

基于想象驾驶行为的 脑机接口控制

JIYU XIANGXIANG JIASHI XINGWEI
DE NAOJI JIEKOU KONGZHI

梁静坤 著



85

201



國防工業出版社

National Defense Industry Press

基于想象驾驶行为的 脑机接口控制

梁静坤 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

脑机接口技术的研究为那些大脑思维正常但存在肢体障碍的人群提供了一种辅助控制的方式。本书详细介绍了脑机接口的产生背景、关键技术及整个控制系统的构成。重点研究在虚拟的交通环境下,驾驶者进行左右手想象驾驶的脑电信号,对其进行特征提取和分类,并建立了一种基于语音识别技术的专用轮椅模型。同时,本书也对目前流行的脑电特征提取和分类的方法进行了介绍与比较,为学习者提供了更多的参考信息。

本书的读者对象可以是从事残疾人辅助健康事业、医疗仪器设计、生物医学、智能家居等多个专业的在校本科生、研究生,也可作为相关专业的工程技术人员、脑机接口爱好者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于想象驾驶行为的脑机接口控制 / 梁静坤著. —
北京:国防工业出版社, 2015. 12
ISBN 978 - 7 - 118 - 10413 - 4

I. ①基… II. ①梁… III. ①脑神经—接口—人
工神经—研究 IV. ①R322. 85 ②TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213068 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 8 字数 200 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前言

直接用大脑思维活动的信号与外界进行通信,甚至实现对周围环境的控制,是人类自古以来就追求的梦想。自从1929年Hans Berger第一次记录脑电图以来,人们就开始研究如何将大脑思维信号用于通信和控制。

脑机接口技术形成于20世纪70年代,领域涉及纳米技术、生物技术、信息技术、认知科学、计算机科学、生物医学工程、神经科学和应用数学等多学科的交叉技术,是目前国际上一个十分活跃的研究领域,是众多学科科研工作者的研究热点。脑机接口作为一门新兴的交叉学科技术,许多理论还都处于探索阶段,要想将其成功应用于人类自身,还有待于更深入的研究。本书针对目前国内外技术的进展,对脑机接口做了较为系统的介绍,并加入了作者独立的研究内容,希望能给初学者提供脑机接口的入门知识,为有一定技能的学习者提供研究方法及方向。

本书共分为7章,第1章是绪论部分,主要介绍脑机接口的研究背景及发展现状,并对目前脑机接口技术研究方法做了简要介绍;第2章介绍了运动想象脑机接口的研究基础,包括脑电信号的生理特点及想象脑电的特点;第3章根据作者研究的实验内容,介绍了基于想象驾驶行为的脑电信号的采集及预处理方法,包括实验环境的设计、实验数据的采集以及特殊电极的预处理等;第4章首先介绍了对脑电信号进行特征提取的几类分析方法,重点利用基于公共空间模式的CSP算法对实验数据进行了处理;第5章先介绍了几种脑电分类处理方法,并利用支持向量机SVM和线性回归算法进行了处理和比较;第6章利用想象驾驶脑电实验数据设计了基于脑电的语音控制车辆模型,并对其他几种用于脑电辅助轮椅控制的语音识别技术做了介绍;第7章为总结与展望部分。另外,本书的附录提供了近几年国内外的优秀研究成果,仅供大家参考。

本书为海南热带海洋学院2015年博士启动项目成果(项目编号:QYXB201501)。同时也感谢教育部、财政部VTNE025资源开发项目的大力支持。在本书的编写过程中,部分内容参考了国内各院校的硕博论文,在此对其作者表示感谢!感谢郝敏钗老师协助搜集了大量资料,同时感谢河北工业大学徐桂芝教授、电磁实验室的孙辉师弟及为脑电实验采集无偿付出的被试同学们!

由于作者水平有限,书中涉及很多特征提取及分类算法公式,难免会出现疏漏,希望广大读者随时沟通,批评指正。作者电子邮箱:451758104@qq.com。

作者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 脑机接口研究背景	1
1.2 脑机接口发展概述	1
1.2.1 发展史及定义	1
1.2.2 研究意义	5
1.3 脑机接口系统简介	8
1.4 脑机接口研究方法	9
1.4.1 根据脑电信号的采集方法进行分类	10
1.4.2 根据生理电信号进行分类	10
1.5 与驾驶行为有关的脑电研究现状	12
1.5.1 研究的方法及意义	12
1.5.2 研究中实验设计与分析	13
1.6 本书研究内容	15
第2章 基于运动想象的脑机接口研究基础	17
2.1 脑电信号生理特点	17
2.1.1 脑电产生机理	17
2.1.2 脑电特点	18
2.1.3 脑电分类	19
2.1.4 脑电处理方法分析	20
2.2 运动想象脑电信号	20
2.2.1 大脑的结构及分区	20
2.2.2 想象脑电的特点	25
2.3 本章小结	27
第3章 基于想象驾驶行为的脑电实验采集及预处理	28
3.1 研究方案	28
3.1.1 虚拟环境的设计	29
3.1.2 实验设备介绍	31
3.1.3 受试者的选取	34
3.1.4 其他注意事项	34
3.2 脑电的预处理	35

3.2.1	脑电数据预处理	35
3.2.2	基于脑电地形图驾驶脑电的分析	36
3.2.3	相关电极 C3、C4 的 EEG 信号预处理后的结果	39
3.3	本章小结	42
第 4 章	驾驶脑电的特征分析研究	43
4.1	脑电信号的特征分析方法	43
4.1.1	概述	43
4.1.2	DSP 特征提取算法分析	44
4.1.3	邻域空间模式算法(NSP)分析	46
4.2	傅里叶变换与功率谱	48
4.2.1	算法分析	48
4.2.2	结果与分析	50
4.3	公共空间模式 CSP 算法的特征提取	55
4.3.1	CSP 滤波	55
4.3.2	降维处理	57
4.4	CSP 算法在频域、时域内的特征提取结果及比较分析	60
4.4.1	频域特征提取结果	60
4.4.2	时域特征提取结果	63
4.5	本章小结	65
第 5 章	驾驶脑电的分类方法研究	67
5.1	概述	67
5.2	线性判别分析	67
5.3	小波变换	69
5.3.1	小波变换理论	69
5.3.2	短时傅里叶变换	70
5.3.3	连续小波变换	70
5.3.4	离散小波变换	71
5.3.5	多分辨率分析	72
5.3.6	Mallat 快速算法	72
5.4	BP 神经网络分类器	74
5.5	支持向量机 SVM	75
5.5.1	算法研究	75
5.5.2	分类结果	78
5.6	线性回归分类算法	79
5.6.1	算法研究	79

5.6.2 分类结果	80
5.7 比较与讨论	82
5.8 本章小结	82
第6章 基于语音识别技术的BCI车辆辅助控制模型	83
6.1 语音识别技术	83
6.2 基于语音识别的BCI智能小车控制方案	83
6.2.1 系统总体方案	83
6.2.2 系统硬件设计与实现	84
6.2.3 系统软件设计与实现	87
6.3 其他语音识别控制接口介绍	90
6.3.1 基于Google Speech语音识别的控制技术	90
6.3.2 多姿态变换声控轮椅	91
6.4 本章小结	92
第7章 总结与展望	93
附录	95
附录1 近几年国内部分相关论文简介	95
附录2 近几年国际部分相关论文简介	108
参考文献	113

第1章 绪 论

1.1 脑机接口研究背景

人脑与外界交流或对外界环境进行控制通常是利用神经肌肉通道来完成的,由于各种疾病的困扰,这种通道可能随时被破坏。目前有许多疾病,如脑瘫、大脑脊髓损伤、肌肉萎缩等多种硬化病能够不同程度地损害肌肉的神经通道。失去了大脑意识的支配,人类就不能根据自己的意愿进行有目的的活动^[1],正常生活就会产生障碍。同时,在现代化发展过程中,随着汽车工业的日益壮大,机动车车祸率不断攀升,频繁的交通事故也给人类带来一定的伤害,事故严重者包括由于脑外伤引起的四肢瘫痪或偏瘫、四肢缺失等多种困扰,严重影响了人类的日常工作和生活。

根据有关数据统计,目前世界各国已经进入了人口老龄化阶段,我国是世界老年人口最多的国家,约占全球老年人的1/5,截止到2012年,我国60岁以上的老年人约1.8亿,并且未来30年,每年还会快速递增。“全国城乡失能老年人状况研究”显示,到2010年末,全国城乡有3300万老年人部分失能和完全失能,其中,1/3的老年人完全丧失劳动能力甚至自理能力。据有关部门科学估计,到2015年,我国将有4000万老年人部分或完全丧失劳动能力甚至自理能力。对于这些未来的群体,现代化的服务设施是急需和必需的,主要用途就是协助这些群体的日常生活。在现代化的医疗设备无法完全治愈或较大程度地改善这些群体身体机能故障的情况下,一种能够代替神经系统和肌肉组织,有效地将大脑信息传递给外部设备,实现控制外界环境的技术就成为了生物医学工程领域重要的研究课题。2006年,《中国残疾人事业“十一五”发展纲要(2006—2010年)》指出未来对肢体残疾人员的福利规划^[2-4],主要包括对肢体残疾的康复训练,并配备矫治或辅助用具。在此基础上,一系列以信息技术和生物技术为核心,关于康复及辅助工程的“973”“863”等科技项目陆续出台。

脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术为截瘫患者或其他肢体障碍的残疾人甚至大批老年人提供了一种全新的人体与外界交流的途径。德国精神科教授Hans Berger首先发现了脑电活动,并对其进行了精确的描述^[5],1924—1929年,他对脑电图的存在进行了潜心研究,从此翻开了人类对脑电信息进行探索的具有历史意义的重要篇章。

1.2 脑机接口发展概述

1.2.1 发展史及定义

脑机接口技术是一种涉及神经科学、信号检测与处理、模式识别等多学科的交叉技术,涉及了神经科学、认知科学、计算机科学、生物医学工程、心理学、数学、信号处理、临

床医学、机器人控制等多个学科领域。

1924年,德国教授 Hans Berger 将两根铂金针状电极从患者的颅骨部位插入到大脑皮层,来记录人脑的生物电活动取得成功,并首次对脑电活动做了精确的记录。接着,他又将电极安置在头皮部位,同样记录到了脑电信号。在接下来的5年里,Hans Berger 教授对脑电进行了大量的研究,发现并命名了 α 波和 β 波,确认了脑电图的存在,从此开始人类对脑电信息的探索和研究,并很快得到世界范围的推广^[5,6]。

1970—1977年,加州大学洛杉矶分校的 Jacques Vidal 首次提出了“脑机接口”这一术语,并设计出了首个 BCI 系统^[7],利用头皮电极采集脑电信号,这个系统可以让使用者自主驱动屏幕上的光标进行二维平面运动,同时 Jacques Vidal 发表了第一篇关于 BCI 的技术文章。

1988年,美国 Illinois 大学的专家 Farewell 和 Donchin 两人利用 P300 实现了虚拟打字机的设计^[8]。

加拿大亚伯塔大学的 Karmali 利用脑电信号实现了电脑屏幕菜单选择、电器设备开关等几种日常电器的使用及控制^[9]。

1999年,在美国昆山的杜克大学,Nicolelis 研究小组对短尾猴进行了实验,他们在猴子大脑部位植入细微的电极,采集肢体运动电位,实现对机械手臂进行控制,研究并取得阶段性的成果^[10]。

以后的10年,BCI 技术的研究发展迅速,1995—2002年,脑机接口研究小组的个数从6个增加到40多个,一系列发展方向也随之逐步确立,主要包括核磁共振、断层扫描、光学脑成像以及脑电波描记等技术。到目前为止,脑机接口的研究小组达到了上百个,有很多个国家包括美国、中国、日本、德国等已经在脑机接口技术及其应用上取得了关键性的进展。

美国 Wadsworth 中心研制的 BCI 2000 通用系统,在1999年、2002年和2005年分别主办了三届脑机接口会议^[5,11-13]。

2002年,Chapin 等人刺激大鼠胡须区,训练其按照人们的指令完成左转、前进等任务。另外,1997—2011年,研究者 Talmadoc 还成功实现了对蟑螂、蜜蜂等昆虫,甚至鸟、望鱼等大型动物的行为控制。这些动物机器人因其物种特有的优势,可以进入人类通常难以进入的区域,如狭缝、高空、深海等,在侦查、缉毒等领域可以发挥重要作用。

奥地利格拉茨实现了 Graz I 和 Graz II 两个具有代表性的 BCI 系统^[14]。

在5年前的一次袭击事故中,25岁的美国马萨诸塞州男子 Matthew Nagle 马修·纳格尔全身瘫痪,2004年,美国罗德岛州医院在这个25岁的男子大脑中植入了一块4mm见方的电极芯片^[15],帮助他实现了利用思想控制电器的设计,这就是世界上首个“仿生人”。医生还为他安装了一个机械臂,马修现在已经能用思维控制机械手掌的打张与闭合,同时他还能移动机械臂抓取物体,图1.1所示是马修正在进行意识控制。

与美国某些研究机构的利用微电极植入大脑皮层中,探测神经细胞的放电研究方法比较,代表我国最高研究水平的清华大学主要专注于无创脑机接口的研究,2006—2008年,以高上凯教授和洪波为代表的研究团队让人脑通过思维控制机器人踢足球成为现实,他们还设计实现了世界上首个纯听觉脑机接口系统,帮助那些像物理学家史蒂芬·霍金这样的“渐冻人”通过听觉脑电活动来表达自己的思想,与外界进行沟通,这项工作作

图 1.1 马修的 BCI 控制系统^[15]

为封面文章发表在美国《IEEE 神经系统与康复工程汇刊》上^[16-18]。

2009 年,美国威斯康星州立大学生物医学博士 Adam Wilson 戴着自制头盔,以每分钟 10 个字母的速度,利用脑电在网络博客上留言:用脑电波扫描发送到 Twitter 上去^[19]。

2011 年,Neurolelis 实现了一个真正的闭环脑机接口系统。猴子被训练通过脑电控制屏幕上的一只假手去选择三个视觉上毫无差异的目标,每个目标在被触碰后都会施加不同的电刺激给猴子的初级感觉皮层,猴子通过该刺激来判断这是否是自己想要的目标。这样,一方面脑电信号记录反映大脑的运动意图,另一方面通过电刺激直接给予大脑可识别的反馈信息,实现了闭环控制。在生物体内,视觉、触觉、嗅觉等多种反馈会同时传递给大脑,帮助大脑决策、调节肢体的运动。通常认为,闭环系统可以缩短动物所需的训练时间,提高执行效果。为了最大程度地模拟生物体的真实感觉,多模态反馈问题已成为当前闭环脑机接口系统的一个研究热点。

图 1.2 是 2011 年 9 月,由上海交通大学计算机智能计算与智能系统教育部-微软重点实验室仿脑计算与机器智能研究中心吕宝粮教授牵头的上海市科学技术委员会科技创新行动计划重点项目:“无线可穿戴干电极脑电帽与驾驶员警觉度监测系统关键技术研究”,于 9 月 29 日顺利通过了上海市科委组织的项目验收,在 2011 年中国国际工业博览会上,该系统荣获中国高校展区优秀展品二等奖,它的功能和未来成果的产品化引起了社会的广泛关注^[20,21]。

2012 年 2 月,由浙江大学研究团队采用 BCI 技术,成功地提取猴子在进行抓、勾、握、捏四种手势时的脑电信息,利用 BCI 系统,外部设备被猴子的“意念”成功控制。

2013 年 8 月,美国华盛顿大学公布了人类首次“非侵入式脑对脑实验”,不需要在大脑内插入电极,一人成功遥控了另一人的手部运动。布朗大学也于同年研制出首个火柴盒大小的脑机接口无线连接装置,可将脑部数据传输至 1m 内的设备。

2014 年,浙江大学王东发表了新的研究方法及成果——基于猕猴的脑机接口平台,在三只猕猴进行四方向 center-out 实验时,就使用 Blackrock 的硅阵列电极同步记录猕

图 1.2 基于眼电信号的警觉度检测系统^[20]

猴初级运动皮层和背侧运动前区中的神经信号,从神经信号特征、神经信号与运动信号间的相关性,以及神经信号解码三个方面对局部场电位信号的长期稳定性及其对于同侧运动信息的解析进行了分析和研究。结果表明在长期稳定性方面,相对于神经元锋电位信号,局部场电位信号记录质量衰减缓慢,能够维持相对更久的运动方向信息。在神经元锋电位信号记录质量较差时,局部场电位信号能够表现出更好的解码性能。特别地,在整个神经电极阵列记录不到神经元锋电位信号时,局部场电位信号仍然能够提供一定的解码信息。在同侧运动表征与解析方面,多个频段的局部场电位信号表征了同侧肢体的运动信息。同时,同一神经信号表现出与对侧运动时显著不同的偏好方向。解码结果表明多个频段能够精确解析同侧肢体的运动信息,其中以 200 ~ 400Hz 频段的解码性能最佳。

同年 8 月,浙江大学医学院附属第二医院神经外科与浙江大学求是高等研究院合作的“脑机接口临床转化应用课题组”宣布,首次通过颅内植入电极的方式实现意念控制机械手,人类利用“意念”操控机械不再是空想,这一成果为“渐冻人”实现运动功能重建带来了希望。目前,这种皮层电极片不能长时间安置于脑内,患者在接受手术后最长一个月必须取出,但随着技术的不断发展以及新型材料的使用,脑机接口这一技术有望实现电极端口终身植入,为更多患者带去福音。

事实上,脑机接口技术较为系统的研究开始于 20 世纪 70 年代,而最初没有明确的研究内容,对脑机接口也没有形成较为权威和完善的定义。1999 年 6 月—2002 年 6 月的三年里,在美国连续召开了两届脑机接口国际学术会议。在第一届会议上,来自美国、英国、奥地利等国家的 22 个研究小组参加了会议,会议通过分析脑机接口的现状,探讨了它的研究目标和关键技术,并对它的研究程序和评价方法做出了一系列的规定。

2003 年 3 月,IEEE 生物医学工程学首届神经工程会议也很大范围地涉及了脑机接口的内容。

2008 年,关于算法研究的脑机接口竞赛已经组织了 4 届,脑机接口技术的应用价值正在被越来越多的研究者所关注。美国国家卫生研究院 NIH 在纽约发起了首届关于 BCI 技术的国际会议中,给出了 BCI 这样的定义^[5,11,12]:脑机接口技术是一种不依赖于大

脑外周神经与肌肉正常输出通道的通信控制系统,通过采集和分析人脑的生物电信号,在人脑和计算机或与其他电子设备之间建立起来的一种直接的信息交流和控制的通道。自此,一个完善的脑机接口系统及功能定义形成,它的研究正成为生物医学工程、康复医学工程以及其他相关领域的一个新亮点。

2013年9月,美国国家卫生研究院宣布,在2014财年将重点资助9个大脑研究领域,这是2013年4月美国总统奥巴马推出人脑研究计划后,相关政府科研机构首次公布具体研究和实施细节。“脑计划”工作组提出的9个资助项目包括:统计大脑细胞类型;建立大脑结构图;开发大规模神经网络记录技术;开发操作神经回路的工具;了解神经细胞与个体行为之间的联系;把神经科学实验与理论、模型、统计学等整合;描述人类大脑成像技术的机制;为科学研究建立收集人类数据的机制;知识传播与培训。这些投入在一定程度上表明了脑机接口研究的重要性和必要性以及世界各国对它的重视程度。

1.2.2 研究意义

自1924年Hans Berger发现脑电以来,人类就从未停止过对脑电的研究和探索。任何的体征信息都对人类的发展起着至关重要的作用,血压和心电可以用来评价心脏功能,中医还可以用面色和脉搏诊断病因对症下药。那么对于功能复杂的大脑来说,它能辅助我们做些什么呢?与大脑相关的疾病很多,作为人类智慧的控制中心,大脑时刻都在控制着人类与外界的交流,就连“植物人”也可以探测到脑电信息的存在。加拿大西安大略大学的一位研究人员艾德里安·欧文发现:一名确诊处于植物人状态之中的患者可以利用一个类似脑电成像的系统来回答“是”或者“不是”的问题。这个令人吃惊的发现震动了医学界^[22]。这个系统证明这些患者并非真正的植物人,“行为无反应性综合征”是对这些患者尚未流行的称呼,把他们从植物人中分离开来,他们被渴望能够一定程度地恢复意识。

在国际公认的脑机接口定义中,“脑”指的是有机生物体的脑或神经系统,而不仅仅是“mind”。“机”是指任何用来处理或控制运算的电子设备,它的形式可以从最简单电路单元到集成芯片。有了这种全新的信息交流技术,人就可以通过自己的大脑表达自己的意愿,完成对外界环境的操作或控制,肢体语言或动作不再是单一而必要的条件。

目前,脑机接口的应用领域主要包括康复工程、军事、机器人、娱乐、脑认知等以下几个方面。

1. 脑机接口在康复工程中的应用

生物工程领域特别是康复和辅助控制领域是脑机接口的一个研究热点,它的一个重要应用是为那些思维正常但有严重功能障碍的群体提供一种语言交流与环境控制途径,以提高这一群体的生活质量。目前运动功能康复手段主要包括通过物理治疗提高残存运动功能;通过功能性电刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)系统^[5, 23-24]代替神经系统直接控制瘫痪肌肉两种方式。在神经工程的研究中,脑机接口技术被成功地应用在神经工程的信号检测与处理上,特别是在感觉神经修复过程中,起到了辅助作用,成功的例子就是人工耳蜗的植入。2002年,Dobelle首次将第二代视觉脑机接口应用于临床,盲人患者术后就可以在医疗中心周围享受慢驾观光^[25]。2005年,Cybernetics公司把脑机接口技术应用在四肢瘫痪的患者身上,目的是让患者能够按自己的意愿控制机械假

肢或者说是机械臂^[26-27]。2010年,中国上海交通大学开发了基于脑机接口技术的智能轮椅,实现了用大脑思维控制轮椅的运动功能,其成果在清华大学主办的首届脑机接口会议上做了展示,这种智能轮椅可以为有肢体障碍的人群提供一种新的活动或出行方式。

曾有人预称:不久的将来,当脑机接口技术发展到一定程度,它不仅能修复残疾人的受损功能,而且能按意愿增强正常人的某种功能。例如利用深部脑刺激(DBS)技术来治疗抑郁症、帕金森氏等病症,将来也可以用来改变正常人的一些脑功能,如增强人的记忆力等。当然,从客观上考虑,在某些方面脑机接口技术未来的发展方向也存在一定程度的不确定性。

2. 脑机接口在军事领域中的应用

目前,美国空军对利用脑电及肌体协同控制战斗机来提高飞行员的快速反应能力非常有兴趣,他们实施的选择性控制技术(Alternative Control Technology, ACT)计划,主要目的是研究使用者在手没有空闲时,协助使用者与计算机之间进行通信。2009年,科幻电影《阿凡达》风靡全球。如果单单从军事变革的视角来看此片,影片主人翁 Jack 用意念控制“战士”与潘多拉星球作战的片段,从某种程度折射出未来战争的场景。早在2004年,美国国防部 DARPA 就已投入巨资,在诸如脑机接口方面颇有研究的杜克大学的神经工程中心等全美6个实验室中展开了“思维控制机器人”的相关研究,并准备打造出用脑电控制的“巨型战士”代替作战^[28]。2013年3月,英国埃塞克斯大学的研究人员开发出第一种用于控制飞船模拟器的“脑机接口”装置,在美国航空航天局喷气推动实验室的测试中,工作人员首先在测试者身上安装了一个电极帽,然后创建了一套计算机模拟程序,测试者只需通过思维即可控制飞船的模拟飞行。

美国明尼苏达大学于2013年成功研制出脑电波遥控直升机,躲避障碍物的成功率高达90%。实验中,飞行器起飞之后,控制者只需想象使用左手、右手或者双手,大脑信号就会转换成指令,控制飞行器的左右及上下的飞行。

脑科学的研究具有巨大的潜在军事价值,“脑计划”的实施将推动认知领域走向战场前沿和装备层面。脑科学的军事价值主要体现在三个方面:一是利用外界干扰技术手段,实现对人的神经活动、思维能力等进行干扰甚至控制,导致出现幻觉、精神混乱甚至做出违背己方利益的行动;二是通过大脑实现对外界物体或设备的直接控制,以减少或替代人的肢体,从而提高作战人员操作控制武器装备的灵活性和敏捷性;三是借鉴人脑构造方式和运行机理,开发出全新的信息处理系统和更加复杂、智能化的武器装备,甚至研发出与人类非常接近的智能机器人。

历史上,科幻与军事往往只有一步之遥,虽然目前脑机接口技术在军事应用方面仍限于对提高模拟训练的效果、增强军事训练的对抗性以及辅助对武器装备进行控制。科学技术的最新成果总是最先进入军事领域,至于脑机接口技术作为生物科技,能不能成为下一个军事较量的先进技术,我们拭目以待。

3. 脑机接口在机器人领域中的应用

基于脑机接口技术的智能机器人的研究涉及智能机器人、脑机接口应用、仿生学和行为控制多个领域,是目前人机交互机器人的一个新的发展方向,它的出现和发展经历了计算机光标的脑控二维运动、脑控机电系统的运动导航和脑控机器人的人机协作三个

阶段。包括瑞士洛桑理工大学、美国华盛顿大学、台湾交通大学相继在脑电极机器人的研究方面取得了一定的进展^[29-32],然而脑控机器人任务复杂,系统设计也具有相当大的难度,目前仍处于起步探索阶段。目前,国内外如清华大学通过基于稳态视觉诱发电位(SSVEP)构造的BCI获取控制指令,通过可编程逻辑控制器(PLC)控制机械手完成规划的动作,最终控制多自由度机械手完成倒水动作,并采用类似方法开发了一套结合脑机接口技术的上肢康复训练系统,应用于人体康复研究。东南大学设计的上肢康复机器人系统,利用计算机上的虚拟现实动画刺激患者想象肢体的运动并形成视觉反馈,采用小波包算法提取特征向量,并通过基于马氏距离的线性判别分类器分类。康复医师可通过调整康复机器人训练参数,帮助患者对完好的运动神经系统进行进一步训练。西安交通大学开发了一个基于BCI驱动的神经义肢手驱动控制系统,利用每个实验者EEG数据的最高离线识别率下的BP神经网络结构参数,进行各自手动动作EEG的在线识别,并用该系统完成了假肢手四种动作(手臂自由状态、手臂移动、手抓取、手张开)的驱动。荷兰的研究小组通过BCI系统分析稳态视觉诱发电位信号,来产生控制信号控制自主机器人FRIEND II。四种频率代表四种任务。在菜单系统中选择任务(如向杯中倒饮料等),康复机器人包含规划实例、环境模型和一系列传感器。实验所控制的机械臂为安装在电动轮椅上的七自由度机械手。Jong-Hwan Lee等人利用FMRI技术检测运动想象电位,经过处理后作为BCI系统的控制指令,并通过视觉诱发电位反馈来调整动作,进一步控制机械手在三维空间内完成抓取目标物的简单动作。斯坦福大学的研究小组将机械手捆绑在患者前臂上,使用基于BCI的共享控制策略控制一个Barret WAM机械手引导中风患者的运动,系统存在触觉反馈,完成了沿肘部方向的单自由度运动控制。此外,Graz理工大学Christoph Guger等人也研制出了处理左右手运动想象电位的BCI系统用于控制假肢,其分类效果和控制精度较以往在触觉反馈方面都有了较大提高,完成了沿肘部方向的单自由度运动控制。

目前的脑机接口上肢康复机器人,已经可以初步实现对上肢及手部多种运动的分类及运动控制,且分类及控制精度较以往有较大提升,但大多为本地脑电所控制,且处于实验室探索阶段,其在控制连续性、灵活度、小型化和远程辅助控制方面上尚有不足。

4. 脑机接口在娱乐领域中的应用

脑机接口技术的应用领域或者说未来的应用领域非常广泛,单单从娱乐方面考虑,它可以协助人类进行思维游戏,即用大脑思维意识玩游戏,也可以上网聊天。听起来这些就像天方夜谭里的故事,却早已出现在我们的现实生活当中,图1.3展示的就是2006年清华大学医学院神经工程研究所研制的思维控制机器狗踢足球的系统,是一个活生生的例子。这套系统的原机价格在六七千元,批量生产的话只需在3000元之内,这种娱乐方式极大地丰富了我们的日常生活,必定吸引大量的年轻人,在娱乐市场的发展潜力无穷。

5. 脑机接口在脑认知领域的应用

脑机接口更为重要的科学价值还在它的研究和开发过程中,有助于对大脑认知模式、信息流程和控制方式的理解,为了解大脑思维模型和意识形成机制提供研究途径,它开拓了大脑信息输出的新通道^[33]。如果面向应用方便考虑,是不是可以利用这种方式获取动物的简单思维,并将此思维转化成几种常见的语言表达,比如“是”或“不是”,“好”

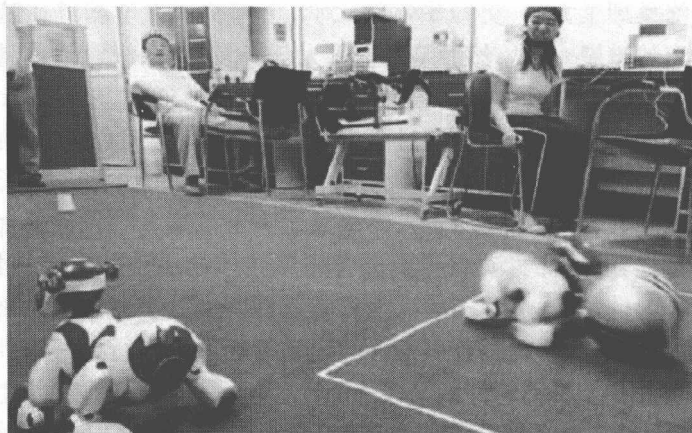


图 1.3 基于脑机接口技术的足球机器狗

与“坏”,以及用它来衡量动物心情状态如何,都可以通过把几种经常出现在动物大脑中的脑电信息转换成相应的语言表达,辅助人类与动物的交流。从目前国内相关研究资料来看,还没有研究机构将脑机接口技术应用于动物和人类的简单交流之中,这是一件非常遗憾的事情,希望有关动物研究学者可以做进一步的相关实验测试。

脑机接口技术研究的最终受益者是人类本身,它可以辅助大脑正常但肢体残疾的患者,为其群体提供一个与外界环境或装置进行实时交流的工具,提高其生活质量,可以辅助正常人在军事、航天领域进行特殊环境下的作业,也可以在大脑认知的相关领域帮助人类,还可以在娱乐方面丰富人类的生活。由此可见,它的发展及应用前景非常广阔。

1.3 脑机接口系统简介

脑机接口技术是一种新兴的多学科交叉技术,是目前生物工程技术、计算机技术以及控制通信技术中比较热门的研究方向之一。

神经工程是生物医学工程的一个备受关注的发展方向,它与脑机接口技术的发展息息相关。研究资料表明:大脑受到外界刺激或进行动作意识前后,神经系统会产生相应的电活动。脑机接口的基本原理就是利用现代化的检测技术将这些相应的电活动检测出来,并作为相应动作的特征信号,通过对信号进行特征提取和分类识别,辨析出引发脑电变化的行为意图,并将此意图产生的电信号作为命令来驱动外部设备或控制外界环境,实现在没有肌肉和外围神经的情况下,直接利用大脑对外界进行控制的目的^[34]。

总的来看,脑机接口技术是一种新兴的多学科的交叉技术,它涉及神经科学、信号检测与处理、模式识别等多个专业领域,是目前生物工程技术、计算机技术以及控制通信技术中比较热门的研究方向之一。而它的核心技术就是把用户的脑电信号,通过计算机的算法处理,转换成可以控制外部设备的信号或命令。根据需求的不同,脑机接口的系统并不是完全一致的,原理上,一个具有基本功能的脑机接口系统可以用图 1.4

来表示,其包括信号采集系统、信号预处理、特征提取和分类、外部控制系统、反馈系统等5部分^[35]。

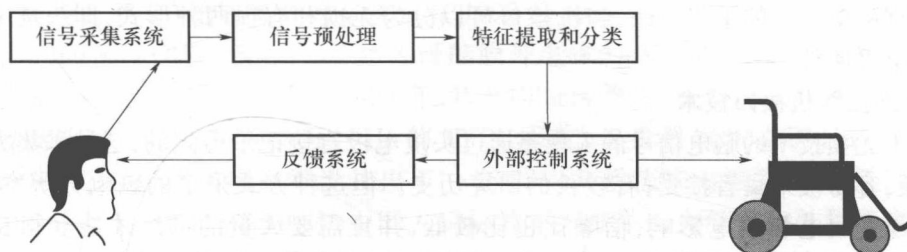


图 1.4 脑机接口系统的组成

以下对各部分功能做简单介绍。

1. 信号采集系统

信号采集系统用来采集受试者的脑电信号,并进行记录。一个成功采集到的脑电信号应该具有可测量、可区分、稳定可靠、可重复等几个特点^[36]。

2. 信号预处理

信号预处理主要是为了去除噪声干扰。脑电信号的噪声主要来自眼电、肌电等非大脑活动以及与被采集者意图无关的脑电活动^[37],信号预处理的过程就是先将微弱的脑电信息进行放大,再采用滤波的方法去除噪声的过程。

3. 特征提取和分类

信号的特征提取主要是从采集的所有脑电中,提取少部分有用的脑电信息,得到特征向量,再利用分类器区分出不同的思维任务。对脑电信号进行特征提取和分类是脑机接口的关键技术之一,它的结果直接关系到外部控制系统的准确性。由于脑电的复杂性,目前用于特征提取和分类的算法很多,详细算法会在以后的章节讨论,此处暂不过多描述。

4. 外部控制系统

外部控制系统主要包括控制接口、设备控制处理部分以及被控制的外部设备。其中控制接口的选取种类较多,包括用串并口、蓝牙、红外、网络等方式,设计者可根据要求选取。整个外控系统的稳定性和准确性与脑电信号的处理效果息息相关,目前常常用来研究的控制设备主要包括智能轮椅、电器开关、智能机器人等。

5. 反馈系统

反馈系统是为了改善控制精度服务的,用来反馈的信号主要来自周围的环境,如被控制设备的状态,再经过使用者把相应的信息反馈到脑电信号的采集和处理系统,提高脑电的控制效果。

1.4 脑机接口研究方法

脑机接口的分类方法很多,常见的主要是根据脑电信号的采集方法、生理电信号来划分不同的类别。当然,根据实验策略、操作模式以及反馈形式也可以划分类别,这里主要对前两种分类方法进行介绍。

1.4.1 根据脑电信号的采集方法进行分类

根据脑电信号的采集方法,脑机接口可以分为无损和有损两种形式,即头皮电极和植入式电极两种。

1. 无损脑机接口技术

基于无损技术的脑电信号的采集是通过头皮电极直接记录得到的,这种采集方法安全、方便,容易被采集者接受,有较长的研究历史。但这种方式采集的脑电分辨率较低,而且容易受眼电和肌电影响,信噪比也比较低,并且需要大量的训练才能获得良好的效果^[38-40]。

2. 有损脑机接口技术

有损脑机接口采集需要经过外科手术,通过脑膜下电极或大脑皮层内单神经元记录得到,由于这种植入电极定位性较好,所以这种脑电采集方式有比较高的空间和频域分辨率,由于电极植入具有一定的风险,会对大脑带来损伤,不容易被使用者接受,并且植入电极有一定的寿命,所以这种方式比较适合一些严重瘫痪的病人。它的首次应用是在2006年,Hochberg将BMI系统应用在患有严重SCI患者的病人身上,实现了病人使用假肢进行控制的功能^[41-42]。

1.4.2 根据生理电信号进行分类

按照采集到的生理电信号的不同,脑机接口常见的研究方式可以分为以下几种^[43-44]。

1. P300 诱发电位

脑机接口研究中的P300是一种事件相关电位(Event-Related Potentials,ERP),它的峰值大约出现在相关事件发生后的第300ms处^[45]。研究资料表明:P300反映在大脑认知过程中,大脑的神经电生理的变化,相关事件的概率出现越小,引起的P300就越为显著。最早进行P300研究的是美国伊利诺伊大学的Farwell和Donchin,早在1998年,两人利用P300设计了一款虚拟打字机^[46]。这个实验的设计如下:电脑屏幕显示一个oddball paradigm刺激序列的6×6矩阵,矩阵中的行或列被随机点亮。被加亮的行或列交叉的字符就是受试者需要输入的字符。这个研究结果表明:矩阵越大,产生的P300电位越强,分类越容易。到2000年,该组人员使用Windows 95操作系统,设计了新的虚拟打字系统,在准确率已经达到80%的前提下,系统的平均识别速度由原来的每分钟2.3个字符增加到了7.8个字符^[47]。P300这种信号的诱发方式要求受试者集中精力,因此容易疲劳,而受试者的疲劳程度会直接影响系统的效果。2011年9月,天津大学的栾伟波、明东等人也设计了一套基于P300的脑机接口系统及其控制方法,此系统增加了可选的字符数,并提高了传输率^[48-50]。

2. 视觉诱发电位

视觉诱发电位指的是神经系统由于受到视觉刺激(如图形或闪光刺激)而产生的特定电活动,属于外源性诱发的响应,这些诱发刺激包括灯光闪烁、图形变换、颜色交替等方式。从视觉刺激的频率分析,视觉诱发可以分为高频率的瞬态视觉诱发(Transient VEP, TVEP)和低频率的稳态视觉诱发(Steady-State VEP, SSVEP)两种方