

 普通高等教育计算机规划教材

# 数字图像处理

## ——原理与算法

孙燮华 编著

提供电子教案



下载网址 <http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育计算机规划教材  
国家自然科学基金 NO. 60970151 资助

# 数字图像处理

## —原理与算法

孙燮华 编著



机械工业出版社



本书针对图像处理和算法两方面为“零知识”起点的读者。前12章适用于本科教学,主要内容包括概论、图像数字化、图像处理基础、图像几何变换、图像时频变换、图像增强、图像恢复、图像分割、图像特征与分析、图像形态学、模式识别和图像压缩。最后3章包括分形图像压缩、图像加密和图像水印,可为本科高年级和研究生教学之用。

本书内容新颖并注重培养创新能力,介绍算法深入浅出并注重实现,其主要算法都在配套的《数字图像处理—Visual C#. NET 编程与实验》一书中实现了程序。若结合《数字图像处理—Visual C#. NET 编程与实验》,各层次读者可各取所需地学习有关章节。本书的所有算法和公式都经过推导和证明,并经过程序验证。

本书适用于计算机、通信和电子信息、自动控制、生物医学工程等各理工科相关专业的本科和研究生教学和工程技术人员应用参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理:原理与算法/孙燮华编著. —北京:机械工业出版社,2010.6  
(普通高等教育计算机规划教材)  
ISBN 978-7-111-30723-5

I. ①数… II. ①孙… III. ①数字图像处理-高等学校-教材  
IV. ①TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第092126号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:张宝珠 罗子超

责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2010年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·19印张·471千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30723-5

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

## 出版说明

信息技术是当今世界发展最快、渗透性最强、应用最广的关键技术，是推动经济增长和知识传播的重要引擎。在我国，随着国家信息化发展战略的贯彻实施，信息化建设已进入了全方位、多层次推进应用的新阶段。现在，掌握计算机技术已成为 21 世纪人才应具备的基本素质之一。

为了进一步推动计算机技术的发展，满足计算机学科教育的需求，机械工业出版社聘请了全国多所高等院校的一线教师，进行了充分的调研和讨论，针对计算机相关课程的特点，总结教学中的实践经验，组织出版了这套“普通高等教育计算机规划教材”。

本套教材具有以下特点：

(1) 反映计算机技术领域的新发展的新应用。

(2) 注重立体化教材的建设，多数教材配有电子教案、习题与上机指导或多媒体光盘等。

(3) 针对多数学生的学习特点，采用通俗易懂的方法讲解知识，逻辑性强、层次分明、叙述准确而精炼、图文并茂，使学生可以快速掌握，学以致用。

(4) 符合高等院校各专业人才的培养目标及课程体系的设置，注重培养学生的应用能力，强调知识、能力与素质的综合训练。

(5) 适合各类高等院校、高等职业学校及相关院校的教学，也可作为各类培训班和自学用书。

机械工业出版社

# 前 言

数字图像处理是实用性很强的学科，许多处理算法具有实际应用背景。因此，学习图像处理原理与算法必须与编程实践相结合才能真正理解和掌握。本着这个目的，作者编写了本书，并将所有主要算法编程实现写成另一本《数字图像处理——Visual C#. NET 编程与实验》（以下简称《编程与实验》）。本书中，作者对于原理与算法的着眼点不是“介绍性”的，即不是停留在介绍上，而是着眼于实现和实践。虽然将图像处理算法作为基本对象，但对于没有学习过甚至没有接触过计算机图形学和算法的读者来说，也能顺利地学完大部分章节。按照现在流行的新潮语言，本书是“零知识”起点的，即对于图像处理和算法两个方面是“零知识”起点的。对于其他基础知识，一般地，要求读者学习过大学高等数学和一门程序设计语言，如 C 或 Java 语言。

本书作者认为，一个算法只有当程序实现时才是一个真正意义上的算法。因为算法在实现时，仍然会遇到一些计算机编程实现的困难。另一方面，当算法已经实现时，可以通过程序的运行和对代码的分析进一步理解和掌握算法，还可以学到编程实现的技巧。而这些正是读者需要掌握的。用“百闻不如一见”的成语来描述图像处理的学习方法恐怕是最恰当的。在学习了原理与算法后，如果不进行编程和实验将会留下缺憾。出于这样的考虑，《编程与实验》中的程序是完整的，程序除了可用标准的可视化选择控件设置参数外，还设置了默认参数。作者这样处理的目的之一是让读者进行图像处理实践和实验上带来便利。其目的之二是为非计算机专业的读者在学习和应用图像处理技术上考虑的。所以，本书不仅是面向计算机专业的，事实上它也适合电子信息、自动控制、生物医学等各理工科相关专业。由于程序已能自动运行，即使初学者也能从中有所收获，所以本书大部分内容对于专科、高等职业技术学院等各个层次的读者也是适合的。书中某些内容特别是最后 3 章更是为本科高年级学生和研究生们创新学习特意编写的。

## 本书的特色和学习方法

下面介绍本书的特色和相应的学习方法，供读者参考。

### 1. 介绍算法详细并注重实现

一个算法只有当其程序实现时，才是一个真正意义上的算法。事实上，本书的算法是在程序实现后写成的。读者可以通过与本书配套的《编程与实验》中的程序运行和对代码的分析进一步理解和掌握算法，还可以学习编程实现的技巧。

### 2. 主要算法都实现了程序

在本书中的主要算法都在《编程与实验》中实现了完整程序，且可直接运行又可设置参数运行。全部程序提供了运行所需的完整图像等实验材料。此外，对有关章节理论内容的学习在光盘中还提供了仿真实验程序，读者可进行实验，用以加深理解和掌握。

### 3. 程序代码注释详细并具有研究开发价值

对应算法在程序的相应语句中提供详细注释，便于对照学习。不少程序直接来自作者在公司开发实践和研究工作，具有研究开发价值。

### 4. 内容新颖并注重培养创新能力

本书特别注重内容的现代化和创新能力培养。从傅里叶分析到小波分析，从分形到混

沌,从学习算法理论到编程实现技巧都作了详细的介绍。对于创新能力培养,以指导研究生的方式指导读者从模仿、改进到创新创造,并提供模仿的参照算法和程序,改进的途径等详细可执行的操作。

#### 5. 介绍算法深入浅出,各层次读者可各取所需

本书算法基础与同济大学《高等数学》接轨。由于算法配程序,各层次读者可各取所需地学习相应章节的内容。部分读者可以仅学习程序实践与应用而不必学习算法的理论基础和推导。而另一部分读者,可以深入地学习本书的算法基础推导和一些定理的证明,从中学习算法的设计和实现的技术。

为了适应大学生对创新的需要,作者在有关章节特别介绍了一些最新的技术和算法。同时,对某些技术和方法指出其改进和创新的方法和方向,并给出相应的参考算法与程序留给读者作为习题。这部分习题可作为大学生的创新尝试题材。按难易程度分级标注,分为一星“\*”、二星“\*\*”和三星“\*\*\*”级习题。这部分星级习题也是学生课外科技活动和撰写毕业论文的题材,其中,“\*\*\*”习题可作为高年级和研究生的创新研究题材。

本书由孙燮华编写完成。书中难免有错误之处,欢迎读者和同行专家批评指正。对参考文献中的作者们表示衷心的感谢!

孙燮华  
2010 年元月

# 目 录

出版说明

前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第1章 概论 .....                   | 1  |
| 1.1 基本概念 .....                 | 1  |
| 1.1.1 连续图像 .....               | 1  |
| 1.1.2 数字图像 .....               | 2  |
| 1.1.3 颜色模型 .....               | 3  |
| 1.2 图像的统计特性 .....              | 5  |
| 1.2.1 基本统计分析量 .....            | 5  |
| 1.2.2 直方图 .....                | 6  |
| 1.3 图像文件格式 .....               | 8  |
| 1.3.1 BMP 图像文件格式 .....         | 8  |
| 1.3.2 JPG 图像文件格式 .....         | 10 |
| 1.3.3 GIF 图像文件格式 .....         | 10 |
| 1.3.4 PNG 图像文件格式 .....         | 11 |
| 1.4 图像质量的评价标准 .....            | 15 |
| 1.4.1 客观评价标准 .....             | 15 |
| 1.4.2 主观评价标准 .....             | 16 |
| 1.5 数字图像处理的应用 .....            | 16 |
| 1.6 习题 .....                   | 18 |
| 第2章 图像数字化 .....                | 19 |
| 2.1 图像采样 .....                 | 19 |
| 2.1.1 图像采样基本概念 .....           | 19 |
| 2.1.2 采样定理 .....               | 21 |
| 2.1.3 图像重建 .....               | 23 |
| 2.2 图像量化 .....                 | 25 |
| 2.2.1 标量量化 .....               | 25 |
| 2.2.2 向量量化 .....               | 27 |
| 2.2.3 采样、量化参数与数字化图像之间的关系 ..... | 31 |
| 2.2.4 数字图像的数值描述 .....          | 32 |
| 2.3 图像输入/输出设备 .....            | 33 |
| 2.3.1 图像输入设备 .....             | 33 |
| 2.3.2 图像输出设备 .....             | 36 |
| 2.4 习题 .....                   | 37 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>第3章 图像处理基础</b>        | <b>39</b> |
| 3.1 点运算                  | 39        |
| 3.1.1 线性点运算              | 40        |
| 3.1.2 非线性点运算             | 40        |
| 3.1.3 点运算与直方图            | 41        |
| 3.1.4 点运算的应用             | 42        |
| 3.2 代数运算                 | 43        |
| 3.2.1 加法运算               | 44        |
| 3.2.2 减法运算               | 45        |
| 3.2.3 乘法运算               | 48        |
| 3.2.4 除法运算               | 48        |
| 3.3 点运算和代数运算应用算法         | 48        |
| 3.3.1 彩色图像转变为灰度图像        | 49        |
| 3.3.2 灰度阈值变换             | 49        |
| 3.3.3 灰度线性变换             | 50        |
| 3.3.4 伪彩色处理              | 51        |
| 3.3.5 图像融合               | 53        |
| 3.4 习题                   | 53        |
| <b>第4章 图像几何变换</b>        | <b>55</b> |
| 4.1 图像仿射变换               | 55        |
| 4.1.1 齐次坐标系              | 55        |
| 4.1.2 图像仿射变换             | 56        |
| 4.1.3 仿射变换算法设计           | 60        |
| 4.2 图像插值放大               | 62        |
| 4.2.1 最邻近插值算法            | 63        |
| 4.2.2 双线性插值算法            | 64        |
| 4.2.3 三次卷积插值算法           | 65        |
| 4.3 图像缩小                 | 66        |
| 4.3.1 基于等间隔采样的图像缩小算法     | 66        |
| 4.3.2 基于局部均值的图像缩小算法      | 67        |
| 4.4 习题                   | 67        |
| <b>第5章 图像时频变换</b>        | <b>68</b> |
| 5.1 Fourier 变换           | 68        |
| 5.1.1 Fourier 变换的性质      | 68        |
| 5.1.2 离散 Fourier 变换      | 71        |
| 5.1.3 二维离散 Fourier 变换的性质 | 72        |
| 5.2 快速傅里叶变换              | 73        |
| 5.2.1 计算 DFT 的问题及其改进途径   | 74        |
| 5.2.2 FFT 算法及其原理         | 75        |



|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 5.3 离散余弦变换·····            | 80  |
| 5.3.1 一维离散余弦变换·····        | 80  |
| 5.3.2 利用FFT快速计算DCT·····    | 81  |
| 5.4 沃尔什-哈达玛变换·····         | 82  |
| 5.4.1 沃尔什函数与哈达玛矩阵·····     | 82  |
| 5.4.2 沃尔什-哈达玛变换·····       | 83  |
| 5.5 K-L变换·····             | 84  |
| 5.5.1 图像的向量表示和统计参数·····    | 84  |
| 5.5.2 $C_i$ 的特征值和特征向量····· | 85  |
| 5.5.3 离散K-L变换及其性质·····     | 85  |
| 5.6 小波变换·····              | 87  |
| 5.6.1 从Fourier分析到小波分析····· | 87  |
| 5.6.2 小波分析·····            | 88  |
| 5.6.3 小波变换算法·····          | 93  |
| 5.7 习题·····                | 96  |
| <b>第6章 图像增强</b> ·····      | 98  |
| 6.1 空域增强·····              | 98  |
| 6.1.1 灰度变换增强·····          | 98  |
| 6.1.2 直方图变换增强·····         | 99  |
| 6.1.3 平滑滤波·····            | 104 |
| 6.1.4 中值滤波·····            | 107 |
| 6.1.5 空域模板滤波·····          | 109 |
| 6.2 频域增强·····              | 111 |
| 6.2.1 巴特沃斯低通滤波·····        | 111 |
| 6.2.2 巴特沃斯高通滤波·····        | 114 |
| 6.3 图像锐化·····              | 115 |
| 6.3.1 罗伯特算子·····           | 115 |
| 6.3.2 拉普拉斯算子·····          | 116 |
| 6.3.3 索伯尔算子·····           | 116 |
| 6.3.4 普瑞维特算子·····          | 118 |
| 6.3.5 凯西算子·····            | 118 |
| 6.4 习题·····                | 119 |
| <b>第7章 图像恢复</b> ·····      | 120 |
| 7.1 图像退化模型·····            | 120 |
| 7.1.1 线性系统·····            | 120 |
| 7.1.2 图像退化模型·····          | 122 |
| 7.1.3 图像退化模型的离散形式·····     | 123 |
| 7.1.4 运动模糊的退化模型·····       | 126 |
| 7.2 图像代数恢复方法·····          | 126 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 7.2.1 无约束代数恢复方法 .....       | 127        |
| 7.2.2 有约束代数恢复方法 .....       | 128        |
| 7.3 图像频域恢复方法 .....          | 130        |
| 7.3.1 逆滤波 .....             | 130        |
| 7.3.2 最小二乘方滤波 .....         | 132        |
| 7.4 其他图像恢复方法 .....          | 134        |
| 7.4.1 人机交互式恢复方法 .....       | 134        |
| 7.4.2 几何畸变校正 .....          | 136        |
| 7.5 习题 .....                | 138        |
| <b>第8章 图像分割 .....</b>       | <b>139</b> |
| 8.1 边缘检测 .....              | 139        |
| 8.1.1 图像边缘与梯度 .....         | 139        |
| 8.1.2 边缘检测算法 .....          | 141        |
| 8.2 图像阈值法 .....             | 147        |
| 8.2.1 阈值分割原理 .....          | 147        |
| 8.2.2 最佳阈值分割算法 .....        | 148        |
| 8.2.3 Otsu 阈值分割算法 .....     | 150        |
| 8.2.4 基于熵的二值化方法 .....       | 150        |
| 8.3 基于区域的分割 .....           | 153        |
| 8.3.1 区域生长法 .....           | 153        |
| 8.3.2 区域分裂与合并 .....         | 155        |
| 8.4 霍夫变换 .....              | 157        |
| 8.4.1 直线的检测 .....           | 157        |
| 8.4.2 广义 Hough 变换检测曲线 ..... | 159        |
| 8.5 习题 .....                | 160        |
| <b>第9章 图像特征提取与分析 .....</b>  | <b>162</b> |
| 9.1 几何特征 .....              | 162        |
| 9.1.1 位置和面积 .....           | 162        |
| 9.1.2 距离 .....              | 163        |
| 9.2 形状特征 .....              | 164        |
| 9.2.1 区域外部空间域分析 .....       | 164        |
| 9.2.2 区域内部空间域分析 .....       | 165        |
| 9.2.3 区域内部变换分析 .....        | 167        |
| 9.3 边界特征 .....              | 169        |
| 9.3.1 链码描述 .....            | 170        |
| 9.3.2 傅里叶描述子 .....          | 172        |
| 9.3.3 边界提取与外轮廓跟踪 .....      | 173        |
| 9.4 图形细化 .....              | 174        |
| 9.4.1 细化算法1 .....           | 174        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 9.4.2 细化算法 2 .....           | 175 |
| 9.5 纹理分析 .....               | 176 |
| 9.5.1 统计法 .....              | 176 |
| 9.5.2 用空间自相关函数作纹理测度 .....    | 178 |
| 9.5.3 频谱法 .....              | 178 |
| 9.5.4 联合概率矩阵法 .....          | 178 |
| 9.6 习题 .....                 | 180 |
| 第 10 章 图像形态学 .....           | 181 |
| 10.1 二值图像形态学 .....           | 181 |
| 10.1.1 基本概念 .....            | 181 |
| 10.1.2 基本运算 .....            | 183 |
| 10.1.3 击中与未击中变换 .....        | 185 |
| 10.1.4 二值图像形态学的应用 .....      | 187 |
| 10.2 灰度图像形态学 .....           | 191 |
| 10.2.1 基本运算 .....            | 191 |
| 10.2.2 实用算法 .....            | 191 |
| 10.3 习题 .....                | 193 |
| 第 11 章 模式识别 .....            | 195 |
| 11.1 概论 .....                | 195 |
| 11.1.1 模式识别及其方法 .....        | 195 |
| 11.1.2 模式的描述方法与识别系统 .....    | 196 |
| 11.1.3 图像识别 .....            | 199 |
| 11.2 模板匹配分类器 .....           | 200 |
| 11.2.1 特征类设计 .....           | 200 |
| 11.2.2 模板匹配分类法 .....         | 201 |
| 11.3 基于概率统计的 Bayes 分类器 ..... | 202 |
| 11.3.1 Bayes 方法 .....        | 203 |
| 11.3.2 手写数字的分类问题算法 .....     | 204 |
| 11.4 感知器算法与最小均方误差算法 .....    | 205 |
| 11.4.1 感知器算法 .....           | 205 |
| 11.4.2 最小均方误差算法 .....        | 210 |
| 11.5 习题 .....                | 211 |
| 第 12 章 图像压缩 .....            | 213 |
| 12.1 图像压缩概论 .....            | 213 |
| 12.1.1 图像编码的必要性 .....        | 213 |
| 12.1.2 图像压缩的可能性 .....        | 213 |
| 12.1.3 图像编码分类 .....          | 214 |
| 12.2 RAW 图像的读写与压缩 .....      | 215 |
| 12.2.1 RAW 图像的读写 .....       | 215 |

|               |                              |            |
|---------------|------------------------------|------------|
| 12.2.2        | RAW 图像的压缩试验 .....            | 216        |
| 12.3          | 数据压缩算法 .....                 | 217        |
| 12.3.1        | 哈夫曼编码 .....                  | 217        |
| 12.3.2        | 游程编码 .....                   | 218        |
| 12.3.3        | LZW 压缩算法 .....               | 220        |
| 12.4          | JPEG 图像文件与压缩 .....           | 223        |
| 12.4.1        | JPEG 图像文件格式 .....            | 223        |
| 12.4.2        | JPEG 2000 静态图像压缩标准 .....     | 228        |
| 12.5          | 习题 .....                     | 229        |
| <b>第 13 章</b> | <b>分形图像压缩 .....</b>          | <b>231</b> |
| 13.1          | 分形简介 .....                   | 231        |
| 13.1.1        | 几个著名分形 .....                 | 231        |
| 13.1.2        | 分形维数 .....                   | 233        |
| 13.1.3        | 分形空间 .....                   | 234        |
| 13.2          | 确定性迭代函数系统 .....              | 236        |
| 13.2.1        | 迭代函数系统 .....                 | 236        |
| 13.2.2        | 拼贴定理与 IFS 编码方法 .....         | 238        |
| 13.2.3        | 二值图像 IFS 编码方法 .....          | 240        |
| 13.3          | 随机迭代函数系统 .....               | 241        |
| 13.3.1        | 随机 IFS 方法 .....              | 242        |
| 13.3.2        | 随机迭代算法 .....                 | 243        |
| 13.4          | 全自动分形图像编码方法 .....            | 245        |
| 13.4.1        | 分形图像压缩方法 .....               | 245        |
| 13.4.2        | 分形图像压缩编码算法的改进 .....          | 248        |
| 13.5          | 习题 .....                     | 251        |
| <b>第 14 章</b> | <b>图像加密 .....</b>            | <b>252</b> |
| 14.1          | 空域图像加密 .....                 | 252        |
| 14.1.1        | Arnold 变换置乱算法 .....          | 253        |
| 14.1.2        | Logistic 混沌置乱算法 .....        | 257        |
| 14.1.3        | 序列加密算法 .....                 | 261        |
| 14.2          | 频域图像加密 .....                 | 262        |
| 14.2.1        | DCT 频域 Arnold 置乱算法 .....     | 262        |
| 14.2.2        | 沃尔什-哈达玛变换域混沌置乱算法 .....       | 263        |
| 14.2.3        | DWT 频域 Logistic 混沌置乱算法 ..... | 264        |
| 14.3          | 习题 .....                     | 265        |
| <b>第 15 章</b> | <b>图像数字水印 .....</b>          | <b>268</b> |
| 15.1          | 数字水印基础 .....                 | 268        |
| 15.1.1        | 概论 .....                     | 268        |
| 15.1.2        | 数字水印的分类 .....                | 269        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 15.1.3 数字水印系统的组成 .....   | 270 |
| 15.1.4 数字水印的攻击 .....     | 271 |
| 15.1.5 数字水印设计和产生 .....   | 272 |
| 15.2 空域数字水印 .....        | 275 |
| 15.2.1 最低有效位水印算法 .....   | 276 |
| 15.2.2 双集法 .....         | 278 |
| 15.3 频域数字水印 .....        | 281 |
| 15.3.1 基于扩频的数字水印技术 ..... | 281 |
| 15.3.2 抖动调制算法 .....      | 283 |
| 15.4 习题 .....            | 286 |
| 附录 常用符号 .....            | 287 |
| 参考文献 .....               | 290 |

# 第1章 概 论

图像无处不在。任何物体通过光线在人眼的视网膜中成像，如同在摄像头或照相机中成像一样。所以，图像对于人来说是最首要的信息。许多自动检测仪器，只要使用摄像头成像技术，以后的工作就是图像处理和图像分析。人类探索宇宙空间，当需要知道一个未知的星体是什么样时，怎么描述都不如提供几幅该星体的照片更为有力。这就是“百闻不如一见”。由此可见，图像给出的信息量十分丰富和全面，也反映了图像信息的重要性。

本章学习图像处理的一些基本概念和基础知识。

## 1.1 基本概念

一幅单色图像  $P$  可以用一个在平面区域  $G = \{(x, y) | 0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N\}$  上的二元光强函数  $f(x, y)$  来表示。其中，函数  $f(x, y)$  的值表示在坐标  $(x, y)$  处图像的灰度值。如果图像  $P$  是彩色的，则  $f(x, y)$  是一个向量函数。它的每一个分量代表图像在点  $(x, y)$  处相应的颜色通道的值。

### 1.1.1 连续图像

人眼所看到的空间某位置上的景物是由光线照射在景物上，并经过反射或透射映入人眼而形成的图像。因而，可以将一幅图像看做空间各点光强度的集合。我们可以简单地把光强度看做随空间坐标  $(x, y)$ 、光线波长  $\lambda$  和时间  $t$  变化的连续函数，其数学表达式为

$$I = f(x, y, \lambda, t) \quad (1-1)$$

如果只考虑光的能量而不考虑其波长，则图像在视觉上表现为灰色影像，称为**灰度图像**(gray image)或**单色图像**(monochrome image)，其图像函数为

$$I = f(x, y, t) \quad (1-2)$$

如果处理的灰度图像是**静止图像**(still image)，即图像内容不随时间变化，则上述图像函数可以表示为

$$I = f(x, y) \quad (1-3)$$

本书重点介绍静止图像。理论上，**静止彩色图像**可以表示为

$$I = \vec{f}(x, y) \quad (1-4)$$

由于彩色图像(color image)可以分为红(R)、绿(G)和蓝(B)三基色，因此，对于彩色图像而言，图像函数可以用 R、G 和 B 通道的值表示

$$I = \vec{f}(x, y) = (f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)) \quad (1-5)$$

由式(1-5)表示的  $\vec{f}(x, y)$  是一个三维向量函数。本书用两种方法表示向量函数，在不强调向量函数时，用粗黑体、斜体字母表示，如在式(1-4)中使用了粗黑体  $f$ ，它表示一个向量函数；在强调向量函数时，使用向量标记  $\vec{f}(x, y)$ 。



由此可见,对灰度图像处理的有关理论和方法是进行彩色图像处理的基础。

**连续图像**也称为**模拟图像**。连续图像在水平与垂直方向上,像点位置的变化以及每个像点的灰度变化都是连续的。可以认为它是由无数个像点组成的,而且每个点上的灰度值都有无限多个可能的取值。它反映了客观景物的亮度和颜色随空间位置和方向上的变化而发生的连续变化。因此,上面讨论的就是连续图像和它的数学描述。它是数字图像处理的理论基础。

## 1.1.2 数字图像

连续图像虽然能全面地表示图像信息,但目前的计算机不能处理连续图像。通常得到的照片、图样或景物等原始信息都是连续的模拟信号,所以,数字图像处理的第一个环节就是将连续图像信息转化为数字形式。也就是说,需要将二维坐标系中连续变化的像点实现离散化,以及对表示亮暗程度或彩色的数值进行离散化。由这两个离散化处理得到的图像就是**离散图像**。

离散图像又称为**数字图像**,将平面区域  $G = \{(x, y) | 0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N\}$  内的连续图像  $f(x, y)$  按一定方式划分为小块区域  $(x_i, y_j) (i=0, 1, \dots, M-1; j=0, 1, \dots, N-1)$ , 如图 1-1 所示。这些小区域称为**图像元素**(picture element), 简称**像素**(pixel)。像素是组成数字图像的基本元素,是按某种规律(比如,经过模拟/数字转换的一系列二进制数码)表示的信息。

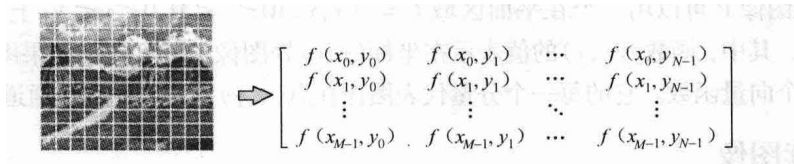


图 1-1 图像离散化示意图

上述图像进行的两个离散化操作也称为**图像数字化处理**。通过数字化处理,就可以获得数字图像。在这些小区域上获取图像的亮度作为“样本”的过程就是通常所说的**采样**。采样过程中获取的亮度样本值仍然是连续的值,还需要将这些值“量化”为整数值。一般地,将亮度值均匀地量化成 256 个等级。有两种方法表示从白到黑的量化:一种是 0 ~ 255 对应由白到黑;另一种是 0 ~ 255 对应由黑到白。在图像处理时,应该注意,相应系统采用的是哪一种表示法。

图像在空间上经过离散化并对采样值量化后,一幅宽高分别为  $M$  和  $N$  的图像简称为  $M \times N$  图像,可用如下矩阵表示

$$f = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

此处的  $M$  和  $N$  通常可用 2 的整数幂表示,比如  $M=2^m, N=2^n$ 。常称(1-6)的矩阵  $f$  为**图像矩阵**。由式(1-6)可知,离散图像的宽度  $M$  是图像矩阵的行数,而高度  $N$  是列数。本书规定进行处理的所有图像除特别说明外均指数字图像。

根据图像的不同,可以分为以下 3 类。

### 1. 灰度图像

当一幅图像具有  $2^k$  灰度级时,常称该图像是 **k 比特图像**。比如,一幅有  $2^8 = 256$  个灰度级,就称其为 **8 比特图像**。灰度图像矩阵元素  $f(i, j)$  的取值范围通常为  $[0, 255]$ , 所以,也常

称为 **256 级灰度图像**。一般地，“0”级表示纯黑色，“255”级表示纯白色，中间的灰度级从小到大表示由黑到白的过渡。

## 2. 二值图像

一幅**二值图像**的二维矩阵仅由 0、1 两个值组成，“0”代表白色，“1”代表黑色。二值图像通常用于文字、线条图的扫描识别和掩模图像的存储。二值图像可以看成是灰度图像的一个特例。注意，在图像存储时，即使二值图像其灰度值仍然在  $[0, 255]$  内，但它仅有两个值：0 和 255。所以二值图像在存储时，必须将 0 - 1 图像序列转化成 255 - 0 图像序列。

## 3. RGB 彩色图像

RGB 图像分别用红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色的组合来表示每个像素的颜色。图像中的每个像素的颜色值，用 RGB 三原色表示直接存放在图像矩阵中。由于每一像素的颜色需要 R、G、B 分量来表示，所以 RGB 图像的图像矩阵与其他类型的图像矩阵不同，是一个三维矩阵，可用  $M \times N \times 3$  表示。比如，若  $f$  表示彩色图像，则在矩阵式(1-6)中

$$f(i,j) = \vec{f}(i,j) = (f_R(i,j), f_G(i,j), f_B(i,j)) \quad (i=0,1,\dots,M-1; j=0,1,\dots,N-1) \quad (1-7)$$

是一个三维向量，由表示 R、G、B 值的 3 个分量组成。其实，在实际的图像文件组成中还有一个透明度(alpha)分量  $f_A(i,j)$ ，所以严格地说，RGB 图像的矩阵是一个 ARGB 四维矩阵。但由于透明度分量使用较少，为简便起见，在许多著作中不提及这个分量。有关透明度在动画制作中的应用可参阅文献[91]。

### 1. 1. 3 颜色模型

为了正确地使用颜色，需要建立颜色模型。下面介绍几种主要的模型。

#### 1. RGB 模型

这个模型基于笛卡儿坐标系，3 个轴分别为 R、G、B，如图 1-2 所示。我们感兴趣的部分形成一个立方体。原点对应黑色，离原点最远的立方体的顶点对应白色。在这个模型中，从黑到白的灰度值分布在从原点到离原点最远的顶点的连线上。在立方体内其余各点对应不同的颜色，可用从原点到该点的矢量表示。

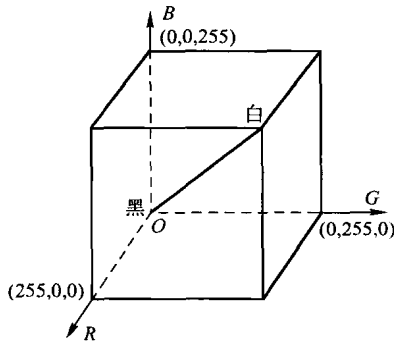


图 1-2 RGB 彩色立方体

根据这个模型，每幅彩色图像包括 3 个独立的基色平面，或者说可以分解到 3 个基色平面上。反过来，用 3 个独立的基色平面可表示一幅彩色图像。一幅“真”彩色 RGB 图像用 24 比特，即 R、G、B 各个分量均用 8 比特表示。这样，一幅“真”彩色 RGB 图像的颜色总数有 16 777 216 种。

## 2. HSI 模型

RGB 模型是从物理和光学的角度描述颜色的,而 HSI 则是根据人类视觉主观感觉对颜色进行描述的。研究与实践均表明,人眼不能直接感觉 R、G、B 的颜色比例,只能通过感知颜色的色度、饱和度和亮度来区分物体。在 HSI 彩色空间中,**H** 表示色度(hue),**S** 表示饱和度(saturation),**I** 表示强度(intensity),即亮度。其中,色度和饱和度表示颜色的彩色信息,而 I 决定了像素的整体亮度,与彩色信息无关。

这个模型有两个特点:①分量 *I* 与图像的彩色信息无关;②分量 *H* 和 *S* 与人感受的方式紧密相连。这两个特点使得 HSI 模型非常适合于借助人的视觉系统来感知彩色特性的图像处理算法。

由 RGB 到 HSI 的转换公式如下:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{3}(R + G + B) \\ S = I - \frac{3}{R + G + B}[\min(R, G, B)] \\ H = \arccos\left(\frac{[(R - G) + (R - B)]/2}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}\right) \end{cases}$$

也可作相反的转换。

为简化计算公式,设 *S*、*I* 和 *R*、*G*、*B* 的取值范围均为  $[0, 1]$ 。对于其他取值范围,比如  $[0, 255]$  可作相应的线性变换。由 HSI 到 RGB 的变换公式如下:

(1) 当 *H* 在  $[0^\circ, 120^\circ]$  内时,

$$\begin{cases} R = I\left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)}\right] \\ G = 3I - (B + R) \\ B = I(1 - S) \end{cases}$$

(2) 当 *H* 在  $[120^\circ, 240^\circ]$  内时,

$$\begin{cases} R = I(1 - S) \\ G = I\left[1 + \frac{S \cos(H - 120^\circ)}{\cos(180^\circ - H)}\right] \\ B = 3I - (R + G) \end{cases}$$

(3) 当 *H* 在  $[240^\circ, 360^\circ]$  内时,

$$\begin{cases} R = 3I - (G + B) \\ G = I(1 - S) \\ B = I\left[1 + \frac{S \cos(H - 240^\circ)}{\cos(300^\circ - H)}\right] \end{cases}$$

彩色空间转换后,图像所用的颜色总数,或者其比特数保持不变。

## 3. YIQ 色彩系统

YIQ 色彩系统为欧洲的电视系统所采用,其中,**Y** 是指颜色的明视度(luminance),即亮度(brightness),其实就是图像的灰度值,而 **I** 和 **Q** 属于色调(chrominance),即描述图像色彩及饱和度的属性。RGB 与 YIQ 系统之间可以转换,对应关系如下: