

集成成像三维显示系统立体深度的研究

王芳 黎达 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 针对集成成像三维显示技术的特点,利用相邻元素图像中的同名点间距,计算了集成成像三维显示过程中再现场景的立体深度,通过深入分析系统所能再现场景的最大和最小立体深度,对集成成像三维显示系统立体深度的再现能力进行了表征。结果表明透镜阵列间距和同名点间距对集成成像三维显示系统再现场景的立体深度有重要的影响,而显示器件的分辨率和透镜间距则决定了系统最终的立体深度再现能力。在理论分析的基础上,通过改变元素图像中的同名点间距,在光学实验上实现了对系统再现场景立体深度的调制。

关键词 三维显示; 集成成像; 立体深度; 同名点间距

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s109002

Study on the Stereo Depth of Integral Imaging Three-Dimensional Display System

Wang Fang Li Da Zhao Xing Yang Yong Fang Zhiliang Yuan Xiaocong

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

Abstract In connection with the characteristics of integral imaging three-dimensional display, the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system has been calculated using the cognominal-points spacing in the adjacent elemental images. Through in-depth analyze the maximum and minimum stereo depth reproduced by the system, the reconstructing ability of stereo depth is presented. The results show that the lens array pitch and cognominal-points spacing have important influence on the stereo depth, and then the reconstructing ability of stereo depth in the integral imaging system is determined by the resolution of display device and the lens array pitch. On the basis of theoretical analysis, modulation of the stereo depth of system is realized with optical experiments through changing the cognominal-points spacing.

Key words three-dimensional display; integral imaging; stereo depth; cognominal-points spacing

OCIS codes 100.6890; 220.2740; 110.6880

1 引言

由于具有逼真的视觉效果、直接反映三维(3D)场景空间关系等优点,三维成像和显示技术受到越来越多的关注,其在教育、医学、精密测量、图像艺术、建筑装饰和立体电视等领域的作用也越来越显著。但由于存在视差不连续、观察点被限定、需要相干光照明或佩戴传统的立体眼镜^[1,2]等缺点使得三维成像和显示技术的使用受到局限。近年来随着光

学器件加工技术和光电技术的高速发展,使具有全视差和连续观察点、不需要佩戴任何辅助设备的集成成像技术^[3]逐步复苏并得到发展,从而弥补了传统三维成像技术的不足。

立体显示区别于平面显示的主要特性是图像的立体深度,与三维显示的景深具有完全不同的含义,后者是指显示空间可以得到一个清晰可分辨再现像的轴向范围^[4]。而立体深度是指再现场景中两个或

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-19

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327702)资助课题。

作者简介: 王芳(1986—),女,硕士研究生,主要从事集成成像三维显示系统方面的研究。E-mail: kokoguodong@163.com

导师简介: 方志良(1945—),男,教授,主要从事应用光学及光学信息等方面的研究。E-mail: zlfang@nankai.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

者多个立体像之间沿轴向的相对距离,体现了再现像在空间上的相对位置关系。通常,再现场景的立体深度越大,人眼感知的三维立体感就越强。因此,如何在不改变系统结构和参数的前提下,获得更大的显示立体深度,实现更强的三维显示立体感,就成为三维显示技术的重要研究内容。

目前对基于双目视差原理的传统三维显示技术立体深度的研究已经比较成熟^[5],可通过对不同视角图像的处理,满足显示观看时对立体深度和立体感的要求。但由于该技术与集成成像三维显示技术的原理不同,其研究结果无法完全适用于集成成像三维显示技术。早期有对集成成像三维显示立体深度的一些研究^[6],需要改变光学系统的结构参数实现显示立体深度的调制,这种方法会使系统成本显著增加,且操作和调整过程复杂,不利于实际应用中根据显示需要对立体深度进行快速调制。

为此,针对集成成像三维显示技术的特点,利用

相邻元素图像的同名点间距,计算了集成成像三维显示系统再现场景的立体深度。通过深入分析透镜阵列间距及同名点间距对立体深度的影响,对集成成像三维显示系统立体深度的再现能力进行了表征。在理论分析的基础上,通过改变元素图像中的同名点间距,在光学实验上实现了对系统再现场景立体深度的调制。

2 集成成像三维显示系统的立体深度

集成成像的原理如图 1 所示。在三维物体信息获取阶段,通过透镜阵列记录物体不同视角的信息,得到与透镜阵列个数相同的元素图像并保存在 CCD 或者其他介质上,经过计算机处理的元素图像再现时放在显示器或者空间光调制器(SLM)上,前置透镜阵列,来自元素图像的光线通过透镜阵列形成原物体的三维立体图像^[7]。

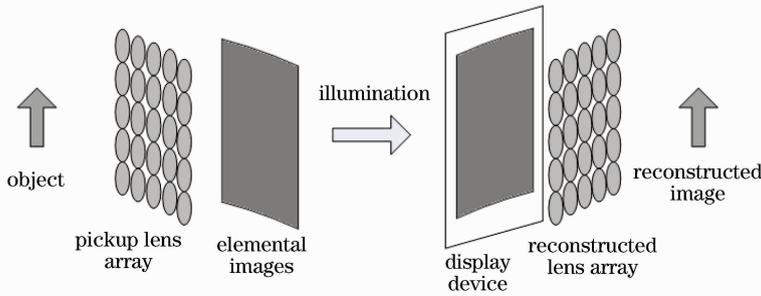


图 1 集成成像系统概念

Fig. 1 Concept of integral imaging system

集成成像系统的景深受透镜阵列间距和焦距的影响,决定了再现立体像在轴向上清晰可辨的范围,不足以说明物空间三维场景中物体空间位置关系的再现情况,即不能在像空间中表征多个像之间的相对位置关系。而在实际应用中更加重要的是由再现像彼此之间的空间位置关系所形成的观看立体深度感,即集成成像三维显示系统再现场景的立体深度

D_{Δ} ,如图 2 所示,其中 A 和 B 表示物空间相距一定距离的两个物点,二者通过透镜阵列成像形成元素图像,在第 i 个元素图像上的像点分别为 A'_i 和 B'_i ,由于透镜阵列可以获取物点不同视角的信息,所以 A 、 B 两点在不同元素图像上的位置是不同的。同名点间距即为同一物点在不同元素图像上像点位置的间距,如图 2(a)中 Δ_A 和 Δ_B 分别表示物点 A 和 B 在

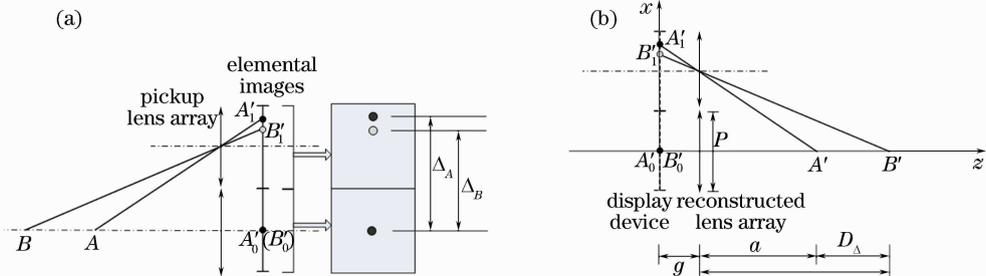


图 2 集成成像三维显示系统的立体深度。(a)同名点间距;(b)立体深度

Fig. 2 Stereo depth of integral imaging three-dimensional display system. (a) Cognominal-points spacing; (b) stereo depth

中心及第一元素图像上像点的同名点间距(由集成成像的特性可知,同一点在各个相邻元素图像上的同名点间距是相同的,所以为了示图简单,选取中心及第一元素图像上的同名点间距)。图 2(b)为通过同名点间距计算集成成像三维显示系统再现场景立体深度的示意图,其中 A' 和 B' 分别为 A 和 B 经过透镜阵列再现的像点, a 和 b 为二者相应的像距, g 为显示设备到透镜阵列的距离, p 为透镜阵列的间距,对于密接的透镜阵列,间距与子透镜的孔径相同。

由图 2 可以得到 A' 和 B' 两点的间距,即 A 和 B 点再现后的立体深度 D_Δ 为

$$D_\Delta = b - a = pg \frac{\Delta_A - \Delta_B}{(\Delta_A - p)(\Delta_B - p)}, \quad (1)$$

其中

$$\Delta_A = p \cdot \frac{g+a}{a}, \quad (2)$$

$$\Delta_B = p \cdot \frac{g+b}{b}, \quad (3)$$

从式(1)可以看出,透镜阵列间距和同名点间距对集成成像三维显示系统的立体深度有重要影响,对于确定的系统,改变同名点间距是改变立体深度的一个简便有效的方法。系统立体深度的大小体现了再现空间的深度信息,直观的表现了再现场景的三维立体效果,立体深度越大,三维立体感越强。

但是,系统的立体深度不是无限的,由图 2(b)的几何关系可以看出,受点 A'_1, B'_1 位置关系的影响, D_Δ 存在最大值与最小值。把一个元素图像沿 x 轴方向上可以显示的像素数记为 M , 密接透镜条件下 $p = M\delta$, 其中 δ 为显示器件一个像素的大小,则点 A'_1, B'_1 处于 $[p + \delta, 3p/2]$ 之间。当 $\Delta_A = 3p/2$ 且 $\Delta_B = p + \delta$, 即 A'_1, B'_1 位于如图 3 所示的位置(A'_1 点位于沿 x 轴正向第一元素图像的顶端像素点处, B'_1 位于沿 x 轴正向第一元素图像中心向上的第一个像

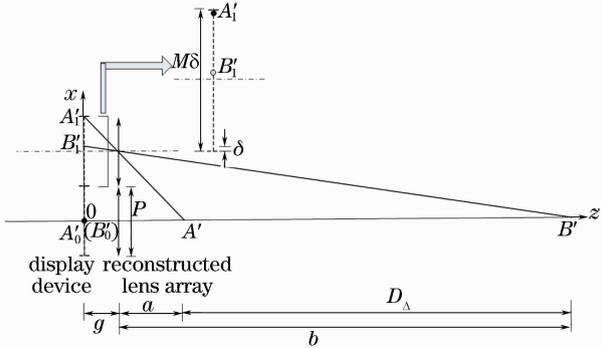


图 3 集成成像三维显示系统立体深度的最大值
Fig. 3 Maximum stereo depth of integral imaging three-dimensional display system

素点处)时, D_Δ 最大, 表示为

$$D_{\Delta\max} = g \frac{p - 2\delta}{\delta}. \quad (4)$$

当 $\Delta_A = 3p/2$ 且 $\Delta_B = 3p/2 - \delta$, 即 A'_1, B'_1 位于如图 4 所示的位置(A'_1 点位于沿 x 轴正向第一元素图像的顶端像素点处, B'_1 位于沿 x 轴负向 A'_1 点的下一个像素点处)时, D_Δ 最小, 表示为

$$D_{\Delta\min} = g \frac{4\delta}{p - 2\delta}. \quad (5)$$

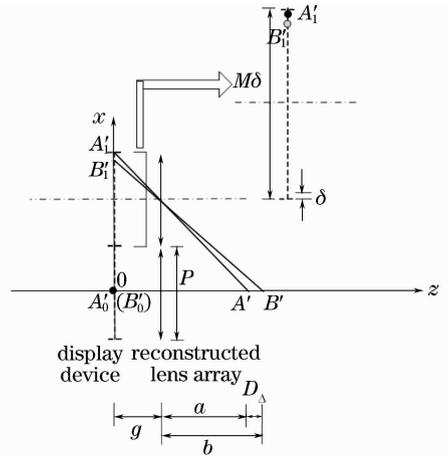


图 4 集成成像三维显示系统立体深度的最小值
Fig. 4 Minimum stereo depth of integral imaging three-dimensional display system

根据集成成像三维显示的原理,在满足元素图像叠加集成的条件下, g 是定值,从(4),(5)式可知立体深度存在最大值和最小值,由透镜阵列间距和显示器件的分辨率决定,表征了集成成像三维显示系统立体深度的范围,集成成像系统确定了,其再现立体深度的能力也就确定了。通过改变元素图像上的同名点间距,可以根据需要对立体深度在系统确定的最大值与最小值之间的调制。

3 实验验证

为了验证本文提出的计算集成成像三维显示系统立体深度的方法以及通过改变同名点间距可以实现对立体深度的调制,我们进行了光学实验的验证。实验装置如图 5 所示,采用计算集成成像获取元素图像 I,物空间三维场景是间距为 10 mm 的两个字母“3”和“D”,通过投影方式显示元素图像,透镜阵列与投影仪之间的透镜把元素图像缩放到与透镜阵列匹配的尺寸,光学再现时通过接收屏在不同位置接收到“3”和“D”的清晰像,二者之间的距离即集成成像三维显示系统的立体深度,为了避免相机景深随物距不同而变化对实验结果的影响,实验时相机

与接收屏的相对位置始终保持不变,实验所用参数如表 1 所示。

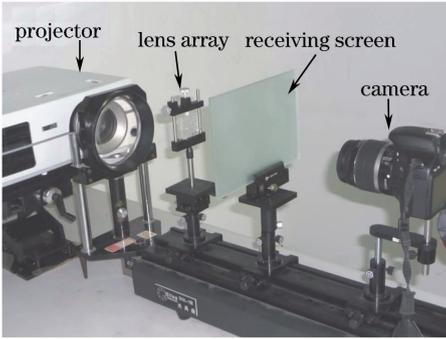


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Lens array	Lens aperture /mm	5
	Lenslet number	49
	Focal length /mm	14
Elemental image I	$\Delta_{A I}$ /mm	5.925
	$\Delta_{B I}$ /mm	5.805
	$D_{\Delta I}$ /mm	8.864

图 6 所示为元素图像 I 在两个不同位置得到的“3”和“D”的再现清晰像。为了使清晰像具有相对准确的判断,实验时截取一系列不同位置的图像,通过相邻像素灰度差分法(SMD)^[8]评价各图像的清晰度,从而得到成像最清晰的位置,图 7 绘出了元素图像 I 再现像“3”和“D”在不同位置的 SMD 曲线图,从图上可以看出,两个字母分别在透镜阵列相距 17.3 cm 和 17.9 cm 处得到 SMD 的最大值,即二者在此距离处最清晰,相应的空间深度为 6 mm,由于透镜阵列质量的影响,实验结果与理论计算值 8.864 mm 有一定的偏差,但是比较接近,从而验证了该计算立体深度方法的正确性。

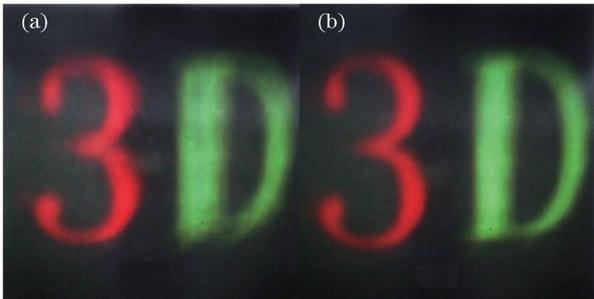


图 6 元素图像 I 再现像 (a)“3”的清晰像;(b)“D”的清晰像

Fig. 6 Reconstructed images of elemental image I

(a) sharp image of “3”; (b) sharp image of “D”

改变元素图像上的同名点间距可以根据需要对立体深度进行调制。预期想要得到 18 mm 的立体深度,通过改变元素图像 I 的同名点间距得到新的元素图像 II, I 与 II 保持字母“3”在空间位置上的一致性,只对“D”进行了适量的缩放,所以 $\Delta_{A II} = 5.925$ mm,由(1)式计算得 $\Delta_{B II} = 5.709$ mm。以相同方式获取一系列元素图像 II 的再现像,计算其 SMD 值并绘出曲线如图 7 所示,因为元素图像 I 与 II 保持了“3”的一致性,所以二者得到“3”再现像的 SMD 相同。由图 7 可知,元素图像 B 再现的空间深度为 14 mm,基本上达到了预期的立体深度,实现了对立体深度的调制,元素图像 II 的再现清晰像如图 8 所示。

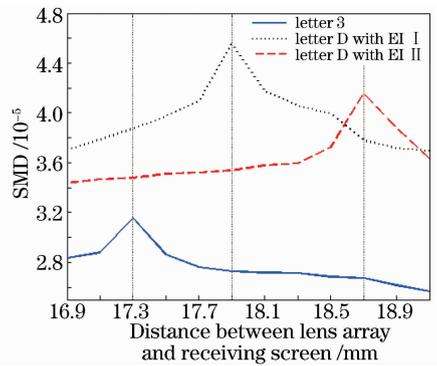


图 7 元素图像 I 和 II 再现像的 SMD

Fig. 7 SMD of reconstructed images with elemental image I and II

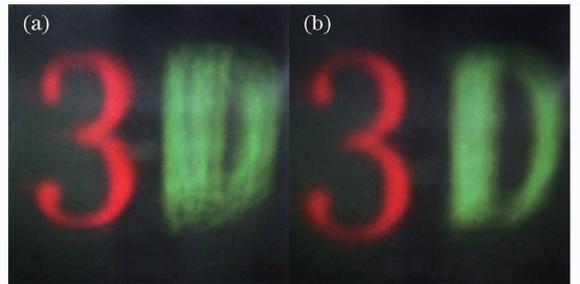


图 8 元素图像 II 再现像 (a)“3”的清晰像;

(b)“D”的清晰像

Fig. 8 Constructed images of elemental image II

(a) sharp image of “3”;(b) sharp image of “D”

对集成成像三维显示系统而言,物空间场景经过再现后,其立体深度与横向尺寸的比例会发生如下的变化^[6]:

$$\frac{D_{\Delta}}{w_{\Delta}} = \chi \cdot \frac{D_{\Delta 0}}{w_{\Delta 0}}, \quad (6)$$

式中 $w_{\Delta 0}$ 和 $D_{\Delta 0}$ 分别表示物空间场景的横向尺寸和轴向深度, w_{Δ} 和 D_{Δ} 表示再现像空间的横向尺寸和显示立体深度, χ 是与系统结构相关的系数。传统的

立体深度调制方法由于改变了系统的结构参数,使 χ 的数值发生了改变,引起了再现像立体深度与横向尺寸比例的变化。在本文所述的立体深度调制过程中,系统结构并无变化, χ 为常数,根据图2的几何成像关系可知,元素图像上同名点间距的变化,等效于物空间场景的轴向深度即(6)式中的 $D_{\Delta 0}$ 发生了改变,从而引起调制后再现像立体深度与横向尺寸的比例发生改变。而无论哪种显示立体深度调制方法,横向尺寸的变化量都采用(6)式或根据系统结构参数和成像关系计算得到。实验中元素图像 I 经过处理得到元素图像 II,对应的物空间轴向深度由 $D_{\Delta 0 I} = 10 \text{ mm}$ 变为 $D_{\Delta 0 II} = 20 \text{ mm}$,二者相应的再现像空间立体深度分别为 $D_{\Delta I} = 8.864 \text{ mm}$, $D_{\Delta II} = 18 \text{ mm}$,由(6)式可知 $\omega_{\Delta II} = 1.015 \omega_{\Delta I}$,即经过调制后的再现像横向尺寸与调制前基本一致,如图6和图8所示。

4 结 论

针对三维集成成像技术的特点,利用相邻元素图像中的同名点间距,计算了集成成像三维显示过程中再现场景的空间深度,通过深入分析系统所能够再现场景的最大和最小空间深度,对集成成像三维显示系统立体场景空间深度的再现能力进行了表征。结果表明透镜阵列间距和同名点间距对集成成像三维显示系统再现立体场景的空间深度有重要的影响,而显示器件的分辨率和透镜间距则决定了系统最终的空间深度再现能力。在理论分析的基础上得到通过改变同名点间距可以对系统再现立体场景空间深度进行调制的结论,并用光学实验进行了验

证,该调制方法可以使得同一集成成像系统对不同的再现空间深度应用要求做出元素图像的相应调整,从而达到不同的立体深度感。

参 考 文 献

- 1 Xu Jing, Gui Huaqiao, Yan Jie *et al.*. The extraction of depth information based on integral imaging technology [C]. Long triangle photonic technology innovation forum and 2006 Anhui Dr. Science and Technology Forum, 2006; 176~180
徐 晶, 桂华侨, 阎 杰等. 基于集成成像技术的深度信息提取 [C]. 长三角光子科技创新论坛暨 2006 年安徽博士科技论坛, 2006; 176~180
- 2 Wu Xiang, Liao Wei, Liu Jingao. A naked-eye stereoscopic display system based on digital light processor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 417~420
吴 翔, 廖 薇, 刘锦高. 基于数字光处理器的裸眼立体显示系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 417~420
- 3 Y. Kim, H. Choi, S. W. Cho *et al.*. Three-dimensional integral display using plastic optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7149~7154
- 4 S. Adrian, J. Bahram. Three-dimensional image sensing, visualization, and processing using integral imaging [C]. *Proc. IEEE*, 2006, **94**(3): 591~607
- 5 Wang Aihong, Wang Qionghua, Li Dahai *et al.*. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(2): 433~438
王爱红, 王琼华, 李大海等. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2): 433~438
- 6 Takanori Okoshi. Three-dimensional imaging techniques [M]. Beijing: China Machine Press, 1982, 57~76
大越孝敬. 三维成像技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982, 57~76
- 7 J. H. Park, K. Hong, B. Lee. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(34): 77~94
- 8 Ren Sigang, Li Jianwei, Xie Lili. Automatic focusing technique based on gray scale difference method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(2): 53~55
任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. *光电工程*, 2003, **30**(2): 53~55

栏目编辑: 李文喆