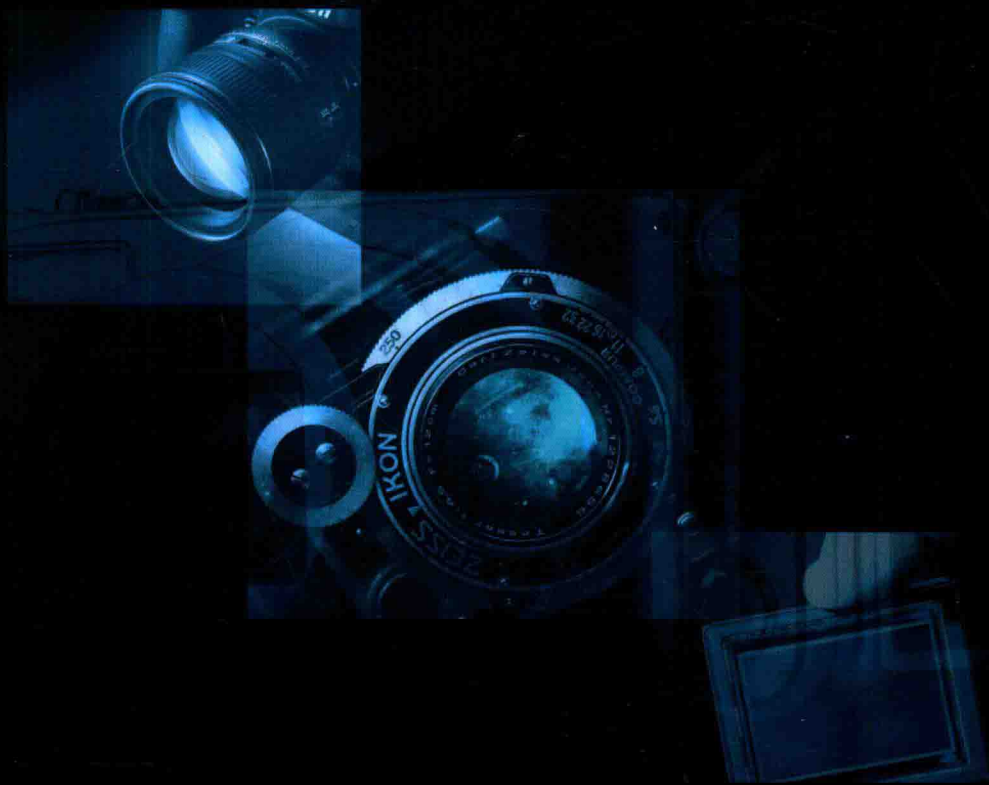


数字图像中 边缘检测算法研究

刘仁云 孙秋成 王春艳 著



科学出版社

数字图像中边缘检测算法研究

刘仁云 孙秋成 王春艳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容主要包括:绪论、图像预处理技术、整像素边缘检测算法、基于拟合的亚像素边缘检测算法、基于矩的亚像素边缘检测算法、基于插值的亚像素边缘检测算法、光条中心线检测方法、边缘检测技术的应用。

本书可作为高等学校计算机科学与技术、电气与电子信息专业高年级研究生和研究人员的科研用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像中边缘检测算法研究/刘仁云,孙秋成,王春艳著. —北京:科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046954-0

I. ①数… II. ①刘…②孙…③王… III. ①数字图像处理 IV. ①TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 006633 号

责任编辑:任加林 戴 薇 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年12月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2015年12月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:196 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<骏杰>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

边缘是图像的基本特征，所谓边缘是指图像中灰度存在阶跃或尖顶状变化像素的集合。边缘广泛存在于物体与物体、物体与背景之间。图像测量是通过处理被测物体图像中的边缘而获得物体的几何参数的过程，而边缘的定位精度直接影响最终的测量结果。因此，图像边缘提取方法是检测的基础和关键之一。

本书在作者近十年研究的基础上，总结了之前的一些研究成果和国内、国际在相关领域发表的论文资料，全面概括了边缘检测的一些新方法，重点研究了图像处理、整像素边缘检测算法和亚像素边缘检测算法等方面的内容，并对边缘检测领域的研究重点和难点提出了一些新的思想和算法。

本书首先介绍了图像处理技术的基本概念和方法，然后介绍了传统的整像素边缘检测算法，最后介绍了三类亚像素边缘检测算法，并给出算法的方阵实验及结果分析。

本书的研究成果丰富了边缘检测的理论，尤其是对在亚像素边缘检测算法方面的研究具有一定的理论意义。实验证明，本书提出的算法具有格子的特点，并具有一定的应用价值。

本书的完成是作者及其课题组多年努力的结果。本书具体分工如下：刘仁云负责统稿及组织协调工作，并撰写第一、二、三、八章，孙秋成撰写第四、五、六章，王春艳负责撰写第七章，孙秋成负责组织及文字校对工作，刘仁云和王春艳负责全书质量把关。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

著 者

2015年10月16日

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 数字图像处理技术	1
1.1.1 数字图像处理技术理论基础	1
1.1.2 数字图像处理技术概述	3
1.1.3 数字图像处理技术应用介绍	5
1.2 边缘检测技术概述	6
1.2.1 边缘检测技术介绍	6
1.2.2 边缘检测技术的研究进展	7
1.2.3 边缘检测中存在的问题和发展趋势	8
1.3 本书的组织结构	9
第二章 图像预处理技术	11
2.1 灰度变换	11
2.1.1 线性变换	11
2.1.2 分段线性变换	12
2.1.3 非线性变换	13
2.2 直方图修正	14
2.3 图像噪声的滤除	16
2.3.1 邻域平均法	17
2.3.2 加权平均法	18
2.3.3 中值滤波	19
2.3.4 空域低通滤波	20
2.4 图像锐化	21
2.4.1 统计差值法	21
2.4.2 离散空间差分法	21
2.4.3 空域高通滤波	24
2.5 频域滤波增强	24
2.5.1 频域低通滤波	25
2.5.2 频域高通滤波	25

2.6	同态滤波	25
2.7	彩色增强	26
2.7.1	伪彩色增强	26
2.7.2	假彩色增强	27
2.8	本章小结	28
第三章	整像素边缘检测算法	29
3.1	边缘的定义及类型	29
3.2	整像素边缘检测算法的步骤	30
3.3	整像素边缘检测算子介绍	31
3.3.1	Sobel 算法	31
3.3.2	Roberts 算子	32
3.3.3	Prewitt 算子	33
3.3.4	Laplace 算子	34
3.3.5	LOG 算子	35
3.3.6	Canny 算子	37
3.3.7	SUSAN 算法	38
3.4	整像素检测算法的实验比较	40
3.5	本章小结	42
第四章	基于拟合的亚像素边缘检测算法	43
4.1	亚像素边缘检测的必要性	43
4.2	基于高斯拟合模型的亚像素边缘检测算法	44
4.3	基于双曲正切边缘模型的边缘检测算法	45
4.3.1	双曲正切函数	45
4.3.2	一维双曲正切边缘模型	47
4.3.3	二维双曲正切边缘模型	48
4.3.4	基于 Nelder-Mead 算法的边缘参数求解	49
4.4	基于贝塞尔边缘模型的亚像素边缘检测方法	50
4.4.1	贝塞尔型点扩散函数及其修正模型	50
4.4.2	修正贝塞尔边缘模型	53
4.4.3	模拟数字采样过程	54
4.4.4	基于最小二乘差的亚像素边缘检测方法求解	55
4.4.5	贝塞尔型边缘模型修正的作用	56
4.4.6	修正贝塞尔边缘检测方法精度的评价	62
4.5	基于反正切函数的亚像素边缘检测方法	65

4.5.1 反正切函数数学特征	65
4.5.2 一维边缘检测	66
4.5.3 二维边缘模型的亚像素边缘检测	67
4.6 基于正交多项式拟合的亚像素边缘检测算法	68
4.6.1 算法的检测流程	68
4.6.2 算法理论基础	69
4.6.3 一维模型边缘检测	70
4.6.4 二维模型边缘检测	72
4.7 本章小结	73
第五章 基于矩的亚像素边缘检测算法	74
5.1 基于空间矩的亚像素边缘检测方法	74
5.1.1 空间矩理论	74
5.1.2 空间矩亚像素边缘检测方法	74
5.1.3 空间矩亚像素边缘检测算法的改进	79
5.2 基于灰度矩的亚像素边缘检测方法	82
5.2.1 灰度矩理论	82
5.2.2 灰度矩亚像素边缘检测方法	82
5.2.3 灰度矩亚像素边缘检测方法的改进	84
5.3 基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法	89
5.3.1 Zernike 矩理论	89
5.3.2 Zernike 矩亚像素边缘检测方法	90
5.3.3 Zernike 矩亚像素边缘检测方法的改进	93
5.4 基于 legendre 正交矩的亚像素边缘定位方法	95
5.4.1 Legendre 正交矩定义及性质	95
5.4.2 基于 Legendre 正交矩的亚像素边缘检测方法原理	96
5.5 本章小结	100
第六章 基于插值的亚像素边缘算法	101
6.1 插值理论预备知识	101
6.1.1 插值法的基本原理	101
6.1.2 Lagrange 插值	102
6.1.3 Newton 插值	103
6.1.4 分段线性插值	105
6.1.5 三次样条插值	106
6.2 基于插值的边缘检测算法	107

6.2.1 基于多项式插值的亚像素边缘检测方法	107
6.2.2 基于拉格朗日插值的亚像素边缘检测	110
6.2.3 基于三次样条函数插值的亚像素边缘检测算法	111
6.3 本章小结	114
第七章 光条中心线检测方法	115
7.1 影响光条图像质量的因素分析	115
7.1.1 反射对光条的影响	116
7.1.2 被测物体表面形貌对光条的影响	117
7.1.3 被测物体表面颜色对光条的影响	117
7.1.4 环境光强对光条的影响	117
7.2 激光光条图像的预处理	118
7.2.1 激光图像滤波	118
7.2.2 激光图像的特征增强	119
7.2.3 激光图像阈值分割	120
7.3 光条中心线的传统提取方法	121
7.3.1 极值法	121
7.3.2 阈值法	121
7.3.3 方向模板法	122
7.3.4 曲线拟合法	123
7.3.5 Hessian 矩阵法	125
7.4 改进的光条中心检测算法	126
7.4.1 基于空间矩的光条中心检测算法	126
7.4.2 基于勒让德矩的光条中心检测算法	130
7.5 光条中心检测的精度评价	133
7.5.1 基于距离的光条中心精度评价	133
7.5.2 基于残差的光条中心精度评价	133
7.5.3 基于标准差的光条中心精度评价	134
7.6 本章小结	136
第八章 边缘检测技术的应用	137
8.1 图像分割	137
8.1.1 基于像素属性的边缘分割	137
8.1.2 基于变形模板的方法	137
8.1.3 基于数学形态学	139
8.1.4 基于代价函数的边缘检测方法	139

8.1.5 基于边缘流的分割方法	139
8.2 工业检测	140
8.2.1 基于整像素检测边缘的轴径测量方法	140
8.2.2 基于亚像素检测边缘的轴径测量方法	143
8.3 边缘检测在医学图像中的应用	144
8.3.1 在医学图像匹配中的应用	144
8.3.2 在各种肿瘤及赘生物诊断上的应用	145
8.3.3 在左心室边缘抽取中的应用	145
8.3.4 在各种血管边缘抽取中的应用	145
8.4 智能交通视频监控系统中的车牌照识别	146
8.4.1 车牌图像的预处理	146
8.4.2 灰度图的二值化	146
8.4.3 Robert 算子边缘检测	146
8.4.4 车牌的定位	147
8.5 图像目标自动识别与图像匹配	148
8.5.1 人脸识别系统	148
8.5.2 各种边缘检测算法的人脸检测	148
8.6 本章小结	150
附录一	151
附录二	152
主要参考文献	153

第一章 绪 论

1.1 数字图像处理技术

1.1.1 数字图像处理技术理论基础

数字图像处理 (digital image processing) 是通过计算机对图像进行增强、提取特征、分割、去除噪声、复原等处理的方法和技术。数字图像处理最早出现在 20 世纪中期, 当时的计算机水平已经有一定的发展, 人们开始利用计算机来处理图像和图形信息。数字图像处理作为一门专门的学科大约形成于 20 世纪 60 年代初。数字图像处理最初的目的是改善图像的质量, 它以人为对象, 最终目的是改善人类的视觉效果。图像处理中, 输入的图像质量往往是低下的, 输出的是高质量的图像, 常用的数字图像处理方法有图像的编码、复原、压缩、增强等。

一般来讲, 对图像进行处理 (或分析、加工) 的主要目的有三个:

(1) 提高图像的视感效果, 如进行彩色变换、图像的亮度, 抑制或增强某些成分, 对图像进行几何变换等, 用以改善图像的质量。

(2) 提取图像中人们所感兴趣的信息, 所包含的特殊信息或某些特征, 这些被提取的信息或特征通常为计算机分析图像提供了便利。提取信息或特征的过程叫做计算机视觉的预处理或模式识别。提取的特征可以包含很多方面, 如区域特征、拓扑特征、纹理特征、灰度或颜色特征、频域特征、边界特征、形状特征和关系结构等。

(3) 图像数据的压缩、编码和变换, 有利于图像的存储和传输。不管是哪一种目的的图像处理, 都需要由图像专用设备组成的图像处理系统和计算机对输入的图像数据进行加工, 最后输出。

在现在的信息时代, 图像的概念在日常生活中会经常遇见, 而在计算机理论中, 需要从数学的角度来看待图像。在计算机中, 一幅图像可以用一个二维函数 $f(x, y)$ 来表示, 其中 x 和 y 表示图像点沿图像横轴与纵轴的坐标, 幅值 f 表示坐标 (x, y) 上图像点的灰度或强度。理想状态下, 图像中的 x 、 y 和 f 是连续的, 但是为了在计算机中能够表示图像, 就需要对图像进行取样和量化, 对坐标进行数字化就是取样, 对幅值 f 进行数字化就是量化。取样和量化以后, x 、 y 和 f 是离散的并且有限的数值, 我们就称该图像为数字图像。数字图像是由有限的元素组成的, 每一个元素有确定的位置坐标和幅值, 我们称这些元素为数字图像的像素。

当一幅图像经过取样和量化后, 可以用整数来表示取样后的坐标, 则产生了

一个 M 行 N 列的数字图像，由此就形成一个矩阵。数字图像就是以二维矩阵的形式存储在计算机中的，可以用下面的矩阵来表示这幅数字图像

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \cdots & f(0, N-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \cdots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1, 0) & f(M-1, 1) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

矩阵中的每个元素表示数字图像的像素，每一个像素具有位置和幅值（也就是灰度值）两个属性。

每一个图像的像素都对应二维空间中一个特定的“位置”，并且拥有一个或者多个与这个点相关的采样值组成的数值。根据采样数目及特性的不同，数字图像主要可以划分为如下五种类型。

1. 二值图像

一幅二值图像的二维矩阵仅由 0、1 两个值构成，“0”代表黑色，“1”代表白色。由于每一像素取值仅有 0、1 两种可能，所以计算机中二值图像的数据类型通常为 1 个二进制位。二值图像通常用于文字、线条图的扫描识别（OCR）和掩膜图像的存储。

2. 灰度图像

灰度图像矩阵元素的取值范围通常为 $[0, 255]$ 。因此其数据类型一般为 8 位无符号整数的（int8），这就是人们经常提到的 256 灰度图像。“0”表示纯黑色，“255”表示纯白色，中间的数字从小到大表示由黑到白的过渡色。在某些软件中，灰度图像也可以用双精度数据类型（double）表示，像素的值域为 $[0, 1]$ ，0 代表黑色，1 代表白色，0 到 1 之间的小数表示不同的灰度等级。二值图像可以看成是灰度图像的一个特例。

3. 索引图像

索引图像的文件结构比较复杂，除了存放图像的二维矩阵外，还包括一个称之为颜色索引矩阵 MAP 的二维数组。MAP 的大小由存放图像的矩阵元素值域决定，如矩阵元素值域为 $[0, 255]$ ，则 MAP 矩阵的大小为 256×3 ，用 $\text{MAP} = [\text{RGB}]$ 表示。MAP 中每一行的三个元素分别指定该行对应颜色的红、绿、蓝单色值，MAP 中每一行对应图像矩阵像素的一个灰度值，如某一像素的灰度值为 64，则该像素就与 MAP 中的第 64 行建立了映射关系，该像素在屏幕上的实际颜色由第 64 行的 $[\text{RGB}]$ 组合决定。也就是说，图像在屏幕上显示时，每一像素的颜色由存放在矩阵中该像素的灰度值作为索引通过检索颜色索引矩阵 MAP 得到。索引图像的数据类型一般为 8 位无符号整形（int8），相应索引矩阵 MAP 的大小为

256×3, 因此一般索引图像只能同时显示 256 种颜色, 但通过改变索引矩阵, 颜色的类型可以调整。索引图像的数据类型也可采用双精度浮点型 (double)。索引图像一般用于存放色彩要求比较简单的图像, 如 Windows 中色彩构成比较简单的壁纸多采用索引图像存放, 如果图像的色彩比较复杂, 就要用到 RGB 真彩色图像。

4. RGB 彩色图像

RGB 图像与索引图像一样都可以用来表示彩色图像。与索引图像一样, 它分别用红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三原色的组合来表示每个像素的颜色。但与索引图像不同的是, RGB 图像每一个像素的颜色值 (由 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由 R、G、B 三个分量来表示, M、N 分别表示图像的行列数, 三个 M×N 的二维矩阵分别表示各个像素的 R、G、B 三个颜色分量。RGB 图像的数据类型一般为 8 位无符号整形, 通常用于表示和存放真彩色图像, 当然也可以存放灰度图像。

5. 多帧图像

多帧图像是一种包含多幅图像或帧的图像文件, 由四维数组构成, 第四维表示的是图像的序列号。

1.1.2 数字图像处理技术概述

将图像模拟信号通过一些特定的形式转换成数字信号, 利用计算机对其进行除增强、除噪声复原、分割、提取特征等处理的过程被称为数字图像处理。

数字图像按处理方法分主要有图像到图像处理、图像到数据的处理、数据到图像的处理三种类型。图像到图像的处理, 输入是一幅图像, 输出依然是一幅图像, 该技术主要应用于图像复原、增强及编码。该方法能够将图像中重要的信息选择性的凸显出来, 增强其特征, 而对于那些次要的信息可以减弱, 进而提高了图像的可读性, 使得处理后的图像更适合人观察及计算机分析处理。图像到数据的处理, 输入的是一幅图像, 输出的是输入图像内容的各种符号表示形式。这种图形处理技术常用的方法有图像识别、图像分割以及特征提取等。图像经过量化处理后就会得到一组组二维数据库, 通过这些数据就能够描述图片的信息。从数据到图像的处理方法, 输入是一组组的数据, 输出则是能够体现这些数据的图片, 也就是图像的重新组合过程。主要是利用采集到与图像有关的各种物理数据来组建一幅能够直观展示数据的图片, 这个过程主要应用的方法有迭代法、代数法、傅里叶反投影法及其卷积反投影法。

下面对常见的几种数字图像处理技术进行简单的介绍。

1. 图像变换技术

当图像所包含的信息量较大时(阵列较大),在原本空间中直接对图像进行预订的变换、处理,会造成计算量过于复杂。因此,对图像应用变换的方法(沃尔什变换、傅里叶变换、离散余弦变换)不但使其计算机简化,而且还能对数字图像更好的处理。小波变换是当前研究较为火热的处理方法,因其不但时域具有良好的局部性频域也同样具备良好的局部性,所以数字图像处理过程中小波变换技术得到了广泛的应用。

2. 图像压缩编码技术

图像压缩编码是一个能够有效地将描述图像信息的数据量(比特率)大幅度减少的技术。因此,该技术能使图像处理、图像传输所用的时间大幅度减少,同时占用存储器的容量也能够大幅度降低。图像的压缩过程可以在未失真的图像上进行,同样也可以在一定范围内失真的图像上进行。图像编码是图像处理技术中相对发展较早、成熟的技术,也是压缩技术中最重要的技术。

3. 图像复原和增强技术

为了较好的增加数字图像的质量,我们通常会采用图像的复原和增强技术。该技术可以用于增加某图像的清晰度、消除噪声对图像的影响等等。图像的增强主要是考虑突出图像中比较重要的部分,不需要考虑图像因为增强过程而导致的质量降低因素。图像灰度值、对比度都可以通过图像的增强技术得到改善达到一种较为理想化的状态,此时图像会变得很平滑,图像中混有的噪声也能够得到有效的抑制。通过图像的增强技术能够是图像更适合应用到实际工作中。图像的复原可以使修复的图像无限的接近原图像。图像复原主要利用图像的退化过程,从中寻找到退化的数学模型,沿着退化模型的逆过程把已经退化的图像进行复原。主要目的在于去除还原原始图像时所遇到的干扰。

4. 图像分割技术

数字图像处理中的图像分割技术是一个较为常用的、比较重要的部分。图像的分割技术不但能够按照一定的准则将所选定的区域划分成各个具有一定功能的区域,也能将图像中特定的边缘、区域等特征部分提取出来,以便对图像进行下一步的识别、分析等处理工作。图像分割可以按照幅度、边缘、形状的不同分割成不同的功能区域,通常情况下是按照图像的幅度进行分割的,将图像的灰度值划分成各个不同的等级,然后设置灰度值方法找到有意义的分割区域或者边缘。图像分割技术应用较为广泛,几乎出现在图像处理的各个领域,但是还没有一种能够适应各种图片的处理方法,所以还有待于不断的深入研究。

5. 图像的描述技术

图像的描述技术简单而言就是图像理解、识别所必需的前提。对于图像物体特性的描述除了一些二值图像由于其较为简单可以应用几何特性外，其余的描述大多数应用二维形状，二维形状描述方法主要包含了区域、边界两种描述方法。

1.1.3 数字图像处理技术应用介绍

数字图像处理技术不但已经应用到了医学、交通、安全、遥感等传统领域，也同样应用到了影视图像系统。

1. 医学方面的应用

图像处理技术被应用于医疗领域可以方便快捷的对患者进行诊断和治疗。最为主要的临床应用就是 CT、超声波、核磁共振等技术。

2. 交通管理的应用

在现代社会，交通管理由原来的人力资源密集型逐渐向智能化所转变。外在的形态特征是一部汽车最重要的特征之一，图像处理技术在提取车的外在形态中得到了很多的应用。例如道路收费站收费系统、高速公路速度检测系统以及特定路段的车流量信息的统计等。

3. 安全范围的应用

利用图像处理中的模式识别技术可以应用在监控摄像、目标跟踪、指纹识别等安全领域。

4. 遥感领域的应用

图像遥感技术随着其分辨率的不断提高使得其应用越来越广泛，该技术被应用于军事侦察及测量、土地测量、环境气候监测、资源勘查等领域。虽然图像遥感技术应用领域较为广泛，但是其本身也存在数据量过大、处理速度慢等缺点。

5. 影视上的应用

数字图像处理技术在影视上主要应用在电视播出、多媒体、影视特技、游戏开发、电子商务等诸多领域，但是其在互联网上的应用较为突出。图 1.1 为数字图像处理技术在互联网上应用的系统结构图。



图 1.1 互联网图像系统结构

1.2 边缘检测技术概述

1.2.1 边缘检测技术介绍

在计算机机器视觉处理过程中有一个陈旧而又充满活力的入门技术——图像边缘检测技术。称其陈旧是因为图像边缘检测技术最早出现 20 世纪 50 年代，作为一门学科则形成于 20 世纪 60 年代，是由 Roberts 等科学家率先着手研究的；称其充满活力是因为图像边缘检测技术在原有基础上不断推出新的方法、新的理论、新的技术手段，大胆创新使得边缘检测技术有了飞速发展。因为图像的边缘检测技术本身具有一定的难度和深度，还有就是现代科技的发展需要边缘检测技术的支撑，所以图像边缘检测技术不断被人们所追捧、研究。边缘检测技术虽然如同雨后春笋般的层出不穷，但是边缘检测技术无论从方法和理论上还都有待于提高，以便适应未来的高精技术。

根据对边缘的定义与解释可以知道，边缘就是图像中灰度值变化最大、最为激烈的区域。根据灰度值变化幅度大这一特性，最开始人们将图像边缘检测技术大致归结为图像中高频分量增加的一个过程，进而对边缘的提取过程可以认为是微分运算的过程。最早被科学家们所提出并且得到应用的边缘检测算子其共同特点就是简单、运算快速、方便操作，这些算子都是通过梯度灰度分布对图像灰度值变化的反应来确定边缘的位置。Robert 算子是最早被提出来的整像素边缘检测算子，在其基础上相继提出了 Kirsch 算子、Prewitt 算子等一大批具有代表性的整像素边缘检测算子。

在对边缘进行提取时，如果只是使用唯一的微分运算则会增加图像中的噪声分量，这是因为图像中的边缘和噪声同是高频分量。所以在提取边缘前要去除高频噪声分量，去除噪声影响通常可以使用平滑滤波器对噪声进行平滑处理。对于这样先进行平滑处理在通过微分提取图像边缘的边缘检测方法是由希尔德雷思和马尔两个人率先提出来的。该方法对噪声平滑处理主要应用了高斯函数，然后对拉普拉斯算子求导处理，图像的边缘点就是导数零交叉点，这就是经典的 LOG 算子。LOG 算子在计算机机器视觉领域应用十分广泛，这是因为 LOG 算子建立了计算机机器视觉同视觉生理研究之间的联系，也可以称 LOG 算子建立了两两者之间联系的数学模型。相对 LOG 算子导数零交叉点即为边缘点，Canny 从最优滤波方向上提出了三个最优准则，利用这三个最优准则得到了一组最优滤波器。图像边缘检测时，LOG 算子与 Canny 算子局部输出极值这一特性在本质上是是一致的，但是 Canny 算子具有更大的优势就是在于 Canny 提出的最优准则、最优滤波器的思想深深地影响了后人，使得以后的研究者都在致力于寻找边缘检测最优算子。这些算子都是边缘检测研究领域的优秀成果。

通常情况下,想要去除数字图像中的噪声需要在整幅图像上对噪声进行抑制、平滑处理。噪声存在于图像的边缘上,使得噪声影响图像的边缘检测受细节。由此可知,抗噪声能力与边缘检测细节是相对的,即我们想要数字图像有较高的抗噪声能力就必须降低对边缘检测细节的要求,相反要有清晰的边缘检测细节就不能有效的抑制高频噪声带来的干扰。通过自适应边缘检测技术可以有效地解决抗噪声能力和边缘检测细节这一对矛盾体,自适应边缘检测技术的指导思想是利用一个使自身能够适应信号局部结构的算子对信号进行平滑处理,使得矛盾体的双方相互分离。再通过调整模板权重自动适应模板所在位置灰度值变化情况,实现既能保证边缘检测细节,又能对噪声很好抑制、平滑的目的。

随着科学技术的不断飞速发展对图像边缘检测技术的认识也不断加深,所涉及的领域也越来越广阔。在研究过程中研究者们渐渐地认识到边缘在不同的尺度空间下存在不同的特征,这些边缘特征也随着分辨率的变化也做出相应的变化,分辨率不同则边缘特征所包含的信息量也是不同的,其对应的滤波器滤波尺度也存在差异。边缘检测算子检测边缘对应的滤波尺度较小时,虽然对噪声的抑制能力很弱且很容易受到噪声的干扰,但是其获得较多的细节边缘图像;当边缘尺度较大时,结果正好与小尺度检测相反。尺度空间这一概念是 Wit-kin 在 1983 年首次提出来的,对不同分辨率、不同尺度边缘检测算子在进行边缘检测时得到的检测结果做了深入、详细的研究与论证。研究结果表明信号的基本结构以及对信号的详细、精确描述都可以由导数的极值点反映出来。调整尺度大小极值点也随之改变而改变,这样就能够获得信息在全尺度下的整体定性描述。多尺度空间思想的提出为边缘检测技术拓宽了研究领域的同时自身也得到了较大的发展,踊跃出很多研究成果,小波技术就是其典型的代表。小波的频域、时域都具有一定的优越性,所以小波技术不仅仅在边缘检测领域发挥重要作用。Canny 算子、LOG 算子等最优检测算子与小波技术有结合更加明确了在边缘检测技术中多尺度空间思想的重要性。

1.2.2 边缘检测技术的研究进展

图像的最基本特征是边缘,所谓边缘是指其周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合。边缘的类型可以分为两种:①阶跃型边缘,它两边的像素的灰度值有显著的不同;②屋顶状边缘,它位于灰度值从增加到减少的变化转折点。对于阶跃型边缘,二阶方向导数在边缘处呈零交叉;对于屋顶状边缘,二阶方向导数在边缘处取极值。在视觉检测领域,早期使用的边缘检测方法多为像素级的,如常用的 Sobel 算子、Krisch 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子、Laplacian 算子、高斯-拉普拉斯算子(也称 Marr-Hildreth 算子或 LOG 算子)和 Canny 算子等。这些方法的定位精度为整像素,即能判断出边缘位置处于某一个像素内,但无法在该像素内再进行细分。然而随着工业检测对测量精度要求的不断提高,像

素级精度已经不能满足实际检测的要求, 必须研究更高精度的边缘提取方法, 即亚像素方法。

亚像素边缘检测技术最早由 Hueckel 提出, 现有的亚像素级的边缘检测方法可以归纳为三种: 基于矩的方法, 拟合法 (基于最小二乘的方法) 和基于插值的方法。其中拟合法是通过假设边缘模型灰度值的最小二乘拟合来获得亚像素的边缘定位, 获得的亚像素边缘精度要高于另外两种方法, 并且该方法对噪声具有良好的鲁棒性, 稳定性强。由于拟合方法中, 边缘模型的准确与否会给最终的测量带来直接的影响, 因此如何给出更为精确的边缘拟合模型, 仍然是这一领域的热点问题。

Canny 给出了评价边缘检测算子性能优劣的三个指标: ①良好的检测性能, 既不漏检真实边缘, 也不把非边缘点作为边缘点检出, 使输出的信噪比最大; ②良好的定位性能, 即被检出的边缘点到与之相对应的实际边缘点的距离最近。③唯一性, 即对于单个边缘点仅有一个响应。上述三个指标, 作为评价像素级边缘检测方法的标准, 能够准确地反映出检测方法的优劣, 同样也可以作为亚像素边缘检测方法的评价标准。但是, 由于亚像素检测方法的精度可达到一个像素的 $1/10$, 甚至更高, 因此很难使用第二个指标对方法的精度进行评价。由于真实的边缘点位置不能确定, 也就无法确定被检出的边缘点与实际边缘点的距离是否最近。目前, 对亚像素边缘检测精度的评价研究同样也是一个热门问题。

1.2.3 边缘检测中存在的问题和发展趋势

边缘检测是图像处理和理解的基本课题之一, 它的基本要求是检测精度高, 抗噪能力强不漏掉实际边缘, 不虚报边缘, 在有些应用中还要求具有高的定位精度。但做到这些比较困难。这是因为: ①实际图像都含有噪声, 并且噪声的分布、方差等信息也都是未知的, 而噪声和边缘都是高频信号。②由于物理和光照等原因, 实际图像中的边缘常常发生在不同的尺度范围上, 并且每一边缘像元的尺度信息是未知的。

因此, 传统的边缘检测算法检测效果并不理想, 表现在:

(1) 在含噪图像中, 边缘检测需要对图像先进行平滑去噪, 但在平滑噪声时, 很容易丢失图像的高频信息, 处理的效果不理想。从理论上讲, 检测精度与抗噪能力这两者之间存在着相互制约的互变关系, 即不确定原则。不确定原则 (uncertainty principle) 是量子力学研究中的一条重要规律, 从信息处理角度看, 这一原则可表述为: 一个信号不可能在时域和频域中任意高度集中, 因而边缘的定位精度和抗噪声能力不可能同时无限提高。一般的边缘检测方法, 很难在检测精度与抗噪性能上达到一个好的折中。

(2) 大多数边缘检测算子针对的都是阶跃边缘, 但实际图像中多数还是斜坡边缘, 虽然斜坡边缘是阶跃边缘特殊的表现形式, 但由于斜坡边缘的特性, 针对