

# 投影光栅 3D

## 显示技术

祁林·著

3D

西北工业大学出版社

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

# 投影光栅 3D 显示技术

祁 林 著

西北工业大学出版社  
西安

**图书在版编目(CIP)数据**

投影光栅 3D 显示技术/祁林著. —西安:西北工业大学出版社, 2017.8

ISBN 978 - 7 - 5612 - 5585 - 8

I. ①投… II. ①祁… III. ①光栅—三坐标显示器  
IV. ①TN873

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 204968 号

策划编辑:付高明 李栋梁

责任编辑:杨丽云

---

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西金德佳印务有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:4.375

字 数:89 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版

2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

# 前 言

3D(三维)显示器可以向观看者提供传统 2D(二维)显示器所不能提供的深度信息,其信息量更加丰富,是显示设备发展的方向,有人预言它将成为下一代的主流显示设备。在多种 3D 显示技术之中,光栅 3D 显示技术因具有成本低、简单易实现、易于产业化等优点而备受人们青睐。传统的光栅 3D 显示器由 2D 显示器和柱透镜光栅或狭缝光栅两部分精密耦合构成,由于受到 2D 显示器分辨率、尺寸等参数的制约,难以实现大尺寸、高分辨率的 3D 图像显示。在基于传统光栅 3D 显示系统的基础上,本书提出两种基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统。这两种系统能够克服传统光栅 3D 显示系统分辨率低、尺寸受限的缺点。

首先,本书设计并搭建了一套基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统,该系统由投影机阵列、柱透镜光栅、背投影屏、狭缝光栅组成。投影机阵列水平放置并投射出多幅视差图像,经过柱透镜光栅后生成一幅合成图像并显示在背投影屏上,利用放置在背投影屏前面的狭缝光栅的遮挡作用,将合成图像中的不同视差图像分光至正确的视点,从而实现 3D 显示。再采用 ASAP 软件进

行模拟仿真实验,验证理论设计的正确性。其次,为了进一步提升 3D 图像的亮度,采用柱透镜光栅代替狭缝光栅对合成图像进行分光,搭建了一套基于双柱透镜光栅的投影 3D 显示系统。相比基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统,该系统的 3D 图像亮度提高了近 2 倍,大大提高了光利用率。同时讨论了投影 3D 显示系统元件的装配对 3D 显示效果的影响,包括合图柱透镜光栅和分光柱透镜光栅之间的相对倾斜角度、合图柱透镜光栅的焦平面与背投影屏之间的距离以及分光柱透镜光栅和合成图像像素之间的水平相对位置。

3D 显示技术发展迅速,完整的 3D 图像评价指标亟待完善和统一。传统的 3D 图像质量评价方法有亮度、串扰和 3D 分辨率等,这些指标不能直接反应 3D 图像在深度方向的特征。本书提出了一种光栅 3D 显示图像的客观评价方法,该方法反映 3D 图像在深度方向上的特征。采用主观评价的方法验证了人眼对 3D 图像深度平面离散分布的感知,定量计算了离散深度平面的分布;定义深度方向上每英寸内的深度平面数为 3D 图像深度分辨率,定量地表示了 3D 图像在深度方向上的分布情况。

本著作由河南城建学院祁林老师编著。

由于水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

祁 林

2017 年 8 月

# 目录



|                           |    |
|---------------------------|----|
| 摘要 .....                  | 1  |
| 第 1 章 绪论 .....            | 5  |
| 1.1 3D 显示技术的发展和现状 .....   | 6  |
| 1.2 3D 显示技术简介 .....       | 8  |
| 1.2.1 3D 系统的组成 .....      | 9  |
| 1.2.2 3D 显示的分类 .....      | 9  |
| 1.3 投影 3D 显示的发展 .....     | 13 |
| 1.4 本书的研究意义及主要内容 .....    | 16 |
| 第 2 章 光栅 3D 显示原理与技术 ..... | 20 |
| 2.1 立体视觉原理 .....          | 20 |
| 2.2 视差图像的获取 .....         | 25 |
| 2.2.1 视差图像的拍摄方式 .....     | 26 |
| 2.2.2 立体相机的摆放方式 .....     | 28 |
| 2.3 视差图像的处理与合成 .....      | 33 |
| 2.3.1 视差图像的处理 .....       | 34 |
| 2.3.2 视差图像的合成 .....       | 41 |
| 2.4 光栅 3D 显示器的原理 .....    | 42 |

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 2.4.1 | 狭缝光栅 3D 显示器 .....              | 43 |
| 2.4.2 | 柱透镜光栅 3D 显示器 .....             | 48 |
| 2.5   | 本章小结 .....                     | 51 |
| 第 3 章 | 基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统 .....    | 52 |
| 3.1   | 投影 3D 显示系统原理 .....             | 52 |
| 3.1.1 | 合成图像的生成 .....                  | 53 |
| 3.1.2 | 合成图像的分光 .....                  | 57 |
| 3.3.2 | 柱透镜光栅参数的优化设计及仿真实验 .....        | 58 |
| 3.2.1 | 柱透镜光栅参数的优化设计 .....             | 59 |
| 3.2.2 | ASAP 仿真合成图像的生成 .....           | 61 |
| 3.3   | 投影 3D 显示系统的搭建 .....            | 63 |
| 3.3.1 | 投影视差图像的校正 .....                | 63 |
| 3.3.2 | 投影 3D 显示系统元件的设计 .....          | 68 |
| 3.3.3 | 投影 3D 显示系统的性能 .....            | 70 |
| 3.4   | 本章小结 .....                     | 74 |
| 第 4 章 | 基于双柱透镜光栅的投影 3D 显示系统 .....      | 75 |
| 4.1   | 投影 3D 显示系统的原理和参数设计 .....       | 75 |
| 4.1.1 | 投影 3D 显示系统原理 .....             | 75 |
| 4.1.2 | 投影 3D 显示系统的参数设计 .....          | 77 |
| 4.2   | 投影 3D 显示系统元件的装配 .....          | 82 |
| 4.2.1 | 合图柱透镜光栅和分光柱透镜光栅之间的相对倾斜角度 ..... | 82 |
| 4.2.2 | 分光柱透镜光栅的焦平面与背投影屏之间的距离 .....    | 84 |

|              |                                   |            |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 4.2.3        | 分光柱透镜光栅和合成图像像素之间的水平<br>相对位置 ..... | 86         |
| 4.3          | 投影 3D 显示系统的搭建及其分光性能 .....         | 88         |
| 4.3.1        | 投影 3D 显示系统的搭建 .....               | 88         |
| 4.3.2        | 投影 3D 显示系统分光性能的分析 .....           | 91         |
| 4.4          | 本章小结 .....                        | 93         |
| <b>第 5 章</b> | <b>助视/光栅 3D 图像质量的评价 .....</b>     | <b>94</b>  |
| 5.1          | 传统的 3D 图像质量评价方法 .....             | 94         |
| 5.1.1        | 3D 图像亮度 .....                     | 94         |
| 5.1.2        | 3D 图像串扰 .....                     | 95         |
| 5.1.3        | 3D 图像分辨率 .....                    | 95         |
| 5.2          | 离散深度平面的主观评价 .....                 | 96         |
| 5.3          | 3D 图像深度分辨率 .....                  | 99         |
| 5.3.1        | 3D 图像深度分辨率的计算 .....               | 99         |
| 5.3.2        | 3D 图像深度分辨率的分析 .....               | 101        |
| 5.4          | 用人眼的立体视觉来评价图像质量 .....             | 103        |
| 5.4.1        | 有效立体像区 .....                      | 104        |
| 5.4.2        | 立体视觉阈值分辨率 .....                   | 107        |
| 5.5          | 本章小结 .....                        | 111        |
| <b>第 6 章</b> | <b>总结及展望 .....</b>                | <b>113</b> |
| 6.1          | 主要工作总结 .....                      | 113        |
| 6.2          | 主要创新点总结 .....                     | 115        |
| 6.3          | 展望 .....                          | 116        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>                      | <b>119</b> |



## 摘 要

3D(三维)显示器可以向观看者提供传统 2D(二维)显示器所不能提供的深度信息,其信息量更加丰富,有人预言它将成为下一代的主流显示设备。随着 3D 大片《阿凡达》的热播以及世界杯首次进行的 3D 转播,3D 显示受到越来越多的关注。在多种 3D 显示技术之中,光栅 3D 显示技术因具有成本低、简单易实现、易于产业化等优点而备受人们青睐。传统的光栅 3D 显示器由 2D 显示器和柱透镜光栅或狭缝光栅两部分精密耦合构成,由于受到 2D 显示器分辨率、尺寸等参数的制约,难以实现大尺寸、高分辨率的 3D 图像显示。

本书提出两种基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统,这两种系统除了具有传统光栅 3D 显示器的简单易实现、成本低等优点之外,还易于实现高分辨率、大尺寸的 3D 图像显示。另外,3D 图像质量的评价是 3D 显示技术发展不可或缺的一部分,本书提出了一种对投影 3D 显示图像进行评价的方法,该方法能够反映 3D

图像在深度方向上的特性。该评价方法能广泛用于助视/光栅 3D 图像质量的评价。

本书具体研究内容分为以下三个部分。

(1) 提出一种基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统。该系统由投影机阵列、柱透镜光栅、背投影屏、狭缝光栅组成。投影机阵列水平放置并投射出多幅视差图像, 经过柱透镜光栅后生成一幅合成图像并显示在背投影屏上, 利用放置在背投影屏前面的狭缝光栅的遮挡作用将合成图像中的不同视差图像分光至正确的视点, 从而实现 3D 显示。柱透镜光栅的像差直接影响合成图像的质量, 而合成图像的质量又直接影响 3D 显示效果, 因此, 我们采用 ASAP 软件进行模拟仿真实验, 优化设计柱透镜光栅参数使其像差最小。实验结果表明柱透镜光栅的折射率越大、孔径角越小, 像差就越小, 这为具体柱透镜光栅的选择提供了依据。此外还模拟仿真了合成图像的生成过程, 验证了理论设计的正确性。无畸变、无垂直视差的视差图像是获得良好 3D 显示效果的前提, 为此, 我们采用单应性原理对视差图像进行校正, 使多幅投影视差图像在投影屏上显示在同一矩形区域内, 消除了视差图像之间的垂直视差和图像的畸变; 搭建了一套 50 in (英寸,  $1\text{ in}=0.025\text{m}$ ) 的投影 3D 显示系统, 并对其视区的光强分布做了测试, 以此来评估 3D 显示系统的分光性能。该系统实现了大尺寸、高分辨率的 3D 图像显示, 3D 显示效果良好。

(2) 为了进一步提升 3D 图像的亮度, 我们提出一种基于双柱透镜光栅的投影 3D 显示系统。该系统由投影机阵列、合图柱透镜光栅、背投影屏、分光柱透镜光栅组成。投影机阵列投射出多幅视

差图像,经过合图柱透镜光栅的折射后生成一幅合成图像并显示在背投影屏上,利用放置在背投影屏前面的分光柱透镜光栅将合成图像中的不同视差图像分光至正确的视点,从而实现 3D 显示。设计了复合柱透镜光栅来增大柱透镜光栅的焦距,以改善投影 3D 显示系统的观看距离。讨论了投影 3D 显示系统元件的装配对 3D 显示效果的影响,包括合图柱透镜光栅和分光柱透镜光栅之间的相对倾斜角度、合图柱透镜光栅的焦平面与背投影屏之间的距离以及分光柱透镜光栅和合成图像像素之间的水平相对位置。搭建了一套 50 in 的投影 3D 显示系统,相比基于柱透镜和狭缝光栅的投影 3D 显示系统,该系统的 3D 图像亮度提高了近 2 倍,大大提高了光利用率。采用模拟和实验两种方法验证了投影 3D 显示系统的分光效果,得到的结果和理论设计一致。该系统实现了大尺寸、高分辨率和高亮度 3D 图像显示,3D 显示效果良好。

(3)提出一种对助视/光栅 3D 图像评价的方法,该方法可以反映 3D 图像在深度方向上的特征。采用主观评价的方法验证人眼对 3D 图像深度平面离散分布的感知,验证结果表明,2D 显示器的像素节距越大,3D 图像深度平面离散分布越明显。定量计算了离散深度平面的分布,定义深度方向上每英寸内的深度平面数为 3D 图像深度分辨率,定量地表示了 3D 图像在深度方向上的分布情况。以人眼的视差融合能力和立体视觉阈值为依据,分别计算了 3D 图像的有效立体像区和立体视觉阈值分辨率。当 3D 图像深度分辨率大于人眼的立体视觉阈值分辨率时,人眼无法感知到 3D 图像深度平面的离散分布,3D 图像在深度方向上看起来就是连续的,3D 显示效果就好,反之,3D 图像在深度方向上看起来就是不连

续的,3D 显示效果就不好。研究了立体视觉阈值分辨率和 3D 图像深度分辨率与相关参数,包括 2D 显示器的像素节距、观看距离等的变化关系,得到 3D 图像深度分辨率大于人眼的立体视觉阈值分辨率的条件。

## 第 1 章 绪 论

人类社会快速通过了工业时代,进入了信息时代。人的生存离不开社会,离不开信息的传递,人们随时随地通过感官和肢体从外界获取信息。实验心理学家赤瑞特拉(Treicher)做了著名的心理实验,其中有一个就是关于人类获取信息的来源的。他通过大量的实验证实人类获取的信息 83%来自视觉,11%来自听觉,3.5%来自嗅觉,1.5%来自触觉,1%来自味觉。视觉信息不仅量最大,而且最全面、准确,正所谓眼见为实。因此,在很长的历史时期内,人们都努力将各种信息转换为视觉信息,将信息以最直观的形式展现。目前,人类获取视觉信息最主要的媒介是显示器。自美国 RCA 公司在 1939 年推出世界上第一台黑白电视机之后,显示技术经历了彩色电视、液晶电视、高清电视等几个发展阶段,但是这些显示技术只能向人们提供三维场景的一个侧面,传递的是二维信息,没能提供场景的深度信息。而 3D(三维)显示器可以将三维的场景展现给观众,使观众获得的信息量更加丰富,观看时仿佛身临其境。

### 1.1 3D 显示技术的发展和现状

人类初次接触 3D 显示技术是 1600 年左右。由 Giovanni Battista della Porta 提出的体视绘图技术,通过对一个物体由两个方向来绘制两张图画,并分别将其送入人的左、右眼实现 3D 显示,这是人类对 3D 显示技术的一个大胆尝试,也是今天基于双目视差原理的 3D 显示技术的雏形。由于当时还没有照相技术,无法获得精确的图像,这项研究陷入了困境,也自此沉寂了两百多年。直到 1827 年 Joseph Nicephore Niepce 发明了照相技术之后,3D 显示技术又再次回到人们的视野。1838 年,Wheastone 在英国皇家学会会议上提出了一种体视镜技术,用照相机在不同的方向上所拍摄得到的一个物体的两张照片,然后通过反光镜的反射将两张照片分别送入人的双眼,从而得到 3D 效果<sup>[1]</sup>。随后又有很多研究人员提出许多不同结构的体视镜技术,如 Brewster 体视镜、Holmes 体视镜等,这类技术称为体视镜 3D 显示技术。这类技术向人眼提供的只是一对双眼信息,只能合成一个视角的立体图像,观看自由度非常小。1853 年,英国人 Rollman 提出了立体照片方案。1888 年,Fleece 和 Green 开始制作立体电影。

进入 20 世纪,随着相关科学技术的快速发展,3D 显示技术也逐渐摆脱一些技术瓶颈的制约进入一个新的阶段。1908 年,法国人 M. G. Lippmann 提出了基于二维微透镜阵列的集成成像 3D 显示技术,但是由于当时实验条件的限制,该技术还只是停留在理论阶段。1911 年,莫斯科大学的 Sokolov 用针孔阵列代替微透镜

阵列进行了初步的实验,但是效果并不理想<sup>[2]</sup>。1918 年,美国的 Kanolt 提出了一种具有较广视角的视差全景照相技术,采用连续拍照的方法获取一空间物体的连续视差图像,使得观看者在移动的过程中可以看到空间物体的不同侧面,大大提高了观看立体图像的自由度。1915 年,世界上最早的立体电影在纽约问世,引起轰动。1938 年,好莱坞开始制作立体照片方式的立体电影。1961 年,美国 TAGA(图标艺术联合会)将柱透镜光栅图片的制作工艺列入会议议题,这是一个创造性的标志,为后来柱透镜光栅立体显示技术器奠定了基础。1948 年,英国的 D. Gabor 提出了全息照相术的原始方案,但当时的目的不是用于成像,而是用于改进电子显微镜<sup>[3]</sup>。随后,许多研究人员发现它能够用于立体像的再现,随即出现了白光再现全息术,其包括 1962 年 Denishok 提出的光栅全息术,1968 年 McGickert 提出的全息立体照相术,1969 年 Benton 提出的彩条全息术。1974 年,日本开始转播立体照片方式的立体电视节目。1983 年,德国的 Harwing 发明了圆筒面旋转方式的 3D 显示方式,美国的 Janson 利用高速旋转的二维 LED 实现 3D 显示,这两种技术就是如今体 3D 显示的雏形。

进入 21 世纪,随着计算机技术和平板显示技术的高速发展,3D 显示技术得到了空前的发展,许多 3D 显示的设想都变成了现实,并有成熟的产品进入市场<sup>[4]</sup>。3D 显示有望取代传统的 2D 显示成为下一代的主流显示方式。面对巨大的发展空间和诱人的经济效益,世界各国也都开始重视 3D 产业的发展,都希望在这个具有广阔市场空间的领域内抢占先机。基于液晶开关眼镜和偏振眼镜的 3D 电视已经日趋成熟并且进入市场,光栅 3D 显示器也在

些展览会上出现。结合 2D/3D 兼容、头部跟踪、互动等技术,已经实现了立体效果良好且有交互功能的 3D 显示系统。另外,已经研制出了具有九千万体素的体 3D 显示系统,实现了全视角的 3D 显示,完全达到虚拟实境的效果。在全息 3D 显示方面也已开发出利用全息技术再现影像的立体影像显示器,目前又研究出了一种可擦写光致折变聚合物全息 3D 材料,有希望在未来实现动态的全息 3D 显示。好莱坞电影《阿凡达》上映后,人们惊叹立体显示技术带来的视觉冲击力,产生了身临其境、更加接近真实世界的感受,其带来的经济效益也可见一斑。3D 显示技术在未来的信息显示领域中必然成为争夺的焦点<sup>[5-9]</sup>。

总之,近两百年来,3D 显示技术一直受到人们的关注,在发展中不断地成熟起来。在发展过程中,虽然出现了一些性能较好的 3D 显示器,但是相对 3D 显示领域巨大的前景空间,这些远远不够,还有太多的关键技术问题需要更多的研究人员去解决。

### 1.2 3D 显示技术简介

现在 3D 显示技术已逐渐进入商品化阶段,已经有部分的 3D 显示产品从实验室进入了普通家庭。随着 3D 显示技术的进一步发展,会有越来越多的 3D 显示产品进入文化、教育、影视、医疗、通信、军事等领域。



### 1.2.1 3D 系统的组成

3D 系统涉及多方面的技术,主要由 3D 内容获取、图像编码、传输、图像解码、3D 显示五个部分组成<sup>[10-11]</sup>,具体如图 1-1 所示。采用等间距相机阵列记录三维场景,获得视差图像。编码系统将获得的视差图像信息除冗余信息后编码成便于传输的视频流,经传输后进入解码器,按照显示端的要求重建视频信号后送至 3D 显示器以显示 3D 图像。

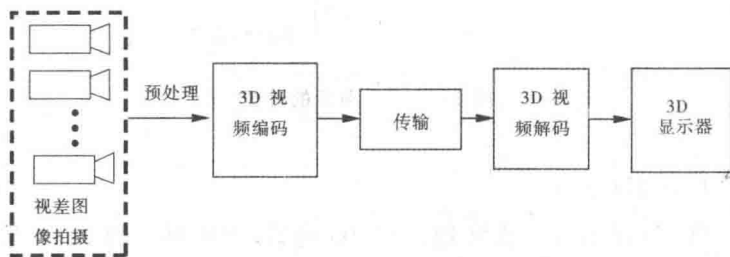


图 1-1 3D 系统的组成

### 1.2.2 3D 显示的分类

人类之所以能感知具有深度感的 3D 图像,主要依靠立体视觉原理。研究人员依据这个原理,研制了许多种类的 3D 显示设备,如眼镜 3D 显示、头盔 3D 显示、全息 3D 显示、集成成像 3D 显示和光栅 3D 显示等。诸多种类的 3D 显示可以按照成像方式和是否需要辅助观看设备分类。按照成像方式,3D 显示分为真 3D 显示和助视/光栅 3D 显示;按照是否依靠辅助观看设备,分为裸视 3D 显