

# 基于多尺度通用傅里叶描述子的灰度图像检索

章志勇 潘志庚 张明敏 吴海虹

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** 灰度图像相似性匹配是图像检索系统的一个重要组成部分。为了把多尺度分析和通用傅里叶描述子相结合来得到多尺度通用傅里叶描述子,并将其用于灰度图像检索系统。实验结果表明,多尺度通用傅里叶描述子具有多尺度分析效果,不仅能较好地克服图像灰度噪声带来的干扰,并且具有旋转、比例不变性,在灰度图像检索中能取得较好的结果。

**关键词** 多尺度分析 傅里叶描述子 图像检索 多尺度通用傅里叶描述子

中图分类号: TP391.3 TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)05-0611-05

## Multiscale Generic Fourier Descriptor for Gray Image Retrieval

ZHANG Zhi-yong, PAN Zhi-geng, ZHANG Ming-ming, WU Hai-hong

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** A large number of gray image are created and available on the Web, since more and more gray images and digitizing tools are developed for different applications. The techniques for content-based gray image retrieval is necessary. In gray image retrieval system, we propose multiscale generic Fourier descriptor(MGFD), which integrates generic fourier descriptor with multiscale anlysis. The experimental results show that MGFD is not only capable of multiscale anlysis, but robust against noise and other changes of image and it is also invariant to rotation and scale. It have a precise result in gray image retrieval.

**Keywords** multiscale anlysis, Fourier descriptors, image retrieval

## 1 引言

灰度图像的相似性匹配是模式识别与图像检索的重要研究内容,目前有多种灰度图像相似性比较算法,其中较常用的有矩分析、傅里叶描述子分析等。

矩分析主要包括有几何矩、Zernike 矩、Legendre 矩等。几何矩虽是灰度图像的一个重要特征,但是几何矩非但不具有旋转不变性,并且不是正交矩。1962 年, Hu 首先提出了几何矩不变量的概念<sup>[1]</sup>,并且得到了 7 个几何矩不变量,这 7 个几何矩不变量具有旋转不变性。Li 推导出一种构造任意阶几何矩不变量的方法<sup>[2]</sup>,但是高阶几何矩不变量的计算量很大,这就限制了几何矩不变量的使用。葛云等使用 Legendre 矩对灰度图像进行相似匹配<sup>[3]</sup>,

Legendre 矩是正交矩,其虽具有冗余信息量少的优点,但是不具有旋转不变性。文献[4,5]使用 Zernike 矩来进行图像的相似性比较,由于 Zernike 矩不仅是正交矩,同时具有冗余信息少和旋转不变性的优点,因此被 MPEG7 作为图像形状匹配的标准,但是 Zhang 等认为,Zernike 矩分析不能有效地比较图像的径向信息<sup>[6]</sup>。

文献[7]是通过灰度图像的对称性来检索图像,但是这种方法只是适合规则对称的图像匹配。Stéphane 等使用 Fourier-Mellin 变换来描述灰度图像<sup>[8]</sup>,但是 Fourier-Mellin 计算复杂,且累积误差难以控制。Torres 等则使用突起轮廓(contour salience)来匹配图像<sup>[9]</sup>。Adoram 则先提取图像的主动轮廓线(snake-active contour),然后使用 Hu 矩来匹配主动轮廓线<sup>[10]</sup>,但是主动轮廓线对复杂图像

收稿日期:2004-03-29; 改回日期:2004-12-20

第一作者简介:章志勇(1976~),男,1997 年获浙江大学机械能学院硕士学位,现为浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为 3 维模型检索、数字图像处理。E-mail: firerain@cad.zju.edu.cn

的匹配效果不好。

傅里叶描述子 (Fourier descriptor, FD) 常用于比较分析图像的轮廓相似性<sup>[11,12]</sup>, FD 是建立在傅里叶变换的基础上, 并具有旋转、比例不变性的特点。Kuntitu 将多尺度分析与 FD 相结合用于图像的匹配<sup>[12]</sup>, 但是 FD 只是针对图像轮廓形状的描述, 在实际灰度图像匹配应用中存在以下缺陷: 首先, 实际灰度图像的轮廓线提取有一定的难度, 并且轮廓边界容易受到噪声的干扰; 其次, 由于图像的轮廓并不能完全代表图像形状信息, 因此仅仅分析图像轮廓有时候并不能得到正确的结果。Zhang 等提出了通用傅里叶描述子 (generic Fourier descriptor, GFD)<sup>[6]</sup>, 其公式如下:

$$D^{GFD} = \left\{ \frac{|P(0,0)|}{A}, \frac{|P(0,1)|}{|P(0,0)|}, \dots, \frac{|P(k,t)|}{|P(0,0)|} \right\}$$

其中,

$$P(\rho, \varphi) = \sum_r \sum_i f(r, \theta_i) \exp \left[ j2\pi \left( \frac{r}{R} \rho + \frac{2\pi i}{T} \varphi \right) \right]$$

$$0 \leq r = [(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2]^{1/2} \leq R$$

$$0 \leq \theta_i = i(2\pi/T) < 2\pi$$

式中,  $(x_c, y_c)$  为图像中心,  $A$  为采样圆包围的面积,  $R$  为采样圆最大半径, 其他符号含意见文献<sup>[6]</sup>。由于 GFD 是对整个图像进行分析, 它包含了图像像素点的灰度信息, 同时具有旋转和比例不变性, 因此 GFD 比 FD 更具实用性, 但是 GFD 只是单一尺度分析, 其对图像噪声和图像的其他变化比较敏感。

## 2 多尺度通用傅里叶描述子

### 2.1 多尺度通用傅里叶描述子

GFD 包括了图像的灰度信息, 其对图像噪声和图像其他变化等干扰会比较敏感, 而将多尺度分析和通用傅里叶描述子相结合, 就可以有效地去除这些干扰, 并且, 对图像进行多尺度分析, 还可以得到不同尺度下的相似匹配结果, 而不同尺度下的匹配结果则代表了图像在不同细节程度下的相似程度, 其中大尺度体现了图像的整体相似性, 尺度越小, 图像边缘等细节信息对图像的相似性匹配影响越大。基于上述考虑, 本文把多尺度分析和通用傅里叶描述子相结合, 即得到 MGF D (multiscale Fourier descriptor), 其公式如下:

$$D_\alpha^{MGFD} = \left\{ \frac{|P_\alpha(0,1)|}{|P_\alpha(0,0)|}, \frac{|P_\alpha(0,2)|}{|P_\alpha(0,0)|}, \dots, \frac{|P_\alpha(k,t)|}{|P_\alpha(0,0)|} \right\}$$

其中,

$$C_\alpha(b, \delta) = \frac{k}{\sqrt{|\alpha|}} \int_0^{2\pi} \int_R f(r, \theta) \psi \left( \frac{t-b}{\alpha}, \frac{\theta-\delta}{\alpha} \right) dt d\theta$$

$$P_\alpha(\rho, \varphi) = \sum_b \sum_\delta C_\alpha(b, \delta) \exp \left[ j2\pi \left( \frac{b}{N} \rho + \frac{\delta}{M} \varphi \right) \right]$$

式中,  $\rho = 0, 1, \dots, N-1, \varphi = 0, 1, \dots, M-1, b, \delta$  是平移参数,  $\alpha$  是尺度,  $k$  是比例系数。  $D_\alpha^{MGFD}$  为不同尺度下的通用傅里叶描述子, 由上述公式可以看出, MGF D 是先对图像进行多尺度分析, 再计算各个尺度下的傅里叶描述子。虽然  $\psi \left( \frac{t-b}{\alpha}, \frac{\theta-\delta}{\alpha} \right)$  和小波分析的尺度函数相似, 且具有低通特性, 但是在小波分析中, 尺度函数选择范围小, 而在 MGF D 中, 一般的滤波函数均能适用, 也就是说, 其使尺度函数选择范围增大。在实际应用中, 要求尺度函数能较好地过滤图像噪声和克服图像的其他干扰, 并且要求计算简单, 速度快。

从上述公式可以看到, GFD 是 MGF D 的一个特例, 它是建立在极坐标上的函数分析, 如果首先对图像进行极坐标采样, 再转换为直角坐标系, 那么 MGF D 就可直接用模板卷积和快速傅里叶变换进行计算。如图 1 所示, 图 1(a) 是直角坐标系下的原图, 图 1(b) 是进行极坐标采样后再转换为直角坐标系的图像。

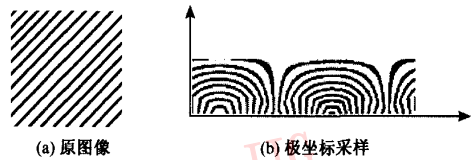


图 1 图像采样转换结果

Fig. 1 Sample result of image

### 2.2 GFD 和 MGF D 的对比实验分析

为了对比 MGF D 和 GFD 之间的图像匹配效果, 本文对 Lena 图进行了一系列相似性比较测试, Lena 原图大小为  $129 \times 129$ 。测试时, 首先分别对 Lena 原图加入高斯噪声或统一噪声, 或进行旋转、比例变换或其他各种变换, 然后对变化后的 Lena 图像分别使用 GFD 和 MGF D 进行相似性比较计算, 结果如图 2 所示, 其中, 图 2(a) 是分别对原图加入 10%、20%、30%、40% 高斯噪声后的图像, 图 2(b) 是对原图分别加入 10%、20%、30%、40% 统一噪声后的图像, 图 2(c) 是对原图做一些变形处理后的结果图像, 图 2(d) 是经过其他的一些剪切、涂抹后的结果图像。此外, 本文还对 Lena 原图作顺时针旋转来测试 MGF D 的旋转不变性和对原图作宽高等比缩放



图 2 经过各种处理后的 Lena 图

Fig. 2 Result of transformation of image

来测试 MGF D 的比例不变性。GFD 和 MGF D 的相似距离计算公式分别为

$$d^{GFD} = \sum_k \sum_t \sqrt{m^2 + n^2} \times \left| (D_1^{GFD}(k, t) - D_2^{GFD}(k, t)) \right|^2$$

$$d_{\alpha}^{MGFD} = \sum_k \sum_t (\sqrt{m^2 + n^2} \times | D_{\alpha,1}^{MGFD}(k, t) - D_{\alpha,2}^{MGFD}(k, t) |)$$

$$m = \frac{N_R}{2} - k, n = \frac{N_{cir}}{2} - t, k \leq \frac{N_R}{2}, t \leq \frac{N_{cir}}{2}$$

其中,  $d^{MGFD}$  表示 GFD 的相似距离,  $d_{\alpha}^{MGFD}$  表示不同尺度  $\alpha$  下 MGF D 的相似距离;  $N_{cir}$  为圆周采样数,  $N_R$  为半径采样数。

对极坐标采样而言, 离极坐标中心越远, 则采样密度越低。为了保证计算的准确性, 极坐标的半径和圆周方向采样数可以根据实际的图像大小来进行调整, 以便使每个采样点的大小小于图像的像素大小。图像的相似距离越小, 则表示图像的相似性越好。

由于高斯函数具有对称性, 它不仅能较好地克服图像的各种噪声干扰, 并且计算速度快, 因此本文在实验中选择 2 维高斯函数作为图像的尺度函数。在本实验中,  $\alpha$  分别为 1/8、1/4、1/2,  $N_{cir}$  和  $N_R$  取为 120。

图 3(a)、(b) 分别是对加入不同高斯噪声和统一噪声的图像进行相似性比较的测试结果, 横坐标为加入的噪声量, 纵坐标为相似距离。从图中可以看到, 对于统一噪声和高斯噪声,  $d_{\alpha}^{MGFD}$  均有显著下降。当噪声量为 40% 时, MGF D 在  $\alpha$  为 1/2 的情况下, 仍然可以准确地测试出图像具有较好的相似性。加入噪声的图像相似性实验说明, MGF D 可以较好地克服噪声干扰。

图 3(c)、(d) 是图 2(c)、(d) 的相似性比较实验结果, 横坐标分别与图 2(c)、图 2(d) 的图像序号对应。从图 3(c) 可以看到, 对于变形操作的相似性比较测试结果表明, MGF D 在  $\alpha$  为 1/2 时均能检测出图像具有较好的相似性; 对于不同的剪切涂抹变化操作的相似性比较测试结果表明, 图 2(d) 中 (1) 和 (2) 的相似性较好。这些实验结果表明, MGF D 对变形和剪切涂抹后的图像也具有较好的相似性比较效果。

图 3(e) 是旋转后图像的相似性比较测试结果, 横坐标为顺时针旋转角度, 纵坐标为相似距离。由

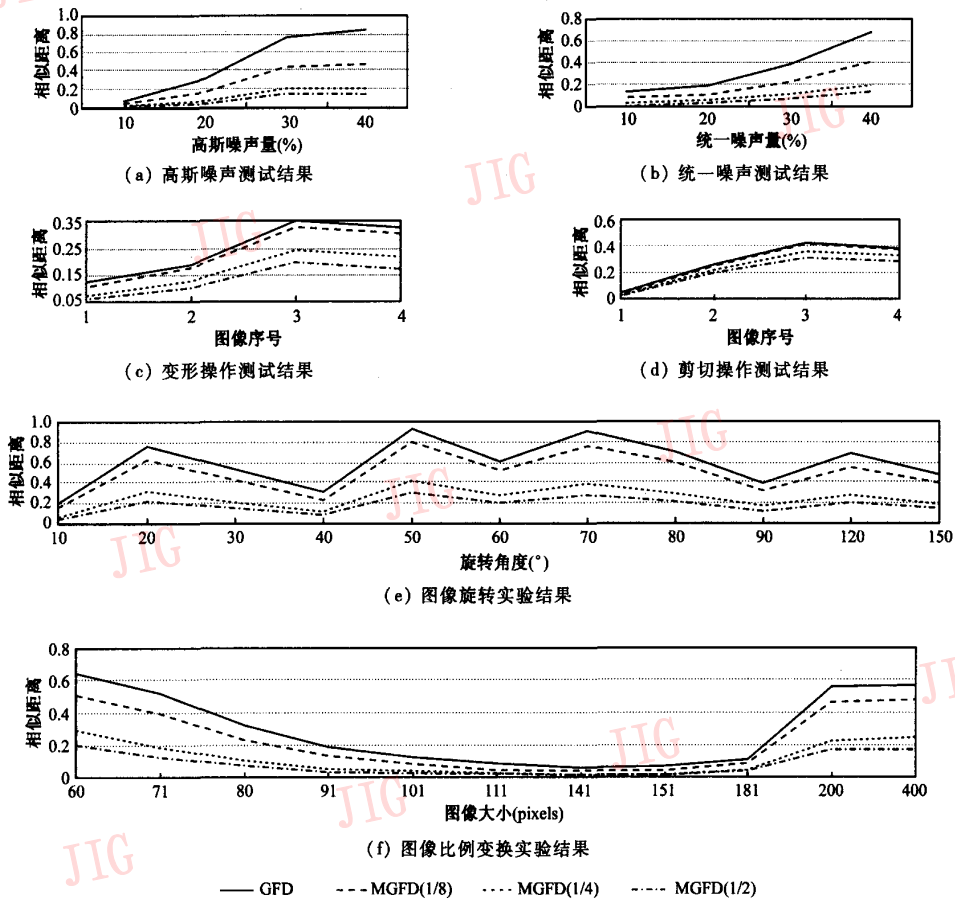


图 3 Lena 图相似性比较实验结果

Fig. 3 Experiment results of similarity matching for Lena

于图像的离散采样会带来计算误差,因此在图像进行旋转变化后,MGFD 和 GFD 的相似距离的离散计算均有计算误差。在实际应用中,要求这个误差处于合理范围之内。从图 3(e)的实验结果看到,GFD 将相似距离误差控制在 0.1 以内,MGFD 将其控制在 0.08 以内,特别是在  $\alpha$  为 1/2 时,MGFD 的相似距离误差非常小。由此可见,MGFD 的相似距离的离散计算具有较好的旋转不变性,并且优于 GFD。

图 3(f)是比例大小变化后图像的相似性比较测试结果,横坐标为图像大小,纵坐标为相似距离。同样,对于图像的比例不变性,离散采样计算会带来计算误差,而在实际应用中要求将这个误差控制在合理的范围内。从图 3(f)可以看到,GFD 和 MGF 的误差都处在合理的范围内,MGFD 在  $\alpha$  为 1/2 时,误差小于 0.02。由此可见,MGFD 相似距离的离散采样计算具有较好的比例不变性,并且优于 GFD。

### 3 灰度图像检索实验

通过对图像进行不同尺度分析,就可以获得不同尺度下图像的相似距离。在灰度图像检索中,如果对这些相似距离赋予不同的权值,则不仅可以综合地体现图像整体和细节的相似性,还可以克服图像灰度噪声和各种变换对图像检索的干扰。本文将相似度  $S$  的计算公式定义为

$$S = 0.8 \cdot (1 - d_{0.5}^{MGFD}) + 0.15 \cdot (1 - d_{0.25}^{MGFD}) + 0.05 \cdot (1 - d_{0.125}^{MGFD})$$

其中, $S$  表示图像的相似度, $d_{0.5}^{MGFD}$  表示尺度为 0.5 时 MGF 的相似距离,其他以此类推。 $S$  越大,则表示图像的相似程度越好。

图 4(a) 和 (b) 给出了两组灰度图像检索的实验结果。图 4(a) 是利用 MGF 的检索结果,图 4(b) 是利用 GFD 的检索结果。



(a) MGFD 电视机检索结果

(b) GFD 电视机检索结果

图 4 MGFD 与 GFD 的检索结果

Fig. 4 Retrieval results of MGFD and GFD

### 4 结 论

本文把多尺度分析和通用傅里叶描述子(GFD)相结合来得到多尺度通用傅里叶描述子(MGFD)。实验表明, MGFD 相比于 GFD, 不仅可以对图像进行多尺度分析, 并能较好地克服噪声和图像其他变化的干扰, 而且旋转和比例不变性的计算误差更小, 能较好地反映图像的相似性。因此将 MGFD 运用于灰度图像的检索, 可以获得较满意的结果。

#### 参考文献 (References)

- 1 Hu M. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, IT-8(2): 179 ~ 187.
- 2 Li Y. Refarming the theory of invariant moments for pattern recognition [J]. Pattern Recognition, 1992, 25(7): 723 ~ 730.
- 3 GE Yun, LUO Li-ming, SHU Hua-zhong. A new way of linear registration using the legendre orthogonal moment and application in z-value image data [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(1): 54 ~ 56. [葛云, 罗立民, 舒华忠. 基于 Legendre 正交矩的配准方法及其在二值图像配准中的应用[J]. 电子学报, 2001, 29(1): 54 ~ 56.]
- 4 Ye Bin, Peng Jiaxiang. Improvement and Invariance Analysis of Zernike Moments[A]. In: IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions [C], Chengdu, China, 2002, 2: 963 ~ 967.

- 5 Zhang Dengsheng, Lu Guojun. Improving retrieval performance of Zernike moment descriptor on affined shapes [A]. In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C], Lausanne, Switzerland, 2002, 1: 205 ~ 208.
- 6 Zhang Dengsheng, Lu Guojun. Generic Fourier descriptor for shape-based image retrieval [A]. In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C], Lausanne, Switzerland, 2002, 1: 425 ~ 428.
- 7 Cheung K K T, Ip H H S. Image retrieval in digital library based on symmetry detection [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Graphic [C], Hannover, Germany, 1998: 366 ~ 372.
- 8 Stéphane Derrode, Faouzi Ghorbel. Shape analysis and symmetry detection in gray-level objects using the analytical Fourier-Mellin representation [J]. Signal Processing, 2004, 84(1): 25 ~ 39.
- 9 Torres R S, Picado E M, Falcão A X, et al. Efficive image retrieval by shape salience [A]. In: Proceedings of the XVI Brazillian Symposium on Computer Graphics and Image Processing [C], Fortaleza-CE, Brazil, 2003: 167 ~ 174.
- 10 Adpra M, Lew M S. IRUS: Image retrieval using shape [A]. In: IEEE International Conference on Multimedia Computing and System [C], Florence, Italy, 1999, 2: 597 ~ 602.
- 11 Miao Zhenjiang, Gandelin M-H, Yuan Baozong. Fourier transform based image shape analysis and its Applction to flower recognition [A]. In: IEEE 6th International Conference on Singal Processing [C], Ottawa, Canada, 2002, 2: 1087 ~ 1090.
- 12 Iivari Kunttu, Leena Lepistu, Juhani Rauhamaa, et al. Multiscale Fourier descriptor for shape classification [A]. In: 12th International Conference on Image Analysis and Processing [C], Mantora, Italy, 2003: 536 ~ 541.