

基于方向性的多通道纹理图象分析及重构

刘 辉 赵荣椿

(西北工业大学计算机科学系, 西安 710072)

摘 要 纹理的各向异性特征(方向性)对于纹理分析有着重要意义,该特征的分析 and 描述,对纹理表征和图形化建模提供了重要的思路.在对纹理各向异性特征分析的基础上,提出了一种新的纹理图形化建模方法.基于各向同性和各向异性分离的思想,分别从频域和空域研究了纹理图象的方向性及非方向性特征,导出了确定纹理主控方向的有效计算方法,和残余图象的随机场模型逼近,并将分析所得的参数用于纹理的综合.实验结果和性能分析与比较证实了该方法的有效性和灵活性,表明能量多通道分析对于方向性纹理的表征和重构是一种行之有效的办法.

关键词 纹理分析 各向异性 Fourier 分析 ARMA 模型 参数估计

中图法分类号: TP391.4 **文章标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)10-1005-04

Texture Analysis and Synthesis Based on Orientation Decomposition

LIU Hui, ZHAO Rong-chun

(Department of Computer Science, North West University, Xi'an 710069)

Abstract The anisotropy features(orientation) of texture is very important for texture analysis. They provides an effectively approach to texture representation and graphical modeling. In this paper we try to introduced an new multi-channel model for texture analysis and synthesis based on analysis of these features. We give the spatial/frequency parameter description of anisotropy/isotropy features with the special distribution of Fourier transform coefficients. Based on this description a new algorithm for determine the dominant orientation of texture images is provided by mathematics method of binary scale. It is interesting that this algorithm is convenience to implement by combination of some ordinary image processing algorithm. The Image power characteristic by Fourier coefficients distribution along the dominant orientation is not completely. For the remain Image power, we use the stochastic field model to approximate them, because these power corresponding to the isotropy part of texture image. The experiment results for texture synthesis with this model and the performance comparison with other approach show that the efficiency and flexibility of this method. Our study shows the multi-channel decomposition based on orientation power will be an available method for orientation texture representation and reconstruction.

Keywords Texture analysis, Anisotropy, Fourier analysis, ARMA model, Parameter estimation

0 引 言

纹理是图象分析的重要特征之一,它对图象的分割与识别、物体表面感知都有着重要意义,同时它还包含着大量的视觉真实感细节信息.在通常的纹理分析问题中,纹理被划分为两种极端的情况:规则纹理和随机纹理.然而,大多数的自然纹理则是这两类情况的复杂组合,要用单一的数学模型来表征纹理场是非常困

难的.另一方面,从视觉感知的角度来看,视觉通路含有一组对朝向和空间频率具有选择性的通道^[1],因而,多通道和多层次的分析方法受到许多研究人员的关注,并被用于方向性纹理(如木纹、水波等)的分析中. Kass 和 Wirkin 研究了基于 Laplacian-Gaussian 滤波器的纹理朝向估计方法^[2], Rao 和 Schunck 对这一方法作了进一步的讨论和改进^[3].

Heeger 等提出了一种基于塔式分解的纹理分析和综合方法^[4],该方法对于图形的真实感生成来

基金项目:云南省自然科学基金(2001F0083M)

收稿日期:2001-09-24; 改回日期:2002-03-08

说,是引人入胜的,因为它仅仅利用真实纹理图象的子带直方图,就能够重构纹理,并且避免了纹理映射中,由于缩放和透视带来的变形和接缝等问题.文献[5]用塔式小波实现了这一算法,然而,正如 Heeger 在文中所指出的那样,这一方法对某些各向同性的不定形纹理(如:云、沙地等)有很好的效果,而对各向异性(方向性)纹理的分析与综合则感到十分困难,为此,提出了采用空/频域相结合的多通道分析方法,对纹理的方向性特征与非方向性特征分别进行处理,以期获得一种更具广泛适用性的纹理分析和综合模型.

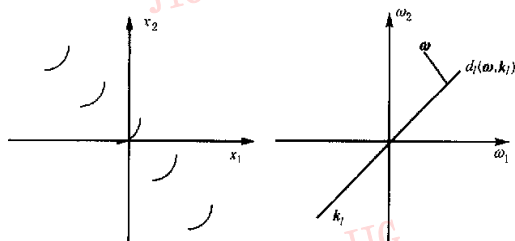
1 方向性纹理的频域特性和方向确定

对一个具有方向性的亮度场而言,它在 Fourier 频域的能量聚集在过原点的直线上,并且,该直线的方向与亮度的排列方向(对纹理图象而言即是纹理朝向)垂直.因此,纹理方向的确定可转化为直线方向的确定,得到的方向为纹理在某一点或某一部区域的主控方向.对于实际图象,由于方向性纹理的非规则性及噪声干扰,它的频域能量不是严格地集中在直线上,而是以离散点的形式临近地分布在直线的两侧,因而,需要通过这些离散点来拟合它们所聚集的直线,并计算直线方向,直线拟合的经典方法是最小二乘法(LMS),以下,根据最小二乘法在 Fourier 频域的一些特点,得出一种非常适用于图象处理的简化计算方法.

在有限点集情况下,用 LMS 拟合方向性纹理图象 f 的 Fourier 频域能量分布直线,通常通过最小化误差函数来实现,即

$$\min_{\|k_i\|=-1} e(k_i) = \min_{\|k_i\|=-1} \iint d_i^2(\omega, k_i) |F(\omega)|^2 d\omega_1 d\omega_2 \quad (1)$$

$F(\omega)$ 为纹理图象 f 的 Fourier 变换, $d_i(\omega, k_i)$ 是点 ω 与待定直线 k_i 的距离,如图 1 所示.



(a) 方向性纹理图象

(b) 频域能量聚集于待定直线 k_i

图 1

l 表示待定情况,如果将 Fourier 变换的能量理解为质量密度,那么, $e(k_i)$ 可理解为质点关于轴 k_i 的转动惯量.式(1)中的距离函数

$$d_i^2(\omega, k_i) = \|\omega - (\omega^T k_i) k_i\|^2 = (\omega - (\omega^T k_i) k_i)^T (\omega - (\omega^T k_i) k_i)$$

利用矩阵乘法规则,注意到 $\omega^T k_i = k_i^T \omega$ 为比例因子,并且 $\|k_i\| = k_i^T k_i = 1$,得到距离函数的二次型

$$d_i^2(\omega, k_i) = k_i^T (I \omega^T \omega - \omega \omega^T) k_i$$

其中, I 为单位矩阵,这样式(1)可表示为如下二次型

$$e(k_i) = k_i^T J k_i \quad (2)$$

这里

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}$$

$$J_{ii} = \iint \omega_i^2 |F(\omega_1, \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 \quad (3)$$

$$J_{ij} = \iint \omega_i \omega_j |F(\omega_1, \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 \quad (i \neq j) \quad (4)$$

由非线性最优化理论可知:式(2)的最小化问题,可转化为求解转动惯量矩阵 J 的最小特征值及所对应直线 k_i 的问题.事实上,当且仅当矩阵 J 关于 F 的特征值 $\lambda_{\max} > 0, \lambda_{\min} = 0$ 时, $F(\omega)$ 的能量聚集于过原点的直线 k 上.如果 θ 为 k 的方向角,则 k 的方向可表示为 $(\cos \theta, \sin \theta)^T$,由于 2θ 将 θ 和 $\theta + \pi$ 映射到相同角度,所以 k 的方向定义为 2θ .为了在空域用离散形式使式(2)最小化,首先根据 Parseval 定理将 J 表示为空域形式

$$J = \frac{1}{4\pi^2} \iint \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_1 dx_2 \quad (5)$$

Bigun 等给出了一种 J 的有效离散近似方法,以及特征值的空域计算方法^[6]

$$\lambda_0 = e(k_{\min}) = \frac{1}{8\pi^2} \left[\sum_j |\nabla f_j|^2 m_j - |z| \right] \quad (6)$$

$$\lambda_1 = e(k_{\max}) = \frac{1}{8\pi^2} \left[\sum_j |\nabla f_j|^2 m_j + |z| \right] \quad (7)$$

其中, $z = \sum_j (\nabla f_j)^2 m_j$, m_j 为尺度 j 下的二维 Gauss 型平滑函数. ∇f_j 是在尺度 j 下对 f 进行梯度运算.由式(6)、式(7)有

$$|z| = 4\pi^2 (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (8)$$

$$\arg z = 2\theta \quad (9)$$

注意到 z 实际上为图象 f 的梯度平方并进行 Gauss 平滑得到的结果图象,因而,最小化问题的求解变得非常简洁.即只需对图象进行梯度运算、平方及 Gauss 平滑.在理想情况下, $\lambda_1 \gg 0, \lambda_0 = 0$,所以,

结果 z 图象的模能够非常恰当地反映频谱分布的直线性这一测度,故称之为直线性测度

$$C_f^{(2)} = 4\pi^2(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (10)$$

$C_f^{(2)}$ 越大,表明所计算的纹理方向越可靠,在设计方向性滤波器提取频谱分量时,这一测度可作为调节滤波器带宽的重要参数,而滤波器的方向则由 z 的幅角 2θ 确定.然而, $C_f^{(2)}$ 与能量有关(z 和 $|\nabla f|^2$ 都有图象梯度平方的量纲),其随着邻域对比度的降低而下降,因此定义如下与能量无关的直线性测度(它实际上是 $C_f^{(2)}$ 的归一化)

$$C_f^{(2)c} = \left[\frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} \right]^c \quad (11)$$

其中,指数 c 为正常数.当 $C_f^{(2)c}$ 增加时(<1),频域能量接近一直线,当 $\lambda_1 \gg 0, \lambda_0 = 0$ 时, $C_f^{(2)c} = 1$ 为理想情况,即频域能量点完全分布在某一直线上.这与 $C_f^{(2)}$ 表示的含义是一致的,并且通过比值,消去了图象亮度的干扰,使得 $C_f^{(2)c}$ 成为与图象无关的直线性测度.该测度将为特征提取提供重要参数.

2 各向同性残余图象的随机表征与纹理综合

基于前面讨论,可用方向性可控带通滤波器提取出各向异性分量,用于恢复纹理的方向特征(各向异性),对包含其余能量的残余图象 $y(s)$ (各向同性),则用二维 ARMA 模型来表征

$$y(s) = \sum_{r \in N} \rho_r y(s+r) + \sqrt{v} \sigma(s) \quad (12)$$

$$E[\sigma(s)y(s)] = \begin{cases} \sqrt{v} & r = 0 \\ \sqrt{v} \rho_r & r \in N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, r 为偏移量, $\sigma(s)$ 为相关有色噪声, ρ_r, \sqrt{v} 为模型参数.实际求解中,用图象样本估计参数 ρ, φ 和 v .得到上述参数后,就可构造噪声序列 $\sigma(s)$,并由式(12)表征残余图象.至此就将方向性纹理分别在频域及空域进行了分解和表征,实现了纹理图象的多通道(空、频)分析.

3 纹理图象重构和实验结果分析

使用上述方法用方向性滤波器(方向由 2θ 给出,带宽则根据 $C_f^{(2)c}$ 选择,详细过程不再赘述)提取出对应于方向性能量的线性分布频率分量,并进行反变换,然后与用随机模型综合的残余图象叠加,即可得到重构的在视觉上与原始图象相近的方向性纹理图象.下面给出用各向异性分离方法(以下简称分离法),进行纹理分析与重构的实验结果,以及它与基于子带直方图匹配的方法^[5](以下简称匹配法)的性能比较.

图 2 给出了分离法对真实的木纹纹理的实验结果,结果表明,用方向性滤波器得到的沿某一直线周围分布的频率分量(比较窄的范围类)能够很好地再现纹理图象的主要结构,残余图象呈各向同性,主要反映纹理细节,用 ARMA 模型可表征其整体分布规律.

图 3 是分离法用于非方向性随机纹理的实验结果,由于原图的 Fourier 能量分布不具直线性,因而

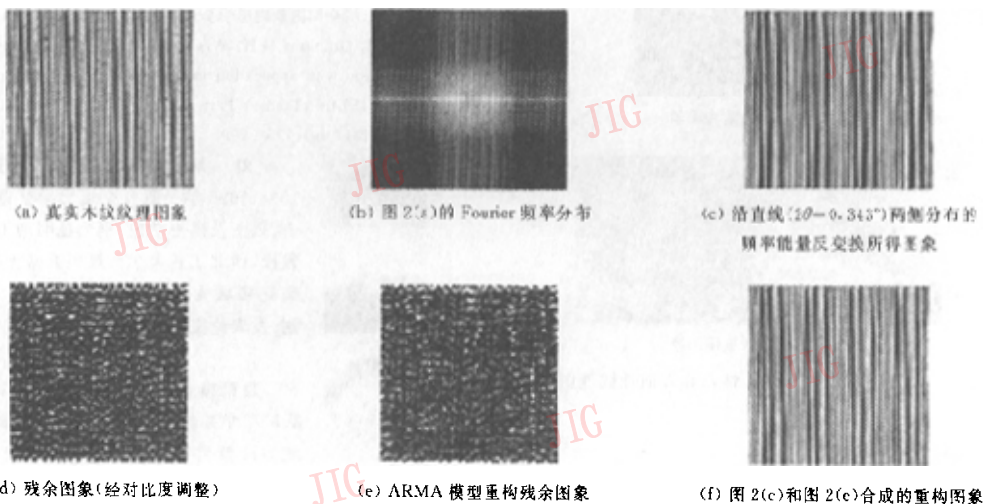


图 2 真实方向性木纹纹理图象的分析与重构

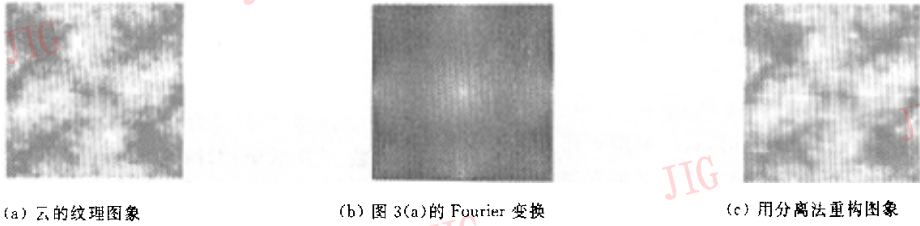


图3 非方向性不定形纹理(云)图象的分析与重构

保留过原点的水平和垂直线上的 Fourier 系数,用于恢复结构信息.

从以上的实验结果看到,分离法对于具有方向性的纹理图象的重构是非常有效的,而对于不定形随机纹理(如:云),从原图的 Fourier 变换(图 3(b))可以看到,频域能量不是明显地聚集在某一直线上, $C_x^{(2)} = 0.138 \ll 1$. 也就是说,纹理不具有明显的方向性,因此,可利用水平和垂直方向上的各频率分量(过原点的水平和垂直线上的 Fourier 变换系数),恢复整体的结构信息. 若 $C_x^{(2)}$ 小于某一门限,也可直接用随机模型来重构. 可见,分离法具有较大的灵活性.

图 4 是用匹配法(本质上是一种子带随机法)对图 2(a)和图 3(a)重构的结果. 从图 4 可以看到,匹配法能够较好地模拟不具明显方向性纹理的整体视觉效果,并且不受图象尺寸的限制. 对方向性纹理(图 2(a)),匹配法由于丢失了对原图至关重要的相位信息,因而,重构结果就面目全非了.

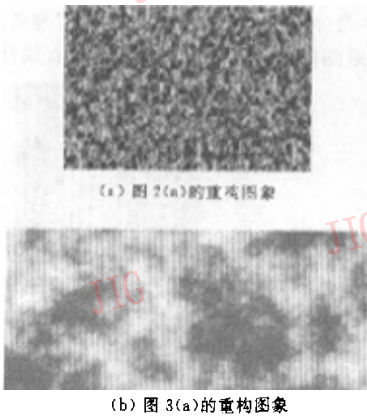


图4 用匹配法重构的方向性及非方向性纹理图象

4 结 语

分离法作为一种纹理分析与重构的多通道方

法,其基本思路是对纹理图象的各向异性和各向同性能量进行分离,在实现上则分别对其在频域和空域进行表征和逼近. 它能够有效地根据 Fourier 变换的分布规律,进行数据压缩,保留主要的能量和相位信息,并结合其他随机方法,重构纹理图象. 这是分离法的主要特点,也是对随机方法的有益补充. 对于方向性纹理的重构,它优于匹配法等随机方法,对于非方向性纹理,它的相位特性优于匹配法,而纹理细节稍逊. 然而,它可与匹配法等其他方法结合使用,得到满意的结果,因而具有较大的灵活性.

参 考 文 献

- 1 马尔 D. 视觉计算理论[M]. 北京:科学出版社,1988.
- 2 Kass M, Witkin A. Analyzing orientated pattern[J]. Computer Vision Graphics Image Process, 1987,37(Apr):362~385.
- 3 Rao A R, Schunck B G. Computing oriented texture fields[J]. Graphical Models And Image Processing, 1991, 53 (2): 157~185.
- 4 Heeger D J, Bergen J R. Pyramid-based texture analysis/synthesis[J]. Computer Graphics, 1995,1:229~238.
- 5 刘辉,谈正,俞义方. 基于子带分解的纹理分析与综合方法[A]. 见:第八届全国图象图形学会议[C]. 武汉,1996;432~434.
- 6 Bigun J, Granlund G H, Wiklund J. Mutidimensional orientation estimation with application to texture analysis and optical flow [J]. IEEE, Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 1991, PAMI-13(Aug):775~790.

刘 辉 1969 年生,分别于 1991、1994、1998 年于西安交通大学获得工学学士、硕士及博士学位. 现为昆明理工大学副教授、西北工业大学计算机系博士后. 主要研究领域为数字图象处理/分析、模式识别. 发表论文 20 余篇.



赵荣椿 1942 年生,西北工业大学计算机系教授,博士生导师. 主要研究领域为计算机视觉、图象处理. 发表论文 50 余篇,出版专著 3 部.

