

## 基于边缘系数增强和对比度提升的Curvelet变换图像增强方法

徐效文, 王阿记

中南大学生物医学工程系, 湖南 长沙 410083

**【摘要】**对比度和边缘是二维图像的两个重要特性, 为了提高图像的对比度和增强图像的边缘, 本文提出了一种基于边缘系数增强和对比度提升的Curvelet变换图像增强方法。该方法首先对图像进行Curvelet变换得到低频系数和中高频系数, 对低频系数采用自适应处理方法, 使得低频系数按照原区间分布的概率重新调整分布区间, 使低频系数的分布更加均匀, 反变换后的图像对比度提高; 对中高频系数先用传统的非线性增益函数进行增强处理, 然后利用Curvelet系数的映射特性提取出和当前处理系数表达同一区域、同一方向的系数集合, 计算这个集合的绝对值之和并与设定的阈值做比较, 大于阈值则认为当前系数是边缘系数, 之后对其进行进一步增强, 这个处理方法能够提高边缘保护指数; 最后进行Curvelet反变换得到增强后的图像。实验结果表明, 与传统的Curvelet变换图像增强方法相比, 运用本文方法增强的图像在主观观察上细节较清晰, 边缘比较明显, 客观指标中的对比度提升了20%左右, 边缘保护指数提升了25%左右。

**【关键词】**Curvelet变换; 对比度提升; 边缘系数增强; 图像

**【中图分类号】**TP393

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)03-0352-05

## Curvelet image enhancement based on edge coefficients enhancement and contrast improvement

XU Xiao-wen, WANG A-ji

Department of Biomedical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract:** Contrast and edge of image are the two important properties of two-dimensional image. In order to improve the contrast and enhance the edge of the image, this paper proposed a method of Curvelet image enhancement based on edge coefficients enhancement and contrast improvement. The image was firstly transformed by Curvelet to obtain low frequency coefficients and medium-high frequency coefficients. The low frequency coefficients were processed by an adaptive processing method to readjust the interval distribution of the low frequency coefficients according to the probability distribution of original interval, producing a more uniform distribution of low frequency coefficients. And the image contrast was improved after the inverse transform. However, the medium-high frequency coefficients were enhanced by traditional nonlinear gain function. The set of coefficients which express the same area, the same direction with the current coefficient were extracted by the mapping properties of Curvelet coefficients. The absolute value of the set of coefficients was calculated and compared with the setting threshold, and the current coefficient was considered as edge coefficient if the value was greater than the threshold, and then, the current coefficient was further enhanced. This processing method could improve the edge-preserving index (EPI). Finally, the enhanced image was obtained by Curvelet inverse transform. The experimental results showed that, compared with the traditional Curvelet transform image enhancement method, the method introduced in this paper provide more clear details and more obvious edges. The image contrast and EPI of objective indicators improved by about 20% and 25%, respectively.

**Key words:** Curvelet transform; contrast improvement; edge coefficients enhancement

### 前言

对于自然界的各种信号如声音、图像信号等, 科

学家们最初是直接在空域中对信号的特性进行分析, 直到傅立叶变换的提出改变了这种局面。傅立叶变换是一个划时代的发明, 它使得隐藏在信号中的频率特性得以凸显出来, 但它也有缺少局部化分析能力的缺点, 在对它进行改善的过程中, 经过窗口傅立叶变换的铺垫, 小波变换作为一个能够最优表

**【收稿日期】**2015-01-03

**【基金项目】**中央高校基本科研业务费专项基金(201012200064)

**【作者简介】**徐效文(1978-), 男, 汉族, 博士/副教授, 硕士生导师, Tel: 18075187940, E-mail: xuxiaowen@csu.edu.cn。

达“点奇异”特性的手段被提了出来。小波变换对信号处理的意义也是非常重大的,但对图像信号来说,只能表达“点奇异”和特定方向信息的小波变换对图像中的边缘、纹理等重要特征的表达是不够“稀疏”的,在这种背景下,多尺度几何分析<sup>[1]</sup>方法应运而生。多尺度几何分析的核心是通过各种手段提取出图像的“线奇异”,它能够对图像中的边缘信息进行较好的表达。其中,Curvelet变换是多尺度几何分析中的佼佼者。

为了克服小波变换在边缘表达上的不足,Cnades和Donoho在1999年和2002年分别提出了第一代Curvelet变换<sup>[2]</sup>和第二代Curvelet变换<sup>[3]</sup>,并在2005年提出了第二代Curvelet变换的快速算法<sup>[4]</sup>,随着快速算法的提出,Curvelet变换在图像处理中的应用<sup>[5]</sup>变得广泛起来。Curvelet变换是从小波变换中发展起来的,它对图像的处理方法很多是从小波变换图像处理的方法中借鉴过来的。例如小波变换去噪的思想<sup>[6]</sup>在Curvelet变换去噪中同样适用,Curvelet变换去噪<sup>[7]</sup>也是寻找一个阈值对变换系数进行阈值化处理,而且处理的结果在边缘保持方面做的比小波要好。

对图像增强来说,小波变换增强的思想是对小波变换系数进行非线性增益处理<sup>[8]</sup>。Starck<sup>[9]</sup>根据这种思想提出了适用于Curvelet变换的非线性增益方法,这也成为了当前应用最广泛的Curvelet变换增强方法。另一方面,Curvelet变换和小波变换也具有很大的区别,最大的区别在于Curvelet变换具有高度的各向异性,系数结构也不一样。2009年,Gebäck<sup>[10]</sup>提出了Curvelet变换系数的映射特性,并首次从显微镜图像提取出边缘系数然后运用到了边缘检测中。2012年,Wu等<sup>[11]</sup>提出了边缘系数在图像去噪中的应用算法。在图像增强中,提升对比度也是图像增强的一个重要方面,对Curvelet变换图像增强方法来说,对比度的提升主要在低频系数的处理中实现。研究发现,高对比度的图像相对于低对比度的图像直方图分布更均匀,动态范围更广。

本文针对低频系数,提出了一种自适应处理方法,对Curvelet变换得到的低频系数矩阵进行处理,使得低频系数矩阵中系数分布更均匀。针对中高频系数进行非线性增益,再用文献<sup>[10]</sup>的方法提取出的边缘系数进行增强处理,起到了很好的边缘增强效果。本文方法能够提升图像的对比度和边缘保护指数。

## 1 算法原理

离散Curvelet变换有两种实现方式:USFFT算法和Wrapping算法,后者运行速度更快,所以本文采用Wrapping算法。

### 1.1 对比度提升

Curvelet变换得到的低频系数矩阵,是图像轮廓和对比度的主要来源,所以对于Curvelet图像增强来说,提升对比度主要是通过对低频系数矩阵进行处理来实现。本文提出了一种针对低频系数矩阵的自适应处理方法,使低频系数矩阵中的系数分布更加均匀,从而提高反变换后的增强图像的对比度。

用本文提出的自适应处理方法对一个虚拟的系数矩阵进行处理,图1a和图1b分别是处理前和处理后的矩阵。从图1a可以看出,原系数矩阵中的系数主要分布在[1, 20]和[200, 255]区间范围内,经过处理后的图1b中的系数分布则均匀的多,达到了调整系数分布的效果。

11.3	254.2	1.0	2.3
19.6	200.1	221.9	230.6
5.8	9.7	6.1	210.9
219.3	228.2	8.8	236.8

a: Original coefficient matrix

35.3	254.2	1.0	5.3
63.0	146.7	192.2	209.9
17.0	30.0	18.0	169.3
186.8	205.3	27.0	221.6

b: The coefficient matrix after processing

图1 自适应处理方法的效果

Fig.1 The effect of the adaptive processing method

### 1.2 边缘系数的提取和增强

Curvelet变换和小波变换都是多尺度、多分辨率的变换,不同的是Curvelet变换多了个方向参数。小波变换对“点奇异”敏感,即在小波系数中绝对值较大的系数表示图像在某个尺度、某个区域上的“点奇异”比较强;而Curvelet变换对“线奇异”敏感则是指绝对值较大的Curvelet系数对应图像特定尺度上的某个区域、某个方向上存在较强的“线奇异”。在Curvelet变换中,可以针对某个系数矩阵设定一个阈值,大于这个阈值的认定是边缘系数。该方法的优点在于简单,缺点在于不够准确。2009年,文献<sup>[10]</sup>提出了一种提取中高频系数中的边缘系数的方法,该方法首先利用Curvelet系数的映射特性确定出某个系数在不同尺度、不同方向的映射系数集合,该集合内系数的绝对值之和可衡量该系数“线奇异”的大

小, 则可以设定一个阈值, 绝对值之和大于某一阈值可认为该系数是边缘系数。

提取出边缘系数之后, 增强这些边缘系数并进行 Curvelet 反变换可以达到增强图像边缘的目的。对这些边缘系数进行增强的公式如下:

$$c'_{j,d}(k_1, k_2) = \begin{cases} M - \frac{(M - c_{j,d}(k_1, k_2))^2}{M - m}, & M_{j,d} > M_{edge} \\ c_{j,d}(k_1, k_2), & else \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $c_{j,d}(k_1, k_2)$  是  $j$  尺度、 $d$  方向、 $(k_1, k_2)$  位置上的 Curvelet 系数,  $c'_{j,d}(k_1, k_2)$  为处理后的 Curvelet 系数,  $M_{edge}$  为设定的阈值,  $M_{j,d}$  为  $c_{j,d}(k_1, k_2)$  映射系数集合的绝对值之和,  $M$  为系数矩阵中满足  $M_{j,d} > M_{edge}$  条件的系数的最大绝对值,  $m$  为系数矩阵中满足  $M_{j,d} > M_{edge}$  条件的系数的最小绝对值。

## 2 算法过程

本文提出的基于边缘系数增强和对比度提升的 Curvelet 变换图像增强算法的过程为:

(1) 对图像进行 Wrapping 式的 Curvelet 正变换得到 Curvelet 系数  $c_{j,d}(k_1, k_2)$ 。

(2) 对 Curvelet 低频系数矩阵进行对比度提升处理: ①假设原低频系数矩阵可以表示为  $I(i, j)$ ,  $i, j$  分别为横坐标和纵坐标, 把原矩阵系数值归一化到  $[0, 1]$  区间; ②设定步长  $step$  为 0 到 1 之间的数值 (本文为 0.15), 通过步长把  $[0, 1]$  划分成  $n$  个区间, 称为原区间, 统计落在原区间上系数的数量, 计算出每个区间系数数量占系数总数的百分比  $p(1) \sim p(n)$ , 利用这些百分比计算出每个区间变换后所对应的区间, 以第 2 个区间  $[index, 2*index]$  (假设  $index$  不超过 0.5) 为例, 这个区间变换后所对应的区间应为  $[p(1), p(1) + p(2)]$ ; ③利用公式 (2) 把原区间变换到以系数数量占总数量百分比确定的区间, 假设  $x$  为原区间上的值,  $y$  为变换后的值:

$$y = \begin{cases} p(1)*x/step, & i=1 \\ (p(1) + \dots + p(i-1)) + p(i)*(x - (i-1)*step)/step, & 1 < i < n \\ (p(1) + \dots + p(i-1)) + (1 - (p(1) + \dots + p(i-1))) * (x - (i-1)*step)/(1 - (i-1)*step), & i=n \end{cases} \quad (2)$$

④反归一化得到变换之后的系数值。

(3) 对 Curvelet 中高频系数进行边缘增强处理:

①用文献<sup>[9]</sup>中的非线性增强函数进行非线性增益处理; ②用文献<sup>[10]</sup>中的方法提取出边缘系数, 然后用公

式 (1) 对边缘系数进行增强;

(4) 进行 Curvelet 反变换得到增强图像。

## 3 结果及分析

### 3.1 评价指标

图像增强没有统一的评价指标, 由于图像增强的目的是提高图像的对比度, 凸显图像的边缘等信息, 使得图像后续处理更加容易, 所以本文主要采用对比度和边缘保护指数两种客观指标来评价增强效果。

**3.1.1 对比度** 图像的对比度反映了图像的辨识度也即图像识别的难易度, 对比度越大则人和机器越容易识别<sup>[12]</sup>。对比度 CT 的计算方法如下:

$$CT = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (f - \bar{f})^2 / (M*N)} \quad (3)$$

**3.1.2 边缘保护指数** 边缘保护指数 (EPI) 反映了增强图像相对于原图像的边缘信息量的多少, EPI 越大则说明增强图像的边缘信息量越多<sup>[13]</sup>。

$$EPI = \frac{\sum (|f_p(i, j) - f_p(i+1, j)| + |f_p(i, j) - f_p(i, j+1)|)}{\sum (|f_o(i, j) - f_o(i+1, j)| + |f_o(i, j) - f_o(i, j+1)|)} \quad (4)$$

其中,  $f_p$  表示增强后的图像,  $f_o$  表示原图像。

### 3.2 实验结果与分析

为了检验本文提出算法的有效性, 采用两幅不同类型 (人脸图像 Face 和医学图像 Leg-MR) 的低对比度图像进行实验, 对这些图像分别用文献<sup>[9]</sup>提出的传统 Curvelet 非线性增强算法和本文提出的基于边缘系数增强和对比度提升的 Curvelet 变换图像增强算法进行处理并比较, 原图及得到的增强图像如图 2 所示。两种增强算法的客观指标如表 1 所示。

边缘保护指数是增强图像相对原图进行计算得来的, 所以原图的边缘保护指数为 1。从表 1 中数据可知, 本文提出的增强算法相比传统的 Curvelet 非线性增强方法在对比度和边缘保护指数这两个指标上具有明显优势, 表明本文算法对图像的对比度提升更多, 增强后的图像边缘信息更丰富。从主观感受上来说, 传统的 Curvelet 增强算法增强后的图像给人一种模糊或平滑的感觉, 而本文算法得到的增强图像则清晰的多, 具体来看本文算法增强的图 2e 在头发的表现上细节更丰富, 可以清晰地分辨出一缕缕头发, 图像 Leg-MR 也是如此。

## 4 结论及展望



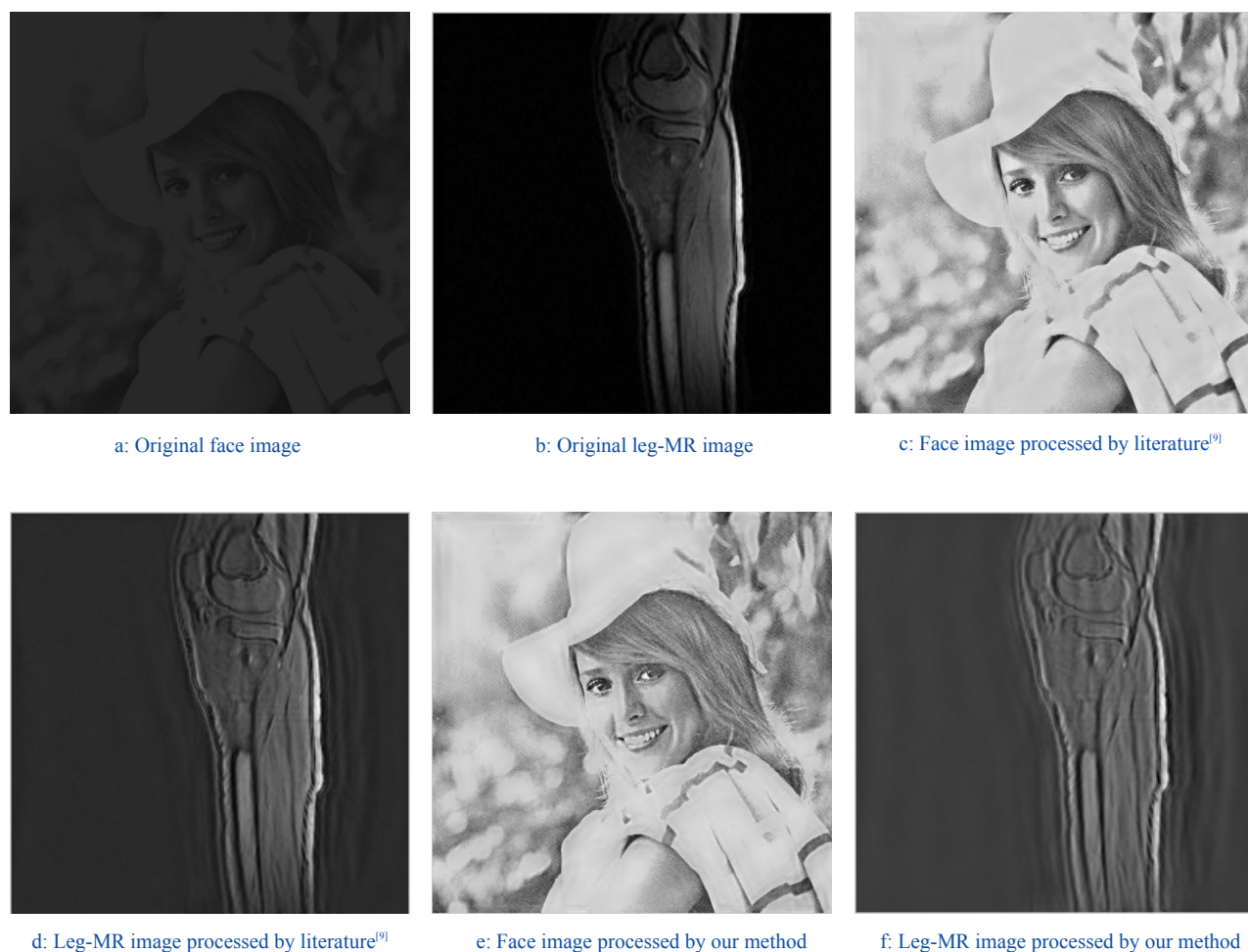


图2 原图及增强后的图像

Fig.2 The original and the enhanced image

表1 两种增强算法的客观指标

Tab.1 Objective indexes of two kinds of enhancement algorithms

Indexes Images	Face		Leg-MR	
	CT	EPI	CT	EPI
The original image	5.245 8	1	28.592 2	1
Literature [9]	5.744 8	1.234 456	32.356 5	1.714 119
Our method	6.758 9	1.501 103	41.533 9	2.336 289

本文提出了一种基于边缘系数增强和对比度提升的 Curvelet 变换图像增强方法,可同时对低频系数和中高频系数进行处理,对低频系数进行自适应处理方法以提高图像的对比度,对中高频系数进行传统的非线性增强之后,提取边缘系数并进一步增强,达到增强图像边缘的目的。实验结果表明,本文方法能够显著提升图像的对比度和边缘保护指数等客观指标,同时能够获得比较好的主观感受。

Curvelet 变换是一个新兴的变换,它在图像增强中的应用主要是通过非线性增益函数来进行。本文

在此基础上增加了提取边缘系数,获得较好的增强效果。但是将来还需要在以下方面进一步深入研究:①在低频系数的处理中,变换区间确定之后系数是根据线性函数来变换的,如果能够用拟合的方式确定出新的变换区间将更加符合实际图像中连续性的要求;②在增强边缘系数的算法中值得改进的地方是找到一个更好的方法确定一个阈值;③目前存在好几种多尺度几何分析的方法,如 Contourlet 变换<sup>[14]</sup>、Bandlet<sup>[15-16]</sup>变换等,可以研究它们各自的系数映射特性,将提取边缘系数的方法推广应用到这些方法中。

## 【参考文献】

- [1] Mallat GS. Multi-resolution approximation and wavelet orthogonal bases of  $L_2(R)$  [J]. Trans Am Math Soc, 1989, 315(1): 69-87.
- [2] Candes EJ, Donoho DL. Curvelets-a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[C]// Cohen A, Rabut C, Schumaker LL. Curves and Surface Fitting. Nashville: Vanderbilt University Press, 2000: 105-120.
- [3] Candes EJ. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with  $C^2$  singularities [J]. Commun Pure Appl Mathemat, 2004, 57(2): 219-266.
- [4] Candes EJ, Demanet L, Donoho DL, et al. Fast discrete curvelet transforms[J]. Multis Model Simul, 2006, 5(3): 861-899.
- [5] Wu HF, Liu WN, Guo XH. The application status of curvelet transformation in medical image processing[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2010, 29(4): 432-435
- [6] Donoho DL. Denosing by soft-thresholding[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [7] Starck JL, Candes EJ, Donoho DL. The Curvelet Transform for Image Denoising[J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(6): 670-684.
- [8] Velde KV. Multi-scale color image enhancement[C]//Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on (Volume:3). Kobe: IEEE, 1999: 584-587.
- [9] Starck JL, Murtagh F, Candes EJ, et al. Gray and color Image contrast enhancement by the curvelet transform[J]. IEEE Trans Image Proc, 2003, 12(6): 706-717.
- [10] Gebäck T, Koumoutsakos P. Edge detection in microscopy images using curvelets[J]. BMC Bioinform, 2009, 10(1): 75.
- [11] Wu JZ, Huang YD. Image denoising algorithm based on edge feature extraction in Curvelet domain[C]// Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR), 2012 International Conference on. Xian: IEEE, 2012: 7-10.
- [12] Xiao D, Sun ZQ. Improved algorithm of image nonlinear enhancement based on Curvelet Transform[J]. Computer Engineering, 2011, 37(17): 200-205.
- [13] Xue Q, Yan ZZ, Wang SQ. Mammographic Feature Enhancement Based on Second Generation Curvelet Transform[C]//2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2010). Yantai: IEEE, 2010: 349-353.
- [14] Do MN, Vetterli M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans Image Pric, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [15] Penne EL, Mallat S. Image compression with geometrical wavelets [C]//In Proc of ICIP, 2000. Vancouve. Canada: 200: 661-664.
- [16] Pennex EL, Mallat A. Sparse geometric image representations with bandelets[J]. IEEE Trans Image Proc, 2005, 14(4): 423-438

## 参考文献序号的标注方法

参考文献序号在正文引文处标注的位置比较复杂,可简单分为如下几种情形(本刊要求):

①文献[1]指出……;本研究方法参见文献[2]。——这是最简单的情况,即“[1]”“[2]”作为语句的组成部分(能读出来),只有紧跟着“文献”2字并不排成上标。

②王xx<sup>[3]</sup>报道……;Brown等<sup>[4]</sup>认为……。——“[3]”“[4]”放在所引作者姓名后,且用上标。

③心肺复苏术一直是医学界关注的重要课题<sup>[5]</sup>。——如果未提及作者,参考文献序号则标在句末(句号前),且用上标。