

数字图象处理

[美] A·罗申菲尔特 A·C·卡克 著

余英林 徐原能 白延隆 译
徐建平 曾邑铎 汤蓉文

人民邮电出版社

数字图像处理

[美] A. 罗申菲尔特 著
A. C. 卡 克

余英林 徐原能 白延隆 译
徐建平 曾邑铎 汤蓉文

人民邮电出版社

Digital Picture Processing

Azriel Rosenfeld

Avinash C. Kak

Academic Press 1976

内 容 简 介

本书从理论上阐明图象信号的传输,加强、恢复、描述等问题。首先讨论了信息的传输问题,其次讨论了信息的处理,最后为跟踪及描述收到的图象。书中附有必需的数学知识,并有习题可供练习。

本书供高等学校信息处理及计算机专业学生及技术人员作参考用。

数 字 图 象 处 理

[美] A. 罗申菲尔特 著
A. C. 卡 克

余英林 徐原能 白延隆 译
徐建平 尚品 汤蓉文

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 1982年9月第一版
印张: 15 8/32 页数: 244 1982年9月北京第一次印刷
字数: 405 千字 印数: 1—9,500 册
统一书号: 15045·总2601-无6189
定价: 1.85元

前 言

从最初发表有关计算机处理图象信息的文章到现在,已经过了约 20 年。这方面的发展很快;据估计,只算英语文献,目前每年发表的有关这个问题的文章也已超过 500 篇。这些文章大部分是应用方面的。但近年来,已发展了多种基本图象处理技术。本书从技术的角度来论述图象处理这个领域。

本书可用来代替我们中间的一位作者(A.R)以前写的《计算机图象处理》一书(Academic Press,1969 出版;日文译本,共力出版株式会社,1971 出版;俄文译本,uzgamenbcmbo“Mup”,1972 出版)。我们对图象数字化、压缩和恢复作了很广泛的论述。这些材料(第四、五、七章)和第二章预备知识是由 A、C、K 写的。另一方面,并没有介绍光学(或别的模拟)处理方法,也没有论述三维景物分析的具体问题,例如用立体镜或测距技术确定物体的距离,或投影几何方法的应用。也没有论及计算机合成影象的处理,这是计算机制图的重要任务。

阅读本书的有些部分,尤其是第四、五、七章,需有一些数学基础,具体的是线性系统理论(包括变换技术)和概率论(随机变量、随机过程)。本书提供了这些方面的简要入门知识,并力图使说明相对完整。我们感到使本书对电机工程和计算机科学的大学生都有用,这样作是必要的。

本书适于作为一学期或两学期的高年级大学生或毕业生的图象处理课程。它包含足够多的材料以供选择。有各种习题补充正文。电机工程和计算机科学两个系已多次开设以本书材料为基础的课程。

目 录

前言

第一章 导论(白延隆译).....	1
1.1 图象处理	1
1.2 图象及其计算机表示法	1
1.3 参考文献指南	6
参考文献	7
第二章 数学预备知识(余英林译)	9
2.1 图象的线性运算	9
2.2 离散图象变换	19
2.3 随机变量	28
2.4 随机场	37
参考文献	46
第三章 视觉(徐建平译).....	47
3.1 亮度和对比度	47
3.2 锐度和轮廓	50
3.3 颜色	57
3.4 图案和结构	57
3.5 形状和空间	61
3.6 持续时间和运动	63
3.7 检测和识别	63
参考文献	65
第四章 数字化(徐建平译).....	66
4.1 采用点阵的采样	66
4.2 利用归一化正交函数采样	88
4.3 图象样本的量化	103
4.4 文献注释	110
参考文献	111

第五章	压缩(曾邑铎译)	113
5.1	变换压缩	114
5.2	预测压缩	133
5.3	再论压缩技术	144
5.4	速率失真函数	145
5.5	文献注释	154
	参考文献	156
第六章	增强(汤蓉文译)	159
6.1	质量	160
6.2	灰度的修整	174
6.3	几何校正	183
6.4	锐化	188
6.5	平滑	201
6.6	文献注释	209
	参考文献	210
第七章	恢复(徐原能译)	213
7.1	图象恢复所需要的先验知识	214
7.2	反过滤	222
7.3	最小二乘方过滤	226
7.4	约束去卷积	233
7.5	递推过滤	250
7.6	文献注释	264
	参考文献	266
第八章	分割(白延隆译)	271
8.1	设置门限	273
8.2	界线检测	291
8.3	匹配	313
8.4	跟踪	337
8.5	文献注释	349
	参考文献	350
第九章	几何学(余英林译)	353

9.1	邻接和连通性	355
9.2	大小和距离	371
9.3	弧和曲线	393
9.4	指向和形状	404
9.5	文献注释	426
	参考文献	428
第十章	描述(徐原能译)	430
10.1	预处理和归一化	431
10.2	性质	444
10.3	相关结构	460
10.4	图象分析	470
10.5	文献注释	477
	参考文献	479

第一章 导 论

1.1 图象处理

用计算机处理**图象或影象**包含多种技术和数学工具。其中大多数是随着下面三个主要问题而发展的：

(a) **图象数字化和编码**：把图象从连续形式变换为离散形式（即数字化）；“压缩”所得结果以节省存贮空间或信道容量。

(b) **图象增强和恢复**：改善质量降低了的（模糊的，有噪声的）图象。

(c) **图象分割和描述**：把图象变换成简化的“图形”；测定图象或图象各部分的性质；根据这些部分和性质进行图象的分类或描述。

因为图象处理的许多方面与人对图象的感觉密切相关，第三章就对视觉作简要的介绍。第四章专门讲述图象数字化的理论，而第五章则论述图象压缩。第六章和第七章讨论图象增强和恢复技术。第八章论述把图象分割为重要部分的方法。第九章则讨论图象部分的几何特性的测定。第十章考虑图象的非几何特性（例如结构），并根据这些部分、性质、和相互关系描述图象。

本章其余篇幅将讨论连续图象和离散图象间的关系，讨论（离散）图象在数字计算机中的表示法。还对有关图象处理的文献作了一个简单介绍。在下一章中，复习各种有用的数学工具。

1.2 图象及其计算机表示法

1.2.1 作为函数的图象

简略地说，一幅图象是一个平面物体，其亮度或彩色可能逐点

不同。这种变化在数学上可以表示为两个空间变量的函数。若涉及彩色, 函数应被看作一个有值向量, 或应使用几个函数, 见 3.3 节。但本书中几乎只讨论黑白图象, 其中仅有灰度之浓淡而无彩色。这种图象可以用一个单值实函数, 比如说 $f(x, y)$ 表示。这个函数在某点的值将称为图象在该点的灰度级或亮度。

习惯上假设表示此图象之函数为可解析的, 比如说, 这些函数是可积的, 具有可逆的付立叶变换等。通常还把这些函数看作为具有非负值和有界的, 即对所有的 $x, y, 0 \leq f(x, y) \leq M$ 。

1.2.2 作为阵列的图象

当图象数字化时(见第四章), 利用取样过程从图象中提取一组离散的实数(“样本”)集, 并对这些样本进行量化, 由此得到许多数, 它们是取各种可能值的一个离散集。在大多数实际情况下, 样本是图象在离散的, 通常是有规则间隔的点集上的值, 或更切合实际地说, 是图象在这些点的小邻域中所取的平均值。为了便于计算机处理这种样本集可表示为一(矩形的)实数阵列。通常把这些样本量化为一组等间隔的灰度级值(见 4.3 节)。若适当选择测量单位, 可把这些值取为整数; 这样, 可把一幅已数字化图象, 或数字图象看作一个整数阵列[△]。数字图象阵列的元素称为象素; 或者有时只称为“点”。

最普通的图象取样方法是使用有规则间隔的点方阵, 即这些点 (md, nd) 的座标是某个单位距离 d 的倍数。在这种阵列中, 每个点有两种邻近点——即距离该点为 d 的四个水平和垂直邻近点(上、下、左、右), 和四个距离为 $d\sqrt{2}$ 的对角线邻近点。(在第九章将讨论由于存在这两类邻近点而引起的一些复杂性)。当然, 在阵列的边界, 有些邻近点将不存在。

另一种可能性是使用样本点的正六边形阵; 这里每个点有 6 个

[△] 在特殊情况下, 若只有两个灰度级“黑”和“白”, 通常用 0 和 1 表示, 因此图象就变成布尔阵列。

邻近点，到这一点的距离都相同。人们能够从方阵得到类似的邻接关系，比如说，把奇数行右移 $\frac{d}{2}$ 即可(见图 1)。事实上，无须作实际位移，人们可简单规定：对奇数行上的一点 p ， p 点的邻近点是它的 4 个水平和垂直邻近点，加上东北方和东南方的两个对角线邻近点；对偶数行上的一点 p ，也作类似规定；不过这次只许取西北方和西南方的两个对角线邻近点。

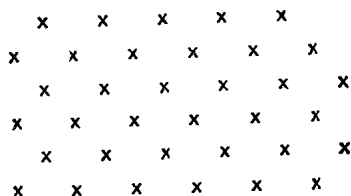


图 1 将方阵的奇数行位移所得的“六边形”阵

实际要处理的图象阵列可能很大。例如，假设我们需要把一幅普通电视影象足够细致地取样和量化，以保证再显示时没有明显的质量降级。那么我们应使用约有 500×500 个样本的阵列，并把这些样本至少量化为 30—50 个离散灰度级，即有 25 万个 5 比特或 6 比特数（见第四章）。在许多情况下，若把高分辨率照片数字化时，甚至需要处理更大的阵列；而且常需要使用更精细的量化，到达 8 比特或甚至 10 比特。（习惯上使用 2 的幂作为量化分层数，并且常使用能除尽所用计算机字长的幂数，以便几个像素能组合在一个计算机字中而不浪费存贮空间）。

1.2.3 作为链的曲线(或区域边界)

如果图象是由较少的区域组成，而这些区域又具有较少的灰度级，则将它数字化成一个大的阵列是很不合算的，因为只需明确指出这些区域的边界和其中的灰度级，该图象就完全确定了，而这一点则可以很简便地做到。同样，若图象是一幅简单的线绘图，它由较少的直线或曲线组成，则明确说出这些直线或曲线（如果需要，也许还有粗细和灰度级）就能简便地表示出该图象。

为了供数字计算机使用，将边界或曲线近似表示为由短线段组

成的多边形是很方便的。若这些线段取得很短,这种数字化能以所需的任何精度重建这些曲线。各段线的长度和斜率本身可量化为离散值的集合。一种广泛使用的这类方案,即通常说的链式编码,仅使用一些(小的)固定长度为 d 的垂直和水平线段和长度为 $d\sqrt{2}$ 的对角线段。

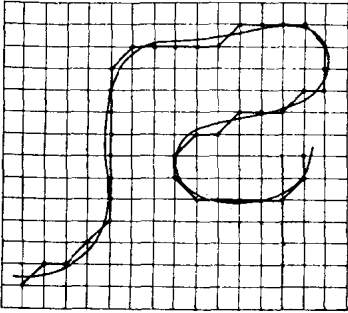


图 2 曲线及其用网格交点法构成的链

可用许多方法把所给(实)的曲线变成一串链式码,现在扼要叙述其中的一种。设想在曲线上叠加一个水平线和垂直线间距均为 d 的正方网格,如图 2 所示。当曲线每次与一根网格线相交时,则距这一交叉点最近的网格点(即网线的交点)就是数字化曲线的一点。(如果交叉点恰好在两个网格点的中央,则可以使用

任意的舍入方案,例如,始终取交叉点下面或左面的网格点)。图 2 表示一条曲线及其用此法规定的数字化点集。

如果曲线的转向率足够小,而且网格线的间隔相当密,则用此法确定的数字化点产生一个与该曲线很接近的多边形弧。这种多边形弧称为曲线的链,它是用线段依次连接沿曲线运动所得到的数字化点构成。显然,若 p 和 q 是两个相继的数字化点,则它们必须是邻近的网格点;换言之, q 是网格中 p 的八个水平、垂直或对角线邻近点之一。因此,连接 p 和 q 的线段或是水平线,或是垂直线,其长度均为 d ,或是对角线,其长度为 $d\sqrt{2}$ 。

若规定链的起点座标及各线段(或“链”)的斜率序列,就可以完全描述这一条链。这些斜率是 45° 的倍数 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$); 因此它们可以用 3 比特数字 $k(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$ 表示。这里“ k ”是指 $45k^\circ$, 它是,比如说,从 x 轴正向开始反时针方向所测得的角度。这个数列称为曲线的链式码。

例如, 图 2 曲线的链式码为

10112 22222 21000 01000 76645 44545 67000 012.

(我们把码分成 5 个一群以便读值)

习题 1 a) 画出链式码为

2222225550000

的曲线。

b) 试描述各边是水平和垂直的所有矩形的链式码。

习题 2 令 n_i 表示 i 在链式码中出现的次数, $0 \leq i \leq 7$, 求证:
当且仅当

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_5 + n_6 + n_7 \text{ 以及 } n_3 + n_4 + n_5 = n_7 + n_0 + n_1$$

时, 链式码表示一个闭合的多边形。

数字图象的区域边界的链式码的构成方法将在 9.1.2 节中给出。把数字图象中一个伸长物体“变薄”为(除端点外, 每个点恰好只有两个邻近点在曲线上)数字曲线的方法将在 9.4.5 节中给出; 作成这样一条数字曲线的链式码是简单的。

人们也能定义一种四向链式码, 只利用 90° 的倍数, 因而这种码是一串 2 比特数字。事实上, 可以把任何八向链式码变换成四向链式码, 即简单地用一对数字 0、2 (或 2、0) 取代码中的每个 1, 用 2、4 取代每个 3, 用 4、6 取代每个 5, 用 6、0 取代每个 7。请注意这是把对角线变换成“阶梯”。(为了获得 2 比特数字, 我们简单地 把 0、2、4、6 重新标号为 0、1、2、3; 这就是说, 我们只用 90° 的倍数, 而不用 45° 的倍数)。

习题 3 试定义一种适用于六边形网格的六向码。你应怎样在一个实际的六边形网格上作出一条曲线的码? 是否需用隔行位移的方网格?

文 献 注 释

链式编码是由文献[1]提出的。对这个题目的最近评述见参考文献[2]。

参 考 文 献

1. H. Freeman, On the encoding of arbitrary geometric configurations, IRE Trans. Electron. Comput. EC-10, 1961, 260—268.
2. H. Freeman, Computer processing of line-drawing images. Comput. Surv. 6, 1974, 57—97.

1.3 参考文献指南

到 1974 年中, 已发表了几千篇关于图象处理的文章。而且文献数目在继续加速增长。已有三本教科书(文献[19、1、4])。还发表了许多优秀的评述文章(因太多, 故在此不引证了)。本书不打算综述这些文献; 读者可参看四篇综述性文章[20—23], 它们共计包含了直到 1973 年的 1300 多篇参考文献。

图象处理的文章发表在许多不同的杂志中, 特别是计算技术和光学方面的杂志。(本书将不论述光学影象处理方面的内容, 有关这个题目的书籍和文章见参考文献[7, 16—17, 25, 27, 28])。尤应注意各杂志最近的几种专刊[2, 9, 10]。还有经常发表这方面文章的专门杂志[14, 24]。

已经出版了许多关于图象处理的论文集[3, 8, 15]。[△]许多图形识别方面的论文集(还有一些关于人工智能方面论文集), 也经常包含关于图象处理的文章[6, 11, 12, 26, 30—32]。此外, 还有关于图象图形识别的具体应用, 例如用于字母数字符号或生物医学影象的文集[5, 13, 18, 29]。更专门的论文集将在每章末尾的文献注译中给出。

[△] 这里没有引证由在会议上提出论文单行本编成的篇幅有限的论文集, 因为通常很难得到。

参 考 文 献

1. H. C. Andrews (with contributions by W. K. Pratt and K. Caspari), "Computer Techniques in Image Processing," Academic Press, New York, 1970.
2. H. C. Andrews and L. H. Enloe (eds.), Special issue on digital picture processing, *Proc. IEEE* 60, 1972, 766-898.
3. G. C. Cheng, R. S. Ledley, D. K. Pollock, and A. Rosenfeld (eds.), "Pictorial Pattern Recognition," Thompson, Washington, D.C., 1968.
4. R. O. Duda and P. E. Hart, "Pattern Classification and Scene Analysis," Wiley, New York, 1973.
5. G. L. Fischer, D. K. Pollock, B. Radack, and M. E. Stevens (eds.), "Optical Character Recognition," Spartan, Baltimore, Maryland, 1962.
6. K. S. Fu (ed.), Special issue on feature extraction and selection in pattern recognition, *IEEE Trans. Comput.* C-20, 1971, 965-1120.
7. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill, New York, 1968.
8. A. Grasselli (ed.), "Automatic Interpretation and Classification of Images," Academic Press, New York, 1969.
9. E. L. Hall and C. F. George, Jr. (eds.), Special issue on two-dimensional digital signal processing, *IEEE Trans. Comput.* C-21, 1972, 633-820.
10. L. D. Harmon (ed.), Special issue on digital pattern recognition, *Proc. IEEE* 60, 1972, 1117-1233.
11. L. Kanal (ed.), "Pattern Recognition," Thompson, Washington, D. C., 1968.
12. P. A. Kolars and M. Eden (eds.), "Recognizing Patterns: Studies in Living and Automatic Systems," MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1968.
13. V. A. Kovalevsky (ed.), "Character Readers and Pattern Recognition," Spartan, New York, 1968.
14. R. S. Ledley (ed.), *Pattern Recognition* 1968ff.
15. B. S. Lipkin and A. Rosenfeld (eds.), "Picture Processing and Psychopictorics," Academic Press, New York, 1970.
16. D. K. Pollock, C. J. Koester, and J. T. Tippett (eds.), "Optical Processing of Information," Spartan, Baltimore, Maryland, 1963.
17. K. Preston, Jr., "Coherent Optical Computers," McGraw-Hill, New York, 1972.
18. D. M. Ramsey (ed.), "Image Processing in Biological Science," Univ. California Press, Berkeley and Los Angeles, 1968.
19. A. Rosenfeld, "Picture Processing by Computer," Academic Press, New York, 1969.
20. A. Rosenfeld, Picture processing by computer, *Comput. Surv.* 1, 1969, 147-176.
21. A. Rosenfeld, Progress in picture processing: 1969-71, *Comput. Surv.* 5, 1973, 81-108.
22. A. Rosenfeld, Picture processing: 1972, *Comput. Graph. Image Proc.* 1, 1972, 394-416.
23. A. Rosenfeld, Picture processing: 1973, *Comput. Graph. Image Proc.* 3, 1974, 178-194.
24. A. Rosenfeld, H. Freeman, T. S. Huang, and A. van Dam (eds.), *Comput. Graph. Image Proc.* 1972ff.
25. A. R. Shulman, "Optical Data Processing," Wiley, New York, 1970.
26. J. Sklansky (ed.), "Pattern Recognition: Introduction and Foundations," Dowden, Hutchinson, and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania, 1973.
27. G. W. Stroke, "An Introduction to Coherent Optics and Holography," Academic Press, New York, 1966 (2nd ed., 1968).

28. J. T. Tippett, D. A. Berkowitz, L. C. Clapp, C. J. Koester, and A. Vanderburgh, Jr., "Optical and Electro-Optical Information Processing," MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.
29. W. E. Tolles (ed.), Data extraction and processing of optical images in the medical and biological sciences, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **157**, 1969, 1-530.
30. L. Uhr (ed.), "Pattern Recognition," Wiley, New York, 1966.
31. S. Watanabe (ed.), "Methodologies of Pattern Recognition," Academic Press, New York, 1969.
32. S. Watanabe (ed.), "Frontiers of Pattern Recognition," Academic Press, New York, 1972.

补 充 文 献

图象领域发展很快, 因而及时掌握现有文献特别重要。要不断更新本书里给的全部目录是不实际的。这里仅提供 1975 年底以前发表的几篇主要参考文献。(不包括关于光信息处理的文章)。

- a. H. C. Andrews, ed. Special Issue on Digital picture Processing, *Computer* **7**(5) 1974 17-87.
- b. A. Rosenfeld, Picture Processing: 1974, *Comput, Graph, Image Proc* **4** 1975, 133-155.
- c. J. K. Aggarwal and R. O. Duda, guest eds, Special Issue on Digital Filtering and Image Processing, *IEEE Trans, Circuits Systems* **CAS-2**, 1975, 161-304.
- d. T. S. Huang ed *Picture Processing and Digital Filtering*. Springer, New York 1975.
- e. P. H. Winston. ed, *The Psychology of Computer Vision* McGraw-Hill, New York. 1975.

第二章 数学预备知识

2.1 图象的线性运算

2.1.1 点源和 δ 函数

令 $\mathcal{O}$ 为把图象变换为图象的一种运算；给定输入图象 f ， $\mathcal{O}$ 对 f 的运算结果由 $\mathcal{O}[f]$ 表示。如果

$$\mathcal{O}[af + bg] = a\mathcal{O}[f] + b\mathcal{O}[g] \quad (1)$$

对所有图象 f ， g 和所有常数 a ， b 都成立，则我们称 $\mathcal{O}$ 为线性的。

在分析图象的线性运算时，点源的概念是很方便的。若任一幅任意的图象 f 可看成为点源之和，则知道了点源输入时的运算输出就可确定 f 的输出。点源输入时 $\mathcal{O}$ 的输出称为 $\mathcal{O}$ 的点扩展函数。

点源可看成为图象序列之非零值在空间上越来越集中的极限。注意为了使每一个这些图象的总亮度相同，它们的非零值必需变得愈来愈大。作为这种图象序列的例子，取

$$\text{rect}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x| \leq \frac{1}{2}, |y| \leq \frac{1}{2}, \\ 0 & \text{其余各处} \end{cases} \quad (2)$$

(参看图 1) 并令

$$\delta_n(x, y) = n^2 \text{rect}(nx, ny), \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

因此 δ_n 在 $|x| \leq \frac{1}{2n}$ ， $|y| \leq \frac{1}{2n}$ 作成的 $\frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$ 方块外为零并在该方

块内取常数值 n^2 。由此得出，对任何 n 值有

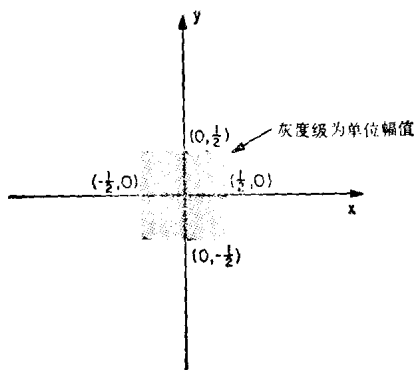


图 1 $\text{Rect}(x, y)$

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} \delta_n(x, y) dx dy = 1 \quad (4)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 序列 δ_n 在通常意义下没有极限, 但为了便于对它进行处理就当作它有极限。这个极限用 δ 表示, 称为**迪拉克 δ 函数**。显然, 对于除 $(0, 0)$ 外的所有 (x, y) 说来, $\delta(x, y) = 0$, 而在 $(0, 0)$ 处为无限大。由此得 $\delta(-x, -y) = \delta(x, y)$ 。

我们可以由函数 δ_n 的性质的极限情形推出 δ 的一些重要性质。因此可由(4)式写出:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) dx dy = 1 \quad (5)$$

更一般地说, 求积分 $\iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta_n(x, y) dx dy$ 。这正好是在以原点为中心的 $\frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$ 方块上 $g(x, y)$ 的平均值。故在取极限时我们保留的正好是它本身在 origin 处的值, 所以可写出

$$\iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta(x, y) dx dy = g(0, 0)$$