

计算机视觉

——低层处理技术

程存学 朱晓昆 著

電子工業出版社

73.87
686

计 算 机 视 觉 ——低层处理技术

程存学 朱晓昆 著

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内容简介

本书的特点是以图像处理中最近几年来国内外学者十分关注的噪声图像的非线性滤波和计算机视觉为重点。在第一篇里,全面地、深入地介绍了秩排序统计滤波器、稳健 M 滤波器、形态滤波器的理论、算法及应用,同时介绍了秩排序统计滤波器与 FIR、IIR 线性滤波器的关系。在第二篇里,重点介绍了计算机视觉中的很重要的特征边缘定位、匹配、从运动景物中获取深度估计的理论和算法。全书大部分章节都附有仿真算法和实验结果以及算法性能比较。以便于读者进一步地深入学习研究。

本书适用于从事图像处理和计算机视觉研究的科技工作者;也可供从事人工智能、模式识别、医学和遥感图像处理工作的科技工作者使用。

计算机视觉
——低层处理技术
程存学 朱晓昆 著
责任编辑 源澜

*

电子工业出版社出版(北京万寿路)
电子工业出版社发行 各地新华书店经售
北京顺义李史山印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:10.75 字数:272 千字

1993 年 7 月第 1 版 1993 年 7 月第 1 次印刷

印数:5000 册 定价:9.00 元

ISBN7-5053-1945-0/TP·472

1990188

前 言

非线性噪声图像滤波理论经历了长期的酝酿后,于本世纪 70 年代中期进入了系统地研究阶段。将非线性滤波理论和方法应用于图像滤波的研究在八十年代初期已全面展开,目前已取得了许多有价值的成果。计算机视觉是利用计算机来模拟生物视觉的部分功能,它起源于本世纪五十年代的统计模式识别理论。进入八十年代,机器视觉理论和算法的研究进展迅速,新观点、新方法层出不穷。这些进展是 VLSI 工艺技术,计算机及其外设在速度、规模、用途和投资效益方面改进的产物;现已从对二维图象进行处理以获取三维信息进入到对灰度/表面方向出发提取各种不变的特征,进行区域分割。以模式识别和人工智能的方法研究计算机视觉已经兴起,因此,图像处理和计算机视觉的研究已初步渗透到医学、遥感、地质、金相分析和智能机器人的各个领域,从宏观看,研究非线性图像滤波和计算机视觉具有广阔前景。

目前,我国学术界和工程界已开始关心这两个领域的研究,也取得一些初步的成果,但还没有一本系统地阐述这个领域的理论和应用的最新发展的专著。为此,我们根据几年来,在攻读硕士、博士学位期间的潜心研究,并参阅国内外大量文献写出本书,其目的是对本领域做较系统的介绍,希望能为浏览者引路,为进取者铺石。书中许多理论和观点系作者提出,肯定有不尽恰当之处,若有谬误,恳请读者给予指正。

本书第一篇以程存学博士的博士论文为基础改写而成,第二篇以朱晓昆博士的博士论文为基础改写,全书由程存学博士执笔统编。

本书的写作得到电子科技大学顾德仁教授、黄香馥教授的指导和帮助,作者仅向他致以诚挚的谢意。同时作者还要感谢李锋工程师、冯文澜讲师给予的支持,她们承担了所有手稿的准备工作,为该书的早日出版付出了辛勤的劳动。

著者 1992. 12

目 录

第一篇 非线性滤波理论、算法及其在图像处理中应用	(1)
第一章 绪论:非线性滤波器的发展	(2)
§ 1.1 非线性滤波的兴起	(2)
§ 1.2 中值型滤波器	(3)
§ 1.3 基于稳健信号估计和形态学的非线性滤波器	(5)
1.3.1 M 型滤波器	(5)
1.3.2 形态滤波器	(5)
§ 1.4 混合型滤波器	(6)
§ 1.5 非线性滤波器在图像处理中应用	(7)
第二章 广义中值滤波器	(8)
§ 2.1 中值滤波特性	(8)
§ 2.2 基于局部统计特性的自适应中值型滤波器(LAMED)	(8)
2.2.1 观测信号的局部统计特性	(9)
2.2.2 滤波算法	(10)
2.2.3 滤波特性	(11)
2.2.4 边缘位置估计	(11)
2.2.5 算法的计算机仿真	(12)
2.2.6 基于边缘方向判决的自适应滤波器(BDAF)	(12)
§ 2.3 多层中值型滤波器(MLMEDF)	(16)
2.3.1 滤波器基本结构	(18)
2.3.2 多层树结构滤波算法	(19)
2.3.3 滤波器确定性特性分析	(20)
2.3.4 统计特性分析	(21)
§ 2.4 混合滤波器	(22)
2.4.1 滤波器结构	(23)
2.4.2 非线性滤波的数学描述	(24)
2.4.3 Winsorized 均值中值混合滤波	(25)
2.4.4 测试结果	(28)
第三章 基于稳健 M 估计和 R 估计理论的非线性滤波器	(30)
§ 3.1 M 估计和 R 估计的稳健性	(30)
§ 3.2 M 型滤波器(M-Filter)	(30)
3.2.1 M 型滤波器理论	(30)
3.2.2 信号自适应 M 滤波器(AMF)	(33)
3.2.3 自适应递归 M 滤波器	(36)
3.2.4 二维自适应 M 滤波器	(36)
§ 3.3 基于秩估计的 R 滤波器算法	(37)

3.3.1 R 滤波理论	(37)
3.3.2 计分函数对滤波器性能的影响	(38)
3.3.3 边缘细节保持 R 型滤波器	(39)
3.3.4 L 滤波、M 滤波和 R 滤波的关系	(40)
§ 3.4 AMF 性能比较	(40)
3.4.1 AMF 性能比较	(40)
3.4.2 R 滤波器性能	(44)
第四章 堆滤波器算法研究	(45)
§ 4.1 引言	(45)
§ 4.2 变窗长堆滤波算法	(45)
4.2.1 滤波算法	(45)
4.2.2 滤波特性	(48)
4.2.3 算法分析和性能评价准则	(51)
4.2.4 算法改进	(51)
4.2.5 堆滤波器的数学形态学分析方法	(52)
第五章 非线性图像增强和检测	(56)
§ 5.1 图像增强的描述	(56)
§ 5.2 比较 FIR—中值混合滤波器	(56)
5.2.1 主从窗口 FIR—中值混合滤波器(MSFMH)	(57)
5.2.2 输出特性分析	(58)
5.2.3 边缘保持和增强	(59)
§ 5.3 基于广义均值滤波的边缘增强滤波器(BGMEN)	(60)
5.3.1 边缘增强的评价	(60)
5.3.2 基于平尾均值(WMEN)的一维边缘增强	(61)
5.3.3 特性分析	(64)
5.3.4 二维边缘增强的非线性滤波器	(67)
§ 5.4 基于方向中值滤波器的边缘检测	(70)
5.4.1 算法 I: 基于方向中值滤波器检测方法	(71)
5.4.2 算法 II: 基于统计特性的 Max/Min 滤波器。	(72)
§ 5.5 具有几个独立非同分布的随机矢量的最大最小值分布	(73)
参考文献 I	(76)
第二篇 三维计算机视觉——深度信息获取理论、算法及其应用	(84)
第六章 计算机视觉的发展	(85)
§ 6.1 景物的几何结构	(85)
§ 6.2 主动测距方法	(87)
6.2.1 成像雷达	(87)
6.2.2 主动三角形法	(87)
6.2.3 几何光学聚焦	(88)
6.2.4 Moire 技术	(89)
6.2.5 全息干涉测量	(89)

6.2.6 Fresnel 衍射技术	(89)
§ 6.3 从二维灰度图中恢复三维几何结构	(90)
6.3.1 “立体对”计算深度	(90)
6.3.2 从运动中提取景物结构信息	(93)
6.3.3 从光流中提取结构	(97)
6.3.4 从明暗中获得形状信息	(98)
第七章 特征边缘定位与匹配的实现	(99)
§ 7.1 平滑与导数过零点检测相结合的边缘提取技术	(99)
§ 7.2 快速边缘提取算法	(104)
§ 7.3 子像素级边缘的定位	(109)
§ 7.4 交互式图像序列特征点自动匹配方法	(115)
第八章 从运动中获取运动参数与深度信息	(116)
§ 8.1 从运动的图像序列中获取深度信息	(116)
§ 8.2 点对应的图像序列深度及运动参数估计方法	(117)
§ 8.3 抗噪声方法和误差分析	(122)
第九章 运动参数估计与深度信息恢复的算法及其实现	(18)
§ 9.1 算法描述	(128)
§ 9.2 算法的模拟与讨论	(133)
9.2.1 最小二乘解类算法	(136)
9.2.2 多元函数极值(变分退化形式)类算法	(133)
第十章 灰度/深度图像在计算机图像生成中的应用	(141)
§ 10.1 计算机图像生成的方法	(141)
§ 10.2 快速三维内插原理与算法	(148)
附录 A 3×3 正交阵与一秩阵之和的性质定理	(150)
附录 B 3×3 实矩阵的可分解性质	(152)
附录 C 对称矩阵扰动与最小特征值及其特征	(154)
附录 D ε 外推算法	(155)
参考文献 I	(157)
结束语	(163)

第一篇

非线性滤波器理论、

算法及其在图像处理中应用

第一章 绪论:非线性滤波器的发展

§ 1.1 非线性滤波的兴起

物理世界离不开能量和信息。事物的运动靠的是能量,而客观事物的状态就是信息。人类在认识自然,改造自然的社会活动中,就是要不停地了解客观事物的状态,就需要传递信息。尤其是在当今知识爆炸的信息社会里,人们对获取信息的质量要求越来越高。图像通信就是以其直观性、准确性和高效性确立了在现代通信中的地位。随着计算机科学和微电子技术的发展,数字图像处理已形成一套完整的理论体系,它在物理、化学、生物医学、天文气象、地质地理等许多学科以及在工业、农业和军事上获得广泛的应用。

理论源于实践,通过实践所获得的理论又用于指导实践。理论和实践这种相互促进的关系推动科学技术的不断向前发展。我们知道,实际观测的图像信号,在形成、传输、接收和处理过程中,由于通过媒质的实际性能和接收设备的限制,不可避免地存在着外部干扰和内部干扰。例如,卫星遥感图像,经过大气紊流和电离层时,由于吸收系数和折射系数的随机性,必然产生对信号振幅、频率和相位的调制,这属于乘性干扰。大气层、电离层、宇宙空间等各种自然界的电磁过程以及电气设备、人为因素、接收和处理设备内部存在的噪声干扰,属于加性干扰。正是由于随机干扰的存在,使观测的图像信号变质。因此,滤除噪声、恢复和重建原始图像就形成图像处理学的一个重要分支。所谓噪声图像滤波,概括地说,就是对来自实际观测的图像加工,提取有用信息。在本世纪的四十年代,N. Wiener 等人阐明了在平稳条件下的线性滤波理论,即著名的 Wiener 滤波器理论^[1]。这些理论在通信及控制领域得到广泛应用,并已应用在图像滤波中^{[1][2]}。但是,Wiener 滤波要求存储量大,计算复杂度高,不便于实时处理,不适用于矢量和非平稳过程的滤波。五十年代中期,随着空间技术的发展,要求对卫星等空间飞行器的运动状态进行估计和预测,以实现精确的测轨和跟踪。为此,1960年,R. E. Kalman 将状态变量的概念引入到最小均方误差估计中,得到了离散线性动态系统状态估计的递推算法,在空间技术中得到广泛应用,这就是著名的卡尔曼滤波理论^{[1][2]},但是,它仍然存在着计算复杂度高,不便实时处理等缺点。

线性滤波器以其完善的理论基础,数学处理简单,易于采用 FFT 和硬件实现等优点,一直在图像滤波领域占有举足轻重的地位。但是,我们分析也发现,尽管线性滤波器(FIR IIR)对加性高斯噪声有较好的平滑作用,但是,对脉冲干扰和其它形式的噪声干扰抑制效果差,模糊信号边缘。为此,1971年,著名学者 Tukey 在他的开拓性论文中,提出一种非线性滤波器——中值滤波器^[3]。从此,非线性滤波及其在图像处理、语音处理等领域中的应用如雨后春笋,在国际上迅速广泛地兴起。理论探讨、快速算法研究、硬件设计、系统应用等方面发展迅速。特别是在1983年后,这一领域发展更加迅速,非线性理论与统计学理论有机结合,形成一门新兴的研究领域。其实用领域诸如:层析 X 射线摄影、地震信号处理、机器人视觉、医学成像等方面。这些理论和应用有机结合,证明非线性滤波具有生命力,同时也促使这一领域研究向纵深发展。

§ 1.2 中值型滤波器

中值滤波器研究始于 Tukey^[3] 的开创性工作。Justusson^[10] 和 Tyan^[11] 深入地、系统地研究了中值滤波的确定性特性和统计特性,得到了一些颇有价值的理论成果,使得中值滤波研究从理论走向实践,成为近年来十分活跃的研究领域之一。在理论上,中值滤波器的冲激响应和阶跃响应特性、根信号特性、根信号收敛特性、弱叠加特性和堆栈特性都得到了深入地研究^[12-24];在实践上,中值滤波器的各种硬件实现^[25-32],应用在语音信号处理^[33,34]、图像噪声滤波、边缘增强和边缘检测^[35-49]、图像块截断量化编码^[50]等领域,取得了令人瞩目的结果。

由于中值滤波器具有冲激响应为零和边缘保持特性,近十年来,一直是非线性滤波研究的主流,滤波原理如图 1.1 所示。

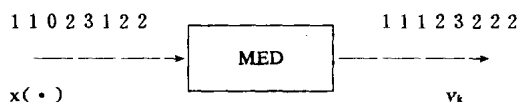


图 1.1 中值滤波器原理图

然而,正如许多文献指出,中值滤波器从一维信号扩展到多维信号处理,并不是总能取得满意的效果,尽管中值滤波器具有良好的窄脉冲干扰抑制能力,但使附加信号失真和对图像信号结构信息丢失。例如,在二维图像中的细线、尖锐的边角,经中值滤波后,可能丢失。在最小均方误差准则下,文献^[110]详细地比较了四种滤波器的性能,其结果表明:中值滤波综合性能并不比其它类滤波器优越,另外,我们知道,虽然中值滤波器对长拖尾分布噪声滤波性能很好,但对中拖尾和短拖尾分布噪声,滤波性能变差,且当分布拖尾越短,其滤波能力越差。例如,在加性高斯噪声干扰下,其滤波方差比均值滤波方差大 57%。基于中值滤波器这些缺点和优点,多年来,许多学者都试图寻求一种新型的滤波结构,使其既能够保持中值滤波器的优点,又能够克服它的弱点。在图像处理领域,就是要具有良好的各种噪声抑制能力,同时又有完备地保持图像的几何结构信息。1983 年, A. C. Bovik 和 T. S. Huang 等人,在中值滤波器原理和秩排序统计学基础上,提出一种广义化中值滤波结构——排序统计滤波器(OSF)^[5],一维定义为:

$$y_k = \sum_{i=1}^{2N+1} a_i x_{(i)}^k \quad (1.1)$$

其中, y_k 是滤波器在窗中心为 k 位置时的输出, $x_{(i)}^k$ 是滤波窗为 $2N+1$ 内样本排序值,满足 $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(2N+1)}$,从定义式看出,OS 滤波器是把滤波窗内的样本排序加权组合作为滤波器的输出。在性能上,OS 滤波器(也称 L 滤波器)是线性滤波器和中值滤波器的有效折衷。对于嵌在独立同分布(i.i.d)噪声中的常数信号,在 MSE 准则下,L 滤波是最优滤波器,但是在非常数信号和信号相关噪声情况下,L 滤波器设计十分困难。文献^[84,85]指出,对于噪声污染的非常数信号,利用样本均值,可以得到 MSE 准则下最优 L 滤波器系数,并应用在马尔可夫链的恢复。L 型滤波器不但是一种新型的滤波结构,重要的是,它拓宽了非线性滤波研究领域^[51-55]。从此,在国外,掀起了非线性滤波研究的热潮。相继提出了许多具有实用价值的非线性滤波结构和实现算法。1987 年, A. Neiminen 等人提出了具有自适应结构的中值型滤波器^[21],它把自适应滤波和中值滤波的优点有机地结合在一起,对信号的快变化和细节保持优于传统的线性自适应滤波器和中值滤波器。同一年, Y. H. Lee 等人提出自适应排序统计滤波器^[45],它是基于中值、均值比较输出,完成对噪声图像的边缘增强,并取得令人满意的结果。R. Berntsen, X. Z. Sun, J. Pitas, J. B. Bednar 等人相继提出了许多具有启发性的滤波结构和算法^[111,128,112]。1986

年, P. D. Wendt, E. J. Coyle 等人提出堆栈滤波器的结构^[114], 把排序统计滤波器的理论研究和 VLSI 实现又推进一步, 导出了许多新颖的非线性滤波结构。堆栈滤波器有效地把排序统计过程与门限逻辑, 正布尔函数等概念相结合。其滤波器原理如图 1.2 所示。

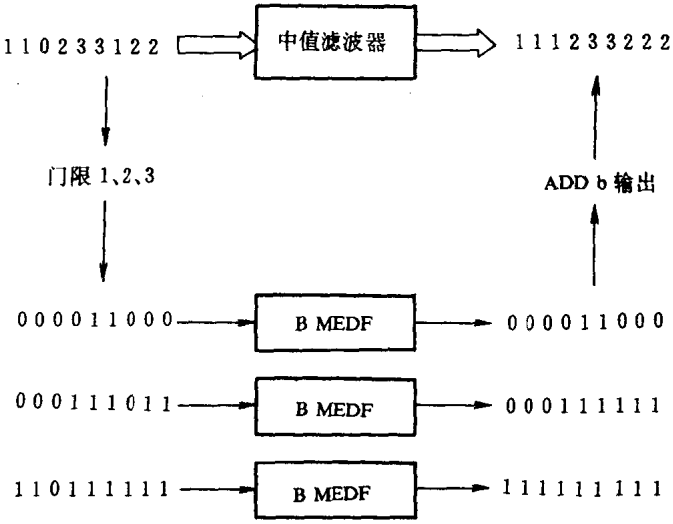


图 1.2 堆栈滤波器原理图

从图中可以看出, 观察样本经门限化后, 形成一系列二值阵列。滤波器处理的是二值电平信号, 这为排序统计滤波器的分析和硬件实现提供强有力的工具。此后, 相继提出的有自适应堆栈滤波器等, 并成功地应用在图像噪声滤波、边缘增强等领域^[115-120]。综述近十年来, 中值滤波器, 排序统计滤波器以及堆栈滤波器的理论、算法和应用领域的发展, 不难得出以下几个在实际中有意义的结论:

(1) 中值滤波器是一种简单有效的信息提取处理器, 即是有效的非参数估计器。尽管有许多稳健的估计器存在, 但是, 中值滤波器仍以有效地抑制脉冲噪声、保持边缘特性, 在图像滤波、增强和特征提取方面, 独领风骚。其性能虽不一定最优, 但能取得满意的结果。通过详尽地分析中值滤波器的确定性特性和统计特性, 我们也发现, 二维中值滤波往往破坏图像的几何结构。虽然可分离中值滤波^[130]较好地保持图像结构特征, 但是, 它使根信号的分辨率下降。因此, 研究一种滤波器结构, 满足抑制各种噪声和保持图像几何结构仍是中值型滤波器一个有意义的研究课题。

(2) OS (order statistics) 滤波器充分地利用信号样本之间的相关信息, 以非线性排序和线性加权组合两步完成滤波操作, 但是, 寻找一组优化的权系数, 使滤波器输出与所需信号之间均方误差最小, 是一个非常困难的任务。因此, 各种改进型 OS 滤波器都是针对特定的噪声分布形式提出的, 从本质上, 并没有很好地解决 OS 滤波的最优权系数问题。1989 年, Bovik 本人根据 OS 滤波与非递归线性滤波的映射关系, 得出了在输入信号足够平滑区域, OS 滤波与线性滤波具有相同的权系数, 对于不满足平滑条件的信号, OS 滤波与线性滤波具有相似的输出信号形状^[131]。但是, 在图像信号处理领域, 研究一种具有自适应追踪图像变化, 保持几何结构的 OS 滤波和秩排序滤波 (R 滤波)^[135]是十分必要的。

(3) OS 滤波器、R 滤波器、中值滤波器的弱叠加性和堆栈特性, 为硬件实现提供了基础。纵观许多实现方案^[25-32], 大都采用门限分解, 使多电平信号变成 0, 1 电平信号, 用逻辑电路实现。但是对高电平信号, 输出端设计很复杂, 寻找一种多电平实现方案仍是待研究的课题。

§ 1.3 基于稳健信号估计和数学形态学的非线性滤波器

1.3.1 M型滤波器

自从 P. J. Hubber 的开拓性论文^[6]“位置参数的稳健估计”发表后,稳健信号处理的研究发展很快,它已渗透到信号检测、信号估计、噪声信号滤波等方面。所谓稳健滤波是指滤波系统满足下列条件:

- (1)当假定的观测信号模型符合真实信号模型时,滤波器具有最优或接近最优的信号输出;
- (2)当假定模型偏离真实信号模型时,滤波器的性能变化很小;
- (3)当假定的观测信号模型偏离真实信号模型较大时,滤波器的性能不会变得很差或导致破坏性后果。

Hubber 给出了估计器的定义方法,假设观测样本 $\{x_i\}_1^{2N+1} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2N+1}\}$, 估值操作为 $T_{2N+1}(x_1, x_2, \dots, x_{2N+1})$, 则估计器输出为:

$T = T_{2N+1}(x_1, x_2, \dots, x_{2N+1})$ 使下式满足

$$\sum_i \rho(x_i - T) \rightarrow \text{minimum} \quad (1.2)$$

其中, ρ 是非常数函数, 如果令 $\psi = \rho'$, 则式(1.2)成为(1.3):

$$\sum_i \psi(x_i - T) = 0 \quad (1.3)$$

如果用渐近方差替代真实方差评价估计器性能, 则最稳健的估计器就是 M 型估计器, 对应的 ρ 函数为:

$$\rho(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2 & |t| \leq k \\ k|t| - \frac{1}{2}k^2 & |t| \geq k \end{cases} \quad (1.4)$$

对于随机信号加噪声的线性滤波, 如果已知观测样本的二阶矩, 那么其最小均方误差估计可通过标准过程求得, 当观测模型不确定时, 欲要获得好的输出结果, 一种有效的方法就是采用稳健的最小最大估计^[63], 即在最不利的工作点情况下, 寻找一种滤波器, 使输出仍有较好的结果。由 M 型估计和最小最大估计而引伸出的 M 型滤波器是近年来一个崭新的研究领域, 并已取得一些有实用价值的成果^[61-71]。Y. H. Lee 和 S. A. Kassam 等人将稳健的 M 型滤波器用于图像滤波和图像增强^[125], 得到很好的结果, 但是, M 滤波器是一种新型的非线性滤波器, 有许多待研究的课题:

- (1)M 型滤波器的各种改进形式以及如何应用 M 型滤波器滤除图像的干扰, 保持图像边缘和细节。
- (2)M 型滤波特性及与 L 滤波器、堆栈滤波器的关系。

1.3.2 形态滤波器

数学形态学研究始于 Matheron^[180] 和 Serra^[182] 工作。1985 年后, 它逐渐变成一种强有力的分析信号几何特征的工具。正如 Serra 指出, 数学形态学是建立在集合代数基础上, 定量地描

述几何结构的科学,因此,它被广泛地应用在图像几何结构分析。前面述及的中值滤波器以及由它推广的 L 滤波器等都是非参数的稳健信号平滑器。在统计参数估计的意义上,它们都能够侧重不同地保持图像几何特征。建立在数学形态学基础上的形态滤波器,也是一种非线性滤波器。它能有效地、局部地修正图像的几何结构。R. Stevenson 和 G. R. Arce^[183]对形态滤波器的统计特性和错列组合特性做了深入分析,提出用概率映射的观点分析滤波性能。文献^[184-183]详细地分析了形态学的几个基本算子以及特性,并指出,数学形态学语言实质是集合论的语言。在集合论中非常强调几何形态,这一点也非常适合于图像处理中的应用。文献^[186-187]系统地总结和分析了形态滤波器与线性移不变滤波器、中值滤波器、排序统计滤波器、堆栈滤波器的内在关系,阐述了形态滤波器在图像滤波、图像检测、特征提取方面的应用前景。文献^[188-193]分别从不同侧面,论述了形态滤波器的应用。综上所述,可以看出,形态滤波器具有完备的数学基础。这为形态滤波器的特性分析和系统设计奠定了坚实基础。同时,形态学十分强调几何结构,这为形态滤波器在图像滤波、分析、表述、检测和压缩编码等领域展示一个美好的应用前景。总之,形态滤波及在图像处理中的应用发展很快,方兴未艾,有许多课题待进一步研究。

§ 1.4 混合型滤波器(Hybrid Filter)

线性滤波以其完备的数学基础,便于采用 FFT 技术,硬件实现方便和对加性高斯噪声有良好的平滑作用等优点,一直是图像处理的主要工具^[1-4]。它的主要缺点是对脉冲干扰和信号相关噪声抑制能力差,特别是它的模糊图像边缘,破坏了图像几何结构。这些缺点极大地限制了线性滤波器在图像处理中的应用。非线性滤波以其良好的噪声抑制能力,保持图像结构信息等优点,令人瞩目。但是,算法设计和硬件实现较复杂。如何充分发挥线性滤波和非线性滤波的优点,克服其不足,自然形成了滤波技术的一个重要分支。1987 年, P. Heinonen 和 Y. Neuvo^[161]首先提出具有 FIR 线性子结构的中值型滤波器,其一般结构如图 1.3 所示。

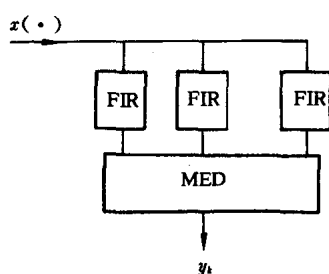


图 1.3 FIR—中值滤波器

随后,他们充分利用 FIR 滤波器设计的自由度,提出了用 FIR—中值滤波完成图象的边缘检测^[162],相继出现有 Wiener—中值混合滤波器^[164]、IIR—中值滤波器、FIR²—中值混合滤波器^[165]、D 滤波与中值滤波的自适应混合滤波器^[166]。每个混合型滤波器的子结构数目和传输函数可根据图像信号结构和噪声分布而定。由于加入线性子结构,使系统设计自由度大,并能改善整个滤波系统的性能。

§ 1.5 非线性滤波器在图像处理中应用

非线性滤波器结构和算法一经提出,人们就开始将非线性滤波技术应用于各种实际图像处理中。与非线性滤波理论自身发展相伴随,非线性滤波在图像中的应用也迅速发展。到今天,非线性滤波技术已渗透到图像滤波、图像检测、图像增强和图像压缩编码等领域。非线性滤波在短短的几年内就已确立了它作为图像处理的基本方法之一的牢固地位。在滤波方面,它在滤除噪声的同时,保持图像的几何结构;在边缘增强方面,它能够既保持优良的噪声抑制能力,同时使对比度增强;在特征提取方面,它以不同于高通滤波器的机理,从局部特征抽象出统计特征。

从某种意义上说,图像处理技术是一门仿生学。它是以计算机为中枢,结合其它设备(例如传感器)来模拟动物视觉部分功能的技术。由于计算机技术的飞速发展,分析处理大量数据信息的条件完全具备,这样,伴随计算机技术发展而发展的图像处理技术已从蓓蕾初放,到现在的花开满园,硕果累累。各种应用领域的要求越来越复杂,源于应用的各种新技术,新理论层出不穷,反过来又促进了应用研究。非线性滤波技术就是在应用与理论反复演绎中不断发展,到今天,才以优良的处理性能,确立了在图像处理中地位。综述近十多年来非线性滤波在图像处理中的应用,大致可分为七类:

- (1)中值型滤波;
- (2)L 型滤波;
- (3)R 型滤波;
- (4)M 型滤波;
- (5)堆栈滤波;
- (6)形态滤波;
- (7)混合滤波。

从本质上讲,上述七种非线性滤波技术存在着内在联系。正是由多种非线性滤波技术既相互关联,又各具优点,使这一领域研究不断向纵深发展。从实用角度看,非线性滤波技术在图像处理中有广阔的发展前景。

第二章 广义中值滤波器

§ 2.1 中值滤波器特性

噪声信号滤波是一个古老而困难的任务。经典的滤波理论,由于具备完备的数学基础,一直在信号滤波、检测中占主导地位。经典的信号处理方法是基于对干扰和信号的概率分布做某些理想化假定,在假定理想模型下,设计对某种性能准则为最佳的信号处理器(例如,Wiener滤波器)。当真实分布偏离假定分布时,处理器是否为最佳不是经典处理方法研究的主题。另一种信号处理器就是对观测模型不做假定,不限制概率分布的具体情况,其中,中值滤波器^[3]就是一种非线性、非参数的信号处理器。标准中值滤波器定义为:

$$y_k = \text{MED}\{x_{k-N}, x_{k-N+1}, \dots, x_k, \dots, x_{k+N-1}, x_{k+N}\}$$

其中 y_k 表示滤波器在时刻 k 的输出, $\{x_i\}$ 是输入序列, MED 表示取中值操作。中值滤波器的滤波过程由两个操作组成。第一步完成对滑动滤波窗 $(2N+1)$ 内的样本 $\{x_i\}$ 进行排序,使 $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(2N+1)}$ 成立;第二步完成取中值操作。排序过程是非线性过程,因此,中值滤波器不满足迭加定理,也不能用付氏变换技术分析。由于中值滤波器很好地解决了消除脉冲干扰和保持信号边缘问题^[38],二十年来,日臻完善,已广泛应用在语音信号和图像信号处理等领域。分析中值滤波特性,特别是在图像处理中的应用,可以发现,标准中值滤波器存在下列缺点:

①从信号估计理论观点看,由于标准中值滤波是非参数估计,在处理过程中,并没有充分地利用实际中可以获得的观测模型统计知识,存在着相当的保守性和盲目性。

②中值滤波器对长拖尾概率分布噪声(脉冲噪声)有很好的抑制能力,但对中拖尾分布(高斯分布)和短拖尾分布(均匀分布)噪声抑制能力显著下降。

③当滤波窗内的脉冲干扰样本数(象素数)大于窗长一半时,中值滤波没有滤波效果。此时,依靠增加滤波窗尺寸,固然可提高噪声滤除能力,但是丢失图像细节。

④图像中的一些细线,尖锐边角,经中值滤波后被消去,破坏图像几何结构。

⑤对于非常数信号受到脉冲干扰,中值滤波后会出现边缘抖动,即使在低噪声区,仍有边缘位移。

⑥经多级中值滤波可获得根信号,但是无法保证根信号就是原信号,最坏情况是:根信号完全是噪声分量。

§ 2.2 基于局部统计特性的自适应 中值型滤波器(LAMED)*

最简单的信号平滑技术是样本均值和样本中值滤波,尽管样本均值对信号的慢变化区提供了良好的噪声平滑能力,但它模糊边缘。正如前节所述,中值滤波器具有滤除脉冲干扰,保持边缘的能力。如图 2.1 所示,图(a)是输入信号,(b)(c)(d)分别表示经滑动窗长为 $2N+1=3$,

* (Local Adaptive Median filter)

5,7 的中值滤波结果。由图可见,中值滤波器的脉冲抑制能力取决于滑动窗的尺寸,而且,由于脉冲干扰效应,滤波后的边缘位置出现移动。因此,选择一个合适的窗长度是完成脉冲滤除和边缘保持的关键。对于二维信号而言,选择合适的窗尺寸和形状同样重要。X·Z·Sun 提出一种自适应窗的中值滤波器^[42],并成功地应用在一维和二维信号处理中。它是根据样本幅度差来决定脉冲数目和窗尺寸。对于脉冲滤波,这无疑是一种好的方案,但它存在三个缺点:

①对高斯分布噪声,同样存在固定窗中值滤波没有解决的问题。

②边缘抖动问题。

③对窄边缘,可能被抑制。

中值型滤波无法解决上述问题的根本原因就是没有充分地利用观测样本的统计特性。

2.2.1 观测信号的局部统计特性

一般地说,人的视觉对平坦区噪声非常敏感,对边缘区噪声不敏感,但是,对一种滤波器结构和算法来说,人们总是期望它能够消除所有的干扰,保持信号的锐度。这里,我们针对中值滤波和自适应窗中值滤波器存在的缺点,基于边缘位置检测和观测样本的局部统计特性,提出一种自适应中值型滤波器。

设观测样本序列模型为:

$$x(i) = s(i) + n(i) \quad \forall i \in Z \quad (2.1)$$

$s(i)$ 是信号在 i 位置的值, $n(i)$ 是噪声样本, Z 是整数集合,这里,我们没有假定 $n(i)$ 的统计特性。

定义(1): 样本 $x(i)$ 的 δ 邻域 W_δ 为:

$$W_\delta = \{x(i); -\delta \leq i \leq \delta \quad \forall i \in Z\} \quad (2.2)$$

对于观测序列 $x(i)$,一般地说,是非平稳的随机过程,但是,对于一个足够小的 δ 邻域,可以认为 $x(i)$ 是局部平稳和各态历经的(在实际问题中这种假定是正确的)。对于滑动窗滤波器,观测样本 $x(i)$ 的 δ 邻域可以理解为滤波窗中心在位置 k 的一个固定区域,因此,观测样本的局部统计特性定义为:

$$\text{观测样本均值: } m_x = \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^{i+N} x(i) \quad \forall i \in Z \quad x(i) \in W_x \quad (2.3)$$

$$\text{观测样本方差: } V_x = \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^{i+N} (x(i) - m_x)^2 \quad \forall i \in Z \quad x(i) \in W_x \quad (2.4)$$

这里,近似用窗内的局部统计特性表示了待估计样本的统计特性。其中 W_x 表示样本集合。

在文献中^[41-44],设计滤波器结构和算法时,都假定加性噪声 $n(i)$ 是具有确定统计特性的随机过程,这往往不符合实际情况。因此,我们将进一步给出噪声估计的统计特性,在一维情况下,当滑动滤波窗沿着观测序列 $x(i)$ 移动时,每移动一个样本点,就得到一个输出估值 $\hat{x}(i)$,利用输出估值 $\hat{x}(i)$ 和窗中心位置的观测样本值 $x_k(i)$ 之差作为噪声估值是合理的,即: $\hat{n}(i) = \hat{x}(i) - x_k(i)$ 。伴随着滤波窗的移动,就形成了噪声估值序列,如图 2.2 所示。由此,定义噪声的局部

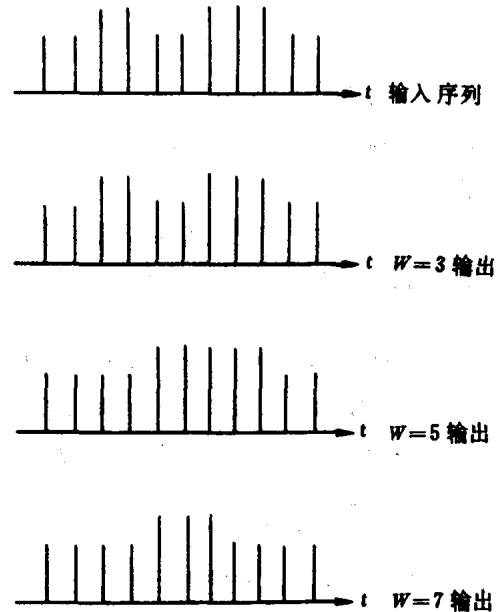


图 2.1 不同窗长中值滤波

统计特性如下:



图 2.2 一维信号噪声窗

$$\text{均值} \quad m_n = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=k-M}^{k+M} \hat{n}(i) \quad \forall i \in Z, \hat{n}(i) \in W_n \quad (2.5)$$

$$\text{方差} \quad V_n = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=k-M}^{k+M} (\hat{n}(i) - m_n)^2 \quad \forall i \in Z, \hat{n}(i) \in W_n \quad (2.6)$$

式中 W_n 表示噪声估值集合, 由于噪声估计来源于观测序列, 故其变化慢于观测样本变化, 因此, 一般取 $M \geq N$ 。

表征随机变量变化特征最重要的参数就是方差, 根据观测样本的局部统计特性和噪声估计的统计特性, 可以得到信号变化特征, 定义信号变化指示因子:

$$r = \max\{V_x - V_n, 0\} \quad (2.7)$$

r 可以较确切地反映在滑动滤波窗内信号变化情况。如果 r 足够大, 说明在窗内信号变化大, 即窗内存在边缘; 如果 r 较小, 则说明在窗内信号足够平坦。因此, 可以根据 r 的变化来自适应选择滤波器结构和算法, 完成对噪声的滤波和保持边缘细节。

2.2.2 滤波算法

定义(2): 观测信号的平均变化率 T_k :

$$T_k = \frac{V_x}{2N+1} \quad (2.8)$$

T_k 的物理意义在于它表明在滤波窗内, 观测样本的平均变化率, r 和 T_k 的意义是不同的, 如果在固定长度的滑动窗内, T_k 越大, 表明观测样本变化越大, 但并不一定说明 r 也大。例如, 在信号平坦区内有强脉冲干扰存在, 那么 V_x 变大, 但是 V_n 也大, $r = V_x - V_n$ 就不一定大, 但是 T_k 一定大。在边缘区, V_x 较大, V_n 不大, T_k 也大, 因此, 利用 r 与 T_k 的比较可以自适应地修正滤波算法。

定义(3): 滤波修正因子 r_1 为:

$$r_1 = \frac{V_n}{V_x} \quad (2.9)$$

根据 r, T_k, r_1 定义, 我们得到滤波算法为:

$$y_k = \begin{cases} \text{MED}\{x(i)\} + r_1(x_{\text{MED}} - x_{\text{MEN}}) & \text{如果 } r > T_k \\ \text{MEN}\{x(i)\} + r_1(x_{\text{MED}} - x_{\text{MEN}}) & \text{如果 } r \leq T_k \end{cases} \quad (2.10)$$

式中, MED 和 MEN 分别表示对窗内所有样本取中值和取均值操作, x_k 表示滤波窗中点对应的观测样本, x_{MED} 和 x_{MEN} 分别表示中值和均值滤波输出, r_1 是一个常数, 满足 $0 \leq r_1 \leq 1$, 利用 r 与 T_k 决定信号的区域, 信号本身变化 r 大于观测样本的平均变化率时, 说明此时滤波窗内含有信号边缘, 中值滤波器保持边缘优越性得到充分地发挥, 在信号平坦区, 即使有脉冲扰动, 也能够满足 $r \leq T_k$, 滤波修正因子 $r_1(x_{\text{MED}} - x_{\text{MEN}})$ 很好地调整了滤波器的输出。一般情况下, 我们选择窗长为 3, 5 和 7, 如果污染度为 $e = 0.2$, 则平均每个窗位置出现一个脉冲, 利用 (2.10) 很好地完成对脉冲噪声, 高斯分布噪声的抑制, 保持信号的几何结构。滤波结构如图 2.3 所示。