

基于事件关联电位脑机接口的电视遥控异步系统

王洪涛^{1,2}, 邹鹤良¹

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 五邑大学 信息工程学院, 广东 江门 529020)

摘要: 本文设计了基于事件关联电位脑机接口的脑电信号预处理、特征提取、分类识别实时算法, 开发了具有通讯功能的遥控器, 实现了脑机接口电视遥控的异步系统. 受试者可以用脑电波来遥控电视选择频道和调整音量, 这为重症瘫痪病人拓展其与自然的直接交流开辟了新的通道. 5位健康的受试者参与了训练实验和在线实验, 实验结果表明经过特定的训练, 受试者均可有效控制该脑机接口电视遥控系统, 其统计平均准确率达87%, 平均传输速率(ITR)达35 bits/min.

关键词: 脑机接口; 电视遥控; 事件关联电位; 异步系统

中图分类号: TP399; R318 **文献标识码:** A

Asynchronous TV remote control system based on event-related potential brain-computer interface

WANG Hong-tao^{1,2}, ZOU He-liang¹.

(1. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2. School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China)

Abstract: We propose an algorithm including data preprocessing, feature extraction, and classification. In designing the remote controller with communication function, we develop an electroencephalograph-based (EEG-based) brain-computer interface (BCI) for the asynchronous system of the television remote control. The system can help the patients suffering from Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) to turn on, turn off, select TV channels and adjust volume using their brain waves. Five healthy subjects took part in train experiments and online experiments; the results demonstrate that the averaged information transfer rate of the system is approximately 35 bits/min and all the subjects can control the system efficiently with an average accuracy of 87% after a special training of procedure.

Key words: brain-computer interface; TV remote controller; event related potential; asynchronous system

1 引言(Introduction)

脑机接口(brain-computer interface, BCI)是大脑和外界进行信息交换的直接通道^[1]. 在助老助残与康复机器人领域, 许多重度残障人士连简单的设备开关都不能有效操作, 也不能可靠地使用诸如语音识别技术等辅助支持手段. 在这种情况下, 脑机接口作为一种先进的人-机交互方式, 在日常生活中辅助残障人士和老年人, 提高其生活质量, 实现其与自然的直接交流开辟了新的通道.

脑电信号(electroencephalography, EEG)是脑细胞群体放电所产生的宏观现象. 由于其时间分辨率高, 采集设备具有容易携带、便于使用等优势, 成为一种非常实用的脑机接口方式. 根据神经生理学机理可将脑机接口分为: 基于运动想象(motor imagery, MI)的BCI、基于事件相关电位(event related potential, ERP)的BCI^[2]、基于视觉诱发电位(visual

evoked potentials, VEP)的BCI等. P300是由小概率事件(视觉、听觉、触觉等形式)诱发的一种典型的事件相关电位, 因对应于事件发生时刻后约300 ms后产生一个正电位波形的EEG而得名^[3], 其产生需要采用特定的事件刺激序列来诱发受试者产生相应的事件关联电位, 故可根据P300的发生时刻来判断受试者的控制意图, 因此特别适用于从多个目标中选择一个目标, 这正好满足了电视遥控从多个选择键中选一个的实际控制需求.

目前基于事件关联电位BCI的研究相对成熟, 已实现了从离线系统到在线系统的过渡. Farwell和Donchin, 将字母排列成一个6×6的矩阵虚拟键盘并轮流闪烁进行视觉诱发, 首次利用P300实现了英文字母选择系统^[4]. Schalk等人基于事件关联电位合作开发的BCI2000, 是目前通用的BCI系统平台^[5]. 浙江大学吴边等设计完成了基于P300电位的

收稿日期: 2011-07-30; 收修改稿日期: 2011-12-27.

基金项目: 国家高科技发展研究计划“863”资助项目(2012AA011601); 国家自然科学基金重点资助项目(91120305); 广东省高等学校高层次人才资助项目(N912014a); 广东高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(LYM11122); 智能机器人湖北省重点实验室开放基金项目(HBIR200904).

新型BCI中文输入虚拟键盘系统^[6], 识别准确率还有进一步提升的空间. 天津大学的利用睁眼闭眼通过检测Alpha波设计了5个键的电视遥控系统^[7], 但多个选择键的输入问题尚未很好的解决. 本文结合事件关联电位P300可实现多个目标输入的优势, 设计了脑电信号预处理、特征提取、分类识别实时算法, 开发了具有通讯功能的遥控器, 实现了在线脑机接口电视遥控异步系统, 提高了系统的实时性、实用性及稳定性, 使受试者可以用脑电波来遥控电视选择频道和调整音量.

2 系统总体设计(System overall design)

2.1 系统组成(System components)

脑机接口电视遥控系统由用户界面、Neuroscan-NuAmps脑电采集仪、运行脑电信号实时处理算法的SAMSUNG台式电脑(Windows XP操作系统, Intel(R)Core(TM)2 Duo 1.8 GHz CPU)、带通讯功能的遥控器及SONY电视组成, 其结构如图1所示.

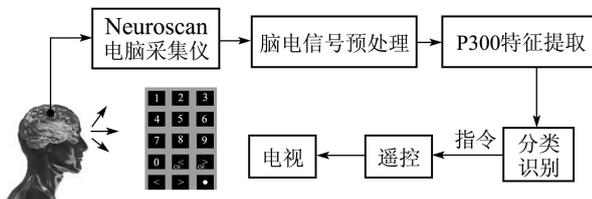


图1 脑机接口电视遥控系统结构图

Fig. 1 The structure of brain-computer interface TV remote control system

受试者头戴32导联电极帽(以右耳为参考电平, 其中HEOG和VEOG两路导联未使用, 剩余的30导联用于脑电信号采集), 通过用户界面闪烁键的闪烁刺激诱发P300电位, 闪烁键点亮的同时同步向脑电采集仪发送标记闪烁时刻的事件代码. 脑电信号实时处理算法负责EEG信号在线处理: 以事件代码为标记提取时间窗口(0~600 ms)的一段脑电数据, 经过预处理、特征提取、分类识别3个过程处理后, 根据P300的发生时刻来判断受试者的操作意图, 并转化为相应指令发送到SAMSUNG台式电脑USB接口. 遥控器通过USB接口接收指令, 并发送相应控制功能的红外编码, 实现对电视打开、关闭、选台、调音等操作. 用户界面和脑电信号实时处理算法在SAMSUNG台式电脑上运行, 用户界面通过台式电脑液晶显示器呈现.

2.2 用户界面(User Interface)

用户界面提供简易的电视遥控虚拟界面, 共设置15个闪烁键, 其中: ●代表启动、0代表关闭、1-9频道、<, >代表音量加减、+, -代表频道加减, 闪烁键大小设置为2.5 cm×2.5 cm, 键间距为1.5 cm, 外观如图2所示.

系统启动后, 用户界面上15个闪烁键开始随机循

环点亮, 闪烁键参数设置为: 每个闪烁键点亮持续时间为100 ms, 相邻两个闪烁键开始闪烁间隔为50 ms. 由于每个闪烁键出现的概率相等, 故当受试者将任何一个闪烁键作为期望时, 此期望的闪烁键相对于非期望闪烁键就构成了小概率事件, 其概率为1/15, 足以诱发出典型的P300电位.



图2 脑电遥控电视用户界面

Fig. 2 The user interface of BCI based TV

2.3 脑电信号实时处理算法(Real-time EEG signal processing algorithms)

脑电信号实时处理算法具体步骤如下:

Step 1 脑电信号预处理, 将30导联EEG信号进行截止频率为20 Hz的低通滤波. 由于头皮脑电信号的频率范围为0.1~100 Hz, 其中对研究有用的脑电信号的频率集中分布在0.1~20 Hz之间, 通过截止频率为20 Hz的低通滤波器做脑电信号预处理可以去除无关频段的信号成分.

Step 2 时间窗设置为: 0~600 ms. 由于P300信号对应于闪烁键标记时刻后约300 ms后产生一个正电位波形的脑电信号. 为此以闪烁键点亮时刻(标记时刻)为基准提取其后时间窗600 ms的数据段, 足以包含P300发生的全过程.

Step 3 特征选择与提取. 事件关联电位特征为P300, 即窗口内的600 ms脑电信号正向波峰幅值做为特征. 即若受试者注视第j个闪烁键, 则在第j个闪烁键标记时刻后600 ms内, 头部顶骨区诱发出正电位波形. 而其他14个闪烁键标记时刻后窗口内的脑电信号则并不会存在正电位波形.

为说明特征提取过程, 脑电信号按以下数据格式组织: 一个Epoch数据记为 $\{F e_{j,q}, j = 1, \dots, 15; 5 \leq q \leq 10\}$ 包含15个闪烁键需要进行q轮Round闪烁的脑电数据. 一个Round记为 $\{F e_j, j = 1, \dots, 15\}$, 包含15个闪烁键标记时刻后所对应0-600 ms窗口的Trial数据. 一个Trial记为 $P a_{i,j,q}$, i, j, q分别代表第i导联、第j个闪烁键、第q轮闪烁. 利用30导联信号, 组合成jth闪烁键和qth轮闪烁的特征向量: $P a_{1,j,q}, \dots, P a_{30,j,q}$. 设置Neuroscan-NuAmps脑电采集仪采样率为250 Hz, 故窗口内的数据为(150×30维), 进行下采样(1/10)处理得到数据为一个Trial(15×30维).

Step 4 线性核支持向量机(support vector machine, SVM)分类器, 用户界面闪烁键经历 q 轮闪烁后, 得到特征向量 $\{F e_j, j = 1, \dots, 15\}$, 输入到训练好的SVM分类器可得到15个输出值式(1), 定义为 $s_{j,q}$. 线性核SVM分类器的训练在3.2节说明.

具体过程为: 计算经过 q 轮闪烁后SVM分类器对应于每个闪烁键的输出 $s_{j,q}$ 总和, 寻找其最大值与次大值^[8], 式(2)–(3).

$$ss_j = s_{j,1} + \dots + s_{j,q}, j = 1, \dots, 15, \quad (1)$$

$$ss_{j_m} = \max\{ss_1, \dots, ss_{15}\}, \quad (2)$$

$$ss_{j_n} = \max\{\{ss_1, \dots, ss_{15}\} \setminus \{ss_{j_m}\}\} \quad (3)$$

Step 5 确定阈值 θ .

$$1 - ss_{j_n}/ss_{j_m} > \theta \quad (4)$$

该阈值 θ 设置为正值常数, 根据长期在线实验经验设置为0.35.

说明: 若满足式(4)则可以确定P300发生在第 j_m

个闪烁键, 否则继续下一轮的检测. 该系统 q 值设置为 $5 \leq q \leq 10$, 即为保证系统的识别准确率, 要输出一个指令至少经过5轮闪烁, 若在5轮后满足式(4), 则可以确定P300发生在哪个闪烁键. 若经10轮闪烁后仍不能满足式(4), 判断受试者处于非控制状态, 则不输出结果. 4.2节将针对此问题进一步分析.

Step 6 Step 5的判断结果转化为指令送往台式电脑USB接口输出.

2.4 遥控器硬件设计(Remote hardware design)

工作时遥控器从台式电脑USB接口读取指令, 并根据指令发送相应的红外编码. 遥控器硬件以ATmega16单片机为核心, 设计有红外接收、发送头、扩展两片AT24C32 EEPROM、ISP程序下载口、串口转USB接口模块如图3所示.

该遥控器具有学习功能, 可以捕捉到电视、空调、风扇的等遥控器编码并存储在AT24C32中, 可以将其扩展为家电集中控制器, 增强了系统的普适性.

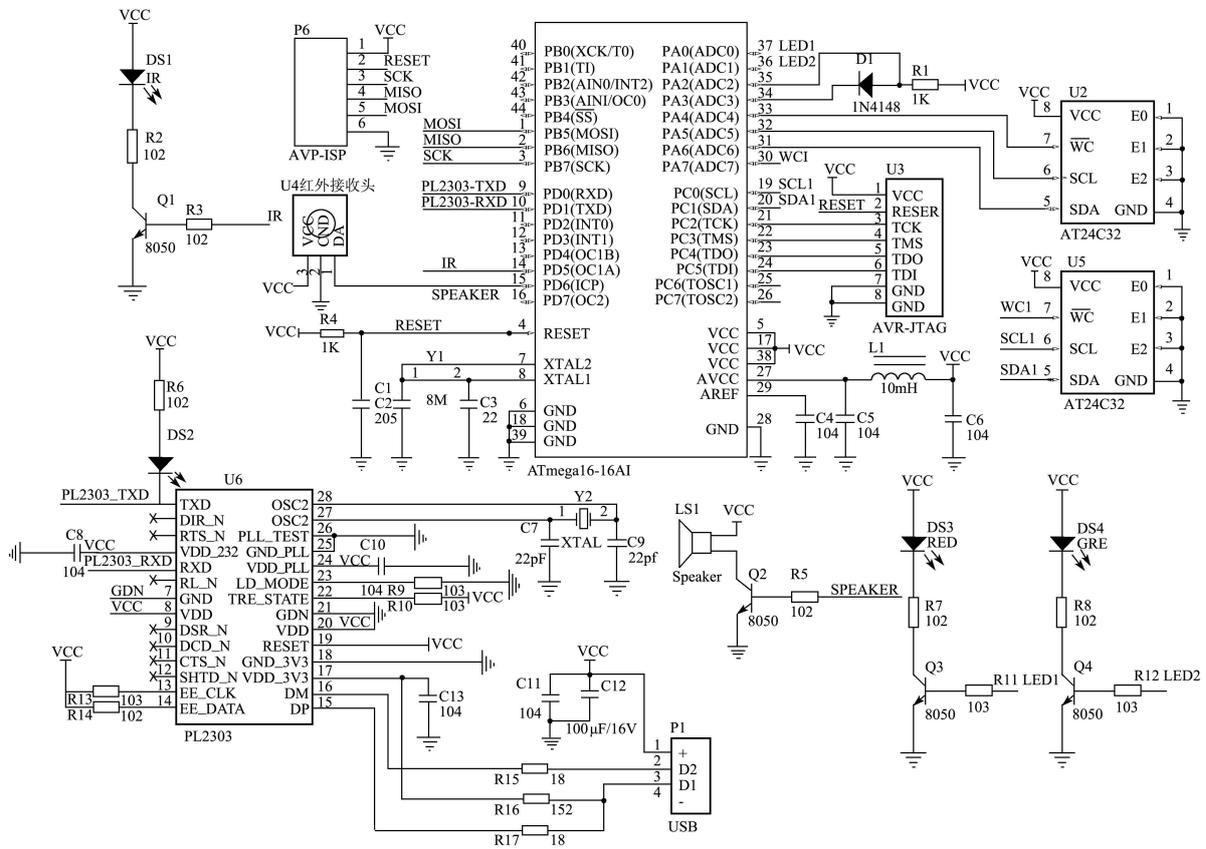


图 3 遥控电路原理图

Fig. 3 The circuit diagram of TV controller

3 系统实验(System experiment)

3.1 实验准备(Experiment preparation)

实验对象为5名受试者(4名男性, 1名女性), 年龄在24~32岁之间, 其中一位受试者C以前没有脑机接口实验经验.

1) 受试者头戴32导导电电极帽, 为保证电极与头

皮有良好的接触, 电极帽插孔中注入具有良好导电特性的导电胶, 要求电阻在 $5\text{ k}\Omega$ 以下.

2) 受试者坐在用户界面前, 眼睛距屏幕 $50\sim 100\text{ cm}$, 熟悉用户界面的工作原理及使用方法.

3) 设置Neuroscan-NuAmps脑电采集仪采样频率为 250 Hz .

实验过程中,要求保持安静且室内光线较弱.受试者专心注视所选择的闪烁键,采集并存储受试者的脑电信号数据.

实验过程分为训练试验和评估实验两部分.

3.2 训练实验(Training experiment)

由于受试者的个体脑电信号存在差异,用于分类的线性核SVM分类器参数不唯一确定.在使用系统前需要进行训练实验,利用训练样本训练出适合该受试者的SVM分类器参数才能在线实验中取得较好的识别效果.训练样本的脑电信号数据格式组织方式如前所述,唯一不同的是:设置循环次数 q 固定为5,故15个闪烁键以随机顺序闪烁5轮.训练实验的过程为:首先用户界面会随机弹出一个目标闪烁键的名称(如第 j th个闪烁键,则该键分类标记为1,其他的14个分类标记为-1).受试者只需根据提示,注视相应的闪烁键即可.经5轮闪烁完成后,获取到脑电信号 $\{Fe_{j,q}, j = 1, \dots, 15, q = 5\}$,根据15个标记时刻分别做迭代平均处理,结合分类标记组合成一个训练样本.完成一个目标闪烁键任务后系统继续提示下一个闪烁键,中间间隔2s.单次实验包含两组实验,一组实验包括50个目标闪烁键任务,中间休息30min,继续下一组实验,单次实验共得到100个训练样本.

3.3 评估实验(Experiment for evaluation)

评估实验时受试者可以根据自己的意愿进行自主遥控电视.评估实验主要从受试者操作准确率及系统平均信息传输速率(information transfer rate, IRT)两个方面进行评估.评估实验为:完成20个定向目标任务(随机产生)为一组,5位参与评估实验的受试者均需完成5组定向操作任务.如受试者操作正确记为“√”,操作错误记为“×”,并记录5位受试者定向任务操作情况.实验结束后统计每位受试者的操作正确率,并计算其操作脑机接口电视时的平均信息传输速率.结果如表1所示.计算方法:正确率=输出指令与期望相符的个数/输出指令总数,IRT计算参考文献[9].

表1 受试者A-E在线操作准确率统计结果

Table 1 The online operation accuracy of statistical results of subjects A-E

| 受试者 | 准确率/% | IRT/(bit · min ⁻¹) |
|-----|-------|--------------------------------|
| A | 90±3 | 37 |
| B | 94±2 | 41 |
| C | 86±4 | 33 |
| D | 80±3 | 29 |
| E | 87±4 | 34 |
| 平均 | 87±9 | 35 |

4 实验分析(Experiment analysis)

4.1 分类器选择(Classifier selection)

现有的脑-机接口分类器常用两种: Fisher线性分类器和支持向量机(support vector machine, SVM).文献[10]中采用Fisher线性分类器对P300分类,达到了很好的分类效果,分类准确率高达100%.文献[11]采用线性核SVM分类器对P300分类,在第3届国际脑机接口比赛中获得第1名,5次迭代分类准确率为73.5%,15次迭代分类准确率为96.5%.为选择适于本系统的分类器,笔者利用训练实验的实验数据作为训练样本(50个),另50个作为测试样本测试了3个分类器: Fisher线性分类器、线性核SVM分类器、高斯核SVM分类器.通过对比3个分类器分类效果(如表2所示)可知: Fisher线性分类器、线性核SVM分类器分类效果总体要比高斯核SVM分类器更适用于P300脑电信号的分类,前两者均可适用于本系统,在算法设计时笔者采用了线性核SVM分类器.

表2 3种分类器的分类准确率对比分析

Table 2 The comparative analysis of three kinds of classifier

| | A/% | B/% | C/% | D/% | E/% | 平均/% |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Fisher线性 | 82 | 88 | 86 | 84 | 90 | 86.0 |
| 线性核SVM | 84 | 92 | 90 | 82 | 88 | 87.2 |
| 高斯核SVM | 72 | 84 | 78 | 80 | 74 | 77.6 |

4.2 循环次数与识别准确率的关系(The relationship between cycles and the recognition accuracy rate)

为设定最佳的闪烁键的循环次数,设置系统循环次数 q 分别从1至10轮.实验过程如训练实验,采用线性核SVM分类器进行分类,得出系统循环次数与受试者识别准确率关系如图4所示.

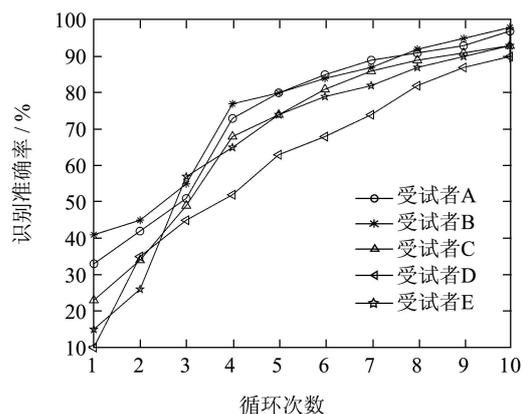


图4 循环次数与识别准确率关系图

Fig. 4 The graph of the relationship between cycles and the recognition accuracy rate

5 结论与展望(Conclusion and prospect)

总体看, 5位受试者均可有效使用该脑机接口电视遥控系统, 其平均正确率达87%。其中一位没有脑机接口的实验经验的受试者在经过特定的强化训练后, 亦取得了较好的控制效果。系统平均信息传输速率ITR达35 bits/min, 可满足系统实时性的需求。但该脑机接口电视遥控系统要真正实用还有一段距离, 其主要原因在于: 第1, 脑电信号采集使用湿电极, 使用者头戴电极帽需要打导电胶连接头皮和电极, 这影响了使用的舒适度; 第2, 价格高昂的脑电信号放大仪也是脑机接口产品化的制约因素; 第3, 在脑机接口处理算法方面还有进一步优化的空间。如: 训练实验过程中半监督学习的应用以减少训练时间, 通道的自适应选择都是系统进一步完善的方向。国家中长期科技发展规划纲要提出了将在2015年实现“人人享有康复服务”的国家战略目标, 并把“康复工程”作为国家科技支撑计划重点资助项目, 这给脑机接口研究由理论向产品转化带来新的契机与产业发展机遇。

参考文献(References):

- [1] JONATHAN R. WOLPAW, NIELS B. Brain-computer interfaces for communication and control [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 7(2): 767 – 791.
- [2] LEVINE S P, HUGGINS J E, BEMENT S L, et al. A direct brain interface based on event related potentials [J]. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 2000, 8(2): 180 – 185.
- [3] SUTTON S, BRAREN M, ZUBIN J, et al. Information delivery and the sensory evoked potential [J]. *Science*, 1965, 155(3768): 1436 – 1439.
- [4] FARWELL L A, DONCHIN E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1988, 70(6): 510 – 513.
- [5] SCHALK G, MCFARLAND D J. BCI2000: development of a general purpose brain-computer interface (BCI) system [J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineers*, 2004, 51(6): 1034 – 1043.
- [6] 吴边, 苏煜, 张剑慧, 等. 基于P300电位的新型BCI中文输入虚拟键盘系统 [J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 1434 – 1438.
(WU Bian, SU Yu, ZHANG Jianhui, et al. A virtual chinese keyboard bci system based on P300 potentials [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(8): 1434 – 1438.)
- [7] CHEN Q. *Design and experiment research of tv remote control system based brain-computer interface system* [D]. Tianjin: University of Tianjin, 2005.
- [8] LI Y Q, LONG J Y, YU T Y, et al. An EEG-based BCI system for 2-D cursor control by combining Mu/Beta rhythm and P300 potential [J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineers*, 2010, 57(10): 249 – 2505.
- [9] WOLPAW J, BIRBAUMER N, HEETDERKS W, et al. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting [J]. *IEEE Transactions on Rehabil Engineering*, 2000, 8(2): 164 – 173.
- [10] HOFFMANN U, VESIN J, EBRAHIMI T, et al. An efficient P300-based brain-computer interface for disabled subjects [C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*. New York: IEEE, 1994, 8: 129 – 134.
- [11] RAKOTOMAMONJY A, GUIGUE V. BCI competition III: dataset II-ensemble of SVMs for BCI P300 speller [J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineers*, 2008, 55(3): 1147 – 1154.

作者简介:

王洪涛 (1979–), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为模式识别、脑机接口, E-mail: wang.ht03@mail.scut.edu.cn;
邹鹤良 (1986–), 男, 硕士, 主要研究领域为模式识别, E-mail: zouhekun@163.com;