

1-3-2019

## Modeling, Simulation and Realization of Writing System Based on BCI Technology

Chen Chao

*1. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; ;2. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ;*

Ping Yao

*1. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; ;*

Bin Hao

*3. Tianjin University of Technology Central Institute of Information, Tianjin 300380, China;*

Xu Rui

*2. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, 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 Paper 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.

---

## Modeling, Simulation and Realization of Writing System Based on BCI Technology

### Abstract

**Abstract:** *In order to solve the problem of insufficient information transmission and interaction between organisms and electromechanical devices in the integrated system of vital electricity, Emotiv EPOC and mechanical arm of eeg acquisition equipment were used to build a writing system based on brain-computer interface technology with faster information transmission rate The system modeling and simulation were conducted.* In the system modeling, the frequency identification of steady-state visual evoked potential was carried out by a combination of bandpass filtering and Canonical Correlation Analysis algorithm, and the accuracy rate of the four classifications was as high as 91.6%. In the online experiment, Emotiv EPOC controlled the mechanical arm to write simple Chinese characters, which showed the purpose of system modeling and simulation was achieved.

### Keywords

electromechanical integration, brain-computer interface, steady-state visual evoked potential, Emotiv EPOC, mechanical arm, typical correlation analysis

### Recommended Citation

Chen Chao, Ping Yao, Hao Bin, Xu Rui. Modeling, Simulation and Realization of Writing System Based on BCI Technology[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4499-4505.

# 基于脑机接口技术的写字系统建模仿真与实现

陈超<sup>1,2</sup>, 平尧<sup>1</sup>, 郝斌<sup>3\*</sup>, 徐瑞<sup>2</sup>

(1.天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384; 2.天津大学 医学工程与转化医学研究院, 天津 300072;

3.天津理工大学中环信息学院, 天津 300380)

**摘要:** 针对生机电一体化系统中生物体与机电装置之间的信息传递与交互能力不足的问题, 利用脑电采集设备 Emotiv EPOC 和机械臂, 搭建了一个信息传输速率较快的基于脑机接口技术的写字系统并进行了系统建模仿真与实现。在系统建模中通过带通滤波和 CCA(Canonical Correlation Analysis) 算法组合对稳态视觉诱发电位进行频率识别, 其四分类的准确率高达 91.6%。在线实验中通过 Emotiv EPOC 控制机械臂实现了对简单汉字的书写, 达到了系统建模仿真的目的。

**关键词:** 生机电一体化; 脑机接口; 稳态视觉诱发电位; Emotiv EPOC; 机械臂; 典型相关性分析  
中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2018)12-4499-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812001

## Modeling, Simulation and Realization of Writing System Based on BCI Technology

Chen Chao<sup>1,2</sup>, Ping Yao<sup>1</sup>, Hao Bin<sup>3\*</sup>, Xu Rui<sup>2</sup>

(1.Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2.Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3.Tianjin University of Technology Central Institute of Information, Tianjin 300380, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of insufficient information transmission and interaction between organisms and electromechanical devices in the integrated system of vital electricity, Emotiv EPOC and mechanical arm of eeg acquisition equipment were used to build a writing system based on brain-computer interface technology with faster information transmission rate. The system modeling and simulation were conducted. In the system modeling, the frequency identification of steady-state visual evoked potential was carried out by a combination of bandpass filtering and Canonical Correlation Analysis algorithm, and the accuracy rate of the four classifications was as high as 91.6%. In the online experiment, Emotiv EPOC controlled the mechanical arm to write simple Chinese characters, which showed the purpose of system modeling and simulation was achieved.

**Keywords:** electromechanical integration; brain-computer interface; steady-state visual evoked potential; Emotiv EPOC; mechanical arm; typical correlation analysis

## 引言

生机电一体化是一门融合了人工智能、机械以及计算机等多项技术的新兴学科, 其科学内涵是通

过生物体和机电设备之间的信息通信, 在不依赖于人体肌肉通信系统的前提下实现人体神经与机电装置之间的互联<sup>[1]</sup>, 其典型代表有智能假肢、脑控四旋翼等系统。目前, 生机电一体化系统所面临的核心问题是生物体与机电设备之间的信息通信能力不足的问题, 脑机接口技术正好弥补了这一技术空缺。

脑机接口(BrainComputer Interface, BCI), 也



收稿日期: 2010-10-18 修回日期: 2010-10-30;  
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1314500),  
国家自然科学基金(61806146);  
作者简介: 陈超(1984-), 男, 福建, 博士, 副教授,  
研究方向为脑信息处理与智能机器人; 平尧(1994-),  
男, 湖北, 硕士, 研究方向为脑信息处理与智能机器人;  
郝斌(通讯作者 1985-), 男, 山东, 硕士, 实验  
师, 研究方向为机械工程。

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

• 4499 •

称“脑机融合感知”，是一种通过分析脑电信号而建立起来的由大脑神经直接控制外部机电设备的生机电一体化接口方式。

脑机接口技术在智能控制、康复训练等领域具有很大的潜力<sup>[2-3]</sup>。对一些脑干中风和肌营养不良等严重神经性疾病的残疾患者来说，他们虽然失去了自由移动和肌肉控制的能力，无法像正常人那样写字和画画，就连正常人的日常生活对这些人来说都是巨大的挑战，但是从生理的角度而言，这些人虽然肢体运动控制能力有所丧失，但是产生相关运动的神经活动的的能力却与正常人相差无几。脑-机接口技术就是帮助这类人通过利用外部辅助设备在人体神经系统与其它机电设备之间建立一种通信的通道，不依赖于患者自身的神经系统与肌肉通讯系统，通过实时的采集病人的脑电信号来实现对机械臂或人体假肢的控制进而成为帮助这类人工作和生活的辅助设备<sup>[4-6]</sup>。

1948 年假肢的出现实现了生机电一体化的控制；在过去的 20 年里，生机电一体化系统被广泛应用于康复医学，基于脑电控制的假肢使用者越来越多，在不同程度上提升了肢体残疾患者的生活质量，产生了显著的社会效益。2007 年，美国 Touch Bionics 公司推出的各手指可独立运动的多自由度假肢产品 i-Limb 被《时代周刊》推举为 2018 年全球 50 项最佳发明之一<sup>[7]</sup>。2005 年，美国国防部启动了假肢领域有史以来最大的研究计划“革命性假肢”计划，其中有 Johns-Hopkins 等 30 多所知名高校和研究机构参与了这项研究，并成功推出了 LUKE 等智能假肢系统，在 2016 年进入了临床应用阶段<sup>[8]</sup>。

目前，国际上很多假肢的灵巧程度和运动特性早已逼近了人手。但是，面向残疾人所设计的假肢更重要的是考虑人体神经与假肢之间的信息传递与交互功能<sup>[9]</sup>。在一系列研发计划的推动下，BCI 技术已取得了较大的成就；现如今用来采集和检测脑电信号的方法有很多，例如脑磁图和核磁共振成像等，都可以为 BCI 系统采集脑电信号作为系统

的输入信号。目前，侵入式 BCI 技术已经能够实现对机械臂的控制和与自身神经系统结合来实现对自身手臂的控制。但是，对 BCI 系统而言，侵入式 BCI 往往会对患者自身造成很大的伤害，而且还会使患者面临术后感染过的风险，在一定程度上就限制了 BCI 系统的广泛应用<sup>[10]</sup>。为了更好地为这些残疾患者服务，非侵入式脑电技术成为了大家研究的热点。目前，基于运动想象的脑电信号已成功用于对四旋翼飞行器和机械手臂的控制，成为了一种替换侵入式 BCI 系统的方案；但是，运动想象在 BCI 系统的应用上识别度较低、且控制过程中实时度较低，无法满足患者在日常生活中正常活动<sup>[11]</sup>。随着 BCI 技术的不断深入，大家对稳态视觉诱发的研究越来越重视，该类脑机接口具有信息传输速率高、鲁棒性强、信噪比高、无需训练等优点，能够更好的为患者服务<sup>[12-13]</sup>。

本系统主要通过 Emotiv EPOC 脑电采集仪采集脑电信号，并对 SSVEP 的采集数据进行系统建模与仿真，在此基础上，将 SSVEP 的分类结果用于对机械臂的在线控制，最终搭建了基于脑机接口技术的写字系统并达到了较好的实验效果。本系统不仅有利于推进脑机接口技术在生机电一体化系统中实际应用，而且为广大残疾患者在日常生活中提供了便利。

## 1 系统组成

图 1 为本系统的系统结构图，由图可知：本系统由脑电信号采集、数据处理、机械臂控制台控制和反馈 4 个部分组成；其中，硬件设备由 Emotiv EPOC、机械臂、计算机等组成，脑电信号的分析处理软件是 MATLAB。

首先利用 MATLAB 软件的 Psychtoolbox 心理学工具箱设计出视觉刺激器，通过不同频率的闪烁块诱发出受试者的脑电信号，再通过 Emotiv EPOC 脑电采集仪采集脑电信号并通过蓝牙通讯模块传输至另一台处理脑电信号的计算机上，然后对采集的脑电数据进行带通滤波、特征提取、特征分类等

处理, 并将不同分类结果转化为对应的控制指令字符发送给机械臂的上位机控制平台, 最后通过机械臂上位机检测到的字符实现对机械臂的控制, 控制机械臂进行书写。

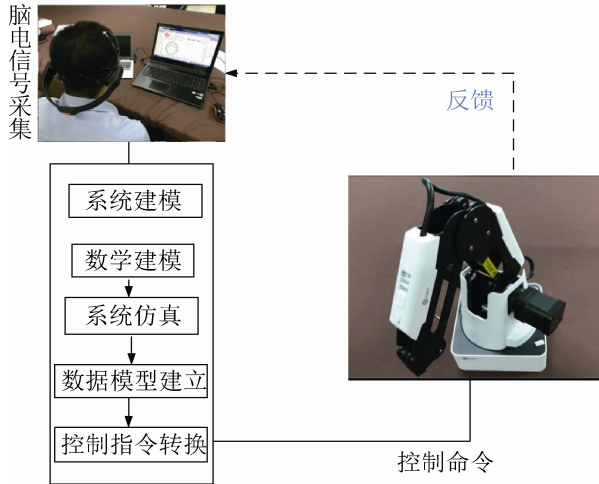


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure drawing

## 2 系统设计

### 2.1 信号采集

如图 2 所示为本系统中所设计的稳态视觉诱发界面, 其中标注了各目标在进行视觉诱发时的闪烁频率, 视觉诱发的界面是在以黑色为底色的显示屏上设计了上、下、左、右 4 个黑白交替对称分布着的闪烁块作为稳态视觉诱发目标, 在对各视觉诱发的目标块的闪烁频率设计时, 为了避免电脑屏幕固定的屏幕刷新率对视觉诱发界面上各闪烁块的干扰, 对其中上、下、左、右 4 个闪烁块所对应的闪烁频率分别为 6 Hz、7.5 Hz、8.57 Hz、10 Hz; 其中, 显示屏的屏幕刷新率为 60 Hz。

在进行信号采集时, 受试者放松的坐在电脑屏幕前, 集中注意力注视其中一个的闪烁模块, 通过 Emotiv EPOC 采集脑电信号, 其中采样频率为 128 Hz。

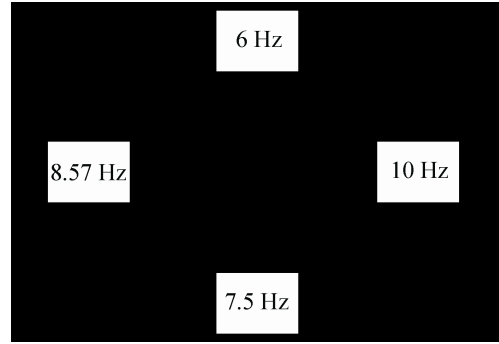


图 2 各目标闪烁频率

Fig. 2 Target flicker frequency

### 2.2 数学建模

在本系统中采样频率为 128 Hz, 在进行数据处理时, 为了除去噪声和倍频重合对实验结果的干扰, 根据采样定理分析所采集原始脑电信号的有效频率成分为 0~32 Hz, 所以在进行数据处理时利用数学建模加入了带通滤波处理脑电信号, 这样就去除了肌电、眼电以及周围环境噪声所产生的干扰信号和 32 Hz 以上与本实验后续分析无关系的高频脑电信号部分。

本系统在数学建模中通过典型相关性分析对采集的脑电信号用进行分析, 就是通过分别比较每两组脑电信号之间的潜在相关性对脑电信号的结果进行分类<sup>[14-15]</sup>。关系如下: 假设脑电信号有两组变量 X 和 Y, 且两者之间存在着特殊的线性组合关系  $x = w_X^T X$  和  $y = w_Y^T Y$ 。典型相关性分析就是通过最大值问题找出相关性最大的两组变量:

$$\max_{w_x, w_y} \rho = \frac{c[x, y]}{\sqrt{V[x]V[y]}} \quad (1)$$

当 X 和 Y 均值都为零时, 式(1)为:

$$\rho = \frac{E[xy^T]}{\sqrt{E[xx^T]E[yy^T]}} = \frac{E[w_Y^T XY w_X]}{\sqrt{E[w_X^T XX^T w_X]E[w_Y^T YY w_Y]}} \quad (2)$$

对  $W_X$  和  $W_Y$  求偏导, 可得出  $\rho$  的最大值:

$$\rho^2 = C_{xx}^{-1} C_{xy} C_{yy}^{-1} C_{yx}^{-1} = C_{yy}^{-1} C_{yx} C_{xy}^{-1} C_{xx} \quad (3)$$

式中:  $C_{XY}$  和  $C_{YX}$  代表类间协方差矩阵;  $C_{XX}$  和  $C_{YY}$

代表类内协方差矩阵。

本系统通过采用典型相关性分析算法对四分类的稳态视觉诱发频率进行识别,待测变量为采集的多通道稳态视觉诱发的脑电信号,参考变量组由对应的刺激频率和倍频的正余弦组成:

$$Y_i = \begin{cases} \sin(2\pi f_i t) \\ \cos(2\pi f_i t) \\ \sin(4\pi f_i t) \\ \cos(4\pi f_i t) \end{cases}, t = \frac{1}{s}, \frac{2}{s}, \dots, \frac{N}{s} \quad (4)$$

式中:  $s$  代表本系统的采样频率;  $N$  为本系统的采样点数。  $f_i$  为四类刺激目标的闪烁频率, 所得出的  $Y_i$  为每类视觉诱发频率的参考变量组, 再通过下面 SSVEP 信号的频率识别的计算公式算出各待测变量组与参考变量组的相关矩阵:

$$f_s = \frac{\max}{f_i} \rho(f_i) \quad (5)$$

该算法通过比较 CCA 相关系数  $\rho$  来对该组的脑电信号进行分类, 并将正确的分类结果转换成相应的字符。

### 2.3 下位机控制

本系统以机械臂作为下位机, 通过利用机械臂的控制平台控制机械臂执行不同的运动指令。本系统通过刺激界面上的 4 个不同频率的闪烁模块分别对应 4 个不同的运动指令, 其中上(6 Hz)、下(7.5 Hz)、左(8.57 Hz)、右(10 Hz)分别对应 u、d、l、r 4 个指令, 通过 MATLAB 将识别出的结果发送给机械臂控制平台, 然后控制平台根据识别结果控制机械臂进行运动。

## 3 系统建模

### 3.1 系统仿真及数据模型建立

本次实验在系统仿真阶段通过采集了 8 位同学, 然后每名受试者分别在四个闪烁快的刺激下进行了 15 组实验, 每组试验中, 受试者注视闪烁快 3 s, 然后休息 5 s, 最终取得了 120 组的脑电信号。

如图 3 所示为 Emotive 脑电采集仪的采集通道

的分布位置, 根据频率谱能量分布图分析, SSVEP 信号较强的区域主要集中在脑部的顶枕区<sup>[16]</sup>, 因此在进行离线数据数据分析时我们只选用 Emotive 分布在顶枕区的 4 个电极 P7、O1、O2、P8 的数据。

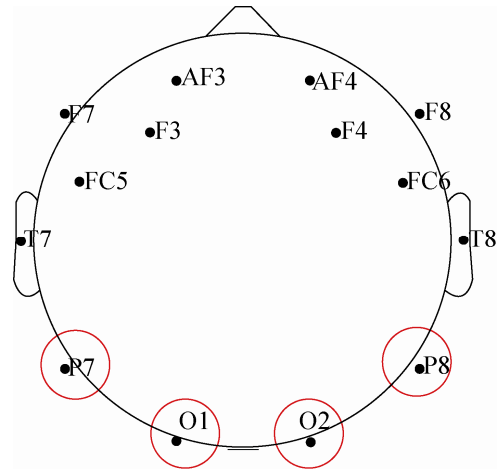


图 3 Emotiv 电极位置分布

Fig. 3 Position distribution of Emotiv electrode

在离线数据的分析中, 信息传输速率(Information Transmission Rate, ITR)的计算公式如下:

$$ITR = \frac{60}{T} \times \left[ \log_2^N + p \log_2^p + (1-p) \log_2 \left( \frac{1-P}{N-1} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $T$  为时间窗口长度;  $N$  为目标数;  $P$  为准确率。为提高系统通讯速率, 综合时间窗口长度和准确率考虑, 本系统选择时间窗口长度为 3 s。

图 4 分别显示了两受试者 10 Hz 闪烁频率下刺激信号的时域波形图和时域幅度谱, 采样频率为 128 Hz, 图 4 表示在志愿者在 3 s 内 P7 电极处单次试脑电信号, 其中, 图 4(a)和图 4(b)为一组, 图 4(c)和图 4(d)为一组, 为了避免 32 Hz 以上与本实验后续分析无关的高频脑电信号部分的干扰, 在数据处理中对采集的脑电信号进行了 1~32 Hz 的带通滤波, 由其幅度谱可清楚地看出在 10 Hz 处有明显的峰值, 表明刺激信号在基频处刺激效果较稳定, 该图验证了本系统中所构建的基于脑机接口技术的生机电一体化写字系统能够准确的识别志愿者的控制命令, 将受试者的意图用于控制机械臂执行相应的运动指令。



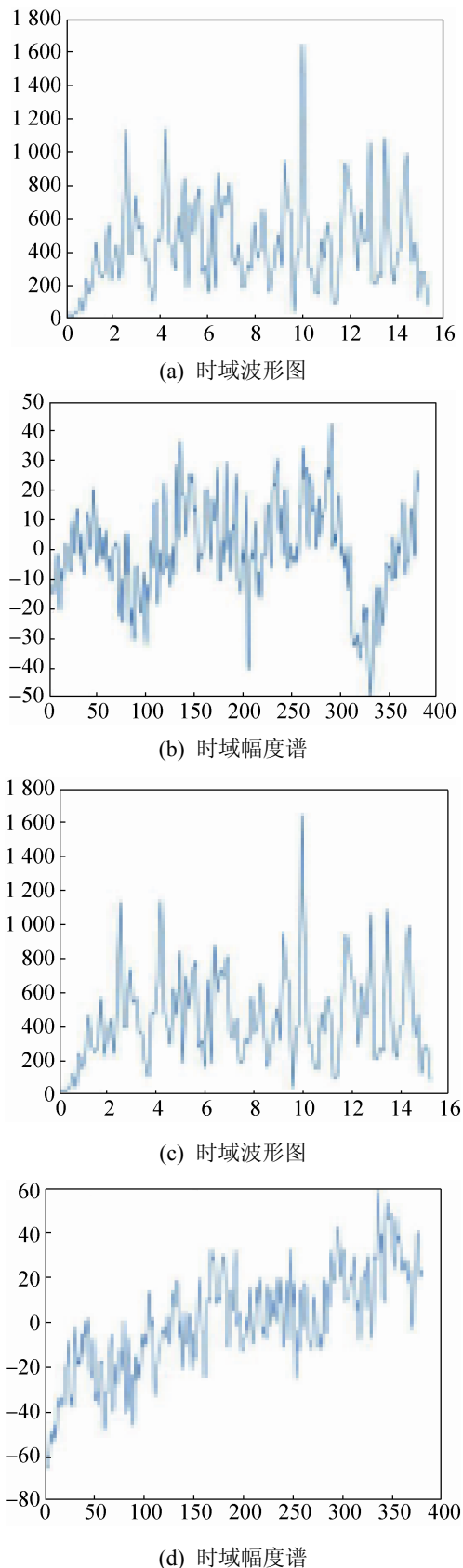


图 4 脑电信号时域波形图和时域幅度谱  
Fig. 4 Time domain waveform and time domain amplitude spectrum of eeg signal

本系统在在线实验前先设计了离线实验来检验该系统的稳定性和信息传输速率, 根据实验设计, 随机挑选了 8 名视力正常或矫正后视力正常的受试者, 均为 22~24 岁身心健康的在读研究生, 且在试验开始前都给大家详细介绍了实验中所需注意的各种事项; 为了更有效地验证该系统的实用性, 在进行离线实验时没有回避外界正常的走动以及说话带来的干扰, 在离线的数据采集中对每位受试者进行 15 组实验并统计离线实验的正确率, 根据离线实验的所统计出的正确率计算出本系统的信息传输速率。表 1 为参与离线实验 8 名受试者的结果, 由表可知: 8 号受试者取得了最高正确率 100%, 其中本系统的平均正确率为 89.17%, 远高于机会水平(25%), 说明本系统有较好的鲁棒性; 经过计算, 本系统平均信息传输速率为 26.5 bit/min, 清华大学高上凯小组开发的高信息传输速率脑机接口中该值为 27.15 bit/min<sup>[17]</sup>, 经过比较两者平均信息传输速率非常接近; 实验结果表明, 本系统可以为残疾患者提供一种基于脑机接口技术的生机电一体化写字系统且具有良好的实时性, 能够有效地为广大患者在日常生活中提供了便利。

表 1 受试者离线实验结果  
Tab. 1 Results of the subjects' off-line experiments

| 受试者 | 正确次数 | 正确率/%  | ITR/(bit/min) |
|-----|------|--------|---------------|
| 1   | 13   | 86.67  | 24.40         |
| 2   | 12   | 80.00  | 21.88         |
| 3   | 14   | 93.33  | 30.74         |
| 4   | 14   | 93.33  | 30.74         |
| 5   | 13   | 86.67  | 24.40         |
| 6   | 12   | 80.00  | 21.88         |
| 7   | 14   | 93.33  | 30.74         |
| 8   | 15   | 100.00 | 40.00         |
| 平均值 | 13   | 89.17  | 26.50         |

### 3.2 系统实现与结果

为了避免实验的随机性, 受试者根据实验任务提前写出每一步所应识别的字符顺序, 受试者在线实验中根据设计的实验任务按相应顺序注视代表四个任务指令的闪烁块的其中一块, 从而控制机械

臂执行相应的书写笔画,这样就能很直观的判断实验结果是否正确;在进行在线实验数据的处理中,根据频率谱能量分布图分析,在线数据选用 P7、O1、O2、P8 四个通道的数据,采用带通滤波结合典型相关性分析的方法,实验设计为每 3 s 进行一次视觉诱发频率识别;根据离线结果分析,CCA 的阈值取 0.3,当识别出的相关性大于该阈值时,表示该在线分类结果有效。

根据离线数据的结果和屏幕刷新率的限制,本系统设置了 4 类闪烁频率用来控制机械臂执行四类运动指令;为了能直观地体现出本系统的效果,本实验设计为机械臂本实验设计为让受试者控制机械臂写一个“中”字,机械臂的书写笔画如图 5 所示。

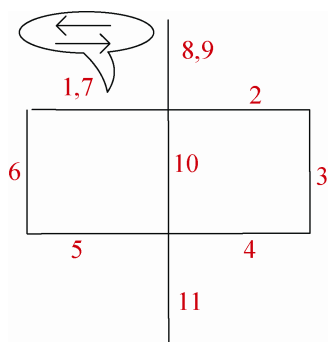


图 5 “中”字的笔画顺序  
Fig. 5 Stroke order of the word “zhong”

在线实验中,随机挑选了五名受试者进行试验,为了避免在线实验的随机性,需提前设计好受试者所应书写的汉字并按提前设计的在线实验流程提前编出来受试者每一步所需识别的字符顺序。在线实验中,如果出现识别出得字符与对应的字符序列不同则允许受试者继续识别字符返回原来的笔画顺序,然后继续下一步实验,直到完成对整个汉字的书写;如果试验中出现连续两次以上识别错误则终止试验,判定为实验失败。表 2 为在线实验的实验结果。

一共五名受试者参与了在线实验,由表 2 可知,他们最终都成功的写了一个“中”字,其中①号受试者和④号受试者在实验中出现了两次错误,都及时进行了补救,一共花了 15 步成功完成了试

验,识别字符的平均正确率为 86.7%;②号和③号受试者在实验中各出现了一次错误且都及时进行了补救,一共花了 13 步成功完成了试验,识别字符的平均正确率为 92.3%;⑤号受试者在实验中没有出现错误,只花了 11 步成功完成了试验,成功的在线效果图如图 6 所示。

表 2 受试者在线实验结果  
Tab. 2 Subjects' online experiment results table

| 次数 | 顺序 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 结果       |
|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----------|
|    | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |          |
| 1  | r  | r | r | l | d | d | u | l | l | u  | r  | u  | d  | d  | d  | 错误<br>两次 |
| 2  | r  | r | d | l | l | l | r | u | r | u  | d  | d  | d  |    |    | 错误<br>一次 |
| 3  | r  | r | d | l | l | u | l | r | r | u  | d  | d  | d  |    |    | 错误<br>一次 |
| 4  | r  | r | d | l | l | l | r | u | r | r  | l  | u  | d  | d  | d  | 错误<br>两次 |
| 5  | r  | r | d | l | l | u | r | u | d | d  | d  |    |    |    |    | 成功       |



图 6 在线实验效果图  
Fig. 6 Online experiment renderings

5 名受试者在线试验中平均正确率为 91.6%,实验结果表明,本系统可为广大残疾患者提供一种对外控制的生机电一体化系统新途径且具较好的实时性,系统使用方便,对一些脑干中风和肌营养不良等严重神经性疾病或运动系统损伤的患者来说,能够通过视觉诱发控制机械臂实现书写的功能。

## 4 结论

该系统设计与实现了一套基于脑机接口技术



的机电一体化写字系统, 5 名健康志愿者在进行在线实验时取得了 91.6% 的平均识别正确率, 这说明了基于稳态视觉诱发的非侵入式脑电活动能够被用于机械臂的控制。在该系统中, 采用脑电信号直接控制机械臂的原理, 所以志愿者无需了解有关机械臂控制的知识, 且不用经过视觉诱发的训练便可以直接实现对机械臂的控制。在脑电信号的处理方面, 本系统采用的是带通滤波和典型相关性分析算法相结合, 这样就无需对各个志愿者进行单独建模, 适用于所有志愿者, 这样就大大降低了实验难度。本系统不仅有利于推进脑机接口技术在机电一体化系统中实际应用, 而且为广大残疾患者在日常生活中提供了便利。

### 参考文献:

- [1] 姜力, 杨斌, 黄琦, 等. 智能假肢手的生机电集成[J]. 机器人, 2017, 39(4): 387-394.  
Jiang li, Yang bin, Huang qi, et al. Dynamic electrical integration of intelligent prosthetic hands[J]. Robot, 2017, 39(4): 387-394.
- [2] Mccullagh P, Lightbody G, Zygierewicz J, et al. Ethical Challenges Associated with the Development and Deployment of Brain Computer Interface Technology[J]. Neuroethics (S1874-5490), 2014, 7(2): 109-122.
- [3] Mason S G, Birch G E. A general framework for brain-computer interface design[J]. Neural Systems & Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on (S1534-4320), 2003, 11(1): 70-85.
- [4] Ortiz-Rosario A, Adeli H. Brain-computer interface technologies: from signal to action[J]. Reviews in the Neurosciences (S0334-1763), 2013, 24(5): 537.
- [5] Chaudhary U, Birbaumer N, Ramosmurguialday A. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation[J]. Nature Reviews Neurology (S1759-4766), 2017, 12(9): 513.
- [6] Ramadan R A, Vasilakos A V. Brain computer interface: control signals review[J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2016, 223: 26-44.
- [7] Connolly C. Prosthetic hands from Touch Bionics[J]. Industrial Robot (S0143-991X), 2008, 35(35): 290-293.
- [8] Weir R F, Mitchell M, Clark S, et al. The intrinsic hand-A22 degree of freedom artificial hand-wrist replacement[C]// Proceedings of the 2008 Myoelectric Controls/Powered Prosthetics Symposium, 2008: 233-237.
- [9] Zhang T, Fan S W, Jiang L, et al. Development and experiment analysis of anthropomorphic prosthetic hand with flexible three-axis tactile sensor[J]. International Journal of Humanoid Robotics (S0219-8436), 2013, 10(3): 1350028.
- [10] 高上凯. 浅谈脑-机接口的发展现状与挑战[J]. 中国生物医学工程学报, 2007, 6(26): 801-803.  
Gao shangkai. Discussion on the development status and challenges of brain-computer interface[J]. China Journal of Biomedical Engineering, 2007, 6(26): 801-803.
- [11] 诸强, 王明时. 左右手运动想象脑电模式的识别[J]. 生物医学工程学杂志, 2004, 21(6): 1031-1034.  
Zhu qiang, Wang mingshi. Recognition of left and right hand motor imaginative eeg patterns[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2004, 21(6): 1031-1034.
- [12] Lin Zhonglin, Zhang Changhui, Wu Wei, et al. Frequency Recognition Based on Canonical Correlation Analysis for SSVEP-Based BCIs[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering (S0018-9492), 2007, 54(6): 1172-1176.
- [13] Zhang Yangsong, Xu peng, Huang Yingling, et al. SSVEP Response Is Related to Functional Brain Network Topology Entrained by the Flickering Stimulus[J]. PLoS ONE (S1932-6203), 2013, 8(9): 72654.
- [14] Bin G, Gao X, Yan Z, et al. An online multi-channel SSVEP-based brain-computer interface using a canonical correlation analysis method[J]. Journal of Neural Engineering (S1741-2552), 2009, 6(4): 046002.
- [15] Wang Y T, Wang Y, Cheng C K, et al. Developing stimulus presentation on mobile devices for a truly portable SSVEP-based BCI[C]// International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. USA: IEEE, 2013: 5271-5274.
- [16] Badcock N A, Petroula M, Yatin M, et al. Validation of the Emotiv EPOC® EEG gaming system for measuring research quality auditory ERPs[J]. Peerj (S2376-5992), 2013, 1(1): 38.
- [17] Ming C, Gao X, Gao S, et al. Stimulation Frequency Extraction in SSVEP-Based Brain-Computer Interface [C]// International Conference on Neural Interface and Control, 2005: 64-67.