

doi:10.3788/gzxb20184711.1111002

三维集成成像显示系统分辨率的测试模型设计

王俊夫, 张文阁, 蒋晓瑜, 闫兴鹏, 王艺霏

(陆军装甲兵学院 信息与通信工程系, 北京 100072)

摘 要:建立了三维集成成像显示系统的分辨率测试模型,对模型所采用的形状、比例和条纹宽度等进行设计研究.首先,根据集成成像技术多角度拍摄测试模型得到视差图;然后,根据二维分辨率测试卡的测试方法对视差图清晰度线进行标定;最后,计算视差图得到合成图像并显示到集成成像系统上,测试得到系统重构三维物体的分辨率.实验结果表明:该设计支持观察者测试不同角度、不同深度的显示分辨率,量化了集成成像显示系统分辨率.模型包含 8 级分辨率清晰度线,基本满足当前三维显示系统分辨率的测试范围,可用于测量集成成像显示系统的重构景深和视场角.

关键词:三维显示;集成成像;分辨率测量;模型构建

中图分类号:TH27;O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1111002-7

Design of Resolution Test Model for Three-dimensional Integral Imaging Display System

WANG Jun-fu, ZHANG Wen-ge, JIANG Xiao-yu, YAN Xing-peng, WANG Yi-fei
(Department of Information and Communication Engineering, Army Armored Forces Academy,
Beijing 100072, China)

Abstract: The resolution measurement model of three-dimensional integral imaging display system is established, and the shape, scale and fringe width of the model are designed. The model can be used to measure the reconstructed depth of field and field angle of integral imaging display system. First, the parallax map is obtained by taking the test model from multiple angles according to the integral imaging technology. Then, the parallax image definition line is calibrated according to the method of the two-dimensional resolution test card. Finally, the composite image calculated by parallax images is loaded onto the integral imaging system and the the resolution of three-dimensional objects reconstructed by the system can be tested. Experimental results show that this design supports the observer to test the display resolution in different angles and depths, and quantifies the resolution of the integral imaging display system. The model contains 8-level resolution definition line, which basically meets the test range of current three-dimensional display system resolution and can be used to measure the reconstructed depth of field and field angle of integral imaging display system.

Key words: Three-dimensional display; Integral imaging; Resolution measurement; Model building

OCIS Codes: 110.6880; 100.6890; 150.6910

0 引言

集成成像技术是三维立体显示技术的重要研究方向,该技术最早由 Lippmann 提出^[1-2],利用人眼的双目视差原理动态地记录和再现三维效果,是一种利用计算机图形、图像处理等显示技术的三维立体显示技术.随着算法的不断优化以及显示器件等设备精度不断提高,集成成像技术在工程测量、生物科学、医疗保

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFB1104500),国家自然科学基金(No.61775240)和全国优秀博士学位论文作者专项(No.201432)资助

第一作者:王俊夫(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为集成光学及数字全息术. Email:13898739990@163.com

导师(通讯作者):蒋晓瑜(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为全息显示技术、集成光学. Email:jiangxiaoyu2007@gmail.com

收稿日期:2018-06-21; **录用日期:**2018-08-31

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

障、三维艺术、商业广告、保安防伪以及存储技术等多方面已显示出独特的优势^[3]。

基于集成成像技术的三维显示系统重构的分辨率与显示系统硬件参数和所运用算法有关。其算法包括两步法^[4-6]、基于交织的像素映射方法^[7-9]和光路追迹法^[10-12]等。通过计算所用算法的光路和映射关系,可以定性地估计显示系统的分辨率,但由于光在传播中存在干涉和衍射现象,估值与实际测量到的显示系统分辨率之间存在误差。现有的关于显示系统分辨率测试的研究主要针对二维图像、三维模型扫描仪和显微CT三维分辨率^[13-15]等,针对基于集成成像三维显示系统性能的研究多集中于显示系统的清晰度、深度、和角度^[16-17],缺少能够量化判断三维重构物体特性参数的方法。本文根据集成成像系统重构光场的光路特点,建立了三维分辨率测试模型,讨论了模型的构成、参数设置及理论依据,并通过实验进行验证。

1 模型构成及工作原理

1.1 模型构成

图1为三维集成成像显示系统的分辨率测试模型,图2为三视图。模型主要由一组轴线在同一平面上的17个圆锥体组成,并且相邻两个圆锥体的轴线方向平行且相反。在空间建立直角坐标系,原点在中间圆锥体(第9个圆锥体)轴线中点, x 轴与模型轴线所在的截面夹角为 $\theta = \arctan \frac{1}{2}$, y 轴是相机拍摄正视图的光轴方向, z 轴沿测试模型中间圆锥体的轴线向顶点方向为正方向。

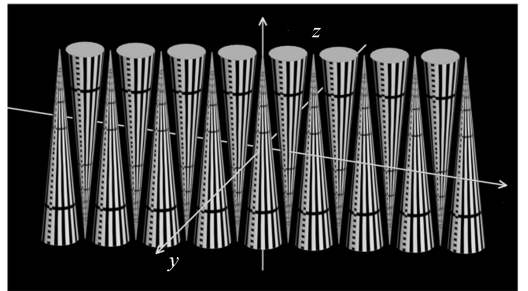


图1 三维集成成像显示系统的分辨率测试模型
Fig.1 Resolution test model of 3D integral imaging display system

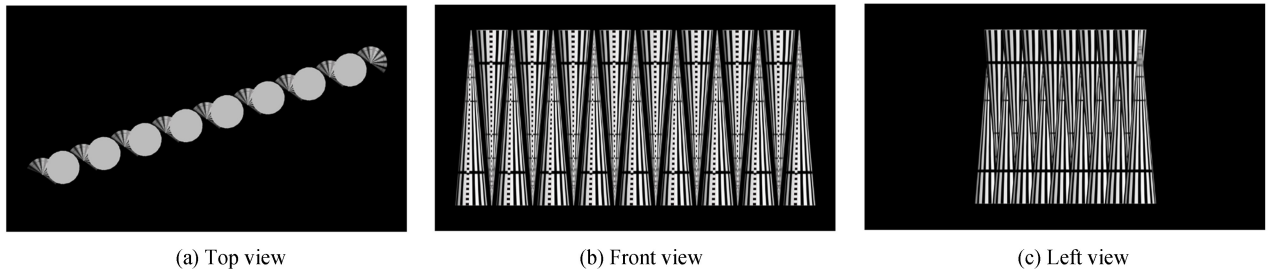


图2 分辨率测试模型三视图
Fig.2 Three views of the resolution test model

每个圆锥体表面附有沿母线向底面方向形状相同、逐渐变宽的15条分辨率清晰度条纹(1条黑色虚线条纹 l_0 ,14条黑色条纹 $l_1 \sim l_{14}$),条纹宽度与条纹间距均相等。由于清晰度条纹由圆锥顶部到底部的宽度逐渐变大,观测不同宽度部分的清晰度就能得到不同的分辨率值。模型通过标定了8条垂直于轴线的分辨率刻度线条纹,用以辅助判断显示系统分辨率。每个圆锥体附有8条沿横截面圆周方向的黑色分辨率刻度线,由圆锥体底面到顶点方向分别为 $c_1 \sim c_8$,刻度线对应的分辨率条纹宽度成倍数的线性关系(对应测量的分辨率为1:2:3:4:5:6:7:8)。每个圆锥体底面半径为 $r = 85$ mm,高度为 $h = 900$ mm。相邻圆锥体轴线之间的距离相等, $\Delta x = 100$ mm, $\Delta y = 50$ mm($\Delta = \sqrt{100^2 + 50^2} = 50\sqrt{5}$ mm)。模型尺寸的长宽高为1 770 (L)×970 (W)×900 (H) mm。

1.2 模型工作原理

首先,为了获得显示系统再现模型的视差信息,对分辨率测试模型的正视图进行拍摄。在得到对应视角的视差图片的同时,确定分辨率刻度线对应清晰度条纹的像素点个数。再对分辨率测试模型进行多个视角拍摄,得到了多个包含不同视差信息的视角图片。然后根据三维显示系统的硬件参数,计算合成单元图像阵列(运用集成成像技术合成的带有物体三维信息的二维图像)。最后将合成的单元图像阵列加载到待测试的三维显示系统上,观察者能观看到重构的三维分辨率测试图模型。

集成成像系统在记录分辨率测试图模型的三维信息时,不同的圆锥体处于不同的深度平面。这使得在观

看重构测试图模型时,观察者能看到处于不同深度平面的圆锥,所以通过重构模型中 17 个圆锥的清晰程度,就可以判断集成成像系统所能显示的深度范围以及效果最清晰的深度平面.通过集成成像重构算法的映射关系可以大致确定重构模型的景深和位置,但由于不同的三维显示系统能够显现的深度范围不同,通过观察圆锥体的清晰个数可以判断显示系统的显示深度范围,观察模型中最清晰的圆锥体位置就能判断出最清晰的深度平面.集成成像显示系统的重构显示具有一定的视场角,观察者在在移动观看的过程中,通过观察重构模型的清晰度来判断所观看的角度以及系统所能显示的视场角范围.观察者在某一视角,首先要观察并找到最清晰圆锥体,然后在该圆锥体上观测 8 级分辨率刻度线对应的清晰度条纹.通过观察判断得到最清晰分辨率条纹对应的刻度线,就可以确定该显示系统在该视角的三维显示分辨率.

2 理论依据

2.1 三维成像原理

基于集成成像的三维显示技术包括记录和再现两个过程^[16,18-19],如图 3.记录过程是通过相机阵列拍摄三维目标,获得带有不同视差信息的目标单元图像.将视角范围内目标场景中的三维信息以二维平面图像的形式记录到与透镜个数相等的相机阵列上^[20].再现过程是使用二维显示设备和微透镜阵列组成的三维显示系统,让观察者能够在屏幕一侧观看到物体的三维立体图像.该过程利用光路可逆原理对目标进行光线追迹并映射到单元图像阵列中,将合成后的图片加载到二维显示器上,置于微透镜阵列的焦平面处,通过还原光路重构空间场景的三维立体图像.

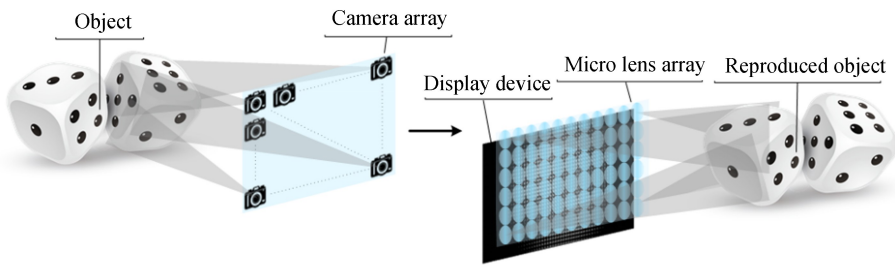


图 3 基于集成成像的三维显示技术过程
Fig.3 Three-dimensional holography based on integral imaging

将拍摄得到的视角图像合成单元图像阵列,使得显示器上每个单元图像都对应一个微透镜.每一个单元图像上的像素发出的光束经过微透镜阵列后折射聚焦形成一个个焦点,这些焦点所在的平面称为中心深度平面^[17,21].在该平面上能显示最高分辨率的图像,根据高斯公式可以计算出中心深度平面到显示器的距离 l ,即

$$f^{-1} = g^{-1} + l^{-1} \quad (1)$$

式中, f 是微透镜阵列的焦距, g 是微透镜阵列到显示屏幕的距离.从光路的几何关系上可以判断出三维显示系统的分辨率与微透镜阵列中透镜的个数有关,也就是与从某一视点出发所能看到的透镜主轴的数量有关.如图 4,在实际观看的过程中,观察者在观看一个视点的重构图像时,往往会接收到相邻视点旁轴像素点的信息,使得人眼观看到的单个视点图像是相邻多个视点图像共同作用的结果,从而对显示系统的分辨率产生了影响,无法直接通过像素映射关系计算得到三维显示系统的分辨率.

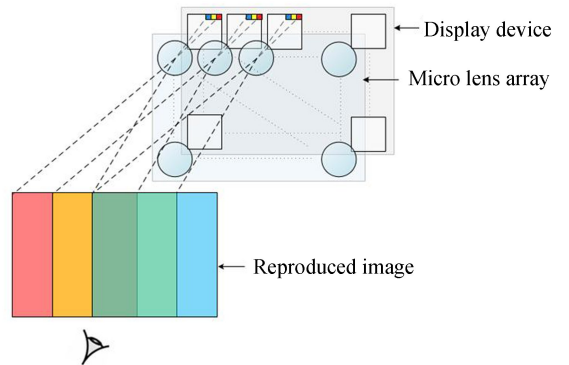


图 4 人眼看到的单个视点图像
Fig.4 Single viewpoint image by eye

2.2 二维测试图工作原理

传统的二维测试图是指用来测试、维修电视机的二维专用电视图形,其中的清晰度线为 140、220、300、380、500 线共 5 级,用来观察和调整电视机的清晰度、色饱和度部分的带宽.另一种分辨率测试卡^[22-23]是用来测试相机的拍摄性能,通过设置具有一定间距的条形图样,采取统一拍摄角度和拍摄环境,让观察者能够判断显示系统中观看清晰条纹对应的等级,从而判定显示器的显示分辨的最低值.

人眼所观看到的三维场景物体是大脑根据双眼分别观看到的两幅二维图像分析合成得到,本文设计的模型利用了二维测试图的工作原理,通过观察清晰度条纹来判断显示系统分辨率等级.通过对模型正视图的拍摄,得到 $L \times W$ 个像素点的分辨率视角图片.然后再测量正视图图片中分辨率刻度线 $c_1 \sim c_8$ 对应分辨率清晰条纹间的像素点个数 $n_1 \sim n_8$.以分辨率为 $19\ 200 \times 10\ 800$ 的正视图图像为例,可以测量得到刻度线 $c_1 \sim c_8$ 对应分辨率测试条纹的像素点个数分别为108、54、36、26、22、18、15、13个,对应的测试分辨率分别为 178×100 、 366×200 、 534×300 、 722×400 、 890×500 、 $1\ 068 \times 600$ 、 $1\ 246 \times 700$ 、 $1\ 444 \times 800$.将带有分辨率测试模型视差信息的单元图像阵列加载到集成成像显示系统后,观察者在某一视角观察到最清晰的圆锥体上最清晰的分辨率条纹,从而得到其对应的分辨率刻度线为 c_i ,对应条纹间的像素点个数为 n_i .对于二维显示屏幕尺寸为 $A \times B$ mm的集成成像显示系统,观察者能够判断该系统在某一视角的重构显示画面中每英寸的像素数目(Pixels Per Inch, PPI)为

$$\text{PPI} = \frac{1}{n_x} \sqrt{\frac{L^2 + W^2}{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

2.3 视角测试原理

在集成成像显示系统中,观看视角 θ 是十分重要的特征参数^[24-25]. θ 是指能够观察到连续、无跳变的三维重构图像范围.模型中分辨率条纹的宽度与条纹的间距均相等,所以每个条纹或条纹间隔可以表示为 $\theta_0 = 360^\circ / (15 \times 2) = 12^\circ$ 的圆周角.黑色虚线条纹定义为0号条纹,视野中虚线0号条纹左侧和右侧的黑色条纹分别编号为 $k_{l_1} \sim l_7$ 和 $k_{r_1} \sim r_7$.当观察者在某一视角观测显示系统时,视线方向对应的第 k 个条纹或条纹间隔就能表示所在观察角度为 $2k\theta_0$.观察者左右移动观看视角至不能看清再现模型时,视线方向对应第 k_{l_i} 和 k_{r_m} 个条纹,计算可得到显示系统的视场角度,即

$$\theta = 2(k_{l_i} + k_{r_m})\theta_0 \quad (3)$$

2.4 深度测试原理

不同的三维显示系统能够再现的深度范围不同.根据透镜成像原理以及高斯公式可以计算得到重构图像的理论位置,但现实场景中通过相邻透镜的光线以及相邻视点的图像之间都会产生相互干扰,导致计算的理论值会出现一定偏差.在拍摄记录分辨率测试模型的过程中,模型圆锥体轴线所在的平面与拍摄时相机阵列不平行.所以在集成成像显示系统重构模型图像时,不同的圆锥体会处于不同的深度平面^[26].通过观察圆锥体的清晰个数 n 可以判断显示系统的大致显示深度范围 R_d ,即

$$R_d = \Delta y \cdot n(A/L) \quad (4)$$

式中, A 是集成成像显示系统中二维显示系统的显示器长度, L 是该模型的模型长度, Δy 是模型中相邻圆锥体轴线沿 y 方向的间距.

3 实验测试与结果

为了更好地证明模型的可行性,通过计算机记录和光学再现相结合的方法来进行测试实验.图5展示了测试的集成成像显示系统,系统包括一个Mac显示屏幕,一组微透镜阵列和一块全息功能屏幕.显示屏幕的尺寸为 $597\text{ mm(H)} \times 336\text{ mm(V)}$,分辨率为 $5120\text{(H)} \times 2\ 880\text{(V)}$,像素尺寸为 $116.7\ \mu\text{m}$.微透镜阵列距离显示屏幕 11 mm ,由 $59\text{(H)} \times 33\text{(V)}$ 个圆透镜组成,透镜直径为 10 mm ,焦距为 10 mm .

利用3D Max软件构建三维集成成像显示系统分辨率测试模型,模型大小为 $1\ 770\text{ (L)} \times 970\text{ (W)} \times 900\text{ (H)}\text{ mm}$.根据集成成像的重构原理用模拟相机对模型进行拍摄,模拟相机与目标的轴向距离为 $4\ 000\text{ mm}$,焦距为 81.2 mm ,记录过程中得到 59×33 张视角图片,左右两端视角图片对应的视场夹角为 36° .利用

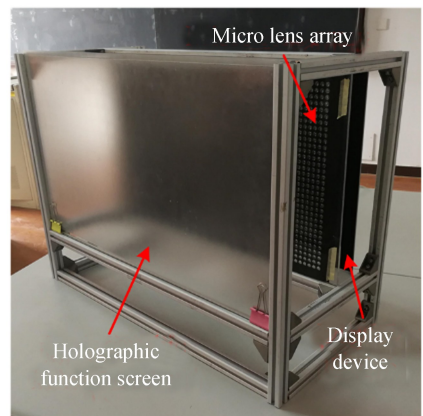


图5 测试实验中使用的集成成像显示系统
Fig.5 Integral imaging Mac display system used in the test experiments

传统的集成成像算法,将视角图片合成的单元图像阵列加载到待测试显示系统中,测试模型的显示效果如图6.

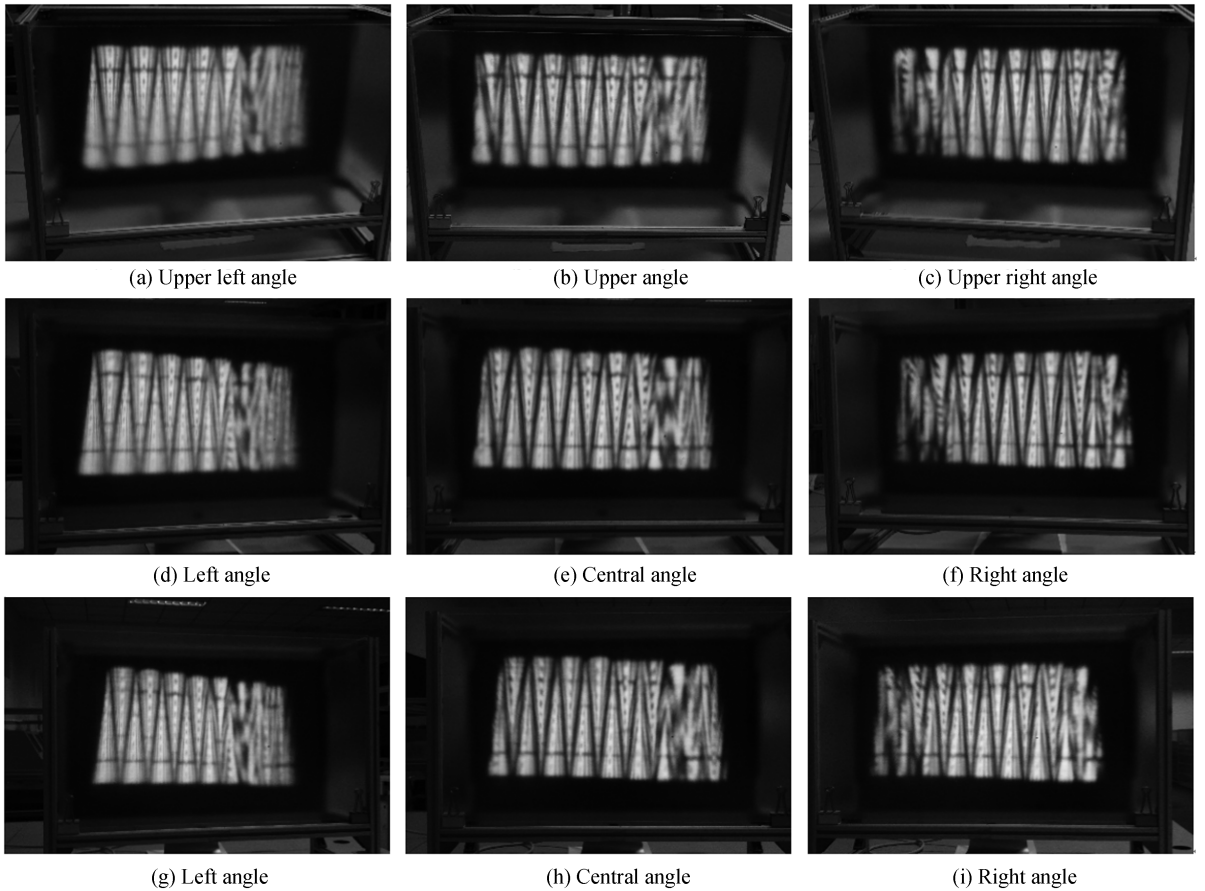


图 6 三维集成成像 Mac 显示系统分辨率测试效果

Fig.6 Resolution test renderings of three-dimensional integral imaging Mac display system

图 6 所示的 9 个观察视角图展示了基于集成成像显示系统再现的分辨率测试模型的显示效果.显示模型图像中每个圆锥体对应一个深度平面,通过观察找到最清晰的圆锥体,该圆锥体距离中心深度平面的相对距离最小.再现模型中 8 个级别的分辨率清晰度线由圆锥底部至顶部分别表示分辨率为 178×100 、 366×200 、 534×300 、 722×400 、 890×500 、 1068×600 、 1246×700 、 1444×800 .观察得到位于系统中心深度平面附近的圆锥体后,由圆锥顶部至底部观察该圆锥体的清晰度条纹,直到能够观看到最清晰、最密集的清晰度线为止.观察得到的结果见表格 1,其中图 6 每幅观察视角图像的圆锥体由左至右编号为 1~17.

表 1 三维集成成像 Mac 显示系统分辨率测试观察结果

Table 1 Resolution test observations three-dimensional integral imaging Mac display system

Serialnumber	Perspectives	Discerniblecones	Sharpestcone	Resolution level	Resolution
1	a	6,7,8	7	2	15.1 PPI
2	b	6,8,9	8	2	15.1 PPI
3	c	5,6,7	6	2	15.1 PPI
4	d	6,7,8	7	2	15.1 PPI
5	e	6,7,8,9	7	2	15.1 PPI
6	f	5,6,7	6	2	15.1 PPI
7	g	6,7,8	7	2	15.1 PPI
8	h	6,7,8	7	2	15.1 PPI
9	i	6,7,8	7	2	15.1 PPI

通过观察图 6 中的 9 个视角,综合表 1 的观察结果得到最清晰的圆锥体标号为 7.根据集成成像的成像原理和 Mac 三维显示系统参数,计算得到该系统重构显示的中心平面到微透镜阵列的距离为 625 mm,重构显示深度范围为 40.5 mm.移动观察视角得到最左边和最右边的视场夹角分别为 0.75 个条纹间隔,计算得到系统视场角为 36° .

4 讨论

由表 1 的实验结果可知,不同视角测试得到的可分辨圆锥体个数和最清晰圆锥体的编号不尽相同。

在硬件校准上,由于实验系统利用光学再现法,系统本身的硬件参数存在误差,Mac 显示器与微透镜阵列之间的光路搭建、校准存在偏差,导致系统再现成像会产生微小的畸变,使得在观测分辨率清晰度条纹时清晰的重构条纹受到干扰。

实验中所采用的像素映射重构算法^[7]是一种利用光路可逆原理将模型发光强度和方向映射到图像阵列上的方法,但在实际模拟运算过程中存在一定的像素映射误差,对三维分辨率测试模型的清晰度会有一定影响,并且在记录过程中用模拟相机获取的视角图片与再现过程中对应视角的重构像的映射角度存在误差,重构像在角度测试的过程中会有微小的偏转,影响了系统视场角的测量。

理论上基于该算法的实验系统能够重构三维物体的分辨率为 355×165 ,实际测量得到的分辨率为 366×200 ,基本能够对该实验系统的三维显示分辨率进行有效测量。

5 结论

本文建立了三维集成成像显示系统分辨率测试模型,设计了模型的形状类别、大小比例和测试条纹宽度等参数,通过对基于 Mac 的三维显示系统进行分辨率测量,计算出该显示系统的重构深度范围和视场角大小,证明了模型的可行性,实验结果表明:该模型测试范围包含 8 个分辨率测试等级,测量精度为 100 个像素点,且支持观察者测量不同角度、不同深度的显示分辨率,基本满足三维集成成像显示系统高分辨率测试要求。

参考文献

- [1] XIA Jun, QU Di, ZHOU Xue-chao, *et al.* Progress in integral imaging display technology[J]. *Vacuum Electronics*, 2011, (5): 16-21.
夏军, 曲笛, 周学超, 等. 集成成像立体显示技术研究进展[J]. 真空电子技术, 2011, (5): 16-21.
- [2] JANG JS, JAVIDI B. Three-dimensional synthetic aperture integral imaging[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(13): 1144-1146.
- [3] WANG Ning-fang, YAN An-ying, LING Xu-yu. The development and application of integral imaging[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition)*, 2011(s1): 150-153.
王芳宁, 闫安英, 凌绪玉. 集成成像技术的发展与应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2011(s1): 150-153.
- [4] OKANO F, HOSHINO H, YUYAMA I, *et al.* Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(11): 2034-2045.
- [5] MARTINEZCORRAL M, JAVIDI B, MARTINEZCUENCA R, *et al.* Formation of real, orthoscopic integral images by smart pixel mapping[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(23): 9175-9180.
- [6] NAVARRO H, SAAVEDRA G, JAVIDI B, *et al.* 3D integral imaging display by smart pseudoscopic-to-orthoscopic conversion (SPOC)[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 25573-25583.
- [7] JUNG J H, KIIM J, LEE B. Solution of pseudoscopic problem in integral imaging for real-time processing[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(1): 76-78.
- [8] YU X, SANG X, XING S, *et al.* Natural three-dimensional display with smooth motion parallax using active partially pixelated masks[J]. *Optics Communications*, 2014, **313**(4): 146-151.
- [9] PARK J H, KIM Y, KIM J, *et al.* Three-dimensional display scheme based on integral imaging with three-dimensional information processing[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(24): 6020-6032.
- [10] ZUN Y, SANG X, YU X, *et al.* Wide field of view tabletop light field display based on piece-wise tracking and off-axis pickup[J]. *Optics Communications*, 2017, **402**: 41-46.
- [11] XING S, SANG X, YU X, *et al.* High-efficient computer-generated integral imaging based on the backward ray-tracing technique and optical reconstruction[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(1): 330.
- [12] SANG X, FAN F C, JIANG C C, *et al.* Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(24): 3803-3805.
- [13] NIU Ping-juan, XUE Wei-fang, NING Ping-fan, *et al.* Optical properties of display devices enabled by low-dimensional phase-change thin films[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(12): 1514-1520.
牛萍娟, 薛卫芳, 宁平凡, 等. 基于低维相变薄膜的显示器件光学性质的研究[J]. 发光学报, 2016, **37**(12): 1514-1520.
- [14] CHEN Tao, LIU Gui-chang, ZHANG Qian, *et al.* Test method for the resolution of three-dimensional laser scanner [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2012, **33**(10): 65-68.

- 陈涛,刘桂昌,张倩,等. 三维激光扫描仪分辨率的测试方法[J]. 自动化仪表, 2012, **33**(10): 65-68.
- [15] CHEN Jin-ping, CUI Fang-fang, ZHOU Jing, *et al.* Research progress on micro-CT three-dimensional resolution test methods[J], *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, **15**(2): 127-134.
陈津平,崔芳芳,邹晶,等. 显微CT三维分辨率测试方法研究进展[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, **15**(2): 127-134.
- [16] XU Jing. Integral imaging and field imaging based on microlens array[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 1-93.
徐晶. 基于微透镜阵列的集成成像和光场成像研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011:1-93.
- [17] WANG Qiong-hua. 3D display technology and devices[M]. Beijing: Science Press, 2011:316-326.
王琼华. 3D显示技术与器件[M]. 北京:科学出版社, 2011: 316-326.
- [18] ZHAO Xing, WANG Fang, YANG Yong, *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.
- [19] JIAO Xiao-xue, ZHAO Xing, YANG Yong, *et al.* Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1653-1660.
焦小雪,赵星,杨勇,等. 基于相机阵列的三维集成成像记录系统[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1653-1660.
- [20] YUAN Xiao-cong, XU Yu-ping, YANG Yong, *et al.* Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2050-2056.
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.
- [21] JANG J S, JAVIDI B. Three-dimensional integral imaging with electronically synthesized lenslet arrays.[J].*Optics Letters*, 2002, **27**(20): 1767-1769.
- [22] ZENG Xiang-zhao, Structure and image resolution test method of the resolution test card[J]. *Nondestructive Test*, 2001, **25**(5): 6-8.
曾祥照. 分辨率测试卡的结构及图像分辨率测试方法[J]. 无损探伤, 2001, **25**(5): 6-8.
- [23] ZENG Xiang-zhao, Structure and standard of image resolution test card[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2005, **14**(6): 29-34.
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**(6): 29-34.
- [24] PARK J H, BAASANTSEREN G, KIM N, *et al.* View image generation in perspective and orthographic projection geometry based on integral imaging[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 8800-8813.
- [25] SHIN D H, LEE B, KIM E S. Multidirectional curved integral imaging with large depth by additional use of a large-aperture lens[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(28): 7375-7381.
- [26] WANG Xiao-rui, PU Qing-feng, ZHANG Dong-yang, *et al.* Research on enhancement methods for depth of field of three-dimensional integral imaging[J], *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 26-30.
王晓蕊,卜庆风,张冬阳,等. 三维集成成像景深提高方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(8): 26-30.

Foundation item: The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB1104500), National Natural Science Foundation of China (No.61775240), Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of the People's Republic of China (No.201432)

引用格式: WANG Jun-fu, ZHANG Wen-ge, JIANG Xiao-yu, *et al.* Design of Resolution Test Model for Three-dimensional Integral Imaging Display System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1111002

王俊夫,张文阁,蒋晓瑜,等.三维集成成像显示系统分辨率的测试模型设计[J].光子学报,2018,**47**(11):1111002