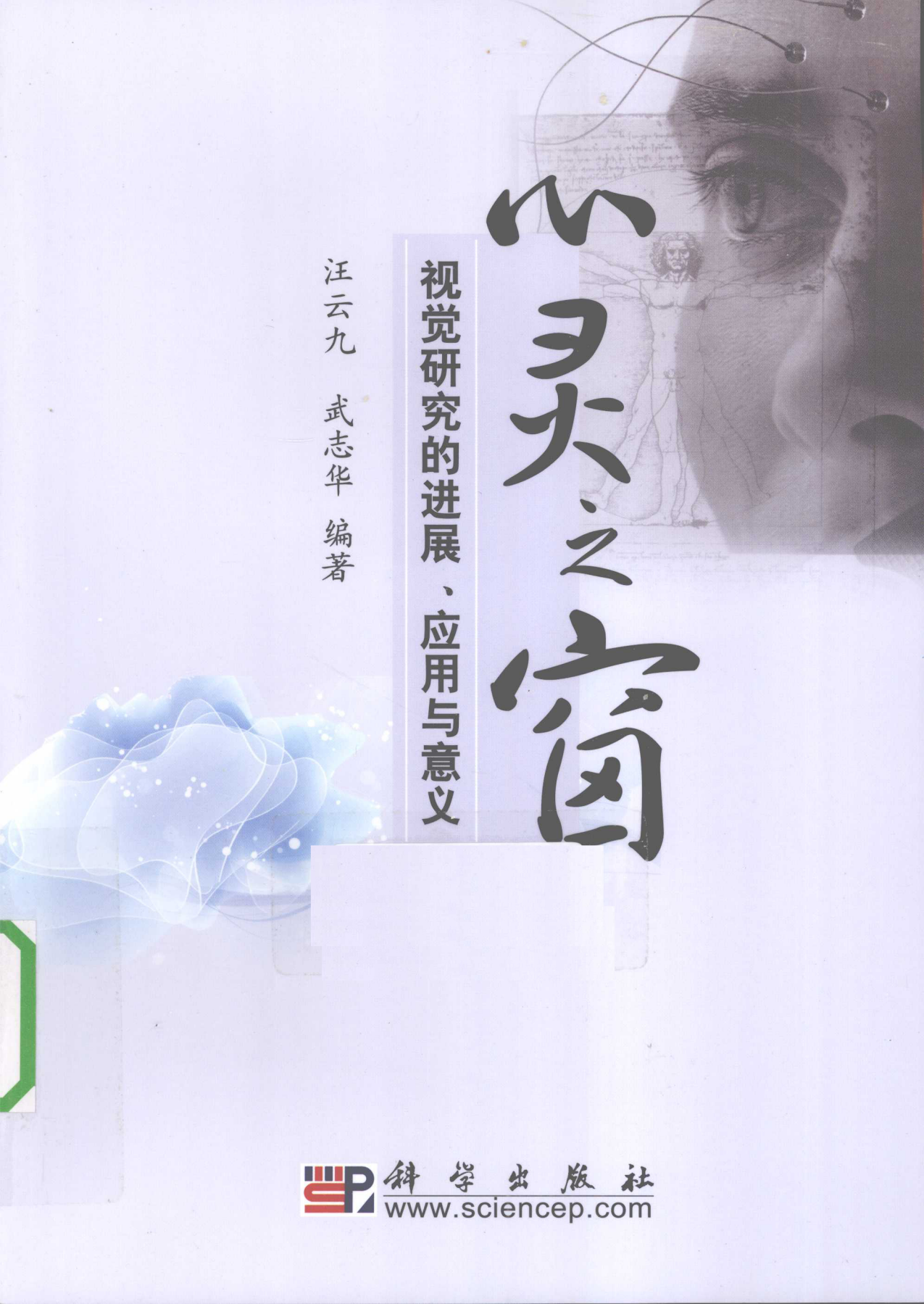




心灵之窗

视觉研究的进展、应用与意义

汪云九 武志华 编著



科学出版社
www.sciencep.com

心天省

（作者姓名）

（作者姓名）

（作者姓名）

心灵之窗

——视觉研究的进展、应用与意义

汪云九 武志华 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

视觉是人类最为重要的一种感觉。半个多世纪以来,视觉研究取得极大进展,先后有 5 位该领域科学家获得诺贝尔奖。本书首先用一些有趣的实例说明视觉对动物的行为和动物生存所起的重要作用。然后从心理学、神经生理学、组织解剖、临床病理学等方面,介绍视觉研究的最新进展,同时,用这些成果解释视觉发育和视觉学习中的规律和病理表现。本书还用通俗的语言介绍了一些建立在现代神经科学基础上的关于图像识别的理论观点和视觉信息加工的模型。眼睛是心灵之窗,本书说明视觉如何成为当代研究意识问题的突破口。视觉研究的成果不仅与我们的日常生活有关,而且还涉及人工视觉、视觉仿生、哲学认识论、艺术乃至战争和革命等人类社会生活的方方面面。本书是作者在该领域从事 40 余年研究的知识和经验的积累。

本书语言通俗并采用大量生动的图片,可作为相关专业大学生和研究生的入门书。本书也可用于对视觉的神奇功能有兴趣的读者开阔视野和增长知识。

图书在版编目(CIP)数据

心灵之窗:视觉研究的进展、应用与意义/汪云九,武志华编著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027558-5

I. ①心… II. ①汪… ②武… III. ①视觉-研究 IV. ①Q436

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 085173 号

责任编辑:夏 梁 陈珊珊/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/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

*

2010 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张:14 插页:4

印数:1—2 500 字数:267 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

人类具有智慧的大脑，但大脑的信息来源于遍布全身的各种感受器官。在所有感官中，从感受细胞的数量、功能的精巧、结构的复杂程度，以及提供信息的比例等角度考虑，视觉当居首位。视觉研究是在神经科学中发展较早、取得成就最多的一个领域。自 20 世纪中期以来已有 5 位科学家因视觉研究方面的成就而荣获诺贝尔奖。自 20 世纪 60 年代开始，人工智能的基础研究者就对视觉理论研究抱有强烈兴趣。模式识别研究对人工智能的重要性相当于视觉对人脑智慧的重要性。表面看来相距甚远的两个学科（模式识别和视觉研究），却出现互相激励、相互促进的壮观局面。由于外伤或疾病，视觉障碍患者在总人口中占相当比例，人类一直想用现代技术补偿缺失的视觉功能，尝试应用微电子、克隆等先进技术在临床上实现人工视觉。国防部门也是最早对视觉研究感兴趣的，产生于 20 世纪 60 年代初的仿生学就是想把青蛙捕虫的视觉机理应用到高射炮控制系统中。意识问题是古老的哲学问题，20 世纪末科学界想用自然科学的办法研究它，并把视觉问题作为突破口。因此，当代视觉研究不只局限于心理学、生理学等纯基础理论研究，还涉及人工智能、军事技术乃至哲学等社会生活各方面。另外，现代的视觉研究本身应用了物理学、信息科学、人工智能等多学科的最新发展成果，所以当代视觉研究成为一门真正的交叉科学。从事视觉研究的科研人员只具备某一专业的知识是不够的。培养和从事视觉研究的科研人员必须要具备多方面的知识并掌握最新研究进展。本书将提供粗线条、全景式和最新的视觉基础理论研究、应用和意义方面的总结 and 介绍。由于我国科技管理部门历年来相当重视视觉研究的基础研究和应用研究，历年来“攀登计划”和国家自然科学基金委重大项目及重点项目都有这方面的内容，所以人才问题成为相当重要的一个方面。本书可作为从事这方面研究的科研人员的参考资料、研究生的入门读物、相关专业大学生的兴趣读物。此外，当前我国正处于科技知识大普及的时期，本书可以作为高级科普读物。因为本书极少运用高等数学的符号、公式，语言又浅显易懂，所以只要具备高中文化且对本书有兴趣的读者，都可从阅读中获得裨益。

由于视觉功能在动物的生存竞争中具有十分重要的意义，所以本书第一章用生动的事例说明视觉与动物行为的关系，这方面的内容最直观形象、最有趣味。第二章介绍视觉心理的研究成果，这方面的内容与我们日常生活和个人经验有很大关系。第三章内容关于视觉的结构和功能，主要介绍以微电极为探测手段的电生理研究成果。人出生后视觉功能发育非常快速，而且这是一个神经系统的自学功能，与人的语言功能不一样，并非母亲教导的结果，现代科学对这个过程的

了解还不十分清楚。这方面的内容在本书第四章论述。科学研究就是从大量实验结果提出理论观点，这些理论观点不仅是实验工作的总结和概括，还对进一步的实验工作有指导意义。而且视觉认知的理论模型对人工智能中图像识别研究有重要的参考价值。第五章简要介绍了视觉理论，还包括作者的一些工作内容。人类总有一个梦想，帮助失明患者恢复健康，现代微电子技术和克隆技术为实现这一目标提供了可能性。第六章介绍了人工视觉的主要进展和困难所在。视觉仿生一开始就成为仿生学的重要内容，特别是昆虫复眼的仿生，在军事和工程中都取得了一定成就（第七章）。人们常说眼睛是心灵之窗，20 世纪八九十年代开始，国际上出现了一股从自然科学角度研究意识问题的热潮，一些诺贝尔奖获得者，包括 Crick、Edelman 等，热衷于推动这一问题的研究。他们选择的突破口就是视觉。第八章介绍了从视觉开始研究意识问题的主要思路和进展，这方面的研究开辟了用现代科学技术研究古老哲学问题的范例。在第八章中还包括本实验室工作人员 21 世纪初发表在 *Nature*、*Science* 等国际顶尖刊物上的一些重要工作。因为视觉是人最主要的感官，因此对视觉功能的了解涉及哲学中的认识论。人类创造的文化艺术也无不与视觉有关。近年来国际上的神经美学就是想从视觉神经的角度来解释一些美学问题。人类已进入信息时代，互联网、多媒体无一不是直接与人视觉打交道，甚至视觉理论观点上的争论引发哲学上的争论牵扯到了社会革命的进程。这些内容在本书第九章中有所提及。这样，本书对视觉研究以及有关的应用和意义作一全方位的介绍。由于作者的学识有限和兴趣所及，有些内容在本书中没有涉及。例如，色觉问题是人的视觉的一个重要方面，但本书几乎没有提及。关于视觉的分子机制，本书也未论及。在研究工作和本书写作过程中我们阅读了大量视觉研究方面的研究成果，包括几乎所有经典著作和重要进展，其中还有 21 世纪发表的一些重要论文。本书的部分内容取自作者本人以及本实验室同仁（张少吾、郭爱克、王书荣、刘力和唐世民等）的工作。

汪云九（本书作者之一）自 1959 年从山东大学数学系毕业后分配到中国科学院生物物理研究所理论组工作，将近半个世纪的时间从事视觉理论研究。1964 年在讨论研究室研究方向时，他提出视觉信息加工的研究方向，经全室同志的讨论和所领导的批准定为生物物理所第五研究室的研究方向。该研究室于 1988 年被批准成为中国科学院开放实验室之一，2005 年在该研究室基础上与中国科学院心理研究所、研究生院认知研究室联合成立脑与认知科学国家重点实验室。汪云九一直在中国科技大学和中国科学院研究生院担任教职，讲授生物信息论、生物控制论和神经信息学，长达 30 余年。

为介绍脑与认知科学国家重点实验室在昆虫视觉认知及相关领域的最新工作，作者邀请武志华副研究员撰写了部分章节（第一章的“印记行为”及“大鼠的认知地图”两节；第八章的“果蝇视觉学习、记忆和抉择行为”一节）。武志华 1996 年获北京大学非线性动力学专业博士学位，1996 年起先后在中国科学院

视觉信息加工开放实验室和日本理化学研究所脑研究中心作博士后。2006年起在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工作,研究领域是计算神经科学。

视觉研究从20世纪中期开始,经过半个多世纪的发展,取得了许多突破性进展。国外出版了数十本专著和科普读物,国内也翻译和写作了10多本著作。但是视觉系统的最高级功能是图像和物体的识别,在这个核心问题上尚未有根本性的突破。所以视觉研究的基本问题可以说还没有解决,因此,计算机的模式识别任务也没有彻底完成。人的视觉功能发生在几十亿神经元构成的系统中的自学过程,其基本规律还未被人类完全掌握。因此,视觉研究的探索历程还未到达终点,需要更多的设备和经费的支持,更有待于年轻人才的艰苦奋斗。谨以本书献给有志于视觉研究的青年人,希望本书对他们的成长有所裨益。

有关视觉研究的参考文献,可说是浩如烟海,这些文献不仅发表在心理学、生理学、解剖学、行为学等经典学科领域,从20世纪下半世纪开始,大量文献还出现在光学、计算机模式识别、计算神经科学等新兴学科领域,还有一些文献发表在哲学、艺术等非自然科学和技术领域。本书只可能有选择性地录用其中很少部分。选择的标准是文献的经典性,如诺贝尔奖获得者的工作,重要的文献和最新的进展。而且对重要作者也只选取两篇主要工作列出。我们期望这份参考文献对于想深入研究的读者有所裨益。

本书基本定稿后,为寻求合适出版社花费了将近3年时间,后来与科学出版社夏梁编辑联系,经过相关论证工作,科学出版社同意出版,因此才有本书的面世,所以,本书作者谨向科学出版社致谢!

本书之所以成册,依靠的是作者在此领域内的工作,而这些工作之所以能够进行,要感谢国家自然科学基金委员会长期而充裕的经费资助,以及中国科学院生物物理研究所提供的工作条件和良好的学术环境,在此作者向这两个单位表示谢意!

最后,作者要向为本书出版作出贡献的学术前辈、学界同仁(郭爱克院士和顾凡及教授曾为本书写过推荐信)、工作中同事、研究生们及作者的家人,表示衷心的感谢!恕我们不在此一一列出他们的姓名。

中国科学院生物物理研究所

汪云九 武志华

2009年12月

目 录

前言

第一章 视觉与动物的行为	1
捕食与逃避	1
求爱和配偶寻找	2
苍蝇的追逐行为	6
视野与捕食行为	7
眼球运动和瞳孔调节	9
蜜蜂的视觉行为反应	11
蟾蜍的视觉行为反应	16
蚂蚁的偏振光导航返窠	19
印记行为	22
大鼠的认知地图	24
第二章 视觉心理	30
亮度感觉	31
视觉残留与电影、电视	32
视力与超视锐度	33
空间频率与人眼调制传递函数	34
恒常性(不变性)	37
图形与背景问题	37
双眼立体视觉	39
视觉后效应	41
几何错觉	42
对比错觉	43
交变图与双眼竞争图对	44
图形的上下	45
McCulloch 朝向——颜色后效应	47
盲视	48
第三章 视觉系统的结构和生理	50
两大类视觉系统	50
复眼的结构	50
哺乳动物视觉系统的结构	51

两个亚系统	54
感受野的性质	56
第三只眼睛	68
第四章 视觉系统的发育, 再生与可塑性	70
视网膜是脑的一部分	70
视神经再生	71
可塑性与学习的关键期	73
弱视、斜视和白内障摘除	76
成年患者复明后的视觉	77
上下颠倒和左右交换的视觉	78
黑白颠倒的世界	79
第五章 视觉理论和模型	80
Gestalt 理论	80
神经还原论(老祖母细胞理论)	82
Marr 的视觉计算理论	85
计算视觉	102
感受野的 Gabor 模型	107
Crick 的视觉原理	115
还原论的复苏	115
第六章 人工视觉	119
感觉代偿	119
视网膜细胞移植	120
人工视觉	121
第七章 视觉仿生	128
昆虫视觉仿生	129
相控阵雷达——复眼仿生	133
复眼透镜(复眼复印机, 复眼照相机)	134
复眼全息	137
视动反应与测速	138
认知机	142
第八章 视觉与意识	145
视觉是研究意识问题的突破口	145
视觉注意	146
视觉系统中发现的 40Hz 同步振荡	148
视觉觉知的部位和功能	153
电生理与行为实验的结合	155

无损伤实验的结果·····	159
创造和中止一种视觉功能·····	160
灵魂出窍·····	160
果蝇视觉学习记忆和抉择行为·····	163
第九章 视觉、艺术及其他·····	173
眼睛在人物画中的作用·····	173
侧抑制网络是线条画的神经基础·····	174
空间对比的艺术意义·····	182
视知觉与艺术·····	184
视觉艺术的生物学基础·····	186
神经美学·····	190
视觉与广告·····	194
Escher 画作点评 ·····	196
视觉与其他感觉·····	199
视觉与信息论·····	201
视觉与认识论·····	203
视觉与革命·····	204
参考文献·····	208
图版	

第一章 视觉与动物的行为

* 眼见为实，耳听为虚。

——民间谚语

* I don't believe it until I saw with my own two eyes.

——西方谚语

* 百闻不如一见。

——民间谚语

* Seeing is believing.

——西方谚语

大千世界，五彩缤纷，千姿百态，让我们赏心悦目。这一切全是视觉系统提供给我们大脑的。视觉系统还是许多动物赖以生存的重要感官。

捕食与逃避

小鸡和小鸭等雏禽天生就对天空中飞过的老鹰等猛禽表现得惊恐万状，四处逃散、寻找庇护所，而面对天鹅、野鸭等飞禽的飞越却无动于衷，泰然自若。有人设计一种图案（图 1-1），两个翅膀加中间突起物，一头短小，另一头细长，如果该图案向短小方向运动，像老鹰，而该图案向细长方向运动，像鸭子。把同一图案以不同运动方向呈现给小鸡、小鸭观看，发现小鸡、小鸭对短小方向运动的图案表现得惊慌失措，而对细长方向运动图案表现得泰然自若。可见图案的不同运动方向使小禽类产生不同的行为反应。这种图案的形状和运动触发了小禽类视觉系统中某种检察器，从而启动了特定的行为模式。这种行为模式是动物天生就具有的，不是母亲传授给它们的，也不是它们出生后自学所获得的。这种视觉

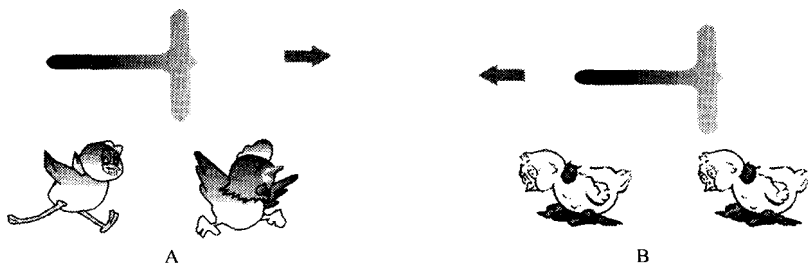


图 1-1 同一个图形，不同的运动方向引起小鸡、小鸭的不同的行为反应

A. 十字图形自左向右运动，看上去像一只猛禽，小鸡、小鸭纷纷逃避；B. 十字图形自右向左运动，看上去像一只天鹅或大雁，对小鸡、小鸭没有威胁，所以相安无事

行为对于小鸡、小鸭的生存来说，当然是十分重要的。低等动物的视觉系统，往往对于目标的细节不十分在意。我们儿时在南方水田中钓青蛙，在竹竿头上系一细线，线头上不必挂食饵（青蛙爱吃的虫子），只用一棉花团作诱饵，然后在稻田中抖动，青蛙发现有一团东西在跳动，以为是昆虫，跳上来吞下肚，从而被捉。青蛙不在乎目标的细节，只要是运动的、一定大小的东西就以为是猎物。青蛙对运动非常敏感，据说，把青蛙饲养在一大堆死掉的昆虫中间，生生地会“视而不见”地饿死。打斗中的蟋蟀对水平的黑色条纹很感兴趣，因为它把黑条看作适合隐蔽的缝隙。从树干上掉落地上的毛虫，直奔黑色垂直条纹而去，并攀登而上。飞行中的水生昆虫，对身下的闪光点很有兴趣，并飞向目标，因为它以为这是水面的景色。蜜蜂在寻找蜜源时对辐射状排列的黑点有兴趣，它把这种图案看作是花朵，而对水平或垂直黑点不感兴趣。野猪对红色特别敏感，如果穿红毛衣的女士在圈外走动，它看到后会惊恐地夺栏而逃。

求爱和配偶寻找

视觉系统对于动物寻找配偶也是十分重要的。许多鸟类的美丽羽毛、热带鱼类的鲜艳色彩，都是求偶的“漂亮服饰”，也是繁衍后代的必要条件。这些信息都是通过视觉系统传达的。

跳蛛（jumping spider）是蜘蛛的一种（图 1-2），它不像普通蜘蛛那样在空中结网捕食飞虫为生。它在地面上走动，发现猎物后，在 1~2cm 距离内一跃而上，捕而食之，所以它的眼睛很重要。跳蛛的视觉系统从结构和功能上来讲很先进。蜘蛛是节肢动物，从外貌和进化角度讲与昆虫相近，但它的眼睛却是单眼。所谓单眼就是视网膜前只有一个光学系统（透镜、水晶体等）。人有 2 只眼睛，而跳蛛则有 8 只眼睛（图 1-3）。其中一对前中眼或称主眼（或原眼），不仅个头大，位置重要，它的视网膜还可以相对于躯体移动，而且感光细胞数量较多（近 800 个），所以它们在识别和捕捉目标方面起重要作用。人的视网膜形状是不大规则的椭圆形，而跳蛛前中眼的视网膜却呈现一个 X 形（“飞去来器”形状）

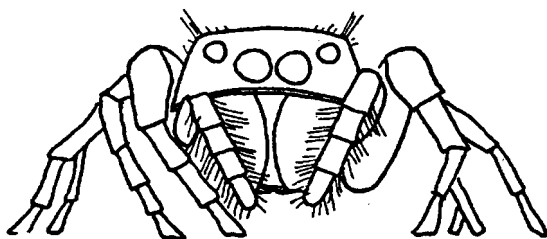


图 1-2 一只雌跳蛛的外貌（Land, 1969）

这是处于休息状态的典型姿势

(图 1-4)。其余 6 只眼统称为边眼，分布在躯体两边，视野开阔，但是每只眼的个体较小，视网膜不能移动，感光细胞较少。

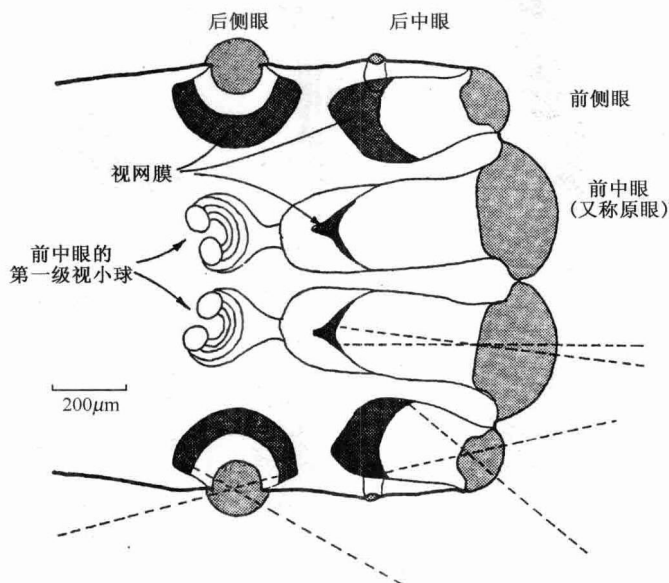


图 1-3 跳蛛 8 只眼睛的分布位置和形状示意图

虚线表示它们的视野，浅灰色部分是光学系统，深灰色部分是它们的视网膜。右侧两只较大一些的复眼，称为前中眼或原眼，稍外侧一些的两只复眼称为前侧眼，躯体两侧称为后中眼和后侧眼。前中眼在捕食和求偶行为中起主要作用

跳蛛用眼睛来发现目标，如果目标是运动的，更能引起它的注意。运动的小黑点之类的图形，往往能引起它的攻击反应（图 1-5），雄跳蛛看到雌跳蛛样图形，则引起求爱反应，图 1-5 上行图形下的数字，是求爱反应的百分数。可是跳蛛的视觉系统虽然简单，却能很好地分辨图形，作出适当反应。跳蛛的前中眼平时处于自发活动状态，如果视野内没有出现目标，“X 形视窗”从左边到右边，再从右边到左边扫视，幅度可达 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ （水平方向），角速度为 $2^{\circ} \sim 100^{\circ}/s$ 。如果把眼睛蒙起来（在角膜上涂上黑色），自发运动还存在。若在视野中出现目标，它会用突然的跳动把 X 形的中心对准目标，这很像人眼的运动，人眼也会把眼球突然间转向目标，以便把中央凹对准目标。跳蛛前中眼的跳动速度很快，可达到 $150^{\circ}/s$ ，而且很准，没有看到超调现象。跳蛛也会产生跟踪运动，像人眼会跟随一个运动目标转动一样，在跟踪运动过程中 X 形视网膜中心会盯住目标。跳蛛前中眼最有意思的一类活动是扫描活动，这种活动常常发生在跳动之后，它有两部分运动组成，一是周期性水平运动，二是低频的旋转运动（图 1-6）。水平运动的幅度依赖于目标的宽度，一般大于 2° 。旋转动作由顺时针方向转 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，回到正常位置，然后再逆时针方向转 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，总共旋转 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，时间为

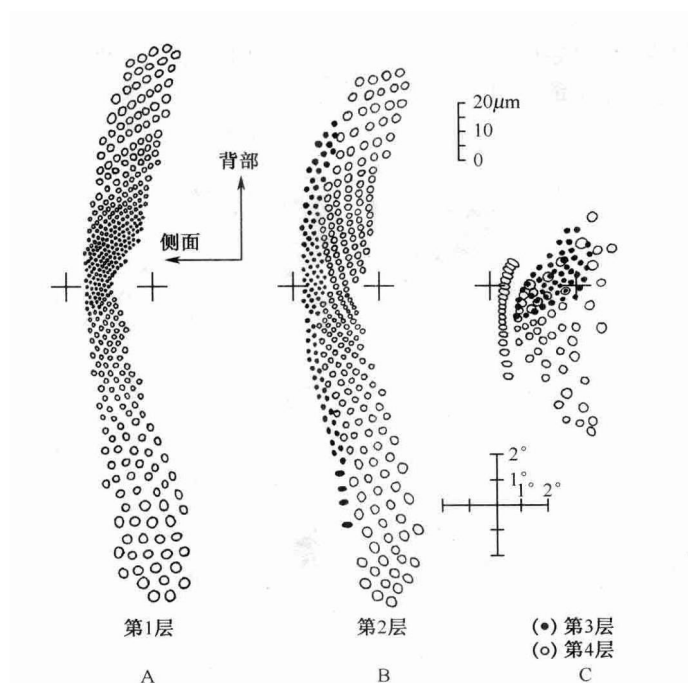


图 1-4 跳蛛的前中眼的视网膜呈“飞去来器”形状 (Land, 1969)
跳蛛视网膜上的感光细胞排列在不同深度的层次上 (从左到右分别列出由浅到深的层次)。A. 给出第 1 层上的感光细胞, 在视网膜的最深处, 这一层的感光细胞最多; B. 较浅的感光细胞层, 图中的实心黑点的细胞体在视网膜的一侧, 空心圈的感光细胞体在视网膜中央; C. 第 3 层 (实心圆点) 和第 4 层感光细胞构成的视网膜。每张图形中的十形标识给出它们在实际情况下的重叠点

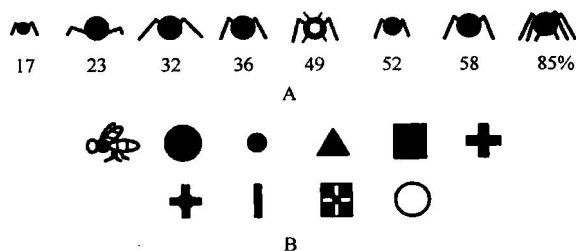


图 1-5 引起雄跳蛛行为反应的刺激图形

A 组图形能引起雄跳蛛的求爱反应, 每个小图下方的数字表示引起求爱反应的百分数; B 组图形可能引起雄跳蛛的捕食反应

5~8s。这个过程非常重要, 它在“审视”目标, 决定采取捕食动作, 还是作出求爱反应。

看来跳蛛的前中眼视网膜的 X 形中心相当于人的黄斑, 集中了较多的感光细胞, 是灵敏的感受中心。人也是靠景物落入黄斑进行精细的形象分辨。因为

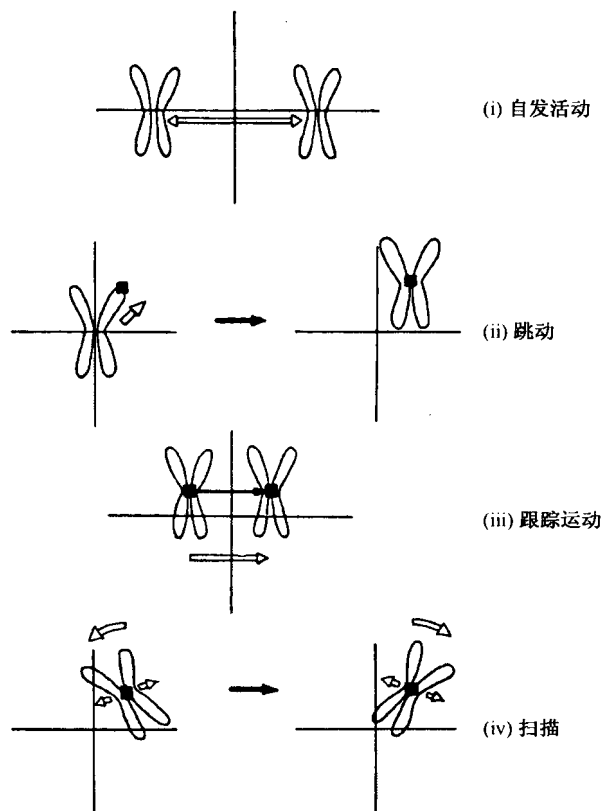


图 1-6 跳蛛眼睛的四类运动模式

由于跳蛛的角膜固定在甲壳上，所以只好用视网膜的相对运动来实现视线的移动。(i) 自发运动；(ii) 跳动；(iii) 跟踪运动；(iv) 扫描。图中空箭头表示前中眼视网膜的运动方向，黑方块表示刺激物，细黑箭头表示刺激物运动

跳蛛的角膜固定在躯体的外壳上，不像人的眼球可相对于颅骨转动，但是它们前中眼后面有 6 条肌肉可牵动视网膜相对于外壳运动，所以可以完成跳动、跟踪和扫描。青蛙、蟾蜍、鱼类靠转动身体，使目标落入视野。跳蛛前中眼的视网膜形成 X 形，可能对于形象识别有好处，因为 X 形正好与雌跳蛛的腿匹配（图 1-7），它扫描时，触发 X 形视网膜上的检察器，从而产生求爱反应。

跳蛛的前中眼睛瞎了则分不清敌我，但是其他眼睛瞎了并不影响捕食行为。可见前中眼主导了它的视觉行为。跳蛛前中眼上 794 个感光细胞在深度上分成 4 层，其功能意义还不十分清楚。光学分析表明，第 1 层细胞对红光敏感，第 2 层细胞对蓝绿光敏感，第 3 层细胞对紫光和紫外光敏感。大部分的跳蛛体表有鲜明的颜色，而且表现在身体前部、脸上和腿上，以便配偶看到，因此这种视网膜结构可能与求偶行为有关。第 4 层细胞可能对极光有反应，使它能够在

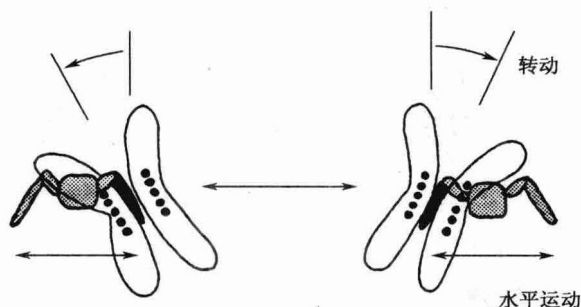


图 1-7 雄跳蛛发现雌跳蛛时前中眼的扫描过程

雌跳蛛的腿正好匹配雄跳蛛前中眼视网膜的形状

星光下行动自如。

小小跳蛛具备如此丰富的视功能，令人感叹不已。它有 8 只眼，视野开阔，几乎包括全天空（ 360° ），这方面还优于人的眼睛。在这 8 只眼中有功能上的分工，位于身体前方的前中眼，集中较多的感光细胞，视网膜可移动，用于识别目标，像人的黄斑，而其余 6 只眼只是起警戒作用，像人的周缘视觉，只是用来发现目标，需要识别目标时必须用黄斑对准目标才行。跳蛛主眼的视网膜可实现跳动、跟踪和扫描等运动形式，完全具备人眼的运动方式。在进化阶梯上相隔如此遥远的两个物种，在视觉功能上有如此相近的表现，确实令人赞叹。

苍蝇的追逐行为

夏日里常可看到苍蝇在空中相互追逐飞行。其中多半是雄蝇追雌蝇。苍蝇的飞行速度很快，可达 20km/h ，相对于体长 1cm 左右的苍蝇来说，显得非常快。一只雌蝇在前面飞行，如果发现有一只苍蝇追逐它，它会想办法作出各种飞行动作，上下翻滚、左右转弯，以便逃避追逐者。而追逐者必须随时掌握对方的飞行速度、高度、转弯等参数，调整自己的飞行参数，力求缩小它们之间的距离差，这是一项极为复杂的信息处理和调节过程，人类一直到 20 世纪下半叶才在第二、三代战斗机飞行中实现这项高技术动作。

图 1-8 是一幅实际拍摄的两只苍蝇的追逐轨迹图。图 1-8 中逃蝇飞行轨迹用空心圆点表示，追蝇的飞行轨迹用实心点表示。每两点之间的时间间隔为 20ms ，在飞行轨线旁用阿拉伯数字标出某一时刻这两只蝇的位置，每 200ms 给出一个数字标记。逃蝇在 1 处作了一个急左拐弯，追蝇发现目标左遁也做左拐弯，由于惯性，追蝇有些“过冲”的动作。逃蝇又来了一个右拐，追蝇紧接着也右拐，两只蝇在 3 处几乎要撞上，逃蝇急速掉头飞行，把追蝇甩到身后。逃蝇在 5 处后作

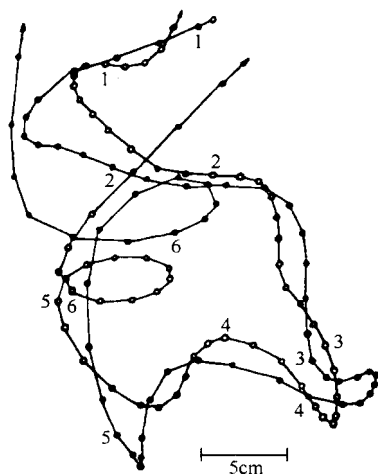


图 1-8 两只苍蝇追逐过程的电影记录 (Landy and Collett, 1974)
 逃蝇的飞行轨道用空心圆点表示, 追蝇的飞行轨道用实心点表示。两个点之间的
 时间间隔为 20ms。轨线旁数字表示每 200ms 时间间隔

了大的回转动作消失在视野外。整个追逐过程在 1.4s 内完成。

仔细考虑一下苍蝇的追逐飞行是一个十分复杂的过程。科学家发现苍蝇的复眼并不是结构均匀的球状体, 复眼各部位的结构排列和精细程度是不一样的。蝇眼前端的结构比较精细, 空间分辨率很高, 雄蝇有专门用于追逐飞行目标的小眼区, 因此把这一部分称之为“爱点”(love point)。而雌蝇的复眼中很少看到这类专门用于发现和跟踪快速运动的小目标的神经结构。

视野与捕食行为

有心的读者会发现, 食草动物, 如马、兔、羊等的眼睛长在头部两侧, 而许多食肉动物, 如虎、豹、猫头鹰等的眼睛在头的正前方 (图 1-9)。这是因为动物生存的需要才生成这样的。食草动物以草本植物为生, 活动在开阔的地域, 但是有许多天敌, 它要及早发现敌人以便逃遁, 所以需要起警戒作用的眼睛有宽广的视野。而食肉动物以抓捕猎物为生, 在抓捕时必须盯准目标, 测出距离, 然后猛扑过去。而位于同一平面上的双眼可以产生立体视觉, 给出距离信息。所以食肉动物的眼睛大都位于头颅的前方。

猴子、猩猩还有人是杂食动物, 他们的眼睛也长在头颅正前方, 可能是因为它们祖先生活在树林里, 树林生活 (攀缘、采摘等) 也十分需要有距离感, 因此双眼的立体视觉发展起来。人的双眼视野中有单眼成分, 也有双眼成分 (图 1-10)。