

文章编号:1007-2780(2022)05-0549-06

基于预处理卷积神经网络提升 3D 光场显示 视觉分辨率的方法

于迅博, 李涵宇, 高 鑫*, 桑新柱, 颜玢玢, 栗曦雯, 温旭东, 徐 斌, 王越笛
(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 3D 光场显示技术因具有较大的观看视角、密集的观看视点而被研究学者们关注。分辨率是 3D 光场显示技术的一个重要参数,提升分辨率的方法较为复杂,因此研究学者们开始关注视觉分辨率。为了提高 3D 光场显示的视觉分辨率,提出了一种基于深度学习获取预处理基元图像阵列(PEIA)的方法。在光场显示的成像过程中,透镜的像差会使成像平面上形成弥散斑。弥散斑之间的交叠区域可以被视为新的视觉像素,并被用作额外的信息载体。一个分辨率增强的卷积神经网络(CNN)被用来从高分辨率基元图像阵列(HEIA)中获取 PEIA,将 PEIA 加载到 LCD 上,经过透镜阵列的光学变换和定向扩散膜的扩散作用,呈现出具有视觉分辨率增强的 3D 光场显示图像。在实验中,通过使用 PEIA、透镜阵列以及定向扩散膜,展示了一个具有 70°视角的光场显示,并提高了视觉分辨率。

关键词: 3D 光场显示;深度学习;卷积神经网络;视觉分辨率

中图分类号: TN27;O435.2 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/CJLCD. 2022-0044

3D light field display with improved visual resolution based on pre-processing convolutional neural network

YU Xun-bo, LI Han-yu, GAO Xin*, SANG Xin-zhu, YAN Bin-bin, SU Xi-wen,
WEN Xu-dong, XU Bin, WANG Yue-di

(College of Electronical Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876, China)

Abstract: 3D light field display technology has been paid attention to by research scholars because of its large viewing angle and dense viewing viewpoint. Resolution is an important parameter of 3D light field display technology, and the method to improve the resolution is complicated, so the research scholars began to focus on the visual resolution. To improve the visual resolution of the light field displays, an approach based on convolutional neural network to acquire pre-processing elemental image (PEI) is proposed. In the imaging procedure of light field display, lens aberrations diffuse the pixels on the imaging plane. The aliasing areas of the diffuse pixels can be regarded as new visual pixels and used as extra information carriers. A visual resolution-enhanced convolutional neural network (CNN) is employed to

收稿日期:2022-01-30;修订日期:2022-03-04.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62175015, No. 61905019, No. 62075016);中央高校基本科研业务费(No. 2021RC13)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 62175015, No. 61905019, No. 62075016);
Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 2021RC13)

*通信联系人, E-mail: gxbupt@126. com

obtain the pre-processing elemental image array (PEIA) from a high-resolution elemental image array (HEIA). The PEIA is loaded onto the LCD, which is optically transformed by the lens array and diffused by the diffuser to render a 3D light field display image with visual resolution enhancement. In the experiment, by using the LEIA, lens array and diffuser, a light field display with a 70° viewing angle and improved visual resolution is demonstrated.

Key words: 3D light field display; deep learning; convolutional neural network; visual resolution

1 引言

3D 光场显示技术被认为是实现裸眼 3D 立体的一种非常有前途的方法。近几十年来,3D 光场显示的成像技术取得了惊人的进展,为观众提供了大量机会去了解裸眼 3D 显示技术。显示设备的分辨率是 3D 光场显示系统中最重要的因素之一,为了进一步提高 3D 光场显示的分辨率,人们做了很多努力^[1-8]。3D 光场显示系统通常由平面(2D)显示设备和控光元件组成。提升分辨率的主要途径有二:一是对背光刷新模组和显示面板进行时分复用^[3-4],二是通过空分复用增加二维显示面板的分辨率^[5-7]。上述两种方法的本质都是为了提高像素的数量,然而它们都大幅增加了系统的复杂度和制造难度。

除了增加像素数量,还可以通过提高视觉分辨率改进图像质量。目前有很多可行的方案来实现 2D 显示系统的视觉分辨率提升^[9-14]。例如通过紧凑排列多个投影仪,并对其投影区域进行特异化处理,以创造新的视觉像素^[10];通过将一对传统显示器分层,构建一个级联的显示器架构,进而产生视觉子像素^[11];基于人眼视觉系统的特点,提高预显示内容的刷新频率也可以提供更多的视觉像素^[12]。最近有学者提出了新的思路,将提升视觉分辨率的方案应用到了 3D 显示系统中^[15-17]。Zhan 等人使用 Pancaratnam-Berry 偏转器,通过叠加两个偏移的像素格来提升视觉分辨率^[15]。高鑫等人设计了一个线性棱镜阵列,将原始像素阵列在对角线上一分为二,以提高视觉分辨率^[16]。

前期工作中为提高视觉分辨率需要引入新的光学结构或显示设备。我们提出了一种基于深度学习优化基元图像阵列的 3D 光场显示方法,该方法不需要引入额外的控光元件就可以提高视觉分辨率。在 3D 光场显示的成像过程中,由于透镜存

在像差,光线经过透镜会形成弥散斑。相邻像素弥散斑之间的混叠区域可被视为新的视觉像素,并作为额外的信息载体。基于这个前提,我们搭建并训练了一个卷积神经网络(CNN),以从高分辨率基元图像阵列(HEIA)中训练得到预处理的基元图像阵列(PEIA)。通过现有的透镜阵列对 PEIA 进行加载显示,实现了视觉分辨率提高的 3D 光场显示。在实验中,对现有的透镜阵列进行像差分析,提取其点扩散函数阵列,并用高斯分布近似替代,方便后续网络的搭建。通过使用 LEIA 和设计的复合透镜阵列,演示了在 70° 视角下具有更好视觉分辨率的光场显示。

2 基于 LEIA 提升视觉分辨率

2.1 由透镜像差引起的弥散斑交叠

我们在以前的工作中提出了一个带有透镜阵列、LCD 和定向扩散膜的光场显示系统^[17]。图 1 中画出了基本的显示单元,并结合了 3D 光场显示系统的成像过程。像素 1、2、3、4(表示为 P1、P2、P3、P4)是 LCD 上相邻的不同像素。由于透镜存在像差,使得单一像素在成像过程中形成了一个弥散斑。LCD 上两个相邻像素发出的光线经过透镜后在定向扩散膜上形成的弥散斑之间产生了交叠区域,混叠区域可以被看作是新的视觉像素。如图 1 所示,新的视觉像素被标记为 SP1~SP5(SP 表示亚像素)。新视觉像素的强度可以用 P1、P2、P3 和 P4 的强度表示。例如 SP5 的强度可以用公式(1)表示:

$$\begin{aligned} \text{Intensity}(\text{SP5}) = & K_1 \cdot \text{Intensity}(\text{P1}) + \\ & K_2 \cdot \text{Intensity}(\text{P2}) + K_3 \cdot \text{Intensity}(\text{P3}) + \\ & K_4 \cdot \text{Intensity}(\text{P4}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 分别表示 P1、P2、P3 和 P4 在 SP5 位置的权重系数。权重系数可以通过分析定向扩散膜上显示的弥散斑强度分布得到。

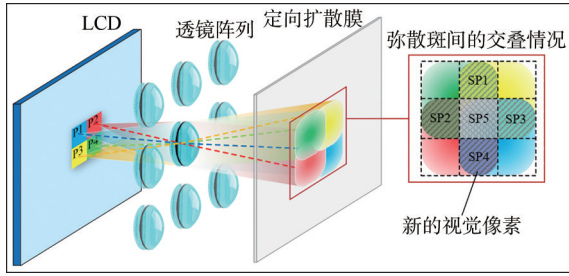


图1 由相邻像素之间交叠区域产生的新视觉像素

Fig.1 New visual pixels generated by aliasing areas between adjacent pixels

如图1所示,在HFS上显示的视觉像素的强度分布可以通过卷积运算来表示:

$$VI(x,y)=PI(x,y)*h(x,y), \quad (2)$$

其中: $*$ 代表卷积运算, $VI(x,y)$ 代表视觉像素在定向扩散膜上的强度分布, $PI(x,y)$ 代表像素在LCD上的强度分布, $h(x,y)$ 表示对应的点扩散函数(PSF)。单一透镜下不同视场角的每个像素的PSF可以被近似看作高斯分布,因此弥散斑的均方根半径(RMS)的2倍可被视为等于高斯分布的半高全宽(FWHM)^[18]。根据高斯公式,任意RMS半径弥散斑的PSF可以表示为:

$$h(x,y)=\frac{4 \ln 2}{\pi R^2} \exp \left\{ -\frac{4 \ln 2}{R^2} \left[(x - \mu_x)^2 + (y - \mu_y)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

其中: R 是RMS半径, μ_x 是沿 x 轴方向的期望, μ_y 是沿 y 轴方向的期望。当基元图像(EI)经过透镜时,透镜不同视场角下弥散斑的RMS半径都不相同,与其对应的PSF也不相同。基于公式(3)及上述的讨论分析,我们可以用不同的高斯分布近似替代不同视场角下的PSF。因此单一透镜下复杂繁琐的PSF分布情况可以用一个高斯核

阵列(GKA)来表示。那么EI的成像过程可以看作是EI的强度分布与高斯核阵列之间的卷积运算,如图2所示。

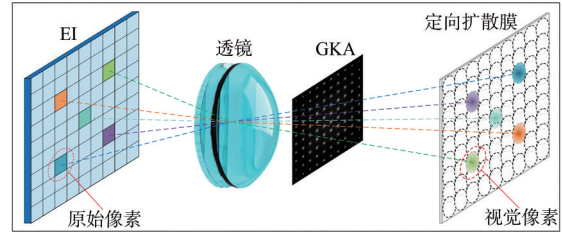


图2 像素经过透镜的过程可被视为与高斯核的卷积

Fig.2 Process of pixel blurring after passing through a lens which can be regarded as convolution with a Gaussian kernel

2.2 基于CNN提升视觉分辨率

为了将交叠区域变成可利用的视觉像素,我们设计了一个用于分辨率增强的CNN,用于从HEIA中获得PEIA。图3解释了视觉分辨率增强是如何实现的。首先用虚拟相机阵列(VCA)对三维模型采集一系列高分辨率的视差图,然后以 $15\,360 \times 8\,640$ (16K)的分辨率合成HEIA。

将HEIA输入至CNN,经过CNN的处理,得到分辨率为 $7\,680 \times 4\,320$ (8K)的PEIA。输出的PEIA被加载到LCD面板上,经过透镜阵列的光学变换后,观众可以在定向扩散膜上观察到具有视觉分辨率增强的光场显示3D图像。我们使用16K分辨率的HEIA作为网络输入的原因有二:一是真实物理分辨率与视觉分辨率目前难以通过简单的公式进行衡量,选择横向分辨率乘以2和纵向分辨率乘以2的训练方式与文中所提的两个相邻像素相互交叠产生一个新视觉信息的模

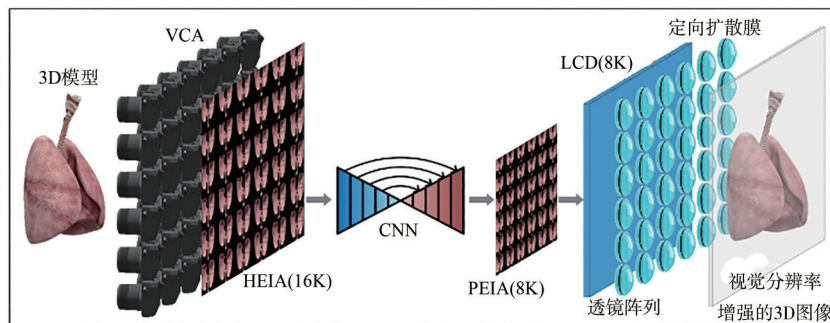


图3 使用CNN实现视觉分辨率增强的3D光场显示过程

Fig.3 Process of using CNN to realize visual resolution enhanced 3D display

型更加契合;二是如果选用更高分辨率的合成图作为输入,将会加剧虚拟相机采集视差图时所带来的时间成本。

图 4 展示了用分辨率增强的 CNN 获取 PEI 的过程。其中 HEI 作为 CNN 的输入。将 HEI 输入至分辨率增强的 CNN 得到 PEI。然后对图像依次进行双线性插值放大和卷积点扩散函数阵列操作,上述操作是模拟真实系统中的光学成像过程:双线性插值对应着像素经过透镜的放大过程,

卷积对应着光线经过透镜形成弥散斑相互影响的过程。最终将仿真得到的图像与 HEI 计算结构相似性差异(SSIM)作为网络的损失函数,进行梯度优化反向传播。CNN 是用 TensorFlow 框架编程的,并在 NVIDIA RTX 2070 GPU 上运行。当训练过程迭代到 50 000 次时,所采用的网络收敛性良好。每次迭代耗时约 0.036 s,总训练时间为 1 800 s。CNN 中共有 5 个卷积层,每个卷积层依次包括 32、64、128、256 和 512 个特征。

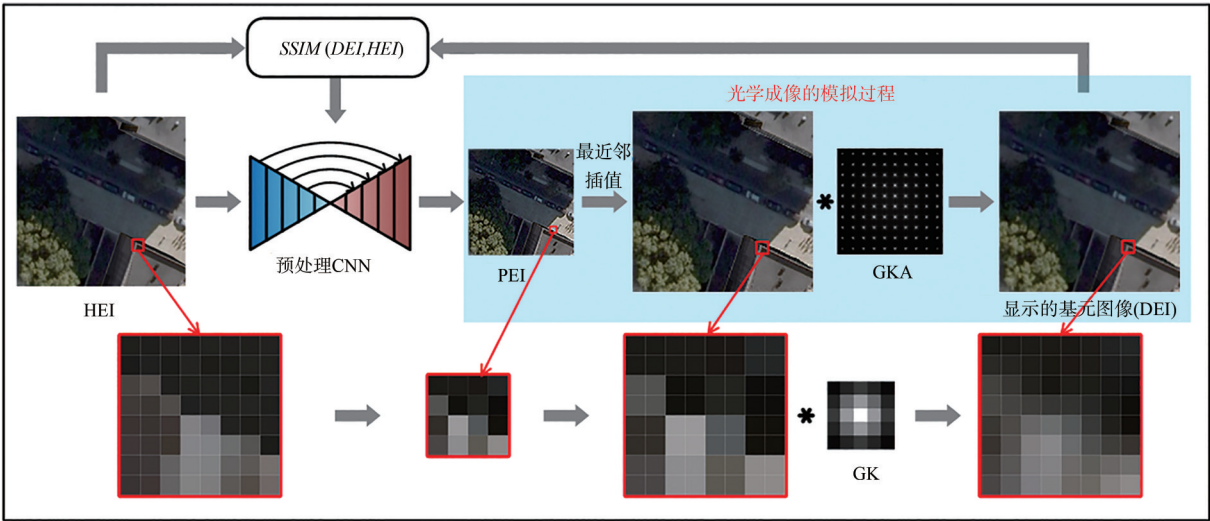


图 4 分辨率增强的 CNN 的示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the resolution-enhanced CNN

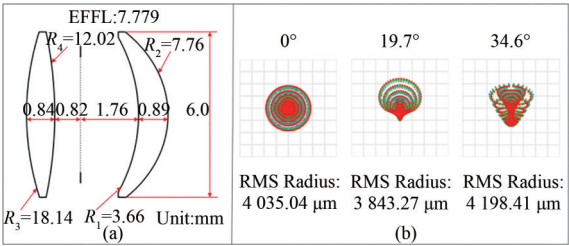


图 5 (a)复合透镜的结构参数;(b)复合透镜在 3 个视角下的弥散斑分布情况(RMS 半径: 0° 视角角: 4 035.04 μm , 19.7° 视角角: 3 843.27 μm , 34.6° 视角角: 4 198.41 μm)。

Fig. 5 (a) Structural parameters of the compound lens; (b) Spot diagrams of the compound lens in three viewing angles (RMS radius: 0° viewing angle: 4 035.04 μm , 19.7° viewing angle: 3 843.27 μm , 34.6° viewing angle: 4 198.41 μm).

为了验证上述的构想,并且考虑到设计制造

的难度和光学加工的成本,我们使用了实验室中现有的透镜阵列模组,其基本透镜单元为两个透镜的复合透镜,如图 5(a)所示。我们对该透镜不同视角角下的弥散斑分布进行了定量分析,并使用 GKA 表示了 PSF 阵列。考虑到读者的直观感受,我们只列出了透镜在 0°、19.7° 和 34.6° 视角角下的弥散斑示意图和 RMS 半径,如图 5(b)所示。

3 仿真和实验

我们分别使用标准分辨率图和三维街道场景来验证所提出方法的有效性。如图 6 和图 7 所示,通过引入基于 CNN 的视觉分辨率增强方法,仿真图像的细节更加清晰。在街道场景的仿真当中可以看到,视觉分辨率有所提升,并且图像的 SSIM 值也有提升。

在光学实验中,我们展示了一个由定向扩散

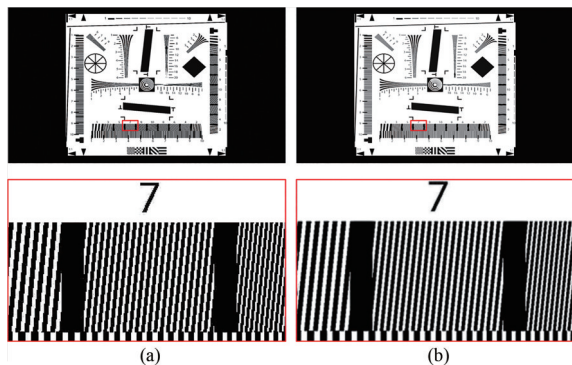


图6 标准分辨率图的仿真结果。(a)未使用优化方法;
(b)采用视觉分辨率增强方法。

Fig. 6 Simulation results of standard resolution chart. (a) Without the proposed visual resolution-enhanced method; (b) With the visual resolution-enhanced method.

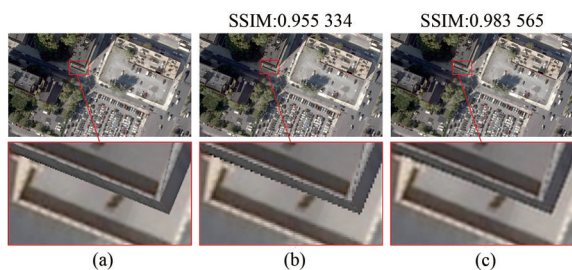


图7 街道场景的仿真结果。(a) 高分辨率的原始图像;
(b) 未优化的仿真图像;(c) 使用视觉分辨率增强方法的仿真图像。

Fig. 7 (a) Original image with high resolution; (b) Simulation image without visual resolution-enhanced method; (c) Simulation image with the visual resolution-enhanced method.

膜、透镜阵列和LCD组成的光场显示系统。透镜阵列被放置在距离LCD上方8.151 mm处,定向扩散膜被放置在透镜阵列上方180.0 mm处。透镜阵列的规模为 53×30 ,相邻透镜单元之间的中心

距离是13 mm。LCD的尺寸为81.28 cm (32 in),分辨率为 $7\,680 \times 4\,320$ 。图8展示了从3个角度下拍摄的实际显示图像的照片,并放大了一些局部的细节。图8的顶部为未进行优化的3D图像,底部为使用基于CNN的视觉分辨率提升的3D图像,中间两种图像之间的局部对比。很明显,在 70° 的视角内,由视觉分辨率增强方法产生的3D图像更加清晰,并提供了更多的街道细节信息。

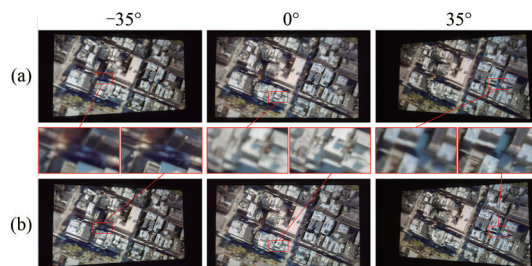


图8 未使用优化方法(a)和采用视觉分辨率增强方法(b)的街道场景的三维光场显示

Fig. 8 3D light field display for a street scene without the proposed visual resolution-enhanced method (a) and with the visual resolution-enhanced method (b)

4 结 论

本文提出了一种基于深度学习提升视觉分辨率的3D光场显示方法。该方法的核心是将弥散斑的交叠区域视为新的视觉像素,并作为额外的信息载体使用。为了将交叠区域转化为可用的视觉像素,构建了一个CNN,从HEIA中获得PEIA。将PEIA加载到LCD上,经过透镜阵列的光学变换和定向扩散膜的扩散作用,为观众提供视觉分辨率增强的3D图像。在实验中,通过利用PEIA和复合透镜阵列,实现了视觉分辨率提高的光场显示。

参 考 文 献:

- [1] YANG L, SANG X Z, YU X B, *et al.* Demonstration of a large-size horizontal light-field display based on the LED panel and the micro-pinhole unit array [J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 140-145.
- [2] YANG S W, SANG X Z, YU X B, *et al.* 162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 33013-33021.
- [3] YANG L, SANG X Z, YU X B, *et al.* Viewing-angle and viewing-resolution enhanced integral imaging based on time-multiplexed lens stitching [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15679-15692.
- [4] LIU B Y, SANG X Z, YU X B, *et al.* Time-multiplexed light field display with 120-degree wide viewing angle [J].

- Optics Express*, 2019, 27(24): 35728-35739.
- [5] WATANABE H, KAWAKITA M, OKAICHI N, *et al.* High-resolution spatial image display with multiple UHD projectors [C]//*Proceedings of the SPIE 10666, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display* 2018. Orlando: SPIE, 2018: 106660Y.
 - [6] OKAICHI N, MIURA M, ARAI J, *et al.* Integral 3D display using multiple LCD panels and multi-image combining optical system [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2805-2817.
 - [7] KIMY, PARK J H, CHOI H, *et al.* Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4334-4343.
 - [8] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 28.
 - [9] PARK S C, PARK M K, KANG M G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, 20(3): 21-36.
 - [10] JAYNES C, RAMAKRISHNAN D. Super-resolution composition in multi-projector displays [C]//*Proceedings of IEEE Int'l Workshop on Projector-Camera Systems*. 2003: 8.
 - [11] HEIDE F, LANMAN D, REDDY D, *et al.* Cascaded displays: spatiotemporal superresolution using offset pixel layers [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 60.
 - [12] DIDYK P, EISEMANN E, RITSCHER T, *et al.* Apparent display resolution enhancement for moving images [M]//HOPPE H. *ACM Siggraph 2010 Papers*. New York: ACM, 2010: 113.
 - [13] HEIDE F, GREGSON J, WETZSTEIN G, *et al.* Compressive multi-mode superresolution display [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14981-14992.
 - [14] KASHTER Y, VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Resolving images by blurring: superresolution method with a scattering mask between the observed objects and the hologram recorder [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 932-939.
 - [15] ZHAN T, XIONG J H, TAN G J, *et al.* Improving near-eye display resolution by polarization multiplexing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15327-15334.
 - [16] GAO X, SANG X Z, ZHANG W L, *et al.* Viewing resolution and viewing angle enhanced tabletop 3D light field display based on voxel superimposition and collimated backlight [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126157.
 - [17] SANG X Z, GAO X, YU X B, *et al.* Interactive floating full-parallax digital three-dimensional light-field display based on wavefront recomposing [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8883-8889.
 - [18] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 63-64.
SONG F J, CHEN X, LIU C. *Introduction to the Design of Modern Optical Systems* [M]. Beijing: Science Press, 2019: 63-64. (in Chinese)

作者简介:



于迅博(1988—),男,辽宁铁岭人,博士,副教授,2016年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事三维显示与新型显示技术方面的研究。E-mail: yuxunbo@126.com



高鑫(1988—),男,甘肃兰州人,博士,讲师,2018年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事三维显示与新型显示技术方面的研究。E-mail: gxbupt@126.com