



智能科学技术著作丛书

脉冲耦合神经网络 与数字图像处理

马义德 李廉 绽琨 王兆滨 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

TP183/76

2008

智能科学技术著作丛书

脉冲耦合神经网络 与数字图像处理

马义德 李 廉 绽 琨 王兆滨 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

从 20 世纪 90 年代开始,通过 Reinhard Eckhorn 等对猫的视觉皮层神经元脉冲串同步振荡现象的研究,得到了哺乳动物神经元模型,并由此发展形成了脉冲耦合神经网络 PCNN 模型。脉冲耦合神经网络进一步靠近真实哺乳动物视觉神经网络中神经细胞的工作原理,非常适合于图像分割、图像平滑及降噪等应用,是 20 世纪神经网络理论发展的里程碑,引起了众多学者的兴趣。

本书在详细阐述 PCNN 脉冲耦合神经网络的原理的基础上,分析了其在数字图像处理技术中的应用,特别是在图像降噪、图像分割、参数寻优、压缩编码、图像增强、图像融合、目标识别、图像签名、图像检索、组合决策优化、虹膜识别、细胞分析、凹点检测以及语音识别等方面的最新研究成果,同时介绍了其与数学形态学、小波理论等结合的应用实例,还给出了其在 MATLAB 环境下编程实现的主要程序,便于研究者和学习者很快上手,尽快掌握,利于 PCNN 脉冲耦合神经网络在我国的应用和相关芯片的开发设计。

本书适合数字信号处理、人工智能理论、生物医学图像处理等专业研究生、高年级本科生阅读,还适合数字图像分析和处理、图像通信工程等相关领域的研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲耦合神经网络与数字图像处理 / 马义德等著. —北京:科学出版社, 2008

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-022389-0

I. 脉… II. 马… III. 神经网络-数字图像处理 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 093292 号

责任编辑:耿建业 杨 然 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 7 月 第一次印刷 印张: 20 1/4 插页: 1

印数: 1—3 000

字数: 384 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

庆祝人工智能诞生50周年

暨

中国人工智能学会成立25周年

吴文俊

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 谭 民

秘 书 长：韩力群

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

蔡庆生(中国科学技术大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所)

蔡自兴(中南大学)

孙增圻(清华大学)

杜军平(北京邮电大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

韩力群(北京工商大学)

涂序彦(北京科技大学)

何华灿(西北工业大学)

王国胤(重庆邮电学院)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

王家钦(清华大学)

黄河燕(中国科学院计算语言研究所)

王万森(首都师范大学)

黄心汉(华中科技大学)

吴文俊(中国科学院系统科学研究所)

焦李成(西安电子科技大学)

杨义先(北京邮电大学)

李祖枢(重庆大学)

尹怡欣(北京科技大学)

刘 宏(北京大学)

于洪珍(中国矿业大学)

刘 清(南昌大学)

张琴珠(华东师范大学)

秦世引(北京航空航天大学)

钟义信(北京邮电大学)

邱玉辉(西南师范大学)

庄越挺(浙江大学)

阮秋琦(北京交通大学)

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶,“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章,“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science & technology,简称 IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence,简称 NI),包括:“人的智能”(human intelligence,简称 HI)及其他“生物智能”(biological intelligence,简称 BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence,简称 AI),包括:“机器智能”(machine intelligence,简称 MI)与“智能机器”(intelligent machine,简称 IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence,简称 II),即:“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence,简称 CI),指:“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence,简称 DI),如:广域信息网,分散大系统的分布式智能。

1956年,“人工智能”学科诞生,五十年来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说,当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么,可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence,简称 CAAI)正式成立,二十五年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创

新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

智能科技领域广

人机集成智能强

群体智能协同好

智能创新更辉煌

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

意识问题是对当代科学的巨大挑战,是科学家长期以来十分关注的研究对象,由于其极端复杂,所以经过几个世纪的持续探索,至今还未取得突破性进展。随着人们对生物学与计算机科学等学科研究的逐步深入,人们对意识问题的本质将会有更深刻的认识。

由于发现脱氧核糖核酸(DNA)的双螺旋结构,与 Wilkins 共同获得 1962 年诺贝尔生理及医学奖的 Crick 认为“人的精神活动完全由神经细胞、胶质细胞的行为和构成及影响它们的原子、离子和分子的性质所决定”。他坚信,意识这个心理学难题,可以用神经科学的方法来解决。他用科学的方法来解释意识奥秘的著作《惊人的假说——灵魂的科学探索》一书的最后章节,特别提到脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural networks, PCNN)和研究脉冲耦合神经网络的开山鼻祖 Gray 和 Eckhorn 等科学家。

1987 年,Gray 等发现猫的初生视觉皮层有神经激发相关振荡现象,并于 1989 年将其研究成果发表于 *Nature* 杂志。与此同时,Eckhorn 根据猫的大脑视觉皮层同步脉冲发放现象,提出了展示脉冲发放现象的连接模型,对其进行改进得到了脉冲耦合神经网络基本模型。Eckhorn 开拓性地提出了脉冲耦合神经网络基本模型。

国内研究脉冲耦合神经网络是从 20 世纪 90 年代末开始的。国内研究者很少研究脉冲耦合神经网络模型神经元的内在机理,主要是将其作为强大数学工具应用于图像处理的各个领域,很少对数学模型或参数设置进行研究。

脉冲耦合神经网络模型模拟了猫等哺乳动物视觉皮层视觉神经细胞活动。利用了神经元特有的线性相加、非线性相乘调制耦合两种特性,考虑了生物电传输的时延特性和指数衰减特性,考虑了哺乳动物视神经系统视野受到适当刺激时相邻连接神经元(甚至在猫视觉皮层相邻 7mm 范围内)同步激发产生 35~70Hz 振荡脉冲串特性,还有内部活动项中偏置一项实为神经元处于抑制状态时内部活动平衡态的一种等效表示,这样脉冲耦合神经网络模型向生物实际神经网络更靠近了一步,其对周围信号的处理能力就更强,对环境的适应能力更好。另外,脉冲耦合神经网络为单层模型神经网络,不需要训练过程即可实现模式识别、图像分割和目标分类等,因此非常适合实时图像处理环境。而且如果将其同发展中的小波理论、数学形态学和模糊处理等其他信号处理方法相结合能够在图像和语音等相关处理方面有更广泛的应用。

尽管 PCNN 神经元模型较传统 BP 网络等人工神经元模型前进了一步,但距实际生物神经网络还有很长一段距离。因为 PCNN 模型需要确定较多的参数,到目前为止,其理论发展依然存在不足,主要表现在图像处理的效果与模型参数之间的关系并不清晰,是国内外学者积极关注的热点。

脉冲耦合神经网络课题组是兰州大学 985 特色项目支持的“生物医学图像处理新技术研究”的重要子课题组,也是国内最早开展 PCNN 研究的团队之一,课题组近十年来通过对 PCNN 理论及其应用的研究,形成了自己的特色,积累了很好的成果。对于 PCNN 的理论研究和实际应用以及数字图像处理技术发展具有重要应用价值和现实意义。

脉冲耦合神经网络模型及其应用研究也是国家自然科学基金(No. 60572011)、教育部新世纪人才支持计划(NCET-06-0900)和甘肃省自然科学基金(0710RJZA015)项目等研究内容之一。

本书主要介绍了作者和课题组同事在 PCNN 理论及应用方面多年研究的成果。例如,根据分割图像的信息熵和交叉熵,提出了两种 PCNN 最佳分割迭代次数的确定方法;结合遗传算法寻优,实现了一种改进 PCNN 模型参数的自动确定和自适应 PCNN 自动模型;提出了结合中值滤波和 PCNN 的噪声滤波新算法;提出了基于视觉特性的 PCNN 不规则形状区域分割和施密特正交基的新型图像压缩编码算法;研究了基于改进的多通道 m -PCNN 新的图像融合算法;研究了基于聚类的 PCNN 图像分割新算法;验证了 PCNN 模型阈值指数衰减特性;分析探讨了 PCNN 理论发展和应用研究,开展了其在图像纹理分析、生物特征识别和图像签名等应用方面的研究。

本书在详细阐述脉冲耦合神经网络原理的基础上,结合 PCNN 理论研究现状,探索其在图像处理中的应用,介绍其在图像除噪、图像分割、边缘检测、压缩编码、图像增强、图像融合、目标识别与特征提取、虹膜识别、语音识别、组合优化等方面的最新研究成果。同时介绍了其与遗传算法、数学形态学、小波理论等结合的应用实例。

全书共分 11 章,其中第 1 章为脉冲耦合神经网络基本原理篇,详细阐述了 PCNN 模型基本原理和基本特性;第 2 章~第 11 章为 PCNN 应用篇,主要讲解 PCNN 在图像噪声滤波、图像分割、压缩编码、图像增强和图像融合等应用方面的研究成果,还介绍了 PCNN 与小波变换、数学形态学等结合应用实例。

第 1 章阐述了脉冲耦合神经网络的发展历程,介绍了不同发展阶段的主要 PCNN 神经元模型及自适应 PCNN 模型,分析了 PCNN 的主要参数、基本特性和工作原理,给出了 PCNN 模型的典型 MATLAB 程序。

第 2 章进行基于脉冲耦合神经网络的图像平滑与降噪处理研究,在总结典型图像降噪方法的基础上,主要分析和阐述了 PCNN 及其改进模型在图像噪声滤波

中的应用,详细介绍了基于 PCNN 的几种噪声滤波新算法。

第 3 章阐明基于脉冲耦合神经网络的图像分割完全依赖于图像的自然属性,因而 PCNN 图像分割技术是当前非常重要的研究和应用热点。阐述了图像分割技术发展现状;结合图像信息熵详细介绍了几种基于 PCNN 和信息熵的图像分割新算法;基于聚类分割思想,进行了基于聚类 PCNN 图像分割算法研究和模型的改进以及分析了自适应 PCNN 图像分割自动新模型。

第 4 章阐述图像压缩编码技术发展现状,特别是分析了神经网络与分割图像压缩编码技术,结合人眼视觉特性详细分析和介绍了基于 PCNN 模型的不规则形状分割压缩编码算法及其实现思路。

第 5 章结合人眼视觉特性研究,分析了脉冲耦合神经网络图像增强原理,详细介绍了基于 PCNN 赋时矩阵的图像增强新算法,介绍了 PCNN 在灰度图像增强、彩色图像增强中的应用。

第 6 章介绍了脉冲耦合神经网络与图像融合。在概述图像融合基本概念的基础上,分析和介绍了两种 PCNN 图像融合新算法。

第 7 章介绍了脉冲耦合神经网络与数学形态学。首先,介绍数学形态学在细胞分割与计数中的应用,结合 PCNN 自动波特性和图像信息熵,开展了 PCNN 血细胞分割和计数研究;另外,还分别进行了 PCNN 与数学形态学结合的脉冲噪声滤波算法研究,用双层 PCNN 与数学形态学的有效结合实现了基于 PCNN 的区域标识。

第 8 章详细阐述了基于脉冲耦合神经网络的特征提取方法,介绍了 PCNN 在特征提取方面的应用实例,特别是我们研究的有噪图像识别、语音识别、虹膜识别等方面的一些算法。

第 9 章介绍了脉冲耦合神经网络与图像签名,介绍了基于 PCNN 的数字签名技术,并详细讨论了基于 ICM 数字签名的一种新算法。

第 10 章介绍了脉冲耦合神经网络与组合优化,将 PCNN 应用于组合优化问题求解,通过对模型改进和发展,扩展了 PCNN 性能,更好地解决了最短路径问题。

第 11 章介绍了脉冲耦合神经网络与小波分析。详细比较了小波和 PCNN 各自的特点,特别是在图像边缘提取、降噪、图像压缩编码等方面的特色和不足,回顾了小波理论与 PCNN 软硬件相结合的一些应用实例,详细介绍了非抽样 contourlet 变换(NSCT)和 PCNN 的图像凹点检测新算法。

另外,在每节算法介绍之前,均用大量篇幅介绍该领域研究现状与进展,并对 PCNN 在这方面的研究进行总结,帮助读者开阔视野,了解技术发展前沿,章末给出了大量参考文献,可结合学习。本书不仅仅是一本 PCNN 专题方面的论著,同时也是从事数字图像处理研究人员必备的参考读物。

本书力求做到深入浅出、通俗易懂。适合从事智能信息处理、模式识别、数字

信号处理与软计算理论、计算机视觉、通信与图像工程、生物医学图像处理等信息学科相关专业高年级本科生、研究生学习参考使用,同样也非常适合数字信号处理和数字图像分析及处理专业相关研究人员阅读。

本书的主要内容是作者和课题组同行、研究生长期科研工作的成果积累,为此作者和课题组在这里感谢王亚馥教授、戴若兰教授、刘映杰副教授、张久文副教授、张新国高工、张在峰老师等的大力支持和热情帮助,作者还要特别感谢研究生吴承虎、史飞、齐春亮、钱志柏、刘勍、袁敏、徐光柱、夏春水、张北斗、敦建征、申建军、林冬梅、张红娟、赵荣昌、邱秀清、余文锐、袁树林、陈锐、薛峰、陈昱莅、苏茂君、郑晓、张恩溯、朱望飞、邓海波、程飞燕、杨丽珍、刘丽和田乐等同学为本书付出的辛勤劳动和做出的出色工作,是大家年复一年的持续努力才使得本书得以尽快面世。

科学研究是站在巨人肩膀上的不懈努力,是前赴后继、相互继承的不断延续。为此,作者感谢本书所有参考文献的作者,是他们的前期探索、积累和研究,才会有本书的后续出版。特此表示诚挚的谢意!

由于神经网络与智能信息处理是正在发展中的热点领域,理论性强、技术更新快,加上作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大专家同行批评指正。

作 者

2008年3月15日

目 录

前言

第 1 章 脉冲耦合神经网络	1
1.1 大脑皮层	1
1.1.1 神经元	2
1.1.2 大脑皮层	3
1.2 脉冲耦合神经网络的基本模型	5
1.2.1 Eckhorn 神经元模型	5
1.2.2 脉冲耦合神经网络模型	8
1.2.3 脉冲耦合神经网络模型的电路理论解释	9
1.3 脉冲耦合神经网络的工作机理	11
1.3.1 无耦合连接	11
1.3.2 耦合连接	13
1.3.3 主要特性	14
1.3.4 性能参数	16
1.4 自适应脉冲耦合神经网络	17
1.4.1 基于遗传算法的脉冲耦合神经网络的参数自动设定	18
1.4.2 基于 LMS 准则和梯度下降法的自适应脉冲耦合神经网络	19
1.5 脉冲耦合神经网络的 MATLAB 实现	23
1.6 小结	24
参考文献	26
第 2 章 图像滤波及脉冲噪声滤波器	30
2.1 图像处理中的噪声与滤波	30
2.1.1 噪声的特征与分类	30
2.1.2 传统的噪声抑制方法	31
2.1.3 一些新兴的噪声抑制方法	35
2.1.4 图像和噪声本身的统计特性是图像除噪的难点	38
2.2 一些经典噪声滤波器	39
2.2.1 脉冲噪声滤波器	39
2.2.2 高斯噪声滤波器	40
2.2.3 混合噪声滤波器	42

2.3 基于简化 PCNN 模型的脉冲噪声滤波器	44
2.3.1 简化 PCNN 模型结构	44
2.3.2 基于简化 PCNN 模型的脉冲噪声滤波器	45
2.4 基于 PCNN 的高斯噪声滤波器	49
2.4.1 基于简化 PCNN 模型的高斯噪声滤波器	49
2.4.2 基于 PCNN 赋时矩阵的高斯噪声滤波	51
参考文献	55
第 3 章 脉冲耦合神经网络在图像分割中的应用	57
3.1 图像分割技术	57
3.1.1 图像分割的定义	57
3.1.2 图像分割领域需要解决的问题	57
3.2 生物细胞图像分割技术的进展	59
3.2.1 生物细胞图像分割技术的现状	59
3.2.2 生物细胞图像本身属性是自动分割的难点	65
3.3 基于 PCNN 和熵值最大原则的植物细胞图像分割	67
3.3.1 基于 PCNN 和熵值最大原则的植物胚性细胞图像分割研究	67
3.3.2 实验结果分析	70
3.4 基于聚类的分割技术进展	71
3.4.1 图像分割的实质	71
3.4.2 基于聚类的图像分割技术	73
3.5 基于区域增长的 PCNN 分割	78
3.5.1 区域生长的概念	78
3.5.2 Stewart 等的 PCNN 改进模型	79
3.5.3 对 Stewart 等模型的改进及结果讨论	82
3.6 基于交叉熵的改进型 PCNN 图像自动分割方法	89
3.6.1 最小交叉熵阈值分割算法	89
3.6.2 PCNN 模型及其改进	90
3.6.3 实验仿真结果与分析	92
3.7 基于遗传算法的 PCNN 自动系统的研究	95
3.7.1 基于遗传算法和 PCNN 的图像自动分割算法的设计与实现	95
3.7.2 仿真实验结果和结论	98
3.8 一种生物彩色图像自动分割新方案	100
3.8.1 分割方案	101
3.8.2 实验结果	102
3.8.3 结论	104

3.9 基于 PCNN 的图像边缘检测方法	104
3.10 基于 PCNN 的图像二值化算法及分割评价研究	107
3.10.1 几种常用的图像二值化算法	107
3.10.2 基于 PCNN 的图像二值化方法研究	109
3.10.3 图像二值化分割评价准则	109
3.10.4 实验结果及分析	111
3.10.5 结论	114
参考文献	115
第 4 章 脉冲耦合神经网络与图像编码	122
4.1 图像压缩编码概述	122
4.1.1 传统的压缩编码技术	122
4.1.2 现代图像压缩编码技术	125
4.2 基于感兴趣区的图像压缩编码	128
4.2.1 CDF9/7 小波和 BNC17/11 小波	129
4.2.2 算法原理	130
4.2.3 算法详细说明和讨论	130
4.2.4 实验结果	131
4.2.5 结论	132
4.3 基于小波的感兴趣区渐进图像传输算法	133
4.3.1 小波编码特性	133
4.3.2 感兴趣区渐进图像传输算法	134
4.3.3 实验结果	136
4.3.4 结论	137
4.4 一种快速小波子带分形图像压缩编码方法	137
4.4.1 小波结合分形的压缩编码思想	138
4.4.2 计算机仿真实验及结果分析	139
4.5 不规则区域编码综述与进展	142
4.5.1 经典编码技术比较	143
4.5.2 不规则区域编码方法	144
4.5.3 不规则区域编码的展望	148
4.6 传统神经网络图像压缩方法	148
4.6.1 用于图像压缩的 BP 神经网络模型	149
4.6.2 基于分类的改进 BP 神经网络图像压缩算法	149
4.6.3 实验结果和分析	151
4.7 基于 PCNN 的不规则区域编码	151

4.7.1 编码原理	152
4.7.2 算法描述	154
4.7.3 DSP 仿真	155
4.7.4 实验结果及分析	156
参考文献	160
第 5 章 脉冲耦合神经网络与图像增强	165
5.1 图像增强	165
5.1.1 空域增强	165
5.1.2 频域增强	165
5.1.3 色彩增强	166
5.2 人眼视觉特性与 PCNN 赋时矩阵	167
5.2.1 人眼视觉特性	167
5.2.2 PCNN 与人眼视觉特性	168
5.2.3 PCNN 赋时矩阵	169
5.3 基于 PCNN 的图像增强算法	170
5.3.1 改进 PCNN 模型	170
5.3.2 基于赋时矩阵图像增强算法	171
5.3.3 实现彩色图像增强算法	171
5.4 小结	172
参考文献	173
第 6 章 脉冲耦合神经网络与图像融合	175
6.1 图像融合概述	175
6.1.1 图像融合分类	175
6.1.2 融合效果评价	177
6.2 基于 PCNN 的医学图像融合	178
6.2.1 双通道 PCNN 模型	179
6.2.2 双通道 PCNN 图像融合的实现	180
6.2.3 实验结果与分析	181
6.3 基于 PCNN 的多聚焦图像融合	183
6.3.1 模型介绍	184
6.3.2 算法描述	184
6.3.3 实验结果	185
参考文献	188
第 7 章 脉冲耦合神经网络与形态学	190
7.1 PCNN 与二值数学形态学	190

7.1.1 腐蚀和膨胀	190
7.1.2 开运算和闭运算	192
7.1.3 数学形态学基本运算的应用	192
7.1.4 基于数学形态学的血细胞图像分割与计数算法	194
7.1.5 PCNN 自动波传播特征	197
7.1.6 基于 PCNN 自动波特征的血细胞图像分割和计数方法	200
7.2 PCNN 与灰度形态学相结合的除噪方法	208
7.2.1 灰度数学形态学简介	208
7.2.2 灰度开闭(OC)和闭开(CO)滤波	210
7.2.3 除噪算法	211
7.2.4 计算机仿真及结果分析	211
7.2.5 结论	214
7.3 ICM 与灰度形态学相结合的除噪方法	214
7.3.1 交叉皮层模型	214
7.3.2 ICM 与形态学相结合的除噪算法	216
7.3.3 仿真和结果分析	216
7.3.4 结论	218
7.4 PCNN 与形态学结合的图像标定	219
7.4.1 基于双层 PCNN 与形态学的区域标识算法	219
7.4.2 实验仿真结果	221
参考文献	222
第 8 章 脉冲耦合神经网络在特征提取中的应用	225
8.1 PCNN 与特征提取	225
8.1.1 时间序列	225
8.1.2 熵序列	226
8.1.3 统计序列	226
8.1.4 正交变换	226
8.1.5 特征提取方法总结	227
8.2 有噪图像识别	227
8.2.1 基于 PCNN 的特征提取算法	228
8.2.2 实验仿真结果	228
8.3 基于直方图矢量重心的图像目标识别	231
8.3.1 改进型 PCNN 模型及其赋时矩阵	231
8.3.2 直方图矢量重心特征	232
8.3.3 实验结果与分析	233

8.4 PCNN 应用于语音识别	235
8.4.1 语谱图介绍	236
8.4.2 语谱图特征提取算法	237
8.4.3 实验仿真与结果分析	238
8.5 虹膜识别	240
8.5.1 ICM 模型	241
8.5.2 基于 ICM 的虹膜识别算法	242
8.5.3 实验结果与分析	244
8.5.4 其他方案	244
8.6 基于 LMS 准则和梯度下降法的自适应脉冲耦合神经网络	245
8.6.1 LMS 算法	246
8.6.2 自适应脉冲耦合神经网络的实现	246
8.6.3 光照对 PCNN 输出点火时间序列的影响	250
8.6.4 自适应脉冲耦合神经网络试验研究	251
参考文献	254
第 9 章 脉冲耦合神经网络与数字图像签名技术	258
9.1 基于内容的图像检索综述	258
9.1.1 图像检索技术	258
9.1.2 基于内容的图像检索的索引技术	259
9.1.3 图像内容的相似度量方法	261
9.1.4 图像多特征的相关反馈检索技术	261
9.1.5 基于内容的图像检索效果评判	261
9.2 基于 PCNN 的数字图像签名技术	261
9.2.1 基于 PCNN 的特征提取	262
9.2.2 实验结果	263
9.3 基于 ICM 的数字图像签名技术	266
9.3.1 ICM 模型	266
9.3.2 基于 ICM 的图像检索系统	267
9.4 基于 PCNN 和 ICM 的图像检索系统性能	268
9.4.1 PCNN 和 ICM 在基于内容的图像检索系统的优势	268
9.4.2 基于 PCNN 和 ICM 的图像签名技术可改进的地方	268
9.4.3 关于数据库的几点说明	269
参考文献	270
第 10 章 脉冲耦合神经网络与组合决策优化	272
10.1 组合决策优化	272