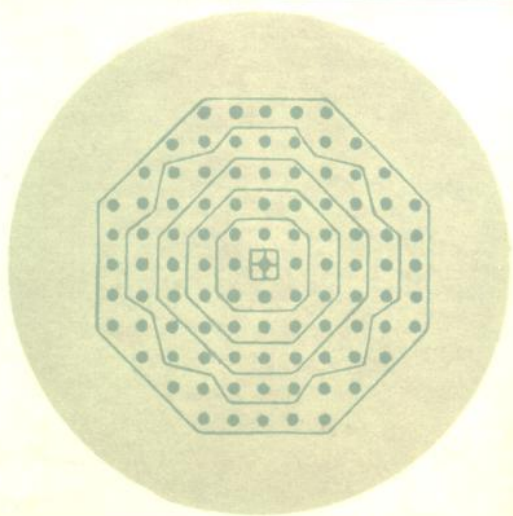


[美] 黄煦涛 主编



# 二维数字 信号处理 II

变换与中值滤波器

科学出版社

73.414

511

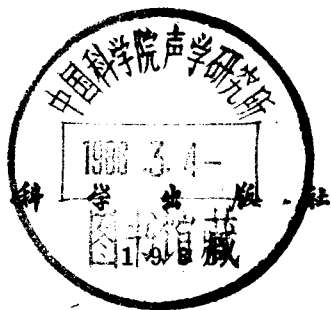
2057/18

# 二维数字信号处理 II

## 变换与中值滤波器

〔美〕黄煦涛 主编

胡光锐 郑志航 戚飞虎 译



4013202

## 内 容 简 介

本书为联邦德国施普林格出版社出版的《应用物理丛书》第四十三卷，主要介绍二维数字信号处理中的变换和中值滤波方法。全书共分六章：引言，矩阵转置的高效算法，二维卷积和离散傅里叶变换的计算，维诺格拉德-傅里叶变换算法以及中值滤波的统计特性和确定性特性。本书由美国著名教授黄煦涛主编，各章分别由有关方面有成就的教授或专家撰写。

本书可供遥感技术、生物医学、天文、通信、气象、工业自动化和国防等部门从事信息科学或与计算机有关的广大科技人员以及大专院校有关专业的师生参考，也可作为高年级大学生或研究生有关课程的教材或教学参考书。

T. S. Huang (Ed.)

## TWO-DIMENSIONAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING II

Transforms and Median Filters

Springer-Verlag, 1981

### 二维数字信号处理 II

变换与中值滤波器

[美] 黄煦涛 主编

胡光锐 郑志航 戚飞虎 译

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

\*

1985年10月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年10月第一次印刷 印张：9 3/8

印数：0001—4,250 字数：207,000

统一书号：15031·677

本社书号：4486·15-7

定价：2.20元

## 译者的话

由于实际世界中大多数信号都是多维信号，因此对于多维信号数字处理方法的研究近年来愈加受到人们的重视，并得到迅速发展，其应用范围遍及很多部门。

本书是《应用物理丛书》第四十三卷。该丛书的第四十二卷《二维数字信号处理 I：线性滤波器》是本书的姊妹篇。这两本书主要介绍数字图象处理中的三种重要方法：线性滤波、变换及中值滤波。这两本书是互相联系的，但又可以独立使用。

本书的主要内容是介绍后面两种方法，即变换及中值滤波。全书共分六章，第一章为引言，第二章讨论矩阵转置的高效算法，第三章介绍利用数论和多项式代数的方法来计算二维卷积和离散傅里叶变换，第四章对维诺格拉德 (Winograd)-傅里叶变换算法进行详细的分析和推导，第五章和第六章论述中值滤波的统计特性和确定性特性。中值滤波是一种非线性处理方法，可用于图象或语言处理。在这两章中介绍了以前没有发表过的研究成果。

本书理论性较强，对每个问题的分析和论述有一定的系统性，因此本书不但是从事这方面工作的科技人员的很好参考书，同时也可作为大专院校有关课程的参考教材。

参加本书翻译工作的有上海交通大学电子工程系胡光锐（序言、第一章与第四章），郑志航（第二章与第三章），戚飞虎（第五章与第六章）。

4013202

· i ·

由于译者水平有限，译文如有错误或不妥之处，欢迎读者批评指正。

译者

1983年10月

## 前 言

在过去十年中，数字图象处理的研究得到了迅速的发展。当人们认识到，图象处理广义上意味着多维信号处理，以及实际世界中的大多数信号都是多维信号时，对这种发展就不感到意外了。事实上，我们所研究的一维信号通常是多维信号的一种简单形式。例如，通常把语言考虑为一维信号，即单一变量（时间）的函数。然而，语言本来是存在于空间的，因此它是四个变量（三个空间变量和一个时间变量）的函数。

对于图象处理，除数字方法外还有模拟的（光学的、电光学的）方法。由于数字方法固有的优点（灵活性、精确性），并且由于计算机及有关技术如大规模集成电路和超大规模集成电路的迅速进步，可以公正地说，除一些专门问题外通常优先选用数字方法。

本书以及它的姊妹篇《二维数字信号处理 I：线性滤波器》\*深入地分析和解决图象处理问题的三种最重要的数字方法：线性滤波器、变换以及中值滤波。这两本书是互相联系的，但可以分开来使用。

在本丛书较早出版的第六卷《图片处理和数字滤波》\*\*中（第一版，1975年），已对包括变换、滤波器设计及图象复原等二维数字信号处理中选出来的题目进行了深入的分析。从那时起，在这些领域中已取得了巨大的进步。在1978

\* 该书的中译本已于1985年由科学出版社出版。——译者注

\*\* 该书的中译本已于1980年由科学出版社出版。——译者注

年，当我们打算出版那本书的第二版时(1979年出版)，决定不对该书进行重大的修订而只新增加一章，简要地评述当前的研究成果。同时，我们计划把一些重要的新成果的深入分析放在这套应用物理丛书的以后几卷中进行。

现在出版的二维数字信号处理方面的这两本书是计划中的头两卷。这些内容可以分成三个部分。第一部分是关于线性滤波器方面的内容，本书的姊妹篇包括了这个部分，介绍了设计二维非递归和递归滤波器、稳定性检验以及卡尔曼(Kalman)滤波(应用于图象增强和复原)方面当前的主要研究成果。在这些内容中，最重要的部分是关于半平面递归滤波器的设计和稳定性检验的讨论，这是当前人们很感兴趣的问题。

在这一卷中包括第二和第三部分的内容。第二部分是关于变换，讨论两个问题：大矩阵转置算法及在变换和卷积中的数论方法。在本书中，我们对维诺格拉德(Winograd)-傅里叶变换算法进行详细的推导。

第一和第二部分主要是线性处理。第三部分是关于中值滤波，它是研究一种特别的非线性处理方法。中值滤波在图象和语言处理中已经有所普及。然而，这方面发表的研究成果却非常少。在第三部分的两章中，介绍了许多新的研究成果，其中大多数在这里第一次发表。

这一卷中的各章实际上都可以自学，通过它们可以把读者引到现在最新的研究工作上。本书对从事这方面工作的科学家和工程师将是一本有用的参考书，对讲授正规班和短训班的有关信号处理、图象处理和数字滤波课程时也是一本辅助教科书。

黄煦涛

1980年9月于美国伊利诺斯州厄伯纳

# 目 录

译者的话

前言

第一章 引言 .....	黄煦涛(1)
1.1 变换 .....	1
1.2 中值滤波器 .....	3
参考文献 .....	8
第二章 高效的矩阵转置法 .....	J. O. 伊克伦德(10)
2.1 背景 .....	10
2.2 存于外存的矩阵的转置方法 .....	13
2.2.1 确定性能标准 .....	13
2.2.2 一种简单的分块转置法 .....	15
2.2.3 利用方阵分块法转置 .....	15
2.2.4 弗洛伊德算法 .....	20
2.2.5 行进/列出转置法 .....	22
2.2.6 矩形分块算法 .....	24
2.3 算法性能的最优化 .....	26
2.3.1 两个引理 .....	26
2.3.2 方阵分块算法 .....	27
2.3.3 矩形分块算法 .....	33
2.3.4 插入因子1的优点 .....	36
2.4 方阵分块和行进/列出算法的优化 .....	37
2.5 一个示例 .....	39
2.6 计算高维 FFT 的安德森直接算法 .....	41
2.7 讨论 .....	43



参考文献 .....	45
<b>第三章 二维卷积和 DFT 的计算</b> .....	H. J. 努斯鲍默(46)
<b>3.1 卷积和多项式代数</b> .....	46
3.1.1 剩余多项式 .....	47
3.1.2 在多项式代数中卷积和多项式积的算法 .....	49
<b>3.2 利用多项式变换进行二维卷积</b> .....	53
3.2.1 多项式变换 .....	54
3.2.2 复合多项式变换 .....	59
3.2.3 多项式变换和简化的计算 .....	64
3.2.4 多项式积和一维卷积的计算 .....	67
3.2.5 嵌套算法 .....	75
3.2.6 和通常的计算方法的比较 .....	78
<b>3.3 利用多项式变换计算二维 DFT</b> .....	81
3.3.1 简化的 DFT 算法 .....	81
3.3.2 嵌套和素数因子算法 .....	90
3.3.3 利用多项式变换计算维诺格拉德-傅里叶变换 .....	93
3.3.4 多项式变换和 DFT 之间的关系 .....	98
<b>3.4 结论</b> .....	99
<b>3.5 附录——短的多项式积算法</b> .....	99
3.5.1 模 $(Z^2 + 1)$ 多项式积 .....	100
3.5.2 模 $(Z^3 - 1)/(Z - 1)$ 多项式积 .....	100
3.5.3 模 $(Z^4 + 1)$ 多项式积 .....	100
3.5.4 模 $(Z^5 - 1)/(Z - 1)$ 多项式积 .....	101
3.5.5 模 $(Z^9 - 1)/(Z^3 - 1)$ 多项式积 .....	101
3.5.6 模 $(Z^7 - 1)/(Z - 1)$ 多项式积 .....	103
3.5.7 模 $(Z^8 + 1)$ 多项式积 .....	105
<b>3.6 附录——<math>N = 4, 8, 9, 16</math> 的简化 DFT 算法</b> .....	107
3.6.1 $N = 4$ .....	107
3.6.2 $N = 8 \quad u = \pi/4$ .....	107

3.6.3	$N = 16$	$u = 2\pi/16$	108
3.6.4	$N = 9$	$u = 2\pi/9$	108
参考文献			109
<b>第四章 维诺格拉德离散傅里叶变换算法</b>			S. 佐哈(110)
4.1	概述		110
4.2	推导方法		113
4.3	基本的 LCT 算法		123
4.3.1	2 阶左循环变换		125
4.3.2	4 阶左循环变换		127
4.3.3	6 阶左循环变换		131
4.4	当 $N$ 为素数时的基本 DFT 算法		138
4.4.1	3 阶 DFT		141
4.4.2	5 阶 DFT		142
4.4.3	7 阶 DFT		144
4.5	$N = 4, 9$ 时的基本 DFT 算法		147
4.5.1	4 阶 DFT		147
4.5.2	9 阶 DFT		150
4.6	$N = 8, 16$ 时的基本 DFT 算法		156
4.6.1	8 阶 DFT		159
4.6.2	16 阶 DFT		164
4.6.3	$\hat{\delta}_1 = \hat{\alpha}_1 \hat{\beta}_1$ 的实现		168
4.6.4	$\hat{\delta}_2 = \hat{\alpha}_2 \hat{\beta}_2$ 的实现		169
4.7	综合算法		175
4.8	速度分析		191
4.9	结论		198
4.10	附录——多项式同余		200
参考文献			204
<b>第五章 中值滤波: 统计特性</b>			B. I. 贾斯特森(205)
5.1	中值滤波器的定义		207

5.1.1	一维中值滤波器	207
5.1.2	二维中值滤波器	207
5.1.3	边缘保护	208
5.2	用中值滤波降低噪声	209
5.2.1	白噪声	209
5.2.2	非白噪声	213
5.2.3	脉冲噪声和椒盐噪声	215
5.3	边缘加噪声	220
5.3.1	中值滤波器与移动均值之比较	220
5.3.2	在两种分布的样本中顺序统计量的分布	224
5.4	中值滤波器的其他特性	226
5.4.1	协方差函数; 白噪声输入	226
5.4.2	协方差函数; 非白噪声输入	230
5.4.3	频率响应	232
5.4.4	样本道路特性	236
5.5	其他的保护边界滤波器	238
5.5.1	中值的线性组合	238
5.5.2	加权中值滤波器	239
5.5.3	迭代中值	241
5.5.4	残差平滑	242
5.5.5	自适应边缘保护滤波器	243
5.6	中值及其他顺序统计量在 图象处理过程中的应用	244
5.6.1	边缘检测	244
5.6.2	目标提取	246
5.6.3	分类	248
5.6.4	一般的顺序统计量	248
	参考文献	251
第六章	中值滤波: 确定性特性	S. G. 泰安(252)
6.1	一维中值滤波器的定点	253

6.2 某些广义的中值滤波器 .....	258
6.3 二维中值滤波器的定点 .....	263
6.4 中值滤波的快速算法 .....	270
6.5 结论 .....	272
附录6.A .....	273
附录6.B .....	276
参考文献 .....	280
<b>补充参考文献</b> .....	<b>281</b>
<b>汉英名词对照索引</b> .....	<b>282</b>

# 第一章 引 言

黄 煦 涛 (T.S.Huang)

这一卷书的目的是深入分析下面两个问题：二维数字变换及中值滤波。图象处理的应用推动了本书所讨论的数学方法。

图象处理的三个主要领域<sup>[1.1]</sup>是：有效编码、复原与增强以及模式识别。许多图象复原和增强的方法都采用线性空间不变 (LSI) 滤波器。在参考文献[1.1, 1.2]中详细地讨论了这种滤波器。通过变换及有关的方法便能在计算方面有效地实现 LSI 滤波器。在高效编码及模式识别的特征提取中，许多变换也都是有用的。

成功的图象复原和增强常常需要非线性方法。中值滤波就是一种这样的方法，它不仅在图象处理而且在一般的信号处理中都已普遍采用。它也可用于几种与模式识别有关的任务，例如象冲淡和提取一个图象中孤立的小物体那样的任务。

在下面的几节中，将对本书所包括的各章进行比较详细的讨论。

## 1.1 变 换

在参考文献[1.2]的第二章中，以一种统一的方式(基于外积)分析了各种不同的二维变换。对其中一些变换更详细讨论可见参考文献 [1.3]。在这些变换中傅里叶变换无疑具

有最广泛的应用。其他变换方法则主要在图象编码和有时在模式识别中 useful。在过去几年中的经验表明，在这些与图象独立的变换中(因此不包括 K-L 变换)，离散余弦变换(DCT)和斜变换在图象编码中具有最好的特性。在理论方面，耶米尼(Yemini)和珀尔(Pearl)<sup>[1.4]</sup>已经证明，离散余弦变换对于所有的有限阶马尔科夫(Markov)信号渐近于最佳变换。贾伊恩(Jain)<sup>[1.5]</sup>最近介绍一种新的酉变换族，它的元包括许多大家知道的变换，如 DCT。

奇异值分解(SVD)方法及其应用在参考文献[1.2]第一、二章中按照一定的深度进行讨论。最近，瑟哈斯勒巴德希(Sahasrabudhe)及维代(Vidya)<sup>[1.6]</sup>已建立起奇异值的特性和图象的相关函数之间的关系。瑟哈斯勒巴德希及库尔卡尼(Kulkarni)<sup>[1.7]</sup>发展了一种利用 SVD 方法来对付图象复原中噪声的新方法。

计算 DCT 的常规方法是利用快速傅里叶变换(FFT)<sup>[1.8,1.9]</sup>。然而，现代快速算法可以将速度加快为原来的六倍<sup>[1.10]</sup>。

为了计算二维变换，例如傅里叶变换和哈达玛(Hadamard)变换，而且因为计算机的磁心存储器不能容纳整幅图象，故需要象磁盘那样的辅助存储器，并通常利用矩阵转置。矩阵转置的高效算法是由伊克伦德(Eklundh)在1972年提出的<sup>[1.11]</sup>。此后，他研究了两种新的算法和采用最佳对策的一些结果<sup>[1.12]</sup>。可参见阿里(Ari)的文章<sup>[1.13]</sup>。另一方面，二维 DFT 及类似的变换也可以不用矩阵转置来进行计算<sup>[1.14-1.18]</sup>。

在当前研究工作中的一个有兴趣的领域是在信号处理中利用数论方法。雷德(Rader)第一个提出利用数论变换(例如费马数变换)来进行快速二维卷积<sup>[1.19-1.23]</sup>。雷德在参

考文献[1.24]的一节中对这个概念作了很好的介绍。更详细的分析可见参考文献[1.25, 1.26]。

在下述情形下利用数论变换可以大大减少计算量：(1) 进行变换的一维序列比较短；(2) 需要相当的精确度；(3) 乘法的耗费比加法大。

维诺格拉德 (Winograd) 应用数论方法来计算离散傅里叶变换 (DFT)<sup>[1.27-1.30]</sup>。和 FFT 方法相比较，乘法次数显著减少而加法次数仍近似相等。例如，对于一个 1024 点采样的序列，FFT 方法需要 12288 次乘法和 26624 次加法，而对于 1008 点采样的序列，维诺格拉德-傅里叶变换 (WFT) 方法需要 4212 次乘法和 25224 次加法。当推广这种算法和考虑编制程序时，可参阅参考文献 [1.31—1.34]。实现 WFT 的硬件已经制成并安装在一个快速信号处理器中<sup>[1.35]</sup>。帕特森 (Patterson) 和麦克莱伦 (McClellan) 研究了定点情形下的 WFT (由于舍入和系数量化) 的量化误差<sup>[1.36]</sup>，他们发现一般 WFT 方法的数据表示需要增加一位或二位的位数，才得到和 FFT 方法相同的误差。

本卷中有关变换方面的内容集中于两个方面：矩阵转置算法和数论变换方法。第二章除讨论安代尔森 (Anderson) 的直接变换方法<sup>[1.14]</sup>外，还讨论几种大矩阵转置的高效算法。第三章叙述数字卷积的快速算法及基于多项式变换的傅里叶变换。在有些算法中，利用多项式变换和维诺格拉德算法的组合算法。在第四章中详细推导了维诺格拉德-傅里叶变换算法。

## 1.2 中值滤波器

在图象复原和图象增强中常应用线性非移变 (LSI) 滤

波器。例如，它们可以用来实现维纳（Wiener）滤波以减少图象噪声。然而，为了减小噪声而又保持图象尖锐边缘可以利用线性移变（LSV）或非线性滤波器。在参考文献〔1.2〕的第一、五章中讨论了LSI滤波器在图象复原中的限制。

在参考文献〔1.2〕的第一、五章中还介绍了在图象复原中的许多LSV及非线性过程。在本书的姐妹篇〔1.1〕关于线性滤波器的第五章中，介绍了为减小噪声和进行图象复原的LSV卡尔曼滤波器。在这一卷的第五、六章中，我们集中讨论特别的非线性过程——中值滤波。中值滤波器在减小一定类型的噪声和周期干扰而又使信号不显著退化方面是很有趣的〔1.37-139〕。它在图象和语言处理中得到推广。

因为中值滤波器特性的理论分析是非常困难的，故几乎没有发表过研究结果。本书中的这两章主要包括了许多以前没有公开发表的新结果。第五章讨论中值滤波器的统计特性，特别分析了当输入是高斯噪声或者是阶跃函数加上高斯噪声时的中值滤波器输出的各种性质。

第六章讨论中值滤波器的确定性特性。我们对中值滤波器的定点的结果有特别的兴趣。中值滤波器的定点是一个序列（当一维时）或一个数组（当二维时），当中值滤波时它不变化。在第六章中，泰安（Tyan）指出，除去一定周期的二进制序列外，中值滤波器的定点是“局部单调的”序列。现在，加勒赫（Gallagher）及怀兹（Wise）〔1.40〕通过将序列限制为有限长度可以取消这个例外。

在第六章中，简要地叙述基于直方图修正的二维中值滤波的高效算法〔1.39〕。埃弗索尔（Eversole）等人〔1.41〕及纳伦德拉（Narendra）〔1.42〕讨论了利用数字选择网络实现中值滤波器的实时硬件。厄塔曼（Ataman）〔1.43〕提出一种求中值的根本方法，它是基于滤波器窗中的图象元素的二进制表



示。他将他的方法的速度和硬件复杂性同直方图算法及数字选择网络方法进行了比较。里弗兹 (Reeves) 和罗斯坦波 (Rostampour)<sup>[1.44]</sup>考虑了在一个二进制阵列处理机上实现中值滤波器的方法。沃尔夫 (Wolfe) 和曼诺兹 (Mannos)<sup>[1.45]</sup>研究了在视频速率流水线处理机上实现中值滤波器的方法。

第五章和第六章是非常理论性的。我们这里介绍一些实验结果来进行补充。图1.1表示中值滤波器的定点的一些例子。图(a)为加到中值滤波器的输入。图(b)~(d)分别为对于图(a)应用三种不同的中值滤波器滤波六次时的方法。

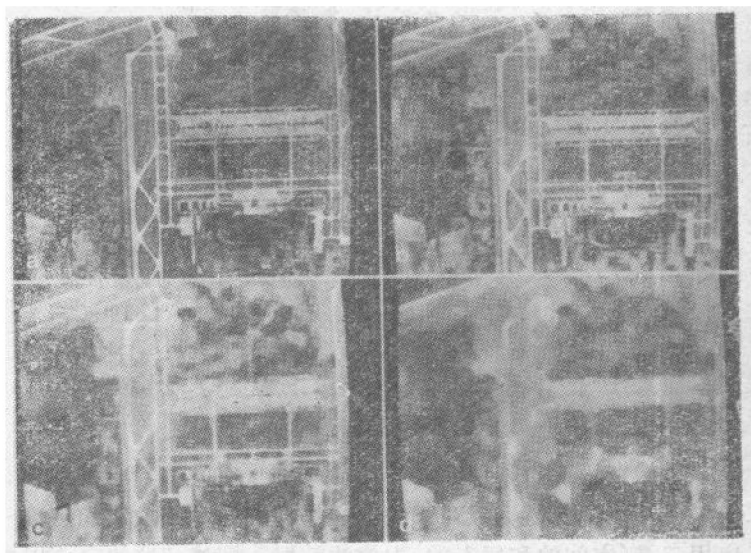


图1.1 中值滤波器的定点。(a) 一个飞机场的一部分的空中摄影照片，以 $256 \times 256$ 取样，8位/取样进行数字化；(b) 中值滤波6次， $3 \times 3$ 十字形窗；(c) 中值滤波6次， $3 \times 3$ 正方形窗；(d) 中值滤波6次， $5 \times 5$ 正方形窗