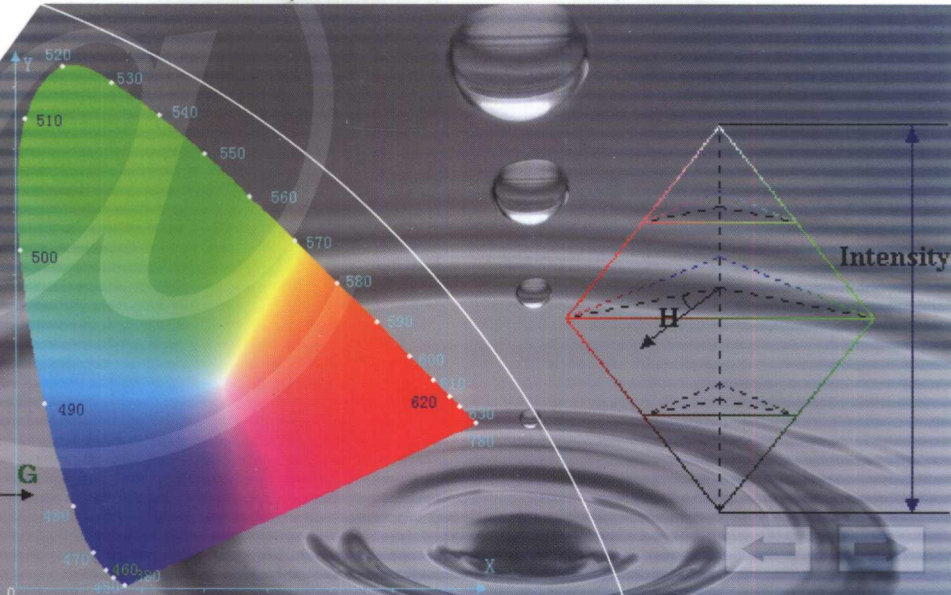




新世纪网络课程教材



图像处理 和分析基础

章毓晋 编著

91.41-43
a



高等教育出版社

<http://www.hep.com.cn>
<http://www.hep.edu.cn>

新世纪网络课程教材

图像处理和分析基础

章毓晋 编著

高等教育出版社

内容提要

本书主要为自学图像处理和分析的读者编写,系统介绍了图像处理和的基本原理、典型方法和实用技术。本书是教育部新世纪网络课程的配套教材。

本书内容包括图像技术和视觉基础概况,常见的数字图像采集方法,基本的图像变换技术、图像增强技术、图像编码技术、图像分割技术、图像中目标表达描述和特征测量技术。读者可从中了解图像处理和的基本原理和技术,并能据此解决实际图像应用中的一些具体问题。考虑到自学的需要和特点,本书以知识点为单元组织,每个单元除包括基本概念、技术原理、算法介绍等内容外,均有例题讲解、要点小结、自我检测(包括提示和解答)、参考文献等,以帮助读者自我学习、复习、掌握并应用有关内容。

本书可作为远程教育或继续教育中电子技术、计算机应用等专业本科和研究生课程教材,也可供涉及图像技术应用行业(如生物医学、电视广播、工业自动化、遥感测绘和军事侦察等)的科技工作者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

图像处理和分析基础/章毓晋编著. —北京:高等教育出版社,2002.7
计算机专业本科、研究生
ISBN 7-04-011126-8

I.图... II.章... III.①图像处理—高等学校—教材②图像分析—高等学校—教材 IV.TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第042856号

图像处理和分析基础

章毓晋 编著

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街55号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	中国科学院印刷厂		
开 本	787×1092 1/16	版 次	2002年7月第1版
印 张	17	印 次	2002年7月第1次印刷
字 数	340 000	定 价	18.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是一本介绍图像处理和分析的基本原理、典型方法和实用技术的教材，主要为自学读者编写，是与教育部新世纪网络课程配套的教材。

编写本书的想法始于 2000 年，那年作者为清华大学继续教育学院远程教育的上千名研究生讲授了图像处理和分析课程。近年来，随着电子仪器设备、计算机软硬件和通信网络环境的发展，图像技术得到非常广泛的重视和应用。参加学习的上千名学员分布在全国各地，通过卫星分班收视学习。这些学员与在校生有很大的区别，他们专业基础各不相同，从事的工作领域也很不一致，而且又常因工作原因不能保证听课，再加上答疑主要通过互联网，师生交流也受到一定影响。考虑到这些因素，作者决定要编一本新的教材。作者构想的新教材应尽可能满足具有不同专业背景并在各种不同行业工作的读者比较独立地学习基本图像技术的需要，这就是本书编写的初衷。

作者原编写过一套“图像工程”教材，包括《图像工程（上册）：图像处理和分析》，《图像工程（下册）：图像理解与计算机视觉》，《图像工程（附册）：教学参考及习题解答》，在本书各章参考文献中均已列出。那套教材较多考虑了在学校学习的本专业学生的特点，体系比较完整（包括了图像工程的 3 全部个层次），内容比较全面（可从本科生讲到研究生），讲解比较精练（考虑到教师有机会根据情况详细讲授）。而本书的内容，根据教学反馈意见并考虑到自学人员的专业背景和学习目的与要求，主要与上册的基本内容对应，也包括了一点下册和附册的内容。相比之下，有些较深、理论性较强的内容没有选取，而对某些内容的介绍更加具体详细。但本书还是有一定的深度和广度的，对图像处理和分析技术提供了比较系统和详细的入门基础，希望读者通过本书的学习，能独立和全面地了解该领域主要的基本理论、技术、应用和发展。另一方面，对希望进一步深入学习的读者，那一套“图像工程”教材及其文中所给出的参考文献应很有帮助。

考虑到自学的特点，本书从方便读者学习的角度出发还做了两项工作：

(1) 对每章按节提供了内容要点和参考资料

自学中常遇到的一个问题是不易把握哪些东西是重点，内容要点就是针对这个问题通过简单概括的方式向读者提供帮助的。在提取内容要点的基础上，对约 100 篇参考文献的介绍就比较有的放矢了。这里的参考资料不是简单的罗列，而是根据不同内容要点分别地、有针对性地进行介绍，导引读者直接阅读具体文献而深入学习。

(2) 提供了大量的自我检测题（包括提示和解答）

自学中常遇到的另一个问题是不易把握自己是否掌握了重点内容，解决这个问题的一种有效方法就是进行自我检测。本书提供了大量的自我检测题，且每道题都有提示和答案。提示一方面可使读者获得更多的信息以进一步理解题目的含义；另一方面，有了提示后，每道题也可说分成了两级，读者看提示后能完成习题表明基本明白了，而不看提示就能完成习题则表明掌握得比较好。有些问题的答案部分还提供了一些解释，以帮助读者了解思路，学到解题方法。题目的类型均为选择题，这与网络课程配套，因为计算机可方便地判断正确与否。

从结构编排上，本书共分 8 章，分别对应图像技术和视觉基础概况、数字图像采集方法、图像变换技术、图像增强技术、图像编码技术、图像分割技术、目标表达描述技术和特征测量技术。每章分为若干节，其下不再分小节。书中内容以知识点为单元组织，每节对应一个知识点，教学内容根据知识点进行组合，各节之间相对独立。每个知识点单元除均包括基本概念、技术分析、算法介绍等教学内容外，还有例题讲解，自我检测习题，以及要点内容的小结和参考资料的介绍等。这样每个知识点都有帮助读者自我学习、复习、检查效果、深化和应用所学知识的有关内容。

本书在内容叙述上，力求理论概念严谨，论证简明扼要，解释清晰详细。考虑到图像技术的特点，书中采用了大量的图表（图中还采用了许多实际图片）使内容更加形象直观；列举了大量实例使理论和概念具体化，以引导读者把这些原理和方法应用于实际。与“图像工程”教材相比，公式数量则有较大的减少（本书中现有的公式多数是用于定义而不是进行推导）。由表 0.1 中的统计数据可看到本书的一些特点。注意，虽然内容要点的小结和参考资料的介绍集中编排在每章的后面，但它们仍是分别围绕各节组织的；自我检测习题也是与节对应的。

表 0.1 关于本书的一些数据统计

	章	节	图	图片	表	公式	例题	习题
总计	8	60	233	189	31	356	125	219
平均(节)			3.883	3.15	0.517	5.93	2.083	3.65

本书可和同名网络课程配合使用，那里的交互手段、彩色图像、动态演示以及可参与的处理和分析操作应有助于提高使用者的积极性和自主性，帮助加深理解和改进学习效率。另外，本书也可供教师用作教材进行讲授。由于内容根据知识点进行组合，各节之间相对独立，所以内容选取比较灵活。下面建议两种方案：对有一定数理基础且希望比较全面掌握图像处理和分析技术的学生，全书约可供一门 50 学时左右的课程使用。如果将标有*的节略去(并不影响学习其他节)，剩下的内容可供仅希望了解图像技术概况的学生使用 30 学时左右。

本书在编写中从一些相关教材得到了许多启发，书中还汇集了几年来不少学生的贡献，包括历届学生的研究开发工作和远程教育研究生们的反馈意见。值得指出的是，学生刘惟锦、朱小青参加了同名网络课程的制作工作，也同时为本书提供了部分图片；学生姜帆、胡浩基、徐丹设计了大部分自我检测习题的原型。作为正在学习和刚学习完“图像处理和分析”课程的学生，他们在工作中充分考虑了读者思维的特点和学习的要求，比较有针对性地结合了自身学习过程中的经验和体会，作者以为这对使本书能更好地满足读者的需要颇为有益。

感谢吴国威教授对初稿的评阅。

最后要指出，作者妻子何芸在 2000 年为远程教育的研究生讲授了图像变换和图像编码内容，她的直接帮助和建议对本书的编写起了很大作用，而她和女儿章荷铭在各方面的理解和支持，更保证了作者能在节日的气氛中写完全书这“最后”一页！

章毓晋

2002 年春节于清华园

通 信：北京清华大学电子工程系，100084
电 话：(010) 62781430
传 真：(010) 62770317
电子邮件：zhangyj@ee.tsinghua.edu.cn
个人主页：www.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin
研究室网：image.ee.tsinghua.edu.cn

目 录

第一章 图像技术基础	1	3.6 离散余弦变换.....	74
1.1 图像和像素.....	1	3.7* 小波变换.....	76
1.2 图像技术及分类.....	3	3.8* 霍特林变换.....	78
1.3 图像表示.....	6	本章要点.....	81
1.4 图像显示.....	8	参考文献.....	83
1.5 图像存储与格式.....	11	自我检测题.....	84
1.6* 视觉基础.....	13	自我检测题参考答案.....	92
1.7* 颜色视觉和色度学.....	15	第四章 图像增强技术	94
本章要点.....	20	4.1 图像灰度映射.....	94
参考文献.....	22	4.2 直方图均衡化.....	95
自我检测题.....	23	4.3* 直方图规范化.....	99
自我检测题参考答案.....	29	4.4 图像间算术和逻辑运算.....	103
第二章 图像采集技术	31	4.5 空域滤波.....	106
2.1 采集装置和性能指标.....	31	4.6 频域低通滤波.....	111
2.2 成像变换和坐标变换.....	34	4.7 频域高通滤波.....	114
2.3* 摄像机校准.....	38	4.8* 频域带通和带阻滤波.....	116
2.4* 立体图采集.....	40	4.9* 彩色图像增强.....	118
2.5* 深度图采集.....	43	本章要点.....	122
2.6 采样和量化.....	45	参考文献.....	124
本章要点.....	48	自我检测题.....	124
参考文献.....	49	自我检测题参考答案.....	137
自我检测题.....	50	第五章 图像编码技术	139
自我检测题参考答案.....	55	5.1 数据冗余和压缩.....	139
第三章 图像变换技术	57	5.2 图像保真度.....	142
3.1 傅里叶变换.....	57	5.3 无失真编码定理.....	144
3.2 傅里叶变换的性质.....	59	5.4 哈夫曼编码.....	147
3.3* 快速傅里叶变换.....	63	5.5* 算术编码.....	150
3.4 沃尔什变换.....	65	5.6* 位平面编码.....	153
3.5 哈达玛变换.....	70	5.7 无损预测编码.....	158

5.8 有损预测编码	160	7.2 轮廓线段的近似表达	215
5.9 变换编码	164	7.3 目标的层次表达	217
本章要点	167	7.4* 目标的骨架表达	220
参考文献	169	7.5* 运动的表达	222
自我检测题	170	7.6* 目标轮廓的傅里叶描述	224
自我检测题参考答案	178	7.7* 目标轮廓的小波描述	226
第六章 图像分割技术	180	本章要点	228
6.1 图像分割定义和方法分类	180	参考文献	229
6.2 边缘检测	181	自我检测题	230
6.3* 轮廓跟踪和图搜索	186	自我检测题参考答案	237
6.4 阈值分割	189	第八章 特征测量技术	239
6.5* 基于变换直方图选取阈值	192	8.1 轮廓基本参数及测量	239
6.6* 空间聚类	194	8.2 区域基本参数及测量	241
6.7 区域生长	196	8.3 区域形状参数及测量	243
6.8* 彩色图像分割	199	8.4* 区域纹理参数及测量	245
本章要点	201	8.5* 轮廓矩和区域矩	248
参考文献	203	8.6* 特征测量的精确度	250
自我检测题	204	本章要点	253
自我检测题参考答案	211	参考文献	254
第七章 目标表达和描述技术	213	自我检测题	254
7.1 轮廓的链码表达	213	自我检测题参考答案	261

第一章 图像技术基础

1.1 图像和像素

图像是用各种观测系统以不同形式和手段观测客观世界而获得的，可以直接或间接作用于人眼并进而产生视知觉的实体。例如人的视觉系统就是一个观测系统，通过它得到的图像就是客观景物在人心目中形成的影像。视觉是人类观察世界、认知世界的重要手段。据统计，人类从外界获得的信息约有 75% 来自视觉系统，这既说明视觉信息量巨大，也表明人类对视觉信息有较高的利用率。视觉信息来源于图像，这里图像是比较广义的，例如照片、绘图、视像，等等。图像带有大量的信息，百闻不如一见，一图值千字都说明了这个事实。这也是图像在近年得到广为宣传和应用的多媒体中占据重要地位的主要原因。

客观世界在空间上是三维(3-D)的，但大部分成像装置都将 3-D 世界投影到二维(2-D)像平面，所以得到的图像是 2-D 的。一幅图像一般可以用一个 2-D 数组 $f(x, y)$ 来表示，这里 x 和 y 表示 2-D 空间 XY 中一个坐标点的位置，而 f 则代表图像在点 (x, y) 的某种性质 F 的数值。例如常用的图像一般是灰度图，这时 f 表示灰度值，当对可见光成像时，灰度值对应客观景物被观察到的亮度。近年来随着科学的进步和技术的发展，成像也从对可见光扩展到对其他辐射波段，如在低频端，有红外线、微波、无线电波等；在高频端，有紫外光、X 光、 γ 射线、宇宙射线等。此时灰度值对应相应的辐射度。

常见图像是连续的，即 f, x, y 的值可以是任意实数。为了能用计算机对图像进行加工，需要把连续的图像在坐标空间 XY 和性质空间 F 都离散化。这种离散化了的图像就是数字图像。表达数字图像的 2-D 数组 $f(x, y)$ 中， f, x, y 都在整数集合中取值。

早期英文书籍里一般用 `picture` 代表图像，随着数字技术的发展，现都用 `image` 代表离散化了的数字图像。图像中每个基本单元叫做图像元素，简称像素 (`picture element`)。对 2-D 图像，英文里常用 `pixel` (也有用 `pel`) 代表像素。一幅图像在空间上的分辨率与其包含的像素个数成正比，像素个数越多，图像的分辨率越高，也就越有可能看出图像的细节。

例 1.1.1 数字图像示例

如图 1.1.1 所示给出 2 幅典型的数字图像 (本书许多处理和分析例子中也以他们为原始图像)。图 1.1.1(a) 所用的坐标系统常在屏幕显示中采用，它的原点 O (`origin`) 在图像

的左上角，纵轴标记图像的行，横轴标记图像的列。 $I(r, c)$ 既可代表这幅图像，也可表示在 (r, c) 行列交点处的图像值。图 1.1.1(b)所用的坐标系常在图像计算中采用，它的原点在图像的左下角，横轴为 X 轴，纵轴为 Y 轴。 $f(x, y)$ 既可代表这幅图像，也可表示在 (x, y) 坐标处像素的值。

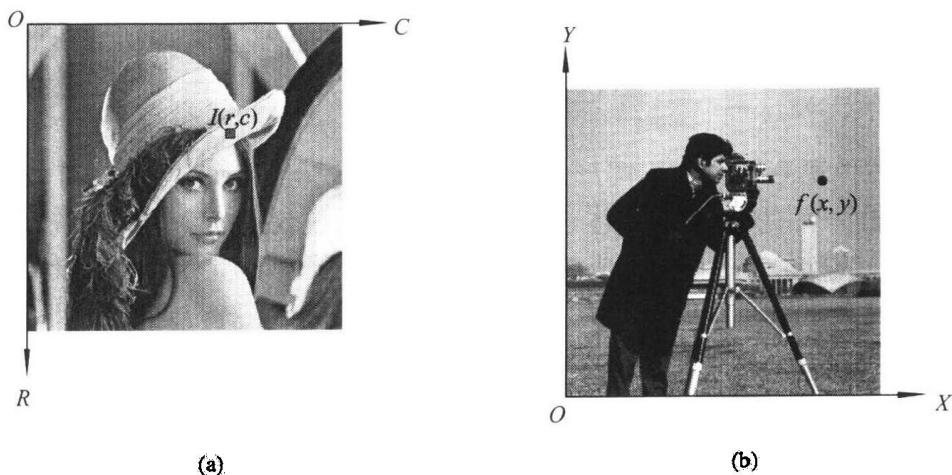


图 1.1.1 数字图像示例

例 1.1.2 像素示例

数字图像是由许多像素紧密排列而成的，或者说一幅灰度图像是亮度点的集合，这只要将图像逐步放大就可看出。例如从图 1.1.1(b)中选取一小块放大，如图 1.1.2(a)所示，将一个 32×32 的网格（如图 1.1.2(b)所示）覆盖在上面，得到图 1.1.2(c)。图 1.1.2(c)中每个小格对应一个像素，格内灰度是一致的。这里的每个小格就对应一个像素。

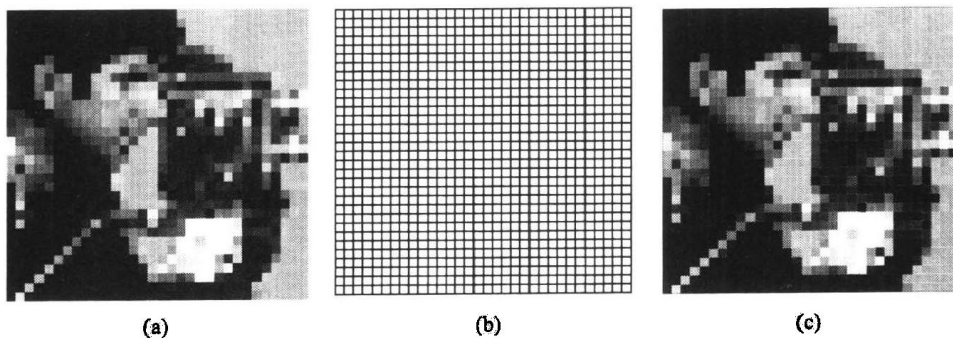


图 1.1.2 像素示例

图像的概念近年有许多扩展。虽然一般谈到图像常指 2-D 图像，但 3-D 图像、立体 (stereo) 图像 (对)、彩色图像、多光谱图像以及多视场 (multi-view) 图像等也越来越多见。虽然一般谈到图像常指静止的单幅图像，但图像序列、运动图像 (如电视和视频)

等也逐步得到了广泛的应用。虽然图像常用对应辐射量的灰度点阵的形式显示，但图像灰度代表的也可能是客观景物的深度值（深度图像）、纹理变化（纹理图像）、物质吸收值（计算机断层扫描图像）等。

1.2 图像技术及分类

对图像の利用由来已久，用计算机处理和分析数字图像也已有几十年的历史，发展出许多技术。图像技术在广义上是各种与图像有关的技术的总称。目前人们主要研究的是数字图像，主要应用的是计算机图像技术。这包括利用计算机和其他电子设备进行和完成的一系列工作，例如图像的采集、获取、（压缩）编码、存储和传输，图像的合成、绘制和生成，图像的显示和输出，图像的变换、增强、恢复（复原）和重建，图像的分割，图像中目标的检测、表达和描述，特征的提取和测量，多幅图像或序列图像的校正、配准，3-D 景物的重建复原，图像数据库的建立、索引和抽取，图像的分类、表示和识别，图像模型的建立和匹配，图像和场景的解释和理解，以及基于它们的判断决策和行为规划等。另外，图像技术还可包括为完成上述功能而进行的硬件设计及制作等方面的技术。

上述这些技术可根据其特点分为 3 个既有联系又有区别的层次（如图 1.2.1 所示）：图像处理、图像分析和图像理解。这三者的有机结合称为图像工程，是一门内容非常丰富的学科。换句话说，图像工程是既有联系又有区别的图像处理、图像分析及图像理解三者的有机结合，另外还包括对它们的工程应用。

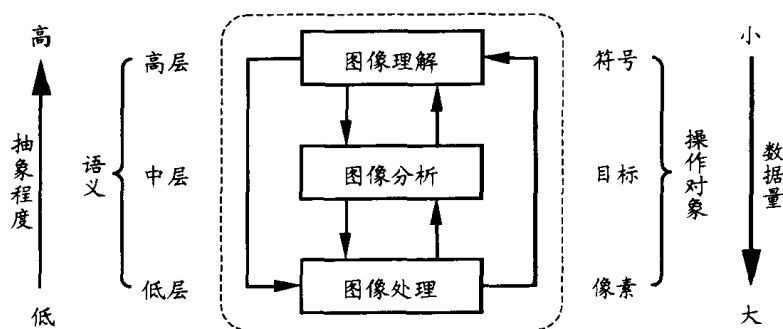


图 1.2.1 图像工程三层次示意图

图像处理着重强调在图像之间进行的变换。虽然人们常用图像处理泛指各种图像技术，但比较狭义的图像处理主要满足对图像进行各种加工以改善图像的视觉效果并为自动识别打基础，或对图像进行压缩编码以减少所需存储空间或传输时间，达到传输通路的要求。

图像分析则主要是对图像中感兴趣的目标进行检测和测量，以获得它们的客观信息从而建立对图像的描述。如果说图像处理是一个从图像到图像的过程，则图像分析是一个

从图像到数据的过程。这里数据可以是对目标特征测量的结果，或是基于测量的符号表示。它们描述了图像中目标的特点和性质。

图像理解的重点是在图像分析的基础上，进一步研究图像中各目标的性质和它们之间的相互联系，并得出对图像内容含义的理解以及对原来客观场景的解释，从而指导和规划行动。如果说图像分析主要是以观察者为中心研究客观世界（主要研究可观察到的事物），那么图像理解在一定程度上则是以客观世界为中心，并借助知识、经验等来把握和解释整个客观世界（包括没有直接观察到的事物）。

综上所述，图像处理、图像分析和图像理解在抽象程度和数据量上各有特点，操作对象和语义层次各不相同，其相互联系可参见图 1.2.1。图像处理是比较低层的操作，它主要在图像像素级上进行处理，处理的数据量非常大。图像分析则进入了中层，分割和特征提取把原来以像素描述的图像转变成比较简洁的对目标的描述。图像理解主要是高层操作，操作对象基本上是从描述中抽象出来的符号，其处理过程和方法与人类的思维推理有许多类似之处。另外由图 1.2.1 可见，随着抽象程度的提高数据量是逐渐减少的。具体来说，原始图像数据经过一系列的处理过程逐步转化为更有组织和用途的信息。在这个过程中，语义不断引入，操作对象发生变化，数据量得到了压缩。另一方面，高层操作对低层操作有指导作用，能提高低层操作的效能。

例 1.2.1 当前主要研究的图像技术

根据最新的对图像工程文献统计分类综述，图像技术在图像处理、图像分析和图像理解 3 个层次中的分类情况如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 当前图像处理、图像分析和图像理解 3 个层次中研究的图像技术

3 个层次	图像技术分类和名称
图像处理	图像采集、获取及存储（包括各种成像方法、摄像机校正等） 图像重建（从投影等重建图像） 图像变换、滤波、增强、恢复/复原、拼接等； 图像（视频）压缩编码 图像数字水印和图像信息隐藏
图像分析	边缘检测、图像分割 目标表达、描述、测量（包括二值图处理等） 目标颜色、形状、纹理、空间、运动等的分析 目标检测、提取、跟踪、识别和分类 人脸和器官的检测与定位
图像理解	（序列，立体）图像配准、匹配、融合 3-D 表示、建模、重构、场景恢复 图像解释、推理（包括语义描述、信息模型、专家系统等） 基于内容的图像和视频检索

图像工程是一门系统地研究各种图像理论、技术和应用的新的交叉学科。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，它与模式识别、计算机视觉、计算机图形学等多个专业又互相交叉。另外，图像工程的研究进展与人工智能、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、文档处理和工业自动化等许多领域也是不可分割的。

图 1.2.2 给出图像工程与相关学科和领域的联系和区别，从图中可以看到图像工程 3 个层次各自不同的输入输出内容以及它们与计算机图形学、模式识别、计算机视觉等学科的关系。图形学原本指用图形 (graph)、图表 (chart)、绘图 (drawing) 等形式表达数据信息的科学，而计算机图形学研究的就是如何利用计算机技术来产生这些形式。如果将它和图像分析对比，两者的处理对象和输出结果正好对调。计算机图形学试图从非图像形式的数据描述来生成 (逼真的) 图像。另一方面，(图像) 模式识别与图像分析则比较相似，只是前者试图把图像分解成可用符号较抽象地描述的类别。它们有相同的输入，而不同的输出结果可以比较方便地进行转换。至于计算机视觉主要强调用计算机实现人的视觉功能，这中间实际上用到图像工程 3 个层次的许多技术，但目前的研究内容主要与图像理解相结合。

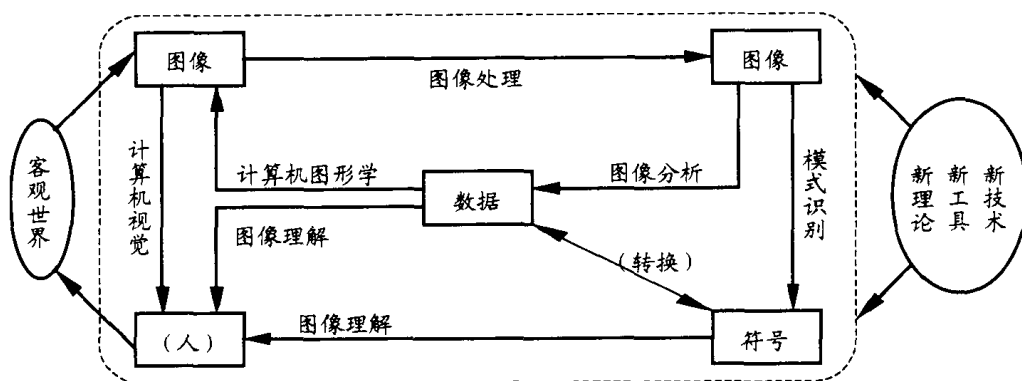


图 1.2.2 图像工程与相关学科和领域的联系和区别

例 1.2.2 图像技术应用领域示例

近年来数字图像技术已在许多领域得到广泛应用，下面是一些典型的例子：

- (1) 视频通信：可视电话、电视会议、按需电视 (VOD)；
- (2) 文字档案：文字识别，过期档案复原，邮件分检，办公自动化，支票，签名辨伪；
- (3) 生物医学：红白血球计数，染色体分析、X 光、CT、MRI、PET 图像分析，显微医学操作，对放射图像、显微图像的自动判读理解，人脑心理和生理的研究，医学手术模拟规划；
- (4) 遥感测绘：巡航导弹制导，无人驾驶飞机飞行，精确制导，矿藏勘探，资源探测，

气象预报, 自然灾害监测监控;

(5) 工业生产: 工业检测, 工业探伤, 自动生产流水线监控, 邮政自动化, 移动机器人, 以及各种危险场合工作的机器人, 无损探测, 金相分析, 印刷板质量检验, 精细印刷品缺陷检测;

(6) 军事公安: 军事侦察, 合成孔径雷达图像, 巡航导弹路径规划/地形识别/制导, 无人驾驶飞机飞行, 罪犯脸形合成、识别、查询, 指纹、印章的鉴定识别, 战场环境/场景建模表示;

(7) 交通: 太空探测、航天飞行、公路交通管理, 自动行驶车辆。 □

图像工程的 3 个层次中, 图像处理和图像分析是图像理解的基础, 对它们的研究相对于图像理解来说比较成熟, 目前应用得也比较广泛。本书将主要介绍这两个层次的内容。从学习图像处理和从分析技术的角度来说, 有 3 个方面的基础知识是比较重要的, 即数学、计算机科学和电子学。数学里值得指出的是线性代数, 因为图像可表示为点阵, 借助矩阵表达解释各种加工处理过程。计算机科学里值得指出的是计算机软件技术, 因为对图像的加工处理要使用计算机, 通过编程用一定的算法来完成。电子学里值得指出的一个是信号处理, 因为图像可看作 1-D 信号的扩展, 图像的加工处理是对信号处理的扩展; 另一个是电路原理, 因为要最终实现对图像的加工处理, 需要使用一定的电子设备。

1.3 图像表示

最常用的图像表示方法是 1.1 节中介绍的, 将一幅图像用一个 2-D 数组 $f(x, y)$ 来表示, 其中 x 和 y 表示像素的位置, 而 f 则代表像素的数值。这样, 图像像素与数组元素是一一对应的。

比较直观地, 一幅图像可表示为一个 2-D 的 $M \times N$ 的矩阵 (其中 M 和 N 分别为图像点阵的行数和列数)

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \cdots & f_{MN} \end{bmatrix} \quad (1.3.1)$$

有些时候用矢量表示图像也比较方便

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_N]^T \quad (1.3.2)$$

其中

$$f_i = [f_{1i} \quad f_{2i} \quad \cdots \quad f_{Mi}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.3.3)$$

上述两种表示形式可以方便地互相转换。

不管用哪种图像表示方法，实际图像中的像素在空间是按某种规律排列的，互相之间有一定的关系，像素之间的关系与像素的由近邻像素组成的邻域有关。对 1 个坐标为 (x, y) 的像素 p ，它可以有 4 个水平和垂直的近邻像素，它们的坐标分别是 $(x+1, y)$ ， $(x-1, y)$ ， $(x, y+1)$ ， $(x, y-1)$ 。这些像素（均用 r 表示）组成 p 的 4-邻域，记为 $N_4(p)$ ，如图 1.3.1(a) 所示。需要指出，如果像素 p 本身处在图像的边缘，则它的 $N_4(p)$ 中的若干个像素会落在图像之外。

像素 p 的 4 个对角近邻像素（用 s 表示）的坐标是 $(x+1, y+1)$ ， $(x+1, y-1)$ ， $(x-1, y+1)$ ， $(x-1, y-1)$ 。它们记为 $N_D(p)$ ，如图 1.3.1(b) 所示。像素 p 的 4 个 4-邻域近邻像素加上 4 个对角邻域像素合起来构成 p 的 8-邻域，记为 $N_8(p)$ ，如图 1.3.1(c) 所示。同上，如果像素 p 本身处在图像的边缘，则它的 $N_D(p)$ 和 $N_8(p)$ 中的若干个像素会落在图像外。

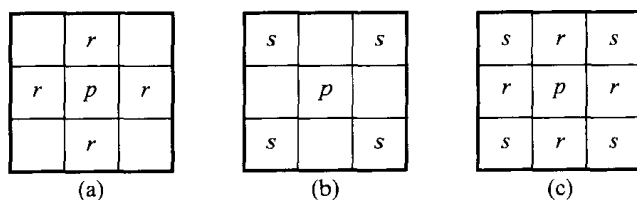


图 1.3.1 像素的邻域

像素之间关系的一个重要概念是像素之间的距离。给定 3 个像素 p ， q ， r ，坐标分别为 (x, y) ， (s, t) ， (u, v) ，如果下列条件满足，则称函数 D 是距离量度函数：

- (1) $D(p, q) \geq 0$ ($D(p, q) = 0$ 当且仅当 $p = q$)；
- (2) $D(p, q) = D(q, p)$ ；
- (3) $D(p, r) \leq D(p, q) + D(q, r)$ 。

上述 3 个条件中，第 1 个条件表明两个像素之间的距离总是正的（两个像素空间位置相同时，其间的距离为零）；第 2 个条件表明两个像素之间的距离与起终点的选择无关；第 3 个条件表明两个像素之间的最短距离是沿直线的。

在数字图像中，距离有不同的量度方法。点 p 和 q 之间的欧氏（Euclidean）距离（也是模为 2 的距离）定义为

$$D_E(p, q) = [(x-s)^2 + (y-t)^2]^{1/2} \quad (1.3.4)$$

根据这个距离量度，与 (x, y) 的距离小于或等于某个值 d 的像素都包括在以 (x, y) 为中心以 d 为半径的圆中。在数字图像中，圆只能近似地表示，例如与 (x, y) 的 D_E 距离小于或等于 3 的像素组成如图 1.3.2(a) 所示等距离轮廓（图中距离值已四舍五入）。

点 p 和 q 之间的距离 D_4 （也是模为 1 的距离），也称为城区（city-block）距离，定义为

$$D_4(p, q) = |x-s| + |y-t| \quad (1.3.5)$$

根据这个距离量度，与 (x, y) 的 D_4 距离小于或等于某个值 d 的像素组成以 (x, y) 为中心的菱

形。例如与 (x, y) 的 D_4 距离小于或等于3的像素组成如图1.3.2(b)所示的区域。 $D_4 = 1$ 的像素就是 (x, y) 的4-近邻像素。

点 p 和 q 之间的距离 D_8 （也是模为 ∞ 的距离），也称为棋盘（chessboard）距离，定义为

$$D_8(p, q) = \max(|x - s|, |y - t|) \quad (1.3.6)$$

根据这个距离量度，与 (x, y) 的 D_8 距离小于或等于某个值 d 的像素组成以 (x, y) 为中心的正方形。例如，与 (x, y) 的 D_8 距离小于或等于3的像素组成如图1.3.2(c)所示的区域。 $D_8 = 1$ 的像素就是 (x, y) 的8-近邻像素。

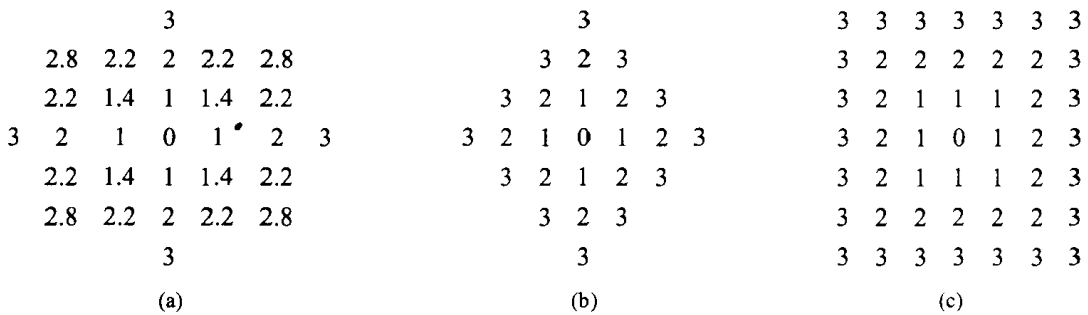


图 1.3.2 等距离轮廓示例

例 1.3.1 距离计算示例

根据上述 3 种距离定义，在计算图像中相同两个像素间的距离时会得到不同的数值，如在图 1.3.3 中，2 个像素 p 和 q 之间的 D_E 距离为 5（如图 1.3.3(a)所示）， D_4 距离为 7（如图 1.3.3(b)所示）， D_8 距离为 4（如图 1.3.3(c)所示）。

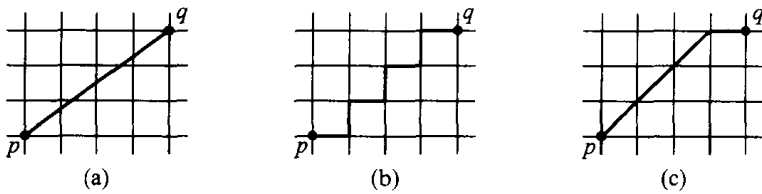


图 1.3.3 像素间距离的计算

□

1.4 图像显示

图像显示指将图像数据以图的形式（一般情况下是亮度模式的空间排列，即在空间 (x, y) 处显示对应 f 的亮度）展示出来（这也是计算机图形学的重要内容）。对图像处理来说，处理的结果主要用于显示给人看。对图像分析来说，分析的结果也可以借助计算机图形学技术转换为图像形式直观地展示。所以图像显示对图像处理和分析系统来说是非常重

要的。

例 1.4.1 显示设备示例

可以显示图像的设备有许多种。常见图像处理和分析系统的主要显示设备是显示器。输入显示器的图像也可以通过硬拷贝转换到幻灯片、照片或透明胶片上。除了显示器，可以随机存取的阴极射线管（CRT）和各种打印设备也可用于图像输出和显示。

在 CRT 中，电子枪束的水平垂直位置可由计算机控制。在每个偏转位置，电子枪束的强度是用电压来调整的。每个点的电压都与该点所对应的灰度值成正比。这样灰度图就转化为光亮度空间变化的模式，这个模式被记录在阴极射线管的屏幕上而显示出来。

打印设备也可以看作一种显示图像的设备，一般用于输出较低分辨率的图像。早期在纸上打印灰度图像的一种简便方法是利用标准行打印机的重复打印能力。输出图像上任一点的灰度值可由该点打印的字符数量和密度来控制。近年来使用的各种热敏、喷墨和激光打印机等具有更高的能力，已可打印较高分辨率的图像。 □

图像的原始灰度常有几十到几百级甚至上千级，但有些图像输出设备的灰度只有两级，如黑白激光打印机（或者打印，输出黑，或者不打印，输出白）。为了在这些设备上输出灰度图像并保持其原有的灰度级常采用一种称为半调输出（halftoning）的技术。半调输出的原理是利用人眼的集成特性，在每个像素位置打印一个其尺寸反比于该像素灰度的黑圆点，即在亮的图像区域打印的点小，而在暗的图像区域打印的点大。当点足够小，观察距离足够远时，人眼就不容易分开各个小点，而得到比较连续平滑的灰度图像。一般报纸上图片的分辨率约在每英寸 100 点（dot per inch, DPI），而书或杂志上图片的分辨率约在每英寸 300 点。

例 1.4.2 一种半调输出方法

上述半调输出技术的一种具体实现方法是先将图像区域细分，取邻近的单元结合起来组成输出区域，这样在每个输出区域内包含若干个单元，只要把一些单元输出黑，而把其他单元输出白就可得到不同灰度的效果。例如将一个区域分成 2×2 个单元，按照图 1.4.1 的方式可以输出 5 种不同的灰度，将一个区域分成 3×3 个单元，按照图 1.4.2 的方式可以输出 10 种不同的灰度。这里如果一个单元在某个灰度为黑，则在所有大于这个灰度的输出中仍为黑。按这种方法，要输出 256 种灰度需要将一个区域分成 16×16 个单元。需要注意这个方法通过减少图像的空间分辨率来增加图像的幅度分辨率，所以有可能导致图像采样过粗而影响图像的显示质量（进一步可参考 2.6 节）。

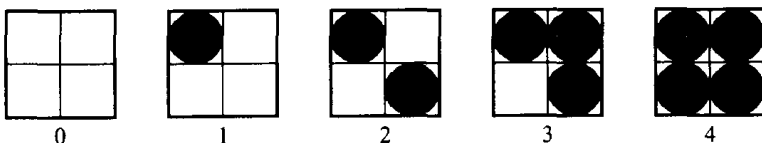


图 1.4.1 将一个区域分成 2×2 个单元输出 5 种灰度