

光学多通道纹理分割技术*

王文陆 严瑛白^V 金国藩 鄂敏贤

(清华大学,精密仪器系,北京,100084)

A

摘要 提出一种以人类视觉系统初级阶段多通道滤波理论为基础的光电混合纹理分割技术,每一通道用盖伯函数描述.在光学系统中采用不同取向的针孔对阵列作为盖伯滤波器,用 2×2 Damann 光栅作为分束器,建立了具有4个通道的纹理图像分割处理系统.光学系统结果由计算机进行聚类或神经网络决策,得到最后的分割标定图像.若增加针孔对的数目,并改变针孔大小,用更高分束比的 Damann 光栅作为分束器件,可以实现通道的纹理图像分割,达到应用水平.

关键词 多通道滤波,纹理分割,子波变换.

图像处理

TX 919.8

引言

(13) 纹理是重要的表面特征,在图像分析和计算机视觉应用中具有重要作用.比如,在金属表面以及喷涂表面的纹理对表面的光洁度、粗糙度测量提供重要判据,在遥感图像中根据纹理特征对地面物体进行分类识别,也可根据图像的纹理特征来测量高维信息,比如形状和运动,还可利用纹理分析突出纹理背景中的目标,等等.纹理分割在过去的几十年中,已提出了一系列纹理分割技术^[1],这些技术一般用计算机实现,包含纹理特征的提取和分割.纹理特征的提取和表达对分割结果的好坏影响很大.在纹理特征提取过程中,通常需要对原图像进行一系列的变换,(比如傅里叶变换),以及频谱域滤波等处理.这些操作由计算机来实现比较费时,而光学技术在图像变换等方面具有潜在的高速度和并行处理能力.光学透镜本身就具有傅里叶变换能力,空间滤波、卷积等操作可以很容易地由光学系统实现,光学技术将会在图像处理等领域中发挥越来越重要的作用,基于光学频谱取样或类子波变换等光学纹理分割技术已有报道^[2,3].

本文以生理视觉系统初级阶段的多通道滤波理论为基础,用 Damann 光栅分束,用不同取向的针孔对阵列来近似盖伯函数滤波器,提出并建立了光学多通道纹理图像分割系统,为实现纹理图像的快速自动分割提出依据,在计算机模拟基础上给出了初步实验结果.

1 纹理分割策略

由于自然纹理和人造纹理的复杂性和多样性,人们对于纹理还缺乏统一的定义和实用的数学模型.纹理通常被看成在图像中某个区域中像素或像素之间的某些性质是固定的、缓变的、或近似周期变化的,所以,纹理具有局部和全局的含义,是由图像区域中像素以及与其

• 国家自然科学基金资助项目
本文 1995 年 1 月 24 日收到

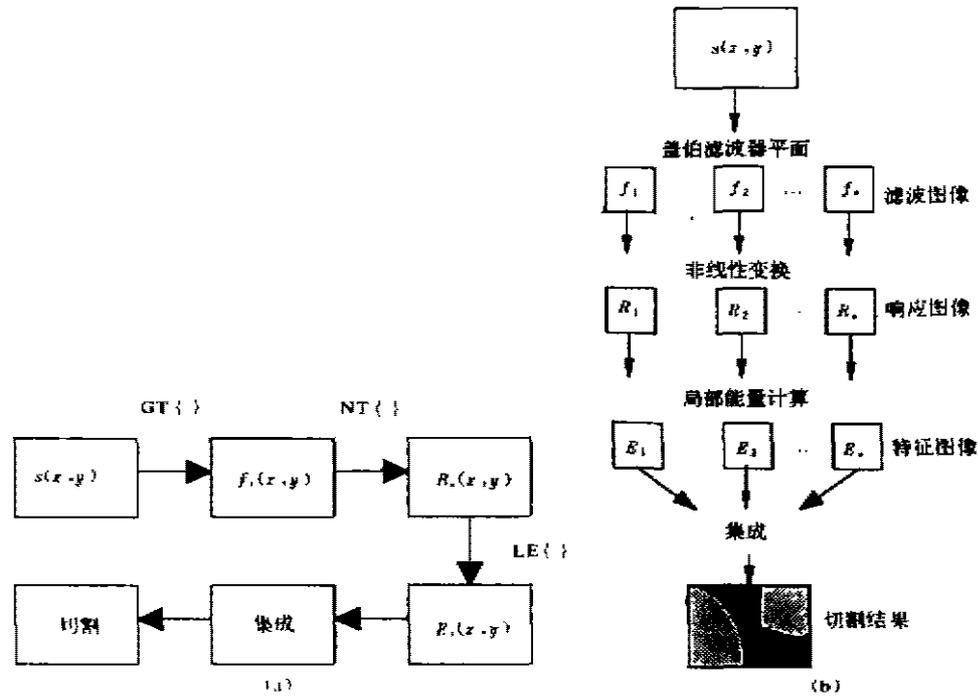


图1 (a)算子处理过程, (b)各算子纹理图像分割算法框图
 Fig. 1 (a) The procedure of operators, (b) texture image segmentation algorithm corresponding to the operators

邻域像素之间的关系来表达,一般可分为随机纹理和结构纹理两大类,相应地可采用统计方法和空间/空间-频率分析的方法来进行纹理特征的提取和分割.在众多分析方法中有一种多通道滤波方法,它是以心理物理学和神经生理学有关生理视觉系统的发现为基础^[4].研究表明,视觉系统的初级阶段把视网膜上的图像分解为一系列的滤波图像,每幅滤波图像包含一个较窄的频率范围和取向上的强度变化信息,更高一级的处理是对这些图像的综合分析.心理生理学和神经生理学的实验证明了多通道滤波理论的正确性. De Valois^[5]等记录了猴子视觉皮层单胞对不同频率和取向的正弦光栅的响应,观察到每个单胞只对一个较窄的频率范围和取向有响应.人类视感觉在眼睛里就已经进行了高度选择,因为眼只能接收和对某些特定的信息做出反应.这表明视觉皮层细胞具有高度的选择性,特定的单胞只接收和对某些特定的信息做出反应,并具有频率和取向调谐的功能,也就是说,视觉系统的初级阶段具有多通道滤波机制.

显然,多通道滤波方法对纹理分析是极具吸引力的,因为它可以揭示不同纹理之间的频率差异和取向差异.多通道滤波方法的多分辨率分析能力可以不同的分辨率对纹理图像进行分析,另一方面,多通道滤波的纹理分析方法可以很简单地统计滤波图像灰阶值,以此作为纹理特征.

多通道纹理分割算法的基本过程如图1(a)和1(b)所示.图1(a)显示了算子处理过程,1(b)是相应于各算子的纹理图像分割算法框图.原始图像经过一系列的滤波器后得到相应

的滤波图像为

$$f_i(x, y) = F^{-1}\{S(u, v) \cdot G_i(u, v)\}, \quad (1)$$

其中 $F^{-1}(\cdot)$ 为逆傅里叶变换, $S(u, v)$, $G(u, v)$ 分别为输入图像和滤波函数的傅里叶变换. 滤波函数的选择以及参数的确定将在下节讨论. 这些滤波图像经过非线性变换, 其行为类似于冒泡探测, 目的是把滤波图像中突出部分更加突出, 并得到一系列的响应图像.

$$R_i(x, y) = \Psi[f_i(x, y)], \quad (2)$$

其中 $\Psi(t) = \tanh(at) = \frac{1 - e^{-2at}}{1 + e^{-2at}}$ 为非线性函数, 类似神经网络中的阈值函数. 然后对这些响应图像进行局域“能量”计算, 得到相应于每通道的特征图像

$$E_i(x, y) = \frac{1}{M^2} \sum_{(a, b) \in W_{xy}} R_i(a, b), \quad (3)$$

其中 W_{xy} 为中心位于 (x, y) 、大小为 $M \times M$ 的窗口. 最后, 对这些特征图像进行平方误差聚类, 得到最后的分类结果.

2 数值模拟

纹理特征既要反映纹理区域中局域化信息, 又要反映该纹理区域的全局信息, 图像中任何像素的特性是由该像素本身及其与周围像素的关系来确定的. 因此要用一个可变的窗函数来测量纹理特征. 所用的窗口越大, 测得的特征越能精确反映该纹理的特性, 且噪声越低. 然而在区域的边缘部分, 所用窗口越大就意味着不同纹理之间有更多的平均效应(混叠效应), 结果就造成分割算法很难精确地确定不同纹理区域之间的边界. 由此可见, 纹理特征的提取和分割精度是相互矛盾的, 最近发展的子波变换技术可以很好地解决这对矛盾. 子波变换能使纹理特征在空间域/空间频率域中达到最优的联合表达, 子波变换技术与视觉系统的理论是一致的.

我们所用的子波函数是二维盖伯函数. 盖伯函数可描述为余弦调制的高斯窗函数, 在空间与频率域中分辨率的联合不确定性保持在不确定性理论的下限, 并与眼睛的响应类似^[6], 它经常被用作有关纹理分割的数字图像处理中的子波函数. 偶对称的盖伯函数为

$$g(x, y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi u_0 x). \quad (4)$$

式中 u_0 是正弦平面波沿 x 轴的频率(即零度取向), σ_x , σ_y 分别是沿 x 、 y 轴的高斯包络的空间常数. 任意取向的盖伯滤波函数可以通过对零度取向的函数在坐标系中的旋转来获得.

盖伯滤波器的频率选择性和取向选择性用其频谱域的表达更能充分地反映出来, 即

$$G(u, v) = A \left\{ \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u-u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} + \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u+u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} \right\}, \quad (5)$$

式中, $A = 2\pi\sigma_x\sigma_y$, $\sigma_u = 1/2\pi\sigma_x$, $\sigma_v = 1/2\pi\sigma_y$. 式(5)就是盖伯滤波器的调制传递函数(MTF), 因为它确定了对输入图像每一频率成分的调制度. 图 2(a)和(b)分别是二维盖伯函数及其傅里叶频谱(即 MTF), 图 2 清楚地表示了盖伯函数的带通特性.

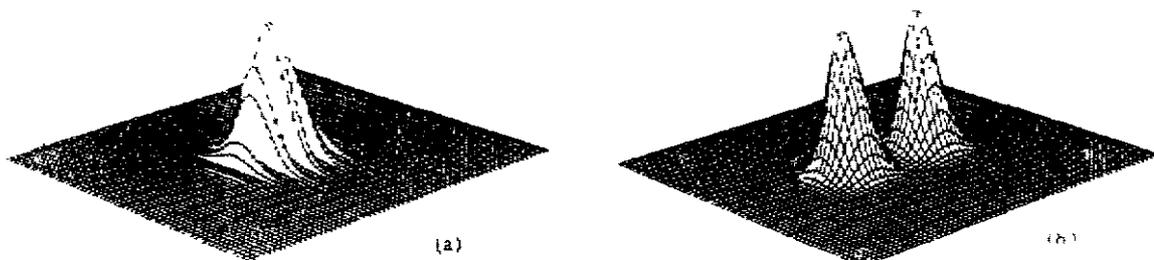


图2 (a) 二维盖伯函数, (b) (a)的傅里叶变换

Fig. 2 (a) Example of 2-D Gabor function, (b) Fourier transform of (a)

用盖伯函数作为滤波函数,我们进行了多通道纹理分割的计算机模拟.图3(a)为输入图像,在空间频率域(128×128)中具有2个尺度、4个取向共8个通道的盖伯滤波器群,如图3(b)所示.图4(a)为用图3(b)内环的4个取向的滤波器的滤波结果,图4(b)为用 3×3 的窗口进行特征能量计算的结果.

3 光学多通道纹理分割系统及结果

我们建立了如图5的光学纹理分割系统,用液晶电视作为实时输入器件,滤波器平面为针孔阵列,如图6所示.由图6可见,我们只考虑了滤波器的取向选择性,而把频率选择性固定在某一频率范围内.所做的针孔阵列的针孔直径为 0.41mm ,两针孔之间的距离为 1.25mm ,针孔对间距为 5.1mm .这些参数的选择是由光源波长 6328\AA 、傅氏透镜焦距(420mm)、Damman光栅等结构参数决定的,并与输入物体有关.滤波器的取向选择性是由水平方向的针孔对分别旋转 45° 、 90° 、 135° 获得.用 2×2 Damman光栅作为谱复制器件^[7],具有把一个谱复制成 2×2 个谱的能力.用 2×2 微透镜阵



图3 (a)输入纹理图像(64×64), (b)盖伯滤波器群
Fig. 3 (a) Input texture image (64×64),
(b) Gabor filters bank

滤波器的取向选择性是由水平方向的针孔对分别旋转 45° 、 90° 、 135° 获得.用 2×2 Damman光栅作为谱复制器件^[7],具有把一个谱复制成 2×2 个谱的能力.用 2×2 微透镜阵

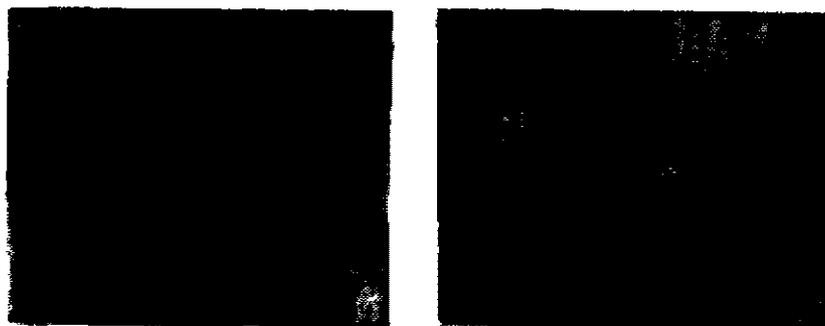


图4 (a)图3(a)的滤波图像, (b)相应于(a)的特征图像

Fig. 4 (a) Filtered images of Fig. 3(a), (b) feature images corresponding to (a)

列反傅氏变换,得到的多通道滤波图像由摄像机获取,送到微机作后继处理.

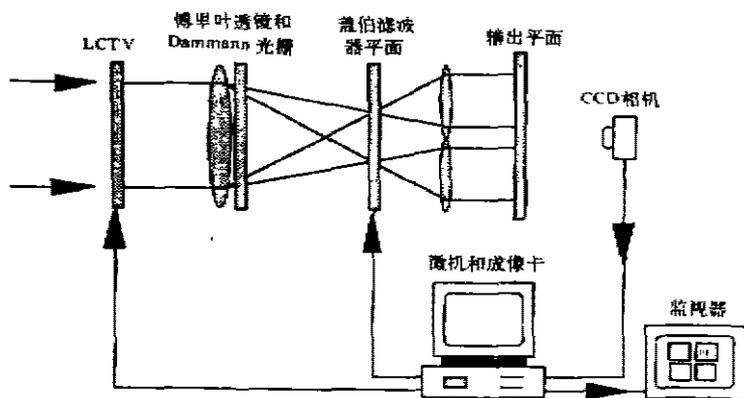


图 5 光学多通道纹理分割系统
Fig. 5 Optical multi-channel texture segmentation system



图 6 二元盖伯滤波器群
Fig. 6 Binary Gabor filters bank



图 7 (a)输入纹理图像,(b) (a)的单通道结果(滤波器方位为 0°),(c) (a)的 2×2 通道结果
Fig. 7 (a) The input texture image, (b) one channel result of (a) with 0° orientation filter, (c) 2×2 channels result of (a)

图 7(a)为输入被处理图像,(b)为单通道分割结果,只选用了 0°取向的盖伯滤波器,结果得到了图 7(a)中纵向纹理部分. 图 7(c)为 2×2 个通道的分割结果,由结果可知,4 个通道的分割系统把输入图像的 4 种纹理较好地分割开了,这一结果可与图 4 的数据模拟结果相媲美. 由摄像机接收并送到计算机进行最后的分割标定,图 8(a)为最后聚类的结果,(b)为采用“胜者全取”(Winner-Take-All, WTA)神经网络的联想分割结果,并用不同的灰阶表示不同的纹理区域.

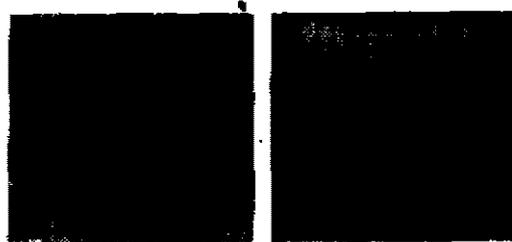


图 8 (a)图 7(c)的模糊聚类结果,
(b) WTA 神经网络的分割结果
Fig. 8 (a) Fuzzy clustering results to Fig. 7 (c), (b) segmented result with WTA neural network model

4 结论

初步的模拟结果和实验结果表明,纹理图像分割可以由光学多通道滤波技术实现,我们的光学系统的图像变换能力为图像处理提供了快速而有效的工具,若在本系统中增加通道数,再加上电子计算机的后继处理,我们相信利用快速光学图像变换功能与灵活的电子处理系统相结合,能在一定程度上模拟人类的眼脑系统处理过程,并能在机器视觉、模式识别等领域中获得应用。

参考文献

- 1 Haralick R M. *Proc. IEEE*, 1979, **67**(5):780~804
- 2 Veronin C P, Priddy K L, Rogers S K, et al. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(2):287~293
- 3 Freeman M O, Fedor A, Bock B, et al. *Proc. SPIE*, 1992, **1772**:241~250
- 4 Faugeras O D. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, Tokyo, Japan, 1978:549~552
- 5 De Valois R L, Albercht D G, Thorell L G. *Vision Res.*, 1980, **22**:545~559
- 6 Jain A K, Farrokhnia F. *Pattern Recognition*, 1991, **24**(12):1167~1186
- 7 Lu Xuenong, Wang Ying, Wu Minxian, et al. *Optics Communications*, 1979, **72**(314):157~162

OPTICAL MULTI-CHANNEL TEXTURE SEGMENTATION TECHNIQUE*

Wang Wenlu Yang Yingbai Jin Guofan Wu Minxian

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract An opto-electrical hybrid texture segmentation technique was proposed based on the multi-channel filtering mechanism in the early stage of human visual system. Each channel was characterized by Gabor wavelet. In the optical realization, a pinhole pair array was fabricated as the Gabor filters and a 2×2 Damann grating was adopted as the beam splitting element. The optical filtering results were transferred into a digital computer for further processing by clustering algorithm or neural network strategy. A final labeled image was obtained. The proposed system could be implemented for practical application of the number if pinhole arrays was increased and the Damann grating with a high beam splitting ratio was adopted.

Key words multi-channel filtering, texture segmentation, wavelet transform.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China