

动态调制型光场相机波前传感器的数值仿真

何宇龙^{1,2,3***}, 宁禹^{1,2,3**}, 姜宗福^{1,2,3*}, 孙全^{1,2,3}, 张明^{1,2,3}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 光场相机波前传感器是一种新型的波前传感器, 具有视场大、动态范围大的优势, 但由于存在信号饱和现象, 光场相机的线性度和波前传感精度较低。利用动态调制提高光场相机的线性度和波前传感精度, 理论分析了光场相机波前传感的原理与特性, 利用 MATLAB 软件对光场相机在动态调制时的波前闭环校正效果进行数值模拟, 并与无调制光场相机的模拟结果进行对比分析。仿真结果表明: 光场相机在动态调制时的测量精度高, 校正效果较好, 校正后远场光斑的斯特列尔比大于 0.8, 波前传感性能优于无调制光场相机。

关键词 传感器; 自适应光学; 波前传感器; 光场相机; 动态调制; 数值模拟

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728008

Numerical Simulation of Plenoptic Camera Wavefront Sensors with Dynamic Modulation

He Yulong^{1,2,3***}, Ning Yu^{1,2,3**}, Jiang Zongfu^{1,2,3*}, Sun Quan^{1,2,3}, Zhang Ming^{1,2,3}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Plenoptic camera is a new type of wavefront sensor with large dynamic range and large field of view. However, the linearity of the plenoptic camera and the accuracy of wavefront sensing are low because of the phenomenon of signal saturation, which can be improved by dynamic modulation. The principle and characteristics of plenoptic camera wavefront sensing are analyzed via numerical simulation. The wavefront closed-loop correction effect in dynamic modulation of plenoptic camera is simulated by MATLAB software, and the simulation results of dynamic modulation with plenoptic camera and without plenoptic camera are compared. Simulation results show that, under the dynamic modulation of plenoptic camera, the measurement accuracy is high, the correction effect is good, the strehl ratio of the corrected far-field spot is higher than 0.8, and the performance of the wavefront sensor is better than that of the plenoptic camera without dynamic modulation.

Key words sensors; adaptive optics; wavefront sensors; plenoptic camera; dynamic modulation; numerical simulation

OCIS codes 280.4788; 110.1080; 010.7350

1 引 言

波前传感器是自适应光学系统的重要组成部分。自适应光学技术中通常采用的波前传感方法为探测波前畸变的一阶导数(波前斜率)或二阶导数(波前曲率)。比较有代表性的波前传感器主要包括

剪切干涉仪、夏克-哈特曼传感器、四棱锥波前传感器和曲率传感器。

夏克-哈特曼传感器是目前应用最广泛的波前传感器, 它利用微透镜阵列(MLA)分割入射波前, 测量各子孔径内波面的平均斜率, 进而复原出波前像差。夏克-哈特曼传感器具有结构紧凑、光能利用

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-03-15; 录用日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61505257)

* E-mail: jiangzongfu7@163.com; ** E-mail: ningyu_0205@126.com; *** E-mail: yulonghe1993@163.com

率高和能工作于连续或脉冲目标等优点,但是它也存在动态范围较小、弱光探测能力不足、波前测量的空间分辨率难以调整等缺陷。四棱锥波前传感器由Ragazzoni于1996年提出,其基本原理是光束聚焦在四棱锥顶点后分光,通过探测面上4个子光瞳像之间的强度差异计算波前局部斜率。四棱锥波前传感器具有高于哈特曼传感器的空间分辨率,在闭环校正时的灵敏度和弱光探测能力也很突出。

光场相机的原理是利用微透镜阵列实现光场获取,在普通成像系统的像面处插入一个微透镜阵列,电荷耦合器件(CCD)位于微透镜阵列的后焦面,每个微透镜元能记录入射光的方向,从而可以从图像中得到四维光场信息^[1]。Clare等^[2]提出利用光场相机进行波前测量,并给出了光场相机波前斜率的计算公式。Rodríguez-Ramos等^[3-6]制造出了一台用作波前传感的光场相机,并对其波前传感特性开展了一系列研究,验证了其作为波前传感器的可行性,并指出光场相机在多层共轭自适应光学(MCAO)中拥有较广阔的应用前景。Wu课题组研究了光场相机的结构,并将其应用于激光通信领域^[7-10]。

相比于现有的波前传感器,光场相机拥有较大的探测视场和动态范围,在目标跟踪以及大视场自适应光学技术中具有良好的应用前景,但是由于存在信号饱和现象,其波前传感的线性度和精度较低,这一缺陷限制了光场相机在自适应光学中的应用。为了提高光场相机的波前传感精度,本文将动态调制应用于光场相机的波前传感,通过理论分析和数值模拟初步研究了光场相机在动态调制时的波前传感特性,并与无调制光场相机进行了对比分析。数值模拟结果表明,动态调制能够提高光场相机的波前传感精度。

2 光场相机的基本原理

2.1 光场相机波前传感器的基本结构

光场相机波前传感器的光路结构如图1所示。构成光场相机的主要器件包括物镜、微透镜阵列和CCD。微透镜阵列置于物镜的后焦面,CCD探测器置于微透镜阵列的后焦面,微透镜阵列对焦平面光斑进行分割,并成像在CCD上形成子光瞳像。为了保证各个微透镜元内的光信号不会互相干扰,光场相机在设计时通常会使用物镜的 f 数大于微透镜阵列的 f 数,即满足条件

$$D/f < d/f_2, \quad (1)$$

式中: D 为物镜的口径; d 为微透镜元的口径; f_2 为微透镜阵列的焦距。对光场相机图像进行后处理,再结合使用波前复原算法,能够利用光场相机复原波前畸变的相位分布。

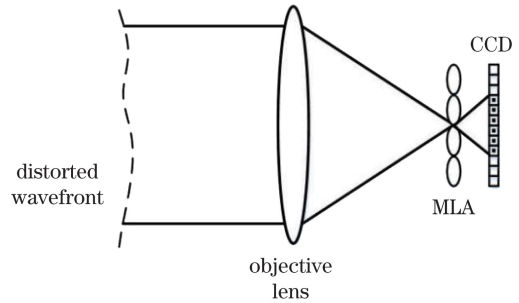


图1 光场相机波前传感器的光路结构示意图
Fig. 1 Optical path diagram of plenoptic camera wavefront sensor

2.2 光场相机波前传感器的原理

2.2.1 光场相机波前传感原理的几何光学解释

光场相机的波前传感原理可以利用几何光学的传输矩阵理论进行推导。如图2所示,一条经过物镜前焦面一点A的光线,其位置和方向可以由向量 (q_1, p_1) 表示,光线通过物镜和微透镜阵列折射

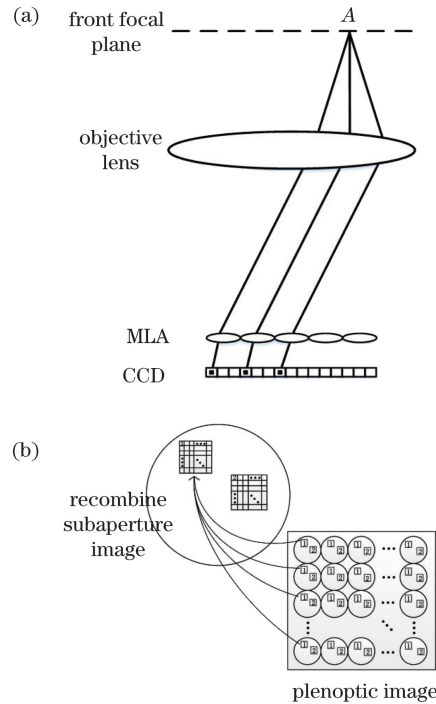


图2 光场相机波前传感原理。(a)光场相机波前测量原理;
(b)重组子孔径图像过程

Fig. 2 Principles of wavefront sensing of plenoptic cameras.
(a) Principle of wavefront measurement of plenoptic camera;
(b) process of recombined subaperture images

后最终照亮 CCD 探测器某个像元的过程,可以用传输矩阵按照如下步骤进行推导:

1) 光线在自由空间中传输 f_1 的距离时(f_1 为物镜的焦距),经过物镜折射,最后在自由空间中再传输 f_1 的距离时落在微透镜阵列表面。物镜的传输矩阵 \mathbf{T}_1 和自由空间的传输矩阵 \mathbf{T}_{f_1} 分别为

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{f_1} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在微透镜阵列的表面,光线的位置和方向可以表示为

$$\begin{bmatrix} q_2 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ p_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 p_1 \\ -q_1/f_1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2) 假设微透镜阵列表面包括 $2N$ 个微透镜元,并且与 CCD 探测器是严格对准的,那么第 n 个微透镜元的中心位置可以表示为 $q_n = (n-0.5) \cdot d$, 其中 n 的取值范围是 $-N \sim N-1$ 。光线入射到的微透镜元位置可以表示为

$$n = \text{floor}\left(\frac{q_2}{d}\right) = \text{floor}\left(\frac{f_1 p_1}{d}\right), \quad (4)$$

其中 $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整。为了方便继续使用传输矩阵进行推导,光线的位置和方向需要修改为相对于微透镜元的坐标,即

$$\begin{bmatrix} q'_2 \\ p'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 - q_n \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 p_1 - q_n \\ -q_1/f_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3) 光线经微透镜元折射后传输至微透镜元的焦面。微透镜元和自由空间的传输矩阵分别为

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{f_2} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在探测器表面,光线的位置和方向为

$$\begin{bmatrix} q'_3 \\ p'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q'_2 \\ p'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_2 q_1/f_1 \\ -\frac{f_1 p_1 - q_n}{f_2} + \frac{q_1}{f_1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

上述过程表征了光线在光场相机中的传输过程,根据(2)~(7)式的结果可以对测量信号与入射光场之间的关系进行分析。光场相机图像的像元位置可以用一对坐标 (n, q) 来表示,其中 q 表示相对于微透镜元的坐标。根据(4)、(7)式的结果,坐标为 (n, q) 的像元表示物镜前焦面上位置为 $-f_1 q/f_2$, 方向为 $nd/f_1 \sim (n+1)d/f_1$ 之间的光线,如果以微透镜元的中心代替其位置,光场图像中 (n, q) 处

的信号表示物镜前焦面位置和方向分别为 $[-f_1 q/f_2, (n+0.5)d/f_1]$ 的光强。根据光场图像中 (n, q) 与物镜前焦面光线 (q_1, p_1) 之间的关系,就可以得到入射波前畸变的相位分布。根据上述分析过程中光场图像与入射光场之间的关系,可以得到光场相机波前复原的一般步骤为:

1) 重组光场相机图像。重组过程如图 2(b) 所示,以各光瞳像中的 1 号像元为例,将所有光瞳像中的 1 号像元按照微透镜阵列的排布方式重组为一幅图像,重组图像表示物镜前焦面一定区域在微透镜阵列上形成的光斑,等效于哈特曼传感器的子孔径图像。将微透镜下所有像元进行重组,重组结果为虚拟的哈特曼传感器图像。

2) 利用质心算法计算重组图像的质心偏移量 (S_η, S_ξ) 。波前局部斜率可以表示为

$$\begin{cases} \partial\varphi/\partial x = S_\eta/f_1 \\ \partial\varphi/\partial y = S_\xi/f_1 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: x, y 为空间坐标; φ 为待测波前畸变。结合现有的线性波前复原算法,可以重构得到入射的波前畸变的相位分布。

综上所述可知,光场相机是一种斜率型波前传感器,通过对光场图像的重组可以得到等效哈特曼子孔径图像,所以光场相机也可以看作是另一种形式的哈特曼传感器。但是在光场相机波前传感器中,微透镜阵列和 CCD 探测器的作用与哈特曼传感器有所不同。在哈特曼传感器中,微透镜阵列对入瞳处的波前畸变进行分割,通过子孔径图像的质心偏移量计算局部斜率来复原波前畸变的相位分布。在光场相机中,对入瞳处波前畸变进行分割的过程根据微透镜下的像元完成的,这个过程对光场图像进行后处理时是虚拟的,不是由某个器件实现的。微透镜阵列的作用是通过光斑在微透镜阵列上的位置对局部斜率进行估计,相当于哈特曼传感器中的 CCD 探测器。

2.2.2 光场相机波前传感原理的波动光学分析

光场相机波前传感原理也可以利用波动光学进行分析。假设入射波前畸变的相位分布为 $\varphi(x, y)$, 光瞳函数记作 $P(x, y)$, 则入射光场的复振幅可以表示为

$$U_0 = P(x, y) \cdot \exp[i\varphi(x, y)]. \quad (9)$$

在物镜的后焦面,光场的复振幅为入瞳处复振幅的傅里叶变换

$$U_1(u, v) = \mathcal{F}[U_0(x, y)]_{f_x=u/(\lambda f_1), f_y=v/(\lambda f_1)}, \quad (10)$$

式中： \mathcal{F} 为傅里叶变换； λ 为光的波长； (u, v) 为物镜后焦面空间坐标； (f_x, f_y) 为空间频谱坐标。微透镜阵列在物镜后焦面上对光斑进行分割，每个微透镜元分别实现傅里叶逆变换 \mathcal{F}^{-1} ，并成像在 CCD 探测器上，CCD 上接收到的光强可以表示为

$$I_{m,n}(\eta, \xi) = |\mathcal{F}^{-1}[H_{m,n}(u, v) \cdot U_1(u, v)]|^2, \quad (11)$$

其中，

$$H_{m,n}(u, v) = \begin{cases} 1, & (m-1)d < u < md, (n-1)d < v < nd \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (12)$$

式中： (m, n) 为微透镜元的坐标； (η, ζ) 为 CCD 像元相对于微透镜元的坐标； $H_{m,n}(u, v)$ 为微透镜元的窗口函数； $I_{m,n}(\eta, \zeta)$ 为光场图像任意位置像元的光强。利用波动光学理论能够对光场相机进行更加精确的分析。以上述分析过程为基础，结合现有的标量衍射数值模拟算法，建立了光场相机数值模拟程序，通过该数值模拟程序，能够仿真光场相机的波前测量和复原过程，对光场相机的波前传感特性进行进一步研究。

2.3 光场相机波前传感特性分析

波前传感器的主要特性包括空间分辨率、探测动态范围、测量精度等，这些性质决定了波前传感器探测能力的好坏。以下根据光场相机的光学结构，对其波前传感特性进行理论分析。

2.3.1 空间分辨率

光场相机波前传感器对波面的分割是由微透镜下的像元完成的，所以其波前传感的空间分辨率等于微透镜元下有效的 CCD 像元数。假设微透镜阵列中微透镜元的口径为 d ，CCD 探测器的像元尺寸为 μ ，物镜和微透镜阵列的 f 数分别为 f_{number1} 和 f_{number2} ，则光场相机的波前传感空间分辨率为

$$r_e = \frac{d}{\mu} \cdot \frac{f_{\text{number2}}}{f_{\text{number1}}}. \quad (13)$$

假如微透镜阵列的口径为 $200 \mu\text{m}$ ，CCD 像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$ ，物镜的 f 数是微透镜阵列的两倍，那么该光场相机波前传感的空间分辨率为 20×20 。

2.3.2 动态范围

光场相机的动态范围可以用能够测量到的最大波前倾斜来描述。不同于哈特曼传感器，光场相机的动态范围不再受微透镜阵列 f 数的限制，能够测量的最大波前倾斜由微透镜阵列的总面积决定。光场相机能够测量的最大波前倾斜为

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{Nd}{f_1}. \quad (14)$$

从(14)式可以看出：光场相机测量的动态范围相比于哈特曼传感器有明显提高，同时其结构设计可以避免哈特曼传感器中子孔径图像之间的光斑交叠；合理地设计物镜的光学结构和微透镜阵列参数，能使光场相机的波前探测范围明显优于哈特曼传感器。

2.3.3 测量精度与线性度

波前传感器的精度是传感器非常重要的参数，精度高的波前传感器的波前测量误差小，在闭环控制时的校正效果好，收敛速度快；精度差的波前传感器对波前测量和校正都会带来不利的影 响。光场相机的测量精度可以用能够测量的最小波前斜率表示。目前，微透镜阵列的制作工艺使得微透镜元的口径多为 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ，而衍射光斑的尺寸大多小于 $50 \mu\text{m}$ ，微透镜元口径一般为衍射光斑的数倍，焦面光斑完全落入微透镜元孔径内时（如图 3 所示），重组子孔径图像只有一个像素的值不为零。入射光波前斜率发生微小的变化，而 CCD 探测器接收到的光强不发生改变的现象称为信号饱和^[11]。信号饱和现象会显著降低光场相机的波前传感精度。依照上述分析过程，光场相机能够测量的最小波前斜率可以表示为

$$\theta_{\min} = d/f_1. \quad (15)$$

从(15)式可以看出，现有光场相机的结构对小像差不敏感，波前传感精度较低，只能进行较为粗略的波前复原。

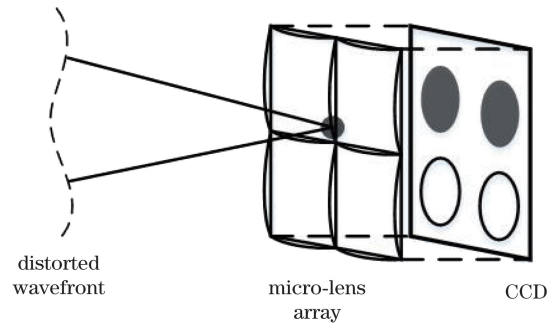


图 3 信号饱和现象说明

Fig. 3 Illustration of signal saturation

光场相机较低的测量精度也影响了光场相机的线性度。线性度的定义为波前传感器输出斜率信号与输入斜率信号之间的线性关系，即为

$$L_{a,b} = \left(1 - \frac{\Delta y_{\max}}{y_a - y_b}\right) \times 100\%, \quad (16)$$

式中： Δy_{\max} 为输出信号与理想值之间的最大偏差；

y_a, y_b 为传感器的量程范围。由于光场相机的测量精度较低,当输入波前斜率连续变化时,只有在零点附近的输入与输出波前斜率能够保持良好的线性关系。随着输入波前斜率的变化,传感器输出斜率信号呈阶梯的分布。利用数值模拟程序对光场相机的线性度进行仿真,仿真结果如图 4 所示,图 4 中的 x 轴表示仅含有整体倾斜的输入波前畸变, y 轴表示光场相机输出的波前斜率。从图中 4 可以看出,输入与输出波前斜率之间呈现阶梯状的响应关系,按(16)式计算得到的线性度为 86.5%,结果证明了上述对光场相机精度、线性度理论分析过程的合理性。

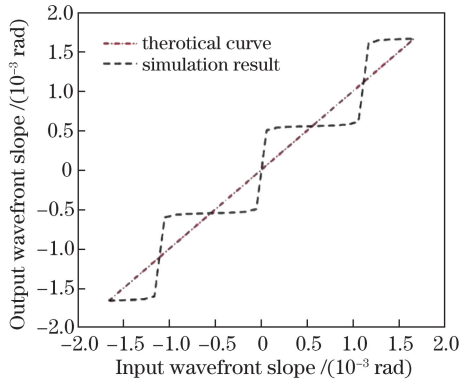


图 4 光场相机无调制时的线性度

Fig. 4 Linearity of plenoptic camera without dynamic modulation

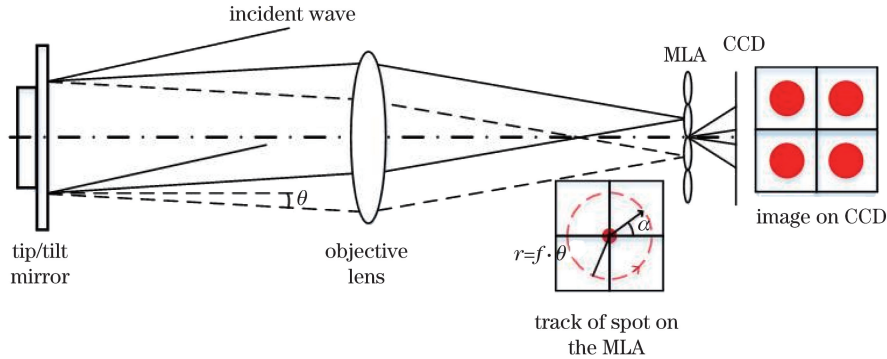


图 5 光场相机动态调制的原理

Fig. 5 Principle of plenoptic camera with dynamic modulation

假设倾斜镜的调制路径为圆形,调制角半径为 θ ,倾斜镜的动态调制效果相当于在波前畸变中加入了 (x, y) 方向的整体倾斜,在加入调制后物镜前焦面的波前畸变可以表示为

$$\varphi_0(x, y, \alpha) = \varphi(x, y) + \frac{\sin \theta \cdot \cos \alpha \cdot x}{\lambda} + \frac{\sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot y}{\lambda}, \quad (18)$$

式中: α 为动态调制时的转动角度。

3 动态调制型光场相机波前传感器

3.1 动态调制型光场相机波前传感器的基本原理

为了提高光场相机的波前传感精度,采用动态调制的方式来降低光场相机能够探测的最小波前斜率^[12]。动态调制原理如图 5 所示,实现方式为在物镜前焦面放置高速倾斜镜,使本应落在 P 点的光斑在 CCD 积分时间内绕着 P 点作整数次周期运动。通过倾斜镜的作用增大焦面光斑在微透镜阵列上的面积,使光能分布在更多的微透镜上,提高质心算法的精度。当调制半径 $r = f \cdot \theta > d/2$ 时,光斑能量总能够分布在至少 4 个微透镜元内,此时可以认为已经完全消除了信号饱和现象。在光场相机光路中加入动态调制元件后,光场相机的波前测量原理与波前复原算法没有发生改变,大部分波前传感特性也得到了保持,但是探测动态范围略有减小,光场相机能够测量到的最小波前畸变变为

$$\theta_{\min} = \frac{\Delta I}{I} \frac{d}{f_1}, \quad (17)$$

式中: ΔI 为 CCD 探测器能够测量的最小光强变化; I 为焦面光斑的总光强。与无调制的光场相机相比,动态调制的光场相机的测量精度有了明显提高。

结合(9)~(12)式的推导过程,CCD 探测器接收到的光强为

$$I_{m,n}(\eta, \xi) = \int_0^{2\pi} |\mathcal{F}^{-1}\{H_{m,n}(u, v) \cdot \mathcal{F}\{P(x, y) \cdot \exp[i\varphi_0(x, y, \alpha)]\}\}|^2 d\alpha^2. \quad (19)$$

3.2 动态调制型光场相机波前传感器的线性度

根据(18)~(19)式计算了光场相机在动态调制时的线性度曲线及其随调制半径的变化趋势,结果如图 6 所示。图 6(a)、(b)分别表示了调制半

径从 0 逐渐变化至 $1.5d$ 时,输入与输出波前斜率之间的关系。可以看到,光场相机的线性度随着调制半径的增大而逐渐提高,当动态调制半径大于等于 $d/2$ 时,线性度曲线中的阶梯状结构完全消失,与理论分析相符。在加入动态调制后,计算

得到的线性度分别为 93.38%、97.32%、95.88%、98.37%、96.29%、98.52%,相比于无调制时的光场相机有了较为明显的提高。上述结果说明,动态调制是提高光场相机测量精度和线性度的一种有效途径。

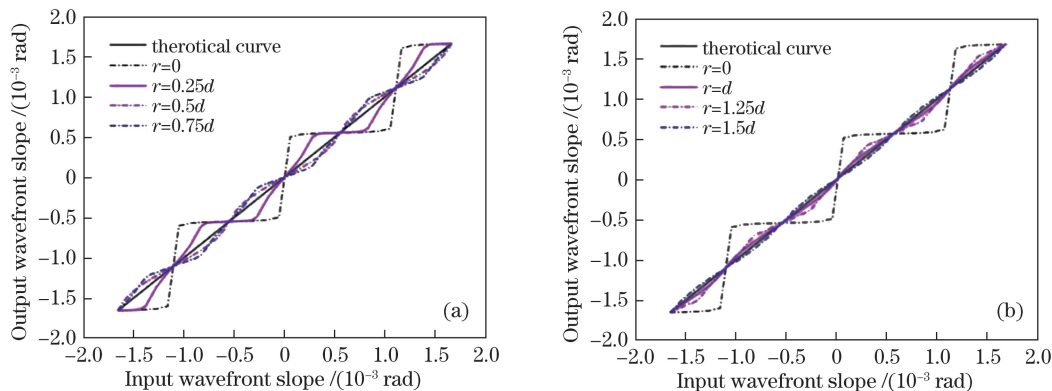


图 6 光场相机动态调制时的线性度。(a) 调制半径从 0 变化到 $0.75d$; (b) 调制半径从 d 变化到 $1.5d$

Fig. 6 Linearity of plenoptic cameras with dynamic modulation. (a) Modulation radius ranging from 0 to $0.75d$; (b) modulation radius ranging from d to $1.5d$

但是从模拟结果中也可以发现,光场相机的线性度并不是随着调制半径的增大而单调增加的,且输入与输出波前斜率之间仍然不是完全的线性关系,产生上述现象的原因主要来自于质心算法的误差。动态调制过程是将焦面光斑调制到半径 $r = f \cdot \theta$ 的圆周上,当调制半径较小时,使用质心算法计算的光斑质心位置与圆周的实际情况存在一定的理论偏差。上述原因导致调制之后的线性度曲线并不能达到完全的线性,且线性度曲线的具体线型与调制半径的选取有较大关系。

生成的湍流相位屏和变形镜致动器的排布方式分别如图 7 和图 8 所示。

4 闭环校正数值模拟结果

基于上述对光场相机的理论分析,针对光场相机在动态调制时的波前传感特性进行了数值模拟,并对比分析了无调制光场相机的模拟结果,数值模拟方法基于自建的光场相机数值模拟程序。仿真参数如下:光束口径为 6 mm,探测波长为 633 nm,主透镜 f 数为 30,微透镜阵列的大小为 10×10 ,微透镜元的口径为 $200 \mu\text{m}$,微透镜阵列 f 数为 15,CCD 像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$,动态调制半径为 d 。动态调制半径选择为 d 的原因是当调制半径大于 $0.5d$ 时,信号饱和现象能够完全消除,但过大的调制半径会将光斑能量分配到过多的微透镜元,反而降低了光场相机的弱光探测能力。数值模拟的主要内容为将光场相机作为波前传感器,与 89 单元变形镜配合,在闭环工作模式下校正模拟的大气湍流相位屏。模拟

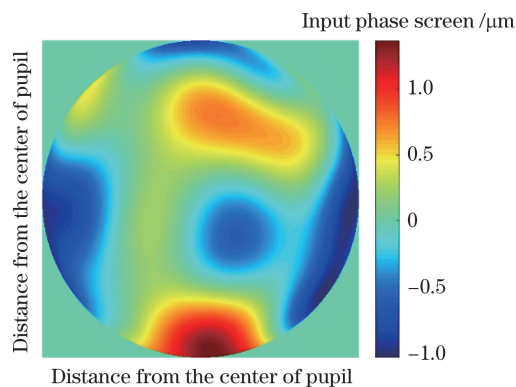


图 7 模拟生成的湍流相位屏

Fig. 7 Simulated turbulence phase screen

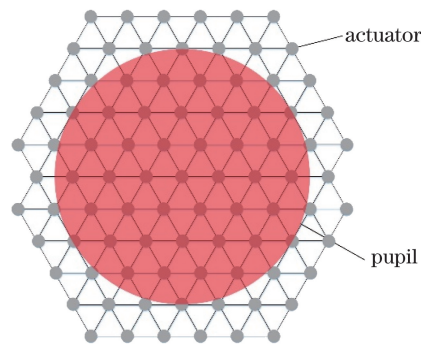


图 8 变形镜致动器的排布

Fig. 8 Distribution of actuator of deformable mirror

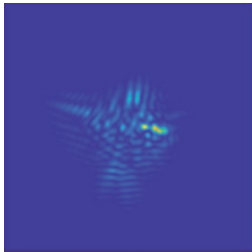
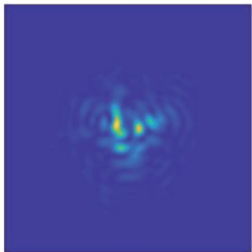
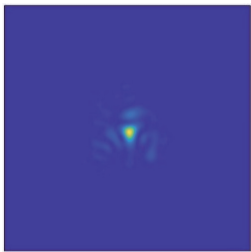
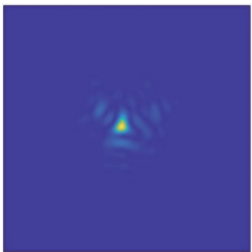
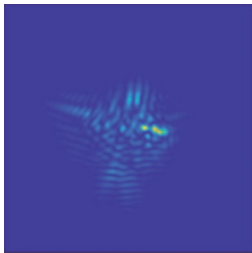
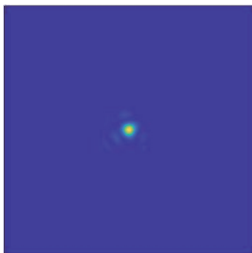
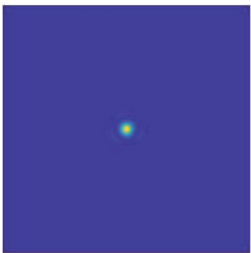
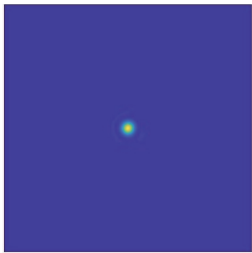
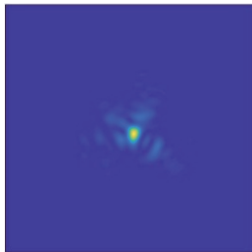
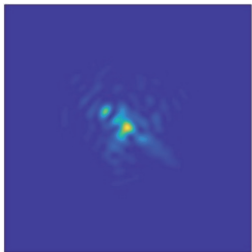
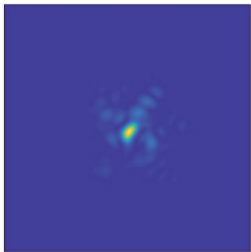
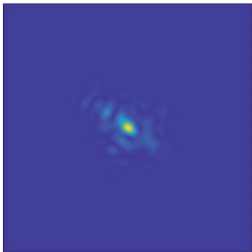
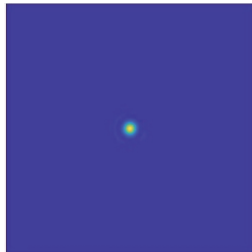
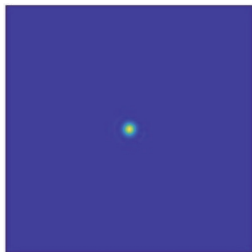
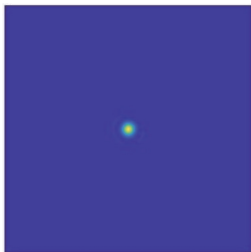
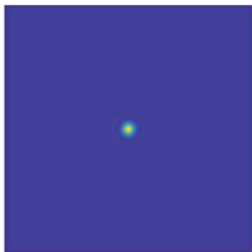
表 1 给出了光场相机与 89 单元变形镜配合在闭环工作模式下的校正结果随着迭代次数的变

化,图 9 和图 10 分别给出了校正后波前残差的均方根(RMS)以及远场光强的斯特列尔比随迭代次数的变化规律。可以看出,光场相机在无调制时与变形镜配合的校正效果较差,无法将远场光斑校正至近衍射极限范围内。产生上述现象的主要原因还是光场相机在无调制时的精度较低,利用直接斜率法构建重构矩阵时,矩阵元素的值与理论值存在较大误差,影响了闭环校正效果和系统的带宽。虽然这样做能够起到一定的校正效果,

但是远场光斑的能量仍然比较分散。相比之下,在动态调制时光场相机的闭环校正效果较好。这是由于动态调制将光能量分布于多个微透镜,光场相机的测量信号能够准确地反映波前的畸变程度,利用直接斜率法构建的重构矩阵较为准确,能够控制变形镜并对波前畸变进行拟合。可以看到,波前残差的 RMS 随着迭代的进行而逐渐减小,当迭代进行到第 3 次时,远场光斑已经趋于稳定。

表 1 远场光斑随校正次数的变化

Table 1 Variation of far field spot with correction times

Number of iterations	0	1	2	3
Without modulation				
With modulation				
Number of iterations	4	5	6	7
Without modulation				
With modulation				

为了消除数值模拟中可能存在的偶然性,对上述过程进行多次重复,图 11 和图 12 给出了 50 次模拟过程中达到稳定时校正结果的变化趋势。从多组

数值模拟结果中可以看到,光场相机在动态调制时的校正结果优于无调制时的校正结果,动态调制时远场光斑斯特列尔比的平均值为 0.8753,波前残差

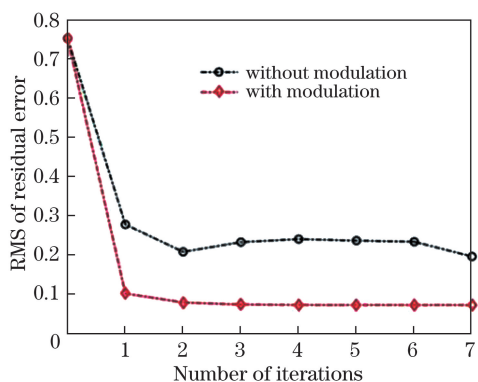


图 9 波前残差的 RMS 随校正次数的变化
Fig. 9 Variation of wavefront residual RMS with correction times

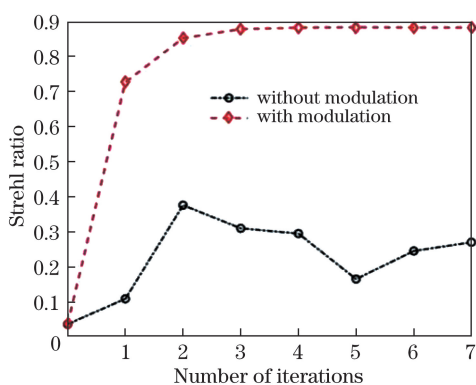


图 10 远场光斑的斯特列尔比随校正次数的变化
Fig. 10 Variation of strehl ratio of far filed spot with correction times

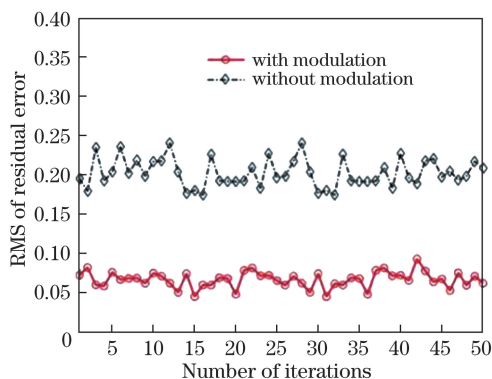


图 11 多次模拟结果的波前残差 RMS 值
Fig. 11 Wavefront residual RMS obtained by multiple simulations

RMS 的平均值为 0.0669λ 。相比之下,在无调制时远场光斑斯特列尔比的平均值只有 0.3252,波前残差的 RMS 的平均值为 0.2026λ 。

5 结 论

光场相机作为一种新型的波前传感器,拥有较大的视场和动态范围,在大行程像差测量和大视场

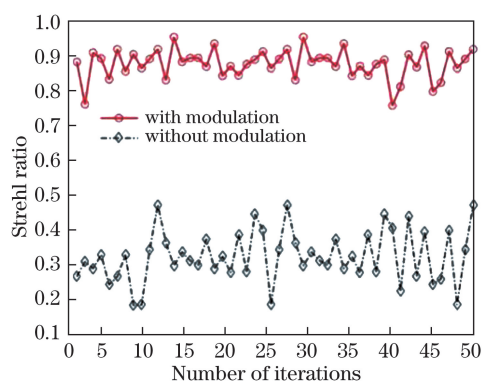


图 12 多次模拟结果的远场光斑斯特列尔比
Fig. 12 Strehl ratio of far filed spot obtained by multiple simulations

自适应光学技术中有较为广阔的应用前景。本研究针对光场相机波前传感特性进行了理论分析和数值模拟,利用光场相机对波前畸变进行测量,并与 89 单元变形镜相配合校正光束中的波前畸变,分别在无调制和动态调制时进行了数值模拟,并对结果进行了对比分析。结果表明,光场相机在动态调制时波前传感性能优于无调制情况下的播前传感性能。远场光强能够校正至近衍射极限,斯特列尔比大于 0.8,波前残差小于 0.1λ ,且闭环速度较快,相比于无调制时的校正结果得到了明显提高。

综合上述的结果与分析可知:动态调制是提高光场相机波前传感性能的有效途径,光场相机在动态调制时可以准确地测量波前畸变的相位分布,并与波前校正器配合对其进行校正。同时也注意到,动态调制时光场相机的线性度并不是完全线性的,误差主要来自质心算法的理论偏差,可以通过继续优化光场相机波前传感结构或调整斜率计算方法来进一步提高波前传感的线性度。

参 考 文 献

- [1] Ren N. Digital light field photography[D]. Standord, CA, USA: Stanford University, 2006, 115(3): 38-39.
- [2] Clare R M, Lane R G. Wave-front sensing from subdivision of the focal plane with a lenslet array[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(1): 117-125.
- [3] Rodríguez-Ramos J M, Castellá B F, Nava F P, *et al.* Wavefront and distance measurement using the CAFADIS camera[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7015: 70155Q.
- [4] Rodríguez-Ramos L, Montilla I, Fernández-Valdivia J, *et al.* Concepts, laboratory, and telescope test results of the plenoptic camera as a wavefront sensor[C]. Adaptive

- Optics Systems III, 2012: 844745.
- [4] Rodríguez-Ramos L F, Montilla I, Fernández-Valdivia J J, *et al.* Concepts, laboratory, and telescope test results of the plenoptic camera as a wavefront sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 844745.
- [5] Rodríguez-Ramos L F, Martín Y, Díaz J J, *et al.* The plenoptic camera as a wavefront sensor for the European Solar Telescope (EST)[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7439: 74390I.
- [6] Rodríguez-Ramos L F, Montilla I, Lüke J P, *et al.* Atmospheric wavefront phases using the plenoptic sensor (real data)[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8384: 83840D.
- [7] Eslami M, Wu C S, Rzasa J, *et al.* Using a plenoptic camera to measure distortions in wavefronts affected by atmospheric turbulence[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8517: 85170S.
- [8] Wu C S, Davis C C. Modified plenoptic camera for phase and amplitude wavefront sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8874: 88740I.
- [9] Wu C S, Ko J, Davis C C. Determining the phase and amplitude distortion of a wavefront using a plenoptic sensor[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(5): 964-978.
- [10] Wu C S, Ko J, Nelson W, *et al.* Phase and amplitude wave front sensing and reconstruction with a modified plenoptic camera[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9224: 92240G.
- [11] Xu J P, Liang Y H, Jiang P Z. Performance analysis of light field wave-front sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s201001.
许洁平, 梁永辉, 蒋鹏志. 光场相机波前传感器性能分析[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s201001.
- [12] Jiang P Z, Xu J P, Liang Y H, *et al.* Comparison of the Shack-Hartmann and plenoptic sensor in closed-loop adaptive optics system[J]. Optical Engineering, 2016, 55(3): 033105.