

基于 LED 屏裸眼三维集成成像显示技术的 空间分辨率研究

李敏, 朴燕*, 邓莉巾

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 基于 LED 屏裸眼三维显示技术, 提出了一种利用时分复用技术提高集成成像系统空间分辨率的方法, 解决了由 LED 屏各个像素点光源发散、相邻像素点间距过大导致的空间分辨率低的问题。通过研究 LED 显示器发光原理, 分析了重构图像空间分辨率的影响因素, 得到成像系统的重构分辨率影响因子, 在 LED 显示阵列不变的情况下, 通过时分复用技术提取单个像素点周围的像素信息, 最终达到提高重构图像空间分辨率的目的。对所提方法进行了理论分析和实验验证, 结果表明该方法提高了 LED 显示器重构图像的空间分辨率, 满足了提高集成成像重构分辨率的要求。

关键词 图像处理; 集成成像; 三维重构; 时分复用; 空间分辨率

中图分类号 TP37 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.061004

Spatial Resolution of Naked Eye Three-Dimensional Integral Imaging Display Based on LED Screen

Li Min, Piao Yan*, Deng Lijin

*College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and
Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Based on naked-eye three-dimensional display technology with LED screen, this paper proposes a method for improving the reconstruction spatial resolution of integral stereo imaging system by using time division multiplexing technology, which solves the problem of low resolution caused by the divergence of the pixel point source of the LED screen and the excessive spacing between the adjacent pixels. By studying the illumination principle of LED display devices, we analyze the factors affecting the spatial resolution of the reconstructed image and the influence factor of reconstruction resolution of imaging system is obtained. Therefore, when the LED display array is unchanged, the time division multiplexing technique can effectively extract the pixel information around a single pixel point and finally improves the spatial resolution of the reconstructed image. The theoretical analysis and experimental verification of this method show that the proposed method effectively improves the resolution of the reconstructed image of LED display and meets the requirements of improving the resolution of integral imaging reconstruction.

Key words image processing; integral imaging; three-dimensional reconstruction; time division multiplexing; spatial resolution

OCIS codes 100.6890; 100.2960

1 引言

集成成像技术是一种利用微透镜阵列来拍摄和

显示物体三维信息的立体显示技术^[1-5], 集成成像被提出以来, 因具有连续视差信息、无需佩戴设备、系统结构简单等特点, 引起了不少三维显示领域的科

收稿日期: 2019-05-28; **修回日期:** 2019-06-04; **录用日期:** 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(60977011)、吉林省科技计划项目(20180201091GX)、吉林省机器视觉智能检测科技创新中心(20180623039TC)

* **E-mail:** piaoyan@cust.edu.cn

研机构的关注^[5-9]。在关于采用集成成像提高重构图像分辨率的研究应用中,通过微扫描技术对场景每次采样得到的图像进行记录和储存,并将这一系列图像的像素按照获取图像的方式和顺序进行交叉重排,再通过进一步处理得到微扫描模式下的重构图像。还有研究利用虚拟弯曲透镜阵列替代传统透镜阵列,将一个附加大孔径透镜放置在典型的集成成像系统中的平面微透镜阵列前面,最终使得附加大孔径透镜与平面微透镜阵列的效果与弯曲透镜阵列效果一致^[10-11]。因为LED是利用发光二极管点阵模块组成的平面式显示屏幕,各个像素点光源发散形成串扰,导致分辨率不高^[12-13]。本文利用焦距为16.5 mm的微透镜阵列在点间距为1.25 mm的LED显示器上进行了集成成像重构的实验,该研究发现利用微透镜阵列重构图像时会出现元素图像模糊、重影等问题。为了解决这些问题,通过理论分析得出在显示阵列不变的情况下,通过提高有限显示区域的信息容量能够提高显示的空间分辨率,因此提出通过亚像素重组来获取相互之间具有不同显示信息的一组元素图像,通过高帧率的LED显示系统实现对多幅低分辨率图像的快速播放,利用分时显示的方式在人眼融合频率内完成序列图像播放,相当于将若干幅图像信息通过一个平面显示,在视觉上增加了像素点间的信息含量,从而提高基于LED显示器集成成像系统的重构图像分辨率。

2 成像系统重构分辨率表征

在集成成像系统中,评价成像系统最主要的性能指标就是空间分辨率,系统空间分辨率的高低直接表征了图像所含的信息量,也影响成像系统的显示效果。由于重构图像的分辨率依赖于单个元素图像,因此下面进行单透镜的成像分辨率分析。图1为单透镜的成像示意图。

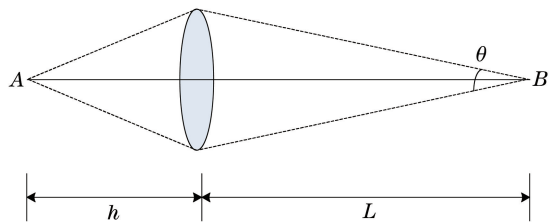


图1 单透镜成像原理

Fig. 1 Single lens imaging schematic

设A是三维物体理想点,A到透镜的间距用 h 表示, B 是A点通过透镜成像的像点, B 到透镜的

间距用 L 表示,成像的视场角为 θ 。由衍射效应可得,点B的光强为

$$J = \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}x\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}y\right), \quad (1)$$

式中: d 为透镜直径; λ 为光的波长; (x, y) 为像平面坐标。假设三维物体还有另一个理想像点 A' 且其对应于像点 B' 。由瑞利判据可得,系统能够分辨两个像点 B 与 B' 之间的最小间距为

$$\alpha = \frac{2\lambda L}{d}. \quad (2)$$

因此,单透镜成像的分辨率为

$$S = \frac{1}{\alpha} = \frac{d}{2\lambda L}. \quad (3)$$

因为单个透镜单独成像,并且在采集时三维物体的某点成像的像点会在透镜后的一点会聚,因此不同元素图像的每一物点经过透镜阵列后所得的光强是微透镜阵列光强之和:

$$J_{\text{total}} = \sum_{i=1}^K \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}x_i\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}y_i\right) = K \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}x\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L}y\right), \quad (4)$$

式中: K 为透镜总个数; i 为透镜数, $i=1, 2, \dots, K$ 。

根据瑞利判据,集成成像系统的成像分辨率为

$$S_{\text{total}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{d}{2\lambda L}. \quad (5)$$

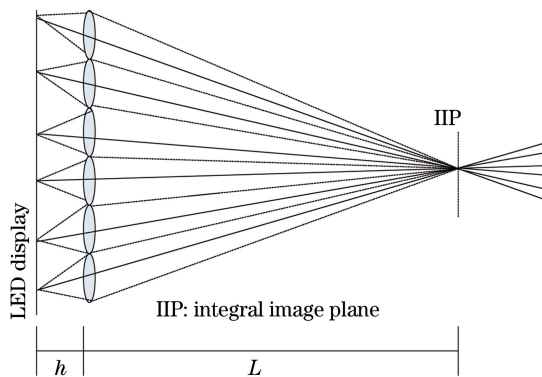


图2 理想集成成像系统的显示器分辨率

Fig. 2 Display resolution of ideal integral imaging system

由图2可知,在理想情况下,基于微透镜阵列的集成成像重构系统的成像分辨率与单个透镜的成像分辨率相同,在显示相同光的时候,空间分辨率只与透镜直径 d 以及像点到透镜的间距有关。实际上,现在的成像系统是数字化系统,所以成像显示器的像素结构对分辨率有影响。设集成成像显示系统中的显示器像素尺寸为 R_d ,根据瑞利判据,显示系统能够分辨两个像点 B 与 B' 之间的最小间距为

$$\alpha_d = \frac{2\lambda L}{d} + \frac{R_d L}{h}. \quad (6)$$

集成成像系统的成像分辨率为

$$S = \frac{1}{\alpha_d} = \frac{1}{\frac{2\lambda L}{d} + \frac{R_d L}{h}} = \frac{hd}{2\lambda Lh + dR_d L}. \quad (7)$$

集成成像系统的重构分辨率影响因子主要有透镜直径 d 、显示器像素尺寸 R_d 以及重构像距 L 。如果显示器像素较小,与之对应的重构像元也较小,则系统重构分辨率由透镜衍射效应和显示器像素决定。如果显示器像素较大,此时透镜的衍射效应可忽略不计,那么重构图像的分辨率影响因子仅是显示器像素尺寸。LED 是利用发光二极管点阵模块组成的平面式显示屏,各个像素点光源发散,相邻像素点间距过大,显示信息密度过小,在集成成像上的应用受到很大限制,所以在显示器固定的情况下,本文通过提高图像所含像素信息量来达到提高重构分辨率的目的。

3 时分复用提高 LED 集成成像重构分辨率方法

提高基于 LED 显示器的集成成像系统中重构图像空间分辨率,最直接的方式是增加显示阵列的点阵密度,但增加点阵密度会导致设备造价大幅提高。由于 LED 显示屏像素点为发光二极管,点阵密度的提高也难以满足集成成像系统对显示屏分辨率的要求。本文提出了一种基于时分复用技术提高集成成像系统的重构图像空间分辨率的方法,主要运用 LED 的换帧频率和刷新频率高的特点来实现时分复用显示。高帧率的 LED 显示系统可以实现对多幅低分辨率图像的快速播放,从而能够达到提高基于时分复用的集成成像系统重构图像分辨率的目的。

亚像素复用技术是指将一幅图像内的单个像素点的亚像素(R、G、B 亚像素)与周围像素点的亚像素重新组合,形成新的像素,重复利用各个像点的 R、G、B 像素信息。根据人眼暂存效应,用高帧率 LED 播放器对通过亚像素复用得到的图像序列进行快速播放,相当于将若干幅图像的信息通过一幅图像显示,从而增加显示平面的信息容量。

假设在三个时间点分别显示三个通过亚像素复用得到的元素图像,使用微透镜对这三个元素图像进行组合,得到最终的重构图像,设原始元素图像阵列的像素点用 $\{R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j}\} (i=1, 2, \dots, m, j=1,$

$2, \dots, n)$ 来表示,仅以第一行像素点为例,对其进行亚像素复用,那么第一时间点显示第一幅元素图像,其像素点为 $\{R_{11}, G_{11}, B_{11}\}, \{R_{12}, G_{12}, B_{12}\}, \{R_{13}, G_{13}, B_{13}\}, \{R_{14}, G_{14}, B_{14}\}, \dots, \{R_{1n}, G_{1n}, B_{1n}\}$; 第二个时间点显示第二幅元素图像信息,其像素点为 $\{G_{11}, B_{11}, R_{12}\}, \{G_{12}, B_{12}, R_{13}\}, \{G_{13}, B_{13}, R_{14}\}, \{G_{14}, B_{14}, R_{15}\}, \dots, \{G_{1n-1}, B_{1n-1}, R_{1n}\}, \{G_{1n}, B_{1n}, R_{1n}\}$; 第三个时间点显示第三幅元素图像信息,其像素点为 $\{B_{11}, R_{12}, G_{12}\}, \{B_{12}, R_{13}, G_{13}\}, \{B_{13}, R_{14}, G_{14}\}, \{B_{14}, R_{15}, G_{15}\}, \dots, \{B_{1n-1}, R_{1n}, G_{1n}\}, \{B_{1n}, R_{1n}, G_{1n}\}$ 。

通过上述分析可知,各个像素点的亚像素分量被复用后,每个像素点的基本点都在不同的时刻被部分复用,信息点的重心落在每个像点的 R、G、B 三个亚像素点的几何中心。然后将全部时刻的图像在人眼暂留时间内进行显示,就可以使人眼看到一幅完整的重构图像。

下面将这一方法扩展到整个空间。设 $f_1(x)$ 为一幅元素图像,该图像的像素点是 m 行 n 列的矩阵空间,矩阵元素为 $x_{i,j} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 。将矩阵元素 $x_{i,j}$ 扩展为 RGB 三通道形式,即 $R_{i,j}G_{i,j}B_{i,j} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, 所以 $f_1(x)$ 可表示为

$$f_1(x) = x_{i,j} = R_{i,j}G_{i,j}B_{i,j}. \quad (8)$$

第一次亚像素复用形式:用元素图像 $f_1(x)$ 中的任一像素点右邻像素点的 $R_{i,j+1}$ 代替这一像素点的 $R_{i,j}$, 新的图像帧的像素点用 $R_{i,j+1}G_{i,j}B_{i,j}$ 表示, 该图像帧用 $f_2(x)$ 表示:

$$f_2(x) = x_{i,j} = R_{i,j+1}G_{i,j}B_{i,j}. \quad (9)$$

第二次亚像素复用形式:用元素图像 $f_1(x)$ 中的任一像素点右邻像素点的 $R_{i,j+1}G_{i,j+1}$ 代替这一像素点的 $R_{i,j}G_{i,j}$, 新的图像帧的像素点用 $R_{i,j+1}G_{i,j+1}B_{i,j}$ 表示, 该图像帧用 $f_3(x)$ 表示:

$$f_3(x) = x_{i,j} = R_{i,j+1}G_{i,j+1}B_{i,j}. \quad (10)$$

第三次亚像素复用形式:用元素图像 $f_1(x)$ 中的任一像素点下邻像素点的 $R_{i+1,j}$ 代替这一像素点的 $R_{i,j}$, 新的图像帧的像素点用 $R_{i+1,j}G_{i,j}B_{i,j}$ 表示, 该图像帧用 $f_4(x)$ 表示:

$$f_4(x) = x_{i,j} = R_{i+1,j}G_{i,j}B_{i,j}. \quad (11)$$

第四次亚像素复用形式:用元素图像 $f_1(x)$ 中的任一像素点下邻像素点的 $R_{i+1,j}G_{i+1,j}$ 代替这一像素点的 $R_{i,j}G_{i,j}$, 新的图像帧的像素点用 $R_{i+1,j}G_{i+1,j}B_{i,j}$ 表示, 该图像帧用 $f_5(x)$ 表示:

$$f_5(x) = x_{i,j} = R_{i+1,j}G_{i+1,j}B_{i,j}. \quad (12)$$

如图 3 所示,仅以第一行、第一列元素列举亚像素复用情况:首先进行横向像素点的复用,原图显示第 1,4,7,10,⋯点的信息,当进行第一次亚像素复用时得到的图像显示第 2,5,8,11,⋯点的信息,当进行第二次亚像素复用时得到的图像显示第 3,6,9,⋯点的信息;下面进行纵向像素点的复用,当进行

第三次亚像素复用时得到的图像显示第 14,17,20,⋯点的信息,当进行第四次亚像素复用时得到的图像显示第 15,18,⋯点的信息。通过这种方式对像素基本点进行分时复用,其空间分布形态如图 4 所示,可以保证形成的信息点不重叠,使原来有限的显示阵列显示更多的信息,显示画面更加清晰稳定。



图 3 亚像素复用过程示意图

Fig. 3 Diagram of sub-pixel multiplexing process

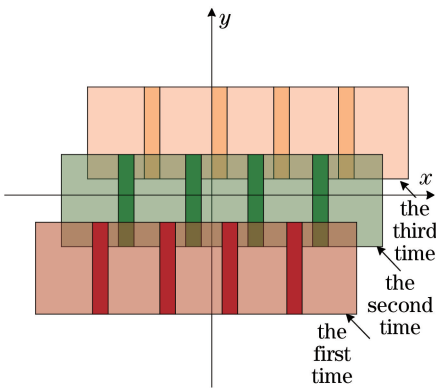


图 4 三个时刻元素图像的空间形态

Fig. 4 Spatial form of element image at three time

通过以上过程得到新的元素图像帧,将原图像帧与得到的新图像帧通过高帧率 LED 大屏幕播放,分时显示原图像帧与通过亚像素复用得到的图像帧。由于各元素图像相对应的位置具有不同的像素点,在时分复用方式下将会在视觉上增加两像素点间的像素信息,然后再进行光学重构,从而提高基于

LED 大屏幕集成成像的重构图像分辨率。

4 仿真实验验证

本文首先进行仿真,为了避免纯光学拍摄过程中的衍射、像差以及感光器件分辨率限制等问题,采用 3DS MAX 软件创建模型和相机,两者间距为 50 mm,每个单元像有 16×16 个像素。使用 MATLAB 2014a 平台进行了元素图像的 RGB 重组,然后进行光学实验。光学实验平台包括 LED 显示器、微透镜阵列和显示支撑滑台。其中 LED 显示器参数为:像素点为 384×384 , $R_d = 1.25$ mm。第一组微透镜阵列参数为:单透镜直径 $d = 20$ mm,透镜焦距 $f = 16.5$ mm,透镜无间隔相邻放置,透镜阵列整体个数为 24×24 ,透镜材质为亚克力(光学 PMMA),透光率为 93%。第二组微透镜阵列参数为:单透镜直径 $d = 10$ mm,透镜焦距 $f = 7$ mm,透镜无间隔相邻放置,透镜阵列整体个数为 48×48 ,透镜材质为亚克力(光学 PMMA),透光率为 93%。

图 5 所示为仿真所用的光学实验平台。

第一组仿真采用骰子模型,重点观察重构图像细节处的分辨率。首先将微透镜阵列置于 LED 大屏幕前方,通过滑台支撑,将采集到的元素图像通过 LED 大屏幕进行显示,并将微透镜阵列置于透镜焦

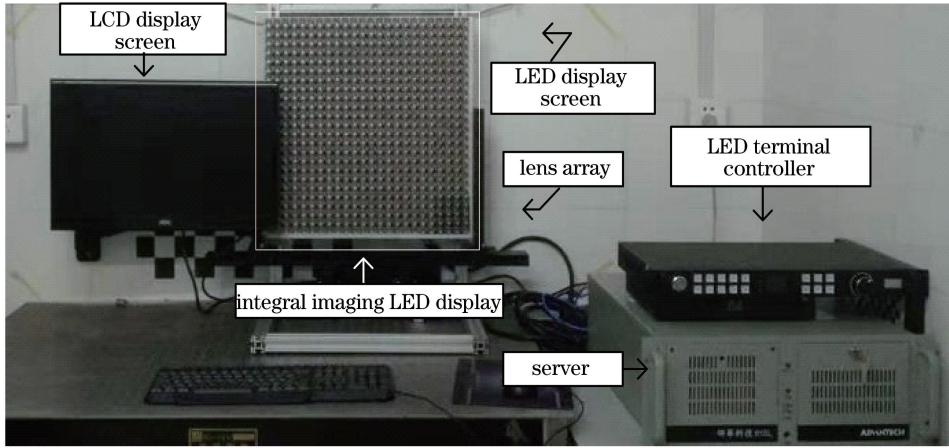


图 5 光学实验平台

Fig. 5 Optical experiment platform

分析图 6 中的单幅元素图像重构后得到的三维图像,发现存在边缘模糊、重影,分辨率较低,骰子轮廓不清晰,成像效果较差等现象。

下面对通过高帧速 LED 大屏幕亚像素重组得

距平面后,将每个微透镜与所对应元素图像对准后固定滑台。从不同视角对三维重构图像进行拍摄,图 6 所示为单幅图像重构得到的三维图像,其中图 6(a)~(c)分别为左 10° 视角、 0° 视角、右 10° 视角的三维重构图像。

到的图像帧进行播放,帧速率为 120 frame/s,并利用微透镜阵列进行光学重构。图 7 所示为时分复用方法重构得到的三维图像,其中图 7(a)~(c)分别为左 10° 视角、 0° 视角、右 10° 视角的三维重构图。

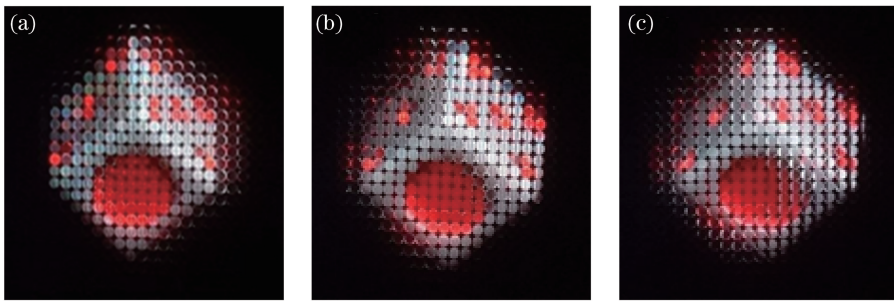


图 6 单幅元素图像重构的三维图像。(a)左 10° 视角;(b) 0° 视角;(c)右 10° 视角

Fig. 6 Reconstructed 3D images of single element image. (a) 10° left view; (b) 0° view; (c) 10° right view

通过对比图 7 得出,时分复用方法重构的图像较单幅图像而言边缘清晰,图像三维立体效果明显,细节处分辨率较高,提高了重构图像分辨率。

第二组仿真采用字母模型,重点观察重构图像的轮廓分辨率。更换微透镜阵列板后重复上组仿真过程。图 8 所示为单幅图像重构得到的二维图像,其中图 8(a)~(c)分别为左 10° 视角、 0° 视角、右 10° 视角的二维重构图。

分析图 8 后发现,单幅元素图像重构后得到的红色字母 A 边缘模糊且有重影,紫色圆环边缘发

散、模糊,重构模型分辨率较低,骰子轮廓不清晰,成像效果较差。

下面重复上组光学重构过程。图 9 所示为采用时分复用方法重构得到的二维图像,其中图 9(a)~(c)分别为左 10° 视角、 0° 视角、右 10° 视角的二维重构图。

主观上来看,通过时分复用方法重构的图像字母 A 边缘较细,轮廓更加清晰,紫色圆环成像清楚,边缘整齐,较单幅元素图像重构图像而言边缘更加清晰,图像三维立体效果明显,分辨率较高,提高了重构图像的分辨率。

像进行 RGB 像素重新组合得到新的元素图像、再通

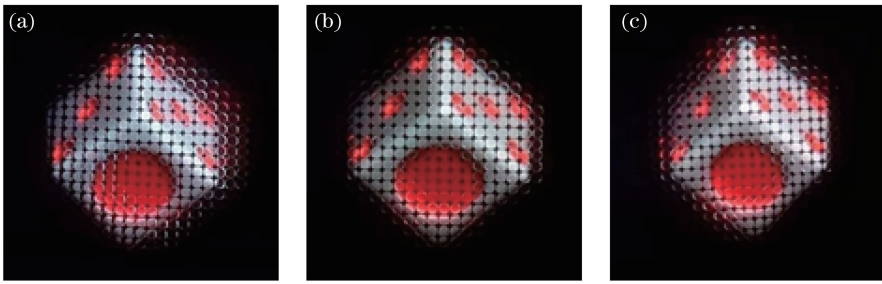


图7 采用时分复用方法得到的重构图像。(a)左 10° 视角;(b) 0° 视角;(c)右 10° 视角
Fig. 7 Reconstruction images obtained by time division multiplexing method. (a) 10° left view;
(b) 0° view; (c) 10° right view

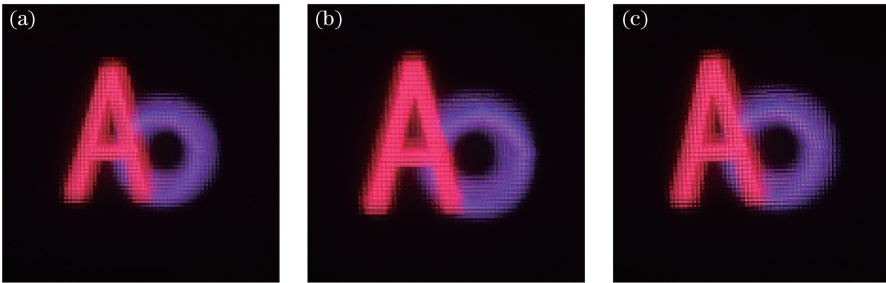


图8 单幅元素图像重构的图像。(a)左 10° 视角;(b) 0° 视角;(c)右 10° 视角
Fig. 8 Reconstruction image of single element image. (a) 10° left view; (b) 0° view; (c) 10° right view

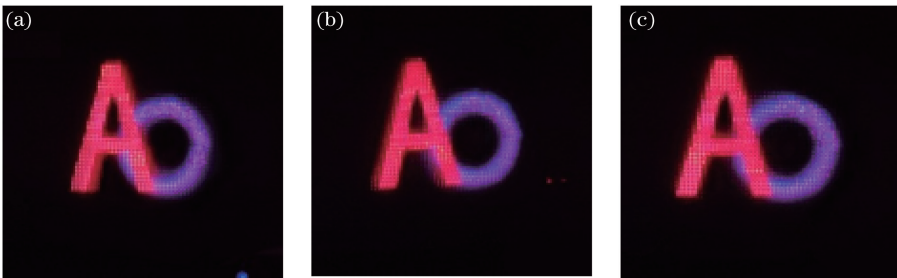


图9 时分复用方法重构图像。(a)左 10° 视角;(b) 0° 视角;(c)右 10° 视角
Fig. 9 Reconstruction images obtained by time division multiplexing method. (a) 10° left view;
(b) 0° view; (c) 10° right view

过快速扫描 LED 大屏幕来增加像素点周围像素信息以提高分辨率的方法是可行的,仿真中得到的重构图像边缘轮廓清晰,形状完整,成像分辨率较高,立体效果明显。

5 结 论

对基于 LED 显示器提高集成成像系统重构图像的空间分辨率进行了研究。LED 显示器像素点的特性导致显示分辨率低,考虑通过时分复用的方式提高有限像素点周围的像素信息,通过重组元素图像 RGB 得到更加丰富的像素信息的元素图像,再利用 LED 显示屏的高帧率投放功能快速投放到 LED 集成成像系统后进行三维信息重构。对仿真结果进行分

析总结:在使用原始的单幅图像进行重构时,重构图像颗粒感明显,三维效果较差;而使用所提方法进行重构时,在视觉上增加了像素信息,重构图像更加清晰,图像亮度增强,颗粒感明显降低,提高了三维立体效果。这种方法在不改变 LED 显示器硬件设备的条件下,提高了重构图像的质量,节约了硬件成本,在 LED 集成成像的推广上有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Piao Y, Wang Y. Integral stereo imaging technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 11-20.
朴燕, 王宇. 集成成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 11-20.

- [2] Xing L Y. Research on visual quality enhancement of reconstructed 3D images in integral imaging [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 6-18.
邢陆雁. 集成成像中提高三维重构图像品质的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 6-18.
- [3] Sang X Z, Yu X B, Chen D, et al. Research progress on three-dimensional optical display technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050006.
桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050006.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zhang J, Zhou L Q, Zhang B, et al. Study on reconstruction resolution of integral imaging technique based on ray-tracing method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1108004.
张娟, 周立秋, 张勃, 等. 基于光线追迹的集成成像技术重建分辨率研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1108004.
- [7] Xu J. Research on integral imaging and light field imaging based on microlens array [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2011: 1-15.
徐晶. 基于微透镜阵列的集成成像和光场成像研究 [D]. 北京: 科学技术大学, 2011: 1-15.
- [8] Yang C. Reconstruction quality improvement in integral imaging and integral holography [D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 13-22.
杨琛. 提高集成成像与集成全息系统成像质量方法的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 13-22.
- [9] 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.
- [10] Shen X. Research on the enhancement methods of integral imaging spatial resolution [D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 17-24.
申欣. 三维集成成像空间分辨率提高方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 17-24.
- [11] Shen X, Wang X R, Xu Y, et al. Integral imaging characteristics based on the virtually curved lens-array [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2011, 38(5): 129-134.
申欣, 王晓蕊, 徐茵, 等. 虚拟弯曲透镜阵列的集成成像特性 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(5): 129-134.
- [12] Xiang J Y, Zhao Y M, Fan G H. Analysis and study of subpixel multiplexing technique for LED display [J]. Advanced Display, 2012(9): 163-166.
向健勇, 赵园美, 樊光辉. LED显示屏亚像素复用技术分析与研究 [J]. 现代显示, 2012(9): 163-166.
- [13] Zhang Y, Zhang B M. Super-resolution color array display based on pixel reorganization [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 28(2): 145-148.
张毅, 张保民. 基于像素重组的彩色阵列超分辨率显示技术 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 145-148.