

光学微透镜阵列成像质量预测和测量

卫劲锋¹, 王海龙¹, 杜雪², 王素娟^{1*}¹广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广东 广州 510006;²香港理工大学超精密加工技术国家重点实验室, 香港 999077

摘要 为了研究微透镜阵列成像质量的影响因素, 针对慢刀伺服加工和紫外(UV)光固化工艺制备的微透镜阵列, 引入微透镜阵列镜片的误差, 建立基于Zemax光学软件的微透镜阵列成像仿真模型, 分析透镜单元的高度、曲率半径、入瞳直径等误差对微透镜阵列成像质量的影响。搭建光学测试平台对评价微透镜阵列成像性能的光学参数进行检测, 包括各透镜单元的焦斑大小、位置误差及其焦距值, 并利用点扩散函数(PSF)曲线的半峰全宽值对光场成像结果进行成像质量评价, 测量得到微透镜阵列的焦距标准误差为0.12 mm。将测量结果与仿真结果相比, 可得PSF曲线的半峰全宽误差在12%左右, 证明了仿真模型的准确性。利用仿真和实验的方法建立了微透镜阵列镜片误差与其光学成像质量之间的关系, 这可为基于功能实现的微透镜阵列的超精密加工工艺提供理论基础和指导。

关键词 成像系统; 微透镜阵列; Zemax; 成像质量; 光学性能

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221605

1 引言

微透镜阵列(MLA)是由多个孔径小于几毫米的透镜单元按一定规则排列在一块基片上组成的, 广泛应用于各种光学系统^[1-3]。例如: Shack-Hartmann光学波前传感器利用微透镜阵列将入射光分成多束并聚焦在像面上以确定光学像差^[4]; 使用微透镜阵列可实现高分辨率激光束控制, 进而改进机电系统(MEMS)反射镜激光扫描技术^[5]; 将三维微透镜阵列、自由曲面透镜阵列和场透镜阵列组成三层三维(3D)人工复眼, 形成一个功能性的3D光学图像传感器, 该传感器适合各种成像应用^[6]; 在用于遥感和植入式生物传感应用的光纤探头中, 可使用不对称微透镜阵列作为光扩散器^[7]; 利用微透镜投影光刻技术和灰度掩模制作可控轮廓的微透镜阵列^[8]。

作为一种高集成度的相位调制光学元件, 微透镜阵列常被用于光场成像系统。基于微透镜阵列的光场成像技术实际上是一种计算成像, 它通过微透镜阵列的多元成像记录光场信息, 可以实现数字对焦、深度测量等操作。微透镜阵列采集得到光场信息后, 可进一步利用算法将光场还原为图像, 主要的处理方法大致包括数字重聚焦、3D成像、合成孔径、光场渲染、立体显示等5种^[9]。

许多学者对基于微透镜阵列的光场成像技术进行

了仿真研究。许春涛^[10]利用3ds Max软件对基于微透镜阵列的光场成像进行仿真, 实现了不同视角下图像的重构; 李赛^[11]建立了光场相机中微透镜阵列的安装误差评价模型, 并用该模型对各种安装误差存在条件下所生成的图像进行质量评价, 该模型考虑了微透镜阵列与探测器间的耦合距离误差、平移误差、旋转误差和倾斜误差; 史柴源^[12]对微透镜阵列直接成像系统进行了仿真模拟并对成像结果进行质量评价。

根据是否需要制作具有凹面三维结构的掩模或者模具, 可以将制备微透镜阵列的方法分为直接法和间接法^[13-14]。然而, 无论是采用直接法还是间接法制备得到微透镜阵列, 其加工误差最终都会映射到微透镜阵列上, 加工误差主要包括透镜单元的高度误差、单元球半径误差和入瞳直径误差。加工误差的存在将对透镜的光学性能产生影响, 而目前已发表的关于微透镜阵列成像仿真的研究都没有考虑到微透镜阵列镜片的加工误差对成像性能的影响。

在检测方面, Aristizabal等^[15]对菲涅耳微透镜阵列的光斑阵列进行评价, 评估焦平面上产生的每个光斑的强度, 并测量了其半峰全宽(FWHM)作为成像质量的评价指标; Huang等^[16]利用透镜的FWHM值测量液晶微透镜阵列的焦距; 朱咸昌^[17]对4类微透镜焦距测量方法进行精度分析和对比, 确定了它们的检测精度和检测适用范围, 并进行焦距一致性测量; Li等^[18]测

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-05; 录用日期: 2022-09-19; 网络首发日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51975128)

通信作者: *grace.wangsj@gdut.edu.cn

试了微透镜阵列的光学成像性能,图像传感器中均匀的亮圈和光斑强度表明制备的玻璃微透镜阵列具有良好的均匀性;Li等^[19]使用平行光束检测聚合物非球面微透镜阵列的聚焦能力,根据光强和成像情况来评估微透镜阵列的均匀性。

由于在光场成像中,微透镜阵列成像是间接的计算成像,最终成像结果是基于图像传感器接收的图像信息进行后期图像计算处理的结果^[20]。然而,现有针对微透镜阵列的光学性能测量的研究主要是对微透镜阵列成像时图像传感器上直接接收到的图像信息进行分析,并没有对采用微透镜阵列成像的后期图像计算得到的最终成像结果进行评价。

本文针对慢刀伺服加工的铝合金模具和紫外(UV)光固化工艺制备的微透镜阵列镜片,在Zemax光学软件中引入镜片加工误差,建立光学微透镜阵列的模型,并对其计算成像仿真。同时,建立光学测试系统对微透镜阵列镜片的成像性能进行检测,并对所检测的微透镜阵列进行直接成像并进行后期图像计算处理,获取最终计算成像结果,进行成像质量评价,验证仿真模型的准确性。

2 微透镜阵列成像性能仿真模型

根据光场信息采集和存储逻辑的不同,微透镜阵列光场成像时采集光场数据的实现方式有两种^[3,10]:第一种方式为利用微透镜阵列对主镜头孔径进行成像,即在一般成像系统的镜头和探测器之间加入微透镜阵列,当镜头对目标物进行成像后,由微透镜阵列对镜头所成图像进行二次成像,最后由探测器记录下来,这种方式一般用于全光相机的制造;第二种方式为利用微透镜阵列直接对主镜头进行分割,即微透镜阵列取代了一般成像系统中的镜头完成对目标物的直接成像,成像信息同样由探测器记录下来,这种方式也被称为集成成像。这种采用微透镜阵列直接成像的方式忽略了镜头(主透镜)在光场成像中的影响,本文将研究集成成像方式下的微透镜阵列成像性能影响因素,并

对其进行仿真和测量。

2.1 光学微透镜阵列计算成像算法

采用微透镜阵列进行直接成像时,后期图像的计算处理方法是基于像素重排法,具体步骤包括以下4步^[12,21]:

1)微透镜阵列原始光场图像的获取,即根据微透镜阵列的分布模式,将各透镜单元成像结果进行组合。如果微透镜阵列分布为环形分布,进行步骤2);如果为矩形分布,进行步骤3)。

2)微透镜阵列分布模式转化,即将环形分布的微透镜阵列转化为矩形分布,如图1所示,右图中“Int”透镜单元的成像是由左图中原有的相邻透镜单元的图像插值结果^[21],其图像像素值也是由相邻两透镜单元的图像像素值取平均值确定。

3)微透镜阵列子孔径图像的获取,即从各个透镜单元的成像区域中取同一位置的像素值组合形成各个子孔径图像。对于 $M \times N$ 个透镜单元呈矩形分布的微透镜阵列,假设各透镜单元成像的像素数量为 $m \times n$,则可以获得 $m \times n$ 个矩形分布的子孔径图像,且各子孔径图像的像素数量是 $M \times N$ 。以 5×5 矩形分布微透镜阵列的原始光场图像的像素重排为例,如图2所示,L1~L25为所有透镜单元的成像区域,以 $A_{(p,q)}^{(L)}$ ($L=1,2,3,\dots,25$)的形式表示各成像区域中任一像素点的位置,下标 (p,q) 表示该像素点位于透镜单元成像区域的第 p 行第 q 列。每个透镜单元的成像区域范围一样,都是 128×128 ,例如 $A_{(1,2)}^{(25)}$ 表示像素点位于L25透镜单元成像区域,并位于成像区域中的第1行第2列。提取每个透镜单元成像区域(L1~L25)中同一位置[同一 (p,q) 值]像素点,之后将所有同一位置的像素点按照L1~L25的顺序排列,组成一幅子孔径图像,记为 $F_{(p,q)}$ 。

4)最终成像结果的获取。所有子孔径图像 $F_{(p,q)}$ 按照 p 和 q 值排序(图2的 $F_{(1,1)}$ 至 $F_{(128,128)}$),形成最终成像结果。

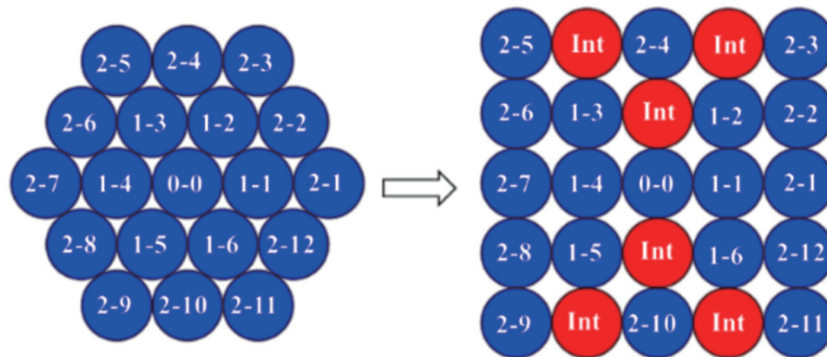


图1 微透镜阵列的分布模式转化算法

Fig. 1 Distribution mode transformation algorithm for microlens array

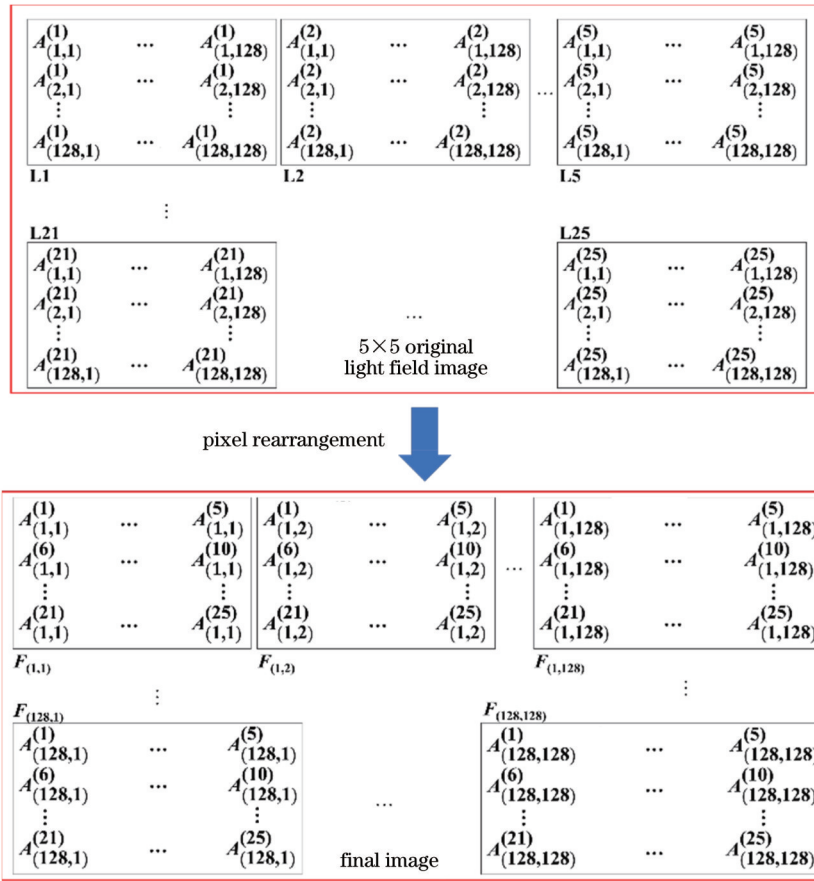


图 2 基于像素重排法的微透镜阵列直接成像

Fig. 2 Direct imaging of microlens array based on pixel rearrangement method

2.2 理想微透镜阵列成像仿真模型

Zemax 软件是美国 Zemax Development Corporation 的光学设计软件,可用于计算当前光学系统的点扩散函数 (PSF) 曲线图,作为成像质量评价的依据。根据 PSF 曲线图的 FWHM 值对成像质量进行评价,FWHM 越小,光斑弥散程度越小,成像质量越好^[15,22]。因此,本文将利用 Zemax 软件的分析功能,对环形分布的微透镜阵列(表 1 和图 3)的成像性能进行仿真和评价,其中,每个透镜单元的面型都是标准球面, D_u 为透镜单元的入瞳直径。

首先设置测试光路:一束单一波长 ($0.656 \mu\text{m}$) 的平行光经微透镜阵列后到达图像传感器。此时,每个

表 1 微透镜阵列的基本几何参数

Table 1 Basic geometric parameters of microlens array

Parameter	Value
Pitch size L / mm	0.78
Number of array layers	3
Curvature radius of lens unit R_q / mm	15
Lens depth h / μm	5
Height of flat substrate T / mm	0.5

透镜单元各自成像,其所成像为一个弥散光斑,由图像传感器接收,将图像传感器设置在预定焦距位置,即理想透镜单元的有效焦距 (30.66 mm) 处。

接着,对各透镜单元所成像进行处理,根据 2.1 节

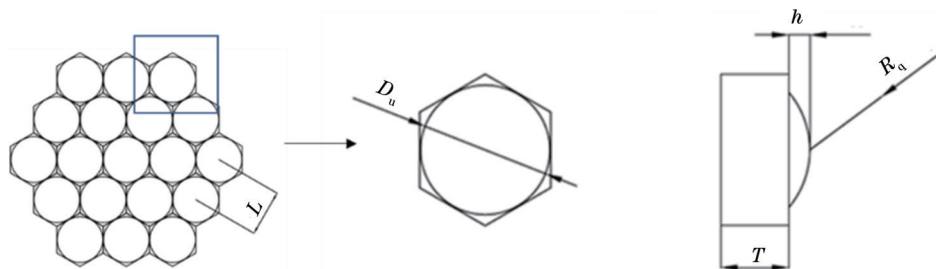


图 3 环形微透镜阵列的基本几何参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of basic geometric parameters of annular microlens array

算法得到原始光场图像和最终图像如图 4 所示。此时的最终图像仍是一个弥散光斑,因此,可通过光斑的光

强分布生成该最终图像的 PSF 曲线图,如图 4(c)所示,其 FWHM 值为 $51.72 \mu\text{m}$ 。

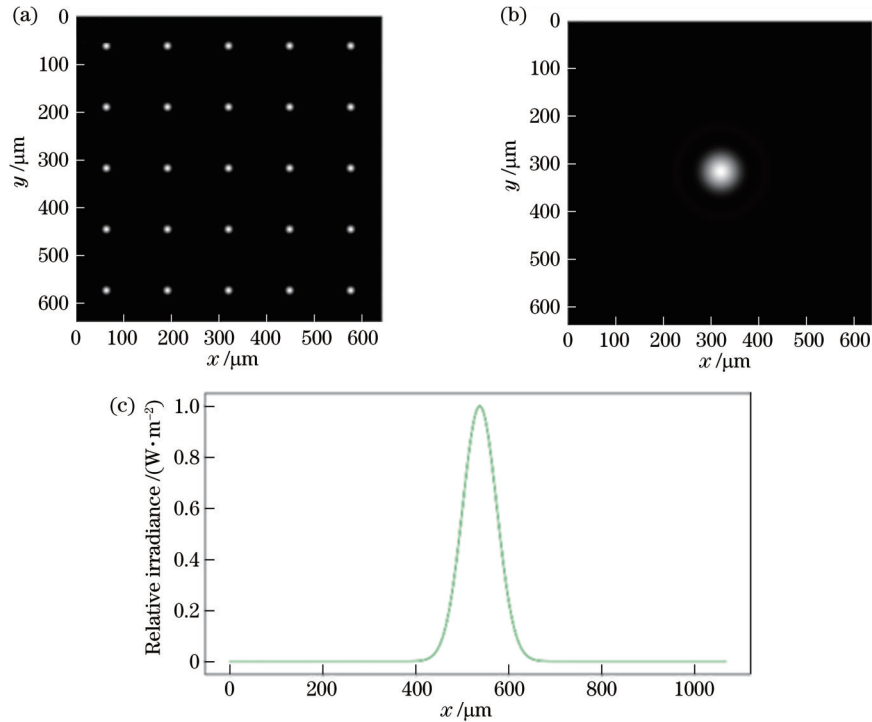


图 4 理想微透镜阵列的成像仿真结果。(a)原始光场图像;(b)最终图像;(c)弧矢 PSF 曲线

Fig. 4 Simulation results of ideal microlens array. (a) Original light field image; (b) final image; (c) sagittal PSF curve

3 微透镜阵列镜片制备实验

3.1 实验设计

本文通过慢刀伺服单点金刚石车削的方法,使用金刚石刀具在铝合金 6061 平面上加工环形分布的

(凹)微透镜阵列[图 5(a)](基本几何参数见表 1),再利用加工的合金模具和 UV 光固化转印工艺制备聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)(凸)微透镜阵列光学镜片[图 5(b)]。微透镜阵列模具的基本几何参数、慢刀伺服加工参数和刀具几何参数如表 2 所示。

表 2 微透镜阵列慢伺服车削参数和金刚石刀具参数

Table 2 Slow servo turning parameters and diamond tool parameters of microlens array

Processing parameter	Value
Spindle speed $n / (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	30
Feed rate $F / (\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	0.4
Number of discrete points per revolution of equal angle n_θ	500
Equal arc length trajectory discrete arc length $\Delta l / \mu\text{m}$	15
Tool corner nose radius R_T / mm	0.53
Tool relief angle $\gamma / (^\circ)$	10
Vibration amplitude A_x / nm	8
Vibration amplitude A_y / nm	6
Vibration amplitude A_z / nm	5
Vibration frequency f_x / Hz	61.2
Vibration frequency f_y / Hz	35
Vibration frequency f_z / Hz	90.2

微透镜阵列模具的加工误差以及光固化转印过程中的误差等都会引起透镜单元实际几何参数的变化,造成光学元件的光学性能误差。因此,本文利用光学轮廓仪(GT-X, Bruker)测量微透镜阵列镜片上不同

位置的透镜单元矢高值,如图 6 所示(透镜单元的编号规则参考图 1)。

3.2 微透镜阵列镜片误差分析

通过测量获得的透镜单元的实际曲率半径、入瞳

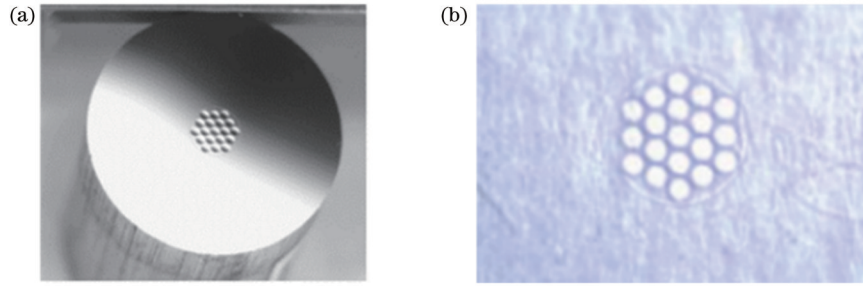


图 5 微透镜阵列。(a)慢刀伺服车削的微透镜阵列铝 6061 模具；(b) UV 光固化制作的微透镜阵列镜片

Fig. 5 Microlens array. (a) Aluminum 6061 alloy mold prepared by slow tool servo turning; (b) microlens array prepared by UV curing fabrication

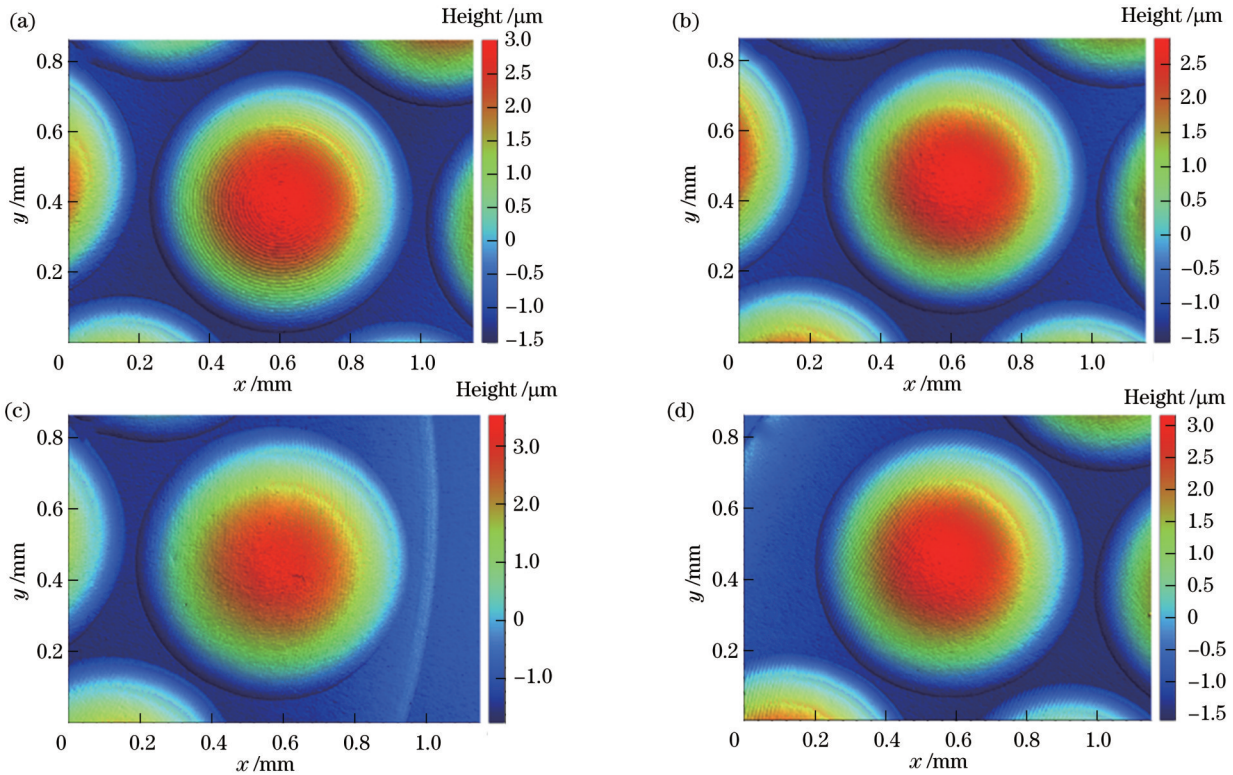


图 6 PMMA 镜片上不同位置透镜单元的测量结果。(a) 0-0 透镜单元；(b) 1-1 透镜单元；(c) 2-1 透镜单元；(d) 2-6 透镜单元

Fig. 6 Measurement results of lens units at different positions on PMMA lens. (a) Lens unit 0-0; (b) lens unit 1-1; (c) lens unit 2-1; (d) lens unit 2-6

直径和透镜高度如表 3 所示(透镜单元的编号规则参考图 1)。本文中理想透镜单元的曲率半径是 15 mm, 入瞳直径为 0.77 mm, 透镜高度为 5 μm(表 1), 计算所得透镜单元的理想有效焦距为 30.66 mm。而微透镜阵列用于光场成像时, 图像传感器与微透镜阵列的位置一般是固定的, 即图像传感器通常放在预定焦距位置(理想透镜单元的有效焦距位置)。因此, 各透镜单元的加工误差导致其在该位置处无法正确对焦, 将造成微透镜阵列的成像质量下降^[10,23]。

从表 3 的测量结果来看, 所有透镜单元的加工误差都不同, 慢刀伺服车削加工的特点, 以工件中心为起点, 其中以透镜单元 0-0 为第一环, 透镜单元 1-1 到 1-6 为第二环, 透镜单元 2-1 到 2-12 为第三环, 由内向外,

每环曲率半径和入瞳直径的平均误差逐渐变大, 而透镜高度的平均误差有减小的趋势。

另一方面, 光学元件的表面不规则度误差是指加工表面不是理想的光滑表面, 而是出现一定程度的不规则度, 包括矢高变化的幅值和频率, 这均会对成像性能产生不同的影响^[24-25]。光学表面的多项式可表示为

$$z = z_{\text{base}} + z_{\text{div}} = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=0}^n A_i Z_i(x, y) - \frac{A}{2} [\cos(2\pi\omega_0 r + \mu_0) - \cos \mu_0], \quad (1)$$

式中: z 为表面矢高, 包括基本表面部分高度 z_{base} 和不规则度误差部分高度 z_{div} ; c 为透镜表面曲率; r 为镜头

表 3 测量所得的镜片上各透镜单元曲率半径、入瞳直径和透镜高度
Table 3 Measured curvature radius, pupil aperture, and lens height of each lens unit

Lens unit label	Curvature radius /mm	Diameter of pupil aperture /mm	Lens height / μm
0-0	15.792	0.74	4.45
1-1	16.253	0.73	4.16
1-2	15.933	0.74	4.45
1-3	15.804	0.73	4.29
1-4	15.736	0.73	4.26
1-5	15.696	0.74	4.48
1-6	15.746	0.74	4.39
2-1	16.664	0.75	4.38
2-2	15.939	0.75	4.53
2-3	16.207	0.75	4.53
2-4	15.819	0.75	4.52
2-5	15.897	0.76	4.80
2-6	15.901	0.75	4.53
2-7	15.953	0.76	4.66
2-8	15.747	0.75	4.50
2-9	15.927	0.75	4.62
2-10	15.938	0.75	4.61
2-11	15.875	0.75	4.75
2-12	15.825	0.75	4.52

单位下的径向坐标; k 为圆锥系数; Z_i 为泽尼克多项式中的各项; A_i 为各项待定系数; A 表示矢高变化的幅值,一般用不规则幅值指标来表示,例如常用的均方根(RMS)值; ω_0 表示矢高扰动的频率; μ_0 表示正弦矢高的初始相位^[26-29]。以透镜单元 0-0 为例,使用光学轮廓仪提取得到其表面离散点数据后,对离散点数据根据式(1)进行拟合。光学表面多项式中不规则度误差部分 z_{div} 的各系数经拟合得到的结果如表 4 所示。

表 4 透镜单元 0-0 面型系数拟合结果
Table 4 Fitted profile coefficient of lens unit 0-0

Fitting coefficient	Value
A_0	-2.27×10^6
A_1	1.07×10^4
A_2	7265
A_3	-7.984
A	3.7449×10^{-5}
ω_0	-121.4
μ_0	0

将表 4 拟合的系数值导入 Zemax 软件便能进行透镜单元的建模和分析,其他透镜单元均能按照此方法进行面型拟合并进行建模。然后将各透镜单元的实际几何参数导入 Zemax 中进行建模并进行计算成像。

3.3 基于镜片误差的微透镜阵列成像仿真模型

将测量所获得的透镜单元实际几何参数(表 3)及面型数据(表 4)引入理想微透镜阵列仿真模型中,测

试光路不变,计算获得的原始光场图像、最终图像以及弧矢 PSF 曲线如图 7 所示,其中 PSF 曲线的 FWHM 值为 $75.35 \mu\text{m}$ 。

相对于理想微透镜阵列的原始光场图像[图 4(a)],引入误差后仿真所获得的光斑阵列并不是均匀分布,这是由慢刀伺服单点金刚石车削所获得的微透镜单元误差不同^[30]、在预定焦距位置处的光斑弥散程度不一造成的。

经计算可得,引入镜片误差后的 FWHM 值[图 7(c)]大于理想状态[图 4(c)],表明光斑弥散程度变大,成像质量下降了。这是由于:引入误差后,每个透镜单元在预定焦距位置的成像光斑弥散情况发生了不同程度的改变,具体表现为成像区域的像素值不同。根据像素重排法的原理(图 2),在最终图像中,由于每一幅子孔径图像里的像素值都来源于原始光场图像中各透镜单元成像区域的像素值,所以当各透镜单元成像区域的像素值相对于理想情况发生改变时,每一幅子孔径图像的像素值也就跟着发生改变,从而影响到最终图像的计算结果。因此,在透镜单元误差的影响下,每个透镜单元的成像结果中光斑弥散程度变大,经像素重排法得到的最终图像的光斑弥散程度相对于理想情况下也变大了,即成像质量下降。

4 微透镜阵列光学性能检测系统开发

为了验证微透镜阵列仿真模型的准确性,并形成光学微透镜阵列元件的性能检测系统,本文开发了光

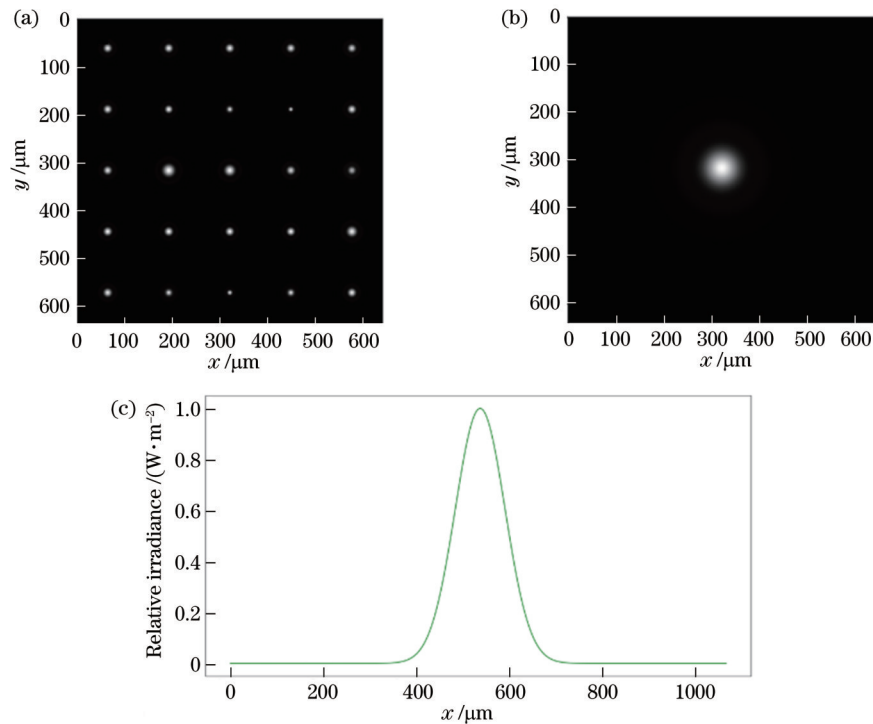


图 7 引入误差的微透镜阵列成像仿真结果。(a)原始光场图像;(b)最终图像;(c)弧矢 PSF 曲线

Fig. 7 Simulation results of microlens array imaging with error. (a) Original light field image; (b) final image; (c) sagittal PSF curve

学性能检测平台,如图 8 所示。测量平台主要由平行激光管、遮光孔和 CCD 相机组成。平行激光管提供 650 nm 的平行光,遮光孔用于挡住多余的光线,防止过多的光线进入相机,CCD 相机使用的是 SUNATE 的 CF1000C 彩色相机,其有效像素为 $3664 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $1.67 \mu\text{m}$ 。平行激光管射出的 650 nm 平行光经过遮光孔后通过微透镜阵列,CCD 相机固定在预定位置(30.66 mm),记录光线经过微透镜阵列后形成的光强信息,测量装置和微透镜阵列固定在各自的滑块上,滑块安装在底部的导轨上,其中固定有微透镜阵列的滑块含微调装置,可以对滑块位置进行调节,进而控制微透镜阵列在整个测量平台的位置。

首先测量微透镜阵列镜片中各透镜单元的焦距值,并将测量结果与仿真结果(表 5)进行对比,用于验证引入误差后的微透镜阵列仿真模型;之后建立微透镜阵列光场成像系统,测量焦斑位置及其大小并对其阵列的最终成像进行成像质量评价。

4.1 焦距测量

无穷远处的光线经透镜单元后,将形成一个弥散光斑,且焦距位置处的光斑弥散程度最小,表现为 PSF 曲线的 FWHM 值最小,因此可以利用这点来测量透镜单元的焦距。如图 8 所示,逐渐调整微透镜阵列和 CCD 相机之间的距离,并利用图像处理技术分析每个位置图像的 FWHM 值,将其最小值所在的距离视为透镜单元的焦距。测量结果如表 5 所示,标准误差为 0.12 mm 左右。测量结果与引入误差的透镜单元仿真计算结果的对比说明测量平台有一定的可靠性。

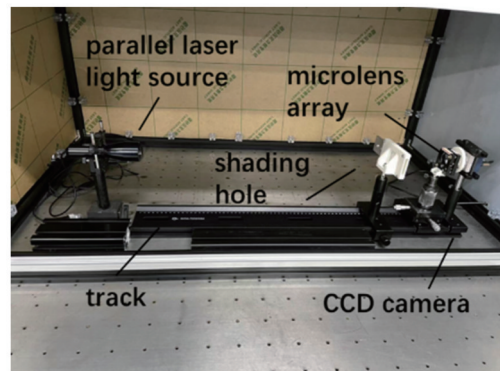


图 8 测量平台

Fig. 8 Measurement platform

4.2 焦斑测量

焦斑的测量包括焦斑大小和位置的测量,平行光线射向微透镜阵列形成光斑阵列,如图 9 所示。慢伺服车削加工微透镜阵列模具时,以透镜单元 0-0 的圆心为工件原点计算其他透镜单元的位置,因此以透镜单元 0-0 的焦斑位置为基准测量各个透镜单元焦斑的相对位置,位置的偏差包括径向距离偏差和角度偏差。径向距离偏差小于理想值时为负数,否则为正数;角度偏差位于逆时针方向时为负,否则为正。焦斑位置和大小测量结果如表 6 所示。

4.3 光场成像质量评价

在测量平台中,通过 CCD 相机获得微透镜阵列的原始光场图像[图 10(a)],图像呈环形分布;随后使用分布模式转化算法得到矩形分布微透镜阵列的原始光

表 5 焦距测量结果

Table 5 Focal length measurement results

Lens unit label	Measured value / mm	Simulation value / mm	Error / μm
0-0	31.2	32.281	-1.081
1-1	31.1	33.223	-2.123
1-2	31.4	32.569	-1.169
1-3	31.3	32.305	-1.005
1-4	33.1	32.166	0.934
1-5	31.0	32.084	-1.084
1-6	31.0	32.187	-1.187
2-1	31.2	34.063	-2.863
2-2	31.0	32.581	-1.581
2-3	31.4	33.129	-1.729
2-4	31.1	32.336	-1.236
2-5	31.2	32.495	-1.295
2-6	31.7	32.504	-0.804
2-7	32.2	32.61	-0.410
2-8	31.2	32.189	-0.989
2-9	31.0	32.557	-1.557
2-10	31.8	32.579	-0.779
2-11	31.0	32.450	-1.450
2-12	31.2	32.348	-1.148

表 6 焦斑测量结果

Table 6 Focal spot measurement results

Lens unit label	Focal spot area / μm^2	Radial deviation / μm	Angular deviation / ($^\circ$)
1-1	1139	0	0
1-2	1121	-6.2	0.06
1-3	1157	-9.0	-0.10
1-4	1179	-6.8	-0.12
1-5	1149	-9.0	-0.16
1-6	1168	-8.4	-0.12
2-1	1205	-19.0	0
2-2	1141	-18.3	0.01
2-3	1166	-25.4	-0.01
2-4	1133	-19.0	-0.02
2-5	1208	-21.9	0.04
2-6	1162	-14.5	-0.01
2-7	1214	-20.7	-0.06
2-8	1162	-16.8	-0.15
2-9	1205	-22.5	-0.01
2-10	1142	-20.6	0.06
2-11	1184	-21.3	0.09
2-12	1143	-14.5	-0.01

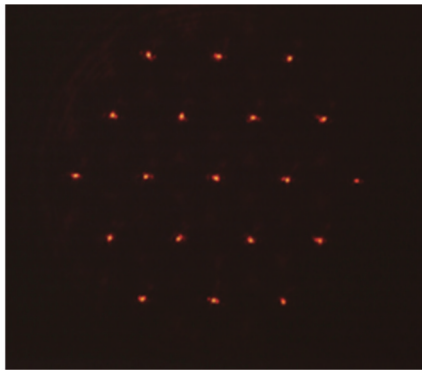


图 9 焦斑阵列图

Fig. 9 Focal spot array

场图像[图 10(b)],显然,由于透镜单元误差的存在,光斑阵列并不均匀;再通过像素重排法进行计算,获得最终图像[图 10(c)],如 3.3 节所描述的,镜片的误差影响了最终图像的计算结果。

随后使用 PSF 对最终成像进行质量评价,并与仿真结果[图 7(c)]以及理想微透镜阵列的成像结果进行比较,如图 10(d)所示。当不考虑加工误差的理想 PSF 曲线[图 10(d)中点划线]FWHM 值为 $51.72 \mu\text{m}$,引入误差的仿真 PSF 曲线(实线)FWHM 值为

$75.35 \mu\text{m}$,而实验测量得到的 PSF 曲线(虚线)FWHM 值为 $84.77 \mu\text{m}$ 。因此,相对于理想微透镜阵列成像仿真模型,引入误差的微透镜阵列仿真模型更准确,仿真模型的结果与测量结果的误差为 12%,其原因主要在于仿真模型无法完全考虑到实际的成像情况,其干扰因素比实际情况要少,因此成像结果优于实际结果,FWHM 值更小。

5 结 论

提出了针对环形微透镜阵列的基于 Zemax 软件的仿真方法,对透镜单元相关误差(曲率半径误差、入瞳直径误差、透镜高度误差和面型不规则误差)进行了测量,根据测量结果建立了引入误差的微透镜阵列成像仿真模型。相比于以前不考虑透镜加工误差的理想仿真模型,所建立的仿真模型更为准确。此外,所搭建的光学性能检测系统可作为微透镜阵列成像结果的评价测量工具。检测平台能对微透镜阵列的成像质量进行检测,并对其直接成像的最终成像结果进行评价。测量出了各透镜单元的焦斑大小和位置误差,焦距测量的标准差为 0.12 mm 左右。利用 PSF 曲线对最终成像结果进行质量评价,与仿真结果相比,FWHM 误差在 12% 左右。综上,通过仿真和测量建立了光学微透镜阵列镜片误差与光学成像质量之间的关系,这可

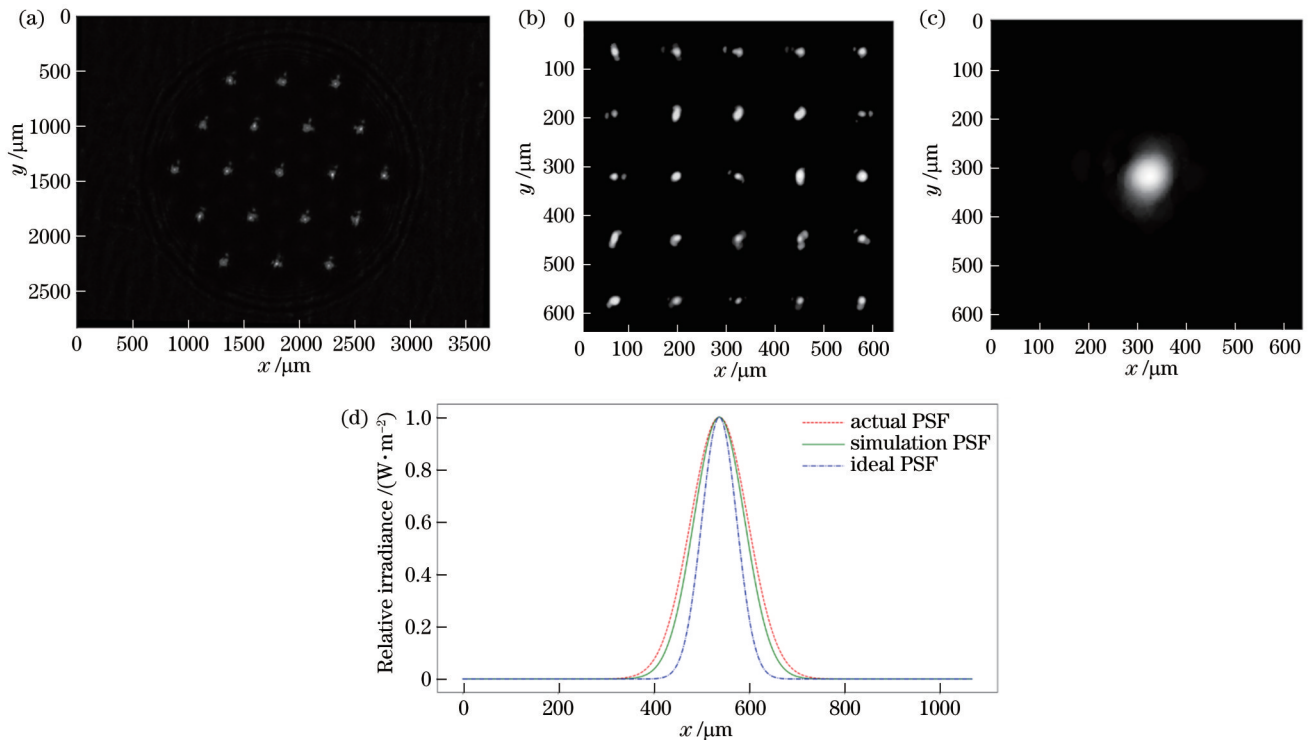


图 10 微透镜阵列光场成像实验结果。(a)原始光场图像(环形分布);(b)原始光场图像(矩形分布);(c)最终图像;(d)弧矢 PSF 曲线

Fig. 10 Experimental results of microlens array light field imaging. (a) Original light field image (annular distribution); (b) original light field image (rectangular distribution); (c) final image; (d) sagittal PSF curves

为微透镜阵列的加工提供指导和建议。

参 考 文 献

- [1] 苏亚辉, 秦天天, 许兵, 等. 飞秒激光双光子聚合方法加工图案化微透镜及其成像测试[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2629-2635.
Su Y H, Qin T T, Xu B, et al. Patterned microlens processed using two-photon polymerization of femtosecond laser and its imaging test[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2629-2635.
- [2] 张家铭, 陈宇, 覃海棋, 等. 大视场并列型仿生复眼光学系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1012-1020.
Zhang J M, Chen Y, Qin H Q, et al. Optical system of bionic compound eye with large field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1012-1020.
- [3] 殷永凯, 于锴, 于春展, 等. 几何光场三维成像综述[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1209001.
Yin Y K, Yu K, Yu C Z, et al. 3D imaging using geometric light field: a review[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1209001.
- [4] Lin V, Wei H C, Hsieh H T, et al. An optical wavefront sensor based on a double layer microlens array[J]. Sensors, 2011, 11(11): 10293-10307.
- [5] Gokce S K, Holmstrom S, Hibert C, et al. Two-dimensional MEMS stage integrated with microlens arrays for laser beam steering[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(1): 15-17.
- [6] Zhang H, Li L, McCray D L, et al. Development of a low cost high precision three-layer 3D artificial compound eye[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22232-22245.
- [7] Elsherif M, Moreddu R, Hassan M U, et al. Real-time optical fiber sensors based on light diffusing microlens arrays[J]. Lab on a Chip, 2019, 19(12): 2060-2070.
- [8] Wu M H, Park C, Whitesides G. Fabrication of arrays of microlenses with controlled profiles using gray-scale microlens projection photolithography[J]. Langmuir, 2002, 18(24): 9312-9318.
- [9] 张韶辉, 胡摇, 曹睿, 等. 光场成像原理及应用技术[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 178-186.
Zhang S H, Hu Y, Cao R, et al. Principle and applications of light field imaging[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 178-186.
- [10] 许春涛. 基于微透镜阵列的光场成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
Xu C T. Research on light field imaging technology based on microlens array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [11] 李赛. 光场相机内微透镜阵列的误差分析及评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Li S. Microlens error analysis and evaluation of light field camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 史柴源. 基于微透镜阵列器件的成像技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
Shi C Y. The study of imaging technology based on microlens array[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
- [13] 乌李瑛, 瞿敏妮, 付学成, 等. 微透镜阵列的制作及其在光场成像中应用的研究进展[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 611-617, 631.
Wu L Y, Qu M N, Fu X C, et al. Fabrication of microlens array and its application progresses in light field imaging[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 611-617, 631.
- [14] 吴峰. 微透镜阵列的设计、制备及其应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
Wu F. Design, fabrication and application of microlens group arrays[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [15] Aristizabal S L, Cirino G A, Montagnoli A N, et al. Microlens array fabricated by a low-cost grayscale lithography maskless

- system[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(12): 125101.
- [16] Huang C T, Hsieh P Y, Chen Z Y, et al. High performance liquid crystal micro-lens array applied to light field display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 364-367.
- [17] 朱咸昌. 微透镜阵列焦距及其一致性检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2013.
Zhu X C. Research on focal length and consistency measurement of microlens-array[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [18] Li K S, Huang X F, Chen Q, et al. Flexible fabrication of optical glass micro-lens array by using contactless hot embossing process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 469-476.
- [19] Li Y L, Li K S, Gong F. Fabrication and optical characterization of polymeric aspherical microlens array using hot embossing technology[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 882.
- [20] 周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
Zhou Z L. Research on light field imaging technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [21] 石肖, 艾灵玉, 于森, 等. 基于光场相机的全视差三维显示[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0711005.
Shi X, Ai L Y, Yu M, et al. Full-parallax three dimensional display based on light field camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0711005.
- [22] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 3版. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
Li X T, Cen Z F. *Geometrical optics, aberrations and optical design*[M]. 3rd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.
- [23] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[D]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [24] 曾雪锋. 光学表面频段误差对成像质量的影响研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
Zeng X F. Impact on image performance of surface spatial frequency[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [25] Harvey J E, Thompson A K. Scattering effects from residual optical fabrication errors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 155-174.
- [26] 刘军辉. 聚合物光学透镜的精密注塑成型关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
Liu J H. Research on key technologies for precision injection molding of polymer optical lens[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [27] 杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(5): 49-55.
Yang J W, Huang Q L, Han Y M. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49-55.
- [28] 刘剑峰, 龙夫年, 张伟, 等. 基于泽尼克多项式进行面形误差拟合的频域分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(8): 1062-1066.
Liu J F, Long F N, Zhang W, et al. Frequency domain analysis of surface figure fitting based on zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1062-1066.
- [29] Wang T, Cheng H B, Yang H, et al. Controlling mid-spatial frequency errors in magnetorheological jet polishing with a simple vertical model[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6433-6440.
- [30] 林泽钦. 微透镜阵列的慢刀伺服加工机理及其光学性能评价方法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Lin Z Q. Research on the machining mechanism in slow tool servo turning of microlens array and the evaluation of its optical performance[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.

Imaging Quality Prediction and Measurement for Optical Microlens Array

Wei Jinfeng¹, Wang Hailong¹, Suet To², Wang Sujuan^{1*}

¹State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

²State Key Laboratory in Ultra-Precision Machining Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077, China

Abstract

Objective To study the influencing factors of imaging quality of microlens arrays (MLAs), this paper conducts optical simulations and experiments to establish the relationship between lens errors and optical imaging quality of MLAs. The results can provide a theoretical basis and guidance for the establishment of function-driven ultra-precision machining technology for optical MLAs. The methods for preparing MLAs can be divided into direct and indirect methods considering the necessity of making masks or molds with three-dimensional concave structures. In any case, the manufacturing errors will eventually be mapped onto the lenses and have an impact on the optical performance of the lenses. Most published studies on the imaging simulation of MLAs do not consider the impact of errors on imaging performance. Meanwhile, the image obtained by MLAs, falling within indirect computational imaging, is the calculation result based on the information received from the sensor. The existing studies on the optical performance measurement of MLAs, however, mainly analyze the image information directly received from the sensor. Therefore, for the MLAs produced by the slow tool servo diamond turning and the UV light curing process, a simulation model of optical MLAs is developed in the optical software Zemax, and the lens errors are introduced into the simulation of imaging performance. In this paper, the errors include the depth error and curvature radius error of the lens unit, as well as the error of the entrance

pupil diameter. Moreover, a platform for the optical performance measurement of MLAs is established to test the imaging performance of MLAs, which applies the calculated final imaging results for imaging quality evaluation. Finally, the accuracy of the simulation model is verified by the comparison of the simulation and experimental results.

Methods Both simulation and experiments are applied in this study. Zemax is the optical design software of Zemax Development Corporation of the United States. It can calculate the point spread function (PSF) curve of the current optical system, and the imaging quality can be evaluated according to the full width at half maximum (FWHM) of the PSF curve. A smaller FWHM indicates a smaller degree of spot dispersion and better imaging quality. The construction of the simulation model of optical MLAs includes the following steps. Firstly, the test optical path should be set. A single-wavelength ($0.656\ \mu\text{m}$) parallel light reaches the image sensor after passing through the MLAs. At this time, each lens unit forms an image, which is a diffuse spot that will be received by the image sensor. The image sensor is set at a predetermined focal distance, namely, the effective focal length of the ideal lens unit ($30.66\ \text{mm}$). Secondly, according to the test optical path, the model of ideal MLAs is built by Zemax. Thirdly, the image formed by each lens unit is calculated, and the original light field image and the final image are obtained, where the latter is obtained with the pixel rearrangement method (Fig. 2). At this time, the final image is still a diffuse spot, and hence, the PSF curve of the final image and its FWHM can be generated by the light intensity distribution of the spot. Similarly, after measurement, the errors of actual MLAs are added to the model of ideal MLAs, and its PSF curve as well as the FWHM of the curve can be generated. A platform for the optical performance measurement of MLAs is established (Fig. 8) to verify the accuracy of the simulation model of optical MLAs and form a performance detection system for optical MLA elements. The test optical path of the detection platform is the same as above. The test platform can measure the focal length of each lens unit of MLAs, and the measurement results are compared with the simulation results (Table 5) to verify the model of optical MLAs upon the addition of errors. After that, the light field imaging system for MLAs is established. The position and size of the focal spot are measured, and the quality of the final image of the MLAs is evaluated by the PSF curve and its FWHM.

Results and Discussions After the final image is obtained by the platform, PSF is used to evaluate the quality of the final image, and the imaging results are compared with the simulation results [Fig. 7(c)] and the results of model of ideal MLAs [Fig. 10(d)]. The FWHM value of the ideal PSF curve [the dot-and-dash line in Fig. 10(d)] without considering the errors is $51.72\ \mu\text{m}$, and that of the simulated PSF curve (the solid line) with the error added is $75.35\ \mu\text{m}$. The FWHM value of the PSF curve (the dotted line) measured experimentally is $84.77\ \mu\text{m}$. Therefore, compared with the model of ideal MLAs, the model of MLAs considering the errors is more accurate, and the error of the measurement result compared to simulation result is about 12%. The reason is that the model of ideal MLAs cannot fully consider the actual imaging situation, and its interference factors are fewer. Therefore, the imaging result is better than the actual one, and the FWHM value is smaller.

Conclusions In this paper, a simulation method based on Zemax for MLAs is proposed. The related errors of lens units (the curvature radius error, entrance pupil diameter, lens depth error, and surface irregularity error) are measured. According to the measurement results, a simulation model of MLAs considering the errors is built. Compared with the model of ideal MLAs that does not consider lens errors, the simulation model built in this paper is more accurate. In addition, a platform for the optical performance measurement of MLAs established in this paper can be used as an evaluation and measurement tool for the imaging results of MLAs. The platform can detect the imaging quality of MLAs and evaluate the final imaging result. The focal-spot size and position errors of each lens unit are measured, and the standard deviation of focal length measurement is about $0.12\ \text{mm}$. The PSF curve is used to evaluate the quality of the final imaging results. Compared with the simulation, the FWHM error is about 12%. To sum up, through simulation and measurement, the relationship between the lens error of MLAs and the optical imaging quality is established, which can provide guidance and suggestions for the manufacturing of MLAs.

Key words imaging systems; microlens array; Zemax; imaging quality; optical performance