

影响虹膜图像质量的关键问题研究

虹膜识别作为最准确、最安全的生物特征识别技术之一，在当今信息安全领域中起着越来越重要的作用，而虹膜图像采集质量的高低决定了虹膜识别的准确率和稳定性。基于虹膜采集技术和光学成像原理，深入剖析光学镜头和图像传感器对虹膜图像质量的重要影响，并且在理论上阐述了提高虹膜图像质量的关键问题和限制因素。

李 萌/公安部第一研究所证件技术事业部

0 引言

虹膜识别是一种新兴的生物特征识别技术，其具体原理是通过采集虹膜图像，提取和比对虹膜纹理特征点之间的差别来识别身份。由于其生理特点和技术特点，虹膜识别技术相比于传统的指纹、人脸等生物特征识别技术具有唯一性、稳定性和高度的防伪性等优势。

虹膜图像采集是虹膜识别技术中一个非常重要的环节，高质量的虹膜图像能够明显提高虹膜识别的准确率和识别速度。本文从光学镜头和图像传感器的角度出发，基于虹膜采集技术和光电成像原理，深入分析前端采集模块的设计对虹膜图像质量的重要影响，并且在理论上阐述提高虹膜图像质量的关键参数和限制因素。

1 光学镜头对虹膜图像质量的影响

光学镜头的作用是收集从虹膜反射的光线并形成光学图像。由于光波的衍射作用和镜头的质量因素，采集系统无法对虹膜进行理想成像。本节主要介绍光波衍射理论和镜头质量对虹膜图像的影响。

1.1 光波衍射理论对虹膜图像的影响

由光波衍射理论可知，当一个波长为 λ 的点光源发出的光通过口径为 D 的圆孔，并且 λ 与 D 在同一个数量级时会发生光的衍射现象，点光源在图像传感器上所成的像将不再是一点，而是一个光斑，这个光斑称为艾里斑，如图1所示。

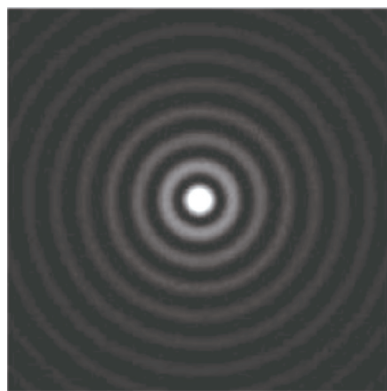


图1 艾里斑示意图

艾里斑的大小与点光源的波长 λ 、光学镜头的通光口径 D 有关，其半径计算公式为

$$\Delta r = 1.22 \frac{\lambda}{D} f \quad (1)$$

当两个物点过于靠近时，由于衍射产生的艾里斑将会部分重叠在一起，从而不能分辨出两点所成的像。根据瑞利判据可知，两个像点刚好被分辨的分辨极限距离是一个艾里斑与相邻的艾里斑的第一级暗环重合，计算公式为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{D} f \quad (2)$$

由式(2)可知，光学镜头最小分辨的距离与通光口径成反比。

由于虹膜图像采集是在仅有约1 cm

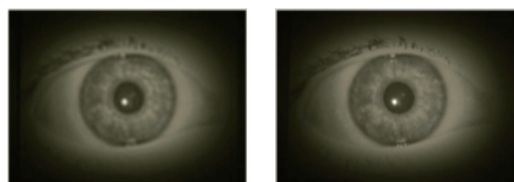


李 萌/工程师

关键词/Keywords

虹膜采集技术 ·
虹膜图像质量 ·
光学镜头 ·
图像传感器 ·
虹膜图像质量 ·

直径的圆形区域内对复杂的虹膜纹理进行成像，因此，光圈的大小会对虹膜成像的分辨率产生明显差别，如图2所示。



(a) 光圈设置为F/8 (b) 光圈设置为F/4

图2 光圈对虹膜图像分辨率的影响

在图2中，光源波长为850 nm，镜头焦距为40 mm，图2a中光圈设置为F/8，即镜头的通光口径为5 mm，图2b中光圈设置为F/4，即镜头的通光口径为10 mm。由图2可见，当光圈增大时，两点之间可分辨的距离 Δx 更小，虹膜图像显示的虹膜纹理更清晰。

但是，研究衍射理论对虹膜成像影响的同时需要考虑景深的因素，景深的计算公式为

$$\text{DoF} \approx 2\delta \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (3)$$

式中， δ 为弥散圆的直径。

可见，光学镜头的景深与通光口径成正比。当通光口径因为衍射的原因增大时，景深会变得更小。因此，光波衍射理论和景深对虹膜图像质量产生矛盾的影响，在实际的虹膜采集系统中，景深的影响对虹膜图像质量影响更大。

1.2 镜头质量对虹膜图像的影响

虹膜图像质量不仅受到光波衍射极限的制约，光学镜头的材料和质量也会对虹膜图像的清晰度产生影响。模型化的塑料镜头虽然工艺比由多镜片组成的非球面镜头简单，成本也更低，但是成像质量更差。对于成像面积小但纹理复杂的虹膜成像来说，塑料镜头带来了更多的像差和离焦模糊，不适合虹膜采集系统的应用。

在光学镜头的设计中，调制传递函数（MTF）是一个公认的测试镜头成像质量的重要参数。用待测光学镜头对正弦光栅进行光学成像，理想情况下，光栅所成像的亮度最大值为

$I_{\max}$ ，亮度最小值是 $I_{\min}$ 。因此，理想成像的调制度 M 计算公式为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

但是，实际的光学镜头由于光波衍射的作用和像差影响无法达到理想成像，而且图像的对比度会降低，实际成像亮度最大值为 $I'_{\max}$ 、亮度最小值是 $I'_{\min}$ ，调制度 M' 计算公式为

$$M' = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (5)$$

MTF是光学镜头成像的调制度随空间频率变化的函数，因此由式（4）和式（5）可以计算得到光学镜头的调制传递函数为

$$\text{MTF} = \frac{M'}{M} = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \bigg/ \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

由式（6）可知，光学镜头的MTF始终大于0，小于1。并且，MTF越接近1，说明光学镜头所成的虹膜图像与虹膜越接近，镜头的成像质量就越好。光学镜头MTF曲线示意图如图3所示。以图3为例讨论MTF曲线对光学镜头成像质量的影响。由于虹膜区域很小，并且纹理复杂，本文提出的光学镜头MTF指标是在MTF50时达到0.3，符合虹膜图像清晰度的要求。

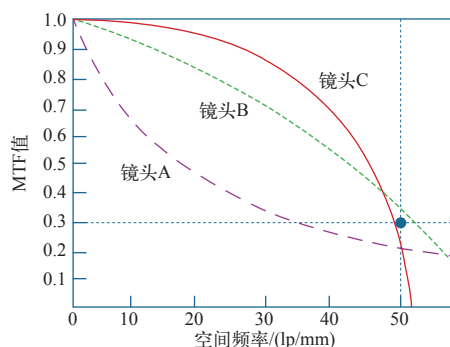


图3 光学镜头MTF曲线示意图

在图3中，横坐标代表光栅的空间频率，即每毫米黑白线对数，lp/mm；纵坐标代表镜头的MTF值。其中，镜头A在空间频率为50 lp/mm以下（低频）时MTF最小；在50 lp/mm以上（高频）时MTF曲线较为平缓，表明通过镜头A成像的虹膜图像锐度较低，分辨率也不高，虹膜纹理不清晰，但是随着空间频率的增大，分辨率下降得并不明

显。镜头B在低频阶段MTF较高,在高频时MTF曲线比镜头A陡,表明镜头B成像的虹膜图像锐度较高,分辨率比镜头A好,但是随着频率的增加,其分辨率下降得比较明显。镜头C在低频阶段MTF值最高,但是高频阶段MTF曲线最陡,表明所成像的锐度最好,但是分辨率随空间频率增高下降得最明显。通过以上的MTF曲线可知,只有镜头B的MTF值在空间频率为50 lp/mm是达到了0.3以上。因此,从光学镜头的质量来看,只有镜头B符合本文提出的虹膜图像采集的清晰度要求。

2 图像传感器对虹膜图像质量的影响

在虹膜采集系统中,图像传感器的作用是将光学镜头收集的光线转换为电信号,以便对图像进行处理。无论是CCD还是CMOS,图像传感器对虹膜图像质量影响两个主要因素是像素和信噪比(SNR)。

2.1 像素对虹膜图像的影响

图像传感器是以像素为单位的光电转换阵列,像素的多少反映的是图像传感器的分辨能力。根据ISO/IEC的虹膜采集相关标准,虹膜区域只有达到150个像素才能符合虹膜图像分辨率的要求,因此,虹膜采集系统至少需要 640×480 的图像传感器才能采集到符合标准的虹膜图像。目前,随着图像传感器技术的不断提高,虹膜采集系统普遍使用的是 $1\,920 \times 1\,080$ 或者 $1\,280 \times 1\,024$ 的图像传感器。但是,清晰的虹膜图像不仅仅需要高像素,每个像素的面积也会对虹膜图像质量产生影响。

虹膜成像示意图如图4所示。假设一个像素的宽度为 a_1 ,光学镜头的放大倍率为 β ,那么根据几何光学理论,在每一个像素上成像的物体宽度计算公式为

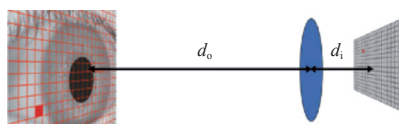


图4 虹膜成像示意图

$$a_o = \frac{a_1}{\beta} \quad (7)$$

再根据像素数量,即可算出图像传感器的成像范围。

一般地,高质量的虹膜图像在虹膜区域占有更多的像素,非虹膜区域比较少。根据这样的条件和式(7)可知,在物距较近的情况下,像素的面积不能太大。但是,当像素的面积太小时,由光波衍射作用引起的衍射斑和由景深产生的弥散圆会占据多个像素,从而导致虹膜图像的清晰度下降。因此,在选择图像传感器的像素参数时,需要同时考虑成像范围和弥散圆的大小,平衡之间的矛盾。

2.2 信噪比对虹膜图像的影响

图像传感器在对入射光子进行光电转换的过程中引入了散粒噪声、读出噪声和暗电流等噪声。

理论上,如果入射光子的数量相同,图像传感器的每个像素产生的光电子数量应该是一致的,但是由于入射光子的随机性,图像传感器中每个像素产生的光电子数量并不一致,而是围绕平均值上下波动,如图5所示。

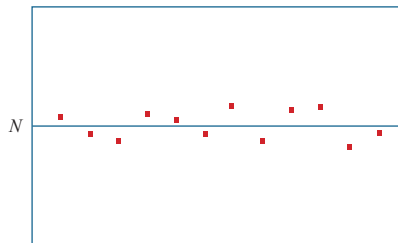


图5 随机噪声示意图

假设图像传感器每个像素接收到的光子数量平均值为 N^* ,传感器噪声可表示为图像传感器接收光子数量的均方差,图像传感器的信噪比计算公式为

$$\text{SNR} = \frac{N^*}{\sqrt{N^*}} = \sqrt{N^*} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,当光照越强,入射光子 N^* 越多时,图像传感器的信噪比SNR越大,图像质量越好。

在虹膜采集系统中,虹膜可以看成是一个朗伯

发光体,则图像传感器的每个像素在单位曝光时间内的信号强度计算公式为

$$S = I \left(\frac{a_i}{\beta} \right)^2 \alpha \sin^2 \theta \frac{\tau_{\text{exp}} \text{QE}}{E_\gamma} \quad (9)$$

式中, α 为反射率; τ_{exp} 为图像传感器曝光时间; QE 为图像传感器的量子效率; $E_\gamma = hc/\lambda$ 。

根据式 (8) 和朗伯发光体的定义, 式 (9) 可写成

$$\text{SNR} = \left(\frac{a_i}{2F} \right) \sqrt{\frac{I \alpha \tau_{\text{exp}} \text{QE} \lambda}{hc}} \quad (10)$$

由式 (10) 可以看出, 虹膜采集系统的信噪比与图像传感器的像素大小、曝光时间成正比, 与光学镜头的 F 数成反比。因此, 增加光子入射的数量和时间可以有效地提高图像的信噪比。另外, 由于虹膜采集照明采用的是 850 nm 的近红外光源, 所以图像传感器的选择应该对 850 nm 的波长具有较高的量子效率。

3 结束语

虹膜图像质量作为虹膜采集技术的一个重要指标越来越受到广泛的关注。本文从光波衍射理论到光学镜头质量, 再到图像传感器的主要参

数, 深入分析了影响虹膜图像质量的关键问题, 提出了提高虹膜图像质量的限制因素和测试图像质量的重要指标, 为实际虹膜采集系统的设计奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 梅江元. 虹膜识别算法关键技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [2] 胡宗星. 虹膜采集关键问题的研究与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [3] 吴岸雄. 虹膜识别关键技术的研究和应用 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [4] 汪良会. 虹膜识别关键技术的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [5] 罗忠亮. 虹膜生物特征的提取与识别 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [6] 宗瑞山, 田启川. 虹膜采集系统中图像质量评估的研究 [J]. 微型机与应用, 2011, 30 (11): 49-51.
- [7] 刑文元. 虹膜图像采集技术及应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

(收稿日期: 2016-12-23) **EA**

(上接第38页)

- 2003, 23 (6): 50-54.
- [4] 祁才君, 王小海. 基于插值FFT算法的间谐波参数估计 [J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 92-95.
- [5] 钱昊, 赵荣祥. 基于插值FFT算法的间谐波分析 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21): 87-91.
- [6] 马秉伟, 刘会金, 周莉, 等. 一种基于自回归模型的间谐波谱估计的改进算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 79-83.
- [7] 莱忠法, 陈隆道. 基于AR谱估计和Adaline神经元的间谐波分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (17): 78-82.
- [8] 熊杰锋. 基于加窗插值和Prony的电力系统间谐波

算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (7): 8-19.

- [9] 丁康, 谢明, 张彼德, 等. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析原理和方法 [J]. 振动工程学报, 2001, 14 (1): 29-35.
- [10] 王继东, 阳官庆, 文晶. 基于改进复调制细化法和加窗值快速傅里叶变换的电力系统谐波分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 64-69.
- [11] 郭瑜, 汤宝平, 纪跃波, 等. 基于解析信号和带通滤波的频率细化分析 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24 (4): 18-25.
- [12] 张德主. MATLAB小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

(收稿日期: 2016-11-20) **EA**