

2-15-2019

Rehabilitation Training System Based on Brain Computer Interface

Banghua Yang

1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;2. Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200444, China;

Li Bo

1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Rehabilitation Training System Based on Brain Computer Interface

Abstract

Abstract: Brain-computer interface (BCI) is a new communication and control method. *The BCI rehabilitation training system was developed for rehabilitation training of post-stroke patients by using MATLAB and VC++ hybrid programming method. By decoding the EEG signal, the patient's movement intention can be recognized accurately in real time, then the work of the rehabilitation peripheral is triggered to give feedback from the visual, auditory, and tactile. The patient's active rehabilitation is achieved through the system.* The system has the characteristics of user-friendly interface, modular algorithm, high online recognition rate; and it can be used as a reference for BCI-based application development.

Keywords

Brain-computer Interface, rehabilitation training, mixed programming, Electroencephalogram

Recommended Citation

Yang Banghua, Li Bo. Rehabilitation Training System Based on Brain Computer Interface[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 174-180.

基于脑机接口的康复训练系统

杨帮华^{1,2}, 李博¹

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444; 2. 上海市电站自动化重点实验室, 上海 200444)

摘要: 脑机接口即大脑-计算机交互接口的简称, 它是一种新的通信和控制方式。采用 MATLAB 与 VC++ 混合编程的方法开发了基于脑机接口的脑卒中康复训练系统。该系统通过解码脑电信号能够实时、准确的分析出患者的运动意图, 进而控制康复外设从视、听、触觉给予反馈, 实现患者的主动康复。系统具有界面人性化、算法模块化、在线识别率高的特点, 对基于 BCI 的应用开发具有借鉴意义。

关键词: 脑机接口; 康复训练; 混合编程; 动态链接库

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 02-0174-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0791

Rehabilitation Training System Based on Brain Computer Interface

Yang Banghua^{1,2}, Li Bo¹

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200444, China)

Abstract: Brain-computer interface (BCI) is a new communication and control method. The BCI rehabilitation training system was developed for rehabilitation training of post-stroke patients by using MATLAB and VC++ hybrid programming method. By decoding the EEG signal, the patient's movement intention can be recognized accurately in real time, then the work of the rehabilitation peripheral is triggered to give feedback from the visual, auditory, and tactile. The patient's active rehabilitation is achieved through the system. The system has the characteristics of user-friendly interface, modular algorithm, high online recognition rate; and it can be used as a reference for BCI-based application development.

Keywords: Brain-computer Interface; rehabilitation training; mixed programming; Electroencephalogram

引言

脑机接口(Brain-computer Interface, BCI)即大脑-计算机交互接口的简称, 它是一种新的通讯和控制方式, 在医疗康复、军事等领域发挥着

越来越重要的作用。大脑活动产生的脑电图(electroencephalogram, EEG)、脑磁(Magnetoencephalography, MEG)、代谢等信号经过采集转化都可用于设计脑机接口, 其中 EEG 容易采集、时间分辨率高, 是目前脑机接口设计的首选。EEG 是典型的非平稳性信号, 电压和频率成分在时间上的分布无规律^[1], 且 EEG 强度只有微伏级, 容易受到外界电、磁信号, 以及人体肌肉电信号的干扰。因此需要对其采用特殊且复杂的处理方法。



收稿日期: 2018-09-03 修回日期: 2018-11-26;
基金项目: 国家科技部重点研发计划(2018YFC1312903, 2018YFC0807405), 上海市科学技术委员会
科技创新(18411952200);

作者简介: 杨帮华(1971-), 女, 河南三门峡, 博士, 研究员, 研究方向为脑机接口, 模式识别与智能系统; 李博(1993-), 男, 河南项城, 硕士生, 研究方向为脑机接口。

<http://www.china-simulation.com>

MATLAB 以其简洁, 直观, 矩阵运算能力强的特点, 广泛应用于科学研究工作, 也是实验室分析处理 EEG 的主要工具, 有大量优异且稳定的 EEG 算法、EEG 工具箱基于 MATLAB 语言编写。但 MATLAB 也存在着人机交互不友好, GUI 界面过于简单的缺点。而 Microsoft Visual C++(VC++) 是微软公司的 C++ 开发工具, 具有集成开发环境, 集成了微软 Windows 操作系统应用程序接口 (Windows API)、三维动画 DirectX API、Microsoft .NET 框架等, 可以出色的完成界面显示, 人机交互, 硬件设备通信等工作。因此, 通过 VC++ 和 MATLAB 的混合编程, 可以实现科研成果的直接转化, 丰富应用软件的功能开发。目前常用的混合编程方法有调用 MATLAB 引擎方法、代码转换方法、集成 DLL 方法等。

李明爱等^[2]利用 MATLAB 和 C 语言混合编程及多线程技术设计了一套基于 MI-BCI 的上肢在线运动康复原型系统, 将 MATLAB 语言编写的 EEG 处理算法编译成 DLL, 提供程序接口由界面软件调用, 可以实现机械手臂带动患肢运动, 但该系统还处于原型阶段。马留洋^[3]等采用 C# 与 MATLAB 混合编程方式在 VS2010 平台下利用 WinForm 窗体设计运动想象 EEG 信号分析处理界面, 可以简单实现运动想象在线控制。

本文采用 MATLAB 与 VC++ 混合编程方法, 将 MATLAB 平台的 EEG 处理算法按照功能模块编译成动态链接库 (Dynamic-link Library, DLL), 集成在 VC++ 窗口程序中。针对脑卒中患者运动康复训练, 开发了一套基于脑机接口的康复训练软件, 具有界面人性化、算法模块化、在线识别准确率高的特点, 对 BCI 的应用系统开发具有借鉴意义。

1 脑机接口康复训练系统设计

脑机接口康复训练系统是基于运动想象疗法, 面向脑卒中患者的康复训练开发的一套康复训练软件。基本原理如图 1 所示, 通过脑机接口判断病

人运动意图, 根据运动意图启动 VR 设备进行沉浸式的视觉、听觉反馈, 启动电刺激仪对患者进行电刺激治疗, 人工搭建一条反馈通路, 起到了闭环康复和主动康复的目的。相比传统的康复方法, 基于脑机接口的康复训练系统有助于强化患者正确的运动想象模式, 提高康复效果^[4]。并且这种康复是与功能神经可塑性的定量指标相关联的, 能够有效、持续地恢复脑卒中幸存者的运动功能^[5]。

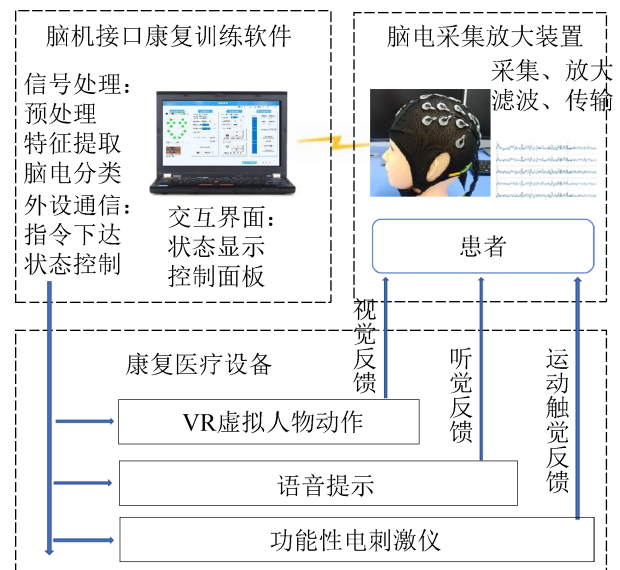


图 1 系统框图

Fig. 1 System chart

通过 EEG 分析运动意图的方法基础是单边的肢体运动或者想象运动能激活主要的感觉运动皮层, 使大脑对侧产生事件相关去同步电位 ERD(event-related desynchronization), 在 EEG 信号上表现为特定频率的节律性活动幅度的降低。同侧产生事件相关同步 ERS (event-related synchronization), 在特定频率就表现出幅度升高^[6]。EEG 处理算法的复杂性在于 EEG 是典型的非平稳性信号, 强度仅为微伏级别且易受干扰, 对于运动想象任务, 个体差异性很大, 每个人有不同的特征组合。因此, 对运动想象 EEG 信号的处理一般在 MATLAB 环境下进行。

2 EEG 信号处理方法及 MATLAB 实现方案

鉴于 EEG 信号以上特点, 如图 2 所示, 信号处理分为 3 个阶段: 预处理、特征提取、信号分类。预处理阶段包括去除背景干扰, 如工频干扰等, 去除伪迹干扰, 如眼电、肌电信号等的过程, 目的是提高脑电信号的信噪比。常用的预处理方法有小波变换^[7]、独立分量分析^[8] (Independent Component Analysis, ICA)等。特征提取阶段, 是从脑电信号中提取出与运动想象最相关的特征成分。常用的方法有功率谱分析^[9] (power spectral density, PSD)、共空间模式^[10] (Common Spatial Pattern, CSP)等。信号分类阶段, 是对脑电信号进行分类的过程, 如分为左手想象模式, 右手想象模式, 它是模型建立以及后续在线应用过程中的关键。脑电信号常用的分类方法有支持向量机^[11] (Support Vector Machine, SVM)、K-近邻法(K Nearest Neighbor Classification Rule, KNN)^[12]等。

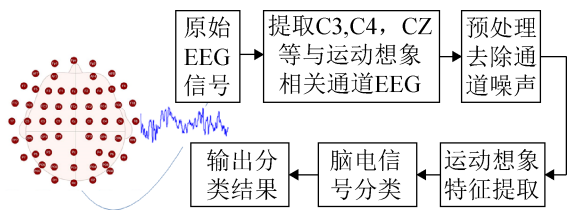


图 2 EEG 处理流程图

Fig. 2 EEG processing flow chart

脑机接口康复训练系统对上述常见处理方法在 MATLAB 中按功能做出了封装, 为即将进行的混合编译提供统一的函数接口, 应用程序调用该步骤的函数即可, 不需要关心算法的具体实现。

3 VC++ 软件交互界面设计

本系统使用 MFC 作为软件开发框架, MFC 是微软公司提供的的一个类库(class libraries), 是最易操作的 Windows 编程工具。使用资源编辑器, 我们可以根据需求编辑多个对话框资源, 放置按钮、编辑框、进度条等控件, 布局好界面之后给各个控

件编写回调函数即可。所见即所得, 大大降低了窗口应用程序开发的工作量。

软件交互界面, 是康复训练系统面向医生和病人的界面, 需要做出人性化的设计, 具体体现为界面简洁美观、操作步骤精简、引导提示充分、容错能力完善等。

本文将软件按功能划分为两个界面, 主界面和副界面。主界面如图 3 所示, 主要用来调整参数, 如设置电刺激仪参数, 选择治疗方案(训练动作)等。为了实现简洁美观, 提示充分, 软件用图标代替按钮, 尽量以直观的图像代替界面文字。另外加入了语音引导功能, 每个参数修改之后, 都会相应的播报注意事项。



图 3 主界面

Fig. 3 Main interface

副界面为功能界面, 如图 4 所示。界面左侧用颜色标识了各个通道信号质量, 用于调整电极与人体的接触, 以获得更好的信号。进度条可以实时显示脑电的活跃程度, 即与运动想象模式的相关程度。功能界面隐藏了专业名词, 将实验室里复杂的运动想象实验合并为两个阶段, 即评定阶段和治疗阶段。评定阶段是在正式使用前采集一段 EEG 数据, 对使用者的运动想象模式进行建模, 只需要一键操作, 之后每个步骤都有语音和文字提示, 评定阶段流程如下: 开始评定->采集平静状态 EEG 25 s->采集想象左手运动状态 EEG 15 s->采集想象右手运动状态 EEG 15 s->完成评

定给出评定得分。如果评定得分达到目标值, 意味着模型可靠, 即可进入治疗阶段, 治疗阶段设定总时间之后, 会循环进行, 运行过程如下: 开始->进行患肢运动想象->到达目标值->触发电刺激仪刺激患肢、触发动画视觉反馈->完成一次治疗。



图 4 副界面
Fig. 4 Secondary interface

4 VC++与 MATLAB 混合编程

在混合编程之前, 项目明确了各个部分应该承担的功能如图 5 所示, VC++负责窗口程序创建, 实现人机交互, 设备管理。MATLAB 专注于 EEG 信号分析处理, 得出分类结果。能够满足这种需求的 VC++与 MATLAB 混合编程的方法有多种, 最常用的有: 调用 MATLAB 引擎方法、使用 MATLAB Coder 转换成 C++源代码的方法、使用 MATLAB Compiler 编译成 DLL 方法^[13]。

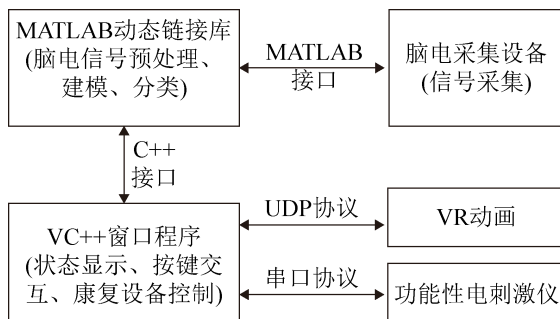


图 5 软件功能划分
Fig. 5 Software function division

MATLAB 引擎采用客户机/服务器模式,

MATLAB 在后台运行, 作为服务器接受数据信息, 而 VC++程序作为前台客户机, 通过 Windows 的动态控件与服务器通信向 MATLAB 引擎传递命令和数据信息, 如传递命令使用: `engEvalString (ep,"指令")`。使用 MATLAB Coder 的方法, 可以将 MATLAB 文件转换成 C/C++源代码, 源代码可直接集成到 VC++工程中, 但代码定义繁杂, 可读性差, 且支持转换的函数数量有限。由于我们并不需要对中间文件进行修改, 考虑到灵活性和可维护性, 本文采用 MATLAB Compiler 编译成 DLL 方法。

在编译成 DLL 之前, 需要对现有的 MATLAB 文件做顶层设计, 按 EEG 信号采集、滤波、特征提取、建模、特征分类、在线分类等功能将代码划分成独立的 M 函数, 规范了哪些函数为私有函数 (隐藏算法), 哪些函数为导出函数 (提供 VC++接口), 并设计了每个函数的输入输出变量。之后利用 MATLAB 简单直观、调试方便的特点, 对代码进行充分的验证, 及时修改代码缺陷, 减轻了后续出现错误的可能。

新版本的 MATLAB (如 2016b), 大大简化了转换过程, 除了使用 `mcc` 指令编译外, 还可以使用 MATLAB 自带的 `library compiler`, 这是具有 UI 界面编译工具。操作步骤如下: 应用程序部署->`library compiler`->选择库类型->添加库中要包含的 MATLAB 函数->添加附件->库命名->设置 MCR 获取方式->设置导出位置->打包导出。库的类型可选 C shared library, C++ shared library, java 包, python 包等。我们这里要与 VC++混合编译, 因此可选 C shared library 或 C++ shared library, 区别在于 C++ 使用了 `mwArray` 这个 C++类来表示矩阵, 而 C 语言中使用数组表示矩阵。

打包之后生成 `for redistribution`、`for_redistribution_files_only`、`for_testing` 三个文件夹, 对于开发者, 需要关心的是 `for_testing` 文件夹内“库名.dll”“库名.lib”“库名.h”三个主要文件, “库名.h”文件包含了“库名.dll”中的导出函数声明, 使用动态链接库时, 需要在主文件 `include` 该文件。

需要注意的是 MATLAB 7.0 及其后续版本所提供的编译器将 M 函数到 C/C++ 的转换变成了只是产生 C/C++ 函数接口, 而 M 函数的功能实现仍然保持为执行 M 函数^[14-15]。所以, 编译生成的 DLL, 在运行时需要 MCR 环境来解释 M 函数。对于没有安装 MATLAB 或 MCR 的电脑, 需要运行 for_redistribution 文件夹内的 MyAppInstaller.exe 安装 MCR 环境, 才能运行集成该 DLL 的应用程序。使用 DLL 方法进行联合编译, 需要将 VC++ 工程进行如下配置:

(1) 设置目标平台: 选择 x64 或 x86 (与 MATLAB 保持一致);

(2) 添加 include 路径: C:\MATLAB\extern\include;

(3) 添加 lib 路径: C:\MATLAB\R2016b\extern\lib\win64\microsoft;

(4) 添加附加依赖项:

“库名.lib”; “mclmcr.lib”; “mclmcr.lib”;

这里以 EEG_CSP 函数为例, 说明编译前后函数声明的变化, EEG_CSP 为 EEG 处理算法中的特征处理函数, 函数有 4 个输入变量, 6 个输出变量。编译前的 MATLAB 函数声明如下:

```
function[feature,label2,S,cc,w,b]=EEG_CSP(data,label,num,patchsize).
```

编译后的 C++ 函数接口声明如下:

```
void EEG_CSP(int nargout, mxArray& feature,
mxArray& label2, mxArray& S, mxArray& cc,
mxArray& w, mxArray& b, const mxArray& data,
const mxArray& label, const mxArray& num, const
mxArray& patchsize).
```

编译前后函数名不发生改变, 但函数返回值转换为 void, 这是由于 C++ 语言只能返回一个参数, 因此对于多输入多输出函数, 输入输出参数都用传引用的方式处理。这里有 11 个变量, 其中 nargout 代表输出变量个数, 第 2~7 个变量为输出变量, 其它为输入变量, 输入输出参数都为 mxArray 类型。定义 mxArray 类型矩阵的方法:

如定义一个 3×3 double 类型实数矩阵 mat1:
mxArray mat1(3, 3, mxDOUBLE_CLASS, mxREAL).

VC++ 代码调用 DLL 中的函数前, 必须先调用“库名 Initialize()”函数。程序结束时, 要调用“库名 Terminate()”。这两个函数分别用于加载和卸载用来支持函数运行的必要 DLL。

5 实验结果及分析

康复软件支持输出结果曲线, 结果曲线和原始 EEG 数据将被保存, 用于后期分析与诊断。图 6 显示了病人 L 在进行一次运动想象训练时, 系统对其 EEG 数据实时分析的结果。蓝色曲线标识了大脑运动区域活动强度, 绿色曲线标识了大脑活动与运动想象的相关程度, 红色曲线标识了系统外设(电刺激仪等)工作状态。0~25 s 病人处于放松状态(强度初始为 0, 外设工作状态初始为 50 表示未触发), 25 s 后病人进行运动想象, 30 s 时运动区域活动被捕捉, 40 s 大脑运动区域活动强度达到最大, 运动想象的相关程度显示达到 84, 大于目标值 70, 触发了系统外设工作, 完成一次治疗。

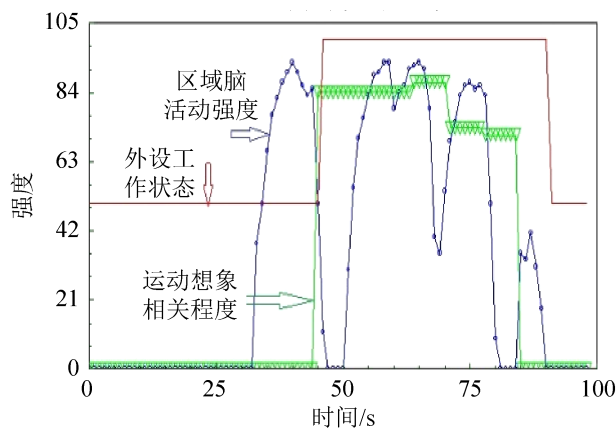


图 6 系统识别结果曲线

Fig. 6 System identification result curve

图 7 显示了病人 L 进行 40 次运动想象训练的统计结果, 其中 38 次被系统获得了有效数据, 31 次(77.5%, 平均强度 81.92)被判定为想象状态并成功触发外设工作。统计结果说明, 该系统能够及时、有效、定量检测出病人的运动意图, 并能正确通过

外设做出反馈。

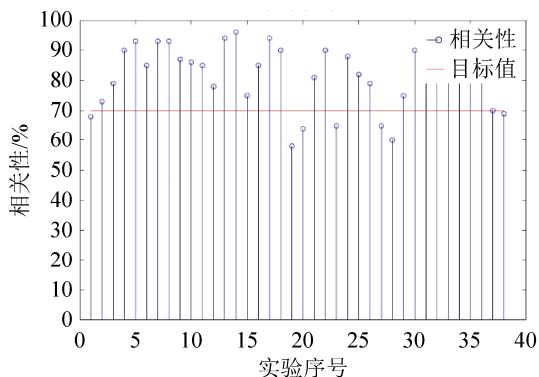


图 7 统计结果分析
Fig. 7 Statistical analysis

为了进一步验证该系统输出结果的有效性, 对治疗阶段同步采集的原始 EEG 信号做了离线分析。EEG 存储格式如图 8, 18 s 为一个治疗周期, 其中运动想象过程持续 8 s, 电刺激治疗过程持续 6 s, 休息时间持续 4 s, 每个过程皆有明确的标签

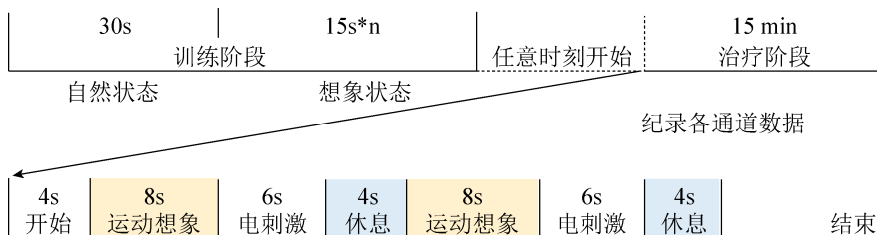


图 8 EEG 存储格式
Fig. 8 EEG storage format

表 1 离线分类结果
Tab. 1 Off-line classification results

频带宽/ Hz	分类器	特征维数		
		2	3	4
2	SVM	0.72	0.75	0.67
	KNN	0.74	0.79	0.73
4	SVN	0.71	0.69	0.64
	KNN	0.68	0.72	0.62

离线分类结果与康复训练系统输出的在线结果基本一致, 即上述 77.5% 的运动想象状态被系统正确识别的结果在算法正确范围内。

(EEG 标签与语音视觉提示同步产生)。15 min 治疗数据我们共截取了 40 组有效数据, 在 40 次运动想象任务, 40 次休息状态数据中随机抽取 20 次想象状态和 20 次休息状态数据用来训练, 其余用于测试。

在 MATLAB 中使用与混合编程康复系统一致的方法对运动想象和休息状态两种 EEG 数据进行分析, 使用一个 2 s 的时间窗截取有效时间段的脑电信号, 使用两组带宽分别为 2 Hz, 4 Hz 的带通滤波器将 EEG 分解为多个频带数据, 然后采用 CSP 方法提取多个频带特征组成多维特征向量, 最后分别使用 SVM 和 KNN 两种分类方法对特征进行分类。不同参数下的分类结果用表 1 中所示, 在选择频带宽为 2 Hz 特征维数为 3 时得到识别率最高为 79%。

6 结论

本文采用 MATLAB 和 VC++ 混合编程的方法设计基于脑机接口的康复训练软件, 既综合了两种编程语言的优点, 又无需重新编写算法, 极大缩短了软件开发调试时间, 且 VC++ 运行结果与 MATLAB 程序运行结果一致。此外采用 DLL 技术, 降低了算法和界面程序的耦合性, 后续算法的修改验证只需要在 MATLAB 平台进行, 重新生成 DLL 即可。基于此系统的脑卒中患者运动障碍康复辅助设备已在上海交通大学附属瑞金医院、首都医科大学附属天坛医院、宣武医院等国内几十家医院进行

了临床试验, 软件系统运行稳定, 识别准确率和患者康复效果都已经达到预期目标。这对其他领域的 BCI 应用软件开发具有极大的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 程明, 高上凯, 张琳. 基于脑电信号的脑—计算机接口[J]. 北京生物医学工程, 2000, 19(2):113-118.
Cheng Ming, Gao Shangkai, Zhang Lin. Brain-computer Interface Based on EEG Signals[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2000, 19(2): 113-118.
- [2] 李明爱, 罗新勇, 崔燕, 等. 基于 MI-BCI 的上肢在线运动康复原型系统[J]. 北京生物医学工程, 2017, 36(3): 273-278.
Li Mingai, Luo Xinyong, Cui Yan, et al. MI-BCI based online prototype system for upper limb rehabilitation[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2017, 36(3): 273-278.
- [3] 马留洋. 基于虚拟现实的运动想象脑—机接口训练系统[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Ma Liuyang. Brain Computer Interface Training System Based on Virtual Reality[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [4] Cervera M A, Soekadar S R, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis[J]. Annals of clinical and translational neurology (S2328-9503), 2018, 5(5): 651-663.
- [5] Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke[J]. Nature Communications (S2041-1723), 2018, 9(1): 2421.
- [6] Pfurtscheller G, Neuper C, Guger C, et al. Current trends in Graz brain-computer interface (BCI) research[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering (S1063-6528), 2000, 8(2): 216-219.
- [7] 陈颖萍. 基于小波和独立分量分析的脑电信号预处理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Chen Yingping. EEG Signal Preprocessing Study Based on Wavelet Transform and Independent Component Analysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [8] 赵丽, 万柏坤, 高扬. 独立分量分析方法在脑电信号预处理中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(增 1): 496-498.
Zhao Li, Wan Baikun, Gao Yang. The Applying Research of Independent Component Analysis on the preprocessind of EEG[J]. Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(S1): 496-498.
- [9] 万柏坤, 周仲兴, 刘亚伟, 等. 基于 ICA 与 PSD 的 ERD/ERS 信号检测[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2008, 41(11): 1383-1390.
Wan Baikun, Zhou Zhongxing, Liu Yawei, et al. Detection of ERD/ERS Signals Based on ICA and PSD[J]. Journal of Tianjin University(Natural Science and Engineering Technology), 2008, 41(11): 1383-1390.
- [10] Yang B H, Wu T, Wang Q, et al. Motor Imagery EEG Recognition Based on WPD-CSP and KF-SVM in Brain Computer Interfaces[J]. Applied Mechanics & Materials (S1662-7482), 2014, 556-562: 2829-2833.
- [11] Li Y, Guan C, Li H, et al. A self-training semi-supervised SVM algorithm and its application in an EEG-based brain computer interface speller system[J]. Pattern Recognition Letters (S0167-8655), 2008, 29(9): 1285-1294.
- [12] Mehmood R M, Lee H J. Emotion classification of EEG brain signal using SVM and KNN[C]//. IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops. IEEE, 2015: 1-5.
- [13] 张宝利, 陈娟, 曹公正, 等. 从 MATLAB 版本间差异看 VC 与 MATLAB 混合编程趋势[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 174-177.
Zhang Baoli, Chen Juan, Cao Zheng, et al. The mix program trend between VC and MATLAB in view of different MATLAB version[J]. Journal of Changchun University of Technology(Natural Science Edition), 2008, 29(2): 174-177.
- [14] 王世香. 精通 MATLAB 接口与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Wang Shixiang. Proficient in MATLAB interface and programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] Lee H H. Programming with MATLAB 2016[M]. Taiwan: SDC Publications, 2016.