

物方远心双指指纹采集光学系统设计

周路^{1,2} 迟耀丹^{1,2} 郭亮²

¹吉林建筑大学电气与计算机学院, 吉林 长春 130118

²吉林建筑大学吉林省建筑电气综合节能重点实验室, 吉林 长春 130118

摘要 传统的光学式单指指纹采集仪存在采集窗口尺寸小、提取特征点有限以及指纹原始图像梯形畸变严重的问题,直接影响指纹识别的精度。为了获得高分辨率、高识别精度的指纹采集系统,从提高采集窗口尺寸以及校正梯形畸变的角度出发,设计了一种基于双指的物方远心指纹采集光学系统。利用 Zemax 光学设计软件,建立了物方远心光学系统模型,通过合理调整优化函数,平衡各种像差,获得了高成像质量,有效采集窗口尺寸达 40.64 mm×38.10 mm,图像中心视场和边缘视场的调制传递函数值在对应特征频率 167 lp/mm 处均大于 0.4,光学畸变率低于 1%,系统分辨率为 500 dpi。

关键词 光学设计; 指纹采集仪; 物方远心; 梯形畸变; 双指

中图分类号 TP274.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.102201

Optical System Design of Object-Telecentric Dual Finger Fingerprint Scanner

Zhou Lu^{1,2} Chi Yaodan^{1,2} Guo Liang²

¹ School of Electrical Engineering and Computer, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China

² Jilin Provincial Key Laboratory of Architectural Electricity & Comprehensive Energy Saving, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China

Abstract Traditional optical single finger fingerprint scanner has some problems, such as small scanning window, limited extracting feature point, serious trapezoidal distortion of fingerprint original image, which directly affect the accuracy of fingerprint identification. To acquire a fingerprint scanner system with high resolution and high identification accuracy, in this paper, the dual finger fingerprint scanner with object-telecentric optical system is designed, which enlarges the size of scanning window and corrects the angle of the trapezoidal distortion. An object-telecentric optical system model is established by Zemax optical design software. By adjusting the suitable merit function and balancing all kinds of aberration, high imaging quality is acquired. The size of effective scanning window is 40.64 mm × 38.10 mm. The modulation transfer function values of the center and edge view field of image are all bigger than 0.4 with corresponding characteristic frequency at 167 lp/mm, the optical distortion is less than 1%, and the system resolution is up to 500 dpi.

Key words optical design; fingerprint scanner; object-telecentric; trapezoidal distortion; dual finger

OCIS codes 220.4830; 220.3620

1 引言

指纹识别技术是目前最成熟的生物识别手段之一,它利用指纹纹理上的特征点,包括核心点、三角点、分叉点、终点以及它们的相对位置等特征来进行身份识别。因指纹具有防伪性、唯一性加之终身不变性,使其成为确认个人身份的重要生物特征,该技术已被广泛应用于公安、海关、门禁、考勤等领域。

市面上的光学式指纹采集仪多以单指指纹采集仪^[1-2]为主,也有体积更大、分辨率更高的四指指纹采集

收稿日期: 2016-06-12; 收到修改稿日期: 2016-06-28; 网络出版日期: 2016-09-20

基金项目: 吉林建筑大学博士启动基金(861117)

作者简介: 周路(1987—),女,博士,讲师,主要从事指纹仪光学设计方面的研究。E-mail: zhoulu885@163.com

仪^[3]和掌纹采集仪^[4],国内外知名企业如法国的 Morpho、意大利的 Green bit、美国的 Cross match 以及国内的中正科技、方圆光电、鸿达光电子、北大高科等生物识别公司均有相关产品推出。但是具有滚动采集功能的双指指纹仪在国内却鲜有报道。公安部行业标准(GA)的单指指纹图像标准^[5-6]为:采集尺寸 32.5 mm×32.5 mm,分辨率 500 dpi(dot per inch, lin=2.54 cm),达不到国际上关于双指指纹采集仪 40.64 mm×38.10 mm的采集尺寸要求。

另外,光学式指纹采集仪是利用光的全反射原理实现指纹图像采集,为了满足全反射条件,棱镜的指纹采集面与光轴必须存在一定的倾斜^[7],因此采集到的原始指纹图像通常存在严重的梯形畸变,影响指纹特征点的提取和比对。市面上很大一部分指纹采集仪是后期通过软件校正这种梯形畸变的,但由于在梯形“高”的方向截取任何一行的放大倍率都不同,校正时会破坏图像整体识别精度,而且处理难度大,耗时长,因此在光学设计上需要尽量降低这种畸变。辛玉洁等^[8]报道了采用双透镜和球面复合棱镜的方法来校正梯形畸变,虽然将系统畸变控制在 0.5%以内,但是球面复合棱镜的加工和安装都不方便,成本也高。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所黄玮^[9]提出采用柱面系统结合双远心物镜方案得到无畸变的指纹图像,但是整个光学系统的镜片数很多,仅是前组大透镜就有三片,实际装调会有一些的困难,而且光机部分外形尺寸也很大。袁春晓等^[10-11]也采用双远心光路设计方案来校正梯形畸变,但同样光学系统也比较复杂,远心后组的镜片数多达 6 片。

综上所述,设计出大采集面、低畸变、易装调的双指指纹采集仪,满足美国联邦调查局(FBI)标准,对开拓国内和国际市场具有重要意义。本文针对这一课题,提出了一种物方远心双指指纹采集光学系统的设计方案,并对系统进行了像质和公差分析。该系统成像质量高、畸变率低,符合 FBI 相关成像要求,同时结构简单,便于加工。

2 光学设计方案

FBI 对双指指纹采集仪光学设计的基本要求是:有效采集面积不低于 40.64 mm×38.10 mm,物方分辨率 500 dpi,光学畸变率不高于 1%。物方分辨率 500 dpi 的含义是采集面 1 in(2.54 cm)长度对应 500 个像素点,换算到像空间的成像大小为 800 pixel×750 pixel。考虑到指纹经等腰直角棱镜成像后,横向方向相比于竖向方向展宽了约 1.414 倍,那么传感器在分辨率的选择上至少要大于 1130 pixel×750 pixel。另外像元尺寸越大,成像质量就越高,但相应成本也会越高,综合考虑后选择了 OV2710 彩色互补金属氧化物半导体(CMOS)作为成像单元,靶面尺寸 1/3 in(0.847 cm),像元大小 3 μm,设计经验要求光学系统在特征频率 167 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)值接近 0.3,从而保证镜头有很高的解析力。另外,根据物方分辨率 500 dpi 的设计要求,可以计算出物方可分辨的最小尺寸为: $d = \frac{25.4 \text{ mm/in}}{500 \text{ dot/in}} = 50.8 \text{ μm/dot}$,因此光学系统的放大倍率 $\beta = -1.414 \times 3 \div 50.8 \approx -0.083$ 。

指纹采集光学系统相对于一般成像光学系统的设计难点,是物面和像面都存在倾斜,由于不同物距放大倍率不同,即在棱镜上远点成像倍率小,近点成像倍率大,因此正方形图形成像为一梯形,指纹垂直方向被压缩,产生严重的梯形畸变。具体光学设计参数如表 1 所示。指纹采集原理和梯形畸变图像分别如图 1 和图 2 所示。为了校正这种梯形畸变,借鉴了参考文献[3]中的由单独前组和独立镜头后组构成的物方远心光路方案,在此基础上进行系统优化设计。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical system

Parameters	Value
Wavelength	(525 ±15) nm
Fingerprint capture size	40.64 mm × 38.10 mm
Object space NA	0.078
Magnification of lens	-0.083
Distortion	<1%
Pixel size of CMOS sensor	3 μm

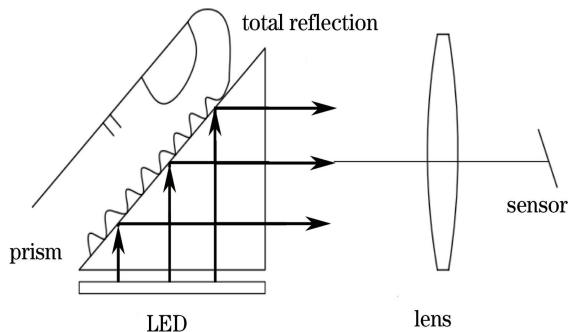


图1 指纹采集仪原理

Fig. 1 Principle of fingerprint scanner

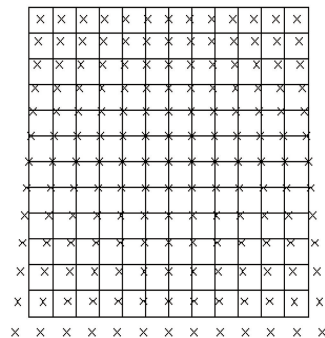


图2 梯形畸变网格变形图

Fig. 2 Grid deformation pattern of trapezoidal distortion

3 结果及分析

3.1 光学设计结果

光学设计采用的是 Zemax 软件,设计时将镜头总长限制在 190 mm 内,并且后截距不小于 5 mm。光学系统如图 3 所示。整个系统除等腰直角采集棱镜外,共由一片式前组和三片式后组构成,孔径光阑设置在后组第一片透镜的光入射面上,并加入两片反射镜进行光路折转,最大程度地减小了系统外形尺寸,同时后组小镜头可以单独实现高质量装调。整个远心光路的结构简单,光机部分的外形尺寸也控制得很小,仅为 $L \times W \times H = 105 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。

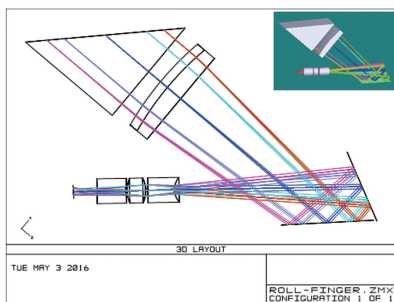


图3 物方远心光学系统光路图

Fig. 3 Light path of object-telecentric optical system

指纹光学系统在采集棱镜的材料选择上有特殊要求,玻璃表面要坚固、耐刮擦,并可预防各种污渍和损害,因此棱镜通常要求硬度较高,并且抗潮湿大气作用稳定性 $R_C(S)$ 和抗酸作用稳定性 $R_A(S)$ 优良,而对其内部透镜材料则没有严格要求。本设计所用的光学玻璃材料均来自于成都光明玻璃库,采集棱镜为常见的 H-K9L 环保玻璃,硬度高, $R_C(S)$ 和 $R_A(S)$ 均为一级,而远心透镜材料依次为 H-LAK2A、H-ZK21、H-LAK5A、ZF51,抗潮湿大气作用稳定性 $R_C(S)$ 也都达到一级,能够满足指纹仪的使用要求,并且各元件曲率、厚度和口径设计合理,易于加工。

3.2 光学系统成像质量评价

图 4 为光学系统的成像点列图,从图中可以看出,该系统的设计质量达到了很高的指标要求,全部视场的均方根(RMS)半径值均小于艾里斑半径,已达到衍射极限。同时该系统也达到了非常好的成像解析度,如图 5 所示,全部视场在特征频率 167 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)值均超过 0.4,达到衍射极限,这与图 4 所得的结论一致。

除了获得高的成像解析度外,控制系统的梯形畸变率是设计要求的另一主要目标。虽然采用更复杂的双远心结构^[12-15]能得到更低畸变的指纹图像,但系统的成本和装调难度也会增加。本设计采用了简单的四片式物方远心结构,将远心度控制在 0.3° ,使得整个系统的最大畸变仅为 0.617%,如图 6 所示,这个设计结果足以满足指纹行业的国际规范要求。

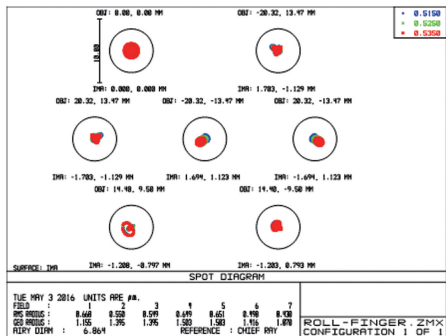


图 4 物方远心光学系统点列图

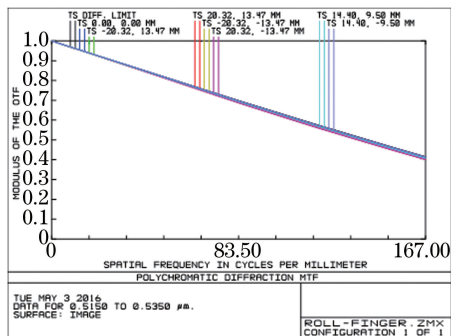


图 5 物方远心光学系统 MTF 曲线

Fig. 4 Spot diagram of object-telescopic optical system

Fig. 5 MTF curves of object-telescopic optical system

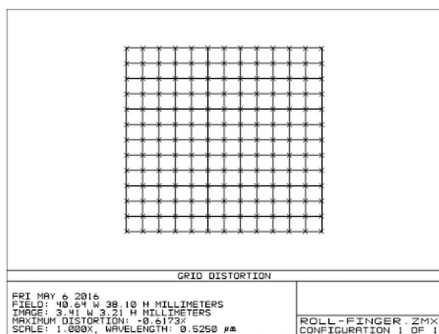


图 6 物方远心光学系统网格畸变

Fig. 6 Grid distortion of object-telescopic optical system

3.3 公差分析及指纹图像采集

针对以上光学设计方案,使用 Zemax 软件中的公差计算程序,分析了透镜的加工和装调公差,公差参数包括:半径、光学元件厚度、空气间隔、偏心、折射率和阿贝数等,具体公差参数值设计如表 2 所示。选择衍射极限下的 MTF 作为公差计算的标准,选取奈奎斯特频率 167 lp/mm,采用蒙特卡罗分析法进行公差灵敏度分析,设置后截距为系统调整参数,计算了 500 个蒙特卡罗样本。公差分析下的 MTF 曲线如图 7 所示,相应 MTF 统计结果如表 3 所示。

表 2 光学系统公差要求

Table 2 Tolerance demands of optical system

Tolerance type	Value
Radius/mm	± 0.02
Surface thickness/mm	± 0.02
Surface tilt/($^{\circ}$)	± 0.02
Surface center/mm	± 0.02
Element tilt/($^{\circ}$)	± 0.05
Element decenter/mm	± 0.03
Index	± 0.001
Abbe/%	± 1

表 3 光学系统的蒙特卡罗分析结果

Table 3 Monte-Carlo analysis result of optical system

Monte-Carlo system	MTF
90%	0.32
50%	0.36
10%	0.40

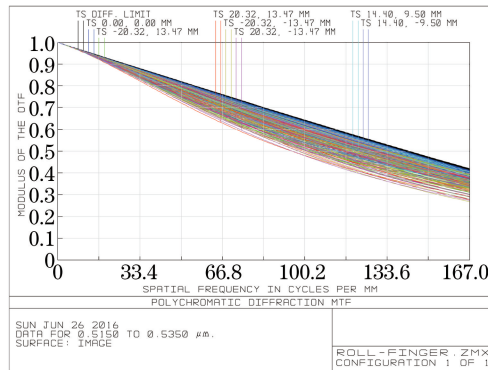


图 7 公差分析下的 MTF

Fig. 7 MTF curves under tolerance analysis

分析数据显示,按设置的公差加工、装调后,90%以上光学系统的 MTF 大于等于 0.32,可以满足指纹采集光学系统 MTF 要求。公差分析中还发现,最后两片透镜的元件偏心灵敏度较高,应重点控制它们的装调公差,其他元件可适当放宽公差要求。最后,采用该光学设计方案加工制作了指纹采集仪原理样机,获得了高对比度、高分辨率的指纹图像,如图 8 所示,指纹特征点及汗腺清晰可见,完全满足指纹特征提取的要求。



图 8 双指指纹图像及局部放大图

Fig. 8 Dual fingerprint image and partial enlarged image

4 结 论

在指纹采集光学系统中,采用远心光路结构能很好地校正梯形畸变,产生一个长宽压缩比固定的图像,从而保证后续处理获得足够高的识别精度。设计了一种物方远心双指指纹采集光学系统,采集窗口有效尺寸为 40.64 mm×38.10 mm,成像分辨率 500 dpi,像面全部视场的 MTF 值在特征频率 167 lp/mm 处均达到 0.4,各视场成像质量比较均衡,系统最大畸变率为 0.617%。该光学系统的设计要求符合 FBI 标准,同时整个光机结构紧凑,装配简单,适宜量产,该产品可以应用于出入境管理、二代身份证指纹采集、电子护照、刑事侦查等多种领域。

参 考 文 献

- Ji Zijuan, Bao Jiaqi. The optical design of fingerprint identification system[J]. Journal of Hubei University of Education, 2008, 25(2): 69-71.
吉紫娟, 包佳祺. 指纹识别系统的 optical 设计[J]. 湖北第二师范学院学报, 2008, 25(2): 69-71.
- Yin Xiaoli. Optical design of fingerprint identification system with non-trapezoidal distortion [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(5): 15-18.
印晓丽. 无梯形畸变指纹识别系统的 optical 设计[J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 15-18.
- Huang Wei, Han Zhengchen. Optical system design of multi-finger fingerprint scanner [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 955-958.
黄 玮, 韩正臣. 多指指纹采集仪的 optical 系统设计[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 955-958.

- 4 Yuan Chunxiao. Research on sampling and recognition technology of high resolution palmprint [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 39-47.
袁春晓. 高分辨率掌纹图像采集与识别技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011: 39-47.
- 5 北大高科. 指纹采集仪 PKU40i [EB/OL]. [2016-07-10]. <http://www.idfounder.com/cn/proInfo.aspx?cid=118&mainID=64>.
- 6 鸿达高新技术集团有限公司. S680 指纹采集仪 [EB/OL]. (2010-10-21) [2016-07-10]. http://www.cchongda.com.cn/products_detail_gdz/&productId=21.html.
- 7 Suwan P, Prathan B. Moisture effect of fingerprint using total internal reflection digital in-line holography [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112315.
- 8 Xin Yujie, Han Zhengchen. An infrared optical system design for small fingerprint scanner with spherical composite prism [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(10): 580-590.
辛玉洁, 韩正臣. 采用球面复合棱镜的指纹仪的红外光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2008, 30(10): 580-590.
- 9 Hung Wei. Optical design of un-distorted fingerprint scanner using cylindrical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(5): 646-650.
黄 玮. 柱面系统无畸变指纹采集仪的光学设计 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 646-650.
- 10 Yuan Chunxiao, Sun Qiang. Design of optical system based on resin lens for palm print image sampling [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 182-187.
袁春晓, 孙 强. 采用树脂透镜的掌纹图像采集光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 182-187.
- 11 Huang W. Optical design of high performance fingerprint scanner with large capture size [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(12): 122201.
- 12 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0416003.
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0416003.
- 13 Yu Jiandong, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu, *et al.* Research and design of prefixing objective with large aperture in imaging spectrometer [J]. *Acata Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222002.
于建冬, 梁中翥, 梁静秋, 等. 成像光谱仪大孔径前置物镜设计研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222002.
- 14 Li Mingdong, Gao Xingyu, Ye Peng, *et al.* Design of aspherical double telecentric lens for machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070801.
李明东, 高兴宇, 叶 鹏, 等. 机器视觉非球面双远心物镜的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070801.