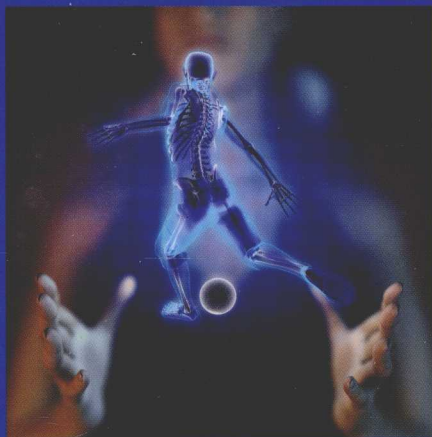


光科学与应用系列

总主编 王之江

数字化全息 三维显示与检测

王 辉 编著



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

014023014

光科学与应用系列

总主编 王之江

0438.1

03

数字化全息 三维显示与检测

王 辉 编著



0438.1

03



北航

C1709883



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在介绍计算全息和数字全息基本原理的基础上,着重论述数字化全息最新理论和技术,尤其是在三维显示和测量中的理论和应用技术。内容包括计算全息的算法、计算全息三维显示技术、全息数字化再现算法、三维显示信息量研究以及彩色计算全息颜色评价等。

本书可供光学及光学工程类研究生、教师和研究工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字化全息三维显示与检测 / 王辉编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2013

(光科学与应用系列)

ISBN 978-7-313-10080-1

I. ①数… II. ①王… III. ①数字化—应用—全息光
学 IV. ①0438.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 163491 号

数字化全息三维显示与检测

编 著: 王 辉

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 浙江云广印业有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

字 数: 249 千字

版 次: 2013 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-10080-1/O

定 价: 68.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 13.25

印 次: 2013 年 11 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0573-86577317

丛书编委会

总主编

王之江(中国科学院院士)

副总主编

楼祺洪(中国科学院上海光机所研究员)

刘立人(中国科学院上海光机所研究员)

编 委(以拼音为序)

陈良尧(复旦大学信息科学与工程学院教授)

陈险峰(上海交通大学物理系常务副主任、光科学与工程研究中心主任、教授)

刘 旭(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室主任、教授)

饶瑞中(中国科学院安徽光机所副所长、研究员)

王清月(天津大学超快激光研究室教授)

徐剑秋(上海交通大学物理系教授)

翟宏琛(南开大学现代光学研究所教授)

赵葆常(中国科学院西安光机所研究员)

Ting-Chung Poon(美国 维珍尼亚理工州立大学电子与计算机工程系教授
Department of Electrical and Computer Engineering Virginia Polytechnic
Institute and State University)

总 序

光学是物理学的一部分,是物理学的一个分支,也是当前科学研究中最活跃的学科之一,光学的发展是人类认识客观世界的进程中一个重要的组成部分。光学从产生开始就具有强烈的应用性,并形成了光学工程这一独特技术领域,在人类改造客观世界的进程中发挥了重要作用。光学实验的结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具,如望远镜对于天文学与大地测量学;显微镜对于生物医学与金相学;光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。

从爱因斯坦辐射理论可以预见到激光存在。20世纪中叶,激光问世对光学及相关科学和技术影响很大。激光的本质是受激辐射形成的高亮度、高功率密度,从而派生出种种前所未有的非线性物理现象;形成非线性光学、激光光谱学等新学科分支;开拓了远紫外到太赫兹等新辐射波段;提供了超快过程研究的工具。激光作为新光源已应用于多个科研领域,并很快被运用到材料加工、精密测量、信号传感、生物医学、农业等极为广泛的技术领域。产生了光通讯、光盘等新产业。此外,激光还为同位素分离、受控核聚变以及军事上的应用,展现了光辉的前景。成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

信息科学原先以电子学为基础,如电报、电话、雷达等领域。现代科技的发展使图像信息日益重要,光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术在近代都有非常大的进步。光信息科学已是信息科学的重要组成部分。

总之,现代光学和其他学科、技术的结合,在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响,成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率的越来越强有力的武器。学术的力量是科技进步的基础,上海交通大学出版社在这个时候策划出版一套“光科学与应用”系列丛书,是一件非常合乎时宜的事情。将许多专家、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,对促进我国光学事业的发展具有十分重要的现实意义。

本套丛书的内容涵盖光学领域先进的理论方法和科研成果。图书类别主要以专著、教材为主。旨在从系统性、完整性、实用性和技术前瞻性角度出发,把理论知识与实践经验结合起来,更好地促进光学领域的学术交流与合作、让更多的学者了解该领域的科研成果和研究趋势,为促进我国光学领域科研成果的转化、加速光学技术的发展提供参考和支持。

可以说,本套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了众多国内外光学专家、学者的智慧和成果。期望这套丛书能有益于光学专业人才的培养、有益于光学事业的进一步发展。同时能为祖国吸引更多的愿投身于光学事业的仁人志士。

王之江

前 言

人类生存在三维(3D)空间中,对三维世界丰富信息的记录、测量、分析、重构和显示进行了长期不懈的探索。目前,微观物体三维结构测量、宏观物体三维面形检测、三维显示、三维影视等一系列与三维相关的术语的频繁出现,不仅说明三维相关领域已经成为当今科学技术研究的热点,也同样预示着人类社会将进入现实和虚拟、物质与精神的三维世界。

在已经出现的所有三维测量和显示技术中,基于光波波前重构的信息记录、分析和再现技术是最忠实、最完美的三维信息表达技术。全息照相是实现基于波前再现的最有效的手段。随着计算机技术和光电成像技术的飞速发展,将光学全息理论、技术与信息技术相结合,产生了数字化全息,为全息术开辟了一个崭新的天地。利用计算机和光电技术的灵活性和精确性,各种简捷方便的全息三维立体显示和测量技术相继出现。全息数字化技术将使得关于全息技术应用的早期梦想变为现实。

本书就数字化全息原理和应用进行了较为系统的讨论。第1章对全息发展历史进行了较为全面的综述;第2章讨论信息载体的光波传播问题,并分别讨论了光全息、计算全息和数字全息基本原理;第3章介绍光场的信息问题,分析了计算全息和数字全息在满足信息有效传递情况下的抽样问题,讨论了数字全息记录元件参数对再现像的影响。第4章分析计算彩虹全息理论与技术,对其算法所涉及的相关问题进行了详细讨论。第5章基于颜色匹配及传递原理,研究计算机显示三原色系统和彩色计算全息再现像颜色之间的关系。在分析彩色彩虹全息颜色合成原理的基础上,对再现像的颜色进行评价。第6章分析了光学全息和计算全息的优缺点,讨论如何将计算和光学方法相结合,实现大视场、大视角的全息三维显示。第7章讨论数字全息三维信息检测的基本原理和基本技术,介绍了作者的一些相关研究成果。第8章主要讨论计算全息三维物体数据的获取及处理技术,同时介绍了目前数字化全息三维显示的一些进展。

本书第1~7章由王辉教授撰写,第8章部分内容由李勇教授撰写。李勇教

授、马利红博士对全书进行了校对。由于作者水平有限,书中错误之处,恳请读者及时指正。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(NO. 11374267)和浙江省自然科学基金项目(NO. Z1080030)的资助;本书的出版获得了浙江师范大学出版基金的资助。

在繁多如星的三维立体显示技术中,人们对全息技术情有独钟,原因是全息显示是一种自然的三维重构,和人眼的立体视觉最匹配,所以自从它诞生以来,人们一直追求利用全息来达到理想的三维显示。从第一幅同轴全息图的诞生到现在,它的发展经历了从激光再现全息到白光再现全息、从单色全息到彩色全息、从光学全息到数字化全息的过程。如今光电成像技术、计算全息技术、空间光调制器及数字光处理技术的快速发展,为全息的应用开拓了更为广阔的天地。希望本书对从事三维显示和检测的研究人员有所帮助。

王 辉

2013年6月于浙江师范大学

目 录

第1章 全息发展概述	1
1.1 计算全息	2
1.2 数字全息	4
1.3 全息三维显示	7
参考文献	11
第2章 数字化全息基本原理	15
2.1 光的衍射与干涉理论	16
2.2 光学全息原理	22
2.3 计算全息原理	28
2.4 数字全息原理	38
参考文献	45
第3章 三维显示信息量及其数字化全息抽样理论	47
3.1 信息量基本概念和定律	47
3.2 数字化全息抽样	52
3.3 记录器件参数对数字全息再现像的影响	61
参考文献	67
第4章 计算机制彩虹全息	68
4.1 彩虹全息	68
4.2 计算彩虹全息线全息图的形成	76
4.3 彩色彩虹计算全息原理	85
参考文献	94
第5章 彩色计算全息的颜色匹配	95
5.1 色度学基本原理	95
5.2 计算机制彩色全息术的三原色系统	103

5.3 计算机制彩色彩虹全息再现像颜色	111
5.4 彩色全息再现像颜色误差分析	114
参考文献	120
第6章 计算机和光学联合制全息技术	121
6.1 全息图信息量与视差和视场关系	121
6.2 全息图的空间频率分布	125
6.3 计算全息图信息的优化利用	128
6.4 计算机-光学联合相位共轭全息图	131
6.5 计算机-光学联合彩色彩虹全息图	135
6.6 计算机-光学联合反射全息图和大视角全息图	142
参考文献	144
第7章 数字全息三维信息检测	145
7.1 数字全息三维光场重构原理	145
7.2 数字全息零级和共轭像的消除	155
7.3 大视角数字全息图	165
参考文献	174
第8章 三维物体数据获取及其显示	175
8.1 面结构光照明三维测量原理	175
8.2 动态场景的三维信息获取	178
8.3 计算机建模场景三维数据获取	183
8.4 数字化全息三维显示	189
参考文献	197

第1章 全息发展概述

光学全息技术也称作全息照相术^[1],其物理原理是基于光的干涉和衍射现象。全息技术的过程是,首先通过光的干涉方法将携带物体信息的光的波前“编码”成干涉条纹记录下来,然后利用光的衍射原理“解码”再现与物体相关的信息。值得注意的是,光的干涉与衍射现象不仅终结了数百年的光的本性之争,而且成为物质波粒二象性的直接证据。更值得关注的是多项诺贝尔物理学奖与干涉、衍射有关:1907年美国人 A·A·迈克耳逊因发明了光学干涉仪获奖;1914年德国人 M·V·劳厄因发现晶体中的 X 射线衍射现象获奖;1937年美国人 C·J·戴维森和英国人 G·P·汤姆森因发现晶体对电子的衍射现象获奖;1953年,荷兰科学家 F·泽尼克因相衬滤波显微镜而获奖。而与全息照相相关的技术获得了两次诺贝尔奖:1908年法国人 G·李普曼因发明了彩色照相干涉法获奖,1971年英国人 D·加博尔因发明并发展了全息摄影获奖。

全息术的发展经历了三个大的阶段。第一阶段是 20 世纪 50 年代的初创时期,这一阶段的标志性成果是同轴全息图和全息术基本理论的创立。第二阶段开始于 20 世纪 60 年代,由于激光光源的出现,使全息术研究进入了一个持续数十年的快速发展阶段,这一阶段的标志性成果有:① 1962 年利思(Leith)和厄帕尼克斯(Upatnicks)发明了离轴全息图,解决了孪生像的困扰^[2];② 1962 年 Denisjuk 发明了反射式体积全息图,首次实现了全息图的白光再现^[3];③ 1963 年 A. V. Lugt 发明了全息复空间滤波器^[4];④ 1969 年 S. A. Benton 发明了彩虹全息图^[5]。这一阶段,全息术的应用渗透到了科学技术的各个领域,最具代表性的成功应用有全息显示、全息干涉测量、全息光学元件等方面^[6~8]。与此同时,计算机全息(Computer-generated Holography, CGH)^[9]和数字全息(Digital Holography, DH)^[10]技术也相继被提出,但因受到计算机技术和相关设备发展等因素制约而进展缓慢。在相当长一段时间,计算机全息仅仅用于特殊光学元件的制作,而数字全息仅仅是一个概念。第三阶段始于 20 世纪末 21 世纪初,这一阶段的特征是全息术的研究与计算机技术、光电子技术以及非线性光学技术紧密结合,发展了一些全新类型的全息术,并在与当代前沿科学研究的结合和应用中,取得了一系列突破性的进展^[11]。随着计算机技术和相关外围设备的迅速发展,全息技术逐渐朝着数字化方向发展。

数字化全息就是在现代信息技术的背景下,计算机和光学全息相结合的产物。数字化全息是区别于激光全息的一类新的全息技术,与激光全息相比更具灵活性,

而且便于进行定量分析和传输。数字化全息研究的主要内容有三个方面:一是数字化全息图的获取,其获取途径可以通过计算机全息技术、光电成像器件或扫描直接记录光学全息图方法得到;二是全息图再现像的数字化重构;三是全息显示,包括全息图打印(Holo-printer)输出^[12,13]和全息影视(Holo-video,或 HoloTV)系统^[14~16]。从数字化全息发展历史来看,上述几个方面的技术由于出现的历史顺序问题,又有各自独立的名称:通过对物光波的数字化综合形成全息图的技术被称作计算机全息术(CGH)或计算全息术(Computing Holography);用光电成像器件直接记录或扫描获得全息图,并进行数字化重构再现像的技术叫做数字全息(DH)^[10],而全息影视技术则被称作电全息(Electro-holography)^[14,15]。事实上,目前越来越多的学者认为上述各种数字化全息技术可统一称作数字全息(DH)^[11,17]。但为了不引起术语使用混乱,本书还是按照传统的表述,将由感光材料获取的全息图称作光学全息图;由计算机计算的全息图称作计算全息图;由数字光电成像器件记录的全息图称作数字全息图。

1.1 计算全息

由于计算机科学技术的快速发展,数字计算机在光学领域得到了广泛的应用,它不仅可以进行光学过程的模拟,而且可以和显示装置连接以实现对大多数光学现象进行仿真。同时由于快速傅里叶变换(FFT)等计算方法的出现,大大缩短了计算机进行傅里叶变换所需的时间,这些都为利用计算机技术制备全息图提供了实现的可能,推进了计算全息技术的发展。计算全息不需要物体的实际存在,只要把物光波的数学描述输入计算机,经计算机编码后得到数字化全息图,然后通过绘图仪或专用的计算全息图缩微系统输出成为可以进行光学再现的全息图,也可以输出到空间光调制器中,进行直接显示。计算全息图不仅可以全面地记录实际光波的振幅和相位,而且能综合出世间不存在的物体波前^[18],因而具有独特的优点和极大的灵活性。

计算全息最早是由科兹马(Kosma)和凯利(Kelly)于1965年提出来的。他们为了检测被噪声掩埋的信号,用人工的方法制作了一个匹配滤波器。滤波器的做法是:先用计算机算出所需要信号的傅里叶频谱,然后用黑白线条对这个频谱进行编码,用放大的尺寸进行绘制,最后以合适的尺寸缩微复制在透明胶片上。后来罗曼(A. W. Lohmann)把通信理论中的抽样定理应用到空间滤波器的制作中,奠定了计算全息图制作的理论基础。到1966年布朗(Brown)和罗曼提出了几种制作二元透过率掩模板的技术,可用单色光再现一般的复值波面^[9]。罗曼首先利用迂回位相效应编码复数波面的位相,这就是后来著名的迂回位相型计算全息图,它

是计算全息技术的真正开端。1967年,巴里斯(D. P. Paris)把FFT算法应用到傅里叶变换计算全息图的计算中,大大缩短了全息图的计算时间^[19]。

在上述计算全息技术取得初步成果的基础上,很多光学和电信工作者对计算全息技术的兴趣陡增,提出了多种计算全息图编码制作技术^[20]。其中包括在计算全息复数信号编码中加离轴参考光或加偏置量,叫做修正型离轴参考波计算全息图^[21]。赖塞姆(L. B. Lesem)等人提出了计算全息图的另一种形式——相息图^[22],因为它有很高的衍射效率并能同轴再现单一图像等优点,使之在计算全息技术中占有重要的地位。

光学全息图一般有振幅型和位相型两类,计算全息图也有这两大类。在这两类中,根据其透过率变化的特征,又可分为二元计算全息图(Binary Hologram)和灰阶计算全息图(Gray-scale Hologram)。振幅型二元计算全息图的振幅透过率只有两个值:0或1,即全息图面是由完全透明或完全不透明的编码孔径构成。振幅型灰阶计算全息图指的是计算全息图的振幅透过率函数按灰阶取值。二元和灰阶计算全息图可用由计算机控制的有灰阶输出的绘图仪绘制,然后缩微在照相底片上记录而成。

位相型计算全息图和光学位相型全息图一样,可由振幅型全息图经过漂白工艺而成。在位相型计算全息图中,依据透过率变化分成位相型灰阶计算全息图(Bleached Gray Hologram)、位相型二元计算全息图(Bleached Binary Hologram)和位相型闪耀计算全息图(Blazed Hologram),由于这类全息图都是经过漂白处理的,故振幅透过率都为1,理想的衍射效率可达到100%。位相型计算全息图也可以通过纯位相空间光调制器(Space Light Modulator, SLM)进行显示^[15]。

与传统的 optical 全息术相比较,计算全息术具有如下优点^[23]:

- (1) 计算机技术和数字图像处理技术的引入,可以方便地利用数字处理方法消除像差、噪声以及记录介质感光特性曲线的非线性等因素带来的不利影响,改善全息图的质量,并且全息图可以直接在电子图像显示器上进行再现。
- (2) 由于全息图是以数字形式存储于计算机中,这使得全息图的保存、传输和复制更容易,甚至可以通过互联网实现全息图的实时传输和异地显示。
- (3) 计算全息术不仅可用于可见光,也可用于X射线、红外、微波等其他电磁波段以及用声波和电子波等进行全息编码和再现。
- (4) 可以实现自然界尚不存在的三维物体的显示,在CAD技术和科学计算数据可视化中有广泛的应用。
- (5) 与三维成像技术相结合获取实际物体的三维数据,解决了光学全息难以拍摄实际景物的限制,比如大楼、人物、彩云以及自发光物体(例如火焰、灯光)等。

光学全息和计算全息本质的差别在于,光学全息唯有实际物体存在时才能制

作,而在计算全息中,只要在计算机中输入实际物体或虚构物体的数学模型就行了。计算全息图的制作和再现过程的步骤如下:

- (1) 抽样,得到物体或波面在离散样点上的值。
- (2) 计算,计算物光波在全息平面上的光场分布。
- (3) 编码,把全息平面上光波的复振幅分布编码成全息图的透过率变化。
- (4) 成图,在计算机控制下,将全息图的透过率变化通过图像输出设备形成可以进行光学再现的实际全息图。
- (5) 再现,这一步骤在本质上与光学全息图的再现没有区别,但是计算全息图可以直接输出到空间光调制器上进行直接再现,从而可望实现全息影视。

计算全息主要应用在如下几个方面:

- (1) 二维和三维物体的显示。
- (2) 在光学信息处理中用于制作各种空间滤波器。
- (3) 产生特定的光波面用于全息干涉计量。
- (4) 激光扫描器。
- (5) 数据存储。

计算全息技术正处于发展中,尚存在很多技术需要突破。关键的问题是用于三维显示的全息图空间带宽积很大,这样对计算机的计算速度、储存容量、图像输出设备的分辨率等都提出了相当高的要求。尤其是在全息实时显示技术中,空间光调制器的时空带宽积和信号的传递速度成为影响全息影视发展的最大瓶颈。

1.2 数字全息

1967年,J. W. Goodman和R. W. Lawrence提出了用计算机进行全息图再现像重建的思想^[10]。1971年,T. Huang在介绍计算机在光波场分析中的进展时,首次提出了数字全息的概念^[24]。随着计算机处理速度的提高和廉价电荷耦合器(Charge Coupled Device, CCD)的问世,20世纪90年代这项技术获得长足进步。数字全息术取得突破是在1994年,Schnars和Jüptner利用CCD直接记录并用计算机数值再现菲涅耳全息图^[25,26],使得全息图的记录和再现完全数字化。此后,随着计算机技术和电子成像设备的发展,数字全息技术进入了一个蓬勃发展的时期。

数字全息和传统全息的基本原理完全相同,也分干涉记录和衍射再现两个过程,但是在记录和再现的实现方式上存在本质的不同。数字全息记录时采用光敏电子记录器件代替全息干版,再现时通过计算机数值计算获取物光波场的复振幅分布。当然,也可以通过电子显示器件直接进行显示。正是因为这些不同,使数字全息术和传统全息相比,具有独特的优势:

(1) 数字全息采用光敏电子器件作记录介质,其感光灵敏度高、曝光时间短,可以记录运动或形变物体的各个瞬态;直接获取数字全息图,进行数值模拟再现,再现操作方便、周期短,有利于实现测量过程的实时化、现场化及远程化;数字化的全息图易于保存、传输和复制,甚至可以通过互联网实现实时传输和异地监测。

(2) 数字全息可以利用计算机技术和数字图像处理技术,方便地对所记录的数字全息图进行图像处理,消除或者减少在记录过程中引入的各种诸如像差、噪声及记录介质感光特性曲线的非线性等因素带来的不利影响,提高再现像的质量。

(3) 数字全息和传统全息相比,最重要的优势在于数字全息通过数值再现得到定量的物光场复振幅分布,不仅可以得到原始物体的强度分布,还可以得到物体的三维形貌分布或相位型物体的相位分布(图 1-1),而这在光学全息中是很难做到的。因此,数字全息术在干涉计量、粒子场分析、无损检测、三维识别、图像加密、显微测量等领域具有广泛的应用。图 1-1 为数字显微成像过程的一个例子。

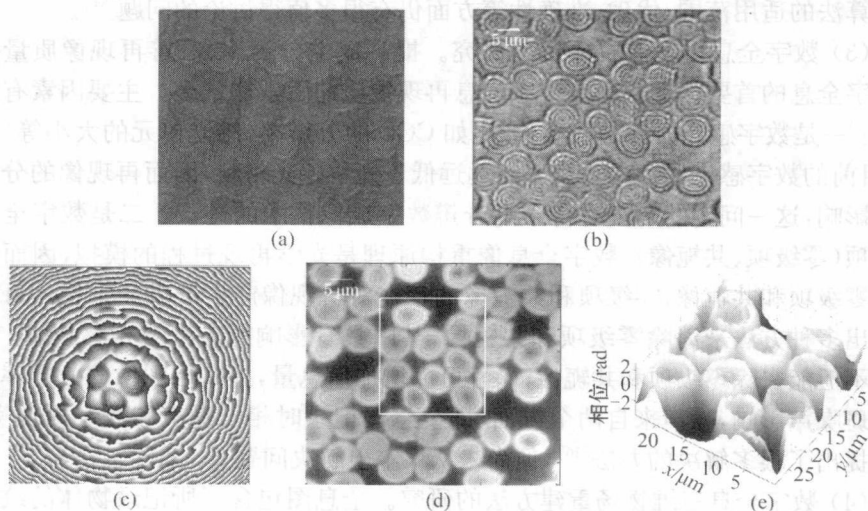


图 1-1 血红细胞的数字全息显微成像结果

(a) 全息图; (b) 再现强度像; (c) 包裹相位图; (d) 相位像; (e) 局部相位像三维图

但是,数字全息最大的问题是光敏电子记录器件的分辨率低和感光面积小。目前,光敏电子器件的分辨率不超过 200 线对/mm,感光面积一般小于 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,与全息干板的高分辨率(至少 3 000 线对/mm)和大感光面积相比,都存在数量级上的差别,因此记录的物体信息量空间带宽很小。同时,在满足采样的条件下,成像孔径很小,进一步加剧了相干成像中不可避免的散斑噪声,像质进一步降低。所以,如何提高数字全息再现像的质量,成为数字全息研究的重要问题,也成为制约数字全息在宏观物体三维信息检测方面得到实际应用的重要难题。但将数

字全息术和显微技术相结合,压缩光场的空间带宽积,满足光敏电子记录器件的采样条件,可以实现小视场高质量成像,这就是数字全息显微术^[27]。数字全息显微镜已经得到了广泛的应用并已经商品化。

目前,数字全息研究主要集中在如下几个方面:

(1) 数字全息记录光路的研究。目的是为了更加方便地记录更多的物光波信息。主要包括合成孔径数字全息记录光路^[28]、将光纤引入数字全息的记录光路^[29]、双波长或多波长数字全息术^[30,31]、部分相干光数字全息光路^[32]、外差式数字全息术^[33]等。

(2) 数字全息重建算法的研究。数字全息再现像重建的理论依据是基尔霍夫衍射积分公式。在不同条件下,可以演化出菲涅耳衍射积分再现算法、卷积再现算法和角谱再现算法。这三种方法被称为数字全息的三种标准重建算法,由于采用了快速傅里叶变换技术,使得利用上述三种标准重建算法均能够实现准实时再现。但从算法的适用范围、优劣、准确性等方面仍有很多值得讨论的问题^[34]。

(3) 数字全息再现像质改善的研究。提高成像分辨率、改善再现像质量是目前数字全息的首要任务。影响数字全息再现像质的因素非常多。主要因素有三个:一是数字感光器件结构参数(比如 CCD 的分辨率、感光单元的大小等)的限制,目前的数字感光器件的分辨率还远远低于光学感光材料,因而再现像的分辨率受到影响,这一问题的解决有待于高分辨数字成像技术的进步。二是数字全息中干扰项(零级项、共轭像),数字全息像重构原理是光学再现过程的模拟,因而同样存在零级项和共轭像,零级项和共轭像的存在对再现像产生严重的干扰。目前已经提出多种方法来消除零级项和共轭像,其中具有影响的方法是相移技术^[35],该技术不但能去除零级项和共轭像,而且可以增加信息量,提高再现像的分辨率。三是散斑噪声影响,噪声来自两个方面,即全息图记录时相干噪声和数字再现噪声。尽管提出了很多解决的办法^[36],但尚未从根本上解决问题。

(4) 数字全息三维物场重建方法的研究。全息图包含了所记录物体的纹理信息和各个点的空间坐标信息,在理论上应该能够通过某种算法,从数字全息图中精确地获取这些信息。目前获取纹理和物点坐标信息的方法是以基尔霍夫衍射积分公式为依据,计算再现光波的波前复振幅分布。复振幅的强度被认为是物体的纹理,复振幅的相位被认为包含物点坐标信息,通过对相位的分析计算可以得到物点的空间坐标^[37]。

(5) 数字全息术的应用研究。数字全息是一种新型的三维信息记录技术和显示技术,它的应用领域还在逐渐地扩展。目前数字全息的应用主要体现在显微术方面^[38~40]。在三维显示日益成为人们关注热点技术的今天,可以展望,数字全息在三维信息获取、检测、传输和显示等方面将会有更为广泛的应用。

1.3 全息三维显示

自光学全息术发明以来,其应用涉及光学信息处理、无损检测、显微术、高密度信息存储等广泛领域。但因全息所具有的三维成像能力是其他任何立体影像技术无法比拟的,所以全息三维显示一直是人们孜孜追求的目标。

1.3.1 光学全息三维显示

1948年,加博尔在Nature上发表的论文“A new microscopic principle”(一种新的显微原理),这就是全息发明的经典文献。显然加博尔全息的目的是为了改善显微镜的分辨率。但这一技术一经提出,人们就关注到其在三维显示方面应用的潜力。但直到具有优质相干性的激光出现后的1964年,利思和厄帕尼克斯才真正实现三维显示。至此,激光全息三维显示的发展走上快车道。到20世纪70年代,光学全息三维显示的基本理论和技术已经发展得相当完善,同时形成了以全息印刷为主的、具有相当规模的全息产业。光学全息三维显示技术标志性的成果主要有如下几个方面:

1) 离轴菲涅耳全息

如前所述,离轴全息是利思和厄帕尼克斯提出的,解决了加博尔全息图再现时直射光和孪生像的困扰。加博尔全息图实际上是同轴全息图,利思和厄帕尼克斯采用离轴参考光与物光干涉,对物光波进行了高频调制,再现时,再现像、直射光以及孪生像处于不同的空间载频中,从而实现了孪生像的分离。1964年他们拍摄了第一张三维物体全息图。菲涅耳全息的特点是具有很大的景深,空间三维感觉逼真,但缺点是只能用相干性非常好的激光再现。

2) 体积全息图

我们知道,全息图实际上是一种光栅结构。当全息图光栅是二维结构时,可以叫做平面全息图;而当是三维光栅结构时,全息图则被称为体积全息图。根据Kogelnik耦合波理论模型^[41],体积全息图对再现光具有很好的角度和波长选择性,因而可以用空间和时间扩展的光源再现全息图,实现全息图在自然白光下再现。当体积全息用于三维显示时,一般情况下,将物光波和参考光波设置成从记录平面正反两面入射到记录介质上,这样拍摄的全息图也可以称作反射全息,图1-2和图1-3是反射全息图的再现结果。反射全息图不仅对再现光具有很强烈的角度和波长选择性,而且因为是反射光再现,与人们观看物体习惯相同,观察再现像很方便。