



装备科技译著出版基金

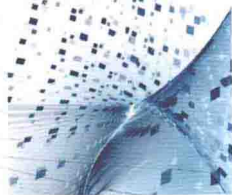
现代光学工程精品译丛

 Springer

# 数字全息显微

## Digital Holographic Microscopy

【美】Myung K.Kim 著  
郭羽 胡亚萍 刘军宁 译  
杨红 姜昌录 校



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



现代光学工程精品译丛

装备科技译著出版基金

# 数字全息显微

Digital Holographic Microscopy

【美】 Myung K. Kim 著  
郭羽 胡亚萍 刘军宁 译  
杨红 姜昌录 校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军—2016—100 号

图书在版编目 (CIP) 数据

数字全息显微 / (美) 金明庚 (Myung K. Kim) 著; 郭羽, 胡亚萍, 刘军宁译. —北京: 国防工业出版社, 2017.2

书名原文: Digital Holographic Microscopy

ISBN 978-7-118-11169-9

I. ①数… II. ①金… ②郭… ③胡… ④刘… III. ①数字技术—应用—全息光学—显微技术—研究 IV. ①TN27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 014864 号

Translation from English language edition:

Digital Holographic Microscopy

By Myung K. Kim

Copyright©Springer Science+Business Media, LLC 2011

All Right Reserved

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 13 字数 240 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

## 译者序

译者在大学期间曾跟随长春理工大学的郑建平教授学习傅里叶光学，对这门学科充满了兴趣，但同时感觉这门学科难度极大。工作后有幸从事了计算全息和数学全息两个课题的研究，并对傅里叶光学及全息光学有了更深一步的理解。恰在2014年，获得国防工业出版社装备科技译著出版基金的支持，得以将本书翻译出版此书。

本书可作为光学专业和光学仪器专业的研究生教材，以及大专院校有关专业师生的参考书，亦可作为从事现代光学研究、光学仪器设计制造和光学计量测试技术人员的参考资料。

本书由国防科技工业光学一级计量站的郭羽主译并统稿，参加本书翻译的有：西安石油大学外国语学院胡亚萍讲师（第3、4、5、8章），空军潍坊场站信息支援站的刘军宁工程师（第2、12章），其他章节由郭羽完成。全书的审核工作由西安应用光学研究所的杨红工程师、姜昌录高工完成。此外，国防科技工业光学一级计量站的马世帮工程师对全书的公式进行了整理、校对，西安应用光学研究所的李四维工程师、张玫工程师、刘伟光工程师对全书的附图进行了整理、校对。本书的翻译得到了西安应用光学研究所人力资源处赵琳老师、段杨子老师的关怀，受到了国防科技工业光学一级计量站杨鸿儒研究员、袁良高工、俞兵高工的鼓励，获得了西安应用光学研究所与国防科技工业光学一级计量站的支持也得到了国防工业出版社冯晨编辑的关心和帮助，在此对以上老师给予的帮助一并致谢。

由于译者水平有限，书中不免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

郭羽

2016年7月

数字全息是一项新兴的成像技术，它继承了传统全息中的许多独特功能，同时对于限制传统全息应用和发展的关键问题，提出了新的解决方案。这种技术使用电子成像方式取代光化学处理过程，通过直接数值方法获取复杂光场，并由此实现了多领域的新成像能力，而其中的许多特性在传统全息中是很难甚至无法实现的。近年来，数字全息的研究活动呈指数式增长，应用领域也迅速扩大，尤其在微生物学和医学成像领域。越来越多来自传统物理、电子工程领域，以及工程学、生物学、医药学等其他领域的研究人员都有极大的兴趣来挖掘数字全息的潜在能力。本书旨在简要而完整地介绍数字全息基本原理，并系统概述该领域中正在开发的大量技术和应用方法。书中对数字全息未来可能发展的领域提出了一些看法。本书面向对开发数字全息新技术和探索数字全息新应用感兴趣的学生以及研究人员。

第1~5章，描述数字全息的基本原理。第1章概述传统全息和数字全年的历史。第2章简要总结标量衍射理论和傅里叶光学。第3章讲述全息的一般操作过程。第4章介绍光学衍射的基本数值计算方法，通过仿真实例阐明了不同处理过程的特点，并清楚地比较了不同方法的区别。第5章描述数字全息成像的一般操作和大多数字全息实验开始阶段或实验中采用的少量基本光路。

第6~10章，详细描述数字全息的一些具体技术。第6章着重介绍数字全息的理论发展，这些发展提升了数字全息的能力和应用范围。零阶项（或称为直流项）和孪生项是全息中的重要问题，而数字全息提供了新的解决方法，该方法在第7章中得到了描述。第8章提出能够有效移除零阶项和孪生项的相位移动方法。相移的概念也应用在一些其他特殊技术中，而这些技术衍生了特殊的能力，这些内容在后续章节介绍。第9、10章汇集了许多为数字全息成像特殊功能开发的技术，并根据它们是否涉及重新配置硬件或只涉及数值处理方法进行了分类。

最后两章纵览显微和低相干成像领域的技术及应用。第11章描述数字全息显微，并重点讲解定量相位显微方面的应用。数字全息显微中的特殊技术以及定量相位显微中的相关技术也在本章讲述。第12章讲述低相干源数字全息成像，这种技术在传统全息中难以实现，但是在新成像方法方面有巨大潜力。

必须注意，本书还强调了数字全息在生物显微方面的应用。这是有望取得大

量新进展的众多领域之一。数字全息技术在干涉计量和光学信息处理等其他主要领域也有应用，但是这些内容不在本书的主要讨论范围内。当然，本书在内容和写作方面也有许多不足之处，希望本书可以给进入这个令人兴奋和快速发展领域的读者一些有益的初始素材和有效的推动。欢迎广大读者将意见和修改建议发送到 [mkkim@usf.edu](mailto:mkkim@usf.edu)。

衷心感谢南佛罗里达大学数字全息和显微实验室的全体同学，在本书中展示的大量精美图片都离不开他们的辛勤付出。还要感谢几位同事在各种相位研究方面给予我的灵感和鼓励，尤其是 C. M. Lo 教授和 D. Richards 教授。特别要感谢施普林格的 J. Burke 女士，她在本书出版方面给予了耐心的指导和帮助。感谢国家自然科学基金给予我在这个领域中多数研究课题的资金支持。最后，感谢家人对我杂乱工作习惯的包容。现在，我该去遛遛狗了……

Myung K. Kim

佛罗里达州 坦帕市

2011 年 3 月

## 第1章 概述

1.1 传统(模拟)全息 .....	1
1.2 数字全息 .....	4
参考文献 .....	7

## 第2章 衍射光学和傅里叶光学

2.1 傅里叶变换和数学背景 .....	10
2.1.1 一维定义 .....	10
2.1.2 二维定义 .....	12
2.1.3 笛卡儿几何学 .....	12
2.1.4 圆柱几何学 .....	13
2.1.5 傅里叶变换的基本属性 .....	13
2.1.6 卷积和相关 .....	14
2.1.7 一些有用的公式 .....	15
2.2 标量衍射理论 .....	16
2.3 2D 孔径的衍射 .....	17
2.3.1 旁轴(菲涅尔)近似 .....	17
2.3.2 夫琅和费衍射 .....	18
2.4 角谱的传播 .....	19
2.5 透镜的传输 .....	20
2.5.1 透镜实现的傅里叶变换 .....	22
2.5.2 透镜成像 .....	23
2.5.3 有限口径的透镜 .....	23
参考文献 .....	24

## 第3章 全息原理

3.1 概述 .....	25
3.2 基本概念 .....	25

3.2.1 全息公式 .....	26
3.3 平面波全息 .....	27
3.4 点源全息 .....	29
3.4.1 放大倍率 .....	30
3.4.2 准直参考光束 .....	31
3.5 全息处理 .....	32
3.5.1 振幅全息和相位全息 .....	32
3.5.2 透射全息和反射全息 .....	32
3.5.3 薄全息和厚全息 .....	32
3.5.4 全息材料 .....	33
3.5.5 光折变晶体实现相位共轭 .....	33
3.5.6 四波混频 .....	33
3.5.7 光谱烧孔效应 .....	34
3.5.8 受激光子回波 .....	34
参考文献 .....	35

## 第4章 数值衍射的基本方法

4.1 离散傅里叶变换 .....	36
4.1.1 编程实现傅里叶变换 .....	38
4.2 菲涅尔变换方法 .....	39
4.3 惠更斯卷积方法 .....	41
4.4 角谱方法 .....	42
4.5 几种方法的比较 .....	43
参考文献 .....	44

## 第5章 数字全息的光机结构

5.1 数字全息成像的基本操作 .....	46
5.2 数字 Gabor 全息 .....	50
5.3 数字共轴全息 .....	51
5.4 数字像面全息 .....	52
5.5 数字傅里叶全息 .....	53
5.6 数字菲涅耳全息 .....	55
参考文献 .....	57

## 第6章 数字全息的理论研究

6.1 全息图的数字采样 .....	59
--------------------	----



6.2	维格纳分布函数	61
6.2.1	WDF 的基本特性	61
6.2.2	透镜的傅里叶变换	62
6.2.3	傅里叶全息	63
6.2.4	菲涅尔全息	64
6.2.5	空间一带宽积	64
6.3	分数阶傅里叶变换	65
6.4	小波	66
	参考文献	68

## 第7章 直流项和孪生项的抑制

7.1	抑制直流项	71
7.2	移相方法	73
7.3	散斑法	75
7.4	角谱滤波	76
	参考文献	78

## 第8章 相移数字全息

8.1	PSDH 的基本原理	79
8.2	减少移相的步数	81
8.2.1	三步移相法	81
8.2.2	两步移相法	81
8.3	未知相位步骤的移相	82
8.4	相移的具体技术	84
8.4.1	相移方法	84
8.4.2	外差数字全息	84
8.4.3	异步数字全息	85
8.4.4	同步相移	86
8.4.5	分数泰伯效应	86
8.4.6	空间相移	87
8.5	相移数字全息 (PSDH) 的误差和噪声	87
	参考文献	88

## 第9章 数字全息的数值技术

9.1	数值聚焦	91
-----	------	----

9.1.1 扩展焦点 .....	93
9.2 像素分辨率控制 .....	94
9.2.1 补零方法 .....	94
9.2.2 两步传输方法 .....	95
9.3 光学相位解包裹 .....	96
9.4 倾斜平面间的衍射 .....	100
9.5 像差补偿 .....	102
参考文献 .....	104

## 第10章 数字全息中的特殊技术

10.1 合成孔径方法 .....	108
10.2 多平面相位恢复 .....	110
10.2.1 非迭代方法 .....	110
10.2.2 迭代方法 .....	112
10.2.3 相位恢复的其他方法 .....	113
10.3 动态系统 .....	113
10.4 降低噪声 .....	114
10.5 非线性光学 .....	115
10.5.1 非线性光学材料的成像 .....	115
10.5.2 非线性光学光束的数字全息 .....	115
10.6 数字全息的光学参数 .....	117
10.6.1 彩色数字全息 .....	117
10.6.2 偏振数字全息 .....	118
10.6.3 其他波长和粒子 .....	118
参考文献 .....	120

## 第11章 数字全息显微

11.1 光学显微基础 .....	125
11.1.1 光学结构 .....	125
11.1.2 放大倍率 .....	126
11.1.3 分辨率 .....	127
11.1.4 物镜 .....	127
11.1.5 眼睛光学系统 .....	127
11.1.6 相机 .....	128
11.2 光学显微 .....	128

11.2.1	亮场显微 .....	128
11.2.2	暗场显微 .....	129
11.2.3	泽尼克相衬显微 .....	129
11.2.4	差分干涉对比 .....	130
11.2.5	干涉显微 .....	131
11.2.6	偏振显微 .....	132
11.2.7	荧光显微 .....	132
11.2.8	共焦激光扫描显微 .....	132
11.2.9	多光子激发和非线性光学显微 .....	133
<b>11.3</b>	<b>数字全息显微 .....</b>	<b>133</b>
11.3.1	光源 .....	134
11.3.2	干涉仪 .....	134
11.3.3	相机 .....	136
11.3.4	计算机 .....	137
11.3.5	实例 .....	137
11.3.6	模拟全息显微与数字全息显微的比较 .....	140
<b>11.4</b>	<b>DHM 法进行的定量相位显微 .....</b>	<b>140</b>
<b>11.5</b>	<b>细胞显微和其他应用 .....</b>	<b>142</b>
<b>11.6</b>	<b>DHM 的特种技术 .....</b>	<b>146</b>
11.6.1	全反射数字全息显微 .....	146
11.6.2	单张全息图中的多模式显微技术 .....	149
11.6.3	暗场 DHM .....	151
11.6.4	带有分束立方棱镜的数字全息干涉仪 .....	151
11.6.5	无透镜片基全息显微 .....	152
<b>11.7</b>	<b>定量相位显微的其他方法 .....</b>	<b>152</b>
11.7.1	傅里叶相位显微 .....	152
11.7.2	希尔伯特 Hilbert 相位显微 .....	153
11.7.3	衍射相位显微术 .....	154
11.7.4	定量 DIC .....	154
11.7.5	螺旋相衬显微 .....	156
11.7.6	低相干干涉显微 .....	156
	<b>参考文献 .....</b>	<b>157</b>

## 第 12 章 低相干和断层扫描 (层析) 技术

<b>12.1</b>	<b>低相干数字全息显微技术 .....</b>	<b>161</b>
-------------	--------------------------	------------

12.1.1 低相干光源 .....	161
12.1.2 旋转毛玻璃片 .....	162
12.1.3 菲涅耳非相干相关全息 .....	165
12.1.4 消色差条纹系统 .....	167
12.1.5 三角干涉仪 .....	167
12.1.6 锥光全息 .....	168
<b>12.2 光学扫描全息</b> .....	<b>169</b>
12.2.1 光学扫描全息的基本原理 .....	169
12.2.2 OSH 的成像特性 .....	170
12.2.3 相关技术和应用 .....	171
<b>12.3 光学相干层析成像</b> .....	<b>172</b>
12.3.1 时域 OCT .....	172
12.3.2 傅里叶域 OCT .....	173
12.3.3 多普勒 OCT .....	174
12.3.4 光学相干显微 .....	174
12.3.5 相位敏感 OCT .....	175
12.3.6 微分相衬 OCT .....	175
12.3.7 相位色散显微 .....	176
12.3.8 相位参考显微 .....	176
<b>12.4 全场光学相干层析 (FFOCT)</b> .....	<b>177</b>
12.4.1 FFOCT 的原理 .....	177
12.4.2 FFOCT 的技术和应用 .....	179
12.4.3 飞光数字全息 .....	181
<b>12.5 数字干涉全息 (DIH)</b> .....	<b>183</b>
12.5.1 DIH 的原理 .....	183
12.5.2 DIH 的相关技术和应用 .....	186
<b>12.6 层析</b> .....	<b>188</b>
12.6.1 光学投影层析 .....	188
12.6.2 光学衍射层析 .....	188
12.6.3 全息光学相干成像 .....	189
12.6.4 浑浊成像 .....	190
<b>参考文献</b> .....	<b>191</b>

数字全息（简称 DH）是常规成像应用中形成的新技术，它以电子成像手段代替传统全息的光化学处理过程，为全息领域打开了一扇具有诸多新特性的的大门。虽然全息术中的许多显著特性在几十年前就已被熟知，但是其繁琐的处理程序和对实验装置的严苛要求，还是限制了许多实际应用。除一些特殊材料（如光折变材料）和效应外，实时处理是难以实现的。在数字全息领域，全息干涉条纹由物光和参考光叠加产生，通过 CCD 数字采样形成数字阵列传输到计算机。衍射理论可以完整精确地描述光场的传输过程，借此我们可以将图像重建为复数阵列，用以表示光场的振幅和相位。数字全息具备许多明显的优点，例如可以快速采集全息图，获取光场完整的振幅和相位信息以及存在多种干涉测量和图像处理技术。实际上，通过光场数值衍射，数字全息术可以用于那些在实际空间全息中难以实现的成像和图像处理。本章将以全息历史发展的概要回顾为起点，开始传统（模拟）全息和数字全息之旅。

## 1.1 传统（模拟）全息

全息术是 1948 年由 Dennis Gabor（汤臣—休斯敦公司，英国）发明的，当时他正在从事提高电子显微镜分辨率的工作，但是电子透镜像差校正的技术难度越来越大。Gabor 没有试图完善电子成像透镜，而是放弃了这种方法，同时他意识到电子束的衍射图中包含了电子波振幅和相位的完整信息。电子波的衍射图形经过记录后，可用于光学合成物波场。因此就可以使用可见光光学元件来成像，与采用电子光学元件相比这种方法更加简单。他把这种新的成像原理称作全息，因为它具有记录整个光场的特性<sup>[1-3]</sup>。

Gabor 的工作是从 W. L. Bragg（英国剑桥卡文迪什实验室）X 射线显微理论获得灵感的，他在 X 射线衍射斑的位置钻了许多的小孔，这些小孔的大小与衍射强度成比例。“当一束单色平行光通过这些小孔后，再经过一个透镜，夫琅和费条纹就建立起这个晶格状结构的图像<sup>[4]</sup>。”从某种意义上讲，这就是二进制编码的傅里叶全息图的雏形。后来他用照相底片替代这些手工钻孔的模板<sup>[5]</sup>。另一方

面, 这个“衍射图样”只包含了强度信息, 而未包含相位信息。Gabor 意识到“如果物体的衍射图样是用相干照明实现的, 而且一个相干的背景加载在衍射波上, 那么这幅照片将包含全部经过调制的信息, 这种调制是由于照明波穿过物体形成的”<sup>[2]</sup>。在这些论文中, Gabor 阐述了理论基础, 并预言了这种成像方式新颖和重要的特性, 比如在重建光学零件中通过复制记录光学零件的像差来进行像差补偿。

虽然 Gabor 演示实验中的记录和再现是通过光学途径实现的 (图 1.1), 但由于缺少高相干性和高强度的光源, 全息光学并没有产生巨大的进步<sup>[6,7]</sup>。在 20 世纪 50 年代, 全息原理主要应用于电子显微和 X 射线显微领域, 当时这种方式被称作是衍射显微<sup>[8]</sup>。两项关键发明激发了光学全息技术和应用的真正爆炸式增长。一项发明是激光, 可提供高质量相干对比度的强大相干光源。另一项发明是由 Emmett Leith 和 Juris Upatnieks (密歇根大学, 安阿伯) 完成<sup>[9-12]</sup>的。他们采用独立参考波面的离轴照明, 这种方式能解决 Gabor 同轴全息结构的零级和孪生像问题。文献 [9] 从通信理论角度来描述全息过程, 其中包括调制、频率离散和振幅平方功率探测过程。他们发现, “一个带宽为  $W$  的复数信号可以用带宽为  $2W$  的实数信号来表达, 其中实数信号通过复数信号叠加载波后, 只使用其实部信号实现”, 这项技术很快促成了离轴全息。他们已经演示了两种物体的重建过程, 其中这两个物体并不适合加博全息过程: 不能通过强背景波 (例如深色背景下的透明字母) 的物体和连续色调物体。在 1964 年, 他们演示了三维固体的全息重建过程 (图 1.2), 与原始物体高度相似, 例如它们是三维物体, 而且距离不同的物体间有视差存在<sup>[11]</sup>。

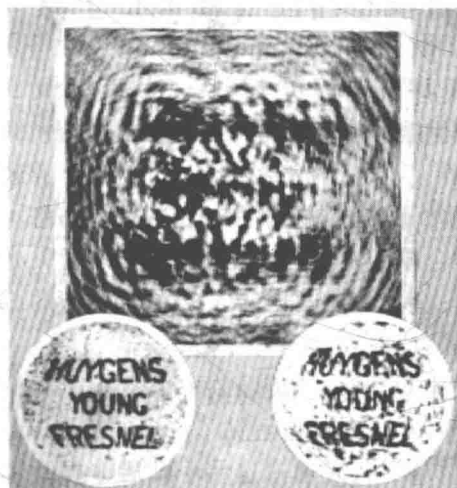


图 1.1 D. Gabor 的第一组全息图中的一幅照片。顶部: 全息图; 左下角: 物体; 右下角: 重建图像。(经伦敦英国皇家科学会许可, 转载自文献 [2])

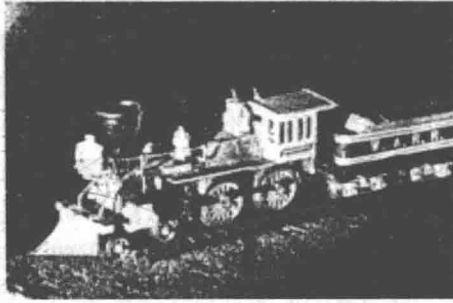


图 1.2 Leith 和 Upatnieks 拍摄的第一组三维物体全息图中的一幅照片  
(经 OSA 许可, 转载自文献 [11])

很快, 许多全息方面的新技术和新应用开始发展。全息现在是一个比较成熟的领域, 文献[13]对此做了很好的总结。所有不同类型的激光器都可以用来产生和再现全息图, 例如从半导体激光器到高功率气体激光器, 其光谱范围不只是可见光波段, 还有红外光、紫外光和 X 射线<sup>[14,15]</sup>。Yuri N. Denisyuk (苏联)<sup>[16,17]</sup>和 Stephen Benton (Polaroid 公司)<sup>[18]</sup>发明的白光反射全息使得许多实际的显示应用成为可能, 现在已随处可见, 例如信用卡。许多不同种类的记录物质都已经发明出来, 例如卤化银照相乳液、重铬酸盐明胶、光致抗蚀剂、光敏聚合物。在光折射晶体中, 例如  $\text{LiNbO}_3$ , 光照可以产生可逆的折射率变化, 可用于产生全息图。与常规平面全息图相比, 体全息图有不同的性质, 例如 Bragg 衍射有相位匹配要求。类似地, 一系列非线性光学效应会引起可逆或实时全息衍射以及相位共轭成像过程, 包括四波混频、光谱烧孔、光子回声<sup>[19]</sup>。事实上, 全息术为理解各种非线性光学现象提供了统一的原理。

全息学最重要的一项工程应用是干涉测量。因为相位和强度信息可以被重建, 所以原来在时间或空间独立的波前, 甚至不同波长的波前都可以通过全息干涉来进行比较<sup>[20]</sup>。带有粗糙表面的物体形变可以通过干涉方法来精确研究, 而且可以进行诸多无损测试, 例如变形、振动、表面轮廓, 以及由于温度、化学、生物变化过程引起的折射率变化。大量的全息干涉技术有了长足发展, 包括二次曝光全息、时间平均全息、外差全息、移相干涉、多波干涉和散斑干涉。事实上, 数字全息是人们在利用干涉电子成像的过程中自然发展形成的, 例如电子散斑干涉 (ESPI) 实验<sup>[21]</sup>。

全息不仅能够存储物体的三维图像信息, 而且可以存储任何形式正确编码的数据。全息数据存储具备很多优势, 包括大容量存储和高速并行处理。体全息材料例如光折变材料、光敏聚合物、非线性晶体材料都是可以实现这种应用的潜在材料。全息数据存储与多种有用的全息图像处理技术紧密联系, 例如全息加密、模式识别、联想记忆和神经网络<sup>[22]</sup>。

我们还注意到两项特殊的全息成像应用：全息显微和粒子分析。在传统显微学中，观测场的深度非常短，而且会随着放大倍率的平方关系而减小。在显微镜的焦面位置，观测场明锐清晰，而焦面之外的扩展物体，就成为了模糊的背景。显微照片或者单帧显微视频只记录了单个焦面位置的信息，而空间物体的其他信息却丢失了。而全息显微技术可以把一个物体的整体信息记录在一张全息图中<sup>[23,24]</sup>。虽然这些是记录体积物体中微生物和粒子动态场景的明显优势，但是也由此限制了全息显微的实际应用。通过在记录和重建全息图时采用不同波长或不同曲率透镜可以实现全息图像的放大，但是实际可用的相干光源波长范围非常有限，而且曲率失配会产生像差。另一个更有效的途径是用传统显微镜观察显微记录的全息图，这种方法对相位显微和干涉显微非常有效<sup>[25]</sup>。

## 1.2 数字全息

光学场的传播可以通过衍射理论完备精确地描述，因此也就可以用数值计算来表述。1967年，Joseph Goodman等（斯坦福大学）首次演示了全息图像数值重建的可能性<sup>[26]</sup>。总结一下他们的描述，参考波和物波形成的干涉条纹直接由摄像机的光敏面来探测（不带镜头）。摄像机的输出由 $256 \times 256$ 像元阵列进行采样，而且定量为8个灰度级。PDP-6计算机用来编程实现阵列的二维傅里叶变换，并提取结果的平方模量。采用Cooley-Tukey算法（即快速傅里叶变换，FFT），能够在5min计算时间内获得图像。计算结果可以直接输出到示波器的显示器（图1.3）。数字全息的另一个先驱是1992年由Haddad等（Los Alamos国家实验室）研发的傅里叶变换全息显微镜<sup>[27]</sup>。他们用甘油液滴当作透镜来产生发散球面参考照明波以实现傅里叶变换全息。他们采用了一个定制的CCD，敏感面是 $2048 \times 2048$ 的方形像元，像素大小是 $9\mu\text{m}$ 。在计算机上进行FFT计算，生成了一段蛔虫的显微全息图像。用数值透镜进行处理，演示了不同焦距的数值定焦过程。



图 1.3 J. Goodman 的数字计算电子探测全息图（经 AIP 许可，转载自文献 [26]）



从1994年开始, Ulf Schnars 和 Werner Jueptner (不来梅大学, 德国) 发表了大量 CCD 记录和非涅尔离轴全息图数值重建的实验 (图 1.4), 而且展示了用于宏观物体计量的可行性<sup>[28-30]</sup>。此时, CCD 相机和计算技术已经发展到了一定程度, 可以完成数字全息的实际应用, 并且越来越多的研究人员开始开发新技术和新应用, 这些内容将在本书的其他部分进行介绍。1999年, Christian Depeursinge 团队 (洛桑联邦综合工科学学校, 瑞士) 演示了通过数字全息实现定量相位显微的技术, 这项技术能直接产生表面轮廓, 有效噪声小于几纳米 (图 1.5)<sup>[31,32]</sup>。传统的模拟全息也可以重建相位信息, 但是为了提取出相位信息, 必须通过另一个干涉实验来实现; 但是在数字全息中, 只要光场的复数数值计算完成, 就获得了相位信息。定量相位显微是数字全息的一个重要应用方向, 它的许多成像和处理能力在真实空间全息中是难以实现的<sup>[33]</sup>。

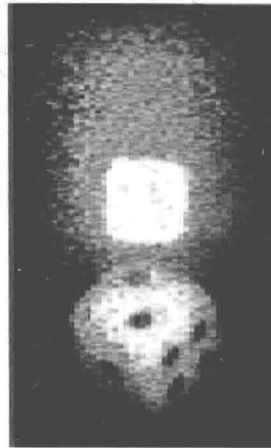


图 1.4 W. Jueptner 和 U. Schnars 的第一组数字全息图中的一幅照片  
(经 OSA 许可, 转载自文献 [29])

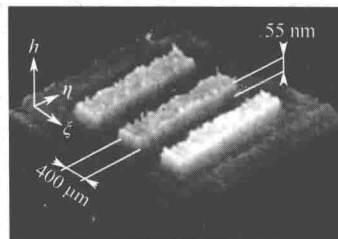


图 1.5 C. Depeursinge 等拍摄的纯相位物体的相衬全息图  
(经 OSA 许可, 转载自文献 [31])

人们开发了各种有用的和特殊的技术来提升全息处理问题的能力并扩大其应用范围。在数字全息显微中, 一张单独的全息图可以用来进行任意距离全息图