

用于曲面集成成像的微透镜数值孔径优化

王文雯^{1,2}, 周雄图^{1,2*}, 张永爱^{1,2}, 吴朝兴^{1,2}, 林志贤^{1,2}, 郭太良^{1,2}¹福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350116;²中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福建 福州 350116

摘要 针对目前集成成像 3D 显示系统存在视场角范围小以及重构图像分辨率低的问题,设计一种适用于曲面集成成像 3D 显示且具有不同数值孔径的柔性微透镜阵列结构,并成功搭建基于曲面屏的集成成像 3D 显示系统。采用 Trace Pro 光学仿真软件建立曲面集成成像 3D 显示系统模型,研究微透镜的数值孔径对曲面集成成像 3D 显示系统重构性能的影响规律。结果表明:当微透镜尺寸和厚度一定时,数值孔径越大,重构图像的质量越好,且视场角越大;当柔性微透镜阵列的数值孔径为 0.376 时,重构图像具有较高的分辨率,当视场角达到 60°时,重构图像依然清晰。为了验证仿真,制备具有不同数值孔径的柔性微透镜阵列并搭建曲面集成成像系统样机,得到的实验结果与仿真结果基本一致。

关键词 几何光学; 曲面集成成像; 3D 显示; Trace Pro; 柔性微透镜阵列; 重构图像

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0508002

Numerical Aperture Optimization of Microlens for Curved Integral Imaging

Wang Wenwen^{1,2}, Zhou Xiongtu^{1,2*}, Zhang Yongai^{1,2}, Wu Chaoxing^{1,2},
Lin Zhixian^{1,2}, Guo Tailiang^{1,2}¹Key School of Physical and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;²College Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou, Fujian 350116, China

Abstract Present three-dimensional (3D) display systems based on integral imaging have small field of view and low resolution of reconstructed images. To overcome these limitations, a flexible microlens array structure with different numerical apertures suitable for curved integral imaging 3D display is designed and successfully built on curved screen. The optical simulation software of Trace Pro is used to establish a curved integral imaging 3D display system model. Further, the influence of the numerical aperture of the microlens on the reconstruction performance of the curved integral imaging 3D display system is investigated. The results show that for microlens with a constant size and thickness, the larger the numerical aperture, the better the quality of the reconstructed image and larger the field of view. However, if the numerical aperture of the flexible microlens array is 0.376, the reconstructed image will have a higher resolution. Moreover, when the field of view reaches 60°, the reconstructed image is still clear. For simulation verification, flexible microlens arrays with different numerical apertures are prepared and a prototype of the curved integral imaging system is constructed. The experimental results are consistent with the simulation results.

Key words geometric optics; curved integral imaging; 3D display; Trace Pro; flexible microlens array; reconstructed image

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-06-30; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61775038)、福建省自然科学基金(2019J01221)

通信作者: *xtzhou@fzu.edu.cn

1 引言

集成成像 3D 显示技术是一种利用微透镜阵列对目标光场进行捕获,并根据光线可逆原理用另一微透镜阵列进行光场再现的自由立体显示技术^[1]。集成成像 3D 显示技术可以捕捉到目标场景中光线的方向和强度,并投射出图像的 3D 立体效果,而且不需要使用特殊的眼镜就可实现 3D 可视化,被认为是具有前景的 3D 显示技术之一。同时,集成成像 3D 显示技术再现的场景比其他 3D 显示技术大很多,因此可以显示更多的场景信息,而且该技术无需佩戴辅助设备就可提供全视差、连续视点的图像,能够消除视觉疲劳,避免视觉辐辏调节冲突(VAC),这是一种真 3D 显示技术^[2-3]。因此,学者们对研究和实现有效的 3D 图像获取、处理和显示技术有广泛的兴趣。将 2D 柔性显示面板与柔性微透镜阵列结合在一起,有望实现柔性集成成像 3D 显示。集成成像 3D 显示系统主要具有记录和重构两个功能。记录阶段,该系统用于捕获目标物体的光学信号,这些信号由 3D 物体上任一点发出的射线锥组成,每条光线都包含着 3D 物体的不同深度和角度信息,并被记录微透镜阵列记录下来,这些由记录微透镜阵列中任一镜头捕捉 3D 场景获得的 2D 图像统称为微单元图像。一旦信号被捕获,在重构阶段该系统通过集成成像重构算法可计算重构出对应的微单元图像阵列,结合与记录微透镜参数完全相同的重构微透镜阵列来重构出目标物体。目前,记录的手段主要包括微透镜阵列记录^[4]和照相机阵列采集^[5-6]。

作为光学系统的核心元件,微透镜阵列^[7]在集成成像^[8]、光通信^[9]、数字显示^[10]、探测器^[11]和远场成像^[12]等领域得到了广泛的应用。特别是,聚焦均匀性好、几何参数重复性高的微透镜阵列对于集成成像 3D 显示系统的原型化和产业化具有重要意义。微透镜阵列的制备方式包括丝网印刷^[13]、灰度曝光法^[14]、光刻胶熔融法^[15]、双光子聚合法^[16]、纳米压印^[17]、喷墨打印^[18]和飞秒激光^[19]等。尽管目前有许多工艺用于制作微透镜阵列,但是在在大尺寸的集成成像 3D 显示系统中,为了与显示屏上的像素点匹配,微透镜(大直径)阵列的制备仍然存在许多技术难题。例如,数值孔径(NA)会显著影响光的采集效率和收敛性能,低数值孔径会导致集成成像 3D 显示系统产生更多的串扰^[13]。然而,采用传统工艺制备的微透镜的高度(20~30 μm)和直径

(1000 μm 以上)有限,大数值孔径的微透镜阵列的制备工艺还有待提高。

曲面显示屏符合人体工程学的要求,为此在有限空间内可以获得更大的显示面积和观看视场角,而且其画面临场感更逼真,可以使用户观看的体验更自然,故曲面集成成像 3D 显示技术有望在曲面显示的基础上获得更广阔的应用前景。除此之外,由于柔性微透镜阵列和曲面屏位于不同的曲面,微透镜阵列参数的设计对于实现高分辨率和大视场角的重构图像至关重要。Kim 团队^[20]在 2004 年利用柔性微透镜阵列来提高集成成像 3D 显示系统的视场角;2005 年,该团队通过在集成成像系统中加入一个曲面屏幕和曲面微透镜阵列代替了传统的平面显示面板和平面微透镜阵列,使视场角相比传统方法提高了 4 倍^[21];除此之外,该团队还设计了一种可弯曲的电致发光薄膜并用于 3D/2D 可切换的柔性集成成像系统,该系统不仅可以提高视场角,还可以在 3D 与 2D 模式之间切换^[22]。长春理工大学朴燕老师^[23]通过研究 LED 显示器的发光原理,分析了影响重构图像空间分辨率的因素,提出了一种利用时分复用技术提高集成成像系统空间分辨率的方法,该方法满足集成成像重构分辨率的要求。

本文在曲面集成成像 3D 显示原理的基础上,结合尺寸为 31.2 inch(1 inch=2.54 cm)的曲面显示屏的相关参数,设计一种基于具有不同数值孔径的柔性微透镜阵列的集成成像 3D 显示系统,探究具有不同数值孔径的柔性微透镜阵列对重构图像质量的影响规律。

2 不同数值孔径微透镜设计及优化仿真

2.1 曲面集成成像原理

集成成像 3D 显示技术是一种在深度范围内具有较高分辨率和足够深度估计精度的自由立体 3D 显示技术,主要具有记录和重构两个功能,原理如图 1 所示。记录阶段通常采用微透镜阵列或相机阵列从 3D 场景中获取光线的空间和方向信息;重构阶段通过光学元件或计算机来重建 3D 图像。曲面集成成像系统将用于记录目标物体信息和重构 3D 场景的平面微透镜阵列换成了可弯曲的柔性微透镜阵列。由几何光学原理可知,当一束平行光线入射到一个透镜表面上时,正光焦度的凸透镜对光束起会聚作用,光束在像方会聚成一个实焦点。因此,在集成成像系统中,3D 物体发出的光线通过记录微透镜阵列后可以捕获包含目标物体各个角度和深度的

微单元图像,经过重构微透镜阵列后会在景深范围内成像。同样,当一个 3D 物体发出的光线经过一个柔性微透镜阵列时,物点发出的光信号通过其中一个透镜单元后会在其对应的焦平面内成像。由单个透镜折射球面的光路可知,3D 目标物体发出的光线经过透镜后会聚于一个焦点,由于柔性微透镜阵列固有的形状优势,目标物体发出的光线经过柔性微透镜阵列后呈发散趋势,整个系统的视场角与平面微透镜阵列相比有了显著的提升。

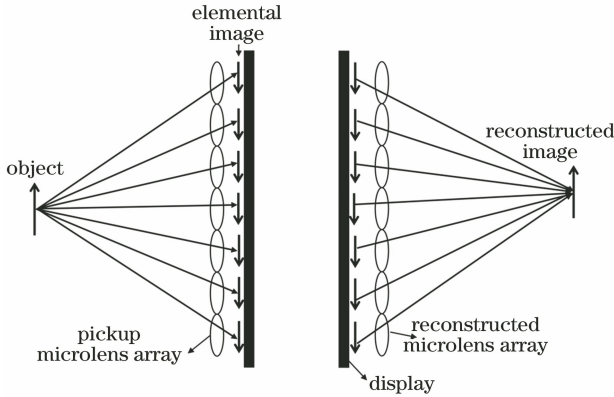


图 1 集成成像原理

Fig. 1 Principles of integral imaging

在重构阶段,柔性微透镜阵列视场角大小及再现深度示意图如图 2 所示。集成成像系统的显示性能主要受到视场角 ψ 、分辨率 R 和深度 ΔZ_m 三个因素的制约,这三者之间的关系^[24]为

$$\psi = 2\arctan\left(\frac{P}{2g}\right), \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{P_{\text{CDP}}} = \frac{g}{l \times P_D}, \quad (2)$$

$$\Delta Z_m = 2 \frac{gP}{P_D}, \quad (3)$$

式中: P 为微透镜单元的尺寸; P_D 为显示器上一个像素点的大小; P_{CDP} 为显示屏上的像素点经过柔性微透镜阵列后在中心深度平面(CDP)上形成的像素点的大小; g 为物距,即微透镜阵列与微单元图像阵列之间的距离; l 为微透镜阵列与中心深度平面之间的距离; ψ 为集成成像系统的视场角大小。在曲

表 1 不同数值孔径下微透镜的物距、像距以及物距与像距的比值

Table 1 Object distance, image distance, and ratio of object distance and image distance of microlens under different numerical apertures

Parameter	0.015	0.061	0.075	0.148	0.376	0.494
Height $h / \mu\text{m}$	10	40	50	100	300	650
Object distance g / mm	43.5	11.0	9.0	4.7	1.9	1.5
Image distance l / mm	2727	458	200	65	19	11
g/l	0.016	0.024	0.045	0.072	0.098	0.138

面集成成像 3D 显示系统中,为了观察到重构图像,整个系统的可视场角度^[20]定义为

$$\varphi = 2 \times 2n_{\text{max}} \arctan\left(\frac{P}{2r}\right), \quad (4)$$

式中: n_{max} 为系统中微透镜的最大数目; r 为柔性微透镜阵列的曲率半径。因此,微透镜的尺寸可以根据实际重构图像的尺寸进行设计,其大小直接影响视场角 ψ 、分辨率 R 和景深 ΔZ_m 。

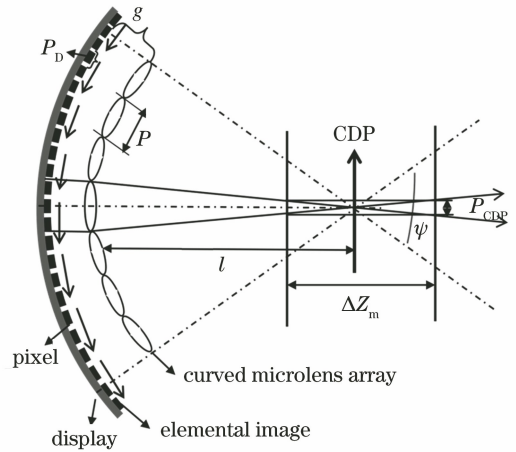


图 2 柔性微透镜阵列的视场角大小及再现深度示意图

Fig. 2 Schematic of viewing angle and reconstructed depth of flexible microlens array

为了进一步验证微透镜的数值孔径对曲面集成成像系统重构性能产生的影响,根据透镜成像原理可得

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

式中: f 为微透镜的焦距,当 $g > f$ 时,系统的中心深度平面和 3D 图像位于柔性微透镜阵列之前,显示模式为实模式。由(2)式推导可知, $R = \frac{1}{P_{\text{CDP}}} =$

$\frac{g}{l \times P_D}$, 令 P_D 固定不变, $\frac{g}{l}$ 随着微透镜数值孔径的逐渐增大而增大,如表 1 所示。大数值孔径的微透镜阵列可以有效提高系统的分辨率,因此通过调整微透镜的数值孔径可以得到高分辨率的集成成像 3D 显示系统。

2.2 不同数值孔径微透镜阵列的曲面集成成像 3D 显示系统设计

微透镜是一种光学微结构元件,光学性能优异,广泛应用于各个领域,但其数值孔径严重影响着集成成像系统的重构图像质量。因此,本文在曲面集成成像 3D 显示系统中研究具有不同数值孔径的微透镜阵列对重构图像质量的影响规律。由文献[24-25]可知,在柔性微透镜阵列模型的设计过程中,为了避免相邻微透镜之间的空隙影响重构图像的分辨率,采用与柔性微透镜阵列曲率半径、孔径大小一致的曲面针孔阵列来屏蔽杂散光,从而整合得到柔性微透镜阵列,每个微孔的直径等于或略小于微单元透镜的直径,且两者中心重合。同时,相较于传统的平面微透镜阵列结构,曲面结构可以克服记录场景范围较窄的不足,并能获得较大的视场角。

当设置集成成像系统的参数时,微透镜的参数需结合曲面显示屏的具体参数(分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 1440 \text{ pixel}$,像素点大小为 $272.4 \mu\text{m}$,曲率半径为 1700 mm ,尺寸为 $713.1 \text{ mm} \times 425.4 \text{ mm}$)来设计。对于集成成像 3D 显示系统,微透镜阵列记录了 3D 目标物体各个空间角度的信息,因此微透镜的分辨率决定了重构图像的分辨率。在系统中,考虑到角度与空间分辨率之间的权衡,将微透镜阵列的尺寸设计为每个微透镜覆盖曲面 2D 显示屏上的 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 大小,因此对于分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 1440 \text{ pixel}$ 的曲面屏,集成成像 3D 显示系统的分辨率应为 $512 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$ 。对于整个曲面集成成像系统,单个微透镜的直径为

$1362 \mu\text{m}$,结合制备过程中微透镜的黏性流体形变规律,相邻微透镜之间的距离设置为 $62 \mu\text{m}$ 。因此,仿真模型中单个微透镜的直径设置为 $1300 \mu\text{m}$,微透镜的高度分别设置为 $10, 40, 50, 100, 300, 650 \mu\text{m}$ 。

利用 Trace Pro 光学仿真软件并结合不同数值孔径下的透镜参数(表 2)和系统参数(表 3)对整个曲面集成成像系统的重构性能进行仿真。结合图 2 的曲面集成成像原理,建立了图 3 的曲面集成成像 3D 显示仿真模型。目标物体被设置为两个半径不同的圆所组成的圆环和一个半球。在集成成像 3D 显示系统的仿真过程中,将所有针孔阵列的材料属性都设置为全吸收,用于吸收多余的杂散光。记录微透镜阵列的参数与重构微透镜阵列完全一致。记录屏的材料属性设置为全吸收,用于捕获记录阶段得到的微单元图像阵列。记录微透镜和重构微透镜的弯曲方向与 2D 曲面屏的弯曲方向一致。重构屏的材料属性设置为全吸收,用于接收和显示集成成像 3D 显示系统最终的重构图像,并通过重构屏上的照度图进一步分析重构图像的分辨率。最后对光线进行追迹,选择朗伯体发射,三个目标物体上表面光源的光线数分别设置为 600 万条,总计 1800 万条,分别分析具有不同数值孔径的微透镜经过光线追迹后在重构屏上得到的重构图像。数值孔径和焦距分别表示为

$$NA = n_0 \sin \theta, \quad (6)$$

$$f = \frac{r^2 + h^2}{2h(n-1)}, \quad (7)$$

式中: n_0 为透镜与透镜间媒质的折射率; θ 为透镜的折射角; n 为微透镜的折射率。

表 2 不同数值孔径下的透镜参数

Table 2 Lens parameters at different numerical apertures

Parameter	0.015	0.061	0.075	0.148	0.376	0.494
Height $h/\mu\text{m}$	10	40	50	100	300	650
f/mm	42.817	10.742	8.612	4.382	1.731	1.317

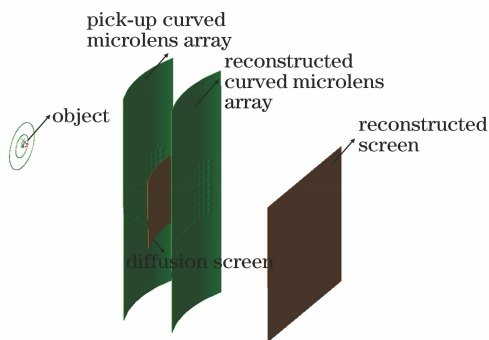


图 3 曲面集成成像 3D 系统的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of curved integral imaging 3D system

本文结合文献[26]设计用于曲面集成成像的微透镜(数值孔径为 0.494),设计过程中使用的参数如表 3 所示。

2.3 结果与讨论

图 4(a)为不同数值孔径的微透镜阵列所搭建的集成成像 3D 显示系统在重构屏未发生旋转(0°)情况下的重构图,分析可知在使用数值孔径为 0.015 的微透镜阵列所搭建的曲面集成成像 3D 显示系统中,重构屏上的图像不连续,成像分辨率较低。图 4(b)~4(d)显示了数值孔径为 0.015、0.075 和 0.494 的单个微透镜的光线追迹图,结合图 4(a)

可得,随着数值孔径的增大,焦距逐渐变小,光线的会聚能力越强,图像逐渐清晰完整,亮度增强,成像分辨率显著提升,证实了微透镜的数值孔径会对重构图像的分辨率产生影响,表明具有大数值孔径的微透镜阵列的加入有效提高了重构图像的分辨率。仿真结果表明,数值孔径是表示微透镜对光的收集能力,数值孔径越大,在曲面集成成像系统的重构屏上的成像质量越好。此外,数值孔径还表示微透镜在一定距离下的聚光能力和分辨精细样品细节的能力,微透镜的数值孔径越大,光子收集效率越高,微透镜阵列的光透射能力越强,即大数值孔径的微透镜可以有效解决集成成像系统的重构图像分辨率较低的问题。

表 3 曲面集成成像系统的参数

Table 3 Parameters of curved integral imaging system

Parameter	Value
Lens array size	11×9
f /mm	1.317
Diameter /mm	1.3
Height /mm	0.65
l /mm	11
g /mm	1.5
Radius of curvature /mm	0.65
Thickness of pinhole array /mm	0.0005
Radius of pick-up curved/reconstructed curved microlens array /mm	34.09
NA	0.494

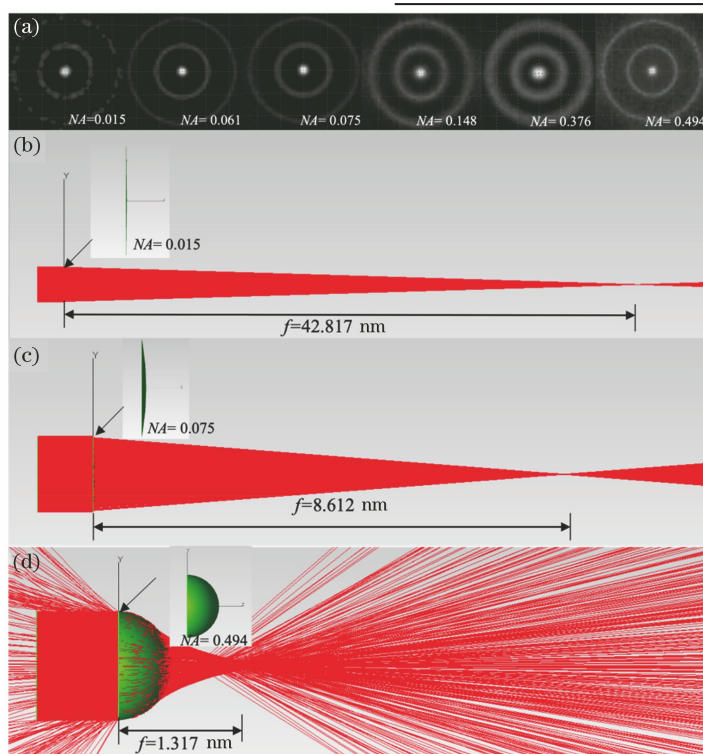


图 4 不同数值孔径下微透镜阵的光线追迹图。(a) 不同数值孔径的微透镜阵列所搭建的集成成像 3D 显示系统在重构屏未发生旋转情况下的重构图;(b)数值孔径为 0.015 的单个微透镜的光线追迹图;(c)数值孔径为 0.075 的单个微透镜的光线追迹图;(d)数值孔径为 0.494 的单个微透镜的光线追迹图

Fig. 4 Ray tracing of microlens array with different numerical apertures. (a) Reconstructed images of reconstruction screen without rotation in integral imaging 3D display system constructed by microlens array with different numerical apertures; (b) ray tracing of single microlens with numerical aperture of 0.015; (c) ray tracing of single microlens with numerical aperture of 0.075; (d) ray tracing of single microlens with numerical aperture of 0.494

除此之外,本文还研究了具有不同数值孔径的微透镜阵列对视场角的影响,如图 5 所示。从图 4(a)可以看到,数值孔径为 0.015 的微透镜在重构屏未发生旋转,即 0°的情况下,重构屏上的图像模糊且不完整。从图 5(a)可以看到:随着重构屏旋转角度的增大,重构图像变得逐渐模糊,最大视场角

仅不到 10°;当数值孔径为 0.061 时,随着旋转角度的逐渐增大,特别是从 20°开始,数值孔径为 0.061 的微透镜所搭建的曲面集成成像 3D 显示系统的重构图像变得逐渐模糊;数值孔径为 0.148 的 3D 显示系统的重构图像仍旧清晰,且视场角提高到 40°;在采用数值孔径为 0.376 的微透镜搭建的曲面集成

成像 3D 显示系统中, 图像的亮度随着数值孔径的增大而增加, 最大视场角可以达到 60° 。以上仿真结果表明, 视场角与微透镜的数值孔径呈对应关系。当系统内光源类型、光源波长、光线数目、记录屏、遮挡屏和重构屏等参数完全一致, 只有微透镜的数值孔径不同时, 微透镜的数值孔径越大, 即微透镜的曲率半径越小, 这会使重构屏接收到的总光线数越来越多, 但是微透镜的数值孔径也不是越大越好。从

图 5(f) 可以看到, 在采用数值孔径为 0.494 的微透镜搭建的曲面集成成像 3D 显示系统中, 虽然系统的最大视场角可以提高到 70° , 但数值孔径的增大会使系统出现像差, 光源发出的光线经过微透镜阵列折射后, 不同高度的光线相交于重构屏上不同的位置, 因此重构屏上会出现很多杂散光, 所以获得的重构图像并不是最好。

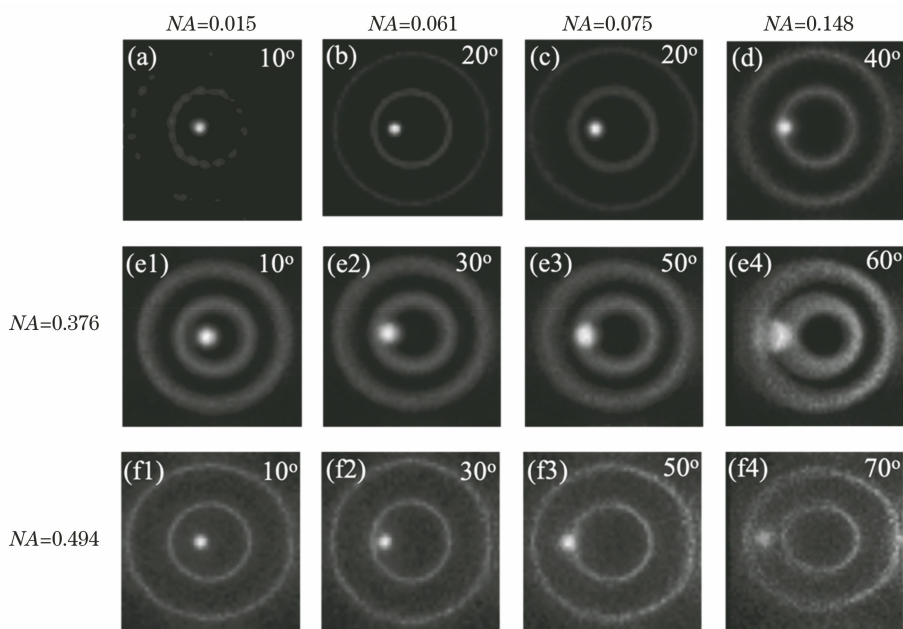


图 5 不同数值孔径的微透镜阵列所搭建的集成成像 3D 显示系统在不同可视场角度下的重构图。(a) 数值孔径为 0.015; (b) 数值孔径为 0.061; (c) 数值孔径为 0.075; (d) 数值孔径为 0.148; (e1)~(e4) 数值孔径为 0.376; (f1)~(f4) 数值孔径为 0.494

Fig. 5 Reconstructed images of integral imaging 3D display system built by microlens arrays with different numerical apertures under different viewing angles. (a) Numerical aperture is 0.015; (b) numerical aperture is 0.061; (c) numerical aperture is 0.075; (d) numerical aperture is 0.148; (e1)–(e4) numerical aperture is 0.376; (f1)–(f4) numerical aperture is 0.494

不同视场角 ($0^\circ \sim 60^\circ$) 下, 不同数值孔径的柔性微透镜阵列所搭建的集成成像系统在重构屏上接收到的光线总数如图 6 所示。相同视场角下, 除了 0.494 的数值孔径以外, 在重构屏上接收到的光线数均随着数值孔径的增大而越来越多, 视场角也在逐渐变大且重构图像的分辨率也越来越高, 即在 60° 以内都可以观察到大视场角的重构图像。特别当视场角逐渐增大 (大于 30°) 时, 采用小数值孔径的微透镜搭建的系统可获得的最大可视场角度有限。当数值孔径为 0.494 时, 视场角虽可以扩大到 70° , 但重构屏上接收到的光线数并不是最多的, 且重构图像的分辨率也不是最佳的。因此从仿真结果可以看出, 当数值孔径为 0.376 时, 系统的重构图像质量最好, 不仅可以有效提高视场角, 还可以提高重

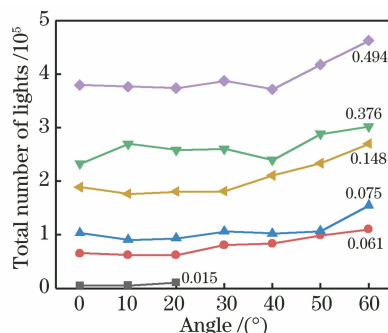


图 6 不同数值孔径的微透镜所搭建的集成成像系统在不同角度下接收到的光线总数

Fig. 6 Total number of lights received by integral imaging system with microlens of different numerical aperture at different angles

构图像的分辨率。

3 不同数值孔径柔性微透镜阵列的制作

为了进一步验证数值孔径会对集成成像系统的显示性能产生影响,采用丝网印刷工艺制备基于曲面屏(尺寸为 31.2 inch)的大尺寸柔性微透镜阵列,关于丝网印刷中精密复合网版的制备和丝网印刷的过程,在之前的工作中已经详细介绍,请参见文献[13,27]。在印刷之前,通过改变柔性基板表面的亲疏水特性来调整透镜的数值孔径,将一柔性聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基板和三甲基氯硅烷溶液(TMCs)置于同一密闭容器内,TMCs 极强的挥发性会使 TMCs 分子附着在 PMMA 基板表面,通过控制 TMCs 处理 PMMA 基板的时间就可得到不同数值孔径的微透镜阵列。图 7 为柔性基板上微透镜的数值孔径与 TMCs 处理时间的关系,可以看出随着处理时间的增长,微透镜的数值孔径也在逐渐增

大。用荧光显微镜(日本,OLYMPUS, BX51M)可观察到图 7(a)未用 TMCs 处理的柔性基板经丝网印刷工艺制备得到的微透镜的形貌,微透镜的 3D 轮廓可用激光 3D 显微镜(日本,OLYMPUS, OLS4100)观察到,可以看到透镜的高度只有 $10\ \mu\text{m}$ 左右,数值孔径为 0.015。图 7(b)为用 TMCs 处理 20 min 后的柔性基板经丝网印刷工艺制备得到的微透镜的形貌和高度,可以看到微透镜的形貌较好,高度可提高到 $40\ \mu\text{m}$,数值孔径可达 0.061。如图 7(c)所示,当处理基板的时间增加到 55 min 时,微透镜的高度稳定在 $50\ \mu\text{m}$ 左右,数值孔径可达到 0.075,随着处理基板时间的增长,微透镜的高度并不会增大,所以最终选取处理时间为 55 min 的柔性基板。因此,通过调控 TMCs 处理柔性基板的时间可得到不同数值孔径的柔性微透镜阵列,随着处理时间的增加,柔性微透镜阵列的数值孔径也在增大,当处理时间高于 55 min 时,微透镜的数值孔径趋于稳定。

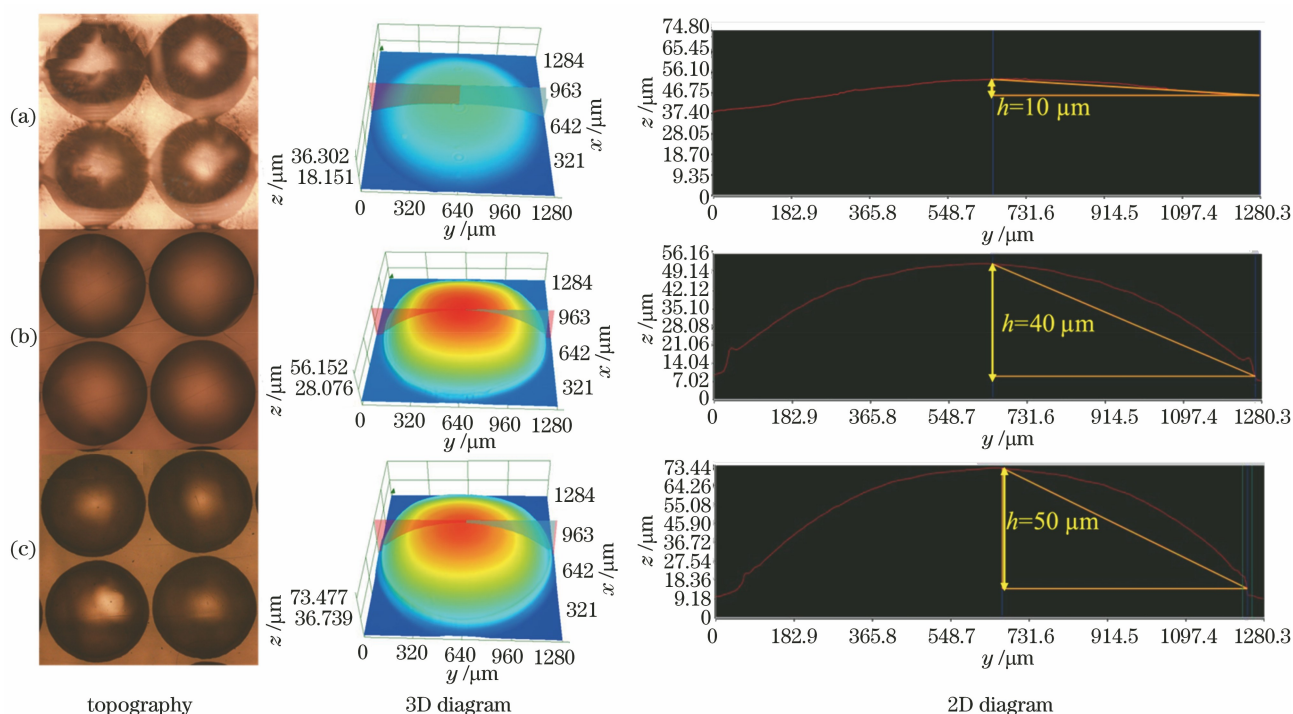


图 7 柔性基板上微透镜的数值孔径在不同 TMCs 处理时间的关系。(a)未处理;(b) 20 min;(c) 55 min
Fig. 7 Relationship between numerical aperture of microlens on flexible substrate and TMCs processing time.
(a) Unprocessed; (b) 20 min; (c) 55 min

微透镜的材料:选择粘度为 $40000\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 、无色透明、折射率为 1.476 的 UV 树脂;选取处理时间为 55 min 的柔性基板。将 UV 树脂均匀涂覆在网版表面上进行丝网印刷,待网版与柔性基板分离后即可得到一微柱状 UV 树脂阵列,其在重力的作用下发生回流形变,最终形成微透镜阵列。将得到的

微透镜阵列放置在波长为 365 nm 的紫外灯下固化 10 min,即可得到大尺寸的柔性微透镜阵列。

4 集成成像演示实验

本文利用 3Ds Max 软件创建 3D 物体模型和相机,使用 MATLAB2018a 平台生成微单元图像,图

像为一个蘑菇形状的两孔插座,每个单元像的尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$,如图 8(a)所示。数值孔径为 0.015、0.061 和 0.075 的柔性微透镜阵列结合一曲面显示屏(分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 1440 \text{ pixel}$,像素点大小为 $272.4 \mu\text{m}$,曲率半径为 1700 mm ,尺寸为 $713.1 \text{ mm} \times 425.4 \text{ mm}$)搭建的曲面集成成像 3D 显示系统,如图 8(b)~8(d)所示,其中柔性微透镜阵列分别放置在距离曲面显示屏 44,11,9 mm 处。如图 8(b)所示,当数值孔径较小时,微单元图像上的细节并不能完全重构出来,存在边缘模糊、重影、分辨率较低、黑色插孔部分轮廓不清晰、成像效果较

差等现象。如图 8(c)所示,当数值孔径增大时,微单元图像基本重构出来,图像的分辨率较低,虽然数值孔径有了显著提高,但是黑色插孔部分仍不能完全重构。如图 8(d)所示,当数值孔径为 0.075 时,柔性微透镜能将微单元图像完全重构出来,图像边缘清晰,3D 立体效果明显,细节处的分辨率较高,特别是黑色插孔部分,此时重构图像最清晰。因此,随着柔性微透镜阵列数值孔径的增大,曲面集成成像 3D 显示系统的重构图像的边缘轮廓逐渐清晰,形状完整,成像分辨率较高,进一步验证了微透镜的数值孔径会对集成成像显示系统的重构图像产生影响。

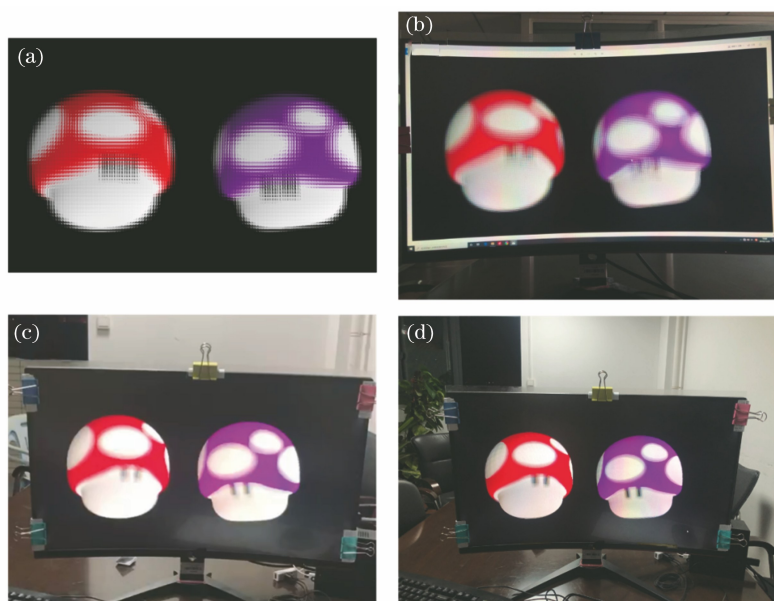


图 8 不同数值孔径的微透镜阵列所搭建的 3D 显示系统样机的成像效果。(a)微单元图像;(b)数值孔径为 0.015;(c)数值孔径为 0.061;(d)数值孔径为 0.075

Fig. 8 Imaging effect of 3D display system prototype built by microlens array with different numerical apertures.

(a) Elemental image; (b) numerical aperture is 0.015; (c) numerical aperture is 0.061; (d) numerical aperture is 0.075

5 结 论

本文以柔性微透镜阵列为研究对象,设计一种适用于曲面集成成像 3D 显示且具有不同数值孔径的柔性微透镜阵列结构。结合传统制备工艺的相关参数,利用 Trace Pro 光学仿真软件对柔性微透镜的数值孔径进行优化,并对曲面集成成像 3D 显示系统的性能进行研究。仿真结果表明,微透镜的数值孔径越大,重构图像的质量越好,且视场角越大,说明微透镜的数值孔径可以在一定程度上影响曲面集成成像 3D 显示系统的视场角和分辨率。在重构阶段:当微透镜的数值孔径为 0.015 时,集成成像系统的分辨率最差,视场角只有 10° ;当数值孔径为 0.494 时,视场角最大可以扩大到 70° ,但是此时像

差太大会影响重构图像的质量;当柔性微透镜阵列的数值孔径为 0.376 时,重构图像的分辨率仍然较高;当视场角从 10° 增加到 60° 时,重构图像依然清晰。从仿真结果可以看出,当数值孔径为 0.376 时,重构图像的质量最好。本文还制备了不同数值孔径的柔性微透镜阵列,由于实验条件有限,柔性微透镜阵列的数值孔径最大仅达到 0.075。基于此,搭建了基于不同数值孔径的柔性微透镜阵列的曲面集成成像系统,实验结果符合本文模拟仿真的结果。因此,该仿真模型不仅可以解释柔性微透镜的数值孔径对曲面集成成像系统重构性能的影响,也可为工艺上制作柔性微透镜阵列并搭建集成成像 3D 显示系统建立一个理论依据和参考,而且还能减少实验成本,节约资源,提高实验效率。

参 考 文 献

- [1] Wang Q H, Wang A H, Liang D, et al. Overview on glasses-free 3D display technologies [J]. *Vacuum Electronics*, 2011(5): 1-6.
王琼华, 王爱红, 梁栋, 等. 裸视 3D 显示技术概述 [J]. *真空电子技术*, 2011(5): 1-6.
- [2] Zhou L, Tao Y H, Wang Q H, et al. Design of lenticular lens in autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 30-33.
周磊, 陶宇虹, 王琼华, 等. 立体显示用柱面透镜光栅的设计 [J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 30-33.
- [3] Zhao X, Wang F, Yang Y, et al. Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 209-221.
赵星, 王芳, 杨勇, 等. 集成成像三维显示系统显示性能的研究进展 [J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 209-221.
- [4] Liu Y, Deng H, Wang Q H, et al. An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0910004.
刘尧, 邓欢, 王琼华, 等. 基于光孔阵列的集成成像三维显示方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0910004.
- [5] Qian W T, Li H, Wu Y T. Synthetic-aperture occlusion removal algorithm using microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111027.
钱文彤, 李晖, 吴云韬. 基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111027.
- [6] Li J J, Deng H, Li S, et al. One-step shooting method for integral imaging without depth inversion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0109002.
李姣姣, 邓欢, 李赛, 等. 无深度反转的集成成像一次拍摄方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0109002.
- [7] Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. The developments of microlens array: from fabrications to photonic applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2100001.
李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展 [J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2100001.
- [8] Piao Y R, Xing L Y, Zhang M, et al. Three-dimensional reconstruction of far and large objects using synthetic aperture integral imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 153-161.
- [9] Jian H J, He J Z, Jin X Y, et al. Automatic geometric calibration and three-dimensional detecting with an artificial compound eye [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1296-1301.
- [10] Tanida J, Mima H, Kagawa K, et al. Application of a compound imaging system to odontotherapy [J]. *Optical Review*, 2015, 22(2): 322-328.
- [11] Chen X X, Wu T L, Gong Z Y, et al. Subwavelength imaging and detection using adjustable and movable droplet microlenses [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 225-234.
- [12] Guo M L, Ye Y H, Hou J L, et al. Experimental far-field imaging properties of high refractive index microsphere lens [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 339-342.
- [13] Zhou X T, Peng Y Y, Peng R, et al. Fabrication of large-scale microlens arrays based on screen printing for integral imaging 3D display [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24248-24255.
- [14] Luo N N, Zhang Z M. Fabrication of a curved microlens array using double gray-scale digital maskless lithography [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(3): 035015.
- [15] Liu X Y. Design of aspheric microlens made by photoresist reflow method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0208001.
刘向阳. 光刻胶热熔法制备的非球面微透镜的设计方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0208001.
- [16] Jung H, Jeong K H. Monolithic polymer microlens arrays with high numerical aperture and high packing density [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(4): 2160-2165.
- [17] Zhang D, Xu Q, Fang C, et al. Fabrication of a microlens array with controlled curvature by thermally curving photosensitive gel film beneath microholes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(19): 16604-16609.
- [18] Zhu X Y, Lan H B, Yang J J, et al. Simple fabrication of high focal number micro-lenses based on a microfluid pulse jetting method [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(6): 2789-2802.
- [19] Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500005.
杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500005.
- [20] Kim Y, Park J H, Min S W, et al. Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 546-552.
- [21] Jung J H, Kim Y, Kim Y, et al. Integral imaging

- system using an electroluminescent film backlight for three-dimensional-two-dimensional convertibility and a curved structure[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5): 998-1007.
- [22] Kim Y, Park J H, Choi H, et al. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array[J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 421-429.
- [23] Li M, Piao Y, Deng L J. Spatial resolution of naked eye three-dimensional integral imaging display based on LED screen [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061004.
李敏, 朴燕, 邓莉巾. 基于 LED 屏裸眼三维集成成像显示技术的空间分辨率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061004.
- [24] Peng Y Y, Zhou X T, Zhang Y A, et al. Design and simulation of curved microlens array for integral imaging 3D display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0322002.
彭玉颜, 周雄图, 张永爱, 等. 用于集成成像 3D 显示的曲面微透镜阵列设计与仿真[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0322002.
- [25] Zhou X T, Chen E G, Yao J M, et al. Design and simulation of combined pinholes/microlens array for integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 855-859.
周雄图, 陈恩果, 姚剑敏, 等. 用于集成成像的针孔/微透镜组合阵列设计与仿真[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(6): 855-859.
- [26] Li D, Zhao X, Yang Y, et al. Non-flipping reconstruction system design and implementation in three-dimensional integral imaging [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(1): 35-40.
黎达, 赵星, 杨勇, 等. 三维集成成像中无串扰显示系统的设计与实现 [J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(1): 35-40.
- [27] Wang W W, Chen G X, Weng Y Y, et al. Large-scale microlens arrays on flexible substrate with improved numerical aperture for curved integral imaging 3D display[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11741.