

基于 P300 的脑-机接口: 视觉刺激强度对性能的影响

马忠伟, 高上凯

(清华大学 医学院 生物医学工程系, 北京 100084)

摘要: 脑-机接口(BCI)是大脑与外部世界直接的交流通道。为了研究视觉刺激强度对基于 P300 的脑-机接口性能的影响,设计并实现了一种基于 5 个选择 oddball 的 P300 诱发电位范式的脑-机接口系统,并在此系统中研究 2 种不同强度下视觉刺激(高强度和低强度)下脑-机接口的信息传输率差异。9 名受试者参加了实验,每位受试者在高低 2 种强度视觉刺激下各采集 40 组数据,数据在预处理后使用支持向量机进行分类,最终的目标识别率分别为 84%和 81%。平均波形表明在所设计的范式下 2 种强度视觉刺激均可以诱发出稳健的 P300 电位,离线分析表明高强度视觉刺激下平均信息传输率可以达到 4.9 bit/min, 而低强度视觉刺激下为 4.5 bit/min。

关键词: 脑-机接口; P300; 支持向量机; 信息传输率

中图分类号: R 318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2008)03-0415-04

P300-based brain-computer interface: Effect of stimulus intensity on performance

MA Zhongwei, GAO Shangkai

(Department of Biomedical Engineering, School of Medicine,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A brain-computer interface (BCI) is a direct communication channel between the human brain and the external world. The effect of stimulus intensity on the performance of the brain-computer interface was investigated using a P300-based BCI system having a five-choice oddball paradigm. 9 subjects participated the tests with each subject completing 40 epochs with high intensity visual stimuli (HIVS) and 40 epochs with low intensity visual stimuli (LIVS). The results show a difference of the BCI performance between the HIVS and the LIVS. The preprocessed data were classified by a support vector machines. The identification correct rates of 84% with HIVS and 81% with LIVS were acquired. The averaged waveforms from the HIVS and the LIVS show that this new paradigm could elicit evident P300 potentials. Further analyses indicate that the HIVS information transfer rate could reach 4.9 bit/min, which is higher than the 4.5 bit/min with the LIVS.

Key words: brain-computer interface (BCI); P300; support vector machine; information transfer rate

脑-机接口(brain-computer interface, BCI)是当前神经工程研究的热点之一,它旨在建立一个人脑和外周世界的直接交流通道,把大脑发出的指令或者信息直接传递给被控制的外部设备^[1-2]。因为 BCI 系统是不需要外周肌肉与神经参与的通讯系统,所以它可以帮助那些运动障碍的残疾患者实现与外界的交流,从而改善生活质量。

P300 电位是脑-机接口中经常使用的信号,通常通过 Oddball 范式诱发^[3],它应用于脑-机接口有 2 个明显的优势^[1]:首先是受试者不需要进行训练即可诱发出 P300 电位;其次是由于 P300 的延迟很短,所以单次实验的时间也可以很短。Donchin 首先把 P300 电位引入 BCI 领域^[4]。P300 电位的分析方法有很多,常见的有:相关、独立分量分析、小波变换和支持向量机等。最近国际脑-机接口数据竞赛接连出现与 P300 分析相关的竞赛题目,效果好的多是采用支持向量机为核心的算法进行分类^[5-6]。

由于对于某些残疾人来说,6×6 的字符矩阵可能过于复杂,因此最近很多学者开始研究 4 个选择情况下的 BCI 系统^[7-8]。4 个选择可以传递一些简单的命令,但是当应用到模拟鼠标控制时,至少应该有 5 个选择才能完成基本的控制(上、下、左、右、确定)。因此,本文提出了一种基于 Oddball 条件的 5 个选择的新范式,并验证了它可以诱发出稳定的 P300 信号来实现信息传递。

Polich 等^[9]的研究表明,视觉刺激强度增加会增加 P300 波峰的幅度并减小其延迟。但是刺激强度是否会影响 BCI 系统性能仍然未知,因此本文在新范式下研究 2 种不同刺激条件下(高强度和低强

收稿日期: 2006-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60318001);

清华-裕元医学科学研究基金项目

作者简介: 马忠伟(1978—),男(汉),北京,博士研究生。

通讯联系人: 高上凯,教授, E-mail: gsk-dea@tsinghua.edu.cn

度)的BCI系统的性能差异。

1 试验方法

1.1 受试者

总共有9名志愿者参加了此次试验,其中男性受试者5名,女性受试者4名。这些受试者的年龄在22~26岁之间,均惯用右手,视力正常或者经矫正为正常。

1.2 试验范式

本文设计了新的范式用来研究2种刺激强度下的差异,视觉刺激面板见图1a所示。5个十字线表示5种选择,受试者只关注其中的一个。在实际应用中,这5个选择可以表示5种命令,例如鼠标的上、下、左、右运动和确认。实验开始后,首先是3s的准备期,然后一个特定的对象会在这5个十字线上以随机的顺序连续出现,对象显示时间为100ms,相邻两次对象出现之间的间隔为75ms,这样总的刺激的频率就为5.7Hz,与脑-机接口数据竞赛中的频率相同。当对象出现在受试者关注的十字线上时,称为目标刺激;否则为非目标刺激。当目标刺激出现时,受试者通过心里计数来产生响应。对象在这5个十字线上均出现1次为1个基本实验周期(Run),每个试验单元(Epoch)包含15个基本实验周期,也就是说对象在每个十字线上都出现15次。每个试验单元总的时间为16.125s,具体的试验流程如图2所示。

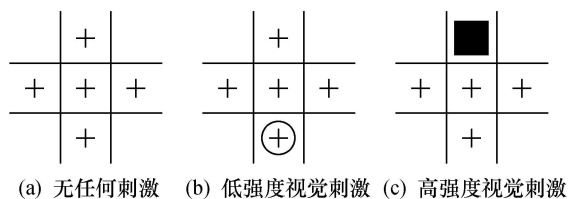


图1 刺激界面示意图

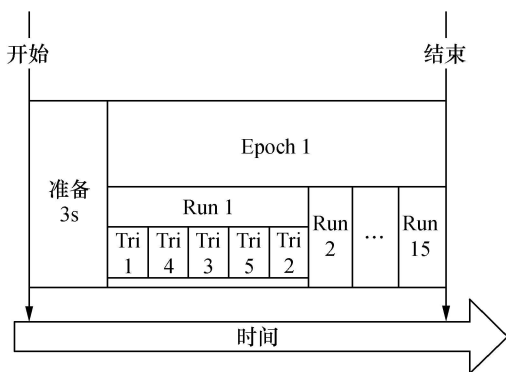


图2 试验单元的刺激序列流程图

本文要研究的是不同视觉刺激强度的对象对测试结果的影响。2种对象被使用:空心圆圈(图1b)和实心方块(图1c)。首先研究的是空心圆圈型的对象,此处认为空心圆圈对受试者产生较小的视觉刺激,用空心圆圈进行试验被称为低强度视觉刺激(low intensity visual stimuli, LIVS)。然后再研究实心方块的对象,此处认为实心方块对受试者产生较大的视觉刺激,用实心方块进行试验被称为高强度视觉刺激(high intensity visual stimuli, HIVS)。

试验时,视觉刺激界面显示在一台15英寸液晶显示器上,显示器距离受试者1m远。液晶显示器的分辨率设置为 1024×768 ,空心圆圈对象的直径为128像素,实心方块的边长为128像素,任意两个相邻对象之间间距为128像素。显示器显示白色时亮度为 150 cd/m^2 ,环境光线投射到实验台上的照度为 120 Lx 。

1.3 数据获取

文中试验数据均采用BioSemi Active Two系统记录,采样频率为256Hz。记录时采用5个导联,分别是T7、T8、Cz、Pz和Oz。参考电极被放置在头顶附近,为系统的标准设置。

1.4 数据处理

所有数据首先通过一个带通滤波器,只有1~26Hz范围内的成分被保留下来。由于设备默认参考电极在头顶,不利于P300波形的分析,所以数据需要重新进行参考设置。文中采用偏离头顶T7和T8两个电极的平均值作为新的参考。每个刺激出现后持续500ms的数据段被提取,这样每个实验单元得到75(5个符号,15次重复)个数据段。根据进一步分析的需要,选择同一epoch内不同Run的数据进行平均以增加信噪比。在平均过程中,任何幅度绝对值超过 $90 \mu\text{V}$ 的数据段被抛弃^[9]。

3个导联(Cz, Pz, Oz)的平均数据被用来作进一步分析,每个导联中的数据首先被降采样为52个点,然后把3个导联的点串联起来组成特征向量送入分类器。

本文中用支持向量机进行数据分类,经过比较发现径向基核函数可以得到较好的分类效果。为了保证结果的可靠性,这里使用 10×10 阶的交叉验证。关于支持向量机的细节问题,可以参考文^[10]。

2 结果及讨论

2.1 P300波形分析

本文设计的范式含有5个刺激,其中只有1个

是受试者关心的,因此目标刺激出现的概率为 20%。从 Oddball 原理来说,目标概率越高,P300 电位幅度越低。目前的研究表明,当目标概率高至 33% 时,仍能够产生稳定的 P300 电位用来分类^[3]。因此,从原理上讲,本文提到的范式完全可以诱发出 P300 电位。

下面通过数据分析是否诱发出了稳健的 P300 电位。此部分主要通过低强度视觉刺激下得到的数据来分析。P300 成分一般被认为是在刺激出现后的第 3 个正峰(因此也有人称之为 P3),出现时间在 300 ms 左右。验证 P300 的存在通常是看其时域波形,图 3(受试者 3,导连 Cz,平均次数为 600 次)为一个典型的实验结果。

从图 3 可以看出,在 0.2~0.4 s 之间内,目标刺激下的波形中在这个导连上有一个明显正向峰,这和前人文献^[1-2]中提到的 P300 特征完全吻合,因此可以说,本文提出的范式完全可以诱发出 P300 电位。

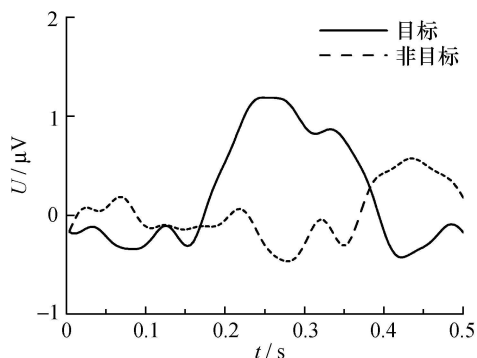


图 3 目标与非目标刺激下的波形对比

2.2 不同对象刺激下波形差异

前文已经提到过,有学者证明高强度视觉刺激时,P300 电位的幅度要比低强度视觉刺激下高一些。本文实验得到的 2 种强度视觉刺激下平均波形对比结果见图 4(所有受试者平均,导连 Pz,平均为 5 400 次)。

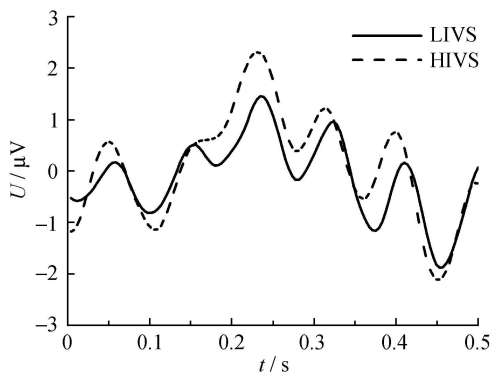


图 4 高低强度视觉刺激下波形对比

从图 4 可以看出,在导连 Pz, 2 个强度下波形非常类似,但高强度下 P300 幅度有明显提高。

2.3 识别正确率

对于每个受试者,重复次数为 15 次时的识别正确率被计算,结果如表 1 所示。

表 1 15 次平均后识别正确率对比 %

受试者	LIVS	HIVS
s1	97	91
s2	87	94
s3	69	86
s4	94	100
s5	100	96
s6	36	34
s7	92	100
s8	57	58
s9	91	92
平均	80	83

9 名受试者中在低、高 2 种不同强度的视觉刺激下,分别有 6 人和 7 人的识别正确率超过了 85%,说明设计的范式对大多数人都是适用的。很多原因可能会导致正确率较低,主观原因包括受试者对实验重视程度,对试验的理解和试验时的精神状态等。实验时受试者 s7 的主观报告表明其在试验时较为疲劳,可能由此引发其注意力下降,导致在 2 种强度视觉刺激下识别正确率都很低。

可以看到,在 9 名数据有效的受试者中,有 6 名受试者(s2、s3、s4、s8、s9 和 s10)在高强度刺激下的识别正确率有不同程度的提高,其中 4 人提高了 6% 以上。剩下的 3 人中,1 人(s7)在 2 种强度视觉刺激下的正确率都达不到基本的要求,结果不具有可比性。另有 2 人(s1、s5)在高强度视觉刺激下的效果不如低强度视觉刺激下的效果,但在高强度视觉刺激下的识别正确率都超过了 90%,达到了使用的要求。总的平均正确率高强度视觉刺激下要高于低强度视觉刺激下 3%。

对于以上差异,可以从 Oddball 原理给出一个解释。在 Oddball 范式中,受试者对目标刺激产生较大的 P300 电位,而对非目标刺激产生较小或者不产生 P300 电位。对于那些对非目标的刺激也产生较大响应的受试者来说,刺激强度越高,他们越容易受到非目标刺激的干扰,当这种干扰的影响大于刺激强度提高而产生的贡献时,其信噪比就会有一定程度的降低,造成其识别正确率的降低。

2.4 信息传输率

信息传输率的计算公式为

$$B = \text{lb } N + p \text{lb } P + (1 - P) \text{lb}[(1 - P)/(N - 1)].$$

其中: N 为供选择的目标的数量, P 为识别的正确率, B 为每次选择可传递的比特数^[2]。

根据前面的结果可以算出, 本文设计的范式在高亮度视觉刺激下平均信息传输率可以达到 4.9 bit/min, 而低强度视觉刺激下为 4.5 bit/min。因此高亮度视觉刺激可以提高信息传输率。

3 结论

1) 本文提出了一种新的诱发 P300 的范式, 并且证明了它可以从绝大部分受试者中诱发出 P300 电位。由于本文设计的新范式包含有 5 个选择, 因此可以应用到如模拟鼠标控制的 BCI 系统中。

2) 本文研究了低强度和高强度 2 种视觉刺激模式下的对比, 结果表明高强度视觉刺激下的平均识别正确率要比低强度视觉刺激下高 3%, 这将帮助今后设计基于 P300 的 BCI 系统时获得更好的性能。

参考文献 (References)

[1] Birbaumer N. Breaking the silence: Brain-computer interfaces for communication and motor control [J]. *Psychophysiology*, 2006, **43**(6): 517-532.

- [2] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, **113**(6): 767-791.
- [3] Sellers E W, Krusienski D J, McFarland D J, et al. A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance [J]. *Biological Psychology*, 2006, **73**(3): 242-252.
- [4] Donchin L A. Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials [J]. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol*, 1988, **70**: 510-523.
- [5] Blankertz B, Muller K R, Curio G, et al. The BCI competition 2003: Progress and perspectives in detection and discrimination of EEG single trials [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2004, **51**(6): 1044-1051.
- [6] Blankertz B, Muller K R, Krusienski D J, et al. The BCI competition III: Validating alternative approaches to actual BCI problems [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2006, **14**(2): 153-159.
- [7] Sellers E W, Donchin E. A P300-based brain-computer interface: Initial tests by ALS patients [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2006, **117**(3): 538-548.
- [8] Piccione F, Giorgi F, Tonin P, et al. P300-based brain computer interface: Reliability and performance in healthy and paralysed participants [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2006, **117**(3): 531-537.
- [9] Polich J, Ellerson P C, Cohen J. P300, stimulus intensity, modality, and probability [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 1996, **23**(1-2): 55-62.
- [10] Burges C J C. A tutorial on Support Vector Machines for pattern recognition [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, **2**(2): 121-167.

科技简讯

清华大学与美国约翰霍普金斯大学成立 “生物医学工程联合研究中心”

经过 3 年多的筹备, 由清华大学和美国约翰霍普金斯大学联手合作的“清华-约翰霍普金斯大学生物医学工程联合研究中心”正式成立, 两校同时还签署了科研与教学合作协议。

两校共同聘请约翰霍普金斯大学教授、清华大学教育部“长江学者”讲座教授王小勤担任该中心主任。王小勤是系统神经科学与工程领域的国际知名学者, 在听觉神经机理的研究方面有多项重要发现。清华大学与约翰霍普金斯大学将通过该中心, 在生物医学工程的前沿领域, 如神经工程、医学影像、组织工程方向进行实质性的合作研究, 开展师资培养等多方面的合作。该中心还将在生物医学工程的前沿方向上组织两校博士生的学术互访和联合培养, 以及本科生的暑期交流等。该中心将支持两校教师的短期互访和学术休假, 并定期组织双边学术研讨会。

约翰霍普金斯大学以医学学科和生物医学工程学科而闻名, 该校生物医学工程学科连续多年在全美排名第一, 该校毕业生和教授中先后有 23 位获得诺贝尔奖, 其中 15 位获得医学和生理学奖。