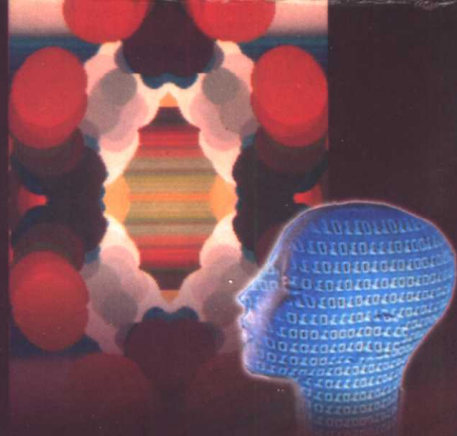


图 象 图 形 科 学 丛 书

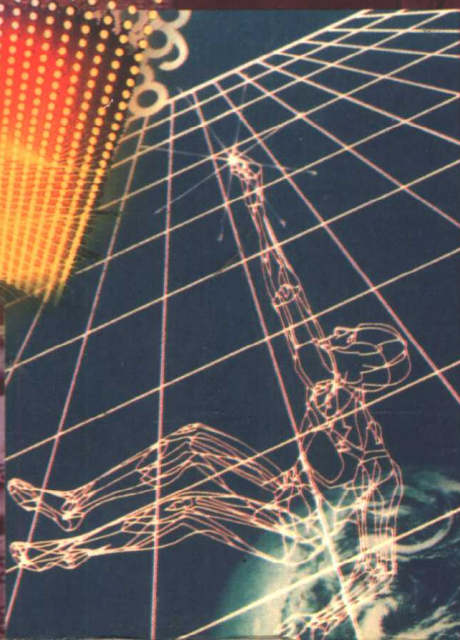


崔 屹 编 著

图 象 处 理 与 分 析

— 数 字 形 态 学 方 法 及 应 用

科 学 出 版 社



图象图形科学丛书

图象处理与分析

——数学形态学方法及应用

崔 屹 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

数学形态学是一门新兴的图象处理与分析学科,其基本理论和方法在视觉检测、生物医学图象分析、机器人视觉、图象压缩编码、纹理分析等诸多领域,都取得了非常成功的应用,创造了巨大的经济效益。

本书用浅显的语言,结合丰富的图示,详细、系统地介绍了数学形态学图象分析的理论和方法,并给出了大量的应用实例。对于书中所介绍的算法,基本上都给出了相应的C程序例子,书后附有程序软盘一张。

本书可作为计算机信息处理、自动控制、材料科学、生物医学工程、遥感地质等领域科技人员的入门书,也可作为高校师生的教学参考书。

另外,与本书内容配合,还有专业版图象分析软件一套,有意者可与科学出版社或作者联系。

图书在版编目(CIP)数据

图象处理与分析——数学形态学方法及应用/崔屹编著. -北京:

科学出版社, 2000

ISBN 7-03-007231-6

I. 图… II. 崔… III. 计算机-图象 IV. TP919.8

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第37730号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000年4月第 一 版	开本: 787×1092 1/16
2000年4月第一次印刷	印张: 11 1/2
印数: 1—3 800	字数: 269 800

定价: 23.00 元(含盘)

(如有印装质量问题, 我社负责调换(环伟))

图象图形科学丛书编委会名单

主任委员

潘云鹤

副主任委员

(按姓氏笔划为序)

王宝兴 王淑兰 罗志安 章毓晋

委 员

(按姓氏笔划为序)

王宝兴 王淑兰 刘健勤 朱述龙 江 早
石教英 何江华 鲍虎军 罗志安 张永生
章毓晋 崔 屹 潘云鹤 潘志庚

印

丛书序言

图象图形是人类相互交流和认识客观世界的主要媒体。科学研究和统计表明,视觉系统帮助人类从外界获得 $3/4$ 以上的信息,而图象图形带给我们的正是视觉世界中的所有信息。视觉信息所获得的客观作用是其他信息不能替代的,百闻不如一见就是一个非常形象的例子。图象图形是现代信息化社会的重要支柱。

图象图形科学是一门理论与现代高科技相结合来系统地研究各种视觉原理、技术和应用的综合性很强交叉学科。图象图形技术在广义上是各种与视觉有关技术的总称。人类基于视觉的活动,是一个广阔、复杂、富有挑战性的研究领域。图象图形科学和技术是这个领域的有力工具。该学科包括利用计算机和其他电子设备观察世界而获得的数据及按产生数据处理并且显示这些数据的理论和技术的研究。

图象图形科学具有涉及面广,内容丰富,跨行业、跨学科的特点。从它的研究方法来看,它与数学、物理学、生理学、心理学、电子学、计算机科学等许多学科可以相互借鉴;从它的研究范围来看,它与人工智能、神经网络、遗传算法、模糊逻辑等理论和技术都有密切的联系;它的发展应用与医学、遥感、通信、影视、文档处理和工业自动化等许多领域也是不可分割的。在科学史上,它代表了最活跃和令人振奋的边缘学科之一。

图象图形技术已经迅速渗透到人类生活和社会发展的各个方面。图象图形技术无论在科学研究、工业生产、文化娱乐、管理部门都得到越来越多的重视。图象图形技术在工业检测、高空侦察、制导、文件处理、动画、虚拟现实、生物医学、人体科学、艺术、远程教育、科学可视化、计算机辅助设计、遥感、航天等方面都得到越来越多的应用。进入 21 世纪后,其发展将更加迅速。

“图象图形科学丛书”正是在这种形势下组织出版的。中国图象图形学会和科学出版社为该套书的出版付出了很多的努力。这套丛书比较全面地覆盖了图象图形科学的各个分支,是广泛了解图象图形领域基本理论、技术应用和发展动态的最好读物;也是从事图象图形领域研究、技术开发和实际应用人员的工具书。

“图象图形科学丛书”由我国该领域的专家编写,这些专家既对 图象图形领域的发展有全面的把握,又分别在其中的某一方向上有深入的研究和独到的见解,充分反映了当前图象图形科技研究的前沿、进展和水平。希望该套书能为发展图象图形科学技术,活跃学术气氛,交流研究成果,促进科技发展,为迎接信息技术的挑战,为我国图象图形事业做出应有贡献。

潘雪鹤

2000 年 2 月 1 日

前 言

近年来, 形态学图象处理这门特殊的图象处理学科已从法国的枫丹白露数学形态学研究中心走向了世界, 发展成为图象处理的一个主要研究领域。对于形态学兴趣的增长势头, 可以从近几年大量涌现的研究期刊和会议论文的数量, 以及许多已经开发和正在开发的工业应用系统中窥见一斑。形态学的应用覆盖了图象处理的几乎所有领域, 包括文字识别、医学图象处理、图象编码压缩、视觉检测、材料科学以及机器人视觉等, 不胜枚举。一些图象分析系统将数学形态运算作为系统的基本运算, 并由此出发考虑其体系结构。形态学方法已迅速成为图象应用领域工程技术人员的必备工具。

形态学图象处理的基本思想, 是利用一个称作结构元素的“探针”收集图象的信息。当探针在图象中不断移动时, 便可考察图象各个部分间的相互关系, 从而了解图象的结构特征。

数学形态学基于探测的思想, 与人的 FOA (Focus Of Attention) 的视觉特点有类似之处。作为探针的结构元素, 可直接携带知识 (形态、大小、甚至加入灰度和色度信息), 来探测研究图象的结构特点。

深入了解数学形态学, 会发现, 数学形态学的基本思想及方法适用于与图象处理有关的各个方面, 如基于击中击不中变换的目标识别, 基于流域概念的图象分割, 基于腐蚀和开运算的骨架抽取及图象编码压缩, 基于测地距离的图象重建, 基于形态学滤波器的颗粒分析等。迄今为止, 还没有一种方法能像数学形态学那样既有坚实的理论基础, 简洁、朴素、统一的基本思想, 又具有如此广泛的实际应用价值。有人称数学形态学在理论上是严谨的, 在基本观念上却是简单和优美的。显然, 这并不是一句简单的褒奖。

本书在编写过程中参阅了大量文献, 这些文献的出处主要有以下几种国际刊物:

- (1) Computer Vision Graphics & Image Processing (此刊物现在的名称为 Graphical Models and Image Processing 及 Computer Vision and Image Understanding)
- (2) IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence
- (3) Pattern Recognition
- (4) IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing
- (5) Journal of Electronic Imaging

以及 SPIE 的会议论文集等。由于文献信息量非常之大, 将其整理, 使其系统化, 形成一本由浅入深、有理论、有实践的论著是一件工作量很大的事。在此应该感谢为数学形态学图象处理作出卓越贡献的几位学者, 他们的著作为本书的编写提供了蓝本。第一部著作是《Image Analysis and Mathematical Morphology》, 这是数学形态学奠基人之一赛拉撰写的一部关于形态学图象处理的巨著, 书中包括了形态学各个方面的理论论述, 对于初学者是一部艰深的著作。第二部是 E. R. Dougherty 于 1993 年主编的《Mathematical Morphology in Image Processing》, 书中收入了一些很值得一读的形态学论述文章。Dougherty 与 Giardina 合著的另外一部著作《Morphological Methods in Image and Signal Processing》也是一部很好的形态学著作。本书后面列出的参考文献给出了有关学术论著的详细出处, 有兴趣的读者可跟踪了解当前形态学的发展状况。

为了配合读者学习本书内容,书后还附有与本书内容配套的程序软盘一张,盘中给出了数学形态学各种运算的C程序代码及在Windows环境下运行的学习版形态学图象处理软件。通过使用该软件,读者可以直观地了解各种形态学运算的图象处理效果。另外,为了帮助广大读者进一步了解和掌握数学形态学图象处理的基本理论、方法及其在实际中的具体应用,本书作者还为广大读者准备了一套专业版系统软件。该软件以数学形态学算法为基础算法,可在Win95、Win98环境下运行,提供在线中文提示、全汉化图文界面,操作简单方便。系统具有真彩色图象采集、输出、腐蚀膨胀、开闭运算、测地膨胀、流域变换、TOP-HAT变换、形态学梯度、测地影响区骨架、特征与、图象细化、边缘检测、图象平滑、灰值变换、照明场均衡、细化图象的修剪与方向连接、颗粒图象的自动识别、统计、标记、粘连颗粒自动切分、孤立化、背景抑制、图象变形、几何矫正、色度调整、图象间各种运算、自动分析过程编辑等一百多项图象处理功能,可完成图象面积、等效圆直径、长短轴、圆度、边界能、闭包、体态比、凹度、欧拉数、不变矩等近百项形态学参数分析。为了满足不同应用领域的需要,系统专门提供了细长体(如裂纹)、块状体(如金相图)、颗粒体(如细胞)、线状体(如血管网络)等各种特征体的定量分析功能。该软件适合于生物学、医学、化工、冶金、材料科学、摩擦学等各种需要利用视觉方式进行定量分析的应用领域,亦可作为理论教学、实验分析和基础科学研究的辅助工具。感兴趣的读者可与科学出版社或本书作者联系。

本书在编写作过程中曾得到清华大学电子工程系吴国威教授的指导和帮助,北京邮电大学信息系钟义信教授、北方交通大学信息所袁保宗教授、北京邮电大学无线电系金子一教授审阅了全书,提出了宝贵意见,作者在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中一定存在许多不足之处,恳请读者给予批评指正。

作 者

1998.1.1 于北京

Email: yicui@public.bta.net.cn

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 数学形态学与图象处理	1
1.2 连续图象和数字图象	2
1.3 形态学基本运算及应用实例	4
1.4 本书的内容及安排	14
第二章 二值腐蚀和膨胀	15
2.1 腐蚀	15
2.2 膨胀	20
2.3 腐蚀和膨胀的代数性质	24
2.4 腐蚀和膨胀的滤波性质	26
2.5 与集合运算之间的关系	28
第三章 二值开运算和闭运算	29
3.1 开运算	29
3.2 闭运算	33
3.3 开闭运算的滤波性质	35
3.4 开闭运算滤波器的应用	36
3.5 不变性	39
3.6 τ -开运算	40
第四章 击中击不中变换	43
4.1 定义	43
4.2 物体识别	45
4.3 细化	47
4.4 修剪	51
第五章 二值图象的形态学处理	56
5.1 象素区域	56
5.2 边界检测	57
5.3 条件膨胀	62
5.4 骨架化	67
5.5 流域分割方法	77
5.6 马瑟荣表达定理及形态学恢复	84
第六章 颗粒分析	87
6.1 采用凸基元的欧几里德颗粒分析	87
6.2 离散粒度分布	90
6.3 随机布尔图象的颗粒分析	93
6.4 局部颗粒分析及纹理分析	94
6.5 一般颗粒分析	96
第七章 灰值形态学	98
7.1 预备数学知识	98

7.2	灰值腐蚀	101
7.3	灰值膨胀	103
7.4	代数性质	106
7.5	滤波性质	106
7.6	本影变换	107
7.7	扁平结构元素	110
7.8	灰值开闭运算	111
7.9	图象的数字灰值形态学	113
第八章	灰值形态学算法	126
8.1	灰值形态学梯度	126
8.2	Top-Hat 变换	128
8.3	开闭运算及混合滤波器	135
8.4	利用流域的分割方法	140
附录		149
附录 A	数学形态学发展简史	149
附录 B	书中使用的符号及含义	153
附录 C	数学形态学常用运算及其性质	155
附录 D	英汉术语对照	161
参考文献		164

第一章 绪 论

数学形态学是一门新兴的图象分析学科,其基本理论和方法在视觉检测,机器人视觉,医学图象分析等诸多领域都取得了非常成功的应用。本章简单介绍数学形态学的发展历史,数学形态学在图象分析中的应用,以及与数学形态学图象处理有关的一些基本知识。

1.1 数学形态学与图象处理

数学形态学(Mathematical Morphology)诞生于1964年。当时,法国巴黎矿业学院的马瑟荣(G. Matheron)在从事多孔介质的透气性与其几何(或纹理)之间关系的研究工作,赛拉(J. Serra)在马瑟荣的指导下从事铁矿核的定量岩石学分析,以预测其开采价值的博士论文研究工作,在研究过程中,赛拉摒弃了传统的分析方法,动手与J-C Klein建立了一个数字图象分析设备,并将它称为“纹理分析器”。随着实验研究与分析工作的不断深入,赛拉逐渐形成了击中击不中变换的概念。正如赛拉本人所说:“我认识到象方差,弦长分布,周长测量及颗粒统计等都是某个独特概念的特殊情况,我将它称为击中击不中变换”^[194]。与此同时,马瑟荣在一个更为理论的层面上第一次引入了形态学的表达式,并建立了颗粒分析方法。他们的工作几乎同时奠定了这门学科的理论基础(击中击不中变换,开闭运算,布尔模型及纹理分析器的原型)。此后他们共同在法国枫丹白露(巴黎矿业学院)建立了枫丹白露数学形态学研究中心(附录A中对数学形态学的发展历史作了更详尽的介绍)。

数学形态学是一门建立在严格数学理论基础上的学科,其基本思想和方法对图象处理的理论和技术产生了重大影响。许多非常成功的理论模型和视觉检测系统都采用了数学形态学算法作为其理论基础或组成部分。事实上,数学形态学已经构成一种新型的图象处理方法和理论,形态学图象处理已成为计算机数字图象处理的一个主要研究领域。这门学科在计算机文字识别,计算机显微图象分析(如定量金相分析,颗粒分析),医学图象处理,工业检测(如印刷电路自动检测),机器人视觉等方面都取得了许多非常成功的应用。有些计算机图象处理和分析系统把形态学运算作为基本运算,由此出发来考虑体系结构。一些形态学的算法,已经作成了计算机芯片,许多研究成果已经作为专利出售,其影响已波及到与计算机图象处理有关的各个领域,包括图象增强、分割、恢复、边缘检测、纹理分析、颗粒分析、特征生成、骨架化、形状分析、压缩、成分分析及细化等诸多领域。目前,有关形态学的技术和应用正在不断地发展和扩大。

从某种特定意义上讲,形态学图象处理是以几何学为基础的。它着重研究图象的几何结构,这种结构表示的可以是分析对象的宏观性质,例如,在分析一个工具或印刷字符的形状时,研究的就是其宏观结构形态;也可以是微观性质,例如,在分析颗粒分布或由小的基元产生的纹理时,研究的便是微观结构形态。形态学研究图象几何结构的基本思想是利用一个结构元素(structuring element)去探测一个图象,看是否能够将这个

结构元素很好地填放在图象的内部,同时验证填放结构元素的方法是否有效。在图 1.1 中给出了一个二值图象 A 和一个圆形结构元素 B 。结构元素放在两个不同的位置。其中一个位置可以很好地放入结构元素,而在另一个位置,则无法放入结构元素。通过对图象内适合放入结构元素的位置作标记,便可得到关于图象结构的信息。这些信息与结构元素的尺寸和形状都有关。因而,这些信息的性质取决于结构元素的选择。也就是说,结构元素的选择与从图象中抽取何种信息有密切的关系,构造不同的结构元素,便可完成不同的图象分析,得到不同的分析结果。

所有的形态学处理都基于填放结构元素的概念。事实上,在数学形态中只有一种基本运算,这种运算可以用图 1.1 所示的探测概念粗略地描述。

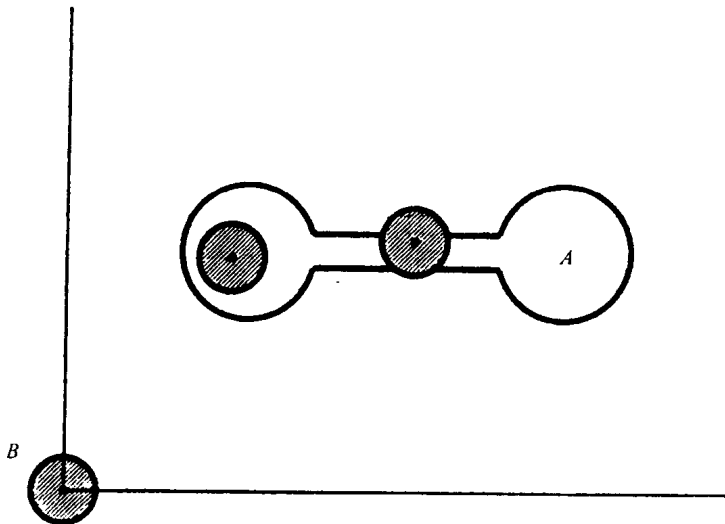


图 1.1 形态学基本运算

1.2 连续图象和数字图象

本书在介绍形态学运算时讨论了两类图象:连续图象与离散图象。连续图象亦称模拟图象或欧氏图象,它在空间和值域上都是连续的,可用一两维连续函数 $f(x, y)$ 表示。为了用计算机对图象作处理,首先要将模拟图象转化成数字图象。这一过程实际包括两部分:(1)将图象在空间上离散化,这一过程称作采样;(2)采样值实际上仍然是模拟量,还要将其分成多个层,每一层表示一个整数值,这一过程称作量化。

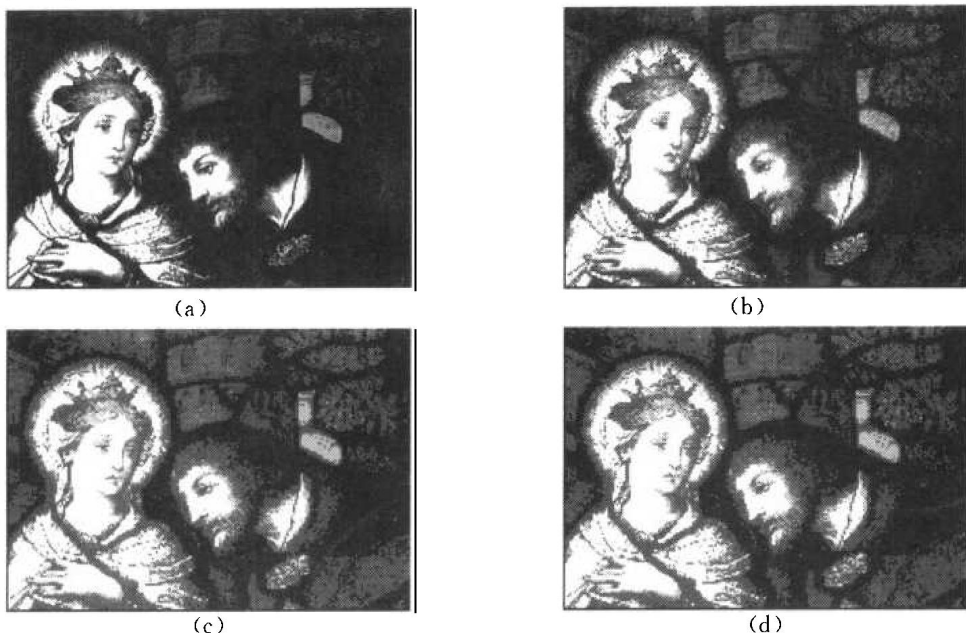
一幅图象经过采样和量化后便可以得到一幅数字图象。通常可以用一个矩阵来表示:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,n-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(n-1,0) & f(n-1,1) & \cdots & f(n-1,n-1) \end{bmatrix}$$

矩阵中的元素称作像素。每一个像素都有 x 和 y 两个坐标,表示其在图象中的位置。另外还有一个值,称灰值,对应于原始模拟图象在该点处的亮度。

将一幅模拟图象转换成数字图象后,往往会丢失一些信息,为了能够从数字图象中完全恢复模拟图象,要求对图象采样时满足采样定律,即采样频率大于图象信号最高频率的 2 倍,而且采样点必须是一个理论上的点,即没有大小的点。这在实际中是无法做

到的。因为物理可实现的点总是存在一定的尺寸，这种现象称点扩散，是使图象质量下降的一个因素。在效果上，相当于对图象作均值处理，使图象模糊化了。除此之外，量化等级也会影响到图象的质量。一般量化等级都取8位，表示0~255，256个灰度级。图1.2给出了同一幅图象量化等级分别为256、16、4和2灰度级的例子。如果量化等级只取两个值，得到的图象称为二值图象。如果一幅图象在空间上是连续的，而灰度值只有两个值，则称连续二值图象。图1.3和图1.4为离散二值图象和连续二值图象的例子。另外，采样点的位置也有多种方案，图1.5是常用的两种采样栅格结构。关于采样与量化的更详细讨论，可参考文献[236]。



(a) 256 灰度级数字图象 (b) 16 灰度级数字图象 (c) 4 个灰度级数字图象 (d) 两个灰度级数字图象

图 1.2 不同量化等级的数字图象

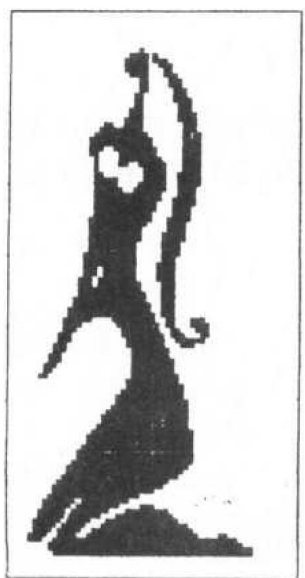


图 1.3 离散二值图象

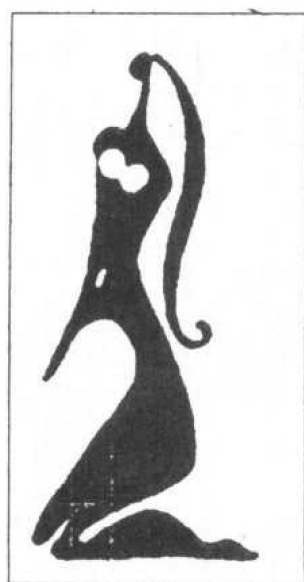
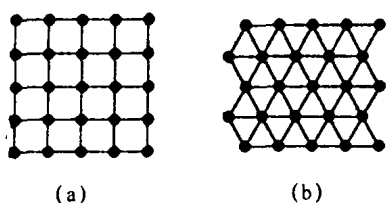


图 1.4 空间上连续的二值图象



(a) 正方形 (b) 等边六角形

图 1.5 两种采样栅格

在本书中，我们实际上接触到四种图象：连续二值图象，离散二值图象，连续灰度图象和离散灰度图象。由于本书讨论计算机图象处理，故主要分析离散图象。连续图象则是为了从几何上说明问题方便而引入。

连续二值图象亦称欧几里德二值图象，是 n 维欧几里德（以下简称欧氏）空间的一个子集。对于信号处理， $n=1$ ，对于图象处理， $n=2$ 。本书的讨论集中在图象处理方面，因而，欧几里德图象便成为欧氏平面的一个子集。同理，一幅离散二值图象可看作是二维笛卡尔栅格的一个子集。后面介绍形态学基本运算的时候，我们还会给出一些有关的定义，讨论一些基本性质，并利用欧氏空间的图示，即连续二值图象从几何角度对形态学的概念作进一步解释。

前面已经指出，数字图象可以用一个矩阵表示。由于形态学运算一般要跟踪图象在栅格中的位置，因而需要标记出矩阵相对原点的位置。为此，可以将图象中位于原点处的像素值用带“ Δ ”号下标的字体来表示，并约定用 1 表示活动（前景）像素，用 0 表示不活动（背景）像素。在处理二值图象时，假设所有不在矩阵边框之内的像素都为 0 值。

下面是利用有界矩阵表示数字图象的一个例子。

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0_{\Delta} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

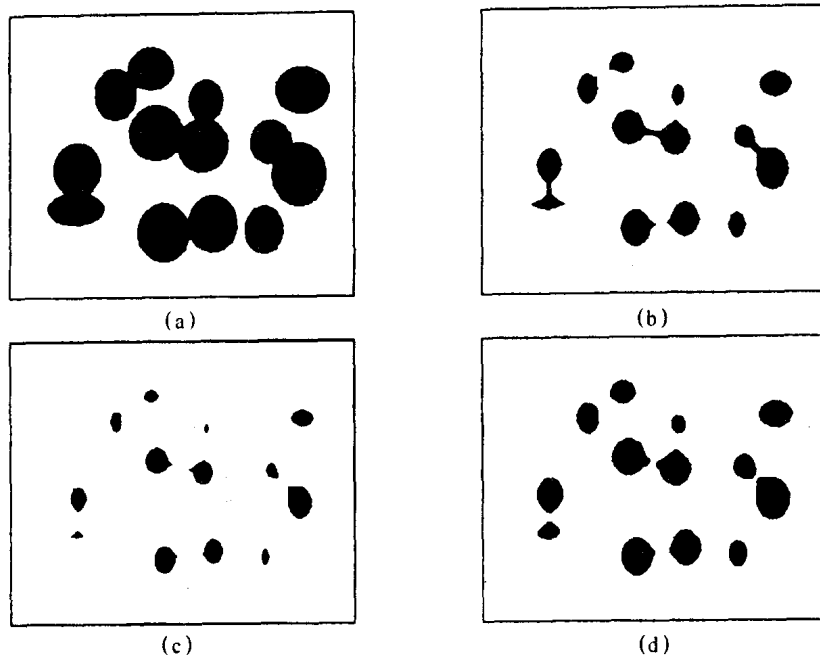
该图象为一个 2×3 的矩形，矩形左下角位于栅格中像素 $(2, 1)$ 处，带下标的元素 0_{Δ} 表示原点的位置。

1.3 形态学基本运算及应用实例

利用数学形态学基本运算可以构造出许多非常有效的图象处理与分析方法。这里我们仅给出其中的一部分例子，后面章节将对这些形态学运算的原理和实现方法作更详尽的讨论。

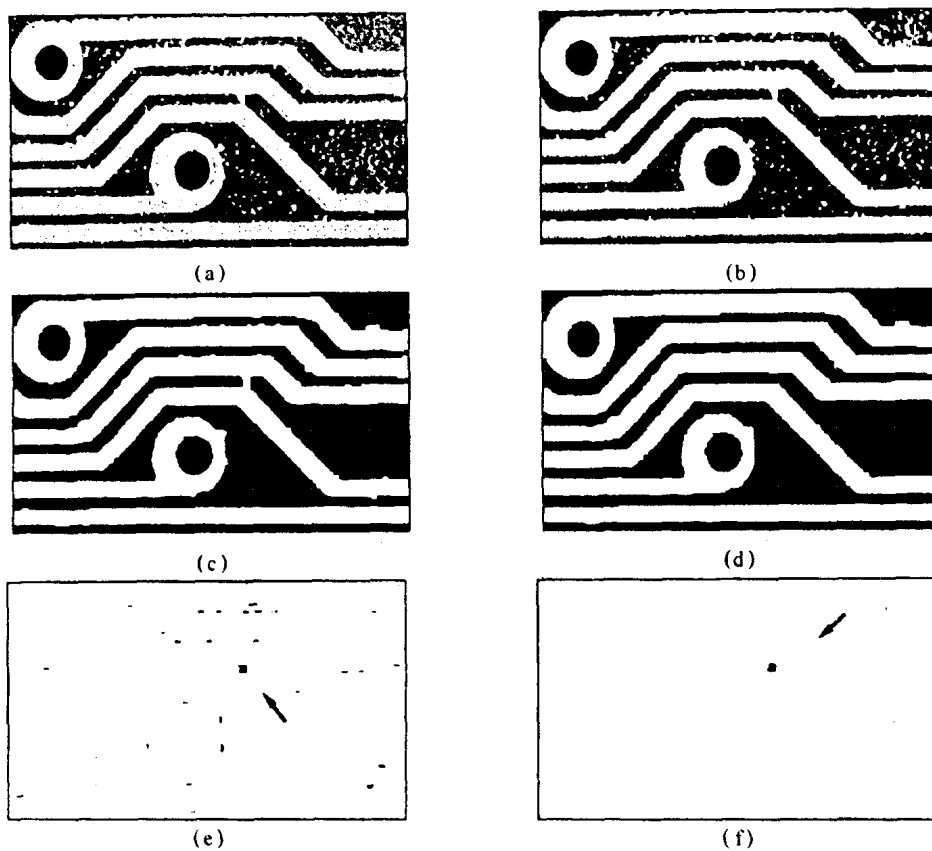
1.3.1 二值腐蚀和膨胀

二值腐蚀和膨胀是最基本的形态学运算，它们互为对偶运算。腐蚀具有收缩图象的作用，膨胀具有扩大图象的作用。利用腐蚀和膨胀运算的特点可以完成一些特殊的图象处理过程。图 1.6 所示为一些相互粘接的颗粒图象，利用腐蚀运算可以将它们分开，这是颗粒统计分析中常用的一种方法。图 1.7 (a) 为存在毛刺的印刷电路板图象，其中存在一个短路点，利用腐蚀和膨胀运算可以将毛刺点检测出来。图 1.7 (e) 为检测到的毛刺点，图 1.7 (f) 给出了检测到的短路点。



(a) 原始颗粒图象 (b) 腐蚀运算中间步骤 (c) 腐蚀运算产生的分割结果 (d) 利用膨胀恢复

图 1.6 重叠颗粒图象分割处理

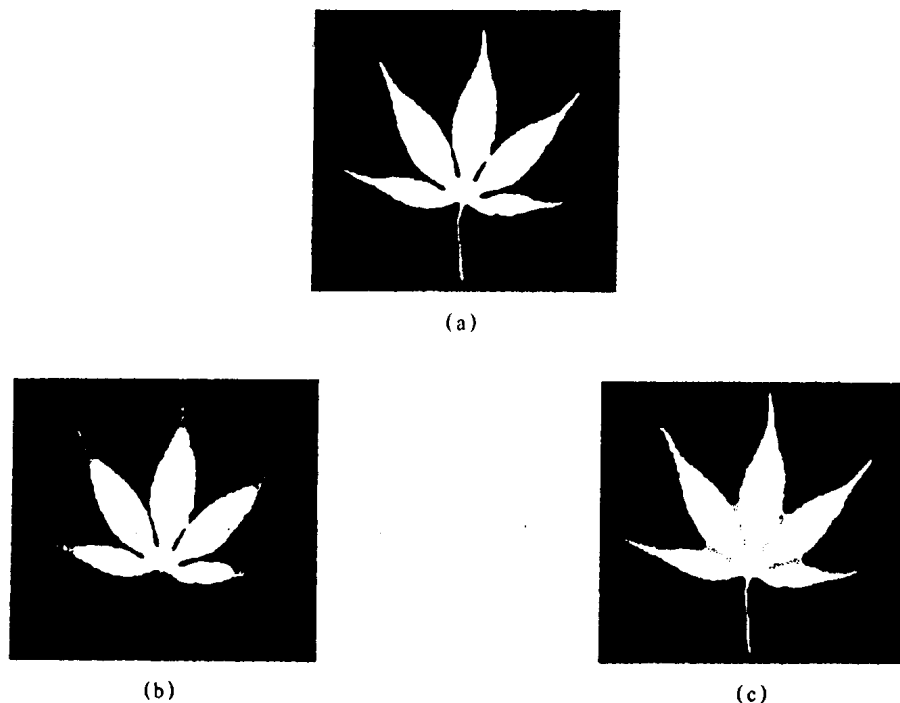


(a) 原始图象 (b) 二值化图象 (c) 形态学滤波结果 (d) 先腐蚀后膨胀处理结果
(e) 图 (c) 与图 (d) 之差 (毛刺点) (f) 除去较小毛刺点后, 得到的短路点 (箭头所示)

图 1.7 利用形态学方法检测印刷电路板

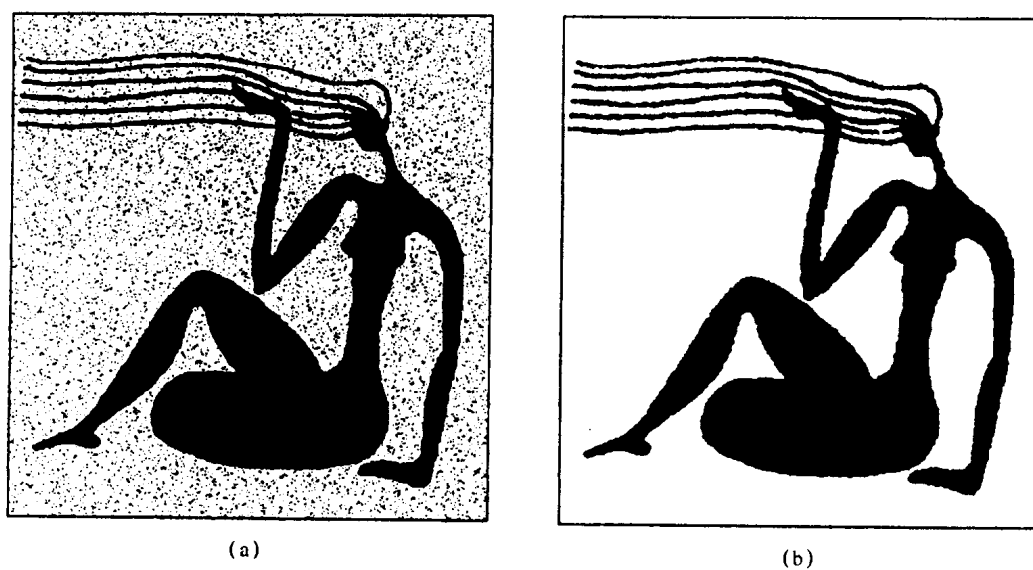
1.3.2 二值开闭运算

开闭运算也互为对偶运算，开运算具有磨光图象外边界的作用，闭运算具有磨光内边界作用。图 1.8 所示为开闭运算产生的结果。利用开闭运算还可以消除图象中的噪声（见图 1.9）。开闭运算同样可用于识别目的。



(a) 原始图象 (b) 开运算与原始图象叠加结果，其中灰色区域为开运算磨光外边界而去掉的部分
(c) 闭运算与原始图象叠加结果，其中灰色区域为闭运算磨光内边界而增加的部分

图 1.8 开闭运算



(a) 被噪声污染的图象 (b) 交变开闭滤波后的图象

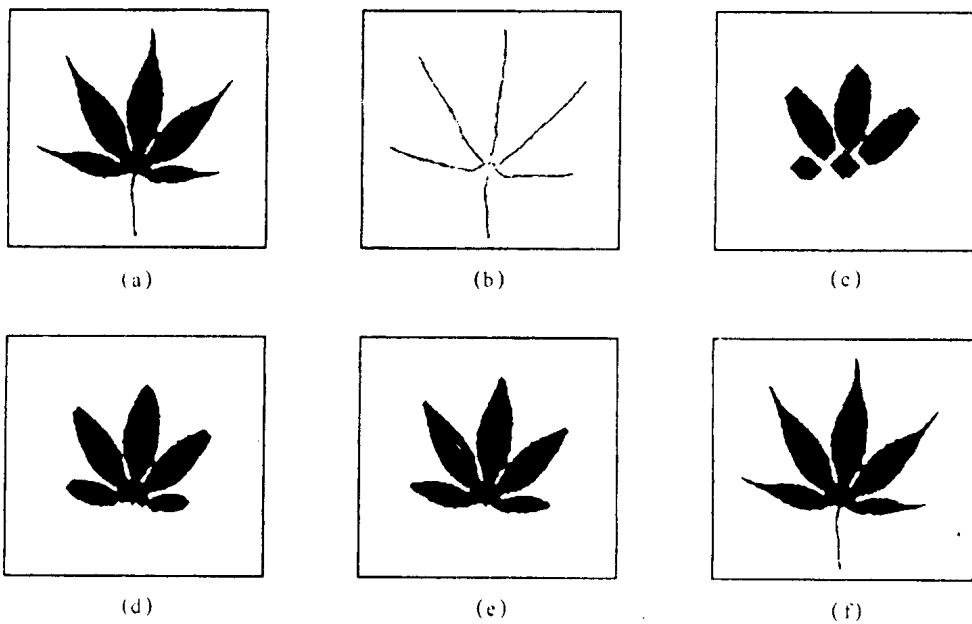
图 1.9 开闭运算的滤波作用

1.3.3 骨架抽取

骨架是图象几何形态的重要拓扑描述,可用于文字识别等应用场合。图 1.10 所示为一些图象的骨架。利用骨架可恢复原始图象,故骨架还可用于图象的压缩编码处理(见图 1.11)。



图 1.10 用形态学方法获取的二值图象骨架



(a) 原始图象 (b) 图象的形态学骨架 (c) ~ (f) 由骨架重建图象的过程

图 1.11 形态学骨架抽取及重建

1.3.4 极限腐蚀

极限腐蚀及测地距离在图象分析中是两个重要的概念。利用这两个概念建立的流域分割算法是一种非常精美的颗粒分割方法。图 1.12 给出了几种图象的极限腐蚀及距离带。

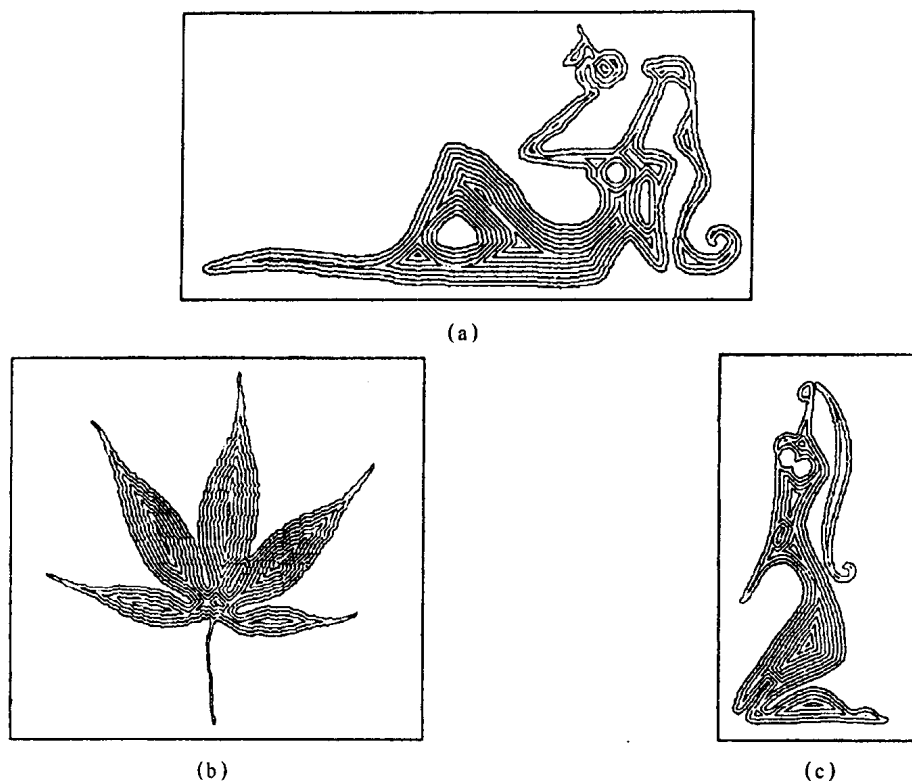
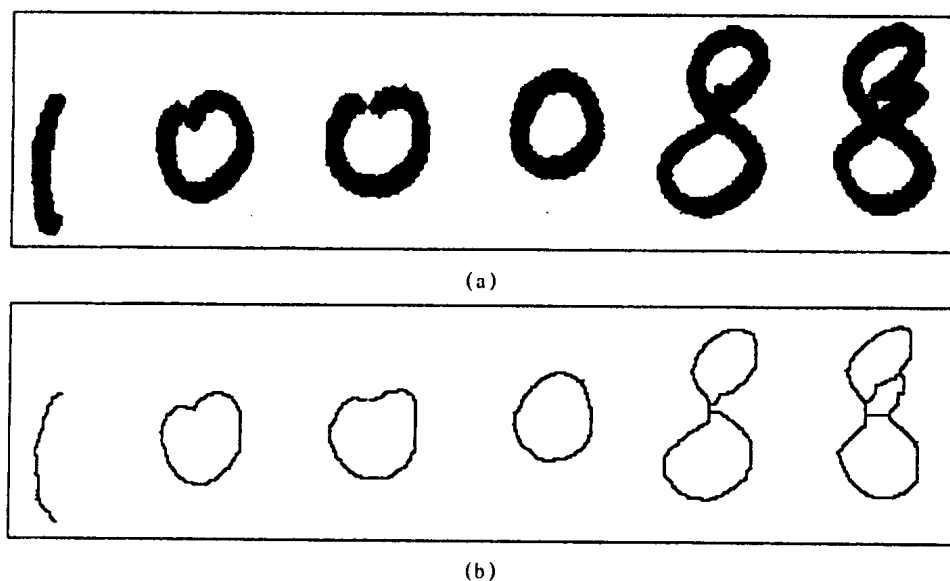


图 1.12 极限腐蚀及距离带

1.3.5 击中击不中变换

击中击不中变换可用于图象细化与目标识别。击中击不中变换通过同时探测图象内部和外部来确定图象的特性，在数学形态学的发展过程中，曾起到过非常重要的作用。图 1.13 给出了利用击中击不中变换细化图象的例子。



(a) 原始图象 (b) 细化结果

图 1.13 利用击中击不中变换细化图象