

基于剪切不变的递归 Contourlet 变换图像去噪

贾建¹ 项海林²

(西北大学数学系 西安 710069)¹

(西安电子科技大学智能信息处理研究所 西安 710071)²

摘要 根据综合剪切和递归 Cycle Spinning 技术,提出一种基于剪切不变的递归 Contourlet 变换图像去噪方法(RSICT)。为改善图像去噪由于缺少平移不变性而产生的伪吉布斯效应,使用剪切替代平移技术来提取图像中原有的几何特征,将递归 Cycle Spinning 方法运用在剪切技术中给出剪切不变思想,并将其用于 Contourlet 域图像去噪。对于被加性高斯白噪声污染的图像,实验中将 RSICT 方法与平移不变小波、平移不变 Contourlet 等方法进行了比较,结果表明在大多数情况下,RSICT 的 PSNR 结果相比这些方法高出 0.1 至 1.2 dB,并保持良好的视觉效果。

关键词 平移不变,剪切不变,Contourlet 变换,递归 Cycle Spinning

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

Using Shear Invariant and Recursive Cycle Spinning for Image Denoising in Contourlet Domain

JIA Jian¹ XIANG Hai-lin²

(Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710069, China)¹

(Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)²

Abstract Based on Shear and Recursive Cycle Spinning, a novel contourlet transform denoising scheme was proposed. To avoid the Gibbs-like phenomena caused by transform variance of the contourlet transform, translation method was replaced by shear technique and employed to capture the geometric structure hidden in images, applied Recursive Cycle Spinning to Shear produced Shear Invariant method, and developed Recursive Shear Invariant Contourlet Transform denoising scheme (RSICT). This scheme achieves enhanced estimation results for images that are corrupted with additive Gaussian noise over a wide range of noise variance. To evaluate the performance of the proposed algorithms, experiment results were compared with those of the algorithms, such as translation invariant wavelets and translation invariant contourlet method. The simulation results indicate that the proposed method outperforms the others 0.1 ~ 1.2 dB in PSNR, and keeps better visual result as well.

Keywords Shear invariant, Translation invariant, Contourlet transform, Recursive cycle spinning

1 引言

近 20 年来,小波变换被广泛应用于图像、语音等信号处理领域,但由于小波基函数的各向同性导致方向选择性较差,不能有效地捕捉轮廓信息,因此变换不能充分利用图像的几何正则性。近年来,许多学者提出了各种多尺度多方向变换方法用于有效“捕获”自然图像中潜在的几何结构,比如围线、边界等信息^[1]。

1999 年 Candès 等人提出了 Curvelet 变换^[2],该函数在一定度量标准下可以最优表示连续域中具有曲线奇异的函数。受 Curvelet 变换启发,2002 年 Minh Do 和 Martin Vetterli 提出 Contourlet 变换(CT)^[3],该变换满足各向异性尺度关系,能准确地将图像中的边缘轮廓信息捕捉到不同尺度、不同方向的子带中。此后,Ramin Eslami 和 Hayder Radha 提出平移不变 Contourlet 变换(TICT)^[4,5],并指出 TICT 相比平

移不变小波方法(TIWT)具有更高的峰值信噪比(PSNR)。从视觉效果上来看,TICT 能够更好地保持边界及纹理等特征信息。

除了考虑平移不变,有效的图像表示方法还应该考虑到在去噪时提取图像中原有的几何结构。本文综合剪切技术和 Contourlet 变换提出一个新的算法——剪切不变的递归 Contourlet 变换去噪算法。相比平移不变方法,剪切能够在图像中引入更多新的方向特征,从而在变换的过程中保留图像的方向信息的同时提取原有的几何结构,取得更好的数值结果及视觉效果。

2 Contourlet 变换

由于认识到小波在表示图像中几何规则上的缺陷性,很多学者关注于如何更有效地表示图像中的几何结构信息。Minh Do 引入 Contourlet 变换,该变换不局限于小波变换的 3

到稿日期:2008-06-13 本文受国家自然科学基金(60703117),国家自然科学基金项目(60703109)资助。

贾建(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为模式识别、图像处理、计算机图形学,E-mail:jjjianbb@126.com;项海林(1972—),男,博士生,研究方向为图像处理。

个方向,具有更加“稀疏”的空间与方向表示形式,因此是局部的和多方向的多分辨图像表示方法。

Contourlet 变换第一步应用拉普拉斯(LP)塔形分解实现变换的多尺度分解,每一级分解产生一个上一级信号的低通采样,和由低通采样与上一级信号的差值得到的一个带通分量,下一级分解是在产生的低通采样上迭代进行;第二步应用合适的二维方向滤波器及严格采样将每一个 Laplacian 塔形带通子带分解成一组楔形方向子带,以此得到方向几何信息,最终图像在各个尺度上被表示为一组方向子带信息。图 1 显示了一个多尺度 Contourlet 变换的分解步骤过程。

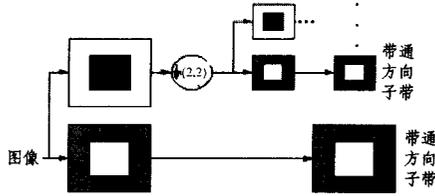


图 1 Contourlet 变换流程图



图 2 四幅剪切变换结果图

剪切^[6]为原始图像提供了更多的新的方向信息,而后这些方向特征经过 Contourlet 变换之后可以更好地保留下来,大量新的方向信息也正是剪切不变利用的主要特点,这也是 RSICT 方法优于其它变换方法的主要原因。另一方面,剪切改变了图像的几何结构,因此将放大某些特定方向上的线性特征。例如一根水平直线将在剪切矩阵 $S_{2,1}$ 的作用下被拉伸,同时在剪切矩阵 $S_{1,1}$ 作用下产生平移。这将有助于保持和恢复一些特定方向上的信息,同时,被阈值掉的结构信息将在其他的剪切矩阵作用下得到补偿。

另一方面,在剪切因子 α 为非整数情况下,式(2)变换中要进行插值运算,这实际上是一种重采样过程,会引入误差信息。本文利用文献[6]中介绍的 Bresenham 算法实现这一过程,确定图像在变换过程中像素的整数点位置,避免舍入误差,该方法可逆、快速、有效,且只牵扯整数操作。

3 平移不变与剪切不变

在小波阈值去噪过程中通常引起伪 Gibbs 效应的出现,这种缺陷对于基于 Contourlet 变换的方法也不例外。提出平移不变方法实际上给出了一个紧的平移不变框架,它弥补了离散小波变换(WT)的一些缺陷,在此框架下做图像去噪非常有效。Contourlet 变换也是近乎严格采样的,因此也同样适合采用平移不变技术来提高去噪效果。在文献[4]中,R. Eslami 和 Hayder Radha 通过 Cycle Spinning 技术将平移不变方法引入 Contourlet 变换中并用于图像去噪,该方法称为 TICT。实验证明,TICT 可以得到比单纯利用 Contourlet 变换更好的处理效果。

一般来讲,平移不变是满足下列形式的一组变换集:

$$\hat{f} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N T_i^{-1} [D[T_i(f)]] \right) \quad (1)$$

其中 f, \hat{f} 分别是待处理图像及处理后的结果图像, D 是去噪算子, T_i 为一可逆变换。不失一般性,如果可逆变换对应平移变换,那么这组操作对应的就是平移不变方法。

3.1 剪切变换

虽然平移不变方法可以取得较好的处理效果,但对于 Contourlet 变换来讲,平移并没有有效利用 Contourlet 变换的方向性信息。为了有效利用 Contourlet 变换的方向特征,本文利用剪切不变技术(SI)来替代平移不变完成去噪过程。

剪切是一种使物体形状发生变化的变换。两种常用的剪切变换是沿 x 方向剪切和沿 y 方向剪切,它们实际上是一组坐标变换矩阵:

$$S_{ij}f; S_{\alpha,0} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, S_{0,\alpha} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

变换矩阵 $S_{\alpha,0}$ 生成沿 x 方向剪切,变换矩阵 $S_{0,\alpha}$ 生成沿 y 方向剪切。当沿 x 方向剪切时,剪切因子 α 的几何意义是对 $y=1$ 的点在剪切时沿 x 轴正向平移的距离;同理,当沿 y 方向剪切时,剪切因子 α 的几何意义是对 $x=1$ 的点在剪切时沿 y 轴正向平移的距离。基于这一变换,对一幅图像进行剪切变换可以产生更多新的方向信息。图 2 显示 Lena 图像应用剪切变换后的结果,对应公式(2)中取剪切因子 $\alpha = \pm 3/4$ 。

3.2 递归 Cycle Spinning

针对去噪过程出现的伪吉布斯现象,1995 年 Coifman 和 Donoho 提出的 Cycle Spinning^[7]以及 2003 年 Fletcher A K 等人提出的递归 Cycle Spinning^[4,8]都用来抑制小波阈值所出现的这一现象。这里看到平移变换并没有有效利用 Contourlet 变换的方向性信息,同样由不同剪切因子得到不同的去噪结果 s_k ,在每次对 s_k 进行阈值时也会使伪吉布斯现象出现在不同位置。为有效利用 Contourlet 变换的方向特征,本文利用剪切技术(SI)来替代平移,同时结合递归 Cycle Spinning 技术减少为吉布斯效应^[8],提出剪切不变递归 Contourlet 变换去噪算法,即对含噪信号进行“循环剪切-阈值去噪-逆循环剪切”。RSICT 可通过下面公式计算得到:

$$s_{k+1} = D_{ij}(s_k) \quad (3)$$

其中, $D_{ij}(\cdot) = S_{ij}^{-1} [D[S_{ij}(\cdot)]]$, $i = (k \text{ div } K_2) \bmod K_1$, $j = k \bmod K_2$, div 为求商符号, mod 为求余运算, k 为递归运算次数, K_1, K_2 分别表示 x 方向和 y 方向上的最大剪切量, S_{ij} 为剪切变换, C 为 Contourlet 去噪变换,下标 i, j 分别控制 x 方向和 y 方向上的剪切。对 $M \times N$ 大小图像,式(2)中 $S_{\alpha,0}$ 对应取 $\alpha = i/M$, $S_{0,\alpha}$ 中对应取 $\alpha = j/N$,可见剪切因子随着 i, j 的值循环地发生变化。

4 去噪实验与分析

结合递归 Cycle Spinning 与剪切不变,将其应用于 Contourlet 去噪变换,式(3)所描述的 RSICT 具体算法如下:

- 步骤 1 取 $k=0, s_0 = f$, 设定递归运算最大次数 L ;
- 步骤 2 取 $i = (k \text{ div } K_2) \bmod K_1, j = k \bmod K_2$;
- 步骤 3 取 $i = i * \text{step}, j = j * \text{step}$, 利用式(3)对 s_k 做循环剪切;
- 步骤 4 对剪切后的图像做 Contourlet 分解,得到各尺度、各方向上的 Contourlet 系数 $C(s_k)$;
- 步骤 5 对系数 $C(s_k)$ 做阈值处理得到 $\hat{C}(s_k)$;
- 步骤 6 对 $\hat{C}(s_k)$ 做 Contourlet 逆变换,并对逆变换的结

果进行逆向剪切,得到去噪后的图像 s_{k+1} ;

步骤7 如果 $k=L$,算法结束,输出结果 s_{k+1} ;否则, $k=k+1, s_k=s_{k+1}$,返回步骤2。

对于 512×512 大小图像,实验中设定递归运算最大次数 $L=256$,步骤2中最大剪切量 $K_1=K_2=17$,步骤3中取 $step=32$,这样做的目的使得原图像在尽可能大的剪切因子范围应用剪切变换,其中剪切因子 $\alpha \in [-1, 1]$ 。

文中对参与比较的方法采用非线性硬阈值处理规则,下面通过一组去噪实验证实 RSICT 算法的有效性。实验中用到 256 灰度级测试图像为 512×512 大小,为原始图像添加零均值高斯白噪声,标准差 σ 从 20 变化到 80,将 RSICT 与 Wiener 滤波、WT、TIWT、CT 及 TICT 进行比较。实验中采用双正交 Daubechies 9/7 小波进行分解,其中 WT 及 TIWT

使用 Wavelab850^[9] 工具包实现得到,CT 由工具包^[10] 实现得到,对 Contourlet 的 Laplacian 分解过程使用同样的双正交滤波带并分解 5 层。对于平移不变去噪,设置硬阈值大小为 3σ ,对 RSICT 也使用同样规则。数值比较结果如表 1 所列。可以看到,TICT 方法明显优于 Wiener 滤波、WT、TIWT 及 CT 方法,然而在大多数情况下,RSICT 得到的 PSNR 结果比 TICT 都要高出 0.1 至 1.2 dB,这也证实了剪切相比平移变换的优越性。

图 3 显示当噪声标准差 $\sigma=40$ 时,Barabara 标准图像与噪声图像及各种方法去噪结果对应的局部图。虽然 RSICT 与 TICT 的 PSNR 数值相差不多,但从视觉效果可以看到 TICT 方法中桌布上的平行线彼此相互干扰,并且直线有弯曲的迹象,而这些纹理在 RSICT 方法中恢复得很好。

表 1 不同噪声标准差 σ 对应去噪结果的 PSNR 数值

	σ	Noise	Wiener	WT	TIWT	CT	TICT	RSICT
Lena	20	22.10	30.21	28.73	30.86	29.14	31.57	31.47
	30	18.58	27.95	27.00	28.99	27.31	29.67	29.73
	40	16.10	26.12	25.78	27.96	26.02	28.34	28.48
	50	14.14	24.54	24.88	26.91	24.94	27.35	27.54
	60	12.57	23.19	24.23	26.02	24.21	26.56	26.79
	70	11.24	22.10	23.62	25.37	23.53	25.94	26.26
	80	10.08	21.05	22.79	24.85	22.93	25.34	25.69
	Barbara	20	22.10	26.24	25.49	27.95	26.27	28.48
30		18.60	24.72	23.41	25.19	24.27	26.33	26.37
40		16.08	23.44	22.32	24.16	22.95	24.90	24.96
50		14.16	22.38	21.78	23.07	22.13	23.85	24.00
60		12.58	21.45	21.26	22.50	21.47	23.19	23.30
70		11.23	20.59	20.87	22.02	20.94	22.66	22.85
80		10.06	19.80	20.45	21.72	20.43	22.26	22.42

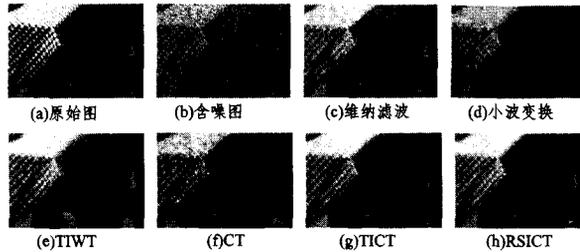


图 3 $\sigma=40$ 时,Barbara 图像及各种去噪方法结果的局部图

结束语 由 Do 和 Vetterli 提出的 Contourlet 变换作为一种具有良好局部性的多分辨图像表示方法,其方向性和各向异性都要优于小波变换,能更好地保持含噪图像中的细节纹理信息,因此在图像处理领域具有更好的应用前景。

Contourlet 分解中的操作都包含下采样操作,因此不具有平移不变特性。借鉴平移不变的思想,本文在 Contourlet 变换中引入剪切技术,通过剪切变换在原始图像中引入许多新的方向特征,相比平移方法,剪切可以更好地恢复方向细节信息。随后通过递归 Cycle Spinning 技术减少伪吉布斯效应,给出了 RSICT 去噪方法。实验表明在大多数情况下,RSICT 在数值上及视觉效果上都要优于 TIWT 及 TICT 方法。

Contourlet 变换是一种正在发展和完善的数学工具,其自身技术的完善和应用还有待进一步的扩展,本文继承平移不变的思想,将剪切不变引入 Contourlet 图像处理当中,相比很多优秀的去噪方法^[11,12] 并不能取得最好的处理结果,希望能够在后续的发展过程中不断地完善。

参考文献

- [1] 汪西莉,焦李成. 基于对偶树复小波和 MRF 模型的纹理图像分割[J]. 计算机科学,2007,34(1):187-190
- [2] Starck J L, Candès E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising[J]. IEEE trans. Image Processing, 2002, 11(6): 670-684
- [3] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans. on Image Processing. 2005, 14(12): 2091-2106
- [4] Eslami R, Radha H. The contourlet transform for image denoising using cycle spinning[C]// Signals, Systems, and Computers, 2003. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on, New York: IEEE, 2003: 1982-1986
- [5] Eslami R, Radha H. Image denoising using translation invariant contourlet transform[C]// Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings. (ICASSP'05). IEEE International Conference on, 2005, 4: 557-560
- [6] 贾建,焦李成. 数字脊波变换的实现与一种改进方法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(1): 115-119
- [7] Coifman R R, Donoho D L. Translation invariant denoising[C] // A. Antoniadis and G. Oppenheim, eds. Wavelets and Statistics, Springer Lecture Notes in Statistics, 103. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 125-150
- [8] Fletcher A K, Ramchandran K, Goyal V K. Iterative projective wavelet methods for denoising[C] // Unser M A, Aldroubi A, Laine A F, eds. Proc. Wavelets: Appl in Sig. & Image Proc X. San Diego: SPIE, 2003, 5207: 9-15

(下转第 301 页)

表5 加密方式表

加密方法	修改项目	修改内容
修改光盘容量	卷描述符 BP81-84 字节	目标容量
文件变目录	目录记录 BP26 的 Bit 1	1
目录变文件	目录记录 BP26 的 Bit 1	0
隐藏目录或文件	目录记录 BP26 的 Bit 0	1
变超大文件	目录记录 BP11-14 字节	目标文件大小

以变超大文件为例说明加密步骤。

步骤1 确定是否有辅助卷描述符,以判断使用的文件系统是 ISO 9660 还是 Joliet。通过搜索 16 进制代码“02 67 68 48 48 49”来确定,如果是 Joliet 文件系统,转步骤 2;否则转步骤 3;

步骤2 根据辅助卷描述符的 BP89-120 确定换码顺序,并使用对应的 UCS-2 字符集对目录名和文件名进行转换,根据 BP141-144 确定路径表的扇区号;转步骤 4;

步骤3 根据主卷描述符的 BP141-144 确定路径表的扇区号;

步骤4 到路径表扇区号,按照路径表记录格式,如表 3 所列,根据子目录名找到文件对应的子目录的地址;

步骤5 到子目录地址,按照文件和目录记录格式,如表 4 所列,根据文件名找到该文件记录的 BP11-14,这 4 个字节对应真实的文件大小,将它们修改为指定大小。

对以上加密方法进行了具体的实验验证,实验结果表明,通过以上方法加密的光盘,可以正常运行,但不能进行复制,起到了对光盘数据的保护作用。

4.2 对加密光盘数据的解密

对加密光盘进行解密时,需要先将加密光盘上的数据制作成光盘映像文件,再对映像文件进行修改。

卷描述符中的光盘容量、目录记录中的数据长度用 4 字节来表示,采用 Both Endian 的方式,占用 8 字节,它们的内容以字节为单位是对称的,即第 1 字节与第 8 字节,第 2 字节与第 7 字节、第 3 字节与第 6 字节,第 4 字节与第 5 字节的内容相同。确定该域的值时,只需要前 4 字节的内容即可。这种存储方式为数据的解密提供了方便,因为在加密时就只需要修改前 4 字节的内容,保留后 4 字节的内容为正常的值,因此只需要根据后 4 字节的内容恢复前 4 字节的内容,就可以实现解密。用类似于加密的方法,可实现对表 5 所列加密方法产生的加密光盘数据的解密,解密方法及需要修改的内容如表 6 所列。

表6 解密方式表

解密方法	修改项目	修改内容
恢复光盘容量	卷描述符 BP81-84	根据 BP85-88 恢复 BP81-84
恢复变为目录的文件	目录记录 BP26 的 Bit 1	0
恢复变为文件的目录	目录记录 BP26 的 Bit 1	1
恢复隐藏的目录或文件	目录记录 BP26 的 Bit 0	0
将超大文件变为正常大小	目录记录 BP11-14	根据 BP15-18 恢复 BP11-14

使用 ISO 9660 文件系统产生的光盘映像文件,通常没有辅助卷描述符,只需要修改主卷描述符的相关内容,Joliet 文

件系统使用 ISO 9660 的辅助卷描述符来指定 UCS-2 字符集的一系列记录特性,因此如果使用 Joliet 文件系统,需要修改辅助卷描述符的相关内容。

4.3 光盘数据的个性化加密和解密方法

以上讨论的方法,通过现有的加密与解密软件如光盘加密大师等^[7]也可实现相同的功能。为了制作出具有个性化的加密光盘,需要对光盘映像文件进行特殊的修改。以下是对几种修改方式的说明:

(1) 互换卷描述符标识符: Joliet 文件系统使用辅助卷描述符定义相关属性,将其与主卷描述符的类型值互换,由于原来的主卷描述符没有定义换码顺序,无法进行 UCS 字符集的正确转换,结果标识符显示全成为乱码,由于文件名和扩展名格式不正确,显示的文件名、文件大小和文件类型都将不正确。

(2) 修改文件域的首地址,这样复制得到的数据是不完全的、错位的,由于不能读取到正确的文件头信息,使得复制到的数据没有使用价值。

本文涉及到的各种加密方法可以联合使用,通过恢复修改项可实现解密。

用光盘加密大师、ClonyXXL 等解密软件对上述加密方法进行了测试,实验表明对第(1)种加密方法无法解密,而第(2)种方法加密的光盘则根本检测不出有加密的内容。

用上述的方法对光盘映像文件进行修改后,光盘将不能正常浏览和运行,需要自带解密程序才能使用该光盘上的数据。

结束语 本文通过对光盘映像文件的结构的分析,阐述了通过修改光盘映像文件的卷描述符和对应文件的目录记录的相应内容,实现光盘数据的结构性加密方法。最后提出了通过互换卷标识符和文件域首地址的个性化加密方法,达到使文件属性显示不正常,复制内容无效的目的。该方法具有灵活多样的特点,具有更好的加密性能,可在一定程度上达到保护合法的软件知识产权的目的。

参考文献

- [1] 王九丁. 浅谈光盘防拷贝技术[J]. 记录媒体技术, 2003, 2(2): 6-8
- [2] 孙龙霞, 刘军. 光盘加密技术的研究[J]. 军事通信技术, 2005, 26(2): 35-40
- [3] 乔志江, 赵明. 光盘加密刻录的方法与实现[J]. 沈阳电力高等专科学校学报, 2003, 5(1): 31-34
- [4] 覃祝君. 光盘加密技术的回顾与展望[J]. 记录媒体技术, 2006, 5(7): 42-46
- [5] ISO 9660-1988. Information processing -Volume and File structure of CD-ROM for Information Interchange[S]. International Organization for Standardization, April 15, 1988
- [6] Joliet Specification - CD-ROM Recording Spec ISO 9660: 1988 Extensions for Unicode [S]. Microsoft Corporation, May 22, 1995
- [7] 张亮, 程志艳, 张弘. DVD/MP3/VCD/CD-RW 光盘刻录手册[M]. 北京: 希望电子出版社, 2006

(上接第 256 页)

- [9] Donoho DL. Wavelab850[CP/OL]. http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/Wavelab_850
- [10] Do M N. Contourlet Toolbox[CP/OL]. <http://www.ifp.uiuc.edu/minhdo/software/>
- [11] Portilla J, Strela V, Wainwright M J, et al. Image denoising u-

sing scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain[J].

- IEEE Trans. Image Processing, 2003, 12(11): 1338-1351
- [12] Foi A, Katkovnik V, Egiazarian K. Pointwise Shape - Adaptive DCT for High-Quality Denoising and Deblocking of Grayscale and Color Images[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2007, 16(5): 1395-1411