

基于 Curvelet-散射特征的图像纹理分类*

冯鑫¹ 王晓明¹ 党建武²

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730050)

【摘要】 在二代曲线波的基础上,提出一种旋转不变曲波特征,然后结合具有平移不变性和 Lipschitz 连续性的散射向量特征用于对纹理图像的分类研究。通过系统分析以及严格实验可以得出,旋转不变曲波纹理特征优于广泛使用的 Gabor 纹理特征,且 Curvelet-散射组合特征在纹理分类上具有很高准确率以及计算纹理特征的效率,和单一的散射特征相比,具有一定的优势。

关键词: 曲线波 散射向量 平移不变性 旋转不变性 Gabor 纹理特征

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0184-06

Image Texture Classification Based on Curvelet – Scattering Features

Feng Xin¹ Wang Xiaoming¹ Dang Jianwu²

(1. School of Electric Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730050, China)

Abstract

A Curvelet feature with rotation invariant was put forward on the basis of the theory of the second generation Curvelet, and used for classification of texture images combination with the scattering feature vectors which have translation invariance and Lipschitz succession. With systematic analysis and rigorous experiments, the proposed Curvelet features significantly outperforms the widely used Gabor texture features. The combination features of Curvelet – scattering had high accuracy and computation efficiency for texture classification, and had a certain advantages compared with the single scattering features.

Key words Curvelet, Scattering vectors, Translation invariance, Rotation invariance, Gabor texture feature

引言

纹理图像的分类是指将图像中的纹理模式,按照一定的决策规则归属到已知的某一纹理类别中。目前主要应用于生物医学处理(如 CT 成像的人体器官识别)以及遥感遥测(如卫星图像中的土壤或者海洋识别)^[1]。纹理分类最重要的部分是纹理特征提取,包括空域纹理特征提取技术与频域纹理特征提取技术两大类。

空域纹理特征提取方法主要是通过原始图像的像素统计以及局部像素结构来提取纹理特征。例

如:灰度共生矩阵(GLCM)^[2]、MRF 特征方法^[2]、分形维方法^[3]。空域纹理特征提取方法通常包括无通解的复杂搜索和优化处理,而且很容易受噪声影响,所以在大多数应用中性能很差。

频域纹理特征提取方法通常是使用适当的滤波器组将图像转换到频率域内,然后用统计的方法从转化后的频谱中提取纹理特征,主要的方法有 FT 方法^[4]、DCT 方法^[5]、小波方法^[6]和 Gabor 方法^[7]等。

Curvelet^[8]由一组特殊小波组成并适应于曲线形的边缘,它能于不同方向以及不同尺度捕捉图像的边缘信息,就像小波和 Gabor 的结合体,目前已经

收稿日期: 2011-12-23 修回日期: 2012-03-09

* 国家自然科学基金资助项目(61162016,60962004)

作者简介: 冯鑫,博士生,主要从事图像处理和模式识别研究,E-mail: 149495263@qq.com

通讯作者: 王晓明,教授,博士生导师,主要从事信息处理和人工智能研究,E-mail: majing111111@sina.com

被广泛用来进行图像的去噪和增强。Joutel 等^[9]使用 Ridgelet 来对手写稿进行识别,然而只是提取了曲率和方向的特征,分类精度不高。Arivazhagan 等^[10]以及 Shekhar 等^[11]使用 Curvelet 特征进行彩色图像的分类和检索,然而由于彩色图像为不同质性,所以还需进行分割处理。Semler 等^[12]应用 Curvelet 纹理特征来对 CT 图像中的器官进行分类,取得了较好效果。国内,李树涛等^[13]使用 Curvelet 变换与小波变换相结合的纹理分类算法,其提取图像经 Curvelet 变换和小波变换后各子带波段的统计学特征(平均值与标准差)以及 Curvelet 变换分解子波带的共生矩特征作为分类特征,最后使用支持向量机进行分类,取得了较好的精度。

纹理分类在农业上的应用也相当广泛,张弓等^[14]将纹理分类用于谷物的识别上,由于谷物纹理是谷物的主要特征,所以使用纹理特征对 3 种谷物(小麦、大麦、燕麦)平均正确识别率达到了 95%。Carlos 等^[15]用纹理对木材的裂缝进行检测,也取得了相当好的效果。

本文提出一种改进的 Curvelet 特征,该特征具有旋转不变性,再结合散射变换具有的局部平移不变性和线性变形性,得到旋转不变 Curvelet 特征和散射向量特征,然后将这 2 种纹理特征结合用于纹理分类研究,最后使用 CURE 纹理数据库对提出的 Curvelet 散射纹理特征有效性进行验证。

1 Curvelet 变换

Curvelet 变换为 Ridgelet 变换在多尺度分析中的扩展。它主要分为基于投影片的 Curvelet 变换(一代 Curvelet 变换)和基于包装的 Curvelet 变换(二代 Curvelet 变换)。基于包装的 Curvelet 变换具有更好的有效性,它相对于第一代 Curvelet 变换来说计算复杂性降低、分解冗余减少,并且在尺度和位移的基础上增加了一个方向参量,所以辨识能力更强^[16]。

设图像函数为 $f(x,y)$, 则其连续 Ridgelet 变换为^[17]

$$R_f(a,b,\theta) = \psi_{a,b,\theta}(x,y)f(x,y) dx dy \quad (1)$$

其中 $\psi_{a,b,\theta}(x,y) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{a}\right)$ (2)

式中 a ——尺度,取 $a > 0$

b ——平移,取 $b \in \mathbf{R}$

θ ——方向,取 $\theta \in [0, 2\pi)$

ψ ——脊波平滑函数

相对应的 Gabor 滤波器为不同方向与尺度上高斯分布形状的小波变换,Gabor 滤波器的表达式为

$$g_{a,\theta,b_1,b_2}(x,y) = a^{-\frac{1}{2}} g\left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta - b_1}{a}, \frac{-x \sin \theta + y \cos \theta - b_2}{a}\right) \quad (3)$$

其中母小波 $g(x,y)$ 定义为

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right) \exp(j2\pi Wx) \quad (4)$$

式中 σ_x, σ_y ——高斯包络在 x 轴、 y 轴上常量

W ——分解于不同方向的高斯形状小波函数

图 1 分别为 Ridgelet、小波、Gabor 3 种滤波器的波形图,将 Ridgelet 延伸到不同的方向和尺度就得到 Curvelet,类似于 Gabor 滤波器。它与 Gabor 滤波器的主要区别是 Curvelet 完全覆盖整个频率域的频谱,而 Gabor 滤波器只能覆盖部分频率域的频谱。这是由于 Curvelet 的频率响应为楔形,所以能无缝覆盖整个频率平面,如图 2a 所示。而 Gabor 滤波器的频率响应为椭圆形,以至于不能完全覆盖频率平面,如图 2b 所示。这就意味着 Curvelet 变换在捕捉图像的频率信息的时候不会有信息的损失。

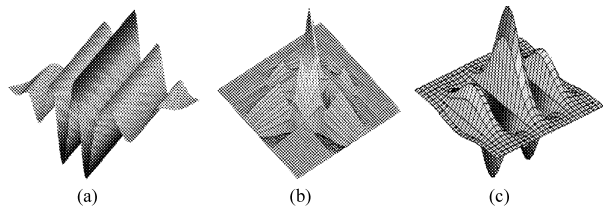


图 1 3 种滤波器波形图

Fig. 1 Three kinds of filter

(a) Ridgelet (b) 小波 (c) Gabor

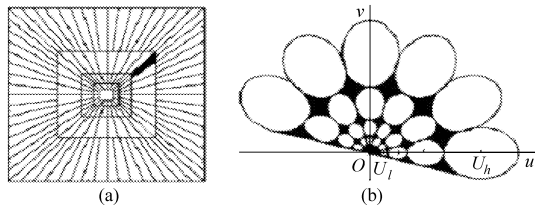


图 2 Curvelet 与 Gabor 频谱图

Fig. 2 Frequency spectrogram between Curvelet and Gabor

(a) Curvelet (b) Gabor

2 旋转不变 Curvelet 特征提取

2.1 Curvelet 特征提取

离散 Curvelet 变换在 2 维笛卡尔网格 $f[m,n]$ 中进行,反快速傅里叶变换后的离散 Curvelet 系数为

$$C^D(a,b,\theta) = T_{\text{IFFT}}(T_{\text{FFT}}(f[m,n]) \times T_{\text{FFT}}(\psi_{a,b,\theta}^D[m,n])) \quad (5)$$

其中, T_{FFT} 与 T_{IFFT} 分别对应快速傅里叶变换和反快速傅里叶变换。首先,将图像和 Curvelet 转换到傅里叶域,此时,曲波与图像的卷积变为了傅里叶域的

乘积。然后通过频谱乘积进行反傅里叶变换获得 Curvelet 系数。但是由于 Curvelet 变换的频率响应为楔形而非直角,所以需要将其包装到矩形中,然后再执行反傅里叶变换。包装也就是频率平面楔形频谱进行周期性贴瓷,且此时在频率平面的中心区域收集矩形系数。通过周期性的贴瓷,矩形区域收集到来自楔形部分的周期性楔形响应。

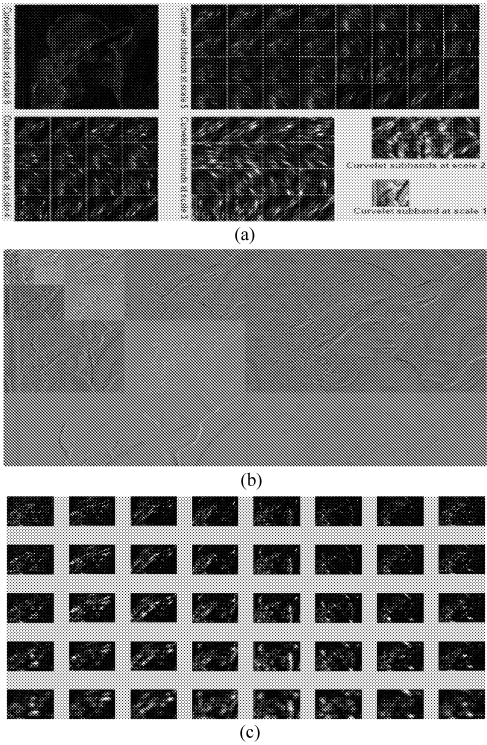


图 3 滤波器频谱图
Fig. 3 Frequency spectrogram of filters
(a) Curvelet (b) 小波 (c) Gabor

以 Lena 图像为例,从图 3 可以看出,Curvelet 捕捉的信息正是所需的正确纹理边缘信息,小波和 Gabor 滤波器捕捉了很多的冗余信息,这严重的降低了纹理分类的效率。并且可以看出,小波由于提取都是高频信息(纹理信息),所以精确度最差。

应用 Curvelet 变换时,在每个方向以及尺度上都获得 Curvelet 系数,且每个子带上系数的均值与标准方差计算式为

$$\mu_{s\theta} = \frac{E(s,\theta)}{mn} \tag{6}$$

$$\sigma_{s\theta} = \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y (|C_{s\theta}(x,y)| - \mu_{s\theta})^2}{mn}} \tag{7}$$

其中 $E(s,\theta) = \sum_x \sum_y |C_{s\theta}(x,y)|$ (8)

式中 s ——Curvelet 变换中的尺度
 m,n ——相关子带的尺寸
 $E(s,\theta)$ ——整个子带的频率谱能量
 $C_{s\theta}(x,y)$ ——各方向和尺度上 Curvelet 系数

因此,对于每个 Curvelet 子带,可以获取 2 个特征。如果 l 个 Curvelet 子带用来进行变换,则可以获得 $2l$ 个纹理特征。所以使用 $2l$ 维的纹理特征向量来对数据库中每张图片进行分类。为了减轻频谱能量的动态范围,还得使用数据库中相关特性的最大值进行正则化。

使用 4 层曲波分解进行曲波子带分割,可以计算出 50 个子带的曲波系数(图 2a)。然而,曲波于 θ 和 $\theta + \pi$ 角度处产生的系数相同,由于对称性原则可以只计算第二和第三尺度中的一半子带,所以可以只保留 26 个子带,则数据库中每张图像可以产生 52 维的特征向量。类似,对于 5 层的 Curvelet 来说,计算了 42 个子带的 Curvelet 分解系数,数据库每张图像能产生 84 维特征向量。

2.2 旋转规范化

这种获得曲波特征的方法不具有旋转不变性,当纹理图像旋转时,它们的特征向量显著不同,如图 4 所示。

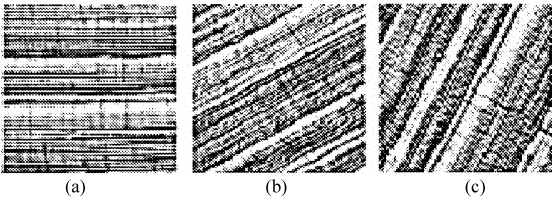


图 4 不同角度的同一纹理
Fig. 4 Different point of view of same texture
(a) 旋转 0° (b) 旋转 30° (c) 旋转 60°

表 1 为图 4 中的子带能量分布。3 张图像虽然都是同一纹理,但是其特征向量是不一样的。通过对这 3 张图像的特征向量的分析,可以发现特征值在纹理旋转时每个尺度都是循环变化的,并且每个尺度的频谱能量都集中于该纹理的主导方向。所以应用该循环变化的特性将最高频谱能量的放在第一位,第二高的频谱能量放到第二位,以此类推。以表 1 中尺度 3 为例,此时图像 4a、4b、4c 的能量值分别为: 1. 777 388、1. 061 707、1. 329 857、2. 642 727、5. 142 773、1. 876 816、1. 344 805、1. 367 682、1. 274 890、1. 539 031、1. 352 630、1. 369 954、1. 198 996、1. 209 949、1. 282 413、2. 281 955、2. 274 384、5. 339 085、3. 289 273、1. 615 015、1. 303 992、1. 900 946、2. 218 360、1. 592 070、1. 271 694、1. 168 736、1. 370 046、1. 351 483、1. 684 908、1. 420 957、1. 670 626、1. 704 048、1. 443 845、1. 467 926、1. 385 565、1. 797 558、1. 333 557、1. 492 066、1. 221 638、1. 234 507、1. 483 058、2. 340 187、1. 874 732、1. 149 372、1. 433 490、2. 780 489、5. 306 259、1. 931 466。

表 1 图 4 中的子带能量分布

Tab.1 Sub-band energy distribution of Fig. 4

各尺度方向	图 4a	图 4b	图 4c
1	6. 612 492	6. 734 992	6. 773 879
1	1. 312 077	4. 214 702	2. 268 232
2	3. 104 991	3. 328 110	1. 970 233
3	4. 112 442	1. 325 157	2. 077 396
4	1. 969 191	2. 838 665	2. 372 323
5	1. 710 743	2. 307 907	2. 715 669
6	2. 022 882	2. 093 893	1. 387 268
7	2. 135 686	2. 019 883	3. 537 925
8	2. 628 652	2. 142 651	4. 400 911
1	1. 777 388	2. 274 384	1. 443 845
2	1. 061 707	5. 339 085	1. 467 926
3	1. 329 857	3. 289 273	1. 385 565
4	2. 642 727	1. 615 015	1. 797 558
5	5. 142 773	1. 303 992	1. 333 557
6	1. 876 816	1. 900 946	1. 492 066
7	1. 344 805	2. 218 360	1. 221 638
8	1. 367 682	1. 592 070	1. 234 507
9	1. 274 890	1. 271 694	1. 483 058
10	1. 539 031	1. 168 736	2. 340 187
11	1. 352 630	1. 370 046	1. 874 732
12	1. 369 954	1. 351 483	1. 149 372
13	1. 198 996	1. 684 908	1. 433 490
14	1. 209 949	1. 420 957	2. 780 489
15	1. 282 413	1. 670 626	5. 306 259
16	2. 281 955	1. 704 048	1. 931 466
1	2. 726 421	2. 833 140	2. 834 186

通过将最大值、第二大值分别放于第一、二位置,以此循环,可以得到规范化后的这 3 张图像在尺度 3 时的能量为:5. 142 773、2. 864 270、2. 281 955、1. 876 816、1. 777 388、1. 061 707、1. 539 031、1. 369 954、1. 367 682、1. 352 630、1. 344 805、1. 329 857、1. 282 413、1. 274 890、1. 209 949、1. 198 996; 5. 339 085、3. 289 273、2. 274 384、2. 218 360、1. 900 946、1. 704 048、1. 684 908、1. 670 626、1. 615 015、1. 592 070、1. 420 957、1. 370 046、1. 351 483、1. 303 992、1. 271 694、1. 168 736; 5. 306 259、2. 780 489、2. 340 187、1. 931 466、1. 874 732、1. 797 558、1. 492 066、1. 483 058、1. 467 926、1. 443 845、1. 433 490、1. 385 565、1. 333 557、1. 234 507、1. 221 638、1. 149 372。

同理,Curvelet 标准方差特征也用此同样的方法改变位置。通过旋转规范化过程,可以采集到旋转不变 Curvelet 特征。

3 散射变换

散射算子由小波变换和模运算迭代而获得,因此对于变形来说具有平移不变性和 Lipschitz 连续性,并且能区分出具有相同功率谱的不同纹理。Mallat^[18]首先提出散射算子概念,将小波和卷积网络^[19]以及模运算结合在一起,提出一种具有平移不变性和 Lipschitz 稳定性的算子——散射算子。Mallat^[18]将散射算子用于 MNIST 手写数据库识别,选择 12 000 个训练样本和 50 000 个测试样本进行实验,其类内标准近似误差结果为 6×10^{-4} ,类间和类内近似误差比例为 4.3,取得了良好的效果^[20]。

根据 Mallat 提出的散射算子,进行 q 次迭代后在 x 点处产生向量系数为

$$S_{q,J}f(x)=(|f*\psi_{j_1,\gamma_1}|*\cdots*|\psi_{j_q,\gamma_q}|\ast\varphi_J(x))$$

(9)

其中 $\phi_J(x)=2^{-2J}\phi_J(2^{-J}x)$
式中 J ——小波分解尺度,取 $j_1<j_2<\cdots<j_q<J$
 γ ——小波分解方向,取 $(\gamma_1,\gamma_2,\cdots,\gamma_q)\in\Gamma^q$
 ψ_{j_q,γ_q} ——小波系数,为图像 f 在尺度 2^J 上的低通滤波器

该向量的散射系数尺度为 $k^q\left[\begin{smallmatrix} J \\ q \end{smallmatrix}\right]$,将 $q\leq m$ 的所有阶次散射系数累加起来得到散射系数

$$S_Jf(x)=(S_{q,J}f(x))_{0\leq q\leq m}$$

(10)

图 5 为原始纹理图像,系数如图 6 所示。

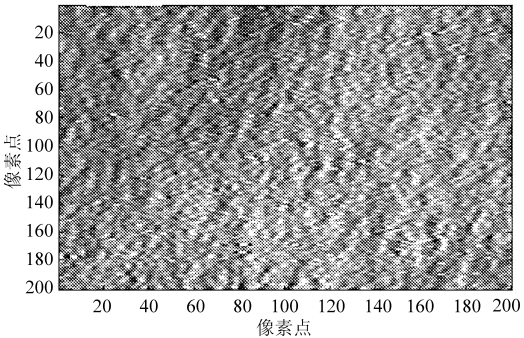


图 5 人工纹理图像

Fig. 5 Artificial texture image

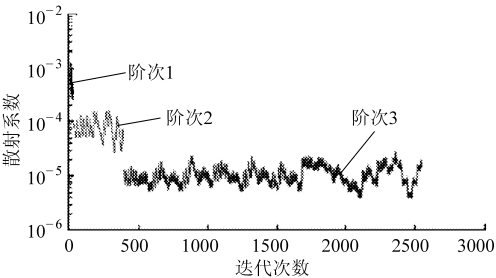


图 6 不同阶次的散射系数

Fig. 6 Different order times of scattering coefficient

然后,类似于在卷积网络结构体系将所有阶散射层分别进行卷积和模运算得到散射向量特征。第 1、2、3 层散射向量特征表达式分别为

$$f(n) \rightarrow f * \phi_j(2^j n) \tag{11}$$

$$|f * \psi_{j_1, \gamma_1}| \rightarrow |f * \psi_{j_1, \gamma_1}| * \phi_j(2^j n) \tag{12}$$

$$| |f * \psi_{j_1, \gamma_1}| * \psi_{j_2, \gamma_2}| \rightarrow | |f * \psi_{j_1, \gamma_1}| * \psi_{j_2, \gamma_2}| * \phi_j(2^j n) \tag{13}$$

最后, Mallat 还定义了 2 幅图像 f 和 g 之间的散射距离为

$$|S_j f - S_j g|^2 = \int | (S_j f(x) - S_j g(x)) |^2 dx \tag{14}$$

该距离具有稳定性和不变性,主要用来对具有相同功率谱的不同纹理进行分类。

4 分类结果与分析

实验在 CURET 纹理数据库的基础上进行纹理分类测试。数据库包括 200 像素 × 200 像素的 61 类纹理图像(图 7)。每个纹理类均包含各种不同观测与照度的相同材质图像,总共有 5 612 张,它的主要缺点是同样的纹理数不多,一般的分类方法很难研究出其类内变化,然而本文分类方法可以找出相同功率谱下的类内变化,所以很适合用于本文的分类验证。本文将数据库随机分成训练集和测试集 2 个集合,其划分包括 2 种情况^[21]:

- (1) T46:每类 92 张图片,将训练集和测试集均匀划分为 46 类,每类样本数均为 2 806。
- (2) T23:每类 92 张图片,不均匀划分训练集和测试集,其中训练集为 23 类,样本数为 1 403;测试集为 69 类,样本数为 4 209。

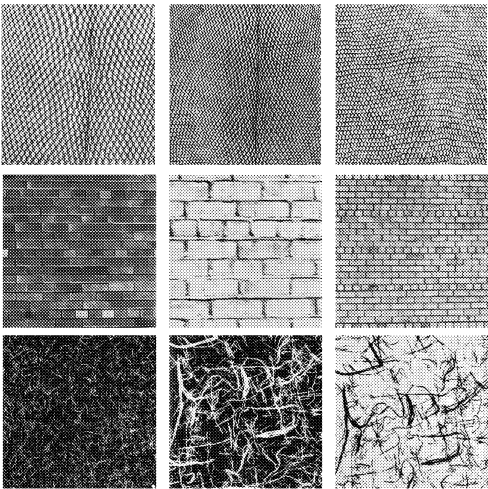


图 7 各类 CURET 纹理图像

Fig. 7 All kinds of CURET texture images

设置 2 种模式能更好地研究不同算子的性质。一般情况下在有综合训练样本时设置 T46,在只有部分训练样本集时设置 T23。该测试的实验平台

为:Windows XP 操作系统、Pentium(R) 双核 E5400 @ 2.70 GHz 的 CPU、2 GB 内存。

4.1 旋转不变性测试

目标与图像由于倾斜或后处理的原因导致可能会出现方向不一样的情况,而目前大多数使用的纹理特征都不是旋转不变的。本文提出的规范化后的 Curvelet 特征算子为旋转不变,为了验证其旋转不变性,将规范化后的 Curvelet 特征算子与规范化后旋转不变 Gabor 特征^[21]以及规范化后旋转不变双树小波(DTW)^[22]进行对比,实验结果如表 2 所示。

表 2 旋转不变特征测试对比

Tab. 2 Comparison test of rotation invariant features

训练模式	Curvelet	Gabor	%
			DTW
T23	2.89	7.8	14.4
T46	1.06	3.5	4.1

4.2 计算效率

Curvelet 特征提取时间与 Gabor 滤波器以及双树小波特征提取时间对比如表 3 所示。

表 3 特征提取时间

Tab. 3 Cost time of feature extraction

方法	所有图片	每张图片
	总耗时	平均耗时
Curvelet(4 尺度)	1 846.42	0.329 1
Curvelet(5 尺度)	1 921.86	0.342 6
Gabor 滤波器	2 112.30	0.376 5
DTW	1 808.46	0.322 8

可以很明显地看出,旋转不变的 Curvelet 特征提取比 Gabor 滤波器更加有效率,但是稍弱于 DTW 特征提取。

4.3 分类精度

在实验中,主要采用 Curvelet-散射特征 PCA 分类(CSF-PCA)、Curvelet-散射特征多项式核 SVM 分类(CSF-SVM)、散射向量 PCA 分类^[20](散射-PCA)、散射向量多项式核 SVM 分类^[20](散射-SVM)、LBP(局部二值模式)、MR8(8 维母响应滤波器法)6 种不同方法进行对比。在主要的参数设置中, Curvelet 取 5 层变换,产生 84 维特征向量,散射最大尺度为 3,散射最大阶次 M 为 2,其方向数设置为 6 个,仿射空间最大维数为 256。

如表 4 所示,使用 PCA 分类器时效果要好于使用 SVM,在使用 T23 和 T46 样本分别进行交叉验证时,可以发现用 T46 特征样本分类时精度明显要高。而使用本文 Curvelet-散射 PCA 进行纹理分类时误

差比单独使用散射向量 PCA 要低。

表 4 不同方法对 CURET 纹理分类的误差

Tab.4 Error of various classification methods in CURET texture image

分类方法	T23	T46
CSF-PCA	0.58	0.07
CSF-SVM	2.67	0.96
散射-PCA	0.90	0.09
散射-SVM	3.30	1.10
LBP	18.13	3.88
MR8	22.49	2.38

综上,使用 Curvelet 结合散射特征进行纹理分类明显比一般经典分类算法好,并且好于单独使用散射算子进行纹理分类。

5 结束语

提出了一种基于 Curvelet 的具有旋转不变性且多方向多尺度的纹理特征,然后结合具有平移不变性以及 Lipschitz 连续性的散射向量特征来进行纹理图像的分类。根据使用 CURET 纹理数据库进行验证可得,该方法保持了较低的错误率,且有较高计算效率,在综合性能上优于单独使用散射向量进行分类。

参 考 文 献

1 王书志,张建华,冯全. 基于纹理和颜色特征的甜瓜缺陷识别[J]. 农业机械学报,2011,42(3):175~179.
Wang Shuzhi, Zhang Jianhua, Feng Quan. Defect detection of muskmelon based on texture features and color features[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011, 42(3):175~179. (in Chinese)

2 Long F, Zhang H J, Feng D D. Fundamentals of content based image retrieval[J]. Multimedia Information Retrieval and Management, 2003, 152:45~51.

3 Chaudhuri B B, Sarkar N. Texture segmentation using fractal dimension[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(1):72~77.

4 Hervé N, Boujemaa N. Image annotation; which approach for realistic databases[C] // Proc. of the 6th ACM International Conference on Image and Video Retrieval, Amsterdam, Netherlands, IEEE Press, 2007.

5 Lu Z, Li S, Burkhardt H. A content-based image retrieval scheme in JPEG compressed domain[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2006, 2(4):831~839.

6 Do M N, Vetterli M. Wavelet-based texture retrieval using generalized Gaussian density and Kullback-Leibler distance[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(2):146~158.

7 Manjunath B S, Salembier P, Sikora T. Introduction to MPEG-7[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2007.

8 Do M N, Vetterli M. The finite ridgelet transform for image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(1):16~28.

9 Joutel G, Eglin V, Bres S, et al. Curvelet based feature extraction of handwritten shapes for ancient manuscripts classification [C] // Proc. of SPIE-IS & Telectronic imaging, North America, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2007.

10 Arivazhagan S, Ganesan L, Kumar T G S. Texture classification using Curvelet statistical and co-occurrence features[C] // Proc. of the 18th International Conference on Pattern Recognition, Washington, DC, IEEE Press, 2006.

11 Shekhar R, Chaudhuri S. Use of contourlets for image retrieval[C] // Lecture Notes in Computer Science,2005:3 776.

12 Semler L, Dettori L. Curvelet-based texture classification of tissues in computed tomography [C] // Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing, Las Vegas, Nevada, USA, IEEE Press, 2006.

13 李树涛,孙凤梅. 基于 Curvelet 和小波变换的纹理图像识别[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(4):25~29.
Li Shutao, Sun Fengmei. Texture recognition based on Curvelet and wavelet transformation[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2008,35(4):25~29. (in Chinese)

14 张弓, Jayas D S,蒋德云. 谷物纹理特征的识别[J]. 农业工程学报,2001, 17(1):55~60.
Zhang Gong, Jayas D S, Jiang Deyun. Grain classification with combined texture model[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1):55~60. (in Chinese)

15 Carlos Becker, Rocio Cabrera, Guillaume Lemaitre. Pattern recognition wood crack detection[C] // IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition and Applications, Calgary, 2010.

16 Joutel G, Eglin V, Bres S, et al. Curvelets based queries for CBIR application in handwriting collections [C] // Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition, Curitiba, Brazil, IEEE Press, 2007.

17 Starck J, Candès E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image de-noising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6):670~684.

(下转第 199 页)

7 王海泉,朱继强. 微量元素与植物生长调节剂配合对马铃薯生理指标及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2005(5): 19~20.
Wang Haiquan,Zhu Jiqiang. The effect of microelement and plant growing regulator on the physiological characteristics and yield of potato[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2005 (5):19~20. (in Chinese)

8 雷桅,王双明,孙敏. Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} 对植物生理特性影响的比较分析[J]. 广西植物,2007,27(5): 770~774.
Lei Wei, Wang Shuangming, Sun Min. Comparative analysis on effect of Fe^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} to physiological characteristics of plant[J]. Guihaia, 2007,27(5): 770~774. (in Chinese)

9 杜长玉,高明旭. 不同微肥在马铃薯上应用效果的研究[J]. 中国马铃薯,1999,13(3): 141~144.
Du Changyu,Gao Mingxu. Study on the effects of trace element applied on potatoes[J]. Chinese Potato, 1999,13(3): 141~144. (in Chinese)

10 韦建玉,金亚波,杨启港,等. 植物铁营养研究进展:铁运输与铁有关的分子生物学基础[J]. 安徽农业科学,2007, 35(33): 10 589~10 595.
Wei Jianyu,Jin Yabo,Yang Qigang, et al. Research advances in iron nutrition of plants: iron transports and the relevant molecular biology basis of iron[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007,35(33): 10 589~10 595. (in Chinese)

11 王静钢,李寿如,高晶,等. 不同营养液的使用对马铃薯原原种生产的影响[J]. 中国马铃薯, 2007,21(1):24~25.
Wang Jinggang,Li Shouru,Gao Jing, et al. The effects on produce of potato minituber through applying the different kinds of nutrient solution[J]. Chinese Potato, 2007,21(1):24~25. (in Chinese)

12 陈永波,赵清华. 微量元素缺乏及过量对脱毒马铃薯苗生长的影响[J]. 中国马铃薯,2005,19(1):10~12.
Chen Yongbo, Zhao Qinghua. Effect of deficiency or excessiveness of microelements on growth of virus-free potato plants [J]. Chinese Potato, 2005,19(1):10~12. (in Chinese)

13 王素梅. 雾培脱毒马铃薯适宜营养液配方和浓度的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2004.
Wang Sumei. Studies on optimum prescription and concentration of nutrient solution on virus-free minituber production by aeroponic cultivation[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2004. (in Chinese)



(上接第 154 页)

11 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109~112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109~112. (in Chinese)

12 钱少明,杨庆华,王志恒,等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107~112.
Qian Shaoming, Yang Qinghua, Wang Zhiheng, et al. Research on holding characteristics of cucumber and end-effector of cucumber picking [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 107~112. (in Chinese)

13 杨庆华,金寅德,钱少明,等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 154~158.
Yang Qinghua, Jin Yinde, Qian Shaoming, et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 154~158. (in Chinese)

14 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 175~184.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175~184. (in Chinese)



(上接第 189 页)

18 Mallat S. Recursive interferometric representation[C] //Proc. of EUSICO Conference, Denmark, IEEE Press, 2010.

19 Yann Lecun, Kavukvuoglu K, Farabet C. Convolutional networks and applications in vision [C] //Proc. of ISCAS 2010, Paris, France, IEEE Press, 2010.

20 王晓明,冯鑫,党建武. 一种局部监督式纹理分类算法[J]. 兰州理工大学学报,2012,12(3):128~134.
Wang Xiaoming, Feng Xin, Dang Jianwu. A local supervised texture classification algorithm [J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2012, 12(3):128~134. (in Chinese)

21 Zhang D, Lu G. Content-based image retrieval using Gabor texture features[C] //Proc. of First IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia (PCM00), Sydney, Australia, 2000.

22 Kokare M, Biswas P K, Chatterji B N. Rotation-invariant texture image retrieval using rotated complex wavelet filters[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2006, 36(6):1 273~1 282.