

数字图像处理

原理与实践 (MATLAB版)

——左飞 / 著——

- ◀ 全面系统地介绍了数字图像处理技术的理论与方法，内容涉及15大核心话题。
- ◀ 详细讲解进行图像处理编程开发的具体思路与技术，并配有完整的MATLAB实现代码。
- ◀ 提供完备的在线支持与丰富的学习资源，便于读者深入研究和自我提升。



数字图像处理

原理与实践 (MATLAB版)

— 左飞 / 著 —

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了数字图像处理技术的理论与方法,内容涉及几何变换、灰度变换、图像增强、图像分割、图像去噪、小波变换、形态学处理、多尺度融合、偏微分方程应用、正交变换与图像压缩、边缘及轮廓检测、图像复原、图像去雾、多尺度空间构建与特征匹配等 15 大核心话题。工欲善其事,必先利其器。本书所有算法均配有完整的 MATLAB 实现代码,并以此为基础详细介绍了 MATLAB 中与图像处理有关的近 200 个函数的使用方法,便于读者学习与实践。此外,本书还提供了丰富的在线支持资源,方便为读者答疑解惑及提供辅助资料下载。

本书源于实践,贴近应用,又兼顾各层次读者需求,既可作为大专院校相关专业在校师生或工程技术人员参考书,亦可作为图像处理研究爱好者之自学教程。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理:原理与实践:MATLAB版/左飞著. —北京:电子工业出版社,2014.11
ISBN 978-7-121-24469-8

I. ①数… II. ①左… III. ①数字图象处理—Matlab 软件 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 230394 号

策划编辑:付睿

责任编辑:葛娜

印刷:北京京科印刷有限公司

装订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

开本:787×1092 1/16 印张:36

版次:2014 年 11 月第 1 版

印次:2014 年 11 月第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:89.00 元

邮编 100036

字数:722 千字 彩插:2



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



前 言

1. 引子

于本书之前，笔者已经在数字图像处理领域陆续出版了多部作品。彼时我的新作《数字图像处理：技术详解与 Visual C++ 实践》一书刚刚问世，余便开始筹划或许应该出一本用 MATLAB 来作为描述语言的数字图像处理书籍。此前的“Visual C++ 数字图像处理”系列已经出到了第三版，先后重印近十次，可以说在业界赢得了颇佳的成绩。许多读者纷纷来信与笔者讨论技术问题，交流心得感想。此外，据不完全统计，前两本图书的科技文献参考引用量已经超过百余篇次。另根据中国互动出版网的实际销售数据统计，前两个版本的图书自问世以来一直居于数字图像处理类图书畅销排行榜前五名之列（由于第三版刚刚问世暂无统计数据）。可见这一系列的图书在市场表现上也值得肯定。

当前，关于数字图像处理开发方面的书籍主要分为两大阵营，即 Visual C++（或 C/C++）和 MATLAB，且二者可谓各有千秋，不分伯仲。但笔者此前的作品却一直专注于 Visual C++ 环境下的数字图像处理技术。所以，在这里笔者也想同各位分享一下二者之于图像处理开发中的异同。

MATLAB 很适合做科学研究，借助它提供的各种功能强大的工具箱，图像处理编程将变得非常轻松，代码也更简短。MATLAB 中提供的许多现成可用的函数大大简化了实际开发过程，一个显而易见的事实就是用 MATLAB 进行图像处理编程甚至无须考虑内存的分配与回收这种琐碎的问题。

相对而言，使用 Visual C++ 进行图像处理开发难度较大，需要考虑的问题更多，很多矩阵运算函数都需要自己编写。读入不同格式和类型的图像数据，然后进行解码，这种问题也没有现成的方法。但是，Visual C++ 在工业开发中则更实用，可移植性、通用性以及效率表现都更优越。

就绝对的初学者而言，我还是建议他们从 Visual C++ 环境入手。MATLAB 用起来很简单、很方便，但是它掩盖了太多细节，不利于读者深入理解底层实现，也不利于读者打好基础。不积跬步，无以至千里。最初学习时如果基础不打牢，后续再讲什么创新其实都是纸上谈兵、空中楼阁。在读者对底层实现比较清楚的情况下，进行后续的科学研究的时，再去考虑使用 MATLAB 可能才是明智的选择。

以图像编解码为例。在 MATLAB 中，只需一个函数就能将图像读入，然后得到一个现成的像素矩阵。在这个过程中，就忽略了很多细节。而在 Visual C++ 中，如果不调用现成的函数库（例如 OpenCV），那么就需要自己编写解码函数。这时就不得不去考虑不同图像格式的编码方案和算法，考虑图像文件在存储器上到底是如何存储的等问题。这时才会知道原来图像被写进存储器的时候不是简简单单的一个像素矩阵，原来还有调色板、文件头等内容。

我经常喜欢拿武侠小说《天龙八部》中的一段情节来向读者说明此中的道理，相信读者对这部曾经被多次搬上银幕的金庸作品已经耳熟能详了。书中讲到有个名叫鸠摩智的番僧一心想练就绝世武学，而且他也算是个相当勤奋的人了。但是，他错就错在太过于急功近利，甚至使用道家的小无相功来催动少林绝技。看上去威力无比，而且可以在短时间内“速成”，但实则后患无穷。最终鸠摩智走火入魔，前功尽废，方才大彻大悟。这个故事其实就告诉我们打牢基础是非常重要的，特别是要取得更长足的发展，就更是要对基本原理刨根问底，力求甚解，从而做到庖丁解牛，烂熟于心。

所以，总结起来，笔者撰写本书的目的主要是考虑那些对于 Visual C++（或者 C/C++）编程不是特别熟悉，而对于 MATLAB 编程有一定基础，又希望深入学习图像处理技术的读者的实际需求，以期帮助他们深入剖析相关理论，并为他们继续深入研究助一臂之力。

2. 天书 VS. 儿歌三百首

说到这里，我想告诉读者本书并非一本 MATLAB 的入门书。更准确地说，本书是一本介绍数字图像处理技术的书，只不过书中的描述语言选择了 MATLAB。因此，我希望阅读和使用本书的读者应当具有一定的 MATLAB 基础。当然，笔者也确信无论你

现在处于图像处理学习的哪个层次，本书都会在某种程度上帮到你。之所以这样说，主要是因为本书关于理论部分的描述和讲解都是在畅销系列图书“Visual C++数字图像处理”数度再版后精心锤炼和筛选之后留存的精华部分。这些地方笔者均经过反复雕琢，力求做到深入浅出、翔实全面。

众所周知，数字图像处理的理论基础主要就是数学，而数学本身又是一个极其庞杂的系统，它的分支层出不穷，不计其数。读者现在所要学习的数字图像处理，至少涉及数学中三门主干课程的内容，即高等数学、线性代数和概率论。在本书中，读者会发现这些内容几乎无处不在，以高等数学中的泰勒公式为例，本书中就至少用到过三次以上。除了上述提到的大家在本科阶段就应学过的三门数学课程之外，本书还用到了复变函数、偏微分方程和泛函理论等内容。从这个角度说，数字图像处理对于很多学生而言，无异于“天书”。

霍金也说：“在书中每增加一条公式，读者就会流失一半”。如果你现在手捧着的是这样一部由公式罗列而成的天书，相信很多读者都会望而却步。当然，数学公式亦有数学公式的好处。从数学角度解释图像处理算法的原理，是深入到了算法本质层面的。如果不谈任何公式，而把如何处理一张图片的方法用文字描述的方式告诉读者也不是不可能的，但是这其实只是让读者“知其然，而不知其所以然”。这样的弊端就在于读者想进行更为深入的研究时，几乎难如登天。那么有没有什么方法能够调和这两者之间的矛盾，而把“天书”写得如同“儿歌三百首”一样通俗易懂呢？

笔者一直以把复杂晦涩的理论写得深入浅出、浅显明了为终极目标。但是要真正做到这一点实非易事，为此笔者也进行了诸多探索。所有数学公式集中爆发的地方必然都是读者学习上的薄弱环节和理解上的峻岭鸿沟。但本书绝非仅仅简单地罗列公式，为了帮助读者打牢根基，融会贯通，在写本书时，笔者主要做了三项工作：首先，给足背景的铺垫，而非凭空丢来一个公式。例如，本书在介绍 PM 方程时，为了让读者能够真正理解它的原理，笔者是从一个简单的物理现象开始一步步引导读者进行学习的；其次，在给出公式的同时，笔者基本都给出了最为浅显的证明过程，而且力求过程之详细。例如，在率失真理论的介绍中，对于这部分公式的证明，国内教材都是以詹森不等式为基础的，但是读者不禁又困惑了，詹森不等式为什么会成立呢？所以笔者在这些地方完全摒弃了詹森不等式，而是用初等数学中的基本不等式来开展有关证明，这无疑会大大减少读者心中的困惑；最后，在某些时候我们可能需要的是严密的数学证明，而有些时候可能需要的是感性的认识。笔者试图将两者有机地结合在一起，需要严密的时候就尽量严密，需要感性的时候就努力感性。例如，我们在推导欧拉-拉格朗日方程时，其实证明过程并不完全严格，但是从读者对于该公式的理解以及后续学

习的可开展性上，这种程度的解释可能才是最佳的方式。

尽管为了能把理论讲得更明白、更透彻，笔者查阅了许多资料，进行了诸多求索，但科技文章写作永远是留有遗憾的艺术。可能本书仍有许多未尽之处，可能本书还不能完全把“天书”降低到“儿歌三百首”那种地步，但笔者相信只要读者能够仔细研读本书，定能有所长进，有所收获。

3. 一些建议

为了使读者充分用好本书，提升自我，笔者也想给各位提点学习图像处理以及使用本书方面的建议。

纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行。

数字图像处理绝对是面向应用的技术，因此学习它的第一精要就是绝对不能“纸上谈兵”。特别是好的想法也要通过实践的检验和验证才能有说服力和实用价值。本书提供了涉及的全部算法的完整 MATLAB 实现代码，而读者在使用时切不可大行“拿来主义”，完全不假思索地照搬照抄。最好是可以亲自动手运行一下，这样既能帮助巩固所学之理论，又能增进动手能力。更重要的是，当读者面对实际的开发问题时心中也更有底气、更自信。当然，要想在编程开发时做到得心应手、游刃有余，必然是要以对理论的深刻认知和绝对领悟为前提的。因此，在面对每一个具体的算法时，读者都应当努力做到知其然，更知其所以然。而不能因一些模棱两可、似是而非的理解就沾沾自喜、自以为是。

合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土。

学习和研究的过程都是一个不断积累的过程。做高深学问当然应该成为每个学子的追求，但是这肯定不能成为你研究的开端。很多人习惯于接到一个问题时，马上查资料看当前学术界解决该问题的最先进方法是什么，然后一头扎进去。学术研究就像是一个接力的过程，即使最先进、最有效的方法也必然是基于前人的成果发展而来的。如果你一开始就钻到所谓的最新方法上，你可能很快就会发现了自己的困惑和不解实在太多了，这样往往会搞得自己筋疲力尽、事倍功半。不积跬步，无以致千里；不积小流，无以成江海。因此学习也应该讲究循序渐进，切忌妄图一蹴而就。特别是对于数字图像处理这个领域来说，很多当前流行的技术也都是在一些简单算法的合并重组之后发展而来的。例如 SIFT 特征检测中就用到了像直方图、高斯滤波等这些基础的算法。更重要的是，了解一个学科或者一门技术，应该设法理清它的发展脉络。要想明白前人的方法有哪些优点，又有哪些缺点，后来的改进方法是从哪个角度出发设计而来的。

如果理清了这个脉络，那么你在研究过程中才好把握准方向。这一点会在边缘检测那一章体现得尤为明显。

无冥冥之志者，无昭昭之明；无惛惛之事者，无赫赫之功。

数字图像处理的相关理论都是比较晦涩的、复杂的。对此读者务必要知难而上，挑硬骨头啃。要想后续能够取得一定的成绩，前期就必须劳其筋骨，饿其体肤。最开始可能会感觉很痛苦，但是这样做必然会使后续的道路更顺畅、更平坦。而在这个过程中，读者一是不要半途而废、浅尝辄止；二就是要沉得下心，沉得住气。志向越是高远，脚步就越是要踩稳走实。学习任何知识都不可能是一日之功，长期的积累往往必不可少。所以，不要因为一时不顺而灰心丧气。就像古人所说的：“试玉要烧三日满，辨材须待七年期；向使当初身便死，一生真伪复谁知？”特别是在研究陷入一时的困境时，更要坚持。其实每一次失败往往都是朝成功迈进了一步。而我们之所以会困惑，往往是因为不知道距离成功到底还有多远。但大家始终都应该相信，天道酬勤，付出总会有回报的。

4. 关于本书

白居易说：“文章合为时而著，歌诗合为事而作。”我想不管是写诗还是做文章都要有些现实意义。特别是对于类似数字图像处理这种发展非常迅猛的领域，每天都有新方法和新理论诞生，读者当然不能总是拘泥于最原始、最简单的一些知识。本书考虑到当前研究的一些热门话题，着重在读者深入研究时可能会遇到的重点、难点上花费了较多精力。类似频域变换（包括小波变换）、基于偏微分方程的应用以及图像特征检测等内容，尽管已经取得了长足的发展，但仍然是理论界的热门话题。这些内容的特点是，首先是对于数学要求高，理解起来比较费力；其次是许多读者在进行后续深入研究时往往又需要用到这些知识。因此，这部分内容也是建议读者重点研习的部分。本书在这些内容上花费了大量的笔墨，就是希望能够帮助读者叩开久闭的山门，同时也希望为读者挺进这些方兴未艾的领域披荆斩棘、扫除障碍。

本书在保持系列作品突出实践的特色基础之上，兼有深入浅出、通俗易懂的优点。在此基础上，本书详细地介绍了包括频域变换、几何变换、灰度变换、形态学处理、图像增强、图像分割、小波变换和偏微分方程降噪等十多个数字图像处理领域的核心话题，并配有完整的 MATLAB 实现代码。可以说，本书更适合期望对相关理论进行系统学习和深入研究的读者。

在本书写作过程中，笔者参考研读了众多先贤以及业界专家的著作，在此谨向他

们表示衷心的感谢。其中需要特别提及的是，暗通道图像去雾算法中用到的导向滤波代码来自微软亚洲研究院的何恺明博士；种子填充算法的部分代码，以及 SURF 特征检测函数代码来自荷兰特温特大学 Ir. D. Kroon 博士；基于 Hough 变换的直线检测部分，在不使用系统函数情况下获取的处理结果由美国马里兰大学的 Tao Peng 所编写之程序得到；图像的双边滤波程序代码和基于全变分的图像去噪代码最初版本分别来自布朗大学的 Douglas Lanman 博士和以色列理工学院的 Gilboa Guy 教授，作者稍有修改。另外，笔者在研究 KAZE 特征检测算法时，承蒙佐治亚理工学院的 Pablo F. Alcantarilla 博士不吝赐教，笔者深表感谢。最后笔者还要感谢的人有胡俊、向永歆、吴凯、何鹏，感谢他们在本书撰写过程中提供的无私帮助，以及对作者本人长久以来的大力支持。

欢迎读者就书中的问题同笔者展开交流，具体请访问笔者在 CSDN 上的博客 <http://blog.csdn.net/baimafujinji>，关于本书的勘误和补遗也将实时发布在此博客上。另外，书中所有示例程序的完整代码也全部可以在此博客上得到，具体请见“MATLAB 数字图像处理”专栏。本书所有代码均在 MATLAB 8.0 版本上测试通过，不同版本的程序在执行代码过程中可能存在差异，这一点请读者留意。此外，附录中还提供了本书中反复被使用到的几个数学知识点的详细介绍和证明过程，建议有深入学习需求的读者参阅。

自知论道需思量，几度无眠一文章。由于时间和能力有限，书中纰漏在所难免，真诚地希望各位读者和专家不吝批评斧正。

目 录

第1章 绪论	1	2.2 灰度线性变换	38
1.1 数字图像处理概述	1	2.2.1 基本原理	39
1.1.1 图像与数字图像	1	2.2.2 编码实现	41
1.1.2 数字图像处理研究的内容	6	2.3 灰度非线性变换	43
1.1.3 数字图像处理的应用	8	2.3.1 灰度对数变换	43
1.2 MATLAB 概述	9	2.3.2 灰度幂次变换	45
1.2.1 MATLAB 的发展	9	2.3.3 灰度指数变换	49
1.2.2 MATLAB 的特点	10	2.4 灰度拉伸	50
1.2.3 MATLAB 的结构	12	2.4.1 基本原理	50
1.3 在 MATLAB 中处理数字图像	13	2.4.2 编码实现	52
1.3.1 MATLAB 中的图像存储	13	2.5 灰度均衡	52
1.3.2 MATLAB 中的图像转换	18	2.5.1 基本原理	53
1.3.3 MATLAB 中图像的基本操作	21	2.5.2 编码实现	54
本章参考文献及推荐阅读材料	27	2.6 直方图规定化	55
第2章 图像的点运算	28	2.6.1 基本原理	55
2.1 灰度直方图	28	2.6.2 编码实现	56
2.1.1 灰度直方图简介	28	本章参考文献及推荐阅读材料	57
2.1.2 基本原理	31	第3章 图像的几何变换	58
2.1.3 编码实现	31	3.1 图像几何变换的基本理论	58
		3.1.1 图像几何变换概述	58

3.1.2 图像几何变换的数学描述	61	4.3 图像的高斯平滑	93
3.2 图像的平移变换	62	4.3.1 平滑线性滤波器	94
3.2.1 效果预览	62	4.3.2 高斯平滑的原理	94
3.2.2 基本原理	62	4.3.3 高斯分布	95
3.2.3 编程实现	63	4.3.4 高斯平滑的算法实现	98
3.3 图像的镜像变换	64	4.4 图像的中值滤波	99
3.3.1 效果预览	64	4.4.1 统计排序滤波器	99
3.3.2 基本原理	65	4.4.2 图像中值滤波的原理	100
3.3.3 编程实现	66	4.4.3 图像中值滤波的算法实现	102
3.4 图像的转置	67	4.5 图像的双边滤波	104
3.4.1 效果预览	67	4.6 图像的拉普拉斯锐化	109
3.4.2 基本原理	68	4.6.1 图像的锐化	109
3.4.3 编程实现	68	4.6.2 拉普拉斯锐化的原理	110
3.5 图像的缩放	69	4.6.3 拉普拉斯锐化的编码实现	110
3.5.1 效果预览	69	本章参考文献及推荐阅读材料	113
3.5.2 基本原理	69	第5章 图像的形态学处理	114
3.5.3 插值算法介绍	71	5.1 数学形态学	114
3.5.4 编程实现	74	5.2 一些必要的概念和符号约定	115
3.6 图像的旋转	75	5.3 图像的腐蚀	118
3.6.1 效果预览	75	5.3.1 腐蚀原理	119
3.6.2 基本原理	76	5.3.2 编程实现	123
3.6.3 编程实现	79	5.4 图像的膨胀	125
本章参考文献及推荐阅读材料	81	5.4.1 膨胀原理	125
第4章 图像的增强处理	82	5.4.2 编程实现	127
4.1 卷积积分与邻域处理	82	5.5 腐蚀和膨胀的性质及应用	128
4.1.1 理解卷积积分的概念	82	5.5.1 腐蚀和膨胀的代数性质	128
4.1.2 卷积应用于图像处理的原理	87	5.5.2 腐蚀和膨胀的应用	131
4.1.3 邻域处理的基本概念	88	5.6 开运算和闭运算	134
4.1.4 运用模板实现邻域处理	90	5.6.1 开运算	135
4.2 图像的简单平滑	91	5.6.2 闭运算	137
4.2.1 图像的简单平滑原理	92	5.6.3 编程实现	139
4.2.2 简单平滑的编码实现	92	5.6.4 开运算和闭运算的代数性质	140

5.7 图像形态学的其他运算	142	7.3 种子填充	197
5.7.1 击中/不击中运算	142	7.3.1 算法介绍	198
5.7.2 细化处理	144	7.3.2 编码实现	203
本章参考文献及推荐阅读材料	147	7.4 区域分割	209
第6章 边缘检测	148	7.4.1 区域分裂与合并	209
6.1 基本概念及思想	148	7.4.2 编程实现	212
6.1.1 边缘检测的基本概念	148	7.5 水域分割	214
6.1.2 边缘检测的基本思想	149	7.5.1 从必备的基本概念开始	214
6.2 基于梯度的常规方法	150	7.5.2 分水岭分割算法的原理	215
6.2.1 梯度算子及其离散化表示	150	7.5.3 标记控制的分水岭算法	218
6.2.2 用梯度算子进行边缘检测	153	本章参考文献及推荐阅读材料	224
6.2.3 带有方向信息的边缘检测	154	第8章 正交变换与图像压缩	225
6.3 拉普拉斯算子	157	8.1 傅里叶变换	225
6.4 基于 LoG 和 DoG 的边缘检测	162	8.1.1 傅里叶变换的数学基础	225
6.4.1 高斯拉普拉斯算子 (LoG)	162	8.1.2 傅里叶变换与傅里叶级数的 关系	229
6.4.2 高斯差分算子 (DoG)	165	8.1.3 数字图像的傅里叶变换	237
6.5 Canny 边缘检测算法	168	8.1.4 快速傅里叶变换的算法	239
6.5.1 Canny 准则	168	8.1.5 编程实现图像的快速傅里叶 变换	245
6.5.2 Canny 算法与实现	170	8.2 离散余弦变换	246
本章参考文献及推荐阅读材料	173	8.2.1 基本概念及数学描述	247
第7章 图像分割	174	8.2.2 离散余弦变换的快速算法	249
7.1 豪格变换	174	8.2.3 离散余弦变换的意义与应用	251
7.1.1 平面坐标系的转换	174	8.3 沃尔什-哈达玛变换	254
7.1.2 Hough 变换的思想	177	8.3.1 沃尔什函数	254
7.1.3 直线的 Hough 变换	177	8.3.2 离散沃尔什变换及其快速 算法	257
7.1.4 圆的 Hough 变换	185	8.3.3 沃尔什变换的应用	262
7.2 轮廓跟踪	187	8.4 卡洛南-洛伊变换	265
7.2.1 区域表示方法	187	8.4.1 一些必备的基础概念	265
7.2.2 单区域跟踪	192	8.4.2 主成分变换的推导	267
7.2.3 多区域跟踪	193		
7.2.4 编码实现	195		

8.4.3 编码实现主成分变换	271	第 10 章 偏微分方程与图像降噪	346
8.4.4 应用 K-L 变换实现图像 压缩	275	10.1 PM 方程及其应用	346
本章参考文献及推荐阅读材料	279	10.1.1 一维热传导方程	346
第 9 章 小波变换及其应用	280	10.1.2 各向异性扩散方程	352
9.1 子带编码	280	10.1.3 PM 扩散方程的实现	359
9.1.1 数字信号处理基础	280	10.1.4 加性算子分裂	363
9.1.2 多抽样率信号处理	284	10.2 TV 方法及其应用	374
9.1.3 图像的子带分解	294	10.2.1 泛函与变分法	374
9.2 哈尔函数与哈尔变换	301	10.2.2 全变分模型	379
9.2.1 哈尔函数的定义	301	10.2.3 TV 算法的数值实现	386
9.2.2 哈尔函数的性质	302	10.2.4 基于 TV 的图像降噪实例	387
9.2.3 酉矩阵与酉变换	303	本章参考文献及推荐阅读材料	388
9.2.4 二维离散线性变换	304	第 11 章 图像复原	390
9.2.5 哈尔基函数	305	11.1 从图像的退化到复原	391
9.2.6 哈尔变换	308	11.1.1 图像的退化模型	391
9.3 小波的数学基础	311	11.1.2 连续的退化模型	392
9.3.1 小波的历史	312	11.1.3 离散的退化模型	393
9.3.2 理解小波的概念	313	11.2 常规的图像复原示例	395
9.3.3 多分辨率分析	315	11.2.1 循环矩阵的对角化	395
9.3.4 小波函数的构建	319	11.2.2 逆滤波的基本原理	397
9.3.5 小波序列展开	322	11.2.3 维纳滤波及其应用	398
9.3.6 离散小波变换	323	11.2.4 露茜-理查德森算法	402
9.3.7 连续小波变换	323	11.3 暗通道优先的图像去雾算法	406
9.3.8 小波的容许条件与基本 特征	326	11.3.1 暗通道的概念与意义	407
9.4 快速小波变换	327	11.3.2 暗通道去雾霾的原理	409
9.4.1 快速小波正变换	327	11.3.3 算法实现与应用	412
9.4.2 快速小波逆变换	332	11.3.4 算法不足及改进方向	414
9.4.3 图像的小波变换	334	本章参考文献及推荐阅读材料	414
9.5 小波在图像处理中的应用	339	第 12 章 图像的特征检测	416
本章参考文献及推荐阅读材料	344	12.1 SIFT 特征检测	416
		12.1.1 尺度空间构造	417
		12.1.2 空间极值检测	421

12.1.3 方向赋值	424	12.3 KAZE 特征检测	438
12.1.4 特征描述	426	12.3.1 非线性扩散滤波	439
12.1.5 算法实现	429	12.3.2 尺度空间的构造	440
12.2 SURF 特征检测	430	12.3.3 特征检测与描述	441
12.2.1 积分图	430	本章参考文献及推荐阅读材料	443
12.2.2 DoH 近似	431	附录 A 必不可少的数学基础	445
12.2.3 尺度空间表达	434	附录 B 图像编码的理论基础	532
12.2.4 特征描述	435		
12.2.5 算法实现	437		

1

绪 论

欢迎学习数字图像处理技术。绪论部分将向读者介绍一些较为基础的概念，包括数字图像处理的研究内容和应用领域等问题。同时，本章还将对 MATLAB 进行初步的介绍，从而让读者对其有一个基本的认识。本书后续各章节的示例程序都在 MATLAB 环境下开发完成。因此通过本章的学习，读者将初步建立对于数字图像处理技术以及 MATLAB 软件的感性认识。而绪论中所讨论的许多内容都将会在本书后续章节中得到更为详细的研究和论述。

1.1 数字图像处理概述

本节介绍数字图像处理方面的一些概念，从认识图像与数字图像开始，读者将了解到数字图像处理所研究和考虑的问题，以及数字图像处理技术的应用等内容。

1.1.1 图像与数字图像

所谓图像可以解释为绘制、摄制或印制的形象。而图像在计算机中是以数字的方式存储与工作的，换句话说，数字图像其实是用数字信号来表示的图像。数字图像相当于一个 $m \times n$ 的矩阵，也可以形象化地将数字图像比喻成一个 $m \times n$ 的网格，而一幅图像的每个网格则用一定的颜色元素去填充，就形成了我们所看到的完整图像。其中 $m \times n$ 称为图像的分辨率，显然分辨率越高，图像就越逼真。每个网格中的颜色只能是所有可表达的颜色中的一种，这个过程称为图像颜色的离散化。颜色数越多，用以表示颜色的位数越长，图像色彩就越逼真。作为以数字形式进行存储和处理的图像，数字图像的优点在于，通过计算机就能实现对图像进行各种处理和加工，还可以将它

在网上传输，甚至可以多次复制而不失真。相比之下，模拟图像则以一个连续的形式存储数据。

我们还可以用另外一种形式来定义图像和数字图像。通常可以把一幅图像定义为平面上的位置点与其对应的某种属性的关系。用数学的方法可以通过函数 $f(x, y)$ 来表示，其中 x 和 y 是平面上的位置点坐标，而 $f(x, y)$ 表示这一点的图像的灰度或强度。以这种数学描述为基础来定义数字图像的概念是非常容易的，即当平面上的位置点与其对应的灰度或强度的关系满足函数 $f(x, y)$ ，且 x 、 y 与 $f(x, y)$ 同时为有限的、离散的数值时，该图像就称为数字图像。

在实际生活中，数字信号和模拟信号的区别也会被经常提到，即数字信号总是离散存在的，而模拟信号则是连续变化的。模拟信号与数字信号的例子十分常见。当声音录制在磁带中时，声音就是以模拟信号的形式被记录下来的；而当声音被转换成 MP3 格式后存储在音乐播放器中时，它就以数字信号的形式存在。同样，当影像被胶片记录下来时，它是以模拟信号的形式存在的；而数码相机拍摄的图像则是以数字信号的形式存在的。

数字图像处理 (Digital Image Processing) 是指通过计算机对图像进行降噪、增强、复原、分割、提取特征等处理的方法和技术。而数字图像是由有限的元素组成的，每一个元素都有一个特定的位置和色彩属性，通常把这些元素称为图像元素，简称像素。像素是广泛用于表示数字图像元素的词汇。

数字图像处理的历史可以追溯到近百年以前，大约在 1920 年的时候，图像首次通过海底电缆从英国伦敦传送到美国纽约。图像处理的首次应用是为了改善伦敦和纽约之间海底电缆发送的图片质量，那时就应用了图像编码，被编码后的图像通过海底电缆传送至目的地，再通过特殊设备进行输出。这是一次历史性的进步，传送一幅图片的时间从原来的一个多星期减少到了 3 小时。

1946 年 2 月，世界上第一台电子计算机 ENIAC 在美国的宾夕法尼亚大学诞生，该项目的负责人是莫契利 (John William Mauchly) 和埃克特 (J. Presper Eckert)。ENIAC 一共使用了 17 468 个真空管、7200 个晶体二极管、1500 个继电器、10 000 个电容器，还有大约 500 万个手工焊接头。它的重量达 27 吨，占地 167 平方米，约有两间教室那么大，运行时耗电 150 千瓦，每秒可执行 5000 次简单加减操作。

1950 年，美国的麻省理工学院制造出了第一台配有图形显示器的电子计算机——旋风 I 号 (Whirlwind I)，如图 1-1 所示。旋风 I 号的显示器使用一个类似于示波器的阴极射线管 (Cathode Ray Tube, CRT) 来显示一些简单的图形。1958 年，美国 Calcomp

公司研制出了滚筒式绘图仪，GerBer 公司把数控机床发展成为平板式绘图仪。在这一时期，电子计算机都主要应用于科学计算，而为这些计算机配置的图形设备也仅仅是作为一种简单的输出设备。

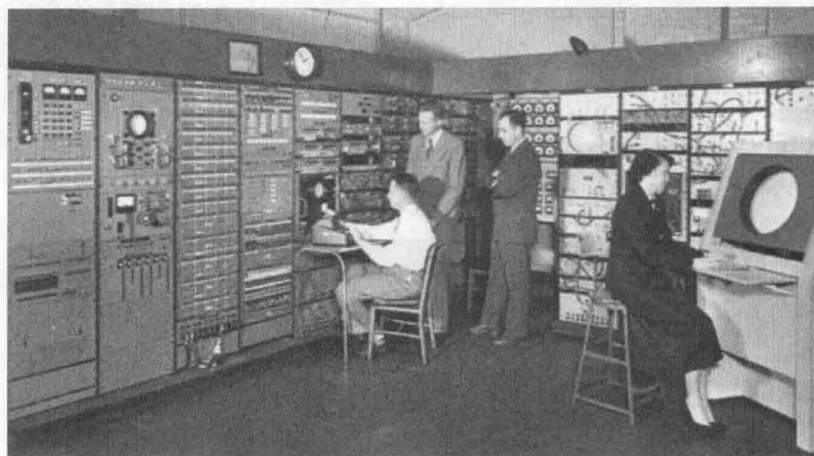


图 1-1 旋风 I 号计算机

数学家冯·诺依曼 (John von Neumann) 提出的“程序存储、顺序执行”思想为现代计算机的发展奠定了理论基础，此后计算机技术突飞猛进、日新月异，并经历了从电子管到晶体管、集成电路、大规模集成电路，再到超大规模集成电路等阶段。时至今日，计算机已经走进千家万户，并融入到人们生活的方方面面。

随着计算机技术的进步，数字图像处理技术也得到了很大的发展。1962 年，当时还在麻省理工学院攻读博士学位的伊凡·苏泽兰 (Ivan Sutherland) 成功地开发了具有划时代意义的“画板” (Sketchpad) 程序。而这正是有史以来第一个交互式绘图系统，同时也是交互式计算机绘图的开端。从此计算机和图形图像被更加紧密地联系在一起。鉴于伊凡·苏泽兰为计算机图形学创立所做出的杰出贡献，他于 1988 年被授予计算机领域最高奖——图灵奖。

1964 年，美国加利福尼亚的喷气推进实验室用计算机对“旅行者七号”太空船发回的大批月球照片进行处理，以校正航天器上摄影机中各种类型的图像畸变，收到了明显的效果。在后来的宇航空间技术中，数字图像处理技术都发挥了巨大的作用。

到了 20 世纪 60 年代末期，数字图像处理已经形成了比较完善的学科体系，这套理论在 20 世纪 70 年代发展得十分迅速，并开始应用于医学影像和天文学等领域。1972 年，美国物理学家阿伦·马克利奥德·柯麦科 (Allan MacLeod Cormack) 和英国电机工程师戈弗雷·纽博尔德·豪恩斯弗尔德 (Godfrey Newbold Housfield) 发明了轴向断层术，并将其用于头颅诊断。世界上第一台 X 射线计算机轴向断层摄影装置由 EMI