

# 基于 **FPGA** 的数字图像处理 原理及应用

THE PRINCIPLE AND APPLICATION OF  
DIGITAL IMAGE PROCESSING BASED ON FPGA

牟新刚 周晓 郑晓亮◎著

本书偏向于工程应用，提供大量关于如何利用 FPGA 实现图像处理算法的实例及源代码；在仿真测试章节设计了一种通用的完善的测试系统，并利用此测试系统在每一章的仿真测试环节对所设计算法进行严格的测试和验证。

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 基于 FPGA 的数字图像处理原理及应用

牟新刚 周 晓 郑晓亮 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书首先介绍 FPGA 程序设计和图像与视频处理的关键基础理论, 然后通过实例代码详细讲解了如何利用 FPGA 实现直方图操作中的直方图统计/均衡化/线性拉伸/规定化、线性滤波器操作中的均值滤波器、Sobel 算子(滤波、求模、求角度)、非线性滤波器操作中的排序类算法/形态学滤波、图像分割算法中的局部自适应分割/Canny 算子等。本书在仿真测试部分设计了一种完善的通用测试系统, 并利用此测试系统在每一章的仿真测试环节对所设计算法进行严格的测试和验证。本书在最后一章介绍了在视频处理领域常见的输入/输出接口。

本书偏向于工程应用, 在书中有大量关于如何利用 FPGA 实现图像处理算法的实例及代码, 并对这些算法的原理及其实现过程、算法测试等做了详细的介绍, 全部的算法都进行了仿真测试验证。本书提供实例的全部源代码, 可登录以下网址免费获取: <http://www.hxedu.com.cn> (华信资源教育网)。

本书适用于需要利用 FPGA 进行图像处理和视频分析的学者和工程开发人员。读者需要具备一定的嵌入式设计及 FPGA 设计的基础知识, 特别是 Verilog 语言的语法基础。

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

基于 FPGA 的数字图像处理原理及应用/牟新刚, 周晓, 郑晓亮著. —北京: 电子工业出版社, 2017.1  
ISBN 978-7-121-29335-1

I. ①基… II. ①牟…②周…③郑… III. ①数字图象处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 156215 号

责任编辑: 郭穗娟

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 28.25 字数: 720 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 66.00 元

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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询方式: (010)88254502, [guosj@phei.com.cn](mailto:guosj@phei.com.cn)

# 前 言

最近几年图像处理与机器视觉的发展非常迅速，图像处理领域也被认为是未来几十年最有前途的领域之一。

随着现代图像及视频处理技术的不断发展，人们对图像处理提出了新的要求，图像处理系统的硬件体积越来越小，实时性也越来越好。特别是最近几年，图像的分辨率和扫描频率都有了较大范围的提升，1080P 分辨率的视频已经非常流行，2K 甚至 4K 分辨率的图像也在火热发展中。目前，比较火热的 VR 技术更是需要双通道的高分辨率、高扫描频率的视频数据及处理能力。

这些新的要求给之前的图像处理平台带来了严重的挑战，传统的图像处理技术主要基于软件平台，一般运行在 Windows 平台的 PC 上。虽然现代 PC 的主频较高，但是用软件的串行化处理方法进行图像处理的效率还是非常低的。例如，用 PC 处理一个比较复杂的高分辨率图像处理算法花费半个小时或更多时间也是常见的事情。然而，对于实时图像处理，例如实时跟踪和视频显示，这个处理速度是远远不够的。

正是由于这个原因，嵌入式图像处理技术得到了广泛的应用，一些带有图像视频处理组件的嵌入式处理器开始在图像处理领域大显身手，例如，TI 公司生产的达芬奇系列的 DSP。这些组件实际上是图像处理硬核，但是大部分是标准化接口的硬核，针对数字视频、图像采样处理、视觉分析等应用进行了剪裁和优化。对于一个特定的图像处理任务，需要利用其内部的处理器来进行串行化软件处理。多核处理器的发展使得多个图像处理任务可以同时执行，也大大提高了图像处理的实时性。尽管这些嵌入式处理器的发展加快了图像处理和视频分析的实际应用，但其本质上仍为软件处理的串行方式，难以满足通用图像处理中大数据量计算的需求。

随着成像传感器技术和信号处理技术的迅猛发展，图像的分辨率、帧频和像元有效位数越来越高，图像处理算法越来越复杂，图像处理结果的实时性要求越来越高，基于 PC 和 DSP 软件平台的图像处理系统已难以满足要求。由于图像处理算法天然的并行性，FPGA 的加入给图像处理带来了新的活力，特别是针对图像处理底层一些并行特性的图像处理算法。例如二维卷积，FPGA 可以保证在极低主频下得到比 DSP 平台快得多的处理速度，利用其流水线技术可以在每个时钟输出一个处理后像素。然而，FPGA 并不适合进行串行化处理算法和部分其他上层算法。因此，目前 DSP+FPGA 平台是图像处理平台的主流。此外，FPGA 在一些低成本的机器视觉领域也得到了广泛的应用。例如，著者所在实验室研究的利用线列 CCD 和激光实现高精度位移测量项

目, 该项目利用 FPGA 实现 CCD 时序驱动、A/D 转换和测量算法实现, 并实现高速接口与上位机。

在 FPGA 上实现一个图像处理算法包括确定具体算法和对其进行并行性改造、将算法中计算和存储需求与 FPGA 内部可用资源相映射、将算法映射到硬件结构上等步骤。然而, 目前只有很少的公开资料可供初学者学习该领域的知识, 可以让初学者深入了解设计思路、过程、代码的文献资料更难找到。

为改变这一现状, 本书从 FPGA 图像处理理论和分析入手, 重点讲解图像处理算法移植到 FPGA 中的基本思路和方法, 突出工程应用。每一章均附有 C/C++ 实现代码, 同时用循序渐进、自顶向下的方式设计 FPGA 算法模块, 针对每一个模块设计了详细的实现框图, 确保读者能理解算法设计的原理。此外, 每个算法都配有 Verilog 实现方法, 并给出仿真结果。本书还提出了一个通用的利用 Modelsim 和 VS 实现图像处理的仿真测试平台。

本书内容概述如下:

(1) 第 1~5 章是基础章节, 重点介绍数字图像处理和 FPGA 程序设计的基础知识。

第 1 章简单介绍了图像处理的基础知识, 包括图像处理的发展现状, 还地介绍了图像从获取到显示存储的基本流程。

第 2 章首先介绍了 FPGA 的发展现状, 生产厂家及其开发流程。接着介绍了基于 FPGA 的图像处理的基本开发流程。

第 3 章主要介绍了在 FPGA 中应用的编程语言。本章并没有详细介绍 Verilog 语法, 而是从工程应用的角度介绍常用的设计方法和实例。

第 4 章主要介绍了把软件算法映射到 FPGA 常用的技巧。首先介绍了应用较广泛的流水线设计方法, 接着介绍了 FPGA 硬件计算技术, 包括一些常用的计算转换、查找表、浮点计算、Cordic 计算等方法。最后介绍了在图像处理中用途非常多的存储器映射, 并提出了一些其他设计技巧。

第 5 章首先简要介绍了仿真测试软件 Modelsim 的使用, 接着重点介绍了一个通用的视频图像处理仿真测试系统。这个测试系统包括完整的视频模拟、视频捕获, 以及 testbench 设计, 并结合基于 MFC 的 VC 上位机来实现测试系统的搭建。

(2) 第 6~10 章主要介绍算法实现。

第 6 章介绍直方图操作, 主要介绍几种常用直方图操作的 FPGA 实现: 直方图统计、直方图均衡、直方图规定及直方图线性拉伸。

第 7 章介绍基于图像处理的线性滤波。首先, 介绍了均值滤波算法、高斯滤波算法、Sobel 算子及 FFT 等常见的几种线性滤波原理。其次, 介绍了均值滤波算法和 Sobel 算子的 FPGA 实现。

第 8 章主要介绍基于图像处理的非线性滤波算法, 包括排序滤波的基本原理及其



FPGA 实现方法。

第 9 章主要介绍基于图像处理的形态学滤波算法，包括形态学滤波的基本概念，包括形态学膨胀、形态学腐蚀、开运算及闭运算等。重点介绍了基于 FPGA 的 Tophat 滤波的原理及实现方法。

第 10 章主要介绍基于图像处理的常见的分割算法，包括全局阈值分割、局部自适应阈值分割及 Canny 算子。重点介绍基于 FPGA 的局部自适应阈值分割和 Canny 算子的设计与实现。

第 11 章主要介绍与视频和图像处理相关的输入/输出接口，包括 CameraLink、火线接口、USB 接口、千兆以太网等视频输入接口和 CVT 标准，以及 VGA, PAL, DVI, HDMI 等视频输出接口。其中，给出了 VGA 和 PAL 接口的 Verilog 代码实现。

为了确保读者能够快速地了解 FPGA 图像处理设计方法，本书提供了算法章节的全部源代码。

本书由武汉理工大学机电工程学院牟新刚、周晓和郑晓亮合著，全书由牟新刚统稿。

本书参考了相关著作及资料的部分内容和图表，部分技术资料取材于互联网，在此对这些文献的作者一并表示谢意。尽管我们为编写本书付出了心血和努力，但仍然存在一些疏漏及欠妥之处，敬请读者批评指正。

著者

2016.5

# 目 录

第 1 章 图像处理基础 .....	1
1.1 数字图像处理简介 .....	1
1.1.1 图像采样 .....	1
1.1.2 图像量化 .....	2
1.1.3 数字图像处理 .....	3
1.2 数字图像处理系统 .....	4
1.2.1 图像处理系统构成 .....	4
1.2.2 原始图像获取 .....	6
1.2.3 图像传感器接口 .....	16
1.2.4 图像处理流水线 .....	17
1.2.5 图像与视频压缩 .....	19
1.2.6 视频显示处理 .....	26
第 2 章 FPGA 与图像处理 .....	32
2.1 使用 FPGA 的原因 .....	32
2.2 FPGA 技术优势 .....	33
2.3 FPGA 的发展历程 .....	34
2.4 FPGA 生产厂家及其产品 .....	35
2.4.1 Altera .....	35
2.4.2 Xilinx .....	37
2.4.3 Lattice .....	37
2.4.4 Atmel .....	38
2.4.5 Actel .....	38
2.5 FPGA 开发流程 .....	38
2.5.1 FPGA 设计方法 .....	38
2.5.2 典型的 FPGA 开发流程 .....	39
2.6 FPGA 常用开发工具 .....	44
2.6.1 代码输入工具 .....	45
2.6.2 综合工具 .....	46
2.6.3 仿真工具 .....	47
2.6.4 实现与优化工具 .....	47
2.6.5 EDA 工具 .....	48
2.7 FPGA 图像处理的开发流程 .....	49
2.7.1 需求分析及问题描述 .....	49
2.7.2 软件算法设计及验证 .....	50
2.7.3 硬件平台设计 .....	51
2.7.4 FPGA 映射 .....	52
2.7.5 仿真及验证 .....	54
第 3 章 FPGA 编程语言 .....	55
3.1 HDL 语言简介 .....	55
3.2 模块化设计 .....	56
3.3 可移植性 .....	57
3.4 不可移植性 .....	61
3.5 测试逻辑 .....	62
3.6 冗余逻辑 .....	63
3.7 常用语法 .....	63
3.7.1 参数化 .....	63
3.7.2 条件编译 .....	68
3.7.3 位宽匹配 .....	69
3.7.4 二维数组 .....	69
3.8 应用实例 .....	70
3.8.1 信号边沿检测 .....	70
3.8.2 多拍处理 .....	72
3.8.3 图像行列计数 .....	73
第 4 章 映射技术 .....	77
4.1 系统结构 .....	77
4.1.1 流水线设计 .....	77
4.1.2 并行阵列 .....	81
4.2 计算技术 .....	82
4.2.1 算法转换 .....	82
4.2.2 近似计算 .....	83

4.2.3	增量更新.....	85	6.5.2	FPGA 直方图均衡化.....	192
4.2.4	查找表.....	85	6.5.3	FPGA 直方图线性拉伸.....	203
4.2.5	浮点计算.....	89	<b>第 7 章</b>	<b>线性滤波器.....</b>	<b>214</b>
4.2.6	Cordic 技术.....	96	7.1	线性滤波.....	214
4.3	存储器映射.....	103	7.1.1	均值滤波.....	214
4.3.1	帧缓存.....	104	7.1.2	高斯滤波.....	216
4.3.2	行缓存.....	105	7.1.3	Sobel 算子.....	219
4.3.3	异步缓存.....	113	7.1.4	离散傅里叶变换.....	222
4.3.4	增加存储器带宽.....	114	7.2	基于 FPGA 的均值滤波.....	227
4.3.5	存储器建模与仿真.....	115	7.2.1	整体设计与模块划分.....	227
4.4	其他设计技巧.....	116	7.2.2	子模块设计.....	228
4.4.1	合理处理参数.....	116	7.2.3	Verilog 代码设计.....	232
4.4.2	资源及模块复用.....	117	7.2.4	仿真与调试结果.....	243
4.4.3	防止亚稳态.....	118	7.3	基于 FPGA 的 Sobel 算子.....	247
<b>第 5 章</b>	<b>系统仿真.....</b>	<b>121</b>	7.3.1	整体设计与模块划分.....	247
5.1	Modelsim 使用基础.....	121	7.3.2	Sobel 模板计算电路.....	249
5.1.1	Modelsim 简介.....	121	7.3.3	基于 Cordic 的坐标系转换 电路.....	251
5.1.2	Modelsim 图形界面及 仿真示例.....	122	7.3.4	Verilog 代码设计.....	257
5.1.3	使用脚本命令来加速 仿真.....	133	7.3.5	仿真与调试结果.....	274
5.1.4	其他加速仿真的方法.....	136	<b>第 8 章</b>	<b>非线性滤波器.....</b>	<b>280</b>
5.2	视频图像处理仿真测试系统.....	136	8.1	统计排序滤波.....	280
5.2.1	仿真测试系统框架.....	136	8.2	基于 FPGA 的统计排序滤波器.....	282
5.2.2	视频时序模拟.....	137	8.2.1	并行全比较排序法原理.....	282
5.2.3	视频捕获模拟.....	145	8.2.2	整体设计与模块划分.....	285
5.2.4	MFC 程序设计.....	157	8.2.3	子模块设计.....	286
5.2.5	通用 testbench.....	161	8.2.4	Verilog 代码设计.....	288
<b>第 6 章</b>	<b>直方图操作.....</b>	<b>167</b>	8.2.5	仿真与调试结果.....	298
6.1	灰度直方图.....	167	<b>第 9 章</b>	<b>形态学滤波.....</b>	<b>303</b>
6.2	直方图均衡化.....	169	9.1	形态学滤波简介.....	303
6.3	直方图规定化.....	172	9.2	形态学滤波的基本应用.....	304
6.4	直方图拉伸.....	175	9.3	基于 FPGA 的 Tophat 滤波设计.....	311
6.5	基于 FPGA 的直方图操作.....	179	9.3.1	顶层框架设计.....	311
6.5.1	FPGA 直方图统计.....	179	9.3.2	子模块设计.....	312





9.3.3 Verilog 代码设计 .....	317	10.5.2 滞后阈值分割电路设计 ...	381
9.3.4 仿真及调试结果 .....	337	10.5.3 Verilog 代码设计 .....	382
<b>第 10 章 图像分割 .....</b>	<b>341</b>	10.5.4 仿真调试结果 .....	390
10.1 图像分割简介 .....	341	<b>第 11 章 视频接口 .....</b>	<b>391</b>
10.2 基于阈值的分割 .....	341	11.1 视频输入接口 .....	391
10.2.1 全局阈值分割 .....	341	11.1.1 模拟视频输入 .....	391
10.2.2 局部自适应阈值分割 .....	344	11.1.2 CameraLink 接口 .....	394
10.3 基于边缘的分割 .....	347	11.1.3 USB 接口 .....	399
10.3.1 Canny 算子 .....	347	11.1.4 FireWire 接口 .....	401
10.3.2 Canny 算子的计算步骤 ...	347	11.1.5 GigE Vision™接口 .....	407
10.4 基于 FPGA 的局部自适应分割 .....	356	11.1.6 直接接口 .....	410
10.4.1 算法转换 .....	357	11.2 视频输出接口 .....	411
10.4.2 FPGA 结构设计 .....	358	11.2.1 CVT 标准 .....	411
10.4.3 子模块设计 .....	359	11.2.2 VGA .....	416
10.4.4 Verilog 代码设计 .....	363	11.2.3 PAL .....	425
10.4.5 仿真与调试 .....	371	11.2.4 DVI/HDMI .....	433
10.5 基于 FPGA 的 Canny 算子设计 ...	378	<b>参考文献 .....</b>	<b>441</b>
10.5.1 非最大值抑制电路设计 ...	378		

# 第 1 章 图像处理基础

## 1.1 数字图像处理简介

光作用于视觉器官，使其感受细胞兴奋，其信息经视觉神经系统加工后便产生视觉（vision）。通过视觉，人和动物感知外界物体的大小、明暗、颜色、动静，获得对机体生存具有重要意义的各种信息。至少有 80% 以上的外界信息经视觉获得，视觉可以说是人和动物最重要的感觉。

图像作为人类感知世界的视觉基础，是人类获取信息、表达信息和传递信息的重要手段。数字图像处理即用计算机对图像进行处理的发展历史并不长。数字图像处理技术源于 20 世纪 20 年代时通过海底电缆从英国伦敦到美国纽约传输了一幅照片，采用了数字压缩技术。然而，由于当时的计算技术和存储空间的限制，基于计算机的图像处理并没有得到很快的发展。直到 20 世纪 50 年代，当时的美国国家标准局的扫描仪第一次被加入一台计算机中，用于进行边缘增强和模式识别的早期研究。在 20 世纪 60 年代，处理大量对从卫星和空间探索取得的大尺寸图像的需求直接推动了美国航空航天局对图像处理的研究。与此同时，高能粒子的物理研究，需要对大量的云室照片进行处理以捕获感兴趣的事件。随着计算机计算能力的增加及计算成本的降低，数字图像处理的应用范围呈爆炸式增长，从工业检测到医疗影像，都称为数字图像处理的应用领域。

### 1.1.1 图像采样

多数图像传感器（如 CCD 等）的输出是连续的电压波形信号，这些波形的幅度和空间特性都与其所感知的光照有关。为了产生一幅数字图像，我们需要把连续的感知数据转换为数字形式，这个转换的过程被称为图像采样和量化。

采样和量化的过程如图 1-1 所示。

采样频率是指 1 秒内采样的次数（即图 1-1 中采样间隔的倒数），它反映了采样点之间的间隔大小。采样频率越高，得

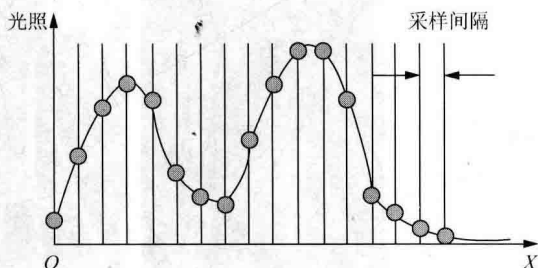


图 1-1 图像采样过程

到的图像样本越逼真，图像的质量越高，但要求的存储量也越大。图 1-2 (a)、(b)、(c) 是采样间隔分别为 16s、32s、64s 采样所获得的图像。

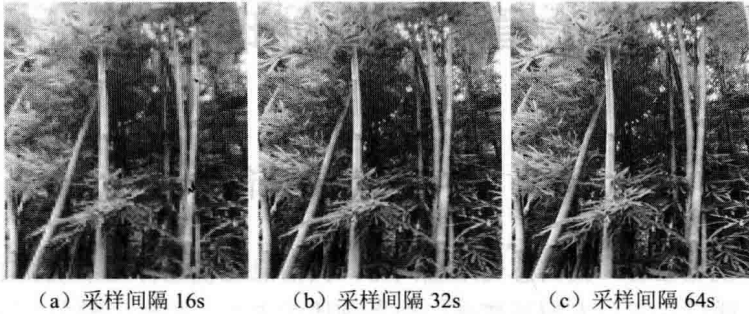


图 1-2 以不同分辨率采样获得的数字图像

在进行采样时，采样点间隔大小的选取很重要，它决定了采样后的图像能否真实地反映原图像的程度。一般来说，原图像中的画面越复杂，色彩越丰富，则采样间隔应越小。由于二维图像的采样是一维的推广，根据信号的采样定理，要从取样本中精确地复原图像，可得到图像采样的奈奎斯特（Nyquist）定理：图像采样的频率必须大于或等于源图像最高频率分量的两倍。

### 1.1.2 图像量化

量化是指要使用多大范围的数值来表示图像采样之后的每一个点。量化的结果是图像能够容纳的颜色总数，它反映了采样的质量。

例如：如果以 4 位存储一个点，就表示图像只能有 16 种颜色；若采用 16 位存储一个点，则有  $2^{16}=65536$  种颜色。因此，量化位数越来越大，表示图像可以拥有更多的颜色，自然可以产生更为细致的图像效果。但是，也会占用更大的存储空间。两者的基本问题都是视觉效果和存储空间的取舍。图 1-3 给出了量化级数分别为 2，8，64 所获得的数字图像。

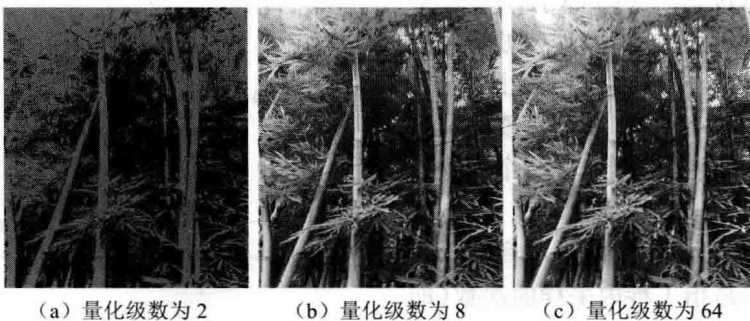


图 1-3 以不同的量化深度采样获得的数字图像

在实际应用中,常常用8位,24位和32位数字来存储一个像素。8位图像也就是常说的灰度图像,这个灰度图像包含了一幅图像的主要亮度信息。一般情况下,对数字图像进行算法处理,通常会将图像转换为灰度图像进行处理。24位图像也就是常说的真彩图像,包括RGB3个通道的颜色信息。32位的图像还包含了Alpha通道,用来表示图像的透明度。此外,在红外图像的处理中,通常用14位的数字来表示一个像素。

从图像传感器出来的信号经过采样和量化之后,便获得了一系列的数字图像。这个数字图像通常情况下被取样为一个二维阵列 $f(x,y)$ ,该阵列包含 $M$ 列和 $N$ 行,其中 $(x,y)$ 是离散坐标, $M$ 也就是所说的图像宽度, $N$ 是图像的高度。 $(x,y)$ 的取值范围为

$$0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1$$

通常情况下,用一个二维矩阵来表示这个数字图像,如图1-4所示。

一般情况下,数字图像的原点位于左上角。数字图像的扫描方式是从左上角开始向右扫描,扫描完一行之后转到下一行的最左侧开始扫描,一直到达图像的右下角,即 $x$ 坐标轴方向为自左向右, $y$ 坐标轴方向为自上到下。这与传统的笛卡儿坐标系还是有区别的,如图1-5所示。

$$\begin{pmatrix} f(0,0) & f(1,0) & \cdots & f(M-1,0) \\ f(0,1) & f(1,1) & \cdots & f(M-1,1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(0,N-1) & & \cdots & f(M-1,N-1) \end{pmatrix}$$

图1-4 用矩阵表示的二维数字图像



图1-5 数字图像的坐标轴方向

### 1.1.3 数字图像处理

获得图像的下一步就是尽快对获得数字图像进行预期目的的处理。对一幅图像来说,从一个状态得到另一个状态的图像处理操作序列称为图像处理算法。

一般来说,数字图像处理常用方法有以下几种:

(1) 图像变换。由于图像阵列很大,直接在空间域中进行处理,涉及计算量很大。因此,往往采用各种图像变换的方法,例如傅里叶变换、沃尔什变换、离散余弦变换等间接处理技术,将空间域的处理转换为变换域处理,不仅可减少计算量,而且可获

得更有效的处理（如傅里叶变换可在频域中进行数字滤波处理）。新兴研究的小波变换在时域和频域中都具有良好的局部化特性，它在图像处理中也有着广泛而有效的应用。

(2) 图像编码压缩。图像编码压缩技术可减少描述图像的数据量（即比特数），以便节省图像传输、处理时间和减少所占用的存储器容量。压缩可以在不失真的前提下获得，也可以在允许的失真条件下进行。编码是压缩技术中最重要的方法，它在图像处理技术中是发展最早且比较成熟的技术。

(3) 图像增强和复原。图像增强和复原的目的是为了提高图像的质量，例如，去除噪声及提高图像的清晰度等。图像增强不考虑图像降质的原因，突出图像中所感兴趣的部分。例如强化图像高频分量，可使图像中物体轮廓清晰、细节明显，以及强化低频分量可减少图像中噪声影响。图像复原要求对图像降质的原因有一定的了解，一般来说，应根据降质过程建立“降质模型”，再采用某种滤波方法，恢复或重建原来的图像。

(4) 图像分割。图像分割是数字图像处理中的关键技术之一。图像分割是将图像中有意义的特征部分提取出来，其有意义的特征包括图像中的边缘、区域等，这是进一步进行图像识别、分析和理解的基础。虽然已研究出不少边缘提取、区域分割的方法，但是还没有一种普遍适用于各种图像的有效方法。因此，对图像分割的研究还在不断深入之中，是图像处理中研究的热点之一。

(5) 图像描述。图像描述是图像识别和理解的必要前提。作为最简单的二值图像可采用其几何特性描述物体的特性，一般图像的描述方法采用二维形状描述，它有边界描述和区域描述两类方法。对于特殊的纹理图像可采用二维纹理特征描述。随着图像处理研究的深入发展，已经开始进行三维物体描述的研究，提出了体积描述、表面描述、广义圆柱体描述等方法。

(6) 图像分类（识别）。图像分类（识别）属于模式识别的范畴，其主要内容是图像经过某些预处理（增强、复原、压缩）后，进行图像分割和特征提取，从而进行判决分类。图像分类常采用经典的模式识别方法，有统计模式分类和句法（结构）模式分类，近年来新发展起来的模糊模式识别和人工神经网络模式分类在图像识别中也越来越受到重视。

## 1.2 数字图像处理系统

### 1.2.1 图像处理系统构成

一个典型的图像处理系统由图像传感器、图像编码、图像处理器、显示设备、存储设备及控制设备几大部分组成，如图 1-6 所示。

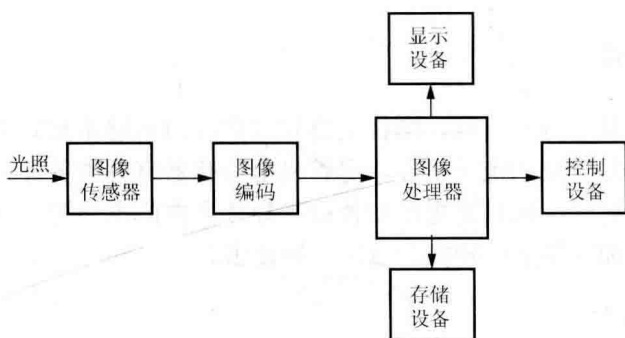


图 1-6 典型的图像处理系统

(1) 图像传感器。图像传感器负责采集光照信息，常用的图像传感器有 CCD 和 CMOS 等。在实际应用中，获取图像的方法不一定是传感器，可能是一个现成的图像采集卡、摄像机、数码相机、扫描仪或者一个专用的图像设备等。这一设备将待处理的图像场景或光照信息转换为数字或者模拟信号进行下一步的处理。

(2) 图像编码。图像编码负责对图像传感器输出的图像进行采样和量化（对于模拟输出的图像传感器），将图像变换为适合图像处理器处理的数字形式。然后，将编码后的结果送入图像处理器进行进一步的处理。

(3) 图像处理器。图像处理器是整个图像处理系统的核心，图像处理器将以取样和量化的结果作为数据源，根据图像处理任务的需求，对图像进行一系列的变换，例如图像预处理、图像分割及目标识别等。图像处理器还负责与图像显示设备、图像存储设备及控制设备进行交互。

图像处理器可以是以  $\times 86$  为硬件平台的 PC，也可以是一个嵌入式图像处理器，例如，TI 公司的达芬奇系列专用数字视频处理器、ARM 处理器及本书所介绍的 FPGA 等。部分处理器有一系列现成的图像处理软件包，可以大大减轻开发的工作量。例如，如果图像处理系统以  $\times 86$  作为硬件平台，处理系统就可以以 Windows 操作系统为软件平台，并在其基础上采用已经开发好的图像处理软件。

(4) 显示设备。图像显示设备负责对图像进行显示。被显示的图像可能是最终的处理结果，或者使原始图像，或者是中间处理结果。这个显示设备可以是一个视频显示器、打印机，或者使 Internet 上的其他设备等。

(5) 存储设备。图像存储设备负责对视频或图像进行保存。

(6) 控制设备。图像控制设备在一个图像处理系统中不一定是必需的。控制设备通常应用在一些专用的场合，例如工业自动化领域的自动控制系统。图像处理的算法往往要完成一个特定的检测目的，图像处理器根据图像处理的结果进行决策。决策的结果被输出到控制设备用来完成一些控制目的，这个控制设备可能是电机、语音提示系统、报警系统或者是军工领域的一些控制设备等。

### 1.2.2 原始图像获取

和其他信息的获取方式一致，图像的感知也需要用传感器来完成，图像传感器负责将感受到的光信号转换为电子信号。尽管光电传感器有各种各样的型号，其基本原理都是相同的：入射光子通过光电效应使硅半导体之内的电子得到释放，这些电子在曝光时间之内被累加，然后被转换为电压之后读出。

#### 1. 可见光传感器

对于可见光的图像成像，目前的图像传感器市场主要被 CCD (Charge Coupled Device, 电荷耦合元件) 和 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, 金属氧化物半导体元件) 所占据。

##### 1) CCD 传感器

CCD 于 1969 年在贝尔试验室研制成功，之后由日本的公司开始批量生产，其发展历程已经将近 40 年多。

CCD 传感器的基本单元是 MOS 电容器。CCD 内部的门电路的三相中的一个被加上偏压，在偏转的电路下面的硅衬底上产生势阱，即 MOS 电容器。该势阱吸引和存储光电子，直到它们被读出为止。通过在电路下一相加偏压，电荷被传递到下一个单元。该单元不断地重复，并连续地把电荷从每个像素传递到读出放大器并将其转换为电压信号。该读出过程的特点是像素必须被顺序读出。CCD 的内部结构如图 1-7 所示。

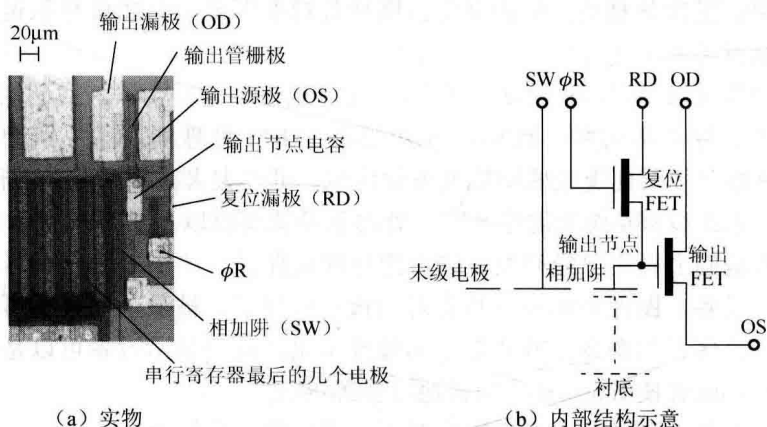


图 1-7 典型 CCD 传感器内部结构

CCD 又可以分为以下几种：

(1) 面阵 CCD。面阵 CCD 的结构一般有 3 种。第一种是帧转性 CCD。它由上、下两部分组成，上半部分是集中了像素的光敏区域，下半部分是被遮光而集中垂直寄存器的存储区域。其优点是结构较简单并容易增加像素数，缺点是 CCD 尺寸较大，易

产生垂直拖影。第二种是行间转移性 CCD。它是目前 CCD 的主流产品，像素群和垂直寄存器在同一平面上，其特点是在 1 个单片上、价格低并容易获得良好的摄影特性。第三种是帧行间转移性 CCD。它是第一种和第二种的复合型，结构复杂，但能大幅度减少垂直拖影并容易实现可变速电子快门等优点。

(2) 线列 CCD。线列 CCD 用一排像素扫描过图片，进行三次曝光——分别对应于红、绿、蓝三色滤镜，正如名称所表示的，线性传感器是捕捉一维图像。初期应用于广告界拍摄静态图像、线性阵列及处理高分辨率的图像时，受局限于非移动连续光照的物体。

(3) 三线传感器 CCD。在三线传感器中，三排并行的像素分别覆盖 RGB 滤镜，当捕捉彩色图片时，完整的彩色图片由多排的像素来组合成。三线 CCD 传感器多用于高端数码相机，以产生高的分辨率和光谱色阶。

(4) 交织传输 CCD。这种传感器利用单独的阵列摄取图像和电量转化，允许在拍摄下一图像时在读取当前图像。交织传输 CCD 通常用于低端数码相机、摄像机和拍摄动画的广播拍摄机。

(5) 全幅面 CCD。此种 CCD 具有更多电量处理能力、更好的动态范围、低噪声和传输光学分辨率，全幅面 CCD 允许即时拍摄全彩图片。全幅面 CCD 由并行浮点寄存器、串行浮点寄存器和信号输出放大器组成。全幅面 CCD 曝光是由机械快门或闸门控制去保存图像，并行寄存器用于测光和读取测光值。图像投射到作投影幕的并行阵列上。此元件接收图像信息并把它分成离散的由数目决定量化的元素。这些信息流就会由并行寄存器流向串行寄存器。此过程反复执行，直到所有的信息传输完毕。然后，系统进行精确的图像重组。

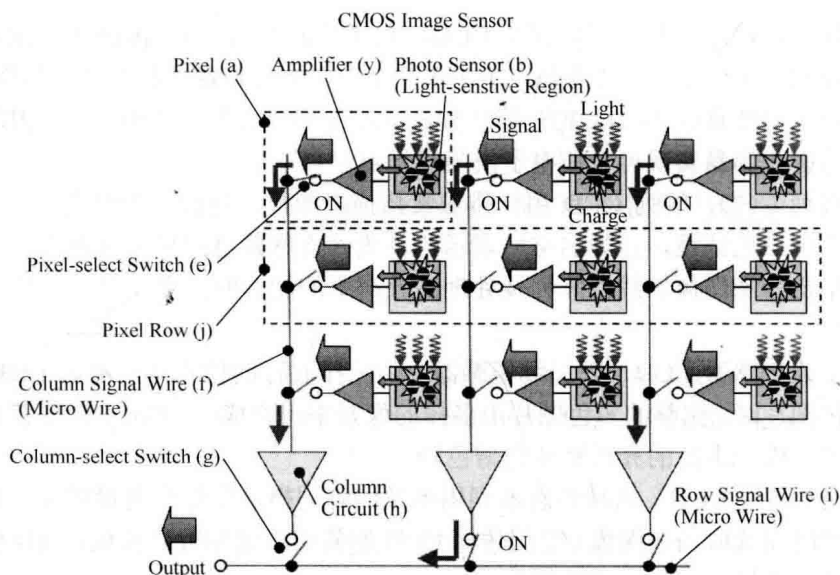
## 2) CMOS 传感器

CMOS 传感器使用光电二极管检测光照。它并不是直接将电荷传输至输出端，而是每个像素有一个进行局部放大的嵌入式放大器。这意味着电荷被保留至传感元件本身，因此需要一个重置晶体管和连线连接至输出。CMOS 传感器的这种特点使其对像素进行单独寻址成为可能，从而更容易读出局部阵列或者随机存取像素。

CMOS 内部原理如图 1-8 所示。CMOS 传感器按为像素结构分被动式与主动式两种。

(1) 被动式。被动式像素结构 (Passive Pixel Sensor, PPS)，又称为无源式。它由一个反向偏置的光敏二极管和一个开关管构成。光敏二极管本质上是一个由 P 型半导体和 N 型半导体组成的 PN 结，它可等效为一个反向偏置的二极管和一个 MOS 电容并联。当开关管开启时，光敏二极管与垂直的列线 (Column Bus) 连通。位于列线末端的电荷积分放大器读出电路 (Charge Integrating Amplifier) 保持列线电压为一常数，当光敏二极管存储的信号电荷被读出时，其电压被复位到列线电压水平。与此同时，与光信号成正比的电荷由电荷积分放大器转换为电荷输出。





(a) Pixel: 一个完整的 CMOS 像素单元 (y) Amplifier: 嵌入式放大器 (b) Photo Sensor: 光电探测器, 一般为光电二极管 (e) Pixel-select Switch: 像素选择开关 (j) Pixel Row: 行方向像素  
(f) Column Signal Wire: 列信号线 (g) Column-select Switch: 列选择开关  
(h) Column Circuit: 列电路 (i) Row Signal Wire: 行信号线

图 1-8 CMOS 内部原理

(2) 主动式。主动式像素结构 (Active Pixel Sensor, APS), 又称为有源式。几乎在 CMOS PPS 像素结构发明的同时, 人们很快认识到在像素内引入缓冲器或放大器可以改善像素的性能, 在 CMOS APS 中每一像素内都有自己的放大器。集成在表面的放大晶体管减少了像素元件的有效表面积, 降低了“封装密度”, 使 40%~50% 的入射光被反射。这种传感器的另一个问题是, 如何使传感器的多通道放大器之间有较好的匹配, 这可以通过降低残余水平的固定图形噪声较好地实现。由于 CMOS APS 像素内的每个放大器仅在此读出期间被激发, 因此 CMOS APS 的功耗比 CCD 图像传感器的还小。

(3) 填充因数。填充因数 (Fill Factor) 又称为充满因数, 它指像素上的光电二极管相对于像素表面的大小。量子效率 (Quantum efficiency) 是指一个像素被光子撞击后实际和理论最大值电子数的归一化值, 被动式像素结构的电荷填充因数通常可达到 70%。因此, 量子效率高。但光电二极管积累的电荷通常很小, 很易受到杂波干扰。再说, 像素内部又没有信号放大器, 只依赖垂直总线终端放大器, 因而输出的信号杂波很大, 其 S/N 比低, 更因不同位置的像素杂波大小不一样 (固定图形噪声波 FPN) 而影响整个图像的质量。而主动性像素结构与被动式相比, 它在每个像素处增加了一个放大器, 可以将光电二极管积累的电荷转换成电压进行放大, 大大提高了 S/N 比值, 从而提高了传输过程中抗干扰的能力。但由于放大器占据了过多的像素面积, 因而它