

图 象 处 理 概 论

〔日〕土井康弘 安藤 繁 著 原子能出版社

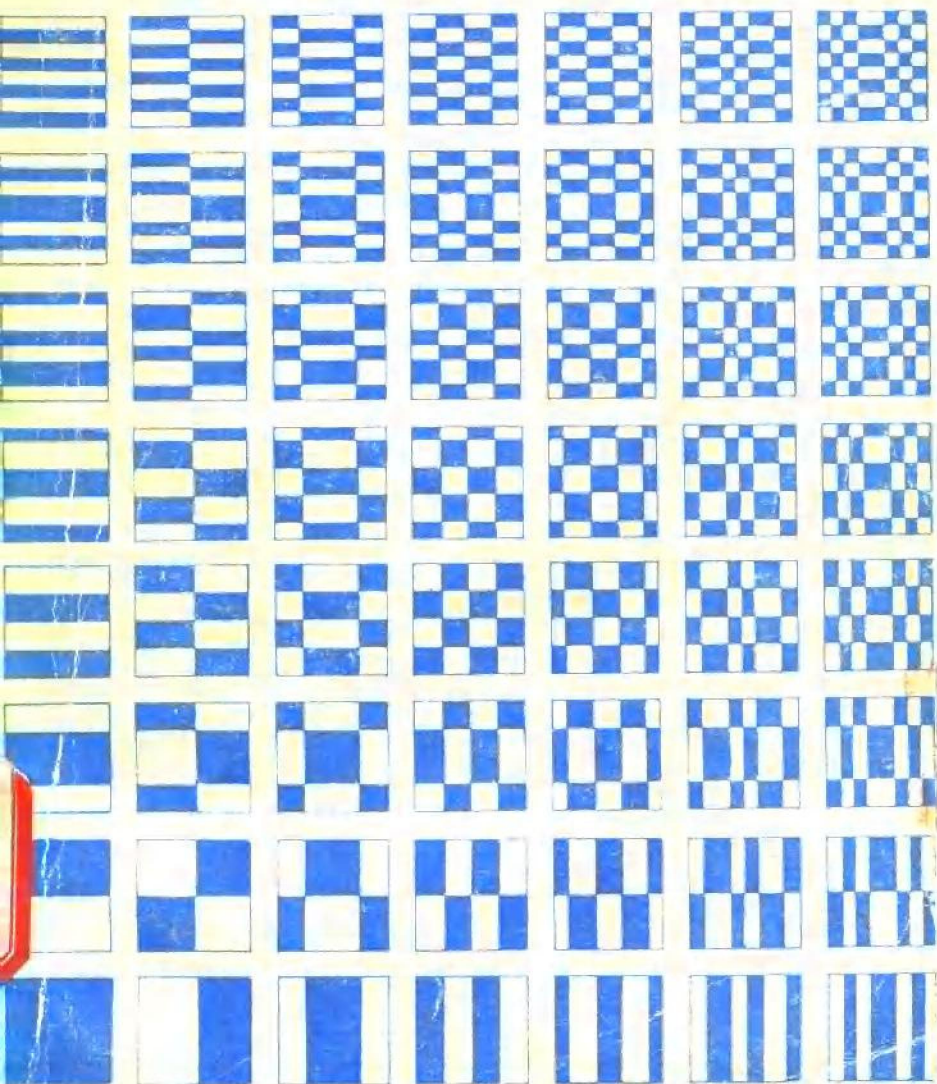
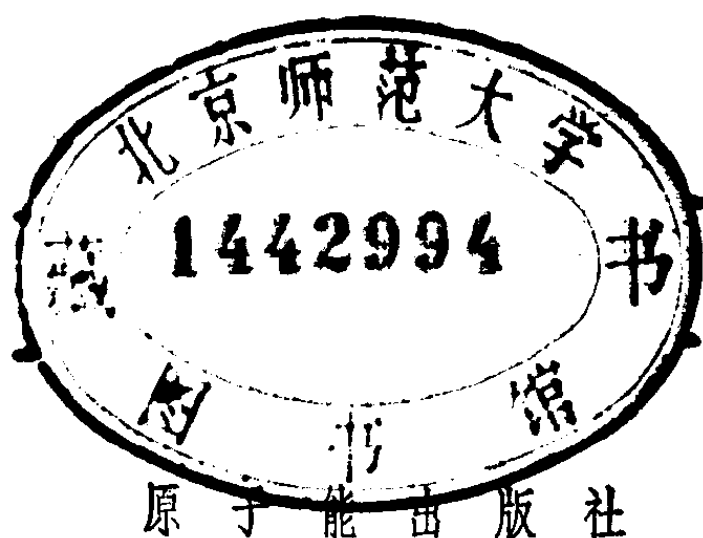


图 象 处 理 概 论

【日】土井康弘 安藤 繁 著
王宝兴 杨学礼 译
李叔梁 校

741197/15



内 容 简 介

本书是图象信息处理技术方面的一本专著。本书较为详细地介绍了图象信息处理技术中的各种理论和处理方法。全书共十一章，包括相干与相干光学系统处理；图象线性变换；图象的量化、复原、增强、重建；纹理结构分析等。

图 象 处 理 概 论

〔日〕土井康弘 著
安藤 繁

王宝兴 杨学礼 译
李叔梁 校

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

外文印刷厂印刷

（北京西便门）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 $\frac{1}{32}$ ·印张9.375 ·字数207千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 1—2400 统一书号：15175·624

定价：1.90元

序

本书是根据作者之一土井在东京大学工学院计算机工程系编写的同名讲义综合整理的。图象处理是一门涉及到从图象的获得到识别的、范围广泛的技术。如果横观其基础理论，会发现包括许多学科的广泛内容。本书为了避开这一点，特将主要应用线性系统理论的图象处理作为取材对象。

本书以原讲义笔记为基础，但阐述问题尽量避免平叙罗列，努力揭示它们之间的内在联系，而且适当收录了在研究室里进行的实验研究结果。作为一本教科书，如果希望面面俱到，当然是平叙罗列为好；如果把重点放在对概念的理解上，则应该是揭示它们之间的内在联系。究竟采取哪一种意见，我们要根据处理的目的来决定。

本书执笔者以土井为主，负责第一、二、三、四、五、六、十章，安藤负责第七、八、九章，全书由土井综合整理。值本书出版之际，谨向过去、现在在研究室工作的诸同事表示谢意。

1980年3月

作者

译者的话

本书系 1980 年关于图象处理方面的日文版新著，由作者之一土井在东京大学工学院编写的讲义的基础上整理扩充写成。主要目的是介绍计算机图象处理的基本理论、概念和方法。本书有三个特点：一、概念清楚，概念和数学分析并重；二、除讲解计算机处理外，专辟两章阐述关于光学图象处理的内容，指出光学信息处理与计算机处理之间的密切联系；三、内容较新，包括了近年来的几种重要的处理内容和方法，如 X 光断层图象的重建方法，卡尔曼滤波在图象处理中的应用，特别是在后几章中作者以研究室的研究实例为中心所作的论述。

作为一种独特的图象处理方法——图象重建，本书日文版已多处论及，但是由于这部分内容本身的重要性及为了给读者以更全面详细的了解，我们在书中另外增补图象重建一章。这一章内容译自 E. L. Hall 所著的“Computer Image Processing and Recognition”，1979 年版第 5 章：Reconstruction from Projection。

由于译者水平所限，译文中有错误和不当之处，希望读者批评指正。

译者

目 录

第一章 绪论	1
线性系统	4
随机过程	8
全书的组成	9

I 光学图象处理

第二章 利用非相干光学系统的处理	11
2.1 光相关器	11
2.2 断层照片的重建	17
2.3 图象增强	25
第三章 利用相干光学系统的处理	31
3.1 傅立叶变换光学系统	33
3.2 傅立叶变换光学系统的应用	36
3.3 透镜成象的推导	39
3.4 使用全息象的滤波器	44

II 计算机图象处理

第四章 图象的线性变换	50
4.1 连续傅立叶变换	50
4.2 对离散图象的线性变换	58
4.3 对平稳图象的 D. F. T. 的效果	77
4.4 哈达玛-沃尔什(Hadamard-Walsh)变换	78
第五章 图象的量化	83
5.1 量化图象的平均信息量与畸变	84
5.2 均方差量化	89
5.3 与等间隔量化的比较	92

5.4	比率畸变(Rate-Distortion)函数	93
第六章	图象复原	99
6.1	有限带宽图象的复原	100
6.2	线性传递系统的反向滤波	105
6.3	数字滤波器	116
第七章	有限带宽图象的复原	128
7.1	图象的非平稳性与频率分量的相关	130
7.2	有限带宽劣化的复原	131
7.3	估计误差方差的分析	138
7.4	完全复原条件与超析象	144
7.5	模拟	148
第八章	图象增强	155
8.1	图象噪声的消除	156
8.2	图象清晰度的改善	175
8.3	图象的特征抽取	181
第九章	纹理结构(texture)分析	193
9.1	用自相关函数表示纹理结构	194
9.2	利用光学处理的纹理结构分析	195
9.3	用共生(co-occurrence)表进行纹理结构分析	197
9.4	最优法的纹理结构分析	201
9.5	纹理结构的模型化与利用最优法进行纹理结构识别	206
9.6	联合概率密度函数的非参量估计与最优法	212
9.7	子图象大小的选择	217
9.8	其它纹理结构的分析方法	221
第十章	分割描述,模式识别简介	222
	分割(segmentation)	222
	描述(description)	223
	结构文法模式识别(Syntactic Pattern Recognition)	224
附第十一章	图象重建	227

11.1	绪论	227
11.2	傅立叶变换重建	229
11.3	卷积算法	233
11.4	代数方程	236
11.5	重建用的滤波器设计	247
11.6	重建图象与物体的显示	251
11.7	在医学放射图片中的应用	266
11.8	重建方面的文献	280
参考文献		281

第一章 绪 论

提到图象，我们会联想到照片、绘画以及象电视机那样显示在荧光屏上的图象等等。它们不仅供观赏或娱乐，还有具体地说明某事物的目的及直观地表达某种概念的用途。综合起来，研究图象的目的在于观察、测量、识别等各个方面。图象处理就是利用机器，根据不同的目的进行图象修正或变换。

图象的特点在于它是扩展到二维的空间信息，而且其信息量非常庞大。作为信号来看，不具有如时间信号那样的因果关系，因而是容易处理的；但要处理二维信息，问题就复杂了。通常这类照片，在对角线上具有 $1/1000$ 左右的分辨率。不然，我们看照片就会感到不鲜明。因此，假定按面积比每个象素的大小取作 $10^{-3} \times 10^{-3}$ ，那么整幅照片就具有 10^6 个象素。如果设象素本身具有可感知的最低限度的灰度密度等级是 10^2 个，那么它就有 $10^2 \times 10^6$ 种变化。用信息量来表示，就是 6.6 兆字节。用计算机来处理这样庞大的信息，就必须要有大容量的存储器才行。但是对图象本身来说，因为实际上还包括着大量冗长而无关紧要的信息，所以在不降低图象实用质量的前提下，可以减少信息量。另外，根据测量、识别的目的，只取出所需要的信息，那么信息量还可以显著地进行削减。这种信息量的大量削减与压缩，其本身就是图象处理过程所具有的特点。

在科学和工程技术上，图象载有大量的信息。图象处理

技术也是随着它的具体应用发展起来的。其主要的应用领域有：1) 遥感；2) 放射线图象处理；3) 细胞诊断；4) 自动装置景物分析；5) 高能粒子轨迹分析；6) 文字识别等等。

图象处理过程的示意图如图 1.1 所示。下面我们以遥感为例来按图说明这一过程。第一阶段，为数据收集过程。用卫星运载的图象扫描器(通常使用多光谱扫描器MSS)，扫描从地面各点发出的电磁辐射，取得地面的图象信号，再向地面发送。所接受的信号是时间信号，由此构成图象。这期间

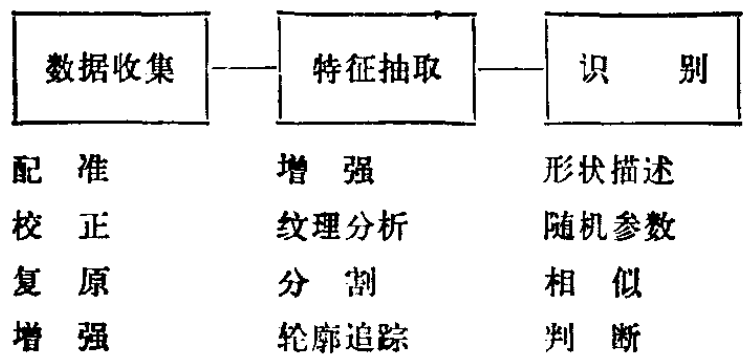


图 1.1 图象处理过程

要经过与图象的地面标志点的对准(配准, registration), 几何畸变的校正 (correction), 增强(enhancement) 与复原 (restoration) 等步骤, 使所作的处理能成为经得起人们直接观察解译 (photo-interpretation) 的图象。当发送数据时, 频带压缩等也是很必要的。第二阶段是特征抽取过程, 进行线性或非线性变换, 按某种目的把图象变换成便于量测的图象。例如分离出某些灰度级, 或者是抽取轮廓线, 或者是局部研究灰度的统计分布。在这一阶段, 图象从质的方面可能会变成大不相同的东西, 但几何量、物理状态量等有关测度还被某种程度地保持着。第三阶段是用于识别的过程。这部分利用模式识别手段, 输出的是关于地面植物生态分类和生

活环境区域划分等的符号，它按说是图象，但却变成为对某种概念粗略描述的东西了。该过程就是所谓模式识别的过程。由此看来，第一、二阶段可以称为预处理过程，全部过程合起来就叫做图象处理。

一般认为图象处理有两种研究方法。

(1) 从历史上来看，图象处理是作为光信息处理的应用而发展起来的，这是一种见解。当然有人认为，即使在电视等的图象通信中，有关图象处理方面的研究工作早就开始进行了，但要进行比光信息处理技巧更高级的处理，用其他的模拟技术是很困难的。光信息处理本身就是由于在物理光学中引入线性系统理论的处理才得到发展的，因此，即使在这个意义上，图象处理也是以二维空间域上的线性系统理论为基础的。在图象处理的基本技术中，变换、滤波、复原、增强等始终是保存图象特性的技术。由于计算机的普及，解除了在光信息处理系统中所受到的限制，使图象处理成为以计算机处理为主，研究工作向更加精细和更加高级的技术方面展开。例如用二维随机过程来处理图象，通过应用统计判决理论，使受噪声污染的图象的复原、增强和纹理分析等能更加有效地进行。

(2) 与此相反，如果从开始便是以模式识别为目的，那么图象处理始终是预处理，主要处理过程的方式为：提取出构成图象的形状信息，根据相位几何学或者曲线的特征分析，最后导出蕴含于图象中的概念，以此为对象的有文字识别、三维物体识别等等。这种图象处理过程，通过图象的增强、分割、链形编码、句法描述和自动机，具有识别过程的特点。对于(1)的研究，通常把图象保存下来，是在始终不损害测量处理的意义下来加以模拟与分析的。对于(2)，无视测量的

性质，在寻求保持图象的概念这个意义上则是抽象的、代数的。

当然(1)与(2)是相互衔接的，因此虽然都是图象处理，但上述方法与立足点彼此可以相差很大。上述划分方式犹如一条道路分成两段走，本书内容就是以相当于第一阶段的图象处理为中心而构成的。

线 性 系 统

线性系统本来是以时间为参量来进行讨论的，但在图象处理中，时间被空间所代替，通常是二维系统。在对图象处理的认识上，有关线性系统理论方面的基本了解是必不可少的。这里，我们以公式集的形式汇集了有关线性系统的各种概念、定理及运算公式等，并且认为：凡一维公式，按照把变量 x 读作二维向量 $\mathbf{x}$ 的方式，便很容易得到向二维情形推广的公式。

设线性系统为 L ，输入函数为 $f(x)$ ，输出函数为 $g(x)$ 。今将输入与输出之间的关系表示如下：

$$g(x) = L[f(x)] \quad (1.1)$$

叠加原理：对于常数 λ_1, λ_2 ，有下式成立：

$$\begin{aligned} L[\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)] &= \lambda_1 L[f_1(x)] + \lambda_2 L[f_2(x)] \\ &= \lambda_1 g_1(x) + \lambda_2 g_2(x) \end{aligned} \quad (1.2)$$

冲击响应函数， $h(x)$ ；即把狄拉克(Dirac，英国物理学家)的 δ 函数 $\delta(x)$ 作为输入函数的输出函数：

$$L[\delta(x)] = h(x) \quad (1.3)$$

不变系统：对于任意的 y ，有以下关系式成立：

线性系统 L 不依赖于 x ，

$$L[\delta(x-y)] = h(x-y) \quad (1.4)$$

卷积(convolution): 当以 $f(x)$ 的 δ 函数展开式

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \delta(x-y) dy \quad (1.5)$$

作为L的输入函数时, 表示输出的积分叫做卷积。

$$\left. \begin{aligned} L[f(x)] &= L\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(y) \delta(x-y) dy\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(y) L[\delta(x-y)] dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(y) h(x-y) dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(y) f(x-y) dy \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

记作

$$L[f(x)] = f(x) * h(x) \quad (1.7)$$

相关, $R_{ff}(\xi)$:

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} f(x) f(x-\xi) dx \\ &= f(x) * f(-x) = R_{ff}(\xi) \quad \text{自相关函数} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} f(x) g(x-\xi) dx \\ &= f(x) * g(-x) = R_{fg}(\xi) \quad \text{互相关函数} \end{aligned} \quad (1.9)$$

频率响应函数, $H(u)$: 相对于输入函数为 $e^{2\pi i u x}$ 的输出函数为

$$\left. \begin{aligned} L[e^{2\pi i u x}] &= \int_{-\infty}^{\infty} h(y) e^{2\pi i u (x-y)} dy \\ &= e^{2\pi i u x} \int_{-\infty}^{\infty} h(y) e^{-2\pi i u y} dy \\ &= H(u) e^{2\pi i u x} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

输出函数 $e^{2\pi jux}$ 为 L 的本征函数, $H(u)$ 为其本征值。 $H(u)$ 称为频率响应函数。

傅立叶变换: 当 $f(x)$ 绝对可积时, 称

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi jux} dx \quad (1.11)$$

为 $f(x)$ 的傅立叶变换。有时记作

$$\mathcal{F}[f(x)] = F(u)$$

逆变换为

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{2\pi jux} du \quad (1.12)$$

有时将 $f(x)$ 与 $F(u)$ 之间的关系记作

$$f(x) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} F(u)$$

关于傅立叶变换的诸定理:

(1) 比例变化 (scaling)

$$f(ax) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} \frac{1}{|a|} F\left(\frac{u}{a}\right) \quad (1.13)$$

(2) 位移 (shift) 定理

$$f(x-x_0) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} e^{2\pi jux_0} F(u) \quad (1.14)$$

(3) 共轭 (conjugate)

$$f(-x) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} F^*(u) \quad (1.15)$$

(4) 卷积 (卷积定理)

$$f(x) * h(x) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} F(u) H(u) \quad (1.16)$$

(5) 功率 (Parseval 定理)

$$\int |f(x)|^2 dx = \int |F(u)|^2 du \quad (1.17)$$

(6) 功率谱密度, $S_{ff}(u)$

$$S_{ff}(u) = |F(u)|^2 \xleftrightarrow{\mathcal{F}} R_{ff}(x) \quad (1.18)$$

所用到的函数及其傅立叶变换有：

(1) $\text{rect}(\cdot)$

$$\text{rect}(x) \triangleq \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\mathcal{F}[\text{rect}(x)] = \frac{\sin \pi u}{\pi u} \quad (1.19)$$

(2) $\text{sinc}(\cdot)$

$$\text{sinc}(x) \triangleq \frac{\sin \pi x}{\pi x} \quad (1.20)$$

(3) $\delta(\cdot)$

$$\delta(x) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i u x} du \quad (1.21)$$

(4) $\text{circ}(\cdot)$

$$\text{circ}(r) \triangleq \begin{cases} 1 & r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\mathcal{F}^2[\text{circ}(r)] = \frac{J_1(2\pi\rho)}{\rho}, \quad \rho = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.22)$$

(5) $\text{comb}(\cdot)$

$$\text{comb}(x) \triangleq \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n)$$

$$\mathcal{F}[\text{comb}(x)] = \text{comb}(u) \quad (1.23)$$

(6) $\text{sgn}(\cdot)$

$$\text{sgn}(x) \triangleq \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{F}[\text{sgn}(x)] = \frac{1}{j\pi u} \quad (1.24)$$

随 机 过 程

对于事件(图象) $\omega \in \Omega$, 其随机变量为 $z_j(\omega)$; $j=1, \dots, N$ 。

联合概率分布: $z_i \leq \bar{z}_i$ 的概率分布函数

$$P(\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_N) = \int_{-\infty}^{\bar{z}_1} \cdots \int_{-\infty}^{\bar{z}_N} p(z_1, z_2, \dots, z_N) \prod_{i=1}^N dz_i \quad (1.25)$$

联合概率密度:

$$p(z_1, z_2, \dots, z_N)$$

关于 z_j 的边界分布:

$$p(z_j) = \int_{(N-1)} \cdots \int p(z_1, z_2, \dots, z_N) \prod_{i \neq j} dz_i \quad (1.26)$$

关于 z_j, z_k 的联合密度:

$$p(z_j, z_k) = \int_{(N-2)} \cdots \int p(z_1, z_2, \dots, z_N) \prod_{i \neq j, k} dz_i \quad (1.27)$$

期望值:

$$E[z_j] = \mu_j = \int z_j p(z_j) dz_j \quad (1.28)$$

方差:

$$E[(z_j - \mu_j)^2] = \sigma_j^2 = \int (z_j - \mu_j)^2 p(z_j) dz_j \quad (1.29)$$

协方差:

• • •

$$E[(z_j - \mu_j)(z_k - \mu_k)] = \sigma_{jk} = \int (z_j - \mu_j)(z_k - \mu_k) p(z_j, z_k) dz_j dz_k \quad (1.30)$$

相关:

$$E[z_j z_k] = R_{jk} = \int z_j z_k p(z_j, z_k) dz_j dz_k \quad (1.31)$$

相关常数:

$$R_{jk} = R(j - k), \text{ mod } N \quad (1.32)$$

相关系数:

$$r_{jk} = R_{jk} / \sigma_j \sigma_k \quad (1.33)$$

全书的组成

我们编写本书时,首先讲述应用光学系统的图象处理,然后再进一步讲述利用计算机进行图象处理的问题。其理由是:前者虽然属于光学信息处理领域,但后者多依赖于这一领域的发展,它是通过与光学信息处理部分的接触来建立与真实图象的联系的,因此在理解图象处理技术上,前者所起的作用是不可忽视的。

第二、三章为光学信息处理的应用。第二章是非相干光学系统的应用,第三章是相干光学系统的应用。在第二章中,我们选入了作为图象处理较为重要的技术,诸如:光相关器、断层照片重建、掩膜匹配等,这些在后半部分的章节里还会谈到。在第三章,从与过去不同的观点引入傅立叶变换光学系统和全息照相滤波器。第四章以后,便进入计算机图象处理。在第四章,首先从线性连续系统出发,作为与离散系统有关的基础预备知识,将介绍各种线性变换,并特别论及离散傅立叶变换的图象频带压缩效应。第五章叙述量化。通常为了进行计算处理,要实行等距量化,从量化畸变