

基于脑机接口的机器人辅助脑瘫康复表情训练系统设计^①

卢振利^②*** 王 红*** 沈玄霖*** Marko Pečnić*** 刘 燕** 单长考** 赵 宇*****
Roumiana Ilieva***** Bojan Nemec***** Marjan Mernik*****

(* 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116)

(** 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(*** 常熟市第二人民医院康复医学科 常熟 215500)

(**** 诺维萨德大学技术科学学院 诺维萨德 21000, 塞尔维亚)

(***** 常熟理工学院商学院 常熟 215500)

(***** 索非亚技术大学管理学院 索非亚 1000, 保加利亚)

(***** 约瑟夫·斯蒂芬研究所 卢布尔雅那 1000, 斯洛文尼亚)

(***** 马里博尔大学电气工程和计算机科学学院 马里博尔 462000, 斯洛文尼亚)

摘 要 本文基于脑机接口(BCI)设备 Emotiv EPOC + 设计了机器人辅助脑瘫康复面部表情训练系统。系统在 Python 开发环境中使用 WebSocket 通信协议设定服务器与客户端用来完成获取设备信号和对信号进行处理以及应用的工作,使用小波变换处理方法捕捉单一通道在某一训练时段的特征信号,通过触发对应的特征信号与动作关系指令驱动机器人。设置了人机交互界面,辅助训练师引导脑瘫患儿完成训练,以达到对脑瘫患儿注意力、反应能力及其面部肌肉训练的目的。

关键词 脑瘫康复训练;脑机接口(BCI);通信协议;信号处理;Emotiv EPOC +

0 引 言

小儿脑性瘫痪又称小儿大脑性瘫痪,俗称脑瘫。脑瘫是小儿时期常见的中枢神经障碍综合征,病变部位在脑,累及四肢,常伴有智力缺陷、癫痫、行为异常、精神障碍及视、听觉、语言障碍等症^[1]。脑瘫患儿存在自卑、注意力不集中、爱哭闹、不配合治疗等^[2]行为,这些都会影响到康复训练的效果。

近年来,越来越多的专家学者将脑电信号、眼电信号等生物信号应用于各类残疾人的康复训练和辅助训练中,将人类大脑和电脑控制设备结合在一起,让训练系统更加智能化、自动化^[3-4]。

文献[5]开发了一种使用 Matlab 与 VC++ 混合编程,基于脑机接口(brain-computer interface, BCI)

的脑卒康复训练系统。文献[6]利用 Emotiv EPOC + 设备对眼电信号进行研究,提出眼电信号的处理方法。

本文针对脑瘫患儿中存在的注意力不集中、吞咽发音困难等问题设计了脑瘫康复训练系统。大脑有意识地控制眨眼睛和微笑可以锻炼面部眼轮匝肌、颊肌、咬肌等多处肌肉,帮助改善部分脑瘫患儿存在的吞咽发音障碍等症状,同时也达到提高注意力集中能力的目的。

1 基于脑机接口设备的脑瘫康复训练系统架构设计

基于脑机接口设备的表情机器人辅助脑瘫康复

① 中国斯洛文尼亚政府间科技合作交流项目(国科外 2018-11-12-17)。
② 男,1974 年生,博士,副教授;研究方向:机器人智能控制;联系人,E-mail: zhenlilu@ csig. cn
(收稿日期:2020-01-07)

训练系统通过脑机接口设备 Emotiv EPOC + 采集脑瘫患儿的面部动作信号,控制表情机器人做出相应的动作。训练师根据训练过程中记录下来的数据结合患儿的实际情况调整训练计划,从而达到帮助脑瘫患儿恢复正常生活、提高生活质量的目的。系统框架如图 1 所示。

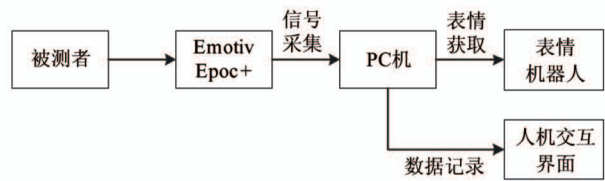


图 1 系统框架图

实验平台主要包括 3 个部分,即 Emotiv EPOC + 设备、个人电脑(PC)机和表情机器人。

脑机接口设备根据电极所处位置的不同分为两种:植入型脑机接口和非植入型脑机接口^[7]。本文采用的是非植入型脑机接口设备 Emotiv EPOC +。Emotiv EPOC + 是 Emotiv Systems 公司研发的基于蓝牙传输的便携式脑电采集设备,其运用贴在皮肤表面的非植入性电极采集头部的脑电信号,也包含眼电信号和肌电信号以及其他噪声信号。图 2 所示为被测者戴上脑电采集设备 Emotiv EPOC + 示意图,设备的 16 个传感器(包括两个参考位置传感器)根据 10-20 国际标准导联系统分别位于大脑的左右两侧的对对应位置。



图 2 Emotiv EPOC + 设备

PC 机采用的是 Windows 系统,装有系统所需的各类软件,并且通过 USB 串口实现对表情机器人的信号传输。

表情机器人内部含有 Arduino 开发板和多个舵机,可以通过调节脉冲宽度调制(pulse width modu-

lation, PWM)的值控制舵机实现 0 ~ 180 °转动,设定不同位置舵机的转动角度控制机器人实现眼睛,眉毛,嘴巴在不同程度上的动作。图 3 所示是用于展示表情动作的机器人。Emotiv EPOC + 采集到的信号经 USB 收发器发送到 PC 端,PC 端接收数据并对数据进行处理识别得到对应动作的特征信号通过串口发送给机器人上的控制板,从而使机器人完成动作。

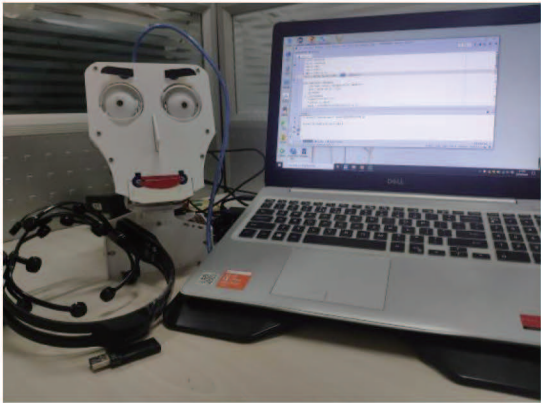


图 3 基于脑机接口的表情训练机器人辅助系统

对机器人的控制是调用 Python 中的 Serial 库设定端口号和波特率实现 Python 向机器人发送数据。动作与标志字符的对应如表 1 所示。

表 1 动作对应表

动作	字符
眨眼	‘0’
微笑	‘1’

2 基于脑机接口设备的信号采集

Emotiv EPOC + 设备通过 2.4 GHz 的无线蓝牙适配器与电脑建立连接,在 C++ 语言环境下调用低能耗蓝牙开发程序与 Emotiv API,生成可供调用的 dll 动态库,然后在 Python 中创建服务器端程序,调用生成的动态库,创建多线程。服务器端与客户端通过 WebSocket 进行通信,一般情况下,WebSocket 用于浏览器与服务器进行全双工通讯,本文为了方便下一步数据处理与控制机器人,该系统在 Python 环境下创建客户端。

2.1 WebSocket 通信协议

WebSocket 是一种基于 TCP 协议的全双工通信协议,是 HTML5 中的一种新的协议,可以在 C、Python、C++ 等多种语言或者框架及服务器中应用。WebSocket 模拟 Socket 协议,实现双向发送和接收信息,使服务器端与客户端之间的数据交换简单化,允许服务器端主动向客户端发送数据,客户端与服务器端通过握手建立连接后可以实现持久双向数据传输^[8-9]。

WebSocket 通信可以替代 HTTP 协议即时通信时采用的轮询,只需要在服务器与客户端通过 HTTP 协议实现一个握手动作后,单独建立一条 TCP 的通信通道进行数据的传输,减少了不必要的请求,节省了流量和服务器资源。因为系统需要实时接收设备数据,因此使用 WebSocket 更加方便快捷。

2.2 通信过程

WebSocket 服务器与客户端交互图如图 4 所示,分别运行服务器与客户端程序,图 5 为客户端部分程序。客户端发送请求报文 request header,如图 6 所示,主要包含升级协议、地址等信息,其中 Sec-WebSocket-Key 是随机生成的,起到基本的保护作用,防止其他恶意或者无意的连接;Sec-WebSocket-Version 表示当前使用的 WebSocket 版本。服务器端接受握手响应,响应报文如图 7 所示,其中 101 表示协议切换。响应报文的出现代表完成握手操作,接下来可以进行通信。

握手成功后,在原程序中加入多线程程序,启动多线程实现接收和发送多条消息。系统根据设备传

```
websocket.enableTrace(True)
ws = websocket.WebSocketApp("ws://127.0.0.1:54123/",
                             on_message = onmess,
                             on_error = Error,
                             on_close = Close)

ws.on_open = Open
ws.run_forever()
```

图 5 客户端通信部分程序

```
--- request header ---
GET / HTTP/1.1
Upgrade: websocket
Host: 127.0.0.1:54123
Origin: http://127.0.0.1:54123
Sec-WebSocket-Key: CSFI9ippjz6L9B+d/wua3g==
Sec-WebSocket-Version: 13
Connection: upgrade
```

图 6 客户端请求报文

```
--- response header ---
HTTP/1.1 101 Switching Protocols
Upgrade: websocket
Connection: Upgrade
Sec-WebSocket-Accept: SS4XUmlBQggAaU9mkN1VDcvPdrI=
```

图 7 服务器端响应报文

感器通道的位置对接收到的信号所对应的通道号进行了设定,如表 2 所示。设定信号传输速率为 256 Hz。接收到的信号格式如图 8 所示,按照上述通道顺序每一个通道的数据为一列,随着时间逐行增加。将某一时段的信号绘制出来,结果如图 9 所示。

表 2 传感器通道表

通道名	通道号	通道名	通道号
F3	2	O2	9
FC5	3	P8	10
AF3	4	T8	11
F7	5	F8	12
T7	6	AF4	13
P7	7	FC6	14
O1	8	F4	15

3889.74358898,3893.71794796,4063.97435856,3952.43589681,3889.35897360,3938.20512751,3865.76922994,3850.76922994,3970.51281989,3975.38461483,3892.69230693,3973.97435842,3885.76923001,3883.07692232,3971.28205073,3988.84615329,3895.51281975,3982.94871740,3922.17948649,3947.30769169,4037.30769189,3982.94871740,3896.15384539,3965.76923015,3925.64102495,3960.25640963,4070.64102530,3963.3333271,3900.89743514,3945.76923015,3891.92307616,3909.99999931,4040.76923036,3947.69230707,3912.94871726,3941.28205066,3867.17948635,3871.02564020,4012.30769183,3947.30769169,3925.38461469,3947.69230707,3886.53846078,3902.17948642,4041.02564061,3955.38461476,3926.53846085,3948.20512758,3926.02564033,3967.05128143,4092.56410222,3956.15384553,3915.25640957,3935.51281982,3934.74358905,3981.41025586,4086.79487145,3943.58974297,3902.56410180,3918.20512751,3902.56410180,3926.53846085,4018.33333285,3927.05128136,3899.61538385,3905.25640950,3873.33333257,3874.48717873,3974.74358919,3918.97435828,3904.35897360,3895.89743514,

图 8 部分原始信号数据

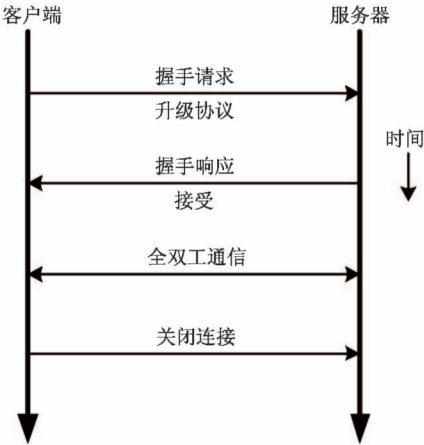


图 4 WebSocket 服务器与客户端交互图

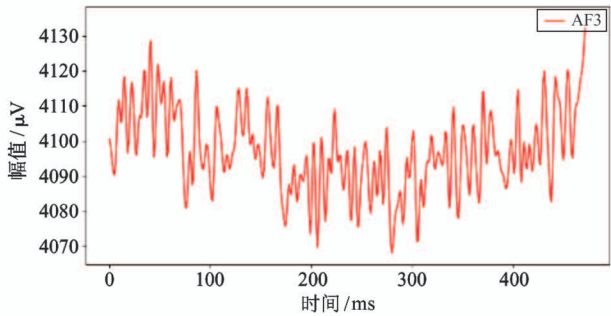


图 9 某一时段的 AF3 通道波形

3 信号处理

在该系统运行中,需要被测者集中注意力想象眨眼与微笑两种动作,在想象的同时大脑控制面部肌肉活动,做出相应的动作,所以在使用 Emotiv EPOC + 获取系统所需的脑电信号的同时也采集到了头部肌电信号与眼动信号。经过多次实验发现眨眼睛时位于眉毛上方的 AF3 和 AF4 通道的信号最强,微笑时位于太阳穴上下的 F7 和 F8 信号较强,所以主要对这 4 个通道的数据进行分析,采用逐个通道分析再结合的方式,本文以眨眼睛时的 AF3 通道信号为例进行介绍。图 10 是采集到的某一段时间内单次眨眼睛的波形图,可以看出在眨眼睛时信号有明显的峰值。

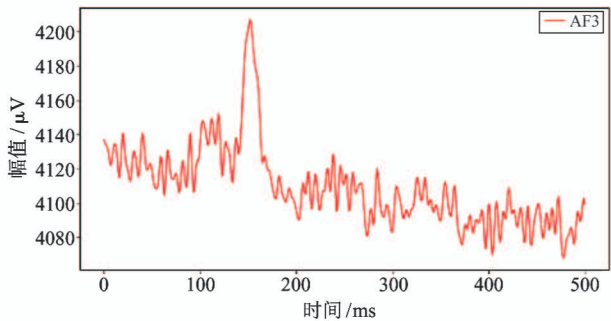


图 10 某一时段的眨眼睛信号图

小波变换可以有效减少噪声并且提取有用信号,还能够得到特征信号所在的时间。连续小波变换(CWT)公式为

$$WT(\alpha,\tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \times \Psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad (1)$$

其中, α 为尺度参数, τ 为平移量, $\Psi(t)$ 为基本小波, $\Psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right)$ 为基本小波的小波族, $f(t)$ 为原始信

号。

离散小波变换(DWT)为

$$\begin{aligned} DWTx(\alpha,\tau) &= \langle x(n), \Psi_{\alpha,\tau}(n) \rangle \\ &= 2^{-\frac{\alpha}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(n) \times \Psi(2^{-\alpha}n - \tau) dt \end{aligned} \quad (2)$$

该系统采集到的信号是离散的,并且连续小波函数在尺度和时间上容易存在信息冗余,所以系统更适合采用离散小波变换^[10]。

离散小波函数将尺度参数和平移量离散化,在处理信号的过程中对信号进行分解、重构,得到如图 11 所示的信号,进而得到特征信号点。

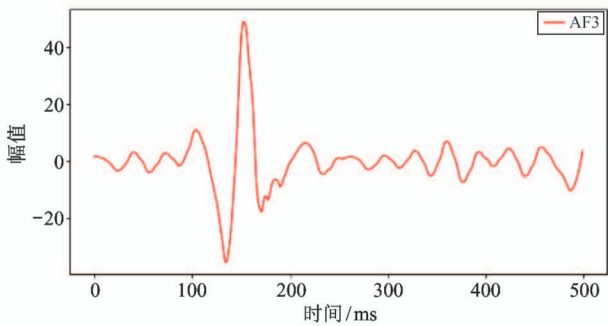


图 11 处理后的信号波形

4 系统调试

首先将设备的 14 个通道的传感器逐个安装上,被测者戴上设备,打开开关,按压耳后两侧的传感器,调整各个传感器位置,查看 Emotiv EPOC + 是否连接好,确保 AF3 通道信号正常连接,即指示灯为绿色,图 12 为信号连接质量示意图。



图 12 信号连接质量示意图

运行系统的 Python 程序,首先观察服务器与客户端是否成功连接,根据第 2.0 节内容,确定握手成功,并且有传感器信号源源不断写入 txt 文件。然后测试系统人机交互界面是否正常。图 13 所示为系统初始界面,界面设定了动作选择按钮,康复训练师可以根据实际情况选择训练动作。



图 13 系统初始界面

图 14 和图 15 分别为眨眼睛和微笑时对应的系统界面和机器人动作,此处规定眨眼睛时眼睛由张开-闭合-张开动作完成;微笑时眼睛为正常睁开状态,嘴角上扬,嘴巴可以微微张开。



(a) 训练界面



(b) 系统整体

图 14 微笑动作



(a) 训练界面



(b) 系统整体

图 15 眨眼动作

5 系统性能评估

该系统的应用对象是年龄较小的儿童,因此为了增强他们对康复训练的兴趣,在训练方案中加入作业疗法。作业疗法是针对受测者在身体上、精神上的某些功能障碍设计特定的专门的作业活动,引导受测者完成这些有目的的作业活动,以使患儿恢复、改善、增强认知、运动、日常生活活动能力^[11-12]。作业疗法几种常见的治疗方式有小组式^[13]、游戏式^[14]、音乐式^[15]、配合家庭训练式^[16]等。训练时配合舒缓的音乐,穿插有趣的游戏并配合康复师的引导,完成训练计划中的动作。

5.1 训练方法设计及案例分析

对不同受测者应用该系统进行多次实验,以两位代表性的脑瘫患儿为例进行应用阐述。训练方案设定为眨眼睛和微笑两个动作各做 1 次为一组,共测 10 组,每组间隔 3 min,间隔时间为患儿的游戏和放松时间。训练在安静的环境中进行,训练前安抚

受测者情绪,使其处于安静且注意力集中状态。训练完成后分别从每一个动作每一次训练的完成时间和每一个动作的正确率两个方面对测试结果进行分析。受测者 A,男,6 岁,临床诊断为精神状态良好,智力良好,注意力集中时间约 8 s,吐字不清晰,肢体活动存在障碍。其测试结果和正确率分别如图 16 和表 3 所示。

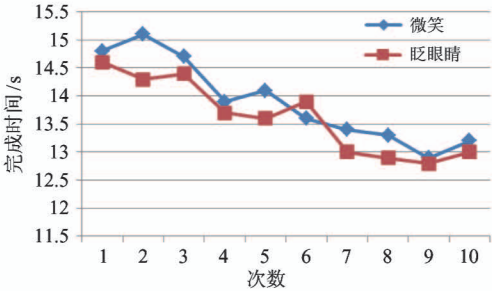


图 16 受测者 A 测试结果

表 3 受测者 A 动作正确率

次数	微笑	眨眼睛
1	正确	错误
2	错误	正确
3	错误	正确
4	正确	错误
5	正确	正确
6	正确	正确
7	正确	正确
8	正确	正确
9	正确	正确
10	错误	正确

由图 16 可以看出,开始训练时用时较长,随着训练次数的增加,受测者 A 完成每一次训练的时间呈下降趋势并趋于稳定,结合表 3,两种动作的正确率分为为 70% 和 80%。

受测者 B,女,7 岁,临床诊断为智力正常,注意力集中时间约 15 s,吐字正常,肢体活动存在障碍。其测试结果和正确率分别如图 17 和表 4 所示。

由图 17 和表 4 可以看出,受测者 B 与 A 相似,从第 5 次训练开始,训练结果趋于稳定,并且每一次训练用时比患儿 A 少,两种动作的正确率分别为 80% 和 90%。

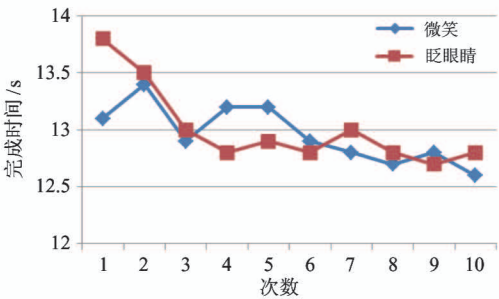


图 17 受测者 B 测试结果

表 4 受测者 B 动作正确率

次数	微笑	眨眼睛
1	错误	正确
2	正确	错误
3	错误	正确
4	正确	正确
5	正确	正确
6	正确	正确
7	正确	正确
8	正确	正确
9	正确	正确
10	正确	正确

就两位受测者的训练结果分析,系统能够对脑瘫患儿的训练起到一定的作用。需要说明的是,影响训练结果的因素还包括设备传感器的接触是否良好,训练环境是否安静等,这些因素同时也会影响动作识别的正确性。

6 结 论

本文采用脑机接口设备 Emotiv EPOC + 设计了表情机器人脑瘫康复训练系统,系统在 Python 编程环境下完成信号的接收与处理工作,通过串口实现对表情机器人的控制。通过想象与动作相结合实现对脑瘫患儿注意力和面部肌肉的训练。后期辅助有趣的引导图片、游戏、音乐等提高了训练过程的乐趣,可以为脑瘫康复训练提供新的技术支持。

参考文献

[1] 唐久来. 脑性瘫痪康复理念和技术的最新进展[J]. 中国儿童保健杂志, 2017,25(5): 433-436

- [2] 兰芳. 心理护理干预对脑瘫儿童康复训练的效果观察[J]. 实用临床护理学电子杂志, 2019,4(4): 65-69
- [3] Benitez D, Silva A, Toscano S. On the use of the Emotiv EPOC neuroheadset as a low cost alternative for EEG signal acquisition [C] // IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM2016), Cartagena, Colombia, 2016: 1-6
- [4] Aguiar S, Y'anez W, Ben'itez D. Low complexity approach for controlling a robotic arm using the Emotiv EPOC headset[J]. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2016), Ixtapa, Mexico, 2016: 1-6
- [5] 杨帮华, 李博. 基于脑机接口的康复训练系统[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(2):174-180
- [6] 姜羽, 王连明. 基于 Emotiv Epoc + 的眼动信号采集与识别方法研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(2):59-64
- [7] 尧俊瑜, 邬长杰. 脑机接口技术研究综述[J]. 现代计算机(专业版), 2017(27):80-84
- [8] 惠苗, 赖道健. 基于 WebSocket 协议的即时通讯系统的开发[J]. 榆林学院学报, 2019, 29(6):76-79
- [9] 郭健, 傅征, 祁胜辉, 等. 基于 WebSocket 的跨平台语音传输实现方法[J]. 信息通信, 2020(1):105-107
- [10] 毛丽民, 朱培逸, 刘叔军, 等. 基于 LabVIEW 的 EEG 信号采集与处理系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(8):153-157, 186
- [11] 丁妍怡, 邱继文. 作业疗法在脑瘫中的应用进展研究[J]. 按摩与康复医学, 2019, 10(7):68-70
- [12] 周磊. 作业疗法在脑瘫儿童康复中的作用及具体应用[J]. 甘肃教育, 2016(3):118
- [13] 庄妍, 庞伟, 孙颖, 等. 小组式作业疗法对脑性瘫痪患儿认知功能的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2016,22(4):455-458
- [14] 范亚蓓, 吴玉霞, 伊文超, 等. 任务导向性游戏结合音乐治疗在脑瘫儿童作业治疗中的应用[J]. 中国康复, 2015,30(6):416-417
- [15] 刘振寰, 张丽红, 赵勇. 五行体感音乐对痉挛型脑性瘫痪患儿肌张力的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2013,19(8):771-774
- [16] 伍宝银, 莫艳玲. 自制健康教育小处方在为脑瘫患儿进行作业治疗中的应用价值[J]. 当代医药论丛, 2015,13(10):7-8

Design of DCI-based robot assisted cerebral palsy rehabilitation facial expression training system

Lu Zhenli * **, Wang Hong * **, Shen Xuanlin ***, Marko Penčić ****, Liu Yan **, Shan Changkao **, Zhao Yu *****, Roumiana Ilieva *****, Bojan Nemec *****, Marjan Mernik *****

(* School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(** School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(*** Department of Rehabilitation Medicine, Changshu No.2 People Hospital, Changshu 215500)

(**** Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad 21000, Serbia)

(***** School of Business, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(***** Faculty of Management, Technical University of Sofia, Sofia 1000, Bulgaria)

(***** Jožef Stefan Institute, Ljubljana 1000, Slovenia)

(***** Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor, Maribor 462000, Slovenia)

Abstract

Based on Emotiv EPOC + , a robot assisted facial expression training system for cerebral palsy rehabilitation is designed in this paper. System in the Python development environment using WebSocket communication protocols is used to complete the set server and the client device signal and the signal processing and application work. The wavelet transform is used to capture a single channel in a training session, and the robot is driven by triggering corresponding characteristic signal and action relation instruction. Human-computer interaction interface is set up to assist trainers to guide children with cerebral palsy to complete training, so as to achieve the purpose of attention, reaction ability and facial muscle training for children with cerebral palsy.

Key words: cerebral palsy rehabilitation training, brain-computer interface(BCI), communication protocol, signal processing, Emotiv EPOC +