

文章编号 1004-924X(2012)06-1159-07

基于小发散角的投影式集成成像 三维显示再现深度的拓展

张 雷, 杨 勇*, 赵 星, 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: 针对集成成像裸眼三维显示技术受三维再现像再现深度的限制而无法实现大规模应用的问题, 提出了一种基于小发散角的投影式集成成像三维再现深度的拓展方法。该方法利用投影式集成成像显示系统和一个辅助透镜来控制元素图像阵列中各像素点的发散角度, 利用小发散角度实现了再现深度的拓展。与传统的多中心平面拓展技术相比, 该方法具有系统结果简单, 扩展效率高, 对显示器件要求较低的优点。光学实验结果显示, 当元素图像阵列中各像素点的发散角为 1.79° 时, 集成成像三维再现深度是原来的 6.4 倍, 比传统的多中心平面扩展技术实现的 4 倍再现深度提升了 60%, 为提高集成成像三维再现像的品质提供了一种有效的解决方法。

关键词: 三维成像; 三维显示; 集成成像; 再现深度; 发散角

中图分类号: TN27; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1159

Enhancement of field depth for projection-type integral imaging three-dimensional display based on small diverging angle

ZHANG Lei, YANG Yong*, ZHAO Xing, 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: yangyong@nankai.edu.cn

Abstract: As the integral imaging three-dimensional(3D) display technology is limited by the depth of field in a reconstructed image, it can not be widely used in the fields of 3D display. Therefore, this paper proposes a method to enhance the depth of field in a projection-type integral imaging system based on the angle control. To enhance the depth of field, an additional lens is used to control the diverging angle of every pixel in the elemental image array. Contrast to the conventional method with multi-layers, the proposed method has advantages in simpler systems, higher efficiency and lower requests for display devices. Experimental results show that the depth of field is 6.4 times that of original one when the diverging angle is 1.79° . And as compared to the conventional method with an enhancement of 4 times depth of field, the proposed method has increased by 60% in efficiency. These results demonstrate that the proposed method gives a new way to enhance the image quality for inte-

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-02-17.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB327702); 天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目 (No. 11CYBJC01400)

gral imaging display systems.

Key words: 3D imaging; 3D display; integral imaging; depth of field; diverging angle

1 引言

1908年, Lippmann提出了一种基于集成成像(Integral Imaging)的三维显示技术^[1]。与其他三维显示技术,如全息^[2-3]和视差^[4-7]等技术相比,集成成像具有全视差、连续视场角、视觉疲劳较小和无需辅助器件等优点^[8-11]。集成成像三维显示利用一个透镜阵列和对应的元素图像阵列来重构出三维图像,其中元素图像阵列可以采用平板显示器或者投影仪来显示。受到透镜阵列的孔径和元素图像阵列显示器件分辨率等参数的限制,集成成像三维再现像的再现深度有限^[10-11],无法满足裸眼三维显示的需求。近年来,大量文献报道了如何提升集成成像三维再现像的再现深度^[12-15]。Javidi^[12]等分析了再现深度和透镜阵列参数的关系,提出了一种利用非对称透镜阵列增加再现深度的技术,借助不同参数的子透镜来实现不同的再现深度,通过参数控制使得不同的再现深度彼此相连,从而增大了整体的再现深度,但是这种技术受到非对称透镜阵列加工工艺的限制,无法实现批量生产。J. Hong等人^[13]通过控制光路实现双层中心平面来增加再现深度,但是此系统需要机械部件来控制光路,系统中的机械振动会产生噪音和振动,无法大规模应用。Y. Kim等人利用多层液晶显示LCD^[14]和多层聚合物分散液晶PDLC^[15]实现了多层中心平面拓展再现深度,利用4层中心平面使再现深度拓展到4倍。虽然多层中心平面再现深度拓展技术能有效地拓展集成成像三维再现像的再现深度;但是由于上述技术是基于多层显示器件轮换显示来实现再现深度的增加,每拓展1倍再现深度,需要增加1个显示器件,从而导致系统结构复杂和成本增加,并且随着再现深度拓展倍数的增加,对显示器件的性能要求也越来越高。对于三维再现像来说,需要50 Hz(2倍再现深度)或者100 Hz(4倍再现深度)才能满足观察者视觉舒适度的要求,因此,受显示器件刷新频率的限制,此技术目前尚无法实现更高倍数再现深度的拓展。

本文提出了一种新的拓展集成成像再现深度的方法。该方法利用辅助透镜来控制投影式集成成像显示系统中元素图像阵列中每个像素点的发散角度,从而实现了集成成像再现深度的拓展。

2 原理

集成成像是利用透镜阵列将元素图像阵列集成为来获得再现的三维信息,其三维显示原理如图1所示。从图1可以看出,再现三维物体的再现深度主要集中在再现深度中心平面附近^[10-15]。

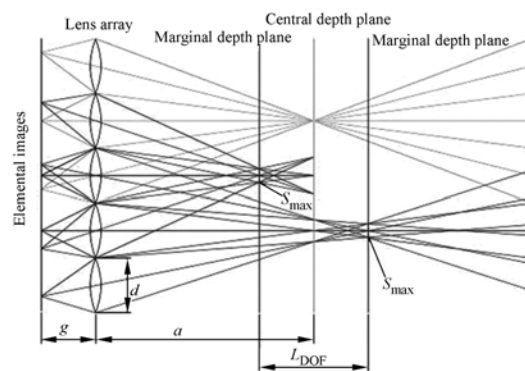


图1 集成成像再现原理示意图

Fig. 1 Principle of integral imaging display

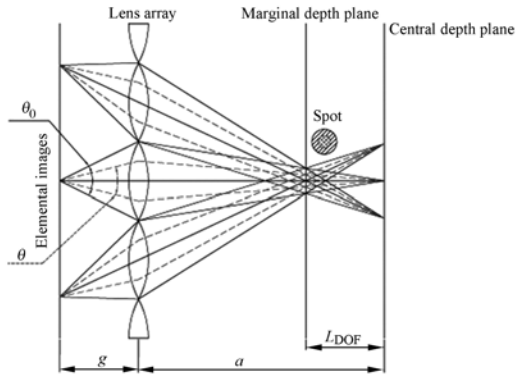
其中, g 是元素图像阵列到透镜阵列的距离, a 是透镜阵列到再现中心平面的距离, f 为子透镜焦距, a, g, f 满足透镜成像公式; d 是透镜阵列子透镜的孔径; S_{\max} 是集成成像显示系统能够接收的最大光斑直径。由此可以计算得到集成成像三维显示中,再现三维像的再现深度 L_{DOF} :

$$L_{\text{DOF}} = 2 \times \frac{S_{\max}}{d} \times a. \quad (1)$$

与传统的多中心平面扩展再现深度的方法不同,本文采用了小发散角拓展集成成像的再现深度,其原理如图2所示。

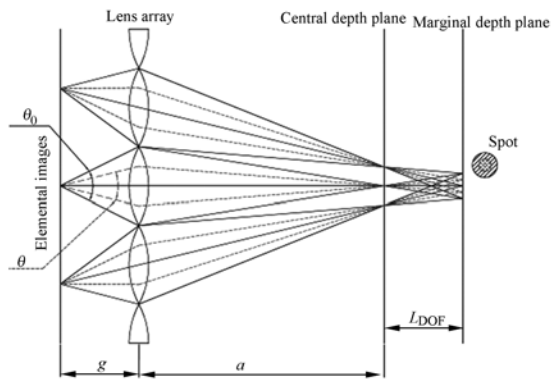
图中, g 是元素图像阵列到透镜阵列的距离, a 是透镜阵列到再现深度中心平面的距离。图2(a)和图2(b)给出了在小发散角情况下经过透镜阵列再现后边界平面上再现光斑的大小。可以看

出,与传统的集成成像再现系统相比,小发散角的光斑有明显的减小。在 S_{\max} 相同的情况下,小发散角拓展方法可以获得更大的再现深度,如图 2 (c)、(d) 所示。元素图像阵列中各点的发散角大



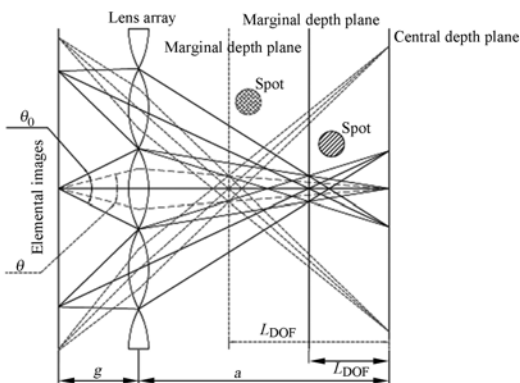
(a)传统方法边界平面上的光斑大小

(a)Spot size on marginal depth plane of traditional method



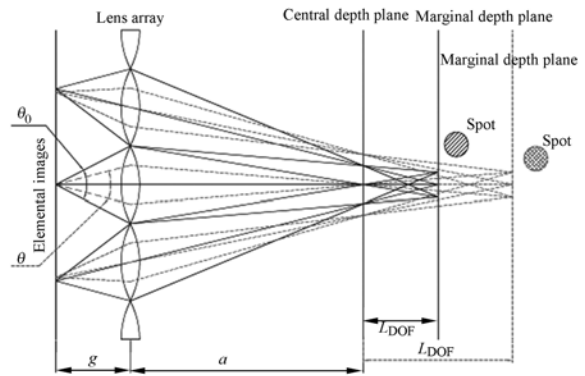
(b)小发散角边界平面上的光斑大小

(b)Spot size on marginal depth plane of small diverging angle



(c)再现深度

(c)Depth of field



(d)光斑大小

(d)Spot size

图 2 小发散角增加再现深度原理示意图

Fig. 2 Sketch of enhanced-depth of field by small diverging angle method

小和再现深度的关系为:

$$L_{\text{DOF}} = \begin{cases} 2 \times \frac{S_{\max}}{d} \times a, & \theta > \theta_0 \\ 2 \times \frac{S_{\max}}{2 \times \tan(\theta/2) \times g} \times a, & \theta \leq \theta_0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: S_{\max} 是集成成像显示系统所能容忍的最大光斑直径; d 是透镜阵列中透镜的孔径; $\theta_0 = 2\arctan(d/2g)$, 由透镜阵列的孔径 d 和元素图像到透镜阵列的距离 g 决定。从上式可以看出,随着元素图像阵列中各像素点发散角的减小,再现深度随之增加,其关系如图 3 所示。

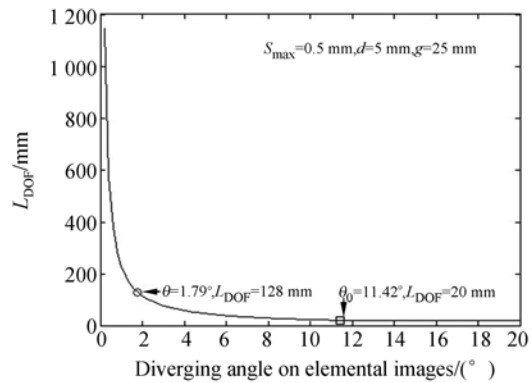


图 3 元素图像阵列中各点发散角和再现深度的关系

Fig. 3 Relation between depth of focus and diverging angle of pixels in elemental images

由图 3 可以看出,随着发散角的增加,再现深度随之减少。受到透镜孔径 d 的限制,元素图像阵列中各点的发散角在超过 θ_0 后,集成成像系统的再现深度和传统的集成成像再现深度保持一致。

3 实验结果和讨论

在上述研究的基础上,本课题组利用投影仪和透镜阵列组成了一套投影式集成成像显示系统^[9-11],如图 4 所示。其中,元素图像阵列中各点的发散角由辅助透镜控制。通过调整辅助透镜的位置,可以控制发散角的大小。实验中,辅助透镜

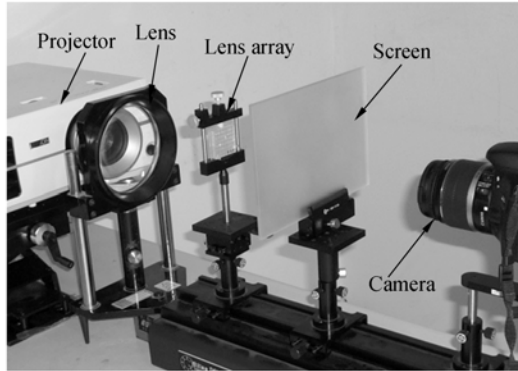


图 4 投影式集成成像显示系统

Fig. 4 Experimental setup of projector-type integral image display system

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Parameters of experiment

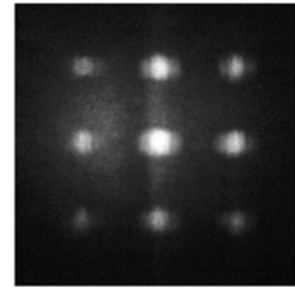
Specification	Characteristics
Lens array	
Lens shape	Square
Aperture of element lens	5 mm×5 mm
Pitch of element lens	5 mm×5 mm
Focal length	20 mm
Lens number	7(H)×7(V)
Pixels of element image	50(H)pixel×50(V) pixel
Projector and angle control lens	
N. A.	0.35
D. M. D pitch	16.38(H)mm×9.22 (V)mm
Focal length	43 mm
Focal of lens	640 mm
Diverging angle	1.79°
Integral imaging system	
g	25 mm
a	100 mm
θ_0 ($\theta_0 = 2\arctan(d/2g)$)	11.31°
S_{\max}	0.5 mm
L_{DOF} (without enhance)	20 mm
L_{DOF} (proposed method)	128 mm

到投影仪镜头的距离为 100 mm,此时元素图像阵列中各像素点的发散角为 1.79°。实验系统的参数如表 1 所示。

由上述参数可知,传统显示系统的再现深度为 20 mm。在发散角为 1.79°时,小发散角集成成像显示系统的再现深度为 128 mm。光学实验中所使用的物体是条纹型图样,条纹间距为 1 mm,如图 5(a)所示。图 5 给出了距离元素图像中心平面不同距离 L_m 处时,条纹物体的再现结果。



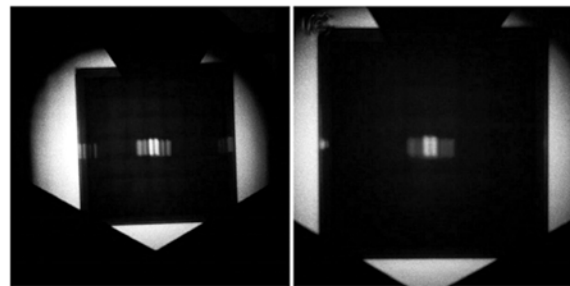
(a) 原始物体



(b) $\theta=1.79^\circ, L_m = 10$ mm 的再现像 (传统方法)

(a) Reconstructed image and flipped images with conventional method in $L_m = 10$ mm

(b) $\theta=1.79^\circ$ and $L_m = 10$ mm with conventional method



(c) $\theta=1.79^\circ, L_m = 10$ mm 的再现像(所提方法)

(d) $\theta=1.79^\circ, L_m = 64$ mm 处的再现像(所提方法)

(c) $\theta=1.79^\circ$ and $L_m = 10$ mm with proposed method

(d) $\theta=1.79^\circ$ and $L_m = 64$ mm with proposed method

图 5 不同再现深度的再现像

Fig. 5 Reconstructed images on different planes

从图 5 可以看出,传统的集成成像显示系统在 $L_m = 10$ mm 时,条纹物体已经不可分辨(图 5(b)),而小角度投影式集成成像显示系统在距离中心平面 10 mm 的平面上,再现像依然清晰可

辨,再现结果如图 5(c)所示;在距离中心平面距离为 64 mm 的平面上,再现像的条纹之间存在一定的重叠,如图 5(d)所示。在发散角 $\theta=1.79^\circ$ 时,集成成像再现系统的再现深度从原来的 20 mm 扩展到了 128 mm,是原来的 6.4 倍。

相比于传统的多中心平面扩展技术,本文所提出的小发散角拓展再现深度的方法具有很大优势。首先,采用发散角控制再现深度扩展技术,无需复杂的辅助设备,只需一个角度控制透镜即可。其次,传统的多中心平面扩展效率不高,目前基于多中心平面再现深度扩展技术一般是扩展 2~4 倍再现深度;而小发散角扩展技术能扩展 6.4 倍再现深度,并可通过进一步减小发散角来获取更大的再现深度。再者,多中心平面扩展技术在实现视频三维再现的大再现深度扩展时,对显示器件的频率有较高要求,以双中心平面扩展技术实现动态视频三维再现需要 50 Hz 的刷新频率;如果扩展 6 倍再现深度的话,需要 6 个显示器件达到 150 Hz 的刷新频率。而本文所提方法只需要 1 个刷新频率为 25 Hz 的显示器件即可实现动态三维 6.4 倍再现深度的拓展,降低了大再现深度集成成像显示系统的硬件需求。

通过上述研究,本文利用小发散角投影式集成成像显示系统对一个深度为 100 mm 的三维物体进行了再现。三维物体由三层间距为 50 mm 的单色条纹构成,条纹颜色依次为蓝,绿,红。集成成像再现的结果如图 6 所示。

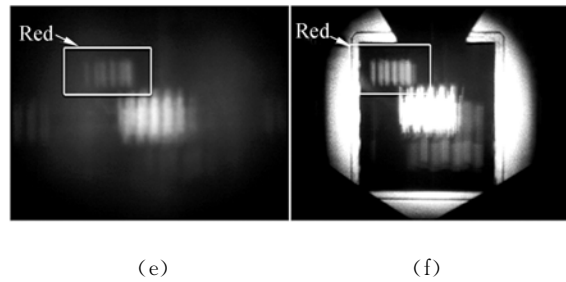
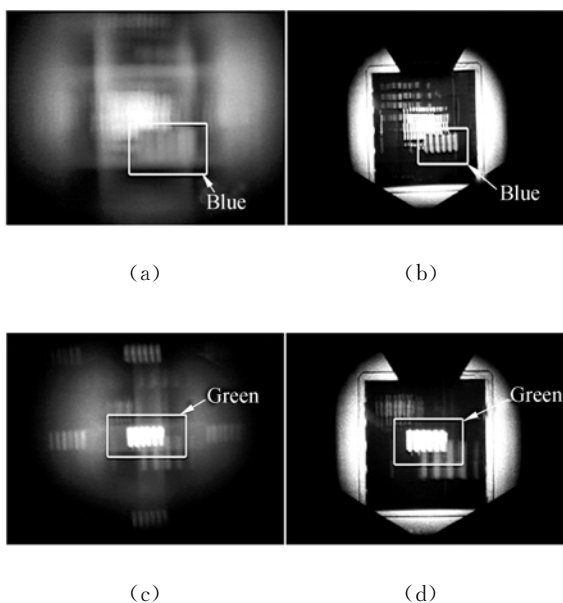


图 6 三维物体(深度 100 mm)的集成成像再现结果。(a),(c),(e)为传统集成成像的再现结果;(b),(d),(f)为小角度再现深度拓展后的再现结果

Fig. 6 Images at different locations in conventional method and proposed method. (a), (c), (e) are results of conventional method; (b), (d), (f) are results of proposed method

在再现深度中心平面上,小发散角集成成像显示系统和传统的集成成像显示系统均能再现出清晰的结果,而对于三维物体的边缘来说,由于三维物体深度为 100 mm,已经超出了传统集成成像显示系统的再现深度(表 1, $L_{\text{DOF}}=20$ mm)。其显示结果如图 6(a)和图 6(e)所示,红色部分和蓝色部分均无法清晰再现。但在小发散角集成成像显示系统中,系统再现深度为 128 mm,大于所再现三维物体的深度,因此能够获得清晰的再现结果,其结果如图 6(b)和图 6(f)所示。三维再现像的边缘清晰可见,由此可知小发散角集成成像再现深度拓展技术能够有效地拓展集成成像显示系统的再现深度。

4 结 论

本文提出了一种新的集成成像再现深度拓展技术,通过控制元素图像阵列中各像素点的发散角度实现了再现深度的拓展。文中从理论上深入分析了元素图像阵列中各像素点发散角和再现深度的关系,并搭建了小发散角投影式集成成像显示系统。光学实验结果显示,利用投影仪和辅助透镜实现了发散角为 1.79° 时 128 mm 的再现深度拓展。与传统的集成成像显示 20 mm 的再现深度相比,本文所提的方法将再现深度提高了 5.4 倍。相比于传统的多中心平面拓展再现深度拓展技术而言,小发散角拓展系统具有系统结果简单,扩展效率高,对显示器件要求较低的优点。该方法不仅为集成成像三维再现像品质的提高提供了

一种行之有效的解决手段,而且还可以和传统的多层中心平面再现深度扩展技术相结合,从而实

现更大倍数再现深度的扩展,为集成成像的实际应用提供了理论依据和实现思路。

参考文献:

- [1] LIPPMANN G. La photographie integrale[J]. *Comptes Rendus Acad. Sci.*, 1908, 146: 446-451.
- [2] 王涛, 于瀛洁, 郑华东. 彩色全息光电再现倍率色差消除[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1414-1420.
WANG T, YU Y J, ZHEN H D. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1414-1420. (in Chinese)
- [3] 于瀛洁, 倪萍, 周文静. 基于全息图放大的数字全息显微结构测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 827-831.
YU Y J, NI P, ZHOU W J. Micro-structure measurement of phase object by digital microholography based on magnified hologram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 827-831. (in Chinese)
- [4] 姜伟, 魏世衡. 反射型立体视觉系统的视差估计和图像复原[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1702-1707.
JIANG W, WEI SH H. Display estimation and image restoration for reflection stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1702-1707. (in Chinese)
- [5] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [6] 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, 38(1): 433-438.
WANG A H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 38(1): 433-438. (in Chinese)
- [7] 王爱红, 王琼华, 李大海, 等. 会聚式相机获取的视差图像的梯形失真校正 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(2): 72-75.
ANG A H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Keystone distortion rectification of parallax images captured by toed-in cameras [J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2011, 43(2): 72-75. (in Chinese)
- [8] 王琼华. 3D显示技术与器件 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WANG Q H. *3D Display Technology and Device* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] PARK S G, SONG B S, MIN S W. Analysis of image visibility in projection-type integral imaging system without diffuser [J]. *J. Opt. Soc. Kor.*, 2010, 14: 121-126.
- [11] KIM Y, PARK S G, MIN S W, *et al.*. Projection-type integral imaging system using multiple elemental image layers [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50: B18-B24.
- [12] JANG J S, JAVIDI B. Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture size [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28: 1924-1926.
- [13] HONG J, PARK J H, JUNG S, *et al.*. Depth-enhanced integral imaging by use of optical path control [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29: 1790-1792.
- [14] KIM Y, PARK J H, CHOI H, *et al.*. Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 4334-4343.
- [15] KIM Y, CHOI H, KIM J, *et al.*. Depth-enhanced integral imaging display system with electrically variable image planes using polymer-dispersed liquid-crystal layers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46: 3766-3773.

作者简介:



张雷(1983—),男,河北邯郸人,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: moon189@163.com



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



赵星(1980—),男,天津人,博士,讲师,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



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年于长春光机学院获得学士学位,现为南开大学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

●下期预告

V型耦合式刀片低能束流位置探测器与性能检测

程显超,赵飞云,田扬超,徐朝银

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029)

基于合肥国家同步辐射实验室(NSRL)低能量真空紫外光源特点,研制了耦合式刀片低能束流位置探测器,用于在线监测由波荡器辐射出的低能量真空紫外相干光源的稳定性。探测器采用V型耦合式刀片作为探针,赋以错位安装、倾斜嵌入被测光束边缘和直流偏压捕集自由电子等技术,有效增强光电效应,提高探针的响应灵敏度和探测器监测精度。本文介绍了耦合式刀片低能束流位置探测器的结构特点、探测原理和性能测试,在线监测了NSRL波荡器光源的稳定性,获得了一系列有价值的试验数据,结果表明:该探测器完全能胜任NSRL-0.8GeV低能储存环上插入件光源的在线监测,满足在改造后的新光源上由波荡器引出的各束线位置稳定性监测要求。