

基于旋转 LED 线阵列全景三维显示系统的 模拟及串扰分析

曹子盛 李海峰* 姚振宁 刘旭 刘向东

(浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 为了提高基于旋转发光二极管(LED)线阵列全景三维显示系统的显示效果,建立了模拟程序。详细分析了视角串扰产生的原因,设计参数和系统误差,并模拟分析了其对显示效果的影响。结果表明通过合理地优化设计参数和控制制造精度能有效地抑制视角串扰的产生。这套模拟程序能很好地再现各个视角视图,并能模拟多种因设计缺陷和系统误差而引起的视角串扰对最终显示效果的影响,进而对系统参数进行优化设计。

关键词 信息光学;全景三维显示;模拟;视角串扰

中图分类号 TP368 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0508001

Simulation and Crosstalk Analysis of 360° Three-Dimensional Display System Based on Rotating LED Line Array

Cao Zisheng Li Haifeng Yao Zhenning Liu Xu Liu Xiangdong

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract In order to improve the display of 360° three-dimensional display system based on rotating linear light-emitting diode array, a simulation program is established. The causes of crosstalk are analyzed in detail; design parameters and system error. And their effects on the display is simulated with the results that the generation of crosstalk can be effectively inhibited by the rational optimization of design parameters and controlling the precision of manufacture. Various perspective views can be reproduced in the simulation program, and the effects of perspective crosstalk caused by design flaws and errors can be simulated, and thus the design of the system parameters is optimized.

Key words information optics; 360° three-dimensional display; simulation; crosstalk

OCIS codes 120.2040; 330.1400; 330.4595

1 引言

全景三维显示是指通过一定的技术手段,在空间内重现三维物体发光信息,又称真三维显示。根据其显示原理大体可分成两类^[1]:体空间扫描和光场重构。体空间扫描通过模拟三维物体各发光点来实现真三维显示。如 Kim 等^[2]提出的基于两束半导体激光对铷蒸气激励产生红色荧光,通过扫描形

成三维显示。Xie 等^[3]提出的利用旋转发光二极管(LED)阵列显示屏来实现体三维显示系统。基于光场重构原理是重建三维物体周围的光场分布,从而实现空间三维显示。如 Actuality Systems, Inc. 开发的 Perspect 空间三维显示系统^[4,5],它也是目前唯一一种商业化的 360°可视三维显示系统。2010 年, Yendo 等^[6]提出了基于旋转 LED 阵列的全景视

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61177015)、国家 863 计划(2012AA011902)和浙江大学校长基金资助课题。

作者简介: 曹子盛(1989—),男,硕士研究生,主要从事三维显示与三维测量等方面的研究。E-mail: caozsh@gmail.com

导师简介: 刘向东(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光电显示、光学与光电子薄膜和光学测量等方面的研究。

E-mail: xdliu@zju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn

场三维显示装置,并在 SIGGRAPH 会议上展示了该三维显示器的原型。国内姚振宁等也实现了大型基于 LED 线阵扫描的全景三维显示系统^[7]。真三维显示技术具有广阔的应用前景,将在医疗成像、影音娱乐、通信、电脑辅助设计以及军事等领域发挥巨大作用^[8,9]。

基于旋转 LED 线阵扫描的全景三维显示是通过 LED 的扫描及狭缝光栅的对其发光方向的调制来实现光场重构。由于显示信息量巨大,系统对精度要求非常敏感,由此产生的视角串扰是影响显示效果的主要因素。为了进一步研究视角串扰对显示效果的影响,搭建一套模拟系统就显得非常有必要。本文在 LED 线阵扫描全景三维显示原理的基础上,建立了一套模拟程序,对设计参数与系统误差引起的视角串扰及对显示效果的影响进行了详细分析,并对不同参数下的模拟视图做对比分析,给出了系统优化设计参数。

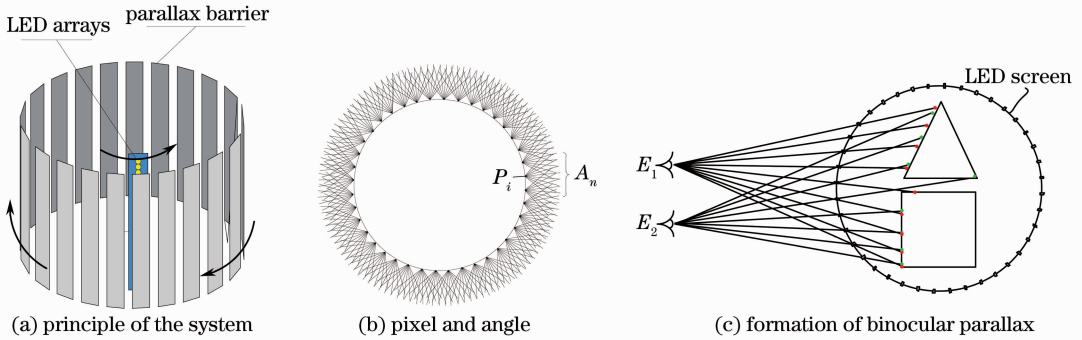


图 1 系统原理图

Fig. 1 System schematic

在基于旋转 LED 线阵列三维显示系统中有几个重要的技术参数:光栅栅条数 B_n 、光栅转速 B_s 、LED 转速 L_s 、视角数 A_n 、LED 屏半径 r_1 、光栅屏半径 r_2 、视点位置距离 V_d 。在 LED 屏与光栅屏相对运动过程中,根据 LED 与狭缝相遇次数可得像素点个数 P_n :

$$P_n = (B_s/L_s + 1)B_n \quad (1)$$

显示图像的生成原理如图 2 所示,最外圈为相机拍摄位置也是显示设备的最佳观察位置。通过相机 V 绕 O 点一周,获得三维物体 M 个视角图,将第 m 个相机 $V(m)$ 获得的视角图映射到 $I(m)$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。令在 x 轴正方向的像素为第 0 个像素的中间位置,逆时针将一周等分为 P_n 个像素点, $i = 0, 1, \dots, P_n - 1$, 每个像素有 A_n 个视角,视角序号顺时针标为 $j = 0, 1, \dots, A_n - 1$, 故显示像素 $p(i, j)$ 显示为第 i 个像素点的第 j 个方向视角的图像。实现方

2 模拟系统原理

2.1 真三维显示原理及图像生成算法

基于旋转 LED 线阵的空间三维显示系统如图 1 所示^[10],显示原理简单来说是通过 LED 与光栅相对移动,使光栅对高速调制的 LED 所发出光线的方向进行同步控制,从而构建出三维物体往 360° 方向的发光光场分布,实现真三维物体的再现。图 1(a)中每个光栅狭缝扫过 LED 时构造出一个像素点,在扫描过程中,随着狭缝和 LED 夹角的变化,扫描出此像素点的对外不同视角方向的光线分布[图 1(b)]。若 LED 旋转一周共有 P_n 个像素点,每个像素又有 A_n 个视角,则旋转一周每个 LED 要显示 $P_n \times A_n$ 次。光栅屏对每次 LED 显示图像的方向进行调制,使其沿特定角度传播,从而使图 1(c)中 E_1 和 E_2 位置的双眼分别看到两幅不同发光方向的具有双眼视差的图像,从而在人脑中形成三维图像。

法具体为:首先确定像素坐标 $p(i, j)$,由转动关系求得狭缝坐标 $s(i, j)$,延长 ps 交外圆于点 $t(i, j)$,由于相机位置不是连续分布,取最靠近 $t(i, j)$ 位置的

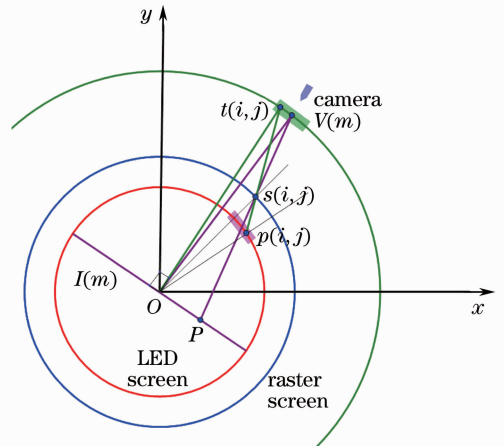


图 2 显示图像生成原理

Fig. 2 Principles of image generation

摄像视点 $V(m)$, 根据 $V(m)$ 对应于视图 $I(m)$, 连线 $V(m)$ 与 $s(i, j)$ 交视图 $I(m)$ 于 P 点, P 点即为坐标 $p(i, j)$ 图像。其他位置视图可由同样方法获得, 最后生成一幅横向分辨率为 $P_n \times A_n$ 的图像。

2.2 真三维显示系统模拟

2.2.1 各视点图像的模拟再现

根据本系统显示特性, 当 LED、狭缝和观察点处在同一直线, 此时 LED 显示的图像应为该视角图一部分。假设 LED、狭缝的初始位置都位于 x 轴上, 如图 3 所示, α, β 分别为 LED 和狭缝在各自旋转过程中对视点 V 的张角, 当它们处于一条直线时, 有 $\tan \alpha = \tan \beta$, 此时 P 位置的圆心角确定其显示的图像信息。设 V_a, V_d 分别为 OV 与 x 轴夹角和 OV 距离, $\tan \alpha$ 和 $\tan \beta$ 可分别表示为

$$\tan \alpha = \frac{V_d \cdot \sin V_a - r_2 \cdot \sin \theta}{V_d \cdot \cos V_a - r_2 \cdot \cos \theta}, \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{V_d \cdot \sin V_a - r_1 \cdot \sin \varphi}{V_d \cdot \cos V_a - r_1 \cdot \cos \varphi}, \quad (3)$$

式中

$$\theta = \frac{2\pi i}{P_n}, \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{2\pi(i+0.5)}{B_n} - \frac{\theta(P_n - B_n)}{B_n}, \quad (5)$$

为了加快计算速度, 减少运算时间, 首先确定像素点, 然后通过迭代求解此像素点对应的显示视角。

设 $T(i) = \tan \alpha - \tan \beta, i = 0, 1, \dots, P_n - 1$ 。先求出相应 $T(i)$ 与 $T(i+1)$, 判断两者符号, 若相同, 则此位置像素点不可见; 若相反, 则可见, 继续下一步, 令

$$\theta = \frac{\theta(i) + \theta(i+1)}{2}, \quad (6)$$

求出此时的 T 值, 再取 $T(i)$ 和 $T(i+1)$ 中与 T 符号相反的值进行同样过程直到 T 趋于 0, 此时 $p(r_1, \theta)$

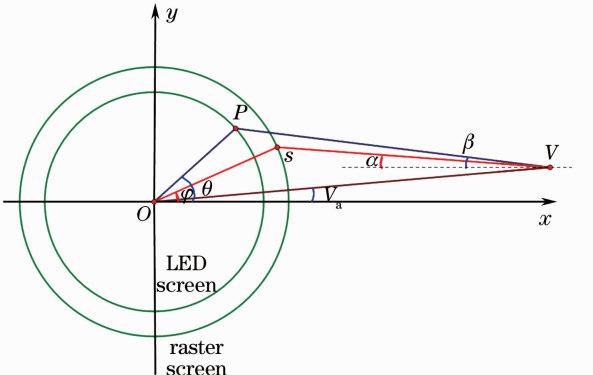


图 3 图像重构原理

Fig. 3 Principles of image reconstruction

值即为视点 V 中观察到的像素。已知输入图像将一周均分为 $P_n \times A_n$ 份, θ 值即对应于相应角度的 RGB 分量, 将此红绿蓝 (RGB) 信息绘制于 P 点。同理绘制出其他对于视点 V 可见的位置点, 将虚拟相机置于视点 V 对显示设备成像, 即可获得视点 V 的视角图。

2.2.2 视角串扰模拟

视角串扰是两个或多个视角图同时被观察到, 从而影响单个视角图的显示, 多由设计缺陷和精度误差引起的。

系统设计中串扰影响最大的是 LED 尺寸和光栅狭缝宽度。它们引起的串扰数可由以下求得: 由于 LED 屏和光栅屏相对运动, 假设某一时刻观察点透过光栅看到 LED 屏, 即 LED 中心、狭缝中心和观察点位于同一条直线上, 如图 4 所示。AB、CD 为狭缝, P_0, P_i 为狭缝中点, EF 为 LED 颗粒, V 为视点。可知只要观察点与狭缝的直线延长线与 LED 相交, LED 即可见。已知 LED 与狭缝以一定速度相对运动, 对于正对视点 V 位置的某一像素点 P_0 , 首先求出 V 点可视的 LED 运动范围, 然后除以单个视角显示的范围, 即可得 V 点可见的视角数。因此,

$$-\frac{d_l}{2} + s = \frac{d_a}{2} + \frac{B_s}{L_s} s, \quad (7)$$

式中 d_l 为 LED 宽度, d_a 为狭缝宽度, B_s, L_s 分别为光栅和 LED 屏转速。由 (7) 式得 LED 可见距离为

$$s = \frac{L_s(d_l + d_a)}{2(L_s + B_s)}. \quad (8)$$

设 n' 是显示正确视角后加入的串扰视角数, 根据每个视角显示的范围, 则

$$n' = \frac{s(P_n \cdot A_n)}{2\pi r_1}. \quad (9)$$

由对称性可知, 此位置的视角总数应为

$$n = 2n' + 1. \quad (10)$$

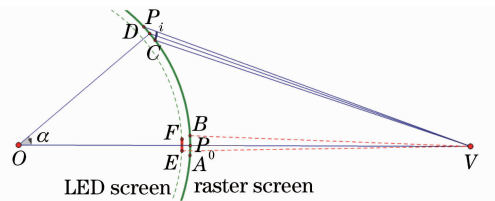


图 4 串扰数的计算

Fig. 4 Crosstalk calculation

光栅屏的加工误差主要包含两部分: 光栅间距误差和光栅缝宽误差。这两种误差对最终显示效果产生不同影响。在模拟过程中, 用随机函数生成随机数组乘以最大误差, 就得到光栅位置误差表, 在重

构过程中求解超越方程时引入误差表,即可模拟光栅间距误差。其次光栅缝宽误差,同样生成一个随机误差表,改变对应位置的狭缝宽度,影响缝宽引起的视角串扰数。

在 LED 和狭缝宽度不是很理想时,串扰视角会比较多,各个视角图虽然是沿时间顺序进入观察点,但时间间隔非常短,由于人眼存在视觉暂留现象,其时值约为二十四分之一秒。(11)式计算了显示单个视角图所需的时间:

$$t = \frac{60}{P_n \cdot A_n \cdot L_s} \quad (11)$$

设 LED 屏转速(L_s)为 0.4 r/s,则在人眼视觉暂留时间内可显示大约 17 个视角图。因此此时的各个串扰视角不应简单地沿空间水平排列,而是它们的幅值叠加,表现在数学上就是求各个串扰视角红绿蓝分量的均值。考虑到 LED 与缝宽都存在大小,在其相对运动过程中,各串扰视角进入观察点的光通量不同。中间的正确视角为最大,逐渐向两边

减小,可根据 LED 透过光栅到达观察点的相对面积求得 k_i 。因此这个视角位置最终显示为

$$\begin{cases} R = \frac{1}{\sum_i k_i} \sum_i k_i R_i \\ G = \frac{1}{\sum_i k_i} \sum_i k_i G_i \\ B = \frac{1}{\sum_i k_i} \sum_i k_i B_i \end{cases} \quad (12)$$

式中 n 为串扰视角数, R_i, G_i, B_i 为各视角红绿蓝颜色分量, k_i 为各视角相对光通量。

对于任意可视点 P_i 位置的串扰计算相对比较复杂。 P_i 位于观察点 V 的视角图上,其取值范围就是视角图的横向分辨率。近似认为 P_i 位置的串扰数由缝宽投影到直线 VP_i 垂线上的宽度 CP'_i 与 BP_1 的比值确定。

$$n_i = \frac{2n |\sin \alpha \cos(\alpha - \theta) - (\cos \alpha - d + r_2) \sin(\alpha - \theta) - (d - r_2) \sin \alpha|}{d_a \sqrt{\sin^2 \alpha + (\cos \alpha - d + r_2)^2}} \quad (13)$$

式中 $\theta \approx d_a / (2r_2)$ 。

3 模拟结果及分析

模拟系统中,根据显示设备的参数取 $B_n = 180$ 条, $A_n = 64$ 个, $r_1 = 322$ mm, $r_2 = 333$ mm, $V_d = 1500$ mm, $P_n = 1000$ 个。取 LED 大小 1 mm,狭缝缝宽 0.4 mm,图 5 为两辆汽车的三维模型。

忽略色彩因素,模拟结果能较好地再现实验设

备的显示效果。图 5(a)为以此原理搭建的三维显示设备实际显示的视图,图 5(b)为根据实验设备的系统及误差参数模拟出的视角串扰视图,两幅视图都有一定程度的模糊,但是模拟结果与实际显示非常接近。图 5(c)为理想无串扰的视角图,而图 5(d)为原三维模型的一个视角图,对比图 5(b)和(c)可发现串扰对显示效果有较大影响,应尽量给予消除。

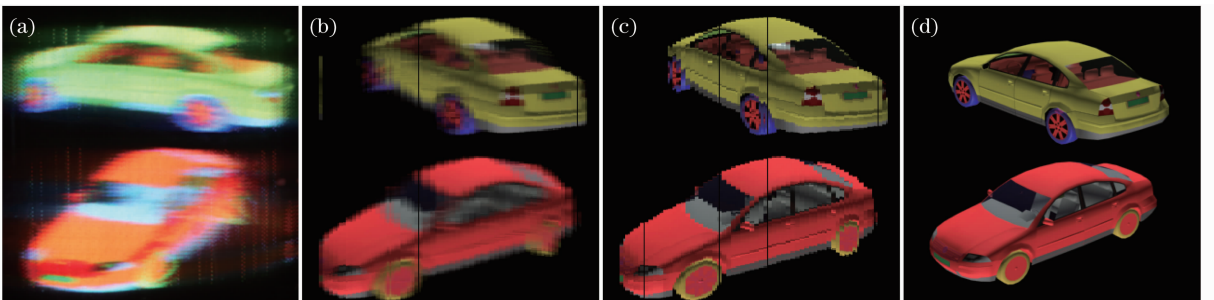


图 5 (a)设备显示视角;(b)相应模拟视角;(c)无串扰模拟视角;(d)模型一个视角

Fig. 5 (a) Device view; (b) simulation view; (c) ideal simulation view; (d) one of the model perspective view

分析加工误差对此系统显示效果的影响。经过对目前实验设备的光栅屏测量发现缝宽最大误差为 0.3 mm,间距最大误差为 0.8 mm,设计缝宽为 0.4 mm,间距为 11.2 mm。图 6 为不同缝宽误差下

的模拟视角图,图 6(a)~(d)四小图分别对应于误差 0.0 mm、0.1 mm、0.2 mm 和 0.3 mm。对于缝宽 0.4 mm,其误差在 ± 0.3 mm 时,对显示效果影响不明显。图 7 为不同间距误差下的模拟视角图,

图7(a)~(d)分别对应于误差0.1 mm、0.2 mm、0.5 mm和0.8 mm。可以看出系统对狭缝间距误差很敏感,必须给予消除,误差最好控制在 ± 0.2 mm内。而狭缝间距误差可通过软件后期优化,主要是

通过测量获得每条缝间距的误差,并反馈到LED控制器,此种方法能有效地减少对显示效果的影响,但也相应增加了系统的复杂性。

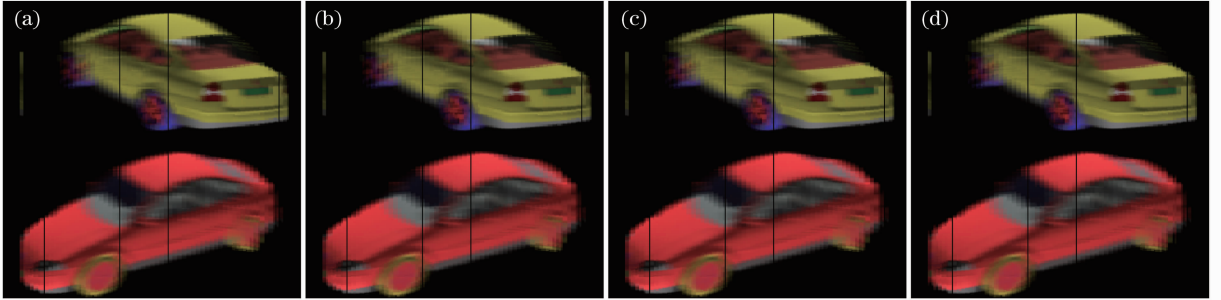


图6 不同缝宽误差下的模拟视角图

Fig. 6 Simulation views of different slit width errors

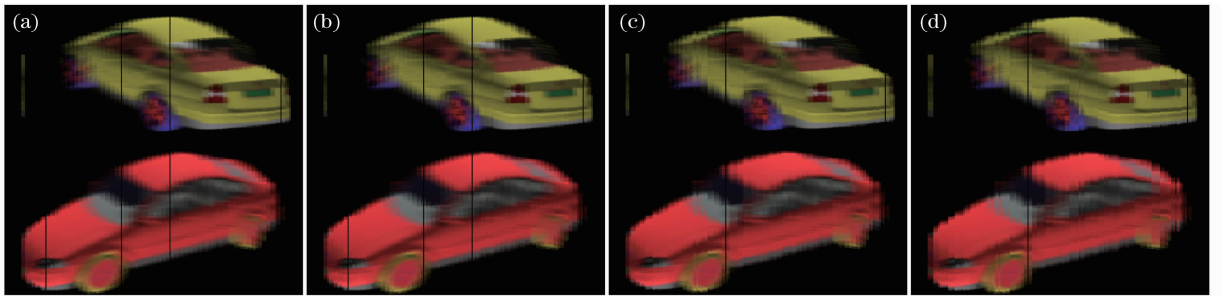


图7 不同间距误差下的模拟视角图

Fig. 7 Simulation views of different spacing errors

为了减少视角串扰,必须同时缩小LED尺寸和狭缝宽度。由于光栅加工工艺限制,设缝宽为0.3 mm,改变LED尺寸,做模拟效果图。图8中LED尺寸分别为0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm和0.5 mm,发现LED尺寸为0.2 mm时效果比较理想,随着LED增大,串扰增强。

由于LED工艺比较成熟,容易获得小尺寸LED颗粒,但综合考虑取0.2 mm LED,改变缝宽(图9)。图9中狭缝宽度分别为0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm和0.5 mm,可以发现缝宽为0.3 mm时可接受,相应地随着缝宽增大,串扰增强。

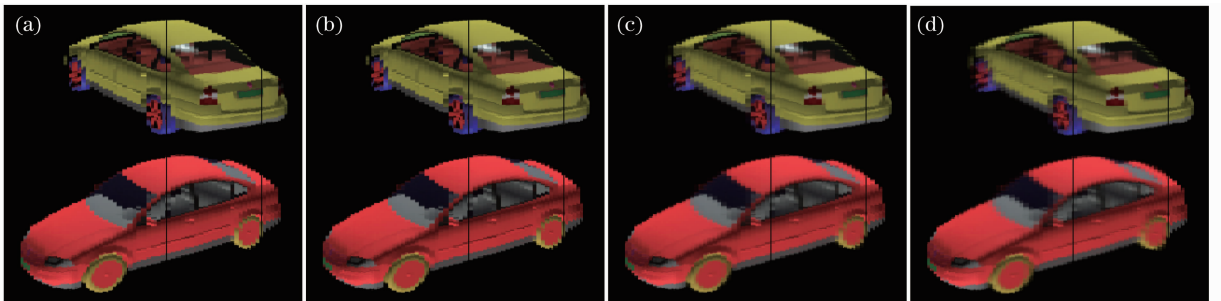


图8 缝宽为0.3 mm在不同LED大小下的模拟效果图

Fig. 8 Simulation views of different LED size where slit widths is 0.3 mm

4 结 论

模拟了真三维显示系统,分析了产生视角串扰的各种因素,及其对最终显示效果的影响,给出合理的优化设计。通过对大量不同串扰程度视图的对比

分析,要控制LED尺寸和狭缝宽度,才能减小视角串扰。狭缝间距误差对显示效果的影响较大,应给予纠正。当LED尺寸为0.2 mm,狭缝宽度为0.3 mm,精度误差在 ± 0.2 mm时,能较好地抑制

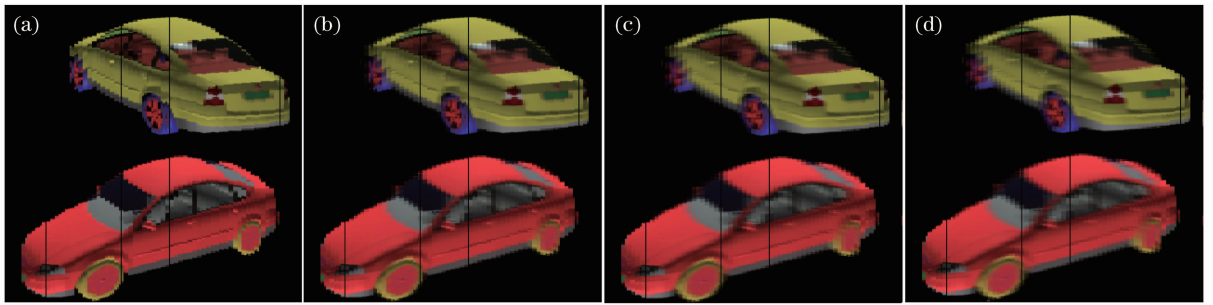


图 9 LED 尺寸为 0.2 mm 在不同缝宽下的模拟效果图

Fig. 9 Simulation views of different slit widths where LED size is 0.2 mm

视角串扰的产生。增大显示分辨率对提高显示效果作用最为显著,但目前还有诸多限制。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 I. I. Kim, E. J. Korevaar, H. Hakakha. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor [C]. *SPIE*, 1996, **2650**: 274~284
- 3 Xiaoyan Xie, Xu Liu, Yuanfang Lin. Three-dimensional volumetric display system based on a rotating two-dimensional LED array[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2008, **39**(1): 1610~1613
- 4 Won-sun Chun, Joshua Napoli, Oliver S. Cossairt *et al.*. Spatial 3D infrastructure: display-independent software framework, high-speed rendering electronics, and several new displays[C]. *SPIE*, 2005, **5664**: 302~312
- 5 G. E. Favalora. Volumetric 3D displays and application infrastructure[C]. *Computer-IEEE*, 2005, **38**(8): 37~44
- 6 T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto *et al.*. The seelinder: cylindrical 3D display viewable from 360 degrees[J]. *J. Vis. Commun. Image R.*, 2010, **21**(5-6): 586~594
- 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 Xinxing Xia, Zhenrong Zheng, Xu Liu *et al.*. Omnidirectional-view three-dimensional display system based on cylindrical selective-diffusing screen [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(26): 4915~4920
- 9 Shuai Li, Haifeng Li, Zhengrong Zheng *et al.*. Full-parallax three-dimensional display using new directional diffuser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(8): 081202
- 10 Caijie Yan, Xu Liu, Di Liu *et al.*. Omnidirectional multiview three-dimensional display based on direction-selective light-emitting diode array[J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(3): 034003

栏目编辑:李文喆