

基于光场重构的空间三维显示技术

刘 旭 李海峰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 真实空间三维显示可以通过精确再现三维物体的空间光场分布来实现。依据三维景物空间光场分布特性, 提出并介绍基于光场重构的真实空间三维场景显示的基本原理与方法。实验表明, 利用光场重构原理, 可以运用现有的光学空间光调制器构造出比全息再现更为优越的真实三维显示。

关键词 显示; 三维显示; 空间光场; 视觉效应

中图分类号 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0900121

Spatial Three-Dimensional Display Based on the Light-Field Reconstruction

Liu Xu Li Haifeng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The light field distribution of a real object is used to regenerate spatial three-dimensional (3D) display. The principle and techniques are proposed describing how to use light field distribution in the real 3D display. The experimental results show that vivid 3D display with current spatial light modulator can be built up, which can get better 3D effect than the traditional holographic display based on light field regeneration.

Key words display; 3D display; light field; vision effect

OCIS codes 120.2040; 330.4595; 330.1400; 230.1980

1 引 言

所谓真实空间三维显示就是人们无需借助任何器具, 能够像平时观看周边景物一样, 围绕着客观景物观看到该景物各个侧面的三维信息。这样的三维显示技术是人类理想的显示技术, 是人们不断追求的目标。

提起真实空间三维显示, 人们很自然就想到全息三维显示, 因为全息显示再现的是三维物体的波面(强度与相位), 自然涵盖了三维物体的空间真实信息, 当然这是十分理想的三维显示。但是事实上由于纪录媒介大小与分辨率的限制, 全息显示在实际的显示中只能展示一定视角范围内的三维场景, 特别是由于衍射效应的存在, 全息显示中很难形成高纯度的彩色三维显示。更不用提目前还无法拥有的超高分辨动态(视频)的空间光调制器, 因此动态的全空间的全息三维显示在目前是不可能的^[1]。

事实上, 人眼观看真实物体时, 感知的是物体发出的光场, 即物体光强的空间分布, 并不需要同时获得物体发出光场的强度与相位信息, 而是只要有强度信息, 就可以很好地感知客观物体的三维状态。

这就意味着, 如果能够在空间再现所要显示的三维场景或三维物体的空间光场分布, 就能很好地在空间再现该三维场景或物体。本文基于光场重构技术提出实现 360°空间三维显示的几种方法, 这些光场重构技术可以使众多的观看者围绕显示区域, 裸眼自然地观看到显示物体或场景的准确三维空间关系, 获得真正的“全息”(全部信息)显示, 而且可以显示品质极高的三维场景。

2 空间光场的物理描述

任何一个物体, 不论其是自行发光, 还是漫射周边其他光源照在其上的光, 都在该物体的周围形成

收稿日期: 2011-07-29; 收到修改稿日期: 2011-08-10

作者简介: 刘 旭(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学与光电子薄膜, 光电显示技术等方面的研究。

E-mail: liuxu@zju.edu.cn

自己独特的光强分布,这就是如图 1 所示的该物体的光场。

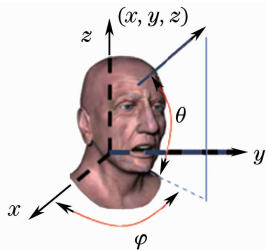


图 1 物体的空间光场

Fig. 1 Spatial light field of an object

如果物体在 x, y, z 方向上分别有 V_x, V_y, V_z 个体素单位,此空间物体的体素数为

$$N_V = V_x V_y V_z \quad (1)$$

因此,在物体周边的观看者,可以通过观看物体各个空间点发出的光场来感知此物体的三维信息。

当从三维物体的周围来观看这个三维物体点,如图 2 所示(这个三维物体就是 p_0 体素)。可以作图来表示从物体发出的光线,将三维物体的各个体素向周边的观看者进行连线以表征物体发出的光场,这时如果物体周围有一个柱面屏,物体发出光场的所有光线与这个柱面屏就有交点。假设这个柱面屏并不改变三维物体发出的光线方向,且透射率很高,则周边的人依然看到这个三维物体,而几乎感觉不到这个圆柱屏幕。换句话说,如果该圆柱屏幕也发出像物体一样分布的光线,这时即便没有这个真实的三维物体在圆柱屏幕内部,但对圆柱屏幕周围的观看者而言,他们确实看到这个位于屏幕中的三维物体。这就是空间光场再现技术的原理。

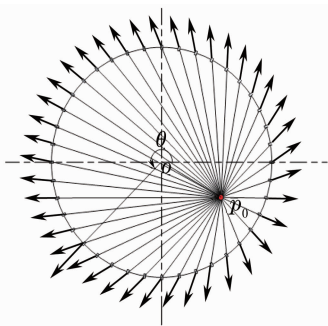


图 2 三维物体光场在周边圆柱屏幕上的体现

Fig. 2 Regeneration of the light field from a cylindrical screen around the 3D object

可以进一步分析全面显示一个空间三维景物的显示信息量。假设某个三维景物具有上述 N_V 个体素,每个空间体素发出的光线都在 4π 空间内均匀分布,且在水平方向和竖直方向的角分辨率分别为

R_H 和 R_V ,颜色与灰度信息为 C_V ,因此三维景物的光场信息量为

$$F_V = N_V \frac{2\pi 2\pi}{R_H R_V} C_V = V_x V_y V_z \frac{2\pi}{R_H} \frac{2\pi}{R_V} C_V, \quad (2)$$

可以看出(2)式与 Leonard McMillan^[2]的全光函数十分类似,不同在于,文献[2]中是用该函数来表示观看者的眼睛参数,本文是用其来表示光场函数,该函数是真实空间的三维显示光线分布函数,显示信息量不仅比二维显示的信息量 V_x 大一维 V_z ,而是大了近三维 $V_z \frac{2\pi}{R_H} \frac{2\pi}{R_V}$ 。如果按照目前二维显示器,

每一维大约有 1000 pixel,三个维度就增加 10^9 pixel 的信息量。这是一个巨大的信息量,增加的部分就大大超过目前平面高清晰度显示器的显示信息,这也是真三维显示的难度所在。

因此,要实现空间三维的显示就是探索如何去去除要显示的空间三维信息中的冗余信息,在高保真显示质量的前提下,尽可能地减少显示的信息量。去除冗余的依据主要是人眼的视觉特性,按照人眼观看的能力,来减少不需要的显示信息量;同时采用并行处理的方法,加大系统对数据的处理速度,进而实现真实空间的三维显示。

可以从目前两大类空间三维显示技术——体三维显示^[3]与全景空间三维显示^[4],来分析其对信息量的压缩方式。体三维显示通过快速扫描三维场景的一系列二维截面,依靠人眼视觉暂留效应产生立体视觉,屏幕旋转一周所显示的二维截面数量越多,显示画面越细腻。体三维显示最大的特点是所有体素的发光均是一样的空间角度,因此其信息量降至 V_i 。其结果图像是无遮拦的,透明的,人们不仅可以看到物体前面表面,而且因为透明还可以看到其后面的表面^[5]。

全景视场三维显示是光场重构三维显示的一种,将显示空间周边光场利用光学扫描器逐个角度扫描再现,或者利用特殊圆柱屏幕上再现屏幕围成的空间中的三维物体在屏幕上对应位置光场再现,从而实现圆柱体内虚三维景物的显示。根据人眼结构以及人眼对三维观看感知的灵敏性,放弃对竖直方向上的光场重建,仅仅以竖直方向散射场来代替竖直方向分布式的光场,而注重人眼视觉特别是三维感知敏感的水平视场光场的精确重建,进而降低系统的数据量,最大限度保持对显示空间光场描述的可接受性,充分展示三维显示效果。

3 光场重构空间三维显示方法——全景视场三维显示

基于光场重构的全景视场空间三维显示按照重构方式分有 3 种：扫描型全景光场重构技术，拼接光场型重构技术以及集成光场重构技术。

3.1 扫描光场重构技术^[4]

利用光学扫描系统，配合高帧频图像发生器，将周边对应各个视角的光场，精确扫描重现。扫描重构技术的核心是光束定向扫描器与高速的图像源（高帧频的图像源），为了保证精确重现显示物体的空间光场，除承载图像的信号之外，扫描系统必须对光束方向进行准确的控制。

为此设计并制备了定向散射的光场扫描镜与高帧频投影仪组成的扫描光场显示系统^[6]。光场扫描

镜在垂直方向将 45° 入射角方向入射光散射到 $45^\circ \pm 30^\circ$ 的区间散射入射光，在水平方向仅仅反射入射光（实际上散射角非常小，在 3° 以内），这样当此特殊的反射镜绕转动轴旋转时[如图 3(a)所示]，就可以将高速投影仪（系统中研制了基于高速 DMD4000 的投影系统，帧频达到 9000 Hz）投出的各个方向的光场准确地投射到相应的方向。也就是说，投影仪投射出的不是对应视角的图像，而是在对应方位的光场分布图像，其满足光场的空间再现条件。因此投影仪投出的是显示三维物体在各个方向的光场组合投影，而不是各个方向的某一视角图像。这样通过高速扫描，运用人眼的视觉暂留功能，周围的观看者就可以获得处于该反射镜区域的三维景象。由于是真实的光场在现，所以是具有遮拦效应的三维图像。

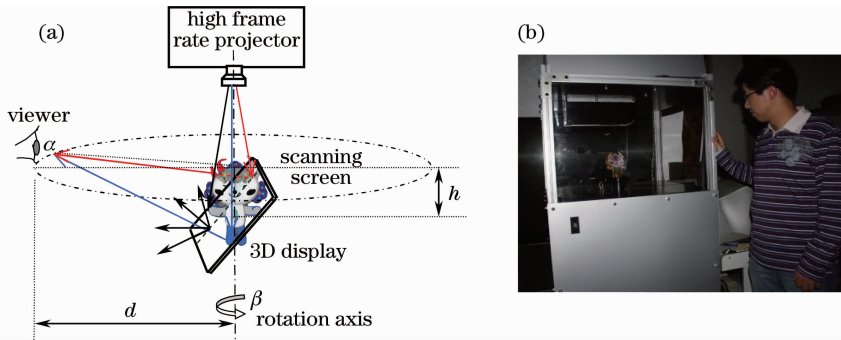


图 3 基于光场扫描的全景三维显示系统原理(a)及实物照片(b)

Fig. 3 Schematic of panorama display system based on light field-scanning (a) and its real photo (b)

为了实现彩色图像，采用红(R)，绿(G)，蓝(B)高亮度 LED 为光源，利用时序效应，建立了彩色基于光场扫描的全景空间三维显示系统，获得了彩色真实的空间三维显示，实物照片如图 3(b)所示。

3.2 基于拼接光场的全景空间三维显示

由前面分析可知，如果能够在要显示的区域外侧的一个圆柱形表面上构造出与显示三维景物光场一样的光场分布，则亦可以实现全景空间三维显

示^[7]。为此利用 LED 的高速发光响应特性(最快可以在 30 ns)，配合 LED 发光光场方向控制屏，形成不同方向发光逐一显示单元的拼接光场显示^[8]。如图 4(a)所示。图中 mn 为 30 列 LED 条状阵列组成的圆柱面显示屏， HJ 为该 LED 屏幕的光场方向控制屏，该控制屏是由 150 条 0.3 mm 宽均匀分布的透光狭缝组成。这两个屏各自独立转动相互之间又相对转动，LED 屏的各条 LED 每次显示一个列图

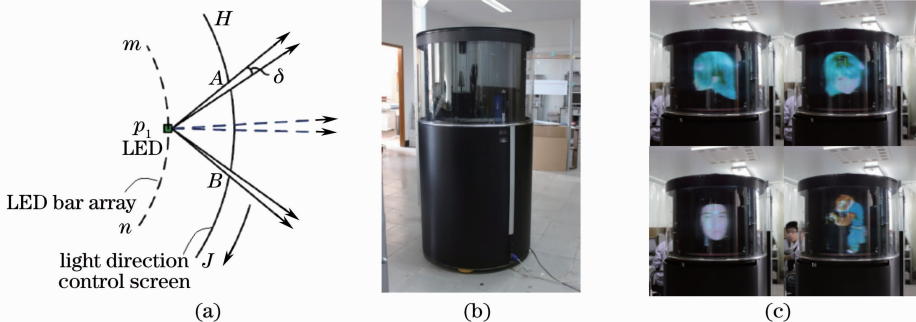


图 4 基于 LED 屏的光场拼接全景三维显示系统。(a)光场控制；(b)系统照片；(c)显示效果

Fig. 4 Schematic of panorama display system based on light-field merging of LED screen. (a) Light field control; (b) photo of display system; (c) display results

像,然后显示该列图像的 64 个视角,转动一个像素,显示下一个列图像,接着又是这一列图像的 64 个视角…以此类推。 HJ 屏相对 LED 转动的结果是在 HJ 屏幕的相邻两个通光缝之间 LED 能够显示多少个视角的图。这样由每一个像素列的 64 个视角的图像拼接出整个空间光场的空间分布。在显示系统中,每一转显示 1000 列图像,每一列图像有 64 个视角,每一列在高度方向有 480 pixel,8 bit 彩色,则整个系统显示的信息量为 235 Mbit。

LED 条状屏以 1 r/s 的速度转动,发光方向控制屏以 5 r/s 的速度转动,实现三维图像的刷新率 30 Hz。显示系统的照片与显示的效果图如 4(b), (c)所示。

3.3 集成光场重构显示

该显示技术利用空间发光方向调控的阵列显示器集成方法,重构空间景物三维光场。这种光场重

构方法克服了前面扫描与拼接光场需要的机械扫描系统的缺点,采用众多显示器与光场调控屏幕组成的集成化的光场重构方法来实现。其原理图如图 5(a)所示^[9],图中 3×3 个显示器阵列将图像经各自光学系统成像于发光方向控制屏幕,发光方向控制屏仅仅产生竖直方向的散射,水平方向不对成像光线进行控制,即在水平方向,各显示器的光线是按照成像系统的几何关系传播的。每一个显示器显示的图像为特定三维区域不同视角图像的组合,这样阵列显示器图像的集成,重构出三维物体的空间光场。图 5(b)中每一个立方体表示某一个显示器的光学出瞳的大小以及相对其他显示器出瞳的位置关系,可以看出相邻两个显示系统的出射光瞳是相连接的,每个显示器按照其光学成像系统的视场角显示出相应不同视角的图像,最终在屏幕上合成完整的三维空间光场。

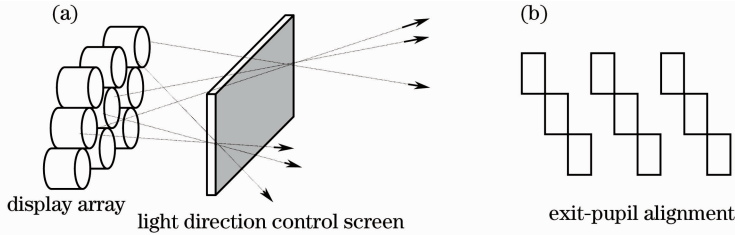


图 5 集成光场全景三维显示系统原理图。(a)光场控制;(b)出射瞳孔排列

Fig. 5 Principle of the panorama 3D display system based on light-field integration. (a) Light field control; (b) exit-pupil arrangement

基于这个原理建立了应用 100 台投影显示器作为图像发生源的集成光场显示系统,该系统的发光方向控制屏直径 2 m,与 100 台投影机构成同心圆排布,如图 6(a)所示。图 6(b)给出了实验系统的实验显示结果,可以看出此系统显示出了很好的全景空间三维场景。

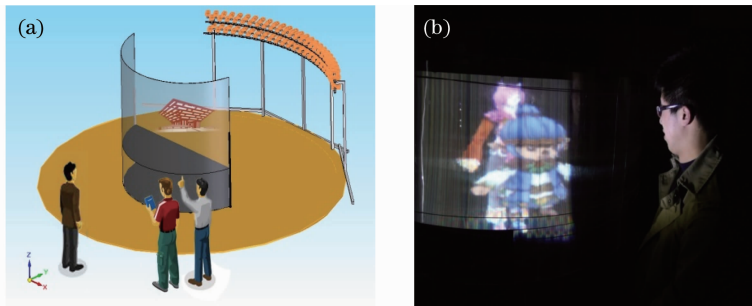


图 6 基于光场集成重构方式的全景空间三维显示。(a)系统原理图;(b)显示结果

Fig. 6 System and the display for the spatial 3D display by light field integration. (a) System principle; (b) display results

4 结 论

光场重构技术的原理就是利用物体真实光场分布的再现,实现真正的空间三维显示,观看者可以围绕显示空间,裸眼自由地观看到准确的三维场景空

间关系。理论上这种再现是十分直接与精确的,没有原理上的显示误差,因此可以完美地再现客观三维场景的空间关系,特别是具有精确遮拦关系的三维场景再现,是一种很好的真三维显示技术。当然

在实际操作上,再现的精确程度与真实性还是要由再现的信息量与显示方法来决定。另外必须指出的是光场重构技术仅仅是指出一种真三维显示原理,人们可以基于该基本原理发展出各种各样的光场重构显示技术与系统,例如本文中提出了三种具体的显示技术来实现光场的重构。只要提出的方法充分利用目前所具有的技术水平与器件水平,达到高水平的空间三维显示的目的,就是好方法。这才是光场重构技术在真三维显示中之所以重要的原因。

参 考 文 献

- 1 Savas Tay, P.-A. Blanche, R. Voorakaranam *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, **451**(7179): 694~698
- 2 Leonard McMillan, Gary Bishop. Plenoptic modeling: an image-based rendering system [C]. Proc. SIGGRAPH 95, 1995. 39~46
- 3 G. E. Favalora. Volumetric 3D displays and application infrastructure[J]. *Computer-IEEE*, 2005, **38**(8): 37~44
- 4 A. M. Jones, I. Yamada, H. Bolas *et al.*. Rendering for an interactive 3600 light field display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): 1~10
- 5 Xie Xiaoyan, Liu Xu, Lin Yuanfang. Study on gray scale deviations in three-dimensional volumetric display system based on geometric approximation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1508~1513
谢小燕, 刘旭, 林远芳. 体三维显示系统中基于几何近似法的灰度偏差研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1508~1513
- 6 C. J. L. Yan, X. Li, H. F. Xia *et al.*. Color three-dimensional display with omnidirectional view based on a light-emitting diode projector[J]. *Appl. Opt.*, 2009, (48): 4490~4495
- 7 Endo T. K., Y. Honda, T. Sato, M. *et al.*. Cylindrical 3-D video display observable from all directions [C]. *SPIE*, 2000, **3957**: 225~233
- 8 X. X. Z. Xia, Z. R. Liu, X. Li *et al.*. Omnidirectional-view three-dimensional display system based on cylindrical selective-diffusing screen[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(26): 4915~4920
- 9 Li Shuai, Li Haifeng, Peng Yifan *et al.*. Novel 3D display based on spliced view-field[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, **25**(4): 601~604
李帅, 李海峰, 彭帆等. 基于视场拼接的体视三维显示[J]. *液晶与显示*, 2010, **25**(4): 601~604