

## 基于深度调节方法的集成成像畸变消除

邓莉巾, 朴燕, 王宇, 谷岳佳楠

引用本文:

邓莉巾, 朴燕, 王宇, 等. 基于深度调节方法的集成成像畸变消除[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2168–2179.

DENG Li-jin, PIAO Yan, WANG Yu, et al. Eliminating distortion of integral imaging technology based on depth adjustment method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2168–2179.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2168>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于贝叶斯自适应估计的光子计数集成成像

Photon counting integral imaging based on adaptive Bayesian estimation

*光学精密工程*. 2018, 26(3): 565–571 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182603.0565>

### 集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工

Design and fabrication for micro-lens array with high fill factor in integral imaging system

*光学精密工程*. 2017, 25(8): 2130–2138 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2130>

### 基于光场相机的深度面光场计算重构

Light field computational reconstruction from focal planes based on light field camera

*光学精密工程*. 2018, 26(3): 708–714 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182603.0708>

### 三维激光扫描系统中目标点云的颜色复原

Color restoration of object surface point cloud in three-dimensional laser scanning system

*光学精密工程*. 2020, 28(10): 2158–2167 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2158>

### 立体成像眼底相机光学系统设计

Design of optical system for stereo imaging fundus camera

*光学精密工程*. 2018, 26(5): 1054–1060 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182605.1054>

文章编号 1004-924X(2020)10-2168-12

# 基于深度调节方法的集成成像畸变消除

邓莉巾, 朴 燕\*, 王 宇, 谷岳佳楠

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了消除集成成像系统中景深范围外目标的畸变现象, 提高重构图像的整体观察效果, 本文通过逆向光线追迹分析集成成像系统中弥散斑直径关系。参考人眼视觉特性, 首先推导出系统的目标采集景深范围; 然后根据此范围模型, 在采集装置固定的情况下, 得到集成成像系统所能重构出的真实深度范围; 以此真实深度值为参考值做深度调整, 基于查找表法得到元素图像, 最终在重构阶段得到无畸变的三维重构图像。实验结果表明, 采集景深范围内的目标可以清晰重构, 验证了此采集景深模型的合理性; 与其他方法得到的元素图像相比, 根据此模型做深度调节得到的元素图像, 其三维重构图与目标平面图的颜色直方图相似度从 67.057% 提升到 94.507%, 结构相似性从 54.002% 提升到 84.510%, 峰值信噪比从 16.902 提升到 19.740, 明显消除了深度范围外目标的重构畸变, 适用于分辨率优先的集成成像显示技术。

**关键词:** 集成成像; 裸眼三维显示; 人眼视觉; 光线追迹; 查找表

**中图分类号:** TN919.81; TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2168

## Eliminating distortion of integral imaging technology based on depth adjustment method

DENG Li-jin, PIAO Yan\*, WANG Yu, GU Yue-jianan

(School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: piaoyan@cust.edu.cn

**Abstract:** A method was proposed to eliminate the distortion of targets beyond the depth of field (DOF) in integral imaging systems and improve the overall effect of the reconstruction. First, the relationship of the diffuse spot diameter in the integral imaging system was analyzed through ray tracing, and the DOF range of the system with reference to the visual characteristics of the human eye was obtained. Then, in the case of a fixed collection device, the depth of the three-dimensional target beyond the DOF range was adjusted according to the actual depth value used as the reference value to obtain an element image using a look up table. Finally, the reconstructed image without distortion was obtained in the reconstruction stage. Experimental results demonstrate that the targets within the range of the acquisition DOF can be clearly reconstructed, thus verifying the efficacy of the acquisition

收稿日期: 2020-06-28; 修订日期: 2020-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60977011); 国家留学基金委 (No. 201808220249); 吉林省科技计划资助项目 (No. 20180201091GX); 吉林省机器视觉智能检测科技创新中心 (No. 20180623039TC); 吉林省教育厅“十三五”科研项目 (No. JJKH20200779KJ)

DOF model. According to this model, the reconstructed image could be obtained using the depth adjustment method. Its color similarity with the two-dimensional color map increases from 67.057% to 94.507%. The SSIM increases from 54.002% to 84.510%, and the PSNR increases from 16.902 to 19.740. This method clearly eliminates the distortion in the reconstruction of objects beyond the DOF range and is suitable for resolution-first integral imaging display technology.

**Key words:** integral imaging; naked eyes 3D display; human vision; ray tracing; look up table

## 1 引言

集成成像技术作为最有前途的裸眼 3D 技术之一,于 1908 年由 Lippmann 提出<sup>[1]</sup>。集成成像系统包括元素图像获取阶段和三维重构显示阶段。首先,使用微透镜阵列捕获来自物体不同方向的光线,生成元素图像;然后利用显示设备通过元素图像的反投影显示三维影像<sup>[2-4]</sup>。集成成像技术的优点是它避免了视觉疲劳的问题,可以实现全视差、连续视点的真三维实时立体成像且无需戴眼镜<sup>[5]</sup>。近年来,随着电子器件和显示设备工艺的发展,透镜制造工艺愈加成熟,集成成像技术在工程测量、水下成像、三维艺术以及商业广告等方面展现出独特的优势<sup>[6-9]</sup>。

尽管集成成像技术有许多明显的优点,但仍存在观看视场角窄、景深有限和图像分辨率低等问题<sup>[9-12]</sup>。目前,已有多种研究方法用于提高景深。文献<sup>[13]</sup>提出了一个结合图像获取和三维显示过程的深度优先集成成像系统,通过真实和虚拟的图像域显示大景深真三维目标。大连理工大学对多聚焦元素图像进行图像融合,提出了一种提高集成成像景深的方法<sup>[14]</sup>。四川大学对集成成像显示器中的大景深场景进行任意深度的重新聚焦,实现了景深 3D 对象的光学重聚焦<sup>[15]</sup>。这些研究主要是针对三维重构阶段提高景深的,而针对图像采集阶段的研究并不多,且大部分不是用于改善景深的,如文献<sup>[16]</sup>提出了一种确定最佳采集距离的方法来减少相邻元素图像间的干扰和三维再现过程中的串扰现象。

集成成像的重构阶段也受采集过程中景深的影响,对于固定参数的采集设备,只有在采集景深内的三维场景才能被记录为清晰的元素图像,最终重构出无畸变的三维图像。本文先推导出集成成像系统的目标采集景深模型。参考此模型,通过深度调节的方法,在采集装置固定的情况下,对

无法改变位置的深度范围外的三维场景进行深度调节,使得最终的重构效果更加完整,消除了深度范围外目标的重构畸变。

## 2 理论分析

### 2.1 采集景深模型

人眼视觉系统具有一定的调节能力,以使清晰的图像聚焦在视网膜上<sup>[17]</sup>。对于焦平面上的点 A 和远离焦平面的点 B,在图像参考平面上,重建的 A 点清晰,尽管 B 点的重建是模糊的,但是人眼视觉系统的调节能力会将 B 固定在参考平面上。在这种情况下,观察者看到的不是锐利的 A 和模糊的 B,而是一个高亮度的锐利点 A 和一系列亮度较低的散斑 B 点,如图 1 所示。此时 B 点的重构就是失真的(图中点间距是夸大的,在实际情况下,散点之间的距离小得多)。因此,若想重构出无畸变现象的 B 点,目标 B 应在采集景深范围内。

集成成像采集阶段如图 2 所示。三维空间中

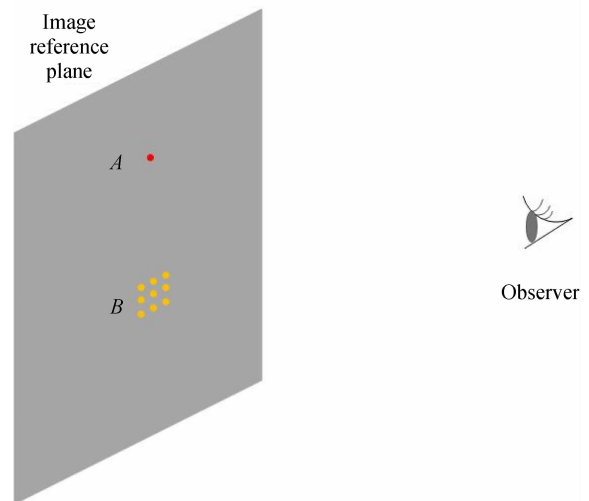


图 1 B 点的离散现象示意图

Fig. 1 Discrete phenomenon at point B

同一物点经过不同的微透镜,在像面上所成的像点互为同名像点<sup>[18-19]</sup>。物点  $A, B$  分别为聚焦物面上的点,  $A_1 - A_5$  和  $B_1 - B_5$  分别为  $A, B$  经过 5 个相邻微透镜后在像平面上生成的同名像点。可以看出,物点  $A$  的同名像点是锐利的点,物点  $B$  的同名像点是散斑,若想观察到清晰的重构图像,三维目标需要在采集景深范围内。图 3 和图 4 分别为集成成像采集阶段和重构阶段的单透镜成像光路,这里通过逆向光线追迹进行分析。

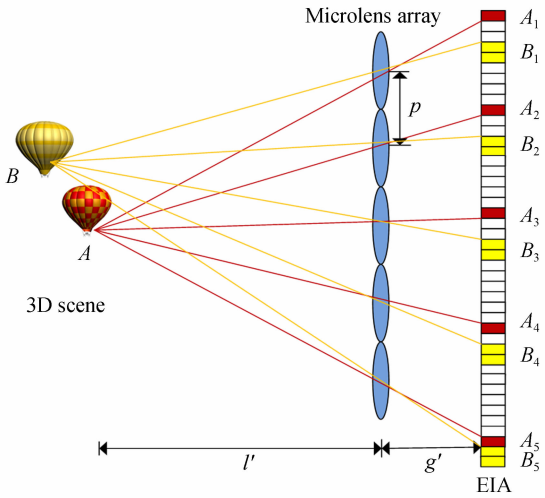


图 2 集成成像采集阶段光路

Fig. 2 Optical path of integral imaging acquisition stage

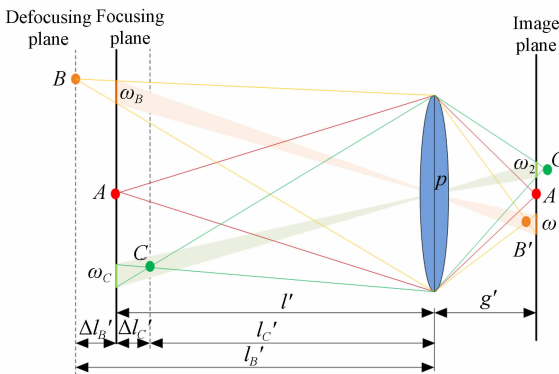


图 3 集成成像采集阶段的单透镜成像光路

Fig. 3 Optical path of single lens imaging in integral acquisition stage

如图 3 所示,  $A$  点在聚焦物面上,其像点  $A'$  在像平面上清晰成像。  $B$  点远离聚焦物面,点  $B$  在聚焦物面上对应的弥散斑直径为  $\omega_B$ ,其像点  $B'$  在像平面之外,在像平面上形成的弥散斑直径为

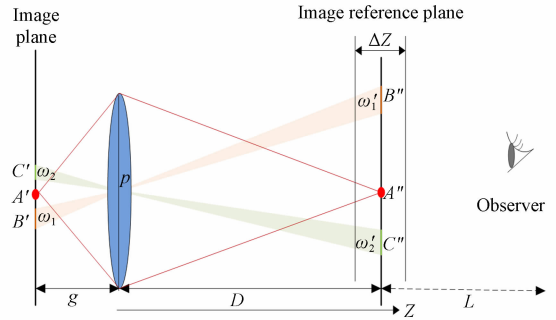


图 4 集成成像重构阶段的单透镜成像光路

Fig. 4 Optical path of single lens imaging in integral reconstruction stage

$\omega_1$ ,其对应的重构阶段在图像参考平面上的散斑直径为  $\omega_1'$ 。根据几何关系可得:

$$\omega_B = \frac{l'}{g} \omega_1 = \frac{l'_B - l'}{l'_B} p, \quad (1)$$

$$\omega_1 = \frac{\omega_1' g}{D}. \quad (2)$$

采集过程与重构过程的单透镜规格相同,因此  $g' = g, l' = D$ ,焦距都为  $f$ ,满足高斯公式:

$$\frac{1}{g'} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{g} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

推导可得远离聚焦物面的点  $B$  的采集距离为:

$$l'_B = \frac{pl'}{p - \omega_1}. \quad (4)$$

远物点  $B$  的采集深度为:

$$\Delta l'_B = l'_B - l' = \frac{\omega_1 l'}{p - \omega_1}. \quad (5)$$

人眼的视场受中心窝和黄斑的限制,在清晰识别时的角度大约为  $6^\circ \sim 8^\circ$ 。这里取可识别的最大角度  $8^\circ$ 。当显示图像充满此区域时进行观看,考虑在分辨率和舒适度等方面能得到最佳的观看效果。因此,当画面一定时,可确定图 4 中的最佳观看距离  $L$  为:

$$L = \frac{\varphi}{2 \tan(4^\circ)}, \quad (6)$$

其中  $\varphi$  为显示图像的对角线长。一般情况下,集成成像的图像尺寸与透镜阵列尺寸相等,显示图像与透镜阵列数目一致。对于  $m \times n$  维数的透镜阵列:

$$\varphi = p \sqrt{m^2 + n^2}. \quad (7)$$

因此,最佳观看距离  $L$  仅与透镜规格相关,当透镜的规格确定时,最佳观看距离也是确定的。

在良好的照明条件下,人眼的角分辨率  $\epsilon$  为  $1' \sim 2'$ ,人眼所能识别的最大散斑直径为最佳观看距离与人眼角分辨率之积,即有:

$$\omega_1' = L\epsilon. \tag{8}$$

代入式(5)可得远物面上  $B$  点的采集深度极限为:

$$\Delta l_B' = \frac{L\epsilon l'}{p - L\epsilon}. \tag{9}$$

同理可得图 3 中另一侧远物面上  $C$  点的采集深度极限为:

$$\Delta l_C' = \frac{L\epsilon l'}{p + L\epsilon}. \tag{10}$$

该系统的采集深度为:

$$\Delta l' = \Delta l_B' + \Delta l_C' = \frac{2pL\epsilon l'}{p^2 - L^2\epsilon^2}. \tag{11}$$

由此可知,当集成成像采集与重构系统固定时,最佳观看距离也是确定的,采集深度范围与采集距离  $l'$  和人眼的角分辨率  $\epsilon$  有关,本文取  $\epsilon = 1' = 0.000291 \text{ rad}$ .

### 2.2 深度调节方法

图 5 为集成成像系统重构阶段的聚焦过程。显示屏上的元素图像阵列 (Element Image Array, EIA) 发出的光线通过微透镜在中心深度平面处相交,重构的图像具有与原始目标相同的大小和位置,显示屏和中心深度平面互为共轭面,此时的中心深度平面即为重构面 (Reconstruction Plane, RP)。最后,人眼将重构面上的图像聚焦在视网膜上,观察者可以通过微透镜阵列看到连续的 3D 图像。因此,中心深度平面上的计算机重构图像是最接近人眼观察效果的。

集成成像重构阶段的景深范围为中心深度平

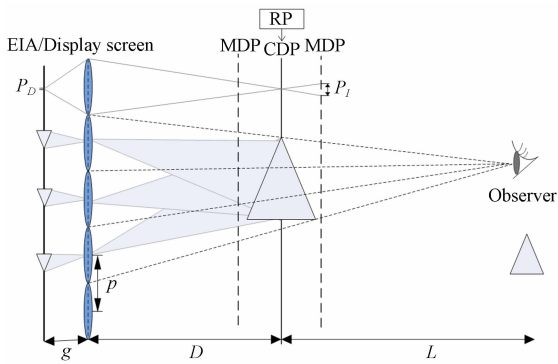


图 5 集成成像的重构阶段

Fig. 5 Reconstruction of integral imaging

面 CDP 到边缘深度平面 MDP 距离的二倍<sup>[20]</sup>:

$$\Delta Z = 2 \frac{D}{p} P_I = 2 \frac{D^2}{pg} P_D. \tag{12}$$

其中:  $P_I$  为再现像的像素尺寸,  $P_D$  为显示设备的像素尺寸。  $\min Z$  和  $\max Z$  为理想条件下不考虑采集距离时的边缘深度,是系统深度范围的极限,这意味着所有再现像的深度必须位于这个范围之内,第  $(i, j)$  个像素的真实深度  $Z_{(i, j)}$  必须与采集距离  $l'_{(i, j)}$  成反比<sup>[21]</sup>,采集距离  $l'_{(i, j)}$  表示为:

$$l'_{(i, j)} = \frac{D(\max Z + \min Z)}{2Z_{(i, j)}}. \tag{13}$$

根据公式(3)的高斯公式可得:

$$D = \frac{gf}{g - f}, \tag{14}$$

带入公式(13)得到真实深度  $Z_{(i, j)}$  为:

$$Z_{(i, j)} = \frac{gf(\max Z + \min Z)}{2l'_{(i, j)}(g - f)}. \tag{15}$$

根据式(9)和式(10)可得采集距离  $l'_{(i, j)}$  的范围为:

$$l'_{(i, j)} \in \left\{ \frac{pl'}{(p + L\epsilon)}, \frac{pl'}{(p - L\epsilon)} \right\}. \tag{16}$$

为了清晰显示所有像素,重构像素必须位于边缘深度  $\min Z = D - \Delta Z/2$  和  $\max Z = D + \Delta Z/2$  之间。因此,真实深度范围为:

$$Z_{(i, j)} \in \left\{ \left( \frac{gf}{g - f} \right)^2 \frac{(p - L\epsilon)}{pl'}, \left( \frac{gf}{g - f} \right)^2 \frac{(p + L\epsilon)}{pl'} \right\}. \tag{17}$$

### 2.3 结合深度调节的元素图像生成算法

本文使用基于查找表 (Look Up Table, LUT) 算法的彩色及深度信息生成元素图像,与普通的像素重新映射算法相似,此方法也是利用固定场景得到的彩色图像与深度图像,通过光线追迹进行像素重新映射得到元素图像。然而,集成成像系统受到采集和重构过程中透镜和显示屏参数等的影响,所能呈现的深度范围是有限的,因此对于一些深度范围外的目标,重构时会出现严重的畸变。本文使用的元素图像生成算法的独特之处在于引入了 LUT 算法后,可以按照系统所能呈现的固定深度进行深度调节,从而改善深度范围外目标的畸变。

普通的像素重新映射算法包含三部分信息,第一部分为每个场景的深度信息和彩色信息,第二部分为透镜信息,第三部分为最终得到的元素

图像像素信息。图 6 表示物体像素经过一个单位透镜投影到元素图像平面上的几何关系,其中物体像素  $A_{(i,j)}$  和  $B_{(i,j)}$  的光线穿过透镜的中心之后落在元素图像像点  $A'_{(i,j)}$  和  $B'_{(i,j)}$  的位置。像素坐标  $(u,v)$  为:

$$u = p \cdot i_m - (i \cdot P_l - p \cdot i_m) \cdot \frac{g'}{l'_{(i,j)}}, \quad (18)$$

$$v = p \cdot j_m - (j \cdot P_l - p \cdot j_m) \cdot \frac{g'}{l'_{(i,j)}}, \quad (19)$$

其中:  $i, j$  分别是  $x, y$  轴上的对应物体像素的序号,  $i_m$  和  $j_m$  是  $x, y$  轴上透镜的序号。通过式(18)和式(19),可以求出光场中任意一点  $A_{(i,j)}$  对应元素图像上的位置  $A'(u_A, v_A)$ , 从而得到透镜  $m$  对应的元素图像。

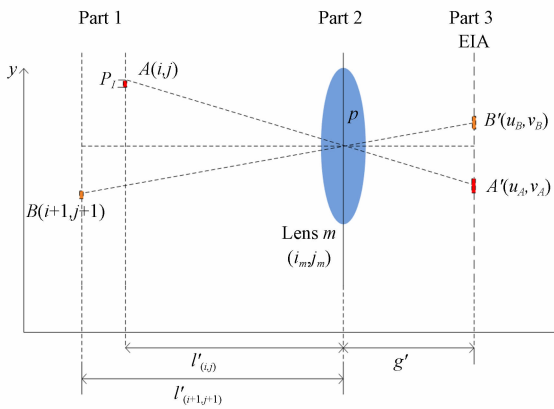


图 6 像素映射采集方法

Fig. 6 Acquisition method of pixel mapping

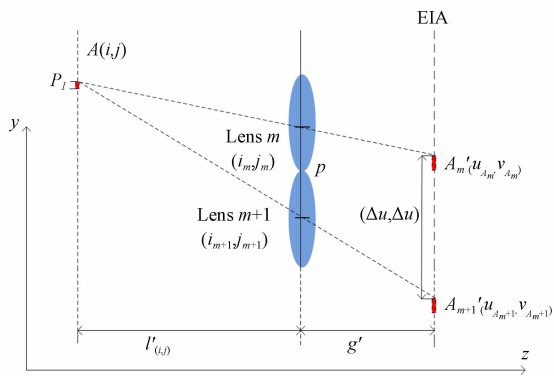


图 7 同名像点位移关系

Fig. 7 Displacement relationship of corresponding pixels

图 7 为物点  $A$  在经过透镜  $m$  和透镜  $m+1$  后在元素图像阵列中的同名像点位移关系, 则有:

$$\Delta u = \Delta v = p^2 \left( 1 + \frac{g'}{l'_{(i,j)}} \right). \quad (20)$$

物点  $A(i, j)$  经过不同透镜得到的同名像点的坐标最终可由上述公式相加而得。因此可以看到, 物点  $A$  的同名像点之间的位置仅与自己的深度数据  $l'_{(i,j)}$  有关, 深度值是通过双目立体匹配算法或深度相机等技术获取的。对于固定场景, 目标位置的深度不变, 所得到的深度图是固定的, 之后像素映射方法会直接按照物体原有的深度进行元素图像的重构, 从而使得采集深度外的目标出现了畸变。本文提出的元素图像生成算法引入了 LUT 方法, 按照集成成像系统所能呈现的固定深度范围进行调节, 最终得到无畸变重构的元素图像。LUT 方法的目的是重新设置最大深度与最小深度的灰度值范围。利用该方法可以将深度图的灰度范围按照集成成像系统的真实深度范围进行映射, 从而实现深度范围的调节。

经过深度调节后, 根据查找表中的数据转换, 场景的深度最终被调整到系统所能承受的深度范围内, 系统的深度范围  $Z_{\min} \sim Z_{\max}$  可根据公式(17)得到, 深度范围内的单位深度步长  $Z_{\text{step}} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2^7}$ 。算法步骤如下:

(1) 设置 LUT 模板。像素偏移量为:

$$\Delta pix = \frac{pZ_{\max}}{2gP_l} + 1. \quad (21)$$

假设输入值为 256 个灰度值, 将 LUT 的模板设置为  $S \times 255$ , 根据像素偏移量得到 LUT 尺寸为:

$$S = \frac{p}{P_l} + 2\Delta pix = \frac{p + 2P_l}{P_l} + \frac{p}{P_l g} Z_{\max}. \quad (22)$$

(2) 在模板范围内生成 LUT:

$$\text{LUT} = (i + \Delta pix) - \frac{p}{2gP_l} (Z_{\min} + XZ_{\text{step}}). \quad (23)$$

(3) 将深度图对照 LUT 进行扫描, 按照深度选择区域, 获取深度列表后重新进行深度排序, 在有效位置返回 LUT 值。

(4) 输出元素图像。经过此算法改进后, 根据 LUT 的返回值得到同名像点的位移关系为:

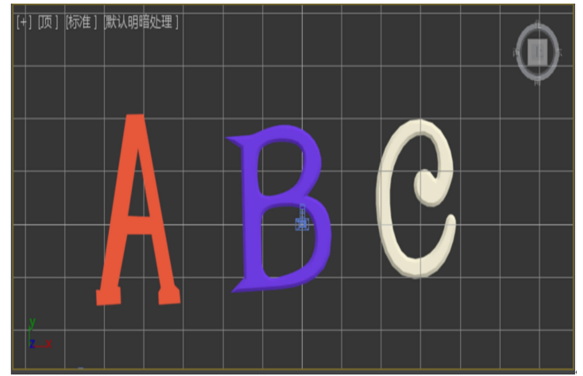
$$\Delta u = \Delta v = p^2 \left( 1 + \frac{g'}{\text{LUT}} \right). \quad (24)$$

参考上文推导出的集成成像系统的目标采集景深范围模型,对此元素图像生成算法进行真实的深度调节,得到可以进行无畸变重构的元素图像阵列,使得三维场景的整体重构效果更加完整,消除了深度范围外目标的重构畸变。

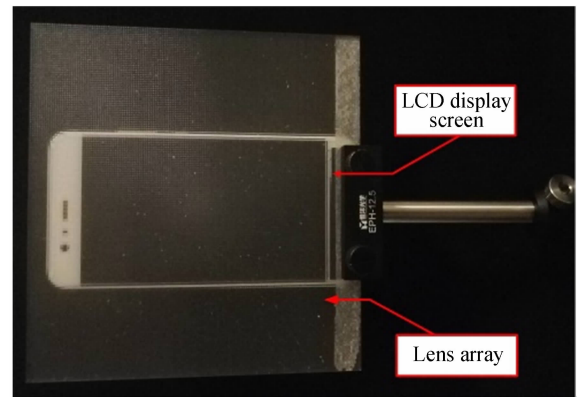
### 3 实 验

为了验证本文所提的采集景深模型的合理性,采集过程使用 3Ds max 直接进行微透镜阵列采集元素图像,重构阶段分别进行了计算机仿真重构实验与光学重构实验。在此基础上又设计深度调节实验,该实验分为两组。第一组为 3Ds max 采集图像的重构实验,采集过程使用 3Ds max 采集彩色平面图与深度图,使用基于 LUT 算法的彩色及深度信息生成元素图像后,分别进行了计算机仿真重构实验与光学重构实验。第二组为真实场景相机采集图像的重构实验,采集过程使用真实场景相机采集的彩色平面图与深度图,使用基于 LUT 算法的彩色及深度信息生成元素图像后,分别进行了计算机仿真重构实验与光学重构实验。

实验使用 3Ds max 进行图像采集,采集界面如图 8(a)所示。重构阶段分别进行了计算机仿真重构实验与光学重构实验。其中,仿真实验采用三维体重构的方法<sup>[3]</sup>,元素图像不需要进行深度反转;光学实验采用图 8(b)装置进行,重构过程使用了厚度为 3.3 mm,单透镜孔径  $p=1$  mm 的透镜板,透镜焦距为  $f=3$  mm,透镜阵列维度  $m \times n$  为  $112 \times 63$ 。本文按照重构过程使用的透镜板的规格设置采集透镜的规格,因此根据高斯公式可得  $g'=g=3.6$  mm,  $l'=D=18$  mm,焦距  $f=3$  mm。使用华为 P10 手机作为显示屏幕,屏幕分辨率为  $1\ 920 \times 1\ 080$ ,像素密度为 432 ppi (pixel per inch),因此可得像素尺寸  $P_D=0.058\ 8$  mm,参考此屏幕分辨率采集了分辨率为  $1\ 904 \times 1\ 071$  的元素图像,以尽量充满屏幕。根据公式(6)得到最佳观测距离  $L=0.92$  m,因此使用相机在 0.92 m 处进行三维成像拍摄,尽量展现人眼的观测效果。表 1 为实验系统参数。根据表 1 中的参数及式(9)~式(11)可得系统的采集深度范围  $\Delta l'=10.35$  mm,远处采集极限距离  $\Delta l_B'=6.557$  mm,近处采集极限距离  $\Delta l_C'=3.793$  mm。



(a) 3Ds max 图像采集界面  
(a) Interface of 3Ds max



(b) 光学重构实验设备  
(b) Experimental setup for optical reconstruction

图 8 光学重构实验装置

Fig. 8 Experimental configuration for optical reconstruction

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

Parameters	Value
Lens' focal length( $f$ )/mm	3
Lens' diameter( $p$ )/mm	1
Lens array( $m \times n$ )	$112 \times 63$
Lens' image distance ( $g'$ ), distance between lens and display ( $g$ )/mm	3.6
Lens' object distance ( $l'$ ), distance between lens and CDP ( $D$ )/mm	18
Resolution of element image	$1\ 904 \times 1\ 071$
Resolution of display	$1\ 920 \times 1\ 080$
Pixel size of display ( $P_D$ )/mm	0.058 8
Observation distance ( $L$ )/m	0.92

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 采集景深模型验证实验

仿真实验使用 3Ds max 直接进行元素图像的采集,根据公式(16)得到集成成像系统的无畸变采集距离  $l'$  为 14.207~24.557 mm。参考此采集景深范围,将透镜阵列和三维模型按照图 9 所示排布,采集两组元素图像。第一组中字母 AC 在采集景深范围外,第二组中所有三维目标均在采集景深范围内的。这里字母间距设置较小是为了验证本文所得采集景深模型的准确性。图 10

分别为这两个三维场景在中心深度平面  $D=18$  mm 处的计算机重构示意图。从图中细节的放大部分可以明显看出,第一组的字母 AC 在采集景深范围外,重构图像畸变严重,第二组所有字母都在采集景深范围内,重构图像清晰。图 11 为光学实验结果,光学实验结果与仿真结果一致,进一步验证了本文所提采集景深模型的合理性。图 10 细节部分图像的能量与光强分布如图 12 所示,客观表现了在采集景深范围内字母的重构图像轮廓清晰,模型边缘平滑,重构图像无畸变。在此采集模型下获得的元素图像阵列都是清晰实焦的,皆在重构成像的深度范围内。

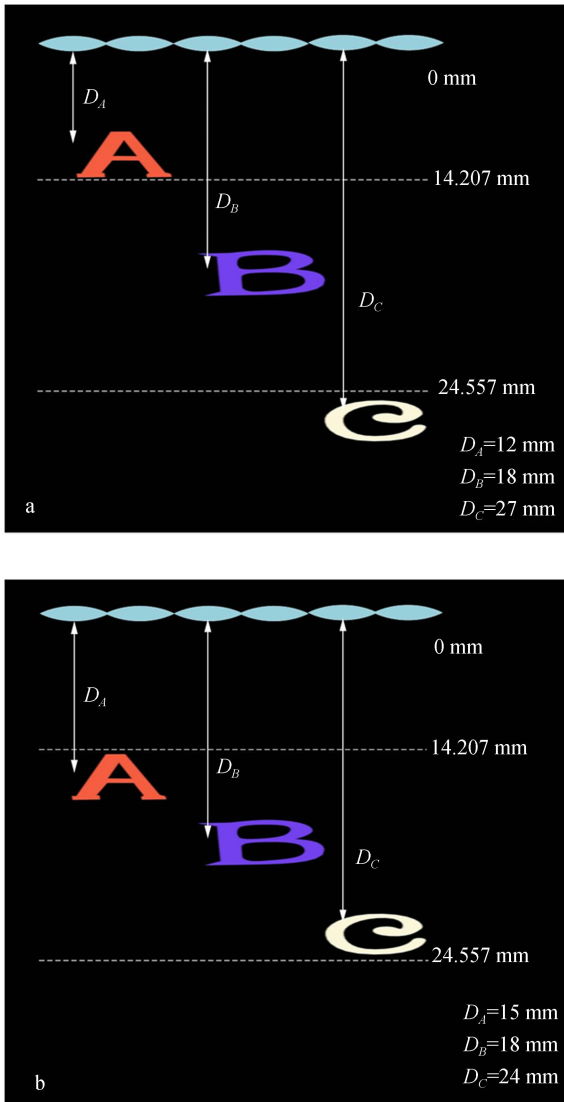


图 9 三维场景排布  
Fig. 9 Arrangement of 3D scene

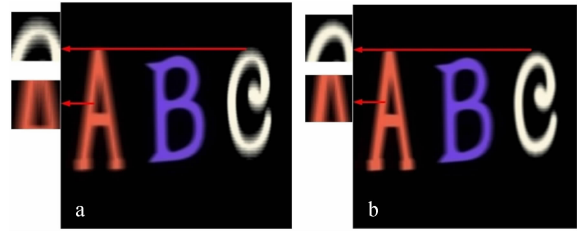


图 10 在中心深度平面处图 9 的计算机重构图  
Fig. 10 Reconstructed images of Fig. 9 at center depth plane

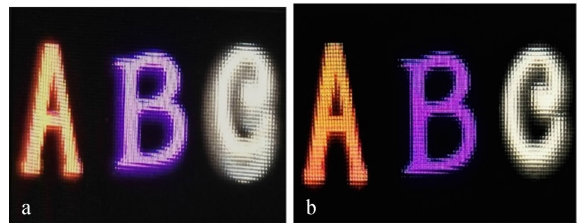


图 11 光学实验结果  
Fig. 11 Results of optical experiments

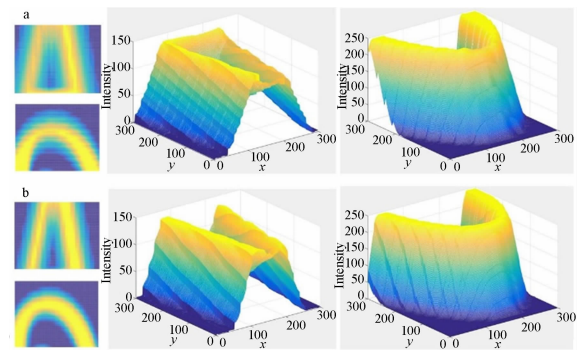


图 12 重构图像细节处能量与光强分布  
Fig. 12 Distribution map of energy and light intensity at details of reconstructed images

### 4.2 3Ds max 采集的无畸变重构实验

由于集成成像系统的采集距离  $l'$  在 14.207 ~ 24.557 mm 的三维目标可以无畸变重构,在此采集范围内,根据公式(17)可得无畸变深度  $Z$  为 13.193 ~ 22.805 mm。参考此深度范围做深度调节,设计深度调节实验,基于 LUT 算法的彩色及深度信息生成元素图像,在此过程中,参考所得的无畸变深度  $Z$  进行深度调节。图 13 为生成元素图像阵列所用的彩色图及元素图。3Ds max 是专业的计算机三维图像应用软件,使用 3Ds Max 拍摄彩色图与深度图,像素数皆为  $800 \times 800$ ,使用焦距为 150 mm 的相机,在距离目标 100 mm 处进行模型的拍摄,并在同一位置将模型转化为黑白深度图,得到图 13 中的彩色图和深度图。模型中字母间距为 25 mm,字母间距设置较大是为了验证本文所提深度调节方法的广泛适用性。利用图 13 的彩色及深度信息生成两组元素图像,分别生成无深度调节的元素图像,即  $\Delta Z = 50$  mm;和本文提出的无畸变深度调节方法所得的元素图像,即  $\Delta Z = 9.6$  mm。生成的元素图像如图 14 所示。它们在中心深度平面处的体三维重构的计算机仿真图如图 15 所示。可以看出,经过无畸变深度调节后,字母 X 与 Z 的畸变现象得到了明显改善,图 16 的光学实验结果也与此一致。分别将图 13 中的平面彩色图与图 15 两组计算机重构图像进行客观评价实验,经过深度调节后,重构图像的颜色直方图相似度 (CHS) 从 67.057% 提升到 94.507%,如图 17 所示。另外计算图 13 中的平面彩色图与计算机重构图像图 15(a) 的结构相似性 (SSIM) 为 54.002%,峰值信噪比 (Peak Signal to Ratio, PSNR) 为 16.902,与图 15(b) 的 SSIM 为 84.510%,PSNR 为 19.740,可以看出经过深

度调节,重构图像的结构相似性明显提高,峰值信噪比变大,图像畸变减少。

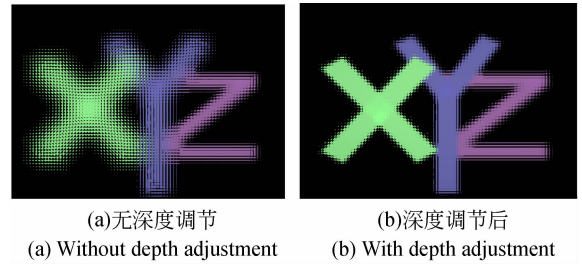


图 14 生成的元素图像

Fig. 14 Generated EIs

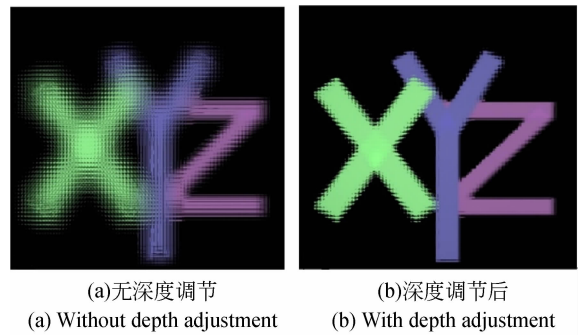


图 15 在中心深度平面处计算机重构示意图  
Fig. 15 Reconstructed images at center depth plane

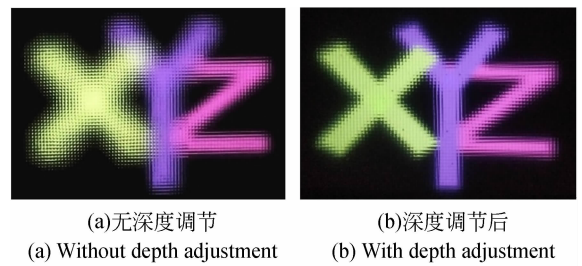


图 16 光学实验结果

Fig. 16 Results of optical experiments

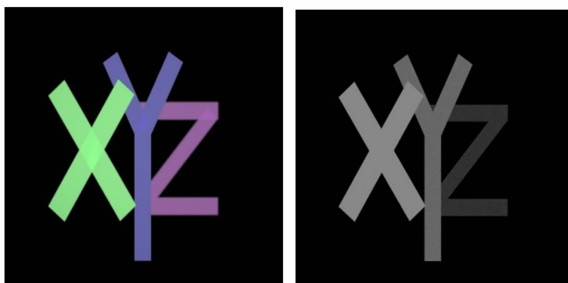
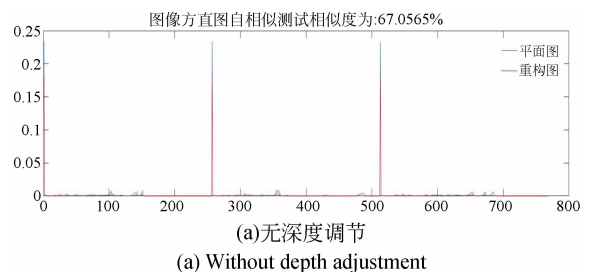


图 13 实验采集的彩色图及深度图

Fig. 13 Color and depth maps collected by experiments



(a) 无深度调节  
(A) Without depth adjustment

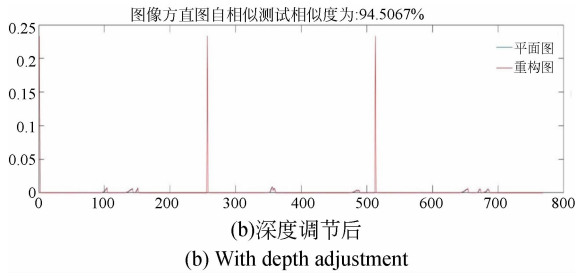


图 17 计算机重构图与彩色图的颜色直方图相似度  
Fig. 17 Histogram of color similarity with color map and computer reconstructed image

### 4.3 真实场景的无畸变重构实验

为了更进一步说明此方法的实用性,这里加入一组真实场景的重构实验。实验场景的彩色图与深度图如图 18 所示,使用的是 Microsoft 公司的 MSR 3D 视频数据集中一幅芭蕾舞场景的彩色图与深度图<sup>[22]</sup>,分辨率皆为  $1\ 024 \times 768$ 。



图 18 彩色图及深度图  
Fig. 18 Color and depth maps

本文所提的方法适用于大景深场景的三维重构,然而目前已经提出的元素图像生成算法大部分都是针对小场景的三维目标。图 19 所示为使用文献<sup>[23]</sup>方法得到的两种元素图像,它们的计算机重构效果和光学实验结果分别如图 20 和图 21 所示。可以看到,无论是场景前方的男人还是

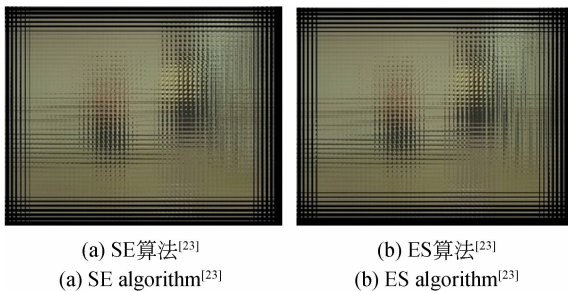


图 19 生成的元素图像  
Fig. 19 Generated EIs

场景后方的女人,重构效果都比较差,因此这两种方法对于大景深的三维场景重构效果不佳。

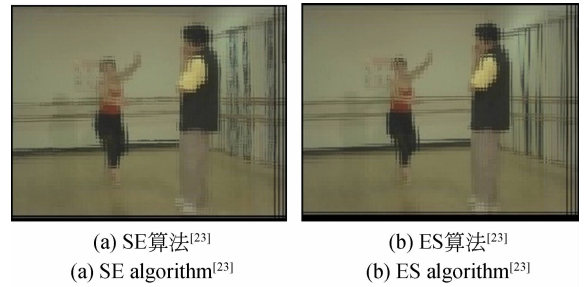


图 20 计算机重构示意图  
Fig. 20 Reconstructed images

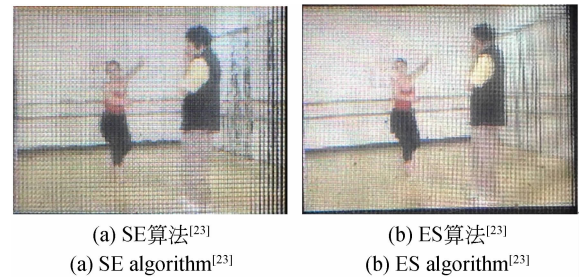


图 21 光学实验结果  
Fig. 21 Results of optical experiments

此集成成像系统无畸变重构的采集距离  $l'$  在  $14.207 \sim 24.557\text{ mm}$ ,无畸变深度  $Z$  在  $13.193 \sim 22.805\text{ mm}$ 。基于 LUT 算法的彩色及深度信息生成元素图像,在此过程中,参考所得的无畸变深度  $Z$  进行深度调节。利用彩色及深度信息生成两组元素图像,分别为不做深度调节的元素图像,和本文提出的无畸变深度调节方法所得的元素图像,即  $\Delta Z = 9.6\text{ mm}$ ,如图 22 所示。通过像素提取方法对两幅元素图像进行计算机重构,得到的两组计算机仿真重构图如图 23 所示,可以看出,经过无畸变深度调节后,重构效果明显变好,尤其远处舞者的畸变现象得到了明显改善,图 24 的光学实验结果也与此一致。实验表明,与无深度调节的方法相比,基于深度调节方法生成的元素图像的重构效果明显消除了畸变现象。除此之外,与文献<sup>[23]</sup>相比,本文提出的方法更适用于大景深场景的三维重构。

表 2 分别比较了这 4 种元素图像生成方法的计算机重构图像颜色直方图相似度 (Color Histogram, CH)、结构相似性 (SSIM) 和峰值信噪

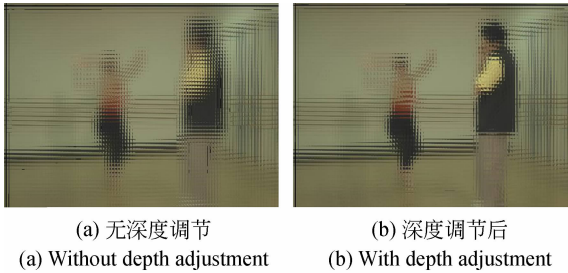


图 22 生成的元素图像  
Fig. 22 Generated EIs

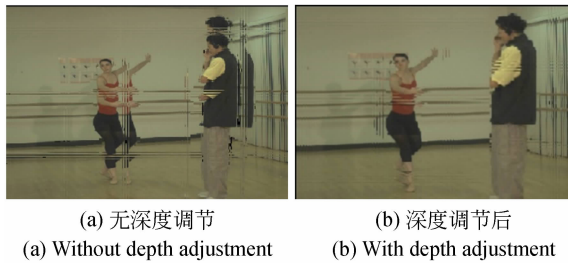


图 23 计算机重构示意图  
Fig. 23 Reconstructed images

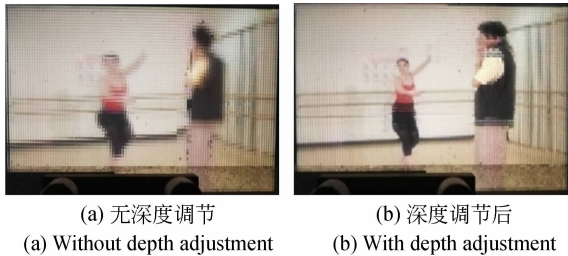


图 24 光学实验结果  
Fig. 24 Results of optical experiments

比 PSNR。可以看出,本文经过深度调节得到的重构图像的结构相似性明显最高,峰值信噪比最大,图像畸变减少。

表 2 客观评价实验结果

Tab. 2 Result of objective evaluation experiment

参数	CH/%	SSIM/%	PSNR
文献[23]SE算法	90.476 6	54.515 7	18.267 65
文献[23]ES算法	90.134 9	53.168 3	17.485 44
无深度调节方法	89.696 4	57.261 8	20.321 57
深度调节后方法	95.494 2	63.203 9	20.785 28

## 5 结 论

本文在人眼视觉特性和集成成像的光线追迹分析基础上,提出采集景深范围模型;以此模型作为指导,推导出集成成像的真实深度范围;针对在采集景深范围外的目标,其重构深度超出了真实深度范围,因此又提出通过参考真实深度范围进行深度调节的 LUT 元素图像生成算法,来实现整个三维场景的完整重构。本文提出的采集景深模型和深度调节方法,对参数固定的采集设备,在无法改变三维场景中目标位置的情况下仍可以进行整体的无畸变重构,并且重构轮廓清晰,提高了集成成像的整体观察效果。这种方法虽然牺牲了景深,但可以为场景外的目标提供更清晰的再现像,不受采集装置和目标场景限制,可广泛应用于分辨率优先的集成成像显示系统。

## 参考文献:

- [1] LIPPMANN M G. La photographie integrals[J]. *Compt. rend.*, 1908, 146: 446-451.
- [2] ARIMOTO H, JAVIDI B. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(3): 157-159.
- [3] HONG S H, JANG J S, JAVIDI B. Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging[J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 483-491.
- [4] 邓欢,李述利,吴非,等.增大 3D 观看视角的会聚式集成成像[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 1-6.
- [5] DENG H, LI SH L, WU F, *et al.*. Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 孟繁斐,步敬.集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2130-2138.
- [7] MENG F F, BU J. Design and fabrication for micro-lens array with high fill factor in integral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2130-2138. (in Chinese)
- [8] PARK J S, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Resolution-enhanced 3D image correlator using

- computationally reconstructed integral images[J]. *Optics Communications*, 2007, 276(1): 72-79.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, 37(S1): 150-153.  
WANG F N, YAN A Y, LING X Y. The development and application of integral imaging[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2011, 37(S1): 150-153. (in Chinese)
- [10] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 多级投影式集成成像三维显示的视场角拓展[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 1-6.  
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Enhancement of viewing angle of multi-stage projection-type integral imaging 3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 1-6. (in Chinese)
- [11] DENG L J, PIAO Y, SI T L, *et al.*. True-color restoration of reconstructed image in naked-eye 3D LED display based on eliminating optical dispersion[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59(1): 017001.
- [12] MARTINEZ-CUENCA R, SAAVEDRA G, MARTINEZ-CORRAL M, *et al.*. Progress in 3-D multi-perspective display by integral imaging[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1067-1077.
- [13] SHIN D H, LEE S H, KIM E S. Optical display of true 3D objects in depth-priority integral imaging using an active sensor[J]. *Optics Communications*, 2007, 275(2): 330-334.
- [14] PIAO Y R, ZHANG M, WANG X H, *et al.*. Extended depth of field integral imaging using multi-focus fusion[J]. *Optics Communications*, 2018, 411: 8-14.
- [15] XING Y, WANG Q H, REN H, *et al.*. Optical arbitrary-depth refocusing for large-depth scene in integral imaging display based on reprojected parallax image[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 209-214.
- [16] 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)
- [17] NAVARRO H, MARTINEZ-CUENCA R, MOLINA-MARTIAN A, *et al.*. Method to remedy image degradations due to facet braiding in 3D integral-imaging monitors[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 404-411.
- [18] 赵岩, 李丽, 王世刚. 结合成像几何特征的立体元图像阵列编码[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(12): 3060-3066.  
ZHAO Y, LI L, WANG SH G. Elemental image array coding combining imaging geometry features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 3060-3066. (in Chinese)
- [19] 杨勇, 徐于萍, 赵星, 等. 基于同名点间距变换的三维显示参数匹配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1084-1089.  
YANG Y, XU Y P, ZHAO X, *et al.*. Parameter matching of three dimensional display based on space of corresponding image point transformation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1084-1089. (in Chinese)
- [20] 杨神武. 大景深、大视角 3D 光场显示关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
YANG SH W. *The Key Technology Research of the 3d Light Field Display with Large Depth Range and Wide Viewing Angle* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019. (in Chinese)
- [21] LI G, KWON K C, SHIN G H, *et al.*. Simplified integral imaging pickup method for real objects using a depth camera[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(4): 381-385.
- [22] ZITNICK C L, KANG S B, UYTENDAELE M, *et al.*. High-quality video view interpolation using a layered representation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 600-608.

[23] GU Y J N, PIAO Y. Elemental image generation algorithm using reverse iteration along optical path

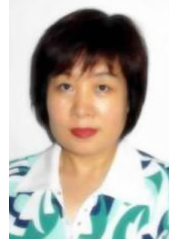
[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, 40(6): 559-570.

作者简介:



邓莉巾(1991—),女,吉林白山人,博士研究生,2014年于吉林大学获得学士学位,主要从事裸眼三维显示、集成成像技术的研究。E-mail: denglijin@126.com

通讯作者:



朴 燕(1965—),女,吉林蛟河人,教授,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1995年于中科院长春物理研究所获得硕士学位,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事裸眼三维显示、集成成像技术、智能目标识别及数字信号处理等方面的研究。E-mail: piaoyan@cust.edu.cn