

信息技术丛书

阎平凡 张长水 编著

人工神经网络 与 模拟进化计算



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



信息技术丛书

人工神经网络与模拟进化计算

阎平凡 张长水 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书较系统全面地讨论了人工神经网络与模拟进化计算的理论和工程应用。特别在学习理论与网络结构选择、动态神经网络、自组织网络、贝叶斯方法的应用以及模拟进化计算中的一些理论问题等方面的论述更为系统深入。

编写中结合了编者多年为研究生讲授这方面课程的教学经验和一些科研成果,同时参考了国内外有关书籍和教材的大量最新文献资料。内容深入浅出,并尽量反映这一领域的最新进展和发展方向;书中附有习题和丰富的参考文献,便于自学。

本书适合作为研究生课程的教材,或作为希望深入学习神经网络和进化计算的科技工作者的自学参考书。

2P25 3618

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络与模拟进化计算/阎平凡,张长水编著. —北京:清华大学出版社,2000
(信息技术丛书)

ISBN 7-302-03977-1

I. 人… II. ①阎… ②张… III. 人工神经网络-研究 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 35836 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:28.5 字数:685 千字

版 次:2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03977-1/TP·2327

印 数:0001~3000

定 价:36.00 元

《信息技术丛书》编委会

主 编 李衍达 郑大钟

编 委 金以慧 边肇祺
 陈禹六 杨家本
 周东华 蔡鸿程

责任编辑 蔡鸿程 王一玲

《信息技术丛书》

出版说明

当今的时代被称为信息时代。信息科学技术的快速发展和广泛渗透已经成为现今社会的一个重要的时代特征。人类社会的生产活动和生活质量,比以往任何时代都更加得益于和依赖于信息技术的成就和发展。自动化是信息技术领域的主要组成部分之一,包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统工程、机器人控制、计算机控制与应用、网络技术等在內,都和信息科学与技术有着直接和密切的关系,几乎涉及到了信息的检测、分析、处理、控制和应用等所有方面。正是基于当今时代特点和科技发展态势这个大视野,结合自动化类专业人才培养模式及教学内容体系的改革,我们规划和组织了这套丛书的编写和出版。这套丛书的读者,定位为自动控制、过程自动化、计算机、电子工程、电气工程、动力工程、机械自动化等系科的高年级大学生和研究生,以及这些领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

十年前,我们曾经组编和出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了比较大的社会影响,其中的许多著作至今仍然被国内很多高等学校用作教材,并被广大相关的科技人员作为进修和自学读物。现在组编和出版的这套《信息技术丛书》,从一定意义上可以说,就是先前的那套系列教材的发展和延伸,以反映新的进展和适应新的需求,匹配于变化了的时代和发展了的科技。列入这套丛书中的著作,大都是清华大学自动化等系所开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有在多年教学经验基础上新编而成的教材,也有属于原系列教材中的部分教材的修订版本。总体上,这套丛书仍将保持原系列教材的求新与求实的风格,力求反映所属学科的基本理论和新近进展,力求做到科学性和教学性的统一,力求体现清华大学近年来在相应学科和领域中科学研究与教学改革的成果。

我们希望这套丛书,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容较新和论述较为系统的教材,也能为广大科技人员的继续学习与知识更新提供适合的和有价值的参考书。我们同时热忱欢迎,选用这套丛书的老师、学生和科技工作者提出批评和建议。

《信息技术丛书》编委会

1999年10月

前 言

现在国内有关神经网络和模拟进化计算的书不少,其中也不乏优秀之作;但作为研究生教材,就编者多年的教学经验看,在广度和深度方面尚不能完全满足要求。研究生课程学时较少,来自各专业的研究生参加了各种各样的科研任务,所提出的问题非常广泛和深入;希望教材有一定深度和广度,以便他们进一步扩展和深入,本书向这个方向作了一些努力。

著名学者 D. Marr 认为,对一个复杂的信息处理系统的研究可分为 3 个层次,即计算理论层,算法层和实现层。计算理论层解决处理的目的,用什么理论,并说明所用理论为何能达此目的;算法层解决为实现计算理论所采用的算法;实现部分应给出可执行的或硬件实现的具体算法。编者认为,对于神经网络来说,计算理论层主要是学习理论,而现在的学习理论是基于统计决策理论的。算法部分是非线性优化方法(所有的学习算法都可归结为一种优化算法)。实现层背后的理论牵涉到非线性动力学系统的稳定性、可靠性理论等,从这一观点出发,本书加强并扩展了以下几方面的内容:

1. 学习理论与网络结构选择,第 4 章较系统地介绍了学习理论方面最近的研究成果,从工程应用的角度简要介绍了 V. Vapnik 的统计学习理论和经验风险最小化方法;特别强调了有限样本下的学习和网络结构选择问题。贝叶斯理论是研究归纳学习的有力工具,第 14 章从贝叶斯学习的观点进一步讨论了参数学习和网络结构选择问题。

2. 优化方法,第 13 章专门讨论了误差函数和参数优化方法,介绍了一些不同的误差函数,重点讨论了各种基于梯度的优化方法,而进化计算部分则主要讨论全局优化方法。

3. 动态系统和信号的处理,神经网络在系统辨识和随时间变化的信号处理(如时间序列的建模和预测)等方面的应用越来越多,第 10 章专门讨论了这方面的问题。第 15 章讨论神经网络在信号处理中的应用,可看作是第 10 章的扩展。

模拟进化计算的具体算法及其改进很多,本书不去求全,只结合最常用的遗传算法和进化策略从理论上作了较深入的分析。

在编写过程中,参考了 Haykin S. 编写的“Neural Networks, A Comprehensive Foundation”(1994 年版)以及 Bishop C M 编写的“Neural Networks for Pattern Recognition”(1995 年版)两本书。有许多内容取材于最近的国内外文献。各章后面都附有较多的参考文献,以便读者查阅。

本书各章安排如下:1~15 章为第一部分。第 1 章是绪论,介绍了人工神经元模型、网络结构和工作方式以及一些重要的学习方法。第 2,3,4 章讲述前馈网络;其中第 2 章讨论了前馈网络的一般问题,反向传播学习算法;为便于理解前馈网络作用的机理,2.6 节对前馈网络各层的作用从物理概念上作了分析。第 3 章讲述径向基函数网络和与之有关的概率神经网络等。第 4 章主要讨论学习和网络结构选择问题,同时也介绍了新近出现的一些神经元模型。第 5,6 章讲述单层全反馈网络,第 5 章讨论反馈网络的一般问题和联想存储器,重点讨论了联想存储器的设计,最后介绍了玻耳兹曼机。第 6 章讲述反馈网络用于优化计算中的一

些问题。第7,8,9章讲述自组织网络。第7章讨论基于Hebb学习的自组织网络,讲述了主成分分析网络和独立成分分析问题。第8章讨论基于竞争学习的自组织网络,重点讨论常用的自组织特征映射算法和向量量化算法。对自适应谐振理论也做了介绍。第9章从信息理论角度研究自组织过程。第10章专门讨论用于处理动态系统和信号的神经网络。介绍了带外加延时的前馈网络和部分反馈网络这两种最常用的模型;讨论了动态网络的一些主要学习算法,最后介绍了再励学习算法。第11章讨论反馈网络的动力学问题,由于反馈网络是一个非线性动力学系统,从数学上严格分析很困难,只能从工程应用的角度,对一些常用的网络模型的稳定性作了定性分析,最后,对混沌神经网络作了介绍。第12,13,14章的内容主要针对前馈网络。第12章讨论了用多个子网络组成复合网络来解决一些较复杂问题的方法;第13章针对学习过程中误差函数的作用和重要的参数优化方法作了介绍;第14章讨论了基于贝叶斯理论的学习方法和网络结构选择问题。第15章主要讨论神经网络在信号处理中的应用,它是第10章内容的深入和扩充。

第16~20章属于本书的第二部分。第16章对进化计算的一般概念作了介绍,系统讲述了进化策略的基本原理和算法。第17章讨论遗传算法,介绍了标准的遗传算法,对遗传算法的理论和收敛问题做了较深入的讨论。第18章进一步从实现的角度讨论遗传算法的设计和实现,包括编码方法,适应度函数的选择,遗传算子和参数选择问题。第19,20章讲述遗传算法的应用,分别讨论了在神经网络结构选择和权值学习中的应用以及在作业调度中的应用。

作为教材,第1~6章、第8章和第10章,16.1,17.1,17.2,17.3节属于基本内容,其余各章可作为专题内容。

本书第1~15章由阎平凡编写,第16~20章由张长水编写。清华大学出版社为本书的编写出版做了大量工作,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中错误遗漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999年12月25日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 神经网络的发展与应用	1
1.2 人工神经元模型	2
1.3 用有向图表示神经网络	4
1.4 网络结构及工作方式	5
1.5 NN 的学习	6
1.5.1 学习方式	6
1.5.2 学习算法	6
1.5.3 学习与自适应	7
习题	8
参考文献	8
第 2 章 前馈网络	10
2.1 线性阈值单元	10
2.1.1 用线性阈值单元实现布尔函数	10
2.1.2 线性可分性	11
2.1.3 n 维欧氏空间中 m 个点上可实现的线性可分函数的个数	11
2.2 多层前馈网络的计算能力及函数逼近	13
2.3 感知器学习算法	15
2.4 反向传播学习算法	17
2.5 改进反向传播算法收敛速度的措施	23
2.5.1 加入动量项	23
2.5.2 高阶导数的利用	24
2.5.3 共轭梯度法	24
2.5.4 递推最小二乘法	24
2.5.5 神经元空间搜索法	25
2.5.6 一些其他措施	26
2.6 多层前馈网络作用的分析	27
2.6.1 线性网络	28
2.6.2 非线性情况	31
2.7 应用举例——手写体数字识别	32
习题	35
参考文献	37

第 3 章 径向基函数网络	40
3.1 φ 可分性	40
3.2 函数逼近与内插	40
3.3 正规化理论	41
3.4 RBF 网络的学习	46
3.5 RBF 网络的一些变形	48
3.6 CMAC 网络	49
3.6.1 模型结构	49
3.6.2 工作原理分析	51
3.6.3 学习算法	53
3.7 概率神经网络	54
3.8 小波网络	55
3.9 泛函连接网络	56
参考文献	57
第 4 章 学习理论与网络结构选择	60
4.1 学习的统计性能	61
4.1.1 经验风险最小化原则	62
4.1.2 VC 维数	64
4.1.3 一致收敛的速度	65
4.1.4 结构风险最小化	66
4.2 学习的复杂性问题	67
4.2.1 PAC 学习的模型	67
4.2.2 PAC 学习的例子	68
4.2.3 PAC 学习模型的一些扩展	69
4.2.4 多层前馈网络的样本数问题	69
4.2.5 学习的计算复杂性	70
4.3 学习的动态特性	71
4.3.1 通用学习方程	71
4.3.2 LMS 规则	72
4.3.3 Hebb 规则	72
4.3.4 Oja 学习规则	73
4.4 推广问题	73
4.4.1 定性分析	73
4.4.2 平均推广能力	75
4.4.3 从数学上研究一般的推广问题	76
4.4.4 样本量问题	77
4.4.5 推广误差的实验估计	78

4.5	预测学习	79
4.5.1	模型	79
4.5.2	根本困难	79
4.5.3	维数灾难问题	80
4.5.4	方差与偏置折衷	80
4.6	网络模型选择	81
4.6.1	定性分析	81
4.6.2	正规化方法	82
4.6.3	修剪与网络构造法	83
4.7	符号学习与神经网络结合	86
4.8	支承向量机	89
4.9	新一代神经元模型及其计算能力的研究	93
4.9.1	布尔函数的计算	94
4.9.2	连续输入的情况	95
4.9.3	脉冲耦合神经元	95
	习题	95
	参考文献	96
第5章	反馈网络与联想存储器	101
5.1	联想存储器	101
5.2	反馈网络	102
5.2.1	离散 Hopfield 网络	103
5.2.2	连续 Hopfield 网络	106
5.3	用反馈网络作联想存储器	107
5.4	相关学习算法	109
5.5	容量分析	112
5.6	伪逆学习算法	115
5.7	基于线性可分性的学习算法	116
5.8	Li 与 Michel 的设计方法	117
5.9	线性规划方法	118
5.10	多余吸引子问题	119
5.11	双向联想存储器	120
5.12	玻耳兹曼机	122
5.12.1	随机神经元	122
5.12.2	模拟退火算法	123
5.12.3	玻耳兹曼机	123
5.12.4	玻耳兹曼机的学习	124
5.12.5	平均场学习规则	128
	习题	129

参考文献	130
第 6 章 神经网络用于优化计算	133
6.1 概述	133
6.2 连续 Hopfield 网络用于求解优化问题	135
6.3 CHNN 用于优化计算时存在的问题	137
6.4 神经网络用于求解货流问题	139
6.5 用于解数学规划的电路举例	142
6.6 在通信网络中的应用举例	144
习题	145
参考文献	146
第 7 章 自组织系统(I)——Hebb 学习	148
7.1 引言	148
7.2 自组织特征检测——一个简单的实验	148
7.3 主成分分析	149
7.4 单个神经元抽取最大主分量	152
7.5 单层网络用于抽取一组主分量	152
7.6 有侧向连接的自适应 PCA	154
7.7 最小均方误差重建学习	156
7.8 次分量的提取和应用	157
7.8.1 最优拟合问题	157
7.8.2 用单个神经元实现	159
7.9 PCA 算法的进一步扩展	161
7.9.1 非线性 PCA	161
7.9.2 鲁棒 PCA 算法	162
7.10 用于特征抽取的网络	162
7.10.1 正态分布的数据	162
7.10.2 类内、类间距离的计算	163
7.10.3 Bhattacharya 距离	165
7.11 独立成分分析	165
7.11.1 IC 与盲源分离	166
7.11.2 高阶累积量	166
7.11.3 基于信息的判据	168
参考文献	169
第 8 章 自组织系统(II)——竞争学习	172
8.1 Hamming 网络与 WTA 网络	172
8.2 自组织特征映射	174
• X •	

8.3	等效的 SOFM 算法	176
8.4	向量量化	179
8.5	广义向量量化	180
8.6	讨论	182
8.7	应用举例——指纹识别	183
8.8	自适应共振理论	185
8.8.1	ART 的基本原理	186
8.8.2	ART 作为分类器时的学习算法	188
	习题	189
	参考文献	190
第 9 章	自组织系统(Ⅲ)——基于信息论的模型	192
9.1	信息论简介	192
9.2	最大信息保持原则	194
9.2.1	单个神经元受噪声干扰	194
9.2.2	输入受加性噪声干扰	195
9.2.3	更复杂些的情况	195
9.3	拓扑有序映射的产生	197
9.4	基于最大熵原则的拓扑映射	199
	参考文献	200
第 10 章	动态信号与系统的处理	202
10.1	延时单元网络	202
10.2	时空神经元模型	205
10.2.1	模型	205
10.2.2	FIR 网络的学习算法	206
10.3	部分反馈网络	210
10.4	有反馈网络的学习算法	213
10.4.1	随时间演化的反向传播算法	213
10.4.2	实时递归学习	213
10.5	应用举例	216
10.6	讨论	227
10.7	再励学习的主要算法	228
10.7.1	时间差分法	229
10.7.2	RL 的主要算法	230
10.8	再励学习在控制中的应用举例	233
	习题	240
	参考文献	240

第 11 章 神经网络中的动力学问题	244
11.1 运动稳定性的基本知识	244
11.1.1 运动微分方程	244
11.1.2 平衡状态及其稳定性	245
11.1.3 定性方法,系统的分类	246
11.1.4 Liapunov 定理	249
11.1.5 吸引子	250
11.2 反馈网络的基本模型及其稳定性	251
11.2.1 基本模型	251
11.2.2 稳定性分析	253
11.2.3 离散模型	254
11.2.4 离散时间连续状态模型	255
11.3 递归反传算法	257
11.4 混沌神经网络的初步介绍	261
11.4.1 一个简单的非线性映射	261
11.4.2 混沌神经元模型	263
11.4.3 用混沌神经网络作联想记忆	265
参考文献	266
第 12 章 模块化神经网络	268
12.1 引言	268
12.2 混合专家网络	269
12.3 分层混合专家网络	270
12.3.1 工作原理	270
12.3.2 EM 算法概述	273
12.3.3 EM 算法用于 HME	273
12.3.4 IRLS 算法	274
12.3.5 EM 算法的步骤	276
12.4 应用举例	277
参考文献	280
第 13 章 误差函数与参数优化方法	282
13.1 误差平方和	282
13.1.1 网络输出的含义	283
13.1.2 更一般的条件分布的建模	284
13.2 后验概率估计	286
13.2.1 误差平方和准则	287
13.2.2 隐单元的作用	287
13.2.3 R 范数误差	288

13.3	交叉熵	288
13.3.1	两类分类器	289
13.3.2	交叉熵的性质	289
13.3.3	多类情况	290
13.4	参数优化算法	291
13.4.1	误差曲面	292
13.4.2	对 E 的局部二次逼近	292
13.4.3	优化过程的一些实际问题	293
13.5	梯度下降法	294
13.5.1	收敛性的定性分析	294
13.5.2	加速收敛的措施	295
13.6	共轭梯度法	297
13.7	牛顿法及其变形	300
13.8	Levenberg-Marquart 算法	301
13.9	信息几何与自然梯度	302
	参考文献	302
第 14 章	贝叶斯方法	303
14.1	网络权值的贝叶斯学习	304
14.1.1	权值的分布	304
14.1.2	一类更广的分布	306
14.1.3	网络输出的分布	307
14.1.4	超参数的处理	308
14.2	贝叶斯模型选择	309
14.2.1	模型显著度	310
14.2.2	网络组	311
14.2.3	贝叶斯方法的实现	312
14.2.4	最小描述长度	312
14.3	贝叶斯阴阳系统理论简介	313
	参考文献	314
第 15 章	神经网络在信号处理中的应用	315
15.1	引言	315
15.2	用泛函对物理系统建模	315
15.2.1	算子与泛函	315
15.2.2	Volterra 级数	316
15.3	Volterra 级数与多层前馈网络	317
15.4	非线性 ARMA 模型与 MFNN	319
15.5	状态空间表示与神经网络	322

15.6	神经网络与马尔可夫模型	322
15.7	特征空间分解与神经网络	324
15.7.1	信息判据用于主子空间分析	324
15.7.2	非线性主元分析	326
15.8	EM 算法用于训练部分反馈网络	329
15.9	混沌时间序列的预测和混沌中信号的检测	332
15.9.1	混沌时间序列的预测	332
15.9.2	混沌中信号的检测——海洋杂乱回波中雷达信号的检测	335
15.10	神经网络用于信息的压缩和编码	337
15.11	神经网络用于盲信号处理	342
15.12	小波网络与多分辨率学习	344
15.12.1	引言	344
15.12.2	小波基函数与函数的多分辨率分析	345
15.12.3	多分辨率学习与小波网络	347
15.12.4	多尺度网络用于时间序列预测	352
	参考文献	353
第 16 章	进化计算概论与进化策略	357
16.1	进化计算概论	357
16.2	二元进化策略	359
16.2.1	基本算法	359
16.2.2	变异过程	360
16.2.3	步长选择	362
16.2.4	收敛准则	364
16.2.5	对于约束条件的处理	364
16.3	多元进化策略	365
16.3.1	基本算法	365
16.3.2	$(1, \lambda)$ 前进速度分析	367
16.3.3	步长控制	371
16.3.4	$\mu \geq 1$ 时的收敛准则	374
16.3.5	串行与并行	374
	参考文献	376
第 17 章	遗传算法及其理论分析	377
17.1	标准遗传算法和基本概念	377
17.2	模式定理	380
17.3	基因块假设	383
17.4	欺骗性问题	386
17.5	收敛性分析	389

17.5.1	基本概念	390
17.5.2	守恒交叉算子	391
17.5.3	完全变异算子	392
17.5.4	遗传算法的马尔可夫链分析	393
	参考文献	395
第 18 章	遗传算法的设计与实现	396
18.1	编码方法	396
18.1.1	编码原则	396
18.1.2	编码方法	398
18.2	适应度函数	402
18.2.1	目标函数映射成适应度函数	402
18.2.2	适应度函数调整	402
18.2.3	适应度函数的设计对遗传算法的影响	404
18.3	遗传算子	404
18.3.1	选择算子	405
18.3.2	交叉算子	407
18.3.3	变异算子	408
18.4	其他问题	409
18.4.1	参数选择	409
18.4.2	其他操作	411
	参考文献	415
第 19 章	遗传算法在神经网络中的应用	416
19.1	连接权的进化方法	416
19.2	网络结构的进化方法	417
19.3	用遗传算法解决 XOR 问题示例	419
	参考文献	421
第 20 章	遗传算法在作业调度中的应用	422
20.1	问题描述	422
20.2	解作业调度问题的遗传算法	423
20.3	仿真结果	427
	参考文献	430
	索引	431

第 1 章 绪 论

1.1 神经网络的发展与应用

现代的计算机有很强的计算和信息处理能力,但是它对于模式识别、感知和在复杂环境中作决策等问题的处理能力却远不如人,特别是它只能按人事先编好的程序机械地执行,缺乏向环境学习、适应环境的能力。早在 20 世纪初,人们已经知道人脑的工作方式与现在的计算机是不同的,人脑是由极大量基本单元(称之为神经元)经过复杂的互相连接而成的一种高度复杂的、非线性的、并行处理的信息处理系统。单个神经元的反应速度是在毫秒级,比起计算机的基本单元——逻辑门(反应时间在 10^{-9} s 量级)低 5~6 个数量级。由于人脑的神经元数量巨大(约为 10^{10} 个),每个神经元可与几千个其他神经元连接(总连接数约为 6×10^{13}),对有些问题的处理速度反而比计算机快得多。它的能耗约为每一运算 10^{-16} J/s(计算机为每一运算 10^{-6} J/s),可见其性能要比现代计算机高得多。

因此,人们自然会想到,大脑的组织结构和运行机制必有其绝妙的特点,从模仿人脑智能的角度出发,来探寻新的信息表示、存储和处理方式,设计全新的计算机处理结构模型,构造一种更接近人类智能的信息处理系统来解决实际工程和科学研究领域中传统的冯·诺依曼计算机难以解决的问题,必将大大促进科学进步,并会在人类生活的各个领域引起巨大变化,这就促使人们研究人工神经网络(artificial neural networks,以下简称 NN)系统。简而言之,所谓 NN 就是模仿人脑工作方式而设计的一种机器,它可用电子或光电元件实现,也可用软件在常规计算机上仿真;或者说 NN 是一种具有大量连接的并行分布式处理器,它具有通过学习获取知识并解决问题的能力,且知识是分布存储在连接权(对应于生物神经元的突触)中,而不是像常规计算机那样按地址存在特定的存储单元中。

尽管目前人们对大脑的神经网络结构、运行机制,甚至单个神经细胞的工作原理的了解还很肤浅,但是基于生物神经系统的分布式存储、并行处理、自适应学习这些现象,已经构造出有一定初级智能的人工神经网络。当然这种人工神经网络仅仅是对大脑的粗略而且简单的模拟,无论是在规模上、功能上与大脑相比都还差得很远。有人从理论上研究了现有神经网络模型计算能力的局限性,并认为它不能解决传统的基于物理符号系统的人工智能中的一些困难^[5]。但它在一些科学研究和实际工程领域中,已显示了很大的威力。从 80 年代初神经网络的研究再次复苏并形成热点以来,发展非常迅速,从理论上对它的计算能力、对任意连续映射的逼近能力、学习理论以及动态网络的稳定性分析上都取得了丰硕的成果。特别是在应用上已迅速扩展到许多重要领域。以下根据一些文献的介绍,列出一些主要领域的应用情况^[1,2]。

(1) 模式识别与图像处理

印刷体和手写体字符识别,语音识别,签字识别,指纹,人脸识别, RNA 与 DNA^[6]序列