

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106201

可见光虹膜采集质量评估与精确定位系统设计

李晓宇 孟令军 王佳军 薛志凌

(中北大学 仪器与电子学院 太原 030051)

摘要:针对虹膜采集设备昂贵和可见光虹膜采集易受光照不均、光斑、镜面反射、睫毛遮挡等干扰导致图像质量差、虹膜定位困难的问题,设计出一种可见光下采集虹膜图像并质量评估与虹膜定位系统。该系统以 Raspberry Pi 3B+ (RPi 3B+) 为核心,驱动 IMX477R 图像传感器采集多张眼部图像。首先采用 MSRCR 算法对图像增强对比度和拉格朗日插值法去除光斑,然后采用 Tencgrad 函数评估图像清晰度质量,最后采用灰度特性阈值化和 Daugman 圆梯度算法定位虹膜内边缘以及采用微小区域搜索法和混合测地线区域曲线演化法定位虹膜外边缘。测试结果表明,虹膜采集系统运行稳定,性价比高,图像质量评估合格率达 84%,虹膜定位准确率达 91%。

关键词:质量评估;虹膜定位;树莓派 3B+;圆梯度算子;混合测地线区域曲线

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Design of iris collection quality evaluation and accurate positioning system based on visible light

Li Xiaoyu Meng Lingjun Wang Jiajun Xue Zhiling

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the iris collection equipment is expensive and the image quality is poor and the iris positioning is difficult due to the iris collection based on visible light is susceptible to uneven illumination, light spots, specular reflection, eyelash occlusion, etc. A system for collecting iris images based on visible light and evaluating quality and iris positioning is designed. The system takes Raspberry Pi 3B+ (RPi 3B+) as the core and drives the IMX477R image sensor to collect multiple eye images. First, the MSRCR algorithm is used to enhance the contrast of the image and the Lagrangian interpolation method is used to remove the effect of the light spot. Second, the Tencgrad function is used to evaluate the image sharpness quality. Finally, the inner edge of the iris was positioned by the gray characteristic thresholded and Daugman circular gradient algorithm, and the outer edge of the iris was positioned by the small area search method and hybrid geodesic area curve evolution method. The test results show that the iris acquisition system is stable and cost-effective, the image quality evaluation pass rate reaches 84% and the iris positioning accuracy rate reaches 91%.

Keywords: fabric appraisal; iridic polarization; RPi 3B+; spherical gradient algorithm; hybrid geodesic district camber

0 引言

虹膜以普遍性、稳定性、防伪性、非接触性等安全性能优势成为 21 世纪最具研究潜力的生物识别技术。目前传统虹膜采集方法是在 832~872 nm 近红外光源下采集眼部区域,采集条件苛刻,用户高度配合,图像理想,但长期照射会对人眼造成损害;而可见光源下虹膜采集因采集条件普遍、采集设备简单成为研究热点^[1],但眼部区域受到光斑、镜面反射等不利因素导致虹膜纹理特征减少。因虹膜约有 266 个量化特征点,以上干扰不会增加识别错误率,但图像

会存在质量不高,纹理不清晰,给定位分割造成困难。国内外已有解决方案,Lopez 等^[2]提出基于一个通用 32 位微处理器和几个协处理器构成嵌入式软硬件协同设计的高速虹膜识别算法并在 FPGA 上实现;罗晓庆等^[3]提出根据灰度分布特征建立以虹膜完整性、清晰度和可见度 3 方面评判的图像质量评价模型;尹思璐等^[4]提出 Viola-Jone 算法、滑动窗口和镜面反射评价因子的多测度级联型的可见光虹膜图像质量评价方法。上述算法模型对虹膜图像评估准确度高但对设备性能要求高。

眼睑、巩膜、虹膜、瞳孔等组织形成人眼。虹膜定位指

收稿日期:2021-03-29

分离出瞳孔与巩膜间的纹理信息区。如张海珊^[5]提出用 Tenegrad 清晰评价函数对图像质量评价和 BP 神经网络对虹膜纹理质量评价后用 HOG+SVM 分类模型进行虹膜初定位,最后用拟合圆法和混合测地线演化法精确定位虹膜的内外边缘方法;穆琚等^[6]提出基于距离约束的 Hough 变换的先外后内虹膜边界定位算法。上述算法适用于干扰较弱但不能有效定位边缘模糊、眼睑遮挡的虹膜图像。

综上所述,可见光虹膜图像受光强、镜面反射、遮挡、失焦等干扰导致图像质量差而虹膜定位困难问题,本文提出基于树莓派和高清摄像头采集多张眼部图像,对虹膜图像清晰度进行质量评估,对满足定位要求的图像进行虹膜定位的系统,降低采集设备成本的同时提高虹膜定位准确率。

1 总体方案设计

本系统设计以 Raspberry Pi 3B+ 处理器为核心,还包括电源稳压检测、距离探测、高清摄像头、图像存储、显示屏 5 大模块。系统上电初始化后等待距离传感器检测摄像头前是否有人,若无人,系统待机;若有人,启动摄像头并进行图像显示,待用户配合好后拍多张眼部图像,然后进行图像质量评估和虹膜定位。本系统的工作原理结构组成如图 1 所示。

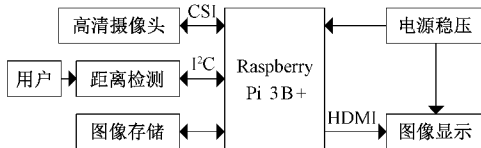


图 1 系统工作原理结构组成

2 硬件设计

2.1 电源稳压检测模块设计

电源系统采用 AC-DC 隔离开关电源,树莓派使用肖特基二极管输出的 5 V/3 A 电源,其作用是防止电流倒灌损坏设备。隔离开关电源稳压检测工作电路如图 2 所示。输入端的延时型保险丝 F_1 判别浪涌或短路电流以快速熔断保护供电系统,控制器 TOP244YN 的 C 端与 S 端并联电容以防止控制端出现高频干扰而触发断电误动作,稳压器 TL431 与光耦合器 LTV817A 联合反馈控制器端输入电流以稳定输出电压,稳定的电压和强劲的电保证了树莓派发挥出超强性能。

2.2 树莓派设计

降低硬件成本、提高便捷性、保证图像质量评估和定位算法的准确率,该设计选择 Raspberry Pi 3B+ 做开发和应用,它拥有 ARM Cortex-A53 1.4 GHz 64 位四核处理器、400 MHz VideoCore IV GPU、1 GB DDR2 内存、板载 16 GB MicroSD 卡、CSI 摄像头接口和 HDMI 高清接口、GPIO 接口\USB 接口等优势^[7]。RPi 3B+ 电路板如图 3 所示。目前市场上虹膜采集设备价格在 20 万以上,而树莓派以高性价比和超强性能满足系统设计。

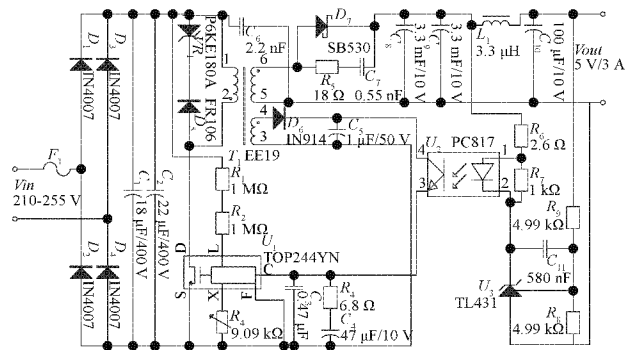


图 2 隔离开关电源稳压检测电路

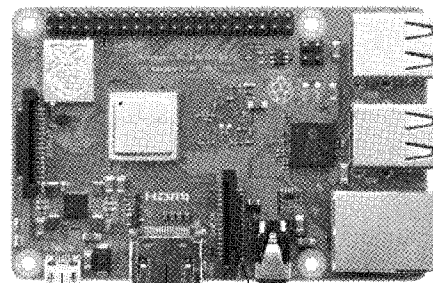


图 3 RPi 3B+ 电路板

2.3 高清摄像头设计

树莓派高清摄像头模块 (Raspberry Pi HQ Camera) 采用 IMX477R 图像传感器,拥有高分辨率 (1 230 万像素) 和高灵敏度 (单像素尺寸: $1.55 \mu\text{m} \times 1.55 \mu\text{m}$),采用背光式成像技术可实现在低照度下拍摄高质量图像。搭配 8~50 mm 变焦镜头实现高质量图像的采集。技术指标如表 1 所示。摄像头模块输出 RAW10 格式数据给树莓派以转换为其他图像格式。RPi 3B+ 高清变焦摄像头如图 4 所示。

表 1 镜头技术指标

名称	像面尺寸	焦距/mm	通光孔径	物距/cm	视场角
参数	1/2.3"	8~50	F1.4	≥ 20	$45^\circ \sim 5.35^\circ$

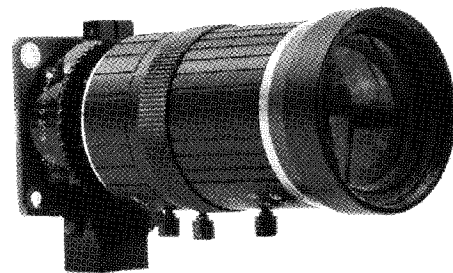


图 4 RPi 3B+ 高清变焦摄像头

3 软件程序设计

3.1 图像增强与光斑消除

图像增强算法有单尺度 Retinex 增强算法(SSR)^[8]、多尺度 Retinex 增强算法(MSR)^[9]、Frankle McCann Retinex 增强算法(FMR)和带色彩恢复的 Retinex 增强算法(MSRCR)^[10] 4种。由于可见光虹膜图像存在光照不均、光斑、对焦模糊等干扰导致图像质量差,需进行图像增强与光斑消除来提高质量评估合格率和边缘定位精确率^[11]。本设计采用带色彩恢复 Retinex 增强算法对图像增强对比度,它能在边缘锐化、动态范围围聚、色彩正常化3个方面达到平衡,其计算公式如式(1)所示。

$$R_{MSRCR_i}(x,y) = C_i(x,y)R_{MSR_i}(x,y)$$

$$C_i(x,y) = f[I'_i(x,y)] = f\left[\frac{I_i(x,y)}{\sum_{j=1}^N I_j(x,y)}\right]$$

$$f[I'_i(x,y)] = \beta \log[\alpha I'_i(x,y)] = \beta \{\log[\alpha I'_i(x,y)] - \log\left[\sum_{j=1}^N I_j(x,y)\right]\}$$

$$R_{MSR_i}(x,y) = \sum_k^K w_k \{\log S(x,y) - \log[F_k(x,y) \cdot S(x,y)]\}$$

式中: $R_{MSRCR_i}(x,y)$ 为增强对比度后图像; $C_i(x,y)$ 表示第*i*个通道的彩色回复因子,*i*取值为1、2、3; $R_{MSR_i}(x,y)$ 为MSR算法执行后图像; $f[I'_i(x,y)]$ 为第*i*个通道图像的颜色区间映射公式; β 为增益系数; α 为被控制的非线性强度值; K 取值为3; $S(x,y)$ 为初始虹膜图像; $F_k(x,y)$ 为高斯中心环绕公式。

经过MSRCR算法处理图像后,像素值可能会出现负值,需改变增益 Gain,偏差 Offest 对图像进行修正,其表达式如式(2)所示。

$$R_{MSRCR_i}(x,y)' = G \cdot R_{MSRCR_i}(x,y) + O \quad (2)$$

式中: G 为增益 Gain; O 为偏差 Offest。

根据光斑发白、连通区域小的特点,使用灰度值与面积大小确定坐标位置后经拉格朗日插值法消除光斑^[12]。实验过程:1)将虹膜图像转换为8位数据深度的灰度图像格式;2)利用阈值法(阈值 $T=248$)把灰度图像转变成二值化图像;3)用形态学法进行开运算获取光斑边缘位置,然后将二值化是1的像素连通并小于600像素的定为光斑;4)用3次差值多项式进行光斑消除并修复图像,其表达式如式(3)所示。

$$L_n(x) = \sum_{j=0}^{n-1} y_j \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{n-1} \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \quad (3)$$

式中: $L_n(x)$ 为光斑消除修复后灰度值,*n*取值为4; y_i 为光斑区域外灰度值; x_i 为像素列坐标。插值示意图如图5所示。其中*p*为光斑内一点,*x*为列坐标, $p_0 \sim p_3$ 为光斑外

的4点, $x_0 \sim x_3$ 为它们的列坐标。

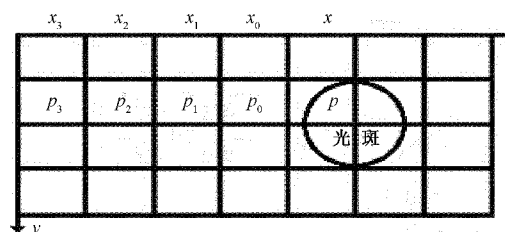


图5 3次插值法示意图

3.2 图像质量评估

图像质量评价(image quality assessment, IQA)是一种对图像进行特征分析而评估图像失真度的技术^[13]。图像采集过程中因用户半睁眼或瞳孔收缩小导致虹膜区域太小、因瞳孔中心偏离或斜视导致虹膜区域不完整、因光照不均或对焦不准导致虹膜图像模糊等情况造成虹膜图像质量差,本设计采用 Tenegrad 清晰评价函数中 Sobel 算法与图像卷积获取两组水平垂直方向梯度值进行图像质量评估,梯度值越大图像边缘越锐利,代表图像越清晰^[14]。Sobel 梯度值 F 的表达式如式(4)所示。

$$F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} / (M \times N) \quad (4)$$

式中: $G_x(x,y)$ 、 $G_y(x,y)$ 为各像素(*x,y*)的 Sobel 算法卷积结果; M 、 N 为图像长宽尺寸。

图像清晰不代表虹膜纹理也清晰,本设计采用小波变换(WT)方法进行虹膜质量评估,通过获取虹膜纹理小波系数来描述纹理信息^[15]。其计算公式如式(5)所示。

$$WT(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * \Psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad (5)$$

式中: α 为尺度,影响伸展与收缩程度; τ 为平移量,影响位移程度。

选择不同的小波基理论上对图像小波变换处理获得的虹膜纹理信息应不相同,经实验分析比较,不同的小波基对图像小波变换处理获得的纹理信息相似。因此选用 db2 作为小波基对图像进行3次小波分解,获得的特征系数最好。WT处理3次示意如图6所示。虹膜图像第1次小波处理得到1幅低频子图和3幅高频子图,第1幅低频子图第2次小波处理再得到1幅低频子图和3幅高频子图,第2幅低频子图第3次小波处理再得到1幅低频子图和3幅高频子图,不改变所有高频子图信息。其中 L 表示低频图, H 表示高频图,数字表示小波处理次数。 LL 表示低频比例带,可看作二维图像缩略图信息; HL 、 LH 和 HH 表示高频比例带,包含图像方向性细节特征,其中 HL 表示的是水平方向细节特征, LH 表示的是垂直方向细节特征, HH 表示的是对角线方向细节特征。

3.3 虹膜边缘定位

想要获取到虹膜图像需对虹膜内外边缘进行定位,它是后续虹膜特征编码匹配的关键前提。本设计采用灰度特

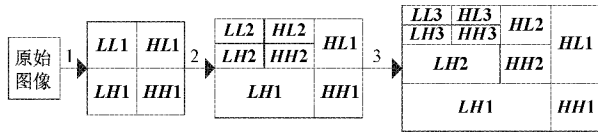


图 6 WT 处理 3 次示意图

性阈值化和 Daugman 圆梯度算法完成虹膜内边缘定位, 然后通过微小区域搜索法与混合测地线区域曲线演化法完成虹膜外边缘定位。

首先用 γ 压缩法提高归一化图像对比度。其表达式如式(6)所示。

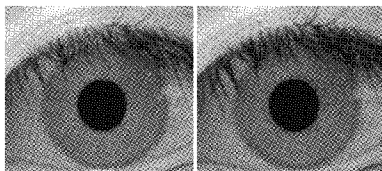
$$I_1(x, y) = I(x, y)^{\gamma} \quad (6)$$

式中: $I(x, y)$ 为原图像; $I_1(x, y)$ 为压缩后图像; γ 取值 0.5。

然后进行一次闭运算, 其目的是削弱图像中比设定的圆形结构元素小的暗色局部细节, 而不改变图像原有的灰度特性。因睫毛呈似长方形结构, 选用半径为 2, 元素值为 1 的圆形结构元素来消除睫毛、暗斑等噪声。其表达式如式(7)所示, 且结果如图 7 所示, 使得睫毛暗色区域相互连接起来。

$$I(x, y) \cdot b = (I(x, y) \oplus b) \otimes b \quad (7)$$

式中: $I(x, y)$ 表示虹膜图像; b 表示结构元素; $I(x, y) \oplus b$ 为先进行膨胀运算; $I(x, y) \otimes b$ 为后进行腐蚀运算。



(a) 去光斑后图像 (b) 闭运算后图像

图 7 闭运算结果

由灰度特征知, 瞳孔灰度值 < 虹膜灰度值 < 巩膜灰度值。利用该区别得到灰度特征直方图如图 8 所示。从图中可以看出有 4 个峰峰值, 从左到右依次为瞳孔、虹膜、眼睑、巩膜。

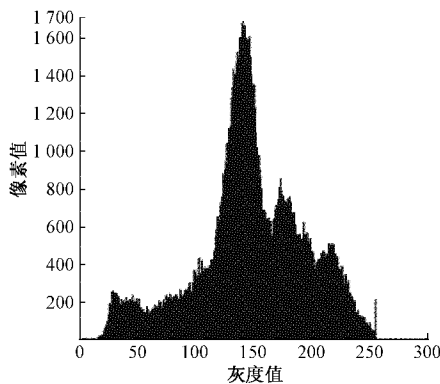


图 8 灰度特征直方图

采用阈值法对闭运算后的图像阈值化处理^[16], 取灰度

图中第 1 个峰值右侧的值 $T = 40$ 为阈值, 其表达式如式(8)所示。

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: B 表示进行阈值转换后图像, $I(x, y)$ 表示像素灰度值。小于阈值的像素灰度为 255, 其他为 0, 只有黑白两种颜色, 容易定位出瞳孔边缘。结果如图 9 所示。

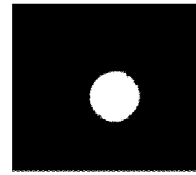


图 9 阈值化结果

根据瞳孔为圆形特点在灰度阈值化结果图中分别找出灰度值为 255 的 4 个像素点最大、最小的纵横坐标, 对纵横坐标取均值暂定为瞳孔圆心和半径。其表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} I(x_p, y_p) = I\left(\frac{x_{ave} + x_{mid}}{2}, \frac{y_{ave} + y_{mid}}{2}\right) \\ x_{ave} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}, y_{ave} = \frac{y_{min} + y_{max}}{2} \\ r_p = \frac{\frac{x_{max} - x_{min}}{2} + \frac{y_{max} - y_{min}}{2}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I(x_{min}, y_{mid}), I(x_{max}, y_{mid}), I(x_{mid}, y_{min}), I(x_{mid}, y_{max})$ 表示瞳孔左右上下边界点。

最终采用瞳孔圆心粗略坐标位置和 Daugman 的圆梯度算子相结合以精确定位瞳孔边缘。Daugman 圆梯度算法计算公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} \max \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \int_{(r, x_0, y_0)} \frac{I(x, y)}{2\pi r} \right| \\ G_\sigma(r) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) e^{-\frac{(r - r_0)^2}{2\sigma^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $G_\sigma(r)$ 为以 σ 为标准差的高斯算子, 作用为平滑滤波去除噪声; $*$ 为卷积运算; $I(x, y)$ 为像素点灰度值; x_0 取值为 $(x_p - 8, x_p + 8)$; y_0 取值为 $(y_p - 8, y_p + 8)$; r 取值为 $(r_p - 8, r_p + 8)$, 表示以 (x_0, y_0) 为圆心, r 为半径, 计算每两个相邻圆的圆周上点的灰度均值的差。当差值最大时, 对应的圆参数 (r, x_0, y_0) 就是瞳孔圆心。

正常虹膜图像, 瞳孔半径在 [30, 55] 像素之间, 虹膜半径在 [80, 130] 像素之间。鉴于虹膜外边界也呈似圆形, 将它当成圆形处理, 但不把这两圆当成同心圆, 圆心距大概在 [0, 10] 像素之间。因虹膜内部区域的灰度值基本不变, 本文设计了一个具有方向性的 4×4 正方形边界检测模版, 且模版灰度值与虹膜区域灰度值在同一范围^[17]。正方形边界检测模版选择示意如图 10 所示。

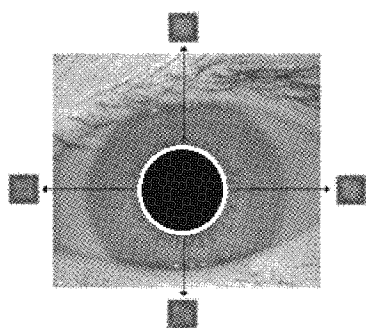


图 10 正方形边界检测模版选择示意图

计算模板内所有像素点的灰度均值,定义为 N_{up} 、 N_{down} 、 N_{left} 和 N_{right} ,其表达式如式(11)所示。

$$\begin{aligned}
 N_{up} &= \frac{\sum_{x=x_0-2}^{x=x_0+2} \sum_{y=y_0-r-5}^{y=y_0-r-1} I(x,y)}{4 \times 4} \\
 N_{down} &= \frac{\sum_{x=x_0-2}^{x=x_0+2} \sum_{y=y_0-r+5}^{y=y_0-r+9} I(x,y)}{4 \times 4} \\
 N_{left} &= \frac{\sum_{x=x_0-r-5}^{x=x_0-r-1} \sum_{y=y_0-2}^{y=y_0+2} I(x,y)}{4 \times 4} \\
 N_{right} &= \frac{\sum_{x=x_0-r+1}^{x=x_0-r+5} \sum_{y=y_0-2}^{y=y_0+2} I(x,y)}{4 \times 4}
 \end{aligned} \tag{11}$$

将检测模板从瞳孔边界以每次 1 个像素点向虹膜外边界移动,记录每次移动后模板区域范围内所有像素点的灰度均值并与检测模板灰度均值相比较,求其梯度差值。瞳孔灰度值在[30,50]之间,虹膜灰度值在[90,160]之间,巩膜和眼睑灰度值在[160,250]之间,此时当灰度均值是模板均值的 1.5 倍以上时,检测模板已经邻近虹膜外边界,记录下梯度差值较大的模板信息点 A_{up} 、 A_{down} 、 A_{left} 、 A_{right} 和移动了 m_i 步。

混合测地线区域曲线演化法融合了测地线和区域主动轮廓的能量函数^[18],能获得图像数据的能量函数,依据所得能量函数进行曲线演化使曲线上的每个点最好地近似,即曲线点周围的局部区域能量最小。把以上 4 个点作为虹膜初始化区,以它的边缘为初始演化曲线,代入式(12)中演化。实验中演化运算设置为 500 次时曲线附近区域的能量最少从而获得虹膜外边界。

$$\begin{aligned}
 C_i(s) &= \left[\int_{x \in \Omega} (I_x(x,s) - u_r(s))^2 + \int_{x \in \bar{\Omega}} (I_x(x,s) - v_l(s))^2 \right] \kappa N - \oint_{C_r} (u_r(r) - v_r(r))(2I_x(x,s) - u_r(r) - v_r(r)) dr N
 \end{aligned} \tag{12}$$

式中: $r, s \in [0, L(C)]$, $L(C)$ 为曲线 C 的尺寸,参数 r 反复替换其上的每个点。 κ 表示曲线的高斯曲率,只有在演化到点 $C(s)$ 附近的点时才更新 χ 函数, N 表示曲线的法线。

4 实验与结果分析

本文的测试数据选自虹膜数据库 UBIRIS V1.0 中的 80 个对象共 400 张图像和采集朋友的 80 张图像,同时包含存在遮挡、闭眼、模糊、斜视等干扰的 50 张图像。从虹膜采集到质量评估再到虹膜定位 3 方面进行系统设计,结果符合设想。代表性图像如图 11 所示。干扰特别严重的图像在质量评估阶段时排除,减轻系统运行负担。

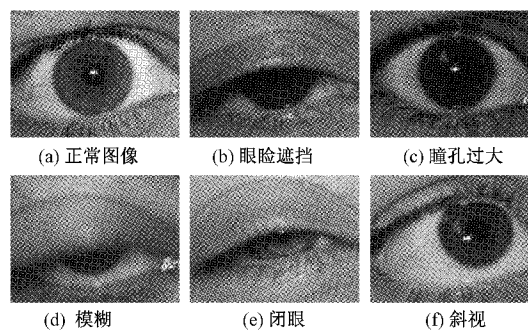


图 11 干扰代表性因素图像

硬件系统由树莓派、高清摄像头、距离传感器、补光灯、7 寸显示屏组成,软件环境使用 python3.6、pandas 库、OpenCV4.1、2019-09-26-raspbian-buster 等编程。

图像增强中设置最大尺度为 300,尺度数量为 3,对比度为 2.8,尺度分布方式为平均分布,能达到很好的增强效果。睫毛、瞳孔色度、边缘颜色区分度明显增强,眼皮肤色对比度弱化,处理每张图像大概用时 150 ms。在确定光斑位置后用相邻的色素灰度消除光斑灰度。图像增强和光斑去除效果如图 12 所示。

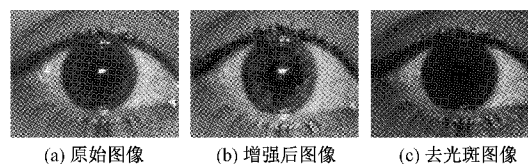


图 12 图像增强和光斑去除效果

在图像质量评估中,各取 100 张清晰图像和非清晰图像,分析得出阈值设为 5.9 时很好地区分出图像清晰度。然后将 3 次小波分解后的低频子图的小波系数作为虹膜纹理质量的特征值,结果如图 13 所示。

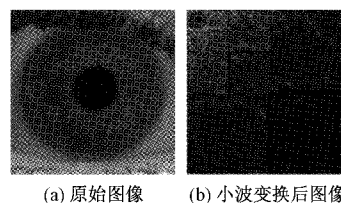


图 13 三次小波变换结果

经过实验,在同一数据集中,系统选取出的清晰图像与人员亲自区分图像质量结果基本一致。选取出较好图像进

行定位,虹膜内边缘定位结果如图14所示。从图14中知粗定位与精定位的区别在瞳孔与虹膜边界标定误差,造成原因分别为瞳孔圆心位置计算误差和虹膜内边界纹理颜色偏深误差。虹膜外边缘定位过程结果如图15所示。演化次数越多,定位越精确,干扰区越少。

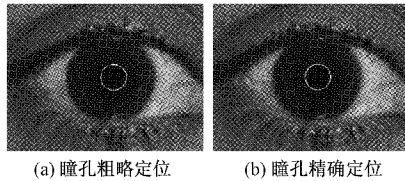


图14 虹膜内边缘定位结果

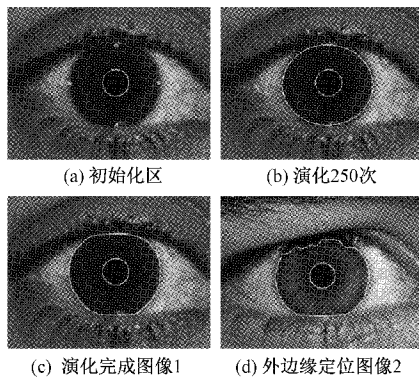


图15 虹膜外边缘外定位结果

与传统Daugman微积分定位算法和Hough变换定位算法比较,本设计排除了眼睑遮挡导致的虹膜无用纹理信息区但用时稍长,本文算法定位准确率达91%,单张处理时间60s。实验结果如表2所示。

表2 3种算法比较结果

算法名称	平均时间/s	准确率/%
Daugman 微积分	50	85
Hough 变换	47	87
本文算法	60	91

5 结 论

虹膜采集识别系统中,图像质量评估和虹膜定位是准确提取虹膜纹理信息的关键前提,本文设计了一种基于Raspberry Pi的可见光下采集高质量虹膜图像并虹膜定位系统,既降低硬件成本又提高了运算速率。通过多种算法相结合进行定位,能很好地排除光斑、眼睑和睫毛遮挡等干扰,对虹膜定位分割有更强的鲁棒性。未来希望在移动端和远距离采集上进一步研究改进。

参考文献

[1] 陈俊杰,曾傲.可见光虹膜识别综述[J].信息通信,2020(1):24-26.

- [2] LOPEZ M, DAUGMAN J, CANTO E. Hardware-software co-design of an iris recognition algorithm[J]. IET Information Security, 2011, 5(1): 60-68.
- [3] 罗晓庆,周响金.基于灰度特征的虹膜图像质量评价方法[J].微计算机信息,2012,28(10):258-260.
- [4] 尹思璐,孙洪林,刘笑楠,等.级联型多测度可见光虹膜图像质量评价方法[J].微处理机,2018,39(5):46-52.
- [5] 张海珊.融合图像质量评价的可见光虹膜定位方法研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [6] 穆珺,晏峻峰,彭清华,等.基于霍夫变换的可见光虹膜图像定位[J].计算机技术与发展,2017,27(5):40-45.
- [7] 汪乐章,林娴,唐伊文,等.基于树莓派与计算机视觉的家庭火灾报警系统的设计与研究[J].电子测量技术,2019,42(8):83-87.
- [8] 李武劲,彭怡书,欧先锋,等.基于改进Retinex算法的低照度图像增强方法[J].成都工业学院学报,2020,23(2):20-25.
- [9] 牛志忠,杨坤.一种基于多尺度Retinex的夜间图像增强算法[J].现代信息科技,2020,4(17):66-68,71.
- [10] 李锦,王俊平,万国挺,等.一种结合直方图均衡化和MSRCR的图像增强新算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2014(3):103-109.
- [11] 杜永生,黄传波.基于质量度量与颜色校正的多曝光图像融合算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(1):90-98.
- [12] 苏正君.拉格朗日插值法算法浅解[J].电子设计技术,2014(2):24-24.
- [13] 刘韡.基于BP神经网络的虹膜图像质量分类方法的研究[D].山东:山东师范大学,2015.
- [14] 刘笑楠,张文云,高艳娜.局部置乱结合双随机相位编码的双虹膜身份模板保护方法[J].仪器仪表学报,2020,41(6):233-239.
- [15] 赵勇,雷欢,马敬奇,等.迁移模式下卷积神经网络在虹膜识别中的应用[J].电子测量技术,2020,43(9):114-120.
- [16] 边世哲,艾萍,岳兆新.基于灰度及形态特征融合的Micro-CT图像纤维束识别方法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(5):70-74.
- [17] 刘成森,邱玥,鲍洁,等.任意边界形状物体的三维轮廓测量[J].辽宁师范大学学报(自然科学版),2015(4):470-474.
- [18] 徐杨,吴成东,陈东岳,等.采用测地线活动轮廓模型检测与跟踪运动目标[J].控制理论与应用,2012,29(6):747-753.

作者简介

李晓宇,硕士研究生,主要研究方向为电路设计、模式识别。

E-mail:1745819038@qq.com

孟令军,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为集成测量系统及仪器、数字图像处理技术。

E-mail:467978439@qq.com