

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0213-06

基于正交柱透镜光栅的计算全息三维成像

郑华东 代林茂 于瀛洁

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

摘要 提出了一种基于正交柱透镜光栅的计算全息三维成像方法。该方法采用 CCD 获取三维场景经过正交柱透镜光栅后所形成的基元图像阵列, 并采用正交投影方法对获取的基元图像阵列进行像素重组, 从而获取子图像阵列。根据透镜的傅里叶变换特性, 对每幅子图像乘以相应的倾斜因子进行积分运算得到全息面上对应点的复振幅。然后通过编码获得三维场景的傅里叶全息图。依据菲涅耳衍射理论, 在计算机中对获得的全息图进行模拟再现, 在不同再现距离上获得处于不同深度位置上的两个骰子的清晰再现, 表明该方法可实现对三维场景的计算全息成像。

关键词 计算全息; 三维成像; 正交柱透镜光栅; 子图像阵列; 基元图像阵列

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0213

Three-Dimensional Imaging Based on Orthogonal-Stacked Lenticular Sheets and Computer Holography

Zheng Huadong Dai Linmao Yu Yingjie

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract A novel three-dimensional (3D) imaging method based on orthogonal-stacked lenticular sheets and computer holography is proposed. Elemental image array (EIA) of 3D object propagated through the orthogonal-stacked lenticular sheets (OLS) are captured by a CCD camera. Sub-image array (SIA) used for generating the Fourier hologram of 3D object is obtained by recombination operation of the EIA. A complex value point in the hologram plane is determined by the two-dimensional (2D) integral operation after the corresponding sub-image is multiplied by an inclination phase factor. Numerical reconstruction of the calculated Fourier hologram at different distances based on Fresnel diffraction shows that the method is feasible for 3D imaging.

Key words computer holography; three-dimensional imaging; orthogonal-stacked lenticular sheets; sub-image array; elemental image array

1 引 言

基于微透镜阵列的三维(3D)立体显示技术也称为“集成成像技术”(II), 最早由法国物理学家 G. Lippmann^[1]提出。但由于硬件等各方面条件的限制, 该技术在较长一段时期内发展比较缓慢。近年来随着先进制造工艺的不断进步, 微透镜阵列、高分辨率的照相设备以及空间光调制器(SLM)等元器件不断出现, 集成成像技术的研究逐渐受到重视^[2,3]。2005年, K. Choi 等^[4,5]设计了基于微透镜

阵列和 SLM 的计算全息 3D 显示系统; 2008 年, M. S. Kim 等^[6]通过模拟透镜阵列成像, 实现了 3D 物体的全息图制作及再现。近年来, 国内一些学者在基于微透镜阵列的集成成像^[7,8], 3D 物体的计算机重构和识别^[9,10], 深度测量^[11]以及微透镜阵列的制作和成像特性分析^[12,13]等方面均开展了卓有成效的研究工作。

但由于微透镜制作对加工工艺要求较高, 且制作成本较高, 目前市场上的微透镜阵列的加工尺寸

收稿日期: 2010-04-16; **收到修改稿日期**: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60772124)、上海市科委国际合作项目(09530708700)和上海大学研究生创新基金(shucx102195, shucx101060)资助课题。

作者简介: 郑华东(1978—), 男, 博士后, 主要从事全息显示及光学信息处理等方面的研究。

E-mail: zhenghuadong_08@163.com

导师简介: 于瀛洁(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程中的光学检测方法、数字全息技术等方面的研究。

E-mail: yingjieyu@stuff.shu.edu.cn

仍较小,难以满足大场景条件下的需要。而柱透镜光栅的加工工艺相对比较成熟,外形尺寸可达到米级,光栅密度能够满足视场要求,且制作成本相对较低。2005年,D. H. Shin 等^[14]提出了基于相交柱透镜光栅的非对称集成成像的计算机补偿方法。2010年,Qionghua Wang 等^[15]设计了柱透镜光栅和狭缝光栅组合的仿微透镜阵列,从而获得3D立体显示效果。然而,基于柱透镜光栅的计算全息集成成像的研究尚未见相关文献报道。

本文在分析柱透镜光栅成像特性的基础上,提出了基于正交柱透镜光栅(OLS)的计算全息3D成像方法。该方法的基本思路是:把两片柱透镜光栅正交叠放,在OLS前放置3D物体,并采用CCD获取经过OLS后所形成的基元图像阵列,再通过计算

机对基元图像阵列进行图像处理和全息编码,获得3D场景的傅里叶全息图,最后通过菲涅耳衍射方式获得3D物体的数值再现效果或光电再现效果。

2 基本原理

实验系统如图1所示。为获得3D场景的基元图像阵列,通过将两片光栅密度相同的光栅按照光栅面背靠背正交贴紧,放置于3D物体前方,用辅助光源照明,用CCD采集透过OLS的基元图像阵列,输入计算机进行图像处理,并计算得到子图像阵列。再根据透镜的傅里叶变换原理,通过计算获得傅里叶全息图,然后用菲涅耳衍射方式对得到的全息图进行模拟再现,也可将全息图加载到SLM后进行光电再现。

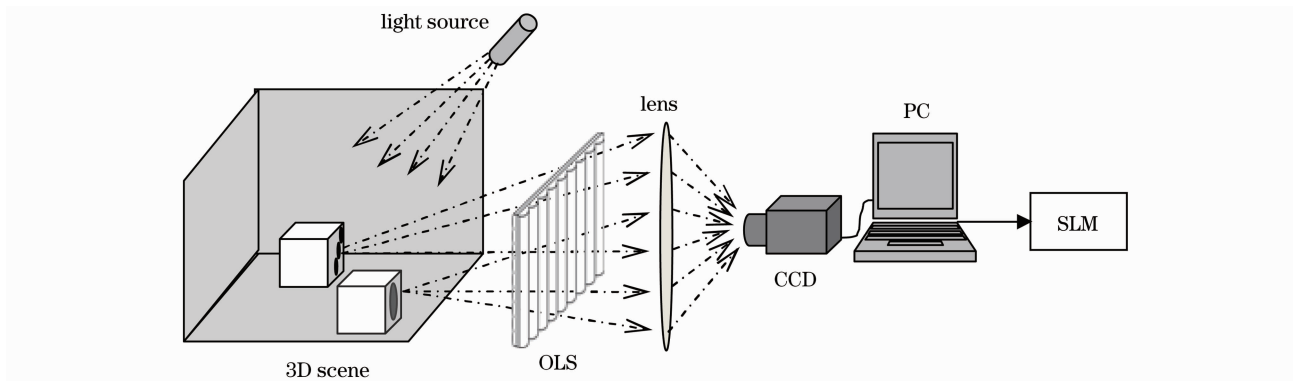


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

2.1 基元图像阵列的获取

3D场景中每个物点发出的光线通过OLS进行“收集”(如图2所示),然后在CCD上记录每个子光栅

透镜所获取的3D场景信息。每个子光栅透镜所对应的子图像的视差反映了3D场景中的深度信息。即3D信息通过二维基元图像之间的视差得以表现^[2,16]。

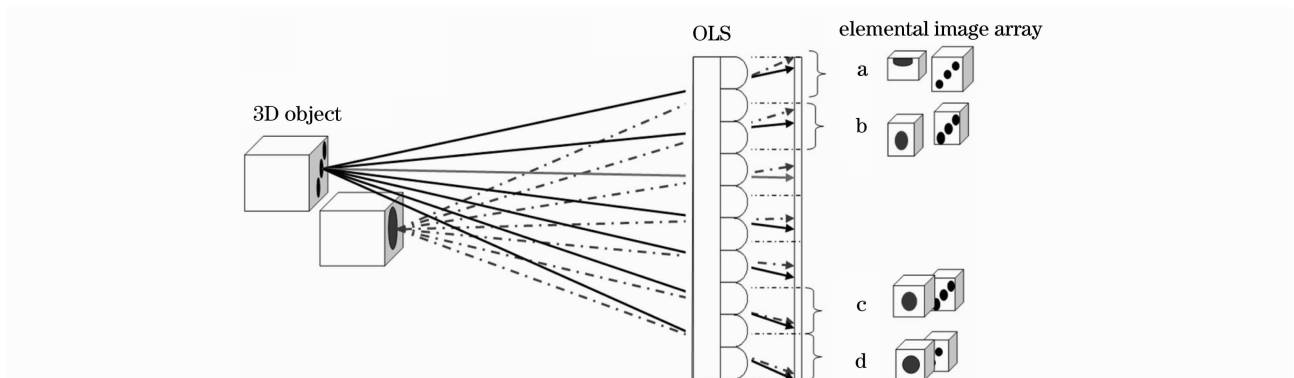


图2 基元图像间的视差效果

Fig. 2 Disparity between elemental images

3D场景中不同深度的物体发出散射光线,通过微透镜阵列后在感光面板上形成基元图像阵列,如图2中基元图像a,b,c和d。虽然基元图像阵列反映了物体经过OLS后的透视投影关系,但是由于单

个柱面透镜的孔径有限,使得经过OLS边缘获取的基元图像不能包含整个3D场景中的物体,或者出现遮挡现象。尤其是边缘部分的基元图像对3D场景的贡献较少甚至没有贡献,这不利于3D物体的

全息图计算^[17]。

2.2 从基元图像阵列提取子图像阵列

为了从基元图像阵列中获得 3D 物体的高质量全息图,提出采用正交投影方法^[14]从基元图像阵列中提取子图像阵列。正交投影的原理相当于对投影的基元图像进行重新采样,即从每幅基元图像中提取相同位置的像素,并组合成一幅新的子图像(如图 3 所示)。图 3 中入射平行光的纵向入射角为 θ_n ,横

向入射角为 φ_m (图中只表示了纵向入射角),以 θ_1 方向平行入射(实线所示)的光线透过每个微透镜阵列后投影到接收屏上的某个像素点,同理以 θ_n 方向平行入射(虚线所示)的光线透过每个微透镜阵列投影到接收屏上某个像素点。基元图像阵列经过重新采样后,每幅子图像代表整个 3D 场景在相应视角的投影视图,再现时每幅子图像均对 3D 像场有贡献。

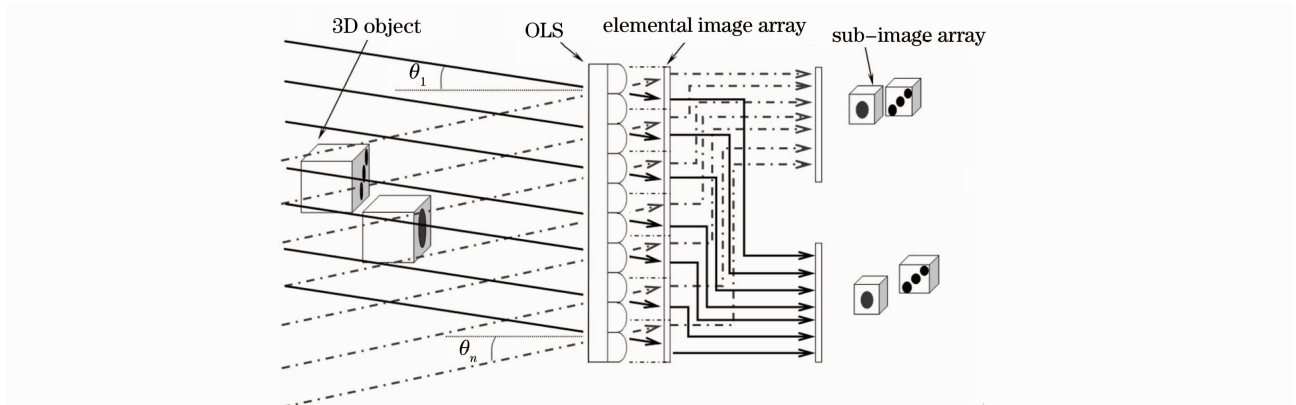


图 3 从基元图像阵列提取子图像阵列的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of extracting sub-image array from elemental image array

基元图像阵列和子图像阵列的区别如图 4 所示,图 4(a)中具有相同灰度值的区域表示一幅基元图像,图 4 (b)中虚线所涉及的区域为图 4(a)中像素进行重新分布后获得的子图像。图 4(a)和(b)中所示整幅图像的像素总量没有变化,但基元图像和

子图像的数目不同。例如:CCD 捕获 3D 场景透过 OLS 的像素总量为 $M \times N$,其中包含 $m \times n$ 幅基元图像,则重新采样后子图像阵列的像素总量仍为 $M \times N$,但子图像的数目变为 $(M/m) \times (N/n)$ 幅。

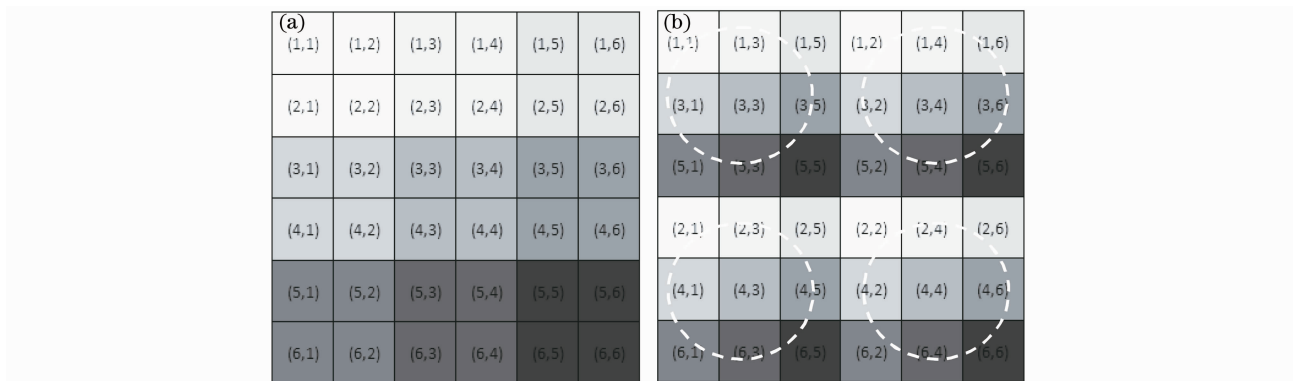


图 4 重新采样前后图像的像素分布。(a)采样前的基元图像阵列,(b)采样后的子图像阵列

Fig. 4 Distributions of pixels before and after resampling. (a) elemental image array before resampling, (b) sub-image array after resampling

2.3 傅里叶全息图制作

根据傅里叶光学理论,3D 物体经过傅里叶透镜后在透镜后焦面上的复振幅分布可通过正交投影子图像阵列的二维傅里叶变换复振幅叠加而成^[16,18]。如图 5 所示,将傅里叶变换面上 (m, n) 点所对应的正交投影子图像定义为 $p_{m,n}(x_p, y_p)$,图 5 中子图像

阵列与图 3 中的子图像阵列位置一一对应。将正交投影子图像作为对应视角的平行光线的强度分布,并以该子图像所对应的视角入射至傅里叶透镜。则将 $p_{m,n}(x_p, y_p)$ 与对应的倾斜平面相位因子相乘再积分后,可得到傅里叶变换面上 (m, n) 点的复振幅。傅里叶变换面上 (m, n) 点的复振幅表示为

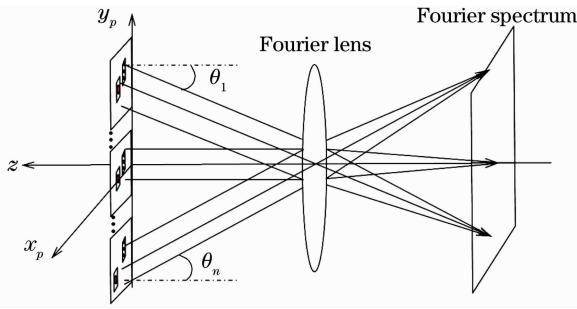


图 5 正交投影子图像阵列的傅里叶频谱产生

Fig. 5 Fourier spectrum of sub-image array of orthographic projection

$$H(m, n) = \iint p_{m,n}(x_p, y_p) \times p(x_p, y_p) \times \exp[-j2\pi b(mx_p + ny_p)] dx_p dy_p, \quad (1)$$

设由透镜的孔径限制所引入的光瞳函数为 $p(x_p, y_p)$, 其定义为^[19]

$$p(x_p, y_p) = \begin{cases} 1, & \text{in lens aperture} \\ 0, & \text{out of lens aperture} \end{cases} \quad (2)$$

在实际光路中, 正交投影子图像一般在透镜的孔径范围内, 并令

$$f_{m,n}(x_p, y_p) = \exp[-j2\pi b(mx_p + ny_p)], \quad (3)$$

则(1)式可写为

$$H(m, n) = \iint p_{m,n}(x_p, y_p) \times f_{m,n}(x_p, y_p) dx_p dy_p, \quad (4)$$

这相当于将每幅正交投影图乘上对应的倾斜相位因子后进行积分运算, 得到的全息面的傅里叶频谱分布, 则对 $H(m, n)$ 进行编码可得到傅里叶全息图。从子图像阵列获得 3D 物体傅里叶全息图的算法示意图如图 6 所示。

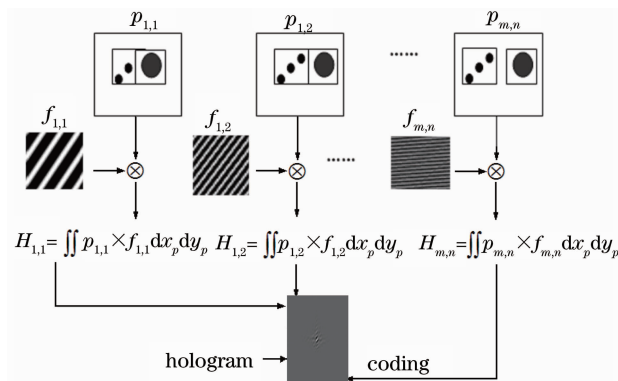


图 6 傅里叶全息图的计算算法示意图

Fig. 6 Schematic of algorithm of Fourier hologram

3 实验结果及分析

基元图像阵列采集系统如图 7(a) 所示。实验中采用 2 片 1.016 lp/mm (25 lp/in.), 厚度为 2 mm, 焦距为 4 mm 的柱透镜光栅按照光栅面背靠背叠放且保持正交状态。将 2 个大小为 10 mm × 10 mm × 10 mm 的骰子放置于 OLS 前, 且骰子的前端面与 OLS 的距离分别为 10 mm 和 20 mm。以环形 LED 冷光源进行照明, 采用像素总量为 1280 pixel × 1024 pixel、像素间距为 5.2 μm × 5.2 μm 的 CCD 获取透过 OLS 骰子的基元图像阵列(包含的基元图像数目为 39 × 31 幅)。在获取图 7(b) 的基元图像阵列后, 移走骰子并采集如图 7(c) 所示的背景图像。滤除背景后骰子的基元图像阵列如图 7(d) 所示。由于 CCD 分辨率有限, 对获取的基元图像进行一次双立方插值运算, 插值后每幅基元图像像素为 64 pixel × 64 pixel。再按照 2.2 节所示的方法对基元图像阵列进行像素的重新分布, 获得 64 × 64 幅像素量均为 39 pixel × 31 pixel 的子图像阵列。但阵列图像边缘部分子图像由于 CCD 镜头畸变导致像质模糊, 取图 7(d) 所示中间部分的 50 × 50 幅图像质量较好的子图像阵列用于全息图计算。图 7(e) 中 4 个角上所示分别为该区域的局部放大视图。右上角骰子顶部的 6 点可见, 且 2 个骰子间距离清晰可辨; 左上角的子图像中骰子则有部分区域重叠; 左下角子图像中骰子顶部 6 点几乎不可见, 且有部分区域重叠; 右下角子图像中骰子间距也较明显。这说明正交投影所得到的子图像之间存在较大的视差。

根据图 7(e) 所示子图像阵列, 通过 2.3 节所述的方法计算得到傅里叶变换面的复振幅, 其相位和振幅分布如图 7(f) 和 (g) 所示。加入参考光后制作成图 7(h) 所示的博奇编码全息图。

为了考察所计算的傅里叶全息图在不同再现距离处的再现效果, 采用菲涅耳衍射公式对全息图进行再现。设再现距离 z 从 5 ~ 25 mm 逐渐变化, 得到不同深度位置物体的再现结果如图 8 所示。当再现距离为 10 mm 时, “三点”的骰子得到了聚焦再现; 而当再现距离为 20 mm 时, “一点”的骰子获得聚焦再现效果。这表明所计算的傅里叶全息图能够再现 3D 场景。

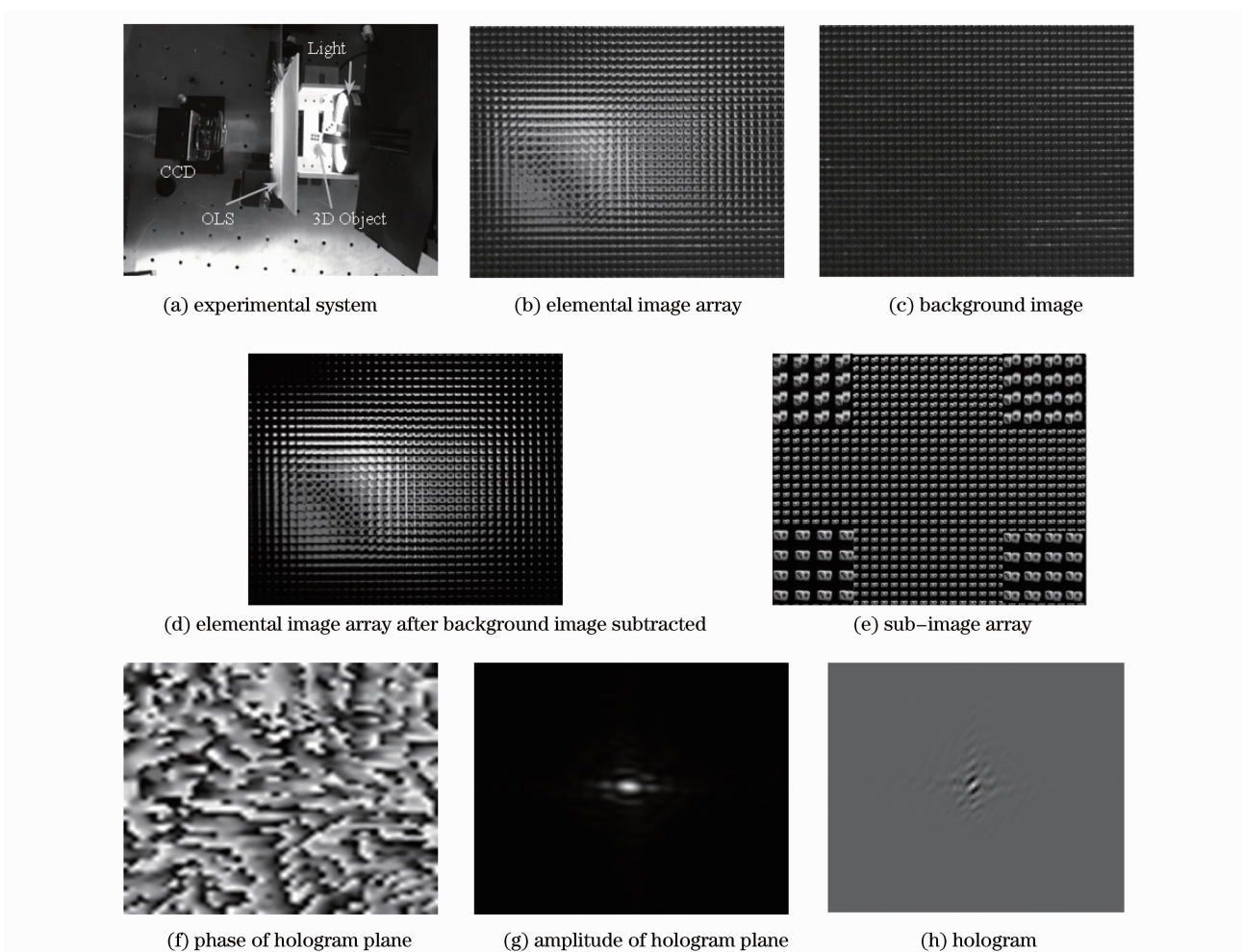


图 7 基元图像阵列获取及图像处理结果

Fig. 7 Elemental images obtaining and results of numerical processing

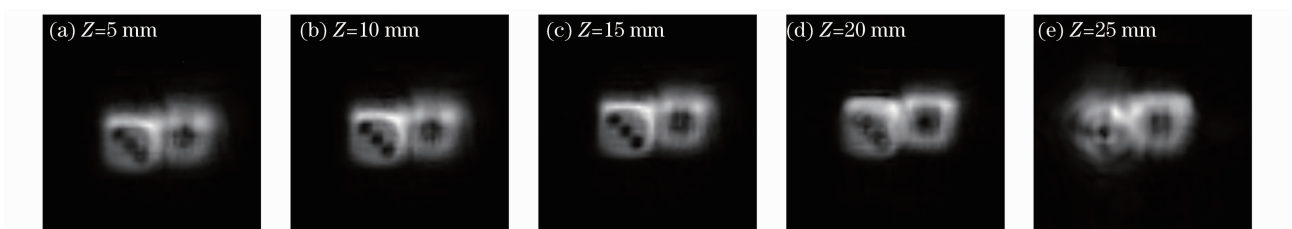


图 8 图 7(h)所示傅里叶全息图的数值再现结果

Fig. 8 Numerical reconstruction of the Fourier hologram shown in Fig. 7(h)

4 结 论

提出了一种基于正交柱透镜光栅的计算全息 3D 成像方法。利用该方法对放置于不同深度位置上(前后相距 10mm)的 2 个骰子进行基元图像阵列获取、子图像提取、傅里叶全息图计算和模拟再现。结果表明,该方法可实现 3D 场景的傅里叶全息图计算,并在不同再现距离处获得 3D 场景不同深度信息的聚焦再现结果。

参 考 文 献

- 1 G. Lippmann. Epreuves reversibles donnant la sensation durerief [J]. *J. Phys.*, 1908, 7(4): 821~825
- 2 J. Park, K. Hong, B. Lee. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(34): H77~H93
- 3 Zheng Huadong, Yu Yingjie, Cheng Weiming. A review on three-dimensional display technique [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 426~434
郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维立体显示技术研究新进展[J]. *光学技术*, 2008, 34(3): 426~434
- 4 K. Choi, J. Kim, Y. Lim *et al.*. Full parallax viewing-angle enhanced computer generated holographic 3D display system using

- integral lens array [J]. *Opt. Express*, 2005, **13** (26): 10494~10502
- 5 K. Choi, H. Choi, J. Kim *et al.*. Viewing-angle enhanced computer-generated holographic display system combined with integral imaging[C]. *SPIE*, 2005, **6016**: 601612
- 6 M. S. Kim, G. Baasantseren, N. Kim *et al.*. Hologram generation of 3D objects using multiple orthographic view images [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2008, **12**(4): 269~274
- 7 Xie Junguo, Zhou Yongming, Yu Bingtao. Research on a technology of realizing integral 3D vision based on microlens array [J]. *Chinese J. Stereology and Image Analysis*, 2008, **13**(1): 42~46
谢俊国, 周永明, 于丙涛. 基于微透镜阵列实现全真立体显示技术的研究[J]. *中国体视学与图像分析*, 2008, **13**(1): 42~46
- 8 Zhang Jian, Xin Yue, Liu Weiqi *et al.*. Three-dimensional digital imaging based on microlens array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1701~1707
张 健, 辛 悦, 刘伟奇 等. 基于微透镜阵列的三维数字成像 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1701~1707
- 9 Hao Jinbo, Hu Manli, Li Linsen *et al.*. Real-time three-dimensional object recognition with microlens array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2008~2012
郝劲波, 忽满利, 李林森 等. 基于微透镜阵列的实时三维物体识别 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2008~2012
- 10 Wang Yu, Chen Dianren, Piao Yan *et al.*. Computational reconstructed three-dimensional image based on disparity information [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38** (11): 2968~2971
王 宇, 陈殿仁, 朴 燕 等. 基于视差信息的三维图像的计算机重构 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2968~2971
- 11 Wu Chunhong, You Fucheng, Yang Yang. A depth measurement approach based on integral imaging [J]. *J. Image Graphics*, 2006, **11**(4): 563~569
伍春洪, 游福成, 杨 扬. 一种基于 3 维全景图像技术的深度测量方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2006, **11**(4): 563~569
- 12 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
王 伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 13 Liu Desen, Hu Jianming, Liu Wei *et al.*. Studies on the optical properties of planar intersect microlens arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 743~748
刘德森, 胡建明, 刘 炜 等. 平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 743~748
- 14 D. H. Shin, M. Cho, E. S. Kim. Computational implementation of asymmetric integral imaging by use of two crossed lenticular sheets [J]. *ETRI J.*, 2005, **27**(3): 289~293
- 15 Qionghua Wang, Huan Deng, Tiantian Jiao *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 512~514
- 16 J. H. Park, M. S. Kim, G. Baasantseren *et al.*. Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6320~6334
- 17 N. T. Shaked, J. Rosen, A. Stern. Integral holography: white-light single-shot hologram acquisition [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5754~5760
- 18 N. T. Shaked, B. Katz, J. Rosen. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(34): H120~H135
- 19 Chen Jiabi, Su Xianyu. Principle and Application of Optical Information Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 49~60
陈家璧, 苏显渝. 光学信息原理及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 49~60