

■ 胡剑锋 著

脑机接口研究进展



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

■ 胡剑锋 著

脑机接口研究进展

图书在版编目(CIP)数据

脑机接口研究进展/胡剑锋著. —武汉: 武汉大学出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-307-07265-7

I. 脑… II. 胡… III. 脑科学—人—机系统—研究 IV. R338.2
R318.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 141617 号

责任编辑:胡国民 责任校对:王 建 版式设计:马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:12.25 字数:174千字 插页:1

版次:2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-07265-7/R·129 定价:20.00元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

脑机接口 (Brain-Computer Interface, 简称 BCI), 有时也称作 Direct Neural Interface 或者 Brain-Machine Interface, 是在人脑或动物脑(或者脑细胞的培养物)和计算机或其他电子设备之间建立的一种直接的信息交流和控制通道, 是一种不依赖于常规大脑输出通路(外周神经和肌肉组织)的全新的信息交流系统。对脑机接口的研究已超过 30 年了, 自 20 世纪 90 年代中期以来, 从实验中获得的此类知识显著增长。在当前所取得的技术与知识的进展之下, 脑机接口研究者们可令人信服地尝试制造出能增强人体功能的脑机接口, 而不仅仅止于恢复人体的功能。

对获取到的生物电信号进行分析是目前脑机接口研究的关键, 这就涉及神经科学与信息科学的结合, 也就是说, 既需要神经生物学的实验方法以及信号采集, 同时也需要计算工具对实验数据进行处理。

近年来, 神经科学和信息科学均得到了很快的发展, 而这两个学科的融合, 必将为这两个学科的发展带来更大的生机。本书作者胡剑锋博士毕业于中国科学院, 接受过神经生物学和信息科学的专业训练, 近年来致力于信息技术与神经生物学方法相结合的研究。本书旨在介绍 BCI 系统的基本概念、研究方法、研究现状和研究实例。第一、第二、第三章分别介绍了 BCI 技术的研究基础、研究方法和研究现状, 目的是让读者能够了解 BCI 技术, 能够入门; 第四章介绍了基于运动想象脑电信号的 BCI 系统的设计, 以便让那些有志于研究和运用 BCI 技术的人员能够起步; 第五、第六、第七章则着重对基于运动想象脑电信号的 BCI 系统研究实例进行阐述; 最后两章为 BCI 技术的应用实例。本书可为神经科学和信息科学学科交叉方面开展工作的研究人员提供一些参考。

前 言

今天，如果我们想要看电视，我们需要用手控制遥控器；我们想操纵电脑，也必须使用双手。然而，也许有一天，我们可以改变这一切，因为在不远的将来，人类与机器可以直接对话，不需通过肢体，只需要思维。这是在做梦吗？不，这是一项新技术——“脑机接口”。

脑机接口(以下简称 BCI)是近年来发展起来的一种不依赖于大脑的正常输出通路(即外围神经和肌肉组织)，就可以实现人脑与外界(计算机或其他外部装置)直接通信的人机接口系统。从广义上讲，这种通信也可以是双向的，一方面外界的信息(声音、需要记忆的内容等)可以直接传入大脑，比如电子耳蜗、大脑记忆芯片等；另一方面大脑可以直接控制外界环境，本书介绍的是后者。

BCI 技术的出现，使得用大脑信号直接控制外界环境的想法成为可能。要想实现 BCI，要具备三个必要条件：第一，必须有一种能够可靠反映大脑思维的信号；第二，这种信号能够被实时且快速地收集；第三，这种信号有明确的分类。目前可用于 BCI 的人脑信号有 EEG(脑电图)、EMG(脑磁图)和 fMRI(功能性核磁共振图像)等。目前大多数 BCI 研究机构采用的大脑信号是 EEG。

人类的每一闪思维、每一种情绪、每一个想法，在大脑中都会产生特定的 EEG 信号，这种信号由千百万个神经元共同产生，并在大脑内传播。不同思维情况下产生的神经电活动信号表现出不同的时空变化模式，会导致 EEG 信号的不同。将检测到的 EEG 信号传送给计算机或相关装置，经过有效的信号处理与模式识别后，计算机就能识别出使用者的思维状态，并完成所希望的控制行为，比如移动光标、开门、打字和开机等。

现今的 BCI 技术采用了各种不同的脑电 (EEG) 特征信号来探测使用者的主观意图, 有头皮电极记录的脑皮层慢波, 短时视觉诱发电位, 稳态视觉诱发电位, P300 电位, α 节律、 μ 节律或 β 节律, 事件相关同步/去同步电位以及从植入电极记录道的皮层神经元活动情况, 这些信号经过信号处理, 特征被提取, 经过算法转换为实时控制命令。

BCI 研究目前主要集中在国外, 如美国、西欧、澳大利亚等国家和地区, 国内也有部分高校进行研究, 有些研究组已有突破性进展, 但尚未有实质性商用开发产品, 离实际应用阶段尚差甚远, 现有的 BCI 系统大多处于实验阶段。

目前在我国, 神经科学和信息科学两大学科都已得到了良好的发展, 在各高等院校和科研院所已建立了非常好的队伍, 但学科交叉研究方面的人才相对较少。本书有三个目的: 第一, 希望促进多个学科的交叉融合; 第二, 希望更多的研究人员投入 BCI 研究中, 以便加快 BCI 研究队伍的建立; 第三, 希望 BCI 研究成果能够尽快普及应用。

本书由胡剑锋著, 尹晶海、穆振东、包学才、肖丹、蒋德荣、王锦丽、王平、毛晨蕾等人参与, 并得到了江西蓝天学院和武汉大学出版社的大力支持, 在此一并感谢。感谢江西蓝天学院信息技术研究所的所有成员, 与你们相处让我的生活充满色彩。同时也要感谢江西蓝天学院的领导, 没有他们的支持和帮助, 就不能有今天的 BCI 研究成果。

本书适用于神经科学和信息科学的研究人员及研究生的参考书籍。有充分的理由相信, 无论是刚刚涉足 BCI 领域的读者, 还是已有多年经验的 BCI 研究人员, 在读完这本教程之后都会有所收获。

本书在编写过程中, 听取和吸收了许多专家学者的意见和建议, 借鉴了国内外专家学者的一些科研成果, 在此表示诚挚的谢意。对于书中的疏漏和缺点, 诚望读者和专家批评并赐教。

胡剑锋

2009 年 2 月 21 日

目 录

第一章 BCI 基础	1
第一节 什么是脑机接口	1
第二节 脑机接口发展历程	2
第三节 BCI 研究的进展	3
第四节 脑机接口研究方法	6
第五节 存在的问题	10
第六节 BCI 的应用	11
第七节 脑机接口系统的技术指标	13
第二章 BCI 技术	15
第一节 脑电信号的产生与特性	15
第二节 数据采集系统	18
第三节 信号处理	22
第四节 分类算法	34
第三章 BCI 现状	50
第一节 BCI 的研究方法	50
第二节 有创直接 BCI	55
第三节 无创间接 BCI	59
第四章 基于运动想象的 BCI 系统设计	68
第一节 实验室建设	68
第二节 刺激程序	70
第三节 采样及信号预处理	80

第四节	Matlab	83
第五节	数据处理流程	83
第五章	研究实例选介	86
第一节	基于二阶盲辨识的脑机接口系统研究实例	86
第二节	基于相位同步的脑机接口系统研究实例	91
第三节	基于能量熵的脑机接口系统研究实例	103
第六章	基于运动想象脑电信号的脑机接口残疾人游戏辅助 平台的设计与应用	113
第一节	研究背景	113
第二节	研究方法	116
第三节	研究结果	124
第四节	未来展望	128
第七章	基于 VEP 的脑机接口浏览器的设计与应用	130
第一节	理论基础	130
第二节	BCI 浏览器的设计	132
第三节	结果	142
参考文献		147
附录		185
后记		188

第一章 BCI 基础

第一节 什么是脑机接口

直接用大脑思维活动信号和外界进行通信,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。在科学高度发达的今天,这还是一种梦想吗?是否有一种技术能实现这种梦想?

1929 年 Berger 第一次记录到了大脑活动的证据——脑电图 (Electroencephalogram, EEG),人们就开始利用脑电图,对大脑活动进行分析。脑机接口技术应运而生,人们逐渐发现,这种梦想正慢慢成为现实。

脑机接口是一种新型的人机交互方式,脑机接口通过脑电采集设备采集相应的脑电信号,提取特征进行分类,然后将不同的思维活动与不同的指令(如鼠标的上下移动等)结合起来,实现人脑和外部设备的通信,例如打字、开灯、驱动轮椅等。

BCI 系统一般具备信号采集、信号分析和控制器三个功能模块(见图 1-1)。

(1)信号采集:受试者头部戴上一个电极帽以采集 EEG 信号,并传送给放大器,信号一般需放大 10000 倍左右,经过预处理,包括信号的滤波和 A/D 转换,最后转化为数字信号存储于计算机中。

(2)信号分析:利用 ICA、PCA、FFT、小波分析等方法,从经过预处理的 EEG 信号中提取与受试者意图相关的特定特征量(如频率变化、幅度变化等);特征量提取后交给分类器进行分类,分类器的输出即作为控制器的输入。

(3)控制器:将已分类的信号转换为实际的动作,如在显示器

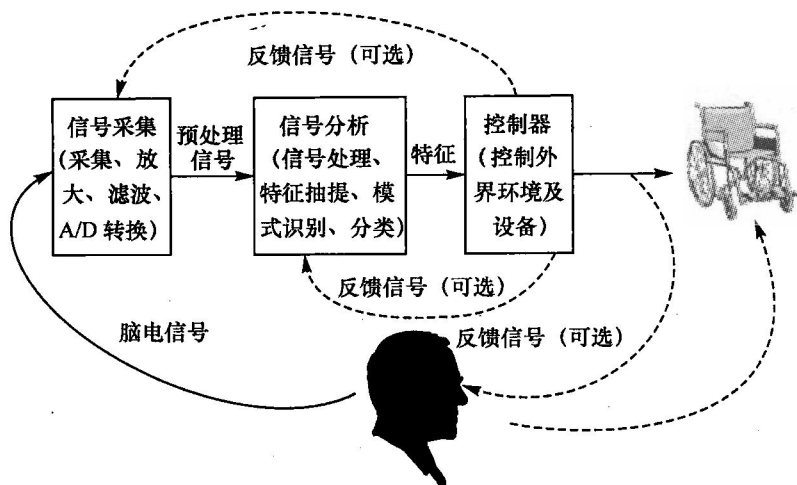


图 1-1 BCI 系统基本结构

上的光标移动、机械手运动、字母输入、控制轮椅、开电视等。

有些 BCI 系统还设置了反馈环节(见图 1-1)，不仅能让受试者清楚自己的思维产生的控制结果，同时还能够帮助受试者根据这个结果来自主调整脑电信号，以达到预期目标。

第二节 脑机接口发展历程

1991 年 Wolpaw 和 McFarland 开始利用 EEG 研究脑机接口系统，此时脑机接口系统主要是控制光标进行一维移动。

随着技术的进步和时代的发展，人们越来越意识到脑机接口系统研究的重要性，在美国的“人类脑计划”的支持下，自 20 世纪 90 年代末以来，BCI 的研究逐渐成为热点。*Nature* 杂志 2000 年刊载了题为“Real Brains for Real Robots”的文章，报道了从猴子大脑皮层获取的神经信号，实时控制千里之外的一个机器人，实现了“Monkey Think, Robot Do”。

近年来，BCI 研究在质和量两个方面都有了迅速提高，1995

年不到6个研究小组,至2000年研究小组的数量已超出了20个。2002年美国国防部高级研究计划署(DARPA)出于军事目的投入了巨资,从而兴起了一个脑机接口研究的高潮。现在,世界各地已有数百个研究小组,专门从事BCI领域的研究工作。

1999年,美国NIH发起了在纽约召开首届BCI技术的国际会议,50位来自多个国家代表22个小组的研究者参加了会议。此次会议回顾了BCI研究历程及现状,定义了BCI研究和应用的基本目的,明确和强调了关键的技术问题,考虑了研究规程和评估方法标准,标志着这一领域的全面起步。2002年6月,在纽约又举行了第二次BCI的国际会议,92位来自美国、加拿大、欧洲和中国代表38个不同研究小组的研究者参与了会议。这次大会的主题定为“Moving Beyond Demonstrations”。

2003年3月,IEEE医学生物工程学会举行的首届神经工程国际会议,与脑机接口有关的论文竟达一半以上。各种BCI新技术、新方法层出不穷,已初步朝实用化方向全面推进。同年10月在无锡召开的中国生物医学工程学会电子学分会会议上,许多与会者对此领域表示了极大的兴趣,纷纷投入此热点领域的研究之中。

2006年,在奥地利举办了第三届脑机接口国际会议,在此次会议上,来自美国、德国、奥地利等国的很多实验室展示了脑机接口的最新研究成果,很多成果已经有了应用的前景。

在2007年7月举行的Orga Techno 2007国际会议上,德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会和柏林科技大学的Klaus-Robert Müller教授发表了他们关于人脑-电脑接口的研究成果:只需思考便可操作机器,利用脑波玩游戏。该成果通过检测人的脑波,根据脑波的变化来操作机器。也就是说,只需让大脑思考,便可控制现实世界的机器。

第三节 BCI研究的进展

根据人脑和机器的契合程度,BCI分为植入式、部分植入式和非植入式三种。其中植入式和部分植入式由于存在对被使者产生创伤的危险,因此BCI也经常被分为有创伤和无创伤两类。

无创伤式 BCI 系统,按应用目的可分为神经修补系统、信息交流系统和环境控制系统等。所采用的信息载体有稳态视觉诱发电位(SSVEP)、慢皮层电位(SCP)、p300 以及频域的 μ 、 β 节律等。由于采用头皮电极记录 EEG 信号作为通信载体,其优点是无损、简单地实现脑机交互,易于为用户所接受。缺点是信号模糊,信噪比小,信息量少,受环境干扰影响较大,使得改善准确性及提高通信速率成为主要的挑战。

2000 年, Pfurtscheller 等人介绍了一个用大脑自主思维控制光标运动的实验。Donchin 等人采用 P300 构建了一个字符输入系统。另外,还有人利用稳态视觉诱发电位(SSVEP)实现了对屏幕菜单的选择。2002 年,清华大学高上凯教授等人开发出了一个利用 SSVEP 实现电话拨号的实验系统,2003 年他们又实现了利用 BCI 对诸如电灯、电视、电话等室内环境的控制。2006 年,清华大学成功地实现用脑电控制机器狗踢球(见图 1-2);在 2007 年举行的 Orga Techno 2007 国际会议上,展示了一款利用脑电波玩乒乓球的游戏(见图 1-3)。



图 1-2 用脑电波控制机器狗踢球

(资料来源于网络:http://blog.sina.com.cn/s/blog_447c7f45010004ae.html)



图 1-3 用脑电波玩乒乓球游戏

(资料来源于网络:http://media.ccidnet.com/art/2619/20070803/1166839_1.html)

有创伤式 BCI 系统采用电极植入技术, 故又称植入式脑机接口。从脑部信息的流向来看, 分为两种类型: 一是以记录的脑电信号与外界通信或控制外部环境及设备的输出式系统; 二是通过植入刺激电极于感知运动区、听觉或视觉皮质, 以恢复或增强人的感官功能, 甚至实现对思维或情绪的某种控制, 这种系统称为植入式系统。植入式脑机接口是一种有损伤的技术, 其优点是电极离信源很近, 能精确地反映脑部的电活动, 信息量大, 信噪比高。

植入式脑机接口一直是 BCI 研究的一个亮点, 其研究成果在 *Nature* 等权威刊物有过报道。目前的研究多以动物做实验, 已实现了对光标、游戏杆、机械臂、运动小车等的控制。直接将电极植入人脑皮层以实现与计算机通信的有美国 Emory 大学的 Kennedy 博士。他在 1998 年将锥状电极分别植入两个病人的大脑皮层, 通过训练, 病人通过集中精力想象某种肌肉的运动, 来控制计算机屏幕上光标的移动, 从而实现某些选项操作。1999 年, 美国 Duke 大学医学中心的科学家通过在大白鼠脑内植入微电极阵列, 使其能控制简单的机械臂, 这也证明了同时记录神经元群信号实现脑机接口的

可行性。2000 年 Duke 大学 Wessberg 等人通过植入微电极阵列于夜猴(owl monkey)的运动皮层区,记录神经元群的电信号,成功地实现了对位于 Duke 大学现场和远在千里外的 MIT 的两个机械臂的同步实时控制。由于技术、伦理等多方面的原因,能接受电极植入手术的病人很难寻找,目前在大规模实用化方面尚无多大进展。

第四节 脑机接口研究方法

一、EEG 信号采样及存储

(1)电极。目前多数采用按照国际 10 ~ 20 系统设定好电极位置的电极帽来提取 EEG 信号。

(2)电极数目的确定和位置的选择。在 BCI 研究中,需要确定测量 EEG 信号的电极的数目。较多的电极数目,在提高 EEG 信号定位的准确性的同时增加了处理的复杂度,因而尽可能选择少一点的电极数目。电极位置的选择取决于 BCI 系统本身的要求及与 EEG 信号特征变化相关的脑区。

(3)预处理。信号在采集过程中,会夹杂干扰,常见的有市电干扰、眼动干扰、声音干扰等,必须通过某种方式减弱或除去干扰,同时保证原有信号成分特征不被改变。

(4)存储。通过电极帽采集的信号是模拟信号,在输入计算机处理之前,必须通过 A/D 板将其转化为数字信号,以便存储在计算机内进一步分析处理。

二、BCI 研究中采用 EEG 信号的类型(见表 1-1)

(1)P300。P300 是一种事件相关电位,其峰值大约出现在事件发生后 300 毫秒,相关事件发生的概率越小,所引起的 P300 越显著。

(2)视觉诱发电位。视觉器官受到光或图形刺激后,在大脑特定部位所记录的 EEG 电位变化,称之为视觉诱发电位(Visual Evoked Potential, VEP)。

(3)事件相关同步或去同步电位。单边的肢体运动或想象运动,对侧脑区产生事件相关去同步电位(Event-Related Desynchronization, ERD),同侧脑区产生事件相关同步电位(Event-Related Synchronization, ERS)。

(4)皮层慢电位。皮层慢电位(Slow Cortical Potential, SCP)是皮层电位的变化,持续时间为几百毫秒到几秒,实验者通过反馈训练学习,可以自主控制 SCP 幅度产生正向或负向偏移。

(5)自发脑电信号。在不同的意识状态下,人们脑电信号中的不同节律呈现出各异的活动状态。按照所在频段的不同分类,一般采用希腊字母(α 、 β 、 γ 、 δ 、 θ)来表示不同的自发 EEG 信号节律。比如 α 节律在 8 ~ 13Hz 频段,而 β 节律则在 13 ~ 22Hz 频段。

表 1-1 BCI 所使用的 EEG 信号

信号名称	描述
μ 节律	μ 波是一种 8 ~ 12Hz 的自发 EEG,它与运动相关,在感觉运动皮层记录幅度最大,幅度大小可以通过训练人为控制
事件相关同步/去同步电位(ERS/ERD)	与运动相关的脑电频率域增强或减弱,在运动皮层记录幅度最大。受试者可以通过训练改变相关频段信号幅度,甚至在受试者想象运动,但事实上没有运动时也存在该信号
慢皮层电位(SCP)	EEG 信号较大的正向或负向偏移,时程在 300 毫秒至几分钟。受试者可以通过训练产生这种偏移
诱发电位的 P300 成分	EEG 信号的正向偏移,在刺激后 300 ~ 400 毫秒达到峰值。在中央顶叶区域可以记录到最大幅度,不需要训练
短时程视觉诱发电位(VEP)	短时程视觉刺激所引起的脑电变化,最大幅度出现在枕区,不需要训练
稳态视觉诱发电位(SSVEP)	特定频率段视觉刺激引发的脑电变化,可以通过刺激调整脑电变化幅度,从而达到控制外界的目的

采用以上几种脑电信号作为 BCI 输入信号, 有各自的特点和局限。P300 和 VEP 都属于诱发电位, 不需要进行训练, 其信号检测和处理方法较简单且正确率较高, 不足之处是需要额外的刺激装置提供刺激, 并且依赖于人的某种知觉(如视觉)。其他几类信号的优点是可以不依赖外部刺激就可产生, 但需要大量的特殊训练。

三、训练

时至今日, 大多数 BCI 研究主要集中于技术层面的研究, 即如何更好地采集、处理和分类 EEG 信号。然而, EEG 信号的产生者是人, 而不是机器, 他(她)的一举一动都可能会对实验产生影响。因此, BCI 实验中对受试者的训练也是值得关注的。

如何对受试者进行训练呢? 也就是说, 我们用什么实验方案? 不同的 BCI 系统采用不同的实验方案。一般来讲, 方案分为几个阶段, 每个阶段又分成若干小节, 每一小节大概持续几分钟, 每个方案可能会持续半个小时到几个小时(见图 1-4), 为我们用于脑机接口系统的训练方案。首先在电脑屏幕中间显示一秒的十字符号, 在第二秒开始屏幕左(或者右)出现一竖线, 用来提示受试者左右想象运动, 运动想象持续时间五秒, 随后出现两秒的随机间隔。

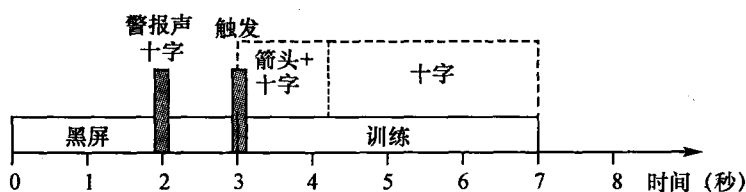


图 1-4 脑机接口系统训练方案

某些 BCI 系统基于事件诱发电位的, 如基于 P300 或 VEP 的 BCI 系统, 并不需要训练, 受试者按照指示就能启动实验。通常为了实验能够顺利开展, 在初次实验前, 对受试者都要进行训练, 只是时间长短不同而已。训练的时间和过程因 BCI 系统和受试者而异。

在某些 BCI 系统中，用户必须了解如何自主调节自身的 EEG 信号幅度，这时训练是必不可少的，而且训练时间可能会很长；在基于模式识别的 BCI 系统中，训练侧重于获得相应的参数；在基于操作条件方法的 BCI 系统中，需要受试者反复训练，可能长达数月才能达到预计的效果。

四、反馈

大多数 BCI 系统是需要反馈的，最常见的反馈形式是光标控制，受试者把光标移到指定目标位置，只能使用上/下或左/右两组命令。一开始，光标在屏幕中央，每一节以光标碰到目标位置或相反位置为结束。当碰到目标位置时，光标会闪烁，说明成功；这种反馈能够加强受试者用意念操作光标的信心。光标控制提供的反馈是持续性反馈，受试者能够亲眼看到自己意念驱动光标在移动，如方向不对可以及时调整。

在 BCI 系统中，特别是基于操作条件的 BCI 系统中，反馈是必要的，受试者需要知道哪种意念能够移动光标朝哪个方向运动，反馈既有好处也有负面影响。

首先来看好处：

(1) 激励持续性实验的动力。看不到结果的实验令人沮丧，不断看到自己能用意念操纵光标朝目的地移动无疑是一种巨大的激励。

(2) 吸引受试者的注意力。不断有进展，会使受试者倍感兴趣，注意力不易分散。

(3) 提供反馈给信号处理模块，以增强系统的稳定性和准确性。

其次来看负面影响：

(1) 反馈可能会引起意念“不纯”。反馈会使受试者产生实验以外的意念，从而使采集的 EEG 信号并不仅仅反映实验的内容。

(2) 反馈的结果会对受试者的 EEG 信号有影响。如在光标移动中，正确的移动会使受试者加快移动速度，错误的移动会使受试者沮丧，两者都会对 EEG 信号产生影响。