

# 一种基于 Contourlet 的图像低码率 SPIHT 算法<sup>\*</sup>

肖 羽<sup>1</sup> 王相海<sup>1,2</sup>

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)<sup>1</sup>

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)<sup>2</sup>

**摘 要** Contourlet 是一种优于小波的不可分离图像表示方法,它除了具有一般小波变换的多尺度、局部性外,还具有方向性、各向异性。为此,本文提出了一种基于 Contourlet 变换的 SPIHT 编码方法。首先,对图像 Contourlet 变换各子带系数的分布情况进行了统计分析;进而设计了一种基于 Contourlet 变换的空间方向树结构,该结构具有类似图像小波变换域中“零树”的特性;在此基础上实现了一种基于 Contourlet 变换的渐进式编码算法(CSPIHT),该算法除了具有一般基于小波变换的零树编码算法的特性外,还具有方向性和各向异性的特点,特别对图像的边缘方向信息和纹理信息具有很好的捕捉能力和解码的视觉效果。实验结果表明,所提出的算法 CSPIHT 在低码率下其重构图像的 PSNR 要高于 SPIHT 算法;而对于中等码率,尽管重构图像的 PSNR 略低于 SPIHT,但重构图像纹理和边缘区域的视觉效果要优于 SPIHT。

**关键词** Contourlet, 空间方向树结构, SPIHT, 图像编码

## A Low Bit-Rate SPIHT Algorithm Based on the Contourlet Transform

XIAO Yu<sup>1</sup> WANG Xiang-Hai<sup>1,2</sup>

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)<sup>2</sup>

**Abstract** In this paper, a new non-linear image approximation method that decomposes images both radially and angularly is proposed. In order to explore the potentiality of this new transform as a tool for image coding, the developed SPIHT coding scheme that is based on using non-linear approximation of images. Through careful statistical analysis on the independent sub-band coefficients of contourlet transform, the spatial orientation trees based on contourlet transform, and this structure has the “Zero-tree” characteristic in wavelet transform domain is proposed. Based on this, the zero-tree encoding (CSPIHT) based on contourlet transform is proposed. This algorithm not only has multi-scale feature, but also has direction and anisotropy, consequently which can enhance the capability of capturing textures, contours and fine details in images. In this work, some study and analyze the contourlet transform for bit-rate image coding. Simulation results prove that the proposed scheme(CSPIHT), at the lower decode bit rate, can achieve higher PSNR than traditional SPIHT image compress algorithm; Although the PSNR of decoded image lower than SPIHT at medium bit rate, our algorithm is visually superior to the SPIHT in textures and contours. So this new coding approach is competitive to the wavelet coder in terms of the PSNR-rate curves, and is visually superior to the wavelet coder for the mentioned images.

**Keywords** Contourlet, Spatial orientation trees, SPIHT, Image coding

## 1 引言

对于含“点奇异”的一维信号,小波能达到“最优”的非线性逼近阶。而在处理二维或更高维“线奇异”的信号时,虽然有一维小波张成的高维小波基在逼近性能上要优于三角基,却不能达到最优逼近阶<sup>[1]</sup>。对于二维图像,由于边缘、轮廓和纹理等具有高维奇异性的几何特征包含了大部分信息,小波不再是表示图像的最优基函数。2002年, M. N. Do 和 Martin Vetterli 提出了一种“真正”的图像二维表示法——Contourlet 变换<sup>[2]</sup>,这种新的多尺度几何变换不仅具有小波变换的多分辨率和时频局部性,而且有很好的各向异性,从而可以更全面地表征图像本身的几何特性<sup>[3]</sup>,这样在检测信号的奇异性等方面具有小波分析无可比拟的优势。人们纷纷把 Contourlet 变换直接用于编码算法,以提高重构图像的视觉效果。然而,由于 Contourlet 变换具有冗余特性,这样给图像

编码带来了难度,为此人们又转去寻找一些折衷方案,用于图像编码,比如文<sup>[4,5]</sup>将 Contourlet 变换中对图像进行多尺度分析的 LP 变换改为小波变换,构造了基于小波的 Contourlet 变换(Wavelet based Contourlet, WBCT)。这种 WBCT 变换一改 Contourlet 变换的冗余性质,是一种非冗余变换,同时继承了 Contourlet 变换的多分辨率、时频局部和多方向等特性,从而提出了一种基于 WBCT 的 SPIHT 算法对图像进行编码,该算法对于纹理较强的图像其视觉效果在一定程度上优于传统基于小波变换的 SPIHT 算法<sup>[6]</sup>,但峰值信噪比却有所降低。然而将 Contourlet 变换中的 LP 换成了小波,使得变换的各向异性和抗扰频性的能力减弱<sup>[2]</sup>,从而影响了对图像的有效表示。

实际上,经过分析发现,对于较高的解码率,与小波变换相比,Contourlet 变换的冗余特性通常会使得 Contourlet 变换所获取的很多重要的变换系数在嵌入式码流中得不到解码,

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(项目编号:60372071)、辽宁省自然科学基金项目(项目编号:20032105)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助(项目编号:RC-04-11)。肖 羽 硕士研究生,主要研究方向为图像、视频编码;王相海 博士、教授,主要研究方向为计算机图形学及多媒体信息处理。

从而造成了编码的低效性。但对于低码率情况,Contourlet 系数对图像的更加有效表示会使排在嵌入式码流前端的 Contourlet 系数较小波系数更加重要,Contourlet 变换可以用较少的重要系数表示图像<sup>[2]</sup>,从而使解码效率得到提高,特别对于强纹理图像。所以本文直接将 Contourlet 变换应用到 SPIHT 算法中。

本文首先对 Contourlet 变换各子带中的系数进行了统计分析,设计了一种基于 Contourlet 变换系数的空间方向树结构。在此基础上,提出了基于 Contourlet 变换的渐进式零树编码(CSPIHT)算法。该算法除了具有一般基于小波变换的零树编码的多尺度外,还具有方向性、各向异性,从而提高了编码算法对图像边缘方向信息和纹理信息的捕捉。实验结果表明,本文提出的 Contourlet 变换域中空间方向树结构是合理的,基于 Contourlet 变换的 SPIHT 算法是有效的。在低码率下,与传统 SPIHT 和文[4]中的算法相比,本文算法的重构图像具有较高的峰值信噪比和较好的视觉效果。对于中等码率,尽管其峰值信噪比优势有所降低,但重构图像的视觉效果也得到了较好的改善,特别对于具有丰富纹理和轮廓信息的图像。

## 2 Contourlet 变换

Contourlet 变换亦称金字塔型方向滤波器组 PDFB(Pyramidal Directional Filter Bank),是一种不可分离的多尺度信号表示方法,其支撑区间具有随尺度而长宽比变化的“长条形”结构,能有效地跟踪图像中的线奇异性 and 面奇异性特征。它将多尺度分析和方向分析分拆进行,首先由 LP(Laplacian Pyramid)变换<sup>[7,8]</sup>对图像进行多尺度分析以捕获奇异点,然后由方向滤波器组 DFB(Directional Filter Bank)<sup>[9,10]</sup>将分布在同方向上的奇异点合成一个系数,这种结构使得 Contourlet 具有较优的非线性逼近性能。图 1 和图 2 分别给出了 PDFB 对图像进行分解的过程示意图和 PDFB 的尺度和方向分布图。

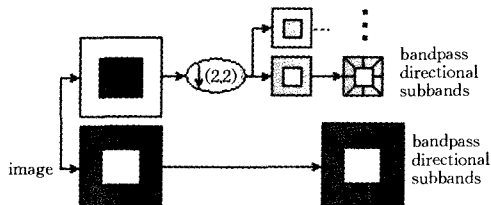


图 1 PDFB 分解过程示意图

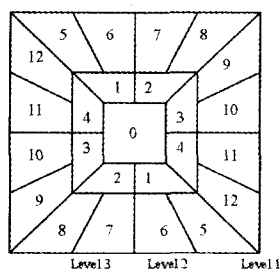


图 2 PDFB 尺度和方向分布图

PDFB 的整个过程首先对图像进行 LP 变换,将获得的带通图像进行 DFB 分解,以捕获方向信息,这一过程在粗糙图像上重复进行,从而将图像分解为多尺度方向子带。PDFB 具有如下性质<sup>[11]</sup>:(1)如果 LP 和 DFB 使用完全重构滤波器,那么 PDFB 也将获得完全重构,这意味着 PDFB 将提供一个帧算子;(2)如果 LP 和 DFB 采用直交滤波器,那么 PDFB 将

提供一个帧界为 1 的紧帧(tight frame with frame bounds equal to 1);(3)PDFB 具有 4/3 的冗余率;(4)如果  $l_j$  层的 DFB 被应用于 LP 的第  $j$  个金字塔层( $j=1,2,\dots,J$ ,其中  $j=1$  对应最精细尺度),那么 PDFB 的基函数将具有宽度约为  $2^j$  和长度约为  $2^{j+l_j-2}$  的支撑区间;(5)如果使用 FIR 滤波器,则对具有  $N$  个像素的图像,PDFB 的计算复杂度是  $O(N)$ 。

## 3 基于 Contourlet 的图像低码率 CSPIHT 算法

### 3.1 SPIHT 算法概述

SPIHT 算法是 Said 和 Pearlman 在 EZW 算法基础上提出的一种更为高效的小波图像编码算法<sup>[6]</sup>,该算法发展了零树的基本思想,设计了空间方向树来更加有效的组织小波系数,图 3 给出了其空间方向树的结构。与零树结构相比,这种空间方向树的数据结构不仅充分利用了不同尺度间小波系数的相关性,也充分考虑了同一尺度下小波系数的相关性,可以更加有效地组织小波系数,因此 SPIHT 算法较 EZW 算法具有更高的变码效率<sup>[12]</sup>,其实现过程参见文[6]。

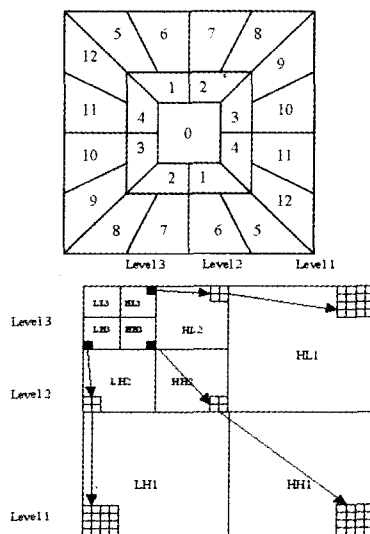


图 3 SPIHT 算法的空间方向树结构

### 3.2 图像 Contourlet 变换系数的统计特性

小波与 Contourlet 对图像的分解结构和形式是不同的,除了由于二者采用的滤波器组的不同,使得 Contourlet 在每一级的图像分解中都较小波具有更多的子带系数外,在小波变换中,每级分解的子带个数是固定的,即只有水平、垂直和对角线三个方向子带。而在 Contourlet 变换中,每级中的方向子带个数是可变的,如 Contourlet 变换的第一层具有 16 个方向子带,而第二层中则有 8 个方向子带,每一个节点在高频子带中对应的 4 个直接子孙的空间位置会根据高频子带个数的变化而改变,即父节点与 4 个子节点的对应关系是可变的(参见图 4)。

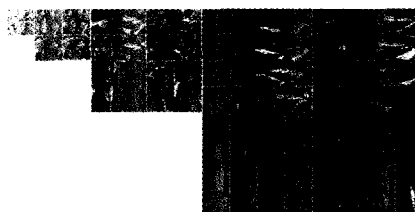


图 4 Barbara 图像的 Contourlet 变换效果图

当然,Contourlet 和小波对图像的变换系数也具有一些相似的特性:(1)与小波图像变换系数相同,在图像的 Contourlet 系数矩阵中,系数幅度总体而言从低频子带到高频子带是逐渐衰减的;(2)Contourlet 变换系数也同样具有许多良好的频域和空域局部化特性,比如从频率分解上看,原始图像的能量大部分聚集在低频子带上,而从高频子带系数的空间分布位置上看,原始图像的能量大部分集中在图像内容的边缘、轮廓上;(3)在同一方向上 Contourlet 各级高频子带系数的幅值分布大体上是一致的。

为了验证上述特性,我们对强纹理图像 Mandrill、Straw 和自然图像 Barbara、Tank、Lena 五幅标准测试图像进行了 2 级 Contourlet 变换,并对其低频子带系数能量、频域全部系数能量以及低频子带系数能量占全部系数能量的百分比进行了统计,其结果见表 1。从统计结果可以看出,Contourlet 变换后原始图像的能量大部分聚集在低频子带,其所占比重维持在 64.23%~95.79%,则实验图像中能量聚集在低频子带平均比例为 83.77% 而在 2 级 Contourlet 变换中低频子带的系数个数只占全部系数个数的 4.761%。无论是 Straw 和 Mandrill 等强纹理图像,还是 Barbara、Tank 和 Lena 等自然图像。

表 1 图像 2 级 Contourlet 变换系数能量分布情况

图像	低频子带系数能量(a)	频域全部系数能量(b)	a/b
Barbara	7693451	10052593	76.53%
Mandrill	8444851	13147829	64.23%
Straw	10274187	14942098	68.76%
Tank	8675965	10328529	84.00%
Lena	6563007	8073572	81.29%
Aerial	11833950	14777632	80.08%
Airplane	11490750	12341572	93.11%
Bark	9733036	14097852	69.04%
Brick wall	10366596	13584400	76.31%
Elaine	8936260	10469726	85.35%
goldhill_large	9429404	12297015	76.68%
Gravel	13056198	14628986	89.25%
Gray	8326144	8691667	95.79%
Peppers	7628489	9489266	80.39%
Stream and bridge	7461529	10882769	68.56%
Wood grain	11704699	14729001	79.47%

此外,我们还对 Lena 图像 2 级 Contourlet 变换后相同方向的两个子带  $N_{23}$ 、 $N_{15}$  子带中重要系数进行了提取(阈值选为  $T=2^9$ ),参见图 5,其中黑色像素表示非重要系数,白色像素表示重要系数。通过对原始图像和高频子带重要系数的分析可以看出,分解后各方向子带图像的能量大部分集中在图像的边缘和轮廓等位置上,并且在相同方向的不同级尺度子带中系数的幅值分布大体上是一致的。

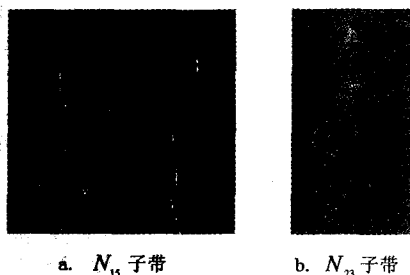


图 5 Lena 图像 Contourlet 变换重要系数的分布示意图

图像 Contourlet 变换系数的上述特性统计为我们下面所

提出的基于 Contourlet 变换的空间方向树结构提供了依据。

### 3.3 基于 Contourlet 变换的空间方向树结构的提出

从传统 SPIHT 编码过程可知,该算法的成功与它采用了相应的空间方向树结构是密切相关的。同样我们根据图像 Contourlet 变换系数的分布特性,提出了一种基于 Contourlet 变换的空间方向树结构(参见图 6)。

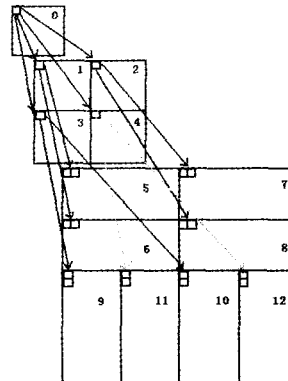


图 6 基于 Contourlet 变换的空间方向树结构

为了验证所提出的基于 Contourlet 变换的空间方向树结构的有效性,我们对 Straw、Mandrill、Barbara、Tank 和 Lena 等图像进行了 2 层分解,并对不同阈值下所提出的空间方向树结构满足文[6]中“零树”条件(即如果一个父结点关于阈值  $T$  是不重要的,那么它的后代关于阈值  $T$  也是不重要的)的情况进行了统计,结果见表 2。从统计结果可以看出,无论是纹理较强的 Straw 和 Mandrill 图像,还是 Barbara、Tank 和 Lena 等自然图像,我们所提出的基于 Contourlet 变换的空间方向树结构都基本符合“零树”的规律。

表 2 所提出的空间方向树中“零树”所占比重

图像	Straw	Barbar	Mand	Tank	Lena
阈值 $T=2^9$	91.15	94.01	94.57	98.66	99.25
阈值 $T=2^8$	91.32	93.89	94.12	97.68	98.02
阈值 $T=2^7$	90.11	92.13	94.32	98.21	98.69
阈值 $T=2^6$	91.26	93.05	94.55	98.36	98.15

### 3.4 CSPIHT 算法的实现

SPIHT 算法的编码过程分为排序过程(sorting pass)和细化过程(refine pass)。根据所提出的空间方向树结构,我们将其应用于 SPIHT 的编码过程中来实现 CSPIHT 算法。CSPIHT 算法也同样包括排序和细化两个过程,以下我们给出其排序过程中方向树的分裂策略,其它过程与 SPIHT 相同。

与 SPIHT 算法过程相似,在排序过程中对重要系数的确定主要是通过空间方向树的多次分裂来实现的。然而,与 SPIHT 不同,Contourlet 变换的方向子带个数按照尺度由高至低,以 2 倍的速度增加,即由高至低分别含有 4 个方向子带、8 个方向子带、16 个方向子带, ...,  $2^{level}$  个方向子带。根据本文 3.3 节中所设计的空间方向树的结构特点,在 Contourlet 变换的塔型分解系数中,将树的每个节点与一个系数相对应,而每一个节点的直接子孙与高一尺度下相同空间方向子带系数相对应,则编码树可定义为每一个节点有 4 个直接子孙或者没有子孙(其中最高尺度的子带系数都没有子孙)。如果节点  $(x, y)$  是父节点,则其直接子节点可分为以下两种情况。

情况一:若 $(x,y)$ 是低频子带中的节点,则其下一级4方向的子节点集合为

$$\begin{aligned} & \{(\text{lowbandsize}+x,y), \\ & (2 \cdot \text{lowbandsize}+x,y), \\ & (\text{lowbandsize}+x,\text{lowbandsize}+y), \\ & (2 \cdot \text{lowbandsize}+x,\text{lowbandsize}+y)\}; \end{aligned}$$

其中 lowbandsize 表示 Contourlet 变换中最低频子带的尺度大小,以下同。

情况二:若 $(x,y)$ 是第 $2^n$ 个方向子带中的节点( $n=1,2,\dots,level,level$ 为变换的层数),则其在 $2^{n+1}$ 方向子带中的子节点的集合可分为如下两种情况(参见图6):

(1) $2^{n+1}$ 方向子带为横向矩形(矩形的长大于宽)

该情况下子节点的集合为

$$\begin{aligned} & \{(\text{lowbandsize}+2x-1,y), \\ & (\text{lowbandsize}+2x,y), \\ & (\text{lowbandsize}+2x-1,2^{n-1} \cdot \text{lowbandsize}+y), \\ & (\text{lowbandsize}+2x,2^{n-1} \cdot \text{lowbandsize}+y)\}. \end{aligned}$$

(2) $2^{n+1}$ 方向子带为纵向矩形(矩形的长小于宽)

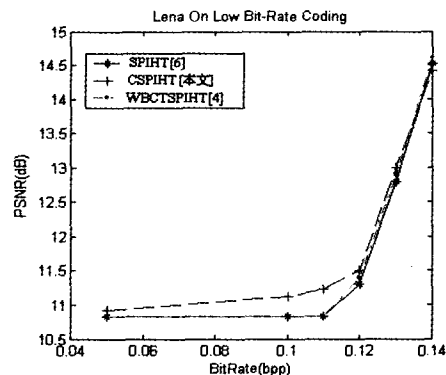
$$\begin{aligned} & \{(2^n \cdot \text{lowbandsize}+x,2y-1), \\ & (2^n \cdot \text{lowbandsize}+x,2y), \\ & (2^{n+1} \cdot \text{lowbandsize}+x,2y-1), \\ & (2^{n+1} \cdot \text{lowbandsize}+x,2y)\}. \end{aligned}$$

#### 4 实验结果与分析

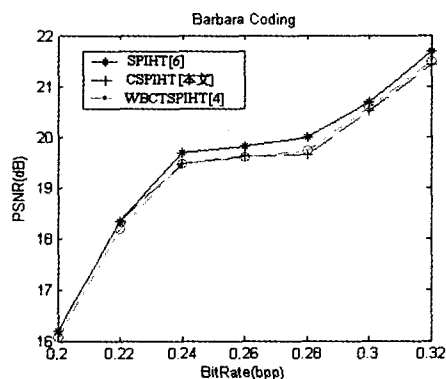
为了验证本文所提出 CSPIHT 算法的有效性,我们以 BMP 格式的  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  的标准测试图像 Lena 和 Barbara 作为参考,分别进行了 3 级 Contourlet 变换,并采用 CSPIHT 算法进行了编、解码实验,同时对这两个测试图像又分别利用传统基于小波的 SPIHT 算法和文[4]中所提出的基于 WBCT 的 SPIHT 算法(简记为 WBCTSPIHT 算法)进行了编码,其中 SPIHT 算法中的小波变换采用的是双正交 9/7 小波滤波器,图像进行均进行了 3 级变换。图 7 分别给出了三种算法对 Lena 和 Barara 进行编码的比较结果。图 8 给出了本文所给出算法和 SPIHT 算法在 0.35bpp 下对 Barara 的重构图像。

从实验结果可以看出:(1)在低码率(0.05~0.125bpp)下,本文所提出算法 CSPIHT 的 PSNR 值较 SPIHT 算法和 WBCTSPIHT 算法略高,这主要是因为低码率情况下,排在 CSPIHT 嵌入式码流前端的 Contourlet 系数要较排在 SPIHT 和 WBCTSPIHT 嵌入式码流前端的小波系数更加重要,从而使得前者的编码效率有所提高,特别对于具有较多纹理和轮廓的图像。但由于 Contourlet 变换冗余的存在,这种优势随着码率的增大而减少;(2)在中码率(0.20~0.36bpp)下,算法 CSPIHT 的 PSNR 值较传统的 SPIHT 算法略低,此时在嵌入式码流中,Contourlet 变换中的冗余对编码效果产生了影响。然而从图 8 中我们可以看出,尽管在 0.35bpp 下 CSPIHT 的 PSNR 值略低于 SPIHT 的 PSNR,但从重构图像的视觉效果上看,对纹理区域和图像的边缘区域(图中方框和圆形的区域)的视觉效果算法 CSPIHT 要强于 SPIHT,这一点在一定程度上体现了本文算法对 Contourlet 变换特性(对图像的方向信息和内容的边缘信息有很强的捕捉能力)的充分利用。

需要指出的是,与小波变换对  $N \times N$  像素图像进行分解的运算复杂度( $O(N \log N)$ )相比,Contourlet 变换由于采用有



a.Lena图像的测试结果



b.Barara 图像的测试结果

图 7 本文提出的算法与其它两种编码算法的比较



a.SPIHT的重构图像, PSNR=21.442



b.CSPIHT的重构图像, PSNR=19.633

图 8 SPIHT 和 CSPIHT 在 0.35bpp 下对 Barara 的重构图像

限冲激响应(FIR)滤波器则运算复杂度为  $O(N^2)$ <sup>[11]</sup>。这样

用 Contourlet 变换取代小波变换的同时,虽然 CSPIHT 算法比传统 SPIHT 以更稀疏的方式表示了图像的边缘和纹理特征,但是以牺牲了少许的运算量做为代价。

**结论** 本文对图像 Contourlet 变换系数的分布特点进行了统计分析,根据其结构特性提出一种基于 Contourlet 变换的空间方向树结构,并通过统计结果验证了该空间方向树具有的“零树”特性。在此基础上,将该空间方向树结构与 SPIHT 算法相结合提出一种渐进式图像编码算法 CSPIHT,该算法在低码率下具有较 SPIHT 更加有效的编码效率;在中等码率下,尽管重构图像的 PNSR 略低于 SPIHT 算法,但重构图像中纹理和边缘区域的视觉效果要优于 SPIHT。

**参考文献**

- 1 焦李成,谭山,刘芳.脊波理论:从脊波变换到 Curvelet 变换.工程数学学报,2005,22(5):761~773
- 2 Do M N, Vetterli M. Contourlets: a new directional multiresolution image representation. Signals, Systems and Computers, 2002(1):497~501
- 3 焦李成,孙强.多尺度变换域图像的感知与识别:进展和展望.计

- 算机学报,2006,29(2):177~193
- 4 Eslami R, Radha H. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 5:3189~3192
- 5 Chappelier V, Guillemol C, Marinkovic S. Image Coding with Iterated Contourlet and Wavelet Transforms. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 5:3157~3160
- 6 Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3):243~250
- 7 Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code. IEEE Trans Commun, 1983, 31(4):532~540
- 8 Do M N, Vetterli M. Framing pyramids. IEEE Trans Signal Proc Sep, 2003
- 9 Bamberg R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: Theory and design. IEEE Trans Signal Proc, 1992, 40(4):882~893
- 10 Do M N. Directional multiresolution image representations: [Ph D dissertation], Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, December 2001. http://www.ifp.uic.edu/~minhdo/publications
- 11 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12):2091~2106
- 12 沈兰荪,卓力.小波编码与网络视频传输.北京:科学出版社,2005

(上接第 179 页)

类最小的类间熵比以前的最小的类间熵显著改变时,根据熵的物理意义知道,这实际上就是一种由无序到有序以及由有序到无序的突变,这时各类分得最开。这时类的总数就是所要聚的类数,所得的结果就是所要聚类的结果。

这里采用的实际上是一种分层聚类方法,根据类减少时类间熵的改变量的突变来确定要聚类的数目。

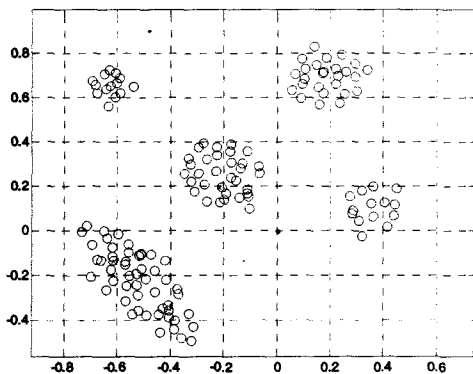


图 2 数据分散点图

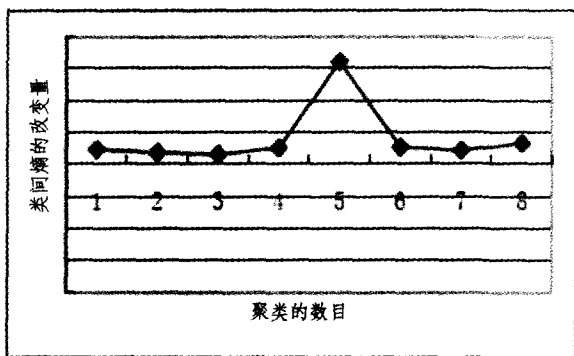


图 3 聚类数目与类间熵改变量间的关系

**5 实验结果**

以下实验中,计算熵时我们都取  $h = 0.5$ 。首先,我们用人工的方法使用高斯分布随机器产生二维高斯型数据,如图

2 所示。首先初始聚类把它分成 8 类,然后再由类间熵来决定聚类数目。图 3 表示聚类数目与类间熵的改变量间的关系。可以看出,当聚成 5 类时,类间熵改变量异常,其它情况下都比较稳定,因此最终聚类的数目应为 5 类。从图 2 可以看出,虽然每个子类包含的数据的数目和密度不同,用本文的方法却能正确地确定其聚类数并进行聚类。

另外,我们针对于极不规则的类的情形,比如螺旋型、环型分布的数据也进行了试验,利用前面的方法也能比较准确地进行聚类(而传统的 C-Means 算法却办不到),而且聚类的数目也不需要事先指定。

**结论** 本文给出了一种基于熵的聚类算法,这种算法能够根据数据样本自身的分布特性进行聚类,能自动确定聚类的数目,减少了用户的参与,聚类的结果更具有客观性,同时能发现任意形状和大小的聚类,是一种聚类效果较好的算法。算法也有不足的地方,特别是初始点的选择以及噪音和离群点对结果影响比较大,这是以后的工作还需要进一步探讨的问题。不过可以通过样本筛选,对原始数据样本中的噪音和离群点进行处理,剔除那些假数据,提高数据的可靠性和可分性来消除噪音和离群点对结果的影响。

**参考文献**

- 1 Raymond Hau N J. Efficient and effective clustering methods for spatial data mining. In: The 20th VLDB Conference, Santiago, Chile, 1994. 144~155
- 2 Zhang Tian, Ramakrishnan R, Livny M. BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conference on Management of Data, Montreal, Canada, 1996. 103~114
- 3 Ester M, Kriegej H, Sander J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial database with noise. In: Proceedings of the 2nd Conference on Knowledge Discovering in Databases and Data Mining, Portland, USA, 1996. 226~231
- 4 Guha U, Rastogi R, Shim K. CURE: an efficient clustering algorithm for large databases. Pergamon Information Systems, 2001, 26(1):35~58
- 5 史玉峰,史文中,靳奉祥.熵及其在空间数据不确定性研究中的应用.计算机工程, 2005, 31(24):36~37
- 6 Gokca E, PRINCIPE I C. Information theoretic clustering. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(2):158~171
- 7 李存华,孙志挥,陈耿,等.核密度估计及其在聚类算法构造中的应用.计算机研究与发展, 2004, 41(10):1712~1719