

无深度反转的集成成像一次拍摄方法

李姣姣, 邓欢*, 李赛, 张汉乐, 王蕾, 陈聪

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 针对传统集成成像显示技术存在深度反转, 需要进行二次成像的问题, 提出一种无深度反转的集成成像一次拍摄方法。该方法采用离轴平行式集成成像拍摄结构对三维(3D)场景进行拍摄, 通过设计合理的拍摄参数, 重排图像元, 生成无梯形畸变的图像阵列(EIA), 直接用于集成成像显示, 解决了传统集成成像的深度反转问题, 避免了复杂且繁琐的图像校正和二次成像过程, 可快速生成具有正确深度信息的 EIA。该方法所获取的 EIA 在集成成像 3D 显示实验中重建的 3D 图像具有正确的深度和逼真清晰的立体显示效果, 验证了本文方法的正确性。

关键词 成像系统; 三维显示; 集成成像; 深度反转; 再现距离

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0109002

One-Step Shooting Method for Integral Imaging Without Depth Inversion

Li Jiaojiao, Deng Huan*, Li Sai, Zhang Hanle, Wang Lei, Chen Cong

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A pseudoscopic problem often exists in traditional integral imaging display, and is typically solved using two-step shooting process. In this paper, a one-step shooting method for integral imaging without depth inversion is proposed. In this method, the off-axis paralleled shooting scheme is adopted to shoot a three-dimensional (3D) scene and generate an orthoscopic elemental image array (EIA) by reasonably designing the shooting parameters and rearranging the set of elemental images. The generated EIA can be directly used for integral imaging display without depth inversion. The proposed method avoids complex image correction and the tedious two-step shooting process and can quickly generate the EIA with correct depth information. In 3D integral image display experiment, the 3D images reconstructed based on EIA are vivid and clear. The experimental results validate the efficacy of the proposed method.

Key words image systems; three-dimensional display; integral imaging; depth inversion; reconstructed distance

OCIS codes 110.2990; 110.2960; 100.6890

1 引 言

集成成像三维(3D)显示作为目前最有发展前景的裸眼真 3D 显示技术之一, 因具有全视差、真彩色、无立体观看视疲劳、显示结构简单等优点^[1-7], 越来越受到国内外研究人员的关注。目前有两大类型的集成成像显示装置, 一种是采用小节距微透镜阵列的集成成像显示装置^[8-10], 另一种是采用大节距微透镜阵列的集成成像显示装置^[11]。针对这两种集成成像显示装置, 获取集成成像片源——图像阵列

(EIA)的方式不同。

针对小节距微透镜阵列的集成成像显示装置, 通常采用基于视点的会聚式拍摄方式, 所需相机个数等于单个图像元中所包含的像素个数, 当图像元的分辨率较高时, 渲染时间会明显增加。基于此, 本课题组提出基于稀疏相机阵列的拍摄方式, 该方式能有效减少集成成像 3D 片源渲染过程的渲染次数^[12], 但会聚式拍摄获取的视差图像存在梯形畸变, 需要进行复杂繁琐的校正过程。对于大节距微透镜阵列的集成成像显示装置, 一般采用相机阵列模

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-09-03; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002900)、国家自然科学基金(61775151)、四川大学创新火花项目(2018SCUH0003)

* E-mail: huandeng@scu.edu.cn

拟透镜阵列的拍摄方式^[13]。该方法中,相机个数等于透镜元个数,由于相机阵列的拍摄方向与再现时观看者的观看方向相反,故会导致深度^[14]反转问题,Ives^[15]提出的二次成像法能有效解决该问题。随着计算机技术的飞速发展,计算机二次成像技术也快速发展起来,但计算机二次成像过程需要进行大量像素映射,会导致计算量大、易产生像素映射错误等问题^[16-22],从而引起图像质量下降。图像元旋转是解决深度反转最简单的方法,但是该方法的本质是将实像显示模式转变为虚像显示模式,从而降低了3D图像的立体效果^[23]。

本文提出一种无深度反转的集成成像一次拍摄方法,通过改变图像元与透镜元间的相对排布方式,实现离轴平行式拍摄,通过对图像元重新排列,有效解决了深度反转的问题,避免了图像校正和像素映射引发的问题,从而大大降低3D片源的生成复杂度。同时,该方法可精确地计算3D图像的再现距离,实现了理想的3D显示效果。

2 基本原理

2.1 集成成像离轴平行式拍摄结构

集成成像离轴平行式拍摄结构如图1所示,各透镜元从不同角度记录3D场景不同侧面的光场信息,生成多个图像元(EI),各EI与其对应的透镜元有一定的离轴偏移量,各透镜元的等效光轴(如图1中粗虚线所示)会聚于一点,以实现离轴平行式的拍摄结构。

获取的EIA是一个二维阵列,由于水平方向和

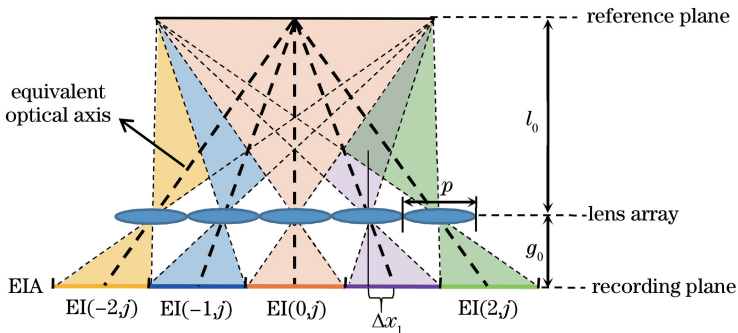


图1 集成成像离轴平行式拍摄结构

Fig. 1 Off-axis paralleled shooting structure for integral imaging

2.2 深度反转问题的解决

集成成像离轴平行式拍摄与显示原理如图2所示。在拍摄过程中,利用离轴平行式的拍摄结构获取3D场景不同侧面的光场信息生成多个EI,各EI组合得到EIA 1。三维空间中一物点A在EIA 1

竖直方向上EI的偏移情况相同,图1只画出了水平方向上的情况。对EI进行编号,EI(*i*,*j*)表示第*i*行、第*j*列的图像元,其中*i*取值范围为 $[-M, +M]$,*j*取值范围为 $[-N, +N]$,*i*、*j*均取整数。 $2M+1$ 和 $2N+1$ 分别为EIA中EI的总行数与总列数,中心图像元为EI(0,0),负号表示EI(0,0)以左或以下的EI,正号表示EI(0,0)以右或以上的EI。除EI(0,0)外,其余各EI均与其对应的透镜元有一定离轴偏移,将偏移距离的大小定义为离轴量。水平方向上的离轴量 Δx_i 为

$$\Delta x_i = \frac{2ipg_0}{l_0}, \quad (1)$$

竖直方向上的离轴量 Δy_j 为

$$\Delta y_j = \frac{2jpg_0}{l_0}, \quad (2)$$

式中:*p*为透镜元节距;*g*₀为记录平面到透镜阵列之间的距离;*l*₀为参考平面到透镜阵列的距离;*i*取正值时,表示EI向右偏移,反之向左偏移,*j*取正值时,表示EI向上偏移,反之向下偏移。参考平面作为3D场景的参考面,3D场景的深度应在参考平面前后一定范围内,大小不超出参考平面的宽度。*g*₀、*l*₀与透镜元焦距*f*之间满足高斯成像公式。

该方法利用EI的离轴偏移实现了离轴平行式拍摄,各拍摄单元的等效光轴会聚于一点,等效于会聚式的拍摄效果,且透镜阵列与记录平面均平行排列,不存在传统会聚式拍摄中固有的梯形畸变等问题,避免了繁琐的图像校正步骤,极大地简化了EIA的合成过程。

中的同名点周期 T_0 为

$$T_0 = p + \frac{pg_0}{l_1}, \quad (3)$$

式中:*l*₁为物点A到透镜阵列的距离,即物点A的记录距离。

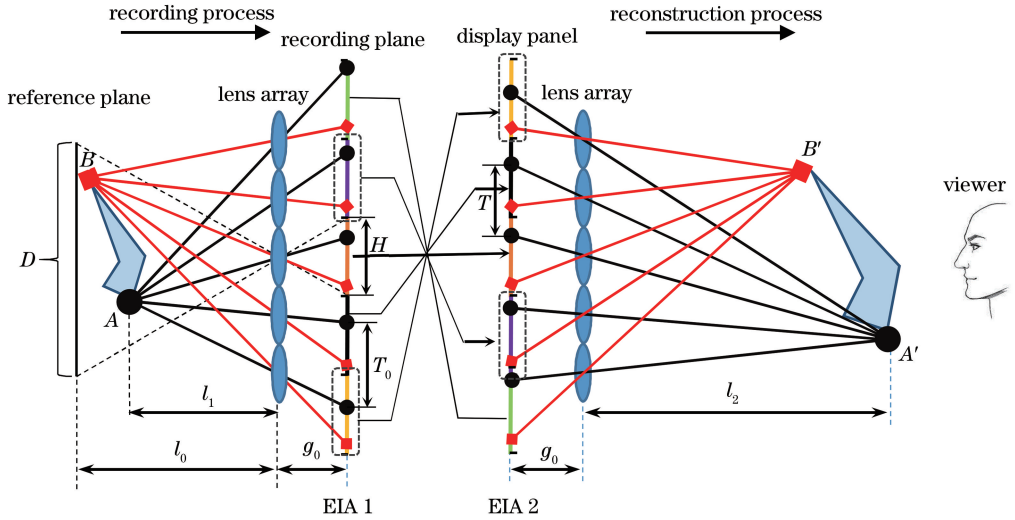


图 2 集集成像离轴平行式记录与再现过程

Fig. 2 Off-axis paralleled recording and reconstruction processes in integral imaging

EIA 1 中 EI 的节距 H 为

$$H = \frac{Dg_0}{l_0} = p + \frac{pg_0}{l_0}, \quad (4)$$

式中: D 为参考平面的宽度。

为得到无深度反转的 EIA, 需将 EI 进行重新排

列, 根据 EI 的编号, 将每个 EI 进行如图 3 所示的重排变换, 变换规则为

$$EI(i, j) \rightarrow EI(-i, -j). \quad (5)$$

将 EIA 1 中所有的 EI 进行(5)式的重排变换, 重排后得到的图像阵列记为 EIA 2。

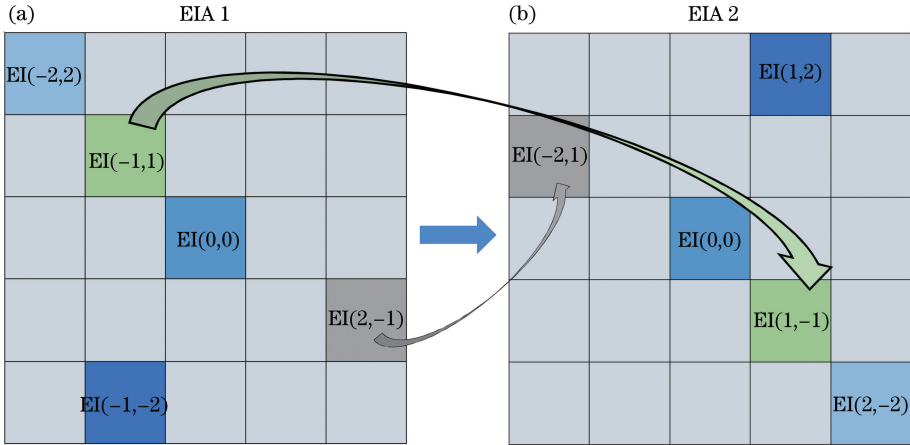


图 3 图像阵列重排示意图。(a)重排之前;(b)重排之后

Fig. 3 Schematics of rearrangement for elemental image array. (a) Before rearrangement; (b) after rearrangement

在 EIA 2 中, 物点 A 的同名点周期记为 T , T 与 T_0 之间的关系满足

$$T_0 + T = 2H. \quad (6)$$

由(3)、(4)、(6)式推导出物点 A 在像空间的再现距离 l_2 为

$$l_2 = \frac{pg_0}{T-p} = \frac{l_0}{2} \left(1 + \frac{l_0}{2l_1 - l_0} \right). \quad (7)$$

当 $T > p$ 时, $l_2 > 0$, 再现的 3D 像凸出于透镜阵列, 成 3D 实像; 当 $T < p$ 时, $l_2 < 0$, 再现的 3D 像凹进透镜阵列, 成 3D 虚像。

再现距离 l_2 随着记录距离 l_1 的变化曲线如

图 4 所示。从图 4 中可以看出, 当 $l_1 > \frac{l_0}{2} = 75 \text{ mm}$

时, 再现距离 $l_2 > 0$, 且随着记录距离 l_1 的增大而减小。记录时, 相对于记录透镜阵列来说, 物点 A 的记录距离比 B 小, 即物点 A 在前(更靠近记录透镜阵列), B 点在后(更远离记录透镜阵列), 再现时, 像点 A' 的再现距离大于 B' , 对于观看者来说, 像点 A' 在前, 像点 B' 在后, 即再现的 3D 图像具有正确的 3D 深度。因此, 只要满足 $l_1 > \frac{l_0}{2}$, 显

示的 3D 图像就具有正确的 3D 深度, 即解决了深

度反转的问题。同时,当 $T > p$ 时,再现的 3D 像仍然是凸出于透镜阵列的实像,实现了良好的立体感。

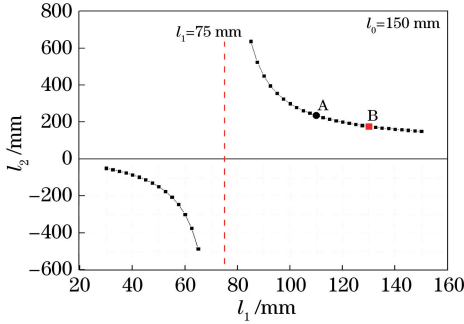
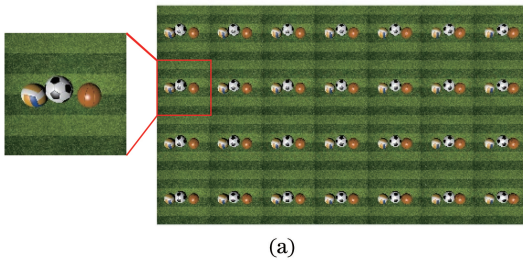


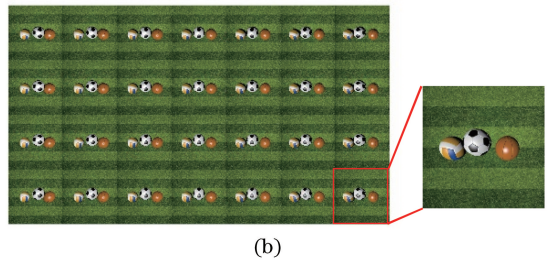
图 4 再现距离 l_2 随着记录距离 l_1 的变化曲线
Fig. 4 Variation in reconstructed distance l_2 with recording distance l_1

3 实 验

实验搭建了由“足球”、“篮球”和“排球”组成的



(a)



(b)

图 6 实验获取的图像阵列。(a)图像阵列 1;(b)图像阵列 2

Fig. 6 Elemental images obtained experimentally. (a) EIA 1; (b) EIA 2

搭建集成成像 3D 显示装置进行 3D 显示实验验证,如图 7 所示。该系统主要由显示面板 (Sony E6883)、透镜阵列及光学扩散屏三部分构成。显示面板上显示 EIA, EIA 发出的光线经透镜阵列调制

3D 场景,由相机阵列代替透镜阵列进行拍摄,“足球”、“篮球”和“排球”距离相机阵列的间距分别为 125、140、140 mm。利用本文离轴平行式相机阵列对 3D 场景进行拍摄,如图 5 所示。相机阵列包含的相机个数为 7×4 。实验拍摄获得的 EIA 1 和重排后生成的 EIA 2 分别如图 6(a)和图 6(b)所示。

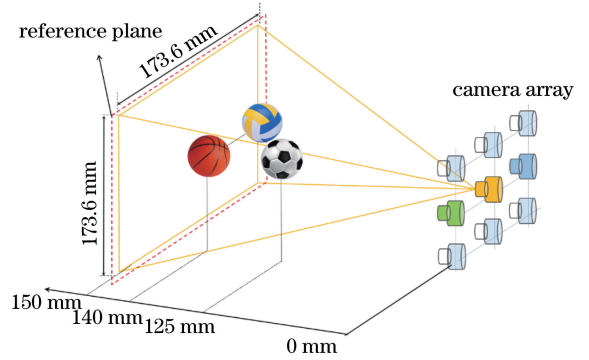
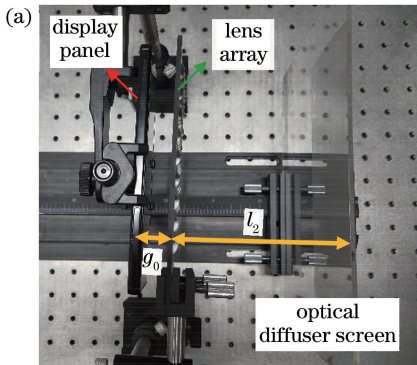
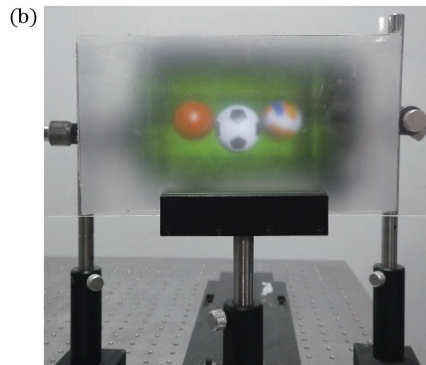


图 5 虚拟记录及 3D 模型的示意图

Fig. 5 Schemes of virtual recording and 3D model



(a)



(b)

图 7 集成成像显示系统的结构。(a)俯视图;(b)前视图

Fig. 7 Configuration of integral imaging display system. (a) Top view; (b) front view

表 1 集成成像显示系统的详细参数

Table 1 Specifications of integral imaging display system

Component	Parameter	Value
Display device	Model number	Sony E6883 smart phone
	Resolution / pixel	3840(H)×2160(V)
	Screen size / cm	13.97 (diagonal)
	Pixel size / mm	0.03163
Lens array	Number of elemental lens	7(H)×4(V)
	Pitch of elemental lens / mm	14.7
	Focal length / mm	12.7
EIA	Number of EI	7(H)×4(V)
	Pixel number on each EI	508(H)×508(V)

分别用 EIA 1 和 EIA 2 进行集成成像再现实验,实验结果如图 8 所示。在图 8(a)所示的 EIA 1 再现的 3D 像中,从椭圆框标注部分可以看出,随着观看视点的右移,“篮球”和“足球”的间距逐渐增大,它们之间的空间遮挡关系是错误的,即“足球”在后,“篮球”和“排球”在前,与原始三维模型中的深度关系相反,说明 EIA 1 再现的是深度反转的 3D 像。而在如图 8(b)所示的 EIA 2 再现的 3D 像中,随着观看视点的右移,“篮球”和“足球”的间距逐渐减小,它们之间的空间遮挡关系是正确的,即“足球”在前,

“篮球”和“排球”在后,与原始三维模型中的深度关系是一致的。将光学扩散屏依次放置在距离透镜阵列 182 mm 和 193 mm 的位置,观看到的再现图像如图 9 所示。图 9(a)和图 9(b)中椭圆线框标注的部分显示,“篮球”和“排球”在 182 mm 的深度附近可清晰再现,而“足球”在 193 mm 的深度附近清晰再现,与原始三维模型中的深度关系相同,进一步表明了再现的 3D 像具有正确的深度。实验表明本文方法可以实现无深度反转,有正确视差信息的 3D 显示效果。

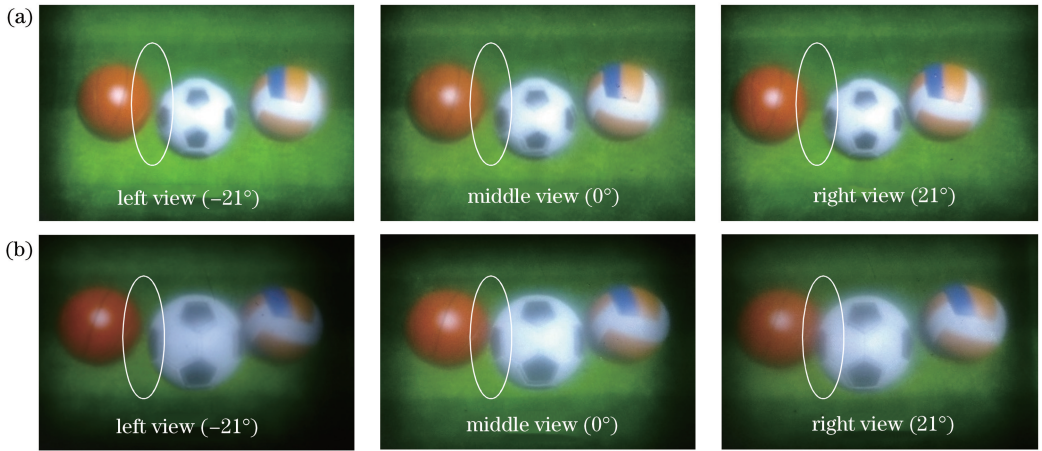


图 8 集成成像再现实验结果。(a) EIA 1 再现的有深度反转的 3D 图像;(b) EIA 2 再现的无深度反转的 3D 图像
Fig. 8 Experimental results of integral imaging reconstruction. (a) Reconstructed 3D images with depth inversion of EIA 1; (b) reconstructed 3D images without depth inversion of EIA 2

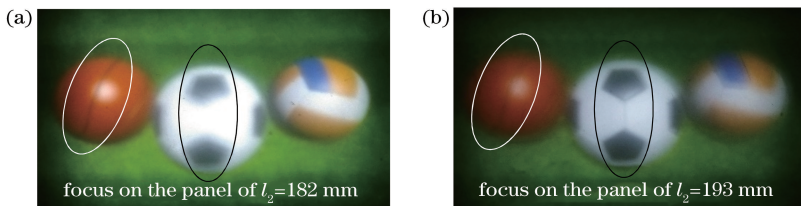


图 9 光学扩散屏位置移动后观看到的再现现象。(a)“篮球”和“排球”再现距离为 182 mm;(b)“足球”的再现距离为 193 mm
Fig. 9 Reconstructed images after position of optical diffuser screen changed. (a) Reconstructed distances of “basketball” and “volleyball” are 182 mm; (b) reconstructed distance of “football” is 193 mm

4 结 论

提出一种无深度反转的集成成像一次拍摄方法。通过设置图像元相对于透镜元的离轴量,将等效光轴会聚于一点,实现了离轴平行式集成成像拍摄结构,该拍摄结构不存在传统会聚式拍摄结构引发的梯形畸变问题,无需进行图像校正步骤。此外,本文方法无需进行计算机二次成像,仅通过一次拍摄和图像元重排,即可生成无深度反转的集成成像3D片源,避免了二次成像过程中由像素映射引发的计算量大、像素映射错误等问题,大大简化了图像阵列的生成过程,提高了集成成像3D片源的生成效率和质量。实验结果证实本文方法的正确性,实现了无深度反转、逼真清晰的3D图像显示。

参 考 文 献

- [1] Lee B, Jung S, Min S W, et al. Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(19): 1481-1482.
- [2] Wu F, Deng H, Luo C G, et al. Dual-view integral imaging three-dimensional display [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4911-4914.
- [3] Zhao X W, Wang Y Y, Song L P, et al. Underwater target imaging based on computational integral imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0109001.
赵雪微, 王尧尧, 宋丽培, 等. 基于计算集成成像的水下目标成像 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0109001.
- [4] Park J H, Hong K, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H77-H94.
- [5] Yu W T, Zhang H L, Deng H, et al. Augmented reality three-dimensional display system based on holographic optical element [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1009001.
余文涛, 张汉乐, 邓欢, 等. 基于全息光学元件的增强现实3D显示系统 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1009001.
- [6] Xiao X, Javidi B, Martinez-Corral M, et al. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 546-560.
- [7] Chen Z Q, Chen K, Huang X Q, et al. Color characterization of barrier-type autostereoscopic displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0533002.
- [8] Yanaka K. Integral photography using hexagonal fly's eye lens and fractional view [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6803: 68031K.
- [9] Deng H, Wang Q H, Li L, et al. An integral-imaging three-dimensional display with wide viewing angle [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(10): 679-684.
- [10] Li R, Chu F, Dou H, et al. A blue-phase liquid crystal lens array based on dual square ring-patterned electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(8): 1266-1272.
- [11] Wu W, Wang S G, Zhao Y, et al. Fast elemental image array generation based on window interception [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0710002.
武伟, 王世刚, 赵岩, 等. 基于窗截取的立体元图像阵列快速生成 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0710002.
- [12] Deng H, Wang Q H, Li D H. Method of generating orthoscopic elemental image array from sparse camera array [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(6): 061102.
- [13] Jiao X X, Zhao X, Yang Y, et al. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging [J]. *Chinese Journal of 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.
- [14] 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.
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.
- [15] Ives H E. Optical properties of a Lippmann lenticulated sheet [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1931, 21(3): 171-176.
- [16] Shin D H, Lee B G, Kim E S. Modified smart pixel mapping method for displaying orthoscopic 3D images in integral imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1189-1194.
- [17] Wu F, Liu Z S, Deng H. Crosstalk-free dual-view integral imaging display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(9): 555-558.
- [18] Navarro H, Martínez-Cuenca R, Saavedra G, et al. 3D integral imaging display by smart pseudoscopic-to-orthoscopic conversion (SPOC) [J]. *Optics Express*,

- 2010, 18(25): 25573-25583.
- [19] 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.
- [20] Zhang J L, Liu Y Q, Wang X R. Method for eliminating the black zone of integral imaging [C] // 2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC), November 4-6, 2015, Krakow, Poland. New York: IEEE, 2015: 458-461.
- [21] Yan Z Q, Jiang X Y, Yan X P. Performance-improved smart pseudoscopic to orthoscopic conversion for integral imaging by use of lens array shifting technique [J]. Optics Communications, 2018, 420: 157-162.
- [22] Xiao X, Shen X, Martinez-Corral M, et al. Multiple-planes pseudoscopic-to-orthoscopic conversion for 3D integral imaging display [J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(11): 921-926.
- [23] Okano F, Hoshino H, Arai J, et al. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography [J]. Applied Optics, 1997, 36(7): 1598-1603.
- [24] Yu C X, Yuan J H, Fan F C, et al. The modulation function and realizing method of holographic functional screen [J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27820-27826.
- [25] Yan Z Q, Yan X P, Jiang X Y, et al. Integral imaging based light field display with enhanced viewing resolution using holographic diffuser [J]. Optics Communications, 2017, 402: 437-441.