

# 基于光场扫描的真三维立体显示系统的开发

曾 崇<sup>1</sup> 郭华龙<sup>1</sup> 曾志宏<sup>1</sup> 赵 娟<sup>2</sup>

(龙岩学院信息工程学院 福建 龙岩 364000)<sup>1</sup> (中国科学院深圳先进技术研究院 广东 深圳 518055)<sup>2</sup>

**摘要** 近年来,计算机视觉领域出现了一种新型的三维显示技术,即光场三维显示技术。基于光场扫描的真三维立体显示系统通过重构物体光强的空间分布,减少了信息冗余,采用高速投影仪、定向散射反射镜和高速旋转马达等设计而成。通过分析光场三维显示原理和系统工作原理、显示系统架构和立体成像原理等,详细论述了显示系统开发的可行性,并通过实验证明了当达到一定投影输出功率和马达旋转功率时可实现立体成像。观测者可 360 度裸眼观测立体图像,并且无需佩戴任何辅助工具。

**关键词** 光场扫描,三维立体显示,定向散射镜,数字微镜元件

**中图分类号** TN873+.7, TN27 **文献标识码** A

## Development of Real 3D Display System Based on Light Field Scanning

ZENG Chong<sup>1</sup> GUO Hua-long<sup>1</sup> ZENG Zhi-hong<sup>1</sup> ZHAO Juan<sup>2</sup>

(Department of Information engineering, Longyan University, Longyan, Fujian 364000, China)<sup>1</sup>

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In recent years, the light field 3D display technology, an innovative 3D display technology, has been proposed in the field of computer vision. This technology is a real 3D display system based on light field scanning. By restructuring the spatial distribution of light intensity, the amount of excessive information will be reduced. In order to design the system, high speed projector, directional scatter reflector, high speed spinning motors and so on will be applied into the system. The feasibility of the display system will be analyzed based on the principles of light field 3D display and its system, display system structure and stereo imaging. The experiment proves that when the output power of the projector and rotary power of the motor reach a certain level, the dimensional imaging will be achieved. Without any goggles or tools, observers could watch the 360 dimensional images with their naked eyes.

**Keywords** Light field scanning, 3D display, Directional scatter reflector, DMD

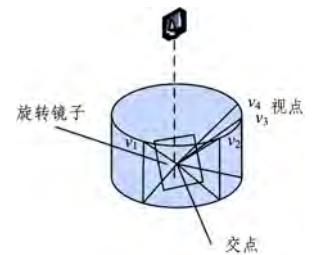
## 1 引言

真三维立体显示摒弃了传统的二维显示空间,可使观察者不佩戴任何辅助工具即可在三维空间中从任意角度对物体进行观测。任何物体都可形成自身周围独特的光强分布,包括自行发光或者其他光源照射使其漫射,而观察者则可通过观察物体各空间点发出的光场来感知物体的三维信息。已知的主流三维全息显示技术利用干涉和衍射原理来记录再现物体的真实三维图像,各物体在光波上的相位、振幅及强度等信息全部被记录,具有较好的逼真度;但是由于全息图像的信息量巨大,并且存在一定冗余,其信息需求量是实际物体的 3 倍以上,因此高分辨率彩色三维影像较难实现。为实现准三维全息显示,可以仅重构物体周围的光场,即重构物体光强的空间分布,而不需重构其相位和强度等信息,从而使观察者能从任意角度和位置感知到对应物体的三维状态<sup>[1-2]</sup>。

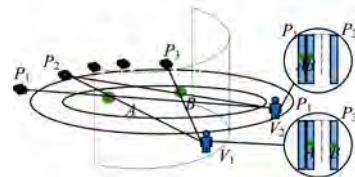
## 2 光场三维显示原理

光场三维显示可分为两种类型,一种可利用高速投影仪和 360 度扫描屏幕实现,另一种可利用投影阵列通过三维光场的空间拼接实现<sup>[2]</sup>。如图 1(a)所示,光场扫描三维显示原理为单一高速投影仪投影出各方向图像,通过散射镜的 360

度高速旋转,重构出物体任意方向的光线分布。投影阵列的三维显示原理如图 1(b)所示,多图像源投影仪  $P_1, P_2, P_3$  等从不同方向投影,其中发光点  $A$  和  $B$  的光场由不同投影仪投出,当投影仪密度足够时,重构出空间三维影像。



(a) 单图像源投影



(b) 投影阵列

图 1 光场立体三维显示原理<sup>[3]</sup>

本文采用改进的 DLP 高速投影仪将预先处理好的图片

本文受龙岩市科技局重点专项基金(2014LY10),龙岩学院百名青年教师攀登项目(LQ2013006),龙岩学院协同创新项目和龙岩学院重点学科项目资助。

曾 崇(1985—),女,硕士,助教,主要研究方向为图形图像处理、软件工程,E-mail: zengchong111@163.com; 郭华龙(1977—),男,硕士,讲师,主要研究方向为软件工程、信息系统与系统识别;曾志宏(1982—),男,硕士,讲师,主要研究方向为视觉图像处理、大数据;赵 娟(1985—),博士,高级工程师,主要研究方向为信息光学和机器视觉,E-mail: juanzhao102@163.com。

(即光场图像)投影至高速旋转的散射镜上,经过屏幕的散射和转折,重构 360 度任意角度的可视三维光场,并呈现 360 度可视悬浮三维物体。

### 3 光场扫描显示系统的工作原理

光场扫描显示系统的工作原理如图 2 所示。高速投影仪位于系统正上方;散射镜位于装置中央并与投影仪以及马达在同一中心轴上。电脑将处理完成的各角度切面图像源数据通过 USB 串行总线接口传递给 DMD 控制电路 flash 缓存区,以供其刷新显示,而后由高速投影仪投影出图像,散射镜在微型电动马达的带动下高速旋转,当高速投影仪的投影帧率和马达旋转帧率达到一定速度匹配时,即可观测出反射镜上方区域悬浮的三维图像。

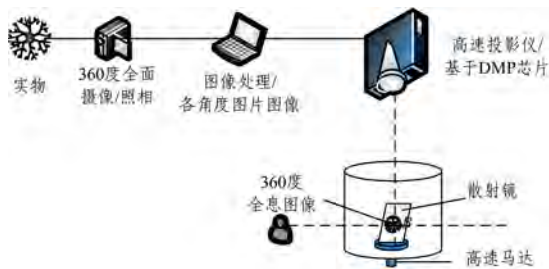


图 2 光场扫描显示系统工作的原理图

### 4 光场扫描三维显示系统的成像架构

基于光场扫描的三维显示系统的成像结构由高速投影仪、定向散射镜、承载圆盘、转动轴以及微型电动马达组成。

1) 高速投影仪采用基于 DMD 的 DLP 来快速开发电路模块,可存储和显示高速图形序列,且能提供高性能和高分辨率的空间光调制器。本系统所投影的图形序列需在 150~250 Hz/s 可调,以与散射镜旋转速度匹配。

2) 定向散射镜选用不锈钢镜面并对其表面进行光学镀膜,通过改变其散射率来保证观测者从任意角度都可以更加清晰地看到三维立体图像,其中散射镜与平面保持 45°角。

3) 承载圆盘采用实心不锈钢材质,作用为固定散射镜和连接马达的转动轴,散射镜重心需落在圆盘重心,以保证成像设备的稳定性。

4) 微型电动马达位于圆盘下方,通过连接轴带动圆盘和散射镜实现高速旋转。马达要求可承载重量较大,因此需配备等比例减速机,以减少离心率,从而保证设备的稳定性。本系统的马达转速需在 1000~1500 转/s 可调,以与散射镜的旋转频率匹配。

### 5 基于数字微镜元件(DMD)的数字光处理(DLP)投影装置

本系统对投影图像源的投影仪刷新频率有极高要求,需采用基于 DMD 的 DLP 投影仪。DLP 技术由美国德州仪器(TI)公司开发,可将数字电信号转化为光信号,其原理是将由 UHP 灯泡发射出的冷光源通过冷凝透镜,由 Rod(光棒)对光进行均匀化处理,经过处理后的光通过一个色轮(Color Wheel)分成 R G B 3 色(或者 R G B W 等更多色)。DLP 技术的核心为 DMD 光学半导体芯片,DMD 芯片由成千上百万个微镜聚焦于 CMOS 硅胶片形成。本投影仪采用 DMD 作为

高速空间光调制器,可调制红、绿、蓝 3 色,以减少光能损失,提高时间利用率,如图 3(a)所示。本系统采用内置 32 MB flash 闪存的投影装置、拥有 150L 光输出的 RGB LED 光引擎以及具有 0~5 A 电流的板载 LED 驱动器。计算机预处理 8 位灰度图形序列时应预先将其输入 flash 闪存,通过对 DMD 操作可使投影仪投影出该图形序列,其投影帧率最高达到 200 Hz/s。图 3(b)给出了一个 DLP 投影装置,其提供了高速串行接口 USB 和迷你 HDMI 高清数据接口。

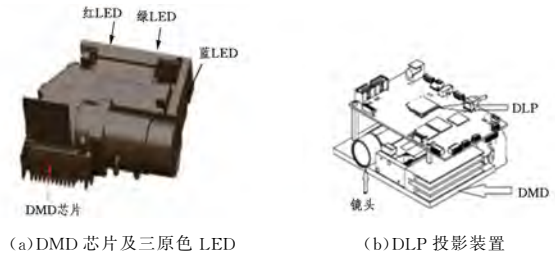


图 3 基于 DMD 元件的 DLP 投影装置

### 6 基于光场扫描三维立体投影图像的构成原理

基于光场扫描的真三维系统开发采用高速投影仪将各角度图像序列依次投影至定向散射镜,使其形成反射屏,而后反射屏将光场空间分布即光线反射至人眼,随着反射镜在转动轴带动下的高速旋转,利用人眼的暂留和视差原理即可投影出人眼观测到的真三维立体显示图像。

#### 6.1 定向散射镜的散射原理

定向散射镜利用了人眼的视差原理,即人的左右眼存在一定的间距(约 6.5 cm),导致左右眼看同一物体时会有细微差异。定向散射镜通过特制散射膜使镜子具有定向散射特性,使投射到其表面的光线通过固定角度  $\gamma$  散射至周围。假设人眼和散射镜之间的距离为  $A$ ,则人眼可观测宽度为  $W = A \times \gamma$ 。

如图 4 所示,当散射镜绕马达中心轴  $Q$  旋转时,每旋转一个角度  $\beta$ ,其中  $\beta \leq \gamma$ ,则高速投影仪每投一张图片。散射镜转动一周的视图数为:

$$v = 360 / \beta \quad (1)$$

则每张图像所对应的散射镜位置如图 4 直径所示,标示为  $D_0$  到  $D_{v-1}$ 。当观测者视线位于  $T_i(v_i)$  位置时,散射镜  $D_i$  垂直对应  $T_i$ ,则表明观测者仅观测短距离宽度的图形,即观测者看到的图形由散射镜  $D_{i-1} \sim D_{i+1}$  共同组成。但由于人眼瞳距处于 55~75 mm 之间,大于观测者视角间距,因此形成立体三维图像。

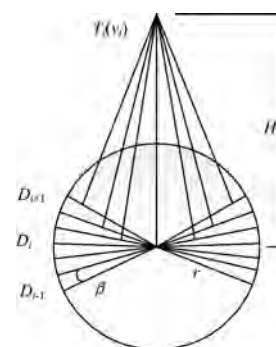


图 4 立体三维单点成像

## 7 基于光场扫描的三维显示系统的性能测试

对于根据光场三维显示工作原理设计的立体显示装置,通过测试和比较其在不同马达转速和 DLP 不同输出功率下的图形显示效果来验证该系统的性能。如图 5 所示,根据式(1),角度  $\beta$  为  $6^\circ$ ,共选取 6 张原始茶壶图片,在黑暗环境下进行输出测试。



图 5 不同角度下的原始茶壶图像

实验 1 设定马达转速为 940 转/min, DLP 输出功率为 120 帧/s,所获取的图像如图 6 所示。可以看出,茶壶并未立体成像,仅能依稀观测到一张张图片。

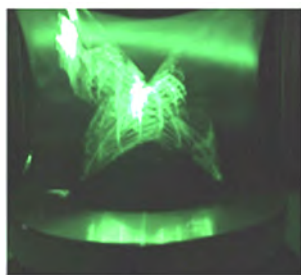


图 6 马达转速为 940 转/min 时获取的图像

实验 2 设定马达转速为 1420 转/min, DLP 输出功率为 120 帧/s,所获取的图像如图 7 所示。可以看出,茶壶立体成像成功,但是由于所选取角度偏大,即输入图片较少,图像细节处理得不够完美。

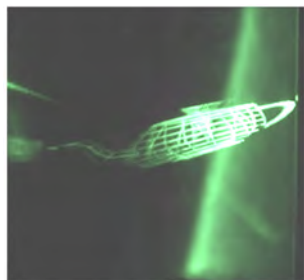


图 7 马达转速为 1420 转/min 时获取的图像

通过多次实验得出结论:所选取图片越多,所需马达转速越低;只有当图像投影速率和旋转反射镜旋转圈数即马达转

速匹配时,才能产生稳定的立体三维成像图像;图像的精度呈现效果取决于所选图片的角度和数量,图片选取的角度越小,数量越多,所呈现的立体图像越逼真。

**结束语** 本显示系统利用光场扫描重构显示技术实现了高速投影和定向散射镜的立体三维显示,整套设备完成了显示图像生成、高速数据传输以及光场三维再现等流程。与主流的全息三维相比,本系统的信息量需求小、冗余低、成像效果逼真。实验证明,本文设计的基于 DLP 高速投影的光场三维显示系统装置运行成功,后续可开发实时动态传输控制三维显示系统。

## 参考文献

- [1] 王辉. 波前再现三维显示[M]. 北京:科学出版社,2017:21-37.
- [2] KUO C J, TSAI M H. Three-dimensional Holographic Imaging [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 100-110.
- [3] 孟祥旭. 人机交互基础教程[M]. 北京:清华大学出版社,2016: 66-75.
- [4] 杨忠,李莉,鄂龙慧,等. 基于数字微镜的旋转体扫描 3 维显示系统[J]. 中国图形图像学报,2010,15(1):149-154.
- [5] 王靖,曹良才,张浩,等. 基于基于体全息三维显示方法[J]. 中国激光,2015,42(9):296-300.
- [6] KLUG M, BURNETT T, FANCELLO A, et al. A scalable, collaborative, interactive light-field display system[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013, 44(1): 412-415.
- [7] YI N H, LIN S H, WHANG W T. Analyses on physical mechanism of holographic recording in phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) hybrid materials[J]. Optical Engineering, 2004, 43(9): 1993-2002.
- [8] 郑竺英. 双眼立体视觉的信息加工[M]. 北京:科学出版社, 1998:51-68.
- [9] 王冬翠,王惠南. 关于基于立体视觉与真三维显示技术[J]. 现代显示,2009,20(9):19-23.
- [10] 董建文,陈定尘,庞晓宁,等. 空域计算全息三维成像技术[J]. 中国激光,2014,41(7):0701001.
- [11] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.
- [12] SLINGER C, CAMERON C, STANLEY M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. IEEE Computer, 2005, 38(8): 46-53.
- [13] KIM M K. 数字全息显微[M]. 郭羽,胡亚萍,译. 北京:国防工业出版社,2017:25-35.
- [14] GABOR D. A new microscope principle[J]. Nature, 1948, 161: 777-778.
- [15] MATOBA O, NOMURA T, PEREZ-CABRE E, et al. Optical Techniques for Information Security[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 1128-1148.