

不同灰度值刺激产生的稳态视觉诱发电位比较

李东阁^{1,2}

1. 认知科学国家民委重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 医学信息分析及肿瘤诊疗湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074

【摘要】稳态视觉诱发电位(SSVEP)是大脑对外界光刺激的一种物理反应。本实验从光刺激的物理因素出发,研究不同灰度值刺激对SSVEP频率识别准确率的影响。本实验采用拉普拉斯融合进行空间滤波,并利用典型相关分析法进行频率识别。设置刺激界面背景为白色,改变刺激方块的灰度值,从而分析受试者的频率识别准确率。结果表明灰度值增加,频率识别准确率下降,灰度值为0时,频率识别准确率最高。

【关键词】稳态视觉诱发电位;灰度值;典型相关分析

【中图分类号】TP391.4;R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)03-0340-04

Comparison of steady-state visual evoked potential produced by stimulations with different grey values

LI Dongge^{1,2}

1. Key Laboratory of Cognitive Science, State Ethnic Affairs Commission, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Medical Information Analysis and Tumor Diagnosis and Treatment, Wuhan 430074, China

Abstract: The steady-state visual evoked potential (SSVEP) is a kind of physical response of the brain to external light stimulation. Based on the physical factors of light stimulation, the effects of grey values on the accuracy of SSVEP frequency recognition is studied. Herein Laplace fusion is used for spatial filtering and canonical correlation analysis is applied for frequency recognition. With the white background, the grey value of squares is changed to analyze the accuracy of frequency recognition. The results show that the accuracy of frequency recognition decreases with the increase of grey value, and the accuracy of frequency recognition reach the highest when the grey value is 0.

Keywords: steady-state visual evoked potential; grey value; canonical correlation analysis

前言

当人眼受到固定频率超过4 Hz的视觉刺激时,大脑皮质活动将被调节,导致类似于刺激的周期性节律,这就是稳态视觉诱发电位(Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP),而SSVEP主要出现在大脑皮层枕区^[1]。人们设计出基于SSVEP的脑-机接口系统,通过识别大脑中的脑电信号的频率成分来检测目标指令^[2]。目前,基于SSVEP的脑-机接口系统得到广泛关注和研究,其中有关SSVEP的识别准确率问题的研究居多。Regan等^[3]证明在不同频段,SSVEP有不同的谐振峰,这些频段分别为:低频段(5~12 Hz)、中频段(12~25 Hz)和高频段(30~50 Hz)。随着频率的升高,谐振强度减弱。

SSVEP是通过固定频率的闪烁刺激诱发的,而诱发产生SSVEP信号的视觉刺激源通常包括光刺激源、图形刺激源以及模式翻转刺激源^[4-6]。其中,光刺激源主要是用受到一定频率调制的LED、荧光灯等光源作为视觉刺激。以LED作为光源诱发视觉刺激为例,利用LED可以实现不同颜色光的闪烁刺激来诱发SSVEP,而不同颜色光的LED闪烁会影响SSVEP的响应。

Regan等^[3]首先研究不同颜色(红色、黄色、蓝色)闪烁刺激对SSVEP在不同频段的响应的影响。研究表明:在11 Hz处红光可以诱发最强的SSVEP响应;在13 Hz处蓝光可以诱发最强的SSVEP响应;黄光诱发出的响应最弱,且对频率不敏感^[7]。也有研究者对不同颜色单色光刺激产生的稳态视觉诱发电位进行比较。结果表明红、绿、蓝3种颜色中,蓝光的效果最好^[8]。在对SSVEP的研究中,使用过红色、绿色、白色、黑色、灰色。

本研究旨在探讨影响SSVEP识别准确率的因素。采用图形刺激源,在计算机屏幕上设置一个单一的简单方块,让该方块以一定频率闪烁作为诱发SSVEP的

【收稿日期】2018-09-08

【作者简介】李东阁,硕士研究生,研究方向:脑-机接口, E-mail: 15827079265@163.com

视觉刺激。刺激界面背景为白色,通过改变刺激方块的灰度值,研究不同灰度值的刺激产生的SSVEP,分析不同灰度值的刺激对频率识别准确率的影响。

1 实验设计

1.1 受试者选择

选择5位在读研究生参加本实验,受试者年龄均在24岁左右并且均自愿参加实验,视力矫正后正常。在实验开始前,受试者需要做5 min的预备刺激,本实验要求受试者端坐在刺激屏幕前,身体不能有大的移动,眼睛要一直注视刺激屏幕上的闪烁方块。

1.2 实验刺激

实验中使用的视觉刺激是15寸的LCD显示器(分辨率1366×768),刷新频率设为60 Hz。很多研究表明,在6~20 Hz内诱发的SSVEP频率特性相较于其他频率度要好,而且周期频率刺激还能诱发出倍频频率的信号,因此要避免存在倍频关系的频率。本实验设置了4个目标频率,分别为7.7、8.1、8.5和8.9 Hz。影响SSVEP识别准确率的因素有很多,如刺激的时间窗长度^[9]、占空比^[10]等。本实验研究不同灰度值的刺激对SSVEP识别准确率的影响,灰度值范围是0~255,设置5种灰度值,分别为0、64、128、160和192(背景为白色,改变闪烁方块的灰度值)。图1为灰度值为0的刺激界面。

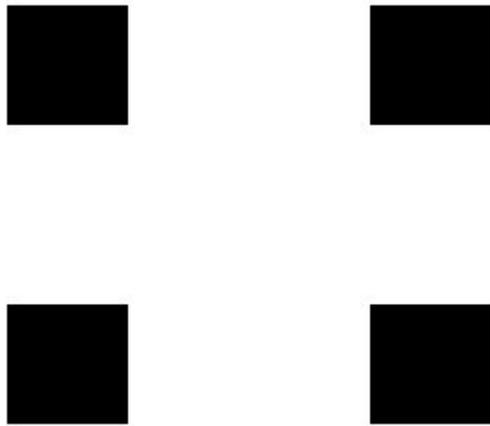


图1 刺激界面(灰度值是0)

Fig.1 Stimulation interface (gray value of 0)

刺激屏幕位于受试者的正前方,距离受试者60 cm,受试者在实验过程中要一直关注闪烁方块,身体不能有大的移动,避免眨眼。

1.3 实验记录

4个频率的闪烁方块依次开始闪烁,每个刺激频率闪烁时间设置为4 s,休息1 s,下一个刺激频率开始,即每个试次时间为5 s,4 s为刺激时间,1 s为休息时间。每组实验采集28个试次的数据,每个受试者

采集3组数据。数据采集频率为1 kHz。在进行典型相关分析时,允许频率误差范围为0.1 Hz。

2 方法

本实验中选用的4个频率均在7~10 Hz内,在预处理过程中,需要对数据进行带通滤波。本实验确定了带通滤波范围为2.5~30.0 Hz。

2.1 空间滤波

预处理能有效避免系统误差对实验结果的影响,但是由于脑电信号微弱、能量不集中,预处理对信噪比的增强有限。而且不同个体的SSVEP存在差异性^[11-12],单个电极的信号特征不能很好地反映整个枕区对外界刺激的反应特性。故本实验采用空间滤波的方法来融合多个电极的信号。

拉普拉斯融合是一种常用的空间融合方法^[13],通过去除局部共同噪声来达到加强SSVEP信噪比的目的:

$$\mathbf{W} = \left[-\frac{1}{2}, 1, -\frac{1}{2} \right]^T \quad (1)$$

式中, \mathbf{W} 表示3个电极进行空间滤波的系数矩阵。

由于SSVEP在枕区响应更为明显,选择 O_z 作为中间电极, PO_3 和 PO_4 电极为间距电极。经融合后的脑电信号 $\hat{X}(t)$ 可以用式(2)表示:

$$\hat{X}(t) = \mathbf{W}^T \bar{\mathbf{X}}_i, i \in [PO_3, O_z, PO_4] \quad (2)$$

其中, $\bar{\mathbf{X}}_i$ 表示 PO_3 、 O_z 、 PO_4 这3个电极采集的脑电数据组成的矩阵。

下面给出一名受试者在注视目标频率为8.1 Hz的刺激时诱发的SSVEP数据,并对比该数据空间滤波前后的频谱图,图中只表示一个试次的数据。图2为空间滤波前的频谱图,图3为空间滤波后的频谱图。两张图对比可以看出,拉普拉斯融合算法有效地去除了噪声信号的干扰。在进行空间滤波之前虽然能看出目标频率,但是由于其他频率的干扰太大,无法方便的将目标频率识别出来。

2.2 典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)

CCA是由Lin等^[14]于2006年提出用于解决SSVEP的识别问题的。与其它算法相比,CCA能更好地识别SSVEP。

CCA是一种多变量统计算法,试图揭示两组数据之间的潜在相关性^[15-16]。假设有两个随机变量 $X \in R^{I \times J}$ 和 $Y \in R^{I' \times J'}$, CCA就是寻找一对线性变换 $W_x \in R^I$ 和 $W_y \in R^{I'}$, 这样一来线性组合 $x = W_x^T X$ 和 $y = W_y^T Y$ 的最大相关性系数可以描述为:

$$\max_{W_x, W_y} \rho = \frac{E[xy^T]}{\sqrt{E[xx^T]E[yy^T]}} = \frac{W_x^T C_{xy} W_y}{\sqrt{W_x^T C_{xx} W_x W_y^T C_{yy} W_y}} \quad (3)$$

其中, $C_{xx} = XX^T$ 和 $C_{yy} = YY^T$ 分别表示随机变量 X 和

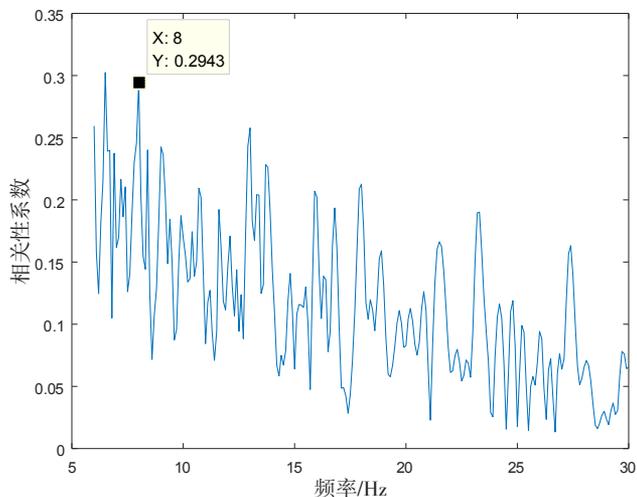


图2 空间滤波前的频谱图(目标频率8.1 Hz)

Fig.2 Spectrogram before spatial filtering (target frequency of 8.1 Hz)

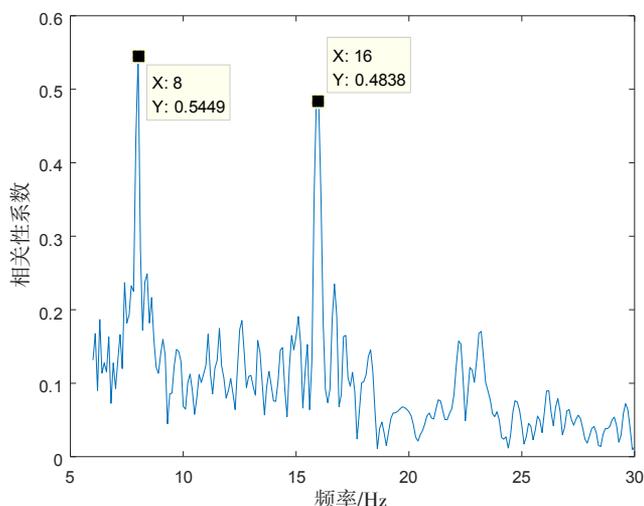


图3 空间滤波后的频谱图(目标频率8.1 Hz)

Fig.3 Spectrogram after spatial filtering (target frequency of 8.1 Hz)

Y 的自协方差矩阵; $C_{xy} = XY^T$ 表示两个随机变量 X 和 Y 之间的协方差矩阵; x 和 y 为典型变量; ρ 为最大相关系数, 表示 W_x 和 W_y 最大的典型相关性。由于关于 W_x 和 W_y 的任何调整都不会影响最大化相关性, 因此式(3)等价于:

$$\max_{W_x, W_y} \rho = W_x^T C_{xy} W_y \quad (4)$$

约束条件为:

$$W_x^T C_{xx} W_x = W_y^T C_{yy} W_y = 1 \quad (5)$$

由拉格朗日乘子方法可知, 求特征值的问题相当于上式的最大化问题:

$$C_{xy} C_{yy}^{-1} C_{yx} W_x = \rho^2 C_{xx} W_x \quad (6)$$

$$C_{yx} C_{xx}^{-1} C_{xy} W_y = \rho^2 C_{yy} W_y \quad (7)$$

由于 W_x 和 W_y 的线性变换, x 和 y 之间的最大典型相关性由最大广义特征值的相应特征向量给出^[17]。

CCA^[18]是最大化脑电信号与不同频率下的参考模板信号(即正余弦信号)之间相关性, 由此来识别并检测目标刺激频率。假设我们要将目标频率(即SSVEP信号的频率)从 M 个刺激频率中找出。 $X \in R^{C \times P}$, 其中 C 是脑电采集时通道的个数表, P 是每个通道采样的点数^[17-19]。 $Y_m \in R^{2H \times P}$ 是事先构建好的参考信号, 设为第 M 个刺激频率 $f_m (m = 1, 2, \dots, M)$, 它的数学表达式是由一系列的正弦-余弦波组成:

$$Y_m = \begin{pmatrix} \sin(2\pi f_m t) \\ \cos(2\pi f_m t) \\ \vdots \\ \sin(2\pi H f_m t) \\ \cos(2\pi H f_m t) \end{pmatrix}, t = \frac{1}{F}, \frac{2}{F}, \dots, \frac{P}{F} \quad (8)$$

其中, H 是信号的谐波数; F 为信号的采样率。 X 与 $Y_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 之间的最大相关系数 ρ_m 可由前面求最大典型相关系数的公式得到, 从而识别得到SSVEP信号的频率^[20], 即有:

$$\hat{f} = \max_{f_m} \rho_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

本实验中共设置了4个刺激频率, 将空间滤波融合后的脑电信号进行典型相关分析, 分析过程中将脑电信号分别与4个刺激频率的参考信号进行相关性分析, 得到4个相关性系数, 相关性系数最大的值所对应的参考信号的频率即为这组采集的脑电信号中的目标频率。

3 结果与讨论

在不同灰度值刺激下, 5名受试者的频率识别准确率随灰度值的变化情况如表1所示。

从实验结果可以看出不同灰度值所对应的频率识别准确率不同, 受试者S1和S4随着灰度值的增加, 频率识别准确率下降。S2、S3、S5在灰度值从64增加到128的过程中频率识别正确率增加, 灰度值继续增加, 频率识别准确率出现大幅下降。由此可见, SSVEP的识别准确率并不是随灰度值的升高不断减小的, 而是根据不同的受试者在灰度值由64增加到128过程中识别准确率有增高趋势, 但是灰度值为0的刺激产生的SSVEP的频率识别准确率对于所有受试者来说都是最高的。S3和S5的整体频率识别准确率明显比其他几名受试者的低。S1、S2和S4在灰度值为0的刺激下识别准确率均在90%以上, 而S3和S5的识别准确率只有75%和65%, 其中, S5在灰度值由0到192的变化过程中, 识别准确率只有10%左右的波动。由此, 我们可以发现对于SSVEP识别准确率低的受试者来说, 灰度值并不能作为提高他们的识别准确率的影响因素。

本实验设定刺激背景为白色, 设置刺激方块的灰度值, 证实产生的不同灰度值刺激对SSVEP有影响, 灰

表1 不同灰度值下的频率识别准确率(%)
Tab.1 Accuracy of frequency recognition under different gray levels (%)

受试者	灰度值				
	0	64	128	160	192
S1	93	88	83	75	63
S2	98	80	85	45	41
S3	75	63	67	44	40
S4	95	90	70	70	65
S5	65	46	58	56	56

度值为0的刺激产生的SSVEP是最强的,频率识别准确率也最高。但是不同受试者产生的SSVEP的识别准确率有较大的区别,说明个体之间存在差异性。

4 结论

本实验采集并分析了5名受试者的数据,其中有两名受试者识别准确率低于80%,在以后的研究中,可以尝试增加受试者,验证SSVEP脑-机接口在人群中的适用范围。本实验采用拉普拉斯空间滤波的方法,将3个信道的数据进行了融合,并将融合后的数据进行CCA。如果尝试融合更多枕区电极,信噪比将得到更好的提高,SSVEP的识别准确率可能会有所提高。

【参考文献】

- [1] MULLER-PUTZ G R, SCHERER R, BRAUNEIS C, et al. Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components[J]. *J Neural Eng*, 2005, 2(4): 123-130.
- [2] GAO X, XU D, CHENG M, et al. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled[J]. *IEEE Trans Neur Sys Reh*, 2003, 11(2): 137-140.
- [3] REGAN D. Human brain electrophysiology: evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine[M]. New York: Elsevier Science Publishing, 1989.
- [4] ZHU D, BIEGER J, MOLINA G G, et al. A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs[J]. *Comput Intell Neurosci*, 2010: 702357.
- [5] VIALATTE F B, MAURICE M, DAUWELS J, et al. Steady-state visually evoked potentials: focus on essential paradigms and future perspectives[J]. *Prog Neurobiol*, 2010, 90(4): 418-438.
- [6] ODOM J V, BACH M, BARBER C, et al. Visual evoked potentials standard[J]. *Doc Ophthalmol*, 2004, 108(2): 115-123.
- [7] 张锋, 徐光华. 稳态视觉诱发电位的研究与展望[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 156-165.
ZHANG F, XU G H. Study and prospect of steady-state visual evoked potential[J]. *Chinese Journal of Scientific Instruments*, 2010, 31(8): 156-165.
- [8] 吴正华, 尧德中. 不同颜色单色光产生的稳态视觉诱发电位的比较[J]. *生物医学工程学杂志*, 2008, 25(5): 1021-1024.
WU Z H, YAO D Z. Comparison of steady-state visual evoked

potentials produced by monochromatic light with different colors[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 25(5): 1021-1024.

- [9] 童基均, 李琳. 采用平滑伪Wigner-Ville分布的SSVEP脑-机接口系统[J]. *浙江大学学报*, 2017, 51(7): 598-604.
TONG J J, LI L. SSVEP brain-computer interface system with smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2017, 51(7): 598-604.
- [10] 覃玉荣, 龙安, 刘凌伶, 等. 不同占空比光刺激对稳态视觉诱发电位的影响研究[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(2): 319-324.
QIN Y R, LONG A, LIU L L, et al. Effects of different duty cycle light stimulation on steady-state visual evoked potential[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(2): 319-324.
- [11] 赵丽, 薛仲林, 王宣方. 基于SSVEP的高传输速率脑机拨号系统[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(10): 185-188.
ZHAO L, XUE Z L, WANG X F. High transmission rate brain-computer dial-up system based on SSVEP [J]. *Computer Technology and Development*, 2017, 27(10): 185-188.
- [12] 陈小刚, 徐圣普. 稳态视觉诱发电位频率响应特性研究[J]. *北京生物医学工程*, 2018, 37(3): 259-264.
CHEN X G, XU S P. Study on frequency response characteristics of steady state visual evoked potentials [J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2018, 37(3): 259-264.
- [13] 李琳. 基于稳态视觉诱发电位的脑-机接口系统设计及相关算法的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
LI L. Design of brain-computer interface system based on steady-state visual evoked potential and research on related algorithms [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [14] LIN Z L, ZHANG C S, WU W, et al. Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2006, 53(12): 2610-2614.
- [15] 吴俊平, 俞祝良. 脑-机接口中的SSVEP信号处理方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
WU J P, YU Z L. Research on SSVEP signal processing in brain-computer interface [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [16] 徐光华, 张锋, 谢俊, 等. 稳态视觉诱发电位的脑机接口范式及其信号处理方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(6): 1-7.
XU G H, ZHANG F, XIE J, et al. Brain-computer interface paradigm and signal processing methods for steady-state visual evoked potentials[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(6): 1-7.
- [17] 杨俊宇. 基于SSVEP的脑机接口系统研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
YANG J Y. Research and design of brain computer interface system based on SSVEP [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [18] LI Y, BIN G, CAO X, et al. Analysis of phase coding SSVEP based on canonical correlation analysis (CCA)[C]. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*, 2011.
- [19] 张宇. 基于视觉诱发电位的脑-机接口分析算法优化及实时控制系统构建[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
ZHANG Y. Optimization of brain-computer interface analysis algorithm based on visual evoked potential and construction of real-time control system [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [20] 刘文倩, 张莉. 关于稳态视觉诱发电位SSVEP信号的BCI关键技术研究[J]. *中国设备工程*, 2017, 24(6): 114-119.
LIU W Q, ZHANG L. BCI key technologies on steady-state visual evoked potential (SSVEP) signal[J]. *China Plant Engineering*, 2017, 24(6): 114-119.

(编辑:谭斯允)