

· 生物电子学 ·

运动方向对深度运动知觉的影响——ERP研究

王 玲, 尧德中

(电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054)

【摘要】深度运动知觉问题的研究目前仍处于探求阶段。该文采用一种较接近人视觉经验的实验范式,对两种情况下的128导事件相关电位(ERP)数据进行了较详细的时-空分析。结果表明,它们都激活了相似或相同的脑区;但不同的运动方向对信息处理的侧重脑区及神经响应程度有所不同,而且在时间过程上也表现出比较显著的差异,为进一步研究深度运动的大脑感知过程奠定了基础。

关键词 深度知觉; 脑电; 运动; 神经生理; 学视觉

中图分类号 R318.04; Q427

文献标识码 A doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.034

Influence of the Motion Direction on Perception of Motion-in-Depth —— An ERP Study

WANG Ling and YAO De-zhong

(School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The perception of motion-in-depth is still in research. The influence of motion direction on the perception is unclear and not reported. By an experiment paradigm close to human's practical visual experience, this paper presents a detail spatio-temporal analysis of the 128-channels event-related potential (ERP) data under two conditions. The results illustrate that same or similar brain areas are activated in both conditions, but the emphasis brain areas are not same when processing different motion direction, and some significant difference on their temporal course can be observed.

Key words depth perception; electroencephalography; motion; neurophysiology; vision

对于视觉加工的研究是了解人脑信息加工、脑高级功能机制的重要途径。对深度运动过程的研究是视运动知觉研究中重要的课题。国内外出现了一些与视运动知觉相关的成果^[1-4],但对人类的深度运动仍有很多问题需要解决。

在有限的人深度运动问题的研究中,研究的对象通常是具有不同属性的物体向被试以各种不同的角度(方向或姿态)接近(或对称扩展)的过程。动物电生理的研究证明,动物脑中有特异的对深度接近(特别是直接碰撞)过程起反应的神经核团^[5-7]。在视觉经验中,物体接近与物体远离过程会带给人不同的感觉,但这两种深度运动知觉过程中人类大脑神经响应上的差异却一直被忽视。本文采用高分辨率的128导脑电技术,对接近与远离这两种深度运动过程的ERP数据进行了分析,初步探索了它们对深度运动

过程大脑知觉上的影响。

1 实验与数据采集

本文在视觉刺激上使用Discreet公司出品的3DMax软件生成,并以40 Hz的帧频(模拟平滑连续的运动过程)显示于被试正前方约65 cm的显示器上,屏幕刷新频率80 Hz。

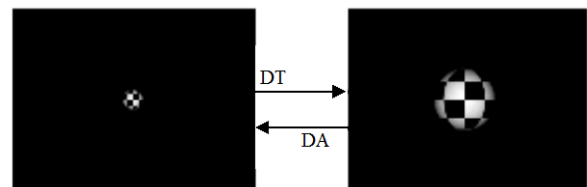


图1 实验刺激模式

本文采用一种较接近人视觉经验的实验模式,如图1所示。视觉刺激模式为1个80 cm的三维立体球,从初始位置以特定的匀速800 cm/s向被试者接近或

收稿日期: 2008-03-16; 修回日期: 2008-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(60571019)

作者简介: 王 玲 (1975-), 博士, 主要从事视运动知觉的脑机制和生物信号处理等方面的研究。

远离1 500 ms的连续、平滑的运动过程。根据运动方向的不同,实验模式分为接近(towards observer, DT)与远离(away from observer, DA)两种。12名健康大学生及研究生作为被试者参加了实验。

在DT模式下,球从初始位置(距屏幕15 m远处、初始视角为2.47°)逐渐向被试者接近,一直到1 500 ms运动结束时终止视角为6.88°。DA模式正相反,为从初始视角6.88°逐渐远离被试者,直至1 500 ms运动结束时终止视角为2.47°。

每个连续运动刺激过程(DT或DA)作为一个试次,在每组内随机等概率出现;每两个试次之间有可选择的1 000~2 000 ms休息时间,可供被试者调适眼睛。采用EGI公司的128导脑电采集系统进行脑电数据采集,接地点为前额发际下0.5 cm,数据采集时的参考电极为头顶Cz位置;滤波为48 Hz,头皮与电极之间阻抗小于40 kΩ,采样频率250 Hz。记录连续脑电,然后作离线叠加处理。

2 数据处理方法

2.1 预处理

进行正式处理前,本文先在EGI脑电处理系统及MATLAB软件中进行了数据预处理,包括5~35 Hz带通滤波、自动校正眼电、充分排除各种伪迹、坏道替换、基线校正、分段叠加、平均参考、去线性趋势等处理。分析的数据为刺激出现起0 ms至刺激后1 400 ms,以刺激出现前100 ms至刺激出现0 ms为基线。去掉伪迹等不可靠数据,保证每种实验模式下进入叠加平均的数据均超过150段。

2.2 总能量分析

参照频域内能量的定义,本文给出了时域内的总能量:在某一时刻全脑的总能量为该时刻全脑所有电极位置处测量电位的平方和^[8]。全脑总能量反映了在某一时刻整个大脑的功能状态,其值越大,代表该时刻整个大脑对刺激的反应越强。

2.3 主成分分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)方法被用于前500 ms的总平均ERP数据,得到所有被试均显著的共同事件相关成分,以最大程度地消除多被试情况下的个体差异及噪声影响。

2.4 相关系数与贡献率

相关系数(correlation coefficients, CC)常被用于衡量两个信号的相似程度,由协方差矩阵除以信号的标准偏差得到。本文既计算两种实验条件下空间模式(激活脑区的空间分布)上的相似性,也计算它们

在时间过程上的相似性。前 k 个主成分对原始信号的贡献率为:

$$\eta_k = \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_j}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (1)$$

式中 λ_i 为第 i 个主成分的奇异值。按照CC与主成分的 η ,深度运动相关的主成分被确定,因此得到了事件相关的感兴趣区域(regions of interest, ROIs),即深度运动过程感知的可能脑源区。

2.5 统计分析

本文以总平均ERP数据主成分的空间模式为共平均空间模式,将12个被试者的ERP数据投影到其上,得到每个被试对应的时间模式(时间过程)。然后对不同运动方向实验模式下的关键时间波的潜伏期与幅值进行统计分析,并用双边配对T检验(two tails paired t-test)对“均值是否相等”进行显著性检验。

3 结果与讨论

3.1 总能量

本文采用能量分析方法得到了不同运动方向情况下,原始ERP总平均数据的全脑总能量图,如图2所示。由图2可知,全脑总能量主要集中在前600 ms,并以前500 ms为反应最强的时间段,160、230及350 ms左右为峰值时刻。双边配对T检验结果显示,两种运动方向实验模式下,前500 ms的全脑总能量及全部1 400 ms的全脑总能量均具有显著的差异($p < 0.001$)。

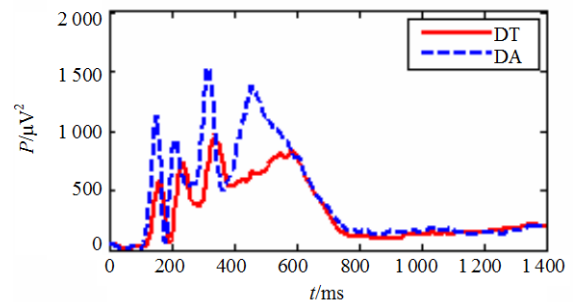


图2 总能量图

3.2 时-空模式

本文对前500 ms的总平均ERP进行了PCA,按照主成分对原始数据的贡献率及其空间模式的共通性,选择了前3个主成分的空间拓扑为共平均空间模式,它们总的贡献率在两种实验模式下分别为 $\eta_{DT} = 92.679\%$ 、 $\eta_{DA} = 92.326\%$,其空间分布最为相似(空间相关系数 > 0.952),如表1所示;由此得到其时-空模式图(时间ERP波形及空间拓扑图),如图3所示。

按照主要激活脑区的位置,分别命名3个主成分为AOP(枕顶区)、AOT(枕颞区)及AFOP(额、枕、顶

联合同步响应),它们就是该问题的事件相关脑区(感兴趣区域)。在两种实验条件下,空间模式的贡献率及空间拓扑的相关系数如表1所示。

表1 空间模式的贡献率及相关系数

	DT		DA		CC (DT,DA)
	成分	贡献率/(%)	成分	贡献率/(%)	
AOP	C ₁	73.122	C ₁	64.879	0.965
AOT	C ₂	15.694	C ₂	24.567	0.964
AFOP	C ₃	3.863	C ₃	2.880	0.952

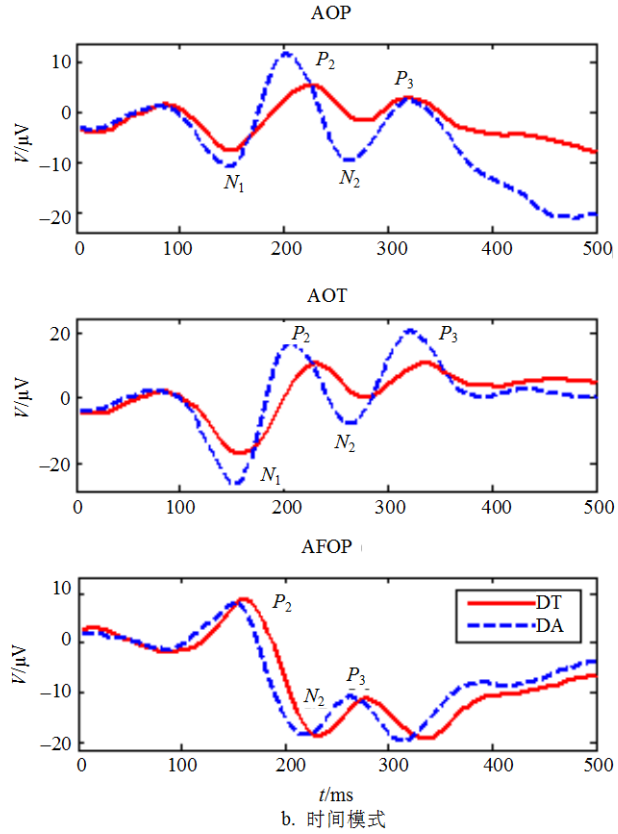
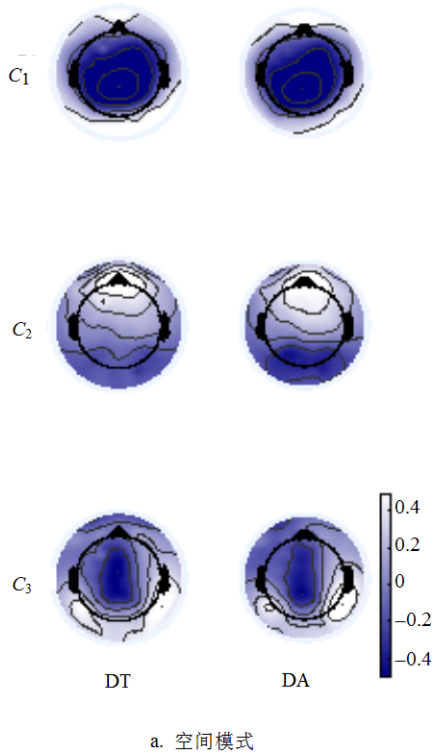


图3 时-空模式

表2 关键时间波的潜伏期与幅度的统计结果(n=12)

		潜伏期/ms			幅度/μV		
		DT	DA	显著性	DT	DA	显著性
N ₁	AOP	149.54±7.05	145.54±6.03		-8.63±5.30	-12.11±4.99	*
	AOT	161.23±6.19	153.54±2.78	**	-18.65±5.62	-27.43±5.69	**
P ₂	AOP	215.38±14.84	204.31±8.06	*	8.04±5.38	14.27±4.97	*
	AOT	229.23±9.24	205.54±7.94	***	12.85±8.45	19.97±8.59	***
	AFOP	163.08±4.76	150.77±5.20	***	9.25±3.01	9.02±2.47	
N ₂	AOP	272.15±9.77	262.46±9.58	**	-2.74±5.37	-11.39±5.55	***
	AOT	285.23±16.27	268.00±11.67	***	-3.07±7.19	-10.90±6.55	*
	AFOP	234.77±7.86	218.77±9.19	***	-20.22±6.19	-20.34±7.00	
P ₃	AOP	322.46±13.45	319.38±14.27		4.33±6.37	4.91±6.43	
	AOT	348.00±18.66	332.15±10.62	*	13.94±9.75	22.30±11.84	***
	AFOP	281.54±9.94	262.15±8.74	***	-9.56±4.34	-9.54±5.06	

注: 统计显著性为 *: p<0.050; **: p<0.010; ***: p<0.001。

3.3 统计结果

本文采用共平均空间模式的主成分分析,得到每个被试各自的时间过程。由图3b可知,不同的运动方向对大脑感知的影响主要体现在4个关键时间波N₁、P₂、N₂和P₃上,本文对它们的潜伏期与幅度进行了均值统计及“均值相等”的双边配对T检验,如表2所示。

3.4 讨论

两种深度运动过程都激活了基本相同的脑区——枕顶区(AOP)、枕及枕颞区(AOT)以及包括额区在内的多脑区(AFOP)的同步活动。但不同的运动方向对深度运动的大脑感知具有一定的影响,除了表现在激活的主要脑区(进行信息处理的侧重脑区)有所不同外,还表现在ERP时间过程中的关键波 N_1 、 P_2 、 N_2 及 P_3 的差异上:

(1) 根据空间拓扑及其贡献率可知,接近运动过程侧重激活了AOP的活动,这是一个高级视觉信息处理脑区,生理证据证实它与空间位置、速度等“where”信息的感知有关,而且也是深度运动导致的光流场变化在该区的神经反映^[9-10]。而远离运动过程在初次级视觉信息处理区域(AOT)^[9-10]的激活比接近运动的贡献大得多。这种激活脑区上的差异一方面暗示了AOP是深度运动特异脑区,另一方面也提示两种深度运动过程的视觉信息处理脑机制可能不同,接近运动对速度、深度及深度运动引起的光流变化等运动高级视觉信息处理的需求比远离运动更高,需要在AOP调动更多的资源参与;而远离运动则除了同样需要进行一些一般的有关速度、深度等运动高级视觉信息处理外,也侧重于初次级视觉信息的处理,可能与该运动过程的初始视角及运动期间视角比较大有关。

(2) 不同运动方向的时间过程基本相似(原位时间相关系数 >0.79),但在大部分关键时间波的潜伏期及幅度上都表现出显著的差异。远离运动比接近运动引起明显的早而强的反应,特别是在初次级视觉处理脑区。由于远离运动过程与接近运动过程的主要区别就是物体的初始视角及视角变化,因此在关键时间波上的显著差异可能与该区域主要处理与物体静态属性密切相关的“what”信息(如物体的大小即视角、颜色等)^[9-10]密切相关。从生理意义上可知, N_1 与 P_2 均是视觉的早期空间注意及方位选择有关的成分。本文的实验结果也证实它们受运动物体的初始视角及视角变化的影响最大,表现为远离运动引起早(AOT: $p<0.01$, AOP: $p<0.05$)而强(AOT: $p<0.01$, AOP: $p<0.05$)的反应。对于关键成分 N_2 ,很多人ERP研究均表明, N_{200} (潜伏期在运动启动后150~280 ms大的负波)最有可能与真实运动感知有关^[1-4],即 N_2 是运动特异成分。另外 P_3 (通常意义上的 P_{300})也是视觉问题中普遍研究的成分,它与注意机

制高度相关^[11]。且根据文献[12]可知, P_3 的潜伏期反映对刺激的评价或分类所需要的时间,其波幅反映工作记忆表征的更新。本文的统计结果表明,不同运动方向在初次级视觉信息处理区域(AOT)的 N_2 及 P_3 上均引起显著的差异,远离运动比接近运动的 N_2 及 P_3 均提前(N_2 : $p<0.001$; P_3 : $p<0.050$),幅度显著地增强(N_2 : $p<0.050$; P_3 : $p<0.001$)。同前,造成这种差异的原因应与这两种深度运动过程的初始视角及视角变化有关。远离运动的初始视角比较大,因此与运动过程中刺激的大小、颜色等“what”属性识别及运动状态、运动形状等基本运动信息的视觉处理有关的初次级视觉信息处理区域(AOT)^[9-10]的活动较强(N_2),对刺激的评价与分类较快,注意效应也更强(P_3)。在高级视觉处理区(AOP),由于处理的是比较纯粹的刺激速度、空间位置等“where”信息及深度运动导致的光流场变化信息,虽然两种运动过程的“where”信息基本等价,但由运动方向不同引起的光流场变化明显不同,导致了在运动特异成分 N_2 上的显著差异。另外,AOT到AOP的信息传递(视角影响)应也起了很大的作用,因此视角大的远离运动更早($p<0.001$)、更强($p<0.001$)。然而,对 P_3 统计检验显示,AOP对这些信息的评价、分类及更新在两种不同运动方向的深度运动过程中没有差异($p>0.05$)。

4 结束语

不同运动方向的深度运动过程(接近运动与远离运动)的人脑ERP反应显示,不同的运动方向会对深度运动感知具有明显的影响。虽然它们都激活了枕颞区、枕顶区及多区(额、顶、枕)同步反应,但是两种条件下的激活程度及重点不同。结合关键时间波 N_1 、 P_2 、 N_2 及 P_3 的生理意义,本文对两种运动方向在其上的差异进行了分析,认为时间成分上的显著差异主要是由于不同运动方向过程带来的初始视角及视角变化的不同造成的。另外,初次级视觉脑区对高级视觉处理脑区的信息传递也起了很大的作用。

本文的实验结果表明,接近运动与远离运动的深度感知等价(空间相关系数 >0.95 、原位时间相关系数 >0.79)。考虑到接近运动更侧重于深度特异脑区(枕顶区)的活动,因此,接近运动实验模式更适合用于做深度运动感知的研究,为进一步研究深度运动的大脑感知过程奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] KOBAYASHI Y J, YOSHINO A, KAWAMOTO M, et al. Perception of apparent motion in depth: a high-density electrical mapping study in humans[J]. *Neuroscience Letters*, 2004, 354: 115-118.
- [2] JIANG Y, HAXBY J V, MARTIN A, et al. Complementary neural mechanisms for tracking items in human working memory[J]. *Science*, 2000, 287: 643-646.
- [3] NIEDEGGEN M, WIST E R. Characteristics of visual evoked potentials generated by motion coherence onset[J]. *Cognitive Brain Research*, 1999, 8: 95-105.
- [4] 罗跃嘉, 姜 扬, 唐一源, 等. 潜意识视觉运动知觉启动的脑机制[J]. *科学通报*, 2001, 46(20): 1709-1713.
LUO Yue-jia, JIANG Yang, TANG Yi-yuan, et al. The brain mechanism of perceptual priming of unconscious visual motion[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(20): 1709-1713.
- [5] SUN H J, ZHAO J, SOUTHALL T L, et al. Contextual influences on the directional responses of tectal cells in pigeons[J]. *Visual Neuroscience*, 2002, 19: 133-144.
- [6] FROST B J, SUN H J. Time-to-contact advances in psychology series[M]. Amsterdam: Elsevier-North Hollan, 2004: 13-37.
- [7] GABBIANI F, MO C H, LAURENT G. Invariance of angular threshold computation in a wide-field looming-sensitive neuron[J]. *Journal of Neuroscience*, 2001, 21: 314-329.
- [8] 王 玲, 尧德中. 深度运动认知的脑电研究——速度因素的影响[J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(6): 837-843.
WANG Ling, YAO De-zhong. Study on ERP for perception of motion-in-depth: the effect of speed factor on cognition[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 26(6): 837-843.
- [9] UNGERLEIDER L G, HAXBY J V. "What" and "Where" in the human brain[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1994, 4: 157.
- [10] 寿天德. 视觉信息处理的脑机制[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1997.
SHOU Tian-de. Brain mechanisms of visual information processing[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 1997.
- [11] POLICH J. P300 in clinical application: meaning, method, and measurement[J]. *EEG Technology*, 1991, 31: 201-231.
- [12] DOCHIN E. Evoked potentials and behavior[M]. New York: Plenum Press, 1979: 13-75.
- [12] KIM J, BENTLEY P J. Towards an artificial immune system for network intrusion detection: an investigation of clonal selection with a negative selection operator[C]// *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*. Seoul: IEEE Press, 2001, 2: 1244-1252.
- [13] DE CASTRO L N, TIMMIS J I. Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm[J]. *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 2003, 7(8): 526-544.

编辑 黄 莘

(上接第612页)

- [10] 蒋亚平, 李 涛, 梁 刚, 等. 一种基于免疫原理求解 TSP问题的模型[J]. *计算机工程*, 2006, 2(15): 165-167.
JIANG Ya-ping, LI Tao, LIANG Gang, et al. An immune-based model for solving TSP[J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(15): 165-167.
- [11] LI Tao. An immunity based network security risk estimation[J]. *Science in China Ser F: Information Sciences*, 2005, 48(5): 557-578.

编辑 熊思亮