

高等学校电子信息类“十三五”规划教材



西安电子科技大学研究生精品教材

Photoelectric Imaging & Image Processing

光电成像与图像处理

主编 邵晓鹏 王琳 宫睿 李庆辉



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十三五”规划教材
西安电子科技大学研究生精品教材

光电成像与图像处理

主编 邵晓鹏 王琳 宫睿 李庆辉

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书从光电成像的基础原理出发,结合经典算法与实例,将图像处理方法融于光电成像过程之中,系统地阐述了光电成像和图像处理领域的主要技术、方法及应用。本书主要包括:图像增强、频域处理、图像复原、图像分割、形态学图像处理、图像描述、模式识别、图像处理中的数学模型、红外弱小目标检测、遥感图像处理、计算成像和图像超分辨率重建技术等。

本书适合作为光电、信息、计算机专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为光学相关领域科研和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光电成像与图像处理/邵晓鹏等主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-5606-3867-6

I. ① 光… II. ① 邵… III. ① 光电效应—成像原理 ② 图像处理 IV. ① O435.2 ② TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 224448 号

策 划 李惠萍

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 19

字 数 450千字

印 数 1~3000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-3867-6/O

XDUP 4159001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

得益于光电子技术、电子技术、计算机技术、人工智能等领域的不断革新和持续发展,光电成像技术已成为信息化时代的重要方向,其发展日新月异,应用愈加广泛,光电图像处理也上升到新的高度,并且迅速扩展到生物医学、信息科学、资源环境科学、天文学、物理学、工业、农业、国防、教育、艺术等各个领域与行业,对经济、军事、文化及人们的日常生活产生着重大的影响。

本书将图像处理方法融于光电成像过程之中,力图从原理层面的角度出发,结合经典算法及其实例,全面介绍该领域的基本知识,并引入最新的前沿技术应用和相关成果,使读者能够对光电成像与图像处理的理论和方法加以了解,并通过学习,为今后相关领域的应用打下良好的理论基础。

本书由邵晓鹏、王琳、宫睿、李庆辉主编。在本书的编写过程中,杜娟、王旭、曹蕾、彭立根、代伟佳、苏来利、骆秋桦、韩平丽、刘飞、靳振华、杨虹、吴腾飞、张少辉、张雁云、白海玲、李霄、师雪艳、海燕、宋倩、杨莹等同学付出了辛勤劳动,在此向他们致以诚挚的谢意。

本书是编者在参考大量文献的基础上,结合近年来在数字图像处理与计算成像方面的研究,同时参考、借鉴了国内外同行的研究成果编写而成的。本书涉及面广,因编者的专业范围、学识水平和时间限制,书中难免存在纰漏和不当之处,敬请广大读者批评指正。

最后,特别感谢西安电子科技大学出版社为本书的出版所提供的大力支持与帮助!

编 者

2015 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 成像光学与光电成像系统	6
2.1 概述	6
2.2 成像系统及其基本性质	8
2.3 几何光学成像	21
2.4 视觉系统与光学成像	30
2.5 光电成像技术及系统	36
2.6 光电成像技术的应用	40
小结	45
习题	45
第 3 章 数字图像基础	47
3.1 图像采样	47
3.2 量化	52
3.3 数字图像的表示	52
3.4 空间分辨率和量化分辨率	54
小结	56
习题	56
第 4 章 图像增强	57
4.1 灰度变换	57
4.2 直方图修正	61
4.3 算术逻辑操作	64
4.4 图像平滑	65
4.5 图像锐化	68
4.6 图像边缘检测	73
小结	79
习题	79
第 5 章 图像的频域处理	80
5.1 频域与频域变换	80
5.2 傅里叶变换	81
5.3 频域变换的一般表达式	85
5.4 频域图像处理	86
5.5 多分辨率理论	89
5.6 小波变换	92
小结	97
习题	97
第 6 章 图像复原	98
6.1 退化复原模型	98

6.2 噪声模糊模型	99
6.3 线性复原	102
6.4 非线性复原	105
6.5 其他复原	108
小结	111
习题	111
第 7 章 图像分割	112
7.1 图像分割的基本概念	112
7.2 基于阈值的分割方法	114
7.3 基于边缘的分割方法	116
7.4 基于区域的分割方法	123
7.5 彩色图像分割	130
7.6 图像分割评价准则	132
小结	133
习题	133
第 8 章 形态学图像处理	135
8.1 形态学的基本概念	135
8.2 膨胀与腐蚀	136
8.3 开运算与闭运算	142
8.4 击中/击不中变换	143
8.5 形态学重建	144
小结	146
习题	146
第 9 章 图像描述	148
9.1 图像的边界描述	148
9.2 关系描述子	152
9.3 目标物的区域描述	153
9.4 图像质量主观评价方法	158
9.5 图像质量客观评价的算法模型	159
小结	165
习题	166
第 10 章 模式识别	167
10.1 模式识别的概念及发展	167
10.2 基于决策理论方法的识别	168
10.3 结构性方法	173
小结	178
习题	178
第 11 章 图像处理中的数学模型	180
11.1 偏微分方程	180
11.2 人工神经网络	186
11.3 主成分分析	194
小结	201

习题	201
第 12 章 红外弱小目标检测	202
12.1 红外图像中弱小目标检测技术的有关概念	202
12.2 红外弱小目标检测方法概述	203
12.3 基于特征统计表决的小目标检测	205
12.4 基于局域背景预测的红外弱小目标检测方法	206
12.5 基于多帧的时域廓线红外弱小目标检测方法	210
12.6 移动式管道滤波方法	218
12.7 红外弱小目标的检测性能分析	219
小结	230
习题	230
第 13 章 遥感图像处理	231
13.1 遥感成像系统	231
13.2 遥感成像技术原理	232
13.3 遥感图像的基本处理方法	236
13.4 遥感图像的复原	247
13.5 遥感图像的质量评价方法	251
小结	253
习题	254
第 14 章 计算成像	255
14.1 计算成像概述	255
14.2 曝光编码方法在去除运动模糊中的应用	261
14.3 编码孔径的方法	263
14.4 光场相机	272
小结	278
习题	279
第 15 章 图像超分辨率重建技术	280
15.1 图像超分辨率重建技术的基本概念	280
15.2 基于插值的图像超分辨率技术	281
15.3 基于重建的图像超分辨率技术	284
15.4 基于学习的图像超分辨率技术	289
小结	293
习题	294
参考文献	295

第1章 绪 论

图像是对物体描述信息的记录,人们从自然界获得的绝大部分信息都是通过图像形式得到的。虽然裸眼能直接看到物体,但是其可见的范围有限。图像处理是对图像信息进行加工以满足人的视觉心理和应用需求的行为。数字图像是对物体信息的数字化表示,数字图像处理是指利用计算机或其他数字设备对图像信息进行各种加工和处理。随着对自然认识的加深和科技的发展,人们已发展了不同的成像技术,特别是近年来随着电子、激光、计算机等技术的发展,出现了很多现代获取图像信息的方法。当今的图像科学已成为一个重要的科学分支,包括图像的形成、获取、传输、存储、处理、分析和识别,成像系统的设计、分析、评估以及新型成像方法的寻求等方面。现代成像理论是光学成像理论与数字图像信息处理理论相结合的产物。从20世纪70年代中期开始,随着计算机技术和人工智能、思维科学研究的迅速发展,光电成像和图像处理技术向更高、更深层次发展,并且迅速扩展到生物医学、信息科学、资源环境科学、天文学、物理学、工业、农业、国防、教育、艺术等各个领域与行业,对经济、军事、文化及人们的日常生活产生着重大的影响。

1. 成像系统及成像技术

被观察对象通过一定的成像系统可以转化为可用于目视观察的图像,这一过程需要通过一定的成像媒介来进行。成像系统是成像过程中最重要的要素。一般而言,被观察对象作为成像系统的输入,最后得到的可目视观察的图像则为成像系统的输出。通常,成像系统不仅包含成像的物理装置,而且包含信息的传输、记录、处理和显示等部件。

作为直接成像的一类方式,几何成像是最简单、历史最长、最成熟的成像方法,即成像系统直接把物体各点转换至相应的图像的各像元。几何成像需要通过成像元件进行,一般只能在紫外、可见光、近红外和红外区进行成像。而扫描成像方法可以对被观察物体各点的能量一次接收、记录或显示,故也属于直接成像,并且,由于它只需逐点接收能量,不需要成像元件,故可用的成像媒介比几何成像方法多。

非直接成像技术是基于近年来激光和计算机技术的发展而发展的。所谓非直接成像技术,就是不直接接收或记录各像元,而是对各像元先进行适当编码,也就是对图像进行一定的变换,然后加以接收或记录。要得到图像的复原,需进行解码,也就是进行逆变换。非直接成像系统较直接成像系统复杂,非直接成像技术大大扩充了人们能观察对象的范围,提高了成像的性能。编码孔径成像时测量像元的一些线性组合,这种方法可提高成像的信噪比;结合压缩感知理论,可以采用低分辨率的传感器获得高分辨率的图像。此外,也发展了一些图像超分辨率重建算法来改善压缩编码孔径的成像质量。

2. 数字图像处理的目的

对数字图像进行加工和分析,主要有以下三方面的目的。

1) 图像质量增强

提高图像的视感质量,以达到赏心悦目的目的。例如,去除图像中的噪声,改变图像

的亮度和颜色,增强图像中的某些成分或抑制某些成分,对图像进行几何变换等,从而改善图像的质量,以达到或真实的、或清晰的、或色彩丰富的、或意想不到的艺术效果。

2) 图像信息提取

提取图像中所包含的某些特征或特殊信息,以便于计算机进行分析。例如,这些特征常被用于模式识别和计算机视觉的预处理等。这些特征也包含很多方面,如频域特性、灰度/颜色特性、边界/区域特性、纹理特性、形状/拓扑特性以及关系结构等。

3) 图像变换

对图像数据进行变换、编码和压缩,以便于图像的存储和传输。

3. 数字图像处理的方法

数字图像处理按照方法分类,主要有以下三类。

1) 图像到图像

这类处理的输入和输出均为图像,主要技术有图像增强、图像复原和图像编码。图像增强是不考虑图像降质的原因,只将图像中感兴趣的特征有选择地突出,衰减次要信息,提高图像的可读性,增强图像中的某些特征,使得处理后的图像更适合人眼观察和机器分析的方法。图像复原利用图像的退化过程,建立相应的数学模型,沿着图像降质的逆过程,把已经退化的图像加以重建和复原,其目的是去除干扰和模糊,从而恢复图像的本来面目。图像编码是在保持一定图像质量的条件下,以尽可能少的比特数来表示图像。由于大数据量的图像信息会给存储器的存储容量、通信干线的带宽以及计算机的处理速度增加极大的压力,故需要对图像进行压缩处理或压缩编码,目的是节约图像的存储空间,减少传输信道的容量以及缩短图像加工处理时间。

2) 图像到数据

这类处理的输入为图像,输出为输入图像内容的各种符号表示,其处理技术主要包括图像分割、图像识别、特征提取等。图像分割的任务是把图像空间按特征分离成互补交叠的有意义的区域,以便进一步对图像进行分析、识别、压缩编码等。通常可以按幅度不同、边缘不同、形状不同来划分各个区域。图像识别又称为模式识别,是数字图像处理的一个新兴的研究方向,识别方法通常有统计识别法、语法结构识别法和模糊识别法三种。特征提取是图像识别中较重要的一环,图像的特征是图像场中可用作标志的属性,而把图像的某些特征加以数字化的过程就称为特征提取。特征提取的过程比较复杂,与识别对象的各种物理的、形态的性能都有联系,需要对识别对象的各种重要特征有充分的理解,故对于不同的识别对象须考虑不同的特征提取方法。

3) 数据到图像

这类处理的输入为数据,输出为图像,即图像重建过程。图像重建主要是利用采集的数据来重建图像,主要算法有代数法、迭代法、傅里叶反投影法和使用最广泛的卷积反投影法等。计算机断层扫描(CT, Computed Tomography)就是利用投影数据重建图像的典型实例。所谓CT图像重建,是按照采集后的数据,求解图像矩阵中的像素,然后重新构造图像的过程;图像矩阵的求解由计算机完成,在CT图像重建的解析法中,当前最常用的是采用卷积运算的滤波反投影法。

4. 数字图像处理的优点

1) 再现性好

数字图像处理与模拟图像处理的根本性区别在于：数字图像不会因存储、传输或复制等一系列变换操作而导致图像质量的退化。

2) 处理精度高

按目前的技术，几乎可将一幅模拟图像数字化为任意大小的二维数组，这主要取决于图像数字化设备的能力。现代扫描仪可以把每个像素的灰度等级量化为 16 位甚至更高，这意味着图像的数字化精度可以达到满足任一应用需求。对计算机而言，不论数组大小，也不论每个像素的位数有多少，其处理程序几乎是一样的。

3) 适用面宽

图像可以来自多种信息源，它们可以是可见光图像，也可以是不可见的波谱图像（例如 X 射线图像、射线图像、超声波图像或红外图像等）。从图像反映的客观实体尺度看，可以小到电子显微镜图像，大到航空照片、遥感图像甚至天文望远镜图像。这些来自不同信息源的图像只要被变换为数字编码形式后，均是用二维数组表示的灰度图像组合而成的，因而均可用计算机来处理。

4) 灵活性高

图像处理大体上可分为图像的像质改善、图像分析和图像重建三大部分，每一部分均包含丰富的内容。由于图像的光学处理从原理上讲只能进行线性运算，这极大地限制了光学图像处理能实现的目标。而数字图像处理不仅能完成线性运算，而且能实现非线性处理，即凡是可以用数学公式或逻辑关系来表达的运算均可用数字图像处理实现。

5. 数字图像处理的应用

图像是人类获取和交换信息的主要来源，因此，图像处理的应用领域必然涉及人类生活和工作的各个方面。随着人类活动范围的不断扩大，图像处理的应用领域也将随之不断扩大。

1) 航天和航空技术方面的应用

航空遥感和卫星遥感图像需要用数字技术加工处理，并提取有用的信息。这些获取的遥感图像主要用于地形地质、矿藏探查，森林、水利、海洋和农业等资源调查，自然灾害预测预报，环境污染检测，气象卫星云图处理以及地面军事目标的识别。

2) 生物医学工程方面的应用

图像处理在医学界的应用非常广泛，无论是临床诊断还是病理研究都大量采用图像处理技术。它的直观、无创伤和安全方便等优点备受青睐。图像处理首先应用于细胞分类、染色体分类和放射图像等。尤其是 20 世纪 70 年代，数字图像处理在医学上的应用有了重大突破，1972 年 X 射线断层扫描 CT 得到了实际应用；1977 年白血病自动分类仪问世；1980 年实现了 CT 的立体重建。

3) 通信工程方面的应用

当前通信的主要发展方向是声音、文字、图像和数据结合的多媒体通信。具体而言，该应用是将电话、电视和计算机以三网合一的方式在数字通信网上传输，由于图像的数据量十分巨大，因此主要进行图像压缩甚至理解基础上的压缩。

4) 工业和工程方面的应用

在工业和工程领域中,图像处理技术有着广泛的应用,如自动装配线中检测零件的质量并对零件进行分类,印刷电路板疵病检查,弹性力学照片的应力分析,流体力学图片的阻力和升力分析,邮政信件自动分拣,在一些有毒、放射性环境内识别工件及物体的形状和排列状态,在先进的设计和制造技术中采用工业视觉等。

5) 军事和公安方面的应用

在军事方面,图像处理和识别主要用于导弹的精确末制导,包括各种侦察照片的判读,具有图像传输、存储和显示功能的军事自动化指挥系统,飞机、坦克和军舰模拟训练系统等;还可用于公安业务的判读分析、指纹识别、人脸鉴别、不完整图片的复原以及交通监控、事故分析等。目前已投入运行的高速公路不停车自动收费系统中的车辆和车牌的自动识别都是图像处理技术成功应用的范例。

6) 文化艺术方面的应用

这类应用有电视画面的数字编辑、动画的制作、电子图像游戏制作、纺织工艺品设计、服装设计、发型设计、文物资料照片的复制和修复、运动员动作分析和评分等,现在已逐渐形成一门新的艺术——计算机美术。

6. 本书的组织

本书从第1章开始,深入、系统地阐述光电成像和图像处理领域的一些主要技术、方法及应用。第1章中介绍了光电成像技术概述以及图像处理技术的目的、方法、优点和应用,可作为后续章节的阅读基础,剩余14章的内容安排如下所述。

第2章:成像光学与光电成像系统。本章简要介绍成像系统的基本性质、光电成像技术发展及其应用范围。

第3章:数字图像基础。本章主要描述图像信息的数字表示、采样及量化原理与过程。

第4章:图像增强。本章重点对灰度变换、直方图修正、图像平滑、图像锐化及彩色增强、边缘检测等基本的数字图像增强方法进行介绍。

第5章:图像的频域处理。本章重点讨论傅里叶变换和小波变换的原理方法,以及在频域实现滤波的方法。

第6章:图像复原。本章对图像退化模型及噪声模型进行讨论和分析,并对传统的线性复原方法进行介绍,如维纳滤波,讨论并说明了非线性方法和其他复原方法等。

第7章:图像分割。本章对基于阈值、基于边缘、基于区域的分割方法和彩色图像分割方法进行重点说明,最后对图像的分割评价准则进行阐述。

第8章:形态学图像处理。本章首先对形态学的基本概念进行简单介绍,然后讲述形态学腐蚀、膨胀、开运算与闭运算、击中/击不中变换等基本操作及应用。

第9章:图像描述。主要对图像的边界描述子和区域描述子进行重点阐述,并介绍图像质量的主观评估方法和客观评价方法。

第10章:模式识别。作为数字图像处理的重要技术之一,本章主要对基于决策理论方法和结构性的识别方法进行详细说明。

第11章:图像处理中的数学模型。本章详细探讨偏微分方程、人工神经网络以及主成分分析在分割、检测及识别等图像处理技术中的应用。

第12章:红外弱小目标检测。本章通过研究像素的时域特性及红外序列图像中目标和

背景时域模型，主要介绍时域剖面线脉冲检测算法并给出其对于弱小目标的分割、跟踪及检测效率。

第13章：遥感图像处理。本章首先介绍遥感成像技术原理及成像系统，然后以遥感图像处理作为综合应用实例进行详细介绍，最后讨论遥感图像几种典型的质量评价方法。

第14章：计算成像。本章对计算成像的概念及方法进行综述性介绍，重点介绍曝光编码方法在去运动模糊和编码孔径在超分辨率重建技术中的应用。

第15章：图像超分辨率重建技术。本章主要介绍基于插值、基于重建和基于学习的三种典型超分辨重建算法。

参考文献

1. 周国栋等. 遥感成像原理及系统. 北京: 科学出版社, 2010.
2. 周国栋等. 遥感图像处理. 北京: 科学出版社, 2010.
3. 周国栋等. 计算成像. 北京: 科学出版社, 2010.
4. 周国栋等. 图像超分辨率重建技术. 北京: 科学出版社, 2010.



图 1-1 系统架构图

图 1-1 系统架构图。该图展示了系统的整体架构，包括输入信号、滤波器、放大器、比较器、控制单元和输出信号。系统主要分为信号处理、图像重建、超分辨率重建和图像增强四个部分。图 1-1 详细描述了重建过程的流程图，涉及输入图像、重建模型、优化算法和输出图像。

图 1-1 系统架构图。该图展示了系统的整体架构，包括输入信号、滤波器、放大器、比较器、控制单元和输出信号。系统主要分为信号处理、图像重建、超分辨率重建和图像增强四个部分。图 1-1 详细描述了重建过程的流程图，涉及输入图像、重建模型、优化算法和输出图像。

图 1-1 系统架构图。该图展示了系统的整体架构，包括输入信号、滤波器、放大器、比较器、控制单元和输出信号。系统主要分为信号处理、图像重建、超分辨率重建和图像增强四个部分。图 1-1 详细描述了重建过程的流程图，涉及输入图像、重建模型、优化算法和输出图像。

图 1-1 系统架构图。该图展示了系统的整体架构，包括输入信号、滤波器、放大器、比较器、控制单元和输出信号。系统主要分为信号处理、图像重建、超分辨率重建和图像增强四个部分。图 1-1 详细描述了重建过程的流程图，涉及输入图像、重建模型、优化算法和输出图像。

第2章 成像光学与光电成像系统

2.1 概 述

2.1.1 电磁波谱

由电磁理论可知,物质内容带电粒子(如电子)的变速运动都会发射或吸收电磁辐射。电磁辐射在空间传播过程中所携带的能量称为电磁辐射能。

在日常生活中, γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波等各种辐射都是电磁辐射。由于产生或探测各种辐射的方法不同,因此它们得到了上述各种不同的名称,但在本质上它们是相同的,故把各种辐射统称为电磁辐射。若将这些辐射按其波长(或频率)的次序排列成一个连续谱,则称之为电磁波谱,如图2-1所示。

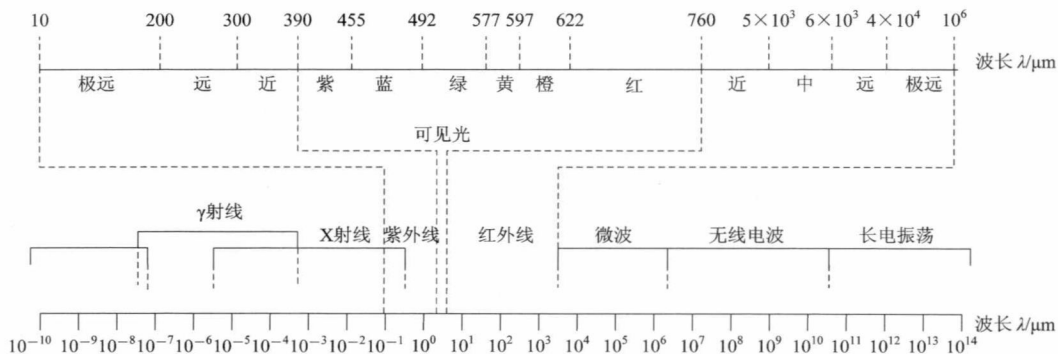


图2-1 电磁波谱

所有的电磁辐射都具有波动性,因此电磁辐射又称为电磁波。所有电磁波都遵循相同形式的反射、折射、干涉、衍射和偏振定律,且在真空中传播的速度具有同样的数值,称之为真空中的光速,其值为 $c=2.997\ 942\ 580\ 000\ 000\ 12\times 10^8\text{ m/s}$ 。

在真空中,频率为 ν 的电磁波,波长为 λ ,真空中的光速为 c ,则有

$$\lambda\nu = c \quad (2.1-1)$$

在介质中,同样频率 ν 的电磁波,波长为 λ' ,速度为 c' ,则有

$$\lambda'\nu = c' \quad (2.1-2)$$

由式(2.1-1)和式(2.1-2)得到

$$\lambda = \frac{c}{c'}\lambda' = n\lambda' \quad (2.1-3)$$

式中, $n=c/c'$ 称为介质对真空的折射率。式(2.1-3)表明,同一频率的电磁波,在介质中的波长是真空中波长的 $1/n$ 。

在光谱学中,由于电磁波的频率是很大的数值,不能直接测量,并且测得的频率数值精度通常比测得的波长数值精度低,因此,多用波长来标志紫外线、可见光和红外线。如无特殊说明,后面所引用的波长数值均是指在真空中的数值。在描述红外辐射时,波长的单位通常用微米(μm)表示。

在光谱学中,电磁波除了用波长 λ 或频率 ν 等参数来表征外,还经常用波数 $\tilde{\nu}$ 来表示。如果电磁辐射在真空中的波长用米(m)表示,则波长值的倒数就是波数值,即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.1-4)$$

在国际单位制中,波数的单位是 m^{-1} 。它的意义相当于在真空中1 m长的路程上包含有多少个波长的数值。利用式(2.1-1),可得到波数 $\tilde{\nu}$ 和频率 ν 的关系为

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \quad (2.1-5)$$

由此可见,波数和频率成正比,波数大小同样可反映频率的高低,因此,在光谱学中,有时又把波数 $\tilde{\nu}$ 称为“频率”。应当注意,在对 $\tilde{\nu}$ 使用“频率”一词时,不要将其与真正的频率混淆。

由于电磁辐射具有波粒二象性,因此,电磁辐射除了作为一种电磁波而遵守上述的波动规律以外,它还以光量子的形式存在。在考虑电磁辐射的辐射和吸收问题时,必须把电磁辐射看成分立的微粒集合,这种微粒称为光子。一个光子具有的能量为

$$\epsilon = h\nu \quad (2.1-6)$$

式中, $h = (6.626\ 176 \pm 0.000\ 036) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,称为普朗克(Planck)常数。

由式(2.1-1)与式(2.1-4)得光子能量与波长和波数的关系为

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda} = hc\tilde{\nu} \quad (2.1-7)$$

即光子的能量与波长 λ 成反比,或者说,光子的能量与波数 $\tilde{\nu}$ 成正比。在光谱学中,有时直接用波数 $\tilde{\nu}$ 来表示光子的能量。

2.1.2 成像光学简介

人们从自然界获得的绝大部分信息是通过图像形式获得的,但人眼可看到的范围是有限的,随着人们对自然认识的加深和科学技术的发展,要被观察的对象也越来越广。从原子世界到太空星系,从地球外貌到地层结构,从晶体到生物分子,从反射物体、透射物体到衍射物体,等等。人们从制造简单的助视仪开始,已经发展了不同的成像技术。特别是近年来随着电子、激光、计算机等技术的飞速发展,出现了很多获取图像信息的方法。现在已不只局限于光学成像,从无线电波到 γ 射线的整个电磁波段,放射性粒子、电子、声波等都被用来作为不同观察的成像媒介,成像技术被广泛应用于各个领域。

现代成像理论实际上是光学成像理论与电信理论相结合的产物,而成像理论也不再只局限于光学领域,但又是以光学成像为基础的。光学成像的发展大致可分为三个阶段:古典光学成像(即直接光学成像)、衍射光学成像(即间接光学成像)和近场光学成像。现代成像光学的基本内容包括:几何光学成像、光纤成像、衍射成像、扫描成像、遥感成像、高速摄影、软X射线和极紫光显微成像、计算机层析成像、近场光学成像、综合孔径成像、编码孔径成像、图像处理以及图像的接收、记录和显示等。

2.2 成像系统及其基本性质

2.2.1 成像系统简介

光学成像系统是信息传递的系统。光波携带输入图像信息(图像的细节、对比、色彩等)从物平面传播到像平面,输出像的质量完全取决于光学系统的传递特性。在一定条件下,成像系统可以看做空间不变的线性系统,因而可以用线性系统理论来研究它的性能。

所谓成像,是指照明一个置于透镜之前的物体,使其经由透镜在另一位置出现与物体非常相似的光场强度分布,这个强度分布即称为该物体的像。由透镜构成的成像系统可看做是线性空间不变系统,其具有叠加性和不变性两种基本性质。把输入物体看做点源的集合,它们在像平面上以几何光学理想像点为中心产生各自的衍射斑,这些衍射斑的函数形式相同,都是透镜孔径的夫朗和费衍射图样,但受到对应物点光场的适当加权。这些脉冲响应的相干叠加给出像面的复振幅分布。系统的作用正是把物面上点的集合变换为像面上重叠的衍射斑的集合,因而像不再是物体的准确复现,而是物体的平滑变形,孔径愈小,脉冲响应愈宽,变形就愈严重。这种平滑化使像中失去物体的精细结构,尤其是当这种细节变化的周期小于脉冲响应的宽度时。

可以用一个数学算符 $L\{\}$ 来描述系统的作用。若函数 $f(x, y)$ 表示一个系统的输入, $g(x, y)$ 表示与之相应的输出,则系统的作用可由下式表示:

$$g(x, y) = L\{f(x, y)\} \quad (2.2-1)$$

它表明输入函数 $f(x, y)$ 由算符 $L\{\}$ 映射或变换成输出函数 $g(x, y)$ 。图 2-2 形象地给出了系统的算符表示。

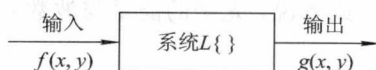


图 2-2 系统的算符表示

可以用图 2-3 所示的框图描述成像过程,输入物场 U_0 。首先通过几何定标器产生一个放大或缩小的几何像 U_g ,这一过程并不丢失信息,然后这个几何像再通过线性不变系统,由于衍射效应几何像变为衍射斑的叠加,实际上得到的是经平滑变形的像 U_i ,在后一过程中损失了信息,为简化表达,直接称 U_g 为输入。

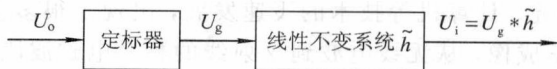


图 2-3 图像的光学成像过程

2.2.2 线性系统和平移不变性

考虑一个用算符 $L\{\}$ 表示的系统,对任意两个输入函数 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$,有 $L\{f_1(x, y)\} = g_1(x, y)$, $L\{f_2(x, y)\} = g_2(x, y)$,若对于任意复数常数 a_1 和 a_2 ,当输入函数为 $[a_1 f_1(x, y) + a_2 f_2(x, y)]$ 时,输出函数为

$$\begin{aligned}
 L\{a_1 f_1(x, y) + a_2 f_2(x, y)\} &= L\{a_1 f_1(x, y)\} + L\{a_2 f_2(x, y)\} \\
 &= a_1 L\{f_1(x, y)\} + a_2 L\{f_2(x, y)\} \\
 &= a_1 g_1(x, y) + a_2 g_2(x, y)
 \end{aligned} \quad (2.2-2)$$

则称此系统为线性系统。式(2.2-2)表明线性系统具有叠加性质,即系统对几个激励的线性组合的整体响应就等于各单个激励所产生的响应的线性组合。图2-4是激励为两个一维函数的例子。不仅电阻、电容、电感所组成的电路系统,而且包括光学系统,在一定条件下都可以看做是线性系统。

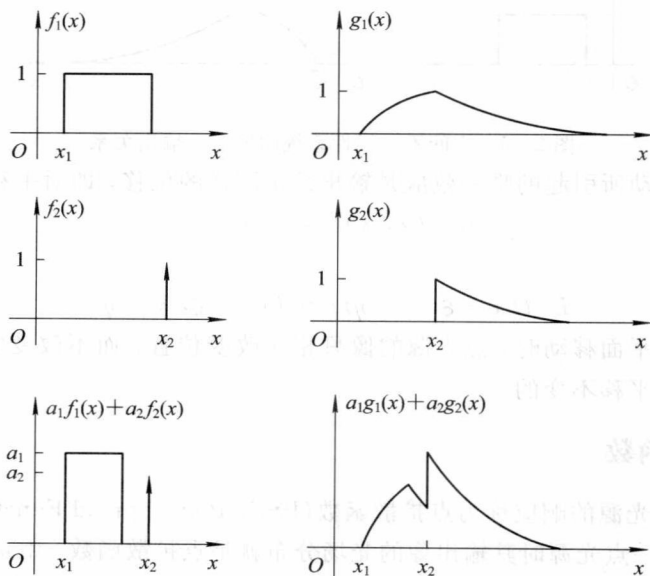


图 2-4 线性系统的叠加性质

一个线性系统的性质可能是随时间(或空间位置)变化的。例如,一个电路系统,不同时刻 τ 输入的时间脉冲信号,其响应 h 的波形可能并不相同。其函数形式与输入时刻 τ 有关,记为 $h(t, \tau)$, 即

$$\varphi\{\delta(t - \tau)\} = h(t, \tau) \quad (2.2-3)$$

若输入脉冲延迟时间 τ , 其响应 h 仅仅有相应的时间延迟 τ , 而函数形式不变, 即

$$\varphi\{\delta(t - \tau)\} = h(t - \tau) \quad (2.2-4)$$

满足式(2.2-4)的线性系统称为时不变系统, 这种系统输入与输出之间的变换关系是确定的, 不随时间变化。固定电阻、电容、电感的特性在一段时间内, 可看做是不随时间变化的, 且由它们组成的电路是时不变的。

一个空间脉冲在输入平面位移, 线性系统的响应函数形式不变, 只产生相应位移, 即

$$\varphi\{\delta(x - \xi, y - \eta)\} = h(x - \xi, y - \eta) \quad (2.2-5)$$

这样的系统称为空间不变系统或平移不变系统。对于平移不变的线性系统, 其脉冲响应为

$$h(x, y, \xi, \eta) = h(x - \xi, y - \eta) \quad (2.2-6)$$

显然 h 仅仅依赖于观察点与脉冲输入点坐标在 x 和 y 方向的相对间距 $(x - \xi)$ 和 $(y - \eta)$, 而与坐标本身的绝对数值无关。对于平移不变系统, 其输入和输出的变换关系是不随空间位

置而变化的。图 2-5 中以一维函数为例表明了这一平移性质。

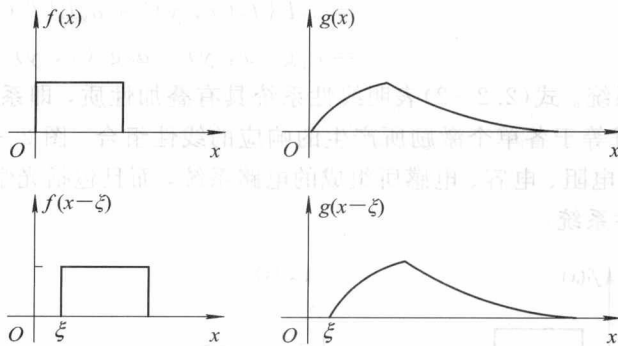


图 2-5 空间不变线性系统的输入—输出关系

输入位置的移动所引起的唯一效应是输出发生同样的位移, 即对平移不变系统, 若

$$L\{f(x, y)\} = g(x, y) \quad (2.2-7)$$

则有

$$L\{f(x-\xi, y-\eta)\} = h(x-\xi, y-\eta) \quad (2.2-8)$$

当点光源在物平面移动时, 点光源的像只相应改变位置, 而不改变它的函数形式, 这样的成像系统就是平移不变的。

2.2.3 点扩散函数

成像系统对点光源的响应称为点扩散函数(PSF, Point Spread Function), 即对光学系统来讲, 输入物为一点光源时其输出像的光场分布就是点扩散函数, 用 $h(x, y)$ 来表示。在数学上, 点光源可用 δ 函数(点脉冲)代表, 输出像的光场分布叫做脉冲响应, 所以点扩散函数也就是光学系统的脉冲响应函数。

对于一个光学系统来说, PSF 就是一个理想的点光源在像面上的像。点扩散函数 PSF 的物理含义是在不考虑加性观测噪声影响的情况下, 一个点源通过该成像系统后所形成的扩散图像, 如图 2-6 所示。因此, 可以将获得的图像看成是真实物体与系统 PSF 的卷积, 即

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (2.2-9)$$

其中, $g(x, y)$ 表示传感器在位置 (x, y) 处获得的图像, $f(x, y)$ 表示真实的物体情况, $h(x, y)$ 是成像系统的点扩散函数。

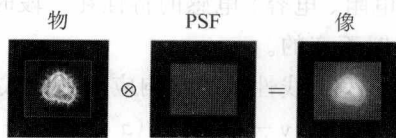


图 2-6 真实物体与 PSF 卷积得到的图像分布

从点扩散函数的定义可以知道, 对于每一个点源, 它通常是一个有限冲激响应滤波器。由点扩散函数的卷积机制造成的图像退化称为模糊, 它的直观表现是图像分辨率的降低。通常所有的模糊退化有一个共性: 它们都是对原始图像进行低通平滑的结果, 从而丢