

引用格式: TIAN Chen, CHEN Peng, ZHANG Xiaojie, et al. Manufacturing of Infrared Polarization Imaging Optical System Based on Micro-scanning[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0622001

田晨,陈鹏,张晓杰,等. 基于微扫描的红外偏振成像光学系统研制[J]. 光子学报, 2022, 51(6):0622001

基于微扫描的红外偏振成像光学系统研制

田晨^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 张晓杰³, 龙华保³, 侯名洋⁴, 沈正祥^{1,2}

(1 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

(2 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

(3 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

(4 北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘 要:为了弥补分焦平面偏振成像技术在测量过程存在瞬时视场误差且图像分辨率降低的缺陷,将微扫描技术与分焦平面偏振成像系统相结合,研制了一款基于透镜微扫描的红外偏振成像光学系统,系统波长为 3~5 μm 、 F 数为 2、光学视场角为 $\pm 2^\circ$ 。采用折反式光学结构,将后透镜组中最后一块透镜作为微扫描透镜,实现了 2×2 模式的正交位移。完成了公差分析和结构设计,分析了微扫描透镜的同轴度、位置度、扫描位移等对成像质量的影响规律,获得了各视场调制传递函数均高于 0.47@17 lp/mm 的设计结果。利用研制的系统进行了偏振成像实验,结果表明,红外偏振成像提高了图像的对比度,目标轮廓更清晰,且对不同材质目标的识别能力更强。

关键词: 红外偏振; 光学系统; 微扫描透镜; 折反式; 大容差

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225106.0622001

0 引言

红外成像技术利用目标与背景的热辐射差形成图像,具有可昼夜工作、作用距离远、隐蔽性好等优点^[1]。红外成像技术仅能获得场景的强度信息,将红外成像技术与偏振探测技术相结合能够同时获得场景的红外强度信息和红外偏振信息,在遥感探测、目标识别、目标跟踪等领域具有广泛的应用^[2-5],是当前红外成像技术的研究热点^[6]。

目前典型的偏振方式有分时法、分孔径法、分振幅法以及分焦平面法^[7-10]。分时法通过机械旋转偏振片依次获取四幅不同偏振方向的光强图像,得到的四幅图像是在不同时刻获取的,因此只适用于静态场景或低速成像场景。分孔径法通过孔径分割技术分光,在每个子孔径位置处放置不同偏振方向的偏振元件,焦平面分为四个有效区域。分孔径法系统结构紧凑,但分光通常采用离轴或者偏心的系统,增加了系统设计和装调的难度。分振幅法通过分束器分光,然后由相应个数的探测器接收,导致系统体积较大。

分焦平面法直接在探测器像元前放置微偏振阵列,红外探测器焦平面与不同角度偏振阵列微光元件集成,每 2×2 像素构成一个超级像元,包含 4 个偏振方向的光强,计算该超级像元所对应的偏振信息,即可解算出偏振图像^[11]。分焦平面法具有系统结构紧凑、实时性好、集成度高等优点,但是存在瞬时视场误差和图像分辨率降低的缺陷。利用超分辨重建算法处理是当前弥补分焦平面法不足的主流方法,已有学者进行了大量的研究实验^[12-15]。基于算法对图像进行处理虽然能够增加图像信息,但所获得的像素点是通过计算得到的,利用不同算法对低分辨率图像进行重建时所得到的分辨率图像并不唯一^[16]。并且当目标小于 1 个像素大小时(即点源物体),将无法获得完整的偏振数据^[17]。微扫描技术可以实现同一场景下多帧具有像素位移的图像采集,采用微扫描技术与红外偏振成像技术相结合的方法可以直接获得目标 4 个偏振方向的光

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.11873004,61621001),上海市级科技重大专项(No.2021SHZDZX0100),中央高校基本科研业务费专项

第一作者: 田晨(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为光学设计。Email: 1930977@tongji.edu.cn

导师(通讯作者): 沈正祥(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为先进光学制造技术、光学仪器研制等。Email: shenzx@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021-12-25; **录用日期:** 2022-02-07

<http://www.photon.ac.cn>

强值,并且对于点源物体也能实现偏振成像^[17]。

基于透镜微扫描的偏振成像光学系统要求微扫描透镜位移不降低成像质量,且需要焦平面位移与探测器像元的高度匹配对准,因此对光学系统设计和装调均提出了较高的要求。本文研制了基于微扫描透镜的红外偏振光学系统,将最后一块透镜作为微扫描透镜的构型,微扫描透镜的同轴度、位置度、扫描位移等公差敏感,该系统同时满足高成像质量、低加工难度、大装配容差的要求。

1 Stokes偏振成像基础

目标物对入射光产生反射和发散,在该过程中会根据自身性质产生相关的偏振信息,偏振态是和振幅、频率、相位一样的另一维光学信息,不同物体或者同一物体的不同状态都会产生不同的偏振状态。Stokes矢量表示法利用4个Stokes参量描述偏振光,各参量可以直接被探测器探测。Stokes参量可以用矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 进行表示,定义为

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_r - I_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I_0 表示 0° 线偏振光强, I_{90} 表示 90° 线偏振光强, I_{45} 表示 45° 线偏振光强, I_{135} 表示 135° 线偏振光强, I_r 表示右旋圆偏振光强, I_l 表示左旋圆偏振光强。 I 表示总光强, Q 表示 0° 和 90° 偏振光强差, U 表示 45° 和 135° 偏振光强差, V 表示右旋和左旋圆偏振光强差,自然界中的圆偏振光分量极低,因此 V 可以忽略不计。

用于表征偏振特性的参数分别为

$$\begin{cases} p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, p 表示偏振度, ψ 表示偏振角。

2 基于微扫描技术的偏振成像方法

系统采用分焦平面法偏振成像技术,将红外成像系统中的聚焦透镜作为微扫描镜片,固定于二维微位移平台,在二维平面上进行微扫描成像。二维微位移平台采用 2×2 模式周期性扫描成像,每次扫描光斑位移一个像素,每像素位置曝光一次,采集一帧数据,实现微扫描成像。最终可以获得同一场景、具有一个像素位移的4幅序列图像,从而获得目标4个不同方向的偏振光强数据,进而解算Stokes参数,弥补了分焦平面偏振成像技术带来的瞬时视场误差和分辨率降低问题。具体实现方式如图1所示。

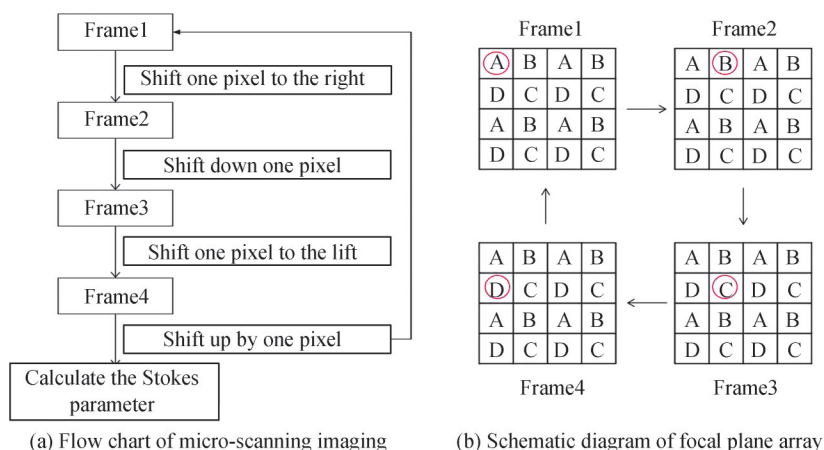


图1 微扫描技术成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-scanning technology imaging

图中,A、B、C、D分别代表4个不同的偏振方向。以成像目标上其中一个物点为例,首先,系统处于初始位置,获得图像1,此时获得该物点A方向的偏振光强;接着二维微位移平台在控制系统的作用下,驱动微扫描透镜向右位移一个像素,获得图像2,此时获得该物点B方向的偏振光强;之后驱动微扫描透镜向下位移一个像素,获得图像3,此时获得该物点C方向的偏振光强;然后驱动微扫描透镜向左位移一个像素,获得图像4,此时获得该物点D方向的偏振光强,完成一次周期扫描成像,最后再驱动微扫描向上位移一个像素,将系统复原至初始位置。通过该方式获得了该物点4个方向的偏振光强数据。通过偏振成像理论可以解算其Stokes参数,将该探测器焦平面上获得的所有数据值按照该方法进行计算,便可获得目标完整的红外图像和红外偏振图像。

3 光学系统设计

3.1 光学设计指标

系统针对中波红外进行成像,采用制冷型中波探测器,像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$,像元数为 $320\ \text{pixel} \times 256\ \text{pixel}$,探测器 F 数为2,系统焦距为176 mm,具体参数如表1所示。

表1 光学系统参数
Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength	3~5 μm
Field	$\phi 4^\circ (3.13^\circ \times 2.51^\circ)$
$F/\#$	2 ± 0.1
Aperture	$\geq \phi 40\ \text{mm}$

3.2 光学结构选型与优化设计

光学系统结构的轻量化和小型化是光学系统设计的重要标准,红外光学系统的结构选型主要包括折射式、反射式和折反式光学结构,卡式折反射系统具有大口径、结构紧凑等优点,得到了广泛的应用。

采用的制冷型探测器通常用二次成像的方法实现100%冷光阑以提高其灵敏度。设计的系统采用折反式光路结构,主次镜以卡式系统为基础,直接限制系统孔径光阑的位置与口径,使得冷光阑为系统的孔径光阑。设计系统轴向总长为99 mm,为了降低系统镜片制作和装调难度,主镜M1选择双曲面,将非球面次镜M2简化为平面,仅用于折转光路。后透镜组利用非球面透镜校正像差,Lens1、Lens2、Lens3的前表面为偶次非球面,其余镜片表面都为球面,Lens4为微扫描透镜。利用ZEMAX软件对系统性能进行优化和仿真,最终设计结果参数如表2所示,系统光路如图2所示。

表2 光学系统设计数据
Table 2 Lens data of optical system design

	Name	Radius/mm	Conic	Thickness/mm	Glass
1	Cowl	62 59	— —	2.5	MgF ₂
2	M1	-81.698	-1.056	—	Mirror
3	M2	∞	—	—	Mirror
4	Lens1	-5.034 98.703	1.872 —	2.5	Ge
5	Lens2	-11.19 -6.373	4.899 —	2	Ge
6	Lens3	-43.311 -22.853	-2.865 —	3	Silicon
7	Lens4	38.482 175.268	— —	3	Silicon
8	Window	∞	—	1	Ge
9	Filter	∞	—	0.3	Ge
10	Diaphragm	∞	—	—	—
11	Image surface	∞	—	—	—

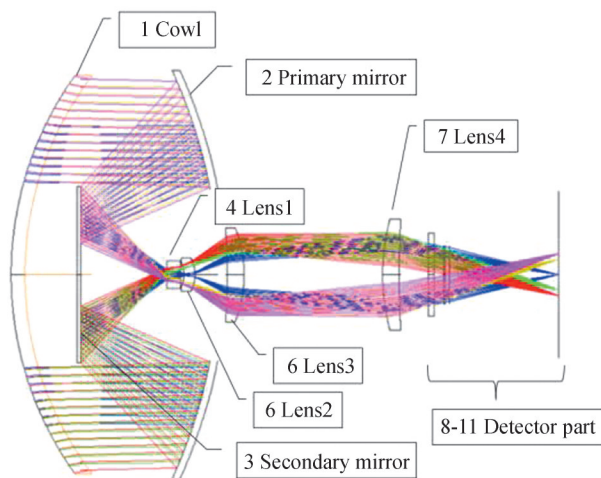


图2 系统设计光路
Fig. 2 Optical path of the system

3.3 成像性能仿真

系统成像质量主要通过光学调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、弥散斑 (点列图) 来分析。图3为该系统的调制传递函数,可以看出,截止频率 17 lp/mm 处,无论是中心视场还是边缘视场,系统的 MTF 值均大于 0.47,满足成像要求。图4为该系统的点列图,可以看出,无论是中心视场还是边缘视场,系统的均方根 (Root Mean Square, RMS) 半径均小于 11 μm , 小于探测器像元尺寸 30 μm 的一半,成像质量良好。

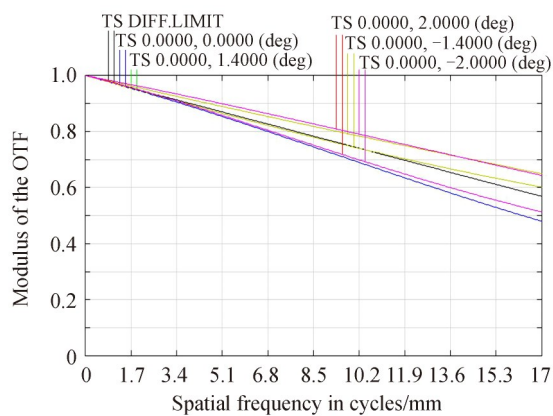


图3 系统的调制传递函数
Fig. 3 MTF of the system

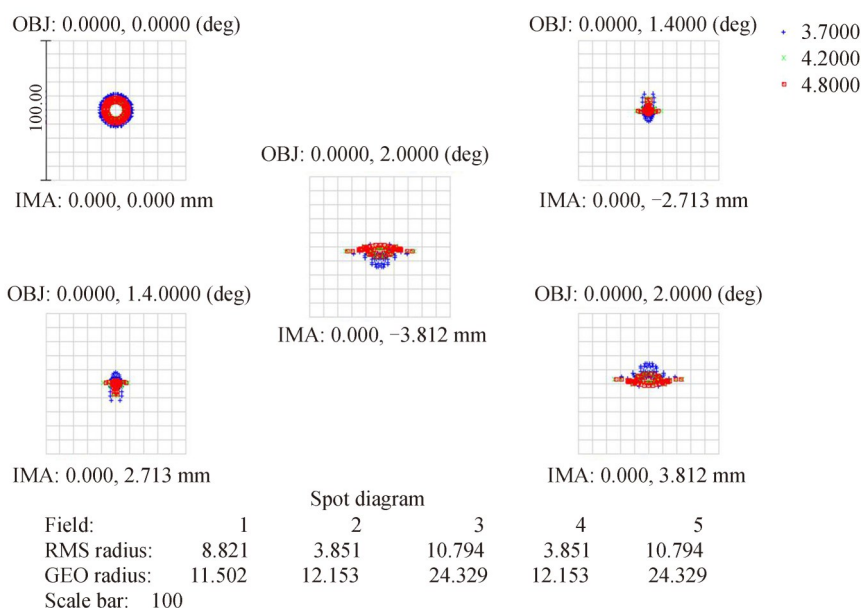


图4 系统的点列图
Fig. 4 Spot diagram of the system

3.4 公差分析

为了证明光学系统加工的可行性,以及在光学成像性能满足使用要求的前提下最大限度地降低加工成本,光学设计完成之后需要进行合理的公差分配。使用蒙特卡洛法进行系统公差分析,得到表3所示的公差分配结果,相应的仿真分析结果如图5所示,全视场MTF大于0.2@17 lp/mm的概率达到90%以上。最终结果表明,使用表3所示的公差分配能够有效地满足实际加工装调以及成像要求。

表3 公差分配结果
Table 3 Tolerance limits

Parameter	Value
Radius/fringe	1
Thickness/ μm	13
Decenter/ μm	13
Tilt/(')	0.9

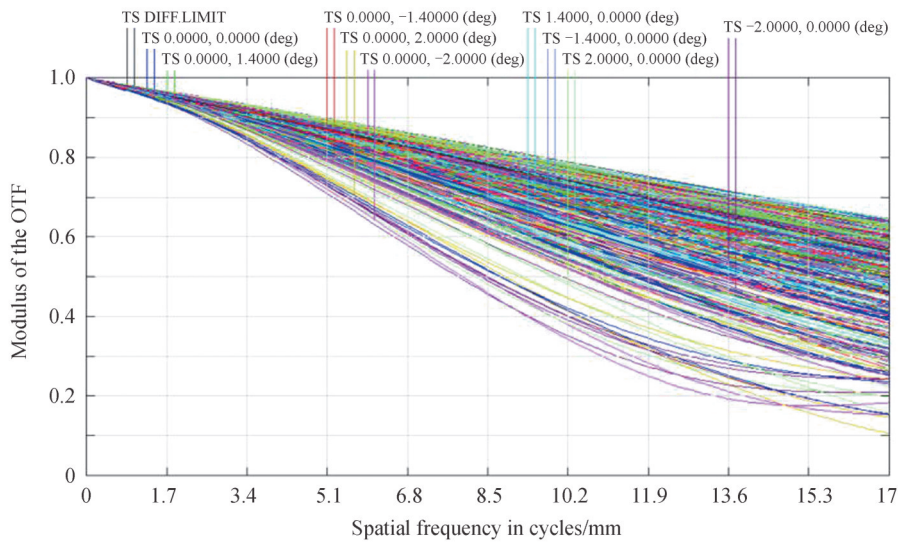
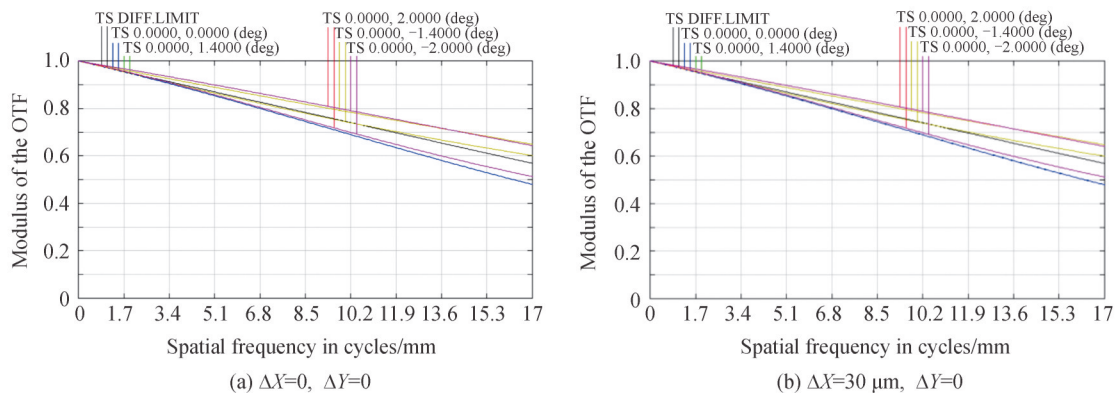


图5 蒙特卡洛分析仿真结果
Fig. 5 Result of Monte Carlo simulation

3.5 微扫描位置像质评价

3.5.1 MTF 分析

图6为系统在4个不同微扫描位置时的光学调制传递函数曲线,可以看出,截止频率17 lp/mm处,无论是中心视场还是边缘视场,系统的MTF值均大于0.47,满足成像要求。



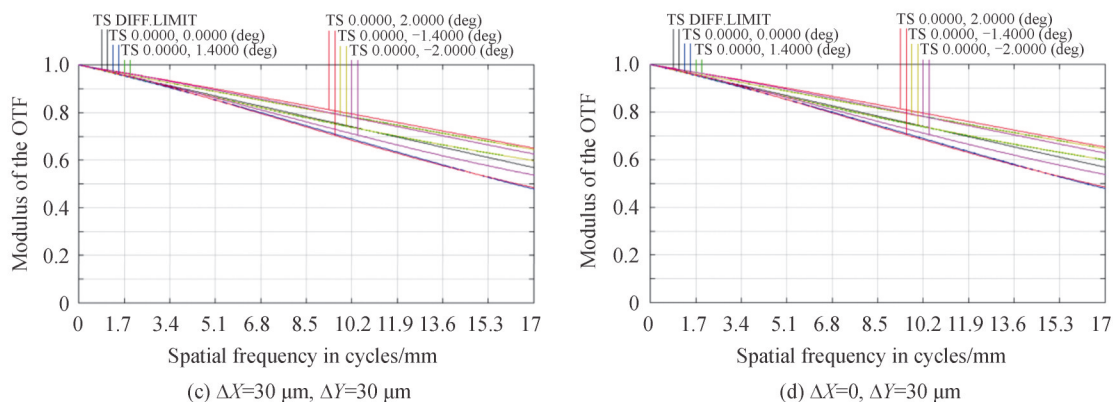


图6 系统在不同微扫描位置的光学调制传递函数
Fig. 6 MTF of the system at different micro-scanning positions

图7~8分别为系统MTF值随微扫描透镜X方向和Y方向的偏心变化和倾斜变化曲线,可以看出,该光学系统在偏心 $\pm 200 \mu\text{m}$ 、倾斜 $\pm 0.4^\circ$ 的范围内仍能保证较好的成像质量,对公差敏感,完美解决了分焦平面偏振成像带来的瞬时视场误差以及分辨率较低的问题。

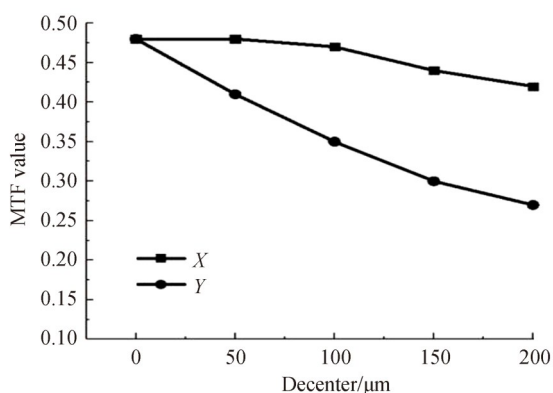


图7 MTF值随微扫描透镜X方向和Y方向的偏心变化曲线
Fig. 7 MTF changes with the decenter of the micro-scanning lens in the X and Y directions

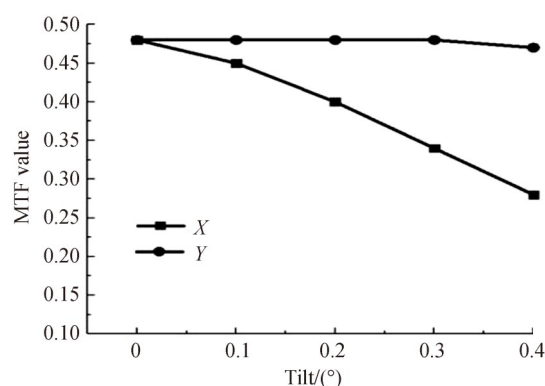
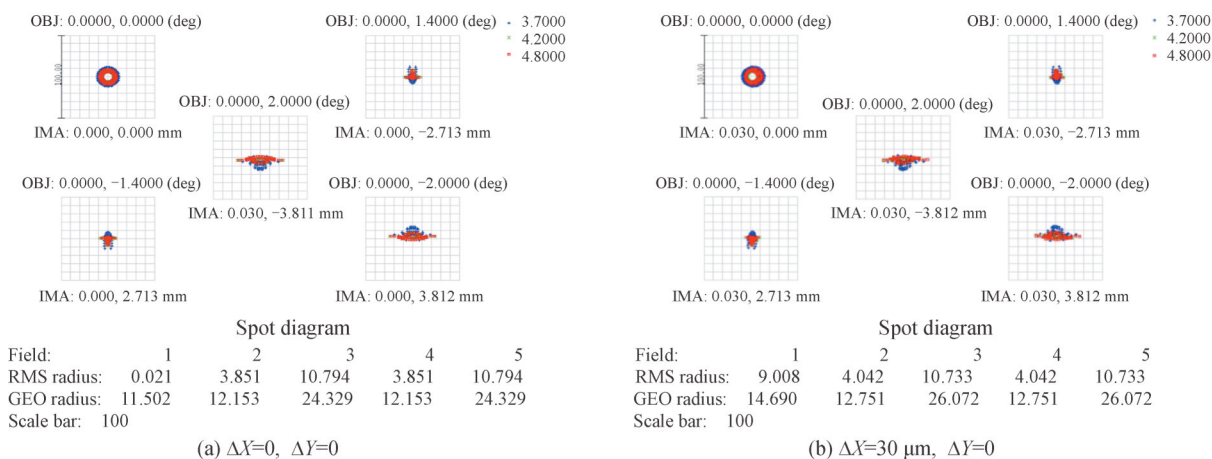


图8 MTF值随微扫描透镜X方向和Y方向的倾斜变化曲线
Fig.8 MTF changes with the tilt of the micro-scanning lens in the X and Y directions

3.5.2 点列图分析

图9为系统在4个不同微扫描位置时的点列图,可以看出,无论是中心视场还是边缘视场,系统的RMS半径均小于 $11 \mu\text{m}$,小于探测器像元尺寸 $30 \mu\text{m}$ 的一半,成像质量良好。



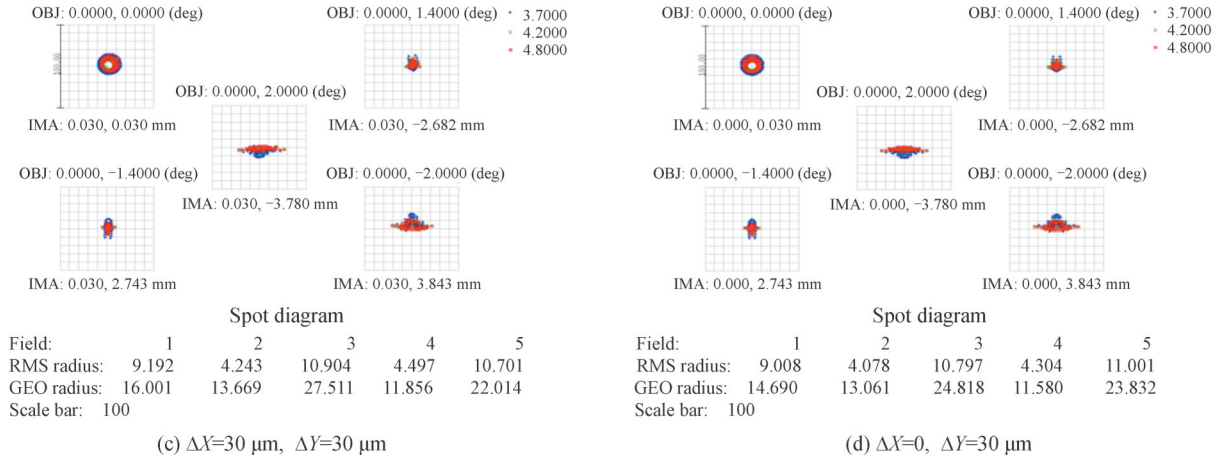


图9 系统在不同微扫描位置的点列图

Fig. 9 Spot diagrams of the system at different micro-scanning positions

3.5.3 微扫描镜片位移分析

微扫描透镜同时要求焦平面位移与探测器像元高度匹配对准,扫描透镜的位移精度影响图像重建的质量。当微扫描透镜 Lens4 位移 $20.8 \mu\text{m}$ 时,焦平面位移一个像素,且 X 轴与 Y 轴方向位移距离一致。利用近轴成像公式计算镜片位移与焦点位移的关系曲线,得出

$$d = 1.438h \quad (3)$$

式中,镜片位移距离为 h ,焦点位移距离为 d 。将该近似关系式(3)与 ZEMAX 仿真结果进行比对,如图 10 所示。从图中可以判断出,当镜片位移距离小于 0.7 mm 时,ZEMAX 光线追迹结果与近轴成像公式计算结果几乎一致,具有良好的线性关系。

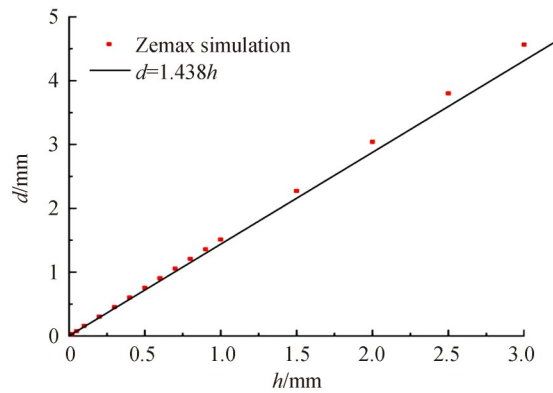


图10 镜片位移与焦点位移的关系曲线

Fig. 10 The relationship curve between lens displacement and focus displacement

系统选用 PI 公司的二维微位移平台,扫描位移精度优于 30 nm ,小于 0.01 个像素,微扫频率大于等于 1 kHz ,响应速度在毫秒级,能够实时获得多帧、具有一个像素位移的图像。

4 系统研制与成像实验

4.1 系统结构设计及加工

图 11 是整个成像系统的三维结构剖面图,整个成像系统包含光学系统以及连接支撑光学系统的机械结构。支撑架是系统的连接核心,主镜、透镜筒以及微透镜二维位移平台都与支撑架连接,支撑架采用钛合金材料提高了刚度。主镜的材质为铝合金,作为折反式光学系统的核心,其面形精度决定了系统的成像质量,因此,采用应力隔离槽与支撑架实现柔性连接。所有反射镜和透镜均采用单点金刚石车削方法^[18]进行加工,图 12 为最终研制的系统实物图。

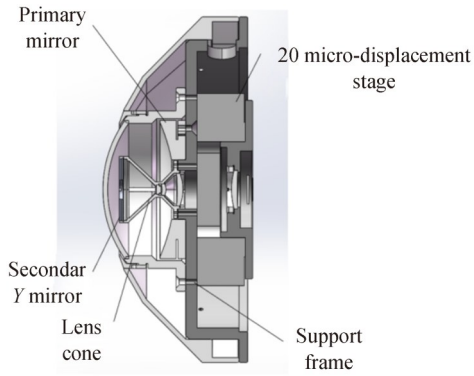


图 11 成像系统三维剖面图

Fig. 11 3D cross-sectional view of the imaging system

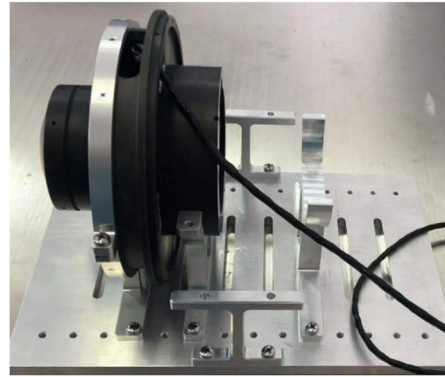


图 12 成像系统实物图

Fig. 12 Physical image of the imaging system

4.1 成像测试

对成像系统进行了室内目标的偏振成像数据采集及偏振信息解算验证实验。图 13 为多偏振态同时成像系统输出的原始图像,其中每一个 2×2 像素单元分别由 0° 、 45° 、 90° 偏振和强度响应像元组成,由于各角度方向的偏振像元和强度像元响应不一致性,图像的清晰度不高。经过偏振态抽取和图像非均匀性校正后,各偏振角度方向和强度响应图像如图 14 所示,经解算后的偏振度图像如图 15 所示。

对偏振图像和强度图像进行对比度计算,计

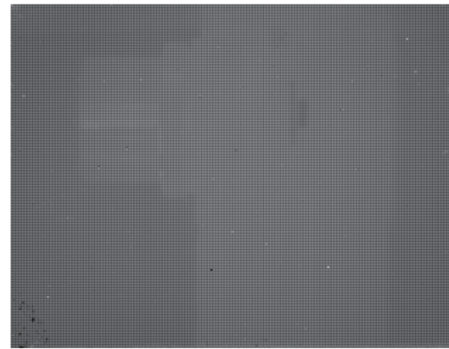


图 13 原始图像

Fig. 13 Original image

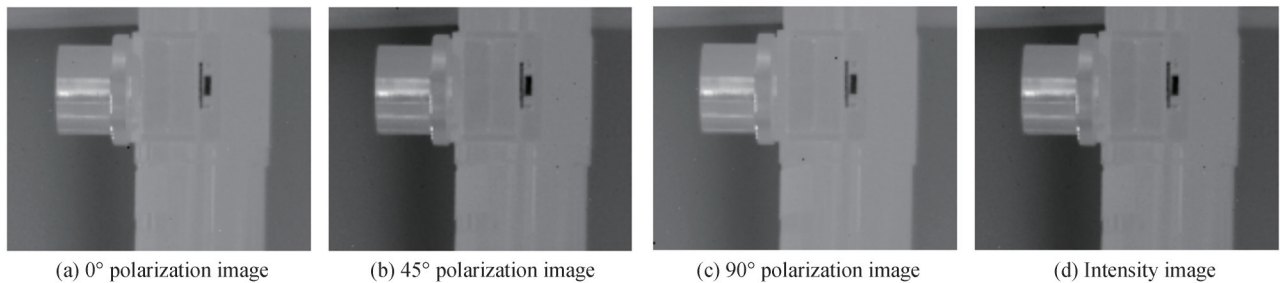


图 14 各偏振方向及红外强度图像

Fig. 14 The images of each polarization direction and infrared intensity

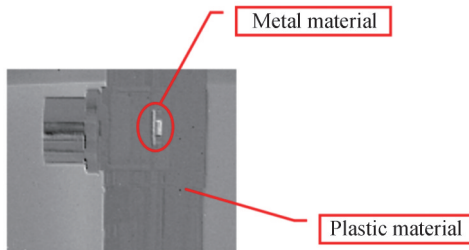


图 15 偏振度图像

Fig. 15 Image of degree of polarization

算公式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j) \quad (4)$$

式中, $\delta(i, j) = |i - j|$, 表示相邻像素间的像素灰度差; $P_{\delta}(i, j)$ 表示相邻像素间灰度差为 δ 的像素分布概率, 结果如表 4 所示。经过偏振态抽取和图像非均匀性校正后, 各偏振角度方向图像、强度图像、偏振度图像的对比度相比原始图像都得到了较大提升, 目标的边缘轮廓更加清晰, 且偏振度图像的对比度优于强度图像。

表 4 图像对比度分析结果
Table 4 Contrast analysis results of images

Image	Original image	0° image	45° image	90° image	Intensity image	Degree of polarization image
Contrast	11.36	80.92	100.99	77.07	108.73	115.83

同时, 对图 15 偏振度图像中各像素点的偏振度进行统计分析。目标包括塑料材质和金属材质两种不同的材料, 其中, 塑料材质部分的偏振度为 0.02~0.12, 金属材质部分的偏振度为 0.31~0.3, 不同材质的偏振度具有较大差异, 验证了红外偏振成像提升了对不同材质目标的识别能力。

5 结论

分焦平面偏振成像与微扫描技术相结合的方法可以解决分焦平面偏振成像带来的瞬时视场误差以及分辨率降低等问题。本文研制了一套基于透镜微扫描的折反式红外偏振成像系统, 将传统卡式系统的双曲面次镜简化为平面镜, 利用非球面后透镜组校正像差, 降低了系统镜片制作和装调难度。将最后一块透镜作为微扫描透镜, 实现 2×2 模式微扫描成像, 分析了微扫描透镜的同轴度、位置度、扫描位移等对成像质量的影响, 证明微扫描透镜对公差敏感。研制了偏振成像系统并开展了成像实验, 结果表明, 相对于红外强度成像, 红外偏振成像图像对比度更高, 目标轮廓更清晰。该系统可为后续进一步开展 2×2 模式微扫描实验提供硬件支撑。

参考文献

- [1] PHAM H T T, LE H T. An effective method for detecting dorsal hand veins utilising near-infrared imaging technology[J]. Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 2021, 63(2): 32-38.
- [2] CHRABASZCZ K, KAMINSKA K, SONG C L, et al. Fourier transform infrared polarization contrast imaging recognizes proteins degradation in lungs upon metastasis from breast cancer[J]. Cancers, 2021, 13(2): 162.
- [3] FELTON M, GURTON K P, PEZZANITI J L, et al. Measured comparison of the crossover periods for mid- and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15704-15713.
- [4] LI Ning, ZHAO Yongqiang, PAN Quan, et al. Illumination-invariant road detection and tracking using LWIR polarization characteristics[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180: 357-369.
- [5] LI Guangde, LIU Dongqing, WANG Yi, et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology [J]. Infrared Technology, 2019, 41(6): 495-503.
李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 495-503.
- [6] FU Qiang, JIANG Huilin, DUAN Jin, et al. Target detection technology based on polarization imaging in the complex environment [C]. International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging: Laser Sensing & Imaging & Applications. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [7] GIUDICOTTI L, BROMBIN M. Data analysis for a rotating quarter-wave, far-infrared Stokes polarimeter[J]. Applied Optics, 2007, 46(14): 2638-2648.
- [8] TYO J S. Hybrid division of aperture/division of a focal-plane polarimeter for real-time polarization imagery without an instantaneous field-of-view error[J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 2984-2986.
- [9] FARLOW C A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, et al. Imaging polarimeter development and applications [C]. Polarization Analysis and Measurement IV, International Society for Optics and Photonics, 2002, 4481: 118-125.
- [10] ZHAO Yongqiang, LIU Wuteng. Design and performance analysis of infrared micro-polarizer array [C]. 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), IEEE, 2015: 4574-4580.
- [11] ANDREOU A G, KALAYJIAN Z K. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters [J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(6): 566-576.

- [12] RATLIFF B M, LACASSE C F, TYO J S. Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgrid polarimeter imagery[J]. Optics Express, 2015, 17(11):9112-9125.
- [13] ZHANG Junchao, LUO Haibo, HUI Bin, et al. Image interpolation for division of focal plane polarimeters with intensity correlation[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20799-20807.
- [14] SARGENT G C, RATLIFF B M, ASARI V K. Conditional generative adversarial network demosaicing strategy for division of focal plane polarimeters[J]. Optics Express, 2020, 28(25): 38419-38443.
- [15] ZHAO Feng, CHENG Ximeng, FENG Bin, et al. Comparison research of interpolation algorithms for division of focal plane polarization image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161014.
赵峰,程喜萌,冯斌,等.分焦平面偏振图像插值算法的比较研究[J].激光与光电子学进展,2020,57(16):161014.
- [16] LU Jinzheng, WU Bin, ZHANG Qiheng. Image super-resolution reconstruction with regularization restoration and sparse representation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(9):1-7.
路锦正,吴斌,张启衡.正则化恢复联合稀疏表示的图像超分辨率重构[J].光电工程,2013,40(9):1-7.
- [17] CHUN C S L. High-resolution polarization-sensitive imaging sensors: U.S. Patent 6 075 235[P]. 2000-6-13.
- [18] XIAO Jianguo, YAO Tong, ZHANG Wanqing, et al. Study on machining technology of large aspheric aluminum reflector with three axis linkage[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 829-835.
肖建国,姚同,张万清,等.大口径非球面铝反射镜三轴联动加工技术研究[J].红外技术,2021,43(9):829-835.

Manufacturing of Infrared Polarization Imaging Optical System Based on Micro-scanning

TIAN Chen^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, ZHANG Xiaojie³, LONG Huabao³, HOU Mingyang⁴,
SHEN Zhengxiang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Tongji University,
Shanghai 200092, China)

(2 Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University,
Shanghai 200092, China)

(3 Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

(4 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: Division of focal plane polarimeters can obtain transient polarization imaging information, which is a research hotspot in the field of infrared polarization imaging technology. However, there are also some shortcomings. In the measurement process, the instantaneous field of view error will be produced and the image resolution will be reduced. The method of combining micro-scanning technology and infrared polarization imaging technology can make up for the above shortcomings. The focusing lens in the infrared imaging system is used as the micro-scanning lens and fixed on the two-dimensional micro-scanning platform which adopts 2×2 mode to implement periodic scanning. Finally, four sequential images of the same scene with one pixel shift can be obtained, to obtain the target's polarized light intensity data in 4 different directions, and then calculate the Stokes parameters. The polarization imaging optical system based on lens micro-scanning requires that the displacement of the micro-scanning lens does not reduce the imaging quality, that is, the tolerances such as the coaxiality, true position, and scanning displacement of the micro-scanning lens are not sensitive, so higher requirements are proposed for the design and assembly of the optical system. The article first discusses the relevant theoretical basis of polarization based on Stokes vector method, introduces the representation of Stokes vector and the calculation formulas of polarization degree and polarization angle, and then introduces the division of focal plane polarimeters based on micro-scanning technology in detail, including the distance of each displacement, the movement path of the micro-scanning lens. What's more, the infrared imaging system is designed. The catadioptric system is selected as the initial structure, the aspherical secondary mirror is simplified to a plane mirror only for reflecting the light path, and then the aspherical rear lens group is used to correct the aberration. The infrared system has four lenses, and using the last lens as a micro-scanning lens to realize the orthogonal displacement of 2×2 mode. The wavelength of the system is $3 \sim 5 \mu\text{m}$, the F-number is 2, the optical field angle is $\pm 2^\circ$, the focal length is 176 mm and the aperture is not less than $\varphi 40$ mm. After completing the

optical design, the optical transfer function and spot diagram are performed. The optical transfer function of each field is higher than 0.47@17 lp/mm and the RMS radius of each field is less than 11 μm . The results show that the optical system meets the requirements for use. Then the tolerance analysis is completed. From the result of the Ment-Karol simulation, the probability of MTF value greater than 0.2@17 lp/mm is over 90%. The influence of the coaxiality, true position, and scanning displacement of the micro-scanning lens on the imaging quality is also analyzed. The system MTF value changes with the decenter and tilt of the micro-scanning lens in the X and Y directions are provided. The results show that the optical system can still ensure good imaging quality in the range of decenter $\pm 200 \mu\text{m}$ and tilt $\pm 0.4^\circ$, and it is not sensitive to tolerances. In addition, structural design is completed. The entire imaging system includes the optical system and the mechanical structure supporting the optical system. Among them, the support frame is made of titanium alloy material to improve rigidity and the rest of the structure is made of aluminum alloy material. The main reflector is the core of the catadioptric optical system, and its surface shape accuracy determines the imaging quality of the system. Therefore, a stress isolation groove is used to realize a flexible connection with the support frame. All mirrors and lenses are machined using a single point diamond turning method. Finally, a polarization imaging experiment is carried out with the developed system, and the results show that infrared polarization imaging images have higher contrast, clearer target contours, and better identification of different materials compared with infrared intensity imaging.

Key words: Infrared polarization; Optical system; Micro-scanning lens; Catadioptric system; Big tolerance

OCIS Codes: 220.4830; 260.5430; 110.3080; 220.4610; 120.3620