

# 视觉信息加工及其脑机制

鲍敏<sup>1,2</sup>, 黄昌兵<sup>1,2</sup>, 王莉<sup>1,2</sup>, 张玟<sup>1,2</sup>, 蒋毅<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院心理研究所, 北京 100101
2. 中国科学院大学心理学系, 北京 100049

**摘要** 视觉是人们感知外部世界最重要的途径之一。视觉信号通过视网膜接收后传递到大脑皮层进行加工处理, 最终形成人们所意识到的画面。目前为止, 已有大量研究从不同水平不同角度探讨大脑如何对视觉信息进行加工和表征, 但仍有很多未解的问题。本文综述了视觉信息加工的研究进展, 回顾了脑视觉信息加工过程及组织形式, 总结了近年来有关视觉可塑性、知觉学习、生物社会信息知觉等方面的研究进展。

**关键词** 视觉信息; 可塑性; 视觉适应; 知觉学习; 生物社会信息

视觉是人类感知外部世界获取信息的最重要的途径之一。眼睛是接收视觉信息的“窗口”, 事实上人类每个眼球的构造都相当于包含了镜头、感光芯片和图形处理器的数码相机, 躲在眼睛后面的脑则类似于对信息进行编码、解析、分类、整合、变换乃至赋予意义等操作的超级计算机。通常说的视觉认知是指脑对视觉信息进行加工的心理过程。视网膜接收到光的信息, 转变为电信号后, 再层层传递到大脑视觉皮层的各个脑区, 进行更深入的加工处理, 最终形成由神经活动表征的人们所意识到的画面。

## 1 脑视觉信息加工过程及组织形式

绝大多数(90%)来自视网膜的信息传递到了位于丘脑背侧的外侧膝状体(LGN), 其他信息则传递给包括丘脑枕核和上丘的皮下核团。LGN是视觉信息进入大脑皮层的门户, 每个大脑半球的LGN接收来自双眼对侧的图像信息(即大脑左半球的LGN接收右侧视野的视觉信息), 然后传递给与之同侧的大脑初级视觉皮层(V1)<sup>[1]</sup>。尽管LGN本身不对视觉信息做过多加工, 但它可能通过有序的拓扑投射连接, 建立视觉信息间的时间和空间相关性。LGN的神经元和视网膜上的神经节细胞具有相似中央-外周拮抗式的感受野结构和对光的反应性质, 但与后者不同的是, 它同时也接受大量的来自V1的兴奋性投射<sup>[2]</sup>。目前, 对这种来自V1的大量兴奋性投射的作用还不清楚, 只知道它们尽管不能使LGN神经元产生新的动作电位, 但却可以改变动作电位的幅值(即电脉冲信号的幅值)。

视觉信号自视网膜经LGN传递到V1, 然后分别由两条主要的信息加工皮质通路做进一步处理<sup>[3]</sup>, 称作背侧通路和腹侧通路(图1)。背侧通路包括枕叶到顶叶的一系列脑区(V1/V2-MT-MST/VIP), 主要处理运动和深度相关的视知觉信息。腹侧通路包括枕叶到颞叶的一系列脑区(V1/V2-V4-TEO/IT), 主要处理形状和颜色相关信息。随着图像信息沿视觉通路的层级传递, 功能脑区能从视觉图像及其变化里提取出的信息也从简单到复杂、从具体到抽象。例如, V1神经元能够区分小光棒的朝向、空间位置和运动方向<sup>[4]</sup>; MT神经元则可以区分多个物体运动方向的一致性, 以及它们之间的相对位置关系<sup>[5]</sup>; 到高级视觉皮层的MST和VIP区, 那里的神经元甚至可以通过综合分析感受野内所有物体的运动状态和眼球的转动, 准确推测出观察者自身的运动方向<sup>[6-7]</sup>。需要

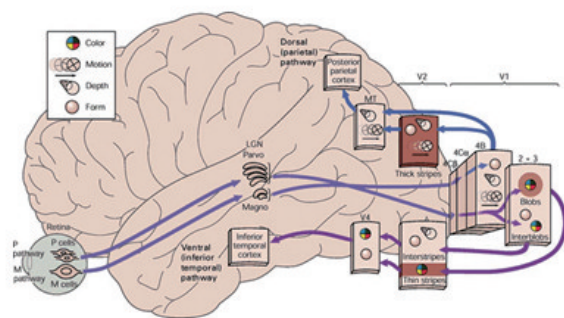


图1 脑视觉信息处理过程示意  
Fig. 1 Illustration of visual information processing in the brain

收稿日期: 2017-08-01; 修回日期: 2017-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31525011, 31671137, 31470983, 31230032, 31371030)

作者简介: 鲍敏, 研究员, 研究方向为视知觉可塑性, 电子邮箱: baom@psych.ac.cn; 蒋毅(通信作者), 研究员, 研究方向为视知觉、注意和意识, 电子邮箱: yjiang@psych.ac.cn

引用格式: 鲍敏, 黄昌兵, 王莉, 等. 视觉信息加工及其脑机制[J]. 科技导报, 2017, 35(19): 15-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.19.001

说明的是,背侧和腹侧通路只是根据视觉信息加工中的主要功能对参与脑区做出的粗略分类。事实上,神经网络是网络化结构,不仅在各个通路内部存在双向投射,两条通路各个脑区间也存在广泛的投射联系<sup>[8]</sup>。

视觉信息处理是人类大脑的核心功能,大脑皮层约 1/4 的面积都参与这项工作。目前看来,脑对视觉信息的处理遵循如下 3 个组织原则:一是分布式,即不同的功能脑区各司其职,如物体朝向、运动方向、相对深度、颜色和形状信息等,都由不同的脑区负责处理。二是层级加工,即存在初、中、高级脑区组成的信息加工通路,初级皮层分辨亮度、对比度、颜色、单个物体的朝向和运动方向等,中级皮层判别多个物体间的运动关系、场景中物体的空间布局和表面特征、区分前景和背景等,高级皮层则可以对复杂环境下的物体进行识别、借助其他感知觉信息排除影响视知觉稳定性的干扰因素、引导身体不同部位与环境进行交互行为等。三是网络化过程,即脑视觉信息处理各个功能区之间存在广泛的交互连接/投射,类似于下级向上级汇报,上级给下级指令,同事间相互协调。考虑到人们对外界图像及其变化的获取是一致的,由于视觉系统处理信息存在限制因素(例如每个神经元只能“看到”一小块视野),以及对图像进行分布式解析和加工的实现方式,这种网络化组织形式也许是人们能形成稳定、统一的视知觉的必要保障。此外,视觉系统只是脑神经系统的一部分,这就造成它对信息处理的过程不可避免地受到大环境的影响,反之亦然。这些影响因素包括情绪状态、经验偏好、关注目标等。例如过于关注某一事物,往往会对周边景物视而不见;而对某个东西越熟悉,人们也越容易把它从复杂背景中识别出来。

## 2 视觉可塑性

视觉功能可以受发育、疾病、环境等多种因素的影响而发生改变,被称为视觉的可塑性。其中,最易理解的是受发育影响的可塑性<sup>[9-10]</sup>。婴儿的很多视觉功能都是在出生后逐步发育完善的。出生后 3 岁的这段时间是视觉发育的关键期。这期间从眼球到视觉皮层的功能都在逐渐改变和完善。关键期内的异常视觉环境很可能会带来视觉相关的疾病<sup>[11-12]</sup>。成年后的一些眼科疾病同样可以导致视觉通路的重塑和新的替代性视觉功能的产生<sup>[13-14]</sup>。

对于正常的成年人,针对环境变化的视觉可塑性每天都在发生。当视觉环境发生变化时,视觉系统总会随之做出适应性地调整,使得神经活动更好地表征视觉系统接收到的输入信息,这被称作视适应<sup>[15]</sup>。大量研究揭示,视适应现象普遍存在于视觉功能的方方面面,涵盖了从最基本的亮度、对比度信息<sup>[16]</sup>,到更为复杂的朝向、颜色、运动、面孔等信息的加工<sup>[17-20]</sup>。值得注意的是,环境变化本身具有不同的时间尺度,即有些环境变化是很缓慢的,例如从早晨到傍晚光的亮度和颜色分布的变化;也有些变化是在短时间内完成的,例如人们从阳光下走进室内时光亮的骤然改变。因此,视适应的控

制机制如何应对不同时间尺度的环境变化是一个值得探讨的问题。关于这个问题,中国科学院心理研究所鲍敏研究组进行了专门的研究,得到了一系列的发现<sup>[21-25]</sup>。他们的研究结果表明,包括对比度适应、运动适应、面孔适应等不同维度的视适应都是由独立的具有不同时间尺度的多重神经机制所调控,其时间尺度短到若干秒,长到几小时。这些机制可能对应于视觉通路上的不同加工层级。他们发现早期视觉皮层(V1)的适应控制机制比中级视觉皮层(如 V4)的适应控制机制的时间尺度更短;此外,控制视适应的多重机制也不依赖于意识,说明即便是意识下的视觉加工也具有不同的时间尺度。

## 3 知觉学习

长久以来人们发现,专家对相关领域物体的识别具有专家化的特点,如品酒师对酒类的丰富味觉经验,音乐家对音色、音质和共振的敏感性,放射科医师的视觉敏感性等。近几十年的知觉学习研究证明,短期经验也足以引起行为改善。知觉学习指通过训练或经验引起知觉上长期稳定的改变,这反映了大脑的可塑性。知觉学习研究开始于 19 世纪中期<sup>[26]</sup>,一直是认知神经科学最前沿和热点的课题之一。最近由于 ERP、fMRI 及计算机建模等方法的引入,知觉学习的发生机制、特点、有效训练方法及其神经机制等基本问题都取得了突破性的进展,在应用转化研究上也有了阶段性成果。

从对基本特征,如朝向、空间频率和运动的检测,到对纹理、模式和物体的认知,人类在几乎所有的视觉认知领域都可以发生显著而稳定的改善<sup>[27]</sup>,尽管这种改善在不同视觉任务上的幅度和持续性上有所不同。与之对应,已有的人类和动物实验发现,经过知觉学习,单个神经元的选择性和细胞反应可靠性增强,细胞反应的同步性变得更好,大脑皮层相关脑区也表现出反应增强<sup>[28-31]</sup>。

特异性和迁移性是知觉学习的两个基本属性。知觉学习的特异性是指知觉学习的效果特异于训练的任务或刺激,如视野位置、朝向、空间频率、运动方向和训练眼等<sup>[32-33]</sup>。特异性将训练效果局限在训练刺激和任务上,随着知觉学习研究的不断深入,研究者发现学习效应在特定的训练条件或实验范式下也可能部分或全部迁移到其他刺激或任务上<sup>[34-35]</sup>。特异性的发现提示知觉信息可能发生在视觉信息加工早期阶段,而迁移性又揭示知觉学习的发生包含了高级认知过程的参与。知觉学习成像研究发现,从初级视皮层到视觉信息加工的中高级阶段等大部分脑区的激活在学习后都有显著改变。这些结果提示,整个视觉通路可能都存在不同程度的可塑性<sup>[27,36]</sup>,不同任务、不同训练模式可能涉及不同阶段、不同幅度的可塑性改变。

知觉学习的神经机制较为复杂。有观点认为知觉学习可以发生在视觉皮层加工信息的最早的阶段(V1),行为学证据表现在学习效果特异于训练时使用的刺激的基本属性,神经电生理证据来自于鲍敏等使用视觉诱发电位的脑电研究,

该研究发现与V1神经元活动紧密相关的C1脑电波成分的幅度在训练后显著增加。与此相反,也有观点认为知觉学习发生在晚期处理的脑区,或者首先发生在晚期脑区而后才会通过反馈影响到早期脑区。两种观点都有较多的证据支持。最近有研究认为,知觉学习是发生在早期还是晚期可能取决于任务的难度,当任务容易时,学习首先发生在晚期的高级加工脑区;当任务困难时,随着训练的深入,编码训练刺激基本属性的早期视觉皮层的神经元功能进一步得到提升。

需要特别指出的是,现有研究一般使用的训练任务相对简单,并且只在训练任务或两三个迁移任务上进行测验,未来的知觉学习研究应该包括更接近人们日常生活的训练任务,并建立一个包括一系列从基本视觉特征到日常视觉功能(如阅读,驾驶或烹饪)的评估测验库。尽管只在训练任务上的特异性改善这一特性具有重要的理论价值,但未来的研究应该考查如何能激发不同任务的迁移性,以使得研究本身更具应用价值。一个可能的获得迁移的策略是训练视觉系统的早期加工阶段,如对比度检测,这可能使得接下来的视觉加工阶段都获益。另一个是针对决策、注意或奖惩等因素,这些因素在相似任务中都可能是普遍分享的。鲍敏研究组最近发现当学习过程中涉及金钱奖惩时,人格因素会影响学习的效果。这一发现证明了知觉学习背后机制的复杂性。

知觉学习之所以被高度关注,主要因为该研究方向与实际应用紧密联系,可以通过训练人为地提升受训者的视觉功能,从而有可能成为临床康复的手段。视知觉学习在临床和商业领域的应用包括弱视、老花、近视、低视力等临床人群治疗、康复训练,或正常人群视觉认知训练等。弱视是指一类视力低于正常标准、无可检测到的前端光学通路器质性病变且不能通过屈光途径加以矫正的患者。传统上的弱视治疗采用遮蔽健康眼的方法,这种方法只对婴幼儿时期的患者有效,大龄儿童和成年后的治愈率几乎为零。近年来,知觉学习研究发现训练后弱视眼的视敏度和对比度敏感性能够表现出显著改善<sup>[37-38]</sup>,且能长期保持。知觉学习研究成果也被应用于低视力人群,通过训练能够帮助被试发展出一个稳定的替代视网膜聚焦点,从而改善患者的阅读能力<sup>[39]</sup>。Polat等<sup>[40]</sup>开发了为老花患者提供视觉训练的手机应用。Huang等<sup>[41]</sup>发现知觉训练对近视患者的裸眼视力也有一定裨益。

但是,目前把知觉训练直接应用于临床和商业还存在一定的挑战。临床和商业应用应使用大样本量、控制组和随机的实验方式,并使用视觉测验库对视觉功能进行前后测并评估改善情况,目前尚缺少有关知觉学习治疗作用的大规模临床验证性数据。目前的知觉学习训练研究主要集中于实验室场景,尚缺乏在临床和特定应用场景使用的优化策略,例如训练强度的选择、训练的分配、刺激的优化、界面的友好性等。最优视觉训练策略的发展还应该包括视觉、计算机建模、生理学和临床等多学科之间的交叉渗透。

#### 4 生物社会信息知觉

人类是天生的社会性动物,需要与他人进行交往,以满足各种需求。能够迅速而准确地识别其他个体,理解其行为和意图,是实现这些社会活动的前提。面孔作为人类最显著的外部特征,能给人们提供非常丰富的社会信息,如身份、性别、年龄、表情、种族等,用于有效地处理错综复杂的社会情形,从而有助于社会交往以及环境适应。除了面孔,另一种视觉线索生物运动也同样包含非常关键的社会信息:情绪、身份、性别等<sup>[42-48]</sup>。由于面孔和生物运动对人类活动的重要性,在漫长的进化过程中,人类视觉系统逐渐获得了对面孔以及生物运动不同于普通客体的加工能力。

有关面孔加工研究一直是认知神经科学的热点,备受国内外研究者的关注。面孔知觉特异性加工的一个重要标志是倒置效应(inversion effect)。将面孔倒置以后,观察者对它的加工能力严重受损,即倒置面孔会导致面孔认知速度变慢且认知错误率增高<sup>[49-50]</sup>。早在20世纪70年代,就有研究者发现面孔加工受倒置的损害程度比其他种类客体严重,由此提出面孔特异性假说<sup>[51]</sup>。面孔的特殊知觉能力在人类生命早期已有所表现。研究发现出生1个月的婴儿对面孔注视的时间长于非面孔刺激<sup>[52-55]</sup>。这种面孔偏好现象在出生几天甚至几小时的婴儿身上即已存在。出生仅2h的婴儿就能表现出对正立抽象面孔的偏好<sup>[56]</sup>。近年来,研究者采用多种神经科学技术探究面孔知觉的神经基础,表明对面孔的加工存在特定的神经机制。来自恒河猴大脑单细胞记录的研究发现,在猴子的颞下回(inferior temporal, IT)腹侧及颞上沟(superior temporal sulcus, STS)存在对面孔特异反应的神经细胞<sup>[57]</sup>。来自PET和fMRI等脑成像技术的研究表明,面孔图片与其他非面孔视觉图片相比,能更大程度地激活枕叶面孔区(occipital face area, OFA),梭状回面孔区(fusiform face area, FFA)以及颞上沟后部(posterior superior temporal sulcus, pSTS)<sup>[58]</sup>,并且这些区域对面孔的特定反应主要表现在大脑右半区域。其中梭状回面孔区主要参与面孔识别相关的任务,而颞上沟后部则主要负责加工与面孔相关的社会性信息(如情绪、性别等)。

相对面孔而言,有关生物运动信息加工的研究则受到较少的关注。在生物运动知觉研究中常用的刺激为光点运动序列。这种刺激通过计算机合成或三维运动捕获系统获取,它去除了人们所熟悉的形状信息,仅用附着在重要关节处的光点的运动表征生物体运动模式(图2)。尽管生物运动在视觉特征上和面孔非常不同,它仍然具有和面孔相似的加工特性。简单的光点运动序列还能和面孔图片一样提供非常丰富的社会信息,如性别、身份和情绪等<sup>[42-48]</sup>。与面孔知觉一样,生物运动具有倒置效应<sup>[59-63]</sup>,生命早期偏好现象<sup>[54, 64-70]</sup>,并且两者涉及共同的特定皮层网络<sup>[71-73]</sup>。

近期研究发现,生物运动除了整体信息外,局部运动本身也包含一定的生物信息。当去除整体形状信息后(随机打乱光点位置或者单独提取出表征脚部运动的两个光点),这

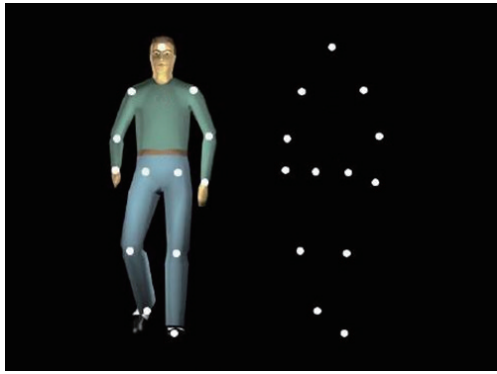


图2 生物运动刺激示意

Fig. 2 Illustration of Biological motion stimuli

种观察者无法识别的局部生物运动信息仍然能够像完整的生物运动信息一样影响视觉搜索、延长时间知觉,更重要的是它能够作为社会线索指引人们的注意<sup>[74-78]</sup>。在人们的大脑中很可能存在对四肢运动敏感的神经机制,用于在形状信息模糊或不完整时检测环境中生物体的存在。

## 5 结论

视觉作为最重要的信息获取途径,其功能的实现需要一个非常复杂的加工流水线。眼睛是接收视觉信息的“窗口”,而大脑则类似于对信息进行编码、解析、分类、整合、变换乃至赋予意义等操作的超级计算机。由于视觉系统自身的发育、发展,以及外界环境的复杂多变,这条加工流水线受进化的影响也已经具备了一定的灵活性。因此脑的视觉信息处理过程具有一定的选择性和可塑性,人们的视知觉体验也是非常主观的。其中知觉学习便是与环境影响相关的一种重要的视觉可塑性现象。此外,大脑对具有进化意义的生物社会信息(面孔与生物运动)的加工具有区别于其他一般视觉信息的特异性。

## 参考文献(References)

[1] Blasdel G G, Lund J S. Termination of afferent axons in macaque striate cortex[J]. *Journal of Neuroscience the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 1983, 3(7): 1389-1413.

[2] Tsumoto T, Creutzfeldt O D, Legéndy C R. Functional organization of the corticofugal system from visual cortex to lateral geniculate nucleus in the cat[J]. *Experimental Brain Research*, 1978, 32(3): 345-364.

[3] Stone J. *Parallel processing in the visual system*[M]. New York: Plenum, 1983.

[4] Hubel D H, Wiesel T N. Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex[J]. *Journal of Physiology*, 1959, 148(3): 574-591.

[5] Maunsell J H, Newsome W T. Visual processing in monkey extrastriate cortex[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1987, 10(1): 363-401.

[6] Britten K H, Van Wezel R J. Area MST and heading perception in macaque monkeys[J]. *Cerebral Cortex*, 2002, 12(7): 692-701.

[7] Zhang T, Heuer H W, Britten K H. Parietal area VIP neuronal responses to heading stimuli are encoded in head-centered coordinates[J]. *Neuron*, 2004, 42(6): 993-1001.

[8] Merigan W H, Maunsell J H. How parallel are the primate visual pathways?[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1993, 16(16): 369-402.

[9] Wiesel T N, Hubel D H. Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1963, 26: 1003-1017.

[10] Hubel D H, Wiesel T N. Ferrier lecture. Functional architecture of macaque monkey visual cortex[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 1977, 198(1130): 1-59.

[11] Dews P B, Wiesel T N. Consequences of monocular deprivation on visual behaviour in kittens[J]. *The Journal of Physiology*, 1970, 206(2): 437-455.

[12] Holmes J M, Repka M X, Kraker R T, et al. The treatment of amblyopia[J]. *Strabismus*, 2006, 14(1): 37-42.

[13] Baker C I, Peli E, Knouf N, et al. Reorganization of visual processing in macular degeneration[J]. *Journal of Neuroscience*, 2005, 25(3): 614-618.

[14] Dilks D D, Julian J B, Peli E, et al. Reorganization of visual processing in age-related macular degeneration depends on foveal loss[J]. *Optometry and Vision Science*, 2014, 91(8): e199-206.

[15] Kohn A. Visual adaptation: Physiology, mechanisms, and functional benefits[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2007, 97(5): 3155-3164.

[16] Fang F, Murray S O, Kersten D, et al. Orientation-tuned fMRI adaptation in human visual cortex[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2005, 94(6): 4188-4195.

[17] Chaudhuri A. Modulation of the motion aftereffect by selective attention[J]. *Nature*, 1990, 344(6261): 60-62.

[18] Clifford C W, Wyatt A M, Arnold D H, et al. Orthogonal adaptation improves orientation discrimination[J]. *Vision Research*, 2001, 41(2): 151-159.

[19] Tanaka Y, Miyauchi S, Misaki M, et al. Mirror symmetrical transfer of perceptual learning by prism adaptation[J]. *Vision Research*, 2007, 47(10): 1350-1361.

[20] Mesik J, Bao M, Engel S A. Spontaneous recovery of motion and face aftereffects[J]. *Vision Research*, 2013, 89: 72-78.

[21] Bao M, Engel S A. Distinct mechanism for long-term contrast adaptation[J]. *PNAS*, 2012, 109(15): 5898-5903.

[22] Bao M, Fast E, Mesik J, et al. Distinct mechanisms control contrast adaptation over different timescales[J]. *Journal of Vision*, 2013, 13(10): 1-11.

[23] Mesik J, Bao M, Engel S A. Spontaneous recovery of motion and face aftereffects[J]. *Vision Res*, 2013, 89: 72-78.

[24] Mei G, Dong X, Dong B, et al. Spontaneous recovery of effects of contrast adaptation without awareness[J]. *Frontiers Psychology*, 2015, 6: 1464.

[25] Mei G, Dong X, Bao M. The timescale of adaptation at early and mid-level stages of visual processing[J]. *Journal of Vision*, 2017, 17(1): 1-7.

[26] Walsh V, Kulikowski J. *Perceptual constancy: Why things look as they do*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[27] Sagi D. *Perceptual learning in vision research*[J]. *Vision Research*, 2011, 51(13): 1552-1566.

[28] Li W, Piëch V, Gilbert C D. Learning to link visual contours[J]. *Neuron*, 2008, 57(3): 442-451.

[29] Schoups A, Vogels R, Qian N, et al. Practising orientation identification improves orientation coding in V1 neurons[J]. *Nature*, 2001, 412(6846): 549-553.

- [30] Yao H, Shi L, Han F, et al. Rapid learning in cortical coding of visual scenes[J]. *Nature Neuroscience*, 2007, 10(6): 772-778.
- [31] Salazar R F, Kayser C, König P. Effects of training on neuronal activity and interactions in primary and higher visual cortices in the alert cat[J]. *Journal of Neuroscience*, 2004, 24(7): 1627-1636.
- [32] Poggio T, Fahle M, Edelman S. Fast perceptual learning in visual hyperacuity[J]. *Science*, 1992, 256(5059): 1018-1021.
- [33] Sowden P T, Rose D, Davies I R. Perceptual learning of luminance contrast detection: Specific for spatial frequency and retinal location but not orientation[J]. *Vision Research*, 2002, 42(10): 1249-1258.
- [34] Tanaka J W, Curran T, Sheinberg D L. The training and transfer of real-world perceptual expertise[J]. *Psychological Science*, 2005, 16(2): 145-151.
- [35] Xiao L-Q, Zhang J-Y, Wang R, et al. Complete transfer of perceptual learning across retinal locations enabled by double training[J]. *Current Biology*, 2008, 18(24): 1922-1926.
- [36] Bavelier D, Levi D M, Li R W, et al. Removing brakes on adult brain plasticity: From molecular to behavioral interventions[J]. *Journal of Neuroscience*, 2010, 30(45): 14964-14971.
- [37] Huang C B, Lu Z L, Zhou Y. Mechanisms underlying perceptual learning of contrast detection in adults with anisometric amblyopia[J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(11): 24.
- [38] Levi D M, Li R W. Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia: A mini-review[J]. *Vision Research*, 2009, 49(21): 2535-2549.
- [39] Kwon M, Nandy A S, Tjan B S. Rapid and persistent adaptability of human oculomotor control in response to simulated central vision loss [J]. *Current Biology*, 2013, 23(17): 1663-1669.
- [40] Polat U, Schor C, Tong J L, et al. Training the brain to overcome the effect of aging on the human eye[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 278.
- [41] Xi J, Yan F, Zhou J, et al. Perceptual learning improves neural processing in myopic vision[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2014, 55(13): 784-784.
- [42] Kozlowski L T, Cutting J E. Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display[J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1977, 21(6): 575-580.
- [43] Pollick F E, Kay J W, Heim K, et al. Gender recognition from point-light walkers[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2005, 31(6): 1247-1265.
- [44] Troje N F. The little difference: Fourier based synthesis of gender-specific biological motion[J]. *Dynamic Perception*, 2002: 115-120.
- [45] Dittrich W H, Troscianko T, Lea S E G, et al. Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance[J]. *Perception-London*, 1996, 25(6): 727-738.
- [46] Montepare J M, Goldstein S B, Clausen A. The identification of emotions from gait information[J]. *Journal of Nonverbal Behavior*, 1987, 11(1): 33-42.
- [47] Cutting J E, Kozlowski L T. Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues[J]. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 1977, 9(5): 353-356.
- [48] Loula F, Prasad S, Harber K, et al. Recognizing people from their movement[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2005, 31(1): 210-220.
- [49] Rhodes G, Brake S, Atkinson A P. What's lost in inverted faces?[J]. *Cognition*, 1993, 47(1): 25-57.
- [50] Valentine T. Upside-down faces: A review of the effect of inversion upon face recognition[J]. *British Journal of Psychology*, 1988, 79(4): 471-491.
- [51] Yin R K. Looking at upside-down faces[J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1969, 81(1): 141-145.
- [52] Morton J, Johnson M H. Conspic and conlern: A two-process theory of infant face recognition[J]. *Psychological Review*, 1991, 98(2): 164-181.
- [53] de Haan M, Humphreys K, Johnson M H. Developing a brain specialized for face perception: A converging methods approach[J]. *Developmental Psychobiology*, 2002, 40(3): 200-212.
- [54] Goren C C, Sarty M, Wu P Y K. Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants[J]. *Pediatrics*, 1975, 56(4): 544-549.
- [55] Maurer D. Infants' perception of facedness[M]. Field T M, Fox N A, *Social Perception in Infants*. Norwood: Ablex Publishing Corporation, 1985: 73-100.
- [56] Mondloch C J, Lewis T L, Budreau D R, et al. Face perception during early infancy[J]. *Psychological Science*, 1999, 10(5): 419-422.
- [57] Puce A, Allison T, Bentin S, et al. Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements[J]. *Journal of Neuroscience*, 1998, 18(6): 2188-2199.
- [58] Haxby J V, Hoffman E A, Gobbini M I. The distributed neural systems for face perception[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2010, 4(6): 223-233.
- [59] Ikeda H, Blake R, Watanabe K. Eccentric perception of biological motion is unscalably poor[J]. *Vision research*, 2005, 45(15): 1935-1943.
- [60] Pavlova M, Sokolov A. Orientation specificity in biological motion perception[J]. *Perception & Psychophysics*, 2000, 62(5): 889-899.
- [61] Sumi S. Upside-down presentation of the Johansson moving light-spot pattern[J]. *Perception*, 1984, 13(3): 283-286.
- [62] Freire A, Lee K, Symons L. The face-inversion effect as a deficit in the encoding of configural information: Direct evidence[J]. *Perception*, 2000, 29(2): 159-170.
- [63] Leder H, Bruce V. When inverted faces are recognized: The role of configural information in face recognition[J]. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 2000, 53(2): 513-536.
- [64] Bertenthal B. Perception of biomechanical motions by infants: Intrinsic image and knowledge-based constraints[M]. Granrud C, *Visual Perception and Cognition in Infancy*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Inc, 1993: 175-214.
- [65] Bertenthal B, Proffitt D, Cutting J. Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions[J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 1984, 37(2): 213-230.
- [66] Fox R, McDaniel C. The perception of biological motion by human infants[J]. *Science*, 1982, 218(4571): 486-487.
- [67] Simion F, Regolin L, Bulf H. A predisposition for biological motion in the newborn baby[J]. *PNAS*, 2008, 105(2): 809-813.
- [68] Valenza E, Simion F, Cassia V M, et al. Face preference at birth[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1996, 22(4): 892-903.
- [69] Cassia V M, Turati C, Simion F. Can a nonspecific bias toward top-heavy patterns explain newborns' face preference?[J]. *Psychological Science*, 2004, 15(6): 379-383.
- [70] Thompson J C, Hardee J E. The first time ever I saw your face[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2008, 12(8): 283-284.
- [71] Bonda E, Petrides M, Ostry D, et al. Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion[J]. *Journal of Neuroscience*, 1996, 16(11): 3737-3744.
- [72] Grossman E, Donnelly M, Price R, et al. Brain areas involved in per-

- ception of biological motion[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000, 12(5): 711-720.
- [73] Allison T, Puce A, McCarthy G. Social perception from visual cues: role of the STS region[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2000, 4(7): 267-278.
- [74] Wang L, Jiang Y. Life motion signals lengthen perceived temporal duration[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(11): E673-E677.
- [75] Wang L, Yang X, Shi J, et al. The feet have it: Local biological motion cues trigger reflexive attentional orienting in the brain[J]. *NeuroImage*, 2014, (84): 217-224.
- [76] Wang L, Zhang K, He S, et al. Searching for life motion signals visual search asymmetry in local but not global biological-motion processing [J]. *Psychological Science*, 2010, 21(8): 1083-1089.
- [77] Zhao J, Wang L, Wang Y, et al. Developmental tuning of reflexive attentional effect to biological motion cues[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 55-58.
- [78] Shi J, Weng X, He S, et al. Biological motion cues trigger reflexive attentional orienting[J]. *Cognition*, 2010, 117(3): 348-354.

## Visual information processing and its brain mechanism

BAO Min<sup>1,2</sup>, HUANG Changbing<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, JIANG Yi<sup>1,2</sup>

1. Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Vision is often recognized as one of the most important senses, as we get much useful information about the world around us from what we see. In this paper we systematically review the research progress on visual information processing. We first focus on the key questions about how the brain processes and represents visual information. Then, we discuss the recent work on visual plasticity, perceptual learning and bio-social information perception, offering a new understanding of visual information processing and its brain mechanism.

**Keywords** visual information; plasticity; visual adaptation; perceptual learning; bio-social information

(责任编辑 祝叶华)