

DOI: 10.7652/xjtuxb201406023

大脑皮层-肌肉交互作用与注意力关系的实验研究

郑杨^{1,2}, 王刚^{1,2}, 徐进^{1,2}, 秦永辉^{1,2}, 王珏^{1,2}

(1. 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家保健器具工程技术研究中心西安交通大学分部, 710049, 西安)

摘要: 为探索注意力因素对大脑皮层与肌肉交互作用的影响, 5 名健康受试者被要求完成两种任务。在任务 1 时, 受试者通过右手食指、拇指对捏维持 2 N 的恒定力; 在任务 2 时, 为了分散受试者右手运动控制的注意力, 除需完成任务 1 中右手动作外, 还要通过左手食指外展保持一个大小随机的恒定力。实验过程中同步采集受试者脑电和肌电信号, 并将皮层-肌肉耦合, 即将脑电与肌电信号的频域相干作为表征大脑皮层与肌肉交互作用强弱的指标。结果显示, 任务 2 与任务 1 相比, 所有受试者其右手肌电信号与左侧大脑脑电信号的皮层-肌肉耦合强度显著降低。此结果表明, 注意力可影响大脑皮层与肌肉的交互作用, 且注意力越集中, 大脑皮层与肌肉交互作用越强。这一结论对于是否将注意力因素引入到神经损伤患者的运动功能康复中具有一定指导作用。

关键词: 相干; 脑电; 肌电; 注意力; 皮层-肌肉耦合

中图分类号: R318.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0134-05

Experimental Research on Relationship Between Attention and Cortex-Muscle Interaction

ZHENG Yang^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, XU Jin^{1,2}, QIN Yonghui^{1,2}, WANG Jue^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong

University, Xi'an 710049, China; 2. National Engineering Research Xi'an Center of Health

Care and Medical Devices, Xi'an Jiaotong University Branch, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the relationship between the attention and the cortex-muscle interaction, five health volunteers were selected as the subjects and asked to finish two kinds of motor tasks. With the first task, one subject was asked to maintain 2 N constant force by index finger and thumb of right hand. With the second task, in addition to the first task, one subject was asked to simultaneously maintain a constant force of random intensity by left index finger to divide his attention on the right hands. In the experiments, electroencephalogram (EEG) and electromyography (EMG) signals were recorded synchronously. The corticomuscular coherence (CMC) is used to measure the strength of the cortex-muscle interaction. The results show that the CMC strength between the right hand and left cortex decreases significantly with the second task, thus the cortex-muscle interaction increases when the attention is focused on the motion control. This conclusion is expected to guide patients with nerve injuries to involve attentions in rehabilitation training.

Keywords: coherence; electroencephalogram; electromyography; attention; corticomuscular

收稿日期: 2013-11-04。 作者简介: 郑杨(1987—), 男, 博士生; 王珏(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAI33B01)。

网络出版时间: 2014-03-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140306.1027.001.html>

正常的运动控制有赖于大脑运动皮层神经元与肌肉间的交互作用,大脑皮层通过运动控制下行通路将兴奋传递至相应的肌肉,控制其收缩。脑电(EEG)和肌电(EMG)分别作为中枢和外周神经电活动的直接反映,越来越多地被用于研究大脑皮层与肌肉电活动的相干性,即皮层-肌肉耦合(CMC)。大量研究表明,在不同的运动任务下均会出现 β 或者 γ 频带的CMC^[1-3],其被认为是直接运动控制下行通路的反映。CMC的强度受运动控制好坏的影响^[4],当受试者能够较好地完成任务时,CMC强度较大,反之强度变弱。文献[5]研究证明,受试者通过多次训练后,CMC强度会升高。当通过降温的方式减少外周神经活动时,从CMC中检测到的EEG与EMG信号间相干成分的时间延迟会增加。当存在视觉反馈时,CMC的强度会增加^[6]。脑卒中患者在进行肢体运动时CMC强度会低于正常受试者^[7]。上述研究结果表明,CMC可以作为一种反映大脑皮层与肌肉间交互作用的指标,考察大脑皮层对肌肉运动的控制能力。

然而,对皮层-肌肉间交互作用是否受到受试者运动相关注意力影响的研究还较少。当人将注意力集中于某一动作的精细控制时,需要不断地调整相应肌肉的收缩状态,从理论上讲,此时相关的大脑运动皮层与肌肉的交互作用较强。当其注意力被分散时,由于大脑还需处理其他任务,此时运动皮层与肌肉的交互作用可能被减弱。因此,假设当运动相关注意力被分散时,受试者大脑运动皮层与肌肉的交互作用减弱,且这一现象能够通过CMC表现出来。

本文以正常人作为受试对象,设计了单手运动控制及双手同时运动控制两种任务,以EEG及EMG间的相干性,即将CMC作为运动皮层与肌肉间交互作用的测量,考察受试者运动相关注意力与皮层-肌肉间交互作用的关系。

1 实验设计

本研究选择5名在校研究生作为受试者,平均年龄23岁。同步采集受试者在进行手部运动控制过程中的EEG和EMG信号,采样率设置为1 kHz,64导(10-20电极系统)EEG信号带通设置为DC-100 Hz。EMG信号带通设置为5~100 Hz,分别采集了左、右手第一背侧骨间肌的EMG信号。

受试者手部施力状态由拉压力传感器测得,并通过显示器反馈给受试者,以便受试者进行施力调整。图1所示为一次实验过程视觉反馈内容的时间

序。一次实验长13 s,受试者通过右手食指和拇指对捏拉压力传感器可以控制光标上下移动(力变大光标上移,水平位置固定),通过左手食指外展挤压传感器可以控制圆圈左右移动(力变大圆圈右移,垂直位置固定),折线及圆环为目标位置。实验开始时,屏幕首先出现折线及光标,折线从右向左滑动,受试者通过调整右手施力大小始终保持折线通过光标中央,从第3 s到第12 s间的平台期,受试者右手需要维持一个2 N的力。在第7 s时,光标上方位置出现圆环及左边一定距离的圆球,受试者左手需要维持一大小随机的恒定力将圆球保持在圆环内,这里选择大小随机的力是为了增加左手任务难度,从而尽量分散右手控制的注意力。一组实验包含30次,每名受试者进行9组实验(其中一名受试者进行了6组实验),以保证最终有足够多的数据段用于CMC估计。

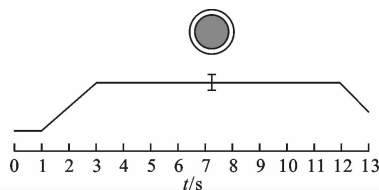


图1 实验视觉反馈时序图

剔除那些用于力量调整的时间段,同时为了消除边缘效应,挑出第4 s至第6 s(任务1)及第9 s至第11 s(任务2)的数据做进一步处理。任务1时,受试者注视光标,右手拇指和食指对捏控制光标上下移动,左手无动作,仅右手输出一个恒定的力;任务2时,受试者同时注视光标及圆球,右手拇指和食指对捏控制光标上下移动,左手食指外展控制圆球左右移动,左右手均输出一个恒定的力。显然,在任务1时,受试者注意力全部集中在右手控制上;在任务2时,受试者注意力要被分散到左右双手控制上。将任务2与任务1比较,针对右手控制而言,唯一的变化是用于右手控制的注意力被分散了。

2 数据处理

2.1 信号预处理

信号预处理主要包括以下3个方面。

(1) EEG及EMG信号的滤波。用一个双向FIR通带频率为5~45 Hz的滤波器对EEG及EMG信号进行带通滤波。

(2) 数据段的整理。将连续EEG及EMG数据截成长0.512 s的数据段,则频率分辨率为1.95 Hz,由于CMC分析主要集中在 β 或者 γ 频带,因此满足

频带相干性分析需求。数据段的剔除标准为:①存在眼电的数据段;②EEG 中包含明显 EMG 成分的数据段;③没有完成运动控制时(实际维持的力超出或低于目标力的 20%)对应的数据段;④EEG 中包含其他噪声的数据段。最终 5 位受试者保留的数据段个数如表 1 所示。

表 1 保留的数据段个数

受试者	数据段个数	
	任务 1	任务 2
1	575	650
2	544	597
3	712	928
4	562	570
5	485	636

(3)头皮表面拉普拉斯^[8](SCD)的估计。EEG 信号作为头皮电势的度量存在两个根本问题:一是 EEG 信号严重依赖于参考电极的选择;二是由于颅骨的存在,EEG 信号的空间分辨率被严重降低。在本研究中,利用 SCD 解决上述两个问题。假设头皮中没有体电流源,则总电流等于欧姆电流

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = -\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{J}$ 为头皮电流密度; Φ 为头皮电势。由于电流不可能向与头皮垂直的方向流动,因此可以定义表面散度

$$\nabla_{\text{surf}} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{e}_y \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{e}_x$ 和 $\boldsymbol{e}_y$ 是局部头皮表面正切平面的正交单位向量。将式(2)代入式(1),可得

$$\begin{aligned} \nabla_{\text{surf}} \cdot \boldsymbol{J} = & -\sigma \left(\frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{e}_y \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \boldsymbol{e}_x + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \boldsymbol{e}_y + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \boldsymbol{e}_z \right) = \\ & -\sigma \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) = -\sigma \nabla_{\text{surf}}^2 \Phi \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)左边即为待估计的 SCD,等式右边为已知的头皮电势。

球形样条假设^[9]在球形表面任意位置 $\boldsymbol{r}$ 处的电势可以表示为

$$\Phi(\boldsymbol{r}) = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i g_m(\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{r}_i) \tag{4}$$

式中: N 为电极个数;函数 $g_m(\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{r})$ 记为 $g_m(x)$

$$g_m(x) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{(n(n+1))^m} P_n(x) \tag{5}$$

式中: $P_n(x)$ 为 n 阶勒让得多项式。将式(4)代入式(3),并考虑到勒让得多项式表面拉普拉斯的简单形式,有

$$\nabla_{\text{surf}}^2 P_n(\cos\theta) = -\frac{n(n+1)}{r^2} P_n(\cos\theta) \tag{6}$$

式中: r 为半径; θ 为 $\boldsymbol{r}$ 与 $\boldsymbol{r}_i$ 间的夹角,则有

$$\nabla_{\text{surf}} \cdot \boldsymbol{J} = -\frac{\sigma}{r^2} \sum_{i=1}^N c_i g_{m-1}(\cos(\boldsymbol{e}_r \cdot \boldsymbol{e}_i)) \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{e}_r$ 和 $\boldsymbol{e}_i$ 分别为位置 $\boldsymbol{r}$ 及已知电极 i 处的单位向量;系数 c_i 需要用球形样条来拟合已知头皮电势得到。

2.2 EEG-EMG 相干性分析

信号 x (头皮电极处的 SCD)和 y (EMG 信号)的互谱密度估计为

$$S_{xy}(f) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i(f) \times Y_i(f)^* \tag{8}$$

式中: $X_i(f)$ 与 $Y_i(f)$ 分别为信号 x 与 y 第 i 个数据段的傅里叶变换; $*$ 表示复共轭; M 为数据段个数。当 $x=y$ 时, $S_{xy}(f)$ 表示信号的自功率谱密度。信号 x 和 y 的频域相干性可表示为

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{(S_{xx}(f) \times S_{yy}(f))^{1/2}} \tag{9}$$

2.3 相干性差异的统计检验

频域相干性差异的统计检验通常面临两个问题:一是两种任务下数据段的个数通常不同(见表 1),相干(见式(9))是有偏估计的,偏差与样本数有关,样本数的差异会导致两种任务下相干估计的偏差不同;二是多重比较问题,因为频域相干性的差异通常不发生在单一的频率点上,而是在一个频带范围内,即需要在一个频带范围内比较差异性。为了解决上述两个问题,利用 Eric Maris 提出的非参数检验手段^[10],此方法不依赖于受试者的数量,可分别对每位受试者进行单独的统计检验。将原始 CMC 差异 $C_1(f)-C_2(f)$ 转化为 $Z(f)$,从而建立统计量为

$$\begin{aligned} Z(f) = & \frac{(\operatorname{arctanh}(C_1(f)) - n_1) - (\operatorname{arctanh}(C_2(f)) - n_2)}{(n_1 + n_2)^{1/2}} \end{aligned} \tag{10}$$

式中: $n_1=1/d_1-2$; $n_2=1/d_2-2$; $C_1(f)$ 和 $C_2(f)$ 分别为任务 1 和任务 2 下的 CMC 值。 d_1 和 d_2 分别为任务 1 和任务 2 的自由度数,本文为数据段数的 2 倍。计算过程如下:首先将任务 1 与任务 2 的数据段合并,从中随机抽取数据段分别作为任务 1 和任务 2 的数据集,然后计算统计量 $Z(f)$ 作为一次重排的统计量,通过多次(本文为 10 000 次)随机抽取-估计 $Z(f)$ 的过程,可以建立统计量 $Z(f)$ 的一个近似分布。结合实际观测数据的统计量与所建立统计量的近似分布,可以估计相应的显著性差异 p 值。

先前的研究表明,一侧肢体的表面 EMG 信号会与对侧运动皮层 EEG 信号在 β 或者 γ 频带存在相干性。结合本研究的目的,主要检验了左侧运动皮层(电极 FC5、FC3、FC1、C5、C3、C1、CP5、CP3、CP1)处 SCD 与右手第一背侧骨间肌 EMG 信号的相干性在两种任务下的差异。

3 结 果

由于不同受试者 CMC 值存在差异,将其进行归一化得到^[11]

$$G_{CMC}(f) = \frac{C(f) - \mu(f)}{\sigma(f)}$$

(11)

式中: $\mu(f)$ 和 $\sigma(f)$ 分别为所有 EEG 信号对于 EMG 信号的 CMC 均值和标准差。图 2 所示为 5 位受试者在任务 1 及任务 2 下所有 EEG 信号与右手背侧第一骨间肌 EMG 信号间的相干性(G_{CMC})的拓扑图。从图中可以看出,所有的受试者在任务 1 下左侧运动皮层与右手背侧第一骨间肌间存在较强的 β 频带(受试者 1 为 γ 频带)相干性,而在任务 2 下,此相干性明显减弱。

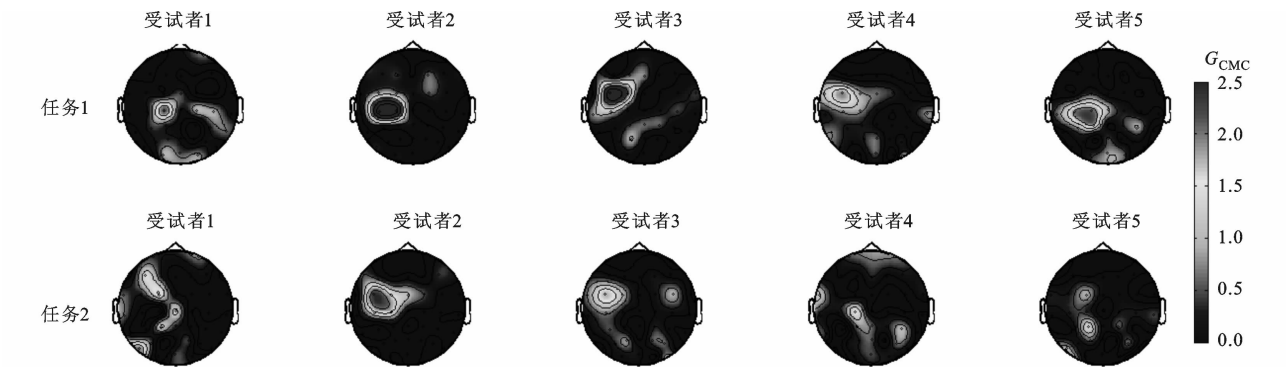


图 2 受试者 EEG 信号与右手背侧第一骨间肌 EMG 信号相干性的拓扑图

本文检验了左侧运动皮层区域 EEG 信号与右手背侧第一骨间肌 EMG 信号间相干性在两种任务下差异的显著性,并设定空假设为任务 1 下 CMC 不比任务 2 下 CMC 大,统计检验结果如表 2 所示。检验结果表明,所有受试者在任务 2 下左侧运动皮层与右手背侧第一骨间肌的 CMC 强度显著低于任务 1 下 CMC 强度。

表 2 统计检验结果

受试者	两种任务下具有显著性差异的 EEG 导联($p<0.05$)
1	C1
2	C3,C1
3	FC3,FC1,C3
4	CP3
5	C1

4 讨论与结论

本文首先证实了前人的研究结果,即当上肢肌肉维持一定恒定力输出时,肌肉的 EMG 信号与肢体对侧运动皮层的 EEG 信号间存在 β 或者 γ 频带的相干性^[4,12-13](见图 2)。以前的研究并没有表明这种相干性是否受到受试者注意力的影响,本研究

通过实验设计,使得患者在任务 1 时将注意力完全集中在右手控制上,而在任务 2 时受试者不得不将注意力分散在双手的运动控制中。从研究结果可以看出,任务 2 时这种皮层肌肉间的耦合明显降低($p<0.05$),说明受试者分散的注意力会导致 CMC 强度显著降低。

CMC 被认为是直接运动控制下行通路神经传导活动的反映,各种生理或病理因素会影响到脑电及肌电活动的耦合强度。特别地,脑卒中患者 CMC 强度低于正常人,且肢体运动功能恢复状态与耦合强度正相关,这与脑卒中患者运动控制下行通路受损的事实是相符的。本研究的结果表明,在正常生理状态下,受试者的注意力能够影响到 CMC 强度,即通过引入受试者注意力,能够加强皮层肌肉间的交互作用,即能够更多地调动直接运动控制下行通路发挥作用。由此可想,当神经损伤患者在运动功能康复训练过程中集中注意力于运动控制时,有可能最大程度地激活运动控制下行通路,促进其恢复过程。

本文以正常受试者作为研究对象,证明运动相关注意力可影响皮层-肌肉的交互作用,且集中注意力,可增加运动控制下行通路活动,增强皮层-肌肉的交互作用。本文结果对于在临床中如何利用虚拟

现实技术改善脑卒中患者肢体运动功能康复效果具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] WITHAM C L, WANG Minyan, BAKER S N. Corticomuscular coherence between motor cortex, somatosensory areas and forearm muscles in the monkey [J]. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2010, 4: 1-38.
- [2] PEREZ M A, SOTEROPOULOS D S, BAKER S N. Corticomuscular coherence during bilateral isometric arm voluntary activity in healthy humans [J]. *Journal of Neurophysiology*, 2012, 107(8): 2154-2162.
- [3] 袁丁. 双间三模态神经肌肉活动范式下的脑-肌电信号处理与相干性分析 [EB/OL]. [2013-10-10]. http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y2241625.aspx.
- [4] KRISTEVA R, PATINO L, OMLOR W. Beta-range cortical motor spectral power and corticomuscular coherence as a mechanism for effective corticospinal interaction during steady-state motor output [J]. *NeuroImage*, 2007, 36(3): 785-792.
- [5] MENDEZ-BALBUENA I, HUETHE F, SCHULTE-MONTING J, et al. Corticomuscular coherence reflects interindividual differences in the state of the corticomuscular network during low-level static and dynamic forces [J]. *Cerebral Cortex*, 2012, 22(3): 628-638.
- [6] 汤晓军. 上肢运动调控的神经机制研究 [EB/OL]. [2013-10-10]. http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y2060598.aspx.
- [7] FANG Y, DALY J J, SUN J, et al. Functional corti-

comuscular connection during reaching is weakened following stroke [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2009, 120(5): 994-1002.

- [8] PERRIN F, BERTRAND O, PERNIER J. Scalp current density mapping: value and estimation from potential data [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1987, 34(4): 283-288.
- [9] PERRIN F, PERNIER J, BERTRAND O, et al. Spherical splines for scalp potential and current density mapping [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1989, 72(2): 184-187.
- [10] MARIS E, SCHOFFELEEN J M, FRIES P. Nonparametric statistical testing of coherence differences [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2007, 163(1): 161-175.
- [11] CHEN S, ENTAKLI J, BONNARD M, et al. Functional corticospinal projections from human supplementary motor area revealed by corticomuscular coherence during precise grip force control [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(3): e60291.
- [12] BOONSTRA T W, VAN WIJK B C, PRAAMSTRA P, et al. Corticomuscular and bilateral EMG coherence reflect distinct aspects of neural synchronization [J]. *Neuroscience Letters*, 2009, 463(1): 17-21.
- [13] BAYRAKTAROGU Z, VON CARLOWITZ-GHORI K, LOSCH F, et al. Optimal imaging of corticomuscular coherence through a novel regression technique based on multi-channel EEG and un-rectified EMG [J]. *NeuroImage*, 2011, 57(3): 1059-1067.

(编辑 杜秀杰)

(上接第121页)

- cooling system: effects of rotation in internal cooling ducts [C] // *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012*. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 633-644.
- [8] PASCOTTO M, ARMELLINI A, CASARSA L, et al. Effects of rotation and channel orientation on the flow field inside a trailing edge internal cooling channel [C] // *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012*. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 11-22.
 - [9] 张宗卫, 朱惠人, 王振伟, 等. 出流孔位置对带肋矩形通道换热特性的影响 [J]. *推进技术*, 2011, 32(8): 581-585.
- ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, WANG Zhenwei, et al. Influence of bleed hole location on heat transfer in rectangular channels with ribs [J]. *Journal of Propul-*

sion Technology, 2009, 32(8): 581-585.

- [10] 裘云, 朱惠人, 倪萌, 等. 带肋壁与出流孔内流通道中肋角度对流量系数的影响 [J]. *航空动力学报*, 2009, 18(4): 235-238.
- QIU Yun, ZHU Huiren, NI Meng, et al. Effect of rib turbulator orientation on the discharge coefficient of suction hole in the internal passage [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 18(4): 235-238.
- [11] 苏福斌, 朱惠人, 郭涛, 等. 内冷通道带肋和出流孔壁面的换热研究 [J]. *航空动力学报*, 2009, 24(7): 1500-1506.
- SU Fubin, ZHU Huiren, GUO Tao, et al. Heat transfer enhancement within An internal passage by combinations of ribs and suction holes [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(7): 1500-1506.

(编辑 武红江 荆树蓉)