

文章编号 1004-924X(2012)08-1653-08

基于相机阵列的三维集成成像记录系统

焦小雪, 赵星*, 杨勇, 方志良, 袁小聪

(南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 基于三维集成成像理论以及相机阵列和显示透镜阵列之间的对应关系, 利用几何成像理论和光线追踪方法对不匹配全光学集成成像记录系统进行了理论分析, 得到了主要记录参数(记录距离和相机间隔)和集成成像显示特性之间的关系。提出了一种非匹配系统中相机阵列记录系统参数的设计方法, 并设计了相机阵列记录系统。计算得到了系统的关键参数为记录距离 49.6 cm, 相机间隔 25 mm。对提出的方法进行了实验验证, 结果表明, 提出的相机阵列光学记录系统能够完整记录场景的三维信息, 三维显示特性基本达到了设计指标, 相机阵列的主要记录参数与集成成像三维显示特性的关系符合理论分析, 验证了提出方法及系统设计的可行性。提出的系统可为不匹配全光学集成成像系统显示提供大场景、高分辨率微图像阵列。

关键词: 三维成像; 三维显示; 集成成像; 相机阵列; 记录系统; 系统设计

中图分类号: TN27; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1653

Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array

JIAO Xiao-xue, ZHAO Xing*, YANG Yong, FANG Zhi-liang, YUAN Xiao-cong

(Key Laboratory of Optical Information Science and Technology of the Ministry of Education,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaoxingtink@nankai.edu.cn

Abstract: On the basis of the principle of integral imaging and the relation between camera array and display lens array, a pick-up system using a camera array for three-dimensional integral imaging was analyzed according to the geometric imaging theory and the ray tracing method, and the dependence of main recording parameters on display characteristics of integral imaging was obtained. A parameter design method for elemental images was proposed according to the display specifications and a pick-up system was designed by the proposed method in a pick-up distance of 49.6 cm and a camera space of 25 mm. The experimental results demonstrate that the pick-up system using the camera array can record the 3D information for a scene completely and the 3D display characteristics reach to the design requirements. Furthermore, the relationship between the pick-up parameters of the camera array and the display characters coincides with theoretical analysis, which verifies the display performance of designed system and the feasibility of the proposed method as well. The system can generate elemental

收稿日期: 2012-01-16; 修订日期: 2012-03-05.

基金项目: 国家 973 基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB327702); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108046)

images with large scenes and high resolution for mismatched full optical integral imaging systems.

Key words: three-dimensional imaging; three-dimensional display; integral imaging; camera array; pick-up system; system design

1 引言

近年来,集成成像技术作为一种具有连续视角、全视差、无需辅助观看设备等优势的新型三维成像与显示技术,受到了业界越来越广泛的关注^[1]。与全息^[2]、双目视差^[3]、光学合成孔径成像^[4]等三维成像与显示技术不同,集成成像技术利用二维透镜阵列进行三维信息的记录和重现,可广泛应用于三维图像识别、三维场景可视化、三维电视和立体显微成像技术等领域^[1]。传统的集成成像技术中,记录阶段与显示阶段是互逆过程,即记录透镜阵列的参数与显示透镜阵列的相同,也被称为系统参数匹配。因此,三维集成成像技术的记录阶段通常采用与显示透镜阵列参数匹配的记录透镜阵列来获取微图像阵列^[5-6],或者根据显示透镜阵列参数,采用计算机模拟技术模拟匹配此参数的透镜阵列从而生成相应的微图像阵列^[7-10]。但是这两种方法都存在无法获取实际大场景物体三维信息的问题,且前者受透镜阵列制作工艺的限制致使图像分辨率过低,相邻透镜元间的互相干扰易导致三维再现像出现串扰^[6,11-13];后者由于计算机技术的限制,存在的生成速度、定位及视角分析等因素^[10]均会直接影响图像质量及观察效果。现行的采用相机阵列记录物体三维信息的方法,不仅易于获得大场景、高分辨率的微图像阵列,而且具备操作灵活、相邻相机互相干扰小等特点,可以适应不同参数的集成成像显示系统^[14]。但是在采用相机阵列获取微图像阵列时,相机阵列与显示透镜阵列的参数难于完全匹配,会对微图像阵列和三维再现像的显示特性产生一定的影响,这对于相机阵列记录系统是一个至关重要的问题。

针对上述问题,徐于萍^[15]等利用几何成像关

系和 3DMAX 模拟技术分析了解相机阵列记录过程中图像元间距对再现景深和成像串扰的影响,然而其研究尚未详尽分析相机阵列记录系统的关键参数(如记录距离和相机间隔)对集成成像三维显示特性的影响。更为重要的是,已有的基于参数匹配的集成成像系统设计方法无法适用于基于相机阵列记录的不匹配集成成像系统设计。因此,本文基于三维集成成像理论以及相机阵列和显示透镜阵列之间的对应关系,利用几何成像原理和光线追踪方法对不匹配全光学集成成像系统进行了详细的理论分析,得到了主要记录参数(记录距离和相机间隔)和集成成像显示特性之间的关系,提出了一种非匹配系统中相机阵列记录系统设计方法,并对此方法的可行性进行了光学实验验证。

2 系统原理及设计方法

为了研究不匹配全光学集成成像系统中记录参数和显示参数之间的关系,本文以参数不匹配相机阵列记录系统和透镜阵列显示系统为例进行分析。如图 1 所示,相机阵列和显示透镜阵列具有相同的维数 $n \times m$ 。相机阵列中子相机焦距为 f_1 ,间隔为 p_1 ,显示透镜阵列中透镜元焦距为 f_2 ,间隔为 p_2 。为了便于计算,将相机阵列和显示透镜阵列放入图 1 所示的直角坐标系中,设定相机阵列中子相机 1 和同一列子相机 m 的中心坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, (m-1)p_1, 0)$,设定显示透镜阵列中透镜元 1 和同一列的透镜元 m 的中心坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, (m-1)p_2, 0)$ 。取三维物体上任意 2 个点 A 和 B,经过相机阵列在微图像阵列上成像为像点 A_1 和 B_1 ,再经由显示透镜阵列集成后,即可分别获得两点在空间中集成的三

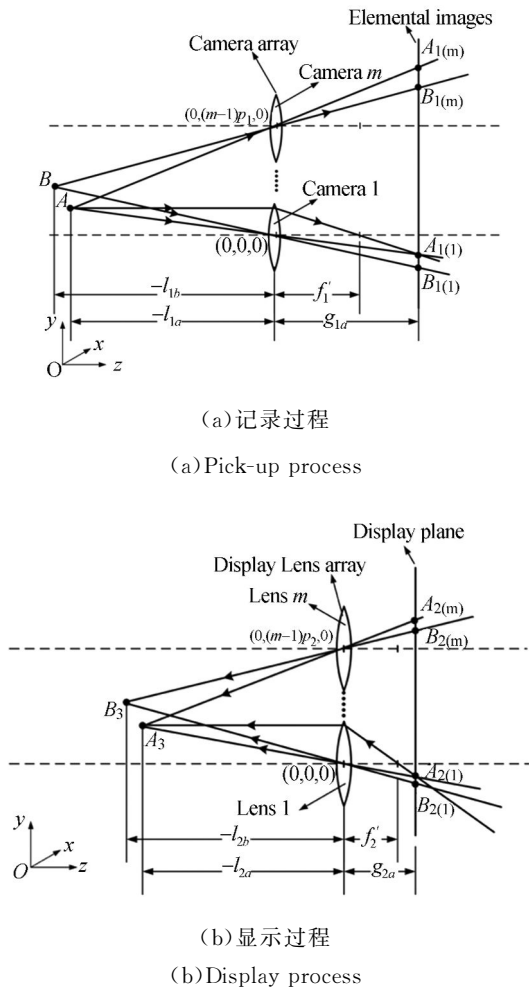


图 1 三维物体上任意两点的记录和显示过程
Fig. 1 Pick-up and display processes of any two points in 3D object

维像点 A_3 和 B_3 。为了满足集成成像的再现条件,图像元需匹配透镜元,为此定义其缩放比例为:

$$\beta = \frac{I_2}{I_1}, \quad (1)$$

其中: I_1 和 I_2 分别为记录和显示像面的对角线大小,可由记录和显示器件的参数确定。

设图 1 中距离相机阵列分别为 l_{1a} 和 l_{1b} 的 A、B 两点坐标为 (x_{0a}, y_{0a}, z_{0a}) 和 (x_{0b}, y_{0b}, z_{0b}) , 基于几何成像原理和光线追踪方法,点 A 通过相机阵列中子相机 1 和子相机 m 所成像点的坐标 $A_{1(1)}$ ($x_{1(1)a}, y_{1(1)a}, z_{1(1)a}$) 和 $A_{1(m)}$ ($x_{1(m)a}, y_{1(m)a}, z_{1(m)a}$) 分别为:

$$(x_{1(1)a}, y_{1(1)a}, z_{1(1)a}) = \left\{ x_{0a} \frac{g_{1a}}{l_{1a}}, y_{0a} \frac{g_{1a}}{l_{1a}}, g_{1a} \right\}, \quad (2)$$

$$(x_{1(m)a}, y_{1(m)a}, z_{1(m)a}) = \left\{ x_{0a} \frac{g_{1a}}{l_{1a}}, (m-1)p_1 + [y_{0a} - (m-1)p_1] \frac{g_{1a}}{l_{1a}}, g_{1a} \right\}, \quad (3)$$

其中: g_{1a} 为记录像面与相机阵列的间距,可由 A 点的物像共轭关系得到。微图像阵列依照比例 β 进行缩放后,可得 $A_{1(1)}$ 和 $A_{1(m)}$ 在显示平面上的坐标 $A_{2(1)}$ 和 $A_{2(m)}$, 经过显示透镜阵列中相应的透镜元 1 和透镜元 m 分别成像后,得到再现像点的坐标 $A_{3(1)}$ ($x_{3(1)a}, y_{3(1)a}, z_{3(1)a}$) 和 $A_{3(m)}$ ($x_{3(m)a}, y_{3(m)a}, z_{3(m)a}$) 分别为:

$$(x_{3(1)a}, y_{3(1)a}, z_{3(1)a}) = \left\{ x_{0a} \beta \frac{g_{1a} l_{2a}}{l_{1a} g_{2a}}, y_{0a} \beta \frac{g_{1a} l_{2a}}{l_{1a} g_{2a}}, l_{2a} \right\}, \quad (4)$$

$$(x_{3(m)a}, y_{3(m)a}, z_{3(m)a}) = \left\{ x_{0a} \beta \frac{g_{1a} l_{2a}}{l_{1a} g_{2a}}, (m-1)p_2 + \beta [y_{0a} - (m-1)p_1] \frac{g_{1a} l_{2a}}{l_{1a} g_{2a}}, l_{2a} \right\}. \quad (5)$$

其中: g_{2a} 为显示平面与显示透镜阵列的间距, l_{2a} 为再现像点的像距,二者满足物像共轭关系。根据集成成像原理, $A_{3(1)}$ 和 $A_{3(m)}$ 在显示透镜阵列后的像空间会聚为一个空间像点 A_3 , 则有:

$$\begin{cases} x_{3(1)a} = x_{3(m)a} \\ y_{3(1)a} = y_{3(m)a} \Rightarrow p_2 = p_1 \beta \frac{g_{1a} l_{2a}}{l_{1a} g_{2a}} \\ z_{3(1)a} = z_{3(m)a} \end{cases} \quad (6)$$

图 1 中虽然点 B 与 A 在 z 轴方向上位于两个不同的平面,但集成成像和再现需要一个共同的微图像阵列来记录和显示它们的三维信息,即 $g_{1b} = g_{1a}, g_{2b} = g_{2a}$, 此时 g_{1b} 与 l_{1b}, g_{2b} 与 l_{2b} 虽不满

足物像共轭关系,但可利用光线追踪方法得到点 B 在微图像阵列中对应弥散斑的中心坐标。因此使用同样方法可计算得到点 B 经过相机阵列成像,并经过显示透镜阵列再现所得像点的坐标 $B_{3(1)}$ ($x_{3(1)b}, y_{3(1)b}, z_{3(1)b}$) 和 $B_{3(m)}$ ($x_{3(m)b}, y_{3(m)b}, z_{3(m)b}$), 并由二点会聚为一个空间像点 B_3 这一性质可得:

$$\begin{cases} x_{3(1)b} = x_{3(m)b} \\ y_{3(1)b} = y_{3(m)b} \Rightarrow p_2 = p_1 \beta \frac{g_{1a} l_{2b}}{l_{1b} g_{2a}} \\ z_{3(1)b} = z_{3(m)b} \end{cases} \quad (7)$$

由公式(6)和(7)可知:

$$\frac{l_{1a}}{l_{2a}} = \frac{l_{1b}}{l_{2b}} \quad (8)$$

进而可以计算出三维物体上任意两点 A 和 B 经非匹配集成成像系统记录和再现前后, x, y, z 方向上二者空间距离的比值, 分别为:

$$\begin{cases} \frac{|x_{3(1)a} - x_{3(1)b}|}{|x_{0a} - x_{0b}|} = \frac{|x_{3(m)a} - x_{3(m)b}|}{|x_{0a} - x_{0b}|} = \frac{p_2}{p_1} \\ \frac{|y_{3(1)a} - y_{3(1)b}|}{|y_{0a} - y_{0b}|} = \frac{|y_{3(m)a} - y_{3(m)b}|}{|y_{0a} - y_{0b}|} = \frac{p_2}{p_1} \\ \frac{|z_{3(1)a} - z_{3(1)b}|}{|z_{0a} - z_{0b}|} = \frac{|z_{3(m)a} - z_{3(m)b}|}{|z_{0a} - z_{0b}|} = \frac{p_2}{p_1} \frac{1}{\beta} \frac{g_{2a}}{g_{1a}} \end{cases} \quad (9)$$

由公式(9)可知, 三维再现像和三维物体的横向尺寸的比值仅与相机间隔 p_1 和显示透镜阵列的间隔 p_2 有关, 而轴向尺寸比值除了与这 2 个参数有关外, 还与记录像面和显示平面的位置 g_1, g_2 以及二者尺寸的缩放比例 β 相关。

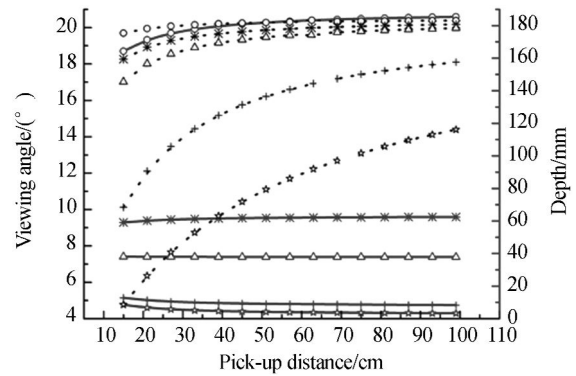
将上述公式进一步整理后可知, 对于集成成像非匹配记录和显示系统, 参数满足如下关系:

$$\begin{cases} \frac{l_1}{l_2} \frac{g_2}{g_1} = \frac{p_1}{p_2} \beta \\ \frac{\Delta z}{\Delta z_0} = \frac{p_2}{p_1} \frac{1}{\beta} \frac{g_2}{g_1} \end{cases} \quad (10)$$

其中: l_1 表示实际场景到相机阵列的记录距离, l_2 表示三维再现像到显示透镜阵列的距离, Δz_0 表示三维物体的原始深度, Δz 表示三维再现像的深度。该式表明, 在集成成像显示系统参数确定的情况下, 记录系统的主要参数, 即相机阵列的记录距离 l_1 和相机间隔 p_1 的选择决定了集成成像显示系统的性能。将其代入集成成像三维显示系统可观测视场角 φ 、横向分辨率 R_l 的定义式^[1], 以及深度 Δz 的关系式(10)中, 可得相机阵列记录距离和相机间隔与三维再现像显示特性的关系为:

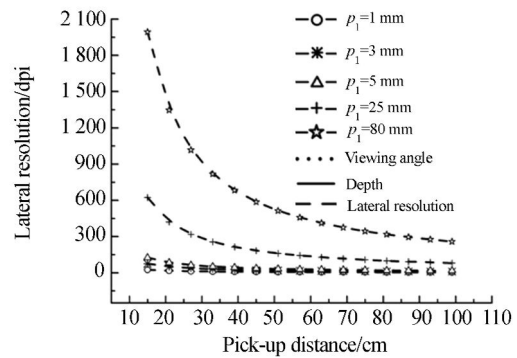
$$\begin{cases} \varphi = 2 \arctan \left(\frac{p_2 l_1 I_2}{2 p_2 f_2' l_1 - 2 p_1 \beta f_2' g_1} \right) \\ R_l = - \frac{\beta p_1 g_1}{p_2 l_1} R_D \\ \Delta z = \left(\frac{p_2 l_1}{p_1 g_1 \beta} - 1 \right) \frac{f_2'}{l_1} \Delta z_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中: R_D 为微图像阵列显示器件的分辨率。在此基础上, 利用表 1 和表 2 中的实验参数, 得到相机阵列的关键参数记录距离 l_1 和相机间隔 p_1 对集成成像显示特性的影响如图 2 所示, 其中横坐标为记录距离 $|l_1|$ 。



(a) 可观测视场角和深度

(a) Viewing angle and depth



(b) 横向分辨率

(b) Lateral resolution

图 2 记录参数(记录距离、相机间隔)和显示特性的关系
Fig. 2 Relationship between pick-up parameters (pick-up distance and camera space) and display characteristics

从图 2 可知, 当记录距离确定时, 随着 p_1 的增大, 可观测视场角 φ 和深度 Δz 逐渐减小, 横向分辨率 R_l 逐渐增大; 当 p_1 确定时, 随着记录距离的增大, 横向分辨率 R_l 逐渐减小, 可观测视场角 φ 逐渐增大, 而深度 Δz 则因物像横向尺寸比的不同呈现不同的变化趋势。当横向尺寸比值 ≥ 1 时, 深度 Δz 随着记录距离的增大逐渐减小, 当横向尺寸比 < 1 时, 深度 Δz 则逐渐增大。

基于上述分析, 将集成成像的显示特性 $\varphi, R_l, \Delta z$ 作为设计指标, 可实现基于相机阵列的三维集成成像记录系统的设计。根据显示需要, 设计时首先定义三维物体和三维再现像的横向尺寸比为 δ , 然后根据记录和显示器件本身的参数, 利

用公式(10)和(11)以及几何成像关系,得到记录系统中相机阵列的关键参数相机间隔 p_1 和记录距离 l_1 分别为:

$$\begin{cases} p_1 = \delta p_2 \\ l_1 = -\frac{I_2 R_D \Delta z_0}{2 \tan(\frac{\varphi}{2}) R_1 \Delta z} \end{cases} \quad (12)$$

在计算得到相机阵列的关键参数 p_1 和 l_1 后,可由相机的像面大小 I_1 确定相机焦距 f_1 和相机最大视场角 ω 的关系:

$$2 f_1' \tan(\frac{\omega}{2}) = I_1. \quad (13)$$

3 系统设计和实验验证

3.1 记录系统设计

本文使用实验室已有的透镜阵列作为集成成像显示透镜阵列,利用上述分析结果和设计方法,进行了相机阵列记录系统的参数设计。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental specifications

Component	Parameter	Value
3D object	Depth Δz_0 /cm	5
Square lens array	Filling factor	100%
	Number of lenses	7(H)×7(V)
	Aperture of lenses/mm	5(H)×5(V)
	Focal length of lenses f_2' /mm	19.64
	Diagonal of lenses I_2 /mm	7.1
	Pitch of lenses p_2 /mm	5(H)×5(V)
Display plane	Lateral resolution R_D /dpi	600

集成成像显示性能的设计指标为:三维再现像的可观测视场角 $\varphi=16^\circ$,分辨率 $R_1=160$ dpi,深度 $\Delta z=9$ mm,且根据显示需要设定三维物体和三维再现像的横向尺寸比为 $\delta=5$ 。由此,利用公式(12)和表 1 参数计算可得相机阵列光学记录系统的关键参数:相机阵列到三维物体的记录距离 $l_1=-49.6$ cm,相机间隔 $p_1=25$ mm。同时为了便于光学实验中视场角的实际测量,由以上参数计算可得可观测水平视场角 $\varphi=12^\circ$ 。根据相机像面大小 I_1 以及公式(13),本文选用固定焦距为 25 mm 的 CCD 相机作为记录相机进行光学实验,如表 2 所示。

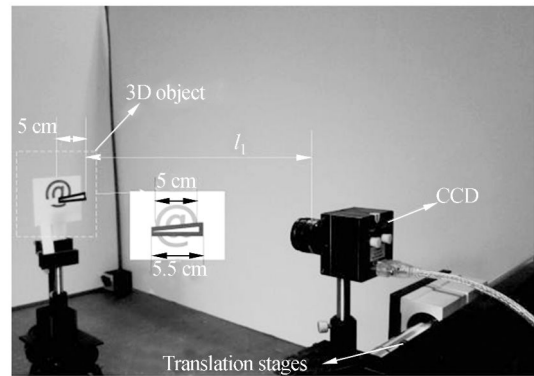
表 2 相机参数

Tab. 2 Camera specifications

Component	Parameter	Value
Camera array	Number of camera	7(H)×7(V)
	Focal length of camera f_1' /mm	25
	Size of image plane/mm	4.8(H)×4.8(V)
	Diagonal of lenses I_1 /mm	6.8
	Field of view $\omega/^\circ$	15

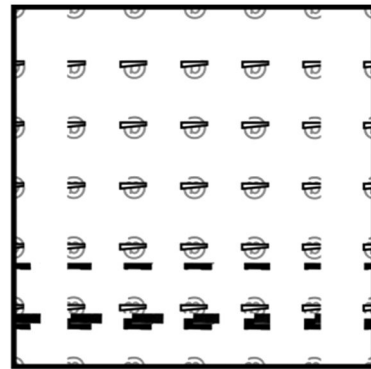
3.2 记录实验与结果

为了验证上述设计结果,进行了光学实验,实验参数如表 1 所示。所需微图像阵列由 CCD 在二维平面内扫描获取。实验装置如图 3(a)所示,其中二维扫描平移台的扫描精度为 $0.5 \mu\text{m}$,彩色面阵 CCD 的像素为 1024×768 。三维场景由轴向间隔为 5 cm 的楔形符号‘ \triangle ’和符号‘@’组成,符号大小分别为 5 cm 和 5.5 cm。根据 3.1 的设



(a)实验装置

(a)Experimental setup



(b)微图像阵列

(b)Elemental images

图 3 扫描式 CCD 阵列光学记录系统

Fig. 3 Optical pick-up system of scanning-type CCD array

计结果将三维物体置于 CCD 前面 49.6 cm 处,设定 CCD 的扫描间隔为 25 mm,对三维物体进行扫描式阵列记录,得到的微图像阵列如图 3(b)所示。

3.3 显示实验与结果

将相机阵列获取的微图像阵列采用投影显示的方式,即通过显示透镜阵列得到其三维再现像^[1],显示装置如图 4 所示。投影仪(EPSON E3300W)作为信号输入系统将微图像阵列投影到光学系统中;中继透镜可以使投影输出图像缩小到与透镜阵列相匹配的大小;孔径光阑用来控制成像光束;透镜阵列用来对微图像阵列进行再现;接收屏用来接收三维再现像。显示结果如图 5 和图 6 所示。

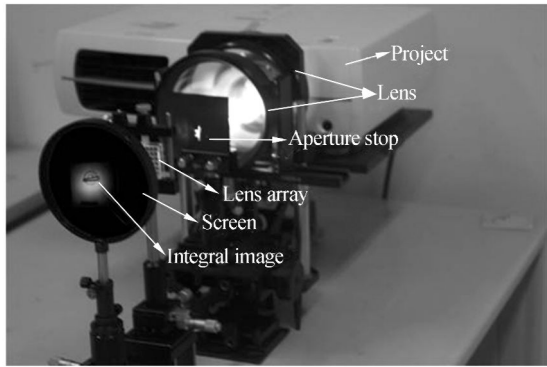


图 4 投影集成成像显示实验装置

Fig. 4 Experimental setup for projection-type integral imaging display

通过移动接收屏的位置来分别获取楔形符号‘∠’和符号‘@’的清晰集成像,如图 5 所示^[16]。对接收屏到透镜阵列的距离 l_2 进行测量,得到 2 个符号‘∠’和‘@’的清晰集成像分别位于距离透镜阵列 91.5, 100.6 mm 位置处,即深度 Δz 为 9.1 mm,基本达到深度的设计要求。接收屏上两个符号‘∠’和‘@’清晰集成像的横向尺寸分别为 1.05 cm 和 0.95 cm,此时三维物体与再现像横向尺寸的比值 δ 均近似为 5,基本达到了物像横向尺寸缩放的基本要求。三维再现像的分辨率是采用楔形测试物体‘∠’进行测量计算,其原理与星型分辨率测试板的原理相同^[17]。在接收屏上观察楔形测试物体的清晰集成像,记录楔形角度刚好可分辨的位置到楔形尖端的距离,由此计算得到所对应的再现像分辨率。实验中测量计算得到‘∠’的清晰集成像的分辨率 R_1 约为 106 dpi。考

虑到实验中透镜阵列受加工工艺的限制,透镜的面形误差和部分透镜元的偏心降低了三维再现像的分辨率,因此,尽管实验结果低于设计分辨率指标,但在一定程度上验证了上述理论的分析结果和设计方法。

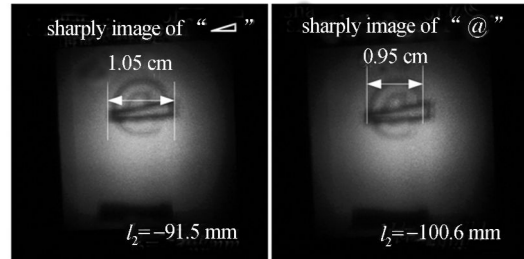


图 5 微图像阵列的三维再现像

Fig. 5 Reconstructed 3D images of elemental images

为减小高亮度投影输出对三维再现像可观测视场角直接测量的影响,将图 4 实验装置中的接收屏移去,并在孔径光阑和中继透镜之间增加透过率为 0.1% 的中性滤光片,以降低透射光强,方便直接记录和观看三维再现像。图 6 所示为不同水平视角方向观察到的三维再现像,其中图像的畸变是由透镜阵列中透镜元面形不均匀性造成的。从图中可以看出,三维再现像在 11.4° 范围内没有出现串扰。考虑到透镜阵列加工误差对成像的影响,这一结果基本达到了可观测水平视场角的设计要求。

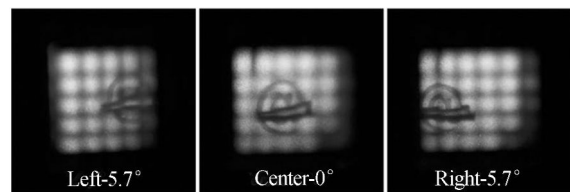


图 6 微图像阵列的三维再现像

Fig. 6 Reconstructed 3D images of elemental images

4 结 论

本文基于几何成像原理和光线追踪方法,通过分析相机阵列以及显示透镜阵列之间的关系,给出了不匹配全光学集成成像系统的详细理论分析以及相机阵列的关键参数与集成成像显示特性的关系,并在此基础上提出了一种基于相机阵列

的不匹配光学集成成像记录系统的设计方法。根据此原理设计了相机阵列记录系统,计算得到了其关键参数:记录距离为49.6 cm,相机间隔为25 mm。光学实验结果表明,根据三维再现像的设计要求,结合显示透镜阵列和相机本身的器件参数,本文设计的相机阵列光学记录系统能够完整记录场景的三维信息,所得微图像阵列经显示透

镜阵列再现后的三维集成成像的显示特性为:深度 $\Delta z=9.1$ mm,分辨率 $R_l=106$ dpi,可观测水平视场角 $\varphi=11.4^\circ$,基本满足了设计要求。由此可见,本文所提的非匹配系统中相机阵列记录系统的设计方法行之有效,可为不匹配全光学集成成像系统提供显示所需的大场景、高分辨率微图像阵列。

参考文献:

- [1] HONG J, KIM Y, CHOI H J, *et al.*. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [J]. *Appl. Opt.*, 2011,50(34):H87-H115.
- [2] 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. WANG T, YU Y J, ZHENG H D. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1414-1420. (in Chinese)
- [3] LUO J Y, WANG Q H, ZHAO W X, *et al.*. Autostereoscopic three-dimensional display based on two parallax barriers [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(18):2911-2915.
- [4] 王忠生,张学军. 空间合成孔径成像光学系统的光瞳对称性 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(9):1999-2005. WANG ZH SH, ZHANG X J. Symmetry of pupil in spatial synthetic aperture imaging optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1999-2005. (in Chinese)
- [5] 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. HAO J B, HU M L, LI L S, *et al.*. Real-time three-dimensional object recognition with microlens array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,36(11):2008-2012. (in Chinese)
- [6] 焦小雪,赵星,杨勇,等. 基于最佳记录距离的三维集成成像光学获取技术 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(11):2805-2811. JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Optical acquiring technique of three-dimensional integral imaging based on optimal pick-up distance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(11):2805-2811. (in Chinese)
- [7] HAIN M, JAVIDI B. 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays [J]. *Opt. Express*, 2005,13(1):315-326.
- [8] DENG H, WANG Q H, LI L, *et al.*. An integral imaging based three-dimensional display with wide viewing angle [J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2011, 19(10):679-683.
- [9] WANG Q H, DENG H, JIAO T T, *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010,8(5):512-514.
- [10] 王红霞,伍春洪,杨扬,等. 计算机生成三维全景图像研究现状与发展 [J]. *计算科学*, 2008, 35(6):11-14. WANG H X, WU CH H, YANG Y, *et al.*. Research and development of computer generated integral image [J]. *Computer Science*, 2008,35(6): 11-14. (in Chinese)
- [11] DENG H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Realization of undistorted and orthoscopic integral imaging without black zone in real and virtual fields [J]. *Journal of Display Technology*, 2011,7(5):255-258.
- [12] ZHOU ZH L, YAN Y, XIANG L B, *et al.*. Enhanced reconstruction of partially occluded objects with occlusion removal in synthetic aperture integral imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(4):041002.
- [13] KAVEHVASH Z, MEHRANY K, BAGHERI S. Optimization of the lens-array structure for performance improvement of integral imaging [J]. *Opt. Lett.*, 36(20):3993-3995.
- [14] 焦甜甜,王琼华,李大海,等. 基于3DS MAX的

集成成像研究 [J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 621-624.

JIAO T T, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Computer generated integral imaging based on 3DS MAX [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(5): 621-624. (in Chinese)

- [15] 袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2050-2056.

YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2050-

2056. (in Chinese)

- [16] 王芳, 黎达, 赵星, 等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s109002.

WANG F, LI D, ZHAO X, *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(s1): s109002.

- [17] 曾祥照. 图像分辨率测试卡的结构与标准 [J]. CT理论与应用研究, 2005, 14(3): 29-34.
ZENG X ZH. Structure and standard of image resolution test card [J]. *CT Theory and Applications*, 2005, 14(3): 29-34. (in Chinese)

作者简介:



焦小雪(1982—), 女, 山西晋城人, 博士研究生, 2008年于河北大学获得硕士学位, 主要从事三维成像与显示技术的研究。E-mail: jiaoxiaoxue267@163.com



赵星(1980—), 男, 天津人, 博士, 副教授, 2007年于南开大学获得博士学位, 主要从事光学信息处理以及光学系统设计等领域的研究工作, 目前从事新型三维成像与显示技术的相关研究。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn



杨勇(1972—), 男, 天津人, 博士, 副教授, 2001年于天津大学获得博士学位, 主要从事机器视觉、三维成像与显示等方面的研究。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn



袁小聪(1963—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 1988年于天津大学获得硕士学位, 1994年于伦敦大学(King's College)获得博士学位, 现为南开大学信息科学技术学院副院长, 主要从事微光学、光学显微成像与传感、光镊等方面的研究。E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn

导师简介:



方志良(1945—), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 1969年于长春光机学院(现长春理工大学)获得学士学位, 现为现代光学研究所所长, 主要从事应用光学、光学信息处理、图像处理等方面的研究。E-mail: zlfang@nankai.edu.cn