

文章编号 2095-1531(2021)05-1194-08

数字微镜器件超分辨成像光学系统 装调误差影响研究

邢思远^{1,3}, 王超^{1,2}, 徐森^{1,3}, 李英超^{1,3*}, 史浩东^{1,3}, 刘壮^{1,3}, 付强^{1,3}

- (1. 长春理工大学空间光电技术吉林省重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:目前对于超分辨成像技术的研究主要集中在超分辨重建算法方面, 光学系统本身的装调误差对超分辨成像结果的影响尚未见报道。针对这一问题, 开展了装调误差对超分辨成像影响的研究, 建立了基于数字微镜器件(DMD)的超分辨成像光学系统的基本成像模型, 设计了一个工作波段为8~12 μm的DMD超分辨成像光学系统, 提出了装调误差对超分辨成像质量影响的分析方法。在成像模型中分别引入适当的偏心、倾斜、镜片间隔误差、离焦等装调误差, 对超分辨重建结果进行仿真分析, 得出了该超分辨成像光学系统装调时的公差范围: 该系统在加工装调时X方向总体偏心误差控制在±0.07 mm以内, Y方向总体偏心误差控制在±0.05 mm以内, X方向和Y方向的总体倾斜误差控制在±0.06°以内, 总体镜片间隔误差控制在±0.02 mm以内, 成像物镜的离焦量控制在±0.04 mm以内, 投影物镜的离焦量控制在±0.05 mm以内, 在此范围内超分辨成像光学系统可以保证超分辨成像的质量。

关键词:装调误差容限; 超分辨成像; 光学设计; 数字微镜器件

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0220

收稿日期: 2020-12-28; 修订日期: 2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金(No. 61805028, No. 61805027, No. 61705019, No. 61701045); 装发2020年第二批快速扶持项目(No. 61404140517); 科工局专项(No. KJSP2016010202); 国家自然科学基金天文联合基金(No. U1731240); 吉林省自然科学基金(No. 20180101338JC); 应用光学国家重点实验室开放基金(No. SKLA02020001A11)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61805028, No. 61805027, No. 61705019, No. 61701045); The Second Batch of Rapid Support Projects in 2020(No. 61404140517); Special Project of Science and Industry Bureau(No. KJSP2016010202); Joint Astronomical Fund of National Natural Science Foundation of China(No. U1731240); Natural Science Foundation of Jilin Province(No. 20180101338JC); Open Fund of State Key Laboratory of Applied Optics(No. SKLA02020001A11)

Influence of alignment error on DMD super-resolution imaging optical system

XING Si-yuan^{1,3}, WANG Chao^{1,2}, XU Miao^{1,3}, LI Ying-chao^{1,3*}, SHI Hao-dong^{1,3}, LIU Zhuang^{1,3}, FU Qiang^{1,3}

(1. *Jilin Province Key Laboratory of Space Opto-Electronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

* *Corresponding author, E-mail: hsjlyc@126.com*

Abstract: At present, most of the research on super-resolution imaging technology is focused on the super-resolution reconstruction algorithm, but the influence of the alignment error of an optical system on the super-resolution imaging results has not been reported. To solve this problem, We researched the influence of alignment error on super-resolution imaging. First, the basic imaging model of super-resolution imaging optical system based on Digital Micro-mirror Device (DMD) is established. A DMD super-resolution imaging optical system with operating band of 8~12 μm is designed, and a method used to analyze the influence of the alignment error on super-resolution imaging quality is proposed. In the imaging model, alignment errors such as eccentricity, tilt, lens spacing error and defocus are introduced, and the reconstruction results are analyzed. Finally, the range of tolerance of the super-resolution imaging optical system is obtained. The results show that the total eccentricity error in the X direction is controlled within ± 0.07 mm, and that in the Y direction is within ± 0.05 mm; the total tilt error in the X and Y directions is controlled within $\pm 0.06^\circ$; the overall lens spacing error is controlled within ± 0.02 mm; the defocusing amount of the imaging object lens is controlled within ± 0.04 mm; the defocusing amount of the projection objective lens is controlled within ± 0.05 mm, and within this range, the super-resolution imaging optical system can ensure the quality of super-resolution imaging.

Key words: alignment error tolerance; super-resolution imaging; optical design; digital micro-mirror device

1 引言

超分辨成像方法是通过成像系统获得的单帧或多帧低分辨率图像得到高分辨率图像的一种技术^[1]。在众多超分辨成像方法中,基于信号稀疏性原理的压缩感知算法因其优秀的超分辨性能成为了近年的研究重点^[2]。

文献 [3-4] 通过引入稀疏训练字典的方式提升了压缩感知在超分辨成像中的效果和性能。压缩感知理论追求的是输入数据量的最小化,而这个理念与超分辨成像中利用低分辨率图像重建高

分辨率图像的理念相近,这里低分辨率图像可以理解为被“压缩”后的数据^[5]。由于压缩感知理论与超分辨成像理念的高度契合,使得目前大多数对于超分辨成像技术的研究都是基于压缩感知理论的重建算法,然而却忽略了光学系统本身对超分辨重建结果的影响。文献 [6] 针对编码孔径成像光谱仪系统中光路多次反射引起的光轴失准问题,提出利用激光参考定位和光的折反射原理相结合的方法进行装调。文献 [7] 中针对 DMD 与 CCD 像素对准时的漏光问题、实际观测与仿真模拟之间的误差以及特定镜头对超分辨成像结果的

影响 3 个方面进行分析,提出了特定的重建模型,从而提高了图像重建质量。然而,上述文献都忽略了光学系统本身的误差对超分辨成像结果的影响。本文首先建立了 DMD 超分辨成像光学系统的成像模型,设计了一个长波红外波段的 DMD 超分辨成像光学系统,然后对超分辨成像光学系统的成像过程进行仿真研究,并提出了装调误差对超分辨成像质量影响的分析方法,在 DMD 成像光学系统的成像模型中分别引入适当的偏心、倾斜、镜片间隔误差、离焦等装调误差,对重建结果进行分析,得到了该 DMD 超分辨成像光学系统装调时的公差范围。

2 DMD 超分辨成像光学系统基本成像模型与仿真过程

图像模糊退化过程一般可视为一个线性空间不变的退化系统。退化后的图像可表示为原始清

晰图像与模糊核函数的卷积:

$$b(x,y) = i(x,y)*k(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中, (x,y) 表示模糊图像坐标, $b(x,y)$ 表示模糊图像, $i(x,y)$ 表示原始清晰图像, “ $*$ ”表示卷积算符, $k(x,y)$ 表示模糊核函数, $n(x,y)$ 表示加性噪声^[8]。

对于光学图像退化过程,可认为引起图像模糊的模糊核函数 $k(x,y)$ 是光学系统的点扩散函数。光学模糊退化过程一般可视为一个线性空间变化的退化过程,模糊图像可表示为:

$$b(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} i(s,t)k_{s,t}(x-s,y-t)dsdt + n(x,y) \quad (2)$$

式中, (s,t) 表示原始清晰图像的坐标, $k_{s,t}$ 表示空间变化的点扩散函数^[9]。

在仿真过程中使用原始图像与光学系统的点扩散函数卷积模拟光学系统的成像过程,本文在仿真时,忽略了噪声的影响,仿真流程图如图 1 所示。

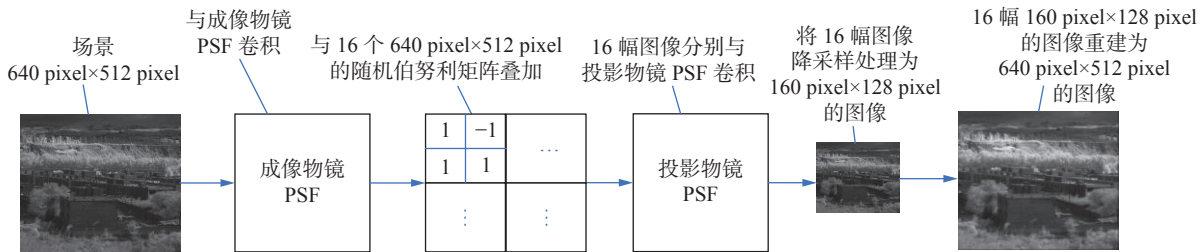


图 1 仿真流程图

Fig. 1 Simulation flow chart

仿真过程在 Matlab 软件平台上实现,仿真过程主要包括 5 个步骤。

(1) 将分辨率为 640 pixel×512 pixel 的场景与成像物镜的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 做卷积,模拟成像物镜的成像过程。获取成像物镜的 PSF 时,在 ZEMAX 中可以直接提取所设置的 9 个视场的 PSF 矩阵,提取 PSF 矩阵时应保证 PSF 的数据采样间隔与探测器像元尺寸相同,DMD 超分辨成像光学系统设置的视场如图 2 所示。将所提取的 9 个视场的 PSF 按视场顺序进行拼接,将 PSF 矩阵的中心点坐标与视场点对应,即可获得不同视场位置的 PSF。根据所提取的 9 个视场的 PSF,再通过插值求取未知视场的 PSF,以获取空间变化 PSF。

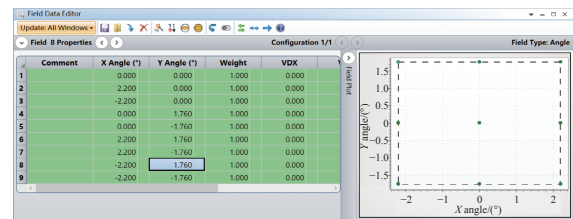


图 2 视场设置

Fig. 2 Field of view settings

所用的方法为基于主元分析的未知视场 PSF 插值获取方法,这种获取 PSF 模型的基本思想是寻找一组基函数,使得成像系统的 PSF 能够在由这组基函数所组成的函数空间内找到一个很好的近似。基于主元分析的 PSF 获取方法包括 3 个步骤: ①已知点 PSF 的表征,选取主成分分析(PCA)模型表征 PSF,拟合获取已知点的 PSF 主元分析

模型参数;②利用点插值法获取未知点的 PSF 的模型参数;③未知点 PSF 的回归;将插值获取的参数带入 PSF 表征模型中拟合获取未知点 PSF^[10]。引入装调误差后,各视场 PSF 均发生变化,重复上述步骤即可获得引入装调误差后空间变化的 PSF。

(2) 将得到的图像与 DMD 编码模板进行叠加,对图像进行编码调制,通过 DMD 的 4 pixel×4 pixel 区域对应长波红外探测器的 1 pixel,实现 4 倍分辨率的图像重构,采用的编码为随机伯努利矩阵,首先生成 16 个 4 pixel×4 pixel 的随机伯努利矩阵,再将其扩展平铺为 640 pixel×512 pixel 的矩阵,并与卷积后的图像进行点乘以实现图像的编码。

(3) 将编码后的图像与投影物镜的 PSF 卷积,仿真模拟投影物镜成像过程,投影物镜的 PSF 获取方法同上。

(4) 将得到的 640 pixel×512 pixel 的图像降采样为 160 pixel×128 pixel,仿真模拟低分辨率长波红外探测器成像过程。

(5) 通过复原算法将 16 幅分辨率为 160 pixel×128 pixel 的图像重构为 640 pixel×512 pixel 的图像,实现 4 倍分辨率的图像重构。

采用的重构算法为正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP),采用 OMP 算法进行信号重构时,需要从信息算子中找到能够表示稀疏信号的一些最优原子,使得表示信号与测量值之间的残差最小,即不断逼近测量值的真实支撑集^[11],其详细计算过程可以参考文献 [12]。将峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 作为图像的客观评价指标。PSNR 是使用最为广泛的一种图像客观评价指标,它基于对应像素点间的误差进行评价,一般用于最大值信号和背景噪声之间的一个工程项目。PSNR 的单位是 dB,其值越大表示失真越小,PSNR 低于 20 dB 时图像不可接受。其计算过程为:

$$MSE = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (X(i, j) - Y(i, j))^2, \quad (3)$$

$$PSNR = 10 \lg \left[\frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right], \quad (4)$$

式中, MSE 表示当前图像 X 和参考图像 Y 的均方

误差 (Mean Square Error), H 和 W 分别为图像的高度和宽度, n 为每像素的比特数,一般取 8,即像素为 256 灰阶。

图 3 给出了原图和使用 OMP 算法重构得到的图像,最终重构图像的 PSNR 值为 23.8302。



(a)



(b)

图 3 (a)原图和(b)OMP 重构图像

Fig. 3 (a) Original image and (b) OMP reconstructed image

3 基于 DMD 的超分辨成像光学系统

3.1 基于 DMD 的超分辨成像光学系统结构

根据上述 DMD 超分辨成像光学系统的基本成像模型,设计了一个基于 DMD 的超分辨成像光学系统。

DMD 本质是一个反射式数字半导体光分布调制器^[13]。在由半导体硅片做衬底的 CMOS 存储芯片上用铰链结构构建数以百万计的微反射镜面,利用静电使每个微镜面发生独立偏转,控制图像灰度等级^[14]。

将 DMD 作为编码孔径掩模放置在系统的光

学一次成像面上,前端编码元件与后端数据处理系统相配合,构成一种光学——数字计算混合成像系统。

所设计的光学系统主要由目标源、成像物镜、DMD、投影物镜、长波红外探测器等 5 部分组成,由成像物镜将目标景象成像在一次像面 DMD 上,中间像经 DMD 调制后通过投影物镜最终成像在长波红外探测器上。最终光学系统的总体构成如图 4 所示,主要技术指标如表 1 所示。

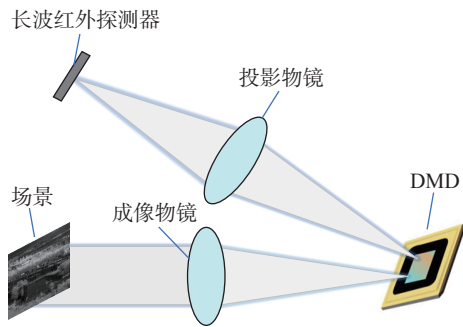


图 4 光学系统总体构成

Fig. 4 Overall structure of the optical system

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Performance parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength/ μm	8~12
Field of view FOV(X/Y) $^{\circ}$	0~4.4/0~3.52
F number	1.76
DMD array size	1920 pixel \times 1080 pixel
DMD pixel size/ μm	10.8
Detector pixel size/ μm	17
Detector array size	640 pixel \times 512 pixel
Dynamic range of detector/dB	29

3.2 设计结果

在优化过程中,由于 DMD 会使光线偏转 24° ,因此 DMD 上的像相对于折转后的光轴是倾斜的,所以需要将像面倾斜设置为变量进行优化^[15]。同时,为了避免成像物镜最后一块透镜与反射后的光线发生干涉,需要对成像物镜的后工作距以及投影物镜的前工作距进行控制^[16]。最终光学系统的结构图如图 5 所示,光学系统的传递函数图 6(彩图见期刊电子版)所示。可以看出,光学系统成像质量良好,在探测器截止频率处的传递函数接近衍射极限。

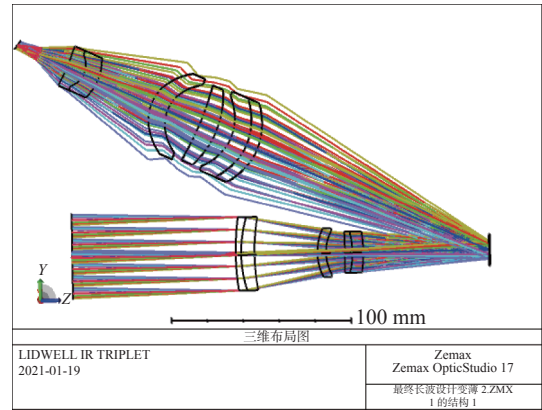


图 5 光学系统结构图

Fig. 5 Structural diagram of optical system

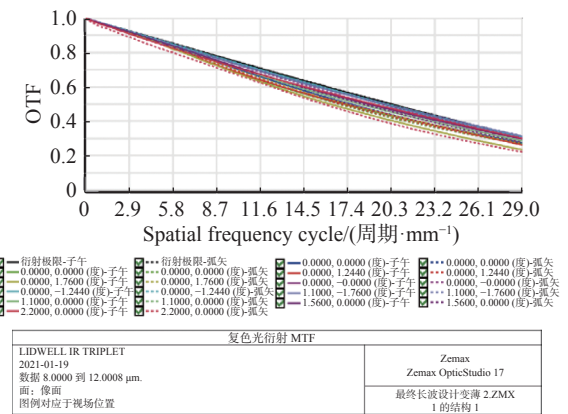


图 6 光学系统的传递函数

Fig. 6 Transfer function of the optical system

4 仿真分析系统装调误差对超分辨重建结果的影响

根据上述 DMD 超分辨成像光学系统的成像模型,在所设计的超分辨成像光学系统中分别引入偏心、倾斜、镜片间隔误差、离焦等装调误差,从 Zemax 软件中可以得到引入装调误差后,具有不同视场的光学系统的 PSF,再使用上述针对空间变化的 PSF 获取方法获取 PSF,并将获取的 PSF 代入上述仿真模型中进行分析。

本文所设计的超分辨成像光学系统在 X 和 Y 方向的视场并不相同,在光学系统中引入装调误差时需要分别对每片透镜的 X、Y 方向分别引入适量的误差进行分析。

公差分析方法主要有 3 种:灵敏度分析、反转灵敏度分析和蒙特卡罗分析^[17]。灵敏度分析是指对于给定的一组公差变量,计算出各评价标准

的变化;反转灵敏度分析是指根据每个公差在性能方面给定的最小允许减小量来计算公差;蒙特卡罗分析是利用某种统计方法,一般有均匀分布、正态分布和抛物线分布等,产生一系列的满足制定公差的随机镜头,然后再按标准进行评估^[18]。本文采用反转灵敏度分析法,以重建图像的PSNR值下降1为基础,对系统进行公差分析。

4.1 镜片偏心对超分辨重建结果的影响

对光学系统的每片透镜的 X 、 Y 方向分别引入适当偏心误差,每次引入0.01 mm的偏心量,将引入误差后的PSF代入成像模型进行图像重构。图7(彩图见期刊电子版)为每片镜片偏心量与重建图像PSNR值之间的关系。

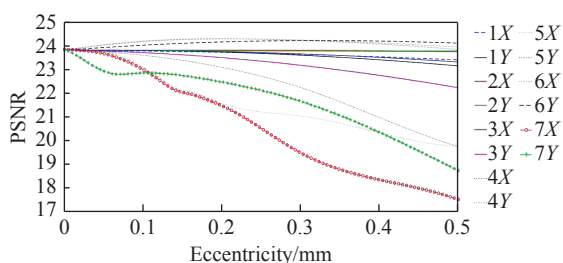


图7 镜片偏心量与重建图像PSNR值的关系

Fig. 7 Relationship between lens eccentricity and PSNR value of reconstructed image

由图7可知,第7片镜片的偏心误差对重建结果影响最大,当第7片镜片 X 方向引入0.11 mm的偏心误差或 Y 方向引入0.07 mm的偏心误差时,重建图像PSNR值下降1。

4.2 镜片倾斜对超分辨重建结果的影响

对光学系统的每片透镜的 X 、 Y 方向分别引入倾斜误差,再使用上述成像模型对图像进行重构,每次引入 0.01° 的倾斜量。图8(彩图见期刊电子版)为每片镜片的倾斜量与重建图像PSNR值之间的关系。

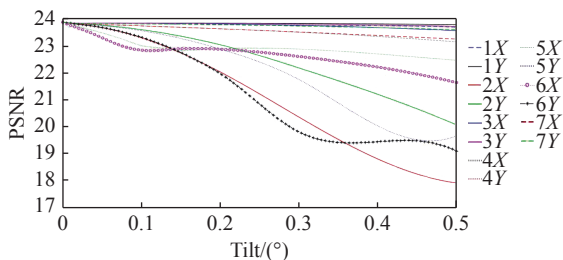


图8 镜片倾斜量与重建图像PSNR值的关系

Fig. 8 Relationship between lens tilt and PSNR of reconstructed images

由图8可知,当第6片透镜 X 方向倾斜 0.10° 或第6片透镜 Y 方向倾斜 0.14° 时重建图像PSNR值下降1。

4.3 镜片间隔误差对超分辨重建结果的影响

改变每两片透镜之间的距离,每次改变0.01 mm,再使用上述成像模型对图像进行重构。图9(彩图见期刊电子版)为镜片间隔误差与重建图像PSNR值之间的关系。

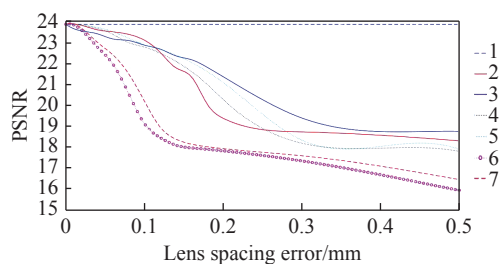


图9 镜片间隔误差与重建图像PSNR值的关系

Fig. 9 Relationship between lens spacing error and the PSNR of reconstructed images

由于光学系统的物面在无穷远处,第1片镜片与物面的间隔误差对重建结果没有影响,第6片镜片的间隔误差对图像重建结果影响最大,当第6片镜片间隔误差为0.04 mm时,重建图像PSNR值下降1。

4.4 光学系统离焦对超分辨重建结果的影响

分别改变成像物镜和投影物镜与像面之间的距离,每次引入0.01 mm的离焦量,再使用上述成像模型对图像进行重构。图10为光学系统离焦量与重建图像PSNR值之间的关系。

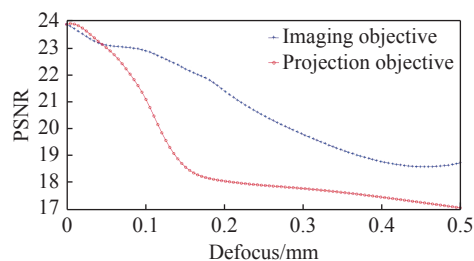


图10 光学系统离焦与重建图像PSNR值之间的关系

Fig. 10 Relationship between defocus of the optical system and PSNR value of the reconstructed image

由图10可知,成像物镜和投影物镜的离焦对重建结果影响都比较大,当成像物镜离焦0.06 mm或投影物镜离焦0.10 mm时,重建图像PSNR值下降1。

在上述装调误差分析结果的基础上,再使用蒙特卡罗法对系统进行公差分析,同时在系统中引入上述分析得到的公差范围内的随机量的多种误差组合,再通过成像模型进行图像重建,最终得到重建图像 PSNR 值下降 1 时的 DMD 超分辨成像光学系统的公差范围,表 2 为 100 次蒙特卡罗分析得到的多种误差共同作用后的 DMD 超分辨成像光学系统的公差分配结果。

表 2 公差分配结果

Tab. 2 Tolerance allocation results

偏心/mm		倾斜/(°)		镜片间隔 误差/mm	成像物镜 离焦/mm	投影物镜 离焦/mm
X	Y	X	Y			
0.07	0.05	0.06	0.06	0.02	0.04	0.05

参考文献:

- [1] 张旭东. 基于压缩感知和深度学习的超分辨成像方法研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2019.
ZHANG X D. Research on super-resolution imaging based on compressive sensing and deep learning[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese).
- [2] TIMOFTE R, AGUSTSSON E, VAN GOOL L, et al.. NTIRE 2017 challenge on single image super-resolution: methods and results[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, IEEE, 2017: 1110-1121.
- [3] YANG J CH, WRIGHT J, HUANG T S, et al.. Image super-resolution via sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(11): 2861-2873.
- [4] YANG SH Y, SUN F H, WANG M, et al.. Novel super resolution restoration of remote sensing images based on compressive sensing and example patches-aided dictionary learning[C]. *2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping*, IEEE, 2011: 1-6.
- [5] 张赛文, 林丹樱, 于斌, 等. 基于压缩感知的三维单分子定位显微成像方法研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1065-1074.
ZHANG S W, LIN D Y, YU B, et al.. Three-dimensional single-molecule localization microscopy imaging based on compressed sensing[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1065-1074. (in Chinese)
- [6] 朱丹彤. 编码孔径成像光谱仪系统集成及光谱复原实验研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
ZHU D T. Research on system integration and spectral restoration experiment of coded aperture imaging spectrometer[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese).
- [7] DUMAS J P, LODHI M A, BAJWA W U, et al.. Computational imaging with a highly parallel image-plane-coded architecture: challenges and solutions[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6145-6155.
- [8] 孙小桐. 基于常见模糊类型的图像复原技术方法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
SUN X T. Research on image restoration technology based on common fuzzy types[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019. (in Chinese).
- [9] 刘铭鑫, 张新, 王灵杰, 等. 压缩感知光谱成像技术的编码孔径与探测器匹配优化[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 290-

5 结 论

通过研究装调误差对超分辨成像结果的影响,建立了 DMD 超分辨成像光学系统的成像模型,并利用该模型对搭建的 DMD 超分辨成像光学系统获取的数据进行仿真,提出了装调误差对超分辨成像质量影响的分析方法。确定了该超分辨成像光学系统装调时所允许的公差范围,即该系统在加工装调时 X 方向总体偏心误差控制在 ± 0.07 mm 以内, Y 方向总体偏心误差控制在 ± 0.05 mm 以内; X 方向和 Y 方向的总体倾斜误差应控制在 $\pm 0.06^\circ$ 以内; 总体镜片间隔误差控制在 ± 0.02 mm 以内; 成像物镜的离焦量控制在 ± 0.04 mm 以内; 投影物镜的离焦量控制在 ± 0.05 mm 以内。

301.
LIU M X, ZHANG X, WANG L J, *et al.*. Optimization of matching coded aperture with detector based on compressed sensing spectral imaging technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 290-301. (in Chinese)
- [10] 周程灏, 王治乐, 刘尚阔. 基于空间变化点扩展函数的图像直接复原方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0110001.
ZHOU CH H, WANG ZH L, LIU SH K. Method of image restoration directly based on spatial varied point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0110001. (in Chinese)
- [11] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [12] 张一, 余卿, 张昆, 等. 基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 859-866.
ZHANG Y, YU Q, ZHANG K, *et al.*. Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 859-866. (in Chinese)
- [13] 王丽, 王威, 陈博. 改进的粒子群优化正交匹配追踪重构算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(8): 1755-1759.
WANG L, WANG W, CHEN B. Improved particle swarm optimization orthogonal matching pursuit reconstruction algorithm[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, 40(8): 1755-1759. (in Chinese)
- [14] 吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 822-831.
LV B, FENG R, KOU W, *et al.*. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese)
- [15] 陈明惠, 王帆, 张晨曦, 等. 基于压缩感知的频域OCT图像稀疏重构[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 189-199.
CHEN M H, WANG F, ZHANG CH X, *et al.*. Sparse reconstruction of frequency domain OCT image based on compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 189-199. (in Chinese)
- [16] 刘琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 675-679.
LIU L, SHEN W M, ZHOU J K. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 675-679. (in Chinese)
- [17] 李杰, 朱京平. 光波导短程透镜加工容限误差研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 244208.
LI J, ZHU J P. Fabrication tolerances in four analytical designs of geodesic lenses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 244208. (in Chinese)
- [18] 马原, 吕群波, 刘扬阳, 等. 编码孔径成像光谱仪光学放大率误差影响分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 3157-3161.
MA Y, LV Q B, LIU Y Y, *et al.*. Effect evaluation of optical magnification errors for coded aperture spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 3157-3161. (in Chinese)

作者简介:



邢思远(1997—), 男, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 2019年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学设计、计算光学等方面的研究。Email: 1249824042@qq.com



李英超(1966—), 男, 吉林长春人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 中国宇航协会光电技术专委会常务委员, 主要从事多维度光学特性测试与探测技术, 先进光学成像测试技术。Email: hsjlcy@126.com