

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802154

基于可变形镜的稳像方法研究*

樊凡¹ 孟晓晨² 娄小平^{1,2} 祝连庆^{1,2} 董明利^{1,2}

(1.北京信息科技大学 先进光电子技术国际合作联合实验室 北京 100192;

2.北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192)

摘要:提出了一种基于可变形镜的稳像方法,利用可变形镜连续改变面型的特点实现光学稳像。首先,建立了基于平面反射面的稳像数学模型,得到了稳像补偿角的数学表达;其次,通过研究可变形镜的关键参数,分析了可变形镜的面型误差;最后,通过实验验证了可变形镜的稳像能力,分析了稳像误差。实验数据表明,利用所选可变形镜可实现光轴偏转的功能,稳像的最大相对误差绝对值为1.87%,对应的稳定精度为2.11"。

关键词:可变形镜;光学稳像;姿态角;光线传递矩阵;面型误差

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on image stabilization method based on deformable mirror

Fan Fan¹ Meng Xiaochen² Lou Xiaoping^{1,2} Zhu Lianqing^{1,2} Dong Mingli^{1,2}

(1. Joint International Research Laboratory of Advanced Photonics and Electronics, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper presents an image stabilization method based on deformable mirror. Firstly, the stabilization mathematical model based on plane mirror has been set to calculate the stabilization compensatory angle. Secondly, according to the key parameters of deformable mirror, the surface-shape error has been researched. At last, by experiments, the steady effect of deformable mirror has been verified and the stabilization error has been analyzed. The experiment results show that, the deformable mirror we used can realize the image stabilization function. Besides the absolute value of the image stabilization maximum relative error is 1.87%, and the corresponding stability accuracy is 2.11".

Keywords: deformable mirror; optical image stabilization; attitude angle; ray transfer matrix; surface-shape error

0 引言

光学稳像技术通过可移动式的部件对发生抖动的光路进行补偿,抵消由于抖动引起的成像光线偏移^[1-4],从而实现减轻照片模糊或者保持目标在画面中位置不变的效果。目前对光学稳像技术的研究,集中在用震动稳像原件解决对系统震动造成的图像模糊进行矫正,及利用棱镜系统改变系统光轴偏转和光程对目标与系统间的相对姿态偏转进行补偿,这些光学稳像系统已经广泛应用于摄影、成像、太空观测、航空、军事等领域^[5-7]。目前,稳像效果最好、使用最广泛的是图像稳定技术或称为光学防抖技术^[8],通过修正光学部件的运动减小震动对成像的影响^[9-10]。英国《简氏武器年鉴》1983—1984年版介绍了美军当时装备的3种

稳像望远镜(MKmm、MKIIIimg、MKIIIV)的一般结构和主要性能,其中MKIIIV稳像望远镜可在飞机、舰船上使用,可消除98%的输入振动。Technische Universitat Dresden 电子工程与信息系的Tcherngkn等^[11]提出一种在光路中增加摆镜来补偿目标像移的方法,通过控制摆镜的实时转动达到稳像的目的。日美联合发射的Solar-B太阳望远镜,搭载了50 cm口径的主光学系统^[12-13],通过基准图像与活动图像的相关运动检测出望远镜视轴的偏移,再通过反馈控制回路驱动摆镜进行校正,使光束保持不变,从而补偿卫星平台不稳定引起的像移。但目前的稳像技术较多采用传统的光学稳像原件^[14]结构固定,不能改善光学系统的光学性能,更不能承担光学系统成像原件的其他功能。另一方面,使用机械驱动的稳像原件受驱动器步进精度的影响,难

收稿日期:2018-09-25

* 基金项目:国家高技术研究发展计划(2015AA042308)、国家自然科学基金(5147504)、教育部长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT, IRT_16R07)、北京信息科技大学校基金(1725004)项目资助

以实现连续变化。

因此,本文提出一种基于可变形镜的稳像系统的设计方法,通过实时改变可变形镜的面形,补偿成像系统偏转角,实现连续高精度稳像。

1 可变形镜参数

可变形镜(deformable mirrors, DM)是一种典型的波前校正器,通过调整致动器来改变面形,以得到需要的曲面。而在平面镜稳像中,需要改变稳像反射镜的位置和姿态对光轴偏转进行补偿^[16]。本文选用 OKO 公司的连续表面压电陶瓷变形镜(piezoactuated deformable mirrors, PDM)作为稳像元件,如图 1 所示,其反射面口径为 30 mm,拥有 37 个独立的致动器,最大行程 8 μm 。

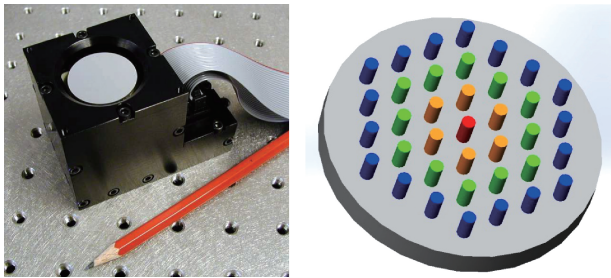


图 1 OKO 公司 PDM

实验中,将 PDM 面形调整稳定后测得面型峰谷值(peak-to-valley value, PV)和均方根值(root mean square, RMS)有 10%左右的波动,并且很难再进行优化。根据实验经验,测试时选择如下面形参数:PV 为 0.260 λ , RMS 为 0.046 λ , $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。

此外,受制于物理结构,PDM 反射面展平时最外环的致动器展平效果有限,是面型误差的主要来源,所以实验中选择 PDM 中心 80%的区域为有效面积,即只对中心口径为 24 mm 的区域进行重点观测。

2 基于平面反射镜的光学稳像模型

根据实际应用环境,本文的设计目标为当指向目标的主光轴出现偏移,经过稳像光学元件进行补偿后,目标在像面上所成的像位置不变,当目标相对系统存在扰动,系统光轴产生偏移,而稳像元件就是要调整系统的光轴使光轴依然指向目标,最终达到像相对位置稳定的效果。

根据棱镜与共轴球面系统配合的要求,设定反射面所在面与入射光轴和出射光轴形成的平面垂直,且入射光轴与平面镜呈 45°角入射,发射面以平面为例进行计算。平移情况较为简单,以下只分析绕空间轴旋转的情况。

如图 2 所示,平面镜位于物镜之后,通过物镜的光线经过平面镜反射会聚在像面上,平面镜可绕 P_1 轴和 P_2 轴转动,其中, P_1 平行于光轴平面, P_2 垂直于光轴平面。入射点 I 与 P_1 的矢量为 s_{i1} ,距离为 S_{i1} ;出射点 E 与 P_1 的

矢量为 s_{e1} ,距离为 S_{e1} ;入射点 I 与 P_2 的矢量为 s_{i2} ,距离为 S_{i2} ;出射点 E 与 P_2 的矢量为 s_{e2} ,距离为 S_{e2} 。 P_1 与出射光轴夹角为 θ_1 , P_2 与出射光轴夹角为 θ_2 。 (i, j, k) 为坐标轴 xyz 的单位矢量。

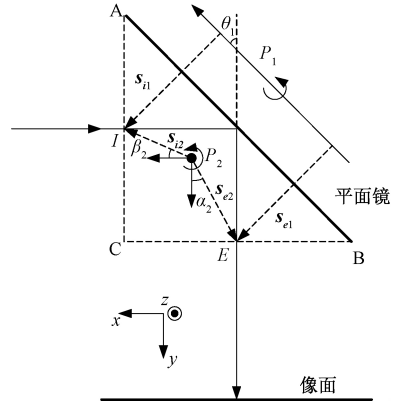


图 2 平面镜稳像空间坐标系

原出射点的位移对于标准像面上的投影为 l_e ;原入射点的位移对于标准像面上的投影为 l_i ;光轴偏在 BC 面上产生的位移对于标准像面上的投影为 l_k ;光轴偏在出射平面镜等效出射面 BC 面后至像平面这一传播过程中产生的位移为 l_l 。所以,像点的位移 LP 可以表示为:

$$LP = l_e + l_k + l_i + l_l \quad (1)$$

1) 反射面绕 P_1 轴转动 $d\epsilon$

如图 2 所示,令 s_{e1} 与光轴平面夹角为 α_1 , P_1 与 y 夹角为 θ_1 。 s_{e1} 可以表达为:

$$\vec{s}_{e1} = S_{e1} \cos \alpha_1 \cos \theta_1 \vec{i} + S_{e1} \cos \alpha_1 \sin \theta_1 \vec{j} - S_{e1} \sin \alpha_1 \vec{k} \quad (2)$$

当平面镜绕 P_1 逆时针转动微小量 $d\epsilon$,对上式进行微分,并化简可以得到 l_e 为:

$$l_e = d\vec{s}_{e1} = -S_{e1} \sin \alpha_1 \cos \theta_1 d\epsilon \vec{i} - S_{e1} \cos \alpha_1 d\epsilon \vec{k} \quad (3)$$

同时, s_{i1} 与光轴平面夹角为 β_1 , s_{i1} 可以表达为:

$$\vec{s}_{i1} = S_{i1} \cos \beta_1 \cos \theta_1 \vec{i} + S_{i1} \cos \beta_1 \sin \theta_1 \vec{j} - S_{i1} \sin \beta_1 \vec{k} \quad (4)$$

进一步可以将上式微分并简化为:

$$l_i = -S_{i1} \sin \beta_1 \sin \theta_1 d\epsilon \vec{i} - S_{i1} \cos \beta_1 d\epsilon \vec{k} \quad (5)$$

令 L 为反射面等效直角棱镜的直角边长,得到 l_k :

$$l_k = L \cos \theta_1 d\epsilon \vec{k} \quad (6)$$

令 L_f 为出射 E 点与像面的距离,可以得到光轴偏映射到像面上的位移 l_l 为:

$$\vec{l}_l = -2L_f \cos \alpha_1 d\epsilon \vec{i} - L_f (\cos \beta_1 - \cos \gamma_1) d\epsilon \vec{k} \quad (7)$$

从而,总的像点位移 LP 可以表达如下:

$$LP = (-S_{e1} \sin \alpha_1 \cos \theta_1 - S_{i1} \sin \beta_1 \sin \theta_1 - 2L_f \cos \alpha_1) d\epsilon \vec{i} + (-S_{e1} \cos \alpha_1 - S_{i1} \cos \beta_1 - L \cos \theta_1 - L_f (\cos \beta_1 - \cos \gamma_1)) d\epsilon \vec{k} \quad (8)$$

2) 反射面绕 P_2 轴转动 $d\omega$

相似的,当反射面绕 P_2 轴转动 $d\omega$ 时,相关参数如图 3 所示。

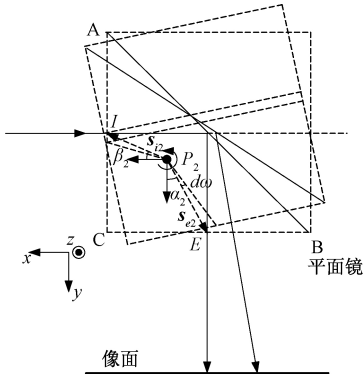


图 3 绕 P_2 轴转动的空间坐标系

用相同的方法可以得到此时 LP 的表达式,如式(9)所示。

$$\begin{cases} l_e = -S_{e2} \sin \alpha_2 d\omega \vec{i} \\ l_i = S_{i2} \sin \beta_2 d\omega \vec{i} \\ l_k = -L d\omega \vec{i} \\ l_l = -\sqrt{2} L_f d\omega \vec{i} \\ LP = -S_{e2} \sin \alpha_2 d\omega \vec{i} + S_{i2} \sin \beta_2 d\omega \vec{i} - \\ L d\omega \vec{i} - \sqrt{2} L_f d\omega \vec{i} \end{cases} \quad (9)$$

l_e 的正负与 $d\omega$ 的转向有关。如图 2 所示,平面镜沿光轴逆时针转动,规算到出射面时, l_i 为负。当平面镜绕垂直于光轴面的轴转动时,只在 x 轴方向产生像点的移动。

从而,得到了转轴位于光轴平面内和垂直于光轴平面两种情况下的像点位移量计算的数学模型。当知道了像面上像点的位移量以及转轴位置等相关参数,即可计算得到平面镜沿转轴的转动量,从而进行调整。

3 实验及分析

3.1 可变形镜面型误差分析

由于 PDM 表面镜面为柔性反射面,而致动器材料为压电陶瓷,致动器随电压的响应曲线为连续曲线, PDM 的表面的面形误差代表了 PDM 作为平面反射镜的平整性,显然这一参数会对稳像效果产生影响。

为了得到面型误差,使用干涉仪对不同状态下的 PDM 镜面进行面形检测,其不同姿态角下的面形误差越接近于稳定状态时的极值, PDM 在稳像过程中的稳定性越好。根据可变形镜圆形镜面的旋转对称性原理,选用一维转动平台,模拟系统和目标之间的相对运动。实验时,将 PDM 固定在一维转台上,转台每转动一个微小角度,就改变一次 PDM 的姿态补偿旋转带来的倾角,从而保持其表面与干涉

仪光轴垂直。这样, PDM 不同姿态角下的面形误差被测量出来,从而可以分析 PDM 稳像时的稳定性。实验装置如图 4 所示,干涉仪用来检测被测面的实时面形;衰减片对光路中的光线进行衰减,防止过饱和;摄像机观察镜面的倾斜效果; PDM 固定在一维转台上,随着转台一起转动。实验中重点评估 PDM 中心 80% 区域内的面形情况,选用的转台为光栅标定,转动步进为 0.011 15~0.012 61 mrad。

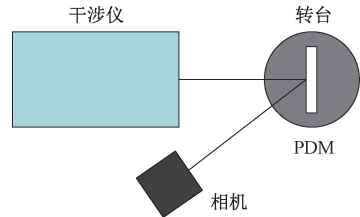


图 4 实验装置

在具体实验过程中,首先将 PDM 固定在一维转台上,并将转台固定在光学平台上。用干涉仪观察 PDM 面形,对面形进行初次展平,用加权平均的方式反复优化致动器控制电压,达到理想展平时的最优状态。然后,令转动精度为转台转动 1 个步长,记录转动后 PDM 的面形,并进行展平和面形展平优化,使 PDM 镜面与干涉仪光轴垂直,当面形 PV 和 RMS 值变化小于 10% 时停止优化。

典型的测试结果如图 5 所示,图 5(a)、(c)、(e) 所示为旋转后面形及参数,图 5(b)、(d)、(f) 所示为改变面型补偿旋转角后面形及参数。根据上文,此 PDM 的最优 PV 值在 0.3λ 左右,而 RMS 在 0.05λ 左右,各组数据的最终平面面形已经接近 PDM 的最佳值。

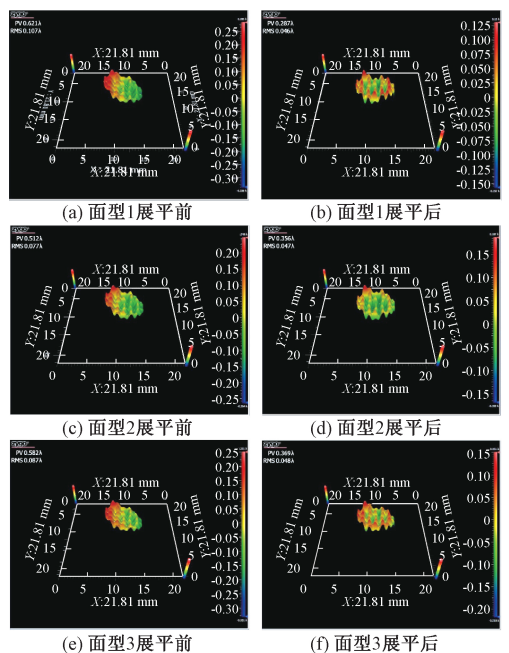


图 5 典型 PDM 转动姿态下展平前后对比

通过重复实验,测量其在这个状态下的面形误差并记录,得到如图 6 所示的结果。

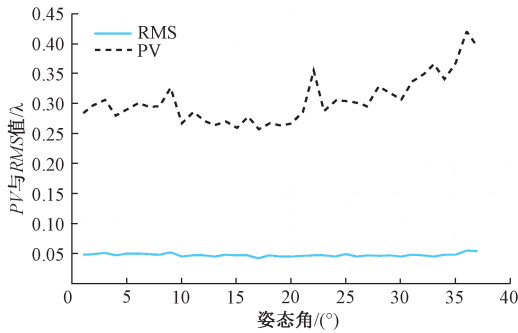


图 6 不同姿态角下调整 PDM 后的 PV 和 RMS 值

从图 6 可以看到, PDM 的 PV 值在 $0.25\lambda \sim 0.45\lambda$ 波动, 而 RMS 稳定在 0.05λ 左右。且随着转台的转动, PDM 与干涉仪基准面的夹角逐渐增大, 展平后的 PV 和 RMS 值出现增大趋势, 说明用 PDM 补偿偏转角难度变大, 效果变差。结果中, RMS 接近这块 PDM 的理想值, 而 PV 值的变化相对 RMS 较为明显。稳定的 RMS 值表明, 当 PDM 姿态改变时, 平面平整度很高, 可以实现平面镜稳像的功能。同时表明这块 PDM 的稳像精度在 0.05λ 左右。而 PV 值的不断增大也表明了 PDM 的补偿能力有限, 随着姿态角的不断增大, PDM 的稳像效果会受到影响, 可能出现不稳定的波动。

3.2 可变形镜稳像实验及分析

为了分析当系统相对于目标存在微小的光轴偏移时, 通过改变 PDM 的面形, 能否能够补偿光轴偏转, 进行了成像实验。由工业 CCD 和定焦镜头组成成像系统, PDM 作为稳像元件放置在成像系统前端, 成像系统对靶标成像, 镜头焦距 75 mm, 靶标上有十字刻度尺。实验前通过辅助光源照亮 PDM 反射面, 调整 CCD 位置使得 PDM 在 CCD 上所成像的中心位于 CCD 的中心。

首先对 PDM 进行展平, 并记录 CCD 的成像结果, 作为标准状态的输出图像。随后改变 PDM 的面形, 使其沿着不同方向倾斜既定角度, 随后记录每次倾斜下的输出图像。通过提取输出图像中的空间位移量, 根据上文数学模型, 可以计算出实际系统的光轴倾斜角, 将这一角度值与 PDM 的倾角比较, 即可分析得到稳像补偿角的准确度, 典型靶标成像结果如图 7 所示。

本文提取了一组数据, 来说明 PDM 的实际倾角与系统的光轴偏转角间的关系, 如表 1 所示。

从表中数据可知, 最大相对误差绝对值为 1.87%, 对应的稳定精度为 $2.11''$, 小于 $1/3$ 的象元尺寸, 为补偿角与理论值之间的偏差。实验得到的结果表明, PDM 可很好地完成光轴偏转校正的任务, PDM 可以改变面形调整自己的空间姿态, 进一步调整系统光轴的偏转, 而偏转补偿角的相

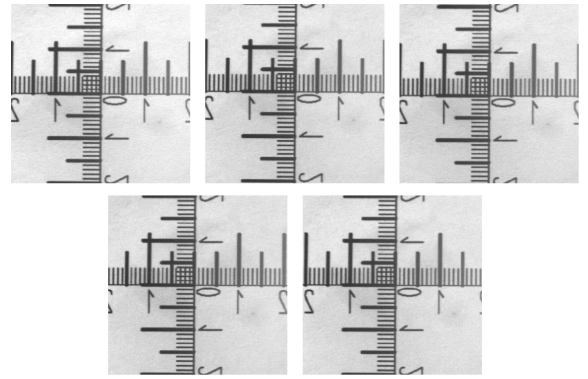


图 7 成像结果

表 1 PDM 姿态角与光轴偏转补偿角间的关系

组别	理论值/(°)	计算值/(°)	相对误差/%
1	0.031 366	0.030 779	-1.87
2	0.031 179	0.031 038	-0.45
3	0.029 087	0.029 590	1.73
4	0.028 143	0.028 309	0.59
5	0.027 241	0.026 976	-0.97
6	0.026 854	0.026 424	-1.60
7	0.024 416	0.024 833	1.71
8	0.026 982	0.026 720	-0.97

对误差绝对值小于 1.87%。

4 结 论

本文提出了一种基于可变形镜的光学稳像系统设计方法。通过建立基于平面镜的光学稳像数学模型完成了稳像偏转角的计算。通过对可变形镜关键参数的研究, 分析了可变形镜的面型误差, 当可变形镜的面型转动角度增大, 其面形的稳定性和面形误差都会增大, 但 RMS 不超过 0.06λ , PV 不超过 0.45λ 。最后进行了稳像实验, 从实验结果可知, 可变形镜可以实现光轴偏转, 补偿角的最大相对误差绝对值为 1.87%, 对应的稳定精度为 $2.11''$, 小于 $1/3$ 的像元尺寸。可变形镜作为稳像元件不仅能实现连续高精度快速稳像, 还有优化波前的潜力, 本文的工作对光学稳像系统的设计提供了一定的借鉴。

参考文献

- [1] YAN F, ILIYASU A M, YANG H, et al. Strategy for quantum image stabilization [J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(5): 1-10.
- [2] 李刚, 程志峰. 基于 FPGA 的实时电子稳像[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(S1): 8-13.
- [3] JOSEPH K, RAJ A, FAN Z, et al. A time-efficient video stabilization algorithm based on block matching in a restricted search space[C]. IEEE International Conference

- on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 2017: 651-656.
- [4] LEE T H, LEE Y G, SONG B C. Fast 3D video stabilization using ROI-based warping[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(5):943-950.
- [5] LEWIS A G R. Image stabilization techniques for long range reconnaissance camera[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1980, 242:153-158.
- [6] SATO K, ISHIZUKA S, NIKAMI A, et al. Control techniques for optical image stabilizing system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1993, 39(3):461-466.
- [7] 张永亮,肖山竹.一种实时稳像方法及其电路设计[J]. 微处理机, 2005(5):55-60.
- [8] WALTER I, JÖRG SCHÖNEKEB. Application of micro-mechanic devices for motion compensation of space-borne CCD-imaging systems[J]. Acta Astronautica, 2000, 46(2-6):269-277.
- [9] GOETZ P G, RABINOVICH W S, MAHON R, et al. Modulating retro-reflector lasercom systems at the Naval Research Laboratory[C]. Military Communications Conference, IEEE, 2010:1601-1606.
- [10] LIPPHARDT B, GERGINOV V, WEYERS S. Optical stabilization of a microwave oscillator for fountain clock interrogation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(4):761-766.
- [11] TCHERNYKH V, DYBLENKO S, JANSCHKE K, et al. Airborne test results for smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004, 5234:550-559.
- [12] KATSUKAWA Y, MASADA Y, SHIMIZU T. Pointing stability of Hinode and requirements for the next Solar mission Solar-C[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2017:10565.
- [13] SHIMIZU T, NAGATA S, TSUNETTA S, et al. Image stabilization system for Hinode(Solar-B) solar optical telescope[J]. Solar Physics, 2008, 249(2): 221-232.
- [14] VOJTECH J, ALTMANN M, SKODA P, et al. Optical stabilization for time transfer infrastructure[C]. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, Conference Series, 2017:10373.
- [15] MENG Y, LEI H, LICHENG S, et al. Sub-regional wavefront hybrid algorithm for limited actuators deformable mirror[J]. Optics Communications, 2018, 426:435-442.

作者简介

樊凡,工学博士、讲师,主要研究方向为仿生视觉传感器、精密测量技术等。

E-mail:fan_fan@bistu.edu.cn

娄小平(通信作者),硕士、教授,主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail:louxiaoping@bistu.edu.cn