H P,Vyborny C J.Digital mammography:ROC studies of the effects of pixel size and unsharp mask filtering on the detection of subtle microcalfications[J].Invest Radiol,1987,22(7):581-589.

[3] 陈武凡,杨丰.小波分析及其在图像处理中的应用[M].北京:科学出版社,2002:166-175.

[4] Candes E J,Donoho D L.Curvelets-a surprisingly effective non-adaptive representation for objects with edges [C]//Rabut C,Cohen A,Schumaker L L.Curves and Surfaces.Nashville,TN:Vanderbilt University Press,2000:105-120.

[5] Candes E J,Donoho D L.New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with C2 singularities[J].Commun on Pure and Appl Math,2004,57(2):219-266.

[6] Candes E J,Demanet L,Donoho D L.Fast discrete curvelet transforms[R].Applied and Computational Mathematics,California Institute of Technology,2005:1-43.

[7] 李晖晖,郭雷,刘航.基于二代 Curvelet 变换的图像融合研究[J].光学学报,2006,26(5):657-662.

[8] 杨家红,许灿辉.基于快速曲波变换的图像去噪算法[J].计算机工程与应用,2007,43(6):31-33.

[9] 吴颖谦,施鹏飞.基于小波变换的低对比度图像增强[J].红外与激光工程,2003,32(1):3-7.

[10] Donoho D L,Johnstone I.Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J].Biometrika,1994,81(3):425-455.

(上接 174 页)

[10] Garnett R,Huegerich T,Chui C,et al.A universal noise removal algorithm with an impulse detector[J].IEEE Transactions on Image Processing,2005,14:1747-1754.

[11] Tomasi C,Manduchi R.Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proc 1998 IEEE Int Conf Computer Vision,1998:839-846.

[12] Immerker J.Fast noise variance estimation[J].Computer Vision and Image Understanding,1996,64:300-302.

[13] Nikolova M.A variational approach to remove outliers and impulse noise[J].J Math Imaging Vision,2004,20:99-120.

[14] Chan R H,Chen Hu,Nikolova.An iterative procedure for removing[J].IEEE Signal Processing Lett,2004,11(12):921-924.