

文章编号: 1672-8785(2018)06-0034-06

体三维显示技术及其特点

张屹东^{1,2} 饶 鹏^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 体三维显示技术是三维显示技术的一个重要分支。首先对目前国内外较为成熟的体三维显示技术进行了分类和举例, 然后对该技术的特点进行了总结。虽然目前的技术方案仍然存在一定的局限性, 但是未来的新方案将会应运而生, 并将逐步取代现在的二维显示。

关键词: 三维显示技术; 体三维; 扫描体

中图分类号: TP37 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.006

Volumetric 3D Display Techniques and Their Features

ZHANG Yi-dong^{1,2}, RAO Peng^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract: Volumetric 3D display technique is an important part of 3D display. Firstly, the volumetric 3D display techniques which are comparatively mature at home and abroad at present are classified. Then, the features of volumetric 3D display techniques are summed up. Although there are a certain limitations for the current technical schemes, the new technical schemes will appear in the future and gradually replace the existing 2D display.

Key words: 3D display; volumetric 3D display; swept volume

0 引言

作为三维显示技术的一个重要分支, 体三维显示技术是通过在极短的时间内在成像空间中构造一系列发光体素点, 并利用视觉暂留现象来实现三维显示的。该技术能够在一定的三维空间中真实地显示三维影像, 目前已在医疗、材料以及军事等领域得到了应用。本文旨在对体三维显示技术中的典型方法进行分类和

探讨。

1 体三维显示技术的分类

根据原理的不同, 体三维显示技术主要分为静态体和扫描体两大类。它们的区别在于成像空间的基本构造方式。其中, 静态体三维显示技术通过用特殊物质充满一定空间来构造成像空间; 扫描体三维显示技术通过用特制二维平面均匀扫描一定空间来构造成像空间。而基

收稿日期: 2017-12-04

作者简介: 张屹东(1991-), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统。

E-mail: yidongzh@mail.ustc.edu.cn

于不同的成像空间构造物质以及发光体素点构造方式, 又可形成各种体三维显示技术。下面介绍其细分技术及相关实例。

1.1 静态体三维显示技术

1.1.1 基于固体介质能量跃迁的静态体三维显示技术

基于固体介质能量跃迁的静态体三维显示技术将特定固体介质充满三维空间中的一块区域来形成成像空间, 然后通过控制两束入射激光, 使其交点能量达到一定阈值, 以实现该点的固体介质跃迁和发光散射, 从而形成一个发光体素点。通过在短时间内激活多个发光体素点而形成三维图像, 并利用视觉暂留现象来实现立体显示。

以 Downing E A 为首的实验团队运用该技术进行了较为成功的试验^[1-3]。1997 年, 他们使用镨、钇、铈掺杂的氟化物玻璃构成一块立方体, 并以此作为成像空间。在不同方向上放置两个激光发射装置, 并利用振镜调整发射角度。通过调整激光波长, 可在两束激光交汇于成像空间内时使其内部物质跃迁并发出荧光。由于单束激光不会发出荧光, 同时在成像空间内也不会发生散射, 因此单束激光的轨迹得以隐藏。由电脑控制器提供的信号通过驱动放大电路驱动振镜, 从而快速控制激光束的偏转; 短时间内在成像空间中形成多个荧光点, 组成立体图像, 从而实现立体显示。图 1 为 Downing E A 等人研发的体三维显示技术的示意图。

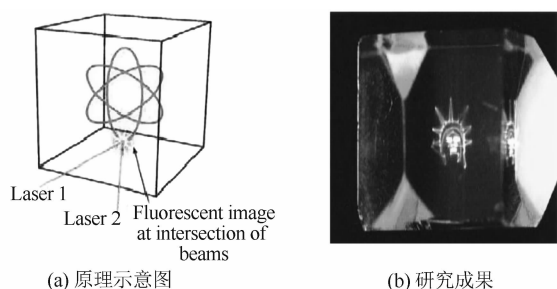


图 1 Downing E A 等人研发的体三维显示技术

该实验中, 固体成像空间的尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。受振镜技术的限制, 激光扫描速度具有一定上限, 因此可组成稳定立体图像

的最大有效体素点数量为 300 个。如果忽略成像空间棱角处的光线折反射问题, 那么可观测视角则为全视角。表 1 列出了 Downing E A 等人研发的体三维显示技术的总结数据。由于固体制作成本及技术问题, 利用基于固体介质能量跃迁的静态体三维显示技术时在尺寸方面难以实现大幅提升, 因此无法满足荧幕级别的立体显示需求。

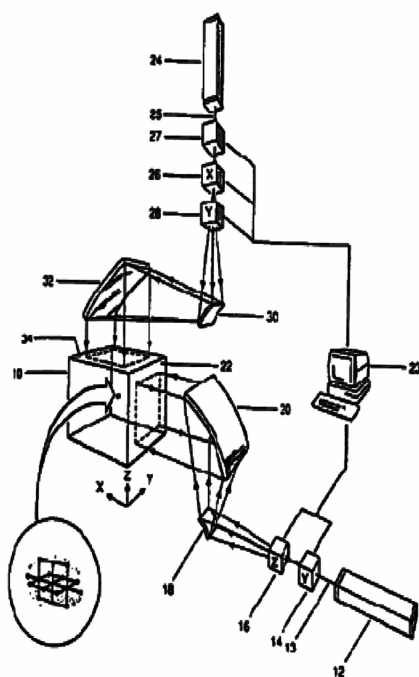
表 1 Downing E A 等人研发的体三维显示技术的总结数据

参数	描述
成像空间	固体(氟化物玻璃)
体素生成	利用两束激光交汇使物质跃迁发出荧光
显示控制	振镜
尺寸	$10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$
最大体素点数	300
视角	全视角

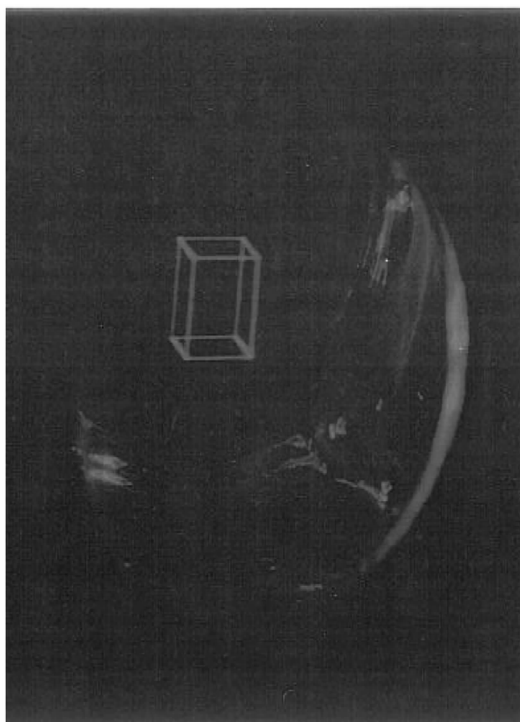
1.1.2 基于气体介质能量跃迁的静态体三维显示技术

在原理方面, 基于气体介质能量跃迁的静态体三维显示技术基本上等同于基于固体介质能量跃迁的静态体三维显示技术, 只是把其中的固体介质变为了气体介质。

以 Kim I I 为首的实验团队运用该技术进行了较为成功的试验^[4]。1996 年, 他们将液态铷放入开有 5 个观察窗口的铝制隔热盒内。后者的外部连接温度控制装置, 在成像过程中使液态铷转变为气态铷, 并以此作为成像空间。采用两个激光发射装置发射两束波长分别为 780 nm 和 630 nm 的激光, 并利用振镜调整发射角度, 使其交汇在气态铷中。交汇点处的气态铷由于两次跃迁发出荧光, 产生单个体素点。由电脑控制器提供的信号通过驱动放大电路驱动振镜, 从而快速控制激光束的偏转; 短时间内在成像空间中形成多个荧光点, 组成立体图像, 从而实现立体显示。图 2 为 Kim I I 等人研发的体三维显示技术的示意图。



(a) 原理示意图



(b) 研究成果

图 2 Kim II 等人研发的体三维显示技术

该实验中, 固体成像空间的尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 。他们尝试增加体素点的数量, 然而当达到 5000 个时, 图像产生明显失真; 体素点在 500 个以下时具有良好的成像效果。受铝制隔热盒的限制, 该成像装置有 5 个观察视角, 分别为前、后、左、右、上。表 2 列出了 Kim II 等人研发的体三维显示技术的总结数据。与固体介质相比, 气体介质具有易于扩展的优点; 只需解决隔热容器及温度控制装置的问题, 便可大幅扩展成像空间的体积。该技术在将来有较大可能满足大规模成像的需求。

表 2 Kim II 等人研发的体三维显示技术的总结数据

参数	描述
成像空间	气体(气态铷)
体素生成	利用两束激光交汇使物质跃迁发出荧光
显示控制	振镜
尺寸	$10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 12\text{ cm}$
最大体素点数	5000
视角	5 (前、后、左、右、上)

1.2 扫描体三维显示技术

1.2.1 基于平移平面屏的体三维显示技术

基于平移平面屏的体三维显示技术将平面屏幕通过平移扫描一定空间, 此空间即为成像空间。利用投影设备投射出三维图像相应位置的二维图像(即剖面图)。在短时间内投影多幅图像, 并利用视觉暂留现象来实现立体显示。平移平面屏易于设置光路, 同时还可固定投影设备的位置。但是平移速度难以均匀, 导致显示图像失真。因此, 基于平移平面屏的体三维显示技术的难点在于处理平面屏平移过程中的速度不均匀问题。

2004 年, LightSpace 公司研制出了 Depth-Cube 三维显示器^[5-6]。该显示器通过堆叠多层平面 LCD 屏幕形成成像空间。LCD 屏幕具有透明和不透明两种状态。其中, 透明状态可近似看作透明介质, 不透明状态可近似看作反射屏幕。LCD 屏幕连接控制装置用于控制其状态切换。在进行立体显示时, 通过改变 LCD 屏幕的状态, 使成像空间仅有一块屏幕呈不透明状态, 并依次切换, 近似模拟平移平面屏;

同时通过由 DMD 芯片控制的高速投影设备投射出相应的二维图像, 从而实现立体显示。图 3 为基于平移平面屏的体三维显示技术的示意图。

该实验中, 整个成像空间的尺寸为 $15.6\text{ cm} \times 11.8\text{ cm} \times 4.1\text{ cm}$ 。由于使用 DMD 芯片进行体素点的显示控制, 可以在单位时间内实现多个体素点的生成。这不仅大大增加了最大体素点数, 而且还提高了分辨率。其最大体素点数的理论值为 $1024 \times 748 \times 20 = 15.3 \times 10^6$ 。同时, 该显示系统可以进行彩色显示, 其色彩深度为 15 bit。由于屏幕无法将图像反射至侧面, 所以侧面上没有观察视角。因此, 该显示系统的观察视角为 1, 即前面。表 3 列出了 DepthCube 产品的总结数据。

表 3 DepthCube 产品的总结数据

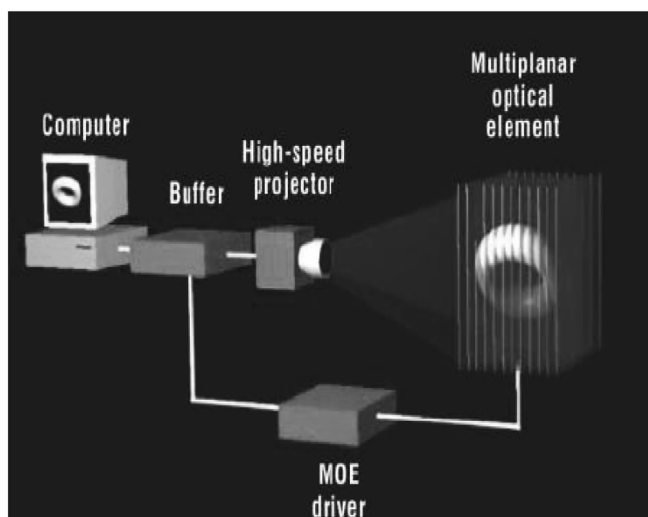
参数	描述
成像空间	多层平面 LCD 屏幕
体素生成	高速投影设备
显示控制	DMD 芯片
尺寸	$15.6\text{ cm} \times 11.8\text{ cm} \times 4.1\text{ cm}$
最大体素点数	15.3×10^6
视角	1 (前)

1.2.2 基于旋转平面屏的体三维显示技术

基于旋转平面屏的体三维显示技术将平面屏幕通过绕固定轴旋转来扫描一定空间, 此空间即为成像空间。利用投影设备投射出三维图像相应位置的二维图像(即剖面图)。在短时间内投影多幅图像, 并利用视觉暂留现象来实现立体显示。旋转平面屏对光路的要求较为复杂, 因为屏幕的角度在变化, 入射角需要保持垂直, 所以入射光路需要同步变化。由于旋转屏幕对于全视角是等价的, 其观察视角为 4, 即前后左右。但是对于指定的观察视角来说, 则有一定的屏幕角度导致难以观测, 因此存在死区问题。

2001 年, 美国 Actuality Systems 公司研制出了 Perspecta™ 3D System 系统^[7-10]。这种显示系统通过将平面屏绕固定轴旋转来形成成像空间。利用由 DMD 芯片控制的高速投影设备投射出相应角度的二维图像, 经光路调整后投射至平面屏幕上, 从而实现立体显示。图 4 为 Perspecta™ 3D System 系统的示意图。

Perspecta™ 3D System 系统具有一个直径为 10 in 的球形成像空间。通过调整光路, 使得投影光线始终垂直于屏幕。该系统同样使用 DMD 芯片对体素点显示进行控制。其最大体素点数的理论值为 $768 \times 768 \times 198 = 116 \times 10^6$ 。

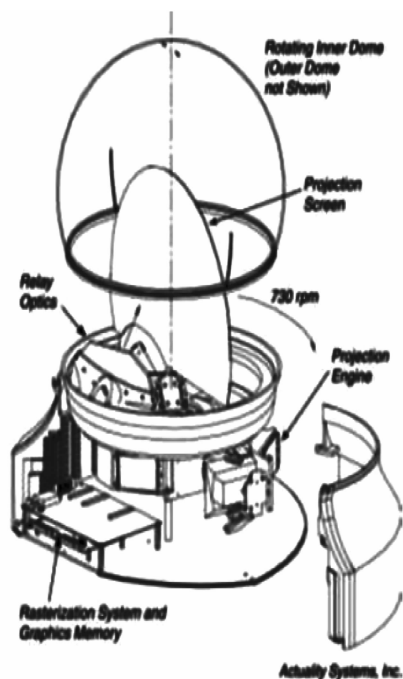


(a) 原理示意图



(b) DepthCube 产品的实物图

图 3 基于平移平面屏的体三维显示技术



(a) 原理示意图



(b) 系统效果

图 4 Perspecta™ 3D System 系统

它同时可以显示彩色图像，即通过 1 bit 色彩深度的 RGB 进行显示。理论上，该系统的观察视角为全视角，但是随着视角的升高，观察效果会降低。表 4 列出了 Perspecta™ 3D System 系统的总结数据。

表 4 Perspecta™ 3D System 系统的总结数据

参数	描述
成像空间	旋转平面
体素生成	高速投影设备
显示控制	DMD 芯片
尺寸	直径为 10 in 的球形空间
最大体素点数	116×10^6
视角	全视角

1.2.3 基于旋转螺面的体三维显示技术

基于旋转螺面的体三维显示技术在原理上基本等同于基于旋转平面屏的体三维显示技术，只是前者将其中的旋转平面屏变为旋转螺面屏，然后再依据屏幕特点布置光路。相比之下，该技术的成像空间的体素分布较为均匀，能够产生良好的显示效果，但是其对于立体图像的螺面切面处理则较为复杂。

2008 年，李莉基于以上技术原理研发出了 Helix-3D 系统^[11]。该系统通过扫描旋转螺面屏形成成像空间。由 DMD 芯片控制的高速投影设备投射出相应角度的二维螺面剖面图像；经过光路调整，该图像被投射至螺面屏幕上，从而实现立体显示。图 5 为 Helix-3D 系统的示意图。

Helix-3D 系统具有一个直径为 10 cm 的圆柱成像空间。该系统使用 DMD 芯片对体素点显示进行控制。其最大体素点数的理论值为 $1024 \times 768 \times 132 = 103 \times 10^6$ 。理论上，该系统的观察视角为全视角，且在各个方向上都不会产生较大失真。

表 5 Helix-3D 系统的总结数据

参数	描述
成像空间	旋转螺面
体素生成	高速投影设备
显示控制	DMD 芯片
尺寸	直径为 10 cm 的圆柱空间
最大体素点数	103×10^6
视角	全视角

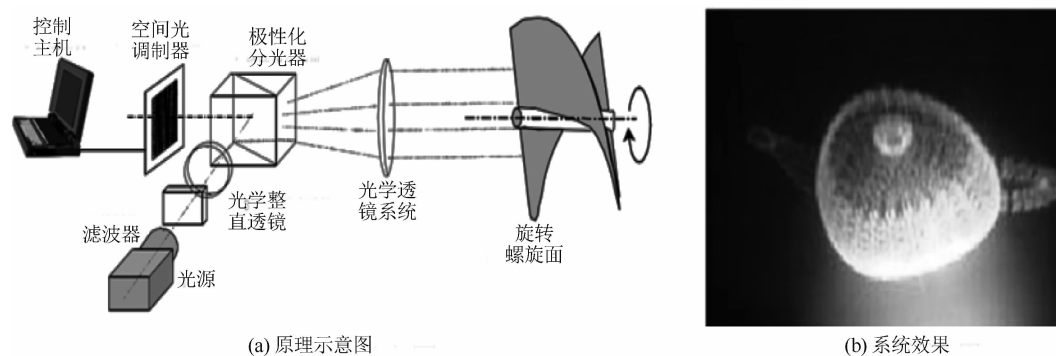


图 5 Helix-3D 系统的示意图

2 总结与展望

基于不同原理的体三维显示技术有其自身利弊, 且适用范围也不相同。随着硬件与软件技术的不断发展, 体三维显示技术的分辨率和成像尺寸将会越来越高, 其显示效果也会越来越好。如今该技术已经在医疗、军事、材料等领域有所应用。虽然目前的技术方案仍然存在一定的局限性, 比如价格和材料等因素, 不过可以预见的是, 未来基于体三维显示技术原理的新方案将会应运而生, 并将逐步取代现在的二维显示。

参考文献

- [1] Downing E, Hesselink L, Ralston J, et al. A Three-Color, Solid-State, Three-Dimensional Display [J]. *Science*, 1996, **273** (5279): 1185–1189.
- [2] Downing E A, Hesselink L, Macfarlane R M, et al. Solid-state Three-dimensional Computer Display [C]. Anaheim: Conference on Lasers and Electro-Optics, 1994.
- [3] Downing E A. A Laser-diode-driven, Three-color, Solid-state 3-D Display [C]. Anaheim: Conference on Lasers and Electro-Optics, 1996.
- [4] Kim I I, Korevaar E J, Hakakha H. Three-dimensional Volumetric Display in Rubidium Vapor [C]. *SPIE*, 1996, **2650**: 274–284.
- [5] Leung M S, Ives N A, Eng G. Three-dimensional Real-image Volumetric Display System and Method; US5745197A [P]. 1998–04–28.
- [6] Sullivan A. DepthCube Solid-state 3D Volumetric Display [C]. *SPIE*, **2004**, 5291: 279–284.
- [7] Favalora G, Hall D M, Giovenco M, et al. A Multi-Megavoxel Volumetric 3-D Display System for Distributed Collaboration [C]. San Francisco: IEEE Global Telecommunications Conference, 2002.
- [8] Favalora G E, Dorval R K, Hall D M, et al. Volumetric Three-dimensional Display System with Rasterization Hardware [C]. *SPIE*, 2001, **4297**: 227–235.
- [9] Favalora G E, Napoli J, Hall D M, et al. 100-million-voxel Volumetric Display [C]. *SPIE*, 2002, **4712**: 300–312.
- [10] Favalora G E. Volumetric 3D Displays and Application Infrastructure [J]. *Computer*, 2005, **38** (8): 37–44.
- [11] 李莉. 体三维显示系统关键技术研究 with 实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.