

立体视觉的形成机制及测量方法的相关研究

郝宽晓,周籽秀

引用:郝宽晓,周籽秀. 立体视觉的形成机制及测量方法的相关研究. 国际眼科杂志 2020;20(3):500-503

基金项目:江苏省南京市社会事业科技发展计划项目(No. 2018Ca06)

作者单位:(211102)中国江苏省南京市,南京同仁医院眼科

作者简介:郝宽晓,毕业于南昌大学附属眼科医院,硕士研究生,研究方向:青光眼、视光学。

通讯作者:周籽秀,毕业于北京中医药大学,副主任医师,研究方向:视光学、眼科常见疾病. 54178593@qq.com

收稿日期:2019-05-20 修回日期:2020-02-13

摘要

立体视觉通过双眼立体视差来感知深度,具有感知三维空间各种物体立体结构的能力,与人的工作及生活密切相关。大脑皮层上存在不同的视觉皮层,参与立体视觉的形成,处理接收到不同的视觉信息。临床上需要对立体视觉进行评估,用于指导临床决策,传统的测量方式主要基于静态立体视敏度,而日常生活中双眼视差随时间动态出现,目前3D立体视觉检测已用于立体视觉的评估。本文主要对目前关于立体视觉的形成机制及测量方法进行综述。

关键词: 立体视觉; 双眼视差; 深度运动; 视觉皮层; 3D 立体视觉检测

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2020.3.21

Research on the formation mechanism and measurement method of stereoscopic vision

Kuan-Xiao Hao, Zi-Xiu Zhou

Foundation item: Nanjing Social Science and Technology Development Plan (No.2018Ca06)

Department of Ophthalmology, Nanjing Tongren Hospital, Nanjing 211102, Jiangsu Province, China

Correspondence to: Zi-Xiu Zhou. Department of Ophthalmology, Nanjing Tongren Hospital, Nanjing 211102, Jiangsu Province, China. 54178593@qq.com

Received:2019-05-20 Accepted:2020-02-13

Abstract

• Stereopsis is to perceive vision depth through the subtle three-dimensional differences between two eyes, and it is closely related to human working and living. There are different visual cortices in the cerebral cortex, which are involved in the formation of stereo vision, and process different visual information received. Clinical evaluation of

stereo vision is needed to guide clinical decision-making. Traditional assessment is mainly based on static stereoscopic acuity, while binocular disparity appears dynamically with time in daily life. Nowadays 3D technology has been used to evaluate stereo vision. This paper mainly reviews the development mechanism and measurement methods of stereoscopic vision.

• **KEYWORDS:** stereoscopic vision; binocular motion; motion in depth; visual cortex; 3D stereoscopic vision detection

Citation: Hao KX, Zhou ZX. Research on the formation mechanism and measurement method of stereoscopic vision. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2020;20(3):500-503

0 引言

视觉是人类最主要的感官之一,约三分之一的大脑区域参与视觉信息处理,支持视觉感知活动。人类通过立体视觉控制复杂、精细的运动行为,因此某些特殊人群及特殊职业的人群对立体视觉的要求更高。良好的立体视觉有助于老年人维持步态稳定,减少跌倒风险^[1],而对于青少年儿童,立体视觉下降可能存在学习困难、精细运动障碍^[2],拥有良好立体视觉的乒乓球运动员能够获得更好的接球成绩^[3],牙医能更出色的完成高技能任务^[4]。目前,在动物模型中证实视觉皮层中 V1、V2、V3、V3A、V4、V5/MT、MST 等脑区参与立体视觉处理^[5]。灵长类动物立体视觉形成机制研究的不断发展,为研究人的立体视觉脑区活动提供了基础。此外,随着影像学及信息技术的发展,可通过人为的信息刺激,如 3D 立体视觉等,同时利用核磁共振成像检测脑区活动,进一步研究立体视觉的形成机制。

1 立体视觉的形成机制

立体视觉形成的基础是正常的双眼单视和双眼融合能力,若出现单眼视力、双眼单视或双眼融合功能异常,立体视觉可出现损害。双眼单视是指双眼视轴平行,注视的物体同时在双眼黄斑上聚焦成像,通过大脑皮层中枢整合成为一个完整并具有立体感觉的单一物像。立体视觉形成过程需要双眼同时参与,单眼造成的视网膜影像模糊程度较大时,引起视觉通路单侧信号传导减弱,造成单眼成像困难或融像困难,立体视功能也相应下降,所以单眼视力降低比双眼视力降低更易引起立体视觉损害^[6],屈光参差性弱视患儿的立体视觉相对较差正验证了此论点。而斜视患儿双眼视轴不平行,导致视觉抑制和异常视网膜对应,影响立体视建立,不同的斜视类型对远近立体视觉产生不同的损害^[7],核磁影像学检查显示共同性外斜视患者初级视觉皮层和其他脑区的功能性连接降低,引起融合功能下降,造成立体视损伤^[8]。

1.1 双眼视差和深度运动 双眼立体视觉是视觉中枢皮

层区域通过接受双眼视差来判断物体深度变化,感知物体三维结构的能力。双眼视差是指物体影像落在双眼视网膜黄斑部对应位置上的差异。正常成年人的瞳距约为58~64mm,当人们将双眼视轴直接注视前方某一物体A时,注视点影像将落在双眼视网膜的黄斑上。在此注视点不同深度的另一视觉注视点B,相对于中心凹落在左右视网膜的不同位置。当双眼由A注视点直接注视B注视点时,双眼眼球需转动不同的角度,这些不同的角度即为绝对视差。相对视差是对于A和B两个注视点的相对位置的评估,即绝对视差之间的差值。立体深度觉感知依赖于双眼视差,而最可靠的深度觉判断是基于场景中两个同时可见的特征之间的相对视差^[9]。

立体视觉主要存在于动态的日常生活中。视觉中枢基于双眼视差提供的线索,调节双眼运动,感知物体深度变化,才能形成我们感知物体的三维空间结构。O'Connor等^[10]解释了双眼深度运动的机制,认为深度运动知觉是依靠视差随时间变化(changing disparity over time, CDOT)和眼间速度差异(interocular velocity differences, IOVD)形成。CDOT刺激被认为是通过深度的运动(z-motion,即靠近或远离的运动)重新计算视差和识别视差随时间的变化,依赖于计算右眼和左眼中任何空间上对应的点之间分离的变化,提供关于深度变化的信息。IOVD机制是利用单个点在视网膜上的运动,双眼之间的速度差被用来推断深度,不需要双眼视网膜之间的空间匹配点。当一个物体直接向观察者移动,会导致右眼视网膜向右运动,左眼向左运动,比较他们的速度有助于了解物体深度的变化^[10]。大脑皮质中枢通过识别处理双眼的绝对视差,提供控制回路原件,调节眼球集中运动,测量视差的变化,感知深度知觉。

1.2 参与立体视觉形成的相关视皮层区域 双眼视网膜的光感受细胞接受刺激后,转化产生神经冲动,经视神经、外侧膝状体、上丘脑传递至视觉皮层。经典的视觉通路包括M细胞通路和P细胞通路^[11],两者在外侧膝状核(lateral geniculate nucleus, LGN)中均有突触传递,前者以大细胞性神经元相互联系,对快速移动的刺激敏感,与背侧大脑皮层视觉通路相关;后者以小细胞性神经元相互联系,对颜色及空间刺激敏感,与腹侧大脑皮层视觉通路有关。然而,也有不同证据显示大细胞性和小细胞性LGN神经元在初级视觉皮层聚集,部分小细胞性神经元可投射到背侧视觉皮层^[12]。有观点认为,立体视觉是大细胞神经元和背侧视觉通路的独特属性,处理粗糙的立体视觉;另有研究者支持小细胞神经元和腹侧视觉通路在其中起关键作用,处理精细的立体视觉^[13-14]。而随着进一步研究证实,背侧通路和腹侧通路均参与双眼视差信息的处理,这取决于不同脑区的功能及刺激水平。

大脑约有20余个视觉皮层区域,它们接收强烈的视觉信息刺激,并处理这些信息,以支持视觉感知的各个方面。这些皮层区域的任何变化都会影响视觉感知,特别是在儿童时期,异常的视觉感知经历往往会破坏视觉皮层通路的成熟,从而导致视力下降。视觉皮层在处理视觉感知及其可塑性方面的作用在动物模型中已经得到了很好的研究^[15],但是关于人类视觉皮层的神经生物学的研究很少,更不用说研究其是如何在人的一生中发展和变化的了^[16]。大脑的影像学研究正开始着手解决人类大脑皮层的结构和功能发展问题^[17],但缺乏细胞和分子机制方面

的信息,这阻碍了视力障碍的生物机制从临床前模型到有效的临床治疗的转化。目前关于视皮层脑区研究较多的是初级视觉皮层V1、次级视觉皮层V2、腹侧跨纹状体皮层V4以及背侧跨纹状体皮层V5^[18-20]。

1.2.1 初级视觉皮层V1和次级视觉皮层V2 初级视觉皮层(primary visual cortex)V1是处理视觉信息的第一个皮层区域。V1的正常发育依赖于关键时期的双眼视觉,年龄相关性视力丧失与V1的神经生物学变化有关。人类初级视觉皮层V1可分为五个发展阶段:婴儿期视觉的早熟以及尽早建立起兴奋性受体与抑制性受体的传递机制阶段;学龄前儿童的高度变异性阶段;学龄儿童的经验依赖性视觉发展阶段;青年期及成年期的视觉发育的延长阶段;人类衰老过程中的可塑性机制丧失阶段^[21]。人类V1的五个发展阶段,从婴儿期开始,并贯穿整个生命周期。

在猕猴的V1区和V2区存在特定双目属性的神经元,参与双眼视差的初级处理。并且相对于V1区,V2的单个神经元比V1中的神经元表现出更大范围的视差处理,这说明V1和V2存在特定间隔传播^[19]。初级视觉皮层V1和次级视觉皮层V2对视差具有不同的选择性。在使用一种中心环绕视觉刺激猕猴时发现,猕猴对中心有绝对视差的刺激反应较敏感,而对环绕有另一个视差(呈现中心和环绕物之间的相对视差)不敏感^[22]。有研究利用随机点模式模拟中心和环绕深度发现,部分V2神经元对这两个区域的相对视差敏感,而V1神经元则不能,这些反应可以直接支持双目立体视觉深度的判断^[10]。在两种不同对比度极性刺激(单极性和混合极性随机点立体图)下,早期视觉皮层(V1/V2)对混合极性刺激的深度判断表现更好,这与观察者看到包含明亮和黑暗视觉特征的刺激时,深度感知会更好的现象表现一致^[23]。在环形边缘刺激模拟V1和V2的前馈反应时发现某些V2神经元对其接受域内视差的阶跃变化比较敏感,V2处理的视差信息比V1复杂^[24]。总的来说,这些证据表明在V1和V2之间有一个重要的信息转换。研究证实,通过立体深度任务激活人的大脑皮质,包括大部分枕叶视觉皮质和部分顶叶皮质,其反应是广泛的,但各区域反应却是不同的^[25]。背侧流视觉通路从V1开始,经过V2,然后到达视觉区MT(颞中/V5)和顶叶下^[26]。在灵长类动物进行的神经电生理学研究中,猕猴腹外皮层区域的神经元表现出一系列更高级的刺激偏好^[27]。这些偏好表明,随着信号从初级视觉皮层转移到腹侧流或背侧流时,有关双眼深度的信息发生了转变。

1.2.2 腹侧跨纹状体皮层V4和背侧跨纹状体皮层V5 腹侧跨纹状体皮层V4是腹侧视觉处理通路的主要阶段,从V1投射到腹侧视觉皮层。既往研究认为,V4主要涉及物体形状^[28]和颜色视觉^[29],并与注意力和视觉搜索相关^[30]。V4对双眼视差也很敏感,携带立体深度信息,并且对交叉差异有强烈偏好^[19]。但是近期研究发现,颞叶癫痫手术对立体视觉无显著影响,癫痫手术患者在单侧颞极切除后仍能保持局部和整体的立体视觉^[31]。功能磁共振影像研究也显示,颞叶后部区域参与腹侧视觉神经通路^[32]。

背侧跨纹状体皮层V5也称为中颞叶(midtemporal, MT),是沿背侧皮层视觉通路从V1到顶叶的中央处理阶段。V5神经元与视觉运动信息的处理密切相关,包括运动深度感知和运动方向感知的作用^[33-34],并且对刺激速

度具有选择性^[35]。

从V1到顶叶皮质的视觉通路解决了对应问题,中间区域V4被认为是通信过程中的一个关键阶段^[36]。V4区在神经元群水平上发生了从相关到匹配的完整转换,并在颞下和后顶叶皮质的单神经元反应中表现出来,V5/MT区神经元以一种介于相关信号和匹配信号之间的方式表示差异,这些区域的相关和匹配信号以加权的、平行的方式有助于深度感知。在不同的视觉条件下,两种表现形式可以适当结合,产生双目深度感知^[37]。

立体视觉的形成是多阶段过程,利用功能磁共振成像技术研究发现,在对绝对视差和相对视差行不同立体视觉刺激干预的情况下,背侧区域视觉皮层对绝对差异的适应性大于对相对差异的适应性,而腹侧区域对两者的适应性相同,但早期视觉区域(V1、V2)在两组实验中均表现出较小的影响。这些结果表明,背侧区域刺激的处理可能主要依赖于绝对视差的信息,而腹侧区域则将两类立体视觉的神经资源进行分割,从而保持相对视差的重要表征^[20]。背侧视觉通路及腹侧视觉通路分别执行着不同的视觉任务,进行着不同类型的立体视计算。立体视觉的发展机制在神经生理及神经生物学方面已取得很大进展,但是对于立体视觉更高级的神经传导进程中,如背侧视觉区V3、顶叶区域及背旋体V6和V6A等区域的功能,立体视觉与意识知觉之间的联系仍不明确,仍需进一步探讨。

2 立体视觉的测量方法

立体视觉评估是眼科评估的一个重要组成部分,其结果可用于指导临床管理决策,如评估斜视手术实施的最佳时间及术后预后能力等,测量方法不同对于指导临床存在差异。立体视觉的测试一般分为两类:(1)真实深度测试,如Frisby测试;(2)分离成像测试,如偏振片矢量图、立体镜检查图、Randot立体测试。真实深度和分离成像测试测量立体视觉的不同方面,主要区别在于解释立体视敏度差异和成像差异两个方面。

2.1 立体视觉测量的传统方法

既往多数临床试验均使用同一基本原理的不同方法,向每只眼睛展示不同的图像,如偏振、浮雕、透镜状或物理/真实深度。展示方法不应影响视差的检测,然而不同测试的标准数据各不相同,说明展示方法对视差仍有影响。日常生活的环境是动态的,我们可在深度变化的情况下识别出更高级别的深度知觉,但临床试验仅限于静态立体视敏度的测量,所以单纯的静态立体视觉测量并不能准确检测出人的深度知觉能力。分析目前传统立体视觉测量的研究结果发现,Titmus立体视觉实验中,因单眼线索的存在而影响其测试结果;在Randot或TNO测试中,可根据中心点的反相关关系,对随机点立体图做出正确的响应。传统立体测试多采用非连续性图形,其用于评价真实立体视觉具有潜在的弱点,在立体视敏度评估和精确测量立体视觉能力方面具有一定的局限性。

2.2 3D技术及其在立体视觉测量中的应用 近年来,三维(three dimensional,3D)设备,如3D笔记本电脑、3D电视、3D手术设备(达·芬奇机器人系统)等得到了快速发展和应用。随着3D电视和电脑的普及以及3D电影的成功推出等,3D产业发展越来越迅速^[38]。部分人群在普通立体视觉测试中表现出立体视敏度较差,但在影院观看3D电影却不受影响,这与普通立体视觉测量图形的非连续性及其测量的视差范围相关。不同于3D娱乐设备,3D立

体视觉测量技术,如The Asteroid Test,主要是利用3D平板发射刺激,其摄像头可主动监控测试距离,并相应地调整视差^[39]。另外,该项检查多以游戏的形式展开,可以使受检者更加专注。Han等^[39]利用3D动画图像分析探讨正常对照组与间歇性外斜视、屈光参差性弱视、部分调节性内斜视患儿的3D视觉水平图像差异。相比传统的测量方式,3D技术可分辨出更小的水平差异。该研究使用3D笔记本电脑进行3D立体视觉测试,将0mm水平视差的3D参数调整为15mm水平视差,通过与传统的Titmus立体视觉测试方法对比,结果显示与正常对照组比较,间歇性外斜视及屈光参差性弱视患儿3D立体视觉测试平均阈值明显降低($P<0.001$),部分调节性内斜视患儿3D立体视觉测试与正常对照组相比无统计学差异($P=0.082$),3D立体视觉测试结果与Titmus立体视觉测试结果高度相关($P<0.001$),但3D立体视觉测试比传统的Titmus立体测试能够产生更多的图像差异。

以上研究表明,3D立体视觉测量对真实立体视觉具有较高的预测能力。如果在3D立体视觉测试中,受试者在最大的视差范围内无法感知到任何立体视觉,那么在观看3D电影时,受试者很可能对立体视觉没有感知。3D立体视觉测试通过动画或游戏的形式,在视觉注意力和现实情境方面更具优势,使用带有动画的3D显示器提供了自然的观看条件,在未来立体视测试中具有更大的价值。

3 小结

日常生活中,立体视觉对于维持运动技能和生活质量具有重要意义。立体视觉的形成是多阶段过程,各视觉皮层参与执行着立体视觉形成过程中的不同任务,但关于立体视觉形成过程中更高级的神经生理活动以及参与立体视觉形成的相关视觉皮层的功能及其特点仍需进一步研究。此外,开发全面、有效评估立体视觉的测量方法极为有益,不仅有利于及早发现有立体视觉下降或缺陷的患者,也可有效辅助临床治疗、评估预后,避免发生不良后果。

参考文献

- 1 Ivers RQ, Norton R, Cumming RG, et al. Visual impairment and risk of hip fracture. *Am J Epidemiol* 2000; 152(7): 633-639
- 2 Hussaindeen JR, Shah P, Ramani KK, et al. Efficacy of vision therapy in children with learning disability and associated binocular vision anomalies. *J Optom* 2018; 11(1): 40-48
- 3 Zhu XJ, Li YH, Liu LQ. Functional significance of stereopsis in professional table-tennis players. *J Sports Med Phys Fitness* 2019; 59(11): 1798-1804
- 4 Al-Saud LM, Mushtaq F, Mirghani I, et al. Drilling into the functional significance of stereopsis: the impact of stereoscopic information on surgical performance. *Ophthalmic Physiol Opt* 2017; 37(4): 498-506
- 5 李月平, 赵堪兴. 立体视觉的机制及临床应用研究进展. *眼科研究* 2009; 27(6): 530-534
- 6 张玥, 封利霞. 儿童单眼屈光参差性弱视与立体视损害的相关性研究. *中国斜视与小儿眼科杂志* 2016; 24(3): 20, 21-23
- 7 刘育榕, 张繁友. 不同类型斜视手术前后远近立体视的变化. *国际眼科杂志* 2018; 18(5): 819-822
- 8 Zhu PW, Huang X, Ye L, et al. Altered intrinsic functional connectivity of the primary visual cortex in youth patients with comitant exotropia: a resting state fMRI study. *Int J Ophthalmol* 2018; 11(4): 668-673
- 9 Thomas OM, Cumming BG, Parker AJ. A specialization for relative disparity in V2. *Nat Neurosci* 2002; 5(5): 472-478

- 10 O'Connor AR, Tidbury LP. Stereopsis: are we assessing it in enough depth? *Clin Exp Optom* 2018; 101(4): 485–494
- 11 Parker AJ. Binocular depth perception and the cerebral cortex. *Nat Rev Neurosci* 2007; 8(5): 379–391
- 12 Nassi JJ, Lyon DC, Callaway EM. The parvocellular LGN provides a robust disynaptic input to the visual motion area MT. *Neuron* 2006; 50(2): 319–327
- 13 Tyler CW. A stereoscopic view of visual processing streams. *Vision Res* 1990; 30(11): 1877–1895
- 14 Schiller PH. The effects of V4 and middle temporal (MT) area lesions on visual performance in the rhesus monkey. *Vis Neurosci* 1993; 10(4): 717–746
- 15 Kiorpes L. Visual development in primates: Neural mechanisms and critical periods. *Dev Neurobiol* 2015; 75(10): 1080–1090
- 16 Mavroudis IA, Manani MG, Petrides F, et al. Age-related dendritic and spinal alterations of pyramidal cells of the human visual cortex. *Folia Neuropathol* 2015; 53(2): 100–110
- 17 Gilmore JH, Knickmeyer RC, Gao W. Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nat Rev Neurosci* 2018; 19(3): 123–137
- 18 Prince SJ, Cumming BG, Parker AJ. Range and mechanism of encoding of horizontal disparity in macaque V1. *J Neurophysiol* 2002; 87(1): 209–221
- 19 Tanabe S, Doi T, Umeda K, et al. Disparity-tuning characteristics of neuronal responses to dynamic random-dot stereograms in macaque visual area V4. *J Neurophysiol* 2005; 94(4): 2683–2699
- 20 Neri P, Bridge H, Heeger DJ. Stereoscopic processing of absolute and relative disparity in human visual cortex. *J Neurophysiol* 2004; 92(3): 1880–1891
- 21 Siu CR, Murphy KM. The development of human visual cortex and clinical implications. *Eye Brain* 2018; 10: 25–36
- 22 Cumming BG, Parker AJ. Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. *J Neurosci* 1999; 19(13): 5602–5618
- 23 Schaeffner LF, Welchman AE. The mixed – polarity benefit of stereopsis arises in early visual cortex. *J Vis* 2019; 19(2): 1–14
- 24 Bredfeldt CE, Cumming BG. A simple account of cyclopean edge responses in macaque v2. *J Neurosci* 2006; 26(29): 7581–7596
- 25 Minini L, Parker AJ, Bridge H. Neural modulation by binocular disparity greatest in human dorsal visual stream. *J Neurophysiol* 2010; 104(1): 169–178
- 26 Singh-Curry V, Husain M. The functional role of the inferior parietal lobe in the dorsal and ventral stream dichotomy. *Neuropsychologia* 2009; 47(6): 1434–1448
- 27 Parker AJ, Smith JET, Krug K. Neural architectures for stereo vision. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2016; 371(1697): 20150261
- 28 Oleskiw TD, Nowack A, Pasupathy A. Joint coding of shape and blur in area V4. *Nat Commun* 2018; 9(1): 466
- 29 Heywood CA, Gadotti A, Cowey A. Cortical area V4 and its role in the perception of color. *J Neurosci* 1992; 12(10): 4056–4065
- 30 Ogawa T, Komatsu H. Target selection in area V4 during a multidimensional visual search task. *J Neurosci* 2004; 24(28): 6371–6382
- 31 Verhoef BE, Decramer T, Van Loon J, et al. Stereopsis after anterior temporal lobectomy. *Cortex* 2016; 82: 63–71
- 32 Cottareau BR, Ales JM, Norcia AM. The evolution of a disparity decision in human visual cortex. *Neuroimage* 2014; 92: 193–206
- 33 Liu LD, Haefner RM, Pack CC. A neural basis for the spatial suppression of visual motion perception. *Elife* 2016; 5: e16167
- 34 Kim HR, Angelaki DE, DeAngelis GC. Gain Modulation as a Mechanism for Coding Depth from Motion Parallax in Macaque Area MT. *J Neurosci* 2017; 37(34): 8180–8197
- 35 Cheng K, Hasegawa T, Saleem KS, et al. Comparison of neuronal selectivity for stimulus speed, length, and contrast in the prestriate visual cortical areas V4 and MT of the macaque monkey. *J Neurophysiol* 1994; 71(6): 2269–2280
- 36 Abdolrahmani IM, Doi T, Shiozaki HM, et al. Pooled, but not single-neuron, responses in macaque V4 represent a solution to the stereo correspondence problem. *J Neurophysiol* 2016; 115(4): 1917–1931
- 37 Fujita I, Doi T. Weighted parallel contributions of binocular correlation and match signals to conscious perception of depth. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2016; 371(1697): 20150257
- 38 Wardle SG, Gillam BJ. Phantom surfaces in da Vinci stereopsis. *J Vis* 2013; 13(2): 16
- 39 Han J, Han SY, Lee SK, et al. Real stereopsis test using a three-dimensional display with Tridex software. *Yonsei Med J* 2014; 55(6): 1672–1677