

基于数字微镜器件的面源目标模拟实验系统研究

陈雪旗^{1,2*}, 姜爱民^{1,2**}

¹中国科学院国家天文台空间天文技术实验室, 北京 100101;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 建立了用数字微镜器件(DMD)作为显示器件的目标模拟系统,对成像畸变进行了研究。进行系统总体设计,利用几何光学计算了 DMD 不同姿态方位引起的物空间深度及变形量,确定了最佳姿态。针对 DMD 装调问题,利用光学软件对系统进行仿真,建立了畸变检测模板和算法,分析 DMD 姿态角的装调误差可知,0.3°俯仰角或方位角偏差引入的畸变约为 1.3%。最后在设计和仿真结果的指导下,完成了系统实验光路的建立,实验结果表明,系统最大视场的平均畸变为 0.385%。

关键词 成像系统; 成像畸变; 仿真建模; 数字微镜器件

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1011003

Source Simulation Experimental System Based on Digital Micromirror Device

Chen Xueqi^{1,2*}, Jiang Aimin^{1,2**}

¹Space and Astronomical Technology Laboratory, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We establish a source simulation system by using a digital micromirror device (DMD) as a display device and investigate the imaging distortion of an optical system. First, we illustrate the general design of the system and calculate the object-space depth and shape variables caused by the different attitude azimuth of the DMD by using geometric optics. Then, we choose the optimum attitude. Subsequently, we simulate the system by using optical software, establish the imaging distortion measurement template and algorithms, and analyze the installation error of the DMD's attitude angle. The analysis shows that the imaging distortion is about 1.3% caused by the 0.3° pitch angle or azimuth deviation. Finally, guided by the design and simulation results, the optical path of the experimental system is completed. The results show that the average distortion corresponding to the maximum field of view is 0.385%.

Key words imaging system; imaging distortion; simulation modeling; digital micromirror device

OCIS codes 110.2960; 110.2970; 230.3990; 120.2040

1 引 言

地面高分辨率天文观测中通常配备稳像及自适应光学系统,以克服大气湍流对波前扰动的影响。在对太阳的观测中,稳像及自适应光学系统常以太阳上随处可见的米粒组织作为信标,但太阳米粒组织具有显著的时间演化特性。因此,在实验室研制阶段,能反映目标真实时间和空间特性的模拟装置极具研究价值。

太阳米粒组织遍布整个光球层,单个米粒组织直径约为 1000 km^[1],对比度约为 5%^[2],平均寿命约为 8.6 min^[3]。由于白天观测时的大气视宁度较夜晚差,用于太阳观测的稳像及自适应光学系统的探测帧频普遍较高,通常大于 2000 frame/s,这对目标显示器件提出了很高的刷新频率要求。另外,使用互相关算法^[4]计算稳像系统中焦平面图像序列的相对偏移量时,面源目标的畸变会引起相关峰值产生偏差,从而影响系统探测精度^[5]。因此,对动态目

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-06-12; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(11427901)

* E-mail: chenxueqi@nao.cas.cn; ** E-mail: amjiang@bao.ac.cn

标成像模拟器提出了 3 个主要要求:1)成像畸变尽可能小;2)成像对比度较高;3)显示帧频大于 2000 frame/s,同时显示图像稳定、无闪烁,模拟器显示与高速采集相机同步,不能出现图像撕裂和重叠等问题。

由国内外有关动态像模拟器显示灰度级和帧频等的研究^[6-9]可知,目前常用的模拟器有阴极射线管(CRT)、液晶显示器(LCD)及数字微镜器件(DMD)等。CRT 显示过程中电子束轰击激发的光能量迅速衰减,图像严重闪烁^[10],因此不适用于高帧频目标模拟。采用振幅相位混合型硅基液晶空间光调制器模拟目标源时发现,驱动电路中强制加入了黑色行预写功能^[11],导致模拟目标的亮度频繁发生改变,该硅基液晶空间光调制器不适用于高帧频目标显示。DMD 显示二值图的刷新频率可达万赫兹量级,采用脉冲宽度调制的方法可以实现低灰度图像的高帧频显示。

为研究 DMD 作为动态目标显示器件的性能,建立了基于 DMD 的目标模拟系统。DMD 的微镜阵列沿各自对角线倾斜摆动工作时形成的特殊结构会引起像面畸变,国内学者对 DMD 在会聚成像光路中引起的光程差进行了计算^[12-13],采用多项式拟合^[14-15]、基于区域的自适应畸变校正函数模型^[16]等实现了像面畸变校正。本文基于本系统的应用场景,进行以下研究:1)确定了系统结构和主要参数,给出了实验系统的设计,分析了 DMD 的姿态;2)对系统进行 Zemax 仿真,并设计了畸变检测方法,分析了实验系统畸变、非平行光照明、DMD 姿态角装调误差对畸变的影响;3)建立了实验装置,介绍了 DMD 姿态的装调过程,并对系统的畸变和对比度进行了实验研究。

2 系统设计

为研究 DMD 的成像特性,对基于 DMD 的目标模拟实验系统进行了总体设计,系统结构如图 1 所示。光纤耦合 LED(light emitting diode)发出的光经过空间滤波器和照明透镜后形成平行照明光,入射至 DMD 靶面。美国 TI 公司的 DMD 为数控机电系统(MEMS)空间光调制器,靶面上处于不同工作状态的微镜调制入射光的振幅、方向或相位,以实现图像的显示。DMD 显示的图像经成像镜头在系统像面处成像,并被 CMOS 相机接收,数字图像采集卡将采集的图像信号传输至计算机,进行存储与计算。

在照明光路中,采用波长带宽为 15 nm 的

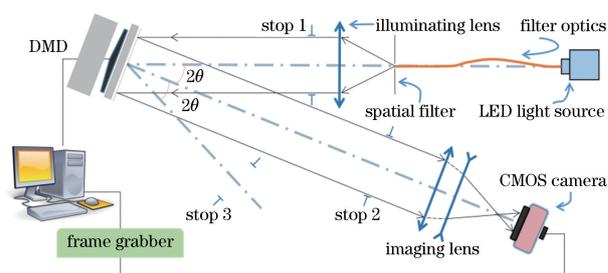


图 1 基于 DMD 的目标模拟系统结构简图

Fig. 1 Structural diagram of source simulation system based DMD

LED 光源,避免强相干光源产生像面干涉环影响像面照度均匀性。使用空间滤波器将 LED 发出的光聚焦成球面波,以提高照明光的亮度均匀性。

影响像点坐标质量的一项重要误差是光学畸变,其为光学系统设计、加工及装配误差引起的实际像点偏离其理想位置的误差^[17],本文分别从径向畸变和倾斜畸变两方面对其进行控制。径向畸变主要来自成像镜头的畸变,倾斜畸变由各成像元件方位变化导致,本文将围绕 DMD 的姿态方位展开讨论。

在成像光路中,系统选择美国 TI 公司型号为 DLP7000 的 DMD 芯片作为显示器件,微镜阵列大小为 1024 pixel×768 pixel,微镜间距 $s=13.68\ \mu\text{m}$,DMD 的靶面尺寸为 14.00832 mm×10.50624 mm,对角线长度为 17.5104 mm。系统使用 Microtron 公司的型号为 MC1362 的 CMOS 相机接收成像系统的像,靶面大小为 1280 pixel×1024 pixel,像元尺寸 $p=14\ \mu\text{m}$ 。CMOS 相机在全分辨率下的最大帧频为 430 frame/s,为保证采集帧频高于 2000 frame/s,相机使用 ROI(region of interest)模式,对应的开窗范围应小于 472 pixel×472 pixel。

2.1 实验系统设计

DMD 靶面、CMOS 相机靶面分别位于成像系统的物、像平面。根据器件参数可知,成像系统物尺寸为 14.00832 mm×10.50624 mm,像尺寸小于 4.144 mm×3.136 mm,以此计算出系统的初始参数如下:物方视场(FOV)角为 1°,物距大于 700 mm,像距大于 200 mm,焦距为 200 mm,工作波长 $\lambda=617\ \text{nm}$ 。根据以上设计参数可知,系统的垂轴放大率 β 小于 -0.3,镜组的初始结构为双分离正负透镜组。选定 Thorlabs 公司的焦距为 100 mm 的最佳外形球面透镜和焦距为 -149.4 mm 的平凹透镜,在 Zemax 中以物面与透镜第一个表面的距离、透镜间距及后截距为变量进行优化,最终得到的实验系统的光学参数见表 1。

表 1 实验系统主要光学参数

Table 1 Main optical parameters of experimental system

Parameter	Value
Wavelength /nm	617
Effective focal length /mm	201.8440
Object distance /mm	966.6993
Image distance /mm	252.2860
F number	15.0048
Transverse magnification β	-0.2630
FOV /($^{\circ}$)	1.0378
Entrance pupil diameter /mm	17.5104
Total track /mm	233.3776

系统的像质评价参数如下:0.707 视场带球差为-0.0288 mm,正弦差为 0.0135 mm,各视场的 MTF(modulation transfer function)曲线在 35 lp/mm 处均优于 0.5,最大视场初级畸变^[18]为 0.00155%,

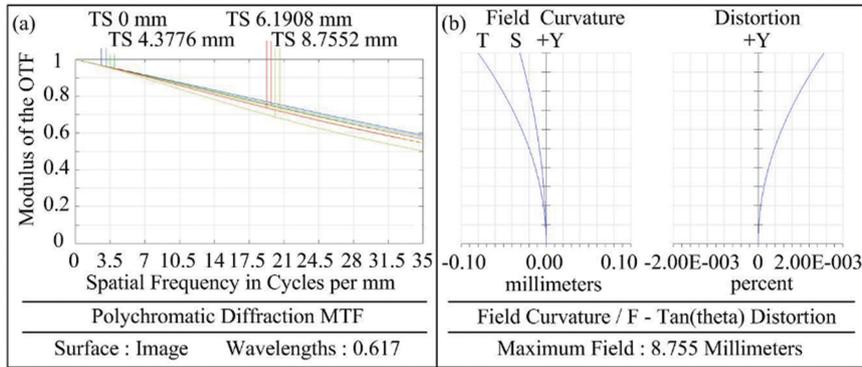


图 2 实验系统成像性能。(a) MTF 曲线;(b)场曲和畸变

Fig. 2 Imaging performance of experimental system. (a) MTF curve; (b) field curvature and distortion

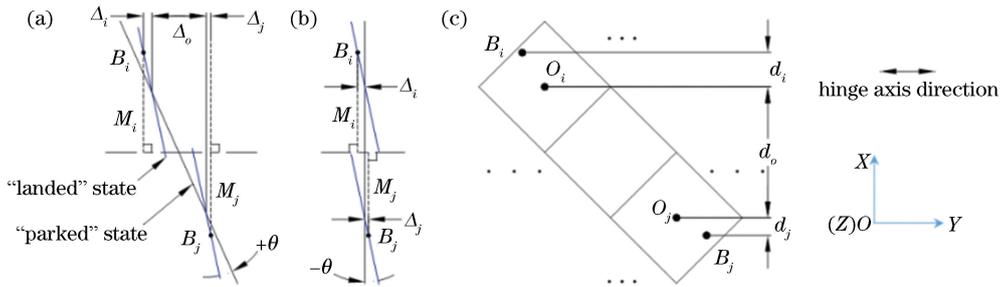


图 3 DMD 在成像光路中的姿态。(a) DMD 阵列面垂直于照明光轴;(b) DMD 阵列面垂直于成像光轴;

(c) B_i 、 B_j 间距示意图

Fig. 3 DMD's azimuth in the imaging light path. (a) DMD array plane perpendicular to the lighting optical axis;

(b) DMD array plane perpendicular to the imaging optical axis; (c) diagram of distance between B_i and B_j

从成像清晰度和几何形变两方面对两种姿态下的 DMD 进行对比分析。分别设垂直、平行于铰链轴方向为 X 轴和 Y 轴,DMD 上任意两点 B_i ($i = 1, 2, \dots, N_x$)、 B_j ($j = 1, 2, \dots, N_y$) (N_x 、 N_y 分别为 B_i 、 B_j 沿 X、Y 轴方向的微镜数量)的物空间深度为

MTF 曲线、场曲和畸变如图 2 所示。

2.2 DMD 摆放姿态分析

DMD 芯片由百万块铝反射微镜组成,每块微镜安装在各自的扭转铰链^[19]上,铰链轴沿微镜对角线放置。不加电信号时,微镜平行于阵列面;加电时,微镜以 $+\theta$ 或 $-\theta$ 绕轴倾斜。由于微镜具有两种偏转状态,DMD 的阵列面垂直于照明光轴(姿态 a)或成像光轴(姿态 b)时,均能使入射光偏转 2θ (图 3)。这两种摆放姿态引起的光路装调的复杂度不同:当 DMD 处于姿态 a 时,不加电时 DMD 阵列面的反射光沿照明光路返回至光阑 1(图 1),为 DMD 的姿态定位提供了便利;当 DMD 处于姿态 b 时,阵列面的反射光沿与照明光轴成 4θ 的方向传输至光阑 3,在定位时引入了角度测量误差。因此,在满足成像质量的前提下,应优先选用姿态 a。

$$\begin{cases} \Delta_a = \Delta_o + \Delta_i - \Delta_j = (N_x + 1) \times \sqrt{2} s \times \\ \sin 2\theta + (d_i - d_j) \sin \theta \\ \Delta_b = \Delta_i - \Delta_j = (d_i - d_j) \sin \theta \end{cases}, (1)$$

式中: Δ_a 、 Δ_b 分别为 DMD 处于姿态 a、b 时的物空间深度; Δ_o 为 B_i 、 B_j 各自所处的微镜中心点 O_i 、

O_j 间的物空间深度; Δ_i, Δ_j 分别为 B_i 到 O_i, B_j 到 O_j 的物空间深度; $d_i = |\overrightarrow{OB_{ix}}|, d_j = |\overrightarrow{OB_{jx}}|$ 分别为 B_i 到 O_i, B_j 到 O_j 的间距沿 X 轴的投影距离。当 $\overrightarrow{OB_x}$ 取值为正时, d 为正; 反之为负。 $N_x = 0.5n, n$ 为非负整数。

B_i, B_j 沿 X 轴的投影距离到各自所在物平面 M_i, M_j 上的尺寸变形量为

$$\begin{cases} d_{ax} = (N_x + 1) \times \sqrt{2}s \times (1 - \cos 2\theta) + \\ \quad (d_i - d_j)(1 - \cos \theta) \\ d_{bx} = (d_i - d_j)(1 - \cos \theta) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: d_{ax}, d_{bx} 分别为 DMD 处于姿态 a、b 时的尺寸变形量。基于 DMD 绕轴倾斜的特性可知, B_i, B_j 沿 Y 轴的尺寸变形量为 0。图 3(c) 为图 3(b) 的左视图, d_o 表示 O_i, O_j 沿 X 轴的投影距离。

当像平面上弥散斑直径的允许值等于系统成像 Airy 斑直径时, 计算出成像系统景深 $\Delta = 1.9806 \text{ mm}$, 将 DMD 参数代入 (1) 式可得, 姿态 a 中, DMD 靶面上 X 轴方向有小于等于 250 块微镜能清晰成像; 姿态 b 中, 所有微镜均能清晰成像。由 (2) 式可得, 在能清晰成像的范围内, $419.4 \mu\text{m} \leq d_{ax} \leq 420.2 \mu\text{m}, d_{ay} = 0, X, Y$ 方向变形量的不等使成像系统的物发生几何形变, 导致成像畸变的产生; 而当 $-0.4228 \mu\text{m} \leq d_{bx} \leq 0.4228 \mu\text{m}, d_{by} = 0$ 时, 此姿态下的物面变形量对于垂轴放大率 β 为 -0.2630 的成像系统可忽略不计。因此, 在系统中采用 DMD 阵列面垂直于成像光轴的姿态。

作为系统的显示器件, DMD 在光路中的特殊姿态为系统装调增加了难度。为在装调中有针对性地对畸变进行控制, 对系统光路进行仿真, 设计了畸变测量方法, 并对畸变进行检测, 用以指导实验系统光学装调。

3 系统畸变来源分析

3.1 系统仿真

在 Zemax 非序列模式中进行系统仿真, 点光源波长为 617 nm , 功率为 0.013 W , 锥角为 8° , 照明透镜为 Thorlabs 公司的平凸透镜 LA1031。点光源与照明透镜间距为 95.65 mm , 点光源经过照明透镜后形成的平行照明光束入射至 DMD 靶面。系统使用 MEMS 仿真 DMD, 将控制 DMD 微镜寻址方式的参数 P-Flag 值设为 2, 以实现每块微镜寻址状态的单独控制。由于铰链轴沿微镜对角线方向排列, 为保证照明光轴和成像光轴平行于光学平台面, 将

DMD 芯片旋转 45° 放置, 如图 4 所示。在系统成像畸变的研究中, CMOS 相机的采集帧频可适当降低, 成像面的尺寸可相应增大。根据旋转后的物面等效尺寸, 确定像面为 $320 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$ 。仿真系统的三维布局如图 5 所示。

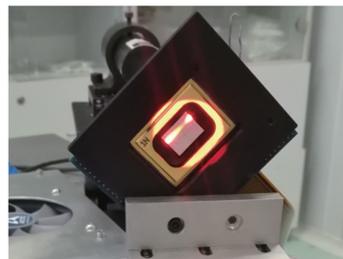


图 4 DMD 在光学平台上旋转 45° 的安装姿态
Fig. 4 DMD mounted on optical platform with rotation angle of 45°

3.2 畸变检测方法

在系统仿真的基础上, 设计了畸变检测模板用于测量系统畸变。根据旋转后 DMD 靶面的等效结构, 结合实际应用时 DMD 的显示范围, 利用 $0.5^\circ, 0.7^\circ$ 和 1° 物方视场布局特征点 (表 2), 得到的测量模板如图 6 所示。

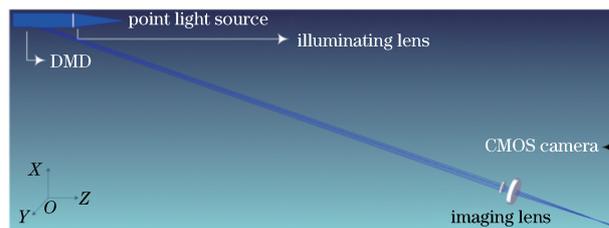


图 5 Zemax 非序列模式中仿真系统 Shaded 模型图
Fig. 5 Shaded model diagram of simulation system with Zemax non-sequence mode

表 2 3 个视场对应特征点表

Table 2 Table of feature points corresponding to three FOVs

FOV / ($^\circ$)	Feature point No.	Distance from center point /pixel
0.5	6,7,8,11,13,16,17,18	160
0.7	3,4,5,10,14,19,20,21	320
1	1,2,9,15,22,23	480

将此模板应用于仿真系统, 将 DMD 上对应位置的微镜调至工作状态, 追迹 10 亿根分析光线, 得到像面上的辐照度分布图。畸变计算方法如下: 1) 对辐照度矩阵进行特征点提取; 2) 根据质心的定义计算出各特征点的质心坐标; 3) 将模板中各特征点与中心点 12 的间距按成像系统的垂轴放大率 β 进

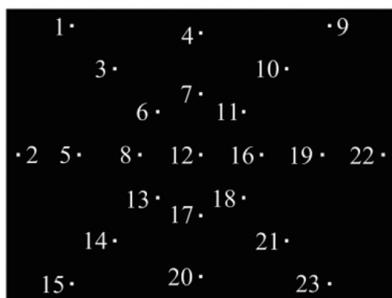


图 6 畸变测量模板

Fig. 6 Distortion measurement template

行缩放,然后转化为各特征点的理想像点坐标。质心与理想像点的间距即为仿真系统中特征点的成像畸变。

3.3 平行和非平行照明光下畸变对比

Zemax 序列模式下,在实验系统的点列示意图中得到 23 个特征点对应的成像弥散斑的质心位置坐标,利用上述算法计算出实验系统各视场的平均畸变,其与平行光照明下系统仿真畸变分布的均值-标准差曲线如图 7(a)所示。

从畸变曲线可以看出,仅由实验系统引起的畸变随视场的增大而线性增大,各视场特征点的畸变数值分布集中,实验系统引入 0.03% 的畸变;仿真系

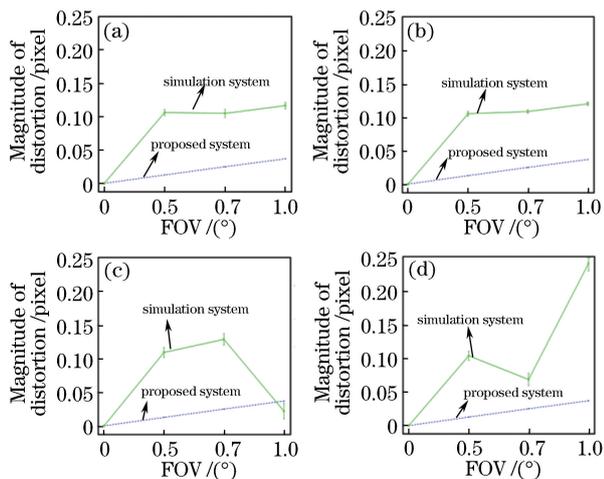


图 7 不同照明光源下的畸变曲线。(a) 平行光源照明; (b) 理想平行光源照明; (c) 非平行光源(点光源沿轴移动-1 mm 后所得)照明; (d) 非平行光源(点光源沿轴移动+1 mm 后所得)照明

Fig. 7 Distortion curves with different lighting sources. (a) Parallel source lighting; (b) ideal parallel source lighting; (c) non-parallel light source lighting (after point light source moving -1 mm along the axis); (d) non-parallel light source lighting (after point light source moving +1 mm along the axis)

统畸变数值集中分布在 0.12 pixel 左右,各视场特征点的畸变值分布较为集中。图 7(b)为理想平行光源入射 DMD 靶面的情况,与图 7(a)相比,系统畸变变化趋势相同,各视场特征点的分布更集中。

除了平行光入射 DMD 的情况,还进行了非平行光入射的研究。将点光源沿照明光轴移动 -1 mm、+1 mm,使照明光束的平行度改变,相应系统畸变如图 7(c)、(d)所示。与图 7(a)相比,各视场特征点的分布集中程度相当,但畸变均值发生变化,即非平行照明光为各视场引入了畸变,其中变化最大值为 0.1 pixel,即最大引入了 0.08% 的畸变。

3.4 DMD 角度偏差对结果的影响

利用仿真模型,分别对由 DMD 绕 X 轴转动的俯仰角、绕 Y 轴转动的方位角及绕成像光轴 Z 轴转动的滚动角的装调误差引起的畸变进行仿真计算。以垂直于成像光轴的 DMD 阵列面为基准,当 DMD 绕轴旋转 $\pm 0.3^\circ$ 、 $\pm 0.2^\circ$ 、 $\pm 0.1^\circ$ 时,利用检测方法分别计算出各特征点的畸变,得到不同视场中,DMD 姿态角偏差与最大畸变的关系曲线如图 8 所示。

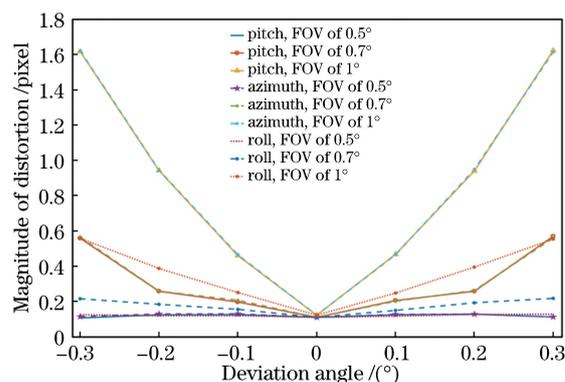


图 8 DMD 俯仰角偏差、方位角偏差、转动角偏差对不同视场畸变的影响

Fig. 8 DMD pitch angle deviation, azimuth angle deviation, and roll angle deviation as functions of distortion in different FOVs

分析可知,俯仰角和方位角失调对像面畸变贡献较大,当俯仰角偏差为 0.3° 时, 1° 视场最大畸变为 1.6233 pixel,给系统增加了 1.32% 的畸变;方位角偏差为 -0.3° 时, 1° 视场最大畸变为 1.6217 pixel,增加了 1.31% 的畸变;滚动角的误差敏感度较低,滚动角偏差为 0.3° 时, 1° 视场最大畸变为 0.5590 pixel,增加了 0.45% 的畸变。其中,滚动角偏差可通过调整 CMOS 相机的滚动角进行补偿,而俯仰角和方位角偏差虽然可通过像面倾斜进行补偿^[13],但会因此引入倾斜畸变^[16]。因此,装调时应严格控制俯仰角偏差和方位角偏差。

4 基于 DMD 的目标模拟系统建立及实验

根据总体设计结果建立目标模拟实验系统,实验光路如图 9(a)所示。在装调过程中,结合畸变检测方法对 DMD 的姿态进行了调整,方法如下:1) DMD 输入回字格图片,根据采集图像中回字格的内角是否均为 90° ,初步判断 DMD 的姿态是否到位。2) DMD 输入畸变测量模板,求出采集图像中相邻特征点的质心距离,与理想像点的相邻间距进行比较,若前者较大,则增大成像系统的物距,反之

则进行反向调整。3)若特征点间的水平距离等于相应的理想间距、垂直距离小于理想值时,则应调整 DMD 的俯仰角;若特征点间的垂直距离等于理想间距、水平距离小于理想值,则应调整方位角。

4.1 系统畸变测量

DMD 输入图 6 所示的畸变测量模板,实验中选取的单个特征点尺寸为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 。图 9(b)所示为系统采集到的特征点图像。根据畸变计算方法求出各特征点的畸变,各视场畸变的平均值-标准差曲线如图 10 所示,系统设计、系统仿真和实验各视场畸变数值见表 3。

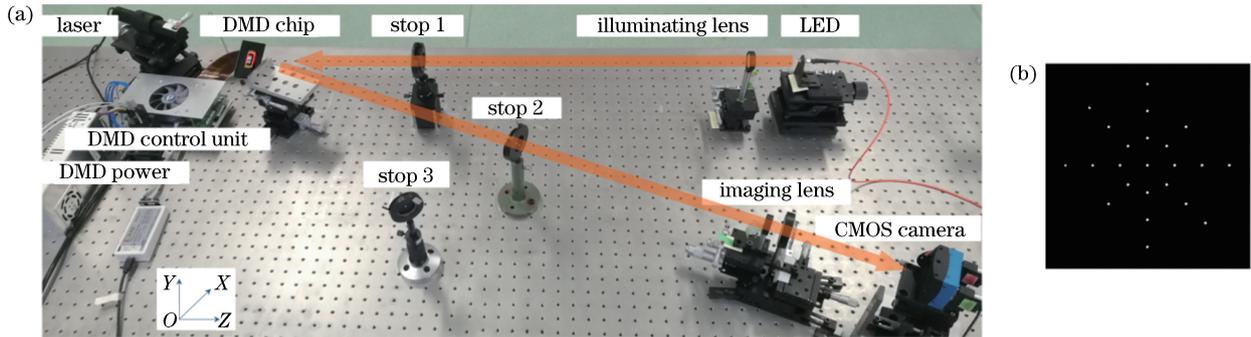


图 9 基于 DMD 的目标模拟系统。(a)实验光路图;(b)畸变测量实验的采集图像

Fig. 9 Source simulation experimental system based on DMD. (a) Experimental light path;

(b) collected image in distortion measurement experiment

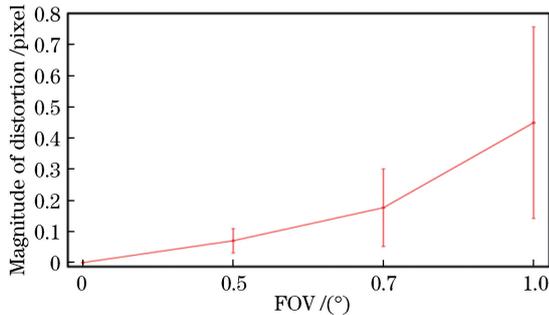


图 10 实验系统畸变曲线

Fig. 10 Distortion curve of experimental system

表 3 系统设计、系统仿真与实验的畸变表

Table 3 Distortion of system design, system simulation, and experiment

FOV / (°)	Imaging distortion / pixel		
	System design	Simulation	Experiment
0.5	0.0108	0.1061	0.0761
0.7	0.0217	0.1048	0.1783
1	0.0312	0.1165	0.4750

由图 10 可知,实验系统畸变的平均值及标准差均随物方视场的增大而递增,且视场越大,实验系统的畸变数值分布越离散。比较表 3 中实验与仿真的

数据可知,各视场的实验畸变值有不同程度的变化,说明实验采集结果中包含非平行光照明带来的误差。 1° 视场的实验畸变值比仿真系统畸变值增加了 4 倍,说明实验结果中还含有装调误差等因素。

实验系统的 0.5° , 0.7° 和 1° 视场畸变平均值分别为 0.062% , 0.145% 和 0.385% 。对于稳像及自适应光学系统, DMD 模拟的面源目标引入了小于 0.385% 的畸变,对图像序列相对偏移量计算结果的影响较小。

4.2 成像对比度测量实验

成像对比度是衡量米粒组织目标模拟器成像质量的指标之一,其与入射光光强、DMD 的显示对比度、照明透镜及成像镜头的光学传递函数、相机的积分时间和采集噪声等因素有关。实验系统中用 DMD 显示黑白格图像,如图 11(a)所示;用 CMOS 相机进行接收,采集结果如图 11(b)所示(为便于对比,将采集的图像放大 3.8 倍)。显示器件 DMD 的微镜反射率为 $0.88^{[19]}$, CMOS 相机积分时间为 $175 \mu\text{s}$ 。图像对比度计算公式为

$$C = \frac{\bar{L}_{\text{white}} - \bar{L}_{\text{black}}}{\bar{L}_{\text{white}} + \bar{L}_{\text{black}}}, \quad (3)$$

式中： \bar{L}_{white} 和 \bar{L}_{black} 分别为白色格和黑色格对应像素的灰度平均值，可得 $C=0.704$ 。

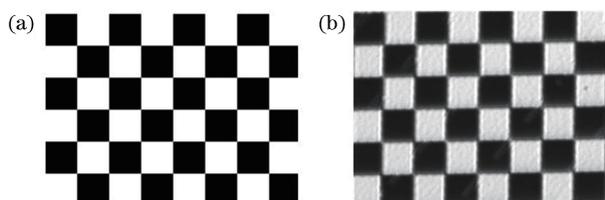


图 11 对比度测试黑白图。(a) DMD 输入图；
(b) CMOS 采集图

Fig. 11 Black and white grid images used to test contrast.

(a) Input image of DMD; (b) acquired image of CMOS

进行图像预处理时，应对采集图像进行去暗流及平场均衡处理，以减小 CMOS 相机噪声及增益不均匀带来的影响^[4]。

5 结 论

在稳像及自适应光学系统的实验室研制阶段，迫切需要一个能反映目标真实特性的动态目标成像模拟器。使用高分辨、高帧频的显示器件 DMD 对面源目标进行模拟。为研究 DMD 的成像特性，设计了基于 DMD 的目标模拟实验系统及畸变检测方法，利用光学设计软件对系统进行仿真，分别对由实验系统畸变、非平行光照明和 DMD 的角度装调误差引入的畸变进行分析可知，装调时 DMD 俯仰角及方位角失调对畸变的贡献最大。

在实验系统的建立中，结合系统仿真结果对 DMD 的姿态进行装调。实验结果显示，系统 0.5° 、 0.7° 、 1° 视场的平均畸变分别为 0.062% 、 0.145% 、 0.385% ，成像对比度为 0.704 。结果表明，DMD 适合为稳像及自适应光学系统提供高精度面源目标。

参 考 文 献

- [1] McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V. Encyclopedia of the solar system [M]. 2nd ed. Massachusetts, Cambridge: Academic Press, 2007: 76.
- [2] Ballesteros E, Collados M, Bonet J A, *et al.* Two-dimensional, high spatial resolution, solar spectroscopy using a Correlation Tracker. I. Correlation Tracker description[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1996, 115(2): 353-365.
- [3] Bahng J, Schwarzschild M. Lifetime of solar granules [J]. The Astrophysical Journal, 1961, 134: 312-322.
- [4] Jiang A M, Ye B X, Sun J H, *et al.* Correlation tracker system for space solar telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4839: 307-311.
- [5] von der Luehe O. A study of a correlation tracking method to improve imaging quality of ground-based solar telescopes [J]. Astronomy and Astrophysics, 1983, 119: 85-94.
- [6] Beasley D B, Bender M, Crosby J, *et al.* Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7210: 721001.
- [7] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, *et al.* Two-band DMD-based infrared scene simulator [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7663: 766302.
- [8] Liang C Y. Research on key technology of laser projection display optical system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 1-16.
梁传祥. 激光投影显示光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2017: 1-16.
- [9] Ma J. Advanced MEMS-based technologies and displays [J]. Displays, 2015, 37: 2-10.
- [10] Östberg O, Shahnavaiz H, Stenberg R. CRT flicker and scan-line direction [J]. Displays, 1987, 8(2): 75-78.
- [11] Janssen P, Shimizu J A, Dean J, *et al.* Design aspects of a scrolling color LCoS display [J]. Displays, 2002, 23(3): 99-108.
- [12] Xiong Z, Liu H, Tan X Q, *et al.* Diffraction analysis of digital micromirror device in maskless photolithography system [J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(4): 043016.
- [13] Sun Y Q, Hu Y, Wang Y Q, *et al.* Analysis on aberration of digital micromirror device in convergent imaging path [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0311001.
孙永强, 胡源, 王月旗, 等. 数字微镜器件在会聚成像光路中的像差分析 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0311001.
- [14] He S W, Wang Y J, Sun H H, *et al.* High dynamic range imaging based on DMD [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0811001.
何舒文, 王延杰, 孙宏海, 等. 基于 DMD 的高动态范围场景成像技术 [J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0811001.
- [15] Wang W J, Zhang F M, Feng W, *et al.* Pixel-level mapping method based on digital micromirror imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1211001.
王惟婧, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜成像系统的像素级映射方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1211001.
- [16] Wu P, Wang Y J, Sun H H, *et al.* Self-distortion

- correction of high dynamic dimming imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2997-3003.
- 吴培, 王延杰, 孙宏海, 等. 高动态调光成像系统畸变的自校正 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(10): 2997-3003.
- [17] Feng W H. On calibration of close-range cameras [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2000(10): 1-3.
- 冯文灏. 关于近景摄影机检校的几个问题 [J]. *测绘通报*, 2000(10): 1-3.
- [18] Wang W S. *Applied optics* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2010: 117-120, 173-183.
- 王文生. *应用光学* [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 117-120, 173-183.
- [19] Texas Instruments. DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD [OL]. (2017-05) [2019-04-01]. <http://www.ti.com/product/DLP7000/technicaldocuments>.