基于二代 bandelets 域 HMT 模型的图像分割

项海林¹ 贾 建² 焦李成¹

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)1 (西北大学数学系 西安 710069)2

摘 要 在小波域隐马尔可夫树模型(WHMT)图像分割算法的基础上,根据二代 bandelets 系数的分布统计特性,提 出一种新的 bandelets 域隐马树模型(BHMT)有监督图像分割算法。新算法试图利用二代 bandelets 能表示图像几何 规律性的特点来改进分割效果。为证明算法的有效性,用合成纹理图像和真实的航空和遥感图像做分割实验,并和小 波域隐马模型树分割算法作了对比,对合成纹理图像分割,用错分概率作为评价参数。实验结果表明,此方法错分概 率低、分割效果理想。

关键词 图像分割,带状波,隐马尔可夫树模型,多尺度

Image Segmentation Based on Second Generation Bandelets-domain Hidden Markov Tree Model

XIANG Hai-lin¹ JIA Jian² JIAO Li-cheng¹

(Institution of electronic engeering, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹ (Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710069, China)²

Abstract Based on wavelet-domain hidden markov tree model and the characters of second generation bandelet coefficients, a new supervised bandelets-domain hidden markov tree model algorithm for image segmentation was presented. The algorithm was intended to improve the performance of segmentation by the use of the characters of bandelets with geometric orthogonal filters. In experiments, Synthetic mosaic image, aerial image and SAR image were selected to evaluate the performance of the method, and the segmentation results were compared with wavelet domain HMTseg method. For synthetic mosaic texture image, miss-classed probability was given as the evaluation of segmentation results. Experiment results show that the method has lower missed classed probability and better performance.

Keywords Image segmentation, Bandelets, Hidden Markov tree model, Multiscale

1 引言

Crouse 等人提出的小波域隐马尔可夫树模型比较全面 地反映了小波系数间的关系[1],被广泛地应用于信号和图像 的估计、检测及分类, Choi 等人用这种模型进行图像分割也 取得了很好的效果^[2]。虽然小波的奇异性检测特性和树状结 构使得小波变换域成为图像建模的自然选择,利用 HMT 进 行图像分割的性能也不错[4],但是,由于小波对含点状奇异的 目标函数是最优的基,对具有线状奇异的函数,小波系数则不 再稀疏[7]。在高维情况下,小波分析不能充分利用数据本身 所特有的几何特征,不能够很好地挖掘图像中方向边缘信息, 容易产生方块效应[3]。为了解决这一问题,充分利用图像的 几何特性,人们在其它的变换域内构造了一系列的隐马模型: 如 Duncan D 和 Minh N. Do 在 contourlet 变换域内构造了具 有混合高斯密度分布的隐马尔可夫树模型,并在图像去噪和 纹理像检索上进行了应用^[5]。B. S. Raghavendra 和 P. Subbanna Bhat 则在 contourlet 域内建立了 HMM-HMT 模型对纹 理进行分割^[6]。Contourlet 域 HMT 模型在遥感图像分割中 也具有较好的性能^[8]。从以上文献的描述中可以看出,多尺 度变换域隐马尔可夫树模型能够有效地描述变换域系数在尺度间、尺度内和方向间的统计相关性,是一种新颖有效的统计 图像感知与识别方法^[11]。

Erwan Le Pennec 和 Stéphane Mallat 提出的 bandelets 基是一种能与图像几何特性相适应的基函数[9]。这种基函数 有各向异性支撑区间,能通过对图像的二进制分割,有效地优 化图像几何特性。二代 bandelets 变换是一个正交多尺度变 换^[10],它的基函数构建与 curvelet 框架和第一代 bandelets 不 同,是直接建在离散域内构建的正交基。因此,算法实现更加 简单和高效。Contourlet 也是用一个多尺度滤波器组和一个 方向滤波器组来实现拉长的基函数,目的是与图像中的几何 特性相适应。但二代 bandelets 在构造一个基函数来表示多 尺度几何特性时,基函数与其所表示的几何特性是最佳适应 的。因此,二代 bandelets 是紧支撑的正则函数,这与 Contourlet 不同。本文所构造的算法,是在二代 bandelets 变换域 中构造 HMT 模型,希望能利用 bandelets 充分获得图像中的 高维奇异性信息,再结合隐马尔可夫树模型能有效描述系数 尺度间、尺度内和方向间统计相关性的能力,改进图像分割性 能。实验结果表明,本文方法在边缘保持和方向信息检测上

到稿日期:2008-03-24 本文受国家自然科学基金(No. 60372050)资助。 项海林 博士生,研究方向为图像处理,E-mail: xhl_7048@163.com;贾 建 讲师,博士生,研究方向为图像处理、模式识别;**焦李成** 教授,博 士生导师,研究方向为智能信息处理。

均有一定改进,是可行和有效的。

2 二代 Bandelets 逼近与 BHMT 模型

2.1 二代 Bandelets 逼近

Bandelets 基函数能够体现图像的几何规律性。二代 Bandelets 基函数是完全离散和正交的,可以通过离散小波基 进行计算。构造这些基函数时,先要对图像进行四叉树分解 (见图 1),在分解后的每个小正方形块中,用几何流来表示出 图像的几何规律性,然后用弯曲小波来表示流向,再对弯曲小 波进行带状化处理,即得到 bandelets 基,这也是"带状波"名 字的来源。



图 1 Bandelets 变换的四叉树结构。从左至右分别为原图及小波 变换和一个子带的 bandelets 四叉树结构

用这些基函数进行正交多尺度变换,能够获得图像和表 面体的几何特征信息。Bandelets 分解就是对正交小波系数进 行正交几何变换。具体地讲,就是先用小波滤波器组进行计 算,然后再用方向正交滤波器计算。每一个几何方向都会产 生不同的变换,然后通过一个最优基算法来找到最优滤波器 组。最优基算法就是对图像失真率的拉格朗日乘子进行最小 化^[9,10]。

对于一个 C^{α} 几何规范函数 f,如果 bandelets 基函数是 对失真率的拉格朗日乘子 L(f,R,B)进行了最小化得到的, 那么,基于这些 bandelets 基函数且有 R 字节的变换码 f_R 所 对应的误差,满足公式: $\|f - f_R\|^2 \ll \operatorname{Clog}^{\alpha}(R)R^{-\alpha}$ 。而对于 小波图像变换码来讲,在相同的条件下,所对应的误差,仅满 足公式: $\|f - f_R\|^2 \ll CR^{-1}\log(R)^{[9]}$ 。因此,从逼近的观点 看, bandelets 基重构函数时要优于小波基。

2.2 BHMT 模型

小波域 HMT 模型能有效地捕捉图像中多尺度间的相关 性^[1],是一个易于操作且很有用的概率模型,它能有效地刻画 小波系数的联合统计特性。通过研究 bandelets 域系数分布 可以发现,在每个尺度的3个子带中,系数分布具有高尖峰、 长拖尾的非高斯分布特征,如图2所示。



图 2 brodatz 纹理 wood (512 * 512)第一次分解所得 3 个子带方 向上 bandelets 系数直方图

与小波系数相同, bandelets 系数在每个尺度上分为3个 不同的子带,其不同尺度间的父子系数,通过限制四叉树分解 的层数,从统计的角度来看仍然具有延续性的特点。因此,我 们参照小波域隐马树模型,构造二代 bandelets 域隐马树模型 (BHMT)^[13]。首先,用一个两状态,零均值的高斯混合模型来 近似拟合单一 bandelets 系数的分布,模型中的隐状态就是在 高斯混合模型中所选用的状态,记为 S=m (m=0,1),分别 对应着变换域中,系数取小或大的隐状态,那么,bandelets 系 数 B 的联合概率密度函数(pdf) f(b)就可以表示为:

$$f_B(b) = \sum_{m=0,1} p_S(m) f_{b|S}(b|S=m)$$
(1)

其中, $p_{s}(0) + p_{s}(1) = 1$, $f_{b+s}(b|S=m)$ 表示 B 处于状态 S=m 时的条件概率密度函数。状态 S=m 时,其分布为零均值, 方差为 δ_{m} 的高斯分布:



图 3 二状态高斯混合模型示意图

然后,对不同尺度的 bandelets 系数采用与 HMT 模型相同的四叉树结构图(如图 4 所示)。



图 4 小波系数四叉树结构

其中黑点代表系数 B,白点代表隐状态 S,状态之间的联接表 示其相关转移特性。每个父节点有 4 个子节点,且每个子节 点的分布都由其父节点的分布以及父子节点间的状态转移概 率确定。相对应的一维信号 HMT 模型包含的参数有:

1) $P_{s_1}(m)$: 根节点 s_1 的概率质量函数(pmf), $m = \{0,1\}$;

2) $\varepsilon_{i,\rho(i)}^{m} = Ps_i | s_{\rho(i)} (S_i = m | S_{\rho(i)} = r)$: 假定父系数状态 $S_{\rho(i)}$ 为r,子系数状态 S_i 为m的概率, $m,r \in \{0,1\}$; $i \in \{1,2, \dots, P\}$ 表示每棵四叉树上系数的个数;

 $3)_{\mu_{i,m}} \pi \sigma_{i,m}^2$ 分别表示状态变量为m时,变量 W_i 的均值 和方差。

将上面的参数组合在一起,用一个参数向量 @ 来表示,即

 $\Theta = \{ P_{S_i}(m), \varepsilon_{i,\rho(i)}^{m,r}, \mu_{i,m}, \sigma_{i,m}^2 | i=1, 2, \cdots, P; m, r=0, 1 \}$

对于上述参数,可采用 EM(Expectation-Maximization) 算法^[1]进行估计。

3 基于 BHMT 模型的图像分割

3.1 基于 BHMT 模型的粗分割

类似于离散小波域 HMT 的多尺度分割,二代 bandelets 变换的子带系数四叉树结构与图像多尺度分割的嵌套四叉树 结构同样形成——对应的关系。每个图像块 d_i 与子带 l 中 节点 bⁱ 为根节点的树 Tⁱ 对应。



图 5 图像多尺度分割的嵌套结构 根据不同的尺度把图像分成大小为二次幂的正方形块



图 6 图像分割块的四叉树结构 尺度 *j*-1上的正方形块 *d^{j-1}*,在尺度 *j*上分裂成四个子块 *dⁱ*

考虑到子带的去相关性,可以假设 bandelets 变换的 3 个 子带的系数之间相互独立,那么尺度 *j* 上的图像块 *d_i* 在模型 中的概率分布可以表示为:

 $f(d_i \mid M_c) = \prod f_l(T_i^l \mid \Theta^l)$ (3)

 M_c 是 c 类训练图像样本对应的 BHMT 模型参数集,其 中每一个参数集包括各个尺度上的状态转移矩阵、数学期望 $\mu_{i,m}$ 以及方差阵 $\delta_{i,m}$,即 $\Theta = \{P_S(m), \epsilon_{i,e(i)}^{m}, \sigma_{i,m}^2\}$ 。根据文 献[2],确定图像 x 在尺度 j 上的图像块 d_i 的类标就是使得 f (d_i | M_c)最大的 c,即最大似然的分类方法

$$\hat{c}^{ML} = \operatorname{argmax} f(d_i \mid M_c) \tag{4}$$

对像素级的图像粗分割,采用文献[2]中所用的高斯混合 模型,概率密度函数可以通过相应图像的像素灰度直方图来 建模。图像可以被近似为一个高斯混合模型,采用 EM 算法 可以得到模型参数。

3.2 基于上下文关系的尺度间融合

用粗尺度的分割,来指导细尺度的分割,可以减少细尺度 对同质区域的分类误差。融合过程是根据最大后验概率分类 准则来进行的,即一个图像块的分割类别应该满足下式:

$$\widehat{C}_{i}^{\text{MAP}} = \underset{c_{i} = (1, 2, \cdots, N)}{\operatorname{argmax}} f(d_{i}^{j} \mid c_{i}^{j}) \times p(c_{i}^{j} \mid v_{i}^{j})$$

$$\tag{5}$$

公式中的 vi 是上下文关系。本文采用一个简单可靠的 上下文关系来指导尺度间的融合^[2]。每个上下文关系矢量 vi由两项组成:父块的类别值(在粗分割中已经得知)加上与父 块相邻的 8 个块的类别值,进行投票选择所得的类别值。当 上下文关系的值确定后,在该值下取某种纹理的概率 $p(ci \mid vi)$ 也就可以被确定。确定 $p(ci \mid vi)$ 的具体算法仍然是 EM 算法^[2]。而条件似然概率 $f(di \mid ci)$ 在粗分割过程中已经得 到。因此,根据式(5)就可最终确定每个块所属的类别。

4 仿真结果与分析

基于 BHMTseg 算法,本文对 Brodzt 纹理库中的合成纹 理图像进行试验。图 7 是 3 个分割结果图,从左到右分别是 原图、WHMT 分割结果和 BHMT 分割结果。小波基选择 Db2 做 3 层分解。Bandelet 基也选择通过 Db2 获得,做 3 层 分解,图像归一化后,分解阈值分别选取 0.9,0.35,0.105。 原图大小为 128×128,训练模型的纹理图大小为 64×64,分 割结果如图 7 所示。



图 7 分割效果图 从上到下分别为原图,WHMT,BHMT

图 7 表明:BHMT 分割时,同质区域聚集性要好于 WH-MT,错分点更多地集中在两种纹理的边缘。下表以错分概 率作为客观评价标准,对分割结果进行比较。错分概率定义 为分割结果中错分像素点数总和与类内像素点总数的比值。



图 8 真实图像的分割结果

从表1可以看出,对于每一种合成纹理,本文方法的错分 概率较小,分割精度较高。通过实验结果分析可以发现,本文 算法与WHMT相似,都是通过训练样本来得到模型,对样本 的选择比较敏感。如果选择不当,对分割精度会有影响。 BHMT还可以通过选择不同的阈值,实现不同精度的分割, 具有一定的灵活性。但需要指出的是,阈值的选取对分割效 果的影响并不大。为进一步说明算法的性能,我们用本文算 法对文献[6]中所用的航空图像和 SAR 图像进行了分割。从 分割的视觉效果看,本文算法的分割更加清晰可靠,保留了更 多的边缘和方向信息。 结束语 本文提出了一种基于二代 bandelets 域的 BH-MT 多尺度图像分割算法,这种算法利用了二代 bandelets 系 数表示几何奇异性的优点,并用隐马模型对不同尺度间系数 关系进行建模。对多种合成纹理图像和真实图像的分割实 验,均得到了比较满意的分割结果。本文算法所需时间要大 于 WHMT 算法,这是因为 bandelets 分解过程所需时间较 长,而模型训练和应用模型进行分割所需的时间与 WHMT 算法相似。

参考文献

- [1] Crouse M S, Nowak R D, Baraniuk R G. Wavelet based statistical signal processing using hidden Markov models [J]. IEEE Transaction on Signal Process, 1998, 46(4): 886-902
- [2] Choi H , Baraniuk R G . Multiscale image segmentation using wavelet domain hidden Markov models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(9):1309-1321
- [3] Fan G L, Xia X G. A joint multicontext and multiscale approach to Bayesian image segmentation[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2001, 39(12): 2680-2688
- [4] Sun Qiang, Gou Shui ping, Jiao Li cheng. A new approach to unsupervised image segmentation based on wavelet domain hi-

(上接第200页)

表 2 区间数决策矩阵 V 案例

	uı	u2	u3	u 4	u 5	u6
Aı	[7,9]	[7,8]	[7,8]	[8,10]	[7,9]	[8,9]
A_2	[8,9]	[9,10]	[7,9]	[7,8]	[7,8]	[8,9]
A ₃	[7,8]	[7,9]	[7,9]	[9,10]	[6,7]	[7,9]
A ₄	[7,9]	[7,8]	[9,10]	[7,8]	[6,8]	[7,9]
A_5	[7,9]	[7,9]	[7,10]	[7,8]	[7,8]	[7,9]

表 3	决策者风险偏好表
20	

风险评价标度	风险偏好程度
$R_2 = \langle r_1^2, r_2^2 \rangle$	$\mathbf{W} = \{\lambda_1^2, \lambda_2^2\} = (0, 4, 0, 6)$
$R_3 = \{ r_1^3 , r_2^3 , r_3^3 \}$	$\mathbf{W} = \{\lambda_1^3, \lambda_2^3, \lambda_3^3\} = (0, 2, 0, 3, 0, 5)$
$\mathbf{R}_{p} = \{\mathbf{r}_{1}^{4}, \mathbf{r}_{2}^{4}, \mathbf{r}_{3}^{4}, \mathbf{r}_{4}^{4}\}$	$\mathbf{W} = \{\lambda_1^4, \lambda_2^4, \lambda_3^4, \lambda_4^4\} = \{0, 1, 0, 2, 0, 25, 0, 45\}$

表4	决策者!	风险偏	好度表
· • •		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	~J / X ~ ~ ~

A_1	A ₂	A ₃	A_4	A5
 0.8215	0.8555	0.8085	0,8185	0.82725

第1步 利用各候选人(即个人方案)的考核指标属性值,可构成其区间数决策矩阵 V,如表2所示。

第2步 根据该单位人力资源部人才选拔条件可知,使 表2中6个效益型属性的决策目标达到最优或满意的标杆方 案,显然可得 $A_0 = (u_1, u_2, \dots, u_6) = (1, 1, \dots, 1)_{0}$ 。

第3步 假设该单位人力资源部(即决策者)对自身的风 险偏好进行衡量后,可构造出其决策者风险偏好表,如表3所 示。

第4步 该单位人力资源部利用本文新算法 Decision_ making,对此多属性决策问题进行人才选拔处理,并可得其决 策者风险偏好度表,如表4所示。

第5步 从各候选人 A_i (i=1,2,...,5)中,选出其决策者 风险偏好度最高者出任新职;因 $\ell_2 > \ell_5 > \ell_1 > \ell_4 > \ell_3$,故候选 人 A_2 是最佳候选人,因而此人该出任新职。

此实例结果与其实际需求相吻合。

dden Markov tree models[C] // ICIAR2004. Portugal; Porto, 2004;41-48

- [5] Po D D-Y, Do M N. Directional Multiscale Modeling of Images using the Contourlet Transform [J] // Statistical Signal Processing,2003 IEEE Workshop on. 2003;262-265
- [6] Raghavendra B S, Bhat P*S. Contourlet Based Multiresolution Texture Segmentation Using Contextual Hidden Markov Models//CIT 2004, LNCS 3356. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. 2004; 336-343
- [7] 焦李成,谭山.图像多尺度几何分析:回顾和展望.电子学报, 2003,31(12A);43-50
- [8] 沙宇恒,丛琳,孙强,等.基于 Contourlet 域 HMT 模型的多尺度 图像分割.红外与毫米波学报,2005,24(6)
- [9] Pennec E L, Mallat S. Sparse Geometric Image Representations with Bandelets. IEEE Transactions on Images Processing, 2005, 14(4)
- [10] Gabriel Peyr'e, St'ephane Mallat, Discrete Bandelets with Geometric Orthogonal Filters // Proceedings of ICIP. Palaisau Codex, France, September 2005
- [11] 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)

结束语 随着社会、经济、生态的不断发展,人们面对的 社会、经济、生态问题日益复杂化,近年来日渐受不少研究者 关注的多属性决策问题即是其中之一。多属性决策问题的复 杂性、决策因素影响的不确定和传统评判方法的局限性,使不 确定决策因素的属性测度常常难以精确量化,而往往只能用 区间数进行大致估量。本文为了精确量化表征属性决策因素 测度值不确定性,根据同构化基本原理与相似性科学相关理 论及相关思想,针对区间型多属性决策问题提出了一种基于 同构化多属性决策的"概念简明、思路自然,计算简便、意义明 确、方法可行、结果可信"的新方法与新算法,为较好地反映和 适应了决策者风险偏好程度及其影响的决策支持需求,提供 了一种新尝试。

参考文献

- [1] 徐泽水.求解不确定型多属性决策问题的一种新方法[J].系统 工程学报,2002,17(2):177-181
- [2] Atanassov K. Operators over interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 64 (2):159-174
- Bustince H, Burillo P. Correlation of interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 74 (2): 237-244
- [4] 谭旭,高妍方,陈英武.区间型多属性决策求解新方法[J].系统 工程与电子技术,2007,29(7):1082-1085
- [5] 刘华文,姚炳学.区间数多指标决策的相对隶属度法[J].系统 工程与电子技术,2004,26(7);903-905
- [6] 徐泽水,达庆利.区间型多属性决策的一种新方法[J].东南大 学学报,2003,33 (4):498-501
- [7] 徐泽水.区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用 [J].控制与决策,2007,22(2):215-219
- [8] 徐泽水. 几类多属性决策方法的研究[D]. 东南大学博士论文. 2003:65