

从仿生学到神经科学

陆惠民 赫荣乔* 郭爱克

(中国科学院生物物理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要 在中国科学院生物物理研究所, 从仿生学到神经科学研究方向的确立, 经历了几代人的艰辛努力. 从 1959 年生物物理研究所三人理论组(仿生学研究室的前身)的成立, 到 2005 年脑与认知科学国家重点实验室申报成功, 走过了 46 年历程, 本文拟对这段历史进行回顾和评述.

关键词 仿生学, 神经科学, 研究目标, 脑与认知

学科分类号 Q42, Q811

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2014.00250

1960 年, 在美国俄亥俄州召开的学术会议上, 经与会学者讨论命名了一个新的学科——仿生学(bionics), 旨在通过研究生物奥妙无穷的结构与功能原理, 用于工程技术的创新和实现. 仿生学的出现, 立即引起世界各国的重视, 苏联和日本等国纷纷出版有关杂志和书籍. 受到美、苏等国科技潮流的影响, 中国科学院生物物理研究所(下称生物物理所)启动了仿生学研究. 希望通过模仿生物的优良性能, 获得创新的思维和工程设计. 中国科学院图书馆和生物物理所图书室编辑出版了三册“仿生学资料汇编”共计 5000 余条文献.

1 “仿生学实验室”的成立

生物物理所王书荣出版了国内第一本仿生学科普书《自然的启示》, 畅销全国、影响颇大. 后来, 郑竺英、王谷岩、蒋锦昌等出版了数十种仿生学小册子, 王谷岩撰写的仿生学文章还被中小学语文课本收入, 为仿生学在我国的普及发挥了较大作用. 仿生学是交叉学科的典型, 它将生物学与数理科学乃至工程技术联系起来, 既研究理论, 又有明确的应用目标, 符合 20 世纪 60 年代我国强调理论联系实际的科技政策, 也符合贝时璋所长当初建立生物物理研究所的想法. 在建所伊始由贝时璋决策建立的三人理论组当时已经逐渐发展壮大为上百人的规模, 生物物理所决定建立第五研究室, 由郑竺英负

责科研业务, 将仿生学作为研究方向.

仿生学有独特的研究思路, 俗称“三步曲”: 第一步是生物原型研究, 这一阶段要阐明生物的优点和特长, 如鸟类的飞行特点, 贝壳的薄壳结构原理等; 第二步是数学模型研究和建立, 即通过生物原型的研究结果, 抽象成数学规律; 第三步是工程实现, 根据数学模型, 制作成电子、光学或机械模型. 1965 年, 生物物理所汪云九、刘守忠等按照这一研究方法, 制作了一个模仿青蛙眼的光机电模型, 即可以自动瞄准的小口径步枪, 在打靶试验中百发百中, 堪与当时国际水平比肩. 由于侧抑制神经网络是在视觉研究中最先发现的一种基本神经网络, 在仿生学研究早期, 除生物物理所外, 中国科学院上海生理研究所孙复川等^[1]以及中国科学技术大学顾凡及(1961~1965 年曾在生物物理所进修)等在侧抑制网络信息处理及其仿生研究方面开展了工作^[2]. 生物物理所吴新年等还根据蜃眼视觉侧抑制原理, 研制了微光夜视仪; 陆惠民, 王秀春等在建立视觉运动信息加工的计算模型和研究实时仿真方面取得了进展, 根据蝇视觉原理研制成功了“看动不看静”的仿生运动目标检测装置^[3]; 生物物理所

* 通讯联系人.

Tel: 010-64889876, E-mail: herq@ibp.ac.cn

收稿日期: 2014-09-01, 接受日期: 2014-09-12

张少吾等根据昆虫复眼成像原理研制成平板型复眼透镜,可用于超小型复印机、光学印刷及信息处理等领域;胡坤生等根据嗜盐菌的原生质膜(紫膜)的独特的光电转换原理,进行了紫膜功能及其作为纳米仿生材料的应用前景研究.沈钧贤等在凹耳蛙通讯研究中证实它能产生并检测超声信号,用于强噪声背景条件下的声通讯,这一研究结果对于开发在噪声环境中,人类声通讯新技术具有启示^[4].蒋锦昌耗时30年进行了地震仿生学研究,旨在通过研究地震前动物异常行为与可能的检测模式,创建具有生物特色的新型地震前兆监测系统^[5];蔡浩然,杨俭华,徐智敏等开展了视觉激光防护和夜视仿生研究,完成了生物夜视仪研制必需的人眼调制传递函数和人瞳孔直径静态对光响应的测定^[6].

但是仿生学的研究范围毕竟太广,大千生物,奥妙无穷,而生物物理所当时的研究能力和基础却很有限.仿生研究室锁定什么方向,搞什么研究?在建室早期,确定研究方向和组织队伍非常重要,郑竺英和汪云九在这方面起到了很大作用.1964年,汪云九建议以视觉信息加工作为实验室的研究方向,这对于仿生实验室的生存和发展来说是一个历史性的建议.

2 从仿生学实验室到视觉信息加工

视觉信息加工属神经科学中的重大基础科学问题,视觉是脑最重要的感觉,这个问题的研究与解决,不仅牵涉哲学上的认识论,而且与相关高科技的发展、计算机的改进、机器人的设计等都密切相关.时至今日,也是一个符合信息时代发展的研究方向.虽然当时世界上以视觉为研究方向的科研机构为数不多,但随后以视觉为主的电生理学研究,就有五位科学家获得诺贝尔奖.此后,认知科学得以迅速发展,认知科学以感觉问题为核心,其中视觉问题为其主角.到了20世纪90年代,意识问题得到不少科学家重视,诺贝尔奖得主Crick提出,研究意识问题应当以视觉为突破口.几十年的发展历程说明,以视觉信息加工为实验室的研究方向具有科学预见性.

1978年生物物理所将“仿生学研究室”更名为“视觉信息加工研究室”,郑竺英为主任.她从生物物理研究所建立初的理论组开始,在生物控制论、视觉信息加工等方面进行了大量探索性的工作,其中双眼立体视觉的研究取得了进展.她与金贵昌等对立体视觉时空特性进行了深入研究,出版

了专著《双眼立体视觉的信息加工》,所建立的人眼立体视觉功能的检测和评估手段,在医学上获得了应用.

2.1 建立中国科学院视觉信息加工重点实验室

我国改革开放以后,与国际同行的学术交流日益增多,研究室也派出了不少人出国进修,他们回国后带回了国外先进的学术思想和实验技术,成为研究室的中坚.其代表性人物如汪云九、王书荣、郭爱克、刁云程等.“中国科学院视觉信息加工重点实验室”于1989年5月由中国科学院批准成立.首任两届(1989~1997)实验室主任和学术委员会主任,分别为王书荣和郭爱克;第三届(1996~2000)分别为刁云程和赫荣乔;第四届(2000~2005)分别为赫荣乔和李朝义.实验室研究方向为:视觉信息加工及其分子和细胞机理;视觉学习和记忆的分子与神经基础;视觉系统的生长、发育及其调控;视觉计算神经科学.目标是采用多学科手段揭示视觉信息加工的神经基础,从一个侧面揭示脑的结构和功能.通过研究视觉信息加工网络和模型,为发展信息技术提供参考.

2.2 研究队伍和成果集萃

汪云九曾在日本东京大学日本控制论专家南云实验室进修,回国后深入研究了视觉感受野的数学模型,他早期提出的感受野矩阵模型(模仿了视网膜的结构,由感受细胞、中间联系细胞和神经节细胞组成,一、二层间的联系用矩阵表达,二、三层的联系用向量表达)比当时国外Rodieck提出的DOG模型(两个高斯分布之差的数学表达式,可以刻画同心圆结构的感受野)更为先进,且解决了研制仿生自动瞄准的小口径步枪的理论问题^[7].此后,他对视觉感受野的Gabor模型(Gabor函数是以德国科学家Gabor命名的一个函数,是一个正弦(或余弦)函数与高斯函数之乘积)进行了20余年的研究,提出了广义Gabor模型(加入了时间维等,将原始的Gabor函数从一维扩展到二维),证明广义Gabor函数可达到时空频三维不确定性的下限,说明视觉系统中,感受野的结构和功能是传递时空信息的最佳方式.通过对其动态特性的研究,提出了神经信息波的假设.以此模型为信息加工单位,构造多层网络,可以解释一些心理现象,例如纹理识别、超视锐度现象和立体视觉.也可将它作为图像识别中的初级滤波器,可用于指纹识别、虹膜识别和二维图形的信息压缩,如将此模型用于神经网络的学习程序,可以使学习速度大为提高.

王书荣从瑞士进修回国后, 以家鸽为动物模型, 系统研究了 13 个视觉相关脑区的细胞性质和神经回路, 在特征抽取、运动编码、眼睛运动、生物节律等方面进行了一系列探索。经过 4 年多的努力, 他发现了产生眼球运动和扫视压抑的神经回路, 揭示了快速眼动(又叫扫视或跳动)时仍能保持视觉清晰的神经机制^[8]: 在清醒状态, 人和动物在不停地转动眼球, 以搜寻感兴趣的目标。人眼可以 500°/s 以上的速度进行扫视, 按理说外界世界看起来应该模糊一片, 但人类视觉感知却很清晰, 那么快速眼动时保持视觉清晰的神经机制是什么? 他们认为存在着一个产生扫视压抑的神经回路: 由 5 个脑区构成的扫视压抑回路组成, 脑干细胞在向“下游”动眼神经核(支配眼外肌)发送扫视指令的同时, 也将该指令的拷贝或伴随放电信号发送给“上游”两个 OKN 核团(视动震颤核团, 负责慢速跟踪和快速返回交替进行的反射性眼动), 后者又向丘脑发出放电压抑信号, 并由此使大脑的视觉活动在扫视前便开始受到压抑, 使扫视产生的模糊图像“视而不见”, 直到扫视结束后才得以恢复和增强, 从而确保扫视期间的视觉清晰稳定^[9]。王书荣等还对视觉运动信息处理的神经机制进行了系统研究, 揭示了中脑神经元不仅能编码方向和速度, 而且还能计算视觉加速度^[9]。动物脑有时会错误解释视觉信息而造成错视, 如何在单个神经元活动的基础上解释错视这一心理物理现象, 长期以来脑科学家们一直未找到答案。王书荣等发现, 有些脑细胞具有两个特性: 一是感受野分成兴奋区和抑制区, 且两者检测的运动方向相反; 二是兴奋(或抑制)方向上的运动停止会诱发抑制(或兴奋)性后反应。显然, 这些细胞的后反应便会被误读为有目标在相反方向上运动, 于是便产生了运动错视。这些为运动错视的脑机制提供了合理的解释, 对认为神经元疲劳或适应是造成运动错视的传统观点提出了质疑^[10]。他们的工作还论证了中脑的峡核是一个视觉中枢: 两栖类峡核、爬行类峡核大细胞部和鸟类峡核的大、小细胞部都是视觉中枢, 而不是前人假定的听觉中枢, 解决了一个长期悬而未决的脊椎动物脑区分工的问题, 并在突触性质、神经递质及其受体等方面鉴定了它与视顶盖构成的神经回路。感受野是视觉信息研究中的核心概念, 顶盖细胞的感受野分成兴奋区和抑制区, 它们分别受峡核大、小细胞部的兴奋性和抑制性调控, 由此构成“胜者为王”神经回路, 以突出感兴趣的目标, 压制次要目标, 使注意

力得以集中在生命攸关的目标上; 顶盖细胞的圆形感受野汇聚形成峡核的长条感受野: 同一顶盖柱里的许多细胞投射到一个峡核细胞上, 其圆形感受野便汇聚形成该峡核细胞的长条感受野。王书荣等从电生理和解剖学两个方面, 证明了 Hubel 和 Wiesel 基于哺乳动物提出的感受野汇聚模型^[11]。

郭爱克在德国进修后, 于 1993 年回所建立了果蝇学习记忆实验室, 他以果蝇为模式动物, 将基因-脑-行为-认知相结合, 开展了果蝇“两难抉择”的研究^[12], 证明了野生型果蝇可以根据颜色和形状线索的“突显”(salient)性质, 在两种相互竞争的视觉线索之间, 做出稳定而明确的趋利避害的选择, 而这一行为依赖于果蝇中央脑中的一个特定的脑区——蘑菇体。郭爱克等对果蝇个体同时完成视、嗅双模态或分别独立完成单模态的操作式条件化学习, 在检测双模态复合记忆时, 发现二者之间的“弱-弱”联合, 竟然能导致跨模态的学习记忆达到 $(1+1>2)$ 的非线性放大, 即“协同共赢”的效果^[13]。他们还发现蘑菇体结构和脑内多巴胺信号系统构成的神经环路, 共同调控果蝇的抉择行为, 没有二者共同参与的抉择是简单的“犹豫不决”的线性过程, 而二者的协同运作才使两难抉择成为“当机立断”的“胜者独享”的非线性抉择。果蝇脑中的蘑菇体可能起到类似的“门控”作用, 它与多巴胺系统共同实现抉择过程中的“门控”、“聚焦”和“放大”机制, 从而导致非线性的“S”形抉择曲线^[14]。郭爱克等发现经验可以提升果蝇的视觉特征抽提能力, 以及果蝇中央脑的一个叫蘑菇体的结构参与上述认知过程。他们揭示了: 多巴胺水平增加可诱发果蝇雄-雄求偶行为, 多巴胺的作用呈倒“U”规律; γ 氨基丁酸能神经元抑制性环路调控果蝇视觉、嗅觉的逆转学习; 果蝇的嗅觉抉择策略是基于嗅觉记忆间的竞争; 果蝇椭圆体中部分 γ 氨基丁酸能神经元能够参与嗅觉麻醉敏感记忆的调控, 并且可能是通过与蘑菇体神经元形成双向突触联结来实现的。他们发现, 果蝇神经系统中 Go 信号通路调控睡眠, 进一步研究发现蘑菇体中存在两群内在神经元可以相反地调控睡眠; 研究表明果蝇的跨模态记忆抽提存在平行通路机制; 他们将环路结构研究与环路生理研究结合, 揭示了脑特定功能区域内神经元微环路和产生气味选择性的信息转换机制^[15-20]。

刁云程曾在英国剑桥大学做访问学者, 研究哺乳动物视觉的功能组织。回国后继续从事哺乳动物

视觉信息加工研究,开展了大脑视皮层细胞的空间频率特性,上丘细胞的双眼反应特性,胼胝体在视觉信息加工中的作用,大脑皮层 17/18 交界区的功能结构,猫外侧上雪氏区功能组织等项研究^[21].

1994 年春,在王书荣所长和马重光书记的鼓励下,当时在生物大分子国家重点实验室工作的赫荣乔与法国科研中心(CNRS)的薛志刚合作建立了分子神经发育青年实验室,开展了脑发育的基因调控的研究.1996 年,该青年小组加盟了视觉信息加工开放实验室,成为该实验室的神经发育研究方向的力量.与薛志刚合作,赫荣乔等先后论证了 Qbrn-1, Qbrn-2 在鹤鹑脑神经发育的表达模式和调控眼睛发育的机制^[22-25].赫荣乔等提出了“伴随老龄化,内源甲醛代谢失调是老年认知损伤的危险因素”的观点,发现甲醛导致神经 Tau 蛋白聚积和功能的丧失^[26]及神经细胞“甲醛应激”.从分子、细胞、模式动物、行为,到流行病学等不同层次,对“甲醛代谢失衡”的致病学说进行了论证^[27].与中国科学院昆明动物研究所胡新天、马原野合作,通过长期低剂量给予甲醇或甲醛,建立了猕猴老年痴呆模型,在年轻猴脑内同时诱导出了“老年斑”和“似神经纤维缠结”,同时伴有工作记忆丧失的症状^[28].根据“甲醛代谢失衡”学说提出的“合理饮水”干预老年性痴呆发生发展的方法,对于降低体内甲醛浓度具有明显的作用^[29].他还发现了核糖具有明显的细胞毒性,而葡萄糖却相对安全^[30],提出了“核糖代谢失调是二型糖尿病的重要病理生理改变^[31],可能是糖尿病脑病的关键危险因素”^[32].

1999 年,刘力以中国科学院“百人计划”引进实验室工作,从事视觉学习记忆等基本认知过程的神经回路及细胞分子机制的研究.经过多年的努力和积累,取得了原创、系统的研究成果.刘力等研究发现,果蝇脑内中央复合体结构参与视觉图形记忆,其亚结构——扇形体的不同层状结构参与了特定视觉参数(重心高度、朝向等)的记忆,而另外一个亚结构——椭球体也参与了视觉学习记忆,但与处理视觉参数无关^[33-35].他们揭示了果蝇幼虫对明亮/黑暗偏好行为的神经机制^[36-37];发现了一个新的长非编码 RNA 参与调控行为的功能,为揭示运动障碍相关的神经性疾病的发病机制提供了新的线索^[38].

同期,生物物理研究所以“百人计划”的方式,从日本秋田大学引进了汲娟娟博士,她采用膜片钳等技术,从事脑黑质等大脑基底节核团的缺血

性代谢负荷研究^[39].李兵课题组采用猫作为模式动物,开展了运动视觉信息加工.2002 年,唐世明加盟了“视觉信息加工开放实验室”,他发现和证明了果蝇的视觉具有位置不变性,这一研究成果改变了人们以往对昆虫视觉的理解,表明果蝇的脑具有复杂的视觉信息处理机制,使昆虫视觉与脊椎动物视觉在认知层面上统一起来.这一成果对于视觉神经机制研究及进化论哲学认识都有重要的启示^[40].

中国科学院上海生理研究所李朝义、孙复川,中国科学技术大学寿天德(目前在复旦大学)、周逸峰等作为开放课题,长期与视觉信息加工开放实验室合作,且在相关领域做出了显著的贡献.李朝义从 20 世纪 80 年代末到 90 年代期间,对视网膜、外膝体和视皮层神经元的非传统感受野进行了系统性研究.确定在视网膜和外膝体神经元的传统感受野以外,还存在着一个比感受野面积大几十倍的“去抑制区”,并证明这个区的活动对于传递图形的区域亮度和亮度梯度信息起决定性作用.他们还发现在初级视皮层神经元的感受野周围,也存在一个能调制感受野反应的大区域,将它命名为“整合野”.在研究“整合野”时空结构和调谐特性的基础上,提出了感受野“三重结构”的新理论模型,来说明脑认知复杂视觉图形的神经机制.观察到在不同背景图像的作用下,外膝体神经元感受野的大小和结构会发生相当大的改变,视皮层神经元的速度选择性也会随背景运动速度的改变而变化^[41-42].

寿天德等在视网膜、外膝体和视皮层三个层次上,对视觉皮层信息处理及其皮层下机制开展了系列研究.寿等在国际上最系统地研究了视觉皮层方位选择性的皮层下起源,发现猫外膝体 70% 以上神经元具有显著的方位或朝向(orientation)敏感性,其最优方位在视网膜上按向心规律分布,最优方位相似的细胞在外膝体内聚集成团,从而为视皮层精细的方位功能柱的形成做出了预分类和组织^[43-44].修正了 Hubel 和 Wiesel (1962)以来认为方位选择性是皮层细胞特有的传统学术观点,获得国际学术界广泛的引用和接受.寿天德等还发现,视觉系统中,小细胞通路比大细胞通路对急性眼内压升高更加敏感,这与慢性青光眼的情况完全相反,发现视觉皮层高级区域对初级视皮层的反馈作用因大细胞和小细胞通路而有所不同.

孙复川等发现,在总亮度不变条件下的图像空间相位变化引发瞳孔反应的新现象,并建成 mosaic 神经网络瞳孔模型^[45];建立了无损伤的电子

正反馈开环 OKN 眼动实验方法, 为 MG 病人的早期诊断和疗效的评价, 提供了客观检测手段^[46]; 随着他们对人类心智(mind)探索兴趣增加, 设计完成了双眼分视(dichopic)OKN 眼动实验, 揭示了所谓“双眼竞争”(binocular rivalry)并非左右眼相互争夺主视权, 而是大脑中形成的不同感知, 争夺意识的表达^[47]. 对于有兴趣以信息及系统控制概念方法来探讨生物医学的科研同行, 孙等的工作可能会有参考价值.

一般认为, 在发育关键期后视觉系统几乎不再具有神经可塑性, 因而成人弱视无有效治疗途径. 周逸峰等观察到成人弱视视觉系统具有明显可塑性, 因为知觉学习可以显著改善其多种视功能. 他们发现, 知觉学习可以提高弱视眼的对比敏感度和视力, 提示知觉学习可成为治疗弱视的潜在工具; 成年弱视视觉系统相比于正常视觉系统具有更强的可塑性, 为成人弱视的治疗提供了一定的理论基础. 他们探索对比度检测知觉学习提高视觉功能的神经机制, 发现猫行为学测定的知觉对比敏感度的改善归因于 V1 区训练诱导的对比度增益提高, 揭示了知觉学习新的神经机制^[48-49]. 上述工作加深了对弱视损害机制的理解, 找到了能有效改善成人弱视患者视功能的方法, 这些结果还可能为研究知觉学习神经机制提供了重要的实验依据.

3 从视觉信息加工到脑与认知科学

20 世纪 90 年代, 越来越多的学者回国, 参与国内神经科学领域的研究工作, 并且在相关领域成绩显著. 进入 21 世纪, 国内的神经科学与认知科学获得了飞跃发展, 形成了竞争越来越强的局面. 2003 年初, 视觉信息加工重点实验室、中国科学院研究生院认知科学重点实验室、中国科学院心理研究所心理健康重点实验室的部分研究力量, 三家组合, 在陈霖的带领下, 由赫荣乔作为重点实验室的建设负责人, 杨玉芳、卓彦、张侃、刘力、付小兰、罗跃嘉等共同努力, 申报脑与认知科学国家重点实验室. 在中国科学院支持下, 生物物理研究所、心理研究所、中国科学院研究生院的协助下, 三家实验室团结协作, 于 2005 年 3 月, 脑与认知科学国家重点实验室获得科技部的批准成立. 实验室主任由陈霖担任, 学委会主任由郭爱克担任. 同期, 北京师范大学的认知神经科学与学习国家重点实验室也获得了批准.

致谢 吴梅英、马丽参与了材料的收集与提供, 感谢李婷在编辑本文方面的工作.

参 考 文 献

- [1] 孙复川, 杨润才, 戴树平. 用模拟“侧抑制”的滤波网络增加空间对比度. 科学通报, 1978, **10**(10): 633-636
Sun F C, Yang R C, Dai S P. Chinese Science Bulletin, 1978, **10**(10): 633-636
- [2] 顾凡及, 汪云九. 侧抑制网络中的信息处理. 北京, 科学出版社, 1983
Gu F J, Wang Y J. Information Processing in Lateral Inhibition Network. Beijing: Science Press, 1983
- [3] Lu H, Wang X, Liu S, *et al.* The possible mechanism underlying visual anticamouflage: a model and its real-time simulation. IEEE Trans. On System, Man, and Cybernetics, 1999, **29**(3): 314-318
- [4] Feng A S, Narings P M, Xu C H, *et al.* Ultrasonic communication in frogs. Nature, 2006, **440**(7028): 333-336
- [5] 蒋锦昌, 陈德玉. 地震生物学概论. 北京, 地震出版社, 1993
Jiang J C, Chen D Y. Introduction to Earthquake Biology, Beijing: Seismological Press, 1993
- [6] 生物的启示: 仿生学四十年研究纪实. 北京, 科学出版社, 2008: 117-128
Inspiration from Biology: Record of 40-year Research on Bionics. Beijing: Science Press, 2008: 117-128
- [7] 汪云九. 某些脊椎动物视网膜感受野的数学模型及其推广. 生物化学与生物物理学报, 1978, **10**(1): 1-14
Wang Y J. Acta Biochim Biophys Sin, 1978, **10**(1): 1-14
- [8] Yang Y, Cao P, Yang Y, *et al.* Corollary discharge circuits for saccadic modulation of the pigeon visual system. Nature Neuroscience, 2008, **11**(5): 595-602
- [9] Cao P, Gu Y, Wang S R. Visual neurons in the pigeon brain encode the acceleration of stimulus motion. J Neurosci, 2004, **24** (35): 7690-7698
- [10] Niu Y Q, Xiao Q, Liu R F, *et al.* Response characteristics of the pigeon's pretectal neurons to illusory contours and motion. J Physiol, 2006, **577**(Pt 3): 805-813
- [11] Li D P, Xiao Q, Wang S R. Feedforward construction of the receptive field and orientation selectivity of visual neurons in the pigeon. Cereb Cortex, 2007, **17**(4): 885-893
- [12] Tang S M, Guo A K. Choice behavior of *Drosophila* facing contradictory visual cues. Science, 2001, **294**(5546): 1543-1547
- [13] Guo J Z, Guo A K. Crossmodal interaction between olfactory and visual learning in *Drosophila*. Science, 2005, **309**(5732): 307-310
- [14] Zhang K, Guo J Z, Peng Y Q, *et al.* Dopamine-mushroom body circuit regulates saliency-based decision-making in *Drosophila*. Science, 2007, **316**(5833): 1901-1904
- [15] Peng Y Q, Xi W, Zhang W, *et al.* Experience improves feature extraction in *Drosophila*. J Neurosci, 2007, **27**(19): 5139-5145
- [16] Liu T, Laurence Dartevelle, Yuan C Y, *et al.* Increased dopamine level enhances male-male courtship in *Drosophila*. J Neurosci,

- 2008, **28**(21): 5539–5546
- [17] Ren Q Z, Li H, Wu Y Y, *et al.* A GABAergic inhibitory neural circuit regulates visual reversal learning in *Drosophila*. *J Neurosci*, 2012, **32**(34): 11524–11538
- [18] Li H, Li Y, Lei Z, *et al.* Transformation of odor selectivity from projection neurons to single mushroom body neurons mapped with dual-color calcium imaging. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, **110**(29): 12084–12089
- [19] Zhang Z, Li X, Guo J, *et al.* Two clusters of GABAergic ellipsoid body neurons modulate olfactory labile memory in *Drosophila*. *J Neurosci*, 2013, **33**(12): 5175–5181
- [20] Zhang X, Ren Q, Guo A. Parallel pathways for cross-modal memory retrieval in *Drosophila*. *J Neurosci*, 2013, **3**(20): 8784–8793
- [21] Li B, Wang L, Wang Y. Orientational and directional selectivities of visual neurons in the superior colliculus of the cat. *Science in China*, 1996, **39**(2): 123–132
- [22] Liu Y, Lupo G, Marchitelli A, *et al.* Expression of the Xvax2 gene demarcates presumptive telencephalon and specific visual structures in *Xenopus laevis*. *Mechanism of Development*, 2001, **100**(1): 115–118
- [23] Liu W, Xue J X, He R Q, *et al.* qBrn-2, a POU III gene in quail: Distinct developmental expression revealed by a specific antibody. *Mechanism of Development*, 2001, **100**(2): 349–352
- [24] Lupo G, Liu Y, Qiu R, *et al.* Dorso-Ventral patterning of the *Xenopus* eye: a collaboration of Retinoid, Hedgehog and FGF Receptor signaling. *Development*, 2005, **132**(7): 1737–1748
- [25] Liu K L, Liu Y, Mo W C, *et al.* MiR-124 regulates early neurogenesis in the optic vesicle and forebrain targeting NeuroD1. *Nucleic Acid Research*, 2011, **39**(7): 2869–2879
- [26] Hua Q, He R Q. Effect of phosphorylation and aggregation on tau binding to DNA. *Prot Pept Lett*, 2002, **9**(4): 349–357
- [27] Yu J, Su T, Zhou T, *et al.* Uric formaldehyde negatively correlates with cognitive abilities in healthy older adults. *Neuroscience Bulletin*, 2014, **30**(2): 172–184
- [28] Yang M F, Miao J Y, Joshua Rizak, *et al.* Alzheimer's Disease and Methanol Toxicity (Pt.2): Lessons from four rhesus macaques (macaca mulatta) chronically fed methanol. *Journal of Alzheimer's disease*, 2014, DOI: 10.3233/JAD-131532
- [29] Li T, Qiang M, He R Q. Chronic dehydration and regularly drinking water to mitigate age-related cognitive impairment. *Acta Neuropharmacologica*, 2012, **2**(3): 43–51
- [30] Han C S, Lu Y, Wei Y, *et al.* D-Ribosylation induces cognitive impairment through RAGE-dependent astrocytic inflammation. *Cell Death and Diseases*, 2014, **5**: e1117. doi: 10.1038/cddis.2014.89
- [31] Su T, Xin L, He Y G, *et al.* Abnormally high level of uric D-ribose for type 2 diabetics. *Prog Biochem Biophys*, 2013, **40**(9): 816–825
- [32] Su T, He R Q. D-ribose, an overlooked player in type 2 Diabetes mellitus?. *Science China Life Sciences*, 2014, **57**(3): 361
- [33] Liu G, Seiler H, Wen A, *et al.* Distinct memory traces for two visual features in the *Drosophila* brain. *Nature*, 2006, **439**(7076): 551–556
- [34] Pan Y F, Zhou Y Q, Guo C, *et al.* Differential roles of the fan-shaped body and the ellipsoid body in *Drosophila* visual pattern memory. *Learning & Memory*, 2009, **16**(5): 289–295
- [35] Cheng X B, Jiang H Q, Li W Z, *et al.* ten-a affects the fusion of central complex primordia in *Drosophila*. *PLoS One*, 2013, **8**(2): e57129
- [36] Gong Z F, Liu J Q, Guo C, *et al.* Two pairs of neurons in central brain control *Drosophila* innate light preference. *Science*, 2010, **330**(6003): 499–502
- [37] Liu J, Gong Z, Liu L. γ -glutamyl transpeptidase 1 specifically suppresses green-light avoidance *via* GABAA receptors in *Drosophila*. *J Neurochem*, 2014, **130**(3): 408–418
- [38] Li M X, Wen S Y, Guo X Q, *et al.* The novel long non-coding RNA CRG regulates *Drosophila* locomotor behaviour. *Nucleic Acids Research*, 2012, **40**(22): 11714–11727
- [39] Chen L W, Bai S Y, Su W T, *et al.* Transient oxygen-glucose deprivation causes immediate changes in redox activity in mouse brain tissue. *Brain Research*, 2011, **1390**(3): 99–107
- [40] Tang S M, Wolf R, Xu S P, *et al.* Visual pattern recognition in *Drosophila* is invariant for retinal position. *Science*, 2004, **305**(5686): 1020–1022
- [41] Yao H, Li C Y. Clustered organization of neurons with similar receptive field properties in the primary visual cortex. *Neuron*, 2002, **35**(3): 547–553
- [42] Zhu Z, Wang Y, Xu X Z, *et al.* A simple and effective method for obtaining stable *in vivo* whole-cell recordings from visual cortical neurons. *Cereb Cortex*, 2002, **12**(6): 585–589
- [43] Li C Y, Lei J J, Yao H S. Shift in speed selectivity of visual cortical neurons: a neural basis of perceived motion contrast. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, **96**(7): 4052–4056
- [43] Shou T, Ruan D, Zhou Y. The orientation bias of LGN neuron shows topographic relation to area centralis in the cat retina. *Exp Brain Res*, 1986, **64**(1): 233–236
- [44] Shou T, Lenventhal A G. Organized arrangement of orientation sensitive cells in the cat's dorsal geniculate nucleus. *J Neuroscience*, 1989, **9**(12): 4287–4302
- [45] Sun W, Sun F, Hung G. Neural network mosaic model for pupillary responses to spatial stimuli, *Biological Cybernetics*, 1998, **79** (2): 131–138
- [46] Yang Q, Wei M, Sun F, *et al.* Open-loop and closed-loop optokinetic nystagmus (OKN) in myasthenia gravis anisomyasthenic subjects. *Experimental Neurology*, 2000, **166**(1): 166–172
- [47] Sun F, Tong J, Yang Q, *et al.* Multi-directional shifts of optokinetic responses to binocular-rivalrous motion stimuli. *Brain Research*, 2002, **944**(1): 56–64
- [48] Hua T M, Bao P L, Huang C B, *et al.* Perceptual learning improves contrast sensitivity of V1 neurons in cats. *Current Biology*, 2010, **20**(10): 887–894
- [49] Zhou Y F, Huang C B, Xu P J, *et al.* Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometric amblyopia. *Vision Research*, 2006, **46**(5): 739–750

From Bionics to Neuroscience

LU Hui-Min, HE Rong-Qiao*, GUO Ai-Ke

(The State Key Laboratory for Brain and Cognitive Science, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The research interest converted from bionics to neuroscience underwent several generations' arduous work in the Institute of Biophysics (IBP), Chinese Academy of Sciences. Since 1959, it had taken about 46 years from the beginning of 3-person theoretic research group (the predecessor for the laboratory of bionics) to the establishment of the State Key Laboratory for Brain and Cognitive Science in IBP in 2005. Here, we try to recall and review this progression.

Key words bionics, neuroscience, research interest, brain and cognition

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2014.00250

*Corresponding author.

Tel: 86-10-64889876, E-mail: herq@ibp.ac.cn

Received: September 1, 2014 Accepted: September 12, 2014