

doi: 10.3788/gzxb20144305.0509002

可编程菲涅耳相位透镜应用于多平面全息投影

沈川, 刘凯峰, 张成, 程鸿, 韦穗

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘 要:研究了基于菲涅耳相位透镜实现多平面全息投影的方法,采用硅基液晶相位调制器建立了多平面全息投影系统.首先,利用可编程菲涅耳相位透镜代替傅里叶透镜,将计算机生成的相位全息图与菲涅耳透镜的相位结合;其次,基于时分复用和空分复用原理提出了加载菲涅耳相位透镜与相位全息图到相位空间光调制器上的两种方法;最后,讨论了在多平面全息投影中每个单一平面实现旋转物体动态 360° 视角显示的方法.实验结果表明:在距离硅基液晶分别为 500、800、1 100 和 1 400 mm 处的四个重构平面可以获得全息投影图像;通过动态地改变菲涅耳相位透镜的焦距,可以实现多平面全息投影.

关键词:信息光学;全息显示;傅里叶变换;菲涅耳相位透镜;空间光调制器;相位全息图;硅基液晶

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0509002-8

Multi-plane Holographic Projection Using Programmable Fresnel Phase Lenses

SHEN Chuan, LIU Kai-feng, ZHANG Cheng, CHENG Hong, WEI Sui

(Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: A method to achieve multi-plane holographic projection using programmable Fresnel phase lenses was investigated. A multi-plane holographic projection system was developed with liquid crystal on silicon phase modulator. First, the programmable Fresnel phase lenses were substituted for the Fourier lens, in addition, the phase of Fresnel phase lenses were added to the computer generated phase holograms. Then based on the principles of time division multiplexing and space division multiplexing, two different methods combined programmable Fresnel phase lenses and phase holograms displayed on a phase modulating spatial light modulator were presented. Finally, the method to acquire dynamic 360° viewing-angle images corresponding to the object rotation in each image plane of multi-plane holographic projection was discussed. Experimental results show that holographic projection images could be recorded at different distances such as 500, 800, 1 100 and 1 400 mm from the LCOS. Dynamically change the focal length offered by the programmable Fresnel phase lenses, multi-plane holographic projection could be performed.

Key words: Information optics; Holographic displays; Fourier transform; Fresnel phase lenses; Spatial light modulators; Phase hologram; Liquid crystal on silicon

OCIS Codes: 090.2870; 090.1760; 070.6120; 050.1940

0 引言

投影系统的核心装置是空间光调制器(Spatial light modulator, SLM). SLM通过改变波阵面的振幅、相位、偏振等,实现对波阵面动态实时调制.传统投影

系统是基于振幅调制的 SLM 来实现二维图像显示;而全息投影技术是基于标量衍射理论形成二维图像,采用相位调制 SLM 对入射光进行调制^[1-2],相对于振幅调制器的调制具有更高的衍射效率.多平面成像作为一种显示手段,能够给观察者带来明显的深度体验,

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61377006, 61301296, 61201396)、NSFC-广东联合基金(No. U1201255)和博士学科点专项科研基金(No. 20113401130001)资助

第一作者:沈川(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为全息显示技术. Email: shenchuan2502@163.com

导师(通讯作者):韦穗(1946-),女,教授,博导,主要研究方向为计算视觉及全息显示技术. Email: swei@ahu.edu.cn

收稿日期:2013-12-05; **录用日期:**2014-03-17

<http://www.photon.ac.cn>

具有一定的研究意义. Sypek M 等^[3-4] 提出将多平面强度信息编码到单一全息图的迭代方法, 并讨论了验证该全息图光学性质的实验方法. 在此基础上, Ying C F 等^[5] 通过结合 GS 迭代算法和补偿迭代算法, 提出基于单平面相位全息图实现两平面图像显示的方法. Dorsch R G 等^[6] 提出菲涅耳迭代算法, 由目标图像提供振幅约束进行菲涅耳迭代传播, 实现多平面图像的重构显示. Gulses A A 等^[7-8] 研究了基于级联的相位元件实现多平面显示的方法, 可以通过增加全息图的数量提高重构图像质量. 郑华东等^[9] 研究了包括层析法在内的三维物体空间再现技术中的全息图计算问题. 梁艳明等^[10] 利用发光材料和三维 GS 迭代算法研究了全息多平面图像的构建和可视化问题. 马建设等^[11] 论述了层析法作为一种三维物体计算全息图的实现方法. 刘凯峰等^[12] 研究了一种生成纯相位菲涅耳全息图的反馈迭代算法, 并建立了相应的全息显示光电系统.

衍射光学元件 (Diffractive Optical Elements, DOE) 广泛应用于光互连^[13]、光镊^[14]、光束整形^[15]、彩色全息显示^[16] 等领域. DOE 与动态调制器技术相结合使得其在控制光的波阵面方面具有更强的灵活性. 菲涅耳相位透镜作为一种 DOE, 理论上它仅能改变波阵面的相位而不能改变振幅. 电寻址的液晶 SLM 能够用于产生可编程菲涅耳相位透镜^[17], 通过编码相应的相位函数到液晶 SLM, 可以动态地改变菲涅耳相位透镜的焦距. 文献 [18-20] 对可编程菲涅耳相位透镜的特性开展了研究. 本文将菲涅耳相位透镜应用于多平面全息投影中, 分析了全息投影系统中傅里叶透镜的作用, 利用相位调制 SLM 可编程的特点, 将计算得到的相位全息图与菲涅耳透镜的相位结合. 采用菲涅耳相位透镜代替傅里叶透镜, 动态地改变菲涅耳相位透镜的焦距, 实现了多平面全息投影. 提出两种编码菲涅耳相位透镜到 SLM 上的实现方法, 并给出了相应的实验结果. 最后研究了在多平面全息投影中每个单一平面实现动态 360° 视角全息投影的方法.

1 全息投影的基本原理

全息投影技术是基于衍射传播形成所需的 2D 图像. 在夫琅禾费近似条件下, 成像平面的场分布 $U(x, y)$ 与全息图 $U(u, v)$ 的关系为

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2) \right] \iint_{-\infty}^{\infty} U(u, v) \cdot \exp \left[\frac{-i2\pi}{\lambda z} (xu + yv) \right] dudv \quad (1)$$

一个典型全息投影系统的基本原理^[21] 如图 1 (为了方便说明, 图中采用了透射型 SLM). 计算得到的全息图加载到 SLM 上, SLM 被准直激光照明. 系统在

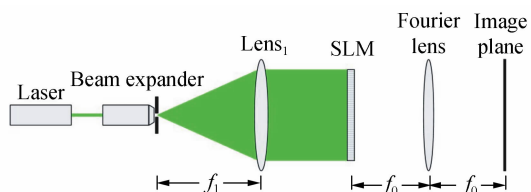


图 1 全息投影系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of holographic projection system SLM 后面引入了傅里叶透镜, 当两者的距离等于傅里叶透镜的焦距时, 在傅里叶透镜后焦面的成像平面与 SLM 所在的平面满足准确的傅里叶变换关系. 此时, 成像平面的场分布与 SLM 透过率函数的关系为

$$U(x, y) = \mathfrak{F}\{U(u, v)\} \quad (2)$$

式中, \mathfrak{F} 表示傅里叶变换.

全息投影系统的核心器件是实现入射光场调制的 SLM. 考虑一个具有二维离散像素结构的 SLM, 其单个正方形像素的边长定义为 d , 像素间距为 Δd , 像素数为 $M \times N$, 填充率定义为 $\eta = (d/\Delta d)^2$, 计算的相位全息图加载至像素的活动区, 其透过率函数的表达式为^[22-23]

$$t(u, v) = a(u, v) \left\{ \text{rect} \left(\frac{u}{d}, \frac{v}{d} \right) \otimes q(u, v) \right\} \quad (3)$$

式中

$$a(u, v) = \text{rect} \left(\frac{u}{M\Delta d}, \frac{v}{N\Delta d} \right) \quad (4)$$

$$q(u, v) = \exp \left[i\varphi \sum_{m,n=0}^{M-1,N-1} \delta(u - m\Delta d, v - n\Delta d) \right] \quad (5)$$

φ 为加载到 SLM 像素活动区上的相位分布, \otimes 表示卷积运算. 式(3)表示当编码相位全息图到 SLM 上时, 透过率函数受到 SLM 离散像素结构的影响. 首先, SLM 的像素间距决定了采样间隔的大小. 其次, 经过采样的相位函数与 SLM 的单个像素形状函数进行卷积. 最后, 尺寸有限的 SLM 决定了相位全息图函数是空间受限的.

本文关注的是远场衍射特性, 将透过率函数 $t(u, v)$ 带入式(2)可以得到成像平面最终的场分布, SLM 的像素特征形成了一个周期的振幅网格状结构, 类似二维振幅光栅, 当采用准直光照明时, 最终的衍射样为正交的二维点阵结构, 多级全息重构像的能量分布受 SLM 单个像素衍射因子的调制.

2 可编程菲涅耳相位透镜

如图 1 所示, 在 SLM 后面引入一个傅里叶透镜来实现 SLM 透过率函数的傅里叶变换, 透镜在忽略相位因子的情况下, 其相位变换作用可以表示为

$$s(u, v) = P(u, v) \exp \left\{ -\frac{i\pi}{\lambda f} (u^2 + v^2) \right\} \quad (6)$$

式中, λ 表示波长, f 表示透镜的焦距. $P(u, v)$ 表示透镜的光瞳函数, 忽略透镜尺寸的影响, 设定 $P(u, v) = 1$.

将透镜看作一种衍射光学元件,为了实现可编程性,菲涅耳透镜将透镜的相位编码到纯相位 SLM 上.当加载到 SLM 上的衍射光学元件是一个焦距为 f 的透镜时,定义相位函数为

$$h(u, v) = -\frac{\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2) \quad (7)$$

随着焦距减小,菲涅耳透镜包含更高的空间频率,但是 SLM 的自身特性限制了它表示空间频率的能力.由第 1 节分析可知,本文考虑一个具有有限填充率 ($\gamma < 1$) 的 SLM,那么编码菲涅耳相位透镜的空间频率可表示为

$$\begin{cases} \xi_x = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial h}{\partial u} = \frac{1}{\lambda f} u \\ \xi_y = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial h}{\partial v} = \frac{1}{\lambda f} v \end{cases} \quad (8)$$

以中心点为原点,SLM 在 x 方向和 y 方向的最大坐标值分别为: $|(M\Delta d)/2|$ 和 $|(N\Delta d)/2|$,则编码在 SLM 上的菲涅耳相位透镜的最高空间频率为

$$\begin{cases} \xi_{x\max} = \frac{M\Delta d}{2\lambda f} \\ \xi_{y\max} = \frac{N\Delta d}{2\lambda f} \end{cases} \quad (9)$$

根据奈奎斯特采样定理,在 SLM 的像素数和像素间距确定的情况下,菲涅耳相位透镜的焦距 f 在设计时应该满足 $f \geq f_r$ [24],即

$$f_r = \frac{\max(M, N) \Delta d^2}{\lambda} \quad (10)$$

在此条件下,不会产生多级焦点的现象,并可以通过动态实时改变焦距值,实现可编程的菲涅耳相位透镜.

3 多平面全息投影的实现

采用菲涅耳相位透镜代替傅里叶透镜,将计算得到的全息图相位与菲涅耳透镜相位叠加后加载到 SLM 上,根据菲涅耳衍射公式,在距离 SLM 后方 f 处的复振幅分布为 [25]

$$\begin{aligned} U_f(x, y) &= \frac{e^{ikf}}{i\lambda f} \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2) \right] \cdot \\ &\iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ U(u, v) s(u, v) \exp \left[\frac{ik}{2f} (u^2 + v^2) \right] \right\} \cdot \\ &\exp \left[\frac{-i2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dudv \end{aligned} \quad (11)$$

将式(6)带入式(11),被积函数中二次相位因子相互抵消,得

$$\begin{aligned} U_f(x, y) &= \frac{e^{ikf}}{i\lambda f} \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2) \right] \cdot \\ &\iint_{-\infty}^{\infty} \{ U(u, v) \} \exp \left[\frac{-i2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dudv \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)与式(1)保持一致,即可在菲涅耳相位透镜的焦点所在平面实现全息投影.本文基于空分复用和时分复用的原理分别提出了两种多平面全息投影的实

现方法.

首先,根据空分复用原理,将 SLM 划分为四个区域,图 2(a)分别对应四个设置了不同投影距离 d_i ($i=1, 2, 3, 4$) 的重构平面.采用 GS 算法 [26] 计算四幅子相位全息图.将待投影的图像作为初始振幅,生成的随机相位作为初始相位,把它们作为输入条件代入算法进行迭代,当迭代终止时将得到的相位分布进行编码生成相位全息图.不同焦距 f_i ($i=1, 2, 3, 4$) 的菲涅耳相位透镜,分别与相位全息图进行叠加,得到新的相位分布为

$$\varphi_{\text{final}} = \varphi + \left[-\frac{\pi}{\lambda f_i} (u^2 + v^2) \right] \quad (13)$$

最后将四幅子图合成为一幅全息图直接加载至 SLM 上,当采用准直激光照明时,可以实现在不同平面的全息投影.其次,根据时分复用原理,如图 2(b)所示,仍然设定四个不同投影距离的重构平面,但是 SLM 不再被划分为多个区域,只需要将不同焦距 f_i ($i=1, 2, 3, 4$) 的菲涅耳相位透镜依次与相位全息图进行叠加,时序加载至 SLM 上.

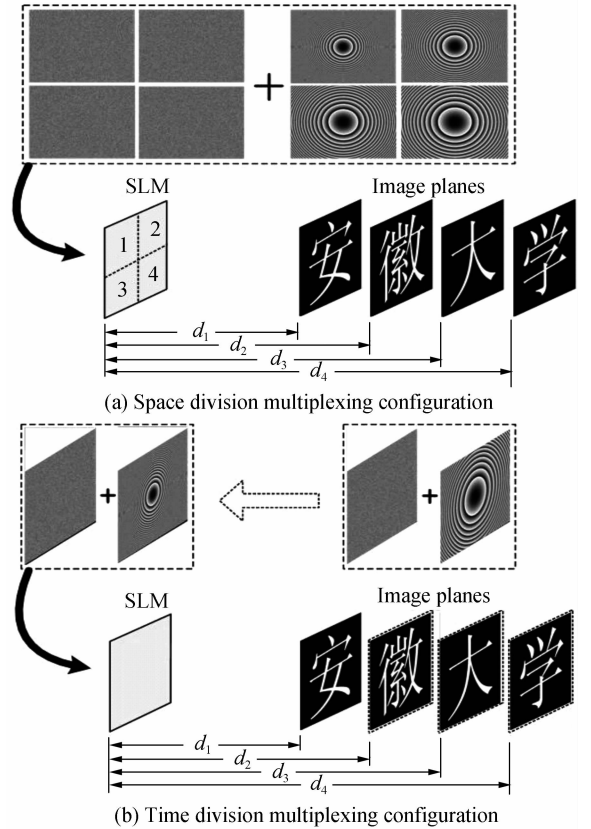


图 2 多平面全息投影示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-plane holographic projection. 全息再现像的重构质量可以由均方根误差 RMS_error 进行评价,即

$$\text{RMS_error} = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} [|P(x,y)| - |I(x,y)|]^2}{M \times N}} \quad (14)$$

式中, $|P(x,y)|$ 表示为重构图像的振幅分布,

$|I(x, y)|$ 表示为原始图像的振幅分布, 图像的像素分辨率为 $M \times N$.

需要指出的是, 两种方法各有利弊, 基于空分复用原理的方法降低了单个全息图的分辨率, 分层越多, 则单一全息图的像素数越少. 为了保证投影的成像质量, 需要选用更高分辨率的 SLM 器件以及设定合理的重构平面数目. 基于时分复用原理的方法对于 SLM 的响应速度提出了更高的要求, 而且采用该方法在同一时间只能在单个重构平面投影成像, 为了同时观察到多平面的投影像, 可以利用人眼的视觉滞留特性, 但是需要设计特定的屏幕以及相应的控制全息图同步加载的器件.

为了进一步实现动态全息显示的效果, 本文研究了在单个重构平面上基于图像序列实现物体 360° 视角动态全息显示的方法. 首先需要获取待投影物体 360° 视角图片, 如图 3 所示. 具体方法为: 将目标物体放在一个圆形托盘上, 固定照相机位置, 转动圆形托盘, 每隔一定角度 α 拍摄一幅原始物体的图片, 直到圆形托盘转动一圈为止. 然后, 采用 GS 算法计算 360° 视角图片对应的全息图, 因为利用菲涅耳相位透镜, 所以可以实现多个平面重构. 与此同时, 在每个重构平面, 通过时序的播放 360° 视角图片对应的全息图, 可以实现动态效果.

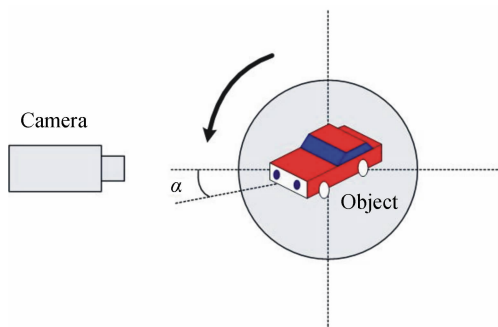


图 3 旋转物体获取 360° 视角图片

Fig. 3 360° viewing-angle images acquired during the object rotation

4 实验结果

本文选用硅基液晶 (Liquid Crystal on Silicon, LCOS) 器件作为液晶 SLM, 其嫁接了平板显示技术与硅芯片技术. 在制作过程中, 将传统液晶器件的玻璃基板换成单晶硅基板, 并且进一步减小器件的体积, 增加

器件的集成度, 具有高分辨率以及更高的填充因子等诸多优势^[27]. 因为 LCOS 工作在反射模式, 所以最终的实验原理图见图 4. 实验时采用绿激光器作为光源, 波长 $\lambda = 532.8 \text{ nm}$, 利用 LCOS 器件的相位调制特性, LCOS (Three-Five systems, MD1280) 的像素间距为 $12 \mu\text{m}$, 像素数为 1280×1024 , 填充率为 87% .

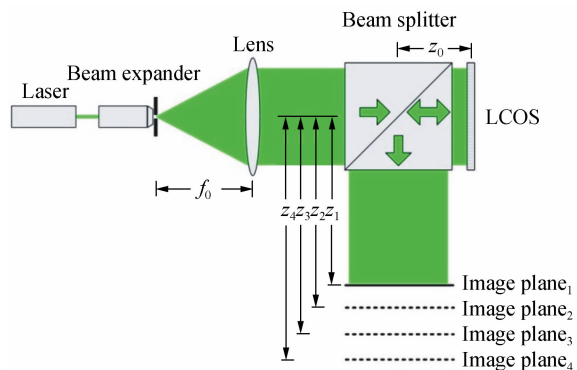


图 4 基于 LCOS 的多平面全息投影系统

Fig. 4 Scheme of multi-plane holographic projection system based on LCOS

4.1 多平面全息投影实验

实验时, 选取“安”、“徽”、“大”、“学”四个汉字作为原始目标图片, 设定它们分别位于距离 LCOS 500 mm、800 mm、1100 mm 和 1400 mm 处的四个重构平面. 将 LCOS 面板均分为四个部分, 由于 LCOS 的像素数决定全息图的像素数, 所以每幅子全息图的尺寸取 640×512 . 采用 GS 算法计算得到相位全息图, 按式 (7) 生成相应菲涅耳透镜的相位函数 (菲涅耳相位透镜的最小焦距 $f_r \approx 173 \text{ mm}$), 透镜焦距分别 $f_1 = 500 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 800 \text{ mm}$ 、 $f_3 = 1100 \text{ mm}$ 、 $f_4 = 1400 \text{ mm}$, 与图 4 中标注的重构距离满足

$$f_i = z_0 + z_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (15)$$

式中, $z_0 = 40 \text{ mm}$. 将四个相位函数分别与子全息图的相位分布进行叠加, 因为 LCOS 的最大相位调制量为 2π , 所以将叠加后的相位进行处理.

$$\varphi_{\text{final}} = \text{mod}(\varphi_{\text{final}}, 2\pi) \quad (16)$$

式中, mod 表示取余运算. 将得到的最终合成相位全息图加载到 LCOS 上, 将接收屏放置在图 4 所示位置, 相应的重构图像如图 5.

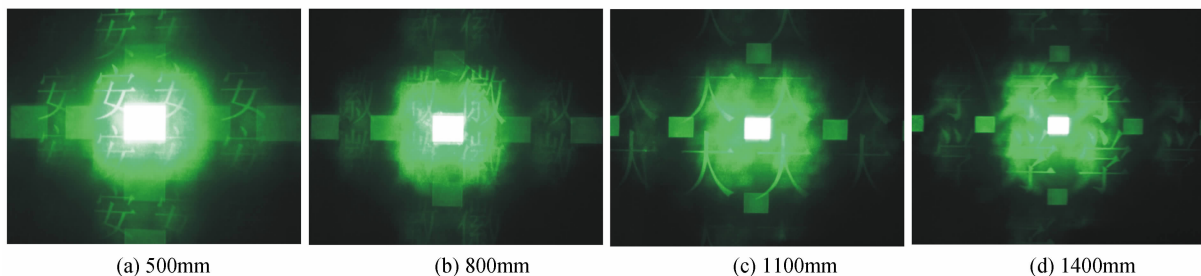


图 5 基于空分复用配置的全息投影结果图

Fig. 5 Holographic images captured on different planes with space division multiplexing configuration

实验时选取同样的原始图片以及设定同样的重构距离.此时每幅相位全息图的尺寸为 $1\ 280 \times 1\ 024$,加载不同焦距 $f_1=500\text{ mm}$ 、 $f_2=800\text{ mm}$ 、 $f_3=1\ 100\text{ mm}$ 、

$f_4=1\ 400\text{ mm}$ 的菲涅耳相位透镜到四幅相位全息图上,按式(16)进行处理,将最终得到的全息图时序地加载到 LCOS 上,重构结果如图 6.

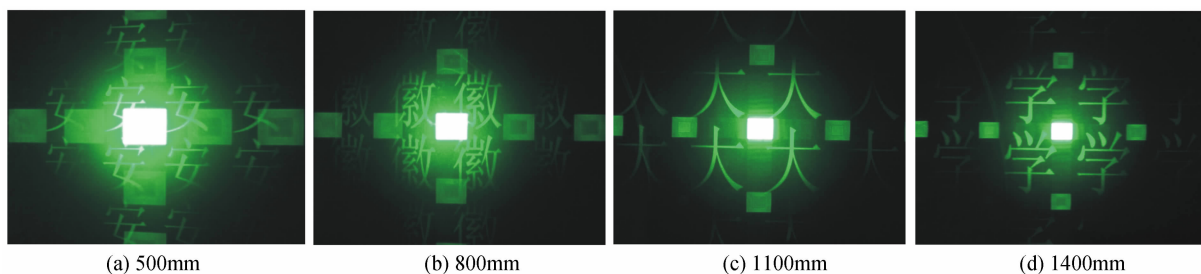


图 6 基于时分复用配置的不同平面全息投影结果

Fig. 6 Holographic images captured on different planes with time division multiplexing configuration

为了评估全息重构的质量,分别计算采用空分复用方法和时分复用方法对“安”、“徽”、“大”、“学”四个汉字进行全息重构的均方根误差,数值见表 1.

表 1 两种重构方法的均方根误差

Table 1 RMS Errors for both reconstruction methods

	Space division multiplexing configuration	Time division multiplexing configuration
$d_1=500\text{ mm}$	0.225 8	0.086 4
$d_2=800\text{ mm}$	0.233 6	0.106 0
$d_3=1\ 100\text{ mm}$	0.191 2	0.075 5
$d_4=1\ 400\text{ mm}$	0.197 9	0.086 1

分析发现,对于基于空分复用的方法,可以同时四个成像平面观察到四幅重构图像.虽然每个子全息图相互独立,但是在重构时相邻重构平面之间的重构图像存在一定的串扰现象.而基于时分复用的方法,在观察不同平面的重构图像时需要切换全息图,但是在相同的重构平面处,基于时分复用方法的全息投影质量更好.

根据标量衍射理论,全息投影图像横向和纵向上的像素间隔表示为

$$\begin{cases} \theta_u = \frac{\lambda f_i}{M \Delta d} \\ \theta_v = \frac{\lambda f_i}{N \Delta d} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知,重构图像的像素间隔主要由波长 λ 、重构距离(等于菲涅耳相位透镜的焦距 f_i)、全息图的像素数 $M \times N$ 、以及 SLM 的像素间距 Δd 决定.在同一重构平面(以 500 mm 为例),采用空分复用方法得到投影图像的横向和纵向像素间隔为 $34.68\ \mu\text{m}$ 和 $43.36\ \mu\text{m}$,采用时分复用方法得到投影图像的横向和纵向像素间隔为 $17.34\ \mu\text{m}$ 和 $21.68\ \mu\text{m}$,两者在对应方向上的比例关系为 2:1.

根据奈奎斯特采样定理,在时域(全息图)或频域(重构图样)重建一个信号所需的采样数是相同的.重构的图像和相位全息图具有相同数目的像素数^[26].实

验中,空分复用方法重构的图像分辨率为 640×512 ,采用时分复用方法重构的图像分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,两者的比例关系为 1:2.

需要指出的是,本文的全息投影基于光场的衍射传播得到,全息投影图像的尺寸为

$$L = f_i \tan[\arcsin(\lambda/\Delta d)] \quad (18)$$

当 $\lambda/\Delta d$ 的值较小时,式(18)可近似为 $L = \lambda f_i/\Delta d$.因此,当 λ 和 Δd 的值确定时,图 5 和图 6 中在四个不同 f_i 重构平面的图像尺寸有所不同.

此外,由图 5 和图 6 的重构结果可知,最终的重构图像包含多级衍射图样,即多级全息再现像,以及多级衍射光.其中,衍射图样中心出现的亮斑称为零级光,主要是由像素之间非活动区对入射光的反射或透射造成的.零级光影响了全息再现像的视觉效果并且降低了衍射效率.文献[29]指出零级光的能量分布主要由 SLM 的填充率,像素非活动区的振幅和相位调制量等参量决定.目前已有众多消除零级光干扰的工作,包括引入校正光束与零级光束相互干涉的方法^[30],分离重构图像与零级光位置的方法^[22,29].以上方法有效地利用了电寻址 SLM 的可编程特性,能够达到预期目标,但是在滤除零级光时会一定程度上降低光能利用率.

4.2 多平面旋转显示实验

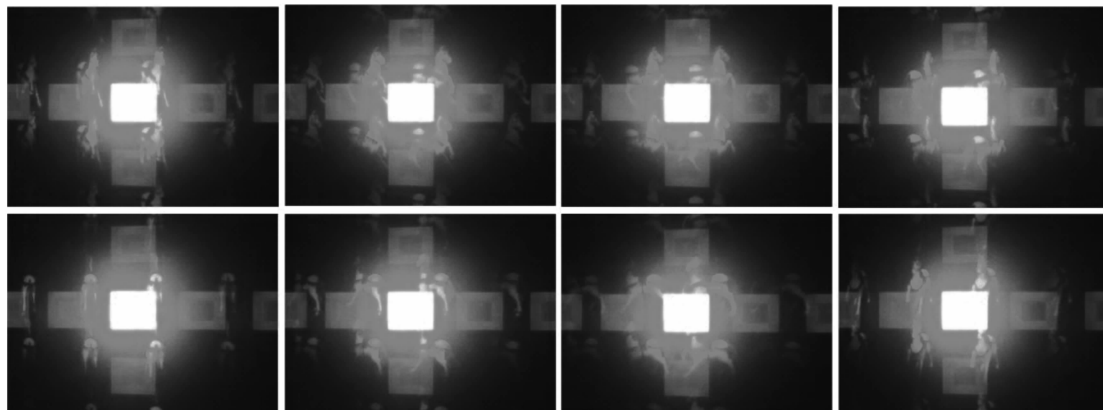
实验从 Amsterdam Library of Object Images (ALOI) 图片库^[31]中获取了四组“horse”、“duck”、“car”、“teapot”物体的 360° 视角图片,如图 7(a)所示(仅给出单帧图片),在获取图片的过程中,圆形托盘每次转动的角度 α 为 5° ,共计 72 张图片.分别计算四组原始物体每张单一视角图片对应的相位全息图,从而可以获得 72 张相位全息图.实验时同样设定四个物体分别位于距离 LCOS 500 mm 、 800 mm 、 1100 mm 、 1400 mm 处的四个重构平面.采用第 4 节中时分复用的方法以一定的速率将这些全息图序列通过计算机按顺序加载到图 4 所示的基于 LCOS 的全息显示系统上,从而在每个单一重构平面上可以得到动态的物体

360°视角重构显示结果,如图 7(b)~7(e),每个物体分别给出了 8 帧不同角度的全息再现结果.实验结果表

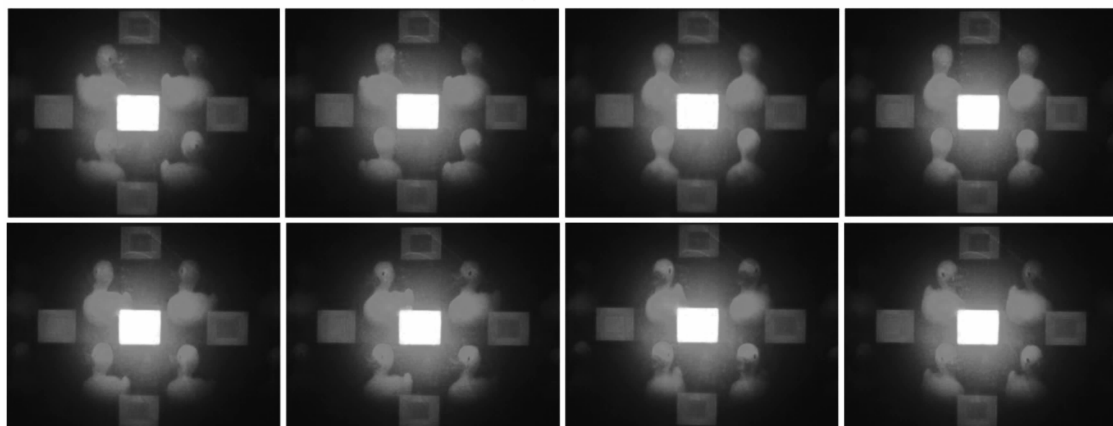
明,通过在每一个重构平面上 360°视角旋转显示,可以实现一定的立体显示效果.



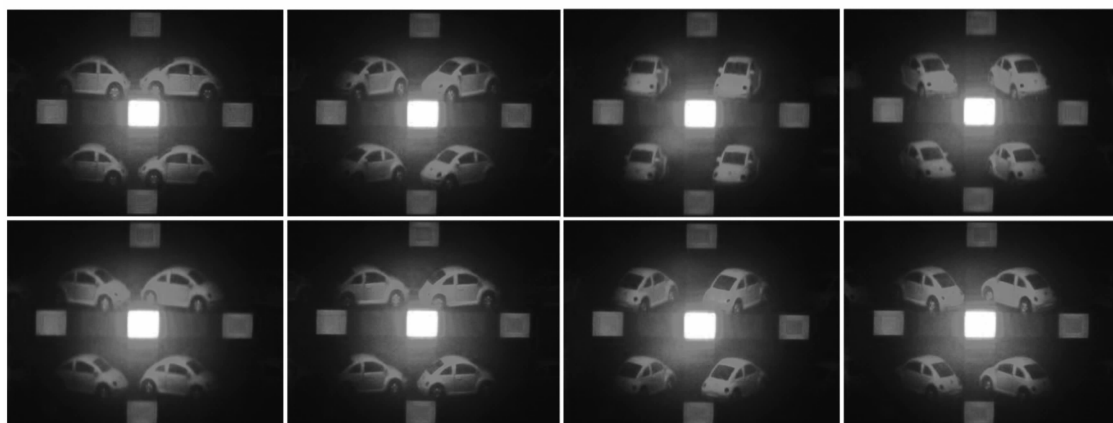
(a) Target images



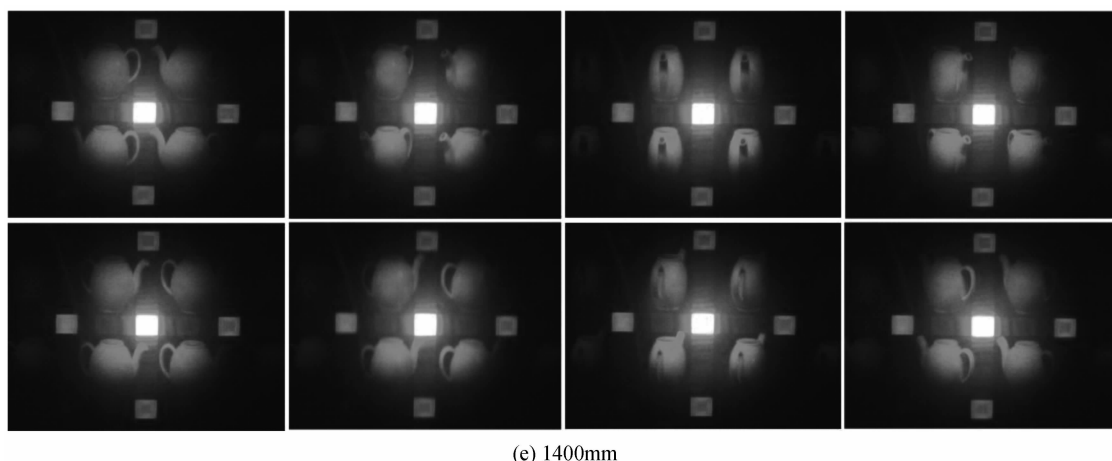
(b) 500mm



(c) 800mm



(d) 1100mm



(e) 1400mm

图7 四个不同距离上的8帧全息再现像

Fig.7 Eight frames of holographic images at four different distances

5 结论

本文分析了编码在SLM上菲涅耳相位透镜的原理,探讨了可编程菲涅耳相位透镜代替傅里叶透镜实现多平面全息投影的可行性,提出两种基于菲涅耳相位透镜实现多平面全息投影,并研究了在单一平面实现动态360°视角全息投影的方法,通过距离LCOS分别为500mm、800mm、1100mm、1400mm的多个平面全息投影的实验验证了本文方法的可行性。

参考文献

- [1] MAKOWSKI M, DUCIN I, KAKARENKO K, *et al.* Simple holographic projection in color[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 25130-25136.
- [2] WANG Tao, YU Ying-jie, ZHENG Hua-dong. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1414-1420.
王涛, 于瀛洁, 郑华东. 彩色全息光电再现倍率色差的消除[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6):1414-1420.
- [3] SYPEK M, KOLODZIEJCZYK A, MIKUL G. Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(12): 125805.
- [4] MAKOWSKI M, SYPEK M, KOLODZIEJCZYK A, *et al.* Iterative design of multiplane holograms: experiments and applications[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(4): 045802.
- [5] YING C F, PANG H, FAN C J, *et al.* New method for the design of a phase-only computer hologram for multiplane reconstruction [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(5): 055802.
- [6] DORSCH R G, LOHMANN A W, SINZINGER S. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(5): 869-875.
- [7] GULSES A A, JENKINS B K. Multi-plane image reconstruction using cascaded phase elements[C]. In *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, Optical Society of America, 2012, DM4C. 2.
- [8] GULSES A A, JENKINS B K. Cascaded diffractive optical elements for improved multiplane image reconstruction [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(15): 3608-3616.
- [9] ZHENG Hua-dong, YU Ying-jie, CHENG Wei-ming. Computer-generated hologram calculation for spatial reconstruction of three-dimensional object [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 917-924.
- [10] LIANG Yan-ming, ZHANG Pei-qing, GUAN Ye-feng, *et al.* Reconstruction and visualization of multi-plane images based on spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1820-1824.
梁艳明, 张培晴, 关烨锋, 等. 基于空间光调制器的多层图像的构建与可视化[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1820-1824.
- [11] MA Jian-she, XIA Fei-peng, SU Ping, *et al.* Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(5): 1141-1152.
马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术与系统综述[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(5): 1141-1152.
- [12] LIU Kai-feng, SHEN Chuan, ZHANG Cheng, *et al.* Iterative feedback algorithm for phase-only fresnelhologram and display using liquid crystal on silicon [J/OL]. *Acta Photonica Sinica*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.O4.20131213.1123.003.html>.
- [13] NIEUBOR N, PANAJOTOV K, GOULET A, *et al.* Data transparent reconfigurable optical interconnections based on polarization-switching VCSELs and polarization-selective diffractive optical elements [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1998, **10**(7): 973-975.
- [14] CURTIS J E, KOSS B A, GRIER D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Optics Communications*, 2002, **207**(1): 169-175.
- [15] LIU J S, TAGHIZADEH M R. Iterative algorithm for the design of diffractive phase elements for laser beam shaping [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(16): 1463-1465.
- [16] MARTINEZ J L, MARTINEZ-Garcia A, MORENO I. Wavelength-compensated color Fourier diffractive optical elements using a ferroelectric liquid crystal on silicon display and a color-filter wheel[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(5): 911-918.
- [17] MORENO I, IEMMI C, MARQUEZ A, *et al.* Modulation light efficiency of diffractive lenses displayed in a restricted phase-mostly modulation display[J]. *Applied Optics*, 2004,

- 43**(34): 6278-6284.
- [18] YZUEL M J, CAMPOS J, MARQUEZ A, *et al.* Inherent apodization of lenses encoded on liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(32): 6034-6039.
- [19] MARQUEZ A, IEMMI C, CAMPOS J, *et al.* Achromatic diffractive lens written onto a liquid crystal display[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(3): 392-394.
- [20] MA S, PANEZAI S, WANG D, *et al.* The study of diffractive lenses displayed in a phase-only liquid crystal spatial light modulator [C]. Proc. SPIE, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging: Optical Storage and Display Technology, 2013, **8913**: 89130M-1-89130M-9.
- [21] BUCKLEY E. Holographic laser projection[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, **7**(3): 135-140.
- [22] SHEN Chuan, ZHANG Cheng, LIU Kai-feng, *et al.* Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0309001.
沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0309001.
- [23] ONURAL L, YARAS F, KANG H. Digital holographic three-dimensional video displays [C]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(4): 576-589.
- [24] COTTRELL D M, DAVIS J A, HEDMAN T R, *et al.* Multiple imaging phase-encoded optical elements written as programmable spatial light modulators[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(17): 2505-2509.
- [25] 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [26] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**: 237-246.
- [27] COLLINGS N, DAVEY T, CHRISTMAS J, *et al.* The applications and technology of phase-only liquid crystal on silicon devices[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, **7**(3): 112-119.
- [28] GEORGIOU A, CHRISTMAS J, MOORE J, *et al.* Liquid crystal over silicon device characteristics for holographic projection of high-definition television images[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(26): 4793-4803.
- [29] ZHANG H, XIE J, LIU J, *et al.* Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(30): 5834-5841.
- [30] PALIMA D, DARIA V R. Holographic projection of arbitrary light patterns with a suppressed zero-order beam [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(20): 4197-4201.
- [31] GEUSEBROEK J M, BURGHOUTS G J, SMEULDERS A W. The Amsterdam library of object images [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, **61**(1): 103-112.