

基于 SSVEP 的高传输速率脑机拨号系统

赵 丽, 薛仲林, 王宣方

(天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300222)

摘要:随着科技的发展,BCI 技术已有长足进步,但是其识别率和传输率低,是阻碍其走出实验室、走向实践应用一个重要原因。SSVEP 即当人的眼睛的视网膜受到固定频率的刺激时,大脑视觉皮层也会产生一个相同频率的脑电信号或者是倍数频率的信号。为此,提出了基于 CCA 算法的快速脑机拨号系统。该系统引入用于识别和分析 SSVEP 信号的空间滤波器,同时将数据分析结果通过 Matlab 串口直接发送给下位机 SIM900 拨打电话。该系统不仅可以实现拨打电话功能,而且还可以实现电话的实时接听,以帮助有运动障碍的残障人士,有效保证了残障人士生活的便利。实验结果表明,基于 CCA 算法所构建的快速脑机拨号系统能够提取脑电信号的特征,实现准确的模式分类,其准确率达 95%, ITR 达到 154 bit/min,为脑机接口系统推向应用提供一种新的思路和方法。

关键词:典型相关分析;稳态视觉诱发电位;传输速率;脑机接口系统

中图分类号:TP302

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)10-0185-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.10.039

A High ITR BCI Dial System Based on SSVEP

ZHAO Li, XUE Zhong-lin, WANG Xuan-fang

(Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control in Tianjin, Tianjin 300222, China)

Abstract: With the development of science and technology, BCI technology has made great progress, but its recognition rate and transmission rate are low which constrain its application in practice. SSVEP is the phenomenon that when the retina of the human eye is stimulated by a fixed frequency, the visual cortex of the brain produces a signal of the same frequency, or multiples of the frequency. Therefore, a quick brain computer dialing system based on CCA is proposed which is used for spatial filter for identification and analysis of SSVEP signals and sends the results of data analysis through Matlab serial port to the client SIM900 call. It can not only own the function of calling the telephone but also have real-time answering of the telephone so as to help the disabled person with the movement disorder and effectively ensure the convenience of the disabled. The experimental results show that it can extract the characteristics of EEG signal for realization of accurate pattern classification with accuracy rate by 95% and ITR by 154 bit/min, and has provided a new ideas and method to establish brain computer interface system for applications.

Key words: canonical correlation analysis; steady-state visual evoked potentials; information transfer rate; brain computer interaction

1 概述

脑-计算机接口是大脑与外部设备直接建立通信,不依赖外周神经和肌肉,旨在帮助残疾人士和瘫痪人士使用的计算机和其他技术设备^[1]。目前应用最广泛的设备是非侵入性的脑机接口系统,该系统不但成本低,而且使用安全,所以被应用于试验系统和字符输入系统中。

SSVEP(Steady-State Visual Evoked Potentials)早在 1966 年被 Regan 研究发现,即当人的眼睛的视网膜

受到固定频率的刺激时,大脑视觉皮层也会产生一个相同频率的脑电信号或者是倍数信号。闪烁刺激频率不同,所诱发的 SSVEP 的强度也不同。一般刺激频率在 25 ~ 50 Hz 所诱发的频率的振值最强,12 ~ 25 Hz 所诱发的频率的振值次之,5 ~ 12 Hz 所诱发的频率的振值最弱。目前在非植入 BCI 系统中,主要有 3 种 SSVEP-BCI 实现形式:以频率为特征,刺激源以不同的频率的闪烁;以相位为特征,刺激源以同一频率但相位不同的闪烁;同时以相位和频率为特征,刺激源以不同

收稿日期:2016-11-15

修回日期:2017-03-03

网络出版时间:2017-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61178081);天津市应用基础与前沿计划重点项目(C14JCZDJC36300)

作者简介:赵 丽(1962-),女,博士,教授,研究方向为生物医学信号处理、智能信息检测等;薛仲林(1990-),男,硕士研究生,研究方向为智能控制与信息处理。

网络出版地址:cnki.net/kcms/detail/61.1450.tp.20170719.1111.060.html

的频率和相位闪烁。文中采用不同频率和相位的闪烁^[2-5]。

BCI 系统的主要指标是信息传输率 (Information Transfer Rate, ITR), 定义为单位时间发出的有效比特数, 因此又称为比特率 (bit rate)。它是一个用来衡量脑机接口性能的客观指标, 与响应时间、命令数目和识别的正确率有关, 单位采用 bits/s 或 bits/min。对于一个准确率的 M 分类问题, 信息传输率的计算方法如下所示:

$$B = C \left\{ \log_2 M + p \log_2 p + (1 - p) \log_2 \left(\frac{1 - p}{M - 1} \right) \right\} \quad (1)$$

其中, C 表示系统在单位时间内所能做出的决策次数^[6-8]。

ITR 取决于三个因素: 目标数量 (必须足够一个特定的接口任务)、检测速度和精度。因为 SSVEP 训练时间短, ITR 传输率高, 设计实验模式简单, 因此广泛应用于非侵入性的脑机接口中。

典型相关算法 (Canonical Correlation Analysis, CCA) 是利用变量间的相关关系反映两组指标之间的整体相关性的多元统计分析方法, 分别在两组变量中提取有代表性的两个综合变量 X 和 Y , 利用两个综合变量的相关关系来反映两组指标之间的整体相关性。

在传统的脑机拨号中, 利用 FFT (Fast Fourier Transformation) 和 PSD (Power Spectral Density) 等方法提取脑电特征, 这种基于能量值提取特征值的方法, 个体差异性很大, 不利于系统推广。文中从刺激范式直接采用 Matlab PTB 工具箱编写刺激界面, 能够减少硬件电路刺激模块的使用, 从而简化电路设计。引入 CCA 算法提取特征值, 提高了系统的识别率和精度; 引入 SIM900 拨号系统, 使用 USB 供电, 增加了系统的便携性。为此, 设计并实现了快速脑机拨号系统。该系统在功能、速度和精度上均有提高, 且体积更小, 更便于携带。

2 系统构建

基于 SSVEP 的高传输速率脑机拨号系统包括脑电诱发、脑电信号采集、脑电信号处理、拨号系统, 系统的工作流程为 Matlab PTB 工具箱编写稳态的视觉界面, Neuroscan 采集脑电数据, Matlab 分析信号结果, 传给下位机 SIM900 模块拨号, 如图 1 所示。

2.1 脑电信号诱发

Psychtoolbox-3 (PTB-3) 是一组 Matlab 工具箱, 在原来的 PTB2 基础上, 兼容和扩展了 C 语言, 能更好地与 OpenGL 交互。主要用于心理实用程序, 而文中用于刺激界面商编辑。

在 PTB 工具箱上设计了一个 12 目标的 BCI 脑机拨号系统。如图 2 所示, 实验刺激界面是 3×4 刺激矩阵, 包含 12 个字符 (10 个数字, 2 个字符)。具体来说, 12 个刺激频率目标包括 9 Hz、9.5 Hz、10 Hz、10.5 Hz、11 Hz、11.5 Hz、12 Hz、12.5 Hz、13 Hz、13.5 Hz、14 Hz、14.5 Hz。两个相邻频率之间的相位间隔为 0.5π , 12 个刺激频率以不同的频率同时闪烁。以电脑的刷新频率为基准, 实现数据帧不同时间的闪烁, 从而产生视觉诱发刺激频率。如图 2 所示, Y 为确认要拨的电话号码, C 为退格键, 其他 0~9 为数字键。

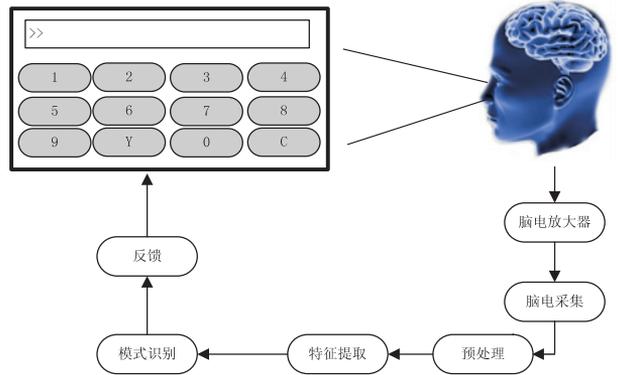


图 1 系统框图

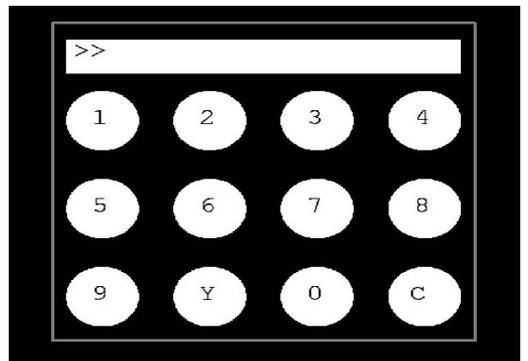


图 2 拨号刺激界面

2.2 脑电信号采集

实验选取了 Neuroscan 公司生产的 128 导脑电数据采集仪, 参考电极为中央区的 REF、GND 等电极。分别采集 Pz、PO3、PO4、PO5、PO6、O1、O2、OZ、POZ 等 9 个导联的 SSVEP 脑电信号。采样率为 1 000 Hz, 电极阻抗值在 10 kΩ 以下。实验共有 7 名在校健康研究生参加 (3 男 4 女), 年龄在 20~25 之间, 保持实验室安静, 受试者坐在一张舒适的椅子上, 距屏幕约 70 cm。实验开始时有两次数据的建模, 每人进行 10 组电话号码实验。

3 信号的处理

3.1 信号预处理

在实验信号处理中, 提取 9 个通道的 SSVEP 由刺激产生的信号。考虑视觉刺激的延迟性, 提取 0.5 s

的数据长度,首先被降采样到 250 Hz,然后用带通滤波器从 7 Hz 滤波到 70 Hz 无限脉冲响应(IIR)滤波器。零相正向和反向滤波在 Matlab 中使用 filtfilt 函数实现。

3.2 CCA 提取特征值

典型相关分析的实质就是在两组随机变量中选取若干个有代表性的综合指标,用这些指标的相关关系表示原来两组变量的相关关系。将采集到脑电信号的 N 个样本和刺激信号的参考 N 个样本都进行线性变化,CCA 应用于 SSVEP 频率分量的脑电信号(EEG)。该方法的实质是提取稳态视觉诱发电位脑电图窄带频率分量,提取相关的频率特征。

$$X = \begin{pmatrix} \text{channel}_i \\ \text{channel}_j \\ \dots \\ \text{channel}_m \\ \text{channel}_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,channel 的下标表示不同信道的编号。

$$Y = \begin{pmatrix} \sin(2\pi ft) \\ \cos(2\pi ft) \\ \dots \\ \sin(2\pi Nft) \\ \cos(2\pi Nft) \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, Y 为与刺激频率相关的参考信号; N 为刺激频率的谐波个数, X 中 channel 的数量也为 N 。

CCA 为两组多维变量 X 和 Y 寻找一对向量 W_x 和 W_y , 通过 W_x 和 W_y 来最大化相关变量 $x = X^T W_x$ 和 $y = Y^T W_y$ 之间的相关性,如下所示:

$$\max_{W_x, W_y} \rho = \frac{E[x^T y]}{\sqrt{E[x^T x] E[y^T y]}} = \frac{E[W_x^T X Y^T W_y]}{\sqrt{E[W_x^T X X^T W_x] E[W_y^T Y Y^T W_y]}} \quad (4)$$

式(4)得出了 X 和 Y 之间的相关系数 ρ 的最大值,选取不同的频率计算 ρ ,最大 ρ 对应的频率即为 SSVEP 响应频率。

CCA 是用来衡量两组多维变量之间的潜在相关性的一种统计方法,广泛用于检测 SSVEP 频率信号。考虑两组多维变量 x, y , 其中 $x = X^T W_x, y = Y^T W_y, W_x$ 和 W_y 为 CCA 的权向量,用于最大限度地衡量 X 和 Y 之间的相关性。

4 打电话实现

4.1 AT 指令介绍

SIM900 是 SIMCom 公司推出的紧凑型的双频 GSM/GPRS 模块,替代原有 T35 模块,不仅能实现拨打

电话、实时通话、发短信等功能,还可以实现 GPS 全球定位,因为其性价比高,功能稳定,功耗小,体积小,方便携带,被广泛应用工业生产。

AT(Attention)指令即 PC 设备与终端设备之间的通信,也可以是终端适配器(Terminal Adapter,TA)或数据电路终端设备(Data Circuit Terminal Equipment, DCTE)和终端设备(Terminal Equipment,TE)之间建立的数据传输。AT 指令必须以字符 AT 开始,以回车换行结束。通过安装 PL2303 的串口驱动,实现在 Matlab 直接操作串口,设置波特率,设置终端为(LF CR)接收和发送格式^[9-11]。

采用 SIM900 芯片和 PL2303 相结合实现 USB 数据传输和供电,抛弃传统的电源供电,实现拨号模块的可便携性。在得到 Y 信号输入时,将受试者输入的数据通过 Matlab 串口发送给 SIM900,执行打电话命令^[12-14]。

SIM900 指令如表 1 所示。

表 1 SIM900 指令

指令类型	指令语法	指令描述
ATD	ATD+XXXXXX	移动台呼叫某一个号码
ATDL	ATDL	重拨上次呼叫号码
ATH	ATH	挂机控制
ATA	ATA	接电话

4.2 实验流程

- (1)受试人员通过注视距自己 70 cm 的电脑显示器上闪烁的 12 字符;
- (2)屏幕反馈显示受试人员选中的目标字符;
- (3)受试人员选定电话号码后,选择 Y 字符确认电话号;
- (4)Matlab 将分析的数据结果通过串口发给下位机,实现拨打电话功能。

5 系统实验

实验结果如表 2 所示。

表 2 实验结果

受试人员	准确率/%	ITR/(bits/min)
S1	91	160
S2	95	140
S3	100	150
S4	98	160
S5	92	145
S6	95	155
S7	95	165

从表 2 可以看出,CCA 算法可以快速提取特征值,实现更加准确的分类,系统的准确率达 95%,ITR 平均达到 154 bit/min,最高可达 160 bit/min;从实现的过程看来,系统对实验被试要求不高,个体差异性较小。受

试者不需要提前训练,但是受试者情绪对实验有影响。

6 结束语

在传统的 SSVEP 脑机信号特征提取的过程中,使用傅里叶变换和功率谱等方法,不仅影响了系统速度、精度和传输率,而且还与受试人员的个体差异有关。为此,设计并实现了基于 SSVEP 的高传输速率脑机拨号系统。实验结果表明,该系统的确提高了系统的速度、精度和传输率,降低了受试人员个体差异性,为 SSVEP 信号的处理提供了新的思路和方法;此外,还能扩大 BCI 人群的使用范围,更利于 SSVEP-BCI 系统的推广。BCI 系统在脑科学、康复工程、生物医学工程有着广泛的应用前景,但是通信速率低依然是阻碍 BCI 系统应用的主要原因。总体而言,BCI 依然处于基础阶段,需要广大科技工作者更加努力。

参考文献:

- [1] Wolpaw J, Birbaumer N, Heetderks W J, et al. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting [J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2000, 8(2): 164-173.
- [2] Chen Xiaogang, Wang Yijun, Nakanishi M, et al. High-speed spelling with a noninvasive brain-computer interface [J]. PNAS, 2015, 112(44): 6058-6067.
- [3] Poryzala P, Materka A. Cluster analysis of CCA coefficients for robust detection of the asynchronous SSVEPs in brain-computer interfaces [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 10(1): 201-208.

(上接第 184 页)

后,将对用户行为与仓储整合资源进行关联研究,以提高用户服务质量。

参考文献:

- [1] 赵英. 搜索引擎 Hubble. Net 的机制分析及基础应用 [J]. 装备制造技术, 2011(12): 53-56.
- [2] 郎小伟, 王申康. 基于 Lucene 的全文检索系统研究与开发 [J]. 计算机工程, 2006, 32(4): 94-96.
- [3] 孙西全, 马瑞芳, 李燕灵. 基于 Lucene 的信息检索的研究与应用 [J]. 情报理论与实践, 2006, 29(1): 125-128.
- [4] Apache Lucene 6. 2. 1 [EB/OL]. 2016-09-20. <http://www.apache.org/dyn/closer.lua/lucene/java/6.2>.
- [5] 霍林, 黄俊文, 潘英花, 等. 大规模分布式资源搜索技术研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4006-4009.
- [6] 周满英, 任树怀. 图书馆用户体验案例研究——以麻省理工学院图书馆实践为例 [J]. 图书馆论坛, 2012, 32(6): 49-52. 万方数据

- [4] Zhang Yu, Zhou Guoxu, Jin Jing, et al. SSVEP recognition using common feature analysis in brain-computer interface [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2015, 244: 8-15.
- [5] Chang M H, Lee J S, Heo J, et al. Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2016, 258: 104-113.
- [6] 赵丽, 孙永, 郭旭宏, 等. 基于稳态视觉诱发电位的手拨号系统研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(2): 253-256.
- [7] 邓志东, 李修全, 郑宽浩, 等. 一种基于 SSVEP 的仿人机器人异步脑机接口控制系统 [J]. 机器人, 2011, 33(1): 129-135.
- [8] 王行愚, 金晶, 张宇, 等. 脑控: 基于脑-机接口的人机融合控制 [J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 208-221.
- [9] 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.
- [10] 霍涛, 贾振堂. 基于 STM32 和 SIM900A 的无线通信模块设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(17): 106-110.
- [11] 翟顺, 王卫红, 张衍, 等. 基于 SIM900A 的物联网短信报警系统 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(5): 86-89.
- [12] 笪毓璐, 陈志阳, 黄丽亚. 基于 CCA 的 SSVEP 性能研究 [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(5): 52-55.
- [13] 薛飞, 杨友良, 孟凡伟, 等. 基于 Matlab GUI 串口通信的实时温度监控系统设计 [J]. 计算机应用, 2014, 34(1): 292-296.
- [14] 朱向荣, 冯乔生, 施少捷, 等. 信捷 PLC 与计算机串口和以太网通信的 VC++ 编程技术 [J]. 软件, 2015, 36(6): 75-82.
- [7] 包凌, 蒋颖. 图书馆统一资源发现系统的比较研究 [J]. 情报资料工作, 2012, 33(5): 68-73.
- [8] 陈定权, 卢玉红, 杨敏. 图书馆资源发现系统的现状与趋势 [J]. 图书情报工作, 2012, 56(7): 44-48.
- [9] 李学勇, 欧阳柳波, 李国徽, 等. 搜索引擎中网络蜘蛛搜索策略比较研究 [J]. 计算技术与自动化, 2003, 22(4): 63-67.
- [10] 曹元大, 贺海军, 涂哲明. 中文 Web 文档全文检索系统的设计及实现 [J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1): 68-71.
- [11] Miller G A. WordNet: a lexical database for english [J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 39-41.
- [12] Voorhees E M. Query expansion using lexical-semantic relations [C]//Proceedings of 17th annual ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval. [s. l.]: ACM, 1994: 61-69.
- [13] 郑炜, 梁战平, 梁建. 面向用户意图的智能搜索引擎框架研究 [J]. 现代图书情报技术, 2014(3): 65-72.
- [14] Massimo P, Takahiro K, Terry P R, et al. Semantic matching of web services capabilities [C]//First international semantic web conference. Sardinia, Italy: [s. n.], 2002: 333-347.