

研究生教育书系
信息与电子学科

视觉感知系统 信息处理理论

罗四维 等著

Information Processing Theory of
Visual Perception



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助课题
国家自然科学基金资助课题
北京市重点学科共建项目

研究生教育书系
信息与电子学科

视觉感知系统信息处理理论

Information Processing Theory of Visual Perception

罗四维 等著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从理论和应用的角度讨论研究神经感知和机器学习之间的关系。这种从模拟人类的神经模式出发来指导机器学习的方法,即结合神经科学的理论来探讨计算机处理信息的能力,具有重要的科学意义。作者力求向读者展示这方面的最新研究成果和热点问题,希望读者,特别是青年读者,能关注那些可能对计算机科学带来突破的课题。

本书可以作为计算机、信号处理等专业硕士研究生、博士研究生的专业课教材,也可作为从事神经计算科学、图像处理等研究领域的科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

视觉感知系统信息处理理论/罗四维等著. —北京:电子工业出版社, 2006.2

(研究生教育书系)

ISBN 7-121-02267-2

I. 视… II. 罗… III. 人工神经网络—研究生—教材 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 007992 号

责任编辑:胡先福 张 濮

印 刷:北京智力达印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:12.25 字数:227 千字

印 次:2006 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:30.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

探索神经计算的数学物理方法，并将这些方法应用于发展新的神经式信息处理模式的神经计算科学，已经成为国内外研究的热点课题之一。神经计算科学不同于计算神经科学。神经计算科学以神经生理学和认知科学的研究成果为基础，应用数学方法研究类似于人类神经处理方式的新的计算原理和信息处理系统。而计算神经科学研究的目标是阐明大脑进行信息处理的基本原理，揭示神经系统的状态所实现的表象本质，探索神经系统所完成的功能。

从理论基础和实际应用的角度来看，目前国内外有很多学者致力于研究神经感知和机器学习之间的关系，并取得了很多成果。随着神经生理学、认知科学、神经计算等学科不断发展，这种将认知科学和神经计算结合起来的研究方法，一定会具有广阔的应用前景。

人类所感知的大部分外界信息都来自于视觉，所以目前研究的内容也以视觉信息为主。但是，由于该领域的研究涉及多学科交叉，一些新的发展和成果分散在数百篇研究论文之中，暂时还没有系统介绍该方面研究的书籍。这种现状给从事该领域的研究者和学习者带来了很大的不便。为了改变这种局面，并更好地促进该领域的发展，我们将自己多年的研究积累和教学经验灌注于此书，期待对耕耘于感知信息处理领域的人们有所帮助。本书在较为系统地介绍人类视觉感知系统工作机理的基础上，着重介绍神经计算领域目前正在发展的一些新理论和新技术，力求向读者展示神经计算科学领域的最新研究成果和热点问题，希望读者，特别是青年读者，能关注那些可能对计算机科学带来突破的课题。

本书正式编写历时一年多。为编写这本著作，我们组织了研究小组，其成员有黄雅平博士，博士生廖灵芝、邹琪、田媚、杨树忠。他们均已多年从事视觉感知系统信息处理的研究，学术思想活跃，理论基础扎实，实践经验丰富。

书中的数据和资料来源于罗四维教授领导的博士生研究小组及同一研究领域他人的研究论文。对于本书引用的他人研究成果，均在参考文献中列出了详细出处。

本书是在国家自然科学基金“基于人类视觉感知系统的有效编码模型”（项目编号 60373029）和教育部高等学校博士学科点专项科研基金“基于视觉神经分层处理模式的信息有效编码研究”（项目编号 20020004020）项目研究成果的基础上

编写的，并得到北京市学科建设共建项目的资助，在此对国家自然科学基金委员会信息学部、教育部高等学校博士学科点基金处及北京市教育委员会表示衷心的感谢。

本书可以作为计算机、信号处理等专业硕士研究生、博士研究生的专业课教材，也可作为从事神经计算科学、图像处理等研究领域的科技人员的参考书。

由于本书内容涉及多学科的交叉及一些悬而未决的科学问题，而我们的知识有限，错误在所难免，诚恳地希望读者批评、指正。

罗四维等于北京

目 录

第 1 章	绪论	1
第 2 章	人类视觉感知系统	7
2.1	人类视觉感知系统概述	7
2.2	人类视觉感知系统的基本概念	9
2.2.1	眼优势柱、朝向柱和超柱	9
2.2.2	奇异点和旋转、旋涡结构	10
2.2.3	感受野	11
2.3	小结	15
第 3 章	模拟人类视觉感知机制模型的理论基础	17
3.1	有效编码假说	17
3.1.1	有效编码假说的概念	17
3.1.2	有效编码假说的国内外研究现状	18
3.2	贝叶斯学习理论	20
3.2.1	贝叶斯概率和贝叶斯定理	21
3.2.2	贝叶斯学习的基本过程	21
3.2.3	贝叶斯方法的计算学习机制	22
3.3	人类视觉系统感知的外界环境及其统计特性	24
3.3.1	自然图像	25
3.3.2	自然图像的高阶统计特性	25
3.3.3	自然图像的时空统计特性	27
3.4	线性转换工具	28
3.4.1	主分量分析方法	28
3.4.2	独立分量分析方法	31
3.5	非线性转换工具	37
3.5.1	局部线性嵌入	37
3.5.2	Isomap 算法	43
3.6	小结	47

第 4 章 基于视觉通路的模型结构	53
4.1 “感知”和“行为”的分离	53
4.2 两条视觉通路	55
4.3 what 和 where 通路划分的生物学基础	56
4.4 Rybak 模型	57
4.4.1 Rybak 模型介绍	60
4.4.2 记忆模式中的主要记忆过程	63
4.4.3 实验结果及分析	73
4.5 小结	75
第 5 章 特征提取和特征选择	79
5.1 Marr 的特征分析理论	80
5.1.1 神经还原论	81
5.1.2 结构分解理论	83
5.1.3 特征空间论	85
5.1.4 特征空间的近似	92
5.2 拓扑知觉理论	93
5.2.1 生物学依据	94
5.2.2 Gestalt 知觉组织原则	94
5.2.3 拓扑特征提取 I —— 尺度空间	97
5.2.4 拓扑特征提取 II —— MRF	101
5.3 小结	104
第 6 章 注意机制	109
6.1 数据驱动的关注模型	110
6.1.1 初级视觉特征提取	110
6.1.2 多特征图合并策略	113
6.1.3 注意焦点转移机制	118
6.2 任务驱动的关注模型	121
6.2.1 心理阈值函数模型	122
6.2.2 马尔可夫模型	123
6.3 注意模型应用举例	126
6.3.1 复杂自然场景中的目标搜索	126
6.3.2 图像压缩	128
6.4 小结	131

第 7 章 模拟人类感知系统模型	134
7.1 模型概述	134
7.2 DLM 人脸识别系统详细介绍	136
7.2.1 结构和动力学机制概述	136
7.2.2 blob 的形成	140
7.2.3 blob 的移动	141
7.2.4 图像层和模板层的交互作用与同步	142
7.2.5 连接动力学	144
7.2.6 注意动力学	145
7.2.7 识别动力学	147
7.2.8 双向连接	148
7.2.9 blob 在模板域中的排列	148
7.2.10 模板层神经元输入信号的选择	149
7.3 实验	149
7.4 小结	153
第 8 章 自然图像的二阶统计特性	155
8.1 空间相关性与能量谱	155
8.1.1 空间相关性	155
8.1.2 自然图像的能量谱	156
8.1.3 能量谱的统计特性	158
8.1.4 能量谱与空间相关性的关系	161
8.2 时间相关性与能量谱	161
8.2.1 时间相关性	161
8.2.2 自然图像序列的能量谱	162
8.3 时空相关性的去除	167
8.3.1 无噪声的情形	167
8.3.2 带噪声的情形	169
8.4 小结	171
第 9 章 自然图像的高阶统计特性	172
9.1 非高斯性	172
9.2 稀疏性	174
9.3 稀疏编码	175
9.3.1 稀疏编码模型	175

9.3.2	统计理论背景	176
9.3.3	学习规则	178
9.3.4	学习结果	180
9.4	自然图像序列的稀疏编码方法.....	182
9.4.1	学习规则	182
9.4.2	学习结果	184
9.5	小结	185

第1章 绪 论

20 世纪 80 年代以来,伴随着神经科学、计算神经科学、解剖学的发展,人类对自身大脑有了更深刻的了解,这就为神经计算科学的发展奠定了基础。神经计算是一门崭新的信息处理学科,它以神经生理学、认知科学的研究成果、假说或模型为基础,利用数学方法研究神经式信息处理模式,并提出不同于当今计算科学的新的计算原理。

目前国内外有很多学者从理论基础和实际应用的角度致力于研究神经感知和机器学习之间的关系,并取得了很多成果。这种从模拟人类的思维模式出发来指导机器学习的方法符合人类与环境之间不断学习、不断适应的演变规律,因此,结合神经科学的理论来探讨计算机处理信息的能力具有重要的战略意义。随着神经生理学、认知科学、计算神经科学等的不断发展,这种将认知科学和神经计算结合起来的研究方法,即神经计算科学,会具有广阔的应用前景。

研究神经就是研究人类的大脑。理解大脑的关键之一是要揭示知识和外界事物在大脑内如何编码、表达、加工和存储,以及大脑如何解释世界。揭示大脑就是揭示人的本质,理解人为什么会成为有个性、有感情、有思想的生命体。了解了大脑也就了解了思维的本质。不过我们应该清醒地认识到,人类对大脑系统的了解永远不过是局部的和近似的。

人类的大脑是在漫长的自然选择和生存竞争中演化而来的。在演化过程中,它与环境、其他物种等相互作用,形成了远离平衡点、非线性的自适应系统。因此,研究人类的神经系统是对人类最重大的挑战之一。

随着计算机技术的发展,计算机作为辅助研究的手段和方法逐渐渗透到科学研究的全过程,也促使科学研究对它产生了依赖关系,为此出现了一些新的学科,如计算数学、计算物理、计算神经科学和神经计算科学等。

在此对计算神经科学和神经计算科学在研究目标方面的区别做一简要说明。计算神经科学和神经计算科学在研究手段和方法方面有很多类似之处。但是,计算神经科学研究的目标是阐明大脑进行信息处理的基本原理,揭示神经系统的状态所实现的表象本质,探索神经系统所完成的功能,即研究大脑的工作机理。神经计算科学的目标是探索神经计算的数理基础,提出不同于当今计算科学的新的计算原理,并将其应用于新的类似于人类神经处理方式的信息处理系统,这也是

本书讨论的核心。虽然两者同属于脑科学和计算机科学的交叉领域,但两者的侧重点有所不同,从事计算神经科学的研究人员以生物学家为主,而从事神经计算科学的研究人员以计算机科学家为主。

神经科学的一个主要目标就是理解神经元和神经系统的功能,在此基础上发展了计算神经科学。计算神经科学的数学模拟和计算仿真应该贴近于神经生物学的实验事实。模拟本身并非是解决问题的终结,因为模拟结果会反过来作用于研究者的思想,触发悟性,达到对生物神经正确认识的目的。目前,计算模型在做出有关神经系统如何工作的预测上已经比较成熟。这些预测不能依靠直觉,需要依靠脑生理学知识进行修正,使其与真实情况更加一致。

众所周知,在人类所感知的外界信息中,大约 80% 的部分都来自于视觉,这种客观事实自然会使得目前的研究内容以视觉信息为主。

基于人们对目前已经掌握的知识的理解,为了能够表示所有的外界输入模式,处理视觉信息的神经感知系统所需的神经元数量是难以估量、非常庞大的,这是我们目前所理解的神经感知系统不能实现的。然而,实际的神经感知系统没有那么多的神经元,却可以有效地表示所有的外界输入模式。如何解释这一矛盾是长期困扰研究者的一个问题。针对该问题,Barlow^[1]在 1961 年提出了有效编码理论,他从香农(Shannon)的信息论出发,认为在神经计算的过程中,一个重要的约束就是信息(或者编码)的有效性。也就是说,一组神经元应该尽可能多地利用“资源”进行有效编码。有效编码理论为计算机模拟大脑来完成各种复杂的任务提供了一种有效的研究手段,对于计算智能的发展具有重要的意义。

最初,人们采用传统的特征提取和特征选择的方法研究有效编码问题^[2, 3],通过线性模型来模拟神经元细胞的相互作用。但研究表明,复杂细胞并不是以线性方式从刺激中抽取相位和位移的不变特征的。因此,该模型与大脑神经系统的实际工作机理并不一致。此后,许多学者提出了用非线性模型模拟复杂细胞的功能,但仍没有给出其自组织映射的算法。这些研究方法在本质上都需要一个特征提取的过程,但实际上,人类的神经系统,即使不经过特征提取的预处理阶段,也能够处理不变的特征。神经系统能够获取不变特征的性质已经得到了生物物理学和神经生理学的证明^[4]。因此,通过模拟人类神经系统的信息处理方式来提取不变特征已经成为另外一种解决有效编码问题的途径。

许多学者在这方面进行了深入的研究工作,研究的方法可以归纳为两大类。第一大类是“归一化”方法。代表性的方法是 Olshausen^[5]提出的动态开关网络模型。Postma^[6]对该模型做了进一步的改进。第二大类方法是“基于不变特征神经网络模型”的方法。比较著名的模型有:Fukushima^[7]提出的“神经识别”方法、Reid^[8]提出的“高阶神经网络”方法、LeCun^[9]提出的“共享权值的 BP 网络”方

法。Kohonen^[10]提出了自适应子空间的自组织特征映射 ASSOM (Adaptive-Subspace Self-Organizing Map) 方法。芬兰的 Hyvärinen^[11]将独立特征子空间和多维独立分量分析的方法结合在一起提取自然图像的不变特性,取得了很好的实验结果。

自然环境下的图像含有很大的冗余,因此,很多学者通过分析自然图像的统计特性,对有效编码问题进行了有益的探索。Field^[12]和 Daugman^[13]证明自然图像的高阶统计特性满足非高斯分布。也就是说,大部分神经元对外界信号的响应很弱,只有少部分神经元对外界信号有较强的响应,Field 把这种性质称为稀疏性 (Sparseness)。根据稀疏性进行自然图像的有效编码,称为稀疏编码 (Sparse Coding)。Olshausen 和 Field^[14, 15]认为每幅图像都可以看成多个基函数的线性组合,这些基函数可以经过多幅图像的训练估计出来。对于不同的图像,虽然它们的系数不同,但是它们都满足稀疏分布。Bell 和 Sejnowski^[16], van Hateren 和 van der Schaaf^[17], Lewicki 和 Olshausen^[18], Hyvärinen 和 Hoyer^[19]采用独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA) 的方法也取得了相似的结果。

从有效编码理论的提出到现在已经有 40 多年的时间了,但是直到 20 世纪 90 年代,随着人类对神经系统认识的不断深入,它才得以迅速发展。特别是最近几年,很多研究者涌入该领域。为了适应发展的需要,国际上成立了专门的大会 NIPS (Neural Information Processing System), 多篇相关文章^[20~22] 发表在 Nature 和 Science 杂志上。这些都表明有效编码理论已经成为国际上神经计算、人工神经网络和人工智能方面的研究前沿和热点。

但是,有效编码理论目前仍然存在着许多有待解决的问题,尤其是以下几个方面的问题更值得深入研究。

(1) 目前的有效编码理论缺乏严格的理论框架,已经提出的模型大都采用了贝叶斯决策理论,需要首先估计信号的先验概率,然后根据风险函数进行决策。因此,如果能够找出更完善的理论框架,将会有利于提出更好的有效编码模型。

(2) 按照提取不变特征的途径来模拟人的视觉系统功能的神经模型,大都基于外部环境变化缓慢而主传感信号变化迅速的假设,也就是从迅速改变的传感输入中抽取平缓变化的特征。这显然大大简化了人的视觉系统模型,但是,在对连续变化的特征在有效时间内做出响应方面还有许多工作要做。事实上,人的视觉系统传导信号并不迅速,但是大脑是一个高度并行的系统,这种高度并行化使得人类能够对外界环境的变化做出及时响应。因此,如果能够针对并行化处理的特点,构建一个有效的并行模型,那么就可以提高处理信息的响应速度。

(3) 在目前提出的模型中,大部分可以用单层的神经网络 (Single-stage Neural Network) 来实现。例如,信号的白化处理可以用输入信号 (相当于人眼看

到的图像信息)和输出信号(相当于视网膜神经节)之间的一组连接来实现。同样,稀疏编码可以用侧膝体(Lateral Geniculate Nucleus, LGN)和大脑皮层细胞(Cortex)之间的一组连接来实现。但事实上,大脑接受视觉刺激的区域共有6个,分别为V1, V2, V3, V3a, V4和MT(或V5),这6个区域构成了一个分层次、并行的视觉信息处理结构。这样一种层次结构,能够有选择地理解图像结构中更为复杂的方面。因此,如果能够模拟大脑的层次化处理过程,构建相应的分层处理结构模型,并增加侧反馈和侧抑制机制来实现信息的有效编码,那么将能大大提高信息处理的自适应性。

(4)输入模式相对比较简单,例如,在模拟视觉的实验中一般采用的都是简单的刺激,包括条状、点状等相对比较容易控制的形状。但实际上,通过简单模式下的实验来预测复杂情况下神经系统的响应,这种方法的可行性在理论上并不能得到证明^[5]。如果能够在构建有效编码模型的时候,将模拟的视觉输入模式扩大到纹理及形状等复杂的刺激,考察这些复杂模式下的实验结果,那么将能够提高模型在复杂情况下的预测能力。

另外,除了进行系统的理论研究之外,开发出成功的实用系统也是非常重要的。它可以很好地证明所提出的理论及模型的实用性和有效性,也会对该领域的研究产生很好的推动作用。目前,有效编码技术已经成功应用到图像的编码、压缩、去噪和增强、合成和分离、基于Web的数据挖掘等许多领域。因此,如何将有效编码理论更好地推广到其他应用领域,也是一个备受关注的问题。

研究表明,人类处理视觉信息之所以具有高度的智能化和很强的自适应性,主要原因在于其处理过程的层次化和并行化。因此,模拟大脑的特点,构造出信息处理的层次并行模型,将是解决有效编码问题的关键。

参 考 文 献

- 1 Barlow H B. Possible principles underlying the transformation of sensory messages. In: Rosenblith W A, ed. Sensory Communication. Cambridge, MA: MIT Press, 1961. 217~234
- 2 Pavlidis T. Structural Pattern Recognition. NY: Springer-Verlag, 1977
- 3 Niemann H. Pattern Analysis (Series in Information Sciences, Vol. 4). Berlin Heidelberg: Springer, 1981
- 4 Biederman I, Cooper E E. Size invariance in visual object priming. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 1992, 18 (1): 121~133

- 5 Olshausen B A, Anderson C H, van Essen D C. A Neurobiological Model of Visual Attention and Invariant Pattern Recognition Based on Dynamic Routing of Information. *Journal of Neuroscience*, 1993, 13(11): 4700~4719
- 6 Postma E O, van den Herik H J, Hudson P T W. SCAN: A Scalable Neural Model of Convert Attention. *Neural Networks*, 1997, 10(6): 993~1015
- 7 Fukushima K, Miyake S, Ito T. Neocognitron: A Neural Network Model for a Mechanism of Visual Pattern Recognition. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1983, 13: 826~834. Reprinted In: Anderson J A, Rosenfeld E, eds. *Neurocomputing*. Cambridge, MA: MIT Press, 1988. 526~534
- 8 Reid M B, Spirkovska L, Ochoa E. Simultaneous Position, Scale, and Rotation Invariant Pattern Classification Using Third-order Neural Networks. *International Journal of Neural Networks - Research & Applications*, 1989, 1 (3): 154~159
- 9 LeCun Y, Boser B, Denker J S, et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989, 1 (4): 541~551
- 10 Kohonen T. Emergence of Invariant-feature Detectors in the Adaptive-subspace Self-organizing Map. *Biological Cybernetics*, 1996, 75: 281~291
- 11 Hyvärinen A, Hoyer P. Emergence of phase and shift invariant features by decomposition of natural images into independent feature subspaces. *Neural Computation*, 2000, 12(7): 1705~1720
- 12 Field D J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *J Optical Society*, 1987, Am. A4(12): 2379~2394
- 13 Daugman J G. Entropy reduction and decorrelation in visual coding by oriented neural receptive fields. *IEEE Trans on Biomed Eng*, 1989, 36(1): 107~114
- 14 Olshausen B A, Field D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images. *Nature*, 1996, 381: 607~609
- 15 Olshausen B A, Field D J. Sparse coding with an overcomplete basis set: a strategy employed by V1? *Visual Research*, 1997, 37: 3311~3325
- 16 Bell A J, Sejnowski T J. The “independent components” of natural scenes are edge filters. *Visual Research*, 1997, 37(23): 3327~3338
- 17 van Hateren J H, van der Schaaf A. Independent component filters of natural images compared with simple cells in primary visual cortex. *Proc R Soc London Ser*, 1998, B 265: 359~366
- 18 Lewicki M, Sejnowski T. Coding time-varying signals using sparse, shift-invariant representations. In: Kearns M S, Solla S A, Cohn D A, eds. *Advances in*

- Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 1999. 11: 815~821
- 19 Hyvärinen A, Hoyer P. Emergence of topography and complex cell properties from natural images using extensions of ICA. In: Solla S A, Leen T K, Müller K R, eds. Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2000. 12: 827~833
 - 20 Müller J R, Metha A B, Krauskopf J, et al. Rapid adaptation in visual cortex to the structure of images. Science, 1999, 285: 1405~1408
 - 21 Vinje W E, Gallant J L. Sparse coding and decorrelation in primary visual cortex during natural vision. Science, 2000, 287: 1273~1276
 - 22 Thorpe S, Fize F, Marlot C. Speed of processing in the human visual system. Nature, 1996, 381: 520~522

第2章 人类视觉感知系统

从计算机诞生开始，人类就希望有朝一日计算机能够像人类那样通过视觉观察和理解世界，具有自动适应环境的能力。但是，目前的计算机视觉与人类的视觉在能力上存在着巨大的差异。科学家常以“过马路”这个简单的视觉任务为例说明它们之间的差异。现代高速计算机的计算能力已达到相当惊人的程度，但计算机视觉系统却无法指导过马路（即从街道上的大量视觉信息中识别出其中的道路、车辆、行人等信息并判断是否能够过马路），可是即使是尚未接受过系统教育的儿童，他们也能轻而易举地完成这项任务。因此说，从研究人类的视觉系统（大脑）如何感知和识别外界视觉刺激出发，使计算机拥有人类所具备的观察和理解世界的能力，需要经过长期艰辛的努力才能达到。

不过，随着人类对自身视觉系统（大脑）研究的逐步深入，从初级视皮层到高级视觉区域，从知识的记忆到视觉功能相关的脑功能等，科学家在这些领域都取得了许多重要的研究成果。本章将以一定篇幅对这些成果做一综述。

同时，目前许多科学家从有效编码假说出发，研究人类视觉系统感知到的外界环境的统计特性，提出了自然图像的概念，并以自然图像为研究对象，试图初步模拟人类视觉的某些特性，取得了重要的突破。本章对这方面的工作也将加以概述和总结。

2.1 人类视觉感知系统概述

人类的视觉信息处理过程已经进化到高度完美的阶段。神经生理学和解剖学的研究表明，视觉信息在大脑中按照一定的通路进行传递。首先，视网膜细胞接收外界信息的信号。其中，柱状细胞主要感应光照条件的变化，锥状细胞则主要感应信号的颜色变化。视网膜有两类神经节细胞：M细胞和P细胞。M细胞的感应域范围较大，主要接收轮廓和形状等信息，而P细胞的感应域较小，主要接收颜色和细节信息。然后，视网膜上的神经节细胞将接收到的信号通过视神经交叉和视束传到中枢的侧膝体。最后，信息到达大脑的皮层细胞。在大脑主皮层内，视觉信息是按照视皮层简单细胞（Simple Cell）→复杂细胞（Complex Cell）→超复杂细胞（Hypercomplex Cell）→更高级的超复杂细胞（High-order Hypercomplex

Cell) 这样一个序列, 由简单到复杂, 由低级到高级分级进行处理的。图 2-1 所示为视觉信息从视网膜到视皮层处理过程的简单示意图。

从神经处理信息的过程可以看到, 视觉信息处理过程是一个既有信息的横向流动, 又有信息的纵向流动的极为复杂的动力学过程。主要特点如下。

(1) 两条通路。目前普遍被接受的观点认为: 在人类视觉系统中存在着两条通路, 一条称为腹部通路, 也叫做 form 通路或者 what 通路, 用来形成感受 and 进行对象识别; 另一条则称为背部通路, 也叫做 motion 通路或者 where 通路, 用来处理动作和其他空间信息。

(2) 层次结构。视觉系统具有非常复杂的层次结构, 主要体现在处理视觉信息的两条通路上, 无论腹部通路还是背部通路都明显地表现出层次处理结构。例如, 腹部通路处理视觉信息的顺序如图 2-1 所示, 大致为从视网膜经由侧膝体, 最后到达视皮层 (详见 4.3 节)。

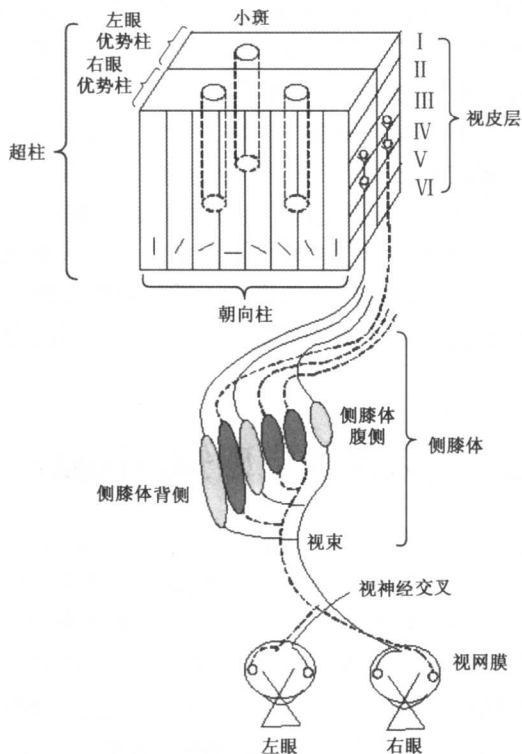


图 2-1 视觉信息的处理过程

(3) 反馈连接。在人类视觉系统中, 大部分连接都是双向的, 前向连接往往都伴随着反馈连接。大脑中许多高层区域具有大量反馈通路到达视觉初级皮层区 VI