

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 8
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 8 月 第 17 卷 第 8 期(总第 196 期)

目 次

综述

可计算图像美学研究进展 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 吴一全, 吴诗嫒, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载平衡方法 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 顿玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头部姿态估计 范进富,陈锻生(1002)

计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 8 期 2012 年 8 月 16 日出版

主管单位	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感应应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所	Sponsored by	Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics
主 编	李小文	Chief editor	LI Xiaowen
编辑出版	《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa. ac. cn 电话:010-64807995 010-82614429 网 址:www. cjig. cn	Editor, Publisher	Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China) E-mail :jig@ irsa. ac. cn
印刷装订	北京北林印刷厂	Distributed by	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
广告经营许可证	京朝工商广字第 0346 号	Domestic	All Local Post Offices in China
总 发 行	北京报刊发行局	Foreign	China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
订 购	全国各地邮局	Printed by	Beijing Beilin Printing House
国外发行	中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)		

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

Contents

Review

Review for computational image aesthetics Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

Image Processing and Coding

Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)

Load balancing for H. 264 parallel encoding Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)

Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability Guo Hong, Li Xuejun (919)

Gaussian noise level estimation in SVD domain for images Liu Wei (923)

Analysis and improvement of image diffusion denoising models Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)

Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

Image Analysis and Recognition

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics Zhang Rong, Wang Rangding (953)

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)

Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression Yu Guofang (966)

Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)

Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)

Fast line edge feature extraction using image gradients Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)

Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

Computer Graphics

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

Remote Sensing Image Processing

Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)

Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-0953-07

论文引用格式: 张荣,王让定. 抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别[J]. 中国图象图形学报,2012,17(8):953-959.

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别

张荣, 王让定

宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211

摘要: 数字图像取证是计算机取证、信息安全领域的一门新学科。为实现照片图像与真实感计算机图形的可靠识别,提出一种基于图像稀疏表示的数字图像取证方法,该方法在抵抗压缩方面具有较好性能,从而保证图像压缩不会改变照片图像与真实感计算机图形的真实性本质。Tetrolet 变换为保护图像局部几何结构,在 L^1 -范数最小约束下搜索 4×4 图像块的最优覆盖 (Covering) 形式,获得图像的稀疏表示。观察自适应值 c 的统计分布,得到一幅图像中 117 种 Covering 出现次数的归一化直方图,从而得到图像的 HoC (histogram of covering) 特征。实验结果表明,在饱和度 (S) 分量提取的 HoC 特征能够很好地刻画照片图像与真实感计算机图形在局部几何结构上的不同统计特性,算法在识别能力、泛化能力,尤其是抵抗压缩能力上表现出良好性能,能够应用于图像真实性检测及照片图像与计算机图形的自动分类。

关键词: 图像稀疏表示; Tetrolet 变换; 数字图像取证; 抗压缩

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics

Zhang Rong, Wang Rangding

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Based on the sparse representation of images, a new approach to distinguish photographic images and photorealistic computer graphics is proposed. The proposed approach is robust enough to compression to guarantee image authenticity forensics. The Tetrolet transformation chooses the optimal tetromino partition for each 4×4 image block in terms of the minimal L^1 -norm criterion to protect local image geometry structure and to obtain the sparsest image representation. When observing the adaptive values c , an image is represented as a normalized histogram with 117 bins corresponding to the number of occurrences of different block covering, i. e. the features of HoC (Histogram of Covering). The experimental results demonstrate the HoC features extracted from S (saturation) are able to characterize the distinct statistical properties in the local geometry between photographic images and photorealistic computer graphics. The proposed approach is applicable to image authenticity detection and auto-classification.

Key words: image sparse representation; Tetrolet transform; digital image forensics; anti-compression

收稿日期:2011-12-06;修回日期:2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60873220, 61170137, 61175026); 浙江省自然科学基金项目 (Y108022, Z1090622, Y1090285); 浙江省教育厅科研计划项目 (Y201018185); 国家教育部博士点基金项目 (20103305110002); 宁波市自然科学基金项目 (2011A610191, 2011A610193)

第一作者简介: 张荣 (1970—), 女, 副教授, 宁波大学通信与信息系统专业博士研究生, 研究方向为数字图像取证, 信息隐藏。E-mail: zhangrong@nbu.edu.cn

0 引 言

面向 Internet 等海量媒体库,相机拍摄的照片图像(PIM,也称为自然图像)和计算机生成的图形图像(CG)是两种重要的图像来源,这两种图像集中反映了自然图像与非自然图像完全不同的生成过程。对于照片图像与计算机图形,尤其是具有真实感的计算机图形(PRCG)的识别算法研究在数字图像取证领域中一直是一个具有挑战性的重要研究课题。

具有真实感的计算机图形(PRCG)一般是由计算机专业人员或艺术家利用计算机图像软件(如 3DS Max、Photoshop、Maya、Lightwave 等)制作的,广泛应用于艺术设计、计算机游戏、图形设计、广告、电视电影图片中。其图像内容一般是现实中不存在的虚拟场景,但却与数码相机拍摄的照片相差无几,从视觉上已经很难区分,如图 1 所示。因此,高度仿真的计算机图形可以看做是图像伪造的一种形式^[1-2]。然而,不论一幅计算机生成的图形图像多么逼真,即使达到肉眼难以区分的程度,也存在着与相机生成图像不同的特征,而且,照片图像具有一些计算机图形难以仿真的特征,这是由照片图像的生成过程,自然场景中的天然物体形状、边缘的不规则性和复杂性决定的。Lyu 和 Farid^[3]分别在彩色图像 RGB 颜色空间的 3 个颜色通道,采用 3 级小波变换,在不同尺度、方向计算各子带小波系数直方图的前 4 阶统计量(均值,方差,偏斜度和峰度),来刻画图像小波子

带系数的 GGD (generalized Gaussian distribution) 模型的边缘分布。该方法同时计算子带线性预测误差图像的 4 阶统计量,共抽取分类特征 216 维,通过分类器来区分照片图像和计算机图形。Shi 等人^[4-5]研究了不同颜色空间表示对自然图像与计算机图形两类图像的识别效果的影响,分别在 HSV 和 YCbCr 颜色空间抽取小波系数边缘分布的特征函数的统计矩。类似地,李文祥等人^[6]在 HSV 颜色空间提取图像及校准图像的 2 阶差分信号和预测误差信号的统计矩特征。Xu 等人^[7]根据首位数字定律(也称为 Benford 定律),从彩色图像的 DCT (discrete cosine transform) 系数及梯度图像中提取首位数字特征,实现照片图像与计算机图形的识别。尽管文献[3-7]所采用的方法在照片图像和计算机图形的分类中取得了较好效果,但这些方法都容易受到图像压缩质量等因素的影响^[8-9]。

文献[9-10]在空间域像素级上研究照片图像与真实感计算机图形的局部几何结构的不同统计特性。文献[9]将局部块几何结构的统计特性与分形维数、表面梯度等微分几何特征相结合,对图像的生成过程进行建模。但该方法存在计算量大、计算复杂的问题。文献[10]在分析图像边缘 3×3 局部块几何结构的统计分布基础上,提出了基于图像边缘块视觉词汇 (bag-of-visual-words) 识别照片图像与真实感计算机图形,该方法在抵抗图像压缩上与统计矩特征^[3]相比具有一定优势。

识别算法的抵抗压缩能力是保证数字图像真实性取证结果可靠性的关键。从图像的真实性上讲,单纯的图像压缩操作不应改变一幅图像是照片图像还是计算机图形的本质。图像分类算法应能抵抗图像压缩操作对图像质量的影响,从而保证二次压缩的照片图像仍然属于自然图像,而计算机生成的图形图像经过压缩后仍然是人造(或伪造)的图像。本文利用 Tetrolet 变换的图像稀疏表示方法,分析图像局部几何结构的统计特性,实现自然图像与计算机图形的自动分离。由于 Tetrolet 变换的自适应算法能够抓住图像局部几何特征,且选择受图像压缩影响小的颜色表示(饱和度分量),所提出的照片图像与真实感计算机图形的识别算法不仅具有较高的识别率和泛化能力,也具有很好的抗压缩能力,能够应用于图像真实性检测及照片图像与计算机图形的自动分类。



图 1 具有照片级真实感的计算机图形,来自 Columbia 大学图像库^[1]

Fig. 1 Samples of photorealistic computer graphics from Columbia university image dataset^[1]

1 图像的稀疏表示

图像稀疏表示是根据图像的固有特性和人眼视觉特性的高效图像表示方法,近年来被广泛地应用于图像处理领域。目前图像稀疏表示多采用多尺度几何分析的方法。目的是利用多尺度几何分析在稀疏表示图像局部几何结构方面的优势,通过分析图像局部几何结构的统计特性,挖掘图像局部结构中所蕴含的显著特征。

1.1 Tetrolet 变换

Tetrolet 变换是 Haar 小波变换的推广,由 Krommweh 于 2009 年提出^[11-12]。传统的 2 维离散小波变换(DWT)只在水平、垂直和对角线 3 个方向对图像分别分解,对于包含不同方向几何结构的图像来说,不能得到最优的图像表示。Tetrolet 变换是在图像的局部块采用几何结构自适应的 Haar 小波变换,能够得到有效的图像稀疏表示。

在每一级 Tetrolet 变换中,首先将低通图像分成 4×4 块,然后在每一块中确定与图像块几何结构相适应的四格拼板(Tetromino)。四格拼板是由 4 个大小相等的正方形构成的不同形状,其中相邻的两个正方形通过一边相连接。图 2 给出 5 种不同形状的基本四格拼板。1 个 4×4 图像块被 4 个四格拼板所覆盖,覆盖的方式共有 117 种不同解(在不考虑旋转或镜像情况下,有 22 种基本解,如图 3 所示)。对于每

一种覆盖(Covering)方式,对 4 个四格拼板分别应用 Harr 小波变换。如果采用传统的 Harr 小波变换,无论在低通还是在高通滤波器组算法中,都是对固定的 2×2 块上求 4 个像素和或差的平均,这种固定块的方法有可能破坏图像的局部几何结构。在 Tetrolet 变换中,采用一种自适应 Harr 小波算法。即在每个 4×4 块中,按照每一种 Covering $c(c = 1, \dots, 117)$,对 4×4 块中的 4 个四格拼板 $I_s^{(c)}$, $s = 0, 1, 2, 3$, 分别应用 Harr 小波变换。每个 4×4 块经过 Tetrolet 变换后,得到低通上 4 个系数和高通 12 个 Tetrolet 系数。在 117 种不同 Covering 中,选择 12 个高通 Tetrolet 系数 L^1 -范数最小的作为最优解,即

$$c^* = \arg \min_c \sum_{l=1}^3 \|w_{r,l}^{(c)}\|_1 = \arg \min_c \sum_{l=1}^3 \sum_{s=0}^3 |w_{r,l}^{(c)}[s]| \quad (1)$$

式中, r 为当前 Tetrolet 变换级别, l 为 3 个高频子带,即, $l = 1, 2, 3$, $w_{r,l}^{(c)}[s]$ 为高频 Tetrolet 系数。

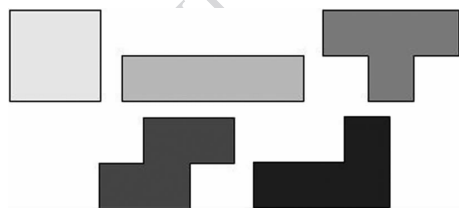


图 2 5 种基本四格拼板(O-I-T-S-L 四格拼板)

Fig. 2 The five free tetrominoes (O-I-T-S-L)

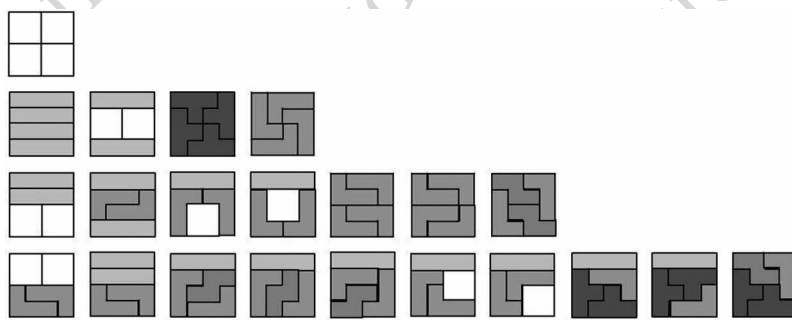


图 3 4×4 块 22 种基本的覆盖方式

Fig. 3 The 22 fundamental forms of Covering for 4×4 block

通过这种自适应 Haar 小波变换,不仅得到了一种最稀疏的图像表示,而且四格拼板没有横断局部图像块中的几何结构,能够更好地刻画图像中重要的边缘和纹理特征。

1.2 基于图像稀疏表示的 4×4 图像块分布

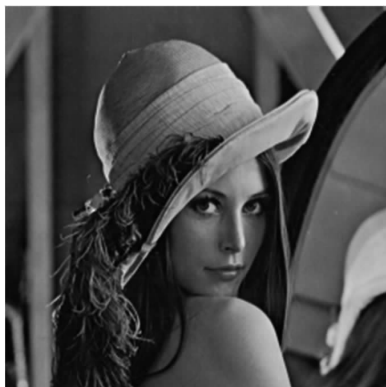
观察 256×256 Lena 图像在 5 级 Tetrolet 变换

后, 4×4 图像块的自适应值 $c(c \in \{1, \dots, 117\})$ 分布,如图 4 所示。

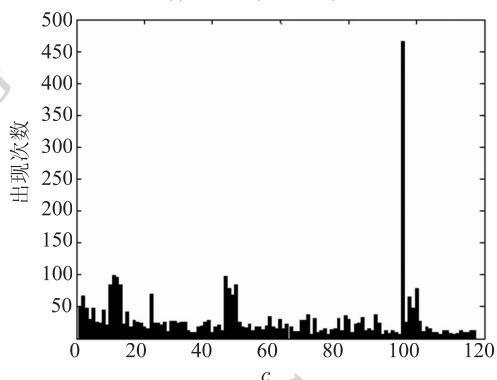
计算每一种 Covering 在 1 幅图像中出现的经验概率

$$t_i = P(C = c_i) = \frac{N_i}{\sum_j N_j} \quad (2)$$

式中, N_i 为第 i 个 Covering 出现的次数。 $\sum_j N_j$ 为所有的 Covering 出现的次数, $i, j = 1, \dots, 117$, 得到一幅图像中 117 种 Covering 出现次数的归一化直方图。用直方图来表示 1 幅图像, 从而得到图像的 HoC 特征 (Histogram of Covering)。



(a) 256×256 (Lena 图像)



(b) Lena 图像 5 级 Tetrolet 变换后自适应值 c 分布

图 4 基于稀疏表示的 4×4 图像块自适应值 c 分布
Fig. 4 Distribution of adaptive value c for 4×4 image blocks under sparse representation

2 彩色图像的颜色模型

颜色模型 (也称为颜色空间) 是一种用于表示颜色的数学方法。为了适应不同的应用场合, 需要建立不同的颜色模型。常用的颜色模型有 RGB 模型、HSV 模型等。

RGB 颜色模型采用线性空间坐标系, 用红 (red)、绿 (green)、蓝 (blue) 3 种颜色亮度的叠加产生各种颜色, 常用于显示器系统。RGB 颜色空间模型是从硬件角度出发, 不符合人类视觉系统对颜色的感知特性。一幅 RGB 彩色图像用 R、G、B 3 个颜色分量来表示。R、G、B 3 个颜色分量不仅具有很强的相关性, 而且两个相近颜色的颜色值可能相差

甚远。

人类视觉系统是通过色调 (hue)、饱和度 (saturation) 和明度 (brightness) 感知一个彩色对象。色调是指光的颜色属性, 即所处的光谱颜色的位置, 如红、橙、黄、绿、青、蓝、紫分别表示不同的色调。饱和度是指颜色的深浅程度, 饱和度高表示颜色深, 饱和度低则颜色浅。换句话说, 饱和度反映了一种颜色的纯度或被白光冲淡的程度, 即白光成分的多少。明度则是人类对色彩明暗程度的主观判断。

根据人类视觉感知特性, HSV 颜色模型采用 H、S、V 3 个颜色分量来表示彩色图像。H、S 分量分别对应色调和饱和度, 而 V 分量则对应明度。给定一幅彩色图像的 RGB 颜色值 (R, G, B), $R, G, B \in [0, 1]$, 将彩色图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间各分量值 (H, S, V) 的算法如下^[13]:

- 1) $M = \max(R, G, B)$, $m = \min(R, G, B)$;
- 2) $V = M$;
- 3) 若 $M \neq 0$, 则 $S = \frac{M - m}{M}$, 否则 $S = 0$;
- 4) 若 $M = R$, 则 $H = 60 \left(\frac{G - B}{M - m} \right)$,
若 $M = G$, 则 $H = 60 \left(\frac{B - R}{M - m} + 2 \right)$,
若 $M = B$, 则 $H = 60 \left(\frac{R - G}{M - m} + 4 \right)$;
- 5) 若 $H < 0$, 则 $H = H + 360$ 。

在 HSV 颜色模型中, 色调 (H) 用角度度量, 取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 饱和度 (S) 的取值范围为 $0 \sim 1$, 明度 (V) 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。

3 图像分类算法

不同颜色模型中的颜色表示对提取特征的判别能力起到决定作用。基于对颜色理论的理解和分析, 首先选择颜色模型。在此基础上, 提出基于 Tetrolet 变换的照片图像和真实感计算机图形识别算法。

3.1 颜色模型的选取

现实世界中拍摄的照片图像是真实世界的场景投影到图像设备的传感器上形成的。照片图像的成像质量是对获取设备的固有属性和成像条件的反映, 不仅受人为因素、拍摄条件的影响, 如曝光时间、拍摄人手的抖动、天气、光照等, 还由相机本身的技术缺陷和技术参数决定。同时, 真实场景中的光照

和对象之间存在着复杂的物理交互作用^[9],这表现为阴影、明暗以及物体的纹理、边缘等。

利用计算机图形技术绘制真实感图形或仿真真实场景时,首先建立图形所描述的场景的几何表示,再用某种光照模型,计算在假想的光源、纹理、材质属性下的明暗效果,最后以数字图像的格式保存。即使是高品质的计算机生成图像,在模拟自然场景时也会由于计算成本限制采用一些简化的算法或操作,无法完整地或正确地模拟天然物体所具有的复杂表面纹理、形状和场景中的光照现象。

照片图像与计算机图形完全不同的生成过程,使两类图像蕴含着不同的统计特性。在对图像来源一无所知的情况下,人类可以凭直觉观察图像颜色是否过于平滑,边缘是否过于锐化,图像纹理是否符合天然,场景光照是否自然、合理等等,判断一幅图像是照片图像还是由计算机生成的虚拟场景图像。根据人类的视觉感知特性,本文选择 HSV 颜色模型。在 HSV 颜色模型的明度、饱和度和明度不同颜色分量中,分析图像局部块几何结构所能反映的照片图像和计算机图形的不同统计特性,最后选择出最具有判别能力的特征。

3.2 提取 4×4 图像块自适应值 c 直方图特征

在 Tetrolet 变换中,通过在 117 种 Covering 中选择最优解,保护了图像的局部几何结构,最后得到图像的稀疏表示。图像的稀疏表示意味着抓住了图像的显著特征,这对于鉴别自然图像与计算机图形至关重要。

为了提高算法效率,将较大的图像裁剪为 1024×1024 大小,而小于 1024×1024 尺寸的图片则保持原始大小。接着,将彩色图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间。

选择一颜色分量,对每一幅图像在该通道进行 5 级 Tetrolet 变换,记下每一个 4×4 图像块采用的最优 Covering 值 c ($c \in \{1, \dots, 117\}$)。

基于 Tetrolet 变换提取 HoC 特征的算法主要包含以下步骤:

- 1) 输入: 图像 $A = \{a[i, j], i = 1, \dots, X, j = 1, \dots, Y, X, Y \leq 1024\}$;
- 2) 初值: $1 \rightarrow r, 0 \rightarrow N_i, i = 1, \dots, 117$;
- 3) 将图像 A' 划分为 4×4 图像块;
- 4) 对于每一个 4×4 图像块,按照式(1)找到最优解 c_i , 且 $N_i + 1 \rightarrow N_i$;
- 5) 低频系数构成低通图像, $A' = (v'[i, j])$,

$$i = 1, \dots, \left\lfloor \frac{X}{2^r} \right\rfloor, j = 1, \dots, \left\lfloor \frac{Y}{2^r} \right\rfloor;$$

- 6) $r + 1 \rightarrow r$;
- 7) 返回步骤 3), 直到 $r > 5$;
- 8) $N_1 + N_2 + \dots + N_{117} \rightarrow S$;
- 9) $\frac{N_i}{S} \rightarrow t_i, i = 1, \dots, 117$;
- 10) 输出: $t_i, i = 1, \dots, 117$ 。

3.3 图像分类

在图像稀疏表示下,用 HoC 特征刻画一幅图像局部块几何结构的统计特性,每一幅图像被表示为一个 117 维的特征向量,即

$$V_C = [t_1, t_2, \dots, t_{117}]^T, C \in \{H, S, V\} \quad (3)$$

接着,基于 HoC 特征训练 SVM 分类器,实现对照片图像和真实感计算机图形的识别。图像分类的算法流程如图 5 所示。

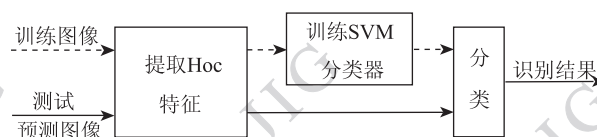


图5 图像分类算法流程图

Fig. 5 Block diagram of the proposed classification algorithm

4 实验结果

通过实验评估不同颜色分量对算法性能的影响。算法性能主要包括识别能力、泛化能力和抗压缩能力。采用基于 RBF (radial basis function) 的 SVM 分类器 (LIBSVM 工具包^[14]) 实现图像分类。所有实验在 Matlab7.0 环境下进行。

4.1 图像库

图像库包含 PIM 和 PRCG 两个图像集,所有图像采用 JPEG 压缩格式。PIM 图像集中包含 1 200 幅由个人相机拍摄的照片图像,分辨率有 2048×1536 , 2592×1944 等不同规格,拍摄设备包括 Canon (4 部)、Sony (2 部)、Nikon (1 部)、Samsung (2 部) 和 Olympus (1 部) 等多种品牌不同机型的相机,图像内容涉及室内/室外,白天/夜晚,晴天/阴天/雨天,人物/建筑/风景照等不同场景。这些照片都经过拍摄者本人证实,未经过任何其他图像处理的一次相机成像图像。PRCG 图像集包含 900 幅高真实感的计算机图形,其中,800 幅来自 Columbia 大学 PRCG 图像集^[1],100 幅高真实感计算机图形来自 www. raph. com 网站,图像

内容包括建筑、人物和动物、风景等不同主题。

为了对算法评估,将图像库中所有图像划分成 5 组,如表 1 所示。首先,在上述图像库上,对 2 100 幅图像在 HSV 颜色空间,对图像的色调(H 分量)、饱和度(S 分量)和明度(V 分量)3 种不同的图像颜

色表示按 3.2 节算法提取 HoC 特征。接着,在不同颜色分量中,对所提出照片图像和真实感计算机图形识别算法的识别性能进行分析,同时,对算法的抗压缩能力、泛化能力作评估。最后,通过实验分析,选择最优的颜色分量。

表 1 算法评估所用数据集

Table 1 Data sets for algorithm evaluation

图像集	图像数	图像来源
组 1 PIM	800	Canon(3 部), Sony(1 部), Nikon(1 部), Samsung(1 部), Olympus(1 部)拍摄
组 2 PRCG	800	Columbia 大学 PRCG 图像集 ^[3]
组 3 PIM	200	同组 1
组 4 PIM	200	Canon(1 部), Samsung(1 部), Sony(1 部)拍摄
组 5 PRCG	100	www. raph. com

4.2 识别性能比较

用图像库中组 1 和组 2 的 1 600 幅照片图像和真实感计算机图形,对算法的识别性能做评估,并对不同颜色分量的判别能力做比较。采用 10 次交叉验证,用 1 600 幅图像中的 70% 进行训练,30% 作测试,实验结果取 10 次的平均值。表 2 表明,照片图像和计算机图形的色调(H 分量)、饱和度(S 分量)和明度(V 分量)都能够显著地反映两类图像在局部块几何结构上的不同统计特性,其中,H 分量的识别性能最好。表 2 给出在相同的图像集上文献[3,10]算法的测试结果。与这两种方法相比,在 3 个颜色分量上提出的 HoC 特征都具有较好的识别能力。

表 2 识别性能比较

Table 2 Comparison experiments of discrimination

	特征数	PIM /%	PRCG /%	平均 正确率/%
本文	H 分量	117	99.9	100
	S 分量	117	99.5	100
	V 分量	117	99.5	99.7
文献[3]		216	95.5	98.1
文献[10]		256	96	95.4

4.3 抗压缩能力

图像压缩是一种最为常见的图像操作。一幅经过压缩的照片图像,应该还是照片图像,同样,一幅经过压缩的计算机图形,也还是计算机图形。算法的抗压缩能力可以提高算法的可靠性。

用组 1 和组 2 的 1 600 幅图像作为训练样本训练 SVM(支持向量机)分类器。接着用组 3,组 4,组 5 中 500 幅图像对算法的抗压缩能力进行测试。组 3 包含 200 幅照片图像,是由组 1 图像的拍摄相机拍摄的不同图像,组 4 中的 200 幅照片图像则是由另外 3 部相机所拍摄。组 5 包含从 www. raph. com 网站下载的 100 幅高仿真计算机图形。每一组图像都按照 90,70,40 不同的 JPEG 质量因子再次压缩。由于原始图像本身是 JPEG 格式的压缩图像,因此再次压缩意味着二次压缩。检测结果如表 3 所示。

表 3 抗压缩评估结果(识别率)

Table 3 Anti-compression evaluation experiments
(accuracy rate)

		H 分量	S 分量	V 分量
原始图像 JPEG	组 3	100	100	100
	组 4	100	100	95
	组 5	100	100	99
二压 JPEG90	组 3	100	100	100
	组 4	100	100	95
	组 5	100	100	99
二压 JPEG70	组 3	94	98	98.5
	组 4	81	98	95
	组 5	100	100	99
二压 JPEG40	组 3	35.5	93.5	85
	组 4	22	95	94.5
	组 5	100	100	98

表 3 的检测结果表明,S 分量(饱和度)具有非

常好的抗压缩能力,V分量(明度)次之,而H分量(色调)尽管在对原始的以及压缩质量为90的JPEG图像的识别性能较好,但对于压缩质量为70和40的JPEG图像的识别性能下降明显。

在文献[10]实验中,按照90、70、40不同压缩质量对组1和组2中1600幅训练样本压缩构成不同的图像集,用文献[3,10]的方法分别进行抗压缩测试,结果远远不如本算法的抵抗压缩能力。

另外,从表3中组4和组5的检测结果看,采用S分量,本文算法对于不同相机拍摄的照片图像和不同软件生成的计算机图形,都具有较好的识别能力和抗压缩能力。

5 结 论

Tetrolet变换在有效保护图像局部几何结构前提下,基于 L^1 -范数最小约束搜索每一个 4×4 图像块Covering的最优解。本文基于Tetrolet变换的图像稀疏表示方法,将一幅图像表示为117种Covering出现次数的归一化直方图(HoC特征),刻画图像在局部几何结构上的统计特性,提出了抗压缩的照片图像和真实感计算机图形的识别算法。

实验表明了选择颜色分量在本文算法中的必要性。与色调和明度相比,算法在饱和度上对两类图像具有较好的识别性能、抗压缩能力及泛化能力。饱和度 S 的计算是一个相对值,即 $S = (M - m)/M$,其中 M 、 m 分别为R、G、B3个颜色值中的最大值和最小值,在图像压缩过程中具有很好的稳定性,因而在该分量提取的HoC特征具有较好抗压缩能力。算法在明度分量也具有较好的抗压缩能力,这是由于JPEG压缩考虑到人眼对明度的敏感程度较高,对明度分量的数据压缩程度相对另外两个颜色分量小。但是,在明度分量提取的HoC特征在识别能力上较差于饱和度。总的来说,从饱和度提取的HoC特征刻画了照片图像和计算机图形在局部几何结构上存在的本质不同,这使得本文算法具有较好的泛化能力,在面向海量媒体库的照片图像与计算机图形检测中具有较好的应用前景。

基于图像的稀疏表示揭示了照片图像与真实感计算机图形在图像局部几何结构上存在固有的不同特性,研究结果不仅在数字图像取证领域,在图像质量评价、图像查询等领域中都具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Ng T T, Chang S F, Hsu Y F, et al. Physics-motivated features for distinguishing photographic images and computer graphics [C]// Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Multimedia. New York, USA: Association for Computing Machinery Inc, 2005: 239-248.
- [2] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3948-3959.
- [3] Lyu S, Farid H. How realistic is photorealistic? [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 845-850.
- [4] Chen W, Shi Y Q, Xuan G. Identifying computer graphics using HSV color model and statistical moments of characteristic functions [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Beijing, 2007:1123-1126.
- [5] Sutthiwan P, Ye J Y, Shi Y Q. An enhanced statistical approach to identifying photorealistic images [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Digital Watermarking. Guildford, UK: Springer Verlag, 2009: 323-335.
- [6] Li W X, Zhang T, Zheng E G, et al. Discrimination between natural images and photorealistic computer graphics using second-order difference statistics [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(9): 1613-1618. [李文祥, 张涛, 郑二功, 等. 基于二阶差分统计量的自然图像与计算机图形的鉴别 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报 2010, 22(9): 1613-1618.]
- [7] Xu B, Wang J, Liu G, et al. Photorealistic computer graphics forensics based on leading digit law [J]. Journal of Electronics, 2011, 21(1): 95-100.
- [8] Farid H. Perceptual discrimination of computer generated and photographic faces [J]. Digital Investigation, 2012, 8: 226-235.
- [9] Ng T T, Chang S F. Classifying photographic and photorealistic computer graphic images using natural image statistics, ADVENT Technical Report #220-2006-6 [R]. Columbia: Columbia University, 2004.
- [10] Zhang R, Wang R D, Ng T T. Distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics using visual vocabulary on local image edges [C]//Proceedings of the 10th International Workshop on Digital-forensics and Watermarking (IWDW11). New Jersey: Springer, 2012.
- [11] Krommweh J. Tetrolet transform: A new adaptive Harr wavelet algorithm for sparse image representation [J]. Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(4): 364-374.
- [12] Krommweh J. An orthonormal basis of directional Haar wavelets on triangles [J]. Results in Mathematics, 2009, 7(1): 9-21.
- [13] Smith A R. Color gamut transform pairs [J]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1978, 12(3): 12-19.
- [14] Hsu C W, Chang C C, Lin C J. A practical guide to support vector classification [CP/OL]. (2010-04-15) [2010-12-01]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin>.