

## 激光与光电子学进展

## 基于 MEMS 技术的超表面三维显示研究

翟雷应<sup>1,2\*</sup>, 王义杰<sup>1</sup>, 赵礼宇<sup>1</sup>, 南敬昌<sup>1,2</sup><sup>1</sup>辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;<sup>2</sup>辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105

**摘要** 三维物体的空间结构复杂, 光波场很难用具体的函数准确描述, 三维显示非常困难。提出一种硅基微机电系统 (MEMS) 二维扫描平台与超表面元件集成的三维显示技术, 利用视觉暂留特性, 建立快速三维显示扫描片上结构, 理论上实现了物像信息的三维图像的重构。利用层析法实现物体的三维显示, 采用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法获得单层二维图像单元相位值, 建立基于几何相位原理的二维超表面结构, 获得了二维全息平面像。依据空间、时间序列构建了由离散的多层超表面二维全息像形成的物体三维显示。结果表明: 所获得的二维全息像峰值信噪比大于 20 dB; 所设计的片上二维扫描平台在 0.1 s 内能够完成 9 幅二维全息像的叠加, 三维显示的帧率达 11 frame/s。研究成果为快速调制的三维显示提供了微型化的系统级解决方案和理论模型。

**关键词** 超表面; 微机电系统; 全息成像; 三维显示

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232387

## Metasurface 3D Display Based on MEMS Technology

Zhai Leiying<sup>1,2\*</sup>, Wang Yijie<sup>1</sup>, Zhao Liyu<sup>1</sup>, Nan Jingchang<sup>1,2</sup><sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University,  
Huludao 125105, Liaoning, China;<sup>2</sup>Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Application,  
Huludao 125105, Liaoning, China

**Abstract** The spatial structure of 3D objects is inherently complex, and making an accurate description of the light wave field using specific functions is challenging. Hence, achieving 3D display is very difficult. In this paper, a 3D display technology is proposed by integrating the silicon-based micro-electro-mechanical system (MEMS) 2D scanning platform with the metasurface element. By leveraging the persistence of vision, an on-chip scanning structure was created to realize 3D display. As a result, the object image information was theoretically reconfigured to 3D display. Further, the chromatography method was used to construct 3D display, and the phase value of the single layer 2D image element was obtained using the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm. Then, 2D metasurface structures were established based on the geometric phase principle, and the corresponding 2D holographic plane images were achieved based on the principle of Fraunhofer diffraction. Finally, a 3D display was built through those above discrete metasurface holograms according to space and time series. The results show that the peak signal-to-noise ratio of 2D holograms is greater than 20 dB. Moreover, the proposed on-chip 2D scanning platform can assemble nine pieces of 2D holograms within 0.1 s, thereby enabling a reconfigured 3D display that can achieve a frame rate of 11 frame/s. Thus, this research findings provide a miniaturized system-level settlement and theoretical model for fast-modulating 3D display.

**Key words** metasurface; micro-electro-mechanical system; holography; 3D display

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2023-12-28; 网络首发日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61971210)、辽宁省应用基础研究计划 (2022JH2/101300275)、辽宁工程技术大学横向课题 (No. 21-2334)

通信作者: \*zlygs1@hotmail.com

# 1 引言

三维像能够直观地重现和还原三维世界的真实信息,获得目标相对完整的空间信息,在信息科学<sup>[1]</sup>、生命科学<sup>[2]</sup>、图像科学<sup>[3]</sup>领域具有重要的应用价值。三维像除了包含二维的图像信息外,还包含物体的深度信息。物体的三维信息包含于物体的光波场中,三维成像是二维成像基础上建立起来的多维成像技术,能够提供更真实、更直观的图像信息。全息成像是一种高保真的成像方式,相关像中不仅包含了物体的强度信息,而且包含了相位、极性、频率等特征,物像信息丰富。因此全息成像成为了目前成像领域的研究热点<sup>[4]</sup>。全息三维成像由于物体全方位信息的特征,是最为全面的物体高质量图像获取方式,目前是非常理想的物体三维图像获取方式。

超表面是一种亚波长的人工结构<sup>[5]</sup>,通过微小单元阵列实现对光场的自由控制<sup>[6]</sup>,能够实现对光的反射、透射、聚焦、散射、偏振、频率等多方面参数的精确调制<sup>[7]</sup>。因此,超表面具有自由构建全息像的前沿技术能力<sup>[8-9]</sup>。通过建立目标相位设计对应的超表面的结构单元,进而灵活地实现全息像的重建。采用超表面实现的全息成像主要为二维<sup>[10-11]</sup>,三维物体的空间结构复杂<sup>[12]</sup>,其光波场很难用具体的函数准确描述,而且由于算法复杂性高,数据量大,加之计算机的运行速度限制,实现三维像非常困难<sup>[13]</sup>。2013年Huang等<sup>[14]</sup>利用空间取向变化的亚波长金属纳米棒构成的超表面实现三维全息。2017年Wei等<sup>[15]</sup>以耦合二聚体为单元实现了等离子体超表面具有大信息容量的多平面全息。但这些超表面三维成像为二维全息在菲涅耳区的深度变化,有着不同程度的串扰。

三维像的显示<sup>[16]</sup>是目前的难点。而层析法<sup>[17]</sup>是一种降低三维显示难度的实用技术,通过将三维物体沿深度方向分层成像,进而能够单独计算各层在全息面上的衍射光场分布,再通过不同层光场的叠加实现物像的重构。如何灵活地实现二维全息结构是相关理论的关键问题之一,其次如何实现深度方向的多层全息成像的叠加重构是三维像显示的另一个关键问题。

为此,本文提出了基于机电系统(MEMS)静电驱动的平面内扫描超表面三维显示结构的解决方案。结合MEMS技术的超表面元件拥有优秀的可调能力<sup>[18-19]</sup>。对于MEMS技术与超表面光学元件的结合,通过控制超表面元件的位置实现对超表面的动态调控,扩展了静态超表面光学元件的性能。本文利用层析法实现物体的三维显示,采用几何相位原理实现二维超表面全息成像。通过硅基MEMS二维扫描平台实现厚度方向的层析的三维结构显示,在人眼暂留时间内,依据空间、时间序列构建了由离散的多层全息像实现的物体三维显示。采用时域有限差分(FDTD)法和ANSYS有限元工具对所设计超表面结构及二维扫

描平台进行仿真,所设计的MEMS二维扫描平台完成了9层二维全息像的扫描及物体三维显示的重构,成像时间小于0.1 s,为快速灵活调制的三维显示系统提供了理论模型及芯片级结构设计。

## 2 三维显示结构原理

### 2.1 超表面全息成像原理

物像的三维数据经计算机处理后,离散为具有不同深度的二维平面物像。采用Gerchberg-Saxton(GS)算法获得二维平面物像全息图的相位分布,之后叠加数字球面镜相位,设计超表面结构排布。该超表面结构经光源照射后形成二维全息像,作为构建三维显示的层析单元。

GS算法流程如图1所示。目标图像的振幅 $|A|$ 和随机相位 $\theta_0$ 构成入射复振幅 $|A| \exp(j\theta_0)$ 输入算法;之后对其进行傅里叶变换,得到 $|A| \exp(j\varphi_n)$ ;对 $|A| \exp(j\varphi_n)$ 进行振幅为1的振幅约束,得到 $|B| \times \exp(j\theta_n)$ ;再对 $|B| \exp(j\theta_n)$ 进行傅里叶逆变换,得到 $|B_0| \exp(j\theta_n)$ ;将 $|B_0| \exp(j\theta_n)$ 的振幅重新设置为目标图像的初始振幅 $|A|$ ;循环以上流程,迭代直到 $|A|$ 与 $|B_0|$ 的误差小于允许值停止,其中 $\theta_n$ 为全息图的相位。

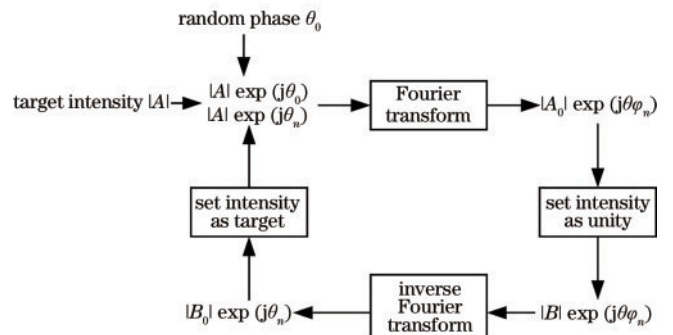


图1 GS算法流程

Fig. 1 GS algorithm flow chart

超表面的全息成像采用几何相位调制。通过对超表面的微结构的设计,可以实现光波相位的控制,从而实现对光波的几何相位的调控<sup>[20]</sup>。为此,本文利用几何相位原理设计层析单元的超表面结构。调制相位仅是单元结构的方位角的2倍,因此可以在 $0 \sim 180^\circ$ 范围旋转纳米柱的方位角,实现相位 $0 \sim 2\pi$ 的完全覆盖。出射光波前的自由控制通过设计单元结构的角度排列来实现,从而调控超表面,呈现所设计的二维全息图。

几何相位超表面结构形成的二维层析全息图按照深度的空间序列排列,可显示三维图像。根据像场的位置及沿深度的空间序列便可确定离散二维全息图在三维深度的精确位置<sup>[21]</sup>。由此,利用层析方法将二维全息像叠加来实现三维重建的效果,计算出其他深度序列在像场中的相对位置所引入的修正相位值,该值

相当于为二维层析超表面结构叠加了一个相位修正透镜,最终把三维物体分为若干层,利用超表面来复现每层二维全息图。每个超面对应三维物体的相应分层。根据物体的不同深度,将三维物体沿轴向分成一个个平面的单元层,最终的三维显示效果由每一层的全息图通过叠加的方式得到。二维全息图对应的超表面几何相位为两者产生的相位之和,总相位表示为

$$\varphi_{\text{metasurface}} = \varphi_{\text{hologram}} + \varphi_{\text{lens}}, \quad (1)$$

式中: $\varphi_{\text{hologram}}$ 为二维层析超表面结构相位; $\varphi_{\text{lens}}$ 为修正相位。在二维层析超表面结构中引入的相位分布 $\varphi_{\text{lens}}$ 赋予每一幅二维全息图相应的深度信息。将多幅二维全息图按一定间隔轴向排列。当多幅二维全息图叠加再现时,便可得到渐进变化的三维再现像。修正相位的聚焦超构透镜的相位分布的计算公式为

$$\varphi(R, \lambda) = -\frac{1}{\lambda} \left[ 2\pi \left( \sqrt{R^2 + f^2} - f \right) \right], \quad (2)$$

式中: $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是超表面透镜上任意位置 $(x, y)$ 到其中心的距离; $f$ 是焦距; $\lambda$ 为入射波长。

为定量全息图的恢复质量,选择峰值信噪比(PSNR)作为衡量指标。PSNR的均方根误差定义为

$$E_{\text{RMSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i, j) - K(i, j)]^2, \quad (3)$$

式中: $I$ 为不包含噪声的图像,即目标原图; $K$ 为处理后包含噪声的图像,即全息重构图像; $i$ 和 $j$ 为像素坐标。则PSNR定义为

$$R_{\text{PSNR}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_{\text{MAX}I}}{\sqrt{E_{\text{RMSE}}}}, \quad (4)$$

式中: $V_{\text{MAX}I}$ 为图中颜色数最大值,本文 $V_{\text{MAX}I} = 255$ 。

## 2.2 基于空间与时间序列扫描的MEMS二维平台

设计MEMS二维扫描平台来驱动多个超表面,将多个二维层析超表面结构与光源按空间、时间序列耦合,实现二维全息像的叠加,形成最终的三维显示的效果。

采用MEMS静电梳齿驱动器获得大位移平面扫描,其具有快速响应的能力。人眼视觉具有暂留特性,暂留时间为0.1~0.4 s,视觉暂留能够将前一个影像保留在视觉系统中,因此,在人眼暂留时间内形成的多个影像能够同时被人感知。利用MEMS平台扫描超表面结构后,获得二维全息图,多个沿深度方向序列扫描的二维全息图能够在人眼的视觉暂留时间内得到扫描,从人眼视觉上实现三维显示。因此,MEMS平台的位移越大、沿深度方向划分的层序列越多,三维显示的分辨率就越高。

MEMS的驱动方式采用静电<sup>[22]</sup>梳齿。驱动梳齿是由两个具有叉指的梳状结构组成的,其中一个固定的,而另一个连接到悬臂梁。施加在两个梳状结构上的电压将导致具有不同电势的梳齿之间的电容器中产生静电力,静电力会引起可动梳齿的移动。静电力

可以表示为

$$F_x = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{N\epsilon t V^2}{g}, \quad (5)$$

式中: $t$ 表示梳齿的厚度; $N$ 表示梳齿的对数; $V$ 表示驱动电压; $\epsilon$ 表示空气介电常数; $g$ 表示梳齿间距。由式(5)可得,静电吸引力与梳齿对数和梳齿厚度成正比,与梳齿间距成反比,与驱动电压的平方成正比。增大静电吸引力可通过增加梳齿的对数或者增大梳齿厚度和缩小梳齿间距实现。

整个周期的扫描时间由MEMS二维扫描平台对多个离散的二维全息像的总响应时间决定。多个离散的二维全息像对应的超表面结构以时间序列得到按序扫描,以深度序列得到按序排列,在人眼暂留时间内完成全部单元扫描。

## 2.3 MEMS可调超表面三维全息集成结构

MEMS二维驱动平台和超表面层析单元集成结构如图2所示。为实现超表面二维全息快速叠加,设计了平面内大行程高频率的MEMS驱动器来保障高帧率三维图像的实现。多个离散的层析超表面结构位于中心,按深度序列在 $\text{SiO}_2$ 基底上形成阵列。整个阵列结构由MEMS平面内二维扫描平台支撑,采用平面梳齿驱动器实现面内扫描。梳齿驱动器的动齿(movable comb)和静齿(static comb)由一步光刻工艺同时完成。 $X$ 、 $Y$ 方向的梳齿驱动器结构采用嵌套结构,能够互相独立设计。内侧支撑框架(inside frame)由内侧悬臂梁(inside beam)铰接,沿 $X$ 方向排列梳齿驱动器结构,在静电力的驱动下形成 $X$ 方向的运动。驱动器的动、静齿驱动电极由悬臂梁上方的薄层引出。外侧支撑框架(outside frame)由外侧悬臂梁(outside beam)铰接,沿 $Y$ 方向排列梳齿驱动器结构,在静电力的驱动下形成 $Y$ 方向的运动。动齿电极由外悬臂上方薄层引出,静齿电极可以自由设计于芯片外部。通过在 $X$ 、 $Y$ 方向的梳齿驱动器上施加一定的偏压信号,支撑平台能够进行 $X$ 、 $Y$ 平面全覆盖的扫描运动。

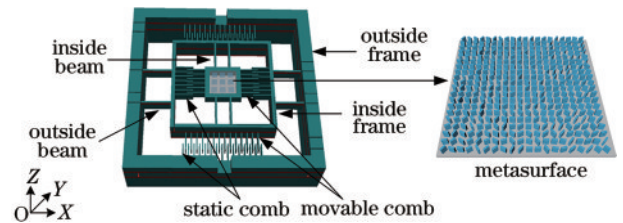


图2 基于MEMS的超表面成像结构示意图

Fig. 2 Structure of metasurface imaging based on MEMS

准直光源照射至超表面,通过施加一定的电压信号, $X$ 、 $Y$ 平台产生一定形式的运动,依照时间序列,将超表面结构依次与光源耦合,直至完成阵列全部单元的扫描。位于 $X$ 、 $Y$ 扫描平台中心的超表面结构阵列的组成单元为离散的二维层析全息像对应的超表面结构。所有单元采用几何相位原理设计,由多个纳米矩

形介质柱状结构单元组成,这些纳米柱结构能够周期性排列,提供与之空间位置相对应的几何相位。为了尽量抑制高阶衍射级次,使单元结构周期小于自由空间传输的最小波长,确保纳米柱旋转过程中的偏振敏感特性。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 单元几何相位调制模拟

使用 FDTD 仿真软件对几何相位单元的相位特性进行模拟。入射光为左旋圆偏振光,波长为 650 nm。对不同长度和宽度的矩形进行扫描,得到不同尺寸下的偏振转换效率,如图 3 所示,从中选取转换效率较高的作为几何单元的长宽参数。图 4 为选取的几何单元结构示意图,采用 SiO<sub>2</sub> 作为基底,纳米柱材料为 TiO<sub>2</sub>,周期  $P=400$  nm,纳米柱高度  $H=600$  nm,长度  $L=380$  nm,宽度  $W=110$  nm。图 5 为 FDTD 仿真得到的相位随单元方位角的变化曲线和偏振转换效率曲线。结果表明,所设计的纳米柱单元实现了 0°~360° 的相位覆盖,与几何相位理论一致。相位变化主要由方位角决定,满足实现全息二维图像的目标相位,所设计结构满足纯相位全息图的调制要求。

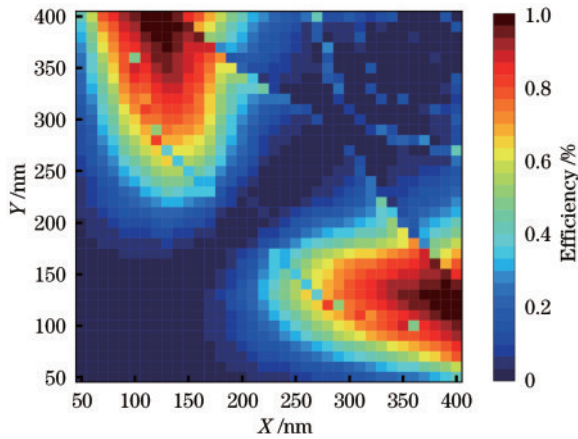


图 3 偏振转换效率

Fig. 3 Polarization conversion efficiency

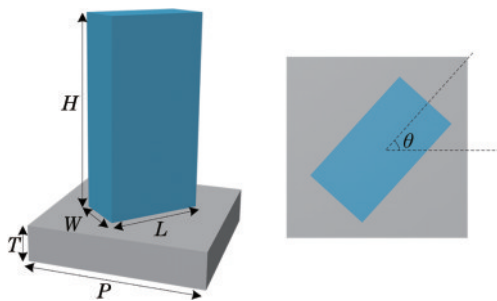


图 4 几何相位超表面单元

Fig. 4 Pancharatnam-Berry (PB) phase metasurface element

#### 3.2 MEMS 片上超表面三维层析全息成像仿真

选取一个五角星三维物体为模型,开展三维层析全息像的仿真。首先,目标图形五角星被分解成平行

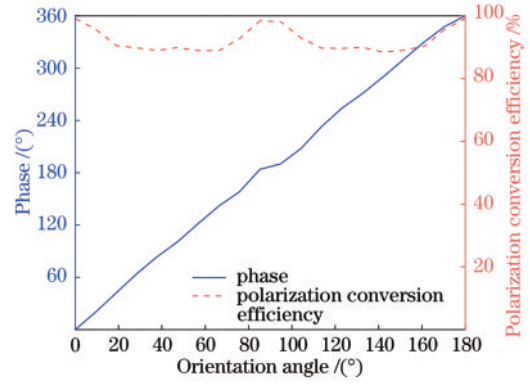


图 5 几何相位纳米柱相位与偏振转换效率

Fig. 5 Phase of PB phase nanocolumn and polarization conversion efficiency

的平面切片,它们之间的间隔相等,经计算机处理后,获得模型的多个单层光场二维像;然后,通过 GS 算法获得图像的相位信息,进行超表面单元的几何相位结构设计,对二维光场平面图进行傅里叶变化获得单层二维全息图像单元的相位值;通过 Matlab 软件进行相位的辅助编码,将透镜相位与全息相位相叠加,将预设全息面相位离散为合适的数量后,对应相位转换为该点的单元结构的取向角,建立了基于几何相位原理的二维超表面结构;在左旋圆偏振光的照射下获得了二维全息平面像,形成按深度方向离散的多层二维全息像;最终,在 MEMS 扫描平台上施加一定的电压信号,依照时间序列,实现多层超表面结构与光源的耦合,依次获得按空间序列排列的全息平面像。五角星图案在轴向上延伸 180  $\mu\text{m}$ ,展示了一个由 9 个五角星的二维全息图组成的投影实心五角星,间隔 20  $\mu\text{m}$ ,实现了三维显示和沿 Z 方向的连续深度重建。

在 MEMS 二维扫描平台中心,构成超表面结构阵列的单层超表面结构单元尺寸为 60  $\mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ ,间隔为 10  $\mu\text{m}$ ,由此, MEMS 二维扫描平台沿 X、Y 向均需 70  $\mu\text{m}$  位移。MEMS 驱动器的梳齿间隙设计为 3  $\mu\text{m}$ ,梳齿的宽度设计为 3  $\mu\text{m}$ ,长度设计为 200  $\mu\text{m}$ ,动、静齿交叠长度 20  $\mu\text{m}$ ,悬臂梁的长度为 800  $\mu\text{m}$ ,宽度为 3  $\mu\text{m}$ ,整体的驱动器结构的厚度为 70  $\mu\text{m}$ 。

采用 ANSYS 有限元软件对所建立的模型进行仿真,为提高仿真效率,简化计算,采用等效质量块的方式对梳齿部分进行等效建模。施加 75 V 驱动电压后所获得的二维扫描平台位移如图 6 所示。结果表明, MEMS 平台沿 X 方向的位移为 69.8  $\mu\text{m}$ , Y 向的位移为 69.9  $\mu\text{m}$ ,与设计的最小误差仅有 0.2  $\mu\text{m}$ ,可以满足设计要求。MEMS 二维扫描平台在施加驱动信号后的显示如图 7 所示,依照时间和空间序列,深度方向多个超表面结构与入射光耦合。

由透射光产生多个二维全息图,所设计的单层超表面几何相位考虑了每层沿厚度方向由空间序列带来的相位修正值,9 幅图按空间序列排布,仿真结果如

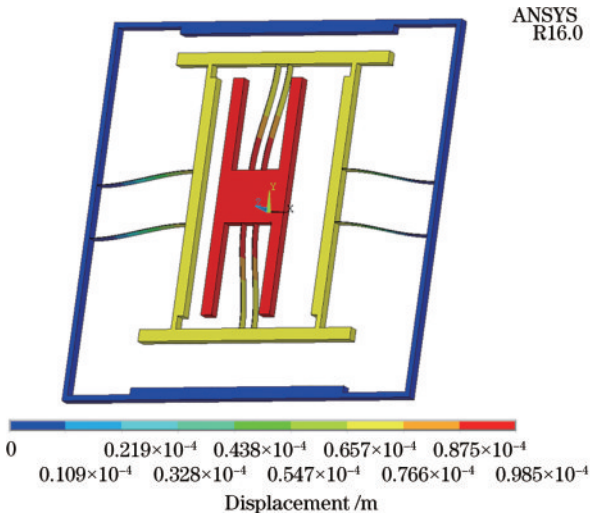


图 6 MEMS 驱动器仿真位移

Fig. 6 Simulation displacement of MEMS driver

图 8 所示。超表面阵列对应 9 幅二维平面全息图, 与原图相比, 在每幅图焦距的对应处有较高的恢复度, 二维全息图的间距如设计一样, 在  $160\ \mu\text{m}$  和  $320\ \mu\text{m}$  之间等间隔  $20\ \mu\text{m}$  排开。二维平台对各层的扫描速度决定了三维显示的帧率。采用 ANSYS 对所设计结构的瞬态响应特性进行了模拟, 结果如图 9 所示。从图 9 能够看到 MEMS 二维扫描平台的响应时间为  $1.8\ \text{ms}$ , 具有较快的响应特性。通过控制电压驻留时间间隔, 便可以完成对整个超表面阵列的扫描, 总的扫描周期为

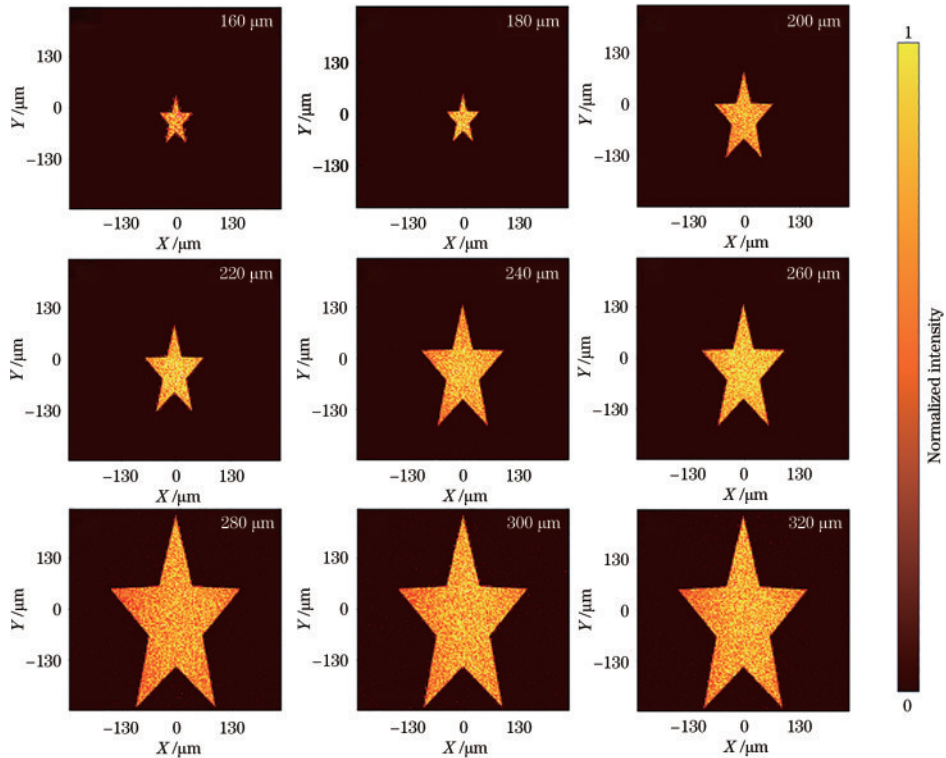


图 8 不同距离上叠加对应透镜相位的模拟全息重构图

Fig. 8 Analog holographic recombination superimposed at different distances corresponding to the phase of the lens

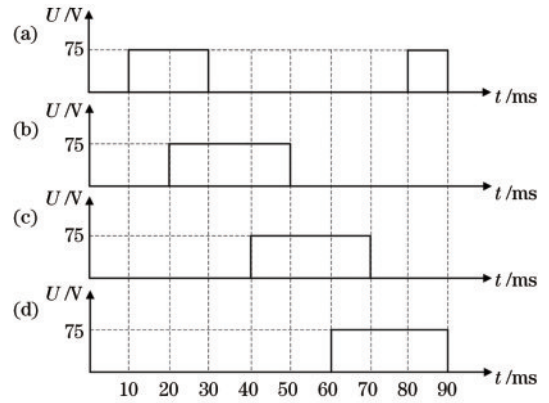


图 7 梳齿电压信号随时间的变化。(a)内框右侧梳齿;(b)外框上侧梳齿;(c)内框左侧梳齿;(d)外框下侧梳齿

Fig. 7 Comb voltage signal variation over time. (a) Inner frame right side comb; (b) outer frame upper side comb; (c) inner frame left side comb; (d) outer frame lower side comb

$0.09\ \text{s}$ , 该值小于人眼视觉暂留时间。因此, 本文所设计的片上扫描结构能够在人眼视觉暂留时间内构建三维全息立体像, 成像帧率达到  $11\ \text{frame/s}$ , 所形成的单层全息图的峰值信噪比均高于  $20\ \text{dB}$ ; 与其他切片方法相比, 每一层的单独设计有着更多的能量利用率。按时间序列, 在二维扫描平台上施加周期性电压信号, 即可实现二维全息像按空间序列的周期性叠加, 从而显示三维像。整个片上结构光耦合成像示意图如图 10 所示。

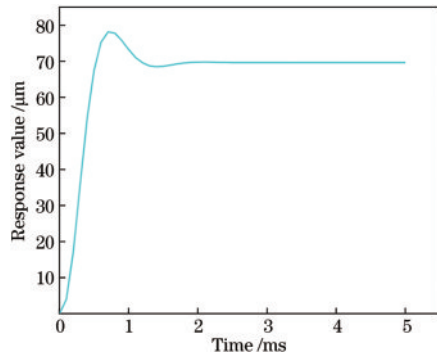


图9 MEMS驱动器瞬态响应时间

Fig. 9 Transient response time of MEMS driver

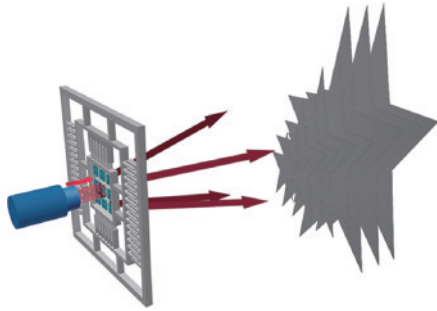


图10 二维全息像叠加示意图

Fig. 10 Schematic of 2D holograms stacking

## 4 结 论

提出了一种基于MEMS驱动的超表面三维显示技术方案,采用MEMS二维平面扫描平台,形成快于人眼视觉暂留时间的三维显示。将三维物体离散为多个单层二维图像,采用GS算法对二维图像进行点采样,获取单层二维全息像的相位值用于几何超表面单元的排布,通过空间和时间序列,由离散的多层二维全息像形成三维显示。结果表明,所获得的二维全息像峰值信噪比大于20 dB,三维显示帧率达11 frame/s,为三维显示提供了芯片级结构设计理论和模型。

### 参 考 文 献

- [1] Xu L, Bai L, Li L. The effect of 3D image virtual reconstruction based on visual communication[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 2022: 6404493.
- [2] Yan L, Dwiggin C W, Gupta U, et al. A rapid-patterning 3D vessel-on-chip for imaging and quantitatively analyzing cell-cell junction phenotypes[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(9): 1080.
- [3] Lü Z L, Li J N, Yang Y, et al. 3D head-up display with a multiple extended depth of field based on integral imaging and holographic optical elements[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 964-975.
- [4] Kim S J, Kim C, Kim Y, et al. Dielectric metalens: properties and three-dimensional imaging applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(13): 4584.

- [5] Yang H, Li G H, Su X F, et al. Reflective metalens with sub-diffraction-limited and multifunctional focusing [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 12632.
- [6] Vabishchevich P, Kivshar Y. Nonlinear photonics with metasurfaces[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(2): B50-B64.
- [7] Zhao H, Wang X K, Liu S T, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(2): 220012.
- [8] You J W, Lan Z, Ma Q, et al. Topological metasurface: from passive toward active and beyond nonlinear photonics with metasurfaces quantum metasurface holography [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(3): B65-B102.
- [9] Yang J Z, Zhao R Z, Meng Z, et al. Quantum metasurface holography[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): 2607-2613.
- [10] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10: 308-312.
- [11] Burch J, Wen D D, Chen X Z, et al. Conformable holographic metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4520.
- [12] Gao H, Wang Y X, Fan X H, et al. Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate[J]. *Science Advances*, 2020, 6(28): eaba8595.
- [13] Hu Y Q, Luo X H, Chen Y Q, et al. 3D-Integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 86.
- [14] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [15] Wei Q S, Huang L L, Li X W, et al. Broadband multiplane holography based on plasmonic metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(18): 1700434.
- [16] Li X, Chen Q M, Zhang X, et al. Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(8): 220060.
- [17] Chen C, Song W G, Chen J W, et al. Spectral tomographic imaging with aplanatic metalens[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 99.
- [18] Roy T, Zhang S Y, Jung I W, et al. Dynamic metasurface lens based on MEMS technology[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(2): 021302.
- [19] Han Z Y, Colburn S, Majumdar A, et al. MEMS-actuated metasurface Alvarez lens[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6: 79.
- [20] Li Z L, Kim I, Zhang L, et al. Dielectric meta-holograms enabled with dual magnetic resonances in visible light[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 9382-9389.
- [21] Shen C, Xu R L, Sun J L, et al. Metasurface-based holographic display with all-dielectric meta-axilens[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(5): 4600105.
- [22] Wang Q, Wang W M, Zhuang X Y, et al. Development of an electrostatic comb-driven MEMS scanning mirror for two-dimensional raster scanning[J]. *Micromachines*, 2021, 12(4): 378.