

王绍霖 著

# 数字图象处理

国际科技大学出版社

SHUZI TU XIANG CHULI

# 数字图象处理

王绍霖 著

国防科技大学出版社

## 内 容 简 介

随着计算技术的迅猛发展,数字图象处理技术日臻成熟,并在科学研究、工业技术、生物医学和宇航空间技术等各方面得到广泛的应用,其各种论著亦不断推陈出新。本书就是作者积多年教学科研之经验,为研究生和高年级本科生编写的一本教材力作。作者从我国数字图象处理技术的研究、开发和应用的实际出发,力求体现目前该技术的最新成果,系统地阐述数字图象处理的基本概念、基本理论和主要应用技术,内容丰富,行文简洁,同时还兼顾各方面读者的要求,对所用的数学知识作了一定的介绍。因而,本书既可作为教材,又可供从事这方面科研和教学的教师、科技工作者参考。

## 数 字 图 象 处 理

王 绍 霖 著

责任编辑 钟 平

封面设计 侯 云

国防科技大学出版社出版

湖南省新华书店发行

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9<sup>7</sup>/<sub>16</sub> 字数: 212千字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷 印数: 0 001—5 000

15415·027

ISBN 7-81024-011-0

---

TN·1 定价: 1.60元

## 前 言

数字图象处理就是用数字计算装置对图象进行加工处理以取得某些预期效果或者用计算机从图象中提取某些有用信息的技术。数字图象处理无论在方法上还是在设备上，近廿多年来都取得了很大的发展。在前十年中，随着成象技术、数字计算机以及信号处理技术的发展，数字图象处理技术已日趋成熟，并在科研、工业、生物医学、宇航空间技术等各方面得到了广泛的应用。自七十年代中期以来，情况发生了变化，由于数字图象处理技术的日臻成熟和计算技术的发展，尤其是VLSI和微型计算机的发展，数字图象处理的研究和应用已进入到了商用阶段。各种小型、廉价的数字图象处理设备如雨后春笋般出现，开始普及于工业生产过程的监测、生物医学和分析自动化、航空照片判读等方面。其中最引人注目且有实际意义的发展是计算机视觉(Computer Vision)的研究，它为数字图象处理呈现了崭新的前景。

从七十年代末以来我们就开设了“数字图象处理”的课程，并编写了教材。本书是根据我们多年教学实践的经验改写而成的，适合于研究生和高年级大学本科生作教材或其他科技人员自修本门学科的课本之用。本书在内容的编排上尽量考虑不同对象的要求，并尽量对所用的数学知识作一定的介绍，对某些理论分析较深的内容，在编排上自成章节，可以跳过阅读而不失连续性。在本书的编写上，力求符合我国当前的现实，做到理论与实际相结合。

王绍霖

一九八七年五月

## 目 录

<b>第一章 数字图象处理概述</b>	
1.1 数字图象处理的发展概况	1
1.2 数字图象处理原理及其各个应用领域	7
<b>第二章 数学预备知识</b>	
2.1 矢量	14
2.2 矩阵	19
2.3 矩阵的秩、迹和范数	24
2.4 矩阵的特征值分解(SVD)	27
2.5 矢量和矩阵的解析运算	28
2.6 循环矩阵和傅氏变换的关系	35
2.7 条件极值——拉格朗日乘法	37
<b>第三章 图象信息的基本知识</b>	
3.1 图象与人的视觉系统	42
3.2 色度学	51
3.3 图象的质量评价	55
3.4 形成图象的光学系统	59
<b>第四章 图象的数字化</b>	
4.1 广义函数—— $\delta$ 函数	64
4.2 图象的采样	69
4.3 图象灰度的量化	77
4.4 矢量量化	82
4.5 离散图象的统计模型	83
<b>第五章 二维离散图象的线性处理方法</b>	
5.1 线性叠加算子	94
5.2 二维变换	97

5.3	线性滤波 .....	107
<b>第六章 数字图象的压缩编码</b>		
6.1	数字图象压缩编码的一般概念 .....	115
6.2	预测编码数字压缩技术 .....	120
6.3	变换编码数字压缩技术 .....	129
6.4	图象的其它编码和压缩方法 .....	135
6.5	信息率失真理论 .....	143
<b>第七章 数字图象增强</b>		
7.1	图象的灰度增强 .....	151
7.2	图象的平滑处理 .....	158
7.3	中值滤波技术 .....	161
7.4	图象的边缘增强 .....	168
7.5	图象的几何校正 .....	172
7.6	伪彩色技术 .....	176
<b>第八章 数字图象恢复技术</b>		
8.1	图象的退化模型 .....	181
8.2	图象恢复的基本概念 .....	186
8.3	图象恢复的线性滤波法 .....	195
8.4	图象恢复的其它改进技术 .....	202
8.5	二维递归卡尔曼滤波法 .....	205
<b>第九章 图象的投影重组技术</b>		
9.1	投影重组技术概况 .....	211
9.2	代数重组技术 (ART) .....	215
9.3	傅里叶重组技术 .....	219
9.4	重组技术的应用讨论 .....	232
9.5	核磁共振 (NMR) 重组技术 .....	236
9.6	NMR 重组成像与三维重组技术 .....	248

**第十章 图象的分割和描述**

10.1	引言 .....	258
10.2	图象的分割技术 .....	259
10.3	图象的特征描述 .....	275
10.4	复杂图象的关系描述 .....	288

# 第一章 数字图象处理概述

## 1.1 数字图象处理的发展概况

数字图象处理开始于六十年代，其含义就是用数字计算机对图象进行加工处理以得到某些预期的效果，或从图象中提取有用信息。在六十年代后期和七十年代前期这十多年中，随着成象技术、数字计算机以及信号处理技术在速度、规模和经济效果上的改进，数字图象处理技术已日趋成熟，并在科研、工业、生物医学、宇宙空间技术等各方面得到了广泛的应用。数字图象处理的发展大致可分为两个阶段，在它的前十年中，限于当时的计算机技术水平，数字图象处理都采用大型的计算机，往往只在少数几个研究机构采用。如美国的喷气推进实验室(JPL)，它是首先开发这项技术几个有名的单位之一。JPL实验室是美国宇宙空间研究的一个中心，它承担了美国航天局(NASA)的许多研究任务。JPL实验室开始进行数字图象处理研究的目的是想从无人月球探测和行星探测飞行器发回的照片中得到尽可能多的有用信息。首次应用是对徘徊者(Ranger)飞行器发回的月球照片的处理。当时苏联已经发表了月球背面的照片，它是经过照相光学处理的。JPL实验室用IBM7094计算机和一台叫做VFC的视频胶片转换器的仪器来取得高质量的月球照片。在飞行器上装有摄像机，但由于恶劣的环境和一些无法控制的积累误差的存在，使得所摄取的照片存在几何失真、非线性失真和附加噪声。JPL实验室用上述设备对所得图象进行计算机处理，包括对比度增强、非线性校正、几何校正和噪声线条去除等。徘徊者7号在1964年发回了4000多张月



球照片，经数字处理后取得了巨大的成功。所用的技术是二维线性滤波、卷积和傅氏变换。利用徘徊者7号的图片，用数字处理的技术，考虑了太阳的位置和月球的反射特性等参数，由计算机成功地制作出了月球表面的地图。1965年徘徊者8号发回37 137张照片。这些照片由于飞行器的高速运动都带有混淆现象（运动模糊）。JPL实验室用去卷积技术消除了这种模糊混淆，取得非常清晰的图象。JPL实验室的另一个早期的图象处理工作是对火星考察的水手(Mariner)4号无人飞船取得的照片进行的。1965年发回了22张 $200 \times 200$ 象素的火星照片，它是以8.33bit/s的数据率传送的视频数字数据。数据送入一台PDP-7计算机进行实时显示，并可记录在胶片上。数字处理的项目主要是去除网状干扰和摄像机阴影。这两项本来是在发射前仔细测量出来的，但是由于发射点火后造成了变化，JPL实验室用将20张照片进行低通滤波后求平均的办法来测得实际的校正量。

JPL实验室在总结上述两项前期工作经验的前提下对其设备进行了改进，主要是采用更先进的计算机IBM360/44（后改为IBM360/65），并发展了一种叫做VICAR（视频信息通信与查找）设备。用这一套改进的设备来处理探测者(Surveyor)、水手6、7、9、10号和海盗(Viking)号飞船取得的照片，并成立了图象处理实验室IPL。探测者飞船是进行月球软着陆用的，它进行了多次成功的发射，并用它所携带的电视摄像机发回了87 674张照片。探测者送回的是模拟FM视频信号，在天线接收后被记录下来，然后进行数字化，再送IPL进行处理。由于探测者号软着陆扬起的月球尘埃产生的闪耀问题，JPL实验室采用了一种在医学上对X射线图象增强处理用的数字滤波器来减轻这种闪耀现象。由探测者号的照片得到了月球的地形

图、立体图、彩色图片和全景的镶嵌图。由于对探测者号月球照片进行数字图象处理取得了非凡的成功，JPL 的研究计划便大幅度地摆向数字图象处理。在这一时期中（1969年）水手 6、7 号发回大量远行星的图象数据。在把如此大量的数据送回地球的过程中，采用了装在飞船上的压缩编码装置，这就使得发射任务与数字图象处理更进一步地联系起来。飞行器上采用了 MM'69 型 TV 系统，系统包括自动曝光表、自动增益控制、信号切割器和磁带记录机，系统可以用三种不同的速率进行数据传输，它们是每象素、每七个象素及每 28 个象素传送一个数据。图象中的主要干扰是飞船上 2 400Hz 电源造成的网状干扰，必须用非线性滤波的方法进行消除。1971 年水手号对火星进行轨道飞行，成功地发回了 7 300 张火星照片，这些照片都必须用数字图象处理技术进行几何校正和光度校正。有些照片是在光照条件非常差的情况下取得的，在未经处理之前基本上看不到什么内容；有些照片是在行星整个表面盖有尘暴的情况下取得的，数字图象处理就变得不可缺少了。1973 年水手号进行了对水星和金星的探测飞行，发回了 16 000 张关于地球、月球、金星和水星的照片。金星照片质量非常之好，通信线路每 42 秒传送一帧图象，数据率为 117 600 bit/s。海盗号对火星发射了两个轨道飞行器和两个软着陆飞船，每个飞行器都带有两个摄像相机，用以得到高分辨率的表面地图和立体照片，图象精度为  $1\ 024 \times 1\ 024$  象素。海盗号发回的照片在 IPL 以每星期 100 机时的速度在 IBM360/44 计算机上处理了一年。

JPL 实验室在开展空间技术中的图象处理的同时，开展了生物医学图象处理的工作，如 X 射线图象增强，光学显微镜图象中的染色体分析，电子显微镜图象的粒子分辨，Apollo 多光谱月球照片的分析，指纹图的频谱滤波等。IPL 的图象处理技

术近年来已用于陆地卫星(LANDSAT)的地球资源多波段图象的分析处理中,用来作水源分析、水质分析、农业收成、农作物生长、矿藏、石油贮量分布、大气和水质污染等方面的分析研究。

从 JPL 实验室十多年来对数字图象处理的研究中可以看到,用计算机处理图象信息是从空间技术的要求开始的。在无人空间飞船所处的恶劣条件下,用摄影机和多波段扫描器所得到的图象,在质量上很难保证,有许多畸变和干扰存在,人们无法从图象得到更多的信息,而这些畸变和干扰又是由多种因素造成的、复杂的,它们不可能用一般的光学手段来加以纠正,而飞行器的发射价格又非常昂贵,这就使得数字图象处理得到了产生和发展的机会,而这种从空间技术中发展起来的处理技术又在许多不同部门得到了应用,如卫星和飞机遥感、生物医学、化学分子结构分析、粒子物理研究以及地震物理勘探等。这一发展阶段的数字图象处理研究主要可以分为四个方面。

**数字图象增强(Image Enhancement)**:即采用数值计算的算法,如线性滤波、卷积、非线性滤波、对比度扩张等,对图象进行处理,使图象变得看起来更清晰,更舒服,能看到图象中更多的细节(信息)。

**数字图象恢复(Image Restoration)**:图象由于成象系统的缺陷,以及成象过程中各传播媒介中的杂质,如空中的云雾、尘埃,图象录取装置和被成象目标之间的相对运动等因素的影响,造成各种复杂的失真。只要系统参数是可测的或是可估计的,那么用数字计算机进行反滤波或反卷积就可以恢复图象的本来面目。这是一项在理论上比较严密的处理项目,并已成功地在应用在飞机和卫星的各种成象系统的校正工作中。

数字图象描述 (Image Description) , 在某些简单的图象信息中包括了要测量的一些物理量, 例如核物理实验中粒子踪迹照片的粒子踪迹轨迹代表着粒子的能量、质量、带电量等; 生物医学显微照片的目标物, 其大小、形状、颜色等表示不同的染色体、细胞、细菌、虫卵等, 都是在匀一背景上的明显的简单物体。可以用计算机对它们进行分割、分类、计数。即用数字、符号组合来对图象中的物体进行描述, 然后进行比较分类。这是用计算机代替人眼进行的简单工作。

数字图象的压缩编码 (Image Compression and Coding), 图象通信实现数字化是一个肯定的发展趋向, 只有这样, 才能充分地体现数字通信的优越性。但宽带的图象信息 (包括可视会议电话、工业电视、广播电视、高分辨电视等) 的数字化需要很大的码速容量, 因此, 宽带图象的压缩编码问题急待解决, 而且成为近几十年来着重研究的问题, 只是在近年来高速 VLSI 技术和计算技术迅速发展的情况下, 才有了解决的条件。如图象模拟信号的最高频率为 4MHz, 则数字化采样率将为 8 兆次/秒。每个样点按 8 个比特 (bit) 计算, 数字信号的码率达 64MB/s。而电话信号经过标准的 PCM 编码后, 数字码率为 64kB/s。这就是说, 数字电视图象的码率将是数字电话的 1 000 倍。亦即一路电视图象将占用的信道容量相当于 1 000 路电话的容量。高清晰度电视图象的信息量必然更大。所以, 不论传输还是存贮, 都要求把表达图象的数据量减到最小的必需量。当然, 经过压缩编码的图象, 在解码后重建原来的图象必将引起少量畸变。为了保证图象质量, 不能让畸变超过容许的限度, 因而压缩是有一定限度的。

图象数据的压缩编码方法, 基本上可以分成两大类, 第一类是预测编码 (Predictive Coding), 主要的方法是 DPCM (差

值脉冲编码调制)；第二类是变换编码(Transform Coding)。图象数据是有冗余性的，也就是说图象数据是随机的，有一定的平滑性和一定的可预测性。如果采样后的图象阵列由另一个没有冗余性的阵列代替，就能得到压缩的效果，但会引起畸变。对广播电视信号，如用DPCM帧内压缩编码，可把码速容量从90MB/s压缩到34MB/s而觉察不到图象质量的降低，对于可视电话压缩比可以进一步提高。

以上这些处理可以称为数字图象处理的第一阶段，它主要应用于高技术部门，如空间技术研究、高能物理实验室等，对其它一些应用如生物医学、图象传输、工业监测等方面则还处在研究阶段。从七十年代中期开始，情况发生了巨大变化，这种变化主要表现在美国、西欧和日本，由于数字图象处理技术的日臻成熟和计算机技术的发展，尤其是微型机的发展，使得微型机的计算能力现在已经达到或超过小型机的水平，而价格却只有小型机的10~20%，使数字图象处理的研究和应用进入了商用阶段，各种各样的小型设备应用于工业监测、生物医学、金相分析自动化等实用工艺。数字图象处理已与计算机自动化监测密切联系起来。各种小型图象处理系统的研制单位和生产厂家如雨后春笋般地出现。这方面最引人注目并具有实际意义的发展被称为计算机视觉或机器人视觉。计算机视觉顾名思义就是指使计算机具有视觉功能，也就是能看懂外界景物或照片。但是由于目前对人的视觉功能还没有真正理解，所以当前的计算机视觉系统不过是一些初级的视觉系统。它们一般可以描述景物图象中的目标物体以及它们之间的空间关系或者可以从二维投影图中获得三维图象信息，能处理二维图象并从中取出有用信息，例如物体的位置、方向、密度、状态等。当前的计算机视觉系统的应用有三个方面：工业生产中的部件、另件的监视

和检测；航空照片的判读；X射线照片的分析。计算机视觉的功能现在已逐步向高级功能发展，涉及联想记忆、策划和管理功能，即能利用当前接收到的图象信息，策划下一步应该怎样进行，以及对前面的功能的反控制，以得到所必需的进一步的视觉信息。这些高级的视觉功能都必须利用知识和技术，因此，计算机视觉系统必须有一个知识库。目前的计算机视觉系统大多是专用的。通用的计算机视觉系统是非常复杂的，目前还是不现实的。在当前的实际可能情况下，计算机视觉方面所做的工作主要是寻找图象与概念之间的联系。计算机视觉中对图象中信息的表述有各种各样的方法，当前大致分成四个层次：肖象式的图象；分割图象；几何信息；关系信息。在某一个具体的计算机视觉系统究竟采用什么形式来表述图象信息要看实际情况而定。计算机视觉已逐步从人类的低级思维活动如逻辑推断、数值计算的模拟发展到心理学、思维科学、行为科学等高级阶段，内容要比单纯的计算机技术宽广得多。

## 1.2 数字图象处理原理及其各个应用领域

完成各种图象处理任务的方式一般分为通用型和专用型两大类。通用型的一般采用通用电子计算机作为处理装置，而配有一些不同的图象输入和输出设备作为外部设备。图象输入设备可以是TV摄像机、滚筒扫描机、平台扫描机、飞点扫描机等，图象输出设备可以是照相记录设备、滚筒扫描机、描绘仪、图象显示器等。图1-1表示一个示意性的数字图象处理系统，可以看到数字图象处理的大致过程。

从图1-1中可以看到，为了得到精密的数字图象，首先要制成胶片，然后再扫描进入计算机。一幅图象的精度一般由 $512 \times 512 \times 8$ 到 $2340 \times 3240 \times 8$ ，后者是陆地卫星所得遥感图

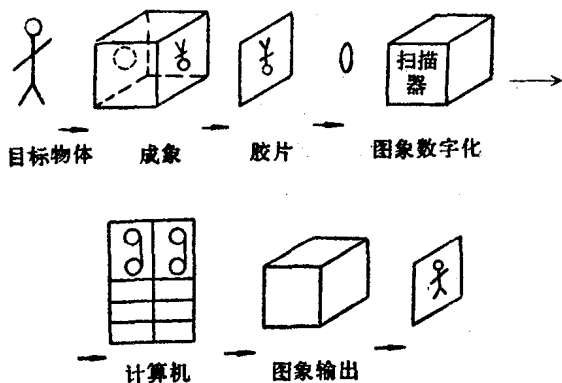


图 1-1 数字图象处理的大致过程

象的标准尺寸。卫星遥感数据往往先存贮在与计算机兼容磁带 (CCT) 上, 然后, 直接输入计算机。计算机的外存至少要 100MB 以上, 主机可以是高档的小型机或大型机。

另外一类设备是近年来迅速发展起来的实时专用图象处理系统。图 1-2 是一个印刷电路板钻孔自动对准系统的设备。用 TV 摄像机取下印刷电路板上所对准的图象, 经计算机可以算出钻孔机钻头所对准的是否是印刷板上金属圆盘的中心, 如不是中心, 即发出命令给 X、Y 方向的电动机使印刷板平台作相应的运动, 直到对准为止。TV 图象被数字化成  $382 \times 287 \times 5$  的数字数据, 但实际上计算用的扫描图为  $20 \times 20$  和  $57 \times 57$  两种小图象 (分别为  $2.5 \times 2.5\text{mm}$  和  $14 \times 14\text{mm}$ )。送入 DDP516 小型计算机。小图象精度分别为  $0.125\text{mm}$  和  $0.250\text{mm}$ 。钻孔的位置是事先编程决定的, 但由于工艺上或操作上的误差, 位置上可能有偏差, 这就要用数字图象处理装置来提取这种偏差信息。这种设备要求简单、可靠、经济, 以利于广泛的推广。

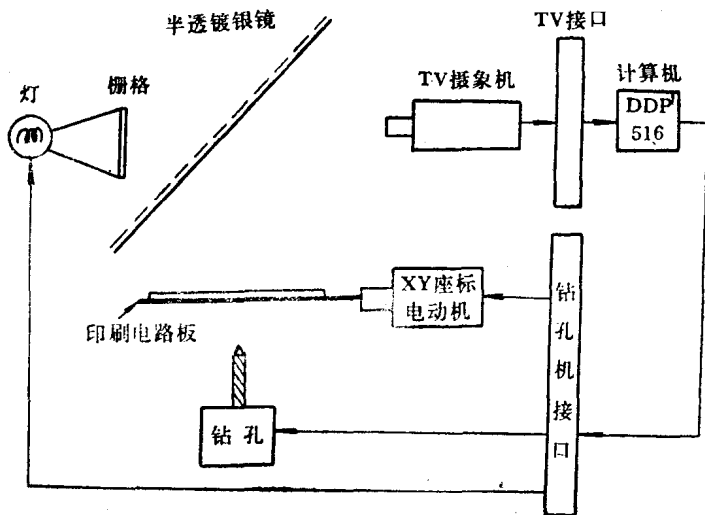


图 1-2 钻孔自动对准系统

经过二十多年的努力，数字图象处理已经得到了很大的发展，它的应用已经扩展到从科学研究、空间技术、生物医学、图象通信到人工智能和工业检测等各个方面。下面分四个方面来看看数字图象处理在主要应用领域中的情况。

#### 1) 空间技术、高空侦察和资源调查

在无人驾驶的空间飞行器中，由于其位置、环境条件、照明情况等都无法事先确知，因此，要得到高质量的照片是很困难的。所以，如何从代价昂贵的图象中提取尽可能多的信息，得到尽可能好的图象这样一种要求促使数字图象处理得以发展，这方面的成功例子已在前面作了介绍。

这方面的另一成功例子是飞机和卫星遥感技术的成功应用。这两者的竞争在美国持续了十多年，最后卫星遥感技术取



得了胜利，取代了飞机遥感。飞机遥感作为军事侦察、地球资源调查、灾害监测等在六十年代取得了很大的发展。在军事上，美国每天派出大量的侦察飞机，对地球上所有感兴趣的地区进行空中摄影。这种飞行都是高空飞行（一万米以上）和按规定路线进行的，每天得到成千上万张照片，雇佣了上千人对照片进行分析，从中提取各种信息。并试图利用计算机代替人工分析，既节省人力，又能得到尽可能多的信息。另一方面，在六十年代中期以后，发射了陆地卫星和天空实验室（SKYL-AB），都是对地球进行资源遥感的，它用的图象录取设备是多波段扫描器（MSS）。陆地卫星是一颗太阳同步卫星，它差不多每天在同一时间（当地时间上午9:42）经过所有地点。卫星高度约900km，敏感元件的分辨率相当于地面上100m左右。

（1983年发射的LANDSAT4已把分辨率提高到30m，计划中的LANDSAT6分辨率提高到15m）。卫星每天绕地球14周，对同一地区每18天重复一次扫描。它得到的图象是数字化的，在星上直接存入磁带机中。当卫星经过地面站上空时，将图象数据高速地发送下来，由地面站进行预处理组成图象并存入CCT磁带中；数据格式为 $2\ 340 \times 3\ 240 \times 8$ 。每幅图代表165km见方的地区。近年来世界各国都利用陆地卫星所得到的数据进行资源普查、农业规划、农作物产量估算、病虫害监测、森林调查、火灾监测、水量估测、水源利用、土地含水量调查、石油勘察、矿产探测、城市规划、海洋泥沙、渔业调查等许许多多的开发应用，相应地设计了许多种计算机图象处理系统。我国已建成了LANDSAT地面站，并已引进了多种数字图象处理系统在各个部门应用。

## 2) 生物医学

数字图象处理在生物医学方面的应用是除空间技术以外最