





第19卷第6期（总第218期）

2014年6月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

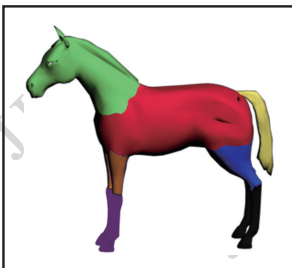
国内定价 50.00元



帧内复制粘贴视频伪造的盲检测(第825页)



基于流形学习的人体动作识别(第914页)



层次结构导向下的动画角色模型分割与标记(第955页)

综述

虹膜图像质量评价综述

李星光, 孙哲南, 谭铁牛

0813

图像处理和编码

帧内复制粘贴视频伪造的盲检测

杜振龙, 焦丽鑫, 李晓丽, 郭延文, 杨小健

0825

破损区域分块划分的图像修复

翟东海, 鱼江, 段维夏, 肖杰

0835

分布式视频编码中相关噪声分布的非参数估计

胡晓飞, 朱秀昌

0843

分数阶原始对偶去噪模型及其数值算法

田丹, 薛定宇, 杨雅婕

0852

结合感知特征和自然场景统计的无参考图像质量评价

贾惠珍, 孙权森, 王同罕

0859

图像置乱度评估的层次分析法

曹光辉, 胡凯, 张兴

0868

图像分析和识别

结合目标预测位置的压缩跟踪

罗会兰, 钟宝康, 孔繁胜

0875

标牌粘连字符自适应定位分割重建识别

洪涛, 梁伟建, 卢玉凤

0886

结合色度和纹理不变性的运动阴影检测

殷保才, 刘羽, 汪增福

0896

仿射不变的自适应局部线性嵌入

顾播宇, 孙俊喜, 李洪祚, 刘广文, 曹永刚

0906

基于流形学习的人体动作识别

王鑫, 沃波海, 管秋, 陈胜勇

0914

图像理解和计算机视觉

基于压缩感知理论的3维人脸快速重建

周大可, 吴子扬, 杨欣

0924

压缩感知跟踪中的特征选择与目标模型更新

石武祯, 宁纪锋, 颜永丰

0932

高动态场景的图像融合优化和实时应用

范逵, 周晓波

0940

计算机图形学

真实图像转换的水墨图像绘制模拟

陈添丁, 金炜炜, 陈英旦, 吴涤

0946

层次结构导向下的动画角色模型分割与标记

李琳, 陶涛, 刘晓平

0955

遥感图像处理

静止卫星图像热带气旋云系自动识别

耿晓庆, 李紫薇, 杨晓峰

0964

非下采样Contourlet域融合和参数化内核图割的SAR图像无监督水灾变化检测

李青松, 覃锡忠, 贾振红, 杨杰, 胡英杰

0971

地理信息技术

描述定性方向关系的复合表达模型

王中辉, 杨艳春

0979

CONTENTS

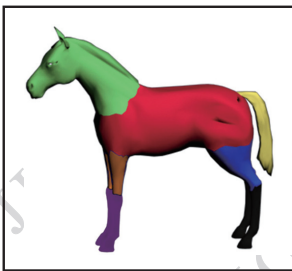
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Intraframe copy-paste forgery video blind detection based on dense SIFT flow(P825)



Human action recognition based on manifold learning(P914)



Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures(P955)

Review

- Overview of iris image quality-assessment
Li Xingguang, Sun Zhenan, Tan Tieniu 0813

Image Processing and Coding

- Intraframe copy-paste forgery video blind detection based on dense SIFT flow
Du Zhenlong, Jiao Lixin, Li Xiaoli, Guo Yanwen, Yang Xiaojian 0825
- Image inpainting algorithm based on partition block of damaged region
Zhai Donghai, Yu Jiang, Duan Weixia, Xiao Jie 0835
- Non-parametric estimation for correlation noise distribution in distributed video coding
Hu Xiaofei, Zhu Xiuchang 0843
- Fractional-order primal-dual model and numerical algorithm for denoising
Tian Dan, Xue Dingyu, Yang Yajie 0852
- Blind image quality assessment based on perceptual features and natural scene statistics
Jia Huizhen, Sun Quansen, Wang Tonghan 0859
- Image scrambling degree evaluation based on analytic hierarchy process
Cao Guanghui, Hu Kai, Zhang Xing 0868

Image Analysis and Recognition

- Object tracking algorithm by combining the predicted target position with compressive tracking
Luo Huilan, Zhong Baokang, Kong Fansheng 0875
- Merged characters segmentation reconstruction and recognition of labels based on adaptive location
Hong Tao, Liang Weijian, Lu Yufeng 0886
- Moving shadow detection by combining chromaticity and texture invariance
Yin Baocai, Liu Yu, Wang Zengfu 0896
- Affine invariant adaptive locally linear embedding
Gu Boyu, Sun Junxi, Li Hongzuo, Liu Guangwen, Cao Yonggang 0906
- Human action recognition based on manifold learning
Wang Xin, Wo Bohai, Guan Qiu, Chen Shengyong 0914

Image Understanding and Computer Vision

- Fast 3D face reconstruction based on compressed sensing
Zhou Dake, Wu Ziyang, Yang Xin 0924
- Feature selection and target model updating in compressive tracking
Shi Wuzhen, Ning Jifeng, Yan Yongfeng 0932
- The optimization of image fusion and real-time application for HDR scenarios
Fan Kui, Zhou Xiaobo 0940

Computer Graphics

- Rendering simulation of real-image converting into chinese ink painting
Chen Tianding, Jin Weiwei, Chen Yingdan, Wu Di 0946
- Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures
Li Lin, Tao Tao, Liu Xiaoping 0955

Remote Sensing Image Processing

- Tropical cyclone auto-recognition from stationary satellite imagery
Geng Xiaoqing, Li Ziwei, Yang Xiaofeng 0964
- Unsupervised detection of flood changes with SAR images combining nonsubsampling Contourlet domain fusion and parametric kernel graph cuts
Li Qingsong, Qin Xizhong, Jia Zhenghong, Yang Jie, Hu Raphael 0971

Geoinformatics

- Compound model for describing direction relations qualitatively
Wang Zhonghui, Yang Yanchun 0979

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)06-0813-12

论文引用格式: Li X G, Sun Z N, Tan T N. Overview of iris image quality-assessment[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(6): 813-824. [李星光, 孙哲南, 谭铁牛. 虹膜图像质量评价综述[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 813-824.][DOI:10.11834/jig.20140601]

虹膜图像质量评价综述

李星光^{1,2}, 孙哲南², 谭铁牛²

1. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027;
2. 中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室 智能感知与计算研究中心, 北京 100190

摘要: **目的** 虹膜图像质量评价是虹膜识别系统中重要的模块, 通过评价低质量虹膜样本的综合质量来提升虹膜识别的性能。虹膜图像质量评价在图像获取、人机交互系统、识别性能预测以及自适应虹膜识别算法设计等各模块中具有重要作用。近年来, 随着虹膜识别系统不断发展, 虹膜图像质量评价得到了广泛研究。**方法** 为了使该领域的研究人员充分了解当前虹膜图像质量评价算法, 本文对已有的方法进行了综述。**结果** 总结了虹膜图像质量评价算法的发展历程、技术思路 and 主要方法, 展望了虹膜图像质量评价算法以及以质量为导向的虹膜识别技术的发展。**结论** 随着大数据时代的到来, 大规模人群的虹膜识别将会成为热点。虹膜图像质量评价的研究对提升虹膜识别系统的处理能力具有重要意义。

关键词: 低图像质量虹膜识别; 虹膜图像质量评价; 质量测度评价; 多测度融合; 频谱分析

Overview of iris image quality-assessment

Li Xingguang^{1,2}, Sun Zhenan², Tan Tieniu²

1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Center for Research on Intelligent Perception and Computing, National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: **Objective** Iris image quality assessment is very important in iris recognition systems. Its motivation is to improve the performance of iris recognition by assessing the quality of iris samples. It is closely related to the modules of iris image acquisition, human-computer interaction, performance evaluation, adaptive iris recognition and so on. With the development of non-ideal iris recognition techniques, iris image quality-assessment methods have been widely studied in recent years. **Method** In order to give the researchers a comprehensive knowledge about iris image quality-assessment, state-of-the-art methods are reviewed. **Result** The trend, technical solution and at last, the potential pointers of the iris image quality-assessment methods and the quality driven iris recognition techniques are discussed. **Conclusion** With the advent of the era of big data, large scale iris recognition will become the hot topic. The study of iris image quality assessment is of great significance to promote the processing capacity of the iris recognition system.

Key words: low quality image iris recognition; iris image quality assessment; quality metric estimation; quality metrics fusion; spectral analysis

收稿日期: 2013-08-14; 修回日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61075024, 61273272); 国家国际科技合作项目(2010DF814110)

第一作者简介: 李星光(1985—), 男, 现为中国科学技术大学自动化系模式识别专业在读博士研究生, 主要研究方向为生物特征识别。

E-mail: lxguang@mail.ustc.edu.cn

0 引言

随着信息技术的不断发展,传统的个人身份信息认证方法受到严峻的挑战。生物特征识别技术因其稳定性及不可替代性受到了广泛的关注,其安全性高于以密码、钥匙为主的身份鉴证方法。虹膜识别技术作为生物特征识别技术的一种,在过去的近二十年时间里,取得了飞速的发展。传统的虹膜识别系统^[1-2]流程包括图像获取、虹膜区域定位与分割、图像归一化、特征提取与编码以及样本比对。在虹膜识别兴起的二十余年间,关注点基本集中在虹膜有效区域定位及特征表达两方面。可控环境下的虹膜识别技术已经具有非常优越的识别性能。然而在非可控环境下(如运动中的虹膜识别^[3],远距离虹膜识别^[4-6]以及可见光虹膜识别^[7]),现有的虹膜识别技术仍无法满足实际应用需求。在复杂环境下虹膜图像质量变化成为了制约虹膜识别技术发展的瓶颈。纵观整个生物特征识别系统,生物特征样本的质量直接决定了识别性能。因此,正确评价虹膜图像的质量有助于提高各类环境下的虹膜识别性能,进而推动基于虹膜识别的身份认证技术进入更广阔的应用领域。

虹膜图像的质量评价在图像获取、人机交互系统设计、识别性能预测^[8-11]、虹膜图像恢复算法^[12-13]、自适应虹膜比对算法^[14]等各模块中起到重要作用。

在生物特征识别中,能否准确判断生物特征样本质量显得尤为重要。由于获取生物特征样本的途径不同,生物特征样本的质量评价也具有一定的差异性。相比于人脸和指纹两种生物特征模态的质量评价方法,虹膜图像质量评价方法更加复杂。一方面,虹膜图像的采集过程中,外界因素以及采集设备的影响使得采集到的原始虹膜图像容易产生图像层的质量畸变,如图像分辨率、离焦模糊、运动模糊和光照强度变化(见图1(a));另一方面,受到外界影响后虹膜图像自身发生变化导致了对象层的质量畸变,如眼皮或眼镜遮挡、瞳孔伸缩和斜眼(见图1(b))。根据虹膜图像质量畸变可以了解到,虹膜图像的质量是多质量测度共同作用的结果。融合多质量测度的质量评价结果,输出统一的质量评价结果一直是极具挑战的问题。

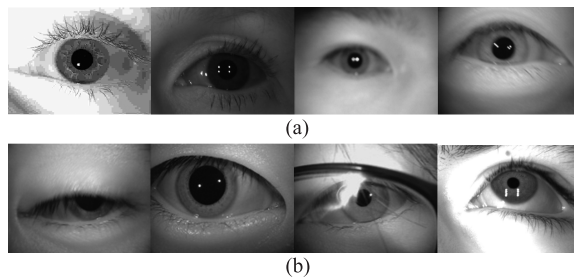


图1 虹膜图像质量畸变示例

Fig. 1 Examples of iris image quality distortions

虹膜图像质量评价有其一般性,也有其特殊性。虹膜图像质量评价算法的发展也遵循着一个由粗到细的过程。自虹膜识别产生以来,涌现了大量的关于虹膜图像质量评价的工作。起初,虹膜图像质量评价只作为概念被提出^[1-2],并没有涉及到具体的实用算法。随后,出现了单测度的虹膜图像质量评价方法,这些方法大都只关注一个或几个质量测度^[15-24],并通过级联的方式将所有的质量测度联合起来。这种简单的质量测度融合方式显然不能满足具体的虹膜图像质量评价的需求。近年来,虹膜图像质量评价的算法大都从单质量测度评价向多测度融合的方向发展^[25-30]。这类方法在准确评价质量测度的基础上,融合多测度的影响,能够输出一个整体的质量分数。除以上的分类之外,还有一类算法是从实际出发,根据不同质量虹膜图像间差异,从虹膜原图像^[31]或是归一化的虹膜图像上^[32-33]进行质量判断,达到虹膜图像质量评价的目的。无论如何进行定义,虹膜图像质量评价都是一个多质量测度交融的问题,所以很难有一个统一的标准将这些方法完全区分开,大多数的方法都是几种策略同时作用的结果。

本文从基本的单测度虹膜图像质量评价入手,延伸到多测度虹膜图像质量评价,力图将虹膜图像质量评价方法梳理出一个系统性的脉络,进而,详细分析未来虹膜图像质量评价发展趋势以及关键的技术问题。

1 单测度虹膜图像质量评价

在虹膜图像质量评价中,将质量畸变的评价结果定义为质量测度。虹膜图像的整体质量状态是由多质量测度共同作用的。如采集到的虹膜图像会同时受到光照变化、离焦以及眼皮遮挡等因素的影响。

虹膜图像整体质量评价的前提是进行单测度的虹膜图像质量评价。由此可见,单测度质量评价是整个虹膜图像质量评价的基础。

虹膜图像层的质量畸变除了环境因素影响外,还受到图像采集设备以及图像压缩比率的影响。由图像压缩带来的质量变化主要表现在像素间的差异。在图像质量评价中,常用的质量评价因子包括峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)和结构相似度(SSIM)^[34]。研究表明^[35-37],严重图像压缩比率一定程度上会影响虹膜识别系统的精度,但是受影响范围非常小。这主要是因为虹膜经过提取特征后会形成“虹膜编码(iris code)”,这种虹膜编码对图像压缩有一定鲁棒性。John指出^[36],将虹膜图像压缩至2 000字节时,只有大约2%到3%的虹膜编码被改变。当然,过于严重的图像压缩会丢失掉虹膜的大部分纹理。为了克服图像压缩给虹膜识别性能带来的影响,大多数的虹膜识别系统中均采用的是无损的图像压缩格式。在具体的虹膜图像质量评价中应考虑的质量测度有:离焦模糊、运动模糊、光照变化、瞳孔伸缩、无效区域遮挡以及斜眼。

1.1 离焦模糊

离焦是指被拍摄的对象远离对焦平面而引起的图像模糊的现象。在图像域上,离焦图像是由一幅清晰图像与一个点扩散函数(PSF)的卷积而产生的。离焦图像的点扩散函数通常建模为高斯函数。该模型通过傅里叶变换展开得到^[20],即

$$F(\mu, v) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint I(x, y) \exp(-i(\mu x + v y)) dx dy \quad (1)$$

式中, $I(x, y)$ 对应清晰图像, $\exp(-i(\mu x + v y))$ 对应点扩散函数, $F(\mu, v)$ 为变换后结果。点扩散函数为衰减函数,图像高频信息衰减速度比低频信息快。直观地,图像的边缘和纹理信息会被削弱。在虹膜图像离焦评价中,如何快速地度量这种高频信息减弱的程度是研究的重点。

1.1.1 基于梯度变化的离焦模糊评价方法

John博士在1993年提出的虹膜识别原型系统中^[1]利用巩膜与虹膜间的梯度值来作为离焦测度的评价结果。如果梯度值过小,说明图像很可能受到眼皮遮挡或离焦模糊的影响,图像质量相对较低,反之,则图像质量较高。但在文献[1],并没有介绍具体的实现方法。文献[21]第一次提到了利用瞳孔与虹膜的边缘局部梯度来进行虹膜图像质量评

价。事实上,这是之前John博士观点的具象化。

1.1.2 基于全局空域滤波的离焦模糊评价方法

事实上,离焦模糊图像中各方向的高频信息均被削弱,可以通过构建高通或带通滤波器的方式检测这种高频信息的损失程度。John博士在2004年^[20]提出了一种 8×8 滤波器并利用其与图像的卷积结果的空域能量作为离焦测度的质量分数。其具体作法是,首先构造一个各向同性的滤波器,之后将图像与对应滤波器的卷积能量值作为最终的离焦模糊的质量分数(对应虹膜图像及滤波结果如图2所示)。通过帕斯瓦尔定理(Parseval's theorem)将频域的能量计算可以转化成空域能量计算,降低了计算复杂度。这里,虹膜图像的离焦程度定义为原图像与算子卷积后的能量,即

$$Q_{\text{blur}} = \iint |I * H|^2 dx dy \quad (2)$$

式中, I 和 H 分别指代原图像和滤波算子。

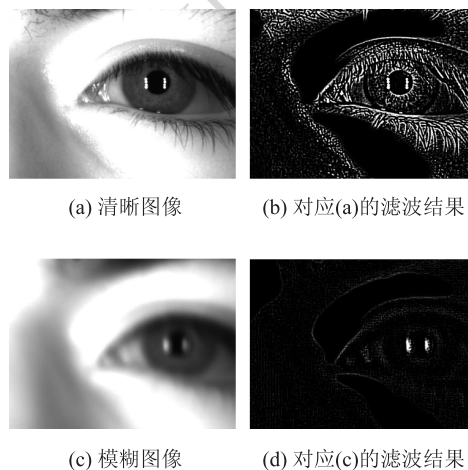


图2 Jones方法的滤波示意图^[20]

Fig. 2 The filtering example of Jones' method

为了取得更好的频带效应和提高算子的计算效率,中科院自动化所的韦卓识博士^[15]和韩国Jang等人分别提出了不同的 5×5 卷积算子^[22],上海交通大学施鹏飞等人^[23]提出了LoG(Laplacian of Gaussian)算子等。这些算子均为各向同性的零均值滤波器,其目的是希望以更小的计算代价达到更好的离焦模糊的检测性能。这类基于全局滤波方法均是通过构建滤波器的方式来检测离焦模糊的程度。其优势在于可以快速有效地区分严重模糊的图像。然而针对虹膜图像离焦模糊而言,这些算子容易受到光照强度变化、眼皮和睫毛等外界因素影响,

而忽略了虹膜区域本身清晰度的变化。如图 2 所示,模糊图像中虹膜区域纹理相比平滑,但由于睫毛的影响,其全图的滤波响应相对于清晰图像会更大,无法输出正确的离焦模糊评价结果。基于全局滤波的方法在正确评价离焦模糊的同时会忽略掉局部虹膜区域的离焦状态,因此,会影响离焦模糊的评价结果。

1.1.3 基于感兴趣区域的离焦模糊评价方法

为了克服非虹膜区域的噪声影响,需要将关注点从全局图像转移到虹膜有效区域当中。直观地,可以先选择虹膜区域中不易被噪声影响的区域作为频谱分析的重点。马力等人^[16]通过虹膜定位得到瞳孔边界,预定义瞳孔两边对应的区域作为感兴趣区域,之后将该区域的中频和低频信息作为特征,通过 SVM 分类器训练得出图像判断是否是清晰图像。Chen 等人^[19]将虹膜区域分成多个同心圆环,通过计算圆环的小波变换系数的能量来分别对各区域虹膜进行质量评价。Nathan 等人^[26]将虹膜的下半部分作为感兴趣区域,直接计算下半部虹膜的 8×8 算子卷积能量来代表图像的离焦程度。类似的方法还有,基于扇形区域和小波变换能量的方法^[38],基于归一化图像和小波变换能量的方法^[32]。这类方法的基本思路就是首先进行虹膜区域定位,确定频谱分析的感兴趣区域,通过频谱分析的方法得到对应区域的质量分数,将其作为虹膜图像离焦测度的评价结果。这些方法加强了对虹膜区域离焦程度的描述力度,然而容易受到定位算法的制约。

1.2 运动模糊

当虹膜采集设备是两场的 CCD 采集仪时,每一帧虹膜图像由奇偶两场组成。产生运动模糊时,两场图像形成一个时间差,导致图像会形成错位。根据此特点,韦卓识等人^[15]提出了基于垂直算子的运动模糊检测方法,其特点是通过训练确定垂直算子的尺度 $2 \times n$,并将虹膜图像与该算子的卷积结果作为运动模糊的质量分数。之后, Lu 等人^[24]提出了 $3 \times n$ 算子,该方法只是在算子构造上与之前的方法有所不同。随着采集设备的改进,这类基于垂直算子的运动模糊检测方法的应用受到了限制。为了摆脱运动模糊评价对设备的依赖,需要分析运动模糊的真实成因。

在一些虹膜运动模糊的评价中,只考虑线性运动模糊的情况。希望从频谱的角度分析虹膜图像的运动模糊一般规律。

图 3 给出了线性运动模糊和非线性运动模糊的虹膜图像以及其对应的傅里叶频谱图像。从线性运动模糊的图像上看,频谱分布类似“波纹”沿运动方向传递。从空域的上分析,线性运动模糊时,对应运动方向的细节信息被平滑,与此同时,垂直于运动方向的细节信息被改变,这种变化反映到频域上即成了线性运动模糊压缩了运动方向上的高频信息,也就导致了所谓的“波纹”传递现象。相对地,非线性运动模糊由于其运动的复杂性,在频域中表现形式即为所有方向的高频信息均被压缩,因此导致全局高频信息损失。全局高频信息损失的情况完全可以通过离焦模糊进行判断,因此,运动模糊评价中通常采用线性运动模糊的假设。在运动模糊评价时,只要检测到线性运动模糊的方向,就可以通过分析相应的频谱分布特点来判断运动模糊的程度。

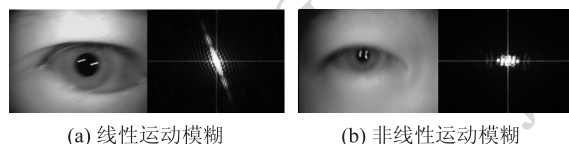


图 3 运动模糊虹膜图像与其对应的傅里叶变换频谱图

Fig. 3 The motion blur iris images and their corresponding Fourier transform frequency images

Kang 等人^[14]通过分析角膜反射区域(角膜反射区域是指系统光源在虹膜图像中留下的反射光斑,如图 4 所示)的频谱分布特点来检测虹膜图像的运动模糊程度。其中,通过定义方向滤波器组进行运动模糊方向检测。之后, Nathan^[26]与 Hugo^[28]等人将这种基于方向滤波器的方法分别应用到了整幅的近红外虹膜图像和可见光虹膜图像的运动模糊检测中,取得了很好的效果。在运动模糊方向的检测中,需要调节方向滤波器的尺度信息与角度信息。近年来, Radon 变换应用到了自然图像的运动模糊检测中^[39-40],取得了很好的效果。在运动模糊的频谱分析中,这类方法不需要调节参数。Li 等人^[27]将 Radon 变换应用到了虹膜图像的运动模糊评价中,克服了应用方向滤波器时遇到的参数选择问题。然而其弊端是加大了计算的复杂度。在实际的评价系统中,权衡精度与计算复杂度间的关系尤为重要,这决定了运动模糊评价的实际应用性。从实用性上考虑,全图的运动模糊的频谱检测会影响到质量评价算法的效率。这时可以采用离焦模糊评价时用到的

策略,即选择感兴趣区域进行运动模糊判断。这会极大提升运动模糊的评价效率。

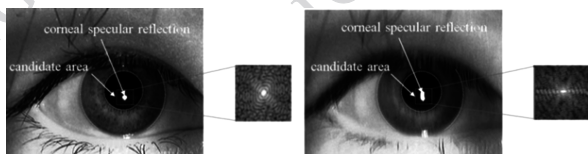


图4 角膜反射区域的频谱分布图^[14]

Fig. 4 Power spectrum in the frequency domain about the corneal specular reflection^[14]

1.3 斜眼状态

斜眼是用户在虹膜图像采集时视轴偏离相机光轴导致的虹膜图像质量畸变的情况。人眼具有的3维结构通过映射到2维平面时,势必会引起一些变化,例如虹膜内外边缘整体形状变化以及虹膜部分纹理被压缩。这些变化直接导致虹膜识别性能的降低。

在虹膜识别中,斜眼的检测方法遵循一个前提假设,即虹膜的内外边缘在正视光轴下近似是圆,而斜眼图像的内外边缘是椭圆,通过度量这种虹膜边缘椭圆的性质来衡量斜眼的程度。John 利用 Fourier 系数展开的方式检测瞳孔边缘^[41],通过椭圆拟合得到对应瞳孔的椭圆参数,如长短轴以及长轴与水平轴的夹角。得到对应的椭圆参数后,通过衡量椭圆的“圆度”来进行斜眼检测。在文献[42]中,通过衡量椭圆长短轴的比值来度量这种“圆度”,即

$$Q_{\text{off-angle}} = \frac{b}{a} \quad (3)$$

式中, b 对应椭圆长轴, a 对应椭圆短轴。

由于斜眼虹膜图像区别正眼虹膜图像在于其瞳孔边缘的形状。将待检测的虹膜图像进行仿射变换得到其3维转换图,通过衡量对应变换图像的瞳孔边缘形状来确定虹膜图像的斜眼程度^[26,43]。在可见光虹膜识别领域,该方法得到了扩展。Hugo^[28]将椭圆拟合的长短轴比值以及长轴与水平轴的夹角作为特征来进行斜眼虹膜的判断。实际中,正眼的虹膜的内外边缘并不是严格的圆形,这就导致以上这些基于“圆”假设的算法在真实系统中无法准确地判断斜眼的程度。

一般的近红外光谱下采集的虹膜图像中在角膜区域会产生由于主动光源反射的光斑,光斑与虹膜中心相对的几何位置与斜眼程度存在着一定的关系(如图5所示,其中数字表明角膜反射区域检测的排序结果)。研究证明,这种关系可以进行视角检

测^[44]。进一步,在虹膜图像的斜眼检测中,角膜反射区域中心与瞳孔中心的距离可以作为斜眼评价的依据^[27]。其优点是计算速度快并无需采用任何的形状假设。缺点也显而易见,即对角膜反射区域敏感,尤其对可见光虹膜图像的检测效果较差。



图5 角膜反射检测结果示意图

Fig. 5 Example image of corneal reflection detection

1.4 有效区域

由于眼皮、睫毛和光斑等因素的影响,在用户不主动配合的前提下,虹膜区域不能完全露在外面。虹膜有效区域是指虹膜未被遮挡的纹理区域,如图6所示,其与整体虹膜区域的比值大小直接决定了虹膜识别的准确率。起初,一些研究者希望在离焦评价之余,通过衡量固定区域的高频分量来确定虹膜是否被严重遮挡^[15-16]。这类方法并没有真正关注虹膜区域的纹理分布,所以其准确率明显偏低。从研究中发现,虹膜有效区域的评价指标与虹膜有效区域分割密切相关,如何定位出有效区域的大小成为算法的关键。为了满足算法的高效性,可以选择虹膜区域粗定位的算法^[26,29]。为了满足算法的准确性,可以选择虹膜区域精定位算法^[45-48]。通过分割算法得到虹膜有效区域大小后,通过计算其与虹膜环形区域的比值达到质量评价的目的。如图6,有效区域质量测度可以定义为虹膜环状区域中有效纹理区域的大小比例,即

$$QM_{\text{valid}} = \frac{\text{Area}}{\pi(R_{\text{iris}}^2 - r_{\text{iris}}^2)} \quad (4)$$

式中, r_{iris} 和 R_{iris} 分别对应虹膜的内、外圆半径,Area 为有效虹膜区域大小,分母是虹膜环状纹理区域的面积。



图6 虹膜图像有效区域

Fig. 6 The valid iris region

1.5 弹性形变

除了有效区域大小的比值外,还有一个质量测度是弹性形变。由于外界光照变化导致的瞳孔扩散和收缩,使得虹膜纹理会随之改变。通过定位和分割可以得到虹膜的内外圆参数和虹膜有效区域图像。其中,内外圆参数可以用来定义弹性形变的质量测度,即

$$QM_{dilation} = \frac{r_{iris}}{R_{iris}} \quad (5)$$

或者

$$QM_{dilation} = 1 - \frac{r_{iris}^2}{R_{iris}^2} \quad (6)$$

其含义是用来度量虹膜区域畸变的情况。如若定位准确,无论采用上述哪种形式,均可以达到区分不同弹性形变虹膜图像的目的。

1.6 光照及其他质量测度

除了离焦模糊、运动模糊、斜眼、遮挡以及伸缩这些质量测度,还可以从虹膜图像的信息量^[25]、虹膜区域的像素均值^[42]以及虹膜不同块间的灰度变

化^[26]、虹膜分割算法的优劣^[49]以及虹膜的颜色^[28]等方面去衡量虹膜图像的质量。本质上来说,这类方法希望在像素层面上描述虹膜图像的质量。也有算法通过判断虹膜图像的位置以及是否眨眼等因素来确定虹膜图像的质量^[50]。此外,还有算法直接绕过质量测度评价,直接在图像层构建特征,通过神经网络分类器训练,来区分低质量虹膜图像^[31]。然而,所有上述因子不具有一般性,无法正确反映出虹膜图像的真正质量。

1.7 小结

表 1 列出了不同质量测度评价方法间的比较。不同质量测度间评价策略和方法完全不同。对单一测度而言,不同方法取得的效果也不尽相同。以离焦模糊为例,3 种不同的评价方法分别适用于不同程度的离焦模糊图像,应根据实际应用的需求选择适当的算法达到准确评价离焦模糊虹膜图像的目的。除此之外,如上文所述,大多的虹膜图像质量评价算法都是由多个测度共同作用的,这也引出了第 2 节的多测度虹膜图像质量评价的问题。

表 1 单测度虹膜图像质量评价算法对比分析
Table 1 Comparison of the quality metric estimation methods

质量测度	算法类型	优点	缺点
离焦模糊	基于边缘梯度变化 ^[21]	计算速度快	需虹膜粗定位
	基于全局空域滤波 ^[15,20,22-23]	无需虹膜粗定位	描述虹膜区域的离焦程度较弱
	基于感兴趣区域滤波 ^[16,19,26,32,38]	描述虹膜区域的离焦程度较强	需虹膜粗定位
运动模糊	基于垂直滤波 ^[15,24]	利于区分两场 CCD 采集的虹膜图像运动模糊检测	无法适用于单场 CCD 采集的虹膜图像
	基于频谱方向分析 ^[14,26-28]	利于区分线性运动模糊的虹膜图像	计算速度慢,无法适用于非线性运动模糊虹膜图像
斜眼	基于瞳孔圆模型 ^[26,28,41,43]	利于区分瞳孔边界清晰的斜眼虹膜图像	计算速度慢,无法应用于实际中多变的斜眼虹膜评价
	基于角膜反射位置 ^[27]	利于区分存在角膜反射区域的斜眼虹膜图像	无法适用于无角膜反射区域的虹膜图像,如可见光虹膜图像
有效区域	基于粗定位 ^[26]	计算速度相对较快	无法精确衡量有效区域大小
	基于精定位 ^[27]	可以精确衡量有效区域大小	计算速度相对较慢
弹性形变	基于虹膜内外半径比值 ^[42]	定性表达弹性形变程度	无法代表虹膜形变的真实状态
光照	基于局部灰度差异 ^[26,42]	利于直观反映虹膜区域的光照程度	需根据实际需求确定光照程度好坏
	基于信息熵 ^[25]	从信息论角度确定图像灰度的信息量	没有直观反映虹膜区域的光照程度
其他	虹膜颜色 ^[28]	利于区分有色虹膜类型	不适用于近红外光源采集的虹膜图像
	分割算法优劣 ^[49]	利于区分预处理算法的好坏	无法反映虹膜图像质量的好坏

2 多测度虹膜图像质量评价

在实际应用中,一幅虹膜图像的质量由多测度共同决定。单一测度的虹膜图像质量评价结果难以反映虹膜样本的整体质量状态。研究思路应从单一质量测度评价向多质量测度评价上延伸。近些年,最简单的方法是将单测度虹膜图像质量评价结果通过级联的方法连接起来^[15,24],直接判断单一因子是否满足质量要求,如果不满足质量要求,直接丢弃掉低质量的虹膜图像,如果满足质量要求,继续测试下一个质量测度,直到所有的质量测度检查完毕。这种方法可以有效地去除单一质量畸变比较突出的低质量虹膜图像,然而对多测度综合作用下虹膜图像质量变化的敏感性不强。由此也就促使多测度虹膜图像质量评价的发展。

多测度虹膜图像质量评价是指通过评价和分析虹膜图像质量畸变的类型,输出一个整体的虹膜图像质量评价结果,用以判断虹膜图像的整体质量状态。Craig 等人^[25]采用了函数映射的方法将 3 个质量测度,即虹膜区域信息熵(*FIM*)、有效区域比率(*O*)和弹性形变率(*D*),融合为一个质量分数。其对应的质量分数为

$$Q = f(FIM)g(O)h(D) \quad (7)$$

式中, $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别指代质量测度的映射函数,对应函数类型通过实验确定。Aditya 等人^[29]将所有的质量测度评价结果线性相加得到最终的质量分数。Nathan 等人^[26]利用 Dempster-Shafer 融合

理论融合多个质量测度,其前提是需要区分出质量优劣的两个子集,作为训练时用到的假设命题。Zuo 等人^[30]通过神经网络的方法融合多个质量测度。训练时,通过单一样本与其他样本间比对时类内比对分数与类间比对分数的距离来确定其质量分数。神经网络作为回归模型来建立起质量分数与质量测度间的对应关系。测试时,训练好的模型可以用来预测目标样本的质量分数。Li 等人^[27]通过似然比法则融合多个质量测度,并通过假设检验的方法确定了具有统计区分性的质量等级,该质量等级可以用来代表虹膜图像的整体质量状态。这类基于监督学习的虹膜图像质量评价算法通常需要有标记信息的虹膜图像。这里的标记信息是指图像的质量状态。实际中,很难通过人为标记的方法得到具体的虹膜图像质量分数。现有的方法是通过训练集中类内与类间比对分数的距离来进行标记,这种标记方法默认一个事实,质量好的虹膜图像间的比对分数的差距相对较大。但这种标记方法也会有一些限制,样本间的比对结果通常是由两个样本的相对质量决定的,无法反映单个眼部的绝对质量,且这种标记方法会因为训练虹膜图像的质量分布和识别算法的变化而不同。因此,虹膜图像质量状态的标记也是一个需要考虑的问题。Hugo^[28]首先将所有的质量测度评价结果量化为 10 个质量等级,之后通过最小化策略融合得到最终的虹膜图像质量评价结果。

表 2 列出了多测度虹膜图像质量评价方法。通过分析可以发现多测度虹膜图像质量评价应着重考虑以下问题:

表 2 多测度融合虹膜图像质量评价算法对比分析

Table 2 Comparison of the multiple quality metrics fusion methods

融合策略	采用的质量测度	缺点	优点
基于函数映射 ^[25]	信息熵,有效区域比率,弹性形变	无归一化模块,映射函数需经验确定	各融合策略均是多质量测度融合结果,能够反映虹膜图像的整体质量状态
基于线性相加 ^[29]	遮挡、离焦、对比度、斜眼	无法正确反映质量分数同质量测度的变化	
基于 Dempster-Shafer 融合策略 ^[26]	离焦、运动模糊、斜眼、遮挡、光照等	需人为标记样本的质量	
基于神经网络 ^[30]	离焦、运动模糊、斜眼、遮挡、光照等	标记的质量分数通过比对算法确定,使其融合得到的质量分数泛化性弱	
基于似然比乘积法则 ^[27]	离焦、运动模糊、斜眼、遮挡、光照等	融合得到的质量分数容易趋向于 0 值	
基于最小化法则 ^[28]	离焦、运动模糊、遮挡、斜眼、颜色等	需要提前量化不同质量测度的质量等级	

1) 虹膜图像质量测度的评价方法各不相同, 这意味着不同的质量测度输出结果的量纲存在着很大差异, 在数据融合前必不可少的步骤是通过归一化算法去除量纲差异。

2) 融合得到的质量分数应能正确反映不同质量测度对识别性能的影响。以线性加权融合算法为例, 该算法通过对质量测度赋予不同权重的方法进行数据融合。这种方法无法展现出单一测度所产生的“短板效应”。因此, 用此类算法进行分数融合时应充分考虑这方面的不足。

3) 融合得到的质量分数应具有对识别性能的预测能力。虹膜图像质量评价意义在于去除低质量虹膜图像对识别性能的影响。因此, 虹膜图像质量评价应该与识别性能密切相关。进一步, 虹膜图像的质量分数应该能预测识别性能, 且不同质量状态的虹膜图像的识别性能应具有显著性差异。

4) 需不同质量测度间的独立性分析。多测度融合之前, 需要确定不同质量测度间是否独立。质量测度间的相关性直接决定融合策略的不同。一般地, 会通过相关分析 (correlation analysis) 确定不同质量测度间的相关性 (独立性)。

3 评测指标

算法性能评测指标可以区分虹膜质量评价算法性能的优劣。由于缺乏相应的测评标准, 无法评价现有虹膜图像质量评价算法性能好坏, 从而影响虹膜图像质量评价算法的发展。评测虹膜图像质量评价算法的性能应该从两方面入手: 准确性检验和预测性检验。

针对单一图像质量变化的情况下, 准确性检验是指相应的质量测度评价算法的准确率。在明确标记虹膜图像变化类型的数据库中, 可以将单测度虹膜图像质量评价看作二类问题, 即正常图像和畸变图像。一般地, 评价结果是质量分数时, 可以最小错误率 (MER) 来判断具体的质量评价算法的好坏, 其定义为

$$MER = \min_x \{ Error(Pos(x)) + Error(Neg(x)) \} \quad (8)$$

式中, $Error(Pos(x))$ 和 $Error(Neg(x))$ 分别代表当阈值为 x 时的正常图像和畸变图像的分类错误率。MER 值越小, 说明评价结果越准确。例如, 离焦模

糊评价的结果是离焦模糊的质量分数, 可以通过计算对应不同质量评价算法得到的 MER 来确定质量评价算法的好坏。如果单质量测度评价结果是质量标记而不是质量分数, 可以直接计算得到 MER 而不需要优化式 (8)。除了定义最小错误率之外, 应通过衡量质量评价得到的分数与标记分数间的相关性来确定对应质量评价算法的准确性。这种相关性度量可以采用计算对应的相关系数来实现。准确性测试的目的是衡量质量评价算法与实际的虹膜图像质量的相关程度, 从而度量质量评价算法的性能。

预测性测试是指质量评价结果应该对虹膜算法的识别性能具有一定的预测性。这种评价手段在自然图像质量评价中并不采用, 却是在虹膜图像质量评价算法性能测评中需要着重考虑的。这种预测性评价的目的是衡量虹膜图像质量评价算法对识别性能的预测, 只有这样的质量评价结果才可以用来指导对应识别性能的改进。通常地, 虹膜识别整体性能衡量标准有两个, 等错误率 (EER) 和可区分因子, 可区分因子为

$$d' = \frac{|\mu_{intra} - \mu_{inter}|}{\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{intra}^2 + \sigma_{inter}^2)}} \quad (9)$$

式中, μ_{intra} 和 μ_{inter} 分别代表类内与类间比对分数的均值, 其方差分别对应 σ_{intra} 和 σ_{inter} 。单质量测度评价的结果会得到质量标记, 数据集中的图像按照质量评价的结果平均分为两类, 一类作为质量好的虹膜图像, 一类作为质量差的虹膜图像, 分别标记为 high 和 low。理论上, 如果质量评价准确的情况下, 标记为 high 的集合的识别性能要比标记为 low 的数据集的识别性能要好。两个子集中的整体性能之差 (ΔEER 和 $\Delta d'$) 作为评价单质量测度预测性能的指标。两个子集的确定是分别根据各自的质量评价算法得出的, 在保证两个子集性能单调性 (子集性能单调性是指质量好子集的识别性能应该优于质量差子集的识别性能) 的同时, 两个子集间性能差距越大, 说明单测度质量评价结果的预测性越好。预测性测试的目的是衡量质量评价算法与识别性能间的相关性。

总之, 准确性测试和预测性测试的结果分别代表了虹膜图像质量评价算法两方面的性能, 也保证了虹膜图像质量评价算法在区分虹膜图像质量畸变的同时与识别性能紧密相连。这样, 虹膜图像质量评价算法才具有真正的应用价值。

4 发展趋势

自虹膜识别出现以来,图像质量评价一直都是虹膜识别流程中不可或缺的单元。然而,由于没有引起重视,使得虹膜图像质量评价的发展处于一个“不温不火”的局面。行业内各抒己见,没有统一的标准。随着虹膜识别系统不断普及,其易用性受到了极大的关注。这提升了研究者对虹膜图像质量评价算法的关注度。2009年下半年,美国标准化组织(NIST)组织了虹膜交互项目^[51],其中最重要的一点就是要对虹膜图像质量评价的标准进行规定,并在2012年组织竞赛评测当今虹膜图像质量评价算法。由此可见,虹膜图像质量评价研究已经受到了广泛的重视。对于虹膜识别系统而言,虹膜图像质量评价具有非常重要的实际意义。总结以往的一些研究成果,本文认为有望从下面问题出发提高质量评价算法性能:

1) 标准数据库建设。众所周知,虹膜识别发展到今天,公开数据库非常多,其中著名的有中科院自动化研究所的虹膜数据库,美国标准化组织的 ICE 1.0, ICE 2.0 以及 Clarkson 虹膜数据库。这些数据库越来越多地融入了图像质量较低的虹膜图像,以适应虹膜识别发展的需求。然而,在这些数据库中并没有标准的虹膜图像质量状态信息,这就导致无法公平的测试出不同虹膜图像质量评价算法的优劣,使得虹膜图像质量评价的发展遇到瓶颈。放眼于整个图像质量评价领域,美国奥斯汀的田纳西大学的 LIVE(laboratory for image & video engineering) 研究组在图像质量评价领域有着较高的影响力。除了方法的创新性之外,其 LIVE 图像质量评价数据库的建立更令人称道。所以关于质量的虹膜图像数据库的建立势在必行。这类数据库必须具备两个特点:第一,涵盖所有的虹膜图像质量畸变类型,标记图像的质量状态,方便测试单质量测度的评价结果;第二,构建虹膜图像质量整体质量变化库,标记质量等级,方便测试虹膜图像质量评价算法的整体性能。该数据库的建立将会推动虹膜图像质量评价算法的进一步发展。

2) 评测标准的制定。人是数字图像质量的最终判定者,所以数字图像质量评价算法的优劣取决于其与人视觉感知的相关性,相关性越高,图像质量评价的结果越准确。然而对于虹膜图像质量评价而

言,虹膜识别的性能才是虹膜图像最终判定者,传统的质量评价算法的评测指标不适用于虹膜图像质量评价算法。之前提到的准确性与预测性检测也无法量化算法之间的实质区别,从根本上,无法确定不同虹膜图像质量评价算法的优越性。所以,一个规范化的标准对于虹膜图像质量评价的发展尤为重要。这类标准应该细化影响虹膜识别的质量畸变类型,并给出对应质量畸变情况下虹膜识别算法的容忍度,给出指导性意见。该标准应该配合标准数据库共同建立。美国标准化组织 NIST 的虹膜交互项目^[51]在这方面做了一些尝试。真正确立公认的评测标准会为虹膜图像质量评价指明努力的方向。

3) 离焦模糊和运动模糊。相对于虹膜对象层的质量畸变,如遮挡、弹性形变与斜眼,虹膜图像层的质量畸变定义十分模糊,当今的评价算法上也主要集中在频域分析的角度^[20]。为了加强对虹膜区域的描述性,采用了基于感兴趣区域的方法^[26]。这类离焦模糊的评价方法与图像内容密切相关,睫毛、眼皮边界或虹膜纹理的丰富程度均会影响离焦模糊的评价方法。有效克服这类因素的影响就需要引入与图像内容相关性较少的特征。随着自然场景统计图像质量评价的发展^[52-54],为虹膜图像离焦模糊的评价提供了理论依据。由此可以启发虹膜图像离焦模糊评价方法的性能。由以上分析可见,对于虹膜质量测度评价而言,虽然已有了一定的研究成果,但是今后还有一段很长的路要走。

4) 多质量测度融合。多质量测度融合事实上是一个数据融合的问题。具体地,是分数层融合的问题。在多测度虹膜图像质量评价单元中已经谈到过需要注意的问题,总结起来可以分为3个方面:第一,融合过程应独立于识别算法,这样才可以保证融合得到的整体质量分数具有代表性;第二,融合应尽量独立于训练集,即保证融合得到质量分数应具有较强的泛化性能;第三,不同的质量分数应与识别性能具有一一对应关系,即质量高的虹膜样本一定对应高识别准确率。解决了这3个问题,融合得到的质量分数能使整体质量评价的结果代表虹膜样本的真实质量状态,从而整体提升虹膜图像质量评价算法的性能。

5) 实时质量评价算法。对于虹膜图像质量评价算法而言,除了必要的评价准确性之外,算法的效率也是尤为重要的。如若算法效率过低,会加重虹膜识别系统的负担,虹膜图像质量评价算法也就丧

失了实际意义。在现有的虹膜图像质量评价算法中, John 在其论文^[20]中证明其离焦模糊评价的计算效率在毫秒级, 其他算法均没有提及算法的效率问题, 证明效率问题一直被人们忽视。随着虹膜图像畸变类型复杂化, 单测度评价无法满足整体虹膜图像质量评价的需要, 这就加大了质量评价算法的计算代价。算法的效率直接决定了算法的应用前景, 如算法效率需要满足图像获取速度的需要, 才可能有效地去除低质量虹膜图像, 决定人机交互的设计, 影响用户体验。感兴趣区域的选择^[14,26]和图像降采样方法均可以提升质量评价算法效率。然而, 这类方法均会将低虹膜图像质量评价算法的准确性。因此, 新的快速算法依然是发展的重点。

6) 基于质量的自适应算法设计。图像去模糊和图像超分辨率算法是图像处理领域中两个流行的图像恢复算法。在图像恢复之前, 需要通过虹膜图像质量评价算法得到对应虹膜样本的质量畸变类型选择相应的图像恢复算法, 将虹膜图像质量评价的结果作为图像恢复的先验信息^[12], 将其应用于图像恢复算法中可以使虹膜图像质量得到进一步改善, 从而提高识别系统的性能。虹膜图像对应的质量状态可以作为比对阈值的选择依据, 如根据质量状态自适应阈值的选择策略^[55]。可以根据虹膜图像质量评价的结果, 改变图像预处理策略, 类似的方法应用在了虹膜图像的眼皮定位中^[56]。近年来, 虹膜比对模版正在向个性化方向发展^[57], 虹膜质量评价的结果可以作为个性化模版的加权工具, 定义不同质量模块的阈值, 从而提高质量模块对应的比对权重, 提高虹膜识别性能。

5 结 语

虹膜图像质量评价算法是虹膜识别框架中不可或缺或缺的模块。随着非可控条件下虹膜识别的发展, 虹膜图像质量评价越来越彰显出其独特的作用。随着其与图像获取、人机交互、识别性能预测以及自适应算法设计间联系的不深入, 虹膜图像质量评价将迎来前所未有的发展机遇。从质量测度评价和多测度融合两个方面回顾了虹膜图像质量评价方法, 并进行了深入的分析和总结, 希望对相关领域的研究人员和工程技术人员有所裨益。

参考文献 (References)

- [1] John D. High confidence visual recognition of persons by a text of statistical independence[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1148-1161.
- [2] Richard P W. Iris recognition: an emerging biometric technology [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 84(9): 1348-1363.
- [3] Matey J R, Naroditsky O, Hanna K, et al. Iris on the move: acquisition of images for iris recognition in less constrained environments[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(11): 1936-1947.
- [4] Craig F, Luca B, Keith H, et al. Iris Recognition at a distance [C]//Proceedings of Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication. Berlin Heidelberg, Germany: Springer 2005, 3546, 187-200.
- [5] Narayanswamy R. Iris recognition at a distance with expanded imaging volume[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6202: 62020G (1-12).
- [6] Dong W B, Sun Z N, Tan T N. A design of iris recognition system at a distance [C]//Proceedings of Chinese Conference on Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE, 2009, 1-5.
- [7] Hugo P, Silvio F, Ricardo S, et al. The UBIRIS. v2: a database of visible wavelength iris images captured on-the-move and at-a-distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1529-1535.
- [8] Natalia A S, Joseph A. Performance prediction methodology for biometric systems using a large deviations approach [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(10): 3036-3045.
- [9] Johnson A, Sun J, Bobiek A. Predicting large population data cumulative match characteristic performance from small population data [C]//Proceedings of Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2003, 2688: 821-829.
- [10] Johnson A Y, Sun J, Bobiek A. Using similarity scores from a small gallery to estimate recognition performance for larger galleries [C]//IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures. Washington DC, USA: IEEE, 2003, 100-103.
- [11] Wang R, Bhanu B. Predicting fingerprint biometrics performance from a small gallery [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(1): 40-48.
- [12] Liu J, Sun Z N, Tan T N. Iris image deblurring based on refinement of point spread function [M]//Biometric Recognition. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 184-192.
- [13] Kien N, Clinton F, Sridha S, et al. Quality-driven super-resolution for less constrained iris recognition at a distance and on-the-move [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(4): 1248-1258.
- [14] Kang B J, Park K R. Restoration of motion-blurred iris images on

- mobile iris recognition devices[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(11): 117-120.
- [45] Wei Z S, Sun Z N, Tan T N. Robust and fast assessment of iris image quality[C]//*Proceedings of Int'l Conference on Biometric*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2006, 464-471.
- [16] Ma L, Tan T N, Wang Y H, et al. Personal identification based on iris texture analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(12): 1519-1533.
- [17] Chen J, Hu G S, Xu J. Iris image quality evaluation method based on wavelet packet decomposition[J]. *J. Tsinghua Univ*, 2003, 43(3): 377-380. [陈戟, 胡广书, 徐进. 基于小波包分解的虹膜图像质量评价方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(3): 377-380].
- [18] Feng X H, Ding X Q, Wu Y S, et al. A quality assessment method of iris images[J]. *Journal of Image and Graphic*, 2005, 10(6): 731-735. [冯薪桦, 丁晓青, 吴佑寿, 等. 一种虹膜图像的质量评价算法[J]. 2005, 10(6): 731-735.].
- [19] Chen Y, Sarat C D, Anil K J. Localized iris image quality using 2-D wavelets[C]//*Proceedings of IAPR International Conf on Biometric*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2006: 373-381.
- [20] John D. How iris recognition works[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(1): 21-30.
- [21] Zhang G H, Marcos S. Method of measuring the focus of close-up image of eyes: U. S, Patent 5,953,440. [P]. 1999.
- [22] Jang J, Park K P, Kim J H, et al. New focus assessment method for iris recognition systems[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29: 1759-1767.
- [23] Wan J, He X F, Shi P F. An iris image quality assessment method based on laplacian of gaussian operator[C]//*Proceedings of IAPR Conf on Machine Vision Applications*. Washington DC, USA: IEEE, 2007.
- [24] Lu G M, Qi J Y, Liao Q M. A new scheme of iris image quality assessment[C]//*Proceedings of Int'l Conf Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. Washington DC, USA: IEEE, 2007.
- [25] Craig B, Du Y Z. A selective feature information approach for iris image-quality measure[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3: 572-577.
- [26] Nathan D K, Zuo J Y, Natalia A S, et al. Estimating and fusing quality factors for iris biometric images[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(3): 509-524.
- [27] Li X G, Sun Z N, Tan T N. Comprehensive assessment of iris image quality[C]//*Proceedings of IEEE Int'l Conference of Image Processing*. Washington DC, USA: IEEE Signal Society, 2011: 3117-3120.
- [28] Hugo P. Quality assessment of degraded iris images acquired in the visible wavelength[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(1): 82-95.
- [29] Aditya A, Stephanie S. Iris quality assessment and bi-orthogonal wavelet based encoding for recognition[J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(9): 1878-1894.
- [30] Zuo J Y, Francesco N, Natalia A S, et al. Adaptive biometric authentication using nonlinear mappings on quality measures and verification scores[C]//*Proceedings of IEEE Int'l Conf of Image Processing*. Washington DC, USA: IEEE, 2010: 4077-4080.
- [31] Ye X Y, Yao P, Long F, et al. Iris Image Real-Time Pre-estimation Using Compound BP Neural Network[M]//*Advances in Biometrics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 450-456.
- [32] Pan L L, Xie M. The algorithm of iris image quality evaluation[C]//*Proceedings of Int'l Conference on Communication, Circuits and Systems*. Washington DC, USA: IEEE, 2007: 616-619.
- [33] Emine K, Sonia G S, Bernadette D. A new probabilistic iris quality measure for comprehensive noise detection[C]//*Proceedings of Int'l Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*. Washington DC, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [34] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [35] Soumyadip R, Donald M M. An evaluation of image sampling and compression for human iris recognition[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2007, 2(3): 605-612.
- [36] John D. Effect of severe image compression on iris recognition performance[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(1): 52-61.
- [37] Robert W I, Randy P B, Lauren R K, et al. Effects of image compression on iris recognition system performance[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2008, 17(1): 011015(1-8).
- [38] Zhu X D, Liu Y N, Ming X, et al. A quality evaluation method of iris images sequence based on wavelet coefficients in region of interest[C]//*Proceedings of Int'l Conference on Computer and Information Technology*. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2004: 24-27.
- [39] Ji H, Liu C Q. Motion blur identification from image gradients[C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference of Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2008: 1-8.
- [40] Michal D, Libor M, Tomas F. Blurred image restoration: a fast method of finding the motion length and angle[J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 20(6): 1677-1686.
- [41] John D. New methods in iris recognition[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2007, 37(5): 1167-1175.
- [42] Zuo J Y, Natalia A S. Global and local quality measures for NIR iris video[C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference of Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 120-125.

- [43] Schuckers S A C, Schmid N A, Abhyankar A, et al. On techniques for angle compensation in nonideal iris recognition[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2007, 37(5): 1176-1190.
- [44] Elias D G, Moshe E. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(6): 1124-1133.
- [45] Hugo P. Iris recognition: on the segmentation of degraded images acquired in the visible wavelength[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1502-1516.
- [46] Tan C W, Ajay K. Unified framework for automated iris segmentation using distantly acquired face images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(9): 4068-4079.
- [47] Li Y H, Marios S. An automatic iris occlusion estimation method based on high dimensional density estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(4): 784-796.
- [48] Li H Q, Sun Z N, Tan T N. Robust iris segmentation based on learned boundary detectors[C]//Proceedings of IAPR International Conference on Biometrics. Washington DC, USA: IEEE, 2012: 317-322.
- [49] Zuo J Y, Schmid N A. An automatic algorithm for evaluating the precision of iris segmentation[C]//Proceedings of IEEE Int'l Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems. Washington DC, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [50] Jang J, Kim K, Lee Y B. Efficient algorithm of eye image check for robust iris recognition system[J]. Computer Analysis of Images and Patterns, 2003, 2756: 301-308.
- [51] Tabassi E, Grother P, Salamon W. IREX II-IQCE iris quality calibration and evaluation[R]. Washington DC, USA: NIST, 2011.
- [52] Moorthy A K, Bovik A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 513-516.
- [53] Moorthy A K, Bovik A C. Blind image quality assessment: from natural scene statistics to perceptual quality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3350-3364.
- [54] Michele A S, Bovik A C, Christophe C. Blind image quality assessment: a natural scene statistics approach in the DCT domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3339-3352.
- [55] Dong W B, Sun Z N, Tan T N, et al. Quality-based dynamic threshold for iris matching[C]//Proceedings of IEEE Int'l Conference on Image Processing. Washington DC, USA: IEEE Signal Society, 2009: 1949-1952.
- [56] Jang Y K, Kang B J, Park K R. A study on eyelid localization considering image focus for iris recognition[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(11): 1698-1704.
- [57] Dong W B, Sun Z N, Tan T N. Iris matching based on personalized weight map[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(9): 1744-1757.