



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

图像处理技术及其应用

王开福 著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

图像处理技术及其应用

王开福 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是南京航空航天大学研究生教育优秀工程(二期)建设项目。
全书主要包括图像运算、图像变换、图像降噪、图像增强、图像分割、图像恢复与再现、图像配准与相关以及图像形态运算等。

本书可作为高等院校航空宇航科学与技术、力学、机械工程、光学工程、材料科学与工程、电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术等专业的研究生教材,也可供理工科相关专业的高校教师、研究人员和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

图像处理技术及其应用 / 王开福著. —北京: 科学出版社, 2015.6
ISBN 978-7-03-044568-1

I. ①图… II. ①王… III. ①图形软件—高等学校—教材
IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124260 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 267 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

图像处理分为模拟图像处理和数字图像处理。模拟图像处理是指采用光学方法对模拟图像进行图像处理，而数字图像处理则是指采用数字方法对数字图像进行图像处理。模拟图像只能采用光学方法进行图像处理，不能直接采用数字方法进行图像处理，然而模拟图像通过采样和量化变成数字图像后，即可通过数字方法进行图像处理，因此通常所说的图像处理是指数字图像处理。

本书是南京航空航天大学研究生教育优秀工程(二期)建设项目，在阐述数字图像处理的基本原理和基础理论的基础上，重点论述数字图像处理的最新技术及其实际应用。全书主要内容包括图像运算、图像变换、图像降噪、图像增强、图像分割、图像恢复与再现、图像配准与相关、图像形态运算等。图像运算部分在介绍图像几何和算术运算的基础上，着重讨论图像卷积与相关的理论与应用；图像变换部分既讨论经典的傅里叶变换和余弦变换，又阐述最新的小波变换技术及其应用；图像降噪部分对空域平滑和频域低通，尤其是同态低通和小波低通，等滤波降噪技术及其应用进行详细论述；直方图变换、灰度变换、空域滤波和频域滤波等常用图像增强技术及其应用在图像增强部分分别进行详细讨论；图像分割部分主要论述阈值分割、边缘检测和边界跟踪的原理和方法；图像恢复与再现部分，在分析图像恢复原理和算法的基础上，详细论述数字全息再现技术及其应用；图像配准的原理和算法，特别是数字散斑相关技术及其应用，在图像配准与相关部分分别进行详细论述；图像形态运算部分对腐蚀与膨胀、开启与闭合等形态运算分别进行论述。

由于作者水平有限和编写时间仓促，若存在不当之处，敬请批评指正。

作 者

2015年3月于南京航空航天大学

目 录

前言

第 1 章 图像处理基础	1
1.1 图像概念	1
1.1.1 图像及其分类	1
1.1.2 采样与量化	1
1.2 图像软件	2
1.3 图像表示	3
1.3.1 像素坐标	4
1.3.2 空间坐标	4
1.4 图像输入与输出	5
1.4.1 图像读入	5
1.4.2 图像写出	5
1.4.3 图像显示	6
1.5 数据类型及其转换	6
1.5.1 数据类型	6
1.5.2 数据类型转换	6
1.6 图像类型及其转换	7
1.6.1 图像类型	7
1.6.2 图像类型转换	8
1.7 颜色模型及其转换	10
1.7.1 RGB 模型	10
1.7.2 HSV 模型及其转换	11
1.7.3 YIQ/NTSC 模型及其转换	12
1.7.4 YCbCr 模型及其转换	13
1.8 图像格式及其转换	14
第 2 章 图像运算	15
2.1 几何运算	15
2.1.1 图像插值	15
2.1.2 图像平移	17
2.1.3 图像缩放	18
2.1.4 图像旋转	19
2.1.5 图像剪切	19

2.2	算术运算	20
2.2.1	图像相加	20
2.2.2	图像相减	22
2.2.3	绝对差值	23
2.2.4	图像相乘	24
2.2.5	图像相除	25
2.2.6	图像线性组合	25
2.3	卷积与相关运算	26
2.3.1	图像卷积	26
2.3.2	图像相关	26
2.3.3	卷积和相关应用	26
第3章	图像变换	29
3.1	傅里叶变换	29
3.1.1	连续傅里叶变换	29
3.1.2	傅里叶变换性质	30
3.1.3	离散傅里叶变换	32
3.1.4	快速傅里叶变换	33
3.1.5	离散傅里叶变换算法	35
3.1.6	离散傅里叶变换应用	39
3.2	余弦变换	40
3.2.1	离散余弦变换	40
3.2.2	离散余弦变换算法	41
3.2.3	离散余弦变换应用	43
3.3	小波变换	43
3.3.1	连续小波变换	44
3.3.2	离散小波变换	45
3.3.3	离散小波变换算法	47
3.3.4	离散小波变换应用	50
第4章	图像降噪	51
4.1	空域平滑滤波	51
4.1.1	均值滤波	51
4.1.2	中值滤波	53
4.1.3	自适应滤波	55
4.2	频域低通滤波	56
4.2.1	理想低通滤波	56
4.2.2	巴特沃斯低通滤波	59
4.2.3	指数低通滤波	60

4.3	同态低通滤波	62
4.3.1	同态低通滤波原理	62
4.3.2	同态低通滤波应用	63
4.4	小波低通滤波	64
4.4.1	小波低通滤波原理	64
4.4.2	小波低通滤波算法	64
4.4.3	小波低通滤波应用	65
第5章	图像增强	66
5.1	直方图变换	66
5.1.1	直方图	66
5.1.2	直方图均衡化	68
5.1.3	直方图自适应均衡化	69
5.2	灰度变换	70
5.2.1	线性变换	70
5.2.2	非线性变换	71
5.2.3	灰度变换算法	72
5.3	空域滤波	73
5.3.1	空域平滑滤波	73
5.3.2	空域锐化滤波	74
5.4	频域滤波	76
5.4.1	频域低通滤波	76
5.4.2	频域高通滤波	76
第6章	图像分割	80
6.1	阈值分割	80
6.1.1	阈值分割原理	80
6.1.2	阈值确定方法	81
6.1.3	阈值分割应用	83
6.2	边缘检测与边界跟踪	83
6.2.1	边缘检测	84
6.2.2	边界跟踪	87
第7章	图像恢复与再现	89
7.1	图像恢复	89
7.1.1	图像恢复原理	89
7.1.2	图像恢复算法	91
7.1.3	图像恢复应用	95
7.2	图像再现	96
7.2.1	数字全息再现原理	96

7.2.2 数字全息再现应用	97
第 8 章 图像配准与相关	99
8.1 图像配准	99
8.1.1 图像配准原理	99
8.1.2 图像配准算法	99
8.1.3 图像配准应用	100
8.2 图像相关	101
8.2.1 数字散斑相关原理	101
8.2.2 数字散斑相关应用	103
第 9 章 图像形态运算	105
9.1 集合概念	105
9.2 结构元素	105
9.2.1 结构元素形成	105
9.2.2 结构元素分解	107
9.3 膨胀和腐蚀	108
9.3.1 膨胀和腐蚀原理	108
9.3.2 图像边界处理	109
9.3.3 膨胀和腐蚀算法	109
9.3.4 膨胀和腐蚀应用	110
9.4 开启和闭合	111
9.4.1 开启和闭合原理	111
9.4.2 开启和闭合算法	112
9.4.3 开启和闭合应用	113
附录 I 常用基本函数	114
I.1 Language Fundamentals	114
I.1.1 Entering Commands	114
I.1.2 Matrices and Arrays	114
I.1.3 Operators and Elementary Operations	116
I.1.4 Special Characters	117
I.1.5 Data Types	117
I.1.6 Dates and Time	125
I.2 Mathematics	125
I.2.1 Elementary Math	125
I.2.2 Linear Algebra	130
I.2.3 Statistics and Random Numbers	132
I.2.4 Interpolation	133
I.2.5 Fourier Analysis and Filtering	134

I.3	Graphics	134
I.3.1	2-D and 3-D Plots	134
I.3.2	Formatting and Annotation	138
I.3.3	Images	140
I.3.4	Printing and Exporting	140
I.3.5	Graphics Objects	141
I.4	Programming Scripts and Functions	143
I.4.1	Control Flow	143
I.4.2	Scripts	143
I.4.3	Functions	143
I.4.4	Debugging	144
I.4.5	Coding and Productivity Tips	145
I.4.6	Programming Utilities	145
I.5	Data and File Management	145
I.5.1	Workspace Variables	145
I.5.2	Data Import and Export	146
附录 II	图像处理函数	148
II.1	Import, Export, and Conversion	148
II.1.1	Basic Import and Export	148
II.1.2	Scientific File Formats	148
II.1.3	High Dynamic Range Images	148
II.1.4	Large Image Files	148
II.1.5	Image Type Conversion	149
II.1.6	Synthetic Images	149
II.2	Display and Exploration	149
II.2.1	Basic Display	149
II.2.2	Interactive Exploration with the Image Viewer App	150
II.2.3	Build Interactive Tools	150
II.3	Geometric Transformation, Spatial Referencing, and Image Registration	151
II.3.1	Geometric Transformations	151
II.3.2	Spatial Referencing	152
II.3.3	Automatic Registration	152
II.3.4	Control Point Registration	153
II.4	Image Enhancement	153
II.4.1	Contrast Adjustment	153
II.4.2	Image Filtering	154
II.4.3	Morphological Operations	154

II.4.4	Deblurring	155
II.4.5	ROI-Based Processing	155
II.4.6	Neighborhood and Block Processing	156
II.4.7	Image Arithmetic	156
II.5	Image Analysis	156
II.5.1	Object Analysis	156
II.5.2	Region and Image Properties	157
II.5.3	Texture Analysis	157
II.5.4	Image Quality	158
II.5.5	Image Segmentation	158
II.5.6	Image Transforms	158
II.6	Color	158
II.7	Code Generation	159
附录 III	小波分析函数	161
III.1	Wavelets and Filter Banks	161
III.1.1	Real and Complex-Valued Wavelets	161
III.1.2	Orthogonal and Biorthogonal Filter Banks	161
III.1.3	Lifting	162
III.1.4	Wavelet Design	162
III.2	Continuous Wavelet Analysis	163
III.3	Discrete Wavelet Analysis	163
III.3.1	Signal Analysis	163
III.3.2	Image Analysis	164
III.3.3	3-D Analysis	165
III.3.4	Multisignal Analysis	166
III.4	Wavelet Packet Analysis	166
III.5	Denoising	168
参考文献		169

第 1 章 图像处理基础

1.1 图 像 概 念

1.1.1 图像及其分类

通常所说的图像(image),其含义十分广泛。图像既指艺术领域人或物的复制,如画像和塑像;也指光学领域人或物的复制,如镜像和影像;还指数学领域二维或多维数组的映射,如图形和图片;甚至指并不存在的人或物的反映,等等。图像处理中所说的图像主要是指光学领域人或物的复制以及数学领域二维或多维数组的映射。

根据人眼视觉特性,图像分为可见图像(visible image)和不可见图像(invisible image)。人眼能够感知的图像称为可见图像,如照片(单幅图像)和电影(序列图像)等;反之,人眼不能感知的图像则称为不可见图像,如电磁波谱和温度分布等。不可见图像通常可以转化为可见图像,如红外热像技术可以把温度分布转变为可见图像。

根据坐标和灰度是否连续,图像分为模拟图像(analogue image)和数字图像(digital image)。模拟图像是指坐标和灰度都具有连续性,如采用照相底片记录的照片;数字图像是指坐标和灰度均具有离散性,如采用数码相机拍摄的照片。

1.1.2 采样与量化

模拟图像只能采用光学方法进行处理,而不能直接采用数字方法进行处理,但是模拟图像通过采样和量化变成数字图像后,即可通过数字方法进行处理。

1. 采样

所谓采样(sampling)是指将模拟图像的连续空间坐标离散化为离散空间坐标。设对模拟图像 $A(x, y)$ 进行均匀采样,在 x, y 方向的采样间隔分别为 $\Delta x, \Delta y$, 则采样后的数字图像可表示为

$$I(x, y) = A(x, y)S(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A(x, y) \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y) \quad (1.1)$$

式中

$$S(m, n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y) \quad (1.2)$$

为采样函数,如图 1.1 所示。

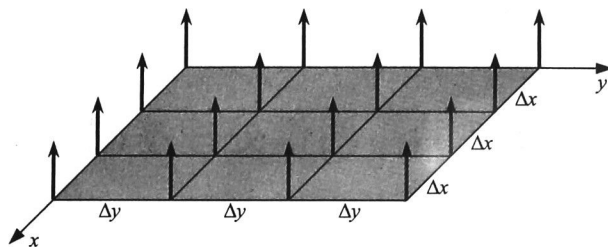


图 1.1 采样函数

如果采样点取得彼此足够靠近, 那么采样数据就是原来图像的精确表示, 即通过插值就能精确再现原来图像。根据采样定理(sampling theorem), 即香农(Shannon)或奈奎斯特(Nyquist)采样定理, 采样频率必须高于模拟图像最高频率的 2 倍, 才不至于在采样过程中产生混叠效应(频谱交叉)。因此采样间隔需要满足

$$\Delta x \leq \frac{1}{2u_{\max}}, \quad \Delta y \leq \frac{1}{2v_{\max}} \quad (1.3)$$

式中, $u_{\max}, v_{\max}$ 分别为模拟图像在 x, y 方向的最大空间频率。

2. 量化

所谓量化(quantizing)是指把模拟图像的连续灰度分布离散化为离散灰度分布, 如二值图像(binary image)的灰度级为 $2^1 = 2$, 其每个像素的灰度值为 0(黑)或 1(白); 8 位无符号整型灰度图像(gray-scale image)的灰度级为 $2^8 = 256$, 其每个像素的灰度值为 0(黑)、1, 2, ..., 254 或 255(白)。

1.2 图像软件

MATLAB(matrix laboratory)是 MathWorks 公司开发的面向科学和工程计算的高级编程语言。MATLAB 语言具有编程简单和易学易用等优点。目前, MATLAB 的图像处理工具箱(Image Processing Toolbox)和小波分析工具箱(Wavelet Toolbox)已广泛应用于图像处理。

目前, MATLAB 的常用版本如图 1.2 所示。

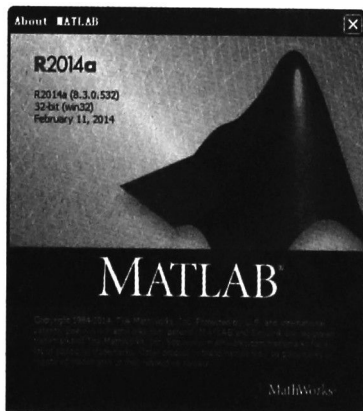


图 1.2 MATLAB R2014a

图 1.3 所示为 MATLAB 命令窗口。命令窗口用于输入 MATLAB 语句。



图 1.3 MATLAB 命令窗口

图 1.4 所示为 MATLAB 编辑窗口。编辑窗口用于编写扩展名为 m 的 M 文件。M 文件是文本文件，通常包含两种类型：脚本 (script) 和函数 (function)。

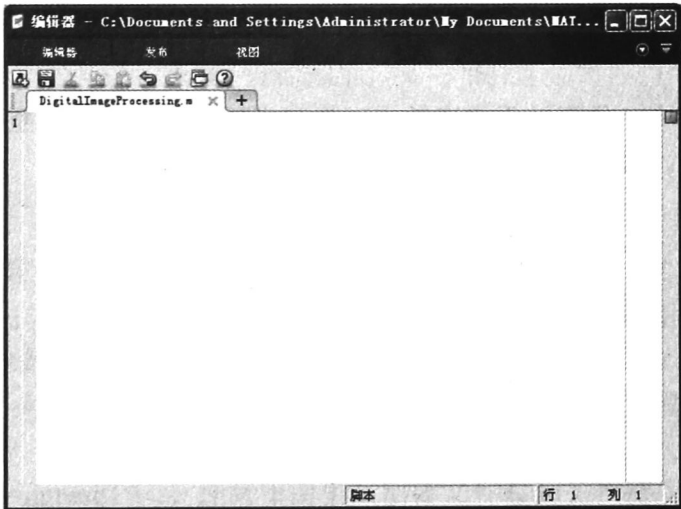


图 1.4 MATLAB 编辑窗口

1.3 图 像 表 示

MATLAB 的基本数据结构是数组，数组就是一组实数或复数的有序集合。而图像正是灰度(或颜色)数据的实值有序集合，因此 MATLAB 非常适合表征图像。

MATLAB 把灰度图像存储为二维数组(矩阵)，数组元素对应图像像素。如 M 行 N 列的灰度图像可表示为

$$I(:, :) = \begin{bmatrix} I(1,1) & I(1,2) & \cdots & I(1,n) & \cdots & I(1,N) \\ I(2,1) & I(2,2) & \cdots & I(2,n) & \cdots & I(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(m,1) & I(m,2) & \cdots & I(m,n) & \cdots & I(m,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(M,1) & I(M,2) & \cdots & I(M,n) & \cdots & I(M,N) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

式中, (m,n) 和 $I(m,n)$ 分别为图像坐标和灰度。

真彩图像在 MATLAB 中存储为三维数组, 其中沿第三维方向的第 1 个面表示红色分量, 第 2 个面表示绿色分量, 第 3 个面表示蓝色分量。如 M 行 N 列的真彩图像的 3 个分量可分别表示为

$$I(:, :, i) = \begin{bmatrix} I(1,1,i) & I(1,2,i) & \cdots & I(1,n,i) & \cdots & I(1,N,i) \\ I(2,1,i) & I(2,2,i) & \cdots & I(2,n,i) & \cdots & I(2,N,i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(m,1,i) & I(m,2,i) & \cdots & I(m,n,i) & \cdots & I(m,N,i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I(M,1,i) & I(M,2,i) & \cdots & I(M,n,i) & \cdots & I(M,N,i) \end{bmatrix}, \quad (i=1,2,3) \quad (1.5)$$

式中, (m,n,i) 和 $I(m,n,i)$ 分别为第 i 面的图像坐标和灰度。

1.3.1 像素坐标

在 MATLAB 中, 像素被看成离散点, 像素坐标只能取离散正整数值, 坐标排序从上到下, 从左到右, 如图 1.5 所示。

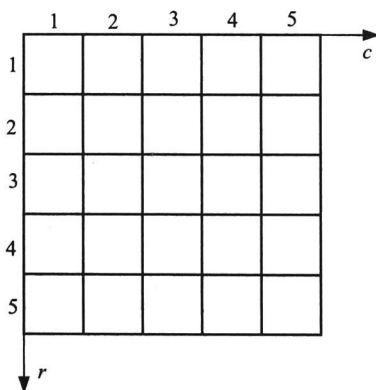


图 1.5 像素坐标

像素坐标与 MATLAB 数组坐标具有一一对应关系, 因此通过数组坐标可以读写图像像素值。如 MATLAB 中坐标为 $(3,2)$ 的数组元素对应于第 3 行第 2 列的图像像素。

1.3.2 空间坐标

在空间坐标中, 像素位置可用连续坐标 (x,y) 表示, 如图 1.6 所示。在 MATLAB 中, x 坐标向右为正, y 坐标向下为正。

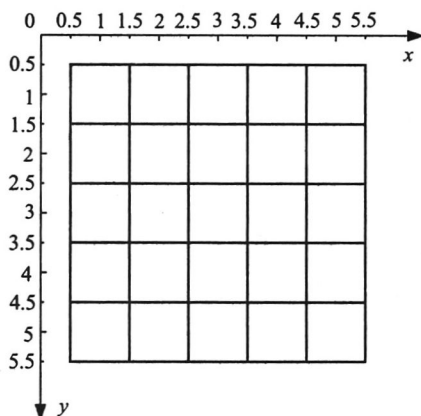


图 1.6 空间坐标

空间坐标与像素坐标之间具有对应关系，如像素坐标与像素中心所对应的空间坐标完全相同。然而，两种坐标之间也存在差别，如在像素坐标中左上角的坐标是(1, 1)，而在空间坐标中左上角的坐标是(0.5, 0.5)，引起这种差别的主要原因是像素坐标具有离散性，而空间坐标具有连续性。另外，在像素坐标中左上角的坐标始终是(1, 1)，而在空间坐标中左上角的坐标可以指定任何值。

1.4 图像输入与输出

1.4.1 图像读入

MATLAB 利用 `imread` 函数把图像从图像文件读到工作空间，其主要用法如下：

(1) `A = imread(filename, format)`，把灰度图像或彩色图像从图像文件读到工作空间。`A` 为包含图像数据的数组。对于灰度图像，则 `A` 是 $M \times N$ 数组；对于真彩图像，则 `A` 是 $M \times N \times 3$ 数组；对于采用 CMYK 颜色空间表示的 TIFF 格式彩色图像，则 `A` 是 $M \times N \times 4$ 数组。

(2) `[X, map] = imread(...)`，把索引图像从图像文件读到工作空间，其中 `X` 是索引数组，`map` 是颜色矩阵。

1.4.2 图像写出

MATLAB 利用 `imwrite` 函数把图像从工作空间写到图像文件，其主要用法如下：

(1) `imwrite(A, filename, format)`，把数组 `A` 从工作空间写到图像文件。图像文件名为 `filename`、格式由 `format` 指定。`A` 可以是 $M \times N$ (灰度图像) 或 $M \times N \times 3$ (真彩图像) 数组。对于 TIFF 文件，`A` 可以是采用 CMYK 颜色空间的 $M \times N \times 4$ 数组。

(2) `imwrite(X, map, filename, format)`，把索引图像 `X` 及其颜色矩阵 `map` 从工作空间写到文件名为 `filename` 和格式为 `format` 的图像文件。

1.4.3 图像显示

MATLAB 利用 `imshow` 函数显示图像，其主要用法如下：

(1) `imshow(I)`，在图像窗口显示灰度图像 `I`。

(2) `imshow(I, [low high])`，在图像窗口显示灰度图像 `I`，并指定灰度显示范围为 `[low high]`。灰度等于或小于 `low` 值时显示为黑，灰度等于或大于 `high` 值时显示为白。如果用空矩阵 `[]` 代替 `[low high]`，则 `imshow` 将在最小灰度值和最大灰度值之间显示图像。

(3) `imshow(RGB)`，显示真彩图像 `RGB`。

(4) `imshow(BW)`，显示二值图像 `BW`。像素值 0 和 1 分别显示为黑和白。

(5) `imshow(X, map)`，借助颜色矩阵 `map` 显示索引图像 `X`。颜色矩阵可以有任意行(但只有 3 列)，每一行代表一种颜色，每行的 3 个元素分别表示红、绿和蓝，颜色值位于 `[0.0,1.0]` 范围。

(6) `imshow(filename)`，显示图像文件，其中 `imshow` 函数将通过调用 `imread` 函数读取图像文件，但并不把图像数据读到 MATLAB 工作空间。

1.5 数据类型及其转换

1.5.1 数据类型

在 MATLAB 中，灰度图像和真彩图像的数据可以是 8 位无符号整型、16 位无符号整型、16 位带符号整型、单精度浮点型、双精度浮点型或逻辑型；索引图像可以是 8 位无符号整型、16 位无符号整型、双精度浮点型或逻辑型；二值图像只能是逻辑型。

1.5.2 数据类型转换

利用 MATLAB 提供的函数可以进行数据类型转换。

1. MATLAB 利用 `im2uint8` 函数把图像数据转换为 8 位无符号整型，其主要用法如下

(1) `A = im2uint8(I)`，灰度图像转换为 8 位无符号整型；

(2) `A = im2uint8(RGB)`，真彩图像转换为 8 位无符号整型；

(3) `A = im2uint8(BW)`，二值图像转换为 8 位无符号整型；

(4) `A = im2uint8(X, 'indexed')`，索引图像转换为 8 位无符号整型。

2. MATLAB 利用 `im2uint16` 函数把图像数据转换为 16 位无符号整型，其主要用法如下

(1) `A = im2uint16(I)`，灰度图像转换为 16 位无符号整型；

(2) `A = im2uint16(RGB)`，真彩图像转换为 16 位无符号整型；

(3) `A = im2uint16(BW)`，二值图像转换为 16 位无符号整型；

(4) `A = im2uint16(X, 'indexed')`，索引图像转换为 16 位无符号整型。

3. MATLAB 利用 `im2int16` 函数把图像数据转换为 16 位带符号整型，其主要用法如下

(1) `A = im2int16(I)`，灰度图像转换为 16 位带符号整型；

- (2) $A = \text{im2int16}(\text{RGB})$, 真彩图像转换为 16 位带符号整型;
- (3) $A = \text{im2int16}(\text{BW})$, 二值图像转换为 16 位带符号整型。
4. MATLAB 利用 im2single 函数把图像数据转换为单精度浮点型, 其主要用法如下
- (1) $A = \text{im2single}(I)$, 灰度图像转换为单精度浮点型;
- (2) $A = \text{im2single}(\text{RGB})$, 真彩图像转换为单精度浮点型;
- (3) $A = \text{im2single}(\text{BW})$, 二值图像转换为单精度浮点型;
- (4) $A = \text{im2single}(X, \text{'indexed'})$, 索引图像转换为单精度浮点型。
5. MATLAB 利用 im2double 函数把图像数据转换为双精度浮点型, 其主要用法如下
- (1) $A = \text{im2double}(I)$, 灰度图像转换为双精度浮点型;
- (2) $A = \text{im2double}(\text{RGB})$, 真彩图像转换为双精度浮点型;
- (3) $A = \text{im2double}(\text{BW})$, 二值图像转换为双精度浮点型;
- (4) $A = \text{im2double}(X, \text{'indexed'})$, 索引图像转换为双精度浮点型。

1.6 图像类型及其转换

1.6.1 图像类型

1. 二值图像

二值图像以逻辑数组存储, 每个像素取值为 0(黑)或 1(白), 如图 1.7 所示。

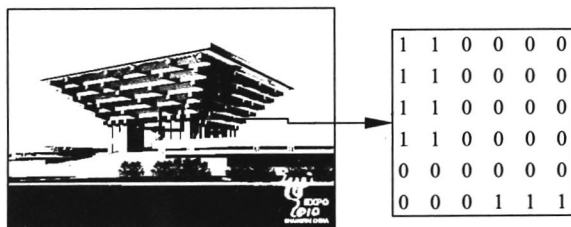


图 1.7 二值图像及其像素值

2. 灰度图像

灰度图像由一个数据矩阵组成, 数据矩阵中的元素值表示像素灰度或亮度, 如图 1.8 所示。矩阵数据可以是 8 位无符号整型、16 位无符号整型、16 位带符号整型、单精度浮点型或双精度浮点型。

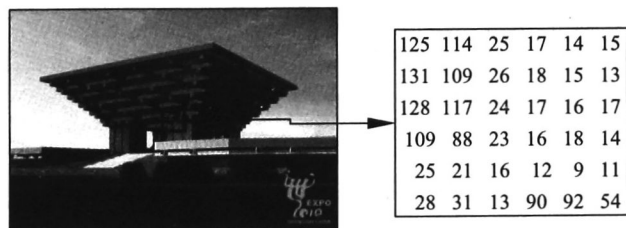


图 1.8 灰度图像及其像素值