

基于数字图像相关的材料和结构 变形及破坏力学测试分析

雷 冬/朱飞鹏/白鹏翔 著

基于数字图像相关的材料和结构 变形及破坏力学测试分析

雷 冬/朱飞鹏/白鹏翔 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

基于数字图像相关的材料和结构变形及破坏力学测试
分析 / 雷冬, 朱飞鹏, 白鹏翔著. -- 南京: 河海大学
出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5630-4626-3

I. ①基… II. ①雷… ②朱… ③白… III. ①数字图
像处理—应用—材料科学 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 282899 号

书 名/ 基于数字图像相关的材料和结构变形及破坏力学测试分析

书 号/ ISBN 978-7-5630-4626-3

责任编辑/ 周 贤

封面设计/ 槿容轩

出版发行/ 河海大学出版社

地 址/ 南京市西康路 1 号 (邮编:210098)

网 址/ <http://www.hhup.com>

电 话/ (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

经 销/ 江苏省新华发行集团有限公司

排 版/ 南京新洲印刷有限公司

印 刷/ 虎彩印艺股份有限公司

开 本/ 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张/ 14.75

字 数/ 298 千字

版 次/ 2016 年 11 月第 1 版

印 次/ 2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价/ 46.00 元

前言

PREFACE

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法是数字图像处理技术和现代光测力学相结合的产物。该方法将数字图像处理技术应用于相机获取的图像以实现物理量的测量,通过分析变形前后被测物表面数字散斑图像的变化获取物体表面的运动和变形信息,包括位移和应变的信息,进一步得到物体的应力状态,从而达到对物体的变形进行定量分析的目的。因其操作过程中不需要以光作为光源,也不需要隔振设备,具有测量系统简单、测量表面处理方便、便于工程应用等优点,所以在最近十几年间得到了广泛应用。

材料和结构的损伤破坏与变形有密切的关系。基于数字图像相关的变形测量技术可以为材料和结构的受力分析和损伤破坏行为的分析带来新的路径。本书结合作者多年的教学、科研经验和近年来国内外发展的成果,向读者介绍数字图像相关方法及其在材料和结构变形测量以及破坏分析方面的应用。

本书主要内容分为三篇。第一篇为数字图像相关方法介绍,包括3章:第一章为数字图像基本知识的介绍,第二章介绍了DIC方法的基本原理,第三章介绍了DIC变形测量精度的影响因素和使用过程中的注意事项;第二篇介绍了基于二维DIC的变形和破坏测试的10个方面的应用,包括变形测量、裂纹跟踪、高精度光学引伸计等;第三篇介绍了基于三维DIC的变形和破坏测试的8个方面的应用,包括棒材试件、岩石材料、拱坝结构的变形测量以及三维形貌场的拼接、基于二维和三维DIC的引伸计精度比较等。

本书得到了国家自然科学基金项目(51679078、11402074、11132003)和河海大学中央高校基本科研业务费项目(2015B18714、2016B06514)的资助。

本书可作为高等院校工程力学、水利土木、航空航天、机械工程专业的高年级本科生和研究生实验力学课程光测部分的教材,也可供土木工程结构测量、材料损伤分析、结构安全等方面的研究人员和技术人员参考。

本书由雷冬、朱飞鹏、白鹏翔主编，书中的应用案例得到过河海大学任青文教授、章青教授、邵国建教授，东南大学何小元教授、杨福俊教授以及中国科学技术大学伍小平教授、赵建华教授、何世平教授的指导。参与本书中具体实验工作的还有东南大学陈振宁、施嘉伟，南京林业大学崔海星、廖承斌，湘潭大学王子涵以及河海大学王京荣、王克峰、张云发、余快、沈泓舟、金剑、张培、王文超、蒋睿、黄震天、杨立群、黄锦峰、何锦涛、冯富凯、朱科辉、李婧宇、沈若尘、江真丞等老师和同学们。

作者

2016年10月于南京河海大学

目 录

CONTENTS

第一篇 数字图像相关(DIC)方法 / 1

第 1 章 数字图像基本知识	3
1.1 数字图像的获取	3
1.2 图像的文件格式	12
1.3 图像的处理	19
第 2 章 DIC 方法的基本原理	38
2.1 二维 DIC 的基本原理	38
2.2 相关函数	41
2.3 位移的整像素搜索	43
2.4 位移的亚像素搜索	45
2.5 应变计算方法	50
2.6 基于质量导向的搜索策略	52
2.7 三维 DIC 的基本原理	54
第 3 章 DIC 变形测量精度的影响因素	59
3.1 散斑质量	59
3.2 相机的参数	65
3.3 离面位移	67
3.4 标定	72

第二篇 基于二维 DIC 的变形和破坏测试 / 75

第 4 章 复杂构件的应变状态测量	77
4.1 试验及过程	77

4.2	试验结果分析	79
4.3	有限元计算结果	82
第5章	胶合薄板表面拉伸和剪切变形测量	85
5.1	竹胶合薄板表面拉伸变形测量	85
5.2	荻草胶合板表面剪切应变测量	87
第6章	颗粒材料平面剪切变形的测量	90
6.1	颗粒材料平面剪切试验装置	90
6.2	试验过程	92
6.3	试验结果和分析	93
第7章	FRP与混凝土的界面黏结滑移测量	98
7.1	实验过程	98
7.2	实验结果和讨论	99
第8章	混凝土断裂试验中裂缝张开位移及张角测量	101
8.1	试验过程	101
8.2	试验结果和讨论	102
第9章	基于损伤应变的混凝土微裂纹跟踪技术	104
9.1	研究背景和思路	104
9.2	试验过程	104
9.3	损伤应变与裂纹分布	105
第10章	岩石动力压缩破坏过程损伤变形测量试验	108
10.1	试验材料和试件加工	108
10.2	试验装置和试验过程	109
10.3	试验结果和讨论	109
第11章	基于DIC的显微应变测量	113
11.1	基于数码显微镜的微观变形测量	113
11.2	基于扫描电子显微镜的微观变形测量	115
第12章	基于远镜头成像的投影散斑变形测量系统	119
12.1	传统投影散斑方法	119

12.2	基于远心镜头成像的薄膜变形测量系统·····	120
12.3	离面变形的测量原理·····	125
12.4	系统标定·····	126
12.5	薄膜变形测量·····	129
第 13 章	基于高精度光学引伸计的应变测量 ·····	136
13.1	光学引伸计及其误差修正·····	136
13.2	基于双 45°反射镜成像的高精度光学引伸计 ·····	143
13.3	验证试验·····	145
13.4	铝制拉伸试件的拉伸应变测量·····	149
13.5	带初弯曲拉伸试件的轴向应变测量·····	155
 第三篇 基于三维 DIC 的变形和破坏测试 / 165		
第 14 章	基于三维 DIC 的 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试 ·····	167
14.1	GFRP 锚杆介绍·····	167
14.2	实验装置及过程·····	168
14.3	实验结果与讨论·····	169
14.4	本章小结·····	173
第 15 章	铸铁棒材试件的拉伸变形测量 ·····	175
15.1	试件与试验装置·····	175
15.2	试验过程·····	176
15.3	实验结果与讨论·····	177
15.4	本章小结·····	181
第 16 章	基于二维和三维 DIC 的引伸计精度比较 ·····	183
16.1	相机不垂直放置对二维引伸计的影响·····	183
16.2	两类光学引伸计的应变精度对比试验·····	186
16.3	两类光学引伸计的优缺点比较·····	192
第 17 章	低碳钢棒材试件的拉伸变形测量 ·····	194
17.1	试验装置及过程·····	195
17.2	低碳钢真实应力-应变测试 ·····	196
17.3	低碳钢塑性区的演化·····	199

第 18 章	人造髋关节置换手术中髌臼部变形测量	203
18.1	研究背景	203
18.2	试验过程	204
18.3	试验结果与分析	205
18.4	结论	209
第 19 章	岩石双轴准静态压缩破坏试验	211
19.1	试验材料和试样	211
19.2	试验装置和试验过程	212
19.3	试验结果和分析	212
19.4	结论和讨论	216
第 20 章	拱坝模型冲击破坏试验	218
20.1	试验模型	218
20.2	试验过程	219
20.3	试验结果和讨论	220
第 21 章	三维形貌场的拼接	223
21.1	三维拼接原理	223
21.2	实验过程和结果讨论	225
21.3	结论	227

第一篇

数字图像相关（DIC）方法

第 1 章 数字图像基本知识

图像是信息的重要载体,是人类获取信息、表达信息和传递信息的重要手段。人类获取外界信息的手段有视觉、听觉、嗅觉、触觉等多种方法,其中约有 75% 的信息是通过人类视觉系统来获取的。图像可分为模拟图像和数字图像。人眼看到的自然图像,以及早期用胶片相机经拍摄、冲洗而得到的图像都是连续的,或者说在数字化之前图像是连续的,因此把这样的图像称为模拟图像。而数字图像(Digital Image)则是由模拟图像经过数字化得到的。随着科技的进步和电子计算机技术的快速发展,人类对信息处理和信息交流的要求越来越高,对数字图像处理技术的广泛研究和应用也成为必然趋势。

本章将主要介绍数字图像的获取、图像的格式和图像的处理这三方面内容,从而为第二章内容的阐述打下坚实的基础。

1.1 数字图像的获取

自然界的图像都是模拟图像,模拟图像是连续图像,在水平和垂直方向上,像素位置的变化以及每个像素的灰度变化都是连续的。在计算机普及之前,电视、电影、照相机等图像记录与传输设备都是使用模拟信号对图像进行处理的。然而,计算机只能处理数字图像,而不能直接处理模拟图像。因此,数字图像处理的第一个环节就是将连续图像转化为数字形式,即进行图像的离散化。离散后得到的图像称为数字图像。

当前获取数字图像的方式有许多,比如图 1-1 所示的手机、卡片相机、微单相机、单反相机、DV 摄像机以及数字相机,等等。这些设备主要由相机镜头和相机的图像传感器两部分组成。其中,镜头主要由光学透镜(组)构成,实物经过镜头之后所形成的像仍为模拟图像,因此,其数字化的器件即为相机的图像传感器。

1.1.1 相机的图像传感器

图像传感器的作用是将不同亮度的光强,经过采样、量化之后,转化为数字信号,图像传感器上的一个光敏单元称作一个像素(Pixel)。当前广泛使用的图像传感器主要有两种:电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和互补型金属氧化

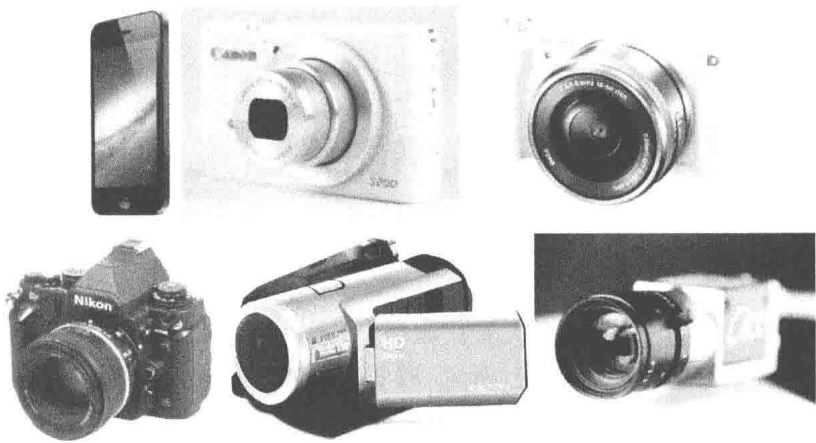


图 1-1 数字图像的获取设备

物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS)。

CCD 图像传感器是由贝尔实验室的 Willard S. Boyle 和 George E. Smith 于 1969 年发明的,为此他们获得了 2009 年度诺贝尔物理奖。CCD 是固态阵中的主要元件,是一种由半导体制成的成像传感器器件,组成它的感光基元是离散硅成像元素,利用电荷注入、转移和读出方式实现场景信息的获取。CCD 的发明颠覆了人类记录影像的方式。经过几十年的发展,CCD 技术已非常成熟,具有诸如高量子效率、低读出噪声、低暗电流、高信噪比等优越的性能^[47],但同时也存在着成品率低、成本高、不能单片集成、芯片体积较大、工艺特殊、有光晕等缺点。

CMOS 图像传感器的光电转换功能与 CCD 相似,但它用传统的芯片工艺方法将光敏元件、放大器、A/D 转换器、存储器、数字信号处理器等都集成在一块硅片上,从而降低了功耗和成本。CMOS 与 CCD 的研究几乎是同时起步的,但由于受当时工艺水平的限制,CMOS 图像质量差、分辨率低、噪声降不下来和光照灵敏度不够,因而没有得到重视和发展,直到 1998 年才被用于制作图像传感器。由于集成电路设计技术和工艺水平的提高,CMOS 的诸多缺点已被克服,除成像质量与 CCD 相当之外,还具有高集成度、小体积、低功耗、低价格、高读出速度、抗晕等优点^[48-49],因此具有更加广阔的应用前景。

在基于数字图像相关方法的变形测量中,所处理的图像大多数都属于灰度图像。所谓灰度图像,是与彩色图像相对的,只表达图像的亮度信息而没有颜色信息。在选择灰度图像传感器时需要关注几个重要参数:分辨率、感光面积、位深、帧频和信噪比。

分辨率

相机能够捕捉到的细节度称为分辨率,用像素来衡量。像素是指图像传感器上的光敏单元,它们可以将不同的光线转换成不同的电荷,从而形成对应原稿光图

像的电荷图像。相机的像素越多,能够拍摄的细节就越多,照片也就可以越大而不变得模糊或产生“颗粒”。若想增加图像的分辨率,就必须增加图像传感器上的光敏单元数量。值得注意的是,像素并非越大越好,还需综合考虑感光面积的大小。在感光面积不变的情况下,增大分辨率并不一定就好,因为这样每个像素分得的光强就少了,造成信噪比下降,所得到的图像画质会变差。因此,在追求分辨率的同时,也需要关注像素尺寸的大小(一般在 $2\text{ }\mu\text{m}\times 2\text{ }\mu\text{m}\sim 10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$)。

感光面积

即感光元件尺寸。对于相同有效像素的感光元件,一般其尺寸越大,每个像素的单位面积也越大,感光性能就越好,就能记录更多的图像细节。常见的感光元件尺寸有 $1/3''$, $1/2''$, $2/3''$, $4/3''$ 等,数值越大成像效果越好,价格亦越昂贵。

位深

也称像素深度,决定了灰度图像的灰度等级。灰度图像是数字图像的最基本形式,可由黑白照片数字化而来,或对彩色图像进行去色处理得到。灰度图像每个像素点表示一个量化的灰度等级,即灰度值(必为非负值),用来表示该点的亮度水平,并通常用 1~2 个字节(1 字节对应 8 位)来存储灰度值。若用 1 位来表示图像,则灰度范围为 0 和 1,即二值图像;若用 4 位来表示图像,则灰度范围为 0~15,灰度等级为 $2^4=16$;若用 8 位(正好 1 字节)来表示图像,则灰度范围为 0~255,灰度等级为 $2^8=256$ 。最暗的灰度值为 0,最亮则为 255,这是灰度图像最常见的形式;在特殊应用中,可能需要更高的灰度等级,比如 12 位(需要 2 字节来存储),则灰度取值范围为 0~4 095,有 4 096 个灰度等级。

帧频(Frame Per Second, fps)

表示每秒图像传感器刷新的频率,它决定了相机每秒拍摄图像的最高速率。该参数与相机的另一个参数即曝光时间密切相关,比如某相机最大帧率为 10,那么曝光时间小于 100 ms 时,相机采集可以达到 10 帧/s,若曝光时间为 200 ms 时,所能达到的帧频只有 5 帧。

信噪比(Signal-noise Ratio, SNR 或 S/N)

也称为灰度的动态范围,在通讯领域是指一个电子设备或者电子系统中信号与噪声的比例。图像传感器信噪比的数值越大,那么图像的质量就越高。信噪比用 $\text{SNR}=20\log(\text{S}/\text{N})\text{dB}$ 来计算, S 代表了工业相机能接受的光线的最亮和最暗之间的反差,而 N 代表了影响视频信号表现灰度细微变化的能力,噪音 N 越大对图像灰度的微小变化的分辨越困难,同时,最小接受的光照也越大,即灵敏度越差。因此,信噪比综合反映了图像信号的动态范围。

1.1.2 相机的数据传输方式

相机的数据传输指由图像传感器采样、量化后得到的数字信号,经过传输设备

送至计算机成为数字图像,供其进行图像处理。当前主要存在着如下几种传送方式:图像采集卡、通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)、IEEE 1394 Firewire (1394 接口)、千兆网卡(GigE Vision 接口)和 Camera Link。在实际应用中,根据实验要求选取适合的图像传感器及其传输接口。

在白光照明的条件下,相机实时采集不同载荷下试件的表面图像,存入计算机硬盘,得到离散的数字图像。

图像采集卡

由于图像信号的传输需要很高的传输速度,通用的传输接口不能满足要求,因此需要图像采集卡。以 Matrox 图像采集卡为其代表。

USB 接口

USB 支持热插拔、即插即用,可用于笔记本等移动设备,使用方便。USB 2.0 的传输速率为 480 Mbps (Million bits per second);2008 年,由 Intel, Microsoft, hp, TI, NEC, ST-NXP 等业界巨头组成的 USB 3.0 Promoter Group 宣布,该组织负责制定的 USB 3.0 标准接口与线缆样品新一代 USB 3.0 标准业已正式完成并公开发布。新规范可提供十倍于 USB 2.0 的传输速度和更高的节能效率,可广泛用于 PC 外围设备和消费电子产品。

1394 接口

1995 年,美国电气和电子工程师学会(IEEE)制定了 IEEE 1394 标准。IEEE1394 作为一个工业标准的高速串行总线,具有廉价、速度快、支持热拔插、数据传输速率可扩展、标准开放等特点,已广泛应用于数字摄像机、数字照相机、电视机顶盒、家庭游戏机、计算机及其外围设备。目前使用较多的 1394a 和 1394b 接口可提供 400 Mbps 和 800 Mbps 的传输速度。为与 USB 相抗衡,2008 年 7 月,IEEE 通过新的规范 S1600 与 S3200,两者的传输速率可分别达到 1.6 Gbps 与 3.2 Gbps,并可分别向下兼容。

GigE Vision 接口

GigE Vision 接口是一种基于千兆以太网通讯协议开发的相机接口标准。采用多年来一直作为最常用网络标准的 5 类双绞线作为数据传输介质,线缆及配件采购容易且便宜;通过标准以太网,可以达到 100 m 的传输距离,通过光纤转换器传输距离甚至能够长达几十千米;GigE 支持 1 000 Mbps 的传输速率;通过支持供电型接口(Power over Ethernet, POE)连接线缆及 POE 以太网交换机可以很方便地进行集成;GigE Vision 接口在可用带宽 unlimited 的前提下支持网络内无限数量的可控制相机,等等。

Camera Link

Camera Link 是专门为数字摄像机的数据传输提出的接口标准,是 2000 年 10 月由一些相机供应商和图像采集公司联合推出的。Camera Link 标准简化了计算机和相机之间的连接。随着数字图像采集速度的提高、数据量的增大,为了简化数

据的连接,实现高速、高精度、灵活、简单的连接,在 National Semiconductor 公司开发的 Channel Link 总线技术基础上,由多家相机制造商共同制定推出了 Camera Link 标准。基于 Camera Link 的数字相机的采集速度和数据量均好于基于 IEEE1394 标准。

在实际测量中,根据实验具体要求选取适合的图像传感器及其传输接口。

1.1.3 数字图像表示形式

数字图像就是将连续图像 $f(x, y)$ 按一定方式划分为小块区域 (x_i, y_j) ($i=0, 1, \dots, N-1; j=0, 1, \dots, M-1$), 如图 1-2 所示。这些小区域称为图像像素, 简称像素。像素是组成数字图像的基本要素。

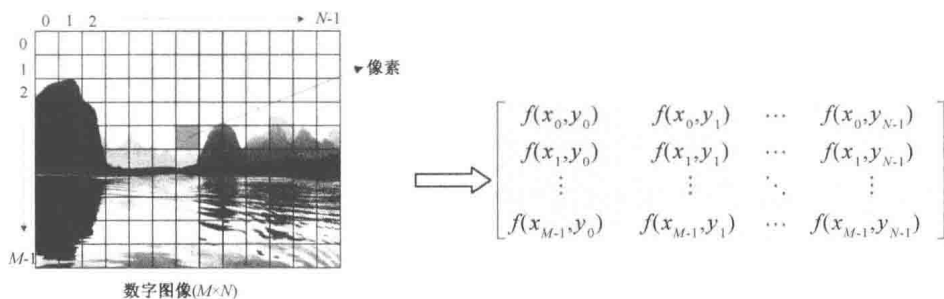


图 1-2 图像离散化示意图

图像在空间上经过离散化并对采样值量化后,一幅高宽分别为 M 和 N 的数字图像简称为 $M \times N$ 图像,可用如下矩阵表示:

$$f = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \cdots & f(0, N-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \cdots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1, 0) & f(M-1, 1) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

数字图像用二维矩阵来表示,因此可以用矩阵理论和矩阵算法对数字图像进行分析和处理(故有强大矩阵运算功能的 Matlab 软件在图像处理领域有着广泛的使用)。最典型的例子是图 1-2 所示的灰度图像。灰度图像的像素数据就是一个二维矩阵,矩阵的行对应图像的高,矩阵的列对应图像的宽,矩阵元素对应图像的像素,矩阵元素的值即为像素的灰度值,该值越大表明所对应图像上的点越亮。

由于数字图像以矩阵形式表示,因此在计算机数字图像处理程序中,通常用二维数组来存放图像数据。二维数组的行和列分别对应于图像的高和宽,二维数组的元素对应于图像的像素,数组元素的值为像素灰度值。使用二维数组来存储数字图像,正符合二维图像的特性,同时也便于程序的寻址操作,使得计算机图像编程十分方便。

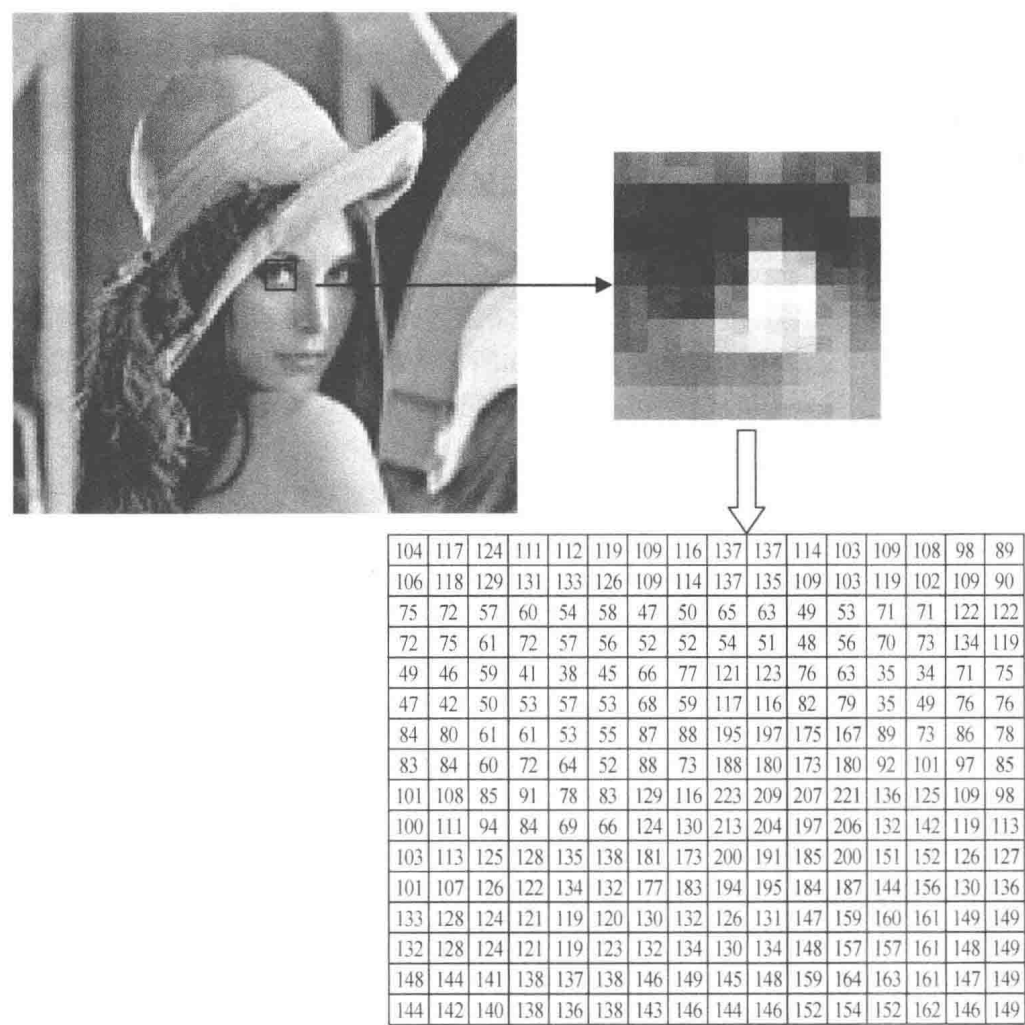


图 1-3 数字图像(Lena)与二维数组

图 1-3 给出了数字图像处理领域经常选用的一幅数字图像(Lena 图),对其右眼部位(16×16 像素)放大显示可明显观察到像素的明暗度不同,并将像素的灰度值以二维数组形式表示出来。从图 1-3 可看出,越亮的像素所对应的灰度值越大,而越暗的像素对应的灰度值则越小。

1.1.4 镜头成像模型

要得到数字图像,仅有图像传感器尚不够,还必须要借助于成像镜头将实物放缩成一个实像,并由图像传感器来感应与离散化。

试验中,根据不同实验对象的需要,选择适合的成像镜头,可以完成不同尺度