

# 集成图像空间分辨率研究

伍春洪<sup>1</sup> 王倩倩<sup>1</sup> 王红霞<sup>2</sup> 蓝金辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京科技大学自动化学院, 北京 100083)  
(<sup>2</sup> 北京青年政治学院计算机系, 北京 100102)

**摘要** 从集成图像显示时再现的空间光学分布着手,研究了微透镜参数、记录/显示平面分辨率和成像系统空间分辨率的关系。研究表明成像系统的空间分辨率与微透镜的孔径和焦距大小有关。采用较小尺寸的微透镜,有助于提高成像系统的空间分辨率,但对记录/显示平面分辨率的要求随微透镜尺寸的减小以及物点深度的增加而提高。研究结果可用于集成成像系统的优化设计。

**关键词** 光学设计;空间分辨率;三维空间重建;集成成像

中图分类号 TN27 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1211004

## Research on Spatial Resolution of Integral Imaging

Wu Chunhong<sup>1</sup> Wang Qianqian<sup>1</sup> Wang Hongxia<sup>2</sup> Lan Jinhui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)  
(<sup>2</sup> Computer Department, Beijing Youth Politics College, Beijing 100102, China)

**Abstract** Through analyzing the reconstructed optical distribution in the displaying stage, the relationship among micro-lens parameters, planar recording resolution and spatial resolution of the integral imaging system is obtained. The results show that the spatial resolution is relevant to the pitch size and focal length of the micro-lens. Small sized micro-lens is preferred to improve spatial resolution. However, the requirement for planar recording resolution increases with the decrease of the micro-lens size. The requirement for recording resolution also increases with the increase of the object depth. The results can be used in the optimal design of integral imaging.

**Key words** optical design; spatial resolution; three-dimensional spatial reconstruction; integral imaging

**OCIS codes** 110.6880; 000.4430; 080.2740; 120.4820; 220.4830

## 1 引言

集成成像技术是一种利用微透镜阵列来记录和显示三维(3D)场景的图像技术。作为光场成像的一种,该技术在 3D 数据获取、信息处理以及 3D 显示方面都有着广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

受到传统二维(2D)图像分析方法的影响,以往有关集成成像系统空间分辨率的研究多从波动光学出发,采用光学传递函数来分析<sup>[6-10]</sup>。现有依据衍射因素给出的对记录平面分辨率的要求和实际并不符合,表明目前的理论模型尚存在一定问题<sup>[11-13]</sup>。考虑到集成成像的记录和再现过程都包含多个微透

镜的共同作用,本文采用几何光学分析的方法从 3D 空间重建的角度来研究集成成像系统的空间分辨率和成像系统参数及记录/显示平面分辨率的关系。研究结果符合现有的经验,可为集成成像系统的优化设计提供进一步的理论依据。

## 2 集成成像技术简介

集成成像技术基本原理如图 1 所示。3D 物空间场景被微透镜阵列记录于其后的平面传感器上,如图 1(a)所示。每个微透镜从不同的方向参与记录,相应的小图像被称为元素图像,图 1(b)为部分

收稿日期: 2013-06-07; 收到修改稿日期: 2013-07-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费(FRF-SD-12-017A, FRF-TP-12-092A)、国家自然科学基金(61105120)

作者简介: 伍春洪(1972—),女,博士,副教授,主要从事三维图像技术方面的研究。E-mail: cwu@ies.ustb.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

元素图像。空间任意一点的视差信息都被这许许多多的元素图像分散记录于 2D 平面上, 这些元素图像的集合称为集成图像。当将记录形成的集成图像放在具有合适参数的微透镜阵列后时, 相应的显示微透镜阵列把许许多多元素图像透射/反射出来的光线会聚后可还原出 3D 场景, 如图 1(c) 所示, 图中

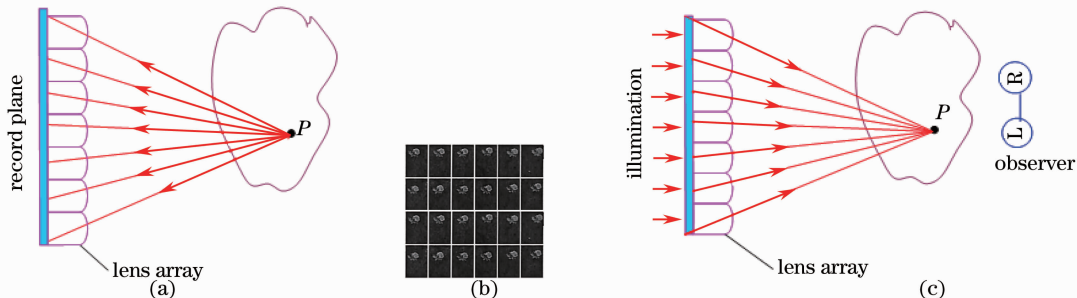


图 1 集成成像的基本原理。(a) 记录过程; (b) 元素图像; (c) 显示过程

Fig. 1 Principle of integral imaging. (a) Recording; (b) element images; (c) displaying

在实际的集成成像系统中, 为克服空间反转问题, 需要添加一定的光学传输网络, 并选取合适的孔径光阑以避免元素图像间的串扰, 保证元素图像间没有重叠区域。伴随着理论研究和光电技术的发展, 各种不同方案被采纳以改善集成成像系统的景深、视角以及分辨率, 使得不同研究小组的成像系统各具特点, 呈现多种形式<sup>[1-2, 14-17]</sup>。依据记录平面所在的位置可将集成成像系统分为深度优先的集成成像系统 (DPII) 和分辨率优先的集成成像系统 (RPII) 两类<sup>[1, 9]</sup>。在 DPII 中, 记录平面和显示平面均位于微透镜阵列的焦平面上, 此时成像系统的光学调制传递函数能够在一个较大的深度范围内保持比较平坦的响应, 因而具有较大的景深范围<sup>[9]</sup>。本文的研究针对 DPII 设置展开, 从集成成像的原理出发, 分析从物空间点经微透镜阵列后的记录光学分布以及显示时从记录平面重建的空间光学分布。从最终实际看到的重建后的光学分布来研究成像系统所能达到的空间分辨率, 以期给出更直观、可信的结果。本文只分析了单方向视差的集成成像系统, 但结论可用于全方向视差的集成成像系统。

### 3 集成成像的记录过程

首先分析物空间一点  $P$  经微透镜阵列后的平面记录分布。考虑到集成成像过程的复杂性, 将分析的重点放在多个微透镜共同作用的整体结果上, 对成像系统的光学模型进行了简化。采用小孔成像模型来近似分析微透镜阵列的记录过程, 并假定记录分辨率足够高。图 2 为分析所用的迪卡儿坐标

$L$  和  $R$  分别代表观察者的左眼和右眼。和传统的 2D 成像方式不同, 集成图像不仅包含了微透镜阵列所在平面不同位置光线的强度信息, 还包含了光线的方向信息。集成图像虽以 2D 图像的形式存在, 但包含空间信息, 从中可恢复深度信息<sup>[4]</sup>。

系, 设  $z$  轴的零点开始于微透镜阵列的光学中心所在的平面,  $x$  轴的零点开始于微透镜阵列的中心。为表述方便对微透镜编号: 中心透镜编号为 0, 其左边透镜编号依次为  $-1, -2, \dots$ , 右边依次为  $1, 2, \dots$ 。微透镜的孔径和焦距分别用  $\varphi$  和  $f$  来表示。

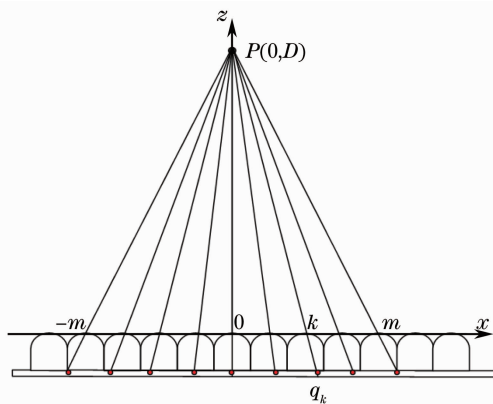


图 2 集成成像的记录

Fig. 2 Recording of integral imaging

首先判断哪些微透镜能够参与对点  $P(0, D)$  的记录。在消除了元素图像串扰的集成成像系统中, 每个元素图像只记录来自对应的微透镜的光线。对点  $P$ , 只有编号在  $[-m, m]$  间的微透镜参与对点  $P$  的记录,

$$m = \left\lfloor \frac{D}{2f} \right\rfloor. \quad (1)$$

点  $P$  在微透镜阵列下共形成  $2m + 1$  个记录点。其中, 第  $k$  个微透镜下的记录点  $q_k$  的坐标  $x_k$  为

$$x_k = k\varphi + k \frac{\varphi f}{D}. \quad (2)$$

点  $P$  在相邻两个元素图像中对应的视差  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{\varphi f}{D}. \quad (3)$$

由不同元素图像间的视差信息可恢复物点的深度<sup>[4]</sup>。

#### 4 集成成像的再现过程

显示时,不同元素图像中的记录点将会从相应的微透镜下以一小束平行光的形式重建。由于不同元素图像中对应的记录点间存在视差,由不同微透镜重建的光束的方向会略有不同。每个记录点都能贡献特定方向的一小束光线,这些光束的会聚构成对原物空间点  $P$  的再现,如图 3 所示。

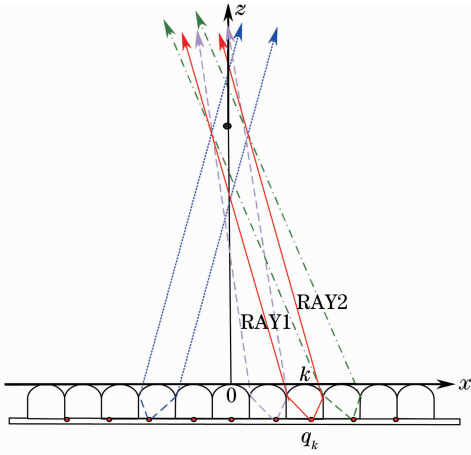


图 3 集成图像显示过程中空间点的再现

Fig. 3 Reconstruction of an object point from the integral image during displaying stage

从记录点  $q_k$  通过第  $k$  个微透镜重建的小光束的最左边和最右边的光线表达式为

$$\text{RAY1: } z_{kL} = -\frac{D}{k\varphi} \left( x - k\varphi + \frac{1}{2}\varphi \right), \quad (4)$$

$$\text{RAY2: } z_{kR} = -\frac{D}{k\varphi} \left( x - k\varphi - \frac{1}{2}\varphi \right). \quad (5)$$

表 1 不同位置物点重建比较(单位: pixel)

Table 1 Reconstruction comparison for different positions (unit: pixel)

Object point position	(0, 192)	(11, 192)	(0, 384)
Spread along $x$ -axis	32	32	32
Spread along $z$ -axis	74	74	70
Reconstruction matches original position?	Yes	Yes	Yes

给定深度为  $D$  的点显示时再现区域在深度方向的等效扩散可在(4)式和(5)式的基础上得到,即

$$\Delta D = 4f \cdot \left( 1 + \frac{2f}{D - 2f} \right). \quad (6)$$

图 6 为根据(6)式绘出的  $D \geq 2f$  时点深度与再

在 Visual Basic 软件环境下依据上面的理论分析编程模拟点  $P$  经微透镜阵列记录并重建后的空间光线分布。微透镜参数取  $\varphi = 0.6 \text{ mm}$ 、 $f = 2 \text{ mm}$ ,为方便计算机处理,把重建的  $xz$  平面区域划分为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$  组成的网格,其中水平方向每个微透镜下对应  $32 \text{ pixel}$ ,垂直方向每  $1 \text{ mm}$  对应  $8 \text{ pixel}$ 。用不同灰度来表示被重建光束覆盖的次数,颜色越深表示被光束覆盖的次数越多。图 4 为模拟重建的结果,绿色圆点表示原物点  $P$  的位置,从图中可以看出重建的结果是以原物点为中心的空间分布。

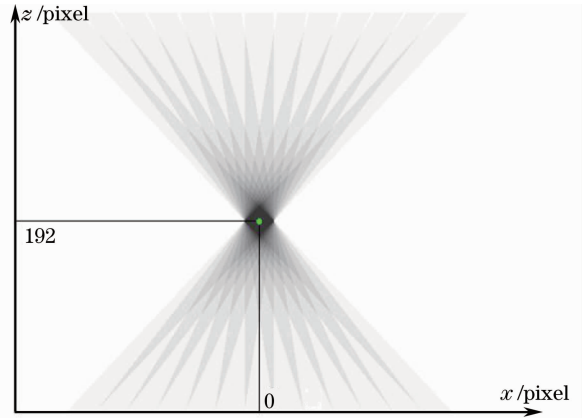


图 4 模拟得到的物点重构光学分布

Fig. 4 Reconstructed optical distribution of an object point by simulation

设  $N_{\max}$  为区域内被重建光线覆盖的最大次数,定义重建的等效范围由覆盖次数大于  $N_{\max}/2$  的点组成,用蓝色区域表示。图 5(a)为在图 4 基础上得到的重建的等效范围。图 5(b)、(c)则分别比较了物点在不同位置时的重建结果,相关数据如表 1 所示。可以看出,三种情况下重建区域的中心都与原物点位置重合,重建区域在  $x$  方向的扩展范围都等于  $32 \text{ pixel}$ (对应微透镜的孔径  $\varphi$ ),在深度方向上的扩散程度略受点深度的影响。

现扩散范围关系曲线。可以看出,在满足  $D \gg f$  的条件时,深度方向的扩散基本不变,趋于极值  $4f$ 。故有如下结论:理想情况下集成成像中空间点在显示时再现的等效大小基本由微透镜的孔径和焦距决定。孔径和水平分辨率对应,焦距和深度分辨率对

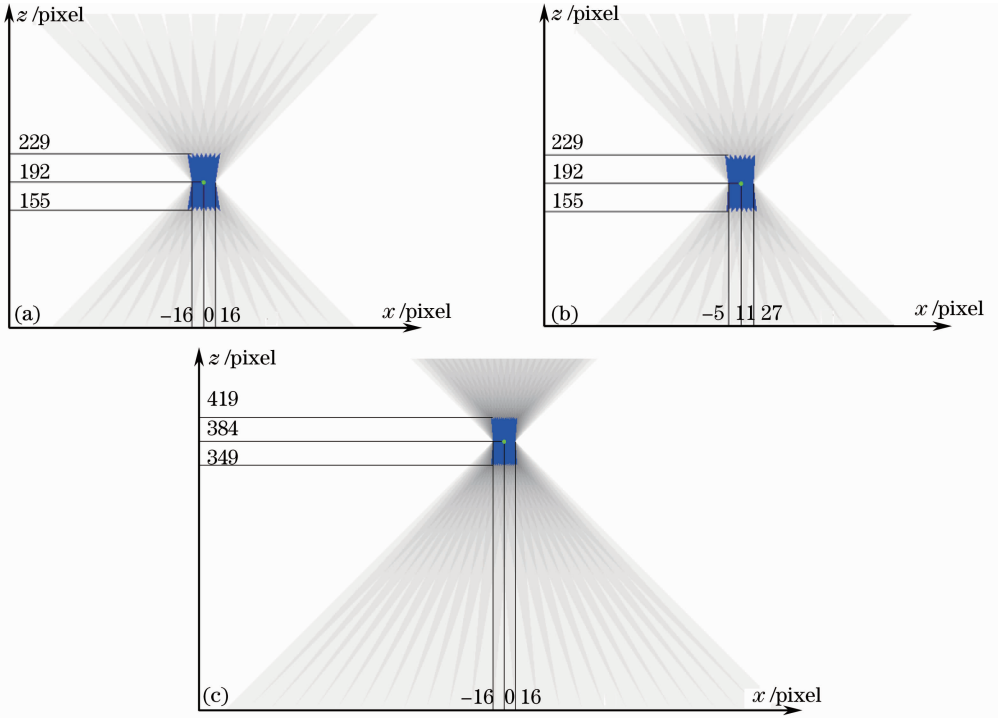


图 5 显示过程中不同位置点再现的等效范围

Fig. 5 Reconstructed ranges for different positions during displaying stage

应。要提高成像系统的空间分辨率,应尽可能减小微透镜的尺寸。

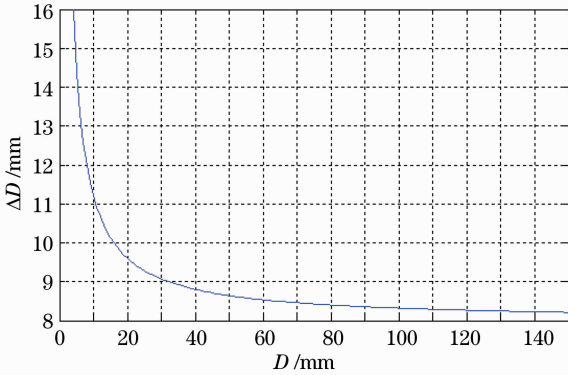


图 6 物点深度与显示时再现区域深度方向的扩散关系

Fig. 6 Relationship between object point depth and reconstructed spread depth during displaying stage

### 5 平面分辨率对再现结果的影响

设每一微透镜下单方向记录点的个数为  $n$ 。前面指出过,由于不同元素图像分别从不同的角度记录 3D 场景,相邻两个元素图像的记录点间存在视差,故再现时重建的小光束的方向会各不相同,如图 3 所示。在记录平面分辨率有限的情况下,如果相邻两个元素图像中对应的记录点间的视差小于可分辨点的大小,这两个记录点将被当作不同元素图像中同一局部位置的点。再现时由这两个微透镜还原

的出射光线将相互平行,从而影响到重建光线的会聚,如图 7 所示。

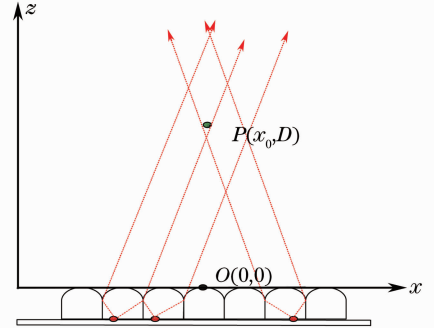


图 7 视差小于平面分辨率的再现情形

Fig. 7 Reconstruction while disparity is less than planar resolution

为避免出现上述情况,要求元素图像中像素点的大小小于相邻元素图像间的视差,即

$$\frac{\varphi}{n} < \Delta, \quad (7)$$

将(3)式代入(7)式得出对每个元素图像中单方向记录点个数的要求,为

$$n > \frac{D}{f}, \quad (8)$$

对平面分辨率  $r$  的要求为

$$r = \frac{n}{\varphi} > \frac{D}{\varphi f}. \quad (9)$$

(9)式表明对平面分辨率的要求与物点的深度和微透

镜的参数都有关。随着物点深度的增加,对平面分辨率的要求随之提高:以  $D=24\text{ mm}$  的  $P$  点为例,当  $\varphi=0.6\text{ mm}$ ,  $f=2\text{ mm}$  时,要求为每个元素图像中单方向上有 12 个点,相应的平面分辨率为 508 pixel/inch (1 inch=2.54 cm),当物点深度  $D=48\text{ mm}$  时,要求平面分辨率为 1016 pixel/inch。

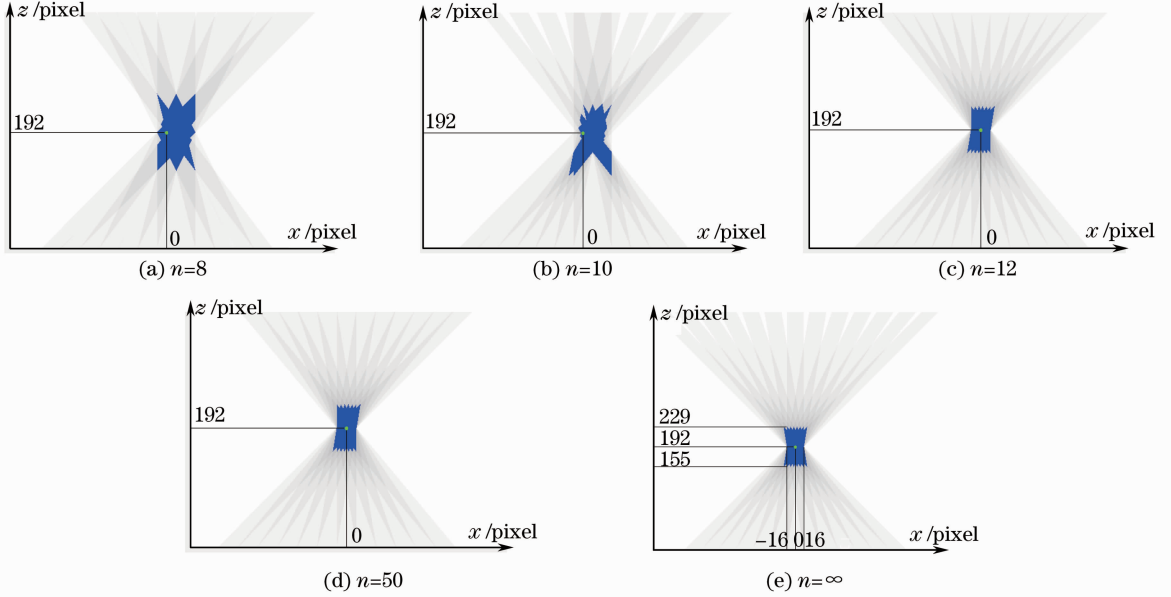


图 8 不同记录分辨率下再现的光学分布

Fig. 8 Reconstructed optical distributions with different recording resolutions

图 9 给出了三种典型的柱状光栅微透镜阵列参数时(参见表 2)不同深度物点对平面分辨率的要求。从图中可以看出,对平面分辨率的要求一方面随物点深度的增加而线性增加;另一方面受到微透镜参数的影响。微透镜尺寸越小,对平面分辨率的要求就越高。举例来说,对于一个距微透镜阵列深度为 50 mm 的点,三种情况下所要求的平面分辨率分别为 152 pixel/inch、1000 pixel/inch 和 6350 pixel/inch,差

图 8 为对  $D=24\text{ mm}$  的点  $P$  模拟不同记录点数时的重建结果。从图中可以看出,当  $n$  低于 12 时,重建的区域在一定范围内存在不规则的扩散,如图 8(a)、(b)所示;当  $n$  超过 12 后,重建的效果和理想情况几乎没有差别,如图 8(c)~(e)所示。

别相当大。若平面分辨率为 300 pixel/inch,要记录/显示深度在 50 mm 的点,只能选用微透镜 3。此时,由于所用的微透镜孔径和焦距都比较大,故成像系统的空间分辨率相对较低。如果需要显示的深度范围在 10 mm 内,可以选择尺寸小一些的微透镜 2 来得到高一些的空间分辨率。实际情况下,需依据物点的深度范围以及记录和显示平面所能达到的分辨率来选取合适的微透镜。

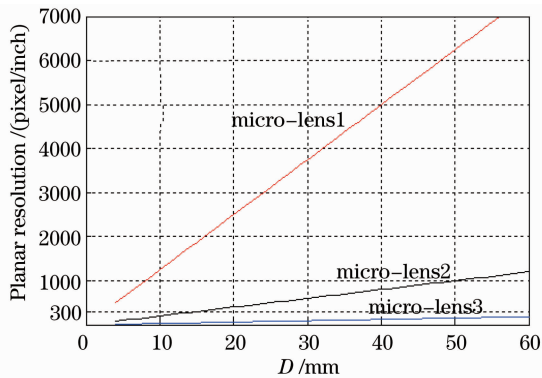


表 2 三种典型柱状光栅微透镜参数

Table 2 Parameters of three typical micro-lenses (LPI: lines per inch)

	Micro-lens1 (75 LPI)	Micro-lens2 (40 LPI)	Micro-lens3 (10 LPI)
Pitch size /mm	0.339	0.635	2.54
Focus distance /mm	0.6	2.0	3.25

## 6 结 论

从集成成像的基本原理出发,通过分析物空间中一点经微透镜阵列记录和再现后的空间光学分布,讨论了记录和显示平面分辨率以及微透镜阵列参数对集成成像系统空间分辨率的影响。研究表明

图 9 不同深度物点对平面分辨率的要求  
Fig. 9 Planar resolution requirement for different object point depths

理想情况下采用较小尺寸的微透镜,有助于提高成像系统的空间分辨率,但微透镜尺寸越小,物点距离微透镜阵列越远,对记录和显示平面分辨率的要求就越高。实际情况下,需根据记录和显示平面分辨率和场景深度范围选取合适的微透镜参数。

## 参 考 文 献

- 1 Myungjin Cho, Mehdi Daneshpanah, Inkyu Moon, *et al.*. Three-dimensional optical sensing and visualization using integral imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(4): 556–575.
- 2 Xiao Xiao, Bahram Javidi, Manuel Martinez-Corral, *et al.*. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 546–560.
- 3 Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing, *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022005.  
戴志华, 徐于萍, 步 敬, 等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022005.
- 4 Chun Hong Wu, Malcolm McCormick, Amar Aggoun, *et al.*. Depth mapping of integral images through viewpoint image extraction with a hybrid disparity analysis algorithm [J]. *J Display Technology*, 2008, 4(1): 101–108.
- 5 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.
- 6 C B Burckhardt. Optimum parameters and resolution limitation of integral photography [J]. *J Opt Soc Am*, 1968, 58(1): 71–74.
- 7 T Okoshi. Optimum design and depth resolution of lens-sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(10): 2284–2291.
- 8 H Hoshino, F Okano, H Isono, *et al.*. Analysis of resolution limitation of integral photography [J]. *J Opt Soc Am A*, 1998, 15(8): 2059–2065.
- 9 Jun Arai, Haruo Hoshino, Makoto Okui, *et al.*. Effects of focusing on the resolution characteristics of integral photography [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(6): 996–1004.
- 10 Fushou Jin, Ju-Seog Jang, Bahram Javidi. Effects of device resolution on three-dimensional integral imaging [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(12): 1345–1347.
- 11 Zahra Kavehvasht, Manuel Martinez-Corral, Khashayar Mehrany, *et al.*. Three-dimensional resolvability in an integral imaging system [J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(4): 525–530.
- 12 M Brewin, M Forman, N Davies. Electronic capture and display of full parallax 3D images [C]. *SPIE*, 1995, 2409: 118–124.
- 13 Myungjin Cho, Bahram Javid. Optimization of 3D integral imaging system parameters [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(6): 357–360.
- 14 Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, *et al.*. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309001.  
焦小雪, 赵 星, 杨 勇, 等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309001.
- 15 Shen Su, Pu Donglin, Hu Jin, *et al.*. Fabrication of microlens arrays based on spatial light modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0316003.  
申 溯, 浦东林, 胡 进, 等. 一种基于空间光调制器的微透镜阵列制备技术 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0316003.
- 16 Wang Xiaorui, Bu Qingfeng, Zhang Dongyang, *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.
- 17 Liu Desen, Jiang Xiaoping. Study on microoptics and special-shaped aperture microlens arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 083501.  
刘德森, 蒋小平. 微小光学与异形孔径微透镜阵列研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(8): 083501.

栏目编辑: 史 敏