

全息成像概论

QUANXI CHENGXIANG GAILUN

韦 穗 编 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社

全息成像概论

QUANXI CHENGXIANG GAILUN

韦 穗 编 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

全息成像概论/韦穗编著. —合肥:安徽大学出版社,2013.1

ISBN 978-7-5664-0590-6

I. ①全… II. ①韦… III. ①全息成像—概论 IV. ①TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 222573 号

全息成像概论

韦穗 编著

出版发行:北京师范大学出版集团
安徽大学出版社
(安徽省合肥市肥西路3号 邮编 230039)
www.bnupg.com.cn
www.ahupress.com.cn

经 销:全国新华书店
印 刷:中国科学技术大学印刷厂
开 本:184mm×260mm
印 张:11
字 数:267千字
版 次:2013年1月第1版
印 次:2013年1月第1次印刷
定 价:30.00元
ISBN 978-7-5664-0590-6

策划编辑:李梅 武溪溪
特约编辑:章权兵
责任编辑:武溪溪
责任校对:程中业

装帧设计:李军
美术编辑:戴丽
责任印制:赵明炎

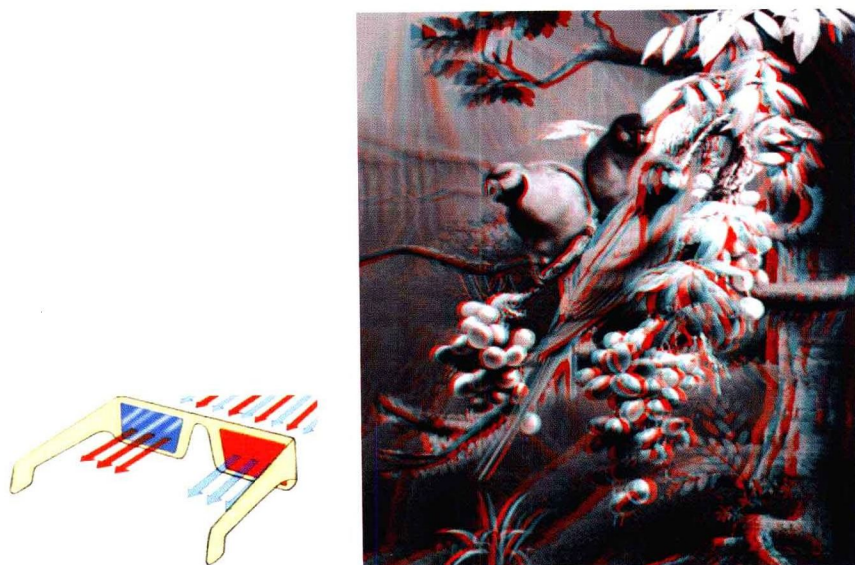
版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话:0551-65106311

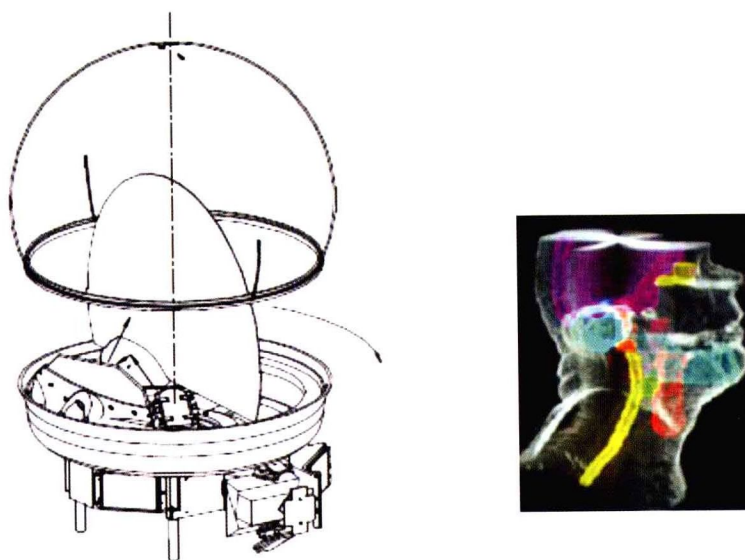
外埠邮购电话:0551-65107716

本书如有印装质量问题,请与印制管理部联系调换。

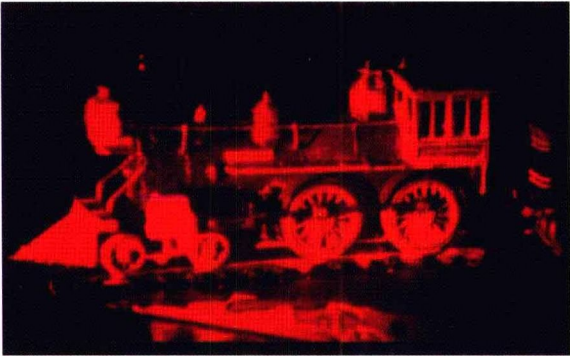
印制管理部电话:0551-65106311



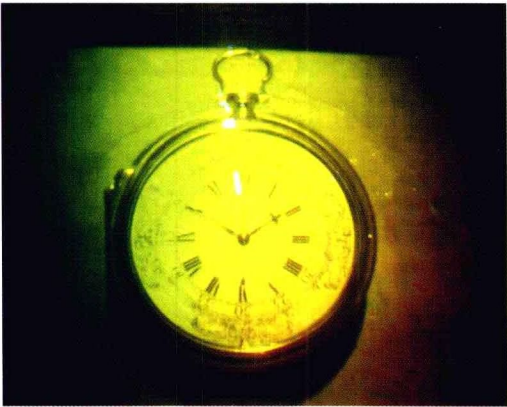
彩图 1 彩色立体显示技术



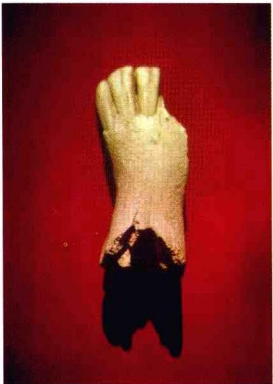
彩图 2 Perspecta 显示用一系列的 2×198 图像投影到旋转在 900 rpm 的一个屏上来产生 3D 效果。



彩图 3 “列车和小鸟”。第一个用激光制作的全息图。此先驱性的图像是在 1964 年由 Emmett Leith 和 Juris Upatnieks 在 Michigan 大学创造的 (<http://www.holophile.com/history.htm>)。



彩图 4 基于全息图的超真实图像



彩图 5 基于彩色全息图的超真实图像:上一个冰川时代(大约 13500 年前)的 马的颌骨。
[ISDH 2009]

• II •



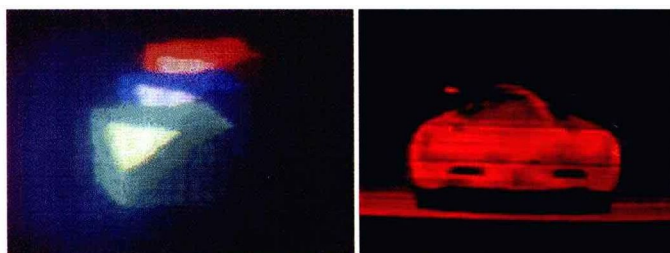
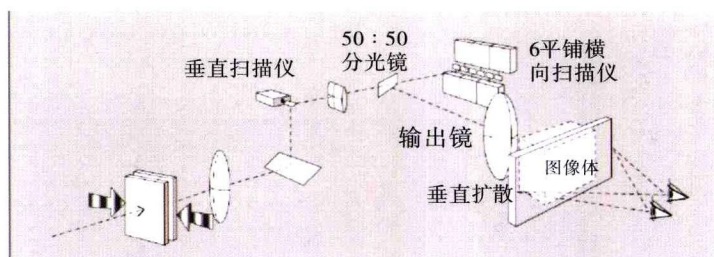
彩图 6 中国首枚全息邮票



彩图 7 首次出现在人民币上的全息图



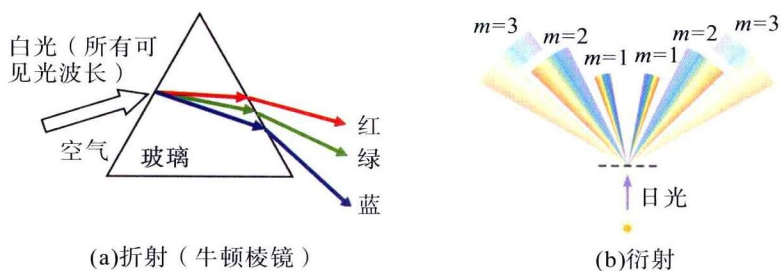
彩图 8 首部采用全息术的电影



彩图 9 由 MIT 空间成像组发明的 Mark-I 显示和图像



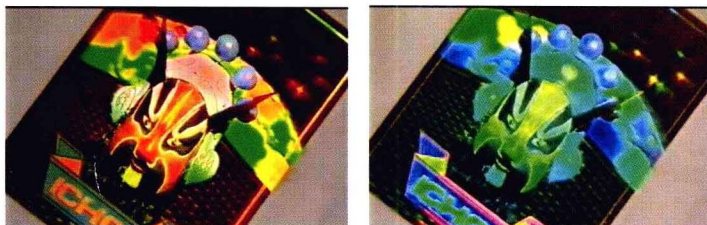
彩图 10 中国魔镜:公元前 11 世纪 (Se-yuen Mak et al ,Secrets of the Chinese magic mirror replica,2001 Phys. Educ. 36 102-107)



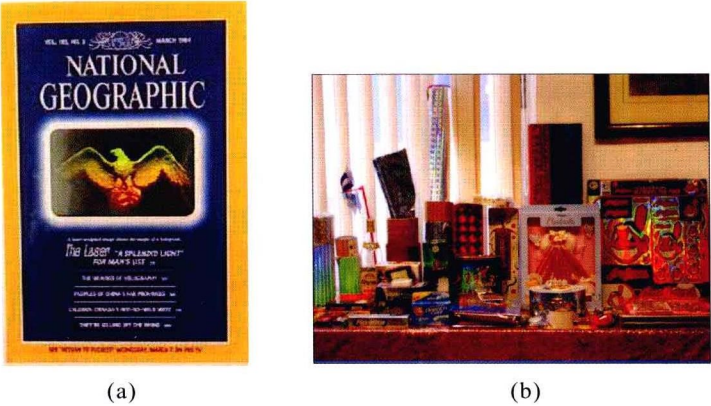
彩图 11 在光路中的折射和衍射



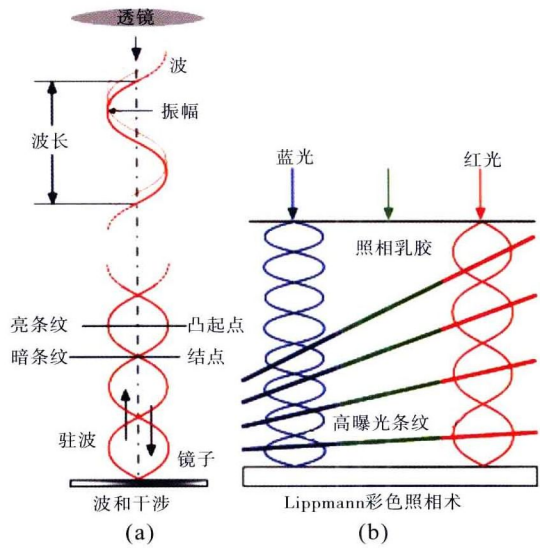
彩图 12 中国的身份证采用了晶体的光各向异性,当卡片的朝向不同时,颜色会产生变化。



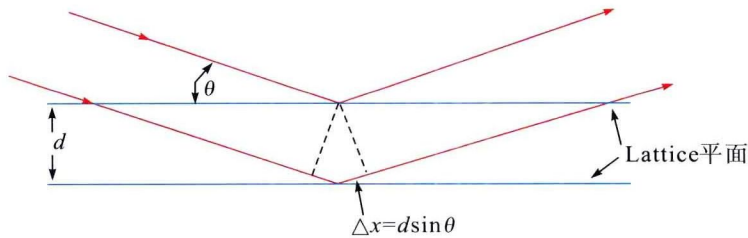
彩图 13 在一幅彩虹全息图中不同垂直视点得到的是图像色调的变化而不改变视图



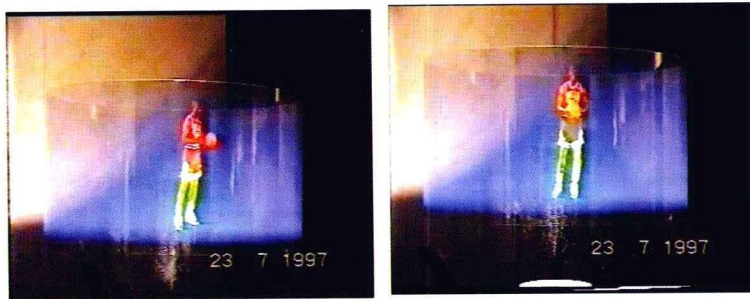
彩图 14 (a)第一个将全息图印在封面上的公开发表的杂志 (<http://www.holography.com/history.htm>, 18. 04. 04); (b)由深圳 AFC 技术有限公司生产的彩虹全息图。



彩图 15 (a)由镜子产生的光场的反射形成一个驻波;(b)Lippmann 如何用驻波在照相术中编码颜色的示意图。



彩图 16 布拉格光栅的作用就像一个波长选择镜



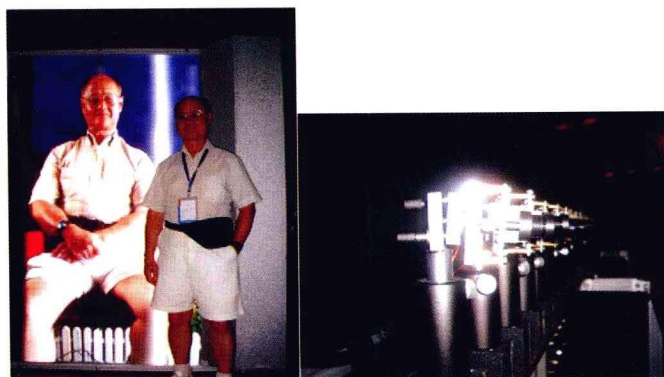
彩图 17 圆柱立体视图中的两个视图,取自深圳泛彩溢技术有限公司网站



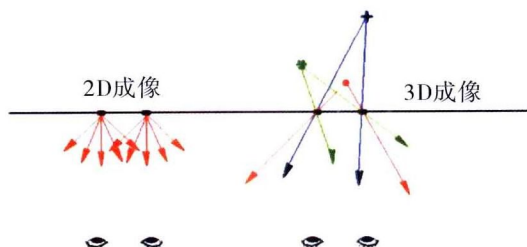
彩图 18 全息立体图的例子:左图:“Kelly”:第一个压制的全息立体视图;右图:小丑 Ken Haines。



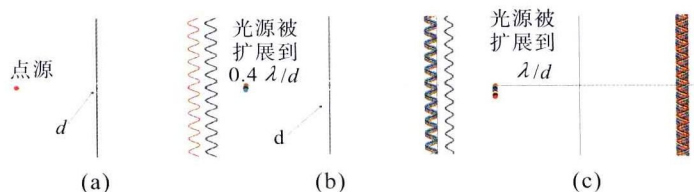
彩图 19 张择端,“清明上河图”,十二世纪。长丝卷,24.8 cm×528.7 cm。中国北京故宫。
长卷给出的视图包括了风景、建筑、人群和在城市节日时的许多事件和活动。



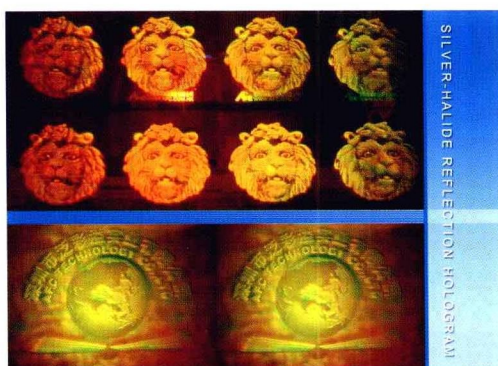
彩图 20 实时彩色 3D 肖像显示以及 Tung H. 教授本人,源于深圳泛彩溢技术有限公司。屏幕的尺寸为 $1.8 \text{ m}^2 \times 1.3 \text{ m}^2$,被称为具有大视场的观看感知并产生连续自然的 3D 图像。



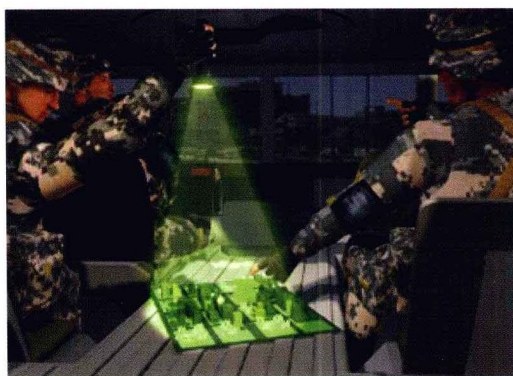
彩图 21 HoloVizio 成像与 2D 成像的比较



彩图 22 (a)点源的 2 针孔 Yang 实验;(b)光源被扩展到 $0.4 \lambda/d$,不相干光源使相加条纹开始相消;(c)光源被扩展到 λ/d ,没有条纹存在(消失)。



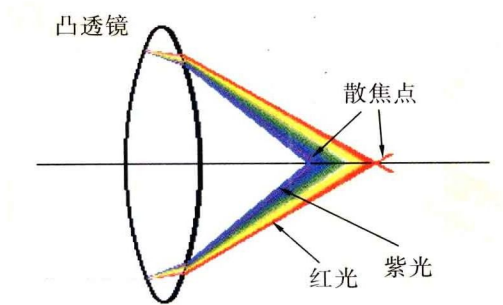
彩图 23 高衍射效率的银卤化物全息乳胶(AFC 技术有限公司,深圳)



彩图 24 Zebra Imaging 用光聚合物胶片产生 3D 全息地图



彩图 25 激光斑点的减少。(a)没有多帧的积分的效应;(b)有多帧的积分的效应



彩图 26 光的色差:可见光由不同的颜色组成,每种颜色有不同的频率。当它们经过一个凸透镜时,它们被折射的程度是不同的,因此会产生一个散射的聚焦点,即图像将不会在聚焦点聚焦。



彩图 27 用平面作为全息基元来计算菲涅尔全息图



彩图 28 用声波阵面模拟方法产生的全息图:(a)星的轮廓图,被放置在不同的空间平面上;(b)平行四边形的轮廓图。

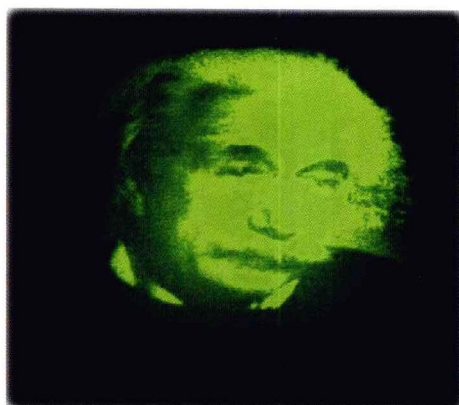
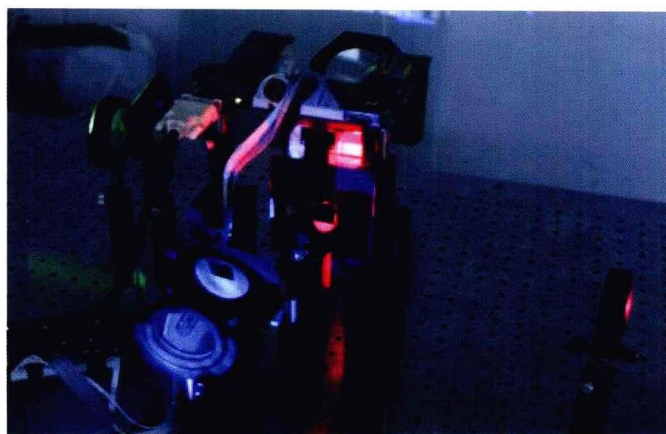
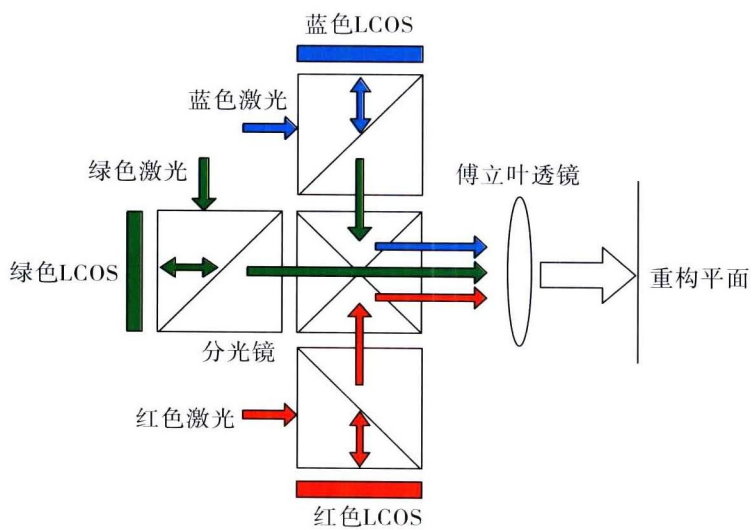


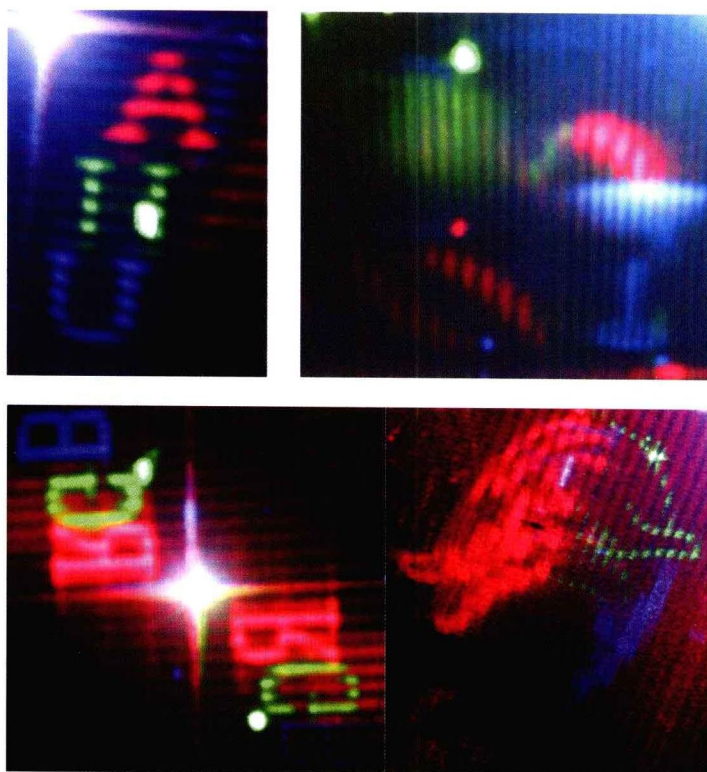
图 29 加载了数字闪耀光栅和球相位函数的相位全息图的重构图像



彩图 30 用于做实验的显示装置的光路配置



彩图 31 三片 LCOS 加三个 PBS 和一个 X 立方镜光系统的示意图



彩图 32 三片 LCOS 装置得到的光学重构

前言

我们知道人类获取的信息 70%~80% 来自视觉,从此意义上说,成像构成了信息学科的主要内容。今天的成像工业正面临一个新的挑战,即寻求新的更科学且更有吸引力的方式来表现信息,它将是 3D 成像,而全息成像将成为 3D 可视化工具的最终目标。

全息术是涉及光波场和比光波频率更高的电磁波场的记录和重构的一门科学,它由 Dennis Gabor 博士在 1948 年创造。这是一项基础性、奠基性的工作,Dennis Gabor 因此获得了 1971 年的诺贝尔物理学奖。

全息术的英文单词 holography 是由希腊词演化而来,表示“完全记录”的含义。这里的“完全”是为了强调全息术与照相术的区别。众所周知,光波场的振荡频率接近 10^{15} Hz,没有一个现有的光传感装置能直接并同时记录光波场的振幅和相位信息。在传统的照相术中,光的强度被获取,但是编码了景物深度或形状的、非常关键的光相位信息却被丢弃;而在全息术中,振幅和相位能被同时记录,即便记录材料仅能响应光的强度。

经过多年研究,全息术已经成为推动无数光学和非光学技术发展的支柱。全息术被用于 X 射线成像,可以同时形成骨骼和器官的 3D 图像。全息数据存储技术可以在极小的面积上存储巨量的数据。全息光镊利用计算机产生的全息图得到能用于捕获和移动介观物体的光陷阱的 3D 形状。在适应性光学中,全息术被用于调制光以便来校正各种光系统中的像差,例如人眼和大气光学系统中的像差。近期研究显示:用全息术衍射形成的特定的空间波阵面可以穿过不透明且高度散射的材料。总之,全息光元件可以实现光学镜、透镜、光栅或其组合功能,并用于各种各样的技术装置中,例如光互连和开关、操纵纳米粒子和生物传感器等。

全息术也是可用于制作 3D 图像的技术。虚拟现实系统和 3D 图像可视化领域的研究者们已经认识到,我们当前所使用的视觉装置并没有发挥其全部潜力。当前,3D 成像市场正在发展,而全息成像是其中真正的 3D 可视化工具,因为它能充分地表达人类感知 3D 景物的深度信息。

本书的章节编排具体如下:

第 1 章首先讨论人类视觉系统的性能,特别是人的 3D 感知。接下来对几种 3D 显示技术作一个简要的综述,包括双眼立体、空间体和全息技术。然后从历史背景角度为读者介绍基本的全息术概念,其中还特别提到古代中国的魔镜,在太阳光照射下,它可以产生衍射效应并形成可观察到的全息图像。

本书内容涉及多学科的深度交叉。但是,全息术基本上还是建立在相当复杂的光学物理定律之上。因此,第 2 章聚焦于波动光学的一些基本知识,希望读者能了解光学的一些基本原理,例如麦克斯韦(Maxwell)方程、波动方程、亥姆霍兹(Helmholtz)波动方程、标量衍射理论、菲涅尔(Fresnel)与夫琅和费(Fraunhofer)逼近以及偏振等。根据本书主题的需要,我

们在本章中还介绍液晶的光电特征。液晶装置是目前唯一可以实现强度、相位和偏振调制的技术,液晶无疑将继续在信息技术时代扮演重要的角色。

下面几章内容包括光全息术、计算机产生全息图和全息视频显示,本书将从光学与计算最优结合的新角度来论述。

第3章给出经典光全息图的基本类型,但不追求广泛的综述。它们基本是由全息术的几位伟大的先驱者所发明的经典光全息术,例如同轴、离轴、彩虹、反射全息图等。然后介绍全息双眼体视图,它在本质上是一个由上千幅图像合成的合成全息图,这些图像对应3D景物中相应的视图。这种构图方法早已在中国山水画中广泛使用,例如《清明上河图》(1085—1145)和《乾隆南巡图》(1770)。接下来,我们用一小节介绍由深圳泛彩溢公司范诚博士带领研制的、被他们命名为“全息功能屏”的成果,我相信这是当今世界上最大的全息双眼体视图。一种称为“全息屏”的技术也在本章中介绍,它有可能提供一种3D显示的新途径。最后,本章给出一些相关的实用全息术,包括光源、记录媒质的特征、使用工具制作简单全息图的过程。

第4章围绕计算机产生全息图这个议题展开。此技术将灵活的计算和光学结合起来,避开了传统方法中的若干限制,这些限制主要来源于在全息图记录阶段采用相干光和湿法的化学处理。Brown和Lohmann于20世纪60年代中期首先提出了计算机产生全息图(CGH)技术。此后,一种纯相位编码的CGH由Lesem提出,并在当今商业透镜中的应用日益增加。1989年,美国MIT大学的媒体实验室空间成像小组创造了第一台实时3D全息图像装置,其中采用一种称为“由衍射确定计算”的新型计算,以取得更快的速率和更低的带宽。这些相关议题将分别在基于单元的计算、纯相位技术和基于解析的计算等小节中具体介绍。实现3D全息成像的一个主要障碍(如果不能说是唯一障碍的话),是缺乏实时获取自然界景物的能力。衍射场的非干涉采样或一种新的相位检索框架将在这里做简单的介绍。在本章的最后一节,我们将探讨数字全息术,该技术用一个数字电荷耦合器件(CCD)实时地记录全息图,然后用数值方法重构。因此,该技术把物理光学和复杂的计算方法相结合,使其性能得到了实质性的提高,全息术正在向计算全息术转变。

第5章介绍当代最新技术——全息视频技术。一个能实时显示3D运动图像的光电混合装置,首先由把全息术从胶片时代带入数字时代的Stephen A. Benton发明。第一个能显示3D全息视频的系统由声光调制器构成,并由此激发了该领域的无穷生机。其后建立在数字微镜系统(DMD)和硅基液晶装置(LCOS)的显示系统由许多研究小组陆续开发出来。这些显示系统的核心是空间光调制器(SLM)。作为一个例子,本章对基于液晶的SLM进行简单的介绍,重点探讨原理性特征和所面临的主要挑战,然后将介绍若干代表性的系统,包括基于声光调制器显示系统、基于数字微镜装置(DMD)显示系统和基于硅基液晶显示系统(LCOS)。我们研究小组正在研究开发基于DMD和LCOS的动态全息显示样机,这里也将我们项目进展的结果报告给读者,同时还包括我们对未来研究中可能得到的理想结果的预测。我们认识到,使用当前商业上买到的SLM对全息视频显示是不适用的,主要的问题在于小衍射角和低分辨率。当然,当前的器件不能很好地适用于3D应用不应该是这些器件的过错,因为它们是专门为2D显示而设计的,而用于3D显示是后来借用的。目前的研究表明我们正走在开发新技术的道路上。

本书出自我为高年级本科生和一年级研究生编写的教案和我的研究小组在此方面的研

究结果,这些研究得到了中国国家自然科学基金资助(项目号为 60473102 和 60872106)。目前,人们充分认识到全息术已经成为现代光学和成像技术的一个主要支柱,这也是向学生介绍有关现代光学及光学与电子学交叉中的科学知识与技术问题的重要主题。强烈推动我写此书的动力还包括我的演讲和相关研究得到工业界的一致欢迎。

因为本书是一本引论,我在其中着重采用了图和解释性的材料,目的是为了能更好地阐述基本的和先进的概念。全息成像仍然是一个正在发展的领域,理论和技术上还有许多进一步研究的空间,我希望此书能对任何希望了解和开发全息成像技术的人有益。

韦 穗

2012 年 6 月

目 录

前 言	1
第 1 章 全息术:终极 3D 可视化工具	1
1.1 人的 3D 感知	2
1.1.1 眼睛的构造	3
1.1.2 双眼立体感	4
1.1.3 调节和会聚	6
1.1.4 运动视差	7
1.1.5 平面图片信息	7
1.1.6 光度视觉参数	9
1.2 3D 可视化系统	11
1.2.1 双眼立体显示	11
1.2.2 自主双眼立体显示	14
1.2.3 空间体显示	16
1.2.4 全息术	17
1.3 历史背景	18
1.3.1 一种两步无透镜成像过程	19
1.3.2 白光全息术	20
1.3.3 计算机产生全息图	22
1.3.4 全息视频显示	22
1.3.5 中国魔镜	23
1.3.6 触角式全息术	24
第 2 章 波动光学	26
2.1 光波的基本特性	27
2.1.1 麦克斯韦方程和波动方程	28
2.1.2 复波表示和亥姆霍兹波动方程	29
2.1.3 平面波和球面波	30
2.1.4 平面波的角谱表示	32
2.2 标量衍射理论	33
2.2.1 惠更斯-菲涅尔原理	34
2.2.2 菲涅尔与夫琅和费逼近	36
2.2.3 菲涅尔逼近的另一种推导	39