

基于同态补偿翻拍图像的方向预测方法

谢 哲, 王让定*, 严迪群, 刘华成

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

(* 通信作者电子邮箱 wangrangding@nbu.edu.cn)

摘 要: 为抵抗翻拍图像对人脸识别等认证系统的攻击, 提出一种人脸图像梯度方向预测算法。通过自适应高斯同态滤波进行光照补偿增强真实活体图像与翻拍图像的对比度, 用八方向 Sobel 算子与像素卷积方向预测, 并使用支持向量机(SVM)分类器设计图像分类器判别两类图像。抽取国内外数据库(南京航空航天大学与耶鲁大学人脸库)活体人脸与翻拍人脸共 522 张进行实验, 检测率达到 99.51%; 另用三星 Galaxy Nexus 手机拍摄 261 张真实人脸, 同时进行翻拍, 得到样本库 522 张人脸, 实验检测率达到 98.08%。特征提取用时 167.04 s。结果表明能有效地检测分类出真实人脸照片与翻拍假冒照片, 并具有较高的特征提取效率。

关键词: 翻拍图像; 同态补偿; 方向预测; 梯度; 分类器

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Homomorphic compensation of recaptured image detection based on direction predict

XIE Zhe, WANG Rangding*, YAN Diqun, LIU Huacheng

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: To resist recaptured image's attack towards face recognition system, an algorithm based on predicting face image's gradient direction was proposed. The contrast of real image and recaptured image was enhanced by adaptive Gauss homomorphic's illumination compensation. A Support Vector Machine (SVM) classifier was chosen for training and testing two kinds of pictures with convoluting 8-direction Sobel operator. Using 522 live and recaptured faces come from domestic and foreign face databases including NUAA Imposter Database and Yale Face Database for experiment, the detection rate reached 99.51%; Taking 261 live face photos using Samsung Galaxy Nexus phone, then remaked them to get 522 samples library, the detection rate was 98.08% and the time of feature extraction was 167.04 s. The results show that the proposed algorithm can classify live and recaptured faces with high extraction efficiency.

Key words: recaptured image; homomorphic compensation; direction predict; gradient; classifier

0 引言

目前智能门锁、考勤机、手机锁等人脸识别认证系统, 都是通过摄像头采集人脸照片进行分析处理, 再判断是否为合法用户。然而, 冒名顶替者通过翻拍图片进行身份伪造, 以此入侵认证系统, 对安全隐私造成严重损害。因此生物特征识别系统^[1]的使用安全性成为人们普遍关注的问题, 这一问题通常被称为活体检测(liveness detection)。其中, 对于二维人脸的特征研究仍然是活体检测的主要领域, 尤其是基于单一图像上的活体检测研究对人脸识别系统中的图像来源鉴定尤为重要^[2]。

研究者们通过分析活体人脸图像与翻拍人脸图像的本质差异^[3], 提出了大量反照片欺骗的活体检测方法。文献[4]提出了用单一图像做活体检测的可能性, 其选择不同参数下的瑞利分布直方图特征, 用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)进行分类训练, 较好地实现了图像的分类。

文献[5]利用纹理模式、细节损失, 捕获图像物理统计特征, 对液晶显示器为介质的图像翻拍作了研究。文献[6]提出了一种结膜血管和虹膜特定光谱图像的检测方法, 利用真假虹膜的光谱吸收量不同, 分别取 860 nm 和 480 nm 的波长特征组合成二维特性向量, 能够用 SVM 分类出活体与假冒虹膜图像, 从而判定是否为活体, 但此方法对摄像头有很高的要求。文献[7]中利用 Zigzag 顺序提取离散余弦变换(Discrete Cosine Transformation, DCT)系数, 利用其作为统计特征对图片进行翻拍检测, 获得了较好的分类效果。文献[8]提出图像的表面梯度模值强度特征 $|\text{grad}(\alpha I)|$, 在 RGB 三通道梯度均值方差共提取 72 个特征, 以区分真实图像与翻拍图像, 对于纹理较为复杂的图检测效果较好, 但是对人脸来说只能得到人脸轮廓的边缘梯度, 单用这个特征分类效果不是很理想。

本文提出了一种基于单一图像的真实与翻拍图像的分类检测算法。以翻拍过程中造成图像梯度方向直方图的差异为

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-06-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170137, 61300055, 61301247); 浙江省自然科学基金资助项目(LY13F020013); 宁波市自然科学基金资助项目(2013A610057, 2013A610059); 宁波大学科研基金资助项目(XKXL1313, XKXL1310)。

作者简介: 谢哲(1990-), 男, 湖南耒阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理; 王让定(1962-), 男, 甘肃天水人, 教授, 主要研究方向: 信息隐藏; 严迪群(1979-), 男, 浙江余姚人, 博士研究生, 主要研究方向: 信息隐藏; 刘华成(1987-), 男, 四川开江人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理。

依据,用八方向 Sobel 梯度方向算子预测分类图像,同时采用同态滤波增强这种差异,增强两类图像的区分度,最后利用 SVM 分类器进行样本判别。在公众开放的图像数据库 NUAA Imposter Database 和 Yale Face Database 上获得了好的结果,能有效地检测出图像的真实情况。

1 自适应同态滤波补偿

本文将活体真人被摄像头捕获的照片称为活体图像,当活体图像再次被拍照后得到的图像称为翻拍图像。两类图像具有高相似度,肉眼难以区分,如图1所示。本文的主要工作是寻找一种特征对图像类型进行区分。



图1 活体图像与翻拍图像示例

正常情况下,普通摄像头采集到的人脸图像光照问题变化很大,在一定程度上会改变像素值 $f(x, y)$ 的大小,从而影响像素梯度方向的判断。因此需要引入补偿程度系数,对不同程度的光照采用不同程度的光照补偿。本文将 RGB 彩色图像转换成 HSV 类型,保持图像色度 H 和饱和度 S 不变,在亮度分量 V 上进行补偿,这样在最大限度上减少图像的失真度,克服无法对彩色图像进行像素补偿^[9]的缺点,为活体检测提供条件:

$$g(x, y) = a + b \frac{\ln(f(x, y) + \beta + 1) - \ln(\beta + 1)}{\ln(b + \beta + 1) - \ln(\beta + 1)}; \quad (1)$$

$$f(x, y) \in \text{低亮度}$$

$$g(x, y) = \exp \left[\frac{(f(x, y) - a)(\ln(b + \beta + 1) - \ln(\beta + 1))}{\ln(b + \beta + 1) - \ln(\beta + 1)} \right]; \quad (2)$$

$$f(x, y) \in \text{高亮度}$$

其中: a 为 V 分量最小值, b 为 V 分量最大值; β 为补偿程度系数,且 $\beta \in [0, 999]$, 为防止对数取 0 的情况,加上 1。

为确定补偿系数 β 的大小,在此给出以下三个原则:

1) 如果 $m \times n$ 图像的像素平均值 $\sum_{(x, y) \in (1, 1)}^{(m, n)} f(x, y) / (m \times n)$, 在 $(a, (a + b) / 2)$ 内判定为过暗, $((a + b) / 2, b)$ 内判定为过亮, 当等于 $(a + b) / 2$ 时认定为标准光照。

2) 考虑实际情况和视觉心理, 取 2/5 和 3/5 为临界点, 即 $\sum_{(x, y) \in (1, 1)}^{(m, n)} f(x, y) \in [0, 102]$ 为过暗, $[153, 255]$ 为过亮, $[102, 153]$ 为正常。

3) 初始化 β 为 100, 根据 $\sum_{(x, y) \in (1, 1)}^{(m, n)} f(x, y)$ 大小以间隔为 10 循环调整 β 值, 直到平均值落入正常区域范围。

图像经过式(1)、(2)变换后,光照得到了改善,像素 $g(x, y)$ 替换了原来像素 $f(x, y)$, 但图像质量变差,主要是该补偿公式欠缺区分照度与反射部分的能力,而照度 $i(x, y)$ 与反射部分 $r(x, y)$ 正是区分翻拍图像与真实图像的关键点。比如眉毛、头发等被当作阴影区域,导致图像细节一同被错误补偿了,从而图像变得模糊,造成失真,同态滤波方法能较好

地解决这个问题。

同态滤波基本原理是将像元值 $g(x, y)$ 看作是照度光强 $i(x, y)$ 和发射率 $r(x, y)$ 两个组分的产物。照度相对变化很小,可以看作是图像低频成分;而反射率则是高频成分,在物体的交界处会急剧变化。通过分别处理照度和反射率对像元值的影响,达到揭示阴影区细节特征的目的:

$$g(x, y) = i(x, y) * r(x, y) \quad (3)$$

因此,在图像过暗的区域,引入同态滤波的照度光强分量 $i(x, y)$, 对阴影区域加以区分。本文在计算照度分量上采取邻域均值方法,即取 $i(x, y)$ 周围 8 像素的均值,如图 2, 将式(1)中 $f(x, y)$ 替换成 $i(x, y)$, 变换后照度图像乘以反射分量就得到补偿后图像,如式(4)。对于过亮区域,人脸的阴影区域细节清楚,不会错误补偿,用原来的式(2)即可。

$i(x-1, y-1)$	$i(x, y-1)$	$i(x+1, y-1)$
$i(x-1, y)$	$i(x, y)$	$i(x+1, y)$
$i(x-1, y+1)$	$i(x, y+1)$	$i(x+1, y+1)$

图2 照度 8 邻域

$$g(x, y) = \frac{g(x, y)}{i(x, y)} \left(a + b \frac{\ln(i(x, y) + \beta + 1) - \ln(\beta + 1)}{\ln(b + \beta + 1) - \ln(\beta + 1)} \right) \quad (4)$$

在亮度分量上完成像素对数变换补偿后,进行傅里叶频域变换,用传递函数 $H(u, v)$ 进行频域滤波,再进行傅里叶反变换,最后用指数运算还原像素值,这就完成了自适应同态滤波补偿。

$$H(u, v) = (H_h - H_l) \left(1 - \exp \left(-c * \frac{D(u, v)^2}{D_0^2} \right) \right) + H_l$$

其中:

$$D(u, v) = \sqrt{(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2} \quad (5)$$

H_h 表示高频增益, H_l 表示低频增益, $D(u, v)$ 为频率 (u, v) 到滤波器中心 (x_0, y_0) 的距离, D_0 为频率为 $(0, 0)$ 时 $D(u, v)$ 的值, c 为锐化系数。补偿后的图像再转回 RGB 图,效果如图 3 所示,与图 1 相比,可以看出同态滤波后的图像在一定程度上增强了两类图像的对比度。同时,为减少计算复杂度,将图像大小进行规整处理,提高梯度方向特征的提取效率。



图3 同态滤波处理效果

2 方向预测原理及实现

图像经预处理后,将选择合适特征进行区分。容易知道,摄像头捕捉的人脸通常含有两类反射:漫反射和镜面反射。漫反射光强取决于人脸表面的折射率,而镜面反射光强主要由人脸表面与空气之间的不同折射率决定。由 Lambert's reflectance model^[10]可知,真实人脸是较为理想的漫反射表面,在成像过程中占主导,可以忽略镜面成分分量,因而真实人脸表面所产生的漫反射光的光强 $g_1(x, y)$ (在平面图像上定义为坐标 (x, y) 的像素),总与表面各个方向入射光光强

$i_1(x, y)$ 及入射角 θ 的余弦值成正比, 从而得到相机函数 δ 响应后的像素表达:

$$g_1(x, y) = \delta\left(\frac{1}{\pi} i_1(x, y) \cos(\theta)\right) \quad (6)$$

而由介质 m (LCD 显示屏或打印纸) 对活体图像进行翻拍后的重现图像 $g_2(x, y)$ 与真实场景下的 $g_1(x, y)$ 有完全不同的表面属性, 其近似可认为是镜反射表面, 在式(6)的基础上则会额外增加镜反射分量 $r(x, y)$; 且人脸每个点所处平面的法向量方向基本相同, 不符合真实人脸面部的凹凸情况, 因而在光强 $i_2(x, y)$ 的二次入射下, 反射光的不均匀对象 $g_2(x, y)$ 将会是漫反射和镜面反射分量的线性组合^[11], 镜反射量 $r(x, y)$ 与漫反射量 $g_1(x, y)$ 共享权重 γ , 在一定程度上削弱了图像细节, 因而在图1中可以看到, 翻拍图像在人脸细节的呈现度上不如活体图像。

$$g_2(x, y) = \delta(\delta_m(i_2(x, y)g_1(x, y)\gamma + i_2(x, y)r(x, y)(1 - \gamma))) \quad (7)$$

如何在二维平面图像上表征 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 上的差异是本文的研究重点。相机感光元件所获得的光照强度到输出图像的像素之间存在一种映射关系, 这个映射被称为相机响应函数。假定在一定曝光度下, 函数是线性分布的, 因此将 $\frac{\partial \delta}{\partial x}$ 定为常数 C , $\frac{\partial \delta_m}{\partial x}$ 同理。因而式(7)对 x 方向求偏导时得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_2(x, y)}{\partial x} = CC_m \left\{ \frac{\partial i_2(x, y)}{\partial x} [g_1(x, y)\gamma + r(x, y)(1 - \gamma)] + i_2(x, y) \left[\frac{\partial g_1(x, y)}{\partial x} \gamma + \frac{\partial r(x, y)}{\partial x} (1 - \gamma) \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

容易知道, 无论是活体人脸还是翻拍人脸, 在接收一定照度光强时, 平面图像中相邻两像素所对应的三维空间距离非常小, 即认为相邻坐标点的光强近似相等, 则 $\frac{\partial g_2(x, y)}{\partial x} = 0$, 因而式(8)变为

$$\frac{\partial g_2(x, y)}{\partial x} = i_2(x, y) \left[\frac{\partial g_1(x, y)}{\partial x} \gamma' + \frac{\partial r(x, y)}{\partial x} \gamma'' \right] \quad (9)$$

其中: $\gamma' = CC_m \gamma$, $\gamma'' = CC_m (1 - \gamma)$ 。

同理可求得 $\frac{\partial g_1(x, y)}{\partial x} = 0$ 。由 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 的偏导可以看出差异, 在图像上即为在梯度水平方向的差异。由于图像实为二维离散平面, 在人脸眉毛、瞳孔等黑色区域附近, 可以判定真实人脸梯度方向的渐变度将大于翻拍人脸(前者从零值突变), 因而选择对梯度方向进行特征统计。本文在4方向、8方向、16方向均进行了特征提取。在4方向中统计水平、垂直方向, 遗漏了图像其他特征方向信息; 16方向中特征提取过多, 导致方向角划分困难, 效果不理想; 而本文在8方向统计中采用 Sobel 算子与人脸区域像素卷积预测方法(如图4)较4方向、16方向增加了对角线方向信息统计, 更为细化了图像块特征信息, 同时较好地解决了梯度方向分布不均匀的问题。

算法将人脸图像划分为16等份, 如图5, 对每一等份里的 3×3 像素, 转换成向量 Y , 从左上角开始依次用8个方向

算子向量 X 进行滑动卷积 $I = X * Y = X * Y \cos(\alpha)$, 统计每一等份内8个卷积值的大小, 作为 3×3 块的特征值。在像素向量 Y 与方向向量 X 越接近时, 也就是夹角 α 越小, $\cos(\alpha)$ 也就越大, 卷积值 I 也就越大, 预测最大值的方向为主方向, 即像素向量 Y 的方向角为模板方向向量 X 的方向角度, 如图6所示。因此, 对一张人脸图像统计出 $16 \times 8 = 128$ 个特征, 同时训练归一化特征值, 避免其值过大或过小。

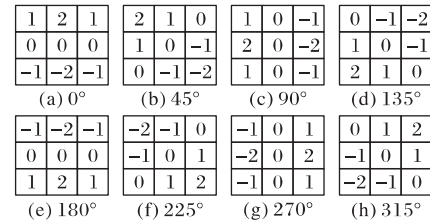


图4 八方向 Sobel 梯度方向算子

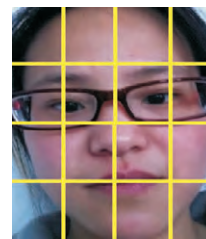


图5 人脸等分图

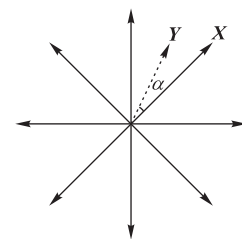
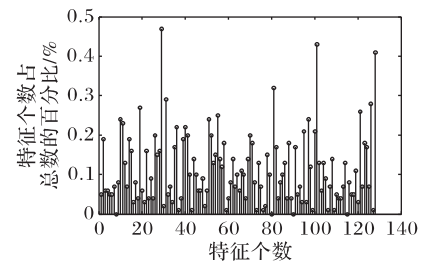
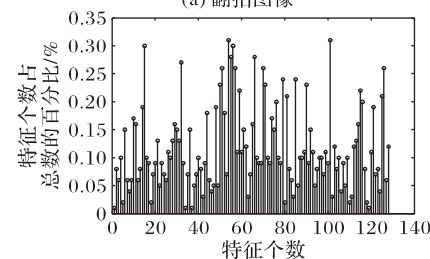


图6 方向预测

统计出的128个特征中, 每8个特征值为一个等份的梯度方向信息, 由图7可以看出原始图像和翻拍图像的128个特征分布上存在差别, 翻拍图像特征值区分度较低, 真实图像区分度较高, 小块体现的主方向信息更为显著, 真实人脸体现的梯度方向信息较翻拍人脸更为丰富, 进一步证明了前面提到的渐变度大小的预判。



(a) 翻拍图像



(b) 活体图像

图7 特征值分布

为验证选取特征的有效性, 本文以均值和方差为统计特征, 对样本库进行二维 SVM 可视化处理, 分布如图8所示。由该统计分布图可以清晰地看出, 两类人脸图像经过同态滤波补偿后, 再用方向角预测算法, 可以成功将人脸样本库区分开(直线上方点为真实人脸样本, 线下方点为翻拍人脸样本点)。因此, 在理论上证实了算法的可行性。

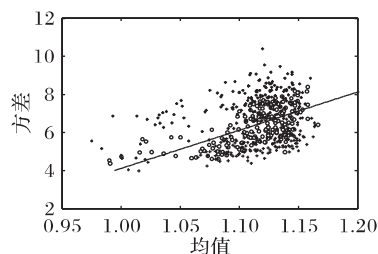
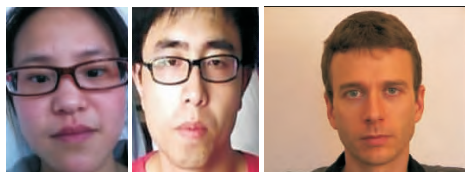


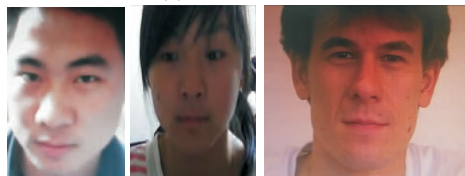
图8 样本统计分布

3 实验结果及其分析

采用三星 Galaxy Nexus 型号手机拍摄活体人脸照片 261 张,并将所有活体人脸翻拍一次,共得到 522 张样本,任意取 4/5 作为模板训练(418 幅图像),1/5 作为测试(104 幅图像)进行实验,如图 9(左列)。同时为增强算法可信度,随机抽取 NUAA Imposter Database^[12](中列)和 Yale Face Database^[13](右列)中的真实人脸图像和翻拍人脸共 522 张,再一次对公共库进行活体检测实验。利用 SVM 的分类学习功能,在 $[-5, 5]$ 的范围内,对惩罚参数 c 和径向基核函数参数 g 进行自动寻优,利用交叉验证测试训练得到模型。



(a) 部分活体图像



(b) 部分翻拍图像

图9 样本库展示

对人脸图像作同态补偿处理后,再进行梯度方向特征统计,分类效果优于未经过同态滤波处理的人脸图像,从图 10 受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic curve, ROC 曲线)中可以看到,估计值(Area Under ROC Curve, AUC)达到 98.718%,为本文算法特征分类的正确性提供了证明。

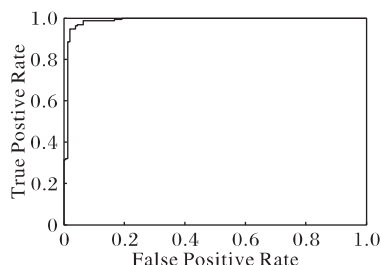


图10 128 个特征 ROC 曲线

使用预测表面梯度方向 $\text{grad}(\theta)$ 方法提取特征值的分类实验统计结果是:在笔者制作的样本库中对 10 次重复实验取平均值,分类检测率为 98.08%;NUAA 与 Yale 样本库中的检测率达到 99.51%。为了进行统计特征分类效果比较,参考[14]提出的翻拍检测统计特征 LBP 局部统一模式与文献[15]提出的噪声与首位数字特征(Mode Based First Digital Features, MBFDF)结合方法,以及文献[8]中的梯度强度特征

$|\text{grad}(\alpha I)|$,分别用笔者制作的样本库与 NUAA 和 Yale 人脸库进行实验,实验结果比较如表 1。

在特征提取耗时方面,对 522 张图像进行特征提取,各算法的时间比较结果如表 2。

表1 多种方法检测率比较

分类特征	特征个数	真实检测率/%	标准人脸库检测率(NUAA、Yale)/%
$\text{grad}(\theta)$	128	98.08	99.51
LBP	80	96.68	97.03
噪声 + MBFDF	12 + 180	97.76	97.86
$ \text{grad}(\alpha I) $	72	95.84	96.32

表2 特征提取时间对比

分类特征	提取时间/s
$\text{grad}(\theta)$	167.04
LBP	983.41
噪声 + MBFDF	1 634.47
$ \text{grad}(\theta I) $	351.03

从表 1、2 的检测率与提取时间数据可知,本文算法与其他三种方法相比保持了较好的分类效果,虽然提取的特征个数不是最少,但是梯度方向预测角度提取非常简单,大大提高了特征提取效率。结果表明,经过同态滤波增强人脸图像对比度后,能增强图像细节,有利于梯度方向预测角分类,并且特征提取效率高,提高了鉴定翻拍图像的实用性。

4 结语

针对翻拍图像鉴定的安全性研究,本文提出了一种自适应同态滤波下的梯度方向预测方法,算法的特征提取个数较少,且简单快捷,无需附加其他设备,不需要用户的主动配合。理论和实验结果表明:自适应高斯同态补偿技术可以有效增强图像方向细节信息,提高梯度方向预测检测率,同时还具有较低的时间复杂度。下一步将算法移植进入 Android 系统中,提出一种更加满足实际应用需求的翻拍检测方法,用于人脸识别系统中的活体检测模块。

参考文献:

- [1] SUN D, QIU Z. The survey of biometric technology [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1744 - 1748. (孙冬梅, 裴正定. 生物特征识别技术综述[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1744 - 1748.)
- [2] FARID H. Image forgery detection [J]. Signal Processing Magazine, 2009, 26(2): 16 - 25.
- [3] SUN L. Research on anti-spoofing in face recognition [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (孙霖. 人脸识别中的活体检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.)
- [4] BAI J, NG T-T, GAO X, et al. Is physics-based liveness detection truly possible with a single image? [C]// ISCAS 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 3425 - 3428.
- [5] GAO X, NG T T, QIU B, et al. Single-view recaptured image detection based on physics-based features [C]// ICME 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE, 2010: 1469 - 1474.
- [6] CHEN R, LIN X, DING T. Liveness detection for iris recognition using multispectral images [J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(12): 1513 - 1519.

(下转第 2715 页)

- [4] WANG X, FANG L. Survey of segmentation based on active contour model [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(8): 751–760. (王相海, 方玲玲. 活动轮廓模型的图像分割方法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(8): 751–760.)
- [5] QIAN Y, ZHANG Y. Level set methods and its application on image segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(1): 7–13. (钱芸, 张英杰. 水平集的图像分割方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(1): 7–13.)
- [6] CHEN R, ZHENG C, XIE W, *et al.* Multi-resolution fuzzy C-means clustering based on MRF for image segmentation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(1): 167–173. (陈荣元, 郑晨, 谢伟, 等. 马尔可夫化的多尺度 FCM 在影像分割中的应用[J]. 光电子 • 激光, 2012, 23(1): 167–173.)
- [7] WANG H, LIU M. Generalized fuzzy C-means algorithm with improved fuzzy partitions based on local membership and neighbor information [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(8): 2355–2358. (王海军, 柳明. 基于局部隶属度和邻域信息的 GIFF-FCM 图像分割算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(8): 2355–2358.)
- [8] LU B, JIA Z, YANG J, *et al.* A new fuzzy C-means algorithm based on gray value compensation and spatial information for aerial image segmentation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(3): 469–473. (路彬彬, 贾振红, 杨杰, 等. 基于领域灰度的模糊C均值图像分割算法[J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(3): 469–473.)
- [9] JIN L, FU M. Images segmentation based on genetic kernel fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(2): 205–210. (靳璐, 付梦印. 基于遗传模糊核聚类的图像分割[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(2): 205–210.)
- [10] AHMED M, YAMANY S, MOHAMED N, *et al.* A modified fuzzy C-means algorithm for bias field estimation and segmentation of MRI data [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(3): 193–199.
- [11] CHEN S, ZHANG D. Robust image segmentation using FCM with spatial constraint based on new kernel-induced distance measure [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2004, 34(4): 1907–1916.
- [12] HOU Z, QIAN W, HUANG S, *et al.* Regularized fuzzy C-means method for brain tissue clustering [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(13): 1789–1794.
- [13] STELIOS K, VASSILIOS C. A robust fuzzy local information C-means clustering algorithm [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1328–1337.
- [14] CHEN W, LU T, WU J, *et al.* An improved genetic FCM clustering algorithm [C]// ICFC 2010: Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication. Piscataway: IEEE, 2010: 45–48.
- [15] ZHANG F, FAN H. Research on medical image segmentation based on fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(4): 144–151. (张翡, 范虹. 基于模糊C均值聚类的医学图像分割研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(4): 144–151.)
- [16] CORINNE V, FERNAND M. The viscous watershed transform [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005, 22(2/3): 251–267.
- [17] XUE J, PIZURICA A, PHILIPS W, *et al.* An integrated method of adaptive enhancement for unsupervised segmentation of MRI brain images [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(15): 2549–2560.
- [18] KANDE G, SAVITHRI T, SUBBAIAH P. Segmentation of vessels in fundus images using spatially weighted fuzzy C-means clustering algorithm [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2007, 7(12): 102–109.
- [19] QIN K, XU M. Remote sensing image segmentation based on cloud model and FCM [J]. Geo-Information Science, 2008, 10(3): 302–307.
- [20] SHE L, ZHONG H, ZHANG S. Fuzzy C-means clustering algorithm combined with Markov random field for brain MR image segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(12): 1554–1560. (余黎煌, 钟华, 张石. 结合马尔可夫随机场与模糊C均值聚类的脑MRI图像分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(12): 1554–1560.)
- [21] RAMATHILAGAM S, HUANG Y. Extended Gaussian kernel version of fuzzy C-means in the problem of data analyzing [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3793–3805.
- [22] RAJENDRAN A, DHANASEKARAN R. Fuzzy clustering and deformable model for tumor segmentation on MRI brain image: a combined approach [J]. Procedia Engineering, 2012, 30: 327–333.
- [23] VOVK U, PERNU F, LIKAR B. A review of methods for correction of intensity inhomogeneity in MRI [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2007, 26(3): 405–421.

(上接第 2690 页)

- [7] LIU H, WANG R. Recaptured image detection based on DCT coefficients [J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(20): 8139–8145.
- [8] LU Y, FENG L, LI X, *et al.* Recapture image detection based on surface gradient [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(5): 57–61. (卢燕飞, 冯莉, 李兴华, 等. 基于图像表面梯度的翻拍检测[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(5): 57–61.)
- [9] ZHENG W, DAI Y. Adaptive illumination compensation by homomorphic logarithmic [J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2011, 16(8): 1429–1436. (郑伟华, 戴永. 自适应同态对数光照补偿[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1429–1436.)
- [10] OREN M, NAYAR S K. Generalization of Lambert's reflectance model [C]// Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1994: 239–246.
- [11] TAN R T, LKEUCHI K. Separating reflection components of textured surfaces using a single image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 178–193.
- [12] TAN X, LI Y, LIU J. Face liveness detection from a single image with sparse low rank bilinear discriminative model [C]// ECCV 2010: Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision, LNCS 6316. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 504–517.
- [13] LEE K C, HO J, KRIEGMAN D. Acquiring linear subspaces for face recognition under variable lighting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(5): 684–698.
- [14] CAO H, KOT A C. Identification of recaptured photographs on LCD screens [C]// IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2010: 1790–1793.
- [15] YI J, FANG Y. Digital recaptured image forensics algorithm [J]. Journal of Zhongshan University: Natural Science Edition, 2012, 50(6): 48–52. (尹京, 方艳梅. 数码翻拍图像取证算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 50(6): 48–52.)