

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012008



混合脑机接口系统的眨眼与 运动想象控制方法

杨 铮¹, 方 慧 娟^{1,2}, 罗 继 亮^{1,2}, 孙 海 信³

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 厦门大学 信息学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对单一运动想象脑机接口实验控制命令数量不足的问题,在单一运动想象系统的基础上,提出基于眨眼控制干预移动机器人的研究方法.首先,采用主动形状模型算法进行人脸识别和人眼定位;然后,利用眼部纵横比算法计算实时的数值,实现实时眨眼次数的统计;最后,将与眨眼次数相匹配的眨眼策略转化为对应指令控制移动机器人运行,进而实现通过眨眼和运动想象控制实时干预移动机器人状态的目的.为了验证该方法的有效性,邀请数位受试者进行基于眨眼和运动想象控制的混合实验.实验结果表明:该方法能够准确、高效地干预移动机器人的实时状态.

关键词: 眨眼控制;眼部纵横比;眨眼次数;实时干预

中图分类号: TP 242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)02-0252-08

Hybrid Brain Computer Interface System Based on Blink and Motor Imagery Control Method

YANG Zheng¹, FANG Huijuan^{1,2}, LUO Jiliang^{1,2}, SUN Haixin³

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. School of Informatics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient number of experimental control commands of single motor imagery brain computer interface, a research method of intervening mobile robot based on blink control is proposed on the basis of single motor imagery system. Firstly, the active shape model algorithm is used for face recognition and eye positioning. Then, the eye aspect ratio algorithm is used to calculate the real-time value to achieve real-time blink count statistics. Finally, the blink strategy which matches the blink count is converted into corresponding instructions to control the operation of the mobile robot, which can realize real-time intervention through blinking and motor imagery control the purpose of the state of the mobile robot. In order to verify the effectiveness of this method, several experimenters are invited to conduct a hybrid experiment based on blinking and motor imagery control. The experimental results show that this method can intervene the sta-

收稿日期: 2020-12-02

通信作者: 方慧娟(1979-),女,讲师,博士,主要从事脑机接口和智能控制的研究. E-mail: huijuan. fang@163. com.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0809200);国家自然科学基金资助项目(605-53119043);福建省自然科学基金资助项目(2017J01117);福建省本科高校教育教学改革研究项目(FBJG20190203)

te of the mobile robot accurately and efficiently in the real-time.

Keywords: blink control; eye aspect ratio; blink times; real-time intervention

脑机接口(BCI)是一项在人脑与外界设备之间建立联系的技术^[1-2],能够辅助残疾人或正常人控制移动设备^[3]. BCI 技术的优势是能够准确、直接地控制外部设备,但是由于其系统模式单一,单模态脑机接口系统存在控制指令不足的问题. 为了解决这一问题,Pfurtscheller 等^[4]于 2010 年提出混合 BCI 的概念,将单模态 BCI 与其他生理或技术信号相结合,构建多模态 BCI 系统. 目前,很多学者对混合 BCI 进行了大量研究,张浩等^[5]开发了一种基于 P300 和运动想象的混合 BCI 系统控制轮椅;窦立祥^[6]结合稳态视觉诱发(SSVEP)和运动想象设计一种混合 BCI 系统,实现 Dobot 机械臂在线写字. 上述混合 BCI 系统的设计均有各自的优势和不足. 基于稳态视觉诱发的 BCI 系统性能稳定且不受头部运动影响,但是输入速度慢;P300 具有准确性高的特点,但长时间的实验会引起人眼不适.

随着科技的发展,基于计算机视觉^[7-9]的控制技术也愈发成熟(如体感技术^[10]等). 基于计算机视觉的眨眼检测技术是通过摄像头获取的用户面部图像进行模式识别实现的,最常见的是基于眼部纵横比(EAR)的方法^[11],其核心是眼睛面部地标之间距离比例的简单计算,通过图像分析捕获实时的眨眼动作. 该技术不需要接触其他设备,直接与计算机进行高效、快速的人-机交互.

单模态的运动想象脑机接口的实验范式设定由空闲状态控制移动机器人向前运动,左想象控制移动机器人向左运动、右想象控制移动机器人向右运动. 然而,移动机器人在执行任务过程中可能会遇到极端的情况,如移动机器人无法通过自身的避障系统避开下楼梯这类环境,出于对移动机器人行动时安全性能的考虑,给该系统添加一个启停机制是必要的. 借鉴以上技术的特点,本文提出一种用计算机视觉代替视觉依赖型反应式 BCI 系统的方法,避免实验过程中受试者眼部产生不适反应.

1 应用于混合脑机接口的眨眼控制方法

人脸检测方法包括基于统计型和基于知识型两种. 基于统计型方法是从大量的人脸图像样本中提取人脸特征,构造人脸模板,将模板与目标图像进行相似度量计算,根据结果判断目标图像中是否有人脸存在;而基于知识型方法则是利用先验知识(如五官特征及相互之间的几何位置)检测人脸. 通过两种人脸识别算法采集人脸图像,实现人脸和人脸轮廓的捕捉和特征点提取,通过算法得到对应实验结果,再将检测结果实时转换成控制指令,从而实现眨眼干预移动机器人. 眨眼检测算法流程图,如图 1 所示.

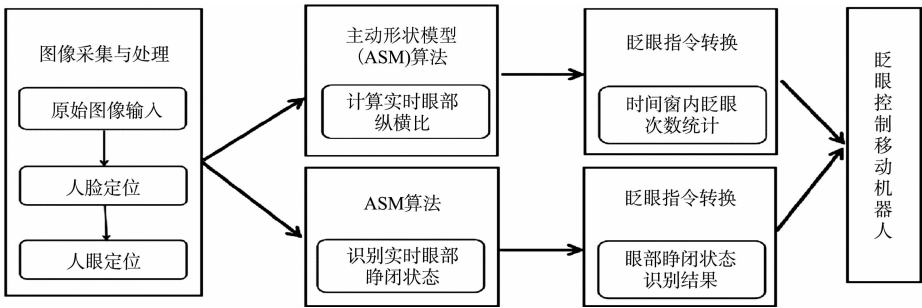


图 1 眨眼检测算法流程图
Fig. 1 Flow chart of blink detection algorithm

1.1 基于眨眼次数的眨眼控制方法

采用主动形状模型(ASM)算法^[12]进行人脸识别. 该算法是一种基于点分布模型的算法,应用面部 68 个特征点定位脸部的重要区域(包括眼睛、眉毛、鼻子和嘴巴),这意味着可以通过特定脸部的索引,提取特定的脸部结构,在完成人脸检测的同时也完成了人眼定位. 该算法的主要流程如下.

- 1) 搜集 n 个人脸训练样本,记录人脸关键特征点的位置坐标信息.
- 2) 构建训练集的形状向量,将人脸图中标定关键特征点组成一个形状向量,即

$$\mathbf{x}_i = (x_1^i, y_1^i, x_2^i, y_2^i, \dots, x_m^i, y_m^i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \tag{1}$$

式(1)中: (x_j^i, y_j^i) 表示第 i 个训练样本上第 j 个特征点的坐标; n 为样本数,一共构成 m 个形状向量.

对标定的人脸特征点进行对齐,减少非形状因素的干扰,消除不同图像大小和方向变化等影响. 定义训练集 $G=\{X_i\}$,采用普氏(Procrustes)分析法对该训练集进行对齐,主要有以下 4 个步骤.

步骤 1 将训练集中所有人脸模型对齐到第 1 个人脸模型,将模型与新点集进行匹配,对刚得到的模型进行平移、旋转和放缩,即

$$T_{x,y,s,\theta} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s\cos \theta & -s\sin \theta \\ s\sin \theta & s\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \tag{2}$$

式(2)中: T 为旋转放缩平移矩阵; θ 为旋转角度; s 为放缩尺寸; X 为水平方向平移向量; Y 为垂直方向平移向量; (x,y) 表示任意特征点的二维坐标.

步骤 2 计算对齐后的人脸形状向量的均值,得到平均人脸模型 \bar{x} ,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \tag{3}$$



图 2 样本对齐结果

Fig. 2 Sample alignment result

步骤 3 将人脸模型样本对齐到平均人脸模型 \bar{x} .

步骤 4 重复步骤 2,3,直至收敛,样本对齐结果,如图 2 所示.

3) 将对齐后的形状向量进行主成分分析(PCA)^[13]降维处理,计算向量协方差矩阵 S ,即

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^T \times (x_i - \bar{x}). \tag{4}$$

4) 计算矩阵 S 特征值并从小到大排序,得到 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$,选取包含了前 t 个特征值构成的特征向量矩阵 $P=[P_1, P_2, \dots, P_t]$,使其满足

$$\sum_{i=1}^t \lambda_i / \sum_{i=1}^q \lambda_w > f_v \times V_i, \quad V_i = \sum \lambda_i. \tag{5}$$

式(5)中: f_v 是特征向量个数确定的比例系数,一般为 95.0%或 97.5%.

通过任意样本模型与标准模型,计算得到特征点 P 为

$$P = (x_i - \bar{x})^T b. \tag{6}$$

式(6)中: b 是一个 t 维向量(约束条件),用来控制特征点 P 的变化. 该向量不宜过大,否则会导致整个形状超过人脸变化范围.

b 的求取过程如下:1) 初始化 b 向量为单位向量,得到标准模型 $Z_1(X, Y)$;2) 将标准模型 $Z_1(X, Y)$ 与样本模型 $Z_2(X, Y)$ 比较,标准模型 $Z_1(X, Y)$ 通过变换矩阵 T 得到样本模型 $Z_2(X, Y)$,采用模型 $Z_1(X, Y), Z_2(X, Y)$ 的结果反求 b ,不同的样本模型得到不同的 b ,不断更新 b ,直至收敛.

将得到的模型 P 模型与样本图像进行匹配,取样本图像上对应模型特征点附近梯度值最大的点,得到新特征点 P 样本,将其标定在图像上,并配合跟踪算法^[14-15]实现对人脸的实时跟踪. 模型匹配效果图,如图 3 所示.

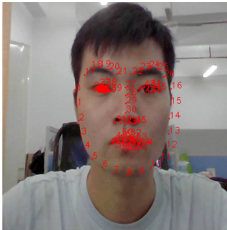


图 3 模型匹配效果图

Fig. 3 Model matching effect diagram

对于眨眼检测,从眼睛的结构入手,每只眼睛用 6 个点 $p_1 \sim p_6$ 表示,如图 4 所示. 运用这些坐标得出眼部宽度和高度之间的眼部纵横比(EAR)关系为

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2 \|p_1 - p_4\|}. \tag{7}$$

式(7)中:分子部分表示眼睛垂直方向标识之间的距离;分母部分则表示眼睛水平方向标识之间的距离.

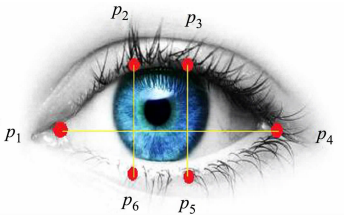


图 4 眼部坐标点

Fig. 4 Eye coordinates

眼睛的纵横比在眼睛张开/闭合的时候大致是恒定的,但是在眨眼时会迅速降低. 依据这一眨眼特点,计算眼部纵横比,通过实时的眼部纵横比值与设定的眨眼阈值相比较,判断是否眨眼,如果 EAR 值低于设定的阈值,则记录眨眼 1 次. 然而,出于对眼球的保护,人体会不自觉地产生眨眼的动作. 眨眼检测过程中,根据实时的 EAR 数据绘制的眨眼波形图,如图 5 所示. 图 5 中: β 为眼部纵横比个数. 由图 5 可知:无意识眨眼时的 EAR 值波动小,而刻意眨眼时的 EAR 值波动较大. 无意识眨眼对整个实验而言是一

种扰动因素,会影响刻意眨眼次数的统计. 为了避免将无意识的眨眼次数统计到实验结果中,对眨眼阈值大小的选取显得尤为重要.

除了 EAR 值,刻意眨眼与无意识眨眼在眨眼时间上有较大的区别. 刻意眨眼一次会在眼睛闭合时持续一小段时间,所需时间为 0.7~1.0 s 左右,而无意识眨眼消耗的时间低于 0.4 s. 因此,可以将眼部纵横比阈值和眨眼时间作为切入点,去除无意识眨眼对眨眼检测的影响.

1.2 基于眼部状态识别的眨眼控制方法

采用基于 Adaboost^[11,16-18] 算法对眼部状态进行识别. Adaboost 算法是一种精度极高的分类器,通过分层分类器对训练样本进行训练,根据每一层的训练结果修改对应的样本权值,并基于新样本权值重新训练. 这样不断循环训练会提高错误样本的分布概率,分类器更新样本权值后会对这些错误样本重点照顾. 最后,将每次训练得到的分类器融合起来,即变成最终的决策分类器. 利用 Adaboost 算法把弱的分类器组合成强的分类器后,进行级联并用于人脸检测,对模型眼部进行瞳孔边缘的椭圆拟合和 Canny 边缘检测,从而确定眼睛的状态.

将瞳孔与椭圆拟合后,通过 Canny 边缘检测确定眼睛的状态. Canny 算子是一个多级的边缘检测算法,通过查找图像中梯度的局部最大值提取图像的边缘信息,若某一点的边缘强度满足边缘定位条件,则将该点定位为边缘点. 采用边缘局部特征处理得到人眼的边缘闭合曲线,根据人眼区域的黑像素点变化情况识别当前的睁闭眼状态. 对眼部黑色像素的数目设定一个阈值,该阈值的判定函数为

$$f = \sum_i z_i.$$

(8)

当 f 值大于该阈值时,判定此时人眼处于睁开状态;当 f 值小于该阈值时,则判定人眼处于闭合状态. 人的眼部状态可以分为 4 类:双眼睁开;左眼闭合、右眼睁开;左眼睁开、右眼闭合;双眼闭合. 实时眼部状态识别结果,如图 6 所示.

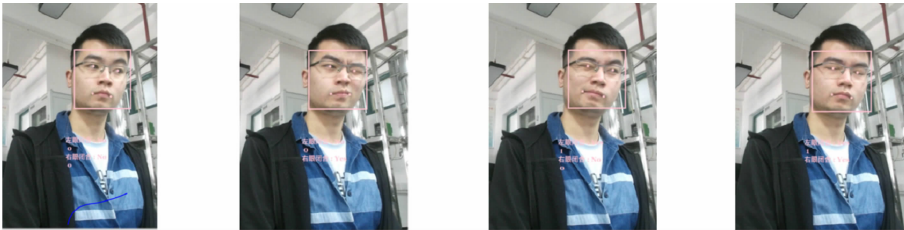


图 6 实时眼部状态识别结果

Fig. 6 Real-time eye status recognition results

1.3 眼部检测实验

1.3.1 眨眼检测实验 室内正常光照条件下,要求 5 名受试者在摄像头前眨眼 50 次,系统根据眨眼检测算法统计受试者的眨眼次数. 采用的眨眼检测算法是将眼部纵横比与眨眼阈值进行比较,判断是否眨眼,因此,眨眼阈值是眨眼检测算法中的重要参数. 为了选取合适的眨眼阈值(θ),对不同眨眼阈值下的眨眼次数进行分析,如表 1 所示. 表 1 中: δ 为眨眼检测误差.

表 1 不同眨眼阈值的眨眼次数

Tab. 1 Blink times with different blink thresholds

受试者	$\theta=2.00$	$\theta=0.19$	$\theta=0.18$	$\theta=0.17$	$\theta=0.16$	$\theta=0.15$
受试者 1	60	56	53	51	50	48
受试者 2	59	55	54	50	51	49
受试者 3	59	56	52	51	49	49
受试者 4	58	55	53	50	48	48
受试者 5	59	55	53	50	49	47
δ	9.02	5.42	3.07	0.63	1.18	1.95

由表 1 可知:当阈值为 0.15~0.18 时,眨眼次数统计结果相对精确;当阈值设定为 0.17 时,实验得到的眨眼检测误差最低,因此,将眨眼阈值设定为 0.17.

阈值参数设定后,要求受试者在室内正常光照条件下完成不同的眨眼次数实验,各 20 组. 为保证发出控制指令的快速性,要求受试者在 1 s 内完成 1 次眨眼. 不同眨眼控制指令下的识别成功次数,如表 2 所示. 表 2 中: n 为眨眼次数; N 为识别成功的总次数; η 为识别准确率; t 为眨眼识别用时.

表 2 不同眨眼控制指令下的识别成功次数

Tab. 2 Successful identified times under different blink control commands

受试者	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
受试者 1	19	17	16	13
受试者 2	18	16	16	14
受试者 3	20	18	15	13
受试者 4	20	18	16	14
受试者 5	18	19	18	14
受试者 6	19	18	16	15
受试者 7	18	17	15	15
受试者 8	19	18	17	14
受试者 9	19	18	16	15
N	170	159	145	127
$\eta/\%$	94.44	88.33	80.56	70.56
t/s	1.57 ± 0.15	2.15 ± 0.20	2.95 ± 0.20	3.60 ± 0.35

1.3.2 眼部状态识别实验 在室内正常光照条件下,要求 9 名会睁、闭单眼的受试者完成 4 类眼部睁开状态实验,各 20 组. 4 种眼部状态的识别成功次数,如表 3 所示.

表 3 4 种眼部状态的识别成功次数

Tab. 3 Successful identified times of four kinds of eye states

受试者	眼部状态			
	双眼睁开	左眼睁开、右眼闭合	右眼睁开、左眼闭合	双眼闭合
受试者 1	20	18	19	20
受试者 2	20	20	19	20
受试者 3	20	18	20	20
受试者 4	20	19	18	20
受试者 5	20	19	20	20
受试者 6	20	18	20	20
受试者 7	20	20	19	20
受试者 8	20	18	18	20
受试者 9	20	19	20	20
N	180	169	173	180
$\eta/\%$	100.00	93.88	96.11	100.00
t/s	1.00 ± 0.15	1.00 ± 0.15	1.00 ± 0.15	1.00 ± 0.15

实验结果表明:基于眨眼次数统计的眨眼控制方法适用人群广、准确率较高,且对硬件设备的要求不高,但是滑动时间窗导致移动机器人接收到对应的控制指令有几秒的延时,实时性略差;而基于眼部状态识别的眨眼控制方法实时性好、准确性高,但是对硬件设备的要求较高,且不适用于不会睁、闭单只眼睛的人群.

1.4 眨眼控制指令的转换

基于眨眼次数的控制方法可以获取实时的眼部纵横比数据,与眨眼阈值比较后可判断是否刻意眨眼. 在此基础上,设计一种通过自适应滑动时间窗转换眼部纵横比数据的方法,统计滑动时间窗范围内的眨眼次数并将其转换成控制指令,干预移动机器人的运动状态. 为了在实验过程中减少计算机对眨眼次数的误判,将两次及两次以上的连续眨眼转换为控制指令. 其算法如下.

算法 1 眨眼次数转换为控制指令算法.

输入: 实时的眼部纵横比数据、滑动时间窗和眨眼阈值参数

输出: 眨眼次数, 眨眼次数对应的控制指令

- 1 系统获取实时的眼部纵横比数据;
- 2 时间窗框定眼部纵横比数据, 范围 $KL \sim (K+1)L-1, K=0$;
- 3 将眼部纵横比数据与眨眼阈值比较, 得到低于眨眼阈值的 EAR 值个数 n (即眨眼次数);
IF $n < 2, K=K+1$
THEN 记录时间窗最后一个数据的位置 P_i , 根据策略将眨眼次数转换为控制指令, 下一个滑动时间窗的方位为 $P_i+1 \sim P_i+L$;
IF $n \geq 2$
THEN 下一个滑动时间窗框定范围 $KL \sim (K+1)L-1$.

基于眼部状态识别的控制方法可以识别实时的眼部状态. 而在实验过程中, 发现大多数情况下人的两只眼睛都是处于睁开状态, 这使得眼部识别结果为“双眼睁开”的频率过高, 所以不适合将“双眼睁开”状态转换为控制指令. 若将其转换为直行指令, 则无法随时控制移动机器人切换至转向状态连续转向; 若将其转换为停止指令, 则无法控制移动机器人连续直行或连续转向. 因此, 提出将其他眼部状态转换为控制指令的算法.

算法 2 眼部状态转换为控制指令算法.

输入: 实时眼部图像, 黑色像素阈值 f

输出: 对应的控制指令

- 1 系统获取实时的眼部图像;
- 2 对于瞳孔区域进行椭圆拟合, 椭圆外部图像全设置为白色;
- 3 得到椭圆内部左、右眼各自的黑色像素数目 GL 和 GR ;
- 4 将实时的黑色像素数目 G 与阈值 f 比较
IF $GL > f \ \&\& \ GR > f$
THEN 识别结果“双眼睁开”
ELSE IF $GL < f \ \&\& \ GR > f$
THEN 识别结果“左眼闭合、右眼睁开”, 转换为控制指令 1;
ELSE IF $GL > f \ \&\& \ GR < f$
THEN 识别结果“左眼睁开、右眼闭合”, 转换为控制指令 2;
ELSE IF $GL < f \ \&\& \ GR < f$
THEN 识别结果“双眼闭合”, 转换为控制指令 3.

1.5 混合脑机接口系统

结合眨眼控制系统模块、运动想象脑机接口系统模块、AmigoBot 移动机器人系统模块和 Petri 网模块设计混合脑机接口系统, 如图 7 所示.

为了方便受试者更轻松地控制移动机器人, 提出如下策略: 通过眨眼的方式控制整个移动机器人的直行、转向和停止 3 种状态, 当眨眼控制系统发出转向指令时, 移动机器人接收运动想象脑电信号, 进一步执行左转或右转指令; 当眨眼控制系统发出直行或停止指令时, 移动机器人不接收运动想象控制指令. 此外, 当移动机器人没有接收到新的控制信号时, 会继续执行前一个控制指令对应的任务; 当移动机器人接收到新的、不同的控制指令时, 停止上一个任务, 执行新的任务.

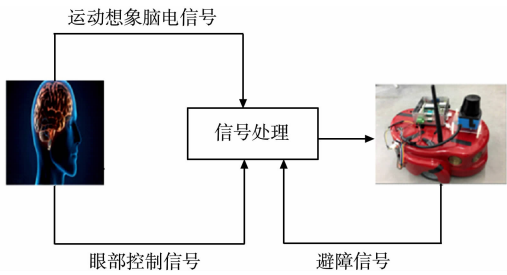


图 7 混合脑机接口系统

Fig. 7 Hybrid brain computer interface system

2 实验仿真分析

为了验证混合系统的效果, 设计一个控制移动机器人移动过程中避开楼梯口的实验, 受试者需要控

制移动机器人从起点运行到楼梯口,再运行至终点. 实验使用的计算机配置为 Inert(R) Core(TM) i5-8250 CPU,8.00 GB 安装内存和 1.80 GHz 主频,Windows 10 操作系统;实验数据来自电脑自带摄像头,图像的分辨率设置为 1 920 px×1 080 px,视频帧率为 30 帧 · s⁻¹;将微软 Microsoft Visual Studio 2013 开发平台与移动机器人仿真界面平台 MoibleSim 相结合,进行在线仿真实验. 仿真实验界面,如图 8 所示.

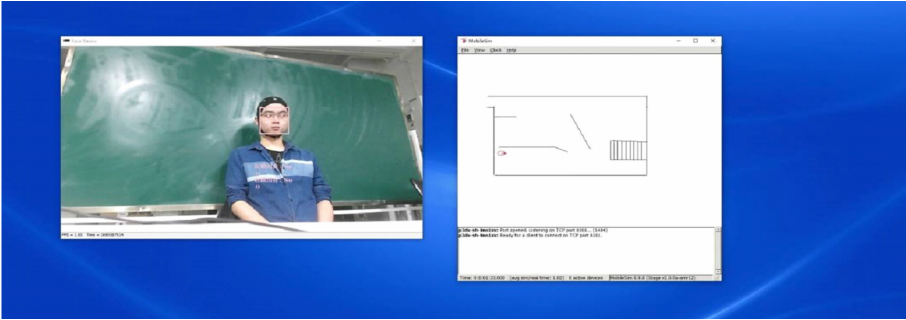


图 8 仿真实验界面
Fig. 8 Simulation experimental interface

图 8 为混合脑机接口系统在线实验的工作环境,眨眼检测界面、运动想象脑机接口界面和移动机器人的仿真图都在同一界面上. 受试者仅需看着电脑界面就可控制仿真界面中的移动机器人. 针对控制问题,对混合 BCI 实验范式进行改进.

- 1) 调节移动机器人的移动速度和转动角度. 移动机器人在实验过程中以 0.1 m · s⁻¹ 的速度移动,每次转向时的转动角度为 15°,即在超低速环境下实现混合脑机接口控制移动机器人.
- 2) 为了方便受试者控制移动机器人,实验过程中受试者不需要持续发出控制信号. 受试者发出控制指令后由系统决策,只要混合 BCI 系统没有决策得到新的控制指令,移动机器人就一直执行原有决策结果对应的任务;若混合 BCI 系统决策得到新的控制指令,移动机器人会停止执行原任务,开始新任务的执行.

单一运动想象 BCI 系统和混合 BCI 系统控制移动机器人经过楼梯(下梯)口的移动路线,如图 9 所示. 图 9 中:绿线代表移动机器人停止运动的位置.

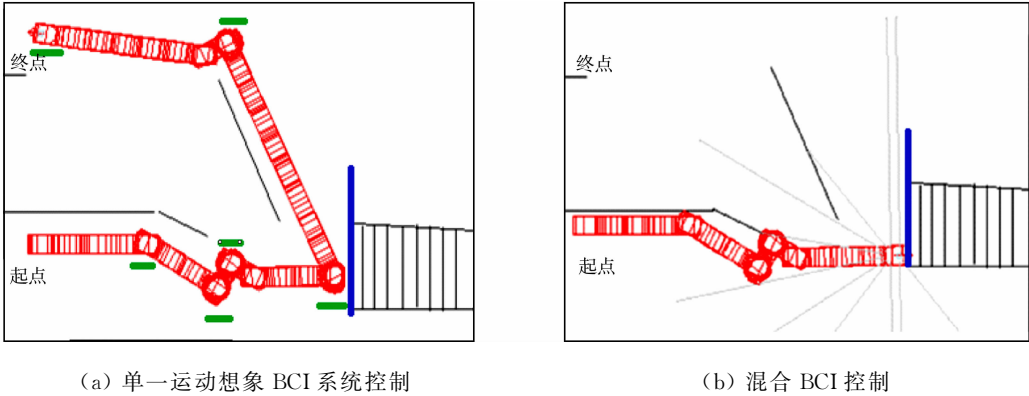


图 9 不同 BCI 系统控制移动机器人的移动路线

Fig. 9 Movement paths of mobile robot controlled by different BCI system

单一运动想象 BCI 系统控制移动机器人抵达楼梯口时,由于受试者不能及时控制移动机器人调转方向,使移动机器人触碰到楼梯口的障碍物后停止运行,无法按预期完成抵达终点的任务. 实验结果表明:单一运动想象 BCI 系统控制移动机器人经过下梯口时,操作不当会产生移动机器人掉下楼梯的风险,而基于眨眼和运动想象控制的 BCI 混合系统可以实时控制移动机器人停止,不仅避免了该风险的发生,还解决了单一运动想象 BCI 控制指令不足的问题,提高了脑机接口系统的实际应用效果.

不同受试者通过脑电设备控制移动机器人的效果不一,但大多都能通过适合自身的眨眼方式控制移动机器人停止. 当受试者感觉控制状态不佳或在实验过程中感到疲劳时,可以随时停止移动机器人,

进行短暂休息或者调整自身的状态,以便在接下来的实验中以更好的精神状态继续工作。

3 结束语

设计基于眨眼和运动想象控制移动机器人运动的混合 BCI 系统,实现由运动想象移动机器人左转、右转,眨眼控制移动机器人停止、直行和转向的功能,有效解决单一运动想象控制移动机器人过程中控制指令不足这一问题。仿真实验证明了系统方案的合理性、准确性和实时性。实验将系统的安全性放在首位,受试者可以通过眨眼随时停止移动机器人,减轻受试者视觉和大脑方面的负担、降低实验的复杂程度,同时有望提高脑机接口系统的实用性。

参考文献:

- [1] 袁保宗,阮秋琦,王延江,等.新一代(第四代)人机交互的概念框架特征及关键技术[J].电子学报,2003,31(增刊1):1945-1954. DOI:10.3321/j.issn:0372-2112.2003.z1.003.
- [2] WOLPAW J R,BIRBAUMER N,HEETDERKS W J,*et al.* Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting[J]. IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering,2000,8(2):164-173. DOI:10.1109/TRE.2000.847807.
- [3] 郑汝琴.物联网智能家居中的人机交互浅析[J].科学技术创新,2019(16):79-80.
- [4] PFURTSCHELLER G,ALLISON B Z,BRUNNER C,*et al.* The hybrid BCI[J]. Frontiers in Neuroscience,2010,4(30):30-40. DOI:10.3389/fnpro.2010.00003.
- [5] 张浩,李远清,张瑞,等.室内环境中脑控轮椅的路径跟踪控制[J].计算机测量与控制,2015,23(1):93-95. DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2015.01.085.
- [6] 窦立祥.基于稳态视觉诱发电位和运动想象的混合脑机接口系统研究与实现[D].天津:天津理工大学,2018.
- [7] 刘伟,欧阳健飞,闫勇刚.基于 iPPG 的非接触式心率测量方法研究[J].计量技术,2015(4):3-5. DOI:10.3969/j.issn.1000-0771.2015.4.01.
- [8] LEVANTINI V,MURATORI P,INGUAGGIATO E,*et al.* Eyes are the window to the mind: Eye-tracking technology as a novel approach to study clinical characteristics of ADHD[J]. Psychiatry Research,2020,290:113135. DOI:10.1016/j.psychres.2020.113135.
- [9] PAULY L,SANKAR D. A novel method for eye tracking and blink detection in video frames[C]//IEEE International Conference on Computer Graphics, Vision and Information Security. Bhubaneswar: IEEE Press,2015:252-257. DOI:10.1109/CGVIS.2015.7449931.
- [10] 陈燕军.基于 Kinect 的人体骨骼信息提取与手势识别[J].机械工程与自动化,2020(4):173-175. DOI:10.3969/j.issn.1672-6413.2020.04.070.
- [11] 汪小帆.基于眨眼检测与瞳孔定位的疲劳驾驶状态检测[D].马鞍山:安徽工业大学,2018.
- [12] COOTES T F,TAYLOR C J. Active shape models: 'Smart snakes'[C]//Proceedings of the British Machine Vision Conference. Leeds:Springer,1992:266-275. DOI:10.1007/978-1-4471-3201-1_28.
- [13] ZHANG Ridong,JIA Kebin. Local two-dimensional principal component analysis algorithm for facial expression recognition[J]. Computer Applications and Software,2018,35(2):172-177. DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.02.032.
- [14] TU Jilin,TAO Hai,HUANG T. Face as mouse through visual face tracking[C]//Proceedings of the 2nd Canadian conference on Computer and Robot Vision. Washington D C: IEEE Press,2005:339-346. DOI:10.1109/CRV.2005.39.
- [15] MEDIONI G,COHEN I,BREMOND F,*et al.* Event detection and analysis from video stream[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2001,23(8):873-889. DOI:10.1109/34.946990.
- [16] 龙伶敏.基于 Adaboost 的人脸检测方法 & 眼睛定位算法研究[D].成都:电子科技大学,2008.
- [17] 冯晶.基于 AdaBoost 算法的人脸检测系统研究及其 SoC 实现[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [18] 余洪山,王耀南.一种改进型 Canny 边缘检测算法[J].计算机工程与应用,2004,40(20):27-29. DOI:10.3321/j.issn:1002-8331.2004.20.009.