



国防特色学术专著·信息与通信工程

形态滤波器原理 及应用

赵春晖 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



国防特色学术专著·信息与通信工程

哈尔滨工程大学研究生教材建设专项资金资助出版

形态滤波器原理及应用

赵春晖 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了数字形态滤波器的基本原理、数学基础、各种形态滤波算法和主要实现技术,并给出了一些应用实例。全书共分十章,内容包括:数学形态学基本原理、数字形态滤波器的基本理论、广义形态滤波器及其算法、多结构元素广义形态滤波器、全方位结构元素形态滤波器、形态滤波器结构元素的自适应优化算法、柔性形态滤波器及优化设计、灰度形态滤波器的快速算法、基本形态滤波器的硬件实现,以及形态滤波器在图形提取、心电信号处理、工程图纸去噪、散斑噪声抑制、图像边缘检测、图像编码、高光谱遥感图像异常检测、水声图像和振动信号处理等领域中的应用。

本书可供信号处理、图像处理、计算机视觉和模式识别等研究领域的专业技术人员、研究生和高年级大学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

形态滤波器原理及应用/赵春晖著. —哈尔滨:

哈尔滨工程大学出版社,2013. 1

ISBN 978-7-5661-0525-7

I. ①形… II. ①赵… III. ①数字滤波器
IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023339 号

形态滤波器原理及应用

赵春晖 著

责任编辑 张盈盈

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://www.hrbeupress.com> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心 各地书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:9.125 字数:325 千字

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5661-0525-7 定价:21.00 元

前 言

随着现代数字信号处理技术的发展,非线性数字信号处理方法在信号处理领域中的地位和作用变得越来越重要,因为从自然现象和社会现象中涌现出来的大量信号处理问题是非线性的。线性数字信号处理方法虽然在理论上比较成熟且实现起来相对简单,但它对非线性问题的处理结果在大多数情况下不是十分理想的。近三十年来,非线性数字信号处理技术已取得了长足进展,其中包括对非线性数字滤波器的研究。

噪声信号(图像)的滤波是信号处理的基本任务之一,过去这一任务主要由线性滤波器来完成。但线性滤波器不能有效地抑制各种非加性噪声(如脉冲噪声、散斑噪声等),且不利于信号边缘、图像轮廓等细节特征的保持;因而,近年来的噪声信号(图像)恢复问题经常采用非线性滤波器来处理。在诸多种类的非线性滤波器中,形态滤波器是最具代表性很有发展前途的一种滤波器,因为它是以数学形态学为理论基础,具有并行快速实现的特点,一直受到国内外学者的普遍关注和广泛研究。数字形态滤波器作为一种非常重要的非线性滤波器,它在图像分析与处理、计算机视觉和模式识别等领域获得了广泛的应用,是目前非线性数字信号处理领域中研究的热点课题。

本书是国内第一部专门论述形态滤波器基本理论、算法和应用的专著,它是在作者承担的国家自然科学基金(69802005、60172038)课题成果总结和所完成的博士学位论文基础上,结合作者的博士后研究工作并参考国内外较新的文献撰写而成的。全书共分10章,第1章介绍了数学形态学基本原理,包括形态变换的类型和性质,这是研究形态滤波器的基础;第2章介绍了数字形态滤波器的基本理论,包括标准形态滤波器的定义和性质,以及根信号特性和统计特性分析;第3章论述了广义形态滤波器

的概念,并分析了它们的性质和统计特性;第4章介绍了多结构元素广义形态滤波器(包括并行复合和自适应加权)的原理和算法;第5章将全方位结构元素的概念引入形态滤波器中,构造了全方位多级组合形态滤波器和全方位多级加权形态滤波算法;第6章论述了形态变换与形态滤波器结构元素的自适应处理优化算法;第7章论述了柔性形态滤波器的基本原理,并分别利用遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法,对柔性形态滤波器进行了优化设计;第8章利用结构元素构成的基矩阵,实现了灰度形态滤波器的快速算法;第9章介绍了基本形态滤波器的硬件实现方法;第10章介绍了形态滤波器在图形提取、心电信号处理、工程图纸去噪、散斑噪声抑制、图像边缘检测、图像编码、高光谱遥感图像异常检测、水声图像和振动信号处理等领域的应用。附录给出了书中主要符号的说明,以供读者查阅和参考。

目前,国内有关数学形态学方面的论著已出版不少,但专门论述形态滤波器方面的专著还比较匮乏。希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,推动我国非线性滤波领域研究的进展。

本书的出版得到了全国优秀博士学位论文作者专项基金和哈尔滨工程大学研究生教材建设专项资金的支持。本书在撰写过程中,得到了美国 Wisconsin - Milwaukee 大学的 J. Zhang 教授的大力帮助,他在百忙中审阅全部书稿,并提出了许多宝贵的意见和建议;作者指导过的博士后蒋立辉、宁海春和研究生孙锐、吴观峰、刘明媛为本书做了部分仿真工作,在此表示感谢。另外,本书撰写过程中,参阅了有关书籍和文献,同时也向这些作者致以诚挚的谢意!最后,感谢哈尔滨工程大学出版社对本书的出版给予的配合和支持。

由于形态滤波器理论性强、技术性新,加之作者水平有限,难免有不妥或者错误之处,敬请读者指正。

著 者

2012年8月于哈尔滨

目 录

第1章 数学形态学基本原理	1
1.1 数学形态学的产生与发展过程	1
1.2 数学形态学基本原理	3
1.3 二值形态学	5
1.4 灰度形态学	10
1.5 形态学表示定理	12
第2章 数字形态滤波器基本理论	15
2.1 引言	15
2.2 数字空间、离散点集和数字图像的简单描述	17
2.3 离散形态变换和数字形态滤波器的一般描述	19
2.4 数字形态滤波器的统计特性	32
第3章 广义形态滤波器及其算法	49
3.1 引言	49
3.2 广义形态滤波器的定义和性质	50
3.3 广义形态滤波器统计特性分析	54
3.4 自适应加权组合广义形态滤波器	64
第4章 多结构元素广义形态滤波器	71
4.1 引言	71
4.2 一类多结构元素并行复合广义形态滤波器	72
4.3 多结构元素自适应加权平均广义形态滤波	78

第5章 全方位结构元素形态滤波器	85
5.1 引言	85
5.2 全方位多级组合形态滤波器	86
5.3 一种全方位多级加权组合形态滤波算法	96
第6章 形态滤波器结构元素的自适应优化算法	102
6.1 引言	102
6.2 误差准则	102
6.3 腐蚀与膨胀的隐函数表示	103
6.4 腐蚀与膨胀的自适应算法	105
6.5 任意组合形态滤波器的自适应算法	107
6.6 仿真实验示例	108
第7章 柔性形态滤波器及优化设计	111
7.1 柔性形态滤波器的定义	111
7.2 柔性形态滤波器的层叠滤波表示与特性分析	113
7.3 基于遗传算法的柔性形态滤波器优化设计	123
7.4 基于模拟退火算法的柔性形态滤波器优化设计	136
7.5 基于禁忌搜索算法的柔性形态滤波器优化设计	142
7.6 小结	155
第8章 灰度形态滤波器的快速算法	157
8.1 引言	157
8.2 开、闭滤波器的快速实现	157
8.3 开-闭、闭-开滤波器的快速实现	162
第9章 基本形态滤波器的硬件实现	170
9.1 引言	170

9.2	灰度形态滤波器的实现	171
9.3	柔性形态滤波器的实现	179
9.4	形态图像处理器	182
第 10 章	形态滤波器的应用实例	186
10.1	在图形提取中的应用	186
10.2	在心电信号处理中的应用	191
10.3	在工程图纸噪声滤除中的应用	200
10.4	在散斑噪声抑制中的应用	204
10.5	在噪声污染图像的边缘检测中应用	216
10.6	在高保真子波图像编码中的应用	221
10.7	在高光谱遥感图像异常检测中的应用	234
10.8	在水声图像处理中的应用	246
10.9	在振动信号处理中的应用	251
附录	.....	258
参考文献	.....	261

CONTENTS

CHAPTER 1	THEORY OF MATHEMATICAL MORPHOLOGY	.....	1
1.1	The Origin and Development of Mathematical Morphology	.....	1
1.2	The Basic Theory of Mathematical Morphology	.....	3
1.3	Binary Morphology	.....	5
1.4	Grayscale Morphology	.....	10
1.5	The Theorem of Morphology Expression	.....	12
CHAPTER 2	BASIC THEORY OF DIGITAL MORPHO - LOGICAL FILTRES	.....	15
2.1	Introduction	.....	15
2.2	Simple Description of Digital Space, Discrete Point Set and Digital Image	.....	17
2.3	General Description of Discrete Morphological Transformations and Digital Morphological Filters	.....	19
2.4	Statistical Properties of Digital Morphological Filters	.....	32
CHAPTER 3	GENERALIZED MORPHOLOGICAL FIL TERS AND THEIR ALGORITHMS	.....	49
3.1	Introduction	.....	49
3.2	Definitions and Properties of Generalized Morphological Filters	.....	50
3.3	Statistical Property Analysis of Generalized Morphological Filters	...	54
3.4	Adaptive Weighted Combination Generalized Morphological Filters	.....	64
CHAPTER 4	GENERALIZED MORPHOLOGICAL FIL TERS WITH MULTIPLE STRUCTURING ELEMENTS	.....	71
4.1	Introduction	.....	71
4.2	A Class of Parallel Compound Generalized Morphological Filters with Multiple Structuring Elements	.....	72
4.3	Adaptive weighted Averaging Generalized Morphological Filters		

with Multiple Structuring Elements	78
CHAPTER 5 MORPHOLOGICAL FILTERS WITH OMNI – DIRECTIONAL STRUCTURING ELEMENTS	85
5.1 Introduction	85
5.2 Omnidirectional Multiple Stages Combination Morphological Filters	86
5.3 An Omnidirectional Multiple Stages Weighted Combination Morphological Filtering Algorithm	96
CHAPTER 6 ADAPTIVE OPTIMIZATION ALGORITHMS OF MORPHOLOGICAL FILTER STRUCTURING ELEMENTS	102
6.1 Introduction	102
6.2 Error Criterion	102
6.3 Implicit Function Expressions of Erosion and Dilation	103
6.4 Adaptive Algorithms of Erosion and Dilation	105
6.5 Adaptive Algorithms of Arbitrary Combination Morphological Filters	107
6.6 Simulation Experiment Samples	108
CHAPTER 7 SOFT MORPHOLOGICAL FILTERS AND THEIR OPTIMAL ALGORITHMS	111
7.1 Definitions of Soft Morphological Filters	111
7.2 Stack Filtering Expression and Property Analysis of Soft Morphological Filters	113
7.3 Optimizing Soft Morphological Filters by Simulated Annealing Algorithm	123
7.4 Optimizing Soft Morphological Filters by Genetic Algorithm	136
7.5 Optimizing Soft Morphological Filters by Tabu Search Algorithm	142
7.6 Conclusions	155
CHAPTER 8 FAST ALGORITHMS OF GRAYSCALE MORPHOLOGICAL FILTERS	157
8.1 Introduction	157
8.2 Fast Implementation of Opening and Closing Filters	157

8.3 Fast Implementation of Open – closing and Clos – opening Filters	162
CHAPTER 9 HARDWARE IMPLEMENTATION OF BASIC MORPHOLOGICAL FILTERS	170
9.1 Introduction	170
9.2 Implementation of Grayscale Morphological Filters	171
9.3 Implemetation of Soft Morphological Filters	179
9.4 Morphological Image Processors	182
CHAPTER10 APPLICATION EXAMPLES OF MORPH – OLOGICAL FILTERS	186
10.1 Application in Graph Extraction	186
10.2 Application in Medicinal Signal Processing	191
10.3 Application in Engineering Blueprint Noise Removing	200
10.4 Application in Speckle Noise Suppressing	204
10.5 Application in Egde Detection for Noisy Images	216
10.6 Application in High Fidelity Wavelet Image Coding	221
10.7 Application in Hyperspectral Remote Image Anomaly Detection	234
10.8 Application in Sonar Image Processing	246
10.9 Application in Vibration Signal Processing	251
Appendix	258
References	261

第1章 数学形态学基本原理

1.1 数学形态学的产生与发展过程

数学形态学(Mathematical Morphology)是20世纪60年代中期由法国数学家G. Matheron和J. Serra创立的^[1]。当初的主要目的是进行地质和金属标本微观图像结构的分析,以及了解分析结果与岩石和矿物物理特性之间的关系,并创立了枫丹白露数学形态学研究中心^[2]。G. Matheron于1975年出版的*Random Sets and Integral Geometry*一书中严谨而详尽地论述了随机集论和积分几何,为数学形态学奠定了理论基础^[3]。到了1982年,J. Serra出版的专著*Image Analysis and Mathematical Morphology*标志着数学形态学的发展进入到了一个新的里程碑^[4]。它给出了图像处理的数学形态学方法经典描述,表明数学形态学在理论上日趋成熟,在应用上日益广泛。并在图像处理、模式识别和计算机视觉等领域都获得了重要应用,这些应用反过来又促进了它的进一步发展^[5]。20世纪80年代中期以来,在上述诸领域的国际大型会议上把数学形态学列为专题进行学术交流和讨论,或组织专门的研讨会。例如,国际光学工程学会(SPIE)在其年会中就举办了数学形态学方法的专题会议,并且每年出版一期*Image Algebra and Morphological Image Processing*专辑。同样,有关的国际刊物和会议文集在这期间都刊登了大量数学形态学方面的研究成果。如1986年《计算机视觉与图形图像处理杂志》(GVGIP)出版了数学形态学专刊;1989年和1994年国际《信号处理杂志》(*Journal of Signal Processing*)也出版了数学形态学方法及在信号处理中应用的专辑^[6]。在此期间,有关数学形态学方面的专著也相继出版,掀起了数学形态学的研究热潮^[7-9]。

数学形态学把集合论方法用于图像分析,是对物体几何形状定量描述的有力手段。特别是它与图像处理技术的融合,已发展成为图像处理学科的一个新分支——图像形态学^[10-12]。首先,数学形态学把一幅图像作为一个运算对象的整体来处理,而不必考虑其局部细节,不必对其中每个像点作出定义。其次,数学形态学能提供一种用来描述图像空间组成的相关数学体系。因此,数学形态学可用来分析图像对象的几何特征和结构形态,是图像分析与处理的一种非常重要的工具。

数学形态学研究的内容非常广泛,其中主要包括各类形态变换^[13-17]和形态分析^[18-20]。形态分析又包含形态信号分解与重构^[21-24]、形态结构元素分解^[25-30]以及各种形态表示法(如形态骨架法^[31-33]、模式谱法^[34]等)。

最初,形态学是基于集合论的,是具有一定约束条件的集合变换,称之为连续形态学^[35,36]。后来,发展成为基于离散点集的离散形态学^[9-12]。从研究的对象来看,形态学也由最早的二值形态学扩展到了灰度(多值)形态学^[37,38]。特别是近二十年来,数学形态学与其他相关学科的渗透与融合,使数学形态学又出现了许多新的分支。例如,排序统计学的注入,使数学形态学发展成为顺序形态学(Order Statistical Morphology)^[39-41]。它研究的对象主要是离散多值信号(图像),其主要运算是局部的排序统计运算。模糊逻辑与数学形态学的结合,又出现了模糊形态学(Fuzzy Morphology)^[42-46]。它是将模糊集合引入到形态学运算中,从而构成模糊形态变换,用以处理图像信号。另外,形态学与神经网络的相互融合,形成了另一个发展方向——形态神经网络(MNN)^[47-52]。它是人工神经网络理论发展的一个特例,但与经典神经网络相比,它又有着明显的不同。其主要差别在于网络中各神经元节点数值信息连接的代数组形式上。在经典的神经网络中,每个节点的信息组合是通过相关节点的各个响应值与权值相乘,再将乘积结果相加完成的^[53,54];而在形态神经网络中,节

点的信息组合是由相加和取极值运算完成的。由于存在着这种差别,形态神经网络将会有特殊的用途,可望将来在图像处理、非线性模式识别和人工智能等领域获得重要应用。

数学形态学从产生到现在,已有三十多年的历史。尽管在理论和应用方面取得了很大成就,但它的发展一直都没有停止。随着研究的不断深入和各相关学科的交叉与融合^[55],数学形态学必将在理论上日臻完善和应用上日趋广泛。为了更好地理解数学形态学原理,也为后几章研究数字形态滤波器打下基础,本章首先对数学形态学基本理论作一简单介绍。

1.2 数学形态学基本原理

数学形态学是一种非线性图像(信号)处理和分析的工具,它具有一套完整的理论、方法和算法体系。它用一套独特的变换或运算来描述图像的基本特征或基本结构,亦即图像中各像素或各部分之间的几何关系。

为了确定一幅图像的结构,必须逐个地考察图像各部分间的关系,并进行检验,最后得到图像各部分之间关系的集合。因此,这里需要设计一种收集信息的“探针”(Probe),数学形态学中称其为“结构元素”(Structuring Element)。在图像中不断移动结构元素,通过结构元素与图像对象的相互作用(变换),便可以考察图像各部分间的关系,并确定其各种几何参数。这一过程可用图1-1来描述。其中集合 X 代表图像对象,集合 B 为结构元素, Ψ 表示某种形态变换, m 为某一测量关系。

不难看出,形态变换的性能与结构元素和变换的类型有关。一般结构元素 B (形状、尺寸等)应根据不同任务来选取,而形态变换 Ψ 应满足如下准则:

(1) 平移不变性 设 X_h 表示集合 $X \subset R^2$ (R 为实数)的平移集合,且 $h \in R^2$ 。若变换 Ψ 满足

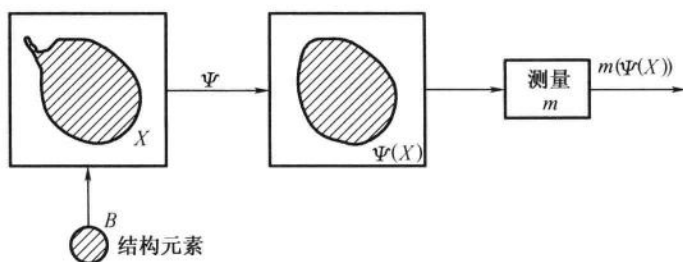


图 1-1 数学形态学方法

$$\Psi(X_h) = [\Psi(X)]_h \quad (1-1)$$

则称 Ψ 具有平移不变性。这个性质是对形态变换的一个基本要求,因为物体的结构一般不会随空间位置的变化而变化。

(2) 尺度变化相容性 对于尺度因子 λ , 若变换 Ψ 满足

$$\Psi(\lambda X) = \lambda \Psi(X), \quad \forall X \subset R^2, \lambda \in R \text{ 且 } \lambda > 0 \quad (1-2)$$

则称 Ψ 具有尺度变化相容性。因为物体的结构不随尺度而变化,所以形态变换应满足这一性质。

(3) 局部可观测性 设变换 Ψ 对于任一有界观测域 Z , 必存在另一个观测域 Z' , 使得

$$[\Psi(X \cap Z')] \cap Z = \Psi(X) \cap Z \quad (1-3)$$

那么称 Ψ 具有局部可观测性。其意义在于,观测域 Z' 中所提供的信息 $(X \cap Z')$ 足以实现对 $\Psi(X)$ 在 Z 中信息的观测。

(4) 半连续性 如果 Ψ 是单调递增变换,对于任意的闭集 $F_n \downarrow F$, 有 $\Psi(F_n) \downarrow \Psi(F)$ (或对任意的开集 $G_n \uparrow G$, 有 $\Psi(G_n) \uparrow \Psi(G)$), 那么称变换 Ψ 具有上半连续性(或下半连续性)。半连续性要求对一幅图像 X 的研究可通过对逐步逼近 X 的一系列图像 $X_n (n=1, 2, \dots)$ 的研究来完成。

根据研究对象的属性,数学形态学又分为二值形态学和灰度形态学。

1.3 二值形态学

二值形态学研究的对象是二值图像(黑白图像)。所谓二值图像是指灰度只取0和1两个值的图像,它通常表示为 n 维欧氏空间 E^n ^①上的集合。习惯上认为取值为1的点集 X 对应于景物中的物体,而取值为0的点集 X^c 构成背景。即:

$$X = \{z: f(z) = 1, z = (x, y) \in R^2\} \quad (1-4)$$

$$X^c = \{z: f(z) = 0, z = (x, y) \in R^2\} \quad (1-5)$$

其中 f 为集合 X 的特征函数。

二值形态学中有四种基本变换,包括膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。在有些文献中它们的定义形式不尽相同,这里采用大多数文献中的定义形式。

1.3.1 膨胀和腐蚀运算

(1) 膨胀和腐蚀运算的定义

膨胀(Dilation)和腐蚀(Erosion)运算是建立在集合的Minkowski和与差基础上的,它们是所有复合形态变换或形态分析的基础。

定义1-1 设 A, B 为欧氏空间 E^n 上的两个集合,即 $A, B \subset E^n$,集合 A 关于矢量 b 的平移集合 $A_b = \{a + b: a \in A, b \in E^n\}$,则集合的Minkowski和与差定义为

$$A \oplus B = \{z \in E^n: z = a + b, a \in A, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (1-6)$$

$$A \ominus B = \{z \in E^n: z - b \in A, b \in B\} = \bigcap_{b \in B} A_b \quad (1-7)$$

这里符号 $\oplus$ 和 $\ominus$ 分别为集合的Minkowski和与差运算符。

^① n 维欧氏(Euclidean)空间 E^n 分为连续空间 R^n 和数字(网格)空间 Z^n 两种形式。本章主要采用的是 R^n 空间,后几章采用的是 Z^n 空间。

定义 1-2 设 X 表示一幅二值图像, B 为结构元素, B 关于原点的对称集合 $B^s = \{-b: b \in B\}$, 则 X 关于 B 的膨胀和腐蚀分别定义为 X 与 B^s 的 Minkowski 和与差, 即

$$X \oplus B^s = \{z \in E^n : B_z \cap X \neq \emptyset\} = \bigcup_{b \in B} X_{-b} \quad (1-8)$$

$$X \ominus B^s = \{z \in E^n : B_z \subset X\} = \bigcap_{b \in B} X_{-b} \quad (1-9)$$

其中 $\emptyset$ 表示空集。

膨胀和腐蚀的几何意义可用图 1-2 来说明。粗略地讲当结构元素 B 沿图像 X 的外边缘移动时, 结构元素中心移动轨迹所包围的区域就是膨胀结果 $X \oplus B^s$; 反之, 当结构元素 B 沿图像 X 的内边缘移动时, 结构元素中心移动轨迹所包围的区域就是腐蚀结果 $X \ominus B^s$ 。所以, 膨胀具有扩展图像功能, 而腐蚀具有收缩图像功能。

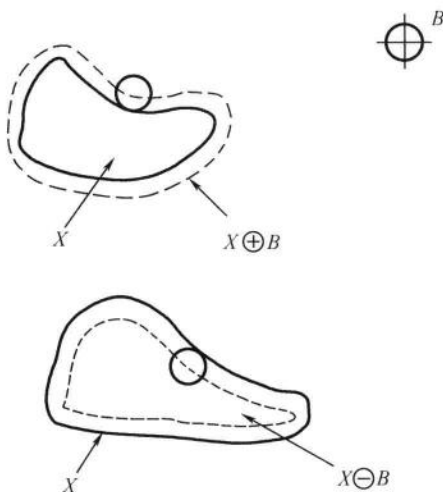


图 1-2 膨胀与腐蚀示意图