

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

利用离焦光斑的离轴望远镜失调校正方法研究

田思恒, 黄永梅, 徐杨杰, 南新元, 吴琼雁, 向春生, 唐薇

引用本文:

田思恒, 黄永梅, 徐杨杰, 等. 利用离焦光斑的离轴望远镜失调校正方法研究[J]. *光电工程*, 2023, 50(7): 230040.

Tian S H, Huang Y M, Xu Y J, et al. Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230040.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230040>

收稿日期: 2023-02-23; 修改日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-04-11

相关论文

Advances in optical engineering for future telescopes

Daewook Kim, Heejoo Choi, Trenton Brendel, Henry Quach, Marcos Esparza, Hyukmo Kang, Yi-Ting Feng, Jaren N. Ashcraft, Xiaolong Ke, Tianyi Wang, Ewan S. Douglas

Opto-Electronic Advances 2021, 4(6): 210040 doi: [10.29026/oea.2021.210040](https://doi.org/10.29026/oea.2021.210040)

改进型高性能静态像差校正技术

任德清, 张天宇, 王钢

光电工程 2022, 49(3): 210319 doi: [10.12086/oe.2022.210319](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210319)

基于传感器优化与鲁棒预测的等效加速度前馈

夏文强, 何秋农, 段倩文, 周翕, 邓久强, 毛耀

光电工程 2021, 48(11): 210153 doi: [10.12086/oe.2021.210153](https://doi.org/10.12086/oe.2021.210153)

量子光通信中位置修正单检测控制方法

李志俊, 毛耀, 亓波, 周翕, 刘琼, 周倩

光电工程 2022, 49(3): 210311 doi: [10.12086/oe.2022.210311](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210311)

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230040

利用离焦光斑的离轴望远镜 失调校正方法研究

田思恒^{1,2,3,4}, 黄永梅^{2,3,4,5*}, 徐杨杰^{2,3,4,5}, 南新元¹,
吴琼雁^{2,3,4,5}, 向春生^{2,3,4,5}, 唐薇^{2,3,4,5}

¹新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所光场调控科学技术全国
重点实验室, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院光电技术研究所光束控制重点实验室,
四川 成都 610209;

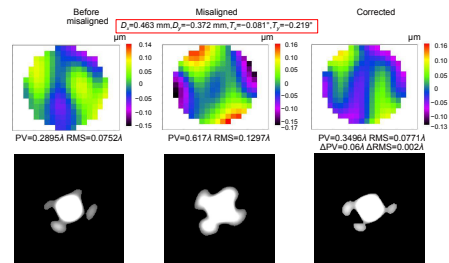
⁵中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要: 离轴反射式望远镜主要应用于空间天文观测等领域。离轴两反望远镜的成像质量对镜片的失调敏感, 且在工作环境下失调后使用激光干涉仪进行校准较为困难。针对这一难题, 本文提出了一种利用系统对无穷远点目标的离焦光斑图并使用 Swin-Transformer 网络计算次镜横向失调量的方法。通过理论计算分析, 可以避免多解问题的相机离焦位置, 并利用仿真探究了不同离焦量对校正精度的影响, 最后搭建实验平台进行验证, 训练好的网络使用失调系统的一帧离焦光斑图便可进行失调量的估计。仿真分析与实验结果均验证了该方法的有效性, 可实现工作环境中失调望远镜系统的高精度和快速校正。

关键词: 光学成像系统; 离轴望远镜; 次镜; 离焦光斑; 神经网络; 快速调整

中图分类号: O438

文献标志码: A



田思恒, 黄永梅, 徐杨杰, 等. 利用离焦光斑的离轴望远镜失调校正方法研究[J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230040

Tian S H, Huang Y M, Xu Y J, et al. Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot[J].

Opto-Electron Eng, 2023, 50(7): 230040

Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot

Tian Siheng^{1,2,3,4}, Huang Yongmei^{2,3,4,5*}, Xu Yangjie^{2,3,4,5}, Nan Xinyuan¹, Wu Qiongyan^{2,3,4,5},
Xiang Chunsheng^{2,3,4,5}, Tang Wei^{2,3,4,5}

¹School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu,
Sichuan 610209, China;

⁴Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

⁵School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing
100049, China

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-04-11

*通信作者: 黄永梅, huangym@ioe.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Abstract: Off-axis reflector telescopes are mainly used in space astronomy observation and other related fields. The image quality of off-axis two-inversion telescopes is sensitive to lens misalignment and is more difficult to calibrate using a laser interferometer after misalignment in an operating environment. To address this challenge, this paper proposes a method that uses the out-of-focus spot map of the system for infinity point targets and uses the Swin-Transformer network to calculate the amount of lateral misalignment of the secondary mirror. Theoretical calculations were used to determine the camera defocus positions that could avoid the multi-solution problem, and simulations were used to investigate the effect of different defocus amounts on calibration accuracy. The trained network uses a frame of out-of-focus spot map of the out-of-tune system to perform the estimation of the amount of out-of-tune. Both simulation analysis and experimental results verify the effectiveness of the method, which can achieve high accuracy and fast correction of out-of-tune telescope systems in the working environment.

Keywords: optical imaging system; off-axis telescope; secondary mirror; defocused spot; neural Networks; quick adjustment

1 引言

离轴反射式望远镜主要应用于空间天文观测等领域, 工作环境中的失调校正是一个很重要和棘手的环节。离轴望远镜系统 F 数小、口径大, 对镜片空间位置失调误差更加敏感^[1], 相对于轴对称光学系统的装调更为困难且耗时。目前的镜面加工技术已经能够很好地控制面型误差带来的像差^[2], 而系统机械结构层面的误差成为了比较主要的像差来源, 精调完毕的离轴系统在运输和工作过程中因温度变化和机械震动等因素影响, 会使其内部机械结构产生形变, 导致镜片空间位置产生误差, 致使系统成像质量下降。

针对离轴望远镜失调难题, 研究人员发展了多种校正技术^[2], 主要有节点像差理论^[3-4]、灵敏度矩阵法^[5-6]、神经网络法^[7-8]等。节点像差理论使用矢量解释系统像差, 在恶劣条件下依旧可以保持较高的精度, 但是推导过程异常复杂且与系统实际参数相关, 通常用作定性分析。灵敏度矩阵法是一种数值求解方法, 使用 Zernike 多项式系数来表征系统的波前像差^[7,9-10], 该方法假设系统像差与失调量之间存在线性关系, 认为 Zernike 系数与失调量之间存在线性关系矩阵, 失调状态下能通过光斑图解算 Zernike 系数来估计出失调误差^[11]。灵敏度矩阵法还需要高精度的波前探测设备反复测量多个视场点, 在工作环境中很难具备这样的条件, 使得校正过程耗时长且不易实现。

随着人工智能的发展, 神经网络法正在被应用于光学领域^[12-13]。神经网络可以通过合理的训练从而正确建立不同数据之间的非线性关系, 例如从 Zernike 系数到系统失调量的直接映射^[14]。中国科学院光电所的马霞飞利用神经网络实现了多口径活塞误差的校正,

降低了系统复杂度^[12]。徐杨杰利用机器学习的方法实现了大气湍流下的图像波前像差探测, 通过散焦平面的点扩散函数 (PSF) 得到 Zernike 系数从而实现像差探测^[13], 此外, 有学者在量子通信收发器对准^[15]、光学跟踪平台的高精度控制算法中采用系统相机采集的信息完成算法的闭环^[16-17], 这说明望远镜系统自身的相机图像具备丰富的信息可以解决许多实际问题, 将相机图像用于望远镜系统工作环境中的快速失调校正是可行的。

望远镜系统的工作环境容易存在多方面的干扰。传统失调校正方法需要多视场波前探测, 步骤繁琐, 且探测设备对外界环境较为敏感, 易受到干扰, 影响测量精度。工作环境中, 望远镜系统由于环境因素和机械震动导致失调, 同轴系统产生的像差以离焦为主, 目前, 检焦调焦方法较为成熟^[18-20], 离焦可以被快速检测并得到很好的校正。而离轴系统在结构上发生了变化, 相对同轴系统而言失调除了产生离焦外还会产生慧差、像散等低阶像差^[21], 本文在系统的额外离焦被有效校正的前提下, 提出使用系统离焦光斑图, 采用神经网络学习光斑与失调量之间的映射关系, 实现工作环境中望远镜系统失调量的快速预测和校正的方法, 用于失调望远镜系统的快速校正, 提升系统成像质量。

2 理论分析

2.1 模型建立与理论分析

在离轴两反望远镜系统中, 由于主镜的体积和重量较大, 不易进行调整, 往往以主镜作为基准, 调整体积小、重量轻的次镜来校正误差。图 1 是仿真所用

离轴两反望远镜系统在 Zemax 中的三维布局图。

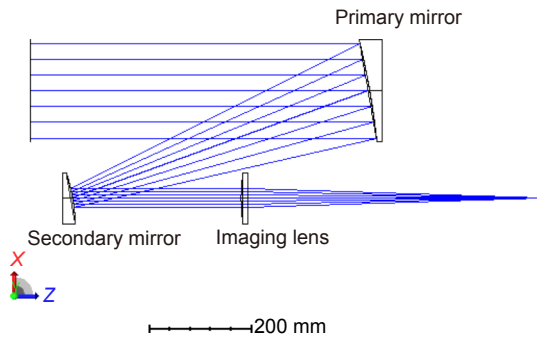


图 1 离轴望远镜三维布局图
Fig. 1 Three-dimensional layout of the off-axis telescope

系统的基本参数如表 1 所示。镜面参数及离轴参量如表 2 所示。

次镜的横向失调包含了次镜沿 X 、 Y 轴的偏心误差 (D_x 、 D_y) 和绕 X 、 Y 轴的倾斜误差 (T_x 、 T_y)。横向失调所产生的系统像差中, 三阶像差系数远大于高阶像差, 三阶像差在系统失调时占据了像差的主导地位。目前, 已有许多学者利用采集得到的系统 Zernike 系数求解系统失调量用于失调校正, 并且有学者推导了以视场矢量和像差场偏移矢量为变量的 Zernike 系数表达式用于失调量的求解^[22]。受到无波前探测技术的启发, 利用系统对无穷远点目标在离焦平面的点扩散函数 (point spread function, PSF) 理论上可以求得系统的待校正失调量, 但是这个过程异常复杂, 而神经网络在拟合映射数据间的复杂关系时具有很大的优势, 本文拟采用神经网络来进行系统 PSF 到系统失调量的映射。

对于非相干的成像系统, 像平面上的光斑强度分布就是光学系统的点扩散函数 $h(x, y)$ 可以表示为^[23]:

$$h(x, y) = \left| FFT \left\{ A(x, y) e^{j\phi(x, y)} \right\} \right|^2, \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 是光瞳函数, $\phi(x, y)$ 是光瞳面的相位分布, FFT 代表傅里叶变换, 对于相位分布 $\phi(x, y)$, 其奇对

称变换为 $-\phi(-x, -y)$ 。设这一对相位分布对应的点扩散函数分别为 $h(x, y)$ 和 $h'(-x, -y)$, 忽略光瞳的影响, $h(x, y)$ 和 $h'(-x, -y)$ 可分别表示为:

$$h(x, y) = \left| \iint (\cos \phi(x, y) + i \sin \phi(x, y)) dx dy \right|^2, \quad (2)$$

$$h'(-x, -y) = \left| \iint (\cos(-\phi(-x, -y)) - i \sin(-\phi(-x, -y))) d(-x) d(-y) \right|^2. \quad (3)$$

式 (2) 和式 (3) 中的积分形式实部相等, 虚部相反, 在取模的平方后两式相等, 即

$$h(x, y) = h'(-x, -y), \quad (4)$$

这表明某一随机波前相位分布与其奇对称变换相位所得点扩散函数相同。换言之, 一个系统焦点处的点扩散函数可以求解出多个波前相位分布, 进而导致预测失调量的多解。

为了解决这样的多解问题, 可以使用离焦光斑作为网络的输入。设离焦相位为 $\Delta\phi(x, y)$, $\Delta\phi(x, y)$ 与离焦距离 d 的关系可以表示为^[24]:

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi d}{\lambda 8F^2}, \quad (5)$$

式中: F 为光学系统 F 数, d 为离焦距离, λ 为工作波长。由于 $\Delta\phi(x, y) = \Delta\phi(-x, -y)$, 则 $\phi(x, y)$ 和 $-\phi(-x, -y)$ 对应的离焦光斑强度分布为:

$$I(x, y) = \left| \iint (\cos(\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) + i \sin(\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y))) dx dy \right|^2, \quad (6)$$

$$I'(-x, -y) = \left| \iint (\cos(-\phi(-x, -y) + \Delta\phi(-x, -y)) + i \sin(-\phi(-x, -y) + \Delta\phi(-x, -y))) dx dy \right|^2. \quad (7)$$

观察式 (6)、(7) 发现积分形式的实部和虚部都不同, 因此 $I(x, y) \neq I'(-x, -y)$ 。由此可知, 离焦光斑可以避免焦点光斑造成的多解问题对网络训练和预测产生不利影响。但是需要注意, 当相位存在分布为 $\phi'(x, y) = -\phi(-x, -y) - 2\Delta\phi(x, y)$ 时, 系统的离焦光强分布 $I''(x, y)$ 变为:

$$I''(x, y) = \left| \iint (\cos(\phi(x, y) + \Delta\phi(-x, -y)) - i \sin(\phi(x, y) + \Delta\phi(-x, -y))) dx dy \right|^2, \quad (8)$$

表 1 望远镜基本参数表

Table 1 Telescope basic parameters table

Parameter name	Focal distance/mm	F-number	Caliber/mm	Working wavelength/nm
Parameter value	2427.12	16.3805	148	532

表 2 望远镜反射面参数表

Table 2 Parameters of the telescope reflector

Surface	Mechanical diameter/mm	Radius of curvature/mm	Interval/mm	Conic factor	Off-axis parameters/mm
Primary mirror	148	-1200	-480	-1	210
Secondary mirror	60	-240	260	-1	42

此时 $I(x, y) = I''(x, y)$, 仍然存在多解问题, 但通过调节离焦相机的离焦位置可以规避, 从而为神经网络的失调量求解提供了途径。

以本文所用模型为例, 对离焦相机离焦距离-15 mm、-10 mm、-5 mm 的情形进行分析, 按照式 (5) 计算得到离焦相位分别为 -21.9583π rad、 -14.6727π rad、 -7.3363π rad, 此时系统 Zernike 离焦项系数和分布如表 3 所示, 由于系统相机视场的限制, 横向失调的偏心自由度误差范围为 ± 0.8 mm, 倾斜自由度误差范围为 $\pm 0.3^\circ$ 。使用蒙特卡洛方法分析 Zernike 系数的离焦项系数分布, 每种离焦距离均采集 20000 组样本。

可以看到三种离焦位置下离焦光斑对应的相位解集和伪解集 (在此定义 φ 为相位解, φ' 为伪解) 完全分离, 同样使得失调量的解集和伪解集完全分离, 不同之处仅在于正、伪解集之间的距离。两个解集的距离越大, 神经网络在训练时输出伪解会受到的训练惩罚越大, 避免输出为伪解的可能性越大, 更能保证网络可以学习光斑与失调量之间正确的映射关系而收敛, 具体将在下一章节分析, 在此处先给出本文方法的实施流程图, 如图 2 所示。

2.2 网络选择

本文选用了 Swin-Transformer 网络的 tiny 版本 (Swin-T) 为基础, 该网络借鉴了类似于 CNN 的滑窗操作、层级设计等特点, 让自然语言处理领域的

Transformer 可以用于解决视觉方面的问题, 由于交叉窗口间的信息交换和多头注意力机制 (multi-head attention) 的存在, 该网络可以充分地关注到输入数据不同方面的信息, 方便挖掘输入数据的特征信息加以学习。其在视觉领域多个公开数据集的测试中性能优于其它卷积神经网络如 RegNet、EfficientNet 等, 取得了优秀的成绩, 显出了巨大的应用潜力^[25], 本文所用网络的主体结构如图 3 所示, 相较于官方给出的网络结构而言, Stage3 的 Block 堆叠数量从 6 个降低至 4 个, 理由是 2000 个样本足以使网络学习正确的映射关系且在实际的数据集采集中时间开销合理, 过多的堆叠 Block 对精度不会有实质的提升且会导致时间成本上升以及过拟合发生。本网络原用于分类任务而本文是非线性拟合任务, 所以修改网络后部结构, 输出层去掉 Softmax 操作, 将原有的交叉熵损失函数 (cross entropy loss) 替换为均方误差函数, 如式 (9) 所示, 该损失函数主要计算网络预测失调量向量与真值向量间的距离来评估网络训练情况。

在深度学习框架下构建展示的 Swin-Transformer 网络采用自适应优化器 (AdamW), 初始学习率 0.00001^[21], 迭代训练 2000 次, 损失函数为均方误差 (MSE Loss, 公式中简写为 L_{MSE})。

$$L_{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{n} \quad (9)$$

现将本文所用网络关键参数进行汇总列于表 4。

表 3 离焦项系数和分布

Table 3 Coefficient and distribution of the out-of-focus term

	-15 mm	-10 mm	-5 mm
Defocus term coefficient	-5.580	-3.307	-1.844
Coefficient distribution/ φ	[-7.0875, -3.8361]	[-5.2038, -1.9909]	[-3.3399, -0.1329]
Coefficient distribution/ φ'	[4.0725, 7.3239]	[1.4102, 4.6231]	[0.3471, 3.5541]

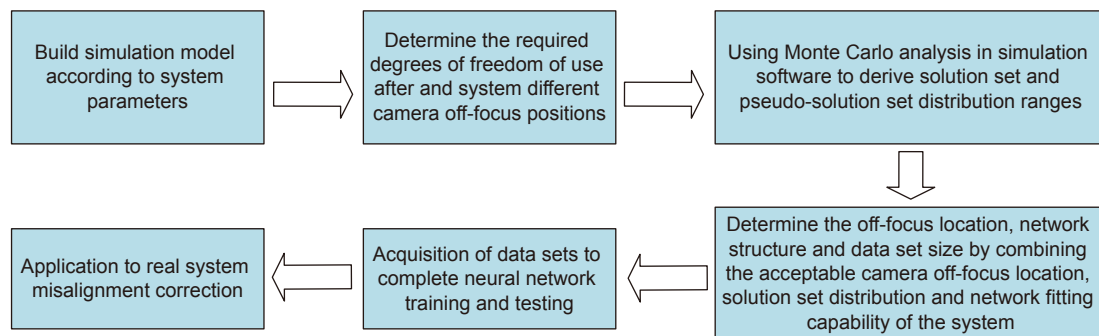


图 2 本文方法一般实施流程

Fig. 2 General implementation process of the method in this paper

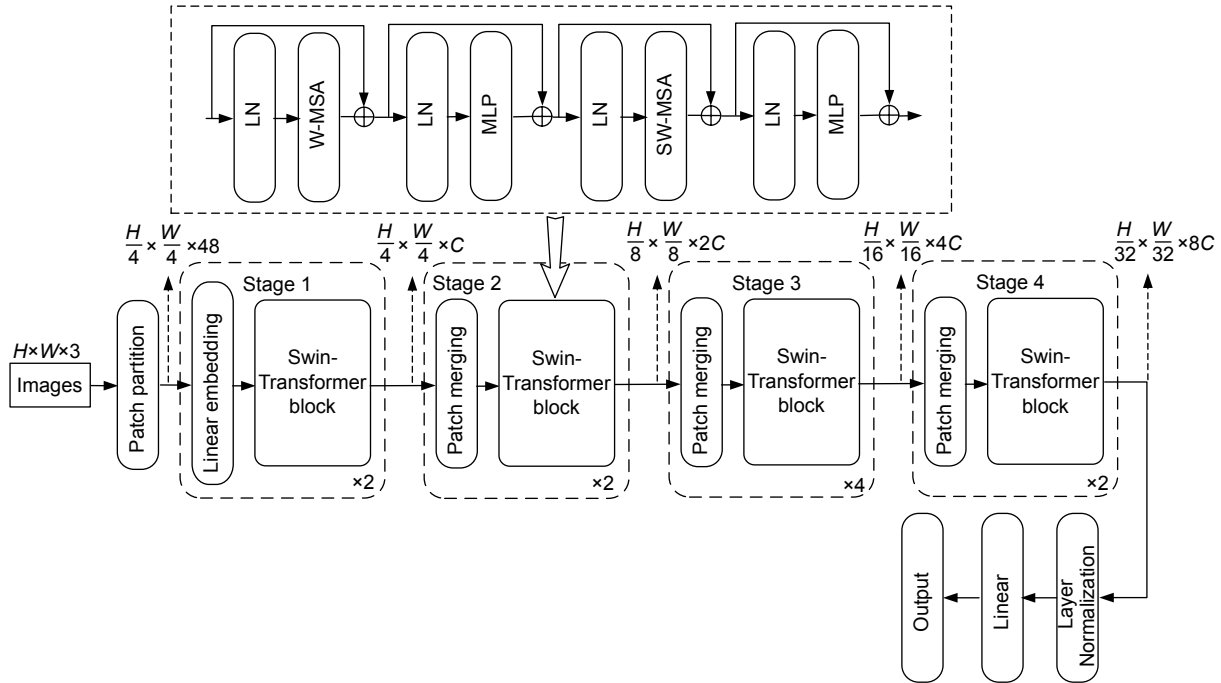


图 3 网络结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the network structure

表 4 网络参数汇总表

Table 4 Summary table of network parameters

Parameter name	Parameter
Block stacked structure	[2, 2, 4, 2]
Loss function	MSE Loss
Optimizer	AdamW
Initial learning rate	10E-6
Training times	2000

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

仿真模型理想状态下波前 PV 值为 0.0498λ , RMS 值为 0.0136λ 。上节理论分析中已经说明了次镜横向失调各自由度的范围, 在此范围内随机施加失调量并同步记录 -15 mm 、 -10 mm 、 -5 mm 处的离焦光斑, 重复 2000 次后便分别得到了三组不同离焦位置下用于 Swin-T 网络的训练集。这 2000 个失调样本的波前信息统计如图 4 所示, 波前 PV 值和 RMS 值都

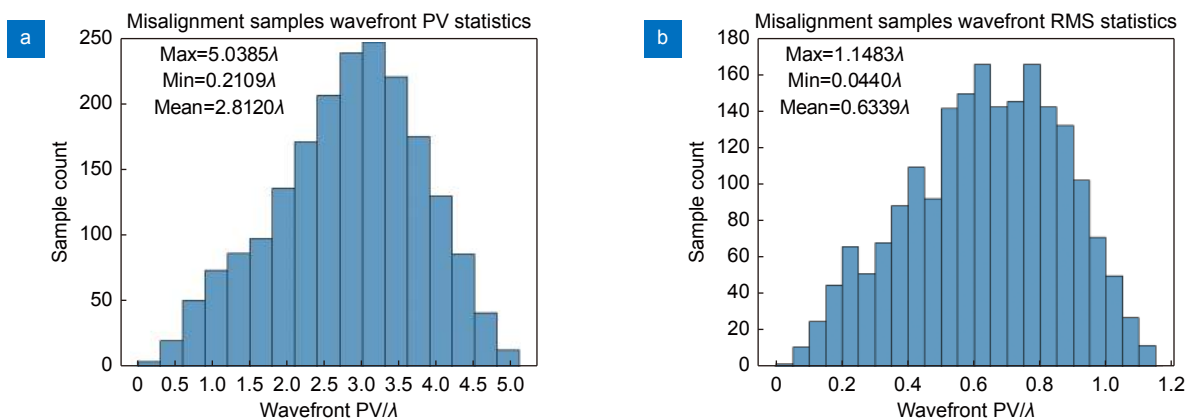


图 4 失调样本波前统计。(a) 波前 PV 统计; (b) 波前 RMS 统计

Fig. 4 Wavefront statistics of misaligned samples. (a) Wavefront PV statistics; (b) Wavefront RMS statistics

呈现正态分布, 波前 PV 值分布范围为 $[0.2109\lambda, 5.0385\lambda]$, 波前 RMS 值分布范围为 $[0.0440\lambda, 1.1483\lambda]$ 。

结合实际系统并兼顾训练、预测的时间开销, 将图像由 1024×1024 分辨率压缩到 224×224 分辨率, 按照上节给出的训练参数在 2000 次迭后结束训练。

在训练集以外各离焦位置的 200 份测试样本 (同

失调误差) 中对 Swin-T 网络的失调量预测能力进行测试, 同时使用传统灵敏度矩阵法作为对照, 统计测试样本校正前后波前信息以及校正后波前残差。图 5 统计了测试样本的波前 PV 值和 RMS 值, 成正态分布, 分布范围与数据集样本波前分布范围接近。

图 6 统计了三种离焦方案和灵敏度矩阵法校正后系统的波前 PV 值, 从图中可以看到, 离焦 -15 mm

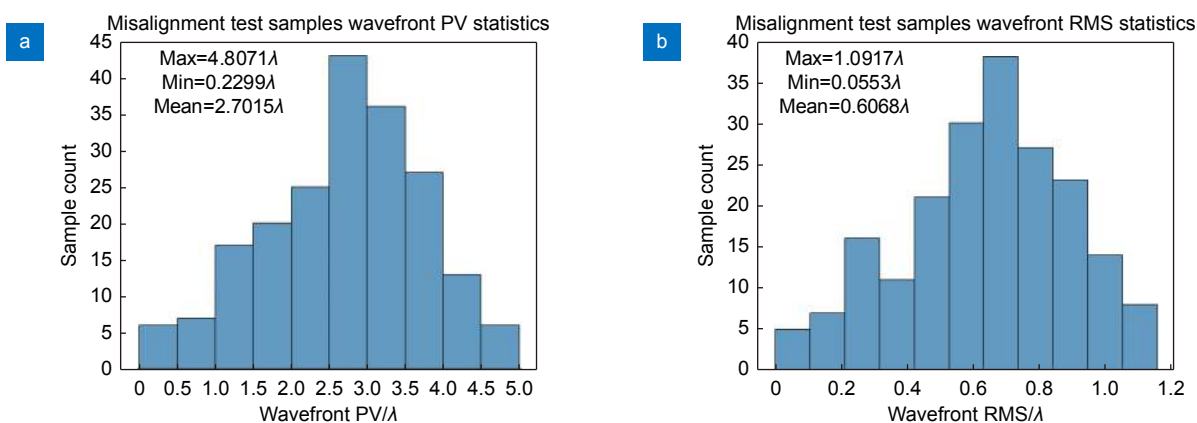


图 5 测试样本波前信息统计。(a) 波前 PV 统计; (b) 波前 RMS 统计

Fig. 5 Test sample wavefront Information Statistics. (a) Wavefront PV statistics; (b) Wavefront RMS statistics

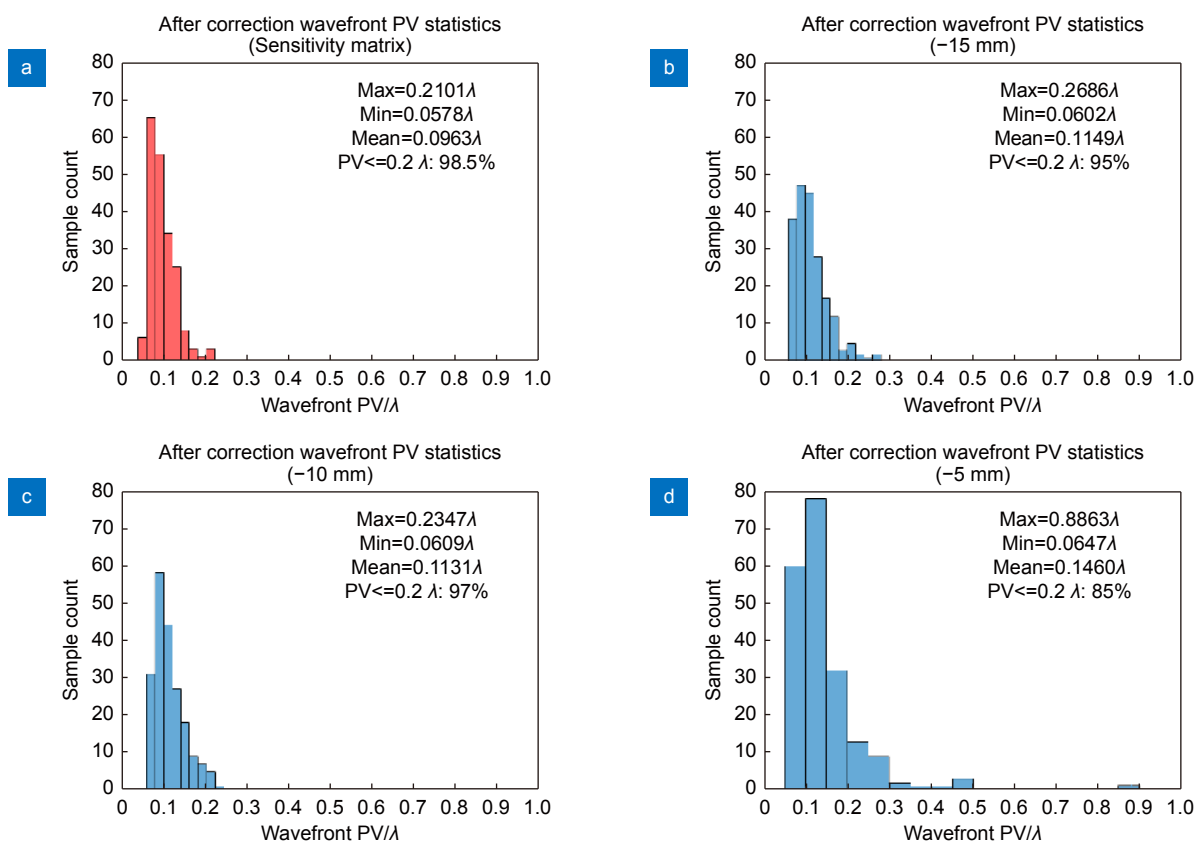


图 6 校正后波前 PV 统计。(a) 灵敏度矩阵法; (b) 离焦 -15 mm; (c) 离焦 -10 mm; (d) 离焦 -5 mm

Fig. 6 Wavefront PV statistics after correction. (a) Sensitivity matrix method; (b) Defocus -15 mm; (c) Defocus -10 mm; (d) Defocus -5 mm

和-10 mm 的方案与灵敏度矩阵法校正后的统计结果相近, 离焦-5 mm 的方案精度相对较差, 校正后波前 PV 值小于 0.2λ 的样本占比为 85%, 较灵敏度矩阵法和离焦-15 mm、-10 mm 方案低十个百分点左右。

图 7 统计了三种离焦方案和灵敏度矩阵法校正后系统的波前 RMS 值, 离焦-15 mm 的方案精度最高, 校正后波前 RMS 值小于 0.03λ 的样本占比达 89%, 离焦-5 mm 方案的精度最差, 校正后波前 RMS 值小于 0.03λ 的样本占比为 72.5%。

结合图 6、图 7 来看, 离焦-15 mm 方案的精度略高于-10 mm 的方案, 离焦-5 mm 的方案相对来说精度较差。离焦-5 mm 方案精度较低的原因是解集距离过小造成的, 理论分析指出正、伪解集距离与离焦量相关, 而解集的距离决定了神经网络输出伪解时所受到的惩罚的大小, 最终影响到网络的预测精度, 仿真结果与理论分析一致。

由于需要用到离焦光斑图, 所以图像分辨率限制也会为失调量的预测带来误差, 此外, 图像噪声也是一个影响基于图像方法的不可忽视的误差来源, 所以我们对-15 mm 离焦方案的神经网络进行了图片底噪鲁棒性测试, 对之前的 200 个测试样本施加图片最大灰度值 1% 的背景噪声, 网络校正后波前统计结果如图 8 所示, 可以看到本文方法受噪声影响后精度略微下降, 但是校正后波前 PV 值小于 0.25λ 的样本占比仍能达到 95%, RMS 值小于 0.035λ 的样本占比达到 86%, 证明了本文方法具有较好的抗噪能力。

在实际系统中, 还要考虑光强和像面大小等因素的限制, 离焦量过大使光斑过大会导致轻微失调后光斑位置偏移无法捕捉完整光斑, 离焦量越小离焦光斑就越小, 光能越汇聚, 所需要的光强就小。光强有限的情况下可以先通过仿真确定不同离焦方案的校正精度, 然后在精度范围内选择离焦量较小的方案。参考前文仿真结果, 实验平台的校正实验采用精度较高的离焦-15 mm 的方案进行。

3.2 实验验证

实验平台如图 9 所示, 前文仿真模型依此搭建, 光源波长 532 nm, 次镜由六自由度位移平台承载, 相机位于横向位移平台上并置于轴向滑轨上(轴向导轨用于快速切换离焦、在焦位置, 横向位移台用于切换哈特曼探测器), 相机成像透镜后放置一片平凸透镜构成 4f 系统, 后接哈特曼探测器用于检测校正效果(仅检测校正效果, 不参与失调量预测)。

相机像素尺寸为 $5.5\ \mu\text{m}$, 像素数量为 1024×1024 , 帧率 100 fps, 采集 8 bit 图像, 为了缩短训练时间会将采集得到的图像截取为保留完整光斑的图片, 像素数量 224×224 ; 哈特曼传感器的参数如表 5 所示。

依据上一小节数据集的采集流程、网络训练参数在实验平台上得到数据集并完成网络训练, 考虑到实际系统限制(离焦光斑需要位于 CCD 采集区域内), 偏心失调量被控制在 $\pm 0.5\ \text{mm}$ 内, 倾斜失调量被控制在 $\pm 0.3^\circ$ 以内。在不属于训练集的 200 个样本对网络进行测试, 随机抽取其中 5 组失调量预测结果于表 6 展示。从表中可以看到 5 组预测值与真值的误差微小, 证明训练好的网络能够很好地通过离焦光斑输出次镜失调量。

为了能全面地反映网络的失调量预测效果, 我们将 200 个测试样本各自由度预测失调量的残差相关信息记录于表 7, 其中包含了各自由度预测量与真值的残差的最大值、最小值、均值和标准差。偏心失调量 (D_x 、 D_y) 的最大预测残差小于 $0.05\ \text{mm}$, 倾斜失调量 (T_x 、 T_y) 的最大预测残差小于 0.05° , 具有较好的精度。

此外, 实验系统基于本方法的两次随机失调测试的样本如图 10 所示(为了更好地展示效果, 对 PSF 进行了高斯滤波以凸显光斑轮廓), 波前信息由哈特曼传感器采集。从系统失调前波前、失调后波前和校正后波前的对比来看, 两次失调均得到了有效的校正, 校正后波前 PV 值和 RMS 值明显减小, 接近失调前状态。

从图 10 可以看到实验平台初始波前较仿真模型理想状态波前有一定差距(理想 PV 值为 0.0498λ , RMS 值为 0.0136λ), 我们认为造成这一现象的可能原因有: 镜面加工误差不可能为零引入的波前误差(本实验所用镜面要求的最大加工 PV 误差小于 $1/6\lambda$); 个人装调技术不够熟练导致的波前误差。但是这并不会对本方法产生太大影响, 神经网络的本质是非线性拟合, 是以系统精调后的状态为基础, 训练时系统初始状态越好那后续校正环节的结果越好, 校正后的系统状态总是向着初始系统状态逼近。除此之外, 还有一些误差或干扰可能会对本文方法产生影响使精度下降: 系统相机自身噪声的变化过大; 大气湍流导致光斑抖动模糊; 相机离焦位置摆放误差。对于相机的噪声波动可以在数据集预处理时对所有图片加入适量的波动噪声扩充数据集提高抗噪

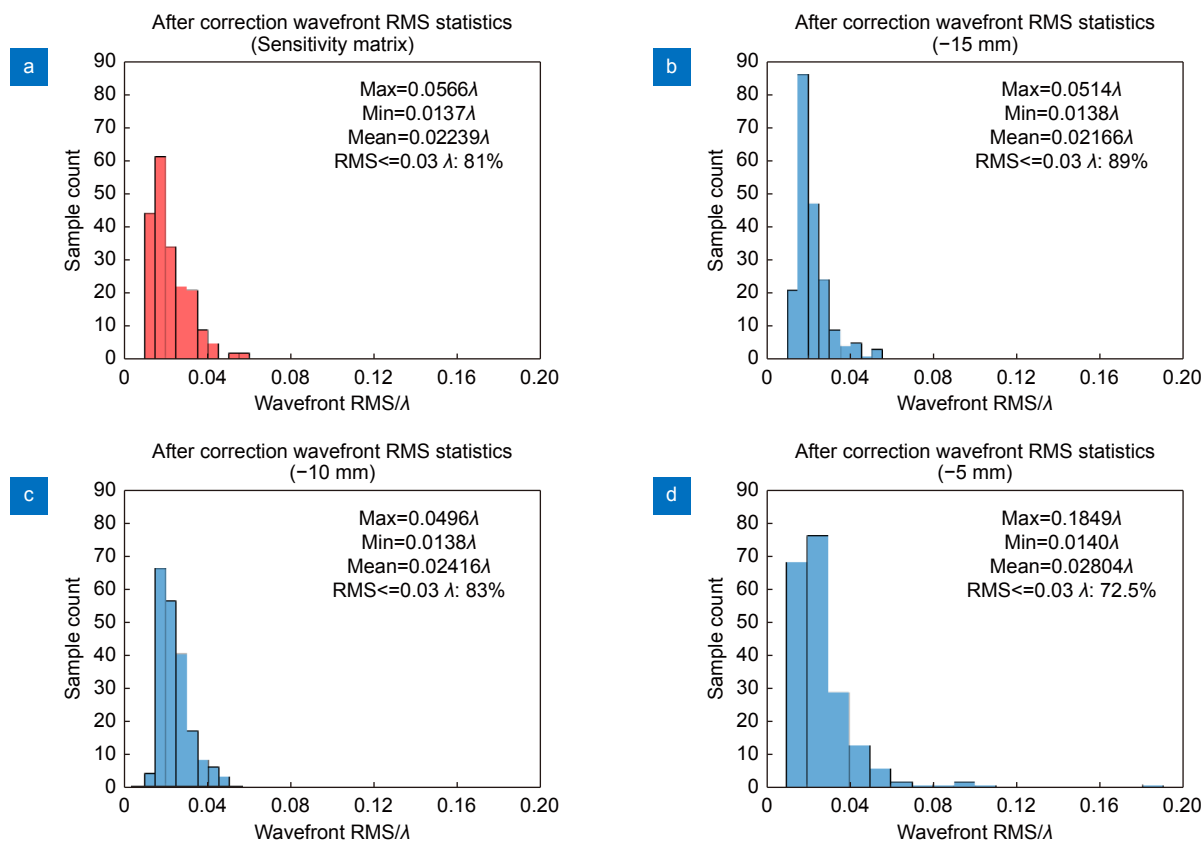


图 7 校正后波前 RMS 统计。(a) 灵敏度矩阵法; (b) 离焦-15 mm; (c) 离焦-10 mm; (d) 离焦-5 mm

Fig. 7 Wavefront RMS statistics after correction. (a) Sensitivity matrix method; (b) Defocus -15 mm; (c) Defocus -10 mm; (d) Defocus -5 mm

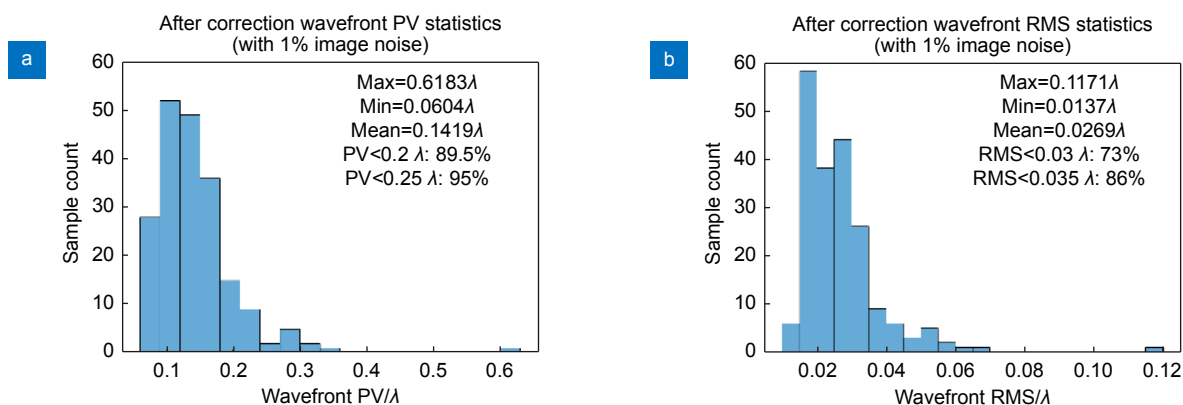


图 8 离焦-15 mm 方案 1% 底噪下校正结果统计。(a) 波前 PV 值统计; (b) 波前 RMS 值统计

Fig. 8 Statistics of correction results under 1% noise floor of the defocus -15 mm scheme.

(a) Wavefront PV value statistics; (b) Wavefront RMS value statistics

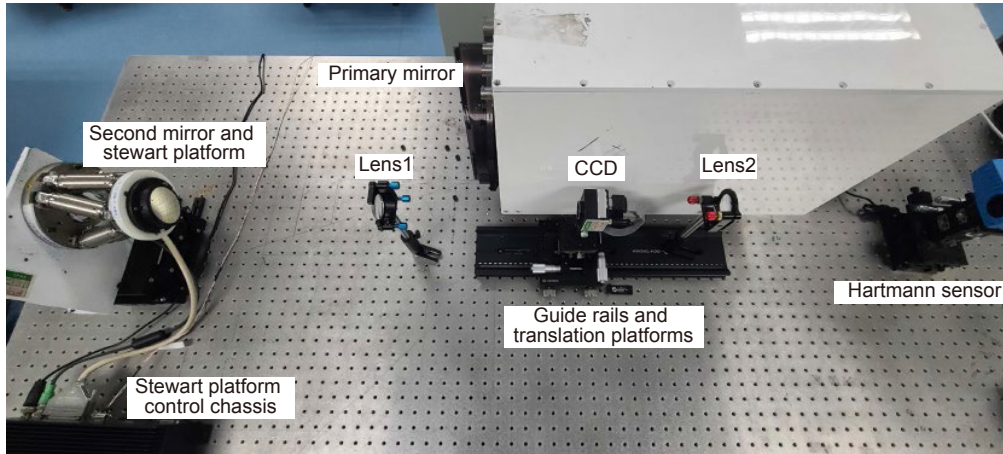


图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

表 5 哈特曼参数表

Table 5 Hartmann parameter table

Technical parameters	Value	Technical parameters	Value
Aperture dimension	5.2 mm×7 mm	Repeatability/rms	$\lambda/200$
Number of sub-apertures dedicated for analysis	16×20	Wavefront measurement accuracy in absolute mode/rms	Maximum between $\sim \lambda/100$ and 6 nm
Tilt dynamic range	$\geq \pm 3^\circ (600 \lambda)$	Max acquisition frequency	20 Hz

表 6 随机失调量预测值与真值表

Table 6 Predicted value and truth table of random misalignment

True value / Predictive value	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
D_x/mm	0.499 / 0.500	0.491 / 0.496	0.088 / 0.086	0.299 / 0.313	-0.472 / -0.471
D_y/mm	-0.312 / -0.325	0.101 / 0.104	0.293 / 0.287	-0.323 / -0.328	0.427 / 0.428
$T_x/degree$	0.063 / 0.057	0.012 / 0.012	-0.114 / -0.113	0.053 / 0.450	-0.121 / -0.120
$T_y/degree$	0.128 / 0.124	0.118 / 0.118	-0.067 / -0.066	-0.134 / -0.113	0.078 / 0.074

表 7 预测失调量残差数据统计表

Table 7 Statistical table of prediction misalignment residual data

	$\Delta D_x/mm$	$\Delta D_y/mm$	$\Delta T_x/degree$	$\Delta T_y/degree$
Maximum	0.0194	0.0147	0.0170	0.0198
Minimum	2.599E-5	2.099E-5	1.100E-5	1.800E-5
Average	0.0072	0.0045	0.0037	0.0055
Standard deviation	0.01421	0.00594	0.00557	0.01028

性能, 对于大气抖动可以采用多帧平均后的图片进行预测但会增加时间上的开销, 对于相机离焦位置误差可以使用其它调焦检焦方法先行校正或直接作为另一待校正量让网络学习。

最后, 我们还将训练好的网络部署到不同规格的

硬件平台上进行失调量预测时间的检验, 平均单次运行时间如图 11 所示, 因为硬件特性的缘故, GPU 计算普遍快于 CPU, 但测试硬件的单次平均计算耗时均小于 120 ms, RTX3090GPU 单次计算耗时仅 7.3 ms, 单次校正耗时短。

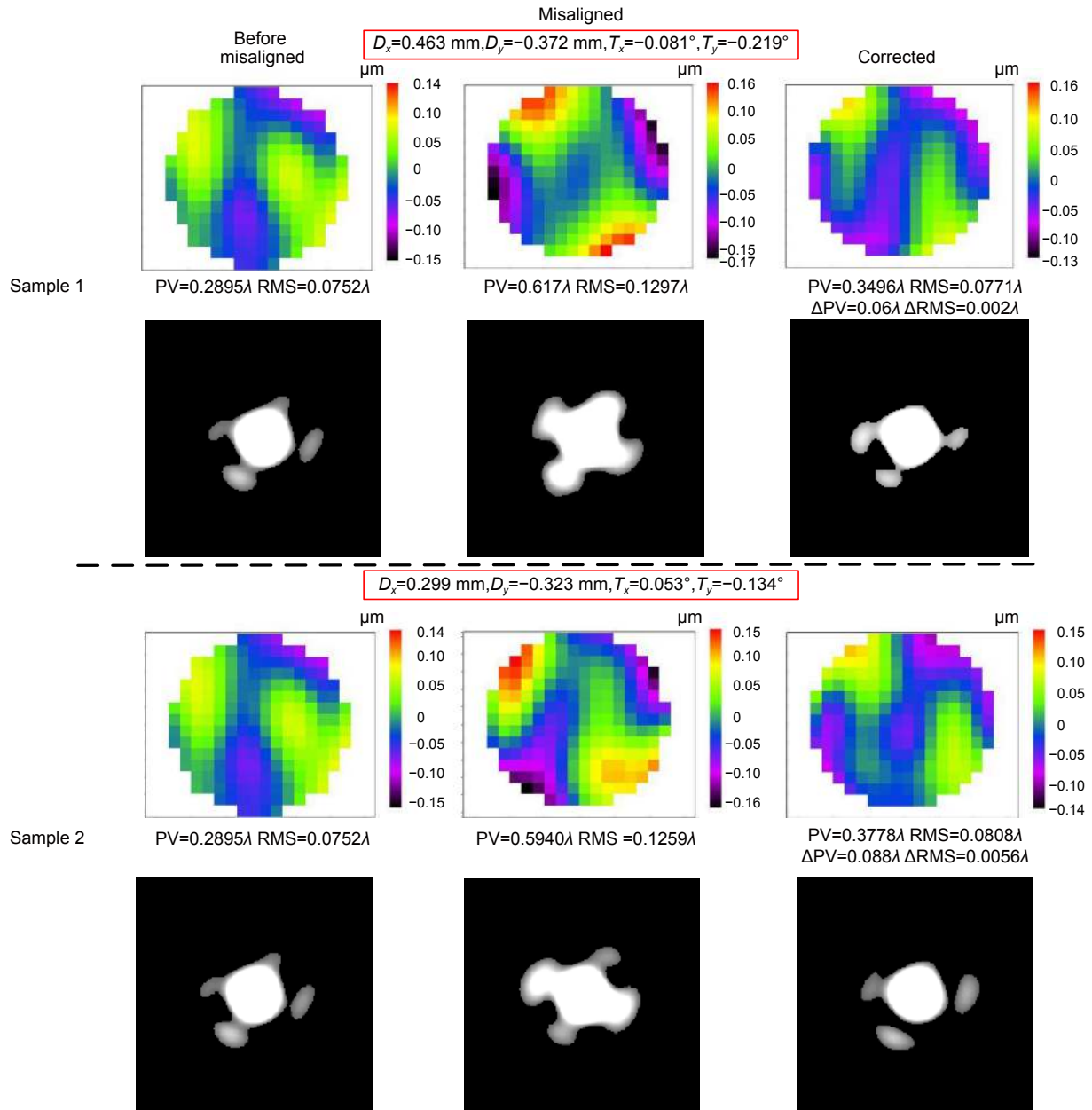


图 10 校正效果测试样本

Fig. 10 Calibration test sample

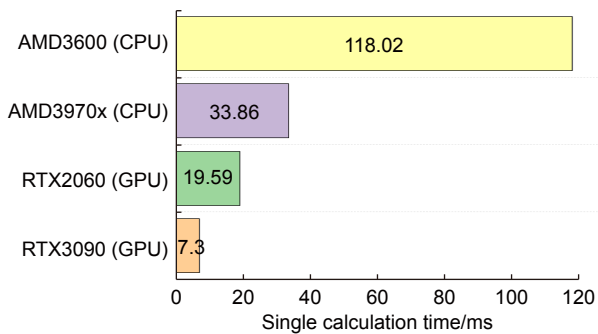


图 11 各硬件平台单次计算平均耗时

Fig. 11 The average time-consuming of a single calculation on each hardware platform

4 结论

本文提出了一种新的用于外场环境下望远镜系统失调误差校正方法，基于望远镜系统的离焦光斑对神经网络 (Swin-T) 进行训练用于拟合光斑能量分布与失调量之间的映射关系，并通过仿真和实验进行了验证。

首先从理论分析入手，阐述了离焦光斑可以避免多解问题对网络训练产生不利影响的机理进行了解释，计算并给出了本文仿真模型下三种离焦距离 (-15 mm、

-10 mm、-5 mm) 的方案中解集和伪解集的分布, 根据神经网络的训练原理指出预测精度会随着离焦距离减小而下降, 并给出本文方法的一般实施步骤。

接着通过仿真将本文方法与传统灵敏度矩阵法进行了对比, 考察校正后波前 RMS 小于 0.03λ 的样本比例, 离焦-15 mm 方案精度最高, 为 89%, 灵敏度矩阵法以及离焦-10 mm、-5 mm 方案的占比分别为 81%、83%、72.5%, 仿真结果显示离焦距离越大预测精度越高, 与理论分析一致。总体来看, 本文方法精度与灵敏度矩阵法精度相当, 具有较好的抗噪性能, 仅使用系统自带相机便可完成校正流程, 且数据集采集和网络训练仅会在出厂前系统精调完毕后进行一次, 在工作环境中无需再次采集数据训练, 保证望远镜系统工作环境中的校正效率。

最后搭建实验平台, 综合考虑后选择了使用离焦-15 mm 的方案进行验证。200 组失调测试样本中, 网络输出的各自由度的失调量与真值的残差的最大值分别为 $D_x=0.0194$ mm, $D_y=0.0147$ mm, $T_x=0.0170^\circ$, $T_y=0.0198^\circ$, 均小于给定失调范围的 5%, 满足校正所需的精度要求; 展示的两组测试样本中, 与失调前波前比较, 第一组测试样本校正后波前 PV 值和 RMS 值残差分别为 0.06λ 和 0.002λ , 第二组测试样本校正后波前 PV 值和 RMS 值的残差分别为 0.088λ 和 0.0056λ , 都取得了较好的校正效果, 证明了本文方法的有效性。实验平台的测试样本在所用的硬件平台上都取得了较快的运算速度, 单次计算平均耗时均小于 120 ms, 其中 RTX3090 单次计算平均耗时仅需 7.3 ms, 证明了本文方法的快速性。

总而言之, 本文所提方法相较于传统方法, 可以在保证精度的前提下更为迅速的校正望远镜系统失调误差, 且避免了波前探测设备的使用, 使望远镜系统在工作环境中的失调校正需求得到保障, 具有较高的工程应用价值和意义。

参考文献

- [1] Kim S, Yang H S, Lee Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(8): 5059–5068.
- [2] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(6): 210040.
- [3] Liu Z, Peng Q, Xu Y J, et al. Misalignment calculation on off-axis telescope system via fully connected neural network[J]. *IEEE Photonics J*, 2020, **12**(4): 0600112.
- [4] Ju G H, Ma H C, Yan C X. Aberration fields of off-axis astronomical telescopes induced by rotational misalignments[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(19): 24816–24834.
- [5] Zhang X B, Zhang D, Xu S Y, et al. Active optical alignment of off-axis telescopes based on nodal aberration theory[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(23): 26392–26413.
- [6] Lee H, Dalton G B, Tosh I A J, et al. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wavefront[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(6): 3127–3139.
- [7] Guerra-Ramos D, Díaz-García L, Trujillo-Sevilla J, et al. Piston alignment of segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(17): 4264–4267.
- [8] Oteo E, Arasa J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks[J]. *Opt Eng*, 2013, **52**(7): 074105.
- [9] Dai X Y, Tan Y, Ren G, et al. Analysis of image quality detection performance of scanning Hartmann technology[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(7): 0712002.
- [10] Bi J C, Gao Z S, Zhu D, et al. An optical coherence tomographic aberration correction method based on the particle swarm optimization algorithm[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(10): 1011002.
- [11] Zhou M Y, Hou J F, Wang D G, et al. Design and verification of depolarized derotator alignment scheme in astronomical telescope[J]. *Chin J Lasers*, 2020, **47**(6): 0604005.
- [12] Wang Y, Zhang X, Wang L J, et al. Freeform optical system alignment based on artificial neural networks[J]. *Acta Opt Sin*, 2013, **33**(12): 1211001.
- [13] Ma X F, Xie Z L, Ma H T, et al. Piston sensing of sparse aperture systems with a single broadband image via deep learning[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(11): 16058–16070.
- [14] Xu Y J, He D, Wang Q, et al. An improved method of measuring wavefront aberration based on image with machine learning in free space optical communication[J]. *Sensors*, 2019, **19**(17): 3665.
- [15] Li Z J, Mao Y, Qi B, et al. Research on control technology of single detection based on position correction in quantum optical communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(3): 210311.
- [16] Zhang L Z, Yang T, Wu Y, et al. Image measurement-based two-stage control of Stewart platform[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 220019.
- [17] Xia W Q, He Q N, Duan Q W, et al. Equivalent acceleration feedforward based on sensor optimization and robust prediction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(11): 210153.
- [18] Zou Y T. Research on auto focus technology in optical imaging system[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, 2021.

- The Chinese Academy of Sciences, 2021.
邹雨彤. 光学成像系统中的自动检焦技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
- [19] Ma X Y. The research on focusing technology based on the combination of optical detecting and image processing[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
马晓雨. 基于光学检测与图像处理相结合的调焦技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [20] Li Q H, Ding Y L, Xiu J H, et al. Self-collimation inspection and focusing method based on image processing[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2020, **57**(2): 021104.
李启辉, 丁亚林, 修吉宏, 等. 基于图像处理的自准直检焦方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(2): 021104.
- [21] Liu Z. Study on off-axis telescope misalignment detection technology[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021.
刘柱. 离轴望远镜失调误差检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
- [22] Li L. Alignment technique for off-axis reflective systems based on Zernike vector polynomials[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
李蕾. 基于Zernike矢量多项式的离轴反射系统装调技术研究[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), 2020.
- [23] Zhou W, Chen X F, Yang D X. *Fundamentals of Photonics*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
周文, 陈秀峰, 杨冬晓. 光子学基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [24] Zhou L, Liu Z H, Shan Q S, et al. Measurement of the object defocus with extended depth-of-field imaging system[J]. *Acta Photon Sin*, 2018, **47**(10): 1011003.
周亮, 刘朝晖, 单秋莎, 等. 大景深成像系统中目标离焦量的测定[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10): 1011003.
- [25] Liu Z, Lin Y T, Cao Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//*Proceedings of 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Montreal*, 2021: 9992–10002. <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00986>.

作者简介



田思恒(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能控制系统开发方面的研究。

E-mail: tiansiheng@163.com



【通信作者】黄永梅(1968-), 女, 博士, 研究员, 主要研究领域为模式识别与智能控制。

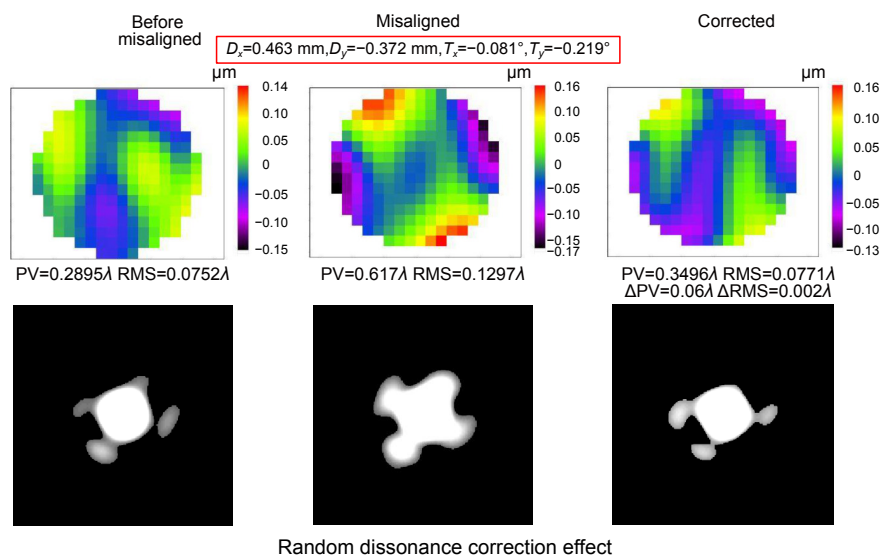
E-mail: huangym@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot

Tian Siheng^{1,2,3,4}, Huang Yongmei^{2,3,4,5*}, Xu Yangjie^{2,3,4,5}, Nan Xinyuan¹, Wu Qiongyan^{2,3,4,5},
Xiang Chunsheng^{2,3,4,5}, Tang Wei^{2,3,4,5}



Random dissonance correction effect

Overview: Off-axis reflector telescopes are mainly used in space astronomy observation and other fields. The imaging quality of off-axis two-reflection telescopes is sensitive to the lens misalignment. This makes the correction of out-of-tune telescope systems in the working environment hindered. To address this challenge, this paper proposes a method that uses the out-of-focus spot map of the system for infinity point targets and uses the Swin-Transformer network to calculate the amount of sub-mirror lateral misalignment. Through the derivation and analysis of the wavefront phase and point spread function formulas, it is pointed out that the use of a non-special location of the out-of-focus spot to avoid the focal spot can avoid the occurrence of multiple solutions so that the network can solve the system corresponding to the amount of misalignment from the spot morphology. In order to avoid the adverse effects of the special out-of-focus location, we observe the distribution range of the solution set and the pseudo-solution set through the Monte Carlo analysis method to determine whether the selected camera out-of-focus location is in a special position or not. We give the general implementation procedure of this method, according to which a reasonable amount of random transverse misalignment is applied to the simulation model secondary mirror in the simulation. The out-of-focus spot map is recorded to generate a dataset for network training. A test set is generated for validation, and the trained network can be used to estimate the amount of misalignment using one frame of the out-of-focus spot map of the misalignment system. The simulation shows that the out-of-focus amount is proportional to the correction accuracy within a certain out-of-focus range. Since this is an image-based method, we also tested the noise-resistance performance of the out-of-focus scheme with the highest accuracy. Finally, the predicted misalignment of the test sample set was verified by the experimental platform, and the mean prediction error of the eccentric misalignment was 0.0072 mm and the mean prediction error of the tilt misalignment was 0.0055° when compared with the real misalignment. The average computation time is less than 120 ms for a single computation when compared with the wavefront of the system before the misalignment. The simulation analysis and experimental results verify the effectiveness of the method, which can realize the misalignment telescope system in the working environment with high accuracy and fast correction.

Tian S H, Huang Y M, Xu Y J, et al. Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230040; DOI: 10.12086/oe.2023.230040

¹School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; ²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁴Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁵School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: huangym@ioe.ac.cn