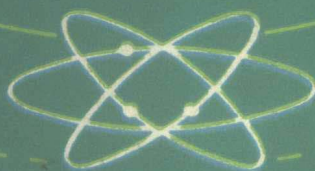


高等学校教材

# 数字图象处理

周新伦 柳 健 刘华志 编



国防工业出版社

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

# THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

# 数字图像处理

周新伦 柳 健 刘华志 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书讨论数字图象处理的基本概念、理论和算法。全书共分八章。第一至三章讨论本学科的基础知识。第四至八章分别讨论图象处理的基本课题，包括压缩与编码、增强、恢复、重建、分割与描述。配合正文，有适量的习题以供练习。

本书可作为无线电技术、信息科学、电子工程、计算机应用等有关专业数字图象处理课程的试用教材。也可供有关科技人员参考。

### 数字图象处理

周新伦 柳 健 刘华志 编

责任编辑 李 端

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张17 394千字

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷 印数：0,001—6,000册

统一书号：15034·3080 定价：2.80元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本书系由〈无线电技术与信息系统〉教材编审委员会〈电路与系统〉编审小组评选审定，并推荐出版。

该书由华中工学院周新伦担任主编，成都电讯工程学院朱维乐、李在铭担任主审。编审者均依据〈电路与系统〉编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为 60 学时，主要讨论数字图象处理的基本概念、理论和算法。由于本学科内容的迅速更新与发展，它所涉及的概念和方法不仅十分广泛，而且还在不断扩充，所以要网罗各种处理方法并概括其最新技术几乎是不可能的。本书试图在合理的篇幅内，使选材适当完整充实、新颖丰富。全篇共分八章。第一章导论，讨论了图象和数字图象的概念，并简单介绍了数字图象处理系统。第二章视觉基础知识，主要讨论视觉现象及视觉的基本模型。第三章图象的表示与变换，讨论了图象的线性运算、各种表示方法以及若干变换，还讨论了图象的取样、量化与重现原理。第一至三章是学习本学科所必备的基础知识。第四至八章分别讨论图象处理的基本课题，包括压缩与编码、增强、恢复、重建、分割与描述。

学习本课程要求读者具备基本微积分、概率论、线性代数、线性系统理论（包括正交变换）以及数值分析的基本知识。本书第三章对有关知识提供一些简要的说明，但限于篇幅，除个别问题外，通常均直接引用结论。

本书第一、二、三、五、六、七各章由周新伦编写，第八章由柳健编写，第四章由刘华志编写。全稿由周新伦统编。张肃文教授及顾德仁教授指导本书的编写工作。黄载禄副教授对本书编写工作给予许多支持和帮助。作者在此表示诚挚的感谢。限于水平，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八五年七月

## 目 录

<b>第一章 导论</b> .....	1
1.1 图象处理的简明历史及应用 .....	1
1.2 图象和数字图象 .....	2
1.3 数字图象处理系统简介 .....	5
1.4 数字图象处理研究课题与本书编排 .....	13
习题 .....	14
<b>第二章 视觉基础知识</b> .....	16
2.1 人眼构造简介 .....	16
2.2 光度学及色度学基础 .....	17
2.3 视觉现象 .....	25
2.4 视觉模型 .....	29
2.5 图象质量的度量 .....	32
习题 .....	35
<b>第三章 图象的表示与变换</b> .....	36
3.1 线性系统中图象的基本运算 .....	36
3.2 图象的傅里叶变换 .....	41
3.3 图象的取样、量化与重现 .....	49
3.4 图象的矩阵与向量表示 .....	56
3.5 图象的统计表示——随机场 .....	59
3.6 纹理 .....	65
3.7 图象的正交变换 .....	67
习题 .....	77
<b>第四章 图象数据压缩与编码</b> .....	80
4.1 信源编码的基本概念 .....	80
4.2 图象编码模型 .....	85
4.3 基于图象的图形结构特性的编码方法 .....	86
4.4 基于图象统计特性的编码方法 .....	90
4.5 基于图象特征提取的数据压缩方法 .....	102
附录 .....	103
习题 .....	104
<b>第五章 图象增强</b> .....	106
5.1 对比度增强 .....	106
5.2 图象平滑 .....	119
5.3 图象锐化 .....	130
5.4 同态滤波 .....	137
5.5 伪彩色与假彩色 .....	140

5.6 代数运算 .....	143
5.7 几何校正 .....	144
习题 .....	147
<b>第六章 图象恢复</b> .....	<b>150</b>
6.1 退化模型的向量空间表示 .....	151
6.2 退化参数的确定 .....	153
6.3 图象恢复的滤波方法 .....	159
6.4 图象恢复的代数方法 .....	171
6.5 图象恢复的非线性方法 .....	174
6.6 约束点扩展函数解卷法 .....	180
习题 .....	183
<b>第七章 图象重建</b> .....	<b>184</b>
7.1 图象重建的基本原理 .....	184
7.2 滤波-逆投影法 .....	188
7.3 用于扇束投影的滤波-逆投影法 .....	194
7.4 代数重建技术 .....	202
7.5 重建技术的应用 .....	204
习题 .....	206
<b>第八章 图象分割与描述</b> .....	<b>207</b>
8.1 象素分类 .....	207
8.2 边缘检测 .....	220
8.3 序贯分割 .....	235
8.4 图象描述 .....	239
习题 .....	263
<b>参考文献</b> .....	<b>265</b>



# 第一章 导 论

## 1.1 图象处理的简明历史及应用

本世纪二十年代, 纽约与伦敦间首次通过海底电缆传送数字化的新闻图片, 这也可以说是一种简单的数字图象处理技术。但严格来说, 所谓数字图象处理, 指的是用数字计算机进行图象处理。它开始于五十年代中期, 当时美国在太空探索计划的推动下, 开始了这项技术的研究。但作为这项新技术诞生的重要标志则是在 1964 年美国喷气推进实验室 (JPL) 正式使用数字计算机对“徘徊者 7 号”太空船送回的四千多张月球照片进行了处理, 得到前所未有的清晰的图片。此后几年, 这项技术在空间研究计划中继续得到应用。例如, 在“勘测者”太空船的登月飞行和一系列“水手号”太空船的靠近火星飞行以及阿波罗载人登月飞行中, 对所传回的许多图象进行了增强和恢复, 从而使图象处理技术不断完善。与此同时, 这门技术还在生物医学工程与军事侦察等领域得到应用并取得显著成果。到了六十年代末, 数字图象处理已形成一个比较完整的理论与技术体系, 从而构成了一门独立的新兴学科。

数字图象处理在六十年代从应用中产生并兴起, 到了七十年代, 则得到迅猛的发展。之所以如此, 一个重要因素是客观的需要。人类从外界获得的知识中, 百分之七十是通过眼睛获取的。眼睛获取的都是图象信息, 而在有些特殊任务中, 目前还没有什么能代替图象所传递的全部信息。因此, 用以改善图象质量的数字处理技术就成为人类认识世界、改造世界的强有力工具。另一个重要原因是计算机硬件 (以固体集成电路技术为代表) 与软件 (以快速傅里叶变换的算法为代表) 的持续进展以及数字处理的精确性、灵活性与通用性, 从而开辟了用数字技术进行高分辨率图象处理的道路。

当今, 数字图象处理除了用于前面所说的太空探索计划外, 还广泛应用于其它领域。归纳起来, 主要有以下几个方面。

### (1) 遥感中的应用

1972 年美国发射第一颗陆地卫星后, 这门技术被应用于地球资源勘探及气象预测等方面。因为遥感图象必须经过计算机处理后才能得到需要的信息或有用的特征, 从而不仅可了解地表的山川、森林、农作物、海洋资源、气象等, 还可探明地下的矿藏、石油、地下水等。随后, 美国继续发射了陆地卫星 I、II、IV, 海洋卫星、气象卫星和军事卫星等, 使遥感资料不断丰富。目前, 世界上已有 130 多个国家利用遥感技术或资料, 取得了很大的经济效益和军事上的好处。

### (2) 生物医学工程中的应用

数字图象处理应用于生物医学的历史几乎与其本身的历史相当。这是因为一些从事数字图象处理的研究人员, 如 JPL<sup>●</sup> 的 R. 内森等人对生物学和医学问题向来颇感兴趣,

● JPL系Jet Propulsion Laboratory的缩语。

常利用业余时间从事生物医学图象如细胞显微图象的研究。因而在六十年代，图象处理在细胞分类、染色体分类和放射学方面获得很多进展。七十年代则取得两项惊人的发明：1972年X射线断层摄影技术（CT）研究成功并商品化和1977年白血球自动分类仪成为商品问世。早期CT用于扫描脑的断层图象，以后出现可扫描全身的CT。1980年美国梅约生物医学研究所试制成功X射线动态空间重建设备，可得到心脏的活动立体图象，把数字图象处理的水平提高到在四维空间的应用。这就极大地促进了数字图象处理在生物医学应用方面的发展。

生物医学图象主要有X射线图象（包括CT），核同位素图象，显微图象以及超声图象。X射线图象的对比度很低，放射医师容易误诊；核同位素图象及超声图象都比较粗糙，分辨率很差；使用图象处理技术，可使这些图象各部分轮廓清晰，便于视觉检查。显微图象的处理主要用于细胞诊断自动化、白血球的百分比分类以及染色体的核型分类上。

### （3）工业中的应用

数字图象处理应用于工业始于七十年代初期，主要有三个方面：视觉检验，零部件选取及过程控制。这些都是工厂自动化和研制机器人必须解决的课题。

视觉检验广泛应用在工业各个部门，为工业生产提供自动的质量检验，以改善产品质量、降低生产成本、提高生产率。这类应用包括电子工业中印刷线路板与集成电路光刻掩模的缺陷检验；机械工业中各种零部件缺陷的检验及焊缝质量的检验；钢铁工业中钢板表面的自动探伤；纺织工业中纺织品的质量检验以及医药制品工业中胶衣质量自动检验；等等。

零部件选取应用于零件传送、在机器上装卸工件、零部件组装等等。例如电子工业中集成电路芯片的自动定位与焊线等。

过程控制是工业应用中最为复杂的课题，包括工具（如装配工作中用的起子）的控制，机器（如切割机）的控制以及生产过程的控制（如自动焊中焊缝跟踪、熔焊速度及熔深的自适应控制等）。

### （4）军事及公安等其它方面的应用

军事上的导向武器、无人操纵武器、火炮控制、反伪装等均要用到数字图象处理技术。公安机构对人脸、指纹、趾纹、视网纹、署名、图章等的识别将依靠图象处理来实现。其它方面的应用则包括文化生活中的图象信息的传输、显示、记录及图象数据的制作和更新，自动字符识别，模糊了的古代字画或档案文件的恢复等。

## 1.2 图象和数字图象

人的一生，每时每刻都接触到图象，图象信息是人类认识世界以及认识人类本身的重要源泉。图象包括的范围非常广泛。各类图片，如普通照片、X光底片、各种绘画与绘图是图象；各种光学影象，如映在屏幕上的电影、电视画面等也是图象。广义来说，人们生活环境中的每一可见的自然景物都是一幅活生生的立体图象。上述这些图象均由可见光形成，能为人的视觉系统所感受，称为可见图象。图象还可由X射线、红外线、微波、超声等形成，这类图象实质上是某种物理量的平面或空间分布图，然而不能为人眼直接感受，称为不可见物理图象。但这类图象通过相应的换能与显示装置变换后，仍然

能为视觉所感受。如X光透视图象, 红外电视图象, 微波辐射计以及B型超声诊断仪上所显示的图象等。

简略地说, 一幅可见图象是一个平面能量分布图, 其本身可以是一个发光物体辐射源, 也可以是物体受光辐射源照射后反射或透射的能量。这种分布图在数学上可用多变量函数来表示

$$Q(x, y, \lambda, t) \quad (1-1)$$

变量  $x, y$  表示图象上象点的坐标位置,  $\lambda$  表示辐射能的波长,  $t$  表示时间。顺便指出, 图象 (Image), 如前所述, 其含意非常广泛, 而图片 (Picture) 仅是图象的形式之一。但在国外文献上, Image 与 Picture 已混用, 均指图象。

一幅实际图象, 其尺寸是有限的。为使数学处理简便起见, 总把图象的尺寸规格取成矩形, 故有

$$-L_x \leq x \leq L_x \quad (1-2a)$$

$$-L_y \leq y \leq L_y \quad (1-2b)$$

五光十色的自然景物或电影、电视画面均是随时间而变化的活动图象, 但我们一般只限于讨论静止图象 (特定瞬间的图象) 的处理技术, 所以时间的因素可以不考虑。

前已指出, 视觉效应是由可见光刺激人眼引起的。如果光的辐射能量相同而波长不同, 则引起的视觉效果也不同。人眼对图象明亮度的响应通常用下式衡量

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} Q(x, y, \lambda) V_r(\lambda) d\lambda \quad (1-3)$$

其中  $V_r(\lambda)$  代表相对视敏函数, 它是人眼对不同波长光的明亮度感觉的相对度量 (详见第二章第 2.2 节)。对于彩色图象, 根据三基色原理, 可分解成红、绿、蓝三幅单色图象, 与 (1-3) 式类似, 三基色相应值可写成

$$f_R(x, y) = \int_0^{\infty} Q(x, y, \lambda) R_r(\lambda) d\lambda \quad (1-4a)$$

$$f_G(x, y) = \int_0^{\infty} Q(x, y, \lambda) G_r(\lambda) d\lambda \quad (1-4b)$$

$$f_B(x, y) = \int_0^{\infty} Q(x, y, \lambda) B_r(\lambda) d\lambda \quad (1-4c)$$

其中  $R_r(\lambda), G_r(\lambda), B_r(\lambda)$  分别代表人眼对红、绿、蓝三基色的相对视敏函数。(1-4) 式中  $f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)$  三者的比例决定了总的色度感觉, 而三者合成的数值决定了总的亮度感觉。类似地, 在遥感多光谱图象中, 第  $i$  个谱段的图象相应值可由下式给出

$$f_i(x, y) = \int_0^{\infty} Q(x, y, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda \quad (1-5)$$

其中  $S_i(\lambda)$  是第  $i$  谱段传感器的光谱响应。

因为本书主要讨论黑白图象, 即图象函数只表示能量值而不考虑波长。在视觉效应上仅有灰度浓淡之分而无色彩之变幻。这种图象函数就可用(1-3)式  $f(x, y)$  来表示。显然, 它是一个单值实函数, 该函数在某点的值称为图象在该点的灰度或明亮度 (Brightness), 我们常简称明亮度为亮度。但应注意, 它与第二章第 2.2.1 节光度学中所讨论的亮度 (Luminance) 在概念上不完全相同, 不要混淆。顺便指出, 对于彩色图

象, 当它分解成红、绿、蓝三幅单色图象后, 如 (1-4) 式所示, 就可按黑白图象那样, 只考虑能量值而略去波长。上述考虑对遥感多光谱图象的任一谱段均同样适用。

综上所述, 可知图象函数能表示成平面上的二元函数  $f(x, y)$ , 且因光的辐射能量总是非负且有界的, 所以亮度是一个有界非负的实数, 从而满足

$$0 \leq f(x, y) \leq B_m \quad (1-6)$$

其中  $B_m$  代表最大亮度。图象所用的坐标系如图 1-1 所示。一般来说, 图象函数是可解析的, 如可积, 存在傅里叶变换等。

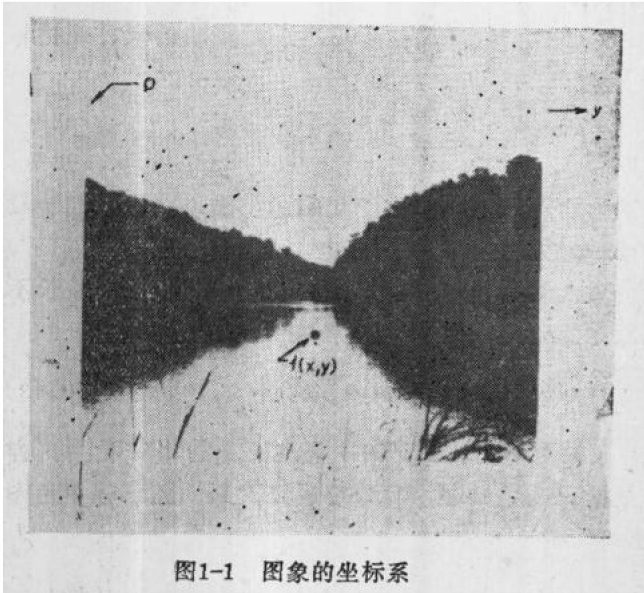


图1-1 图象的坐标系

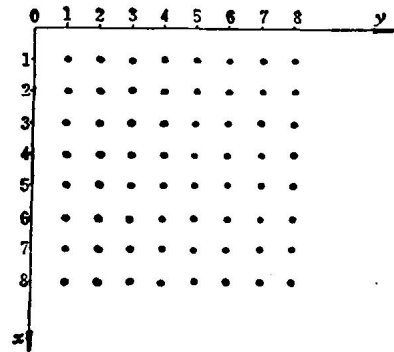


图1-2 数字图象阵列

上面所说的图象是我们日常所见的图象, 即图象函数是可解析的连续函数, 称为连续图象。因连续图象不适合用计算机处理, 故必须转换成数字图象。数字图象是指空间上取样、亮度上量化的图象, 即从一幅连续图象中抽取一组离散的样本, 并对这些样本在取值上进行离散化。通常, 为便于计算机操作, 样本值的量化等级均取 2 的  $m$  次幂, 且每级灰度值只取整数值。例如, 当  $m = 8$  时, 图象样本值便量化成 256 级, 若最亮灰度级 (白) 取值为 255, 则最暗灰度级 (黑) 取值为 0。在大多数情况下, 取样是等间隔的, 因而, 数字图象可看成一个整数阵列, 如图 1-2 所示。其中  $x$  轴取向是行数增加的方向, 而  $y$  轴取向则为列数增加的方向。数字图象阵列中的元素称为象素 (Pixel)。一般数字图象阵列的尺寸比较大, 如 500 行 500 列, 若量化成 256 等级, 那么要把一幅数字图象存入计算机, 需占 25 万个字节 (每字节为 8 比特数)。

在数字图象中, 除图象阵列的边界外, 其上任一点  $(x, y)$  均有八个邻点与之直接相邻, 可表示成

$$\begin{array}{ccccc} (x-1, y-1) & (x-1, y) & (x-1, y+1) & & \\ (x, y-1) & (x, y) & (x, y+1) & & \\ (x+1, y-1) & (x+1, y) & (x+1, y+1) & & \end{array}$$

在第三章将会指出, 对于数字图象, 坐标变量  $x, y$  均取离散整数值  $0, 1, 2, \dots$ ,

此时，水平邻点和垂直邻点的距离相隔均为 1，而对角邻点与中心点  $(x, y)$  相距则为  $\sqrt{2}$ 。

有关连续图象转换成数字图象的原理将在第三章中介绍，这里暂不讨论。

### 1.3 数学图象处理系统简介

数字图象处理需要用计算机对图象进行加工。因为计算机只能对数字进行运算，所以当景物输入计算机前需要采用若干技术措施和相应设备把景物转换成数字图象，其中包括连续图象的形成与记录以及图象数字化设备。当计算机把数字图象处理完毕后，还需要用相应的设备把数字结果再转换成图象显示出来或印成照片，即所谓图象的显示与记录设备。

图 1-3 方框图表示出图象处理过程的概貌。物体可以通过照相机形成与物体相应的光学图象，经显影、定影处理后就在胶片上留下与光学图象相应的负象；也可以通过电视摄像机转换成图象电信号

输出。数字化设备把底片负象或图象电信号转换成数字图象送入计算机进行处理，处理完毕后由显示与记录设备把处理好的数字图象再转换成光学图象在显示器上显示出来，并可通过记录设备印成照片输出。

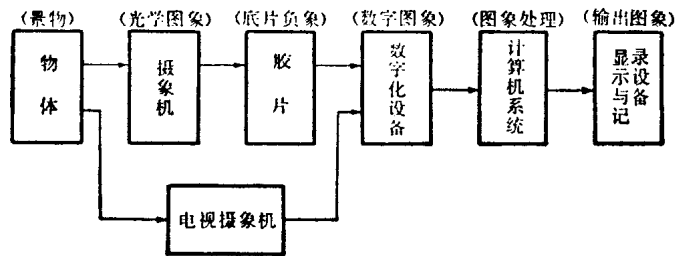


图1-3 图象处理过程框图

本节简要介绍图象形成与记录、图象数字化及图象显示与记录设备，并以方框图形式对图象处理系统作一概括性说明。关于图象数字化及图象重现的基本原理则放在第三章中讨论。现在数字图象处理技术已日趋成熟，各种多功能的处理系统已作为商品投放市场。这些系统往往配备比较完整的包括各类基本处理方法在内的应用程序。假定你熟悉图象处理方法，那么通过阅读用户手册就能使用处理系统所提供的应用程序进行数字处理的操作；或者根据计算机系统所使用的语言自己设计程序进行处理。至于硬件的详细信息，已超出本书范围，读者如有兴趣可参考有关资料。

#### 1.3.1 图象形成与记录设备

##### (一) 图象的形成

广义说来，任何可见景物均是图象。人之所以能感受到图象是依靠人眼的精巧结构与视觉系统的生理功能。人眼其实是一种出色的图象形成系统（由虹膜及晶状体组成光学透镜）和记录系统（视网膜）。计算机要对图象进行处理，同样要“感受”到图象，这就需要先把来自自然景物的辐射能量（它可以是景物本身辐射的能量，也可以是景物受辐射源照射后反射或透射的能量）转换成一种可资利用的图象。

图象处理的应用范围很广，所以成象技术也是多种多样的，除了常用的光学成象与射线成象外，还包括超声成象、红外成象、微波成象等等。后面几种成象技术都需用相应的传感器进行变换以获得光学图象或电信号。由于篇幅所限，我们仅介绍常用的两种

成象原理，即光学成象与射线成象，目的是通过这些典型原理的介绍使我们了解图象形成的一般过程。

### (1) 光学成象

光学透镜成象原理如图 1-4 所示。在视野内，景物上每一点发出的光由透镜聚焦后在另一边形成图象上对应的点象。景物上的点离透镜距离不同，所形成的象点距透镜也各异，其间存在下列关系

$$1/d_o + 1/d_i = 1/f \quad (1-7)$$

式中  $d_o$ 、 $d_i$  分别是物点、象点离透镜的距离； $f$  是透镜的焦距，为一常数。若景物离透镜较远，也即  $d_o$  较大，则  $1/d_o$  可忽略不计，那么我们有  $d_i \approx f$ 。这就是说，图象上各点离透镜的距离差不多是相等的，象平面接近于焦平面。于是，成象系统就把景物发出的能量信息转换成象平面上亮度图象。

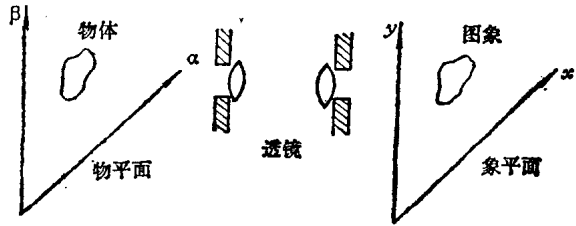


图1-4 典型光学成象系统

实际上，由于透镜孔径有限，产生了光的衍射作用，结果景物上一个点在象平面上被散开成一个光斑。因物平面上每一点的能量均散布到它的邻近点上去，所以光学成象系统所形成的图象原则上说都有某种程度的模糊。

实际上，由于透镜孔径有限，产生了光的衍射作用，结果景物上一个点在象平面上被散开成一个光斑。因物平面上每一点的能量均散布到它的邻近点上去，所以光学成象系统所形成的图象原则上说都有某种程度的模糊。

光学成象系统广泛应用于各种照相机及摄影机中，例如普通照相机、遥感中用的高分辨率照相机、显微照相机、高速摄影机、全息摄影机以及电视摄像机等。

### (2) 射线成象

波长极短的电磁波，如 X 射线或伽玛射线或各种高能质点，它们都有穿透物体的能力，可以用来形成图象。其原理见图 1-5。

射线由点辐射源射出，穿透物体后被象平面拦阻。由于物体内部各部分组织的成分及疏密不一样，穿过的射线被削弱的程度也各不相同，于是在象平面上就形成能显示物体内部结构的透视影象。这类图象一般称为射线照片，如 X 光照片。射线成象过程则称为射线摄影术。典型的射线成象设备是 X 光摄影机。

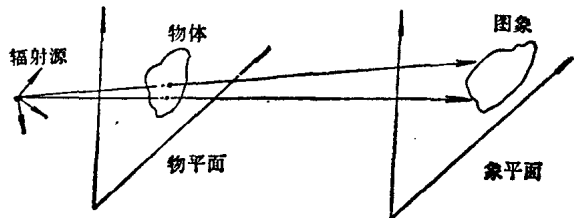


图1-5 射线成象原理

射线成象不同于光学成象，它虽没有光学中的衍射现象，却存在下面三个因素的影响。

射线成象不同于光学成象，它虽没有光学中的衍射现象，却存在下面三个因素的影响。

#### (a) 辐射源大小

射线照片的分辨率与辐射源大小有密切关系。分辨率愈高，要求辐射源的尺寸愈小。理想的辐射源应是无限小的点源。辐射源若有一定尺寸的话，就会使透视影象扩展，如图 1-6(a) 所示。

#### (b) 几何倾斜效应

观察图 1-6(b)，物体的两条水平边沿只有一条处在点源的辐射线方向上。于是，该边沿的影象轮廓清晰，而另一条边沿则扩散开来了。

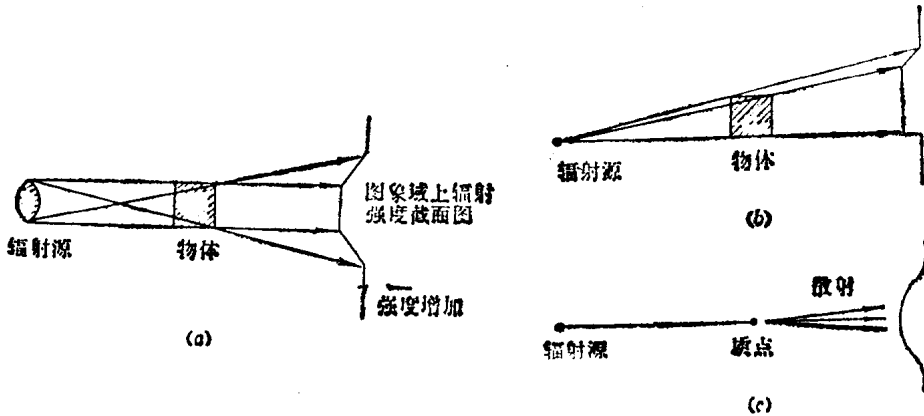


图1-6 射线成像误差的来源

### (c) 辐射线散射

射线穿过物体时，辐射量子会与物体中原子碰撞。于是，一方面使量子强度削弱，另一方面也产生散射。如图 1-6(c) 所示。

上述这三种因素均会形起图象模糊。实际上，它们是同时起作用的，情况相当复杂，由此而造成的图象模糊很难用数学模型加以描述。

## (二) 图象的记录

图象的记录可分为两大类：光化学和光电。光化学记录与照相机配合，以照相胶片为代表；光电记录则以电视摄像机为代表；它们均广泛应用于数字图象处理中。

### (1) 光化学记录

照相胶片记录图象是依靠胶片乳剂层（感光层）内卤化银（如溴化银、氯化银）所特有的性质来完成的。乳剂层在辐射能（光、X射线等）照射下（曝光）发生变化，经过显影、定影处理后，乳剂层内卤化银颗粒还原成黑色的金属银颗粒。若物体越明亮，即曝光量越大，所还原的金属银颗粒就越多，底片就显得黑而不透明，它对光的阻挡和吸收也就越大。反之，则还原的金属银颗粒就少，底片就显得不黑而透明。所以，胶片记录的图象是潜象。显然，当用光线照射底片时，一部分光线被金属银颗粒阻挡而不能通过，另一部分光线则透过乳剂层射出。这种阻挡光线的能力叫做阻光率，用符号  $O$  表示；而称透过光线的能力为透射率，用符号  $T$  表示。

透射率又称透明度，是透过已还原为金属银的乳剂层的光强  $I$ ，与照射到乳剂层的光强  $I_0$  之比，即

$$T = I/I_0 \quad (1-8)$$

阻光率又称为不透明度，它是透射率的倒数，是光强透过还原为金属银的乳剂层后所减小的比率，即

$$O = 1/T = I_0/I \quad (1-9)$$

常用阻光率的以10为底的对数来表示光密度  $D$ ，即

$$D = \lg O = \lg \frac{1}{T} = -\lg T \quad (1-10)$$

所以光密度  $D$  是对底片阻挡光线能力的一种度量。底片上的潜象也因此而称为密度图象。

顺便指出，光密度概念也适用于照片（正片），此时定义光密度为

$$D_r = -\lg r \quad (1-11)$$

其中  $r$  为反射率，是照片表面反射光强与入射到照片上的光强之比。显然，透射率  $0 \leq T \leq 1$ ；反射率  $0 \leq r \leq 1$ 。于是接近于零的密度值对应于几乎完全透射或反射；而非常高的密度值，譬如 3 或 4，对应于几乎完全不透明或不反射（仅  $10^{-3}$  或  $10^{-4}$  的入射光波被透过或被反射）。

若我们称照度与时间的乘积为曝光量，即在一定时间内胶片所受到光源的照度，并以  $H$  来代表。实验证明，光密度与曝光量之间存在一定的关系。若以曝光量  $H$  的对数  $\lg H$  值作为横坐标，以密度值  $D$  作为纵坐标，可测得  $D-\lg H$  特性曲线，如图 1-7 所示。当曝光量低于某值时，密度值与曝光量无关且等于最小值，即特性曲线上  $AB$  段，称为灰雾部分。特性曲线上  $BC$  段，称为趾部。其密度值随着曝光量对数值的增大而变化，开始增加缓慢尔后逐渐加快。随后便是特性曲线的直线部分  $CD$  段，其密度值的生长与曝光量对数值的生长成比例关系，是正确曝光的部分。最后，特性曲线进入饱和部分，称为肩部。这一部分的密度值与曝光量对数值的增加不成比例。

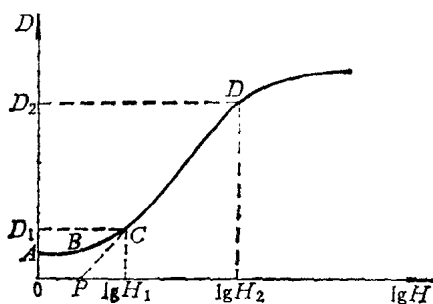


图1-7 典型的  $D-\lg H$  特性曲线

在摄影技术中，把照片上影象的明亮与阴暗之间的差别称为反差。被摄物体的反差能否在底片上准确反映出来，取决于感光材料的性能。为了度量被摄物体反差与影象反差之间的关系，常用反差系数  $\gamma$  来表示。 $\gamma$  定义为

$$\gamma = (D_2 - D_1) / (\lg H_2 - \lg H_1) \quad (1-12)$$

其中  $D_1$ 、 $D_2$  分别为特性曲线直线段  $CD$  上两端点  $C$ 、 $D$  的密度值； $H_1$ 、 $H_2$  为相应点的曝光量。可见，反差系数就是特性曲线在直线段上的斜率。显然， $\gamma = 1$  时，底片上潜象的密度值正确地对应于原物的亮度，即影象的反差与原物反差相同。当  $\gamma > 1$  时，影象反差大于原物反差；而  $\gamma < 1$  时，影象反差小于原物反差。

据上所述，特性曲线直线段的数学表示式可写成

$$D - D_1 = \gamma (\lg H - \lg H_1)$$

$$\text{或} \quad D = \gamma \lg H - (\gamma \lg H_1 - D_1) = \gamma \lg H - D_0 \quad (1-13)$$

其中  $D_0 = \gamma \lg H_1 - D_1$ ，称为偏移量。

由于特性曲线上只有一部分是直线段，所以总的来说胶片记录图象是非线性的，这种非线性在某些场合（如图象恢复）需加考虑。

## (2) 光电记录

电视摄像机从原理上说一般由三部分构成，即形成图象的光学系统，检测图象的光电变换器（例如视象管）以及电子扫描线路。由光学系统形成的图象，投影到位于象平面的光电变换器上；光电变换器则把光能转换成电位分布的潜象，通过电子扫描线路再转化成电信号输送出去。所以在光电记录过程中，实际上是分成图象的检测和记录两个子过程。

通常，照度和输出电信号的变化范围均很宽，故习惯上把这两者的关系曲线画在对



数坐标上,称为转移特性。横坐标表示照度对数值 $\lg E$ ,纵坐标表示输出信号电流对数值 $\lg i_r$ 。典型的转移特性示于图1-8。类似于照相胶片中的情况,在转移特性曲线上,低照度区有一个残留信号电流,称为暗电流。它表明在没有光照的情况下,光电转换器仍存在输出电流。在高照度区,输出电流将逐渐趋于某一最大值,呈现饱和状态。在这两个响应之间,存在着一段直线部分,它表明输出电流对数值的增长与照度对数值的增长成比例关系。按照惯例,我们称转移特性在直线段上的斜率为光电转换器的反差系数 $\gamma$ 。于是,转移特性直线的数学表示式可写成

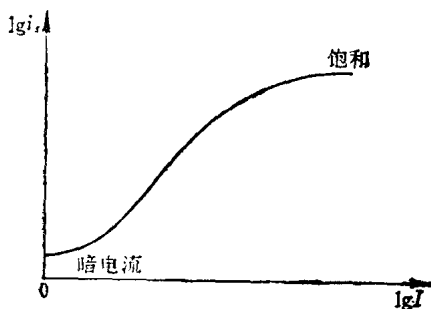


图1-8 光电转换器的转移特性

$$\lg i_r = \gamma \lg E - C_1 \quad (1-14)$$

其中 $C_1$ 为偏移量。

### 1.3.2 图象数字化设备

图象数字化设备是光电转换、图象取样和模拟/数字(A/D)转换等设备的组合体,其中很多则是根据电视摄像机、传真机等设备演化而来,分别介绍如下。

#### (一) 平台式微密度计

平台式微密度计是测量透射率(如对胶片等)或反射率(如对照片、图片等)的仪器,它对光密度的测量有很高的精度。微密度计主要部分是一台大型的自动化显微镜,它把通常显微镜样品台用一个大的样片平台代替,最大样片尺寸可达 $25 \times 25$ 平方厘米。平台受计算机控制可在 $X$ 和 $Y$ 两个方向上作步进移动,最小步距为2.5微米。因为平台是通过由步进电机驱动的精密螺杆来带动的,一般重复定位精度约为 $\pm 10$ 微米。微密度计中的光源是卤钨灯泡,经过光学系统聚光后形成很小的光点,用此光点来照射样片。由于样片各点的透射率或反射率不同,使透过或反射的光强也各不相同,此光强再用物镜会聚于检测器上。平台每移动一步,检测器即测得样片上某相应点的光密度值,光密度测量范围一般可达 $0 \sim 4$ (透射)或 $0 \sim 2$ (反射),精度为 $\pm 0.005$ 。光密度的取样值经过A/D转换器转换成二进制数表示的光密度数据,存入计算机内存中,或进而录在磁带或磁盘上作为永久性资料保存。微密度计的最高量化等级可达1024级,即10位二进制数。

微密度计是一种精密的图象输入设备,其特点为精度极高,取样很密,但运行速度却很慢。为提高仪器运行速度,目前有些微密度计采用了增加检测器数目并提高平台移动的步进速度。此外,还采用了双光路三色光学系统,可以数字化彩色胶片。

#### (二) 鼓式扫描器(扫描鼓)

鼓式扫描器的工作原理与通常传真机的工作原理相似。把胶片安放在一个滚筒上,光学系统使光点从滚筒内部投射到胶片上,透过胶片的光线由另一光学系统聚集后投在光电倍增管靶面上,经放大后由检测装置测量得光密度值。若对照片进行数字化,那么光源由滚筒外投射到照片上,光学系统则收集反射光线,从而测得光密度值。光源、光学