

文章编号: 1673-0062(2010)01-0052-04

## 基于曲波变换的边缘检测技术研究

刘征海

(南华大学 计算机科学与技术学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 曲波变换是一种新的多尺度表示方式, 其系数包含位置和尺度信息. 本文通过对曲波变换系数的分析, 提出一种对各层系数区别处理的方式来加强图像边缘信息的方法. 实验表明该方法能明显地加强灰暗部分物体的边缘.

**关键词:** 边缘检测; 曲波变换; Canny 算子

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A

## Study of Technique of Edge Detection Based on Curvelet Transform

LIU Zheng-hai

(School of Computer and Technology University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract** The curvelet transform is a new family of multi-scale representation containing the information about the scale and location parameters. According to the analysis about the coefficient of curvelet transform, a novel method is proposed in this paper. The method uses different means to deal with different scale of the coefficient to enhance the edge of image. The experimental results show that the method can observably enhance the edge in the gloom area of the image.

**Key words** edge detection; curvelet transform; Canny operator

物体的边缘是以图像局部的不连续性为特征的, 包括灰度值、颜色、纹理等的不连续. 它标志着一个区域的结束和另一个区域的开始. 边缘则是图像最基本的特征, 边缘检测广泛应用于图像处理和计算机视觉等领域. 它是模式识别、图像内容分析的重要部分. 它通常位于系统的最底层, 为其他模块提供服务, 其性能在很大程度上影响着一系列处理的整体效果. 因此边缘检测在图像处理

领域中一直是研究的热点之一.

曲波 (Curvelet) 是由 Candes 在其博士论文中提出来的脊波 (Ridgelet) 变换理论<sup>[1]</sup> 框架衍生出来的. 在随后的研究中 Candes 等又提出了实现更简单、更便于理解的快速 Curvelet 变换算法<sup>[2]</sup>, 使得 Curvelet 变换被国内外学者广泛关注, 并在图像处理中得到了广泛的应用. 其中 Starck 等通过变换系数做硬阈值处理, 以此来达到去噪的目的.

收稿日期: 2009-07-27

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目 (07C638)

作者简介: 刘征海 (1972-), 男, 湖南衡阳人, 南华大学计算机科学与技术学院讲师, 硕士. 主要研究方向: 图像处理、可靠性计算.

的<sup>[3]</sup>. Starck 等人根据各子带的噪声水平分别进行分段非线性增强, 来增强图像<sup>[4]</sup>. Choi 等人提出了基于 Curvelet 变换的图像融合算法<sup>[5]</sup>. 国内学者也对 Curvelet 变换做了探索性研究<sup>[6-8]</sup>.

但将 Curvelet 变换用于对图像边缘特征提取的研究还不多见, 只有少数论文发表. 其中, 丁辉等人在文献 [9] 中提出的利用有限脊波来改进曲波变换, 然后应用于对图像角点的检测. 本文通过对不同层次曲波系数采用不同的处理方式, 来增强局部图像的对比度, 达到增强图像的目的, 再通过 Canny 边缘检测算子就能提取到更为完整的物体边缘.

## 1 曲波变换原理

### 1.1 连续 Curvelet 变换

在二维连续空间  $R^2$  中,  $x$  为空间位置变量,  $\omega$  为频域变量,  $r, \theta$  为频域中的极坐标. 引入一对“窗”函数, “半径窗”  $W(r)$  和“角度窗”  $V(t)$ , 且满足:

$$\begin{cases} \sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1, r \in (3/4, 3/2) \\ \sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t - l) = 1, t \in (-1/2, 1/2) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $j$  为半径;  $l$  为角度参变量.

对所有尺度  $j \geq j_0$ , 定义的 Fourier 频域的频率窗为:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V(\frac{2^j |2^j \theta|}{2\pi}) \quad (2)$$

在时域中, 半径窗伸缩尺度为  $2^{-j}$  短轴, 角窗的伸缩因子是  $2^{-j/2}$  长轴, 即曲波基的支撑区间满足  $width \approx length^2$ , 称为各向异性尺度关系.  $U_j$  为极坐标下的一种“楔形”窗, 如图 1 所示 (灰色阴影部分为“楔形”窗).

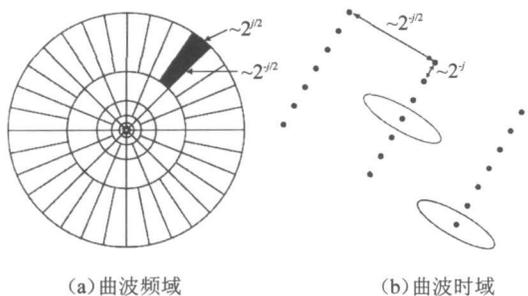


图 1 Curvelet 在频域的分块示意和相应的时域尺度

Fig 1 Curvelet tiling of space and frequency

在频域第  $j$  级, 第  $k$  角度, 位置为  $k = (k_1, k_2)$

$\in Z^2$  的 Curvelet 变换系数定义为:

$$C(i, j, k) := \frac{1}{(2\pi)^2} \int f(\omega) U_j(R_\theta \omega) \times e^{i(x^j l_1 \omega)} d\omega \quad (3)$$

与小波理论一样, Curvelet 也包括粗尺度和精细尺度下的成分, 且粗尺度下的 Curvelet 不具有方向性. 因此整个 Curvelet 变换是由精细尺度下的方向性元素  $(\varphi_{j_1 k})_{j \geq j_0, l k}$  和粗尺度下各向同性的小波  $(\varphi_{j_0 k})_k$  组成的.

### 1.2 离散 Curvelet 变换

连续 Curvelet 变换显然不适用于图像, 在图像的二维笛卡尔坐标系中, 需采用中心方块区域  $\tilde{U}_j$  来代替连续域中频率窗, 如图 2 所示. 此时, 频率窗为:

$$\tilde{U}_{j_1}(\omega) := \tilde{W}_j(\omega) V_j(S_{01} \omega) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} W_j(\omega) = \sqrt{\phi_{j+1}^2(\omega) - \phi_j^2(\omega)}, j \geq 0 \\ V_j(\omega) = V(2^{j/2} \omega_1 / \omega_2) \end{cases} \quad (5)$$

$\phi$  为一维低通窗的内积:

$$\phi_j(\omega_1, \omega_2) = \phi(2^j \omega_1) \phi(2^j \omega_2) \quad (6)$$

$S_0$  为剪切矩阵:

$$S_0 := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan\theta & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此, 离散 Curvelet 变换系数定义为:

$$C(i, j, k) := \int f(\omega) \tilde{U}_j(S_0^{-1} \omega) e^{i(S_0^{-1} \omega \cdot x)} d\omega \quad (8)$$

然后, 就可以利用局部傅立叶基变换来实现, 具体的 Curvelet 变换细节请参见文献 [2].

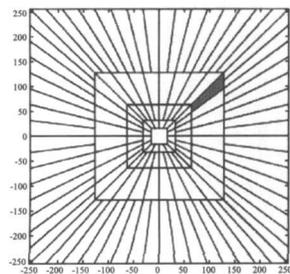


图 2 离散 Curvelet 频域分块图

Fig 2 The basic digital tiling of curvelet

## 2 曲波系数分析

根据上述曲波变换的理论, 通过一个具体实例来分析曲波各层系数的含义.

首先, 对原始图像进行 FFT 变换; 然后, 根据图像尺寸, 确定划分的尺度层次, 划分规则为

scale= log2(n) - 3 因此本例中使用的 512 × 512 图像, 尺度划分为 6

这 6 个层次又可分为三个部分: Coarse, Detail, Fine(即轮廓层, 细节层和精细层). 从频率的分布来说, 低频系数分配到轮廓层部分, 高频部分分配到精细层部分, 中高频系数分配到细节层部分.

512 × 512 的原始图像如图 3 所示. 对图 3 进行 Curvelet 变换, 然后分别保留单层系数, 其余各层系数置 0 的情况下, 再进行重构, 所得到的各单层重构图如图 4 所示.

从图 4 中可以看出: 轮廓层系数包含了图像的概貌, 是低频部分系数, 图像比较模糊; 细节层主要包含了边缘的信息, 且具备多方向性, 各细节

层由中低频到中高频的边缘信息也是越来越纤细; 精细层则是高频部分系数, 主要体现了图像的细节和边缘信息.

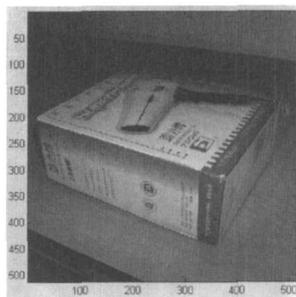


图 3 原始图像

Fig 3 The original image

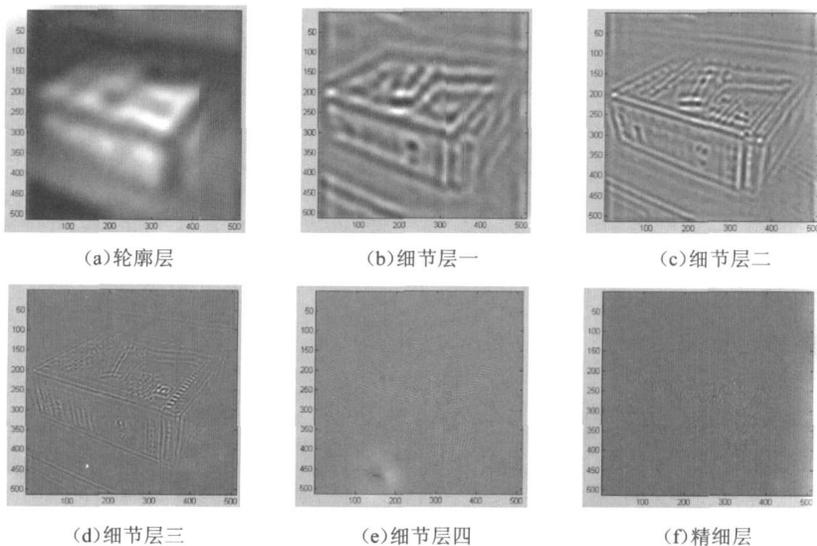


图 4 每个单层系数的重构图

Fig 4 The reconstructed image with single scale level

### 3 曲波在边缘检测中的应用

依据上节的分析, 可以知道: 曲波变换中各层的系数包含了不同的信息. 通过对各层的系数采

用不同的处理方式, 然后再重构生成新的图像, 就可以把感兴趣部分的信息突显出来. 据此, 提出一种新的处理方法, 操作流程如图 5 所示, 用它来检测图像当中特殊部分的边缘信息.

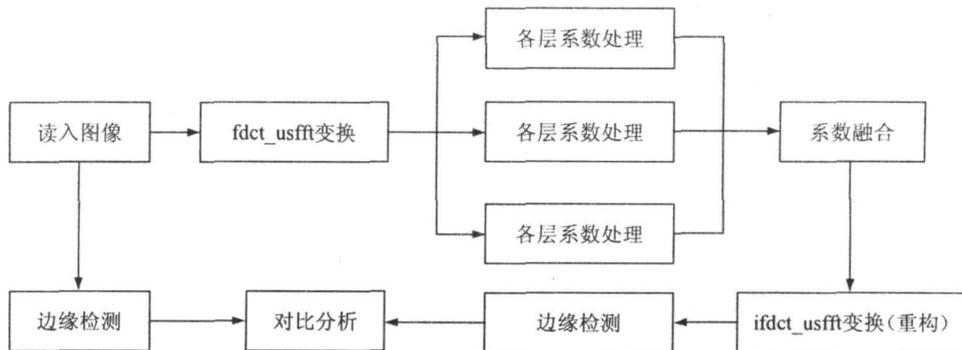


图 5 操作流程

Fig 5 Operate flow chart

整个过程可以分为曲波变换、系数处理、系数融合、逆变换、边缘检测几个主要步骤。其中, 最关键的步骤是系数处理。正如第 2 节所述, 不同层的系数包含了图像不同的边缘信息。本文通过对中高频系数放大, 低频系数局部缩小的方法处理原始图像上部的灰暗部分。通过该方法, 能扩大物体与背景的对比, 从而使物体的边缘显示出来。

## 4 实验及分析

按照上述操作流程, 对图 3 所示的原始图像进行了处理, 可得到重构图像, 如图 6 所示。

从图 6 中可以发现盒子的上边缘比图 3 的原始图像要更清晰。

然后, 用 Canny 算子对图 6 和图 3 进行边缘

分析, 分别得到各自的边缘, 如图 7 所示。

从图 7 的 (a) 图中可以明显的看到盒子的上边缘, 而在 (b) 图中则没有此边缘。

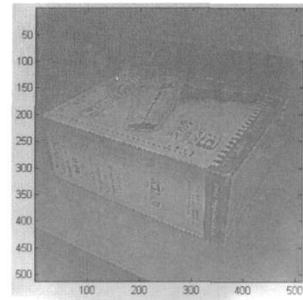
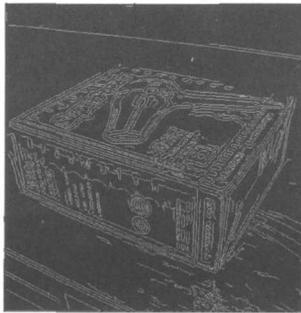
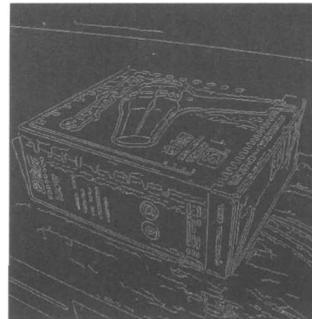


图 6 重构图像

Fig 6 The reconstructed image with syncretized coefficient



(a) 重构图像的边缘



(b) 原始图像的边缘

图 7 边缘对比图

Fig 7 Edge contrast

## 5 结论

曲波是一个较优的多尺度图像表达方式, 每层曲波变换系数分别包含了图像的不同频域信息。根据这一特性可通过对各层系数采取不同的处理方式加强图像。对加强后的图像能提取出更完整的物体边缘。实验表明, 对各层系数的处理能加强图像灰暗部分的对比, 从而使物体边缘能清晰地显现。

但从重构图像中可以看到比较明显的重边现象, 这还需要进一步的研究加以解决。

### 参考文献:

[1] Candes E J Ridgelets Theory and applications[D]. Ph.D. Thesis Department of Statistics, Stanford, California Stanford University, 1998

[2] Candes E J, Donoho D L, Donoho D L, et al Fast Discrete Curvelet Transforms[R]. Applied and Computational Mathematics Pasadena California California Institute of Technology, 2005

[3] Stark J L, Candes E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(6): 670-684

[4] Stark J L, Murtagh F, Candes E L, et al Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform[J]. IEEE Trans Image Proc, 2003, 12(6): 706-717

[5] Myungjin Choi, Rae Young Kim, Myeong-Ryong Nam, et al Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 136-140

[6] 焦李成, 谭山, 刘芳. 脊波理论: 从脊波变换到 Curvelet 变换[J]. 工程数学学报, 2005, 22(5): 761-773

[7] 隆刚, 肖磊, 陈学. Curvelet 变换在图像处理中的应用综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(8): 1331-1337

[8] 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

[9] 丁辉, 付梦印. 改进曲波变换在图像角点检测中的应用研究[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(11): 2141-2144