

“视觉信息加工”研究圆满结束

刁云程

(中国科学院生物物理研究所视觉信息加工开放研究实验室)

[摘要] 国家自然科学基金重大项目“视觉信息加工”研究为期四年,由中国科学院生物物理研究所、生理研究所和中国科学技术大学生物系共同承担。项目内容包括中脑视觉神经回路中的信息加工,胼胝体传递视觉信息的特征,蜜蜂模式识别及平行加工机理研究,视觉信息加工中空间-时间相互作用及其神经机制的研究,视觉感受野空间相互作用与复杂图象的加工处理,视觉图象识别中眼动图象特征抽提作用的研究,和视觉信息处理中基本神经网络的算法理论描述等七个课题,现已圆满完成任务。研究者围绕着中枢视觉信息加工这一核心问题,应用多种技术,在神经回路、生理机制和理论模型等方面都取得了重要进展。本文简要介绍此项研究提出的背景,所取得的主要学术进展及其理论意义,以及作者的体会和建议。

一、研究的意义

近30多年来,神经科学受到高度重视,得到蓬勃发展,脑神经科学已成为当代科学前沿热点之一。神经科学研究人和动物神经系统的结构和功能,目的是揭示人脑的奥秘,防治人类神经系统疾病。计算机和神经科学家共同研究脑的结构和功能,是要使人工神经网络具有脑的信息处理性质,发展模仿脑功能的神经计算机,为发展信息技术做出贡献。经过长期的进化,脑的结构已经变得非常复杂。就其功能看,从简单的单突触反射到学习、记忆、认知、思维等高级活动,已相当完善甚至不可思议。脑研究的一个核心问题是感觉信息如何被接收、加工、贮存和利用。人和大多数动物接收的外界信息中约有80%通过视觉实现。从五、六十年代起,视觉研究在脑研究中异军突起,新发现、新的结果层出不穷。这一方面是由于视觉研究本身的重要性,同时也是这个系统本身的特点决定的。它适宜于用各种技术手段作定性、定量研究,研究结果对了解其它感觉系统乃至整个脑的工作和组织原理都有普遍的意义。因此对视觉回路及其信息加工的研究被誉为揭示脑奥秘的突破口。

我国在70年代末至80年代初派出一批人在国外著名的视觉神经科学实验室进修,从而引进了各种现代研究技术和学术思想,壮大了研究力量。视觉研究本身在理论和实际应用方面的重要性在我国得到了应有的重视。国家自然科学基金会于1988年10月批准了“视觉信息加工”重大项目,这是在多次讨论和论证的基础上确定的一项基础性研究,由中科院生物物理所王书荣研究员主持,中国科学院生物物理所、生理所和中国科技大学共同承担。本重大项目含有七个子课题,即:中脑视觉神经回路中的信息加工;胼胝体传递视觉信息特征;蜜蜂模式识别及平行加工机理研究;视觉信息加工中空间-时间相互作用及其神经机制的研究;视觉感受野

本文于1993年9月29日收到

空间相互作用与复杂图象的加工处理；视觉图象识别中眼动图象特征抽提作用的研究；视觉信息处理中基本神经网络的算法理论描述。在美国，为了提高公众对脑研究的认识，加强神经科学研究，1989年美国国会通过决议，把20世纪90年代定为“脑的十年”。国际脑研究组织（IBRO）对此表示欢迎，并让其成员机构和个人力促本国政府支持这个决议。这也说明我国对“视觉信息加工”研究的立项是适宜的，符合当前神经科学发展趋势的。

二、视觉研究发展概况

自1981年Hubel和Wiesel因对视觉中枢的功能组构和视觉发育的研究而获得诺贝尔奖之后，在视网膜、中脑、丘脑，特别是在大脑皮层水平上都取得了令人瞩目的进展。视觉神经科学已由原来的以细胞水平为主扩展到网络、细胞和分子水平相互配合和并驾齐驱的局面。在视觉中枢机制的研究中，以下各方面的进展尤堪注意。首先，在视觉系统的各个水平上都开展了神经回路的研究，这是视觉通路研究的继续和深化，包括视神经元之间的联系和互相作用，对神经元活动模式起决定性作用的突触传递、递质和调质对神经元活动的调控、受体和离子通道研究。例如，“有第二视觉系统”之称的中脑视中枢的神经回路研究，外膝体的回路研究，以及视皮层内的一些回路等。第二，对各级神经元反应特性及感受野的研究揭示了很多新的事实。这些研究表明，视觉信息的分离和平行处理是一个普遍的原则。视网膜向中枢的投射纤维分X、Y、W三种，X型和Y型投射到外膝体，它们的生理学性质和感受野特性都有明显的不同，被认为传递不同的信息。外膝体到大脑皮层的通路分大细胞系统和小细胞系统，分别与皮层的不同模块系统联系。此外，皮层上还有不同的功能柱系统，它们可能分别处理视觉信息的不同的特征，例如颜色、形状、运动和空间信息等。第三，近年Singer等（1989,1991,1992）发现，视皮层神经元之间有依赖于刺激模式而产生的同步振荡现象，说明处理同一物象不同特征的分布在不同脑区的神经元可以通过其活动的时间关系组织起来。这可能是将景物区分开来的神经基础，这一发现被认为对脑功能研究具有深远意义。

尽管视觉研究已经取得了长足进步，但是离认清视知觉的脑机制仍然相差很远，还有一系列问题有待回答。例如，已知的各种神经通路及回路及怎样的脑功能联系着；某一视觉功能的神经通路或回路是怎样的；某一通路或回路又如何参与实现某一脑功能的；各种神经元感受野性质、形成机制的进一步研究，它们又怎样实现对视觉信息的特征编码的；特别是，视觉通路上的不同水平、不同区域之间是如何组织、协调起来的等，这些问题都属于初级信息加工的范畴，但却是了解如何产生高级视知觉的基础和必须回答的问题。

三、主要学术进展

本项目七个子课题的研究内容虽然各有其独立性和完整性，但就整个大项目来说，各课题又都联系着一个中心问题，即视觉中枢的初级信息加工机制问题。围绕着这一核心问题，本项目在中脑、外膝体及视皮层三个水平，在回路及递质基础、生理机制和理论等方面取得重要进展。

在视觉回路及其递质研究方面

高等动物的视觉系统从眼到脑有两条主要的传入通路，有人称为两个视觉系统：一条由视网膜到外膝体，再到大脑皮层；另一条由视网膜到中脑的上丘。低等脊椎动物如鸟类、两栖类和

爬行类没有大脑皮层,主要的视觉中枢在其中脑。中国科学院生物物理研究所王书荣研究员用多种现代神经生物学方法对这几类低等动物的中脑视觉回路做了迄今为止最详尽的研究,在神经通路、视觉反应、突触特性和神经递质等方面有了多项重要发现。顶盖—中脑深核—峡核大细胞部回路研究表明,爬行类峡核两部分是独立的神经核团,且只有小细胞部投射到双侧顶盖,它与顶盖间有直接和间接两条通路。如蛙峡核主要投射到同侧顶盖,向对侧顶盖投射的只占20%;家鸽峡核内GABA阳性神经元在大细胞部均匀分布,而在小细胞部这种细胞仅存在于其嘴内侧部。甘氨酸对峡核细胞有兴奋性作用,暗示有NMDA受体存在。在中脑峡核对顶盖功能的调节研究中,发现峡核与中脑顶盖及一些结构有复杂的关系。细胞内和细胞外记录研究表明,顶盖中约70%的细胞被视束传递的信号所兴奋,而被同侧峡核的信号所抑制。峡核可直接兴奋顶盖深层的大节细胞,细胞内注射特殊染料的研究表明,这里似有功能柱样的结构。研究还首次提出家鸽顶盖大部分视觉细胞从峡核大细胞部接受兴奋性输入,而从小细胞部接受抑制性输入,这些是通过两个结构之间的正、负反馈环实现的。可能这种正、负反馈环构成“胜者独享”(Winner-take-all)网络,使动物朝向最感兴趣的目标。这些不但为了解中脑回路的生理功能提供了必要基础,而且对了解高等哺乳动物乃至人类的“两个视觉系统”的配合与协调有重要意义。

在视觉中枢机制方面

哺乳动物视觉系统有些神经细胞具有一种特殊的性质,它们对外界视觉刺激的空间取向有一定要求,称之为取向(或方位)选择性。这类细胞最先在视皮层上发现,后来发现在视网膜上也有。中国科技大学寿天德教授等对外膝体细胞的方位(取向)敏感性作了深入、系统的研究,结果表明90%的中转细胞有方位敏感性,其最优方位的分布多与视网膜神经节细胞类似,呈向心分布,但有一些与皮层18区细胞类似,呈切向分布。最优方位相似的方位敏感细胞在膝体内彼此靠拢,与粗糙的功能柱相似,且这种安排不因去皮层而改变,这说明视觉方位敏感性起源于视网膜和外膝体等皮层下结构,外膝体对此作了初步编组加工。方位信息也可能与颜色、左、右眼信息等一样,也在平行的分离通道内传递。从而改变了过去普遍认为的外膝体细胞无选择性的观点,第一次报道在猫外膝体约有32% X和Y型神经元具有明显的方向选择性,而不是像以前人们所说的那样只有W细胞才有方向选择性。进一步研究表明,方向选择性细胞分为两类,并提出了模型,即用输入到外膝体亚单位及感受野中心-周边来的信息所存在的空间和时间上的迟滞或差别,来解释产生两类方向选择性。还发现约1/5视网膜X、Y型细胞也有方向选择性。视觉功能发育研究表明,先天因素和早期经验都对动物视皮层细胞的方位和方向选择性形成有贡献。

每一个视觉神经元都对应着视网膜上一块小区域,也即对应着视野内的一个小的空间,这小部分视野被称为感受野。感受野性质的研究对了解视觉信息加工机制有重要意义。中国科学院生理研究所李朝义研究员等首次报道在视网膜神经节细胞和外膝体细胞传统感受野外存在大范围的去抑制区,该区能根据图象和背景的空间特性,动态地调节感受野的空间滤波参数;能补偿传统感受野的低频滤波损失,在传递大面积亮和暗梯度信息中起决定作用;能调节感受野的颜色敏感性,从而体现了视知觉的颜色恒定性特征。通过以上实验建立了皮层下视觉神经元感受野的新模型。另外,还证明在视皮层神经元感受野以外也存在一个范围很大的整合区,该区对神经元能产生兴奋、抑制或去抑制作用,并有和相关感受野类似的各处调谐特性。这

些结果提出了一个新概念：传统感受野以外的大区域对传递和加工复杂图形信息起着十分重要的作用，具有极大的潜在的重要性。记录了清醒猴月状前背区(DP)神经元的活动，发现此区神经元与复杂图象识别和视觉过程的主动控制有关，能整合从眼外肌传入的眼球位置信息和从视觉通路传入的复杂图象信息，并通过控制视觉注意过程来控制图象信息的采集。

大脑两半球之间由大量胼胝体纤维联系着，负责两半球之间的通讯，对意识、思维、行为等具有重要作用。生物物理研究所刁云程研究员等研究表明，大脑两半球间传递的信息对17/18区交界的细胞感受野性质有重要贡献。阻断胼胝体传递对电刺激诱发的单细胞反应的潜伏期、反应速率和总脉冲数都有影响。在定量地将猫视皮层细胞反应中的方向选择性因素和取向选择性因素分离的基础上，研究阻断胼胝体传递对感受野性质的影响。结果表明，70%以上细胞视觉反应强度发生了变化；60%细胞的方向选择性和80%细胞的取向选择性发生变化。这种变化可能体现为方向、取向选择性强度、或/和最优方向及最优取向的变化。这些，加上已知的阻断胼胝体传递对眼优势和对感受野大小的影响，说明胼胝体纤维在视觉初级信息加工中的贡献是多方面的，导致对其功能的新的认识：胼胝体传递的信息是视网膜双侧投射区造成的信息损失的必要补充。发现猫17/18交界区有片状互补性的同侧视野代表区，支持上述观点。取向功能柱和眼优势柱具有不同的组织形式，提示它们发生的机制不同。HRP标记及细胞内注射荧光染料实验显示的胞体面积、形状、顶树突模式、基树突数目等都证明胼胝体神经元包含多种类型，这是胼胝体参与视觉信息处理的形态基础。提出的视网膜双侧投射带的中枢投射模型解答了多年来关于胼胝体存在的必要性的问题。

通过监视眼球的运动可以了解视觉信息加工的规律和可能的机制。中国科学院生理研究所孙复川研究员等通过图象识别中眼动研究得到了一系列有意义的结果。比较阅读汉字和英文的眼动发现，辨认距和注视时程主要由文字的内容决定，而不是由其几何形状决定，阅读速度决定于脑的高级识别中枢的解码速度，而不取决于几何特征检测能力。对单个汉字识别研究结果说明，识别时眼动注视停顿主要由内容信息决定，旨在有效地提取关键信息，周边视觉在识别中的作用是有效地帮助了对熟悉单字的辨认，而对不熟悉单字，周边视觉引导眼注视到该字的下一个位置。对复杂图形的识别眼动的注视点主要落在含内容信息的部位。上述结果还说明，视觉识别过程中的信息处理方式不只有从外周到中枢的逐级加工的自下而上的方式，而且有中枢模型指导的自上而下的信息处理方式。高级识别中枢亦参与快速眼动的控制过程。阅读汉字中文及拼音中文的对比眼动实验表明，汉字眼动识别跨度是拼音阅读时的2倍，其注视时程短，因而阅读速度快(3倍)。这些复杂图象识别的规律，对我国文字改革的决策有重要参考价值。

昆虫的行为研究与神经生物学研究相结合，对洞察视觉机制有特殊作用。生物物理所张少吾和吴卫国副研究员等发现，在蜜蜂视觉跟踪和接近目标的过程中，远距离时利用目标误差角及目标的相对角速度信息，通过校正与目标的角度偏差来接近目标。在近距离时还利用横向移动来跟踪目标。其角速度和横向跟踪的信息来自绿敏光感受器，背景与目标间的边缘反差在这些行为中起决定性的作用。蜜蜂对颜色的识别、学习、记忆力都比对形状来得强，颜色的存在可抑制其对形状的识别。蜜蜂自运动检测神经元是色盲的，而目标运动检测神经元则对颜色敏感。研究揭示，复眼视觉系统是一种实时处理的多通道平行加工模式识别体系；性特化视觉系统在追逐飞行和制导中有重要作用。在蜜蜂三个视神经丛、前脑和中脑均具有与ACh, 5-HT

和 GABA 对应的神经元群,其神经丛有部分重叠,从解剖学和生理学上解释了昆虫追逐行为的机理。

理论和模型研究是视觉研究的不可或缺的组成部分。生物物理所的汪云九研究员等集中对视觉系统各层次上感受野信息处理特性进行研究,建立描述其时空特性的数学模型,提出用一族广义 Gabor 函数作为视觉系统的核函数。第一类广义 Gabor 函数可描述视网膜和外膝体的对称性感受野;第二类广义 Gabor 函数可描写视皮层上各种非对称型感受野。适当对函数参数取值,可描述感受野的很多性质,例如感受野地图、感受野剖线图、长度、取向、频率调制曲线等等。在此基础上构成的一些模型可以进行纹理分析,以及解释超分辨率现象。首先提出初级视觉系统的神经波表达的观点。推导出波动方程,给出了神经信息波的取值范围,从理论上证明该模型在信息论意义上达到时-空-频域上最小不确定的下限。这种神经信息波的观点有可能成为神经信息表象中一个新的理论框架的起点,并可能在网络结构、处理算法和神经兴奋活动之间建立更为直接的联系,为更高层次上的研究提供一条新途径。这些理论结果也有图象处理技术和临床上的实用价值。

综上所述,本项研究在初级视觉信息加工方面有一系列新发现和新的认识,提出了新概念和新理论,解答了一些存在多年的问题,对视觉研究作出了重要贡献,达到国际水平或国际领先水平。上述结果获得国家自然科学奖二等奖 1 项,中国科学院自然科学奖二等奖 2 项、三等奖 1 项,及省级论文奖和本单位的奖励多项,获国家专利 2 项。另有 1 项成果待报申请国家自然科学奖,2 项待申请专利。截至 1992 年 10 月,已在学报级以上刊物发表论文 141 篇,其中 29 篇发表在外国学术刊物上,还在国内外学术会议上发表了约 100 篇论文。在专家验收会议上本项目被评为优秀。

四、体会和建议

项目学术领导小组与基金会有关负责同志配合对项目的实施实行了有效的管理。根据评审专家提出的意见修订了任务书。根据计划的执行情况和国际上的研究进展随时调整和完善实施计划。组织好年度检查,确保研究计划的执行,实行动态管理。上述措施对完成项目规定的任务起到了保证作用。

在本项目实施过程中,利用各种渠道积极开展了国际合作和交流。共有 27 人次参加国际会议或出国作学术交流,有 21 人次在国外进行合作研究,接待来华合作研究 8 人次,邀请国外同行来华交流 10 人次,请顺访科学家报告、交流数十次。出国参加学术会议 13 人次中,有 3 人次大会报告,33 人次分组报告,都受到好评。这些活动对项目实施起到了促进作用。

随着工作的进展和深入,全体参加者都提高了学术水平。特别是培养了一批青年科技人才,其中有 25 名硕士,5 名博士,和 1 名博士后。有一名博士毕业生被国家授予“作出突出贡献的中国学位获得者”称号。这些青年科学工作者在整个研究过程中起到了很重要的作用。

当然,我们的工作并不是一帆风顺的,最大的困难是经费不足。由于物价的上涨和人民币汇率的不断调整,多数课题都未能按原计划添置实验设备和购买材料。另外,科技人才不稳定,特别是青年人员不够稳定,对工作也有一定影响。我们深刻地体会到上述成果的获得是来之不易的,在总结工作的同时,我们热切地希望这项工作能够继续得到支持,以便为我国乃至世界的视觉科学研究作出更大的贡献。

THE JOINT-RESEARCH PROJECT “INFORMATION PROCESSING OF THE VISUAL SYSTEM” SUCCESSFULLY COMPLETED

Diao Yuncheng

(Laboratory of Visual Information Processing, Institute of Biophysics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

A research project which receives a special grant from the NSFC has recently concluded fruitfully. The four-year project, which was carried out by a group of neuroscientists from Institute of Biophysics and Institute of Physiology, Academia Sinica, and from Department of Biology, the Science and Technology University of China, consisted of seven subprojects, namely information processing in visual neural circuits of the midbrain of low vertebrates, characteristics and roles of signals conveyed by the visual callosal fibers, temporal-spatial interactions of visual information and the underlying mechanisms, spacial interaction of the receptive fields and the processing of complex patterns, characteristics of eye movements in reading recognition, and theoretical description of the algorithm used in neural networks. Using a number of different techniques and concentrating on central visual information processing, the investigators have made essential advances on clarifying neural circuits and physiological mechanisms, and on theoretical modeling. This article presents briefly the background of this project, the main scientific achievements and their significance, as well as, from the point of view of the author, some experience and suggestions.