

一种方向 Gabor 滤波纹理分割算法

赵银娣 张良培 李平湘

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘 要 结合人眼视觉特性, 设计了一种方向 Gabor 滤波器, 该滤波器顾及了纹理图像的方向特性; 利用 Gabor 滤波器的带通技术, 抑制次要纹理图像的主频率分量, 增强目标纹理图像主频率分量, 使滤波输出图像具有较大的类间离散度和较小的类内离散度, 将纹理图像的分割转化为传统的图像分割, 使图像的分割质量和算法效率都得到了提高。

关键词 纹理分割 Gabor 滤波器 人眼视觉特性

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)04-0504-07

A Texture Segmentation Algorithm Based on Directional Gabor Filters

ZHAO Yin-di, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping & Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract This paper presents a texture segmentation algorithm based on directional Gabor filters when orientation characteristics of textures are taken into account. Incorporating into the human visual characteristics, a design approach of optimal directional Gabor filters is proposed. Each texture can be thought of as containing a narrow range of frequency and orientation components. By filtering an input texture image with Gabor filters tuned to the dominant frequency and orientation component of the textures, it is possible to locate each texture. The magnitude of the channel output should be large when the texture exhibits the frequency and orientation characteristics to which the channel's Gabor filter is tuned, vice versa. There are weak intraclass dispersion and strong interclass dispersion in the filtered image, and the issue of texture segmentation is translated into that of traditional image segmentation. Experimental results indicate that the proposed algorithm outperforms conventional approaches in terms of both objective measurements and visual evaluation.

Keywords texture segmentation, Gabor filters, human visual characteristics

1 引言

图像纹理可以定性地用强度、密度、方向等物理量进行描述, 图像纹理分割是图像分析中的一个重要的研究方向。一些传统的纹理分割算法, 如基于灰度共生矩阵的算法^[1]、基于傅氏变换的算法^[2]、基于多通道 Gabor 滤波器的算法^[3-6]等, 是将图像划分成多个窗口子图像, 然后对每个图像块单独运算提取特征值从而实现分类。这类算法首先需要选

择合适的窗口大小。尺寸太小的窗口子图像难以反映纹理的真实特征; 尺寸太大, 又不利于纹理之间边界的精确定位。即使尺寸合适, 也不能保证真实纹理边缘仅发生在窗口边缘之上。因此, 它们的不足在于: 由于窗口的存在, 在进行图像分割之前, 误差可能已经产生。

与上述传统方法不同, 匹配 Gabor 滤波器的纹理分割算法^[7-11]将图像视为一个互相联系的整体, 而 Gabor 滤波算法的关键是滤波器参数的确定。一种方案是在一组或多组预先给定的滤波器中选择最

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471088, 40523005); 国家“973”计划项目(2003CB415205)

收稿日期: 2004-06-07; **改回日期:** 2005-06-10

第一作者简介: 赵银娣(1980 ~), 女。现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生。主要从事图像处理 and 遥感影像理解等方面的研究。E-mail: zhaoyindi@lmars.whu.edu.cn

佳滤波器^[7],但其缺陷在于参数是预先给定的,并不一定是最优的选择;另一种是通过检测纹理图像的傅里叶功率谱确定参数^[8],但其不合理之处是纹理图像的准周期性并不一定表现在其功率谱的峰值处。最优的参数获取方案应该通过遍历算法实现,但如果搜索范围较大,则计算成本较高;而搜索范围较小,则算法效率将大大提高。因此滤波器设计研究^[9-11]主要集中在提高计算效率的同时保证纹理分割的质量,但这些研究基本上局限于圆对称 Gabor 滤波器的设计,没有考虑纹理的方向性,分割后的图像边缘较为粗糙。因此,设计顾及纹理方向的方向 Gabor 滤波器是十分必要的。

本文的目的是要设计一种顾及纹理图像方向特性的方向 Gabor 滤波器,通过利用 Gabor 滤波器的带通技术,抑制次要纹理图像的主频率分量,增强目标纹理图像主频率分量,使滤波输出图像具有较大的类间离散度和较小的类内离散度,将纹理图像的分割转化为传统的图像分割,提高图像的分割质量和算法效率。

2 基于方向 Gabor 滤波器的纹理分割算法

Gabor 滤波器克服了传统傅里叶方法的不足,能够很好地兼顾信号在空间域和频率域中的分辨能力,且具有易于调谐的方向和径向,与人类视觉系统特性相似^[5,11,12]。Gabor 函数 $h(x, y)$ 是一个被复正弦函数调制的高斯函数,其数学表达式如下:

$$h(x, y) = g(x', y') \exp[2\pi j(Ux + Vy)] \quad (1)$$

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

其中, $(x', y') = (x\cos(\theta) + y\sin(\theta), -x\sin(\theta) + y\cos(\theta))$ 是空间域坐标旋转的结果; σ_x, σ_y 分别为水平方向和垂直方向的尺度参数; (U, V) 是中心频率,其频率调制的方向角 $\varphi = \arctan(V/U)$ 。通常情况下,取 Gabor 函数中高斯函数部分的方向与复数调制部分函数的辐角相等,即令 $\theta = \varphi$ 。根据坐标轴旋转的傅里叶变换法则,2 维 Gabor 函数的频率域表达式如下:

$$H(u, v) = \exp\{-2\pi^2[(\sigma_x(u-U)')^2 + (\sigma_y(v-V)')^2]\} \quad (3)$$

其中, $(u-U)' = (u-U)\cos(\theta) + (v-V)\sin(\theta)$, $(v-V)' = -(u-U)\sin(\theta) + (v-V)\cos(\theta)$ 。

本文目的是要设计一个方向 Gabor 滤波器,使得滤波输出图像能够适用于传统的图像分割技术(如阈值分割算法),即将纹理分割的问题转化为传统的图像分割。方向 Gabor 滤波纹理分割算法流程如图 1 所示。

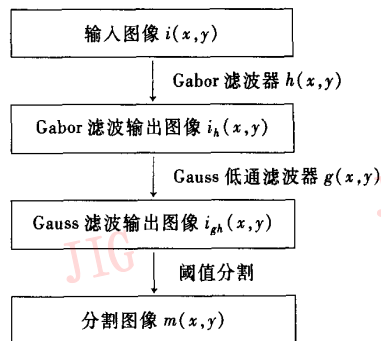


图1 方向 Gabor 滤波纹理分割算法流程

Fig.1 The flow chart of texture segmentation algorithm based on directional Gabor filters

就能量谱而言,任何一个纹理图像的有效带宽内集中了绝大部分能量,不同纹理图像的主频率和主方向是不同的。对于一幅双纹理图像 $i(x, y)$,设计一个最优方向 Gabor 滤波器 $h(x, y)$,它能够抑制背景纹理图像的主频率(目标纹理图像的次要频率)分量,同时增强目标纹理图像的主频率分量,从而使得 Gabor 滤波输出图像 $i_h(x, y)$ 具有较大的类间离散度和较小的类内离散度。然而,由于纹理特征的起伏变化(伪纹理、玫瑰斑等噪声的引入等)会影响 Gabor 滤波输出图像 $i_h(x, y)$ 的效果,所以有必要对 Gabor 滤波输出图像进行 Gauss 低通滤波处理。Gauss 低通滤波器 $g(x, y)$ 略大于 Gabor 滤波器 $h(x, y)$ 的窗口^[8,9],其频率域的数学表达式为

$$G(u, v) = \exp\{-2\pi^2[(\sigma_{px}u)^2 + (\sigma_{py}v)^2]\} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{px} = 1.5\sigma_x, \sigma_{py} = 1.5\sigma_y$ 。

与 Gabor 滤波输出图像 $i_h(x, y)$ 相比, Gauss 低通滤波输出图像 $i_{gh}(x, y)$ 的信噪比更高,提取的纹理特征更趋于稳定,可分性更强。因此,对滤波输出图像 $i_{gh}(x, y)$ 进行直方图分析,用一个全局阈值对图像 $i_{gh}(x, y)$ 进行二值化,从而得到分割图像 $m(x, y)$ ^[13,14]。

3 方向 Gabor 滤波器的设计

由式(1)~(3)可知, Gabor 滤波器 $h(x, y)$ 是由

参数 $(U, V, \sigma_x, \sigma_y)$ 决定的。设计一个最优 Gabor 滤波器 $h(x, y)$, 即寻找一组最优参数 $(U, V, \sigma_x, \sigma_y)$; 对输入图像 $i(x, y)$ 进行 Gabor 和 Gauss 滤波处理, 使得滤波输出图像 $i_{gh}(x, y)$ 能够最好地适用于传统的阈值分割算法。

人类视觉系统初级阶段的视觉信息处理研究^[12]认为: 视觉系统中存在一组假设的分布于不同频率和方向的并行准独立的通道, 视觉皮层细胞感受野的频率带宽约在 0.5 ~ 2.5 个倍频程, 即

$$0.5 \leq B = \log_2 \frac{\pi \sigma_x \sqrt{U^2 + V^2} + \sqrt{(\ln 2)/2}}{\pi \sigma_x \sqrt{U^2 + V^2} - \sqrt{(\ln 2)/2}} \leq 2.5 \quad (5)$$

而且与感受野特性相似的 Gabor 函数的高斯包络一般呈椭圆形^[5], 其纵横比在 1.5 ~ 2.0 之间, 本文采用 $\sigma_y = 1.8\sigma_x$ 。利用式(3)可缩小滤波器参数的搜索范围, 实现最佳方向滤波器的快速定位。假设输入图像 $i(x, y)$ 是由两类纹理图像 $t_1(x, y)$ 和 $t_2(x, y)$ 组成, $S_1(u, v)$ 、 $S_2(u, v)$ 分别表示 $t_1(x, y)$ 和 $t_2(x, y)$ 的谱密度。分别对这两幅纹理图像进行滤波处理, 其滤波输出的总能量 $P_1(U, V)$ 、 $P_2(U, V)$ 可表示为

$$P_1(U, V) = \iint S_1(u, v) |H(u, v)|^2 du dv \quad (6)$$

$$P_2(U, V) = \iint S_2(u, v) |H(u, v)|^2 du dv \quad (7)$$

方向 Gabor 滤波器设计步骤如下:

(1) 计算两类纹理 $t_1(x, y)$ 和 $t_2(x, y)$ 的谱密度 $S_1(u, v)$ 、 $S_2(u, v)$ 。

(2) 确定 σ_x 的取值范围^[15], 即 $\sigma_x \in [1, \text{图像宽度} \times 0.2]$ 。令 σ_x 的初始值等于 1。

(3) 对于每一个确定的 σ_x , 利用式(5)缩小中心频率 (U, V) 的搜索范围。

(4) 利用式(4)和式(5)在步骤 3 得到的范围内分别计算每一个 $P_1(u, v)$ 、 $P_2(u, v)$ 。采用能量比较法, 中心频率 (U, V) 为 $P_1(u, v)/P_2(u, v)$ 最大值所对应的点, 即

$$(U, V) = \arg \{ \max_{(u, v)} (P_1(u, v)/P_2(u, v)) \} \quad (8)$$

(5) 令 $\sigma_x = \sigma_x + 1$, 重复步骤 3 ~ 4, 直到 σ_x 达到最大值, 转入下一个步骤。

(6) 由步骤 3 ~ 5 得到若干组 $(U, V, \sigma_x, \sigma_y)$ 数据, 根据图像分割效果进行定量分析, 选择最佳的方向 Gabor 滤波器。

通过以上步骤粗略地定位了参数 $(U, V, \sigma_x, \sigma_y)$, 为了保证算法的精确度, 还需要进一步深度细

化搜索。细化搜索与粗略定位步骤大体上是一致的, 只不过缩小了 σ_x 的取值范围和步长。以上算法所设计的滤波器, 其滤波输出突出强调纹理 t_1 。类似地, 若要强调纹理 t_2 , 而不是强调纹理 t_1 , 则将步骤 4 中求 $P_1(u, v)/P_2(u, v)$ 的最大值改为求 $P_2(u, v)/P_1(u, v)$ 的最大值。

通常最佳滤波器参数的选择是通过结果图像的感知视觉质量决定的, 其主观性较强。本文通过分析滤波输出图像的灰度统计分布特性实现最优参数的定量选择。经 Gabor 滤波以及高斯低通滤波输出图像 $i_{gh}(x, y)$ 中仅包含两类主要的灰度值区域^[9, 10] (目标和背景), 它的直方图可近似表示为灰度值概率密度函数 $p(z)$ 。这个密度函数^[13]实际上是目标和背景的两个单峰密度函数之和 (如图 2 所示), 数学表达式如下:

$$\begin{aligned} p(z) &= P_1 p_1(z) + P_2 p_2(z) \\ &= \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp \left[-\frac{(z - u_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] + \\ &\quad \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp \left[-\frac{(z - u_2)^2}{2\sigma_2^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, u_1 和 u_2 分别是背景和背景区域的平均灰度值, σ_1 和 σ_2 分别是关于均值的均方差, P_1 和 P_2 分别是背景和背景区域灰度值的先验概率, 根据概率定义有 $P_1 + P_2 = 1$ 。利用非线性曲线拟合的方法可求解函数 $p(z)$ 的各个参数。

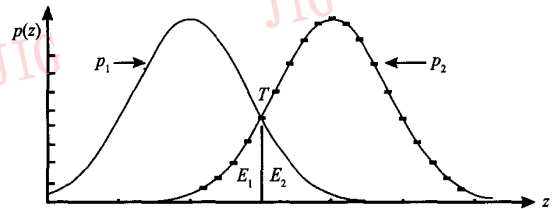


图 2 一幅图像中前景和背景区域的灰度概率密度函数

Fig. 2 Probability density functions of foreground and background in the filtered image

定义一个阈值 T (如图 2 所示) 使得灰度值小于 T 的像素分割为背景而使得灰度值大于 T 的像素分割为目标。总出错率 $E(T)$ 数学表达式为

$$E(T) = P_2 E_1(T) + P_1 E_2(T) \quad (10)$$

其中, $E_1(T) = \int_{-\infty}^T p_2(z) dz$, $E_2(T) = \int_T^{\infty} p_1(z) dz$ 。

要找到出错率最小的阈值需要将 $E(T)$ 对 T 求微分并令微分式等于零, 即

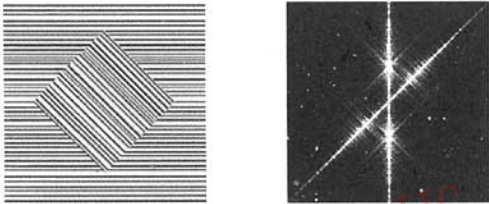
$$P_1p_1(T) = P_2p_2(T) \tag{11}$$

通过求解方程式(11)可获得最佳阈值 T 。最后利用式(10)求解总出错率 $E(T)$ 。

根据方向 Gabor 滤波器设计步骤 1~6 可获得多组 Gabor 滤波器参数,使用这些参数分别对输入图像进行滤波处理,分析滤波输出图像的灰度统计分布特性,利用式(10)计算相应的出错率 $E(T)$ 。出错率最小所对应的一组参数就是最优参数。

4 实验结果与分析

图 3(a)所示的双纹理图像(256×256)是由横向条带组成的背景图案和斜向条带组成的目标图案组成的(实验图像 1),图 3(b)为其对应的傅里叶频谱图。



(a)实验图像 1 (b)傅里叶频谱图

图 3 第 1 组实验图像

Fig.3 The first experimental image

表 1 是根据本文算法搜索到的方向 Gabor 滤波器参数的部分结果;表 2 是根据文献[10]搜索到的圆对称 Gabor 滤波器参数的部分结果。 (U_d,V_d) 是对式(3)中的 (U,V) 进行规一化的结果,其取值范围在 $[-0.5,+0.5]$ 区域范围内。为了对滤波器参数 (U_d,V_d,σ_x) 给出定量的分析和评价,利用式(5)、式(10)分别计算相应的倍频率 B 和出错率 $E(T)$ 。文献[10]提出的算法没有对滤波器参数加以任何的限制,在整个区域内实行了遍历搜索,其算法成本较高。表 2 中所有超出 $[0.5,2.5]$ 范围的倍频率 B 所对应的滤波器参数均不符合人眼视觉特性,其对应的出错率 $E(T)$ 较大,因此都是应该舍弃的。本文利用式(5)对滤波器参数进行了约束,缩小了搜索范围,在保证准确性的同时提高了算法效率。比较表 1 和表 2 中的出错率 $E(T)$,分别确定最佳的方向 Gabor 滤波器参数和最佳的圆对称 Gabor 滤波器参数。由表 1 可知, $\sigma_x=3$ 时对应的出错率 $E(T)$ 最小,由于此时的 $E(T)$ 极小所以没有必要再进行深

表 1 方向 Gabor 滤波器参数的选择

Tab.1 The parameters of directional Gabor filters

σ_x	U_d	V_d	B	$E(T)$
1	0.468 750	0.375 000	0.931 816	0.001 2
2	0.140 625	0.203 125	1.151 806	2.440 0e-050
3	0.140 625	0.140 625	0.937 961	1.747 8e-092
4	-0.093 750	-0.109 375	0.973 697	5.172 1e-046
5	-0.078 125	-0.078 125	1.019 129	6.009 4e-020
6	0.078 125	0.062 500	0.931 816	0.011 8
7	-0.062 500	-0.046 875	1.0303 730	0.038 6
8	-0.046 875	-0.046 875	1.065 469	0.037 7
9	-0.046 875	-0.046 875	0.937 961	0.031 6
10	-0.046 875	-0.031 250	0.997 704	0.050 9
11	-0.046 875	-0.015 625	1.037 300	T 无实根
12	-0.046 875	-0.015 625	0.944 230	0.078 6

表 2 圆对称 Gabor 滤波器参数的选择

Tab.2 The parameters of circular Gabor filters

σ_x	U_d	V_d	B	$E(T)$
1	0.484 375	0.484 375	0.809 949	0.009 2
2	0.281 250	0.250 000	0.733 861	3.158 4e-005
3	0.203 125	0.187 500	0.663 436	9.990 6e-004
4	0.187 500	0.171 875	0.537 569	0.004 9
5	0.187 500	0.171 875	0.428 265	0.009 1
6	0.187 500	0.171 875	0.356 086	0.011 5
7	-0.187 500	-0.171 875	0.304 805	0.013 2
8	-0.187 500	-0.171 875	0.266 472	0.016 2
9	-0.187 500	-0.171 875	0.236 722	0.023 6
10	-0.187 500	-0.171 875	0.212 959	0.027 5
11	-0.187 500	-0.171 875	0.193 539	0.028 5
12	-0.187 500	-0.171 875	0.177 368	0.031 4

度细化搜索,即最佳的方向 Gabor 滤波器参数为 $(U_d, V_d, \sigma_x, \sigma_y) = (0.140\ 625, 0.140\ 625, 3, 5.4)$ 。由表 2 可知, $\sigma_x = 2$ 时对应的出错率 $E(T)$ 最小,即 $(U_d, V_d, \sigma_x, \sigma_y) = (0.281\ 250, 0.250\ 000, 2, 2)$ 是最佳圆对称 Gabor 滤波器参数。分别选用表 1 中的最佳方向 Gabor 滤波器参数和表 2 中的最佳圆对称 Gabor 滤波器参数,根据本文给出的纹理分割算法流程(如图 1 所示)对图 3(a)进行纹理分割实验,实验结果如图 4、5 所示。图 4(d)为基于方向 Gabor

滤波器的分割图像,其分割阈值为 60,分割误差^[16]为 0.34%。图 5(d)为基于圆对称 Gabor 滤波器的分割图像,对应的分割阈值为 13,分割误差为 3.77%。图 6(a)和 6(b)分别是图 4(d)、图 5(d)的局部放大图,由局部放大图可知,基于方向 Gabor 滤波器的纹理分割算法保证了纹理边缘的光滑性,其分割效果优于基于圆对称 Gabor 滤波器的算法;而且本文提出的方向滤波器设计所需花费的时间仅是文献[10]的 0.19 倍,大大提高了计算效率。

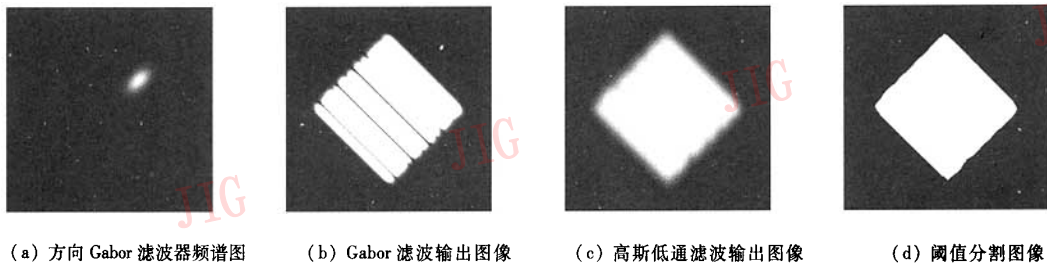


图 4 图 3(a)的方向 Gabor 滤波分割实验

Fig. 4 The segmentation experiment based on directional Gabor filters of Fig. 3(a)

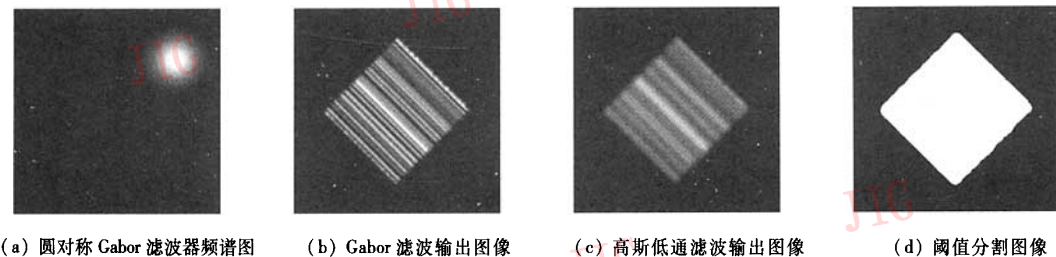


图 5 图 3(a)的圆对称 Gabor 滤波分割实验

Fig. 5 The segmentation experiment based on circular symmetric Gabor filters of Fig. 3(a)

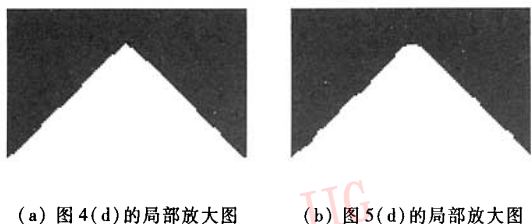


图 6 分割图像的局部放大图

Fig. 6 Local amplification image of segmentation images

为了进一步地说明本文算法的普遍适用性,利用本文算法进行了另外两组实验,如图 7、8 所示。

图 7(a)是由 Brodatz D15 和 Brodatz D22 两种纹理构成的双纹理图像,其中, Brodatz D22 为目标纹理;根据本文提出的方向 Gabor 滤波器设计算法,寻找最佳方向 Gabor 滤波器,其频谱图如图 7(c)所示,对应的滤波器参数为 $(U_d, V_d, \sigma_x) = (-0.140\ 625, -0.046\ 875, 3.15)$;最终的分割图像如图 7(f)所示,其分割阈值为 66,分割误差为 0.36%。图 8(a)是由 Brodatz D103 和 Brodatz D106 两种纹理组成的,其中 Brodatz D103 为目标纹理;最佳方向 Gabor 滤波器参数为 $(U_d, V_d, \sigma_x) = (0, 0.109\ 375, 5.0)$,其频谱图如图 8(c)所示;图 8(f)为分割图像,其分割阈值为 42,分割误差为 0.79%。

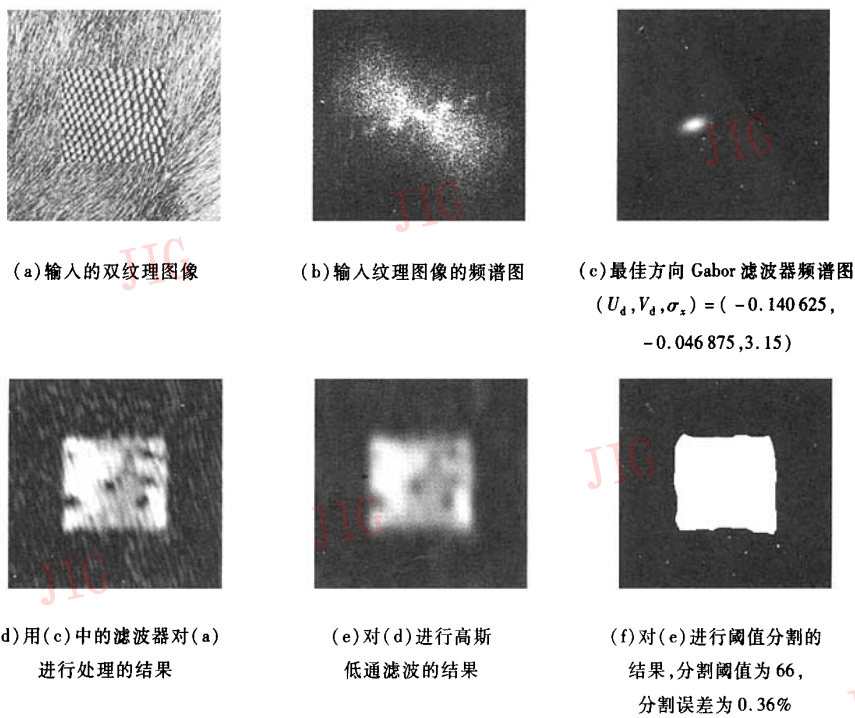


图 7 第 2 组实验图像结果

Fig. 7 The results of the second experimental image

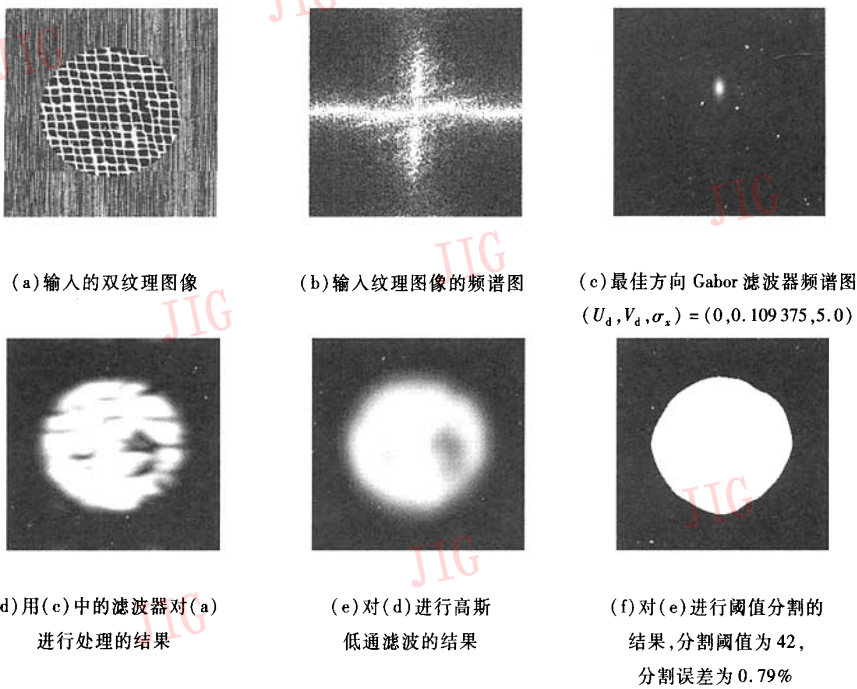


图 8 第 3 组实验图像结果

Fig. 8 The results of the third experimental image

上述 3 组实验结果表明,本文提出的基于方向 Gabor 滤波器的纹理分割算法具有普遍适用性,尤其适用于方向一致性较强的纹理图像分割,而且算法效率较高。

5 结 论

本文提出了一种顾及纹理图像方向特性的 Gabor 滤波器设计方案, 结合人眼视觉特性实现了滤波器参数的快速定位, 利用滤波输出图像的统计分布特征进行了最佳参数的定量选择。通过对双纹理图像分割进行的实验, 证明利用本文提出的方向 Gabor 滤波纹理分割算法分割后的纹理边缘清晰光滑, 分割误差较小, 算法效率较高。为今后进一步开展多纹理图像分割研究打下了基础。

参考文献 (References)

- 1 Clausi D A. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey local level quantization [J]. Canadian Journal of remote sensing, 2002, 28(1): 45 ~ 62.
- 2 Wang Dong-feng, Zou Mou-yan. Auto-registration of Fourier transform magnitude spectra and its application on texture identification and segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(2): 140 ~ 146. [王东峰, 邹谋炎. 傅氏变换的自配准性质及其在纹理识别和图象分割中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(2): 140 ~ 146.]
- 3 Jain A, Healey G. A multiscale representation including opponent color features for texture recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(1): 124 ~ 128.
- 4 Shi M H, Healey G. Hyperspectral texture recognition using a multiscale opponent representation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1090 ~ 1098.
- 5 Sheng Wen, Xia Bin. Texture segmentation method based on Gabor ring filtering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(5): 485 ~ 488. [盛文, 夏斌. 基于 Gabor 环滤波的纹理分割方法 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 485 ~ 488.]
- 6 Lu Li-zhen, Liu Ren-yi, Liu Nan. Remote sensing image retrieval using color and texture fused features [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(3): 328 ~ 333. [陆丽珍, 刘仁义, 刘南. 一种融合颜色和纹理特征的遥感图像检索方法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(3): 328 ~ 333.]
- 7 Jain A K, Bhattacharjee S. Text segmentation using Gabor filters for automatic document processing [J]. Machine Vision and Application, 1992, 5(3): 169 ~ 184.
- 8 Bovik A C, Clark M, Geisler W S. Multichannel texture analysis using localized spatial filters [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(1): 55 ~ 73.
- 9 Weldon T P, Higgins W E. Multiscale Rician approach to Gabor filter design for texture segmentation [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (2) [C], Austin, TX, USA, 1994: 620 ~ 624.
- 10 Dunn D, Higgins W E. Optimal Gabor filters for texture segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(7): 947 ~ 964.
- 11 Wu Gao-hong, Zhang Yu-jin, Ling Xing-gang. Optimal Gabor filter design for bi-textured image segmentation [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2001, 29(1): 48 ~ 50. [吴高洪, 章毓晋, 林行刚. 分割双纹理图像的最佳 Gabor 滤波器设计方法 [J]. 电子学报, 2001, 29(1): 48 ~ 50.]
- 12 Pollen D A, Ronner S E. Visual cortical neurons as localized spatial frequency filters [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1983, 13(5): 907 ~ 916.
- 13 Zhang Yu-jin. Image processing and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 197 ~ 200. [章毓晋. 图像处理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 197 ~ 200.]
- 14 Zhang Yin. License plate binarization algorithm based on analysis of the spatial distribution and maximum variance between clusters [J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 35(3): 272 ~ 280. [张引. 基于空间分布的最大类间方差牌照图象二值化算法 [J]. 浙江大学学报, 2001, 35(3): 272 ~ 280.]
- 15 Panda R, Chatterji B N. Unsupervised texture segmentation using tuned filters in Gaborian space [J]. Pattern Recognition Letters, 1997, 18(5): 620 ~ 624.
- 16 Guo Yu-chun, Kuang Jin-yu. A relaxation algorithm for texture segmentation [J]. Journal of Beijing Normal University, 1994, 30(1): 60 ~ 66. [郭宇春, 匡锦瑜. 一种纹理图像分割的松弛算法 [J]. 北京师范大学学报, 1994, 30(1): 60 ~ 66.]