

高等学校教学参考书

# 数字图象处理基础

北方交通大学 阮秋琦 编

中国铁道出版社

高等学校教学参考书

# 数字图像处理基础

北方交通大学 阮秋琦 编

中国铁道出版社

1988年·北京

## 内 容 简 介

本书全面地、系统地介绍了数字图象处理技术中的基础理论及各种处理方法，并列举一些实例，以供读者参考。

全书共分八章，其中包括：图象处理综述；图象与视觉系统；图象处理中的正交变换；图象增强；图象编码；图象复原；图象分析及模式识别的理论和方法。

本书可供信息处理、通信、自动控制、遥感、生物工程、医学及计算机应用等专业的大学师生阅读，并可供从事图象处理工作的科学研究人员及工程技术人员参考。

IS450/16

高等学校教学参考书

### 数字图象处理基础

阮秋琦 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 颜绍睿

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/16 印张：21 插页：3 字数：512 千

1988年6月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价：3.65 元

# 前 言

图象处理是当前信息处理中十分活跃的一个分支。由于计算机和大规模集成电路技术的发展，为图象处理技术的发展扫清了障碍。在近三十年的时间内，图象处理技术不仅在理论上取得了很大的进展，而且其应用领域也日益扩大。现在，图象处理不仅已成为各学科之间学习和研究的对象，而且其在各个领域取得的成果也奠定了图象处理理论进一步发展的坚实基础。

本书是根据通信、信号教学指导委员会决定进行编写，供信息处理、自动控制、通信、计算机应用等专业学生参考。书中内容是作者几年来教学及科研实践的体会并参考国内外有关书籍、文献资料编写而成。图象处理技术所包含的内容是如此之广泛，以至于书中的每一章都涉及更加专深的内容，本书介绍的只是最基本的理论和方法。其目的在于使读者对图象处理有一个全面了解，为进一步深入研究打下一个基础。

本书的初稿得到北方交通大学杜锡钰教授、袁保宗教授、聂涛副教授、吴湘琪副教授的认真审阅，研究室的李锦成等同志曾给予很大支持与帮助，此外，书中还参考引用了一些论文和资料，对此，本人表示衷心感谢。由于本人水平所限，书中一定会有许多不足之处，请读者批评指正。

作 者

1986年12月于北方交通大学

## 目 录

<b>第一章 图象处理综述</b> .....	1
第一节 图象处理的主要内容及分类.....	1
第二节 图象的表征及其分类.....	3
第三节 图象的统计特性.....	4
第四节 图象处理系统的硬件设备.....	10
<b>第二章 图象与视觉系统</b> .....	30
第一节 视觉系统.....	30
第二节 光度学及色度学原理.....	33
第三节 亮度和颜色感觉的视觉特性.....	36
第四节 视觉的空间性质.....	39
第五节 视觉的时间特性.....	42
第六节 形状感觉与错觉.....	45
<b>第三章 图象处理中的正交变换</b> .....	47
第一节 付里哀变换.....	47
第二节 离散余弦变换.....	68
第三节 沃尔什变换.....	75
第四节 哈尔函数及哈尔变换.....	106
第五节 斜矩阵与斜变换.....	110
<b>第四章 图象增强</b> .....	116
第一节 用直方图修改技术进行图象增强.....	117
第二节 图象平滑化处理.....	132
第三节 图象尖锐化处理.....	136
第四节 利用同态系统进行增强处理.....	141
第五节 彩色图象处理.....	143
<b>第五章 图象编码</b> .....	151
第一节 图象编码分类.....	151
第二节 图象编码中的保真度准则.....	152
第三节 P C M编码.....	154
第四节 统计编码.....	162
第五节 预测编码.....	171
第六节 变换编码.....	185
<b>第六章 图象复原</b> .....	206
第一节 退化模型.....	206
第二节 复原的代数方法.....	211

第三节	逆滤波 .....	213
第四节	最小二乘方滤波 .....	220
第五节	约束去卷积 .....	223
第六节	中值滤波 .....	228
第七节	几种其他空间复原技术 .....	233
<b>第七章</b>	<b>图象分析 .....</b>	<b>242</b>
第一节	分    割 .....	242
第二节	描    绘 .....	253
第三节	纹理分析 .....	271
第四节	形状分析的细线化 .....	278
<b>第八章</b>	<b>模式识别的理论和方法 .....</b>	<b>281</b>
第一节	统计模式识别法 .....	281
第二节	句法结构模式识别 .....	290
第三节	模糊集识别法简介 .....	312
第四节	模式识别的几种应用 .....	323
<b>参考文献</b>	.....	<b>328</b>



# 第一章 图象处理综述

人们传递信息的主要媒介是语音和图象。据统计,在人类接受的信息中,听觉占20%,视觉占60%,其他如味觉、触觉、嗅觉总括起来不过占20%而已。可见,作为传递信息的一种媒介——图象的地位是很重要的。图象处理是近三十年来蓬勃发展的一门新兴学科。它在某些领域卓有成效的应用引起了人们的极大兴趣,随着进一步的深入研究,其应用范围也在日益扩大。

## 第一节 图象处理的主要内容及分类

### 一、主要内容

图象处理大体上可包括如下五方面的内容:

#### 1. 信息的获取

就计算机图象处理而言,图象信息获取的主要任务是把一幅图象转换为适合输入到数字计算机去的数字信号。这里主要包括摄取图象、光电转换及数字化等几个步骤。

#### 2. 信息的存储

图象的信息量大是一个比较突出的特点。图象信息存储常用的方法是磁带和磁盘。由于磁盘在传送数据时速度较快,所以,在处理时常常作为内存与外存之间的媒介。在小型处理系统中也作为档案存储。磁带通常主要作档案存储。有的图象处理系统为了加快处理速度往往在主机内设置2~10个图象平面,这样使得要处理的图象或处理的中间结果存在图象平面中,以避免频频访问磁盘,从而大大提高了处理速度。当然软盘也可用来存放图象。

#### 3. 信息的传送

在计算机图象处理中,图象信息的传送主要指的是图象数据在处理系统内部的传送,而不是指远距离的传送。为了解决大数据量与传输时间之间的矛盾,通常采用并行传送,并且采取DMA方式(直接存储器访问方式)。这样可脱开CPU进行数据传送,以便节省时间。

#### 4. 计算机图象处理

计算机图象处理又称数字图象处理。一般包括:几何处理;图象增强;图象复原;图象重建;图象编码;图象识别;图象理解等内容。

#### 5. 图象的输出和显示

图象处理的最终目的是为人或机器提出一幅便于解释和识别的图象。而计算机输出的数字图象是很难为人理解的。因此,图象的输出也是数字图象处理的重要内容之一。通常在数字图象处理中输出和显示的方法有如下几种。一种是CRT显示(Cathode Ray Tube)。这种显示方法速度快、精度高、几何失真小,它不仅可以显示单色图象而且还可以显示彩色图象。其缺点是不能保存,因此有时也叫软拷贝。另外还有一些属于硬拷贝输出。一种是扫描鼓,扫描鼓既可以做为输入装置又可以做为输出装置,它可以输出精度很高的硬拷贝。另一

种硬拷贝输出装置是激光硬拷贝机。它是利用图象信号去调制激光束并在一种特制的干银纸上呈象的。这种硬拷贝图象清晰、细腻、几何失真小，可拷贝黑白和彩色图象。还有一种就是传真机输出，其原理类似扫描鼓，但精度较差，灰度层次也不多。此外，彩色硬拷贝机，黑白打印机等设备也可以输出硬拷贝，只是灰度层次有限。目前用得较多的，效果较好的硬拷贝方式还是照相机。例如，一种矩阵式彩色胶片记录器，它可将图象记录在35mm的胶片上，分辨力可达到 $2048 \times 1366$ ，精度较高，一般记录时间不大于4min（分钟），设备价格比扫描鼓便宜得多。硬拷贝输出比较慢，而软拷贝则可作到实时。因此，彩色监视器是图象处理系统必不可少的输出设备。

## 二、基本分类

图象处理基本上可分为两大类。

### 1. 模拟处理

模拟处理包括光学透镜处理、照相、广播电视等等。这类处理一般来说都是实时处理。透镜装置处理速度快，能同时并行处理，在理论上讲处理速度是光速。广播电视是以模拟信号的形式进行处理的，其内容均是真实的活动图象。一般说来，模拟处理的优点是处理速度快，其缺点是精度较低，灵活性差，很难有判断功能和非线性处理功能。

### 2. 数字处理

数字处理的处理过程一般大都是用计算机处理。只有一部分需要实时处理的才采用专用硬件处理，所以有时也叫计算机处理。数字处理具有精度高，处理内容丰富，可进行复杂的非线性处理等优点。它有非常灵活的变通能力。一般说来只要改变软件（程序）就可以改变处理内容，因此十分灵活方便。其主要缺点是处理速度较慢，通常多用来处理静止图象。但是随着技术的发展，将会有大量的高速、超高速硬件问世，因此计算机的运算速度将会不断提高，由此看来数字处理速度较慢的缺点也不是不可克服的。值得注意的一点是数字图象很

图象处理的应用领域

表1.1

学 科	应 用 内 容
物理、化学	结晶分析，谱分析
生物、医学	细胞分析，染色体分类，血球分类，X光照片分析，CT
环境保护	水质及大气污染调查
地 质	资源勘探，地图绘制
农 林	植被分布调查，农作物估产
海 洋	鱼群探查
水 利	河流分布，水利及水害调查
气 象	云图分析等
通 信	传真，电视
工业，交通	工业探伤，铁路选线，机器人
法 律	指纹识别等



难被人直接理解, 所以为了实行人-机对话(即人与计算机信息交换), 通常数字图象处理系统经常要用到模拟技术。也就是说在计算机入口与出口要采用模拟处理技术。

图象处理的应用已渗透到了各个领域, 它的应用可概括在表1.1内。

## 第二节 图象的表征及其分类

为了对图象施以有效的处理, 就要了解图象的内在特性。同时, 为了方便地处理图象, 用适当的数字模型去表征图象的特性也是十分必要的。在图象处理中常用的数字表征法有两种, 一种是确定性的, 一种是统计性的。用确定性的图象表征法可方便地研究图象的点的性质, 而用统计表征法可用统计平均参数反映图象的特性。

当用数学方法描述一幅图象时, 常着重考虑它的点的性质。例如, 一幅图象可以被看成是空间各个座标点上强度的集合。它的最普遍的数学表达式为

$$I = f(x, y, z, \lambda, t) \quad (1.1)$$

其中 $x, y, z$ 是空间座标,  $\lambda$ 是波长,  $t$ 是时间,  $I$ 是图象点的强度。这样一个表达式可以代表一幅幅活动的、彩色的、立体的电视图象。如果研究的是静止图象, 则式(1.1)与时间 $t$ 无关; 单色图象, 则波长 $\lambda$ 是一常数; 平面图象, 则与座标 $z$ 无关。因此, 对于静止的平面的单色图象来说, 其数学表达式可简化为式(1.2)的形式

$$I = f(x, y) \quad (1.2)$$

式(1.2)说明一幅平面单色图象可以用二维亮度函数来表示。由于光是能量的一种表现形式, 所以

$$0 < f(x, y) < \infty$$

人们所感受到的图象一般都是由物体反射光组成的。在这种情况下,  $f(x, y)$ 可以看成由两个分量组成: 一个是景物上的入射光量; 另一个分量是景物中物体的反射光量。它们分别被称为照射分量和反射分量。如果用 $i(x, y)$ 表示照射分量, 用 $r(x, y)$ 表示反射分量, 那么 $f(x, y)$ 可用式(1.3)来表示

$$I = f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (1.3)$$

式中 $0 < i(x, y) < \infty$ ,  $0 \leq r(x, y) \leq 1$ 。其中 $r(x, y) = 0$ 表示全吸收,  $r(x, y) = 1$ 表示全反射。而 $i(x, y)$ 由光源的性质来确定。 $r(x, y)$ 则取决于景物中的物体。 $i(x, y)$ 的单位用照度表示, 即流明/平方米( $lm/m^2$ )或勒克司( $lx$ )。下面列出一些 $i(x, y)$ 的典型值, 以便为读者建立一点初步的感性认识: 晴朗的日子, 太阳在地球表面造成的照度是 $96840lx$ 或 $96840lm/m^2$ ; 当天空有云时, 太阳在地球表面造成的照度为 $10760lm/m^2$ , 即 $10760lx$ ; 晴天的夜晚, 而且在满月的情况下的照度为 $0.1076lx$ ; 一般房间照明充分的室内照度为 $1076lx$ 左右。

$r(x, y)$ 作为一反射系数来说, 对于不同的物质有不同的值, 其典型值如下: 黑天鹅绒为 $0.01$ , 不锈钢为 $0.65$ , 白色墙面为 $0.80$ , 镀银金属为 $0.90$ , 白雪为 $0.93$ 。

由式(1.1)所表示的图象是多种多样的, 要想对图象信息进行明确地分类也并非容易。只能就图象处理中常见的图象信息加以简单地分类。概括起来, 图象信息大致可分成三类, 即符号信息, 景物信息和情绪信息。符号图象信息, 一般是用文字、符号、图形等表示的具体的或抽象的事物。景物信息, 这是一种能给人以主观感觉但并不取决于人本身的客观场景信息。一般来讲它包含有丰富的内容, 所含的信息量也较多。情绪信息, 这是一类依赖于受

信者的图象信息。它不仅能给人以直观感觉，而且能以其特殊的艺术内容刺激人的感官，使受信者触景生情，引起感情上的波动和情绪上的共鸣。因此，它包含有更多的信息量。

在数字图象处理中所涉及到的是一些最普通类型的图象。它们的突出特点是都具有特殊的统计特性，并且有专门的应用。从这个基点出发可做如下比较明快的分类：TV型的自然风景，这是一种常见的图象；空间摄影照片和地球资源探测图片，这类图象构图不明显；电子显微镜照片和标准显微镜照片，这是一类在冶金学、医学及石油探测等都很感兴趣的一类照片；文本，这是指一些打印、印刷或手写的记号图象；图样，它们通常就是简单地由线段和图形构成的单色二值图象；专用图象，这一类图象大多是用特殊技术得到的图象，例如，X射线照片、红外热象、超声波图象等等。

总之，对繁多的图象进行分类无疑是十分困难的事。在本书中所涉及到的一些图象只是极少数的有代表性的而又实用的图象。这些图象经过研究大部分可以找到较为近似的模型和规律，这对方便处理和深入研究来讲都是十分有利的。

### 第三节 图象的统计特性

在图象的统计性表征中，认为图象信号是一个随机信号。对于一个随机信号的数学描述则是振幅或相位的分布函数，概率密度函数以及一系列的相关矩、中心矩、功率谱等等，利用这些参数来表征图象的特性。

#### 一、图象的振幅分布特性

图象信号的振幅分布特性是由振幅分布函数或振幅分布密度函数来表示的振幅分布函数由下式表示：

$$F(z) = p\{g(x, y) < z\} \tag{1.4}$$

式中  $F(z)$  是振幅分布函数， $g(x, y)$  是二维图象信号， $p$  代表概率。由式 (1.4) 可知，所谓图象信号振幅分布函数就是图象信号  $g(x, y)$  之值小于某一给定值  $z$  的概率。 $g(x, y)$  的值落在  $z_1$ 、 $z_2$  之间的概率由下式表示

$$F(z_2) - F(z_1) = p\{z_1 \leq g(x, y) < z_2\} \tag{1.5}$$

振幅分布密度函数  $f(z)$  可由  $F(z)$  的导数得到，即

$$f(z) = \frac{d}{dz} F(z) \tag{1.6}$$

或者由式 (1.7) 来表示

$$f(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta z} p\{z \leq g(x, y) < z + \Delta z\} \tag{1.7}$$

图象信号的振幅分布函数及分布密度函数可由式 (1.4) 及式 (1.7) 来测定。

日本NHK技研所的千叶、安东曾对三种图象的振幅分布特性作了测量。其中有戏剧场面摄影作品，电影镜头画面等。其测试曲线如图1.1所示。

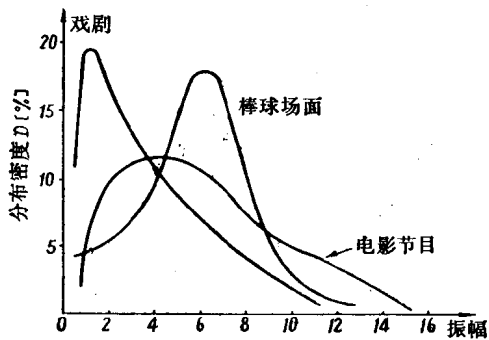


图1.1 图象振幅分布密度曲线

## 二、差值信号的振幅分布特性

对图象信号预测编码有重要意义的差值信号的振幅分布特性也进行了测定。早在1952年，贝尔实验室的克雷茨默对相邻像素间的差值进行了测定，其分布密度曲线如图1.2所示。由曲线可见，相邻像素振幅的差大部分集中于零差值附近。这说明相邻像素间有较大的相关性。由曲线的形状，可认为其近似于指数分布，即

$$f(x) = e^{-\alpha x} \quad (1.8)$$

式中 $x$ 是像素间的距离， $\alpha$ 是由图象性质决定的系数， $f(x)$ 是概率密度函数。由实测结果可知，对于特写画面来说 $\alpha$ 值较小，对于群集远景画面来说 $\alpha$ 较大。

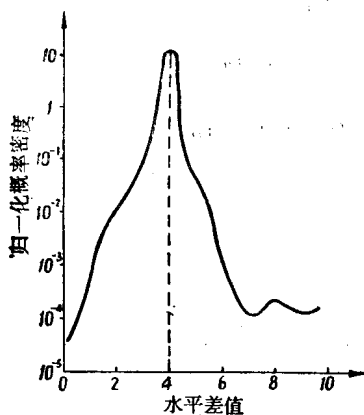


图1.2 相邻像素间差值信号分布密度曲线

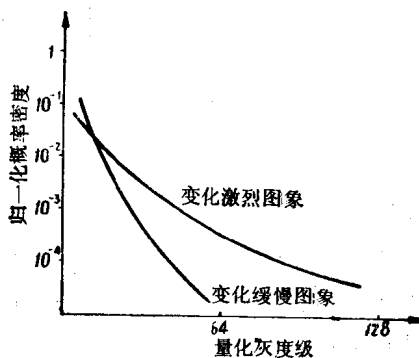


图1.3 帧差值信号分布密度特性

对于电视信号来说，除了像素间的差值外，还存在帧间差值。坎迪对帧差值信号的分布密度特性也进行了测定，其曲线如图1.3所示。由图可见，变化剧烈的图象与变化缓慢的图象其差值的分布是不一样的。帧差值信号分布密度大致也可以用指数函数来表示，即

$$f(x) = e^{-\beta x} \quad (1.9)$$

式中 $\beta$ 是由图象变化程度所决定的系数。当图象内容变化比较剧烈时， $\beta$ 值较小，图象内容变化比较缓慢时， $\beta$ 值较大。

## 三、图象的自相关函数和空域功率谱

一般情况下，图象的自相关函数和空域功率谱针对稳定画面来定义。稳定画面就是指图象 $g(x, y)$ ，在 $x, y$ 方向上可无限扩展，而且无论在哪个方向上都有相同的统计特性。为了充分了解这样的稳定画面的统计特性，我们将研究有限的、固定的图象之统计特性。

### 1. 能量有限的图象振幅谱和自相关函数

当一幅图象用 $g(x, y)$ 来表示的话，那么它的付里哀变换就是其振幅谱，即

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j(u x + v y)} dx dy \quad (1.10)$$

显然，如果知道了图象的振幅谱，用其反付里哀变换就可以求得 $g(x, y)$

$$g(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(u, v) e^{i(u x + v y)} du dv \quad (1.11)$$

图象信号所具有的能量可由下式表示

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g(x, y)|^2 dx dy \quad (1.12)$$

或者是

$$E = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G(u, v)|^2 du dv \quad (1.13)$$

式中  $|G(u, v)|^2$  为能量谱。

对于能量有限的图象信号  $g(x, y)$  的自相关函数由下式表示

$$\rho(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x+\xi, y+\eta) g(x, y) dx dy \quad (1.14)$$

其中  $\rho(\xi, \eta)$  与  $|G(u, v)|^2$  之间存在着付里哀变换关系, 即

$$|G(u, v)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\xi, \eta) e^{-i(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1.15)$$

$$\rho(\xi, \eta) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G(u, v)|^2 e^{i(u\xi + v\eta)} du dv \quad (1.16)$$

## 2. 功率有限的图象的空域功率谱和自相关函数

作为振幅谱和能量谱概念的自然扩展就可以导出功率谱的概念来。振幅谱或能量谱是对能量有限的画面定义的。但是, 多数画面在  $(x, y)$  平面上是无限扩展的。因此, 其能量  $E$  也不可能是有限的。对于  $E$  为无限的信号来说, 有时图象中单位面积上的平均能量 (平均功率) 却是有限的, 即

$$W = \lim_{x, y \rightarrow \infty} \frac{1}{XY} \int_{-\frac{X}{2}}^{\frac{X}{2}} \int_{-\frac{Y}{2}}^{\frac{Y}{2}} |g(x, y)|^2 dx dy \quad (1.17)$$

如果把  $g(x, y)$  限定在如下范围内的话, 即

$$g_{xY}(x, y) = \begin{cases} g(x, y) & -\frac{X}{2} \leq x \leq \frac{X}{2} \\ & -\frac{Y}{2} \leq y \leq \frac{Y}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

则式 (1.17) 可写成下面的形式

$$W = \lim_{x, y \rightarrow \infty} \frac{1}{XY} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g_{xY}(x, y)|^2 dx dy \quad (1.18)$$

如果令  $g_{xY}(x, y)$  为有限能量的图象, 其对应的振幅谱就是  $G_{xY}(u, v)$ 。此时则

$$XYW \approx \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G_{xY}(u, v)|^2 du dv \quad (1.19)$$

$$W \approx \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{XY} |G_{xY}(u, v)|^2 du dv \quad (1.20)$$

当  $X, Y$  无限增大时, 功率谱密度  $\psi(u, v)$  如下式表示

$$\psi(u, v) = \lim_{x, y \rightarrow \infty} \frac{1}{XY} |G_{xY}(u, v)|^2 \quad (1.21)$$

此时式 (1.20) 可成如下形式

$$W = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u, v) du dv \quad (1.22)$$

当能量无限增大时，可定义自相关函数  $\Psi(\xi, \eta)$  如下

$$\Psi(\xi, \eta) = \lim_{x, y \rightarrow \infty} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} g(x + \xi, y + \eta) g(x, y) dx dy \quad (1.23)$$

这里， $\psi(u, v)$  和  $\Psi(\xi, \eta)$  的关系是一对付里哀变换关系，即

$$\psi(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\xi, \eta) e^{-i(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1.24)$$

$$\Psi(\xi, \eta) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u, v) e^{i(u\xi + v\eta)} du dv \quad (1.25)$$

### 3. 自相关函数的基本性质

$$(1) \Psi(0, 0) = E\{|g(x, y)|^2\} \quad (1.26)$$

$$(2) \Psi(\infty, \infty) = [E\{g(x, y)\}]^2 \quad (1.27)$$

$$(3) \Psi(x, y) = \Psi(-x, -y) \quad (1.28)$$

### 4. 空域功率谱密度的基本性质

$$(1) \Psi(0, 0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u, v) du dv \quad (1.29)$$

$$(2) \Psi(u_x, u_y) = \psi(-u_x, -u_y) \quad (1.30)$$

### 5. 自相关函数的测定结果

图象的自相关函数最早也是由贝尔实验室的克雷茨默测定的。采用光学方法测定，用两张完全相同的幻灯片，测量两者稍微错开时的透光量和完全重叠时的透光量，然后求其比值，进而得到相关函数。测定的曲线如图1.4所示。由图可见，自相关函数也近似于指数分布，即

$$\Psi(\xi, \eta) = \exp(-\alpha\sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \quad (1.31)$$

式中  $\alpha$  也是与画面有关的系数，对于特写画面  $\alpha$  较小，群集的远景  $\alpha$  较大。

这一相关函数日本的矶部，藤村也同样用光学方法进行了测试，所得结果基本相似。

另外，克雷茨默对一帧场景各个方向上的相关性的测定，发现并没有明显的相关方向，其测试结果如图1.5所示。

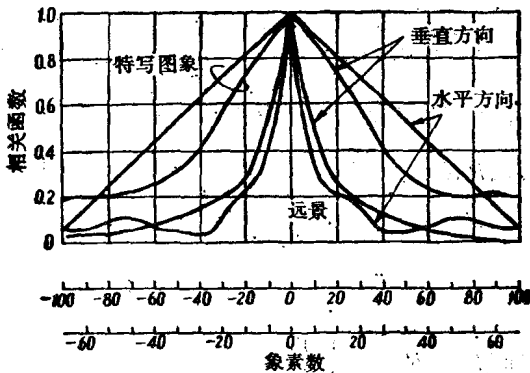


图1.4 图象在水平和垂直方向上的自相关函数

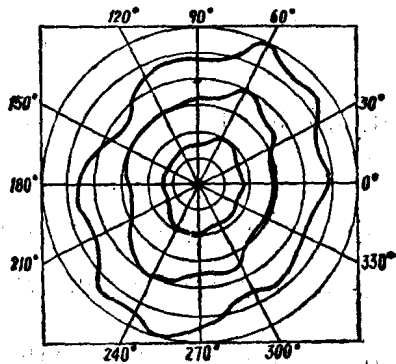


图1.5 某景物各个方向上的自相关函数的轮廓

#### 四、电视信号的数学表示及自相关函数

在数学信号处理中取样定理是大家所熟悉的基本定理。对于一维信号来说，如 $x(t)$ 是频带受限信号，它所包含的最高频率为 $f_c$ ，当取样频率满足 $f_s \geq 2f_c$ 时，则 $x(t)$ 完全可由其离散样点值来表示，即

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \frac{\sin \omega_c(t-nT)}{\omega_c(t-nT)} \quad (1.32)$$

式中 $\omega_c = 2\pi f_c$ ， $T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{2f_c}$ ， $\frac{\sin \omega_c(t-nT)}{\omega_c(t-nT)}$ 为取样函数或叫内插函数。

仿照一维取样定理的结果，可以将其推广至二维情况。如果 $x(t_1, t_2)$ 是频带受限的二维信号，在 $t_1$ 方向上所含最高频率为 $\omega_1$ ，在 $t_2$ 方向上所含最高频率成份是 $\omega_2$ ，在 $t_1$ 方向上的取样间隔为 $T_1$ ，其中 $T_1 = \frac{\pi}{\omega_1}$ ，在 $t_2$ 方向上的取样间隔为 $T_2$ ，其中 $T_2 = \frac{\pi}{\omega_2}$ 。则

$$x(t_1, t_2) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} x(iT_1, jT_2) \cdot \frac{\sin \omega_1(t_1 - iT_1)}{\omega_1(t_1 - iT_1)} \cdot \frac{\sin \omega_2(t_2 - jT_2)}{\omega_2(t_2 - jT_2)} \quad (1.33)$$

如果是动态图象，则可以推广至三维情况。也就是

$$x(t_1, t_2, t_3) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(iT_1, jT_2, kT_3) \cdot \frac{\sin \omega_1(t_1 - iT_1)}{\omega_1(t_1 - iT_1)} \cdot \frac{\sin \omega_2(t_2 - jT_2)}{\omega_2(t_2 - jT_2)} \cdot \frac{\sin \omega_3(t_3 - kT_3)}{\omega_3(t_3 - kT_3)} \quad (1.34)$$

根据动态图象采样定理可以算出动态图象所需的带宽。例如，设有一帧图象的扫描时间为 $T_p$ ，在 $t_1, t_2$ 方向上象素间隔均为 $T$ ，而且在 $t_1, t_2$ 方向上各需 $N_1, N_2$ 个象素，那么

$$T_p = N_1 N_2 T \quad (1.35)$$

由取样定理可知， $T = \frac{1}{2f_c}$ ，所以最高频率  $f_c = \frac{1}{2T}$ ，因此

$$f_c = \frac{1}{2T} = \frac{N_1 N_2}{2T_p} = \frac{1}{2} N_1 N_2 f_p \quad (1.36)$$

一般情况下，在电视体制中要考虑到其他因素，所以最高频率由下式计算

$$f_c = \frac{1}{2} K N_2^2 f_p R R' \quad (1.37)$$

式中  $K$ ——为凯尔系数，通常 $K = 0.7$ ；

$R$ ——电视屏幕之宽高比， $R = \frac{4}{3}$ ；

$R'$ ——水平扫描率与垂直扫描率之比，通常  $R' = \frac{0.95}{0.84}$ ；

$N_2$ ——是扫描行数；

$f_p$ ——是帧频数。

例如，在NTSC制中， $N_2=525$ ， $f_p=30$ ，则可算出其最高频率

$$f_c = \frac{1}{2} \times 0.7 \times (525)^2 \times 30 \times \frac{4}{3} \times \frac{0.95}{0.84} = 4.3 \text{MHz}$$

动态图象的自相关函数可用下式表示：

$$R(t_1, t_2, \tau) = \exp[-\alpha_1 |t_1|] \cdot \exp[-\alpha_2 |t_2|] \cdot \exp[-\beta |\tau|] \quad (1.38)$$

式中： $\exp[-\alpha_1 |t_1|]$ 表示行内相关； $\exp[-\alpha_2 |t_2|]$ 表示帧内相关； $\exp[-\beta |\tau|]$ 表示帧间相关。其中 $\beta$ 是反映时间轴方向上的相关性，研究表明， $\beta$ 是一个很小的量，一般 $\exp[-\beta |\tau|] = 0.99$ 。也就是说帧间的相关性接近于1。

图象自相关函数的另外一种形式是用一阶马尔可夫过程作为模型(在第五章中再介绍)。在图象自相关函数的两种模型中，应用较多的是根据大量实验总结出来的 $e$ 指数模型，即式(1.31)和式(1.38)所示的形式。至于其衰减的速度完全取决于图象的种类及其内容细节。

## 五、图象信息的信息量

### 1. 离散的图象信息的熵

对于一个连续的图象信号经过编码后就变成了离散的图象信息。一幅图象如果有 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_q$ 共 $q$ 种幅度值，并且出现的概率分别为 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_q$ ，那么每一种幅值所具有的信息量分别为 $\log_2 \left( \frac{1}{p_1} \right), \log_2 \left( \frac{1}{p_2} \right), \log_2 \left( \frac{1}{p_3} \right), \dots, \log_2 \left( \frac{1}{p_q} \right)$ 等等。由此，其平均信息量可由下式表示

$$H = \sum_{i=1}^q p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = - \sum_{i=1}^q p_i \log_2 p_i \quad (1.39)$$

把这个平均信息量叫做熵，记作 $H$ 。

如果一个图象信源能输出 $K$ 个独立的消息，当这些消息出现的概率彼此相等时，那么这个信源的熵最大。例如，一个信源只输出 $p$ 和 $1-p$ 两个消息，熵的最大值出现在两个消息的概率都等于0.5处。

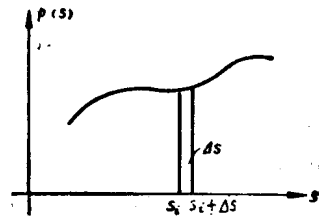


图1.6 连续信源的熵的计算

### 2. 连续的图象信息的熵

对于离散的图象信息来说，它只输出有限个符号。如果输出的不是有限个而是无限个，那么，这样的图象信息叫做连续图象信息。对于连续图象信息的熵也可以仿照离散图象信息的熵来计算。如图1.6所示的连续信源，把 $s$ 分成小微分段 $\Delta s$ ，这样，类似于离散信源的熵可导出如下

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(s_i) \Delta s \cdot \log_2 [p(s_i) \Delta s] = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(s_i) \Delta s \cdot \log_2 \frac{1}{p(s_i) \Delta s} \\ &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(s_i) \Delta s \cdot \log_2 \frac{1}{p(s_i)} + \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(s_i) \Delta s \cdot \log_2 \frac{1}{\Delta s} \end{aligned}$$



当  $\Delta s \rightarrow 0$  时, 则

$$H \approx \int_{-\infty}^{\infty} p(s) \log \frac{1}{p(s)} ds + \infty$$

第二项是由于  $\Delta s \rightarrow 0$  时,  $\log_2 \frac{1}{\Delta s} \rightarrow \infty$  所致。一般忽略掉第二项, 连续图象信源的熵如下式

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} p(s) \log_2 p(s) ds \tag{1.40}$$

这里应该注意的是连续图象信息的熵并不是绝对熵, 而是绝对熵减去一个无限大项。因此, 也可以说这是一个相对熵。其中  $p(s)$  是概率密度。

对于离散信源来说, 当所有消息输出是等概率时其熵最大。但对连续信源来说最大熵的条件取决于输出受限情况。当输出幅值受限的情况下, 幅度概率密度是均匀分布时其熵值最大。当输出功率受限的情况下, 则输出幅度概率密度是高斯分布时其熵值最大。关于熵的概念在图象编码处理中有重要意义。

### 第四节 图象处理系统的硬件设备

数字图象处理技术的进展及其日益广泛的应用促进了处理系统硬件设备的研制。在图象处理技术发展的历史中, 最初在模拟文字识别机构中开始应用计算机。它处理的对象是二值图象, 处理的象素数目较少, 数据量不大。因此, 处理速度问题并没有显得十分突出。尽管如此, 也看到了图象处理与一般的科学计算有着显著的不同, 就是在图象处理中应该保持其二维的特点。图象的数目越来越多, 每幅图象的象素数目越来越大, 因此处理一幅图象所需的时间越来越长, 加之大型机的字长较长, 代价高、效率低。这就愈来愈明显地看出通用计算机的图象处理能力有一定限制, 因此, 人们开始研制专用的计算机图象处理系统。到目前为止, 已出现了各种各样的计算机图象处理系统, 尽管各种系统大小不一, 其处理能力也各有所长, 但其基本硬件结构则都是由如图 1.7 所示的几个部分组成的, 即由主机、输入设备、输出设备及存储器组成的。目前这些系统就其应用领域来看有专用的, 也有通用的。它们的主要差别则在于处理精度、处理速度、专用软件及存储容量等几个方面。为了较系统的理解图象处理系统的硬件设备,

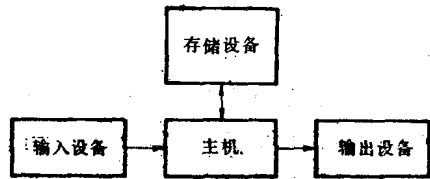


图 1.7 计算机图象处理系统基本结构框图

本节主要介绍几种常见的输入、输出设备的工作原理及图象处理系统的典型结构。

#### 一、图象处理系统中常用的输入设备

##### (一) 电视摄像机

电视摄像机是图象处理中常用的输入设备。它的关键部件是摄像器件。摄像器件的基本任务是把输入的二维辐射(即光学图象)信息转换为适宜处理和传输的电信号。

##### 1. 摄像器件的分类

目前, 由于对摄像器件的不同用途的需要, 发展的品种极为繁多, 大体上可作如下分类:

(1) 按输入信息分类：可分为可见光方式（黑白或彩色方式），不可见电磁辐射方式（红外线，紫外线及X射线）及超声波。

(2) 按电流读出方式分类：可分为电子束扫描摄像管（快电子束，慢电子束和光束扫描）；固体摄像器件（XY寻址扫描，电荷传输扫描及弹性表面波扫描）。

(3) 按光敏靶的种类分类：可分为光电导型（注入型，阻挡型）；移像型（低增益靶，如超正析像管、分流直像管及二次电子传导等，电子轰击导生电导）；特殊型（热释电及压电型）。

## 2. 摄像器件的性能

摄像器件的性能好坏可以从以下几个方面来考虑：

(1) 频谱响应特性：亦称光谱响应特性、分光灵敏特性、光谱灵敏度等。它表示器件的分光灵敏度与相应波长的关系。

(2) 辐射灵敏度：也称响应度，即单位辐射通量或单位辐射照度均匀地输入到器件的接收靶面时所能产生的输出信号电流的大小。

(3) 光电变换特性：亦称光信号变换特性。它是反映输入辐射或光量发生变化时相应的输出信号电流的变化。其中一个重要参数就是 $r$ 值。一般常选用 $r$ 值小于1的摄像器件。

(4) 信噪比：摄像器件噪声的来源很多，不同的探测目的所要求的输出信噪比也不一样。一般在广播电视中要求信噪比在40dB以上。在普通摄像器件中，内部噪声是主要的，它主要来源于电流的散弹噪声。

(5) 暗电流：这是指在没有输入信息时器件输出的电流。在理论上讲，如果暗电流在空间上和时间上是恒定的，它并不构成噪声，但是，实际上它不仅增加电流噪声，而且会使电子束发射系统和前置放大器负担过重。如果暗电流在空间和时间上不是恒定的话，那就会直接构成噪声，增加了图象亮度的不均匀性和色平衡困难。

(6) 分辨率：它是指器件对图象细节的鉴别能力。通常是把一高对比度的鉴别率测试图案投射到光接收面上，然后观察可分辨的最小空间频率数。一般用可分辨电视行数(TVL/H)或(IP/mm)为单位来度量。水平条纹反映的是垂直分辨率，它受扫描线数限制。垂直条纹反映的是水平分辨率，在有足够的频带宽度的条件下，基本决定于摄像器件的分辨能力。因此，测试器件时主要看垂直条纹。

(7) 调制传递函数和方波振幅响应度：这是在工程上更严格的表征器件分辨能力的方法。

(8) 惰性：这是指输入信息在强度发生变化时，输出信号的相应变化在时间上的滞后现象。它有起始惰性和衰减惰性之分，还可分为电容性惰性和光电导惰性。它们分别与阴极温度高低、靶材料物理特性和器件的工作条件等有关。

(9) 动态范围：摄像器件动态范围有两种含义：一是指器件能够处理的一帧景物内最亮单元和最暗单元的亮度的比值，它反映器件能探测的最小信息和能接受的最大信息的能力；另一方面指的是器件能容纳的不同的平均景物亮度的范围，即最亮的一帧景物平均亮度和最暗一帧景物平均亮度的比值。有时把前者称为内动态范围，后者称为外动态范围。

除了上面所列的评价摄像器件的性能的几项指标外，还有如畸变、疵点、晕光、成荫、余像烧伤、寿命、机械强度和环境适应性等等。

以上对摄像器件的基本分类和性能作了简要的介绍，下面介绍几种常用的摄像器件的结构与特性，以便在建立图象处理系统时，根据不同的应用目的加以合理地选用。