

数字信号处理参考教材系列

数字信号处理 基础理论

〔日〕谷萩隆嗣 著



1.72
1

 科学出版社
www.sciencep.com

数字信号处理参考教材系列

数字信号处理 基础理论

〔日〕谷萩隆嗣 著
薛培鼎 徐国鼐 译

科学出版社
北京

图字:01-2003-1058 号

Digital Signal Processing and Basic Theory

Copyright © 1996 by Takashi Yahagi & Corona Publishing Co., Ltd.

All rights reserved.

Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd.

Tokyo, Japan.

デジタル信号処理ライブラリー1

デジタル信号処理と基礎理論

Digital Signal Processing and Basic Theory

谷萩隆嗣 株式会社コロナ社

Takashi Yahagi CORONA PUBLISHING CO., LTD.

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理基础理论/(日)谷萩隆嗣著;薛培鼎,徐国鼎译.

—北京:科学出版社,2003

(数字信号处理参考教材系列)

ISBN 7-03-011369-1

I. 数… II. ①谷… ②薛… ③徐… III. 数字信号-信号处理
IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 031496 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年9月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2003年9月第一次印刷 印张:9 1/8

印数:1—4 000 字数:197 000

定 价:23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

“数字信号处理参考教材系列”序

近年来,随着数字技术的惊人发展,以前用模拟技术进行处理或者以往根本无法进行数字处理的问题,都可以进行数字处理了。因此,数字技术越来越广泛地应用于诸多领域,而且这些领域对数字技术的要求也变得越来越高的。

最近对电气、电子、信息、通信等领域进行的大规模市场调查表明,很多企业以及研究机构都对数字信号处理技术非常重视,他们在调查问卷的表格中,把数字信号处理填在了“必要性”和“重要性”一栏的首位。从这一社会现象也可以看出,数字信号处理是当今社会急需发展的学科领域之一。

鉴于这种状况,我们以供从事数字信号处理或者准备学习数字信号处理的社会各界人士参考阅读为目的,从更广泛的角度对数字信号处理这一学科进行归纳整理,编写了这套系列书。

本系列书包括以下各册:

1. 数字信号处理基础理论
2. 数字滤波器与信号处理
3. 语音与图像的数字信号处理
4. 快速算法与并行信号处理
5. 卡尔曼滤波器与自适应信号处理
6. ARMA 系统与数字信号处理
7. VLSI 与数字信号处理
8. 信息通信与数字信号处理

9. 人工神经网络与模糊信号处理

10. 多媒体与数字信号处理

上述各册中,第1至第3为基础部分,以大学三、四年级本科生为读者对象;第4至第6为比基础部分内容较深的提高部分,以研究生或者具有同等学历的科研人员及技术人员为读者对象;第7至第10为应用部分,以大学或研究机构的研究人员为主要读者对象,亦可供有一定基础知识的社会各界人士参考阅读。

也就是说,读者可根据自己的兴趣和所掌握的知识基础,有选择地阅读本系列书中的内容。比如,从基础知识开始学习数字信号处理的读者,可选择基础部分的内容;如果已具备了一定的基础知识,则可选择提高部分或者应用部分。从基础知识开始学习的,可按基础部分→提高部分→应用部分的顺序,或者按基础部分→应用部分→提高部分的顺序,根据自己的兴趣有选择地阅读。

本系列的执笔者均为目前仍活跃在相关领域第一线的专家、学者,因而编者有理由相信本系列书能够满足不同层次的读者的需求。

另外,考虑到数字信号处理的理论及应用技术的迅速发展,今后我们会根据情况及时补充新内容,使本系列书不断充实和完善。

最后,时值本系列书出版之际,谨向对本系列书的出版提供多方帮助的 CORONA 社的各位表示衷心的感谢。

“数字信号处理参考教材系列”策划兼主编

谷萩隆嗣

前 言

随着计算机技术的惊人进步,数字信号处理技术的应用领域越来越广泛。而在所有应用领域中,数字信号处理技术的基本理论是共同的。作为数字信号处理的共同理论,尽管其表述是抽象化和一般化的,但只要真正掌握了这些内容,就可以用它们来解决各种具体问题。从这种意义上说,正确理解和掌握基本理论是首要的。

本书是本着让读者了解数字信号处理的概貌和便于掌握其基本理论的宗旨编写的。全书的内容既是整套“数字信号处理参考教材系列”的基础,也是数字信号处理这一学科领域的基本知识。有志于从事数字信号处理的读者,请务必从本书读起。本书的内容是按照大学本科三、四年级学生能够充分理解的程度编写的,因而,它不仅可以作为参考书,而且可用作大专院校数字信号处理课程的教材。

本书第1章介绍数字信号处理的目的、形态、发展过程及今后的展望,以便读者首先了解数字信号处理的概貌。

第2章介绍数字信号处理理论必要的数学基础。首先介绍拉普拉斯变换、傅里叶变换及傅里叶级数等,它们是理解数字信号处理理论的基础理论。然后,基于这些数学基础理论,导出当描述包含采样动作的系统时所需要的 z 变换。而数字信号处理中非常重要的采样定理将从拉普拉斯变换及傅里叶变换导出。进而,还将对DFT(离散傅里叶变换)和FFT(快速傅里叶变换)这一重要变换理论予以说明。

第3章介绍数字信号处理中所需的系统理论的基本内容。数字信号处理大多采用动态系统,因此,打好线性系统理论方面的坚实基础是很重要的。本章将在“线性动态系统的数学模型”一节中对传递函数模型和状态变量模型进行详细说明;在“线性动态系统的结构”一节中对可控制性和可观测性进行重点阐述。最后介绍线性动态系统的稳定性问题,将按照传递函数模型和状态变量模型分别说明各种稳定性的概念。

第4章介绍关于数字滤波器的各种基本内容。首先叙述模拟滤波器的频率特性,明确振幅特性和相位特性的概念,然后说明数字滤波器的种类和频率特性,以及线性相位滤波器的物理意义。此外,还将涉及数字滤波器的构成方法和误差分析问题。最后,在数字滤波器设计部分给出 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的设计方法和设计示例。

第5章介绍数字语音信号处理的基础。首先给出日本语语音波形的特征,引入语音形成过程的离散时间模型。然后说明语音的线性预测分析方式的意义,讲述 PARCOR 方式语音分析合成法及格形滤波器的基本内容。最后介绍倒时谱方式的概念和语音信号倒谱的实例。

第6章介绍数字图像处理的基本内容。首先叙述图像的采样和量化问题,用照片图像给出其实例。然后给出求取图像的二维数学模型的方法,按因果模型和非因果模型进行说明。接着介绍将 DFT 引入二维系统时所需的二维 DFT。继而说明用灰度变换和直方图修正等简单处理进行图像增强的方法,以及通过实例对各种图像增强效果进行比较。还将介绍利用二维 FIR 滤波器进行图像复元的方法,并给出图

像恢复的实例。最后介绍几种进行图像压缩的方法,重点对二维 DCT(二维离散余弦变换)进行详细说明,给出用二维 DCT 进行图像压缩的实例。

用本书作为“数字信号处理”课程教材时,通过适当的内容取舍,2 学分的课时能讲完全部重要内容。例如在第 2 章中,如果学生已经学过了 z 变换,则只需讲解 2.2 节的采样定理部分及 2.3 节的 DFT 和 FFT 部分即可。而在需要对 z 变换进行说明的情况下,则可以不必全部涉及三种方法。第 3 章中,对于初学者来说,掌握 3.1 节和 3.2 节的一部分也就够了。第 4 章到第 6 章是数字信号处理的重要内容,应该尽量详细地进行讲解。

当把本书作为参考书时,第 2 章的内容只需像前面说过的那样阅读一些必要的部分即可。第 3 章也不一定要全部掌握系统理论的内容。不过,本书所介绍的系统理论是重要的基础知识,它有助于对本系列中其他内容的理解,因此应尽可能阅读一下。第 4 章到第 6 章的内容在《数字滤波器与信号处理》和《语音与图像的数字信号处理》中还要专门讲解,为了加深理解,最好把它们结合起来阅读。

本书的上述内容是数字信号处理基本理论的核心部分,也是本系列书其他各卷的基础。如果要对数字信号处理作进一步的了解,请继续阅读本系列书其他各卷的内容。

谷菽隆嗣

著者简历

谷萩隆嗣

1966 年 东京工业大学理工学部电子工学科毕业

1971 年 东京工业大学研究生院理工学研究科
电子工学专业博士课程修了,获工学博士学位

1971 年 千叶大学讲师

1974 年 千叶大学副教授

1984 年~至今 千叶大学教授

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 数字信号处理的目的	2
1.2 数字信号处理的应用	3
1.3 数字信号处理的形态	6
1.4 数字信号处理的发展	7
第 2 章 数字信号处理的数学基础	11
2.1 拉普拉斯变换与傅里叶变换	12
2.1.1 拉普拉斯变换与拉普拉斯反变换	12
2.1.2 拉普拉斯变换的性质	17
2.1.3 傅里叶变换与傅里叶反变换	19
2.1.4 傅里叶变换的性质	20
2.1.5 傅里叶级数与正交函数系	21
2.2 z 变换与采样过程	23
2.2.1 差分方程与 z 变换	23
2.2.2 拉普拉斯变换与采样定理	24
2.2.3 拉普拉斯变换与 z 变换	33
2.2.4 z 反变换	34
2.2.5 z 变换的性质	36
2.2.6 单位冲激响应与 z 变换	38
2.2.7 傅里叶变换与 z 变换	39
2.2.8 傅里叶变换与采样定理	41
2.3 DFT 与 FFT	42
2.3.1 DFT 的定义	42

2.3.2	DFT 的性质	43
2.3.3	窗函数	46
2.3.4	FFT 的概念	50
2.3.5	FFT 的算法	51
2.4	矩阵与线性方程	56
2.4.1	线性独立与阶数	56
2.4.2	二次型与正定矩阵	57
2.4.3	标准型与对角化	58
2.4.4	向量和矩阵的微分	59
2.4.5	逆矩阵和行列式定理	61
2.4.6	最小二乘解与最小范数解	63
2.4.7	特殊联立一次方程的数值解法	64
2.4.8	线性向量微分方程的解法	66
第 3 章	数字信号处理中的系统理论	69
3.1	线性动态系统的基础知识	70
3.1.1	线性系统与非线性系统	70
3.1.2	连续时间系统与离散时间系统	72
3.1.3	定常系统与非定常系统	73
3.2	线性动态系统的数学模型	74
3.2.1	连续时间系统的传递函数模型	74
3.2.2	离散时间系统的传递函数模型	78
3.2.3	连续时间系统的状态变量模型	80
3.2.4	离散时间系统的状态变量模型	83
3.2.5	从状态变量模型转换为传递函数模型	84
3.2.6	从传递函数模型转换为状态变量模型	87
3.2.7	数学模型的方框图表示	89
3.3	线性离散时间系统分析	91

3.3.1	线性离散时间系统分析	91
3.3.2	线性采样数据系统的状态空间法分析	91
3.3.3	线性采样数据系统的 z 变换法分析	92
3.3.4	用采样数据系统近似连续时间系统	96
3.4	线性动态系统的结构	98
3.4.1	线性动态系统的可控制性	98
3.4.2	线性动态系统的可观测性	103
3.4.3	线性动态系统的零极点抵消	106
3.4.4	线性动态系统的标准型	115
3.5	线性动态系统的稳定性	119
3.5.1	连续时间系统传递函数的稳定性	119
3.5.2	离散时间系统传递函数的稳定性	123
3.5.3	连续时间系统状态方程的稳定性	125
3.5.4	离散时间系统状态方程的稳定性	132
第 4 章	数字滤波器基础	135
4.1	模拟滤波器的频率特性	136
4.1.1	模拟电路的振幅特性与相位特性	136
4.1.2	模拟滤波器的种类	140
4.1.3	巴特沃思滤波器	141
4.1.4	切比雪夫滤波器	145
4.2	数字滤波器的分类	147
4.2.1	用数字滤波器进行信号处理的过程	148
4.2.2	数字滤波器的分类	149
4.3	数字滤波器的频率特性	150
4.3.1	振幅特性	150
4.3.2	相位特性	152
4.4	数字滤波器的结构及误差分析	153

4.4.1	数字滤波器的结构	154
4.4.2	数字滤波器的误差分析	156
4.5	FIR 数字滤波器的设计	157
4.5.1	窗函数法设计	157
4.5.2	线性相位滤波器的优化设计	159
4.6	IIR 数字滤波器的设计	163
4.6.1	s - z 变换法设计	163
4.6.2	近似线性相位滤波器的优化设计	164
第 5 章	数字语音信号处理	169
5.1	语音形成过程的模型	170
5.1.1	语音的特征和分类	170
5.1.2	语音形成的模型	173
5.1.3	声道的传递函数模型	175
5.2	线性预测分析方式	178
5.2.1	全极点型模型	178
5.2.2	辅音的全极点型模型	180
5.2.3	元音的全极点型模型	181
5.2.4	模型的增益	182
5.3	PARCOR 方式	183
5.3.1	PARCOR 方式的基本概念	183
5.3.2	计算 PARCOR 系数的算法	184
5.3.3	PARCOR 方式的格型滤波器实现	186
5.4	倒谱方式	189
5.4.1	倒谱的概念	189
5.4.2	倒谱的性质	190

第 6 章 数字图像处理基础	197
6.1 图像的采样和量化	198
6.1.1 图像的采样	198
6.1.2 图像的量化	203
6.2 图像的数学模型	206
6.2.1 图像数学模型的种类	206
6.2.2 图像数学模型的辨识	207
6.3 二维 DFT	209
6.3.1 二维 DFT 的定义	209
6.3.2 二维 DFT 的性质	210
6.4 数字图像增强	212
6.4.1 用灰度变换进行对比度增强	212
6.4.2 用直方图修正进行对比度增强	216
6.4.3 用微分操作进行图像锐化	222
6.4.4 图像的平滑	224
6.5 数字图像复元	227
6.5.1 点扩展函数	228
6.5.2 图像的恶化过程	229
6.5.3 恶化图像的复元过程	231
6.5.4 二维数字滤波器	232
6.5.5 用二维 FIR 滤波器进行图像复元	234
6.6 数字图像压缩	235
6.6.1 变换编码方式	235
6.6.2 预测编码方式	241
数字信号处理有关文献	245
参考文献	257
索 引	265

第1章

绪论



- 1.1 数字信号处理的目的
- 1.2 数字信号处理的应用
- 1.3 数字信号处理的形态
- 1.4 数字信号处理的发展

随着数字技术的飞速发展,数字信号处理已成为许多领域中不可缺少的手段。本章首先说明数字信号处理的目和数字信号处理在各个领域中的应用状况,然后简单叙述数字信号处理的形态,数字信号处理的发展过程,以及对今后的展望。

1.1 数字信号处理的目的

信号处理由于受到必要的运算速度、处理系统的规模、成本等各种因素的制约,以前都是用模拟技术实现的。而现在,许多本来是用模拟技术实现的,都已经采用数字处理了。实际的数字信号处理(digital signal processing)是用各种计算机、数字信号处理器(DSP: Digital Signal Processor)或其他专用处理器来实现的,随着这些设备和器件在快速化、高性能化、大容量化、小型化、廉价化等方面的飞跃性发展,相当复杂的高级信号处理也已能够实现。也就是说,利用数字信号处理能够实现模拟信号处理(analog signal processing)所不可能达到的复杂处理和高级处理,例如在多媒体动态图像处理中,图像压缩、移动补偿、编码、解码等许多环节都是用数字信号处理来快速进行的。可以不夸张地说,正是由于数字信号处理实现了这些处理的实时性,多媒体才真正体现了它现实的魅力。

对于用模拟信号处理所不能实现或用模拟信号处理达不到精度要求的那些问题,一般都寄希望于用数字信号处理来解决,因而,数字信号处理技术的应用范围有不断扩大的趋势,并且,许多领域今后还会提出更高的技术要求。从这种形势来看,数字信号处理的必要性和重要性还将继续增强。

1.2 数字信号处理的应用

数字信号处理是个很宽的学术领域,它的应用并不仅限于工程领域的窄范围,而已经被图 1.1 所示的众多学术领域所采用。

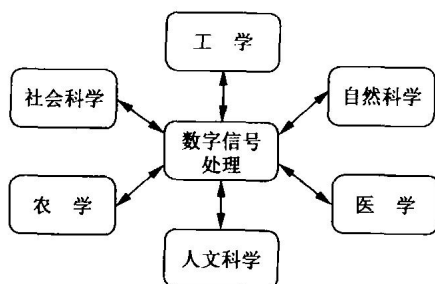


图 1.1 数字信号处理与学术领域

在天文学领域中,很早就进行了太阳黑子的时间序列分析,我们知道,那是利用 AR 模型(Autoregressive Model,自回归模型)所进行的分析^[1]。而在以射电天文学为代表的现代天文学方面,为了从观测数据获得可靠的信息,已经采用了高级数字信号处理的技术。

在地震学领域中,早就知道利用相当于 AR 模型等线性模型的方法来进行地震波分析和特征提取,其中最著名的就是最大熵法(MEM; Maximum Entropy Method)^[2]。在石油等地下资源勘探及古代遗迹勘察方面,也采用着各种各样的数字信号处理手段。计量经济学(econometrics)中则是利用最小二乘法(least-squares method)及各种方法构成的线性模型来进行经济预测的^[3]。

在医学领域中,稍微留意一下最近的发展状况就能发现,现在几乎没有不用计算机的医学了。例如,临床医学上已广泛流行着利用多种医学图像来进行病情诊断的图像诊断方法,这是因为以超声图像和 CT(Computed Tomography,计算机辅助断层扫描机)图像为首的医