

图形形状与空间位置知觉诱发脑电的相干性分析

周群^{1,2}, 尧德中^{1,3}, 尹愚¹, 饶恒毅³, 卓彦³, 陈霖³

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院神经信息中心, 成都 610054;

2. 四川大学电气信息学院, 成都 610065;

3. 中国科学院认知科学重点实验室, 北京 100039)

摘要: 利用 128 道高分辨率脑电测量技术及脑电相干处理技术, 通过测量大脑对图形形状知觉 (任务 1)、图形形状和空间位置知觉 (任务 2) 两种任务的事件相关电位, 并基于电极数大致相同的原则, 从枕叶至额叶把头表分成 7 个区, 然后分析了枕叶与其它各区在不同频段的相干性。结果发现: 在 γ 1 频段 (28~39 Hz), 任务 2 时的平均相干系数值显著大于任务 1 时的相应值; 同时还发现在枕叶与额叶间, 任务 2 的相干系数更显著地大于任务 1 的相干系数。结合视觉的两条通路的理论, 这一结果从相干性角度表明, 背侧通道的参与强化了枕叶与额叶之间的信息沟通, 而这种沟通主要在 γ 1 频段。

关键词: 腹侧通路; 背侧通路; γ 频段; 事件相关电位; 相干系数

中图分类号: Q421

1 引言

对猴子和人大脑皮层的解剖和电生理学研究表明, 除初始视皮层 V1 外, 大量的皮层区域与视觉过程有关, 这些皮层区域大致上可分为解剖和功能分离的两条通路: 一条是与物体形状和颜色等特征 (“What”) 加工有关的腹侧通路; 另一条是与运动和空间位置特征 (“Where”) 加工有关的背侧通路。腹侧通路开始于初级视皮层 (V1), 经过次级视皮层 (V2)、高级视区 (V4)、颞下回 (TE), 最后投射到额叶。背侧通路沿着枕顶叶分布, 从 V1、V2、V3 区经 MT 区投射至顶叶, 然后也投射到额叶。两个通道均起始于 (V1、V2), 终止于额叶^[1]。目前, 对 What 通道的研究较多且较为深入, 而对 Where 通道的研究相对薄弱, 因为空间注意的大脑加工区域较多。最近基于 ERP (event related potentials) 的研究表明, 形状和空间位置的知觉相比于单纯形状知觉表现出枕颞区 N2 波幅的显著降低、P3 潜伏期的显著缩短、额区的 P2 波幅的显著减弱, 其差别波 dN2 成分主要来源于左侧枕颞区; 同时基于 fMRI (functional magnetic resonance imaging) 的观察发现, 形状知觉主要引起与物体识别有关的腹侧通路的兴奋, 空间位置知觉主要引起与空间位置和运动有关的背侧通路的兴奋, 形状和空间位置的知觉引起腹侧通路和背侧通路的兴奋^[2]。但两条视通路之间并非简单的二分法

关系, 可能存在并行加工过程和复杂的相互作用。

分布在大脑皮层不同区域的视觉神经元同步, 被认为是处理整合不同视觉通路信息的重要机制。大量的研究提示不同神经活动之间的相干性是完整视觉景象的不同侧面的生理关联引起的, 有选择的同步增强已被公认是视觉识别的基础, 其中 γ 频段的同步增强已被公认是视觉识别的基础, 其中 γ 频段的同步增强与下列功能有紧密联系: 1) 觉醒和注意; 2) 刺激特征整合; 3) 时空推理; 4) 学习记忆; 5) 语言解释; 6) 音乐和语音^[3]。近几年的研究根据认知任务的不同, 通过脑电 EEG (electroencephalogram) 或事件相关电位 ERP 在不同频段的同步指标, 显示了基于频段的同步性研究在分析问题上的重要性。同时, 事件相关脑电相干系数 ER-Coh (ERP coherence) 计算提供了基于频域测量不同记录通道同步性的指标^[4,5]。本文采用计算 ER-Coh 来研究 “what” 与 “where” 通道被激活时, 有关脑区是否存在相干性及存在相干性的主要频段。

在本文的脑电测量实验中涉及了两种不同任务, 任务 1 涉及单纯的形状知觉, 任务 2 同时涉

收稿日期: 2005-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90208003、30200059);

霍英东教育基金会资助 (91041)

通讯作者: 周群, 电话: (028)85405615,

E-mail: zhouqunsc@163.com

及图形形状和空间位置知觉。

2 研究方法

2.1 实验方法

被试 9 名 (男性 6 名, 女性 3 名) 为裸眼或矫正后视力正常的研究生或本科生, 年龄为 22~29 岁, 均为右利手。实验的刺激图形由相同视角 ($4^\circ \times 4^\circ$) 的圆形或者正三角形组成, 呈现在屏幕中央的绿色 “+” 注视点两侧。注视点视角为 0.5° , 单个图形的视角为 $4^\circ \times 4^\circ$, 距离注视角 4.5° 。刺激图形呈现时间为 200 ms, 刺激间隔时间 ISI (inter-stimulus interval) 随机分布在 1 200~1 500 ms 之间。实验由两种任务组成: 任务 1, 单纯的形状知觉实验, 一对相同的三角形或圆形同时呈现在注视点的左右两侧, 呈现顺序是随机等概率的, 要求被试判断呈现的图形是三角形还是圆形, 并按相应的左键或右键反应; 任务 2, 形状与空间知觉实验, 一对不同的三角形和圆形分别出现在注视点的两侧, 三角形或圆形在每侧呈现的顺序是等概率随机的。被试的任务是, 在盯住注视点的条件下, 注意两侧出现的图形, 要求被试判断指定图形出现在注视点的左侧还是右侧, 并按相应的左键或右键反应。按键反应的速度要求和准确性要求是同等的。

脑电实验的刺激图形和随机刺激序列由 NEURO SCAN 公司的 STIM 软件包产生。刺激图形呈现在 ViewSonic 6E 监视器上, 屏幕距被试 60 cm, 屏幕的背景为黑色, 背景区域长 9 度, 宽 22.7 度, 实验过程中在屏幕中央始终呈现一个绿色 “+” 字作为注视点。对于两种任务, 每种任务都包含 4 组实验, 每组实验由 100 个试验组成。每个被试在正式实验之前, 要对每种任务各进行 2 组练习。正式实验的所有 8 组实验的次序, 在被试间是随机的。

2.2 脑电记录与相干性计算

脑电记录采用 NEURO SCAN 脑电系统进行。记录时选用大小合适的电极帽, 用导电胶使电极与被试头皮接触, 使各导联阻抗均低于 $5 \text{ k}\Omega$ 。除记录对刺激任务的反应时和反应准确性外, 我们主要记录了 120 导的脑电数据和 3 导眼电数据。水平眼电极分别位于左右外眦外侧 1.5 cm。左右两导垂直眼电电极分别位于左右两眼的上下方。NEURO SCAN 脑电系统放大器的带通频率为 0.1~40 Hz, 采样频率为 250 Hz, 采样精度为 16 位, 放大 500

倍。EEG 包含眨眼、眼动等伪迹时, 实验中提示被试纠正, 脱机处理时予以剔除, 为了消除脑电信号对记录中参考点的实际电位的依赖性带来的对相干性分析的影响, 参考电极采用平均电极^[8]。

为了定量分析不同脑区之间的相互联系, 我们采用相干系数进行分析。相干系数是指所分析频段中不同频率相干函数的叠加, 相干函数就是归一化互谱密度函数, 表示两导脑电之间的振幅、频率和相角的相应性的度量, 即表示了大脑不同部位活动的相干性。相干系数在 EEG 中被广泛使用。它的优势是能在分散的频率段中做相干分析。归一化的相干系数为^[9]:

$$ERCoH = \frac{\left| \sum_{k=k_1}^{k_2} \hat{G}_{xy}(k) \right|^2}{\sum_{k=k_1}^{k_2} \hat{G}_{xx}(k) \sum_{k=k_1}^{k_2} \hat{G}_{yy}(k)} \quad (1)$$

其中 $\hat{G}_{xx}(k)$ 、 $\hat{G}_{yy}(k)$ 为需分析相干性的两个信号 X 和 Y 在频率 k 的自功率谱, $\hat{G}_{xy}(k)$ 为互功率谱。ERCoH 的取值范围为 0~1。当相干系数取 1 时, 说明 EEG 信号 Y 是 X 的在频段 k ($k_1 \sim k_2$) 的线性响应; 相干系数为 0 时表明这两个 EEG 信号在频段 k 之间是不相干的, 亦即这两个信号 EEG 是完全独立的; 相干系数常用于检查两个信号之间的因果关系。本工作中, 分别计算两种任务情况下整个脑区 120 个通道两两间的相干函数 (共有 $(119 \times 120)/2 = 7140$ 对), 并计算比较 δ (0~3.9 Hz)、 θ (4~7.9 Hz)、 α (8~11.9 Hz)、 β (12~27.3 Hz)、 $\gamma 1$ (28~39 Hz) 频段的相干系数, 分析任务 2 的相干系数大于任务 1 的分布区域。在计算相干系数时, 由于被试对任务 1 和任务 2 的按键反应时间分别为 $(374 \pm 53) \text{ ms}$ 和 $(319 \pm 55) \text{ ms}$, 为了分析按键前后大脑整合过程, 因此将本次分析的时间段定为 0~640 ms。在计算相干函数时, 频率分辨率为 2 Hz。统计采用 t 检验。

2.3 分析内容

- 1) 统计各频段中任务 2 时的平均相干系数大于任务 1 时的相干系数的情况;
- 2) 计算 δ 、 θ 、 α 、 $\gamma 1$ 四个频段在两种任务下电极间距与相干系数平均值关系曲线;
- 3) 为了更进一步确定两种任务的差异发生在什么区域, 根据大脑皮层从枕叶到前额分布有基本视觉区、视觉联合皮层区、躯体感觉皮层区、运动皮层区、运动前区和前额叶高级智能区, 我们将整

个头部分成了 7 个区域 (其中视觉联合皮层区分成两个区), 如图 1 所示, 计算统计枕叶与不同区域之间两种任务下在 γ_1 频段相干系数的平均值。

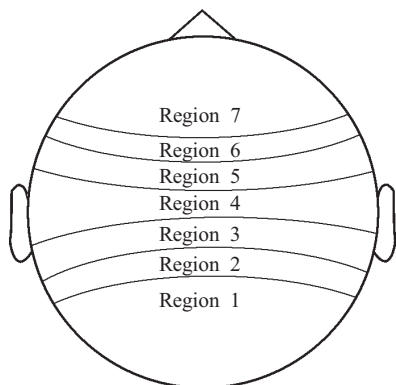


Fig.1 Scalp distribution

3 结 果

3.1 γ_1 波在认知过程中的重要作用

3.1.1 两种任务下各频段的相干系数比较

研究 δ (0~3.9 Hz)、 θ (4~7.9 Hz)、 α

(8~11.9 Hz)、 β (12~27.3 Hz)、 γ_1 (28~39 Hz) 频段所有电极对之间相干系数的平均值任务 2 大于任务 1 的情况, 统计检验表明, 在两种任务情况下, 除了在 γ_1 频段有统计显著性差异外 ($P < 0.05$), 其余频段均没有表现出统计显著性, 这提示 γ_1 频段在空间位置的认知过程中可能起了重要作用。

3.1.2 相干系数于电极间距的关系

图 2 分别是 δ 、 θ 、 α 、 γ_1 频段中两种任务下不同距离时的相干系数的平均值与距离的关系曲线。从图中可看出, 所有曲线总的趋势是随着距离加大而下降, 这可能是脑电的容积导体的传导效应所致。所有曲线在距离为 10~15 之间有下陷, 则可能与“平均参考”的大范围影响有关, 有待进一步研究。但可以看出 δ 、 θ 、 α 三个频段在两种任务条件下曲线趋势基本相同, 即随着距离的增加, 有聚拢的趋势。而 γ_1 频段的曲线明显地与其他三个频段有差异, 这种差异主要表现在距离较大时, 两种任务条件下曲线的背离。

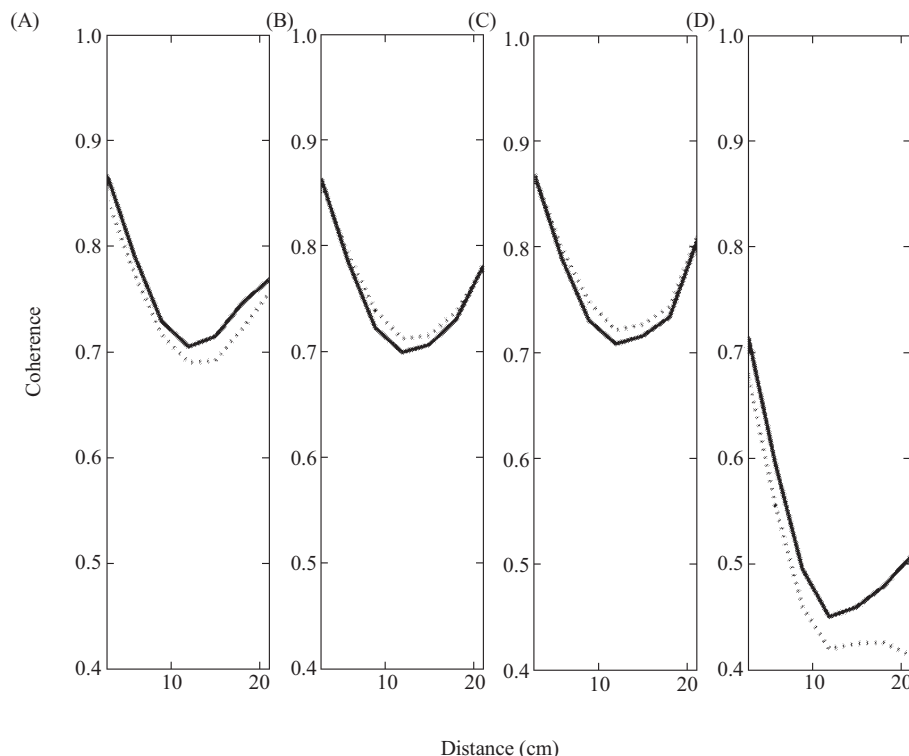


Fig.2 The relationship curve between coherence index and distance at bands δ 、 θ 、 α and γ_1 under two tasks (The distance is defined as the average square root of two electrodes coordinates). (A) δ band; (B) θ band; (C) α band; (D) γ_1 band

3.2 $\gamma 1$ 频段相干系数在两种任务下脑区分布的差异

图3为分别计算两种任务情况下, 1区与另外6个区从刺激后到630 ms间全部被试相干系数的平均值, 从图中可看出两种任务条件下1区与其他6个区域的相干函数差异从2区开始减小, 在3区达到最小, 然后开始加大, 在6区达到最大。

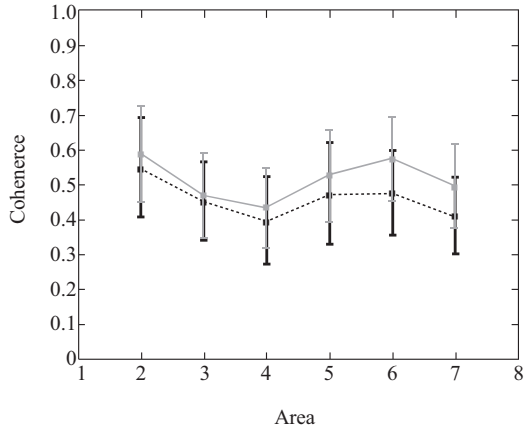


Fig.3 The average values of coherence indexes of all subjects between region 1 and other regions under two tasks from post-stimuli to 630 ms. —: std1; —■—: Location+Shape;: std2; —●—: Shape

Table 1 The statistic results of average value of coherence index of task2 larger than that of task1 across all frequency bands

Distance	1~2	1~3	1~4	1~5	1~6	1~7
Significant effect	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes
<i>P</i>	<0.05	>0.05	>0.05	<0.05	<0.001	<0.01

的推理。本实验由于两种任务均涉及图形任务, 差异主要是由空间位置带来的, 从本文结果的第一部分显示这种差异主要体现在 $\gamma 1$ 频段上的平均相干系数的差异, 这与前人的研究结果是一致的。

从文章结果的第二部分 $\gamma 1$ 频段平均相干系数在两种任务下的差异及其分布结果可看出, 枕叶与额叶相干系数增加的统计显著性特别明显, 这个结果证明额叶对任务2比任务1有更强的参与, 而这种参与的增强是由背侧通道的加入带来的。额叶是脑的高级功能处理区, 腹侧通道和背侧通道最后都会投射到额叶。由于两种任务均涉及图形认知, 差异是空间位置的认知, 如果没有背侧通道的加入, 枕叶通过腹侧通道表现出与额叶的相干系数在两种任务情况下应一致, 那么 $\gamma 1$ 频段上枕叶与额叶间

比较1区与其他6个区两种任务情况下的相干系数, 将任务2的相干系数大于任务1的统计结果列为表1, 从表中看出在两种任务的认知过程中1区与2区、5区、6区、7区的电极对之间相干系数在统计学上有显著性差异, 6区特别显著, 而1区与3区、4区则无统计显著性。

4 讨 论

不同的高级脑功能需要不同的多个区域神经系统之间进行不同层次的整合和协调来完成。多年的动物实验证明: 大脑信息整合和信息处理的主要潜在机制是不同神经网络的同步振荡。脑电中的同步现象, 尤其是脑电中高频段(如 γ 频段)的同步振荡, 被认为是建立不同脑区之间信息交流的一个关键部分。最近的许多研究表明静态靶的视觉刺激导致脑电 α 频段的同步活动^[6], 而移动靶的视觉刺激涉及 γ 频段的同步^[7]。人的视觉判断运动是根据空间位置的变化来实现的。Klemm等^[2]发现, 大脑在识别分布于空间不同位置各个元素的内在联系并将其整合为一个具有意义的完整图形时, 也显现不同脑区在 γ 频段的同步活动, 这也涉及空间位置

平均相干系数的增加在统计上就应和其他频段上一样无显著性, 但实际情况恰好相反, 这就说明大脑对空间位置认知通过背侧通道和额叶发生了更紧密的同步关系, 而背侧通道是经过扣带回通路联系顶叶和额叶的, 所以1区与3、4区间平均相干系数的差异无显著性。从表2可看出, 就1区与2区的平均相干系数而言, 任务2比任务1增加有统计显著性, 也印证了从枕叶到顶叶背侧通道的存在。由于这里讨论的是两种任务平均相干系数的差异, 而不是单个任务条件下1区与2区的相干系数。所以, 1区和2区的传导效应不应影响结论的得出。本次工作只是完成了脑皮层大尺度区域的相干分析, 后面需做更进一步的精确定位分析。

参考文献:

- [1] Ungerleider LG, Haxby JV. "What" and "where" in the human brain. *Curr Opin Neurobiol*, 1994,4:157~165
- [2] Rao HY, Zhou TG, Zhuo Y, Fan SL, Chen L. Spatiotemporal activation of the two visual pathways in form discrimination and spatial location: a brain mapping study. *Human Brain Mapping*, 2003,18:79~89
- [3] Klemm WR, Li TH, Hernandez JL. Coherent EEG indicators of cognitive binding during ambiguous figure tasks. *Consciousness and Cognition*, 2000,9:66~85
- [4] Tatsuya M, Tomi O, Taizo H, Mark H. Transient interhemispheric neuronal synchrony correlates with object recognition. *The Journal of Neuroscience*, 2001,21(11):3942~3948
- [5] Henk JH, Katherine AC, Daniel SR. Long-range neural synchronization mediates on-line sentence processing: EEG coherence evidence from filler-gap construction. *Psychophysiology*, 2002,39(6):820~825
- [6] Sowards TV, Sowards MA. Alpha-band oscillations in visual cortex: part of the neural correlate of visual awareness. *Psychophysiol*, 1999,32:35~45
- [7] Brecht M, Singer W, Engel AK. Correlation analysis of cortico-cortical interactions in the cat visual system. *Neurophysiol*, 1998,79:2394~2407
- [8] 尧德中. 脑功能探测的电学理论与方法. 北京: 科学出版社, 2003. 4~14

ERP COHERENCE ANALYSIS OF FORM AND SPATIAL LOCATION PERCEPTION

ZHOU Qun^{1,2}, YAO De-zhong^{1,3}, YIN Yu¹, RAO Heng-yi³, ZHUO Yan³, CHEN Lin³

1. School of Life Science & Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. School of Electric Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Key Laboratory of Cognitive Science, Graduate School and Institute of Biophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Two kinds of method, 128-channel high resolution electroencephalograms and coherence technology, were adopted to research the cognitive activation patterns in responding to the task of form perception (task1) and the task involving both form discrimination and spatial location (task2). Simultaneously, the scalp was divided into 7 parts from occipital area to frontal area, each of them included the same number electrodes. Coherences, between occipital area and other areas, of different frequency band were calculated. The results indicated that the average coherence index of task2 was significantly bigger than that of task1 in $\gamma 1$ band (28~39 Hz). In addition, between occipital area and frontal area, the difference of coherence index between task2 and task1 was significantly bigger than that between occipital area and others. Combined with two visual pathways theory, and from coherence aspect, these data suggested that the information communication between occipital area and frontal area has been strengthened by the participation of dorsal stream, which happened mainly in $\gamma 1$ band.

Key Words: Ventral stream; Dorsal stream; $\gamma 1$ band; Event-related potentials; Coherence