


OHM 图形图像处理系列

■ 日本映像信息媒体学会 主编

纠错码及其 应用

〔日〕 江藤良纯 金子敏信 主编
张秀琴 译
王福勇 校

 科学出版社
www.sciencepress.com

OHM 图形图像处理系列

■日本映像信息媒体学会 主编

纠错码及其应用

〔日〕江藤良纯 金子敏信 主编
张秀琴 译
王福勇 校

科学出版社

北京

图字: 01-2003-4421

内 容 简 介

本书是“OHM 图形图像处理系列”之一,内容涉及基础知识到应用。本书考虑到各层面的读者,尽量避免使用繁杂的数学公式,结合插图,简明易懂地介绍相关内容,内容包括纠错码检测基础,线性代码、循环码、BCH 码和 RS 码、突发纠错码、卷积码等各种代码,以及编码理论在各领域(如图像记录技术、数字音频技术、计算机技术、广播技术、卫星及移动通信技术)中的应用等。

本书内容翔实、全面、系统,执笔者均是日本国内相关领域的专家。本书可供相关领域科技人员参考,也可作为大学相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

纠错码及其应用/(日)江藤良纯,金子敏信主编;张秀琴译;
王福勇校. —北京:科学出版社,2003

(OHM 图形图像处理系列)

ISBN 7-03-012663-7

I. 纠… II. ①江…②金…③张…④王… III. 数字图像处理-纠错码-基本知识 IV. TN919.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 000422 号

责任编辑:王 炜 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:白 羽 / 封面设计:李 祥

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

*

2004 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 3 月第一次印刷 印张: 8 3/8

印数: 1—4 000 字数: 232 000

定 价: 22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

Original Japanese Language edition
Sentan Gijutsu no Tehodoki Series Ayamari Teisei Fugou to sono Oyou
Supervised by Yoshizumi Etou and Toshinobu Kaneko
Edited by Television Gakkai
Copyright © 1996 by Eizou Jyohou Media Gakkai
Published by Ohmsha, Ltd.
This Chinese version published by Science Press, Beijing
Under license from Ohmsha, Ltd.
Copyright © 2003
All rights reserved

先端技術の手ほどきシリーズ 誤り訂正符号とその応用
映像情報メディア学会 オーム社 2001

原著主编和执笔者一览

主 编

江藤良纯 (日立电子(株))
金子敏信 (东京理科大学理工学部)

执笔者

横山克哉 (原日本 Victor(株))	第 1 章
江藤良纯 (日本电子(株))	第 1 章, 8 章
金子敏信 (东京理科大学理工学部)	第 2~7 章
土居信教 ((株)日立制作所中央研究所)	第 8 章
田中邦彦 (帝京平成大学信息学部)	第 9 章, 10 章
齐藤 实 (山梨学院大学经营信息学部)	第 10 章
山田 宰 (NHK 广播技术研究所)	第 11 章
大桥正良 (国际电信电话(株)研究所)	第 12 章
水野俊夫 (ICO Global Communications)	第 12 章
今井秀树 (东京大学生产技术研究所)	第 13 章

前 言

最近,在通信、计算机、广播、图像处理等领域,数字化技术的发展引人注目。数字化具有很多系统构成方面的优点,“纠错技术”就是其优点之一。也就是说,即使是已经数字化了的代码,由于某种原因出现了错误时,也可以利用此技术自动地把它恢复到原来的正确代码。从提高可靠性的角度出发,纠错技术是卫星通信、移动通信、卫星广播、文字广播等领域不可缺少的技术,这还关系到记录系统的高密度记录。所以,纠错技术已成为 CD, DAT, 数字 VTR, DVD 等实用化的基础。

因此,理解了纠错技术,就懂得了它对相关领域发展的重要性。然而,作为纠错技术基础的“编码理论”包含了很复杂的数学内容。与代码逻辑有关的许多名著也都以数学知识为前提,对于初学者来说,由于存在一些数学知识上的难点,所以还不能说纠错技术已经充分普及。

根据这种情况,电视学会从 1990 年开始,在学会杂志上利用 16 个月刊登了系列讲座。从简单易懂的“纠错技术”开始,一直讲解到应用。

在以后的几年里,“纠错技术”的重要性越来越明显,从而期待着讲座单行本的发行。在单行本的出版过程中,为了使编码理论更加简单易懂,以及在应用方面包含更多最新例子而进行了内容上的全面修改。为便于各层面读者学习参考,修改时特别注意了多收集各方面的应用例子。

希望此书能够对初学编码理论的大学生,以及从事包含纠错技术的系统设计技术人员有所帮助。

主 编

目 录

第 1 章 纠错技术概要

1.1 何谓数字化	1
1.2 编码纠错技术的使用方法	2
1.3 纠错方法的构成	5

第 2 章 纠错检测码基础

2.1 纠错检测的基本思想	6
1. 为错误检测所做的工作	6
2. 为纠错所做的工作	7
3. 通信系统模型	7
2.2 信道模型	10
1. 随机错误	10
2. 突发错误	11
3. 字节错误	12
2.3 代码种类	12
1. 纠错检测码	12
2. 随机突发纠错码	13
3. 块代码与卷积码	14
2.4 汉明距离	14
1. 纠错方法	14
2. 汉明距离	15
2.5 错误检测及纠正原理	17
1. 最小距离	17
2. 纠错、检测原理	18
参考文献	21

第 3 章 线性代码

3.1	简单线性代码例	22
1.	单一奇偶检验码	22
2.	汉明码	24
3.2	线性代码与奇偶校验矩阵	25
1.	矢量与矩阵	25
2.	奇偶校验矩阵	28
3.	不可约台式正准型	28
3.3	生成矩阵	31
1.	报文与代码字	31
2.	生成矩阵	32
3.4	线性代码的译码方法	33
1.	伴随式	33
2.	错误检测方法	34
3.	纠错方法	35
3.5	最小重量	37
1.	最小重量与最小距离	37
2.	最小距离与奇偶校验矩阵	38
3.	伴随式译码方法与最小距离	39
3.6	典型的线性代码例	40
1.	单一奇偶检验码	40
2.	汉明码	40
3.	扩大汉明码	41
3.7	正确译码概率与错误检测概率	41
1.	正确译码概率	41
2.	错误检测概率	43
	参考文献	43

第 4 章 循环码

4.1	具有移位寄存器的编码器和译码器	45
-----	-----------------------	----

1. 伴随式的计算式	46
2. H 矩阵列矢量的发生	47
3. 采用移位寄存器的伴随式计算	48
4. 采用移位寄存器的编码器	49
5. 汉明译码器	49
4.2 移位寄存器电路	51
1. 除法电路	51
2. LFSR 周期	53
4.3 循环码	54
1. 移位寄存器产生的代码性质	54
2. 生成多项式	55
3. 检验多项式	57
4.4 伽罗瓦域	58
1. 伽罗瓦域 $GF(P)$	58
2. 伽罗瓦扩大域 $GF(2^m)$	60
4.5 简单循环码例	64
1. 单一奇偶校验码	64
2. 循环汉明码	64
4.6 使用两个 LFSR 的循环码	66
1. 问 题	66
2. 码 长	66
3. 采用一个 LFSR 的编码器、译码器	67
4.7 循环码译码	69
1. 接收多项式、错误多项式	69
2. 伴随式多项式	69
4.8 循环汉明码的译码	71
1. 伴随式	71
2. 循环汉明码的译码方法	72
3. SEC-DEC 汉明码的译码	73
4.9 M 系列代码	74
1. 最大周期系列	74
2. M 系列代码	75

3. $H(x)$ 编码器	76
参考文献	78

5 章 BCH 码与 RS 码

5.1 多项式根与码根	79
1. 1 的 n 乘根	79
2. 共轭根	80
3. 最小多项式	81
4. 码 根	83
5.2 双重纠错 BCH 码	85
1. 错误定位符	85
2. 为了纠正双重错误	85
3. 双重纠错 BCH 码生成多项式	87
4. 伴随式计算电路	88
5. 错位位置多项式	89
6. 双重纠错 BCH 码的译码方法	90
5.3 BCH 码	92
1. BCH 码的定义	93
2. BCH 码的 H 矩阵与 BCH 界限	94
3. BCH 码的译码方法	95
5.4 里德-索洛蒙码(RS 码)	98
1. 简单的 RS 码例	99
2. 字节错误	100
3. 单一字节错误检测 RS 码	102
4. 单一纠错 RS 码	102
5. t 重字节纠错 RS 码	104
6. RS 码的译码方法	105
参考文献	113

第 6 章 突发纠错码

6.1 突发错误	114
----------------	-----

6.2	循环码突发错误检测	116
	1. 可检测的突发长度	116
	2. 突发错误检测	117
6.3	交错法	118
	1. 交错法的突发错误检测	118
	2. 字节纠错码的交错	119
6.4	积码与连接码	120
	1. 积 码	120
	2. 连接码	121
6.5	GMD 译码方法与雷迪-鲁宾逊译码方法	123
	1. 消失纠错译码方法	123
	2. GMD 译码方法	124
	3. 雷迪-鲁宾逊译码方法	126
6.6	积码、连续码的突发纠错能力	128
	1. 积 码	128
	2. 连接码	129
	参考文献	130

第 7 章 卷积码

7.1	简单卷积码的表示方法	131
	1. 简单卷积码例	131
	2. 延迟运算符	132
	3. 束缚长与编码率	133
7.2	编码器与生成矩阵	134
	1. 生成矩阵	134
	2. 卷积码编码器	135
7.3	校验矩阵与伴随式数列	137
	1. 校验矩阵	137
	2. 伴随式数列	138
7.4	伴随式类型译码方法	138
	1. 简单卷积码的译码方法例	138
	2. 采用伴随式类型译码方法的代码	140

7.5	阈值译码方法	141
1.	阈值译码方法的简单例	141
2.	采用阈值译码方法的代码	142
7.6	最优译码方法	143
1.	树枝状码表现与格式表现	143
2.	彼得比译码方法	145
3.	适用于彼得比译码方法的代码	147
4.	逐次译码方法	147
	参考文献	148

第 8 章 编码理论在图像 记录技术中的应用

8.1	数字 VTR 的开发经过	149
8.2	数字 VTR 的构成	150
8.3	实际的代码错误	151
8.4	代码错误的对策	152
1.	纠错	153
2.	错误修正	156
3.	纠正与修正的兼顾	157
4.	减小残存错误的影响	158
5.	其他考虑	158
8.5	里德-索洛蒙译码器及译码器的设计	159
1.	$GF(2^8)$ 的运算	159
2.	编码器的设计	161
3.	译码器的设计	164
8.6	今后展望	169
	参考文献	170

第 9 章 编码理论对数字 音频技术中的应用

9.1	音频设备使用的纠错码	171
9.2	音频数据的性质	172
9.3	CD、MD、DCC	173

9.4	DAT	176
9.5	8毫米录像机	178
	1. 纠错码	178
	2. 纠错能力	181
	参考文献	182

第 10 章 编码理论在计算机 技术中的应用

10.1	在存储设备中的应用	183
10.2	应用例	184
	1. 在半导体设备中的应用	185
	2. 在磁带设备中的应用	186
	3. 在磁盘设备中的应用	187
	4. 在光盘设备中的应用	188
	参考文献	193

第 11 章 编码理论在广播 技术中的应用

11.1	技术背景	194
11.2	广播线路的特点	195
11.3	广播纠错码	196
11.4	编码增益	198
11.5	(272,190)代码原理及其效果	199
	1. 可通过多数表决理论译码的循环码	200
	2. (272,190)代码	206
	3. (272,190)代码的纠错能力	208
11.6	未来展望	215
	参考文献	216

第 12 章 编码理论在卫星、 移动通信技术中的应用

12.1	卫星、地面移动通信线路的特点	217
	1. 固定卫星通信线路	218
	2. 移动体卫星通信线路	218

3. 地面移动线路	218
4. 功率限制系统与频率限制系统	220
12.2 卫星通信中的纠错技术	222
1. 软判断译码	222
2. 穿孔编码	222
3. 双重编码	223
4. 交 错	224
5. 透明码	224
12.3 卫星通信中的应用例	225
1. 国际卫星通信	225
2. 日本卫星通信	227
3. 编码多值调制方式	228
12.4 地面移动通信中的应用例	230
1. 蜂窝系统中的应用	230
2. 无线系统中的应用	232
3. 移动数据通信中的纠错技术	233
参考文献	233

第 13 章 编码理论的未来展望

13.1 编码理论的中心课题	235
1. 何谓好的代码	235
2. 好的代码分类	236
3. 从 RS 码到代数几何代码	238
13.2 编码理论的 10 年周期的风波	241
1. 从 1950 年到 1990 年	241
2. 2000 年	243
13.3 编码理论应用范围的展开	244
1. 与其他技术之间的融合	245
2. 应用支撑	247
3. 利用方法	248
4. 智 能	248
参考文献	249

第 1 章

纠错技术概要

本章以初学编码理论者为对象,为了使不具备较深数学知识的读者也能够理解,按照初学者的水平,简单易懂地介绍纠错技术在各种系统中的应用。

1.1 何谓数字化

在《英日词典》中,数字(digital)被解释为 0~9 的数;模拟(analogue)则带有类似物的意思,如同音频信号和视频信号一样,类似于声音的振动及图像明暗的(信号)是模拟信号。因此,模拟信号由其“类似”的程度限制着信息的保真度,如果因传输和记录而出现其类似状态的变化,就会产生失真,引起信噪比(S/N)劣化。而数字信号则是用 0~9 的离散(不连续)数字表示信息的信号,通过提高数字位数提高信息的保真度。如果还可以准确地读出数字,就不会因传输和记录而出现失真及信噪比劣化。数字化灵活地利用了这种特长。编码纠错技术是正确读出数字的技术,而编码理论则是其理论基础。

如上所述,数字信号是用数字表示信息的信号。在实际应用中,数字信号是通过脉码调制(PCM)由模拟信号转换的用二进制数表示的信号。因此,数字信号的读出只需判断为 0 或 1 即可,与模拟信号相比较,具有抗噪声、抗干扰强的特点。

另外,由于过强的噪声及干扰,存在着错误地把 0 判断为 1,把 1 判断为 0 的情况。即便是这种情况,也可以根据以编码理论为基础的编码纠错技术纠正大部分错误。

即便有的情况下不能纠错,如果知道错了(错误检测),也可以根

据前后关系等因素估计信息,为了不在整体上造成大的错误,还可以进行错误修正(补正)。

因此,通过数字化,可提高通信系统、广播系统、记录系统等的安全性。例如,对于需要复杂信号处理的广播系统,希望能够通过上述特点,从本质上改进图像质量,提高设备的维护性和应用性。通过这种方法,综合提高系统可靠性就是数字化的基本思想。

1.2 编码纠错技术的使用方法

编码纠错技术基础理论(编码理论)的许多研究在很早以前就已经开始,尽管在学术方面已经形成体系,但是由于设备化很难实现,直到最近也没有实用化。

目前,由于信息化社会的系统要求增大及半导体技术的发展,能够比较容易地实现设备化,编码纠错技术作为支持各种通信系统(卫星通信、宇宙通信、移动通信等)、广播系统(卫星广播、文字广播等)、记录系统(计算机存储设备,CD,DAT,数字VTR等)中的数字系统技术已经得到广泛地应用。

如前所述,编码纠错技术的主要目的是提高系统的可靠性,在宇宙通信中,则是从微弱电波中抽取数据的基本技术,也是数字录音带(DAT:Digital Audio Tape)等记录系统实现高密度化的基本技术。例如,广播用数字磁带录像机(VTR:videotape recorder)的设计就是以编码纠错技术为前提进行的。

广播技术要在系统上引进数字技术的思想,最早是1968年由英国广播公司(BBC)的A. V. Lord在Flemming memorial Lecture发表的,从70年代初开始,BBC等研究所也开始了对数字VTR的研究。

但是,视频信号的PCM记录大约需要100MHz或100MHz以上(模拟VTR的4~5倍)的宽记录带,带消费量也随之增加,很难实现实用化,这是20世纪70年代世界一致性意见。

这是由于当时计算机数字磁记录设备的设计方针是以“尽量不出现错误地进行记录和重放”为基础,如果采用这种设计思想,就必然形成这种结论。

对此,NHK(日本广播协会)研究小组根据“优先提高记录密度,由此而产生的错误要通过编码纠错技术进行更正”的方针,开发了设计方法。根据这种思想,试制了与当时广播用模拟 VTR(1 英寸(1 英寸=2.54cm)螺旋方式)相同带消耗量的数字 VTR,并在 1979 年春季发表。其后彻底消除了数字 VTR 实用化的困难,达到了现在的状况。

编码纠错技术实用化的状况根据各种系统的构成条件(错误发生的种类、传输(记录)频带、所必须的设备规模等)各有不同,其各种情况归纳为表 1.1。表中记载了一些未加以说明的技术术语,这些将在后面的章节中介绍。

表 1.1 纠错码技术实用化状况(例)

系统	引进纠错码技术的系统特点	在系统中成为问题的错误种类	实用系统例	实用纠错码例
卫星通信系统	<ul style="list-style-type: none"> 根据安装天线的尺寸、发送功率限制,采用低 C/N 比(白噪声性)的信道 传输速率(例)56kbit/s(国际通信卫星组织、SCTC 数据发送用国际移动卫星组织、高速数据通道) 	随机错误	国际通信卫星组织	双重纠错自正交卷积码(120, 112) 缩短 BCH 码等
			国际移动卫星组织	卷积码、软判断彼得比译码
宇宙通信系统	<ul style="list-style-type: none"> 超远距离通信(微弱电波),采用低 C/N 比(白噪声性)的信道 传输速率(例)数 Mbit/s(遥测用数据 CCSDS 建议) 地面局也可以采用大规模纠错设备 	随机错误	宇宙数据系统咨询委员会(CCSDS)建议	卷积码(内部码)(255, 233) 里德-索洛蒙码(Reed-Solomon Code)(外部码)的双重码
移动通信系统	<ul style="list-style-type: none"> 有多通路衰减等干扰,是低质量信道 传输速率(例)300bit/s(NTT 汽车电话控制信号) 为了使移动体装有设备,纠错设备需要简单 	突发错误	汽车无线	(43,31)BCH 码
卫星广播系统	<ul style="list-style-type: none"> 有降雨衰减影响,但没有重像干扰,信道质量比较高 传输速率:2.048Mbit/s 作为家庭用,纠错设备规格有限制 	随机错误	PCM 声音广播	(63,56)BCH 码

续表 1.1

	引进纠错码技术的系统特点	在系统中成为问题的错误种类	实用系统例	实用纠错码例
文字广播系统	<ul style="list-style-type: none"> • 由于重影干扰、脉冲噪声等,是低质量信道 • 传输速率:5.73Mbit/s • 作为家庭用,纠错设备的规格有限制 	突发错误	日本方式文字广播	(272,190)缩短差集合循环码、多数表决逻辑译码
计算机半导体存储设备	<ul style="list-style-type: none"> • 可靠性要求高 • 需要高速读写数据 	随机错误	大型计算机系统	单一纠错、双重检错码(构成以汉明码为基础)
计算机磁记录设备	<ul style="list-style-type: none"> • 可靠性要求高(误码率 $10^{-12} \sim 10^{-13}$) • 与媒体相关的错误多 • 传输速率(例)1Mbit/s(磁带设备高速方式) 	随机错误(字节错误)	磁盘设备	法牙码(Far Code)
			磁带设备	单一字节纠错、双重检错码(构成以里德-索洛蒙码为基础)
音频磁记录设备	<ul style="list-style-type: none"> • 听觉所需的误码率较高(10^{-7}指令) • 与媒体相关的错误多 • 传输速率(例)2.46Mbit/s(DAT)5.78Mbit/s(8mm图像) 	随机错误 + 突发错误	DAT	里德-索洛蒙积码
			8mm 图像用 PCM 录音	交叉交织码和循环码
音频光盘设备	<ul style="list-style-type: none"> • 听觉所需的误码率较高(10^{-7}指令) • 超高密度,与媒体相关的错误多 • 传输速率(例)2.03Mbit/s(5.733)Mbit/s(AHD) 	随机错误 + 突发错误	袖珍激光光盘(CD) AHD	双重编码里德-索洛蒙码 交叉码和循环码
视频磁记录设备	<ul style="list-style-type: none"> • 超宽带、高密度记录,与媒体、磁头相关的错误多 • 听觉所需的误码率较高(10^{-7}指令) • 传输速率(例)227Mbit/s(D-1) 	随机错误 + 突发错误	D1 格式数字 VTR D2 格式数字 VTR	里德-索洛蒙积码