

doi:10.3969/j.issn.1673-4785.2011.01.001

视错觉现象的分类和研究进展

刘宏^{1,2}, 李哲媛^{1,2}, 许超^{1,2}

(1. 北京大学 信息科学技术学院, 北京 100871; 2. 北京大学 机器感知与智能教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 视错觉指的是人或动物观察物体时, 基于知觉经验或不当参照等形成的与客观事实不一致的特定感知. 它能从独特的角度显示出视觉系统的认知功能和机理, 因此研究错觉原理, 建立合适的数学模型和计算机模拟模型, 对心理学、生理学和计算机视觉等领域的发展有着重要的意义. 在收集整理大量错觉图片的基础上, 视错觉可按不同的现象和成因分为轮廓错觉、运动错觉、细胞群错觉、扭曲错觉、尺寸错觉和不可能图形等6类, 其中典型错觉图片被选以介绍其成因和生理、心理、计算机领域的研究现状, 阐述不同视错觉发生在视觉不同认知层次上, 且拥有和正常视觉相同的神经基础, 最后概述了视错觉现象的应用意义和前景.

关键词: 视错觉; 心理学; 生理学; 计算机视觉; 认知科学

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)01-0001-12

The categories and research advances of visual illusions

LIU Hong^{1,2}, LI Zheyuan^{1,2}, XU Chao^{1,2}

(1. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Machine Perception and Intelligence, Key Laboratory of Education Ministry, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: When humans or animals observe things, visual/optical illusions can occur since the perceptions are sometimes inconsistent with reality and are caused by the observers' experiences or improper references. Visual illusions can expose the cognitive functions and mechanisms of the human vision system from a unique perspective. Therefore, they help people to understand vision principles, to establish appropriate mathematical models and computer simulation models, and significantly promote the development of many research fields such as psychology, physiology, and computer vision. In this study, due to various phenomenon or causes, 620 illusory pictures were analyzed and divided into 6 categories: contour illusions, motion illusions, cell-population illusions, distorted illusions, size illusions, and impossible objects/3-D illusions. Additionally, the causes and research status of typical illusions were presented. Furthermore, the conclusion was drawn that different illusions occur in different cognitive levels of the vision system and have the same neural basis as normal vision. Finally, the applications and research future were described.

Keywords: visual illusions; psychology; physiology; computer vision; cognitive science

人类研究视错觉的历史可以追溯到公元前4世纪亚里士多德(Aristotle)观察瀑布时记录的运动后效(after-effect), 柏拉图(Plato)也曾指明人类永远不可能完全避开错觉去认识一切真相. 后来几千年里, 视错觉一直处于曲解的位置上, 直至19世纪末德国E. Mach发现侧抑制现象时还未获得足够重视^[1-2]. 随着20世纪初德国格式塔(Gestalt, 意为完

型, 核心思想是整体大于局部之和)理论逐渐传播, 相关研究才逐渐发展. 该领域初期多采用行为实验等传统心理学方法获得推论, 随着生物实验技术水平的提高和20世纪60年代, S. Coren和J. S. Girgus在几何错觉研究中引入系统论方法, 其重心逐渐转向神经生物学和计算机领域, 设计实验发现相关神经基础来提出和论证心理学说, 模拟符合人类视觉机制的数理算法, 以促进认知心理学、神经生理学和计算机视觉领域的发展.

目前视错觉的心理学解释有格式塔理论(Gestaltism)、生态视觉理论(ecology theory)、建构主义(constructivism)、亮度对比假说、视野学说、常性误

收稿日期: 2010-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60675025, 60875050); 国家“863”计划资助项目(2006AA04Z247); 广东省自然科学基金资助项目(9151806001000025); 深圳市科技计划及基础研究计划资助项目(JC200903160369A).

通信作者: 李哲媛. E-mail: zheyuanli@cis.pku.edu.cn.

用说、反常性误用说、先验论和经验主义等,但没有一种能适用所有视错觉. 生理学解释有侧抑制神经网络说、眼动理论、三色色觉学说、三环节论和色觉相对处理学说等,并有神经生理实验数据支持,但同样在完善中^[1,3-13]. 视错觉现在主要有哪些种类,形成原理和基础是什么,还可以应用到信息处理等专业的哪些方面,这就是本文要回答的问题.

1 研究现状和发展前景

视觉是综合信息处理和主观认知的多层次过程,视错觉同样如此. 综合各学科可看出哲学探讨视错觉只注重简单的动作表面和整体意义,而未认识到复杂的信息处理过程;传统心理学试图将高级认知活动分解成简单心理成分,侧重用整体结构实现心智过程的内部还原(如自底向上、自上而下加工),却未追究产生具体认知的神经活动基础,不能证明外在视觉刺激如何转化为内在心理表征;神经生理学从神经元、神经组织、神经网络和整体脑区等水平上来确认错觉物理实现,却无法知道主观认知如何作用. 计算机学科若想实现最贴近自然视觉的算法,就必须了解综合以上学科研究的认知科学.

视错觉研究属于认知科学,仅在欧洲和北美就有 60 多所大学(如 Harvard、MIT、Dartmouth、Princeton 等)建立了专门的研究队伍^[3]. 目前研究多偏重“提出假说,结合计算机技术和心理学理论,进行行为认知和神经生理实验,建立神经和数学模型”的方式,实验技术有患者临床研究、EEG、ERP 和 fMRI 等,研究成果多发表在 Nature、Science、JNS、PNAS、Current Biology、Neuron、ACM 等顶级期刊、会议和相关网站上. 美国 Neural Correlate Society 从 2005 年开始举办的“Best Visual Illusion of the Year Contest”,已有美、德、英等十几个国家的视觉科学家和艺术家参加,并定期在 Scientific American 上发表研究进展. 当前视错觉研究人员代表有德国 Freiburg 大学的 M. Bach、美国 Baylor 医学院的 D. M. Eagleman、日本 Ritsumeikan 大学的 A. Kitaoka、意大利 Sassari 大学的 B. Pinna 等. 我国错觉研究从 20 世纪 50 年代开始,各大高校和研究所已将认知科学研究列为重要课题,如北大、清华、中科院和北师大等. 一些原从事心理学、语言哲学研究的学者,及时地捕捉到先进科研信息开始研究错觉,科研成果多属于图形分析、脑机能研究、视觉注意机制、数理模拟和算法建立方面,除发表在外国期刊外,国内典型错觉的简单介绍和造型设计类文章多发表于《心理学报》、《心理科学进展》、《生理科学进展》及高校学报等综合性自然科学期刊.

21 世纪各国对认知研究更加重视. 美国国家基金会、商务部提出聚合技术概念(nanotechnology,

biotechnology, information technology and cognitive science, NBIC),其中 C 为认知科学^[14];日本科技委员会于 1996 年提出为期 20 年预算 200 亿美元的“脑科学时代计划”(the age of brain science),包括认识脑(思维研究)、保护脑(治疗)、创造脑(信息处理系统)阶段,将脑的认知功能和信息处理机制研究视为重中之重;欧盟第七研究发展框架(the seventh research framework program)在 2009 年发展规划中进一步规划了大脑相关研究项目.

我国自 2001 年正式加入“人类脑计划”后,更加重视脑和认知领域的研究. 继 2005 年科技部批准建立中科院和北师大相关国家重点实验室后,2006 年《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》出台,将脑和认知科学作为八大科学前沿问题之一^[15];2008 年,国家自然科学基金委员会发布“视听觉信息的认知计算”研究计划,希望从人类视觉机理出发,构建新的计算模型和方法,在基础理论研究和与视觉认知相关的脑机接口等关键技术上取得重要进展.

2 视错觉分类

视错觉目前有背景错觉、侧抑制、缪勒莱耶错觉、深度错觉、视觉后像、填充错觉、透视错觉、伪装错觉、知觉模糊、透明错觉、轮廓错觉、似动错觉等多种类型^[1,16-17]. 视感知的复杂性使认知在不同层次上形成不同种类的视错觉,如轮廓错觉中的 Necker 立方体和细胞群错觉中的颜色后效,前者基于不同组神经元群体竞争结果,后者基于单个视神经节细胞(ganglion cell)自身特性;而同种类的视错觉可能表现为不同现象,如 Hermann 栅格和颜色后效都可用细胞群错觉的神经节细胞特性解释,但分属视网膜上的侧抑制和脑纹外区加工后 V4-complex 区发生的错觉^[18]. 故已有的错觉分类经常出现归纳现象覆盖面小、同种错觉重复分类、不同错觉错归为同类结果等不足,表 1 归纳了国内外几种较全面的错觉分类,并进行了简要评论^[1,2,6,16].

表 2 在收集整理 620 多张典型错觉图片基础上,以避免种类交叉为出发点,按不同现象和成因分为六大类错觉:尺寸错觉指人根据深度线索和环境信息等视觉规则对相同面积、长度、体积的物体得出不同认知的现象;细胞群错觉指人因视觉神经上功能相似的神经元群或神经组织作用对刺激的亮度、颜色、方向模式产生误解的现象;轮廓错觉专指人或动物对图像中边缘梯度信息和环境认知出现错误的现象,包括主观轮廓、知觉反转等;不可能错觉是指局部平面结构理解合理却不能客观存在的图像;扭曲错觉是指人把规则的点、线、面等结构元素感知为歪曲结构的现象;运动错觉是指人结合环境线索对

运动刺激判断出错误方向、目标等或从单一静态刺激感知出运动效果的现象。

表 1 几种现有视错觉分类

Table 1 Several current categories of visual illusions

国家	姓名	分 类	优 点	缺 点
德国	M. Bach	亮度对比错觉、运动错觉、几何及角度错觉、尺寸恒常性及不可能图形、格式塔效应、色彩错觉	范围广,种类多,约 86 种现象/图片	部分原理或现象相近的分类可以合并
美国	Eagleman	侧抑制、后效、主观轮廓、多重刺激(如知觉反转)	生理学成因 + 研究历史,脉络清楚	涵盖范围少,约 20 种现象/图片
	BVIC	后效、背景错觉、颜色错觉、亮度错觉、不可能图形、隐藏图形、运动错觉、旋转错觉、形状错觉、梯度错觉等	图片新颖详细(2005-2010),以各类图片的表象特征分类,约 330 种现象/图片	各类图片量小,类间有重复,可以按现象成因合并
日本	Kitaoka	几何错觉、亮度/明度错觉、颜色错觉、视觉竞争、运动错觉、其他错觉	以错觉的现象和成因分类,覆盖全面、各类错觉有详细研究和标注,约 75 种现象/图片	亮度错觉、颜色错觉、视觉竞争、其他错觉间多重复
中国	罗正理	几何图形错觉、对比错觉、形景错觉、似动错觉、运动错觉、其他错觉	覆盖全面,条理较清楚,约 1 300 种现象/图片	前 5 项内容相对单薄,把太多没有共同点的种类都归于其他错觉
	孔彬	长短、大小、平行、弯曲、视觉两义性、知觉整体性、简单性、完美性、理解性	从知觉功能分类角度新颖,约 11 种现象/图片	种类过少,集中于轮廓错觉和扭曲错觉

表 2 视错觉重新分类

Table 2 The new category of illusions

分 类	子 类	例 子
尺寸错觉	深度错觉	Ponzo 错觉及诸多变体 Muller-Lyer 错觉、月亮错觉、正弦错觉、Zollner 错觉、Horizontal-vertical 错觉、Sander 错觉、Shepard 桌面错觉、Ehrenstein 错觉(1941 年)、Ebbinghaus 错觉等
细胞群错觉	视觉后效	颜色后效(正、负后像、McCollough 错觉等)、运动后效(瀑布错觉、螺旋后效、圆盘后效等)
	侧抑制	Wertheimer-Koffka 环、Craik-O' Brien-Cornsweet 现象、Scintillating 栅格错觉、棋盘错觉、Hermann 栅格、调色盘错觉、Mach Band、White's effect、Chevreul 错觉、Vasarely 错觉等明度对比变体
	填充视觉	Bach motion 错觉、Watercolor 错觉、Wave-linecolor 错觉
轮廓错觉	知觉模糊	墙角错觉、Necker cube 等
	伪装错觉	达尔马提亚狗、耶稣像等
	背景错觉 主观轮廓	前景-背景错觉(图形背景错觉、二义性图像)及诸多变体 Kanizsa 三角形、Ehrenstein 圆环及诸多变体
不可能图形	—	不可能三叉戟、不可能楼梯、不可能三角形、不可能房间等
扭曲错觉	—	Hering 错觉、Fraser 错觉、Zollner 错觉、Popple 错觉、Cafe Wall 错觉、Checkered 错觉、Poggen-dorf 错觉、七巧板错觉等
运动错觉	似动	循环蛇、辐条错觉、Ouchi 错觉、Ternus Display、Fraser-Wilcox 错觉、Sigma 错觉等
	—	Pinna-Brelstaff 错觉、Flash-Lag 错觉、Reverse phi 错觉、Kaleidoscope 错觉等

与其他分类方法相比,表2的分类方法按汇总错觉现象,探寻心理生理学成因,综合现象和成因分类,将现象相近的错觉分成子类,这样就避免了错觉种类重复.如运动后效通常由于现象和运动有关而被划分在运动错觉里,但其神经基础是视网膜上神经元群体响应时间差异,而非似动现象的心理认知,故被划分到细胞群错觉;又如轮廓错觉中有主观轮廓、伪装错觉、知觉模糊等子类,主观轮廓指从邻近区域间明度、色彩突然变化的同质刺激中感觉到并不存在的轮廓、线、面的现象^[19],伪装错觉指从一幅包含大量无关联成分的图像中感知出有意义图形的错觉,两者诱导线索不同,但都从点、线段、图形等元素信息判断出区域边缘,从而扩展整体图形意义,本质都基于视觉的边缘提取和自我修复能力,这和V2主要决定真实和虚幻轮廓知觉的生理学研究成果是相一致的^[20].

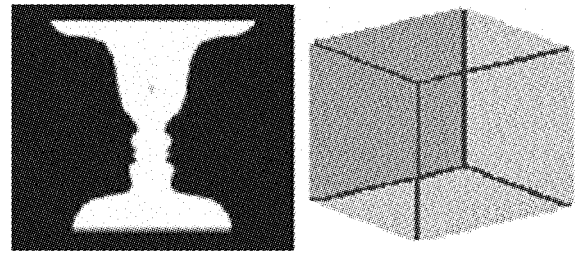
根据目前研究成果来看,视觉是将神经节细胞接受的初级信号按同类组合的模式逐级整合,到达基础节点(essential node,对目标刺激属性有特定反映的神经元)所在的脑区后,才产生完整的知觉反应,逐级整合过程中每一级神经元都向高一级和低一级的神经元发出前馈和后馈^[20].结合D. Marr的计算理论,视错觉可以被看成信息处理的生理机制和脑多层次认知的心理机制结合的结果,其神经基础和产生正常视觉的神经基础一样,只是主观线索、经验等导致心理认知发生变化,以及具体神经活动幅度、时间、类型上的差异.接下来就从以下几种视错觉中选取最有代表性的图例验证这一结论.

3 典型视轮廓错觉原理及其在计算机视觉领域的研究进展

3.1 轮廓错觉(contour illusions)

轮廓错觉由来已久,1915年丹麦心理学家E. Rubin在18世纪法国印刷品基础上创造了经典的Rubin壶^[21](如图1(a)).图形的客观结构没变,变的只是人类对图形特征的认知,这种认知反转显示脑皮层对输入信息有一个积极加工过程,这也是目前神经学家研究意识(consciousness)的一个有用工具.轮廓错觉一般分为3种.

1)视觉反转(多重刺激/歧义图形,ambiguous figures):图形不变,观察者可从中看出2种或2种以上图像,这几种认知也可循环转换.常见类型有前景/背景反转(figure-background illusion,如图1所示)等.



(a) Rubin 壶^[22] (b) Necker 立方体^[21]

图1 前景/背景反转

Fig.1 Figure-background illusion

2)图像不变,观察者因观察角度或距离改变而产生不同认知,常见有回转错觉(如图2所示)、3-D反转错觉(reverspective).



(a) 从一个角度看到带华冠的人物像 (b) 图像旋转180°后看到的带锥形帽的人物像

图2 回转错觉^[4]

Fig.2 Circular illusions^[4]

3)展现2种图形变化过程的“渐变错觉”.但无论如何观察者在某一时刻只能认知其中1种图形的存在(如图3所示).

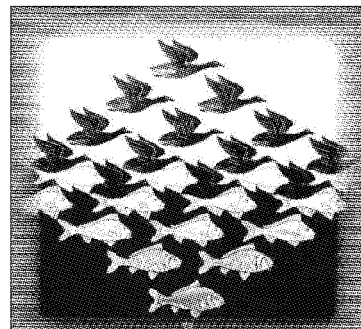


图3 飞鸟和游鱼的渐变^[4]

Fig.3 The change between birds and fish^[4]

轮廓错觉的近期研究多集中于该错觉相关的激活脑区和信息处理方式上.1996年D. A. Leopold等记录猴的V1、V2、V4和MT区对多稳态刺激的反映,发现只有小部分神经元响应当前主宰刺激,其余神经元都响应非主宰或被抑制的刺激^[23].次年D. L. Sheinberg等宣布在视觉信息加工的高级阶段,颞上沟(superior temporal sulcus)中对主宰刺激响应的神经元比

例会增长,直到颞叶皮层中绝大部分 (temporal cortex) 神经元都被主宰刺激相关的方式激活为止^[24]. 这说明有不同神经元群体控制对刺激的感知状况. 而 J. V. Dodd 等发现猴 MT 区神经元在多稳态刺激中响应的概率大于它们在运动方向判断中的相关性^[25], 这可能说明小群体神经元对前者的决定活动更集中. 2003 年 A. J. Parker 等用 FMRI 技术,除了支持 Dodd 的结论外,还发现被试有个决策处理时期,即对歧义图形的每种形态认知都对应一组神经元活动,几组神经元活动的竞争结果决定最终的认知形态^[21],在心理物理学阈值附近的一点变化都会导致认知反转. 2005 年 J. Kornmeier 等在人脑枕部找到一个与反转相关的早期 ERP 信号,并解决了反转时间的估计问题^[26],4 年后他们又从意识控制 (volitional control) 和离散刺激 (discontinuous stimulus presentation) 方向入手,发现两者都可以独立控制认知反转时间,并且不同时间范围中反转来源于不同的神经处理机制 (top-down 或 bottom-up)^[27].

综上所述,认知反转是由 2 组或 2 组以上神经元群体竞争的结果,不同的刺激信号从初级神经元和视皮层放大并上传,结合被试的先验经验和意识控制等,在猴的 MT 区 (人类相似脑区为 V5) 上进行反转,反转过程可用反转率和时间等描述. 这类似于 2007 年 Liu 在信息处理中采用的多组智能体线索竞争机制,即用颜色、亮度、方向等表征目标的不同特征线索,并按跟踪目标变化进行竞争,注意力始终注意当前最显著的一组智能体线索^[28].

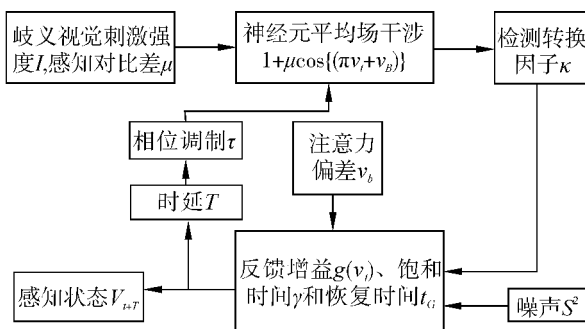


图 4 歧义认知流程图——递归注意力干涉模型^[29]

Fig. 4 Simplified block diagram of perception-attention recursive interference model^[29]

从整体水平上来看,近年学者比较热衷从数学和认知模型的角度来分析认知反转所涉及的深层活动,为计算机模拟认知输出奠定基础. 2006 年, N. Furstenuw 利用电磁场干涉和非线性的动态模型成功模拟知觉反转,如图 4,把基于神经元平均场 (neuronal mean fields) 的认知过程量化成具有干涉和反馈环节的动态数学递归控制过程^[29],将诸多认

知理论和机器视觉结合起来. 同年 A. J. Noest 等对认知反转进行伽马分布拟合的双参数分析 (形状 k 和 λ 尺度),发现反转率随不同刺激而变化,其中最重要的参数是大致垂直于反转率均值 $\mu = k \cdot \lambda$ 的一个参数 $\lambda/k = \lambda^2/\mu$,从而方便对不同刺激和任务中的意识进行量化研究^[30]. 2007 年他们提出一个最小神经模型:

$$\begin{aligned} \tau_H \partial_t H_i &= X_i - (1 + A_i) H_i + \beta A_i + \gamma S(H_j), \\ i, j &\in \{1, 2\}, i \neq j, \\ \tau \partial_t A_i &= -A_i + \alpha S(H_i). \end{aligned}$$

式中: i, j 标记 2 组神经元群体,认知结果为 H_i (模拟神经元膜电位,其反双曲转换为 $S(H_i)$ 模拟神经元激活率),时间尺度 τ_H ,视觉刺激 X_i , γ 决定交叉抑制程度, A_i 为短暂历史信号和 β 确定与认知 j 的联合程度, α 调制 A 的幅度. A. J. Noest 等认为反转结果主要取决于神经元分流适应和神经学阈值的互动结果,刺激的 ON/OFF 时间控制复杂知觉决策序列的产生^[31]. 继 H. Atmanspacher 等用 Necker-Zeno 模型定量研究多稳态刺激认知中反应时间和反转率后^[32], J. W. Brascamp 等对持续和间歇展示的歧义刺激对比研究发现:间歇展示的刺激产生的知觉周期性反转率取决于间歇时期空白时间的长短,并用不同时间尺度加权来改进最小神经模型:

$$\begin{aligned} \tau_H \partial_t H_i &= X_i - (1 + \sum A_i) H_i + \\ &\max\{0, \beta \sum A_i - \beta \sum A_j\} + \gamma S(H_j). \end{aligned}$$

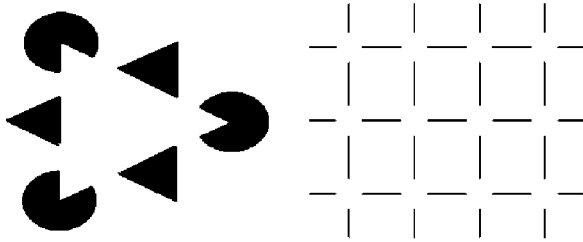
式中: β 决定信号 A_j 参与程度,该模型很好解释了反转中神经网络竞争和相关活动^[33].

值得一提的是,2002 年 T. J. Andrews 等研究人类面孔鉴别的特定脑区 fusiform face area 时发现,当被试给予一定边界线索时能从 robin vace/face 刺激中识别出面孔,且具有和见到真实面孔相同的响应区域^[22]. 综上所述,可推断人类对知觉反转在神经元水平上有一个表征 (representation) 刺激的竞争阶段,这个阶段动态递归,且利用与真实刺激时相同的神经信息通路.

3.2 主观轮廓 (illusory/subjective contours)

1904 年 Schumann 首次描述该错觉,最著名的例证为 1941 年 Ehrenstein 的 Ehrenstein 圆环和 1955 年意大利人 Kanizsa 提出的 Kanizsa 三角,见图 5 所示. 主观轮廓共同点为:静止就可看到、单眼视觉时即能出现、有错觉亮度差异、有深度视觉 (轮廓两边一面在另一个面上). 任旭明在 1996 年总结主观轮廓有心理和生理两方面解释:心理解释认为主观轮廓发生在中枢神经系统,包括格式塔学说、认知学说、深度线索学说等;生理解释认为发生在外周神经

系统,包括特征觉察假说、侧抑制亮度对比假说、高空间频率过滤假说等^[18],但并不统一。



(a) Kanizsa 三角形 (b) Ehrenstein 圆环

图 5 Kanizsa 三角与 Ehrenstein 圆环^[19]

Fig. 5 Kanizsa triangle and Ehrenstein ring^[19]

1980 年张厚粲等通过比较刺激深度线索和被试主观图形完整化倾向在主观轮廓形成中的作用,发现深度线索是形成主观轮廓的直接决定因素^[34]; 1984 年 Von der Heydt 等首次报道猴视皮层 V2 区约 44% 的端神经元(end stopped cells)能检测主观轮廓方向;随后他们用连续和间断的线段、条块刺激对恒河猴实验,得出 V2 神经元对二者有相似的激活反应^[35-37];1989 年,马振华通过研究主观轮廓刺激诱导面积和诱导部分反射率对错觉感知的影响发现,侧抑制引起的明度对比起着主要作用^[38];而 Grosf 等得出初级视皮层单个神经元能检测主观轮廓方位^[22]. 这说明刺激的深度和明度线索会激活视网膜神经细胞,信号传至 V1 检测图像元素方位,V2 区用以判断区域边缘,且 V2 区对真实轮廓和主观轮廓的处理是相似的. 之后的发现也证实了前人的猜测;2001 年 T. S. Lee 等在 V1 区有同 Von der Heydt 类似的发现,但 V1 比 V2 的反应时间要长,这表明大脑在更高级区域的反馈活动基础上来填补主观轮廓. 因此认为主观轮廓的主要认知部位在脑视皮层 V1、V2 区^[39]. 同年,B. M. Ramsden 等用光成像和电生理学技术,比较“abutting line grating”刺激和真实刺激对 V1 区的影响,发现能让 V1 有强烈响应的主观轮廓方位和真实刺激轮廓方位是相反的,因此推断 V1 神经元对主观轮廓是一个“去强调(de-emphasis)”过程,它辅助 V2 区完成人对主观轮廓的认知^[40].

2006 年,M. L. Seghier 等综合 1991 年来主观轮廓的 20 多项神经成影方面的主要研究,从研究技术、发生时期、位置、信息处理机制等方面总结了成果和问题^[41]. 2007 年 Zhan 等对人脑 V1/V2 区和猫脑 A17/18 区研究发现:主观轮廓刺激分别在人脑和猫脑这两区域中产生的映射(map)都相反,从而认为映射的恒定性或相反性由刺激中诱导元素的空

间频率和脑皮层神经元的空间过滤特性共同决定^[42]. 同年,Kouhsari 等用 fMRI 技术发现初级视皮层 V1、V2 和相关高级视皮层(V3、hV4 等)都适应主观轮廓的方向选择性,并且按初级—高级顺序递增^[43],这是对以前主观轮廓只涉及早期视皮层和腹侧通路观点的重要拓展.

综合其他生理学发现可知,人类对主观轮廓主要由 V1、V2 区完成,V2 对来自 V1 的信息进行轮廓方向、明度变换方面的处理,在向更高级神经中枢传递信息的同时又对 V1 进行反馈,V2 是处理主观轮廓的关键脑区,V1 为辅助脑区,这与识别真实轮廓时 V2 的活动一样;但 2008 年 G. Sary 等的研究说明起码猕猴下颞叶皮层(inferior temporal cortex)对二者的处理还有所不同^[44].

除传统生理研究外,近年学者也尝试从信息处理和数学模拟等方向开拓研究:Grossberg 等人在 1994 年提出 FACADE(form and color and depth)理论,认为边界轮廓系统(boundary contour system)和特征轮廓系统(feature contour system)共同作用形成了 3-D 轮廓和背景前景感知,建立了一个可解释主观轮廓的综合性计算模型,是当今部分边缘图像处理算法的基础^[45]. 2008 年,Y. M. Jung 等用 level-set 提出一个变偏微分一阶能量最小化的数学模型,从而可对大量主观轮廓进行数学分析和计算机模拟^[46]. 同年,M. A. Halko 等认为主观轮廓错觉是内插(interpolation)、外推(extrapolation)和图形(figure)类 3 种信息处理机制的共同作用结果,而非先前研究注重的单机制作用^[47]. 由此可以看出,对主观轮廓深层成因的研究,有利于模拟人类对复杂刺激的边界提取鲁棒性和认知修复能力,从而指导计算机视觉方向建立特征提取模型和边缘算子.

Ullman、ShaShua、Rosa 等的不同算法和 Grossberg 的 FACADE 主观轮廓感知修复模型研究则为计算机模拟主观轮廓感知奠定了基础,如国防科大的邵晓芳等提出一个计算机分级模型构造了边界轮廓系统和特征轮廓系统,模拟了视觉系统的有向边缘检测、竞争-合作机制和轮廓边缘端点重组,有效实现了图像轮廓提取^[48].

3.3 运动错觉(motion illusions)

本文中的似动(apparent motion/illusory motion)指在某些条件下人由单一刺激可以产生运动感觉,而刺激实际并不运动,而非将客观不连续刺激位移认知成连续位移的现象. 1912 年德国格式塔心理学创始人 Max Wertheimer 说明后者是一种通过视觉幻觉产生运动假象的 Phi 现象,他认为刺激的不同部

分引起脑区相应皮层区域的兴奋,在适当时空条件下兴奋回路发生融合短路得到运动印象.而心理学上 Korte 定律说明了刺激强度、时间间隔和空间距离间隔对产生似动影响的相互关系.

前者典型图例有周边漂移错觉(peripheral drift illusion)和旋转蛇(rotating snakes)^[49],如图 6~7 所示,此类“似动”最早于 1875 年被德国人 Exner 发现^[1].1983 年 R. L. Gregory 等首次发现不对称的亮度变化能引起运动错觉^[50].2003 年,日本 Ritsumeikan 大学的 A. Kitaoka 等对似动现象进行归纳,认为亮度渐变和线段边缘断层是 2 个基本因素^[51],并根据此结论设计出“旋转蛇”及其系列变体(如图 8 所示).

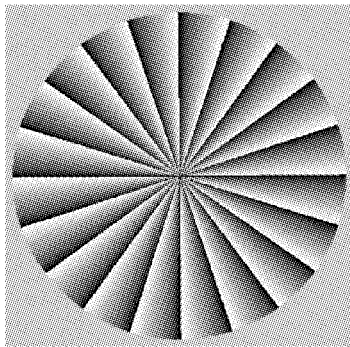


图 6 周边漂移错觉^[51],每个锐角扇形亮度都在渐变,产生微弱的旋转错觉

Fig. 6 Peripheral drift illusion^[51]. The circle appears to rotate clockwise

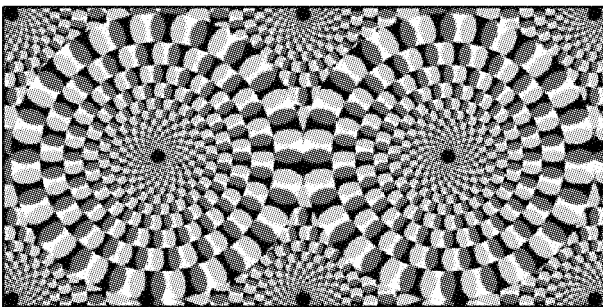
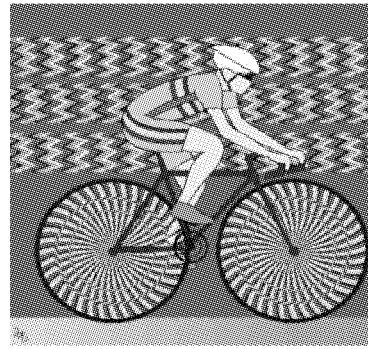


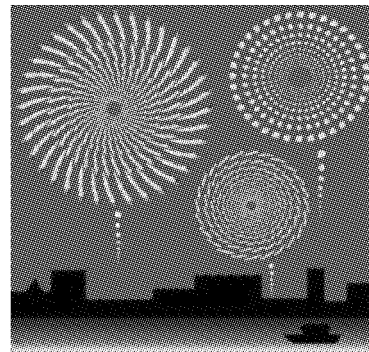
图 7 旋转蛇部分效果^[46],图中每个圆盘都在旋转,但被凝视时错觉消失

Fig. 7 Part of the rotating snakes^[46]. Each disc seems to rotate, but to be static when stared

然而 A. Kitaoka 等仅解释了错觉设计规则,并未找到生理机制.同年,他又与 B. R. Conway 等对猴和人实验,除肯定亮度对比是必要因素外,还发现 V1、MT 区有方向选择特性的神经元,这是首次发现 V1 单神经元能对重复不对称现象(Repeated Asymmetric Patterns, RAPs)产生方向性响应,说明了低水平神经元对似动的解释作用,并提出基于亮度对比的反应时间差模型(contrast-dependant latency-difference model)^[49].



(a)扫视车轮和背景可产生微弱运动错觉



(b)扫视烟花有旋转错觉

图 8 旋转蛇图形的一些变体

Fig. 8 Two variations of rotating snakes

2005 年 Backus 等认为原因是亮度(luminance)和对比度(contrast)响应的神经元随时间变化而变化,在高低亮度对比条件下响应时间不同,对比度越高,响应时间越短,从而使 RAPs 相对快速运动^[52].次年 P. Sterzer 等用 fMRI 技术研究似动,除 V1 参与外,还首次发现在此过程中 V5 区会产生增强反馈,与 V1 皮层间发生耦合^[53];而 T. Kumar 对 Enigma 错觉进行心理测试发现人们产生似动速率和真实刺激旋转起来速率是同样的^[54];2008 年丁晓攀等利用 ERPs 技术发现初级视皮层产生错觉形成的最初加工^[55];同年, B. Ahmed 等对白鼬的脑皮层 17、18、19、21 区神经元群的膜电位动态特性进行研究,发现皮层产生的运动反馈信号和去极化活动与似动有关^[56].由此可见,似动现象是在 V5 神经元水平上进行认知的, V1 接受刺激各类信息,向高级视皮层传送,不同对比度线索到 V5 区时激活对真实运动响应的神经元,从而产生运动的心理认知.似动也与颜色、听觉等刺激相关,但目前还没有较成熟的信息处理模型来表征似动.

似动现象与其他类型刺激的关系也是近年研究的对象:2006 年 V. S. Ramachandran 等用与颜色关联的数字对被试实验发现共感(synesthesia)中的色彩能产生似动^[57];次年 D. Sanabria 等发现空间注意力在跨模态信号(cross-modal)互动中能削弱似动效

果,认为在接收运动信息过程中,空间注意发挥作用的时刻至少不晚于视听信号互动^[58];以及 E. Freeman 等通过双耳接受不同时信号成功影响似动效果,从视听融合角度去研究视觉感知运动方向的时空处理 (spatio-temporal processing) 特性^[59],这说明似动可能是多种认知途径交互作用的结果。

3.4 细胞群错觉 (cell population illusions)

除了似动,细胞群错觉是最常见的基于神经元群体的错觉,包括关于亮度的侧抑制 (lateral inhibition),关于亮度、运动的后效 (after-effect) 等. 这里介绍侧抑制:视网膜由许多光敏细胞组成,单个细胞的激活会影响邻近的细胞活动,当刺激某个细胞得到较大响应时,再刺激邻近细胞,该细胞反应会减弱,即周围细胞抑制了其反应,这种现象被称为侧抑制. 典型例子有 Hermann 栅格 (如图 9 左半部分所示) 和同时对衬 (simultaneous contrast, 如图 10 所示).

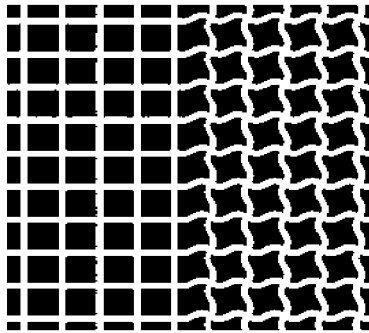


图 9 左边正常的 Hermann 栅格和右边消失错觉的 Hermann 栅格^[2]

Fig.9 The left original Hermann grids and right distorted Hermann grids^[2]

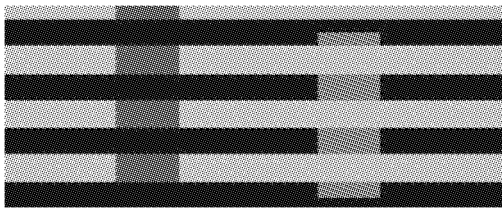


图 10 Munker-White 错觉图的变体,同时对衬,图中左右两矩形框灰度一致,源自 E. Bach

Fig.10 Munker-White simultaneous contrast illusion. The two vertical stripes have the same gray from the website of E. Bach

1865 年, E. Mach 首次发现马赫带现象:在亮度逐渐变化的条纹交界处会发生亮带更亮、暗带更暗的错觉^[60]. 1870 年, L. Hermann 发现“Hermann 栅格”:以矩阵排列的黑方格交叉处会闪现灰色斑点,斑点被凝视时不可见^[1]. 1956 年, H. K. Hartline 通过生物实验微观上证明了侧抑制的存在^[60]. 4 年后 Baumgartner 提出侧抑制学说,认为栅格中的灰斑错

觉主要源于视网膜神经节细胞 (ganglion cells) 的生理结构和响应特性^[61],此后大约半个世纪 Hermann 栅格都被认为是侧抑制所致. 1996 年 Xiang 等发现节细胞有 2 种中央-周边结构,通过锥状体输入的红绿/蓝黄信息差传送色彩信息,其在传导速度、亮度差异敏感度、分辨率以及分布位置的差异是许多视错觉产生的生理基础,依然支持了侧抑制学说^[6].

与此同时,不少科学家发现侧抑制并不能解释 Hermann 栅格中的所有现象. 如 1984 年 Wolfe 发现栅格间的十字交汇处的位置和数量会影响错觉效果^[62];2004 年 J. Geier 等对栅格形状稍加修改,灰斑效果就消失了 (见图 10 右半部分);同年 M. Bach 认为 Hermann 栅格还与视皮层其他加工结构,如有方向选择特性的神经元有关;2008 年 J. Geier 又指出栅格交线是否笔直是产生灰斑的主要因素^[63-64].

随后部分学者开始转向以不同的角度解释 Hermann 栅格. 比如与视网膜的联系:2005 年 Ares-Gomez 等对原发性开角型青光眼患者进行研究,发现该错觉是关于栅格线宽度的一个空间调谐函数^[65];2 年后 M. J. Cox 在不同亮度、偏心率等条件下用基于标准神经节细胞感受野的模型,良好预测了 Hermann 栅格的空间调谐性,认为该错觉是在视网膜节细胞特性上产生的结果,而非脑皮层^[66]. 又比如与整体感知的联系:2007 年, D. Corney 等训练一个神经网络来说明视觉系统的亮度恒常性,从错觉定义本身理解 Hermann 栅格现象^[67];2008 年 M. Bach 总结近年来的科学发现指出侧抑制已不能解释该错觉.

然而目前侧抑制还是 Hermann 栅格的通用解释,当前的研究说明侧抑制在小群体神经元水平上接受亮度等信息,引起相应感受野的抑制,致使对应区域心理认知亮度产生差异. 现可以用高斯带通滤波函数和 Gabor 算子来模拟单个神经节细胞对信息的选通性,用小型神经网络来模拟神经元群体产生侧抑制的过程,用基于最大离散小波的非线性模型来模拟侧抑制和其他亮度错觉^[68],并得到心理实验的支持.

4 视错觉的应用前景

视错觉的应用大量存在于现实生活和专业研究中. 如美国 EP Industries 公司以 Pulfrich 现象为核心研制出优于 3-D 的 Circlescan 4-D 技术^[69],使看立体电影所需佩戴的特制眼镜从 2 片偏振片变为 1 片灰滤光片和 1 片透明镜片,成本大大降低;基于色彩恒常性提出的 McCann Retinex 算法对迭代参数改进

后应用于彩色图像亮度、对比度的处理结果符合人类视觉感知特性,应用在人脸检测中能够较大程度提高识别率;而基于侧抑制模型的去噪单张内窥镜图像高光算法被应用在医学电子内窥镜系统软件平台中,具有侧抑制机制的神经网络和视觉系统模型则被用于红外噪声配准、红外制导、图像预处理、图像增强、联想记忆等领域中。

除此之外,Hotmail、Yahoo、PayPal 等邮箱和论坛使用的 CAPTCHA 验证系统为防止人工智能体自动注册和信息丢失,验证码通常使用图文结合的形式,根据人类特有的感知判断力进行图灵测试^[70],其中验证环节可使用错觉图片来减少判断误差;而主观

轮廓的信息编码方式可以用来研究图像目标轮廓的高效率压缩,以节省存储空间用于网络传输。

视错觉还应用于平面艺术设计、建筑工程、脑科学临床研究、跨文化心理学、运动员与飞行员训练、服饰形象设计、道路交通、电影艺术等方面。如艺术家 Andrea Pozzo 利用深度错觉知识在罗马著名的 St. Ignatius 教堂天花板上创作的平面炮楼,立体效果使许多游客浑然不觉;又如基于人类视觉会简单地把标准字体原样放大缩小从而产生视错觉误差,常见的 IBM 标志在尺寸变化时,要调整蓝色条纹粗细、色彩等以产生恒定印象。表 3 是对一些领域涉及的视错觉知识进行的整理。

表 3 艺术和科研领域视错觉应用

Table 3 Applications of illusion in art and scientific fields

应用方向	所用视错觉种类或知识
建筑设计、室内设计	色彩错觉、建筑元素结构、表面、质感、节奏等方面引起深度错觉等
电影艺术	视觉正后效、事物的多义性和模糊性、对视知的心理预测判断导致错觉
平面艺术设计:海报、广告、包装、网页、印刷版面等	轮廓错觉中的深度和反转错觉,不可能图形,色彩错觉(轻重、胀缩感、冷暖)的同时对称,视觉后效,主观轮廓,格式塔知觉组织原则(相似、接近、连续、完整和闭合等)等
舞台美术	尺寸错觉中深度错觉,色彩错觉(冷暖、强弱等),知觉预测制造悬念导致错觉
服饰搭配	色彩错觉(深浅、冷暖、胀缩感)、裁减线、分割线、饰品和图案引起尺寸错觉
人像摄影	色彩错觉、尺寸错觉(拍摄角度、拍摄光投射方向等)
飞行员视觉超分辨能力的检验	尺寸错觉(Ponzo 错觉、Ebbinghaus 错觉、Muller-Lyer 错觉等)来检验错开、弯曲、评分、倾斜等识别能力
图灵测试	细胞群错觉中的 Scintillating 栅格错觉、似动错觉中的 Rotating Snake 错觉、扭曲错觉中的 CafeWall 错觉和棋盘错觉
图像处理 and 计算机视觉	轮廓错觉中的主观轮廓模型、细胞群错觉中侧抑制错觉的 center-surround 理论提取特征、circle scan 4-D 技术等
信息安全	验证码中使用扭曲错觉等防止邮箱、网站非正常注册
地质制图	尺寸错觉、运动错觉、色彩错觉中的同时和即时对比
体育教学	尺寸错觉中的横竖错觉、面积错觉、深度错觉、重量错觉导致场地、器材的错觉
跨文化研究	尺寸错觉中的横竖错觉、桑氏错觉、横竖错觉、ponzo 错觉等研究不同地域、受教育程度、肤色人们的心理和知识现状
大脑两半球不对称研究	McCollough 效应
脑损伤临床研究	以 Hering 和 Wundt 等错觉从脑不同部分病变、左右半球不对称性和视觉障碍方面研究几何图形错觉的神经基础,用 Hermann 栅格等错觉研究失读症

但视错觉引起的危害也不容小觑。交通部门调查,视错觉还是交通事故的主因之一。雪后放晴,阳光在雪层表面反射形成的雪盲,是严重干扰飞行员视力、延误航班的颜色后效错觉;强光、变换过速的阴影等会引起驾驶者视觉后效,视物不清;复杂路段交错的信号和周边线索缺失会引起司机歧义认知,作出错误判断;雨雪在车玻璃上则会产生扭曲错觉。同时,人们在设计道路时要注意避免道路线性轮廓不清、周围景观元素不协调、交叉路口和交角位置不当引起的尺寸错觉、色彩后效等错觉。研究视错觉很大程度上能避免严重事故发生。

研究视错觉的意义还在于推进视感知机理、注意力转移机制、脑和认知功能等方面的研究,从而使认知科学在信息安全、临床医疗、心理控制、学习教育、智能机器人等领域深入,代表性的智能机器人系统有服务机器人、脑式计算机等。

5 结束语

本文进行典型视错觉的分类,并总结了错觉研究现状和应用前景。认为视错觉是综合信息处理生理机制和心理认知的多层次过程,不同层次上形成不同种类的视错觉,不存在仅产生视错觉却不响应

- [26] KOMMEIER J, BACH M. The necker cube an ambiguous figure disambiguated in early visual processing[J]. *Vision Research*, 2005, 45: 955-960.
- [27] KOMMEIER J, HEIN C M, BACH M. Multistable perception: when bottom-up and top-down coincide[J]. *Brain and Cognition*, 2009, 69(1): 138-147.
- [28] LIU Hong, ZHANG Lin, YU Ze, et al. Collaborative meanshift tracking based on multi-cue integration and auxiliary objects[C]//The International Conference on Image Processing. San Antonio, USA, 2007, 3: 217-220.
- [29] FURSTENAU N. Modeling and simulation of spontaneous perception switching with ambiguous visual stimuli in augmented vision systems[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4021: 20-31.
- [30] Van EE R, NOEST A J, BRASCAMP J W, et al. Attentional control over either of the two competing percepts of ambiguous stimuli revealed by a two-parameter analysis: means do not make the difference[J]. *Vision Research*, 2006, 46: 3129-3141.
- [31] NOEST A J, Van EE R, NIJS M M, et al. Percept-choice sequences driven by interrupted ambiguous stimuli: a low-level neural model[J]. *Journal of Vision*, 2007, 7(8): 1-14.
- [32] ATMANSPACHER H, BACH M, FILK T, et al. Cognitive time scales in a Necker-Zeno model for bistable perception[J]. *The Open Cybernetics and Systemics Journal*, 2008, 2: 234-251.
- [33] BRASCAMP J W, PEARSON J, BLAKE R, et al. Intermittent ambiguous stimuli: implicit memory causes periodic perceptual alternations[J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(3): 1-23.
- [34] 张厚粲, 彭聃龄, 孟庆茂. 主观轮廓和深度线索[J]. *心理学报*, 1980(1): 63-67.
ZHANG Houcan, PENG Danling, MENG Qingmao. Subjective contour and depth cue[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1980(1): 63-67.
- [35] Von DER HEYDT R, PETERHANS E, BAUMGARTNER G. Illusory contours and cortical neuron responses[J]. *Science*, 1984, 224(4654): 1260-1262.
- [36] Von DER HEYDT R, PETERHANS E. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. I. lines of pattern discontinuity[J]. *The Journal of Neuroscience*, 1989, 9(5): 1731-1748.
- [37] Von DER HEYDT R, PETERHANS E. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. II. contours bridging gaps[J]. *The Journal of Neuroscience*, 1989, 9(5): 1749-1763.
- [38] 马振华. 主观轮廓与明度对比的实验研究[J]. *心理学报*, 1989(3): 230-236.
MA Zhenhua. An experimental study of subjective contours and brightness contrast[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1989(3): 230-236.
- [39] LEE T S, NGUYEN M. Dynamics of subjective contour formation in the early visual cortex[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2001, 98(4): 1907-1911.
- [40] RAMSDEN B M, HUNG C P, ROE A W. Real and illusory contour processing in area V1 of the primate: a cortical balancing act[J]. *Cerebral Cortex*, 2001, 17: 648-665.
- [41] SEGHER M L, VUILLEUMIE P. Functional neuroimaging findings on human perception of illusory contours[J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2006, 30: 595-612.
- [42] ZHAN Changan, BAKER C L Jr. Critical spatial frequencies for illusory contour processing in early visual cortex[J]. *Cerebral Cortex*, 2008, 18(5): 1029-1041.
- [43] MONTASER-KOUHSARI L, LANDY M S, HEEGER D J, et al. Orientation-selective adaptation to illusory contours in human visual cortex[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2007, 27(9): 2186-2195.
- [44] SARY G, KOTELES K, KAPOSVARI P, et al. The representation of Kanizsa illusory contours in the monkey inferior temporal cortex[J]. *Cognitive Neuroscience*, 2008, 28(10): 2137-2146.
- [45] GROSSBERG S. 3D vision and figure-ground separation by visual cortex[J]. *Percept Psychophys*, 1994, 55(1): 48-121.
- [46] JUNG Y M, SHEN J. First-order modeling and stability analysis of illusory contours[J]. *Journal of Vision Communication and Image Representation*, 2008, 19(1): 42-55.
- [47] HALKO M A, MINGOLLA E, SOMERS D C. Multiple mechanisms of illusory contour perception[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(11): 1-17.
- [48] 邵晓芳. 主观轮廓感知修复模型及相关算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院, 2006: 60-80.
SHAO Xiaofang. Studies on perceptual completion models and algorithms for subjective contour[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006: 60-80.
- [49] CONWAY B R, KITAOKA A. Neural basis for a powerful static motion illusion[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2005, 25(23): 5651-5656.
- [50] GREGORY R L, HEARD P F. Visual dissociations of movement, position, and stereo depth: some phenomenal phenomena[J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1983, 35(A): 217-237.
- [51] KITAOKA A, ASHIDA H. Phenomenal characteristic of the peripheral drift illusion[J]. *Vision*, 2003, 15(4): 261-262.
- [52] BACKUS B T, ORUC I. Illusory motion from change over time in the response to contrast and luminance[J]. *Journal of Vision*, 2005, 5: 1055-1069.
- [53] STERZER P, HAYNES J D, REES G. Primary visual cortex activation on the path of apparent motion is mediated by feedback from hMT/V5[J]. *NeuroImage*, 2006, 32: 1308-1316.

正常刺激的神经组织,视错觉产生主要因主观线索和先验知识等导致心理认知发生变化,以及在此基础上具体神经活动的差异. 只要人类视觉和认知信息处理机制上还存在疑问,错觉相关的探索就不会停止. 现在已有定论的错觉则需要证实,早已存在的错觉亟待研究,加之不断出现的新错觉,使得计算机视觉、哲学、心理学、解剖学、病理学等多学科结合的视觉研究领域具有广阔的前景.

参考文献:

- [1] EAGLEMAN D M. Visual illusion and neurobiology[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2001, 2: 920-926.
- [2] BACH M, POLOSCHKE C M. Optical illusions[J]. *Visual Neuroscience*, 2006, 6(2): 20-21.
- [3] 周昊天,傅小兰. 认知科学——新千年的前沿领域[J]. *心理科学进展*, 2005, 13(4): 388-397.
ZHOU Haotian, FU Xiaolan. Cognitive science—the scientific frontier of new millennium[J]. *Advances in Psychological Science*, 2005, 13(4): 388-397.
- [4] 白石和也. 平面造型与错觉艺术[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 4-55.
- [5] 罗正理,李毅,高鑫,等. 错觉多媒体软件的研制[J]. *第四军医大学吉林军医学院学报*, 2003, 25(4): 244-246.
LUO Zhengli, LI Yi, GAO Xin, et al. Research of the illusion multimedia software[J]. *Journal of Jilin Military Medical College Fourth Military Medical University*, 2003, 25(4): 244-246.
- [6] XIANG M Q, ZHOU H, NATHANS J. Molecular biology of retinal ganglion cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1996, 93: 596-601.
- [7] 彭聃龄. 知觉的现代理论[J]. *认知科学*, 1992(3): 26-29.
PENG Danling. Modern theories of perception[J]. *Cognitive Science*, 1992(3): 26-29.
- [8] 唐碧峰,熊平凡. 常性误用说和透视错觉的定量研究[J]. *自然杂志*, 1999, 21(3): 182-185.
TANG Bifeng, XIONG Pingfan. A quantitative study on perceptive illusion and misapplied constancy theory[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1999, 21(3): 182-185.
- [9] 张铁忠,孙钢,马剑虹. 错觉图形结构成分的实验研究[J]. *心理学报*, 1986(2): 174-184.
ZHANG Tiezhong, SUN Gang, MA Jianhong. An experimental study of structural components of illusionary figures[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1986(2): 174-184.
- [10] GREGORY R L. 视觉心理学[M]. 彭聃龄,杨枋,译. 北京:北京师范大学出版社, 1986: 122-147.
- [11] 唐碧峰. 视错觉中的“反常性误用效应”研究[J]. *自然杂志*, 1999, 21(5): 305-308.
TANG Bifeng. A study on inverse misapplied constancy effect in the visual illusion[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1999, 21(5): 305-308.
- [12] TURNER R S. Vision studies in Germany: Helmholtz versus Hering[J]. *Osiris 2nd Series*, 1993, 8: 80-103.
- [13] HURVICH L M, JAMESON D. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory: a psychological color specification system[J]. *Optician*, 1956, 46: 416-421.
- [14] 蔡曙山. 认知科学:世界的和中国的[J]. *学术界*, 2007, 125(4): 8-19.
CAI Shushan. Cognitive science: of world and of China[J]. *Academics in China*, 2007, 125(4): 8-19.
- [15] 马庆国,王小毅. 认知神经科学、神经经济学与神经管理学[J]. *管理世界*, 2006(10): 139-150.
MA Qingguo, WANG Xiaoyi. Cognitive neuroscience, neuroeconomics and neuromanagement[J]. *Management World*, 2006(10): 139-150.
- [16] 孔斌. 人类视觉与计算机视觉的比较[J]. *自然杂志*, 2001, 24(1): 51-55.
KONG Bin. Comparison between human vision and computer vision[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2001, 24(1): 51-55.
- [17] NIEDER A. Seeing more than meets the eye: processing of illusory contours in animals[J]. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2002, 188: 249-260.
- [18] 任旭明. 主观轮廓的研究及其理论[J]. *华南师范大学学报*, 1996(4): 29-34.
- [19] 陶海洋,周逸峰. 错觉轮廓识别的视觉生理机制[J]. *生理科学进展*, 1997, 28(1): 73-75.
TAO Haiyang, ZHOU Yifeng. The visual physiological mechanism of illusory contours[J]. *Progress in Physiological Sciences*, 1997, 28(1): 73-75.
- [20] 李小建,刘东台. 视错觉产生的神经机制[J]. *心理科学进展*, 2008, 16(4): 555-561.
LI Xiaojian, LIU Dongtai. Neural mechanisms for the occurrence of visual illusions[J]. *Advances in Psychological Science*, 2008, 16(4): 555-561.
- [21] PARKER A J, KRUG K. Neuronal mechanisms for the perception of ambiguous stimuli[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2003, 13(4): 433-439.
- [22] ANDREWS T J, SCHLUPPECK D, HOMFRAY D, et al. Activity in the fusiform gyrus predicts conscious perception of Rubin's vase-face illusion[J]. *NeuroImage*, 2002, 2(17): 890-901.
- [23] LEOPOLD D A, LOGOTHETIS N K. Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry[J]. *Nature*, 1996, 379: 549-554.
- [24] SHEINBERG D L, LOGOTHETIS N K. The role of temporal cortical areas in perceptual organization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1997, 94: 3408-3413.
- [25] DODD J V, KRUG K, CUMMING B G, et al. Perceptually bistable three-dimensional figures evoke high choice probabilities in cortical area MT[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2001, 21(13): 4809-4821.

- [54] KUMAR T, GLASER D A. Illusory motion in Enigma: a psychophysical investigation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2006, 103(6): 1947-1952.
- [55] 丁晓攀, 俞秀梅, 马剑虹, 等. 视错觉动觉的事件相关电位研究[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(1): 70-72.
DING Xiaopan, YU Xiumei, MA Jianhong, et al. An ERP study on visual illusory motion[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008, 21(1): 70-72.
- [56] AHMED B, HANAZAWA A, UNDEMAN C, et al. Cortical dynamics subserving visual apparent motion[J]. Cerebral Cortex, 2008, 18(12): 2796-2810.
- [57] RAMACHANRAN V S, AZOULAI S. Synesthetically induced colors evoke apparent-motion perception[J]. Perception, 2006, 35(11): 1557-1560.
- [58] SANABRIA D, SOTO FARACO S, SPENCE C. Spatial attention and audiovisual interactions in apparent motion[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2007, 33(4): 927-937.
- [59] FREEMAN E, DRIVER J. Direction of visual apparent motion driven solely by timing of a static sound[J]. Current Biology, 2008, 18: 1262-1266.
- [60] 萧静宁, 戴老红. “马赫带”与认识论[J]. 武汉大学学报, 1987(3): 33-40.
- [61] BAUMGARTNER G. Indirekte grobenbestimmung der rezeptiven felder der retina beim Menschen mittels der Hermannschen gittertauschung[J]. Pflugers Archiv fur die gesamte Physiologie, 1960, 272: 21-22(German).
- [62] WOLFE J M. Global factors in the Hermann grid illusion[J]. Perception, 1984, 13(1): 33-40.
- [63] GEIER J, SERA L, BERNATH L. Stopping the Hermann grid illusion by simple distortion[J]. Perception, 2004, 33: 56.
- [64] GEIER J, BERNATH L, HUDAK M, et al. Straightness as the main factor of the Hermann grid illusion[J]. Perception, 2008, 37(5): 651-665.
- [65] ARES-GOMEZ J B, PACEY I E, COX M J, et al. The Hermann-Hering grid illusion: human parafoveal perceptual field centre size estimations and establishment of a new methodology for investigation application[J]. Perception, 2005, 34: 102.
- [66] COX M J, ARES-GOMEZ J B, PACEY I E, et al. Modeling the spatial tuning of the Hermann grid illusion[J]. Spatial Vision, 2007, 20(5): 415-436.
- [67] CORNEY D, LOTTO R B. What are lightness illusion and why do we see them? [J]. PLoS Computational Biology, 2007, 3(9): 1790-1800.
- [68] HITOSHI A. A nonlinear model of visual information processing based on discrete maximal overlap wavelets[J]. Interdisciplinary Information Sciences, 2005, 11(2): 177-190.
- [69] 孙为民, 刘宪国. Pulfrich(普尔弗利希)现象分析[J]. 高师理科学刊, 2005, 25(4): 23-24.
SUN Weimin, LIU Xianguo. An introduction to the Pulfrich effect[J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2005, 25(4): 23-24.
- [70] AHN L V, BLUM M, LANGFORD J. Telling humans and computers apart automatically[J]. Communications of the ACM, 2004, 47(2): 56-60.

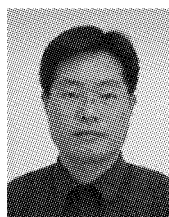
作者简介:



刘宏,男,1967年生,教授、博士生导师,IEEE会员,国际机器人足球联盟(FIRA)竞赛委员会委员,中国人工智能学会常务理事、副秘书长、青年委员会主任,中国自动化学会智能自动化专业委员会委员.主要研究方向为机器感知与智能机器人、视觉注意转移机制和模式识别.先后承担或参与国家自然科学基金项目,国家“863”计划项目和国家“973”计划课题共计10余项.曾获航天部科技进步二等奖、北京大学安泰奖、教学优秀奖等.在重要的学术期刊和国际会议上发表学术论文90余篇.



李哲媛,女,1986年生,博士研究生,主要研究方向为结合视觉选择性注意机制的目标跟踪与图像处理.



许超,男,1964年生,教授、博士生导师,主要研究方向为视感知和视觉算法、图像数据压缩、模式识别与视频处理等.先后承担或参与国家自然科学基金项目,国家“863”计划项目和国家“973”计划课题共计10余项.发明专利5项,获得中国科学院科技进步二等奖,北京大学安泰奖,北京大学通用电气(GE)奖,北京大学柯达(KODAK)奖等.在重要的学术期刊和国际会议上发表学术论文80余篇.