

指纹静脉多模识别光学系统的设计

叶文炜^{1,2**}, 何丽鹏^{1,2}, 林峰^{1,2*}

¹福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007;

²福建师范大学光电与信息工程学院医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007

摘要 设计了一款可同时提取人体指纹及静脉图像的红外与可见光共焦光学系统。该系统由 10 片球面透镜组成, 系统焦距为 10 mm, 视场角为 34°, F 数为 2.4。为减小仪器体积, 系统的共轭距控制在 120 mm 以内。利用 ZEMAX 软件对系统进行了优化, 结果表明, 不同波长的光线严格成像于同一像面; 在系统要求的空间频率 164 lp/mm 处, 调制传递函数值大于 0.4; 所有视场弥散斑的大小均小于成像器件的最小像元尺寸, 畸变小于 1%。系统公差分析表明, 该设计符合生产制造要求。

关键词 光学设计; 多模识别; 共焦系统; 公差分析

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092201

Design of Optical System for Multimode Recognition Based on Fingerprints and Veins

Ye Wenwei^{1,2**}, He Lipeng^{1,2}, Lin Feng^{1,2*}

¹ Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

² Key Laboratory of Opto-Electronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract An infrared-visible confocal optical system for simultaneous extraction of human fingerprint and finger vein images is designed, which consists of ten spherical lenses with system focal length of 10 mm, total field of view of 34° and F number of 2.4. In order to reduce the instrument volume, the conjugate distance of this system is controlled within 120 mm. After optimization by the ZEMAX software, the design results show that the lights with different wavelengths strictly image on the same image plane. The value of modulation transfer function at a spatial frequency of 164 lp/mm required by this system is greater than 0.4. The sizes for all defocused spots in view field are smaller than the smallest pixel size of the image device and the distortion is less than 1%. The tolerance analysis of the system shows that this design meets the manufacturing requirements.

Key words optical design; multimode recognition; confocal system; tolerance analysis

OCIS codes 220.3620; 100.4998; 330.7338

1 引言

随着信息时代的发展,人们对信息安全的需求越来越高。相比于传统的身份认证方式,生物识别具有不会忘记、不会丢失、安全性高^[1]等优势。生物识别特征主要包括指纹、面部特征、虹膜、掌纹等^[2],但这些特征均暴露于身体表面,有被伪造的可能,且

受外界环境因素的影响较大。因此,若单独采用其中任何一种识别技术,其可靠性、准确性将受技术自身的限制。目前,生物识别的主要方向之一是将几种识别技术结合起来,互补不足,以进一步提高技术的可靠性。手指指纹识别技术的发展已成熟,静脉识别的活体检测特征难以被伪造,且二者的特征点位于相同位置,获取方便,故手指指纹静脉综合识别

收稿日期: 2018-02-27; 修回日期: 2018-03-23; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 福建省科技厅高校产学研合作重大项目(2018H61010052)、福建省高校产学研合作项目(2018H6006)

* E-mail: lfeng127@163.com; ** E-mail: yww_dyx@163.com

技术被广泛采用^[3]。

但手指指纹及静脉融合的多模识别技术大多集中于特征提取、图像处理及识别算法等研究^[4-6],对图像的来源,即其成像光学系统的研究较少。张宁宁^[7]仅分析了成像光学系统镜头的参数计算,并未给出实际的设计结果。张春勃等^[8]重点介绍了指纹静脉识别的装置结构及识别流程。吉紫娟等^[9]对指纹静脉复合采集的光学系统作了一定研究,利用分光棱镜进行分光,使指纹和静脉分别成像在不同的传感器上,但并未给出具体的光学设计结果。吉紫娟等^[10]利用两个镜头分别采集指纹及静脉的特征信息,给出了完整的成像系统的设计及实验结果,但其采用了双镜头双传感器的模式,虽减小了各个镜头系统的视场角,减小了设计难度,但增大了系统的成本及体积。本文在前人研究的基础上,采用单镜头单传感器结构,设计了一种可见光红外共焦的光学系统,以同时提取手指指纹及静脉的图像。该设计降低了系统成本,使系统更紧凑。

2 设计原理

2.1 指纹识别

指纹识别是目前生物识别中较成熟的一种技术,大部分指纹识别系统利用等腰直角棱镜的全反射特性来获取反差效果好的指纹图像。该系统将光线入射在压有指纹的玻璃表面上,反射光由传感器获取,反射光的能量依赖于指纹脊和谷的深度及皮肤与玻璃间的油脂和水分^[11]。也有部分指纹识别系统直接将指纹作为有限远物面,通过透镜光学系统将指纹上的散射光线收集并成像于电荷耦合器件(CCD)靶面上^[12]。该系统利用发光二极管(LED)照亮指纹,用光学镜头对其直接成像,捕捉特征点,整体结构更简洁。

2.2 静脉识别

指静脉识别独特的优势包括:1)指静脉属于人体内部特征,难以被伪造和盗窃;2)指静脉只有在活体条件下才能采集到,可实现活体检测;3)识别准确率较高;4)采集设备相对较小,方便携带^[1]。人体静脉血管属于皮下组织,在可见光的照射下,人眼和其他检测系统无法获得清晰图像,故静脉分布通常利用近红外或远红外成像。远红外成像即成热图像,受环境温度和湿度的影响较大。目前,绝大部分静脉识别系统利用的是近红外成像,波长为700~1000 nm的近红外光照射人体时,其容易被血管中不带氧的血红蛋白吸收,在影像中呈黑色条纹^[13]。

2.3 系统结构

2.3.1 指纹图像采集方法

系统将可见光及红外光共焦成像在同一个图像传感器上,系统主要由白光及红外光源、光学成像镜头和互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器构成。使用者将手指平放在透明玻璃平板上,利用白光LED照亮紧贴玻璃盖板的手指指纹表面,指纹经光学镜头后在传感器的下半部分成像。白光LED的光谱分布不均,故设计成像镜头时可适当改变其不同波长的权重,以适配光源属性而获得更清晰可靠的图像。为避免白光LED光源影响静脉端的图像采集,将玻璃平板分为两半,并将中间的截面进行涂黑处理。

2.3.2 静脉图像采集方法

在静脉采集部分,选用的传感器红外感应部分在850 nm波长附近的感应度更好,且使用850 nm波长光源拍摄的静脉图像的识别度优于760,890,940 nm等常用光源的,故系统使用以850 nm为中心波长的红外光源。手指静脉识别使用的光源布局主要有背照式、反射式和侧透式。背照式不利于系统的小型化,反射式成像的对比度较低^[14],综合考虑,采用侧透式的布局,将红外光源放置在手指两侧,通过透射光捕捉静脉图像。这不仅能减小系统体积,提高成像对比度,更能方便用户的使用。但其结构设计较复杂,为避免红外光直接通过玻璃面板造成高亮度的干扰,应尽量使用发散角小的红外光源,且使其尽量紧靠使用者的手指边缘。采集静脉图像时,为避免空间杂光的影响,还可在玻璃后及传感器前添加指定的红外滤波片,以筛除杂光、提高成像质量。系统结构图如图1所示。

2.4 设计指标

人体手指静脉识别系统对手指静脉图像的分辨率要求不高,一般 3×10^5 pixel的光学传感器就可以满足要求^[16]。指纹识别的图像要求更高,故以其要求为准来分析系统指标。考虑到同时采集指纹及静脉图像所需面积较大,将系统的采集面积设定为40 mm×30 mm。研究表明,指纹识别分辨率的最小要求为500 dpi(每英寸点数),而若想识别指纹的三级特征(如汗孔等),分辨率需要达到1000 dpi^[17]。故系统分辨率以1000 dpi为标准,即每一毫米内大约有40 pixel,对应的像方像素为1600 pixel×1200 pixel。选用美国ON Semiconductor公司生产的型号为ARO331的CMOS芯片,其尺寸为4.8 mm×3.6 mm(对角线长6 mm),像素为2048 pixel×1536 pixel,最

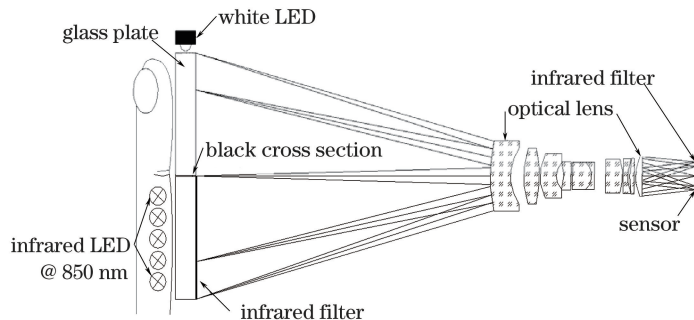


图1 光学系统结构

Fig. 1 Structural diagram of optical system

小像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$ 。根据物方分辨率为1000 dpi的设计要求,算出物方可分辨的最小尺寸为 $25.4 \mu\text{m}/\text{dot}$,而镜头放大率 $\beta = -0.12$,故像方可分辨的最小尺寸至少应为 $3.048 \mu\text{m}/\text{dot}$ 。据此,可得出镜头调制传输函数(MTF)的数值应在 $\xi = 164 \text{ lp}/\text{mm}$ 处大于0.3。为减小系统体积,将镜头的

共轭距限定在120 mm以内,由焦距公式 $f' = \beta L / (1 - \beta)^2 = 11.47 \text{ mm}$,设计时取焦距 $f' = 10 \text{ mm}$ 。为了不影响所需特征的提取,并减小后期软件处理的难度,在光学设计上需要尽量降低系统畸变,将其控制在1%以内^[18]。光学系统的具体参数见表1。

表1 光学系统的主要参数

Table 1 Main parameters of optical system

Effective focal length /mm	Wavelength /nm	Optical distortion /%	MTF	Total length /mm	F number
10	400-700/850-860	<1	>30% @164 lp · mm ⁻¹	<120	2.4

3 设计思路及结果

3.1 初始结构的选取

系统本身有外界光源直接照明,光量充足,故初始结构不需要很大的通光孔径。为减小系统的体积,要求镜头能在较短的共轭距内对物方成像,故要求系统的视场角较大且结构紧凑,这增加了系统的复杂度,因此在初始结构的参数方面,要在满足 F 数(相对孔径的倒数)的前提下尽量选择大的视场角,以便之后优化时有较大余量。在结构方面,为了方便后续传感器、滤光片等器件的安装,系统要求有较大的后截距,故初始选择以负组在前的反远距结构,此时轴外大角度入射的光线经过前组负透镜的发散之后,通过后组正透镜组的光线的倾斜角明显减小,有利于系统像差的校正。据此,最终选取的初始结构对无限远成像, F 数为2.0,视场角为 54° 。

3.2 优化思路及结果

选取的初始结构仅适用于可见光波段,而提出的系统使用中心波长850 nm的近红外光源,考虑到实际光源的脉宽影响,要求该系统在波长为840~860 nm的红外波段也同样拥有良好的成像质量。为了降低像差校正的难度,在初始结构的基础上先

优化可见光波段的成像性能^[19],之后再利用ZEMAX软件的多重结构设计,添加近红外的组态(840,850,860 nm)。根据所选成像传感器在近红外波段的感光性能,合理设置其不同的权重。考虑到指纹部分要求的成像品质较高,故对应的可见光组态的权重应设置得略大一些。

优化时要保证系统在可见光和近红外波段的成像质量均往好的方向发展,且方案同时提取指纹静脉图像,故要严格保证可见光和近红外波段的最佳像面在同一位置,不能使用像面调焦。前组负透镜弯向光阑,有利于减小轴外光束入射的倾斜角度,且光束经前负透镜组的发散,后续组元获得了更大的光束孔径。为消除系统不同波段的色差,选用高低色散玻璃的组合,在光阑附近设置双胶合面,经过不断调整各种参数数值与其权重,并通过全局搜索和锤形优化,得到的结果满足设计指标要求,图2所示为该结构的外形图。系统由10片球面镜组成,其后截距为12.5 mm,焦距为10 mm,物象共轭距为118 mm,结构紧凑。所有镜片均为球面,有利于降低成本。

4 像质分析

系统设计完成后,其成像性能受像差影响,无法

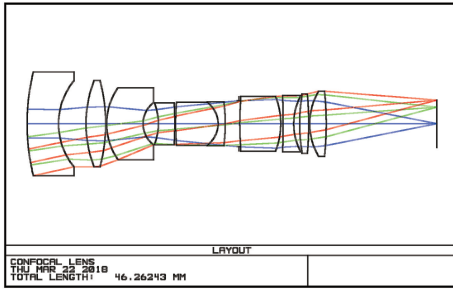


图2 光学系统的外形图

Fig. 2 Layout of optical system

完善成像,故需要对其进行像质评价。下面从MTF、点列图、畸变场曲等角度对系统进行分析。

4.1 MTF

MTF曲线是光学系统成像质量的重要评价标准之一,反映镜头在不同频率时传递物空间信息的能力,MTF值越大,成像质量越好。通常情况下,0.7视场内是镜头的主要成像区域,要重点保证此区域内的成像质量,镜头边缘的成像质量允许一定程度的降低。图3所示分别为系统在可见光和近红外波段的成像MTF,其中OTF表示光学传递函数,可以看出,系统在要求的空间频率处,全视场的MTF值均大于0.4,在0.7视场内的MTF值均大于0.5,系统在不同波段处成像质量均为良好。

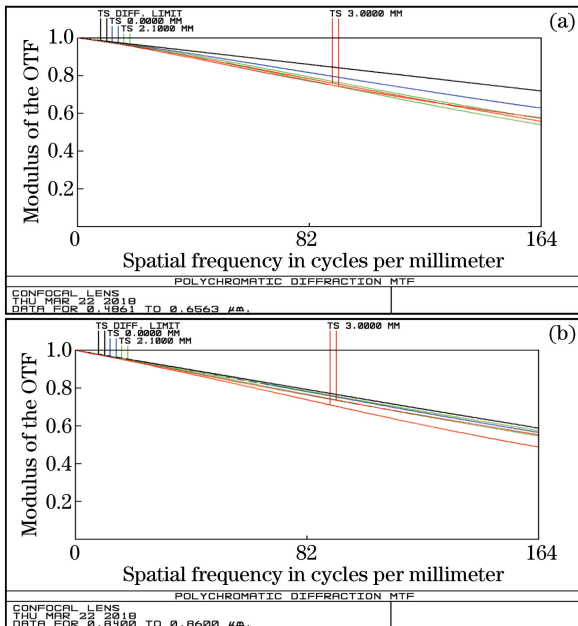


图3 MTF曲线。(a)可见光波段光学系统;

(b)近红外波段光学系统

Fig. 3 MTF curves.

(a) Optical system in visible light band;

(b) optical system in near-infrared light band

4.2 点列图

选取的探测器像元尺寸为 $2.2\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$,若光斑的均方根半径小于像元尺寸的80%,即 $1.76\ \mu\text{m}$,可认为物方信息经光学镜头后能量较为集中,成像性能良好。图4所示分别为系统在可见光和近红外波段的点列图,可以看出,点列图的光斑大小均小于要求的尺寸,系统能有效传递物方信息。

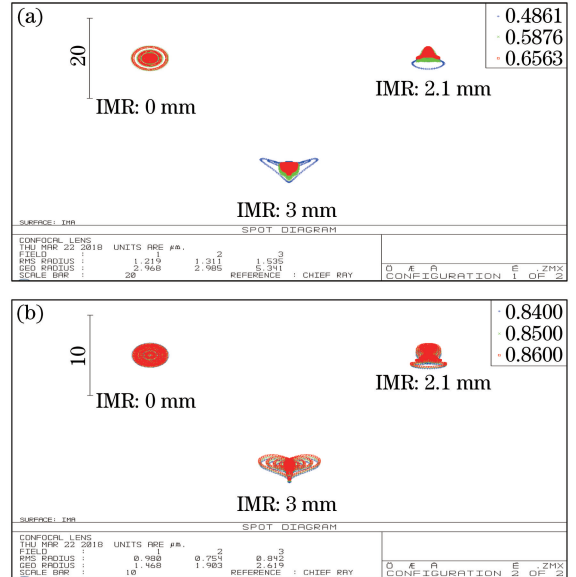


图4 点列图。(a)可见光波段光学系统;

(b)近红外波段光学系统

Fig. 4 Spot diagrams. (a) Optical system in visible light band; (b) optical system in near-infrared light band

4.3 场曲畸变曲线

为减小系统后期图像处理的难度,要求系统在采集到指纹和静脉图像时不仅有较高的清晰度,还必须要有较小的畸变和场曲。图5所示分别是系统在可见光及近红外波段的场曲畸变图及MTF离焦图,可以看出,系统的场曲值不超过 $20\ \mu\text{m}$,除近红外波段的全视场弧矢方向有少许偏离外,其他MTF的离焦曲线没有大的分散,说明场曲对系统像质的影响很小,同时畸变控制在1%以内。

5 公差分析

光学系统的理论设计结束后,为确定系统的实际性能,保证后续生产制造的良率和光学性能,应进行合理的公差分配。采用的公差范围要求见表2。

采用灵敏度分析法,以 $164\ \text{lp/mm}$ 处的平均MTF值作为评价标准,对双组态进行公差分析,该系统的公差分别如图6,其中TEDX为零件在X方向的平行偏心公差,TEDY为零件在Y方向的平行

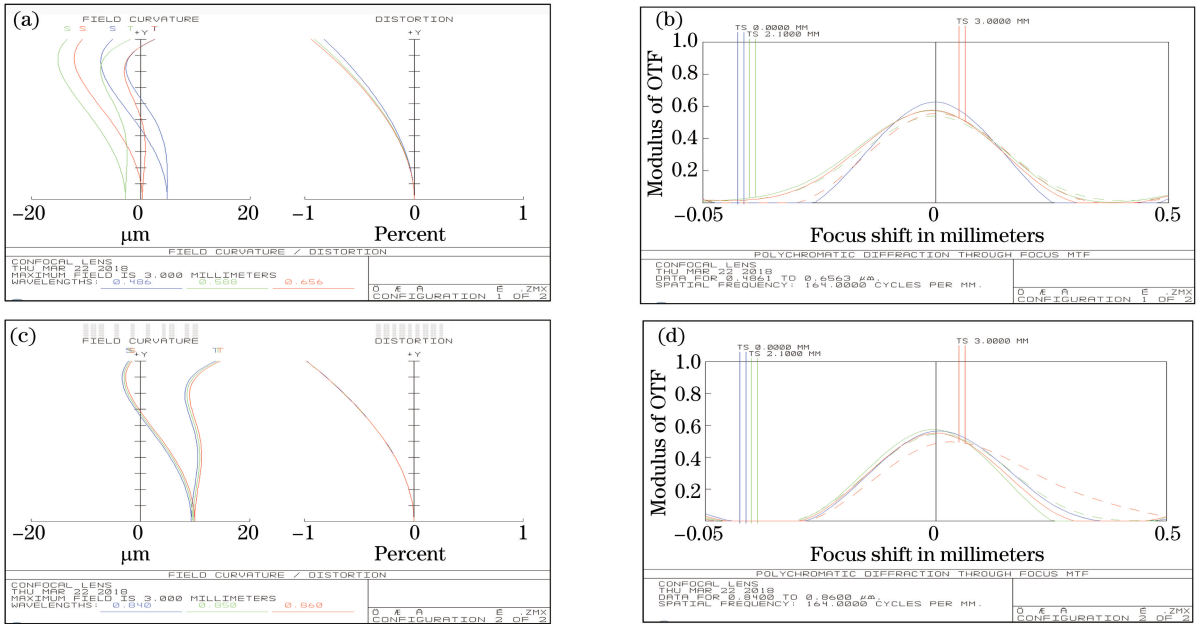


图5 场曲、畸变曲线和 MTF 离焦图。(a)可见光波段光学系统的场曲、畸变曲线；(b)可见光波段光学系统的 MTF 离焦图；(c)近红外波段光学系统的场曲、畸变曲线；(d)近红外波段光学系统的 MTF 离焦图

Fig. 5 Field curvature, distortion curve and MTF defocus diagram. (a) Field curvature and distortion curve of visible optical system; (b) MTF defocus diagram of visible optical system; (c) field curvature and distortion curve of near-infrared optical system; (d) MTF defocus diagram of near-infrared optical system

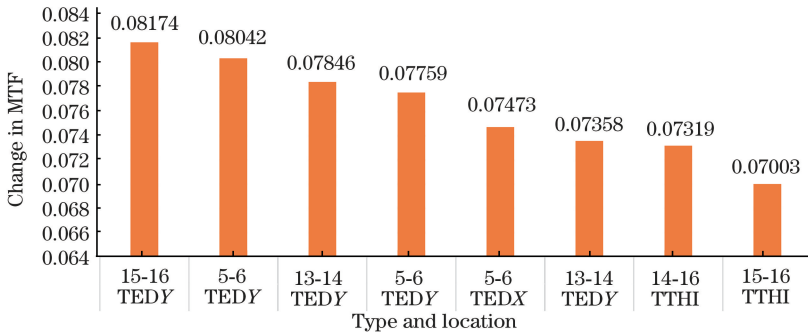


图6 公差修正前最敏感的公差结果

Fig. 6 Most sensitive tolerance result before tolerance correction

偏心公差, TTHI 为零件厚度公差。从图 6 可以看出,对系统 MTF 影响最为严重的是元件的 X/Y 方向偏心及部分镜片的厚度(前组的 5~6 面和后组的 13~14、15~16 面)。蒙特卡罗模拟结果显示,系统 90% 以上的 MTF 数值只达到 0.288,与 MTF 的参考值 0.49 相比,下降了 41%,表明此时的公差设置过松。

针对以上情况,将系统的 X/Y 方向偏心公差加紧到 0.007 mm,并将 15~16 面及 14~16 面的厚度公差加紧到 0.02 mm,再对系统进行公差分析,结果如图 7 所示,其中 TSDX 为表面在 X 方向的平行偏心公差, TSDY 为表面在 Y 方向的平行偏心公差。可以看出,对系统 MTF 影响最大的公差数值由 0.08174 减小到了 0.04826,蒙特卡罗模拟结果显示,有 90% 以上的 MTF 数值大于 0.361。故经公差修

表 2 光学系统的公差范围

Table 2 Tolerance range of optical system

Parameter	Value
Radius	N = 3
Thickness / mm	0.03
Decentered tolerance in X/Y direction / mm	0.013
Surface Tilt tolerance in X/Y direction / (°)	0.013
Surface irregularity tolerance	0.5
Tolerance of refractive index	0.001
Abbe constant tolerance / %	1
Decentered tolerance in X/Y direction / mm	0.01
Element Tilt tolerance in X/Y direction / (°)	0.013

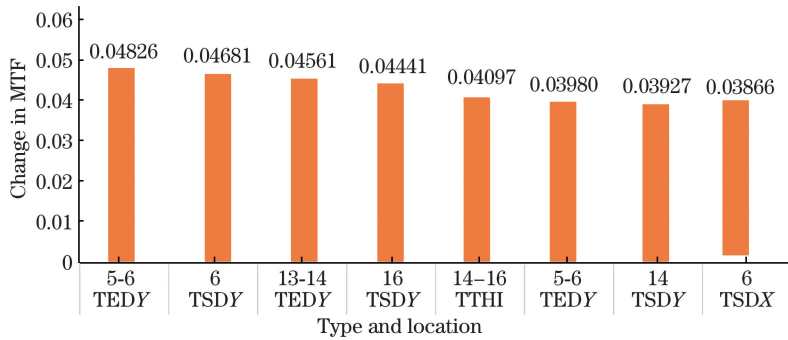


图7 公差修正后最敏感的公差结果

Fig. 7 Most sensitive tolerance result after tolerance correction

正后,镜头满足加工要求。

6 结 论

针对生物单模特征识别的不足,根据实际应用需求,提出了一种在可见光和近红外两波段同时提取手指指纹及静脉图像的光学系统设计方案。与现有技术相比,在识别速度方面,提出的方案能够对手指指纹及静脉图像进行一次成像,能更快速地捕捉多模识别需要的人体特征;在系统复杂程度方面,系统利用同一镜头将目标成像在同一传感器的不同部分,系统更简洁。光学镜头由10片球面镜组成,总长小于120 mm,体积小、成本低。在成像质量方面,各视场的MTF数值在164 lp/mm处均大于0.4,成像光斑均小于传感器的像元尺寸,场曲畸变小。各项指标均符合要求,且公差分析结果良好,符合小批量试制条件,为实现大批量生产提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] Yin Y L, Yang G P, Yang L. Survey of finger vein recognition study[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(5): 933-939.
尹义龙, 杨公平, 杨璐. 指纹静脉识别研究综述[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(5): 933-939
- [2] Saropourian B. A new approach of finger print recognition based on neural network[C]. IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009: 10868177.
- [3] Lin K M. Research on multimode biometrics based on fingerprint and finger vein[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 10-16.
林坤明. 基于指纹与指静脉的多模态身份识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 10-16.
- [4] Li X Y. Study of multibiometrics system based on fingerprint and finger vein[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 68-88.
李雪妍. 融合指纹和指静脉的多模态生物识别技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 68-88.
- [5] Xu T Y, Hui X W, Lin S. A near infrared finger vein recognition approach based on wavelet grayscale surface matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041005.
徐天扬, 惠晓威, 林森. 基于小波灰度曲面的近红外手指静脉识别方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041005.
- [6] Yang J F, Zhang X. Feature-level fusion of fingerprint and finger-vein for personal identification [J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(5): 623-628.
- [7] Zhang N N. Acquisition and recognition system based multispectral palm[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014: 33-40.
张宁宁. 非接触多模态手成像采集系统设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014: 33-40.
- [8] Zhang C B, He D. Composite identification method, device and system based on fingerprint and finger vein: 105678233 A[P]. 2015-12-30.
张春勃, 何笛. 基于指纹与指静脉的复合识别方法、装置及系统: 105678233 A[P]. 2015-12-30.
- [9] Ji Z J. Collect images from fingerprint and vein compound recognition system[J]. Journal of Hubei University of Education, 2009, 26(2): 93-94, 128.
吉紫娟. 指纹与静脉复合识别系统的图像采集[J]. 湖北第二师范学院学报, 2009, 26(2): 93-94, 128.
- [10] Ji Z J, Bao J Q, Yin J J. Optical system design of fingerprint and finger vein images compound acquisition [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(5): 1-7.
吉紫娟, 包佳祺, 尹娟娟. 指纹及手指静脉图像复合采集光学系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(5): 1-7.
- [11] Yin X L. 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光学设计[J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 15-18.
- [12] Chen S J, Xiao Z X. Design of optical system of fingerprint image capture device[J]. Optical Technique, 2005, 31(s): 282-283, 287.
- 陈书剑, 萧泽新. 指纹图像采集光学系统的设计[J]. 光学技术, 2005, 31(s): 282-283, 287.
- [13] Jiang H, Guo S X. Study on near infrared finger vein image acquisition and vein pattern extraction[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(9): 1431-1434.
- 江虹, 郭树旭. 红外光指静脉图像采集及其特征提取技术的研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1431-1434.
- [14] Wu W, Yuan W Q, Lin S, *et al.* Selection of typical wavelength for palm vein recognition[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211002.
- 吴微, 苑玮琦, 林森, 等. 手掌静脉识别典型波长选择[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211002.
- [15] Zou H. An identification system based on finger vein patterns[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 26-28.
- 邹晖. 基于手指静脉的身份识别系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 26-28.
- [16] Chen L K. Research on human finger vein recognition technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009: 38-40.
- 陈刘奎. 人体手指静脉识别技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009: 38-40.
- [17] Wang S G. A survey of fingerprint recognition technology[J]. Journal of Information Security Research, 2016, 2(4): 343-355.
- 王曙光. 指纹识别技术综述[J]. 信息安全研究, 2016, 2(4): 343-355.
- [18] Zhou L, Chi Y D, Guo L. Optical system design of object-telecentric dual finger fingerprint scanner[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 102201.
- 周路, 迟耀丹, 郭亮. 物方远心双指指纹采集光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 102201.
- [19] Wang K. Optical design of day and night con-focal high-definition imaging system with larger sensor and aperture [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2016: 31-35.
- 王琨. 大靶面大孔径日夜共焦高清成像光学系统设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2016: 31-35.