

# 水平光场三维显示单目聚焦特性研究

周欣鑫, 苏 忱, 李海峰, 刘 旭

浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 水平光场三维(3D)显示可以在保证较好立体显示效果的同时,显著压缩需处理的海量光线信息,因此是一种重要的三维显示方法。由于缺少竖直方向的光场变化,水平光场的显示清晰度表现力与单目聚焦能力都与理想的光场形式不同。基于扫描型光场显示技术,分析了水平光场的点扩展函数(PSF);基于人眼和相机的自动聚焦原理,对不同显示参数下所重构的水平光场进行聚焦仿真,得出光线横向散射角以及每圈更新图像数对水平光场单目聚焦能力的影响;通过扫描型水平光场显示样机对所得结论进行验证。结果表明,水平光场的最大可聚焦高度随光线横向散射角的增加而减小,随每圈更新图像数的增加而增加。该分析方法及结论可以为单目聚焦水平光场显示系统提供设计依据。

**关键词** 测量; 三维显示; 水平光场; 单目聚焦; 光场点扩展函数

**中图分类号** TN27 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0912001

## Research on Monocular Focusing Characteristic for Horizontal Light Field Three-Dimensional Display

Zhou Xinxin, Su Chen, Li Haifeng, Liu Xu

*College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

**Abstract** Horizontal light field three-dimensional (3D) display is an important 3D display method, it can achieve fairly good 3D display effect when remarkably compressing the mass information of light rays that need to be processed. As there is no change in vertical light field, its expressive force of display definition and the ability of monocular focusing for horizontal light field are both different from the ideal light field. The point spread function (PSF) of the horizontal light field is analyzed based on the scanning light field display. Based on the auto-focusing principle of human eye and camera, the horizontal light field that is reconstructed under different display parameters is focusing simulated, which shows that the effect of horizontal scattering angle of light and the image number per screen spinning circle of the projection on the monocular focusing ability in horizontal light field is obtained. The conclusion is verified by using a scanning horizontal light field display prototype. And the results show that the maximum focusing height of horizontal light field declines with the increasing of horizontal diffusing angle of light ray, and it goes up with the increasing of the image number per screen spinning circle of the projection. The proposed analytical method and the conclusion can provide the design consideration for the horizontal light field display system of monocular focusing.

**Key words** measurement; three-dimensional display; horizontal light field; monocular focusing; light field point spread function

**OCIS codes** 120.2040; 100.3010; 100.6890

## 1 引 言

自 19 世纪中期 Wheatstone 首次针对双目立体视觉进行研究并构建立体镜以来,随着科学技术的进步

**收稿日期:** 2017-04-11; **收到修改稿日期:** 2017-05-08

**基金项目:** 国家 863 计划(2015AA015904)、国家自然科学基金(61575175)

**作者简介:** 周欣鑫(1992—),女,硕士研究生,主要从事三维显示方面的研究。E-mail: zxx1001@zju.edu.cn

**导师简介:** 刘 旭(1963—),男,博士,教授,主要从事三维显示、超分辨显微和光电薄膜等方面的研究。

E-mail: liuxu@zju.edu.cn(通信联系人)

以及电影游戏娱乐市场的推动,三维显示技术得到了持续的关注和快速的发展<sup>[1]</sup>。国内外多家研究小组已经基于不同的技术实现了裸眼三维显示,技术形式可分为:全息三维显示<sup>[2]</sup>、集成成像三维显示<sup>[3]</sup>、体三维显示<sup>[4]</sup>、光场三维显示<sup>[5]</sup>等。其中,光场三维显示通过投影技术重构物体表面的光线分布,可以实现密集视点、高分辨率、动态、彩色的三维显示,并具有单目聚焦的效果,可以消除立体显示的视觉疲劳,被认为是一种较为理想的三维显示技术<sup>[6]</sup>。光场显示需要再现物体发光光线的空间位置和方向,显示需要的信息量大,光学再现复杂,为了达到较理想的图像质量,一般通过对全光场数据进行采样与压缩减少数据量,简化光学系统<sup>[7]</sup>,如 Jones A 等<sup>[8]</sup>提出的 360°水平光场显示,Xia X X 等<sup>[9]</sup>提出的悬浮型 360°光场显示,都是压缩了竖直方向的光场信息,仅再现物体在水平方向的光场,由于人的双眼是水平生长的,所以在正常观看状态下,这种水平光场三维显示可以实现很好的三维效果。但是由于缺少竖直方向的光场变化,水平光场的单目聚焦效果与全光场存在差异。无论从观看效果还是从舒适度出发,单目聚焦都是裸眼三维显示的重要线索,但还没有细致分析水平光场单目聚焦能力的文献。本文基于悬浮型 360°光场显示系统,对水平光场三维显示系统的单目聚焦特性进行理论分析,建立水平光场点扩展函数模型。通过仿真计算得到不同参数下显示系统的单目聚焦能力,并通过实际水平光场显示系统和具有自动聚焦(AF)功能的单反相机对仿真结果进行实验验证,结果表明所提出的分析方法可以为水平光场显示系统提供设计依据。

## 2 水平光场三维显示原理及水平光场特性

### 2.1 水平光场三维显示原理

主要基于悬浮型 360°光场扫描显示系统<sup>[10]</sup>进行分析,所做的相关讨论对于具有较高角分辨率的其他形式水平光场显示系统同样适用。

扫描型水平光场三维显示系统一般由高速投影机、定向散射屏、旋转机构以及同步机构组成,如图 1(a)所示。其中投影机基于数字微镜器件(DMD)芯片,可以实现超高的投影帧频;定向散射屏能够偏折光线并在竖直方向上发生较大散射而在水平方向散射很小( $\sigma_x$  很小, $\sigma_y$  较大),光学特性类似于柱面光栅。定向散射屏调控光线的方向,同步更新的投影图像加载了光线内容信息,因此构建重构点和投影点之间正确的映射关系是光场重构的关键。

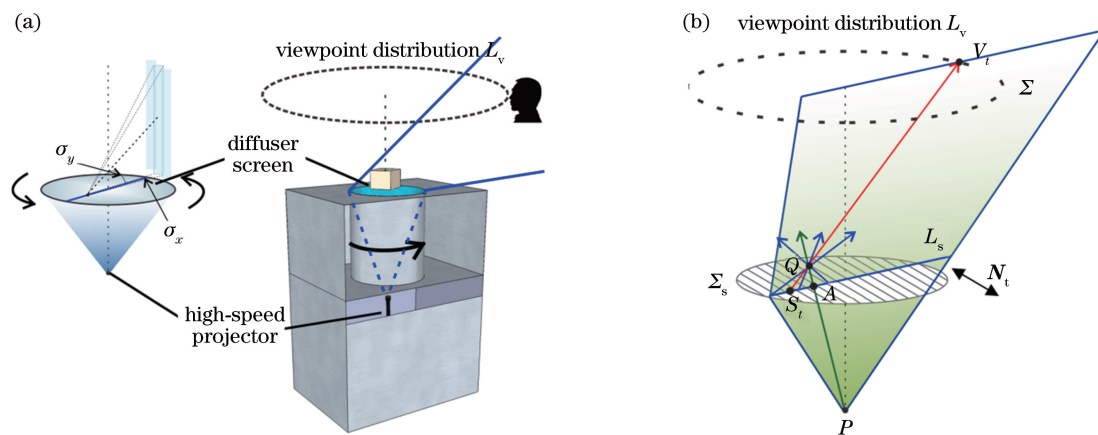


图 1 扫描型水平光场三维显示原理图。(a)系统示意图;(b)重构空间点与屏幕投影点之间的映射关系

Fig. 1 Principle of scanning horizontal light field 3D display. (a) Diagram of the system; (b) mapping relationship between reconstruction spatial point and screen projected point

如图 1(b)所示,向量  $N_t$  为定向散射屏光栅方向,表征屏幕在旋转过程中  $t$  时刻的状态。已知重构空间点  $Q$ 、视点轨迹  $L_v$ 、投影机  $P$ 、屏幕平面  $\Sigma_s$ ,连接  $PQ$  与屏幕相交于点  $A$ ,设  $\Sigma$  为经过点  $A$  并与  $N_t$  垂直的平面,平面  $\Sigma$  与屏幕  $\Sigma_s$  交于直线  $L_s$ ,受制于屏幕的定向散射特性,在  $t$  时刻, $L_s$  上的点发出的光线将在平面  $\Sigma$  内发生纵向散射,因此  $L_s$  上的点都有光线通过  $Q$  点参与光场重构。但在视点轨迹  $L_v$  确定的情况下, $Q$  点光场只有一条光线  $QV_t$  与视点轨迹  $L_v$  相交,交点为  $V_t$  点。为保证正确的透视关系,只需要找到该光线与

屏幕  $\Sigma_s$  的交点  $S_t$ , 把  $Q$  点信息加载到点  $S_t$  上即可。以上过程可表示为

$$A \in \{A | A = \overline{PQ} \cap \Sigma_s\}, \quad (1)$$

$$L_s \in \{L | L \perp N_t, L \in \Sigma_s, A \in L\}, \quad (2)$$

$$\Sigma_t \in \{\Sigma | \Sigma \supseteq L_s, P \in \Sigma\}, \quad (3)$$

$$V_t \in \{V | V = \Sigma_t \cap L_v\}, \quad (4)$$

$$S_t \in \{S | S = \overline{V_tQ} \cap \Sigma_s\}. \quad (5)$$

对于确定的系统以及视点轨迹, 任意时刻  $t$  都会对应一组从  $Q$  点到  $S$  点的映射。若屏幕旋转一周可以更新投影图像  $M$  幅, 则屏幕投影点集合可表示成

$$S \in \{S_1, S_2, \dots, S_M\} = \{S | S = f_{\text{mapping}}(Q, N_t, L_v, Q_p), t \in [1, M], t \in N\}, \quad (6)$$

式中,  $f_{\text{mapping}}()$  表示(1)~(5)式的映射过程。这一过程基于最理想的光线传播形式, 但实际显示时会受到系统各种硬件参数的影响, 如光线的横向散射角  $\sigma_x$  和屏幕旋转一圈所更新的图像数  $M$ , 它们会导致显示分辨率或者角分辨率发生变化。需要指出的是, 投影机到屏幕的垂直距离  $H_p$  确定的情况下, 光线的横向散射角  $\sigma_x$  由投影机光瞳半径  $R_p$  和屏幕横向散射角  $\alpha_x$  决定。如图 2 所示,  $\sigma_x$  与  $R_p$ 、 $\alpha_x$  之间的关系可表示为

$$\sigma_x = \alpha_x + \beta_x = \alpha_x + \arctan \frac{R_p}{H_p}. \quad (7)$$

考虑到实际系统参数以及水平光场特殊的空间映射关系的影响, 将通过引入水平光场点扩展函数对重构过程中系统产生的所有光线集合进行分析。

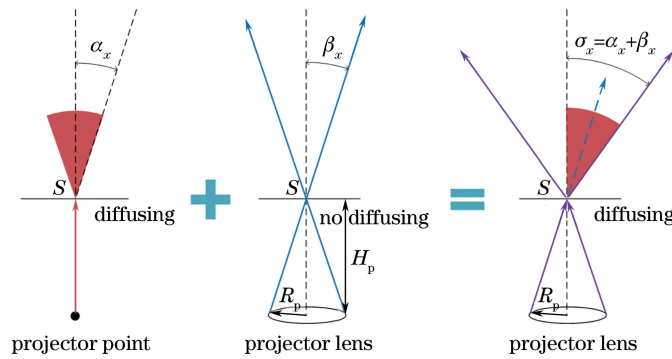


图 2 实际系统中的入射光线横向散射角由屏幕横向散射角和投影机光瞳决定

Fig. 2 Horizontal diffusing angle of the incident light in real system depends on the screen's horizontal diffusing angle and the pupil of the projector

## 2.2 水平光场点扩展函数

根据 2.1 节所讨论的水平光场重构过程, 如图 3(a) 所示, 对于任一重构点  $Q$ , 可求出与其对应的屏幕投影点集合  $\{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ , 其中每个屏幕点  $S_i$  发出的光线  $\xi(S_i)$  将受到横向及纵向散射角 ( $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ ) 的限制。为重构  $Q$  所产生的光线集合可表示为

$$E(Q) = \{\xi(S_i) | |\theta_{X[\xi(S_i), S_iQ]}| \leq \sigma_x, |\theta_{Y[\xi(S_i), S_iQ]}| \leq \sigma_y, 1 \leq i \leq M, i \in N\}, \quad (8)$$

式中  $\theta_{X(a,b)}$  表示光线  $a$  和光线  $b$  在水平面内的夹角,  $\theta_{Y(a,b)}$  表示光线在竖直面内的夹角。由于重构的水平光场只针对视点轨迹透视才是正确的, 所以在视点轨迹处还要对光场进行适当的限制。如图 3(b) 所示, 在视点轨迹上的某点邻域放置圆形来采集光瞳  $\Gamma_v$ , 模拟人眼或相机, 可以忽略落在  $\Gamma_v$  之外的光线, 光线集合  $E(Q)$  得以简化成  $E'(Q)$ 。仿照成像系统的点扩展函数, 垂直于光瞳光轴方向在不同位置设置采样面  $\Sigma_d$  ( $d$  表示采样面与光瞳光轴交点到屏幕的高度),  $E'(Q)$  与这些采样面的交点构成了重构水平光场在各采样面的点扩展函数  $I(u, v)$ , 可以表示为

$$I(u, v) |_{Q, \Sigma_d} = E'(Q) \cap \Sigma_d, \quad (9)$$

式中

$$E'(Q) = \{\xi(S_i) | \xi(S_i) \in E(Q), \xi(S_i) \cap \Gamma_v \neq \emptyset\}. \quad (10)$$

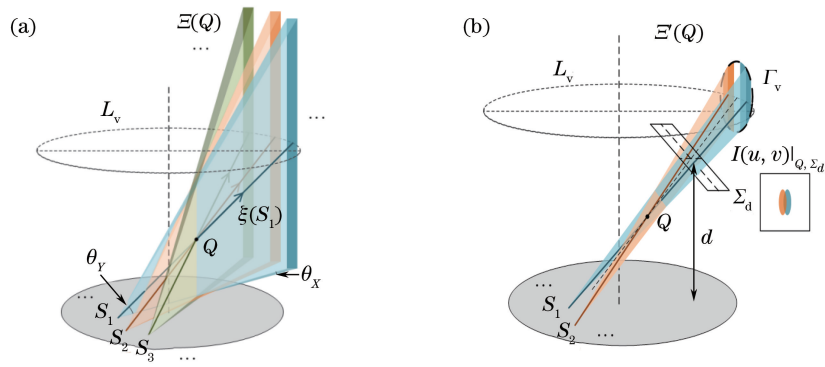


图 3 水平光场的表示。(a) 散射光线集合  $\Xi(Q)$ ; (b) 简化的散射光线集合  $\Xi'(Q)$  及采样面的点扩展函数  
 Fig. 3 Expression of horizontal light field. (a) Diffusing rays set  $\Xi(Q)$ ; (b) simplified diffusing rays set  $\Xi'(Q)$  and the point spread function of the sampling plane

严格来说,系统显示区域中每个空间点都对应着一个独特的光场点扩展函数,复杂场景的水平光场重构结果为理想光场与这些点扩展函数进行卷积。不同采样面的点扩展函数影响着所重构水平光场的清晰度和单目聚焦能力。图 4 给出了水平光场的典型例子,图 4(a)中光线发生横向散射,图 4(b)中光线发生纵向散射。在这个例子中,受制于屏幕的横向散射角,有 5 个屏幕点(蓝色表示)发出的定向散射光线可以进入采集光瞳,不同采样面内所表现的点扩展函数(弥散斑)如图 4(c)所示。可以看出,屏幕点在采样面处的弥散斑会表现成椭圆形,并且随着采样面远离屏幕,弥散斑的高度  $h_{diff}$  不断增大,弥散斑的宽度  $w_{diff}$  则先减小后增大(当采样面经过重构点时  $w_{diff}$  最小),弥散斑各点的幅值表示该点的光线密度,这将在下一节继续讨论。影响弥散斑形状或者点扩展函数的参数主要包括:光线的横向散射角  $\sigma_x$  和每圈更新图像数  $M$ 。随着  $\sigma_x$  的增大,越来越多屏幕投影点被光瞳  $\Gamma_v$  采集到,各采样面的点扩展函数展宽( $w_{diff}$  增大),导致相邻空间点的光场彼此叠加,造成场景模糊;随着  $M$  的减小,场景角分辨率下降,造成场景重影或者运动视差不平滑。因此,为了让水平光场系统的显示效果更好,在系统构建过程中需要保证尽量小的光线横向散射角  $\sigma_x$  (即较小的屏幕横向散射角和较小的投影机光瞳直径),以及尽量大的每圈更新图像数  $M$ 。

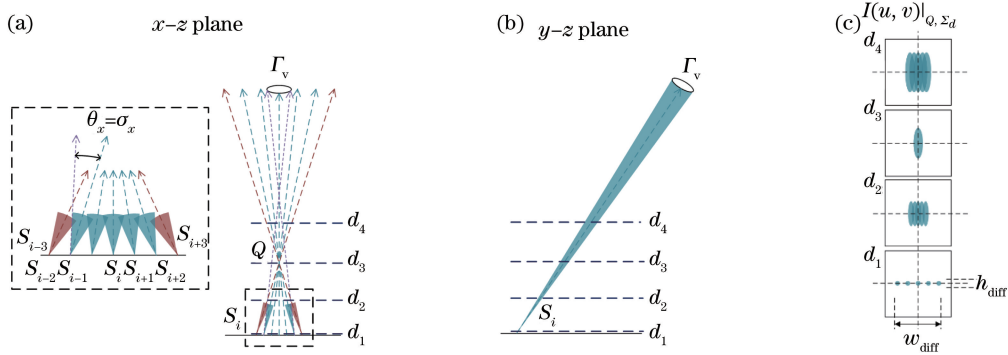


图 4 不同高度采样面下水平光场的点扩展函数。(a) 光线在  $x-z$  平面内的传播形式;  
 (b) 光线在  $y-z$  平面内的传播形式;(c) 不同采样面下的点扩展函数示意图  
 Fig. 4 Point spread function of the horizontal light field in sampling planes with different heights.  
 (a) Propagation mode of light rays in  $x-z$  plane; (b) propagation mode of light rays in  $y-z$  plane;  
 (c) schematic diagram of point spread function in different sampling planes

### 3 水平光场单目聚焦的仿真、实验与分析

#### 3.1 显示系统

水平光场显示系统样机如图 5 所示,系统相关参数如表 1 所示,其中定向散射屏的横向散射角以及高速投影机的光瞳尺寸是可调整的。使用 Canon 5D Mark II 单反相机对该光场显示系统的单目聚焦能力进行

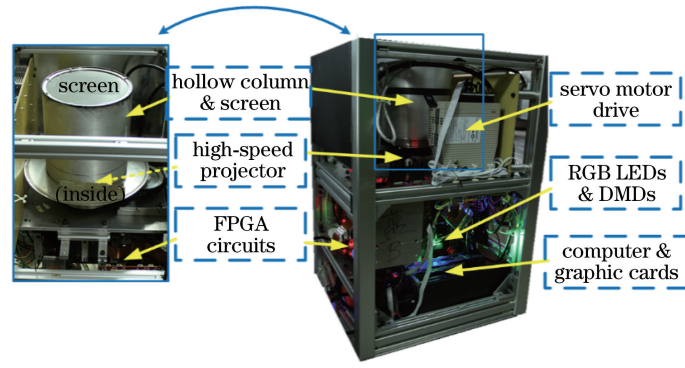


图 5 水平光场显示系统样机

Fig. 5 Display system prototype of horizontal light field

评估,相机的相关设置参数如表 2 所示。其中相机距离屏幕中心水平距离为 400 mm,竖直距离为 530 mm,显示系统的投影图像按照该相机所在位置生成。

表 1 显示系统参数

Table 1 Parameters of the display system

Parameter	Value
Frame rate of high-speed projector	18000 frame · s <sup>-1</sup>
Distance between projector and screen	$H_p = 400$ mm
Resolution of the projector	1024 pixel × 768 pixel
Diameter of the screen	$\Phi$ 250 mm
Diffusing angle of the screen	60° vertical/0°–1° horizontal
Rotating speed of the screen	25 r · s <sup>-1</sup>
Number of images per circle	600 /r

表 2 相机参数

Table 2 Parameters of the camera

Parameter	Value
Focal distance	105 mm
$F$ number	4.0
Camera position	$R_c = 400$ mm, $H_c = 530$ mm
Exposure time	1/20 s
Autofocus mode	AI SERVO

### 3.2 单目聚焦仿真

参考实际显示系统参数设置,对水平光场实现过程进行光线追迹仿真,得到不同采样面处的点扩展函数,并主要讨论光线的横向散射角  $\sigma_x$  和每圈更新图像数  $M$  对不同高度  $h_Q$  重构点的水平光场单目聚焦的影响。

图 6 给出了对于  $h_Q = 30$  mm 的重构点,当  $\sigma_x$  和  $M$  取不同值时,不同采样面所对应的点扩展函数在宽度  $w_{diff}$  方向上的幅值分布(所有图中的纵坐标幅值均已进行统一的归一化处理),图 6(a)中  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 600$ ;图 6(b)中  $\sigma_x = 0.5^\circ, M = 600$ ;图 6(c)中  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 300$ ;图 6(d)中  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 1200$ 。由图 6 可以看出:幅值最高的采样面位置或者在屏幕处( $d = 0$ )或者在重构点处( $d = h_Q$ ); $\sigma_x$  越大,屏幕处的幅值越高; $M$  越大,重构点处的幅值越高。由于点扩展函数的幅值表征重构场景的亮度,因此可以说明水平光场重构场景在不同  $\sigma_x$  和  $M$  下具有不同的亮度分布形式。

就单目聚焦过程的基本原理,人眼与相机会倾向于聚焦在对比度最高的位置,对于细节表现力不强的场景,人眼与相机对亮度更为敏感,因此单目聚焦可近似为寻找亮度最大的位置。按照此单目聚焦策略:图 6(a)将聚焦在重构点处,图 6(b)将聚焦在屏幕处,图 6(c)将处于临界状态,图 6(d)将聚焦在重构点处。进一步地,仿真计算了不同  $\sigma_x$  和  $M$  下的可单目聚焦的最大高度  $h_{max}$ ,如图 7 所示。

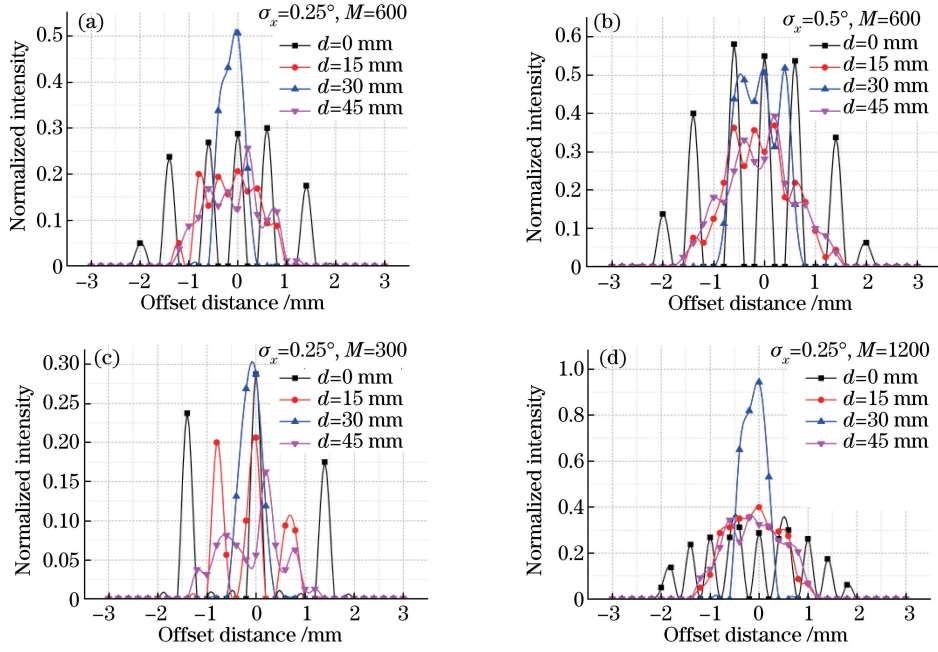


图 6 对于  $h_Q = 30$  mm 重构点, 当  $\sigma_x$  和  $M$  取不同值时, 不同采样面所对应的点扩展函数在宽度  $w_{diff}$  方向上的能量分布。

(a)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 600$ ; (b)  $\sigma_x = 0.5^\circ, M = 600$ ; (c)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 300$ ; (d)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 1200$

Fig. 6 For the reconstructed point  $h_Q = 30$  mm, the energy distribution in  $w_{diff}$  direction of the point spread function in different sampling planes.

(a)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 600$ ; (b)  $\sigma_x = 0.5^\circ, M = 600$ ; (c)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 300$ ;

(d)  $\sigma_x = 0.25^\circ, M = 1200$

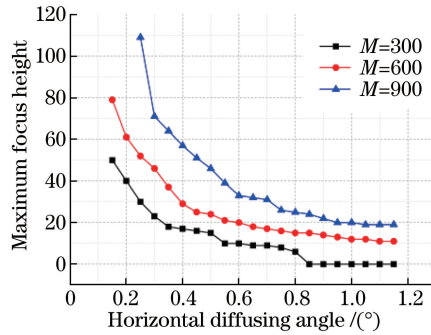


图 7 不同  $\sigma_x$  和  $M$  下的可单目聚焦的最大高度  $h_{max}$  的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of the maximum height of monocular focusing under different  $\sigma_x$  and  $M$

### 3.3 实验结果

在实际显示样机中对部分仿真结果进行验证。使用了两种具有不同横向散射角的屏幕(横向散射角  $\alpha_x$  分别为  $0^\circ$  和  $0.5^\circ$ ), 并搭建了 2 种光瞳规格的投影机(半径  $R_p$  分别为 2 mm 和 4 mm), 由(6)式可知  $\beta_x$  为  $0.28^\circ$  或  $0.56^\circ$ ; 由于实际系统每圈最多只能更新 600 幅图像, 因此  $M$  选取了 300 与 600 两种参数。实验中采用的参数组合为 A:  $\sigma_x = 0.28^\circ (\alpha_x = 0^\circ, \beta_x = 0.28^\circ), M = 600$ ; B:  $\sigma_x = 0.5^\circ (\alpha_x = 0.5^\circ, \beta_x = 0^\circ), M = 300$ ; C:  $\sigma_x = 0.56^\circ (\alpha_x = 0^\circ, \beta_x = 0.56^\circ), M = 600$ 。显示两条竖线, 一条位于左侧的  $h = 0$  mm 位置, 一条位于右侧的  $h > 0$  位置(具体  $h$  值在图 8 中标明), 并使用 Canon 5D Mark II 单反相机分别对空中和屏幕上的直线进行拍摄。

图 8(a) 中, 在  $\sigma_x = 0.28^\circ, M = 600$  参数下重构  $h = 40$  mm 的竖线, 使用相机(ISO 500)对重构线进行自动聚焦拍摄得到右上图像, 对屏幕线进行自动聚焦拍摄得到右下图像。左侧图像表示  $h = 40$  mm 竖线的水平光场在高度为  $d = 40$  mm 和 0 mm 的采样面上的光强分布。由前文讨论可知, 由于该情况下  $d = 40$  mm 处的光强更大, 因此相机将倾向于聚焦于这一位置, 即表示  $\sigma_x = 0.28^\circ, M = 600$  参数下高度为 40 mm 的重构线是可以被单目聚焦到的。

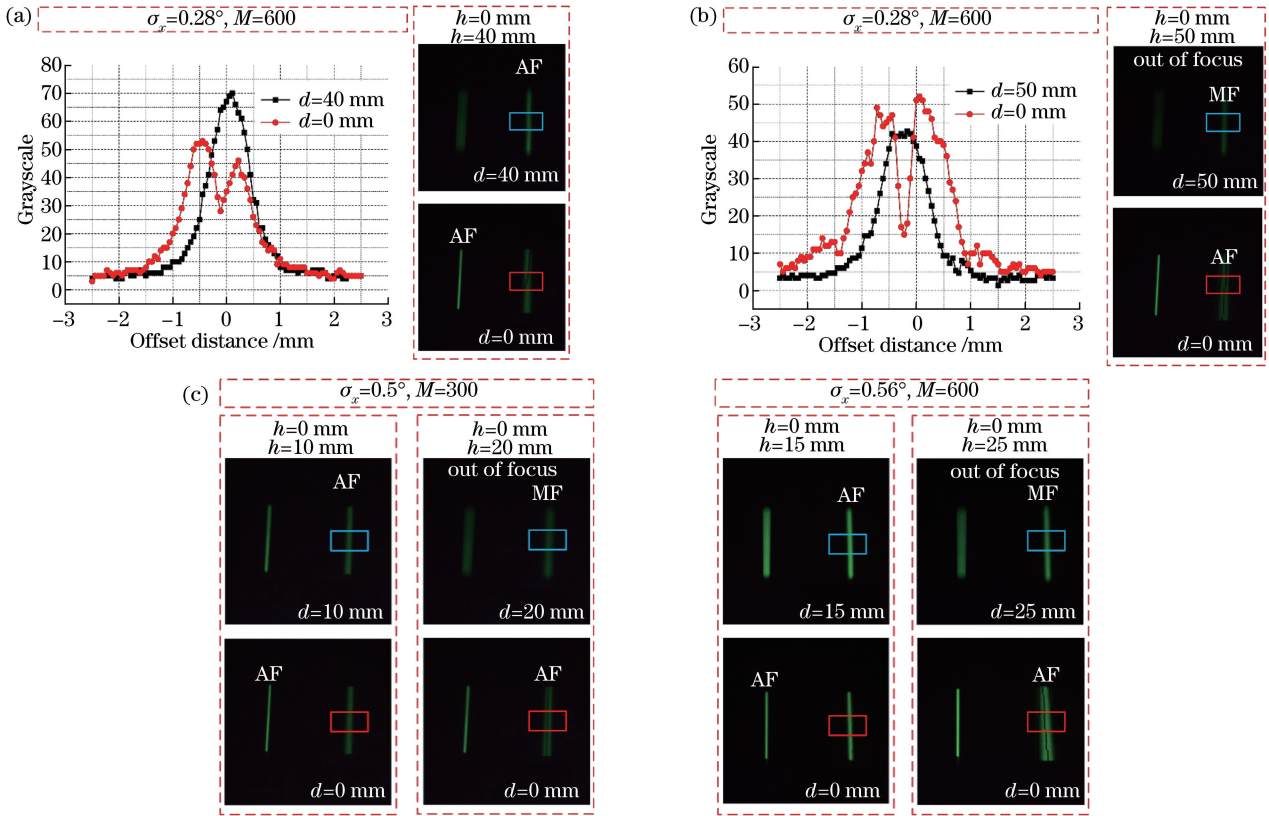


图 8 不同参数下不同重构高度的单目聚焦实验结果 (a)当  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600$  时,  $h=40$  mm; (b)当  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600$  时,  $h=50$  mm; (c)当  $\sigma_x=0.5^\circ, M=300$  时,  $h=10$  mm 与  $20$  mm 以及当  $\sigma_x=0.56^\circ, M=600$  时,  $h=15$  mm 与  $25$  mm  
 Fig. 8 Monocular focusing results of different reconstruction heights under different parameters. (a)  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600$ ,  $h=40$  mm; (b)  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600, h=50$  mm; (c)  $\sigma_x=0.5^\circ, M=300, h=10$  mm and  $20$  mm, respectively, and  $\sigma_x=0.56^\circ, M=600, h=15$  mm and  $25$  mm, respectively

图 8(b)中,在  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600$  参数下重构  $h=50$  mm 的竖线,使用相机(ISO 300)对重构线进行自动聚焦拍摄得到右下图像,但是该图像的屏幕线是最清晰的,说明此时高处重构线已无法单目聚焦,对该重构线进行手动聚焦(MF)拍摄并得到右上图像。左侧图像表示了  $h=50$  mm 竖线的光场在高度为  $d=50$  mm 和  $0$  mm 的采样面上的光强分布。由前文讨论可知,由于该情况下  $d=0$  mm 处的光强更大,因此相机将倾向于聚焦于屏幕上,即表示  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600$  参数下高度为  $50$  mm 的重构线是无法被单目聚焦到的,与实拍结果相符。

类似地,图 8(c)给出了在  $\sigma_x=0.5^\circ, M=300$  和  $\sigma_x=0.56^\circ, M=600$  参数下不同重构线的实拍结果,结果表明  $\sigma_x=0.5^\circ, M=300$  参数下高度为  $20$  mm 的重构线和  $\sigma_x=0.56^\circ, M=600$  参数下高度为  $25$  mm 的重构线是不可以被单目聚焦到的。

由图 7 可知,图 8 中三组参数  $\sigma_x=0.28^\circ, M=600, \sigma_x=0.5^\circ, M=300, \sigma_x=0.56^\circ, M=600$  所对应的最大对焦高度  $h_{\max}$  分别为  $46, 15, 21$  mm, 根据相应的失焦位置以及光强曲线的整体形式,可以看出仿真结果及分析方法与实际情况是相符的。

### 3.4 分析与讨论

通过计算仿真得到水平光场的可聚焦范围与光线的横向散射角  $\sigma_x$  和每圈更新图像数  $M$  的关系,并通过实验进行验证。实验结果表明:光线横向散射角  $\sigma_x$  增大,或每圈更新图像数  $M$  减小,会导致水平光场的最大可聚焦高度减小。由图 8 实拍结果可知,无法单目聚焦在重构点意味着该重构点在屏幕位置采样面的亮度对比度强于重构位置采样面的亮度对比度。由图 6 仿真结果可知,随着光线横向散射角  $\sigma_x$  的增大,重构位置亮度会减小,这是因为较大的  $\sigma_x$  会导致水平光场在重构位置的点扩展函数变大,能量分散,因此亮度降低;随着每圈更新图像数  $M$  的增加,参与重构的屏幕投影点数量增加,因此重构位置的弥散斑能量变大,

亮度增加;从图 6(b)和(c)可以看出, $\sigma_x$  较大且  $M$  较小的系统与  $\sigma_x$  较小且  $M$  较大的系统产生了相似的能量分布曲线,即光线的横向散射角  $\sigma_x$  和每圈更新图像数  $M$  对系统单目聚焦能力有相似的贡献。

为实现具有较大可单目聚焦范围并且清晰的水平光场显示,需要系统具有较小的光线横向散射角  $\sigma_x$  和较大的每圈更新图像数  $M$ 。但在搭建实际系统时,会涉及很多工程问题,比如,就光线横向散射角  $\sigma_x$  而言,它和投影机光瞳尺寸和屏幕横向散射角有关,虽然屏幕横向散射角可以通过光学设计使其接近于零,但是投影机光瞳尺寸不能无限缩小,并且缩小的投影机光瞳会导致场景亮度显著降低[对比图 8(a)和图 8(c)],因此虽然随着  $\sigma_x$  的减小,系统最大可聚焦高度显著增加(如图 7 所示),但是  $\sigma_x$  的影响无法完全消除;就每圈更新图像数  $M$  而言,它和高速投影机的帧频以及数据处理电路带宽有关,高速投影机的帧频是每圈更新图像数与屏幕转速的乘积,在投影机帧频已经达到极限的情况下,提升  $M$  意味着降低屏幕的转速,表现为重构场景刷新率降低,闪烁感增加。因此在针对单目聚焦范围设计水平光场显示系统时,需要综合考虑其他显示质量指标,如分辨率、亮度、刷新率等。

## 4 结 论

通过分析水平光场的显示原理,推导出水平光场点扩展函数;简要分析了水平光场点扩展函数对图像清晰度的影响,着重讨论了水平光场的单目聚焦问题,总结了影响水平光场单目聚焦的主要参数;通过仿真计算定量分析了光线横向散射角和每圈更新图像数对最大可聚焦高度的影响,并在系统样机上对这些结论进行验证;实验结果表明相关分析方法可以作为可聚焦水平光场三维显示系统的设计依据。

## 参 考 文 献

- [1] Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Chen Duo, *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.
- [2] Kreis T M, Aswendt P, Hofling R. Hologram reconstruction using a digital micromirror device [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(6): 926-933.
- [3] Wang Zheng, Cao Liangcai, Zhang Hao, *et al.* Three-dimensional display based on volume holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0909003.  
王 靖, 曹良才, 张 浩, 等. 基于体全息的三维显示方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0909003.
- [4] Zhao Wuxiang, Wang Qionghua, Li Lei. Tunable cylindrical liquid lens array for 2D/3D switchable display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0823001.  
赵悟翔, 王琼华, 李 磊. 用于 2D/3D 可切换显示的柱状液体透镜阵列[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0823001.
- [5] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques- SIGGRAPH'96*, 1996: 31-42.
- [6] Liu Xu, Li Haifeng. Spatial three-dimensional display based on the light-field reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900121.  
刘 旭, 李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900121.
- [7] Yao Zhenning, Li Haifeng, Liu Di, *et al.* An analysis of omnidirectional 3D display system based on scanning LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1233003.  
姚振宁, 李海峰, 柳 迪, 等. 基于 LED 扫描的全景三维显示系统研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1233003.
- [8] Jones A, McDowall I, Yamada H, *et al.* Rendering for an interactive 360° light field display[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(99): 40.
- [9] Xia X X, Liu X, Li H F, *et al.* A 360-degree floating 3D display based on light field regeneration[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11237-11247.
- [10] Su C, Zhong Q, Peng Y F, *et al.* Grayscale performance enhancement for time-multiplexing light field rendering[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32622-32632.