

文章编号: 1004-0374(2009)02-0177-04

神经工程与脑-机接口

高上凯

(清华大学医学院生物医学工程系 神经工程实验室, 北京 100084)

摘要: 神经工程是近年来在生物医学工程领域备受关注的学科发展新方向。它运用神经科学和工程学的方法来分析神经功能并为神经功能缺失与紊乱的修复提供新的解决问题的方案; 而脑-机接口则是当前神经工程领域中最活跃的研究方向之一。脑-机接口是在脑与计算机或其他外部设备之间建立的直接的通信和交流通道。在脑-机接口系统中, 具有特定模式的脑信号携带着受试者希望表达的意愿, 计算机将接收到的脑信号转换成相应的控制命令, 于是那些有运动障碍的残疾人就可以利用脑-机接口系统来实现与外界的交流与对外部设备的控制。在基于脑电信号的脑-机接口系统中, 受试者产生的脑信号大致可以分为内源性(endogenous)和外源性(exogenous)两类。其中外源性的成分主要取决于外部物理刺激(视觉、听觉或触觉)的参数而与认知行为无关; 而内源性成分则主要由认知行为产生而与外部的物理刺激无关。在许多情况下, 脑-机接口中的瞬态诱发电位通常都同时包含着内源性和外源性两种成分。寻找新的脑-机接口模式使之能显著提升记录脑电信号中的内源性与外源性成分在脑-机接口研究中具有重要意义。本文将介绍一种基于运动起始时刻(motion-onset)的新的脑-机接口实验范式。本文的最后还探讨了脑-机接口未来发展的趋势与展望。

关键词: 神经工程; 脑-机接口; 运动感知

中图分类号: R338; TP389.1; R318.18 **文献标识码:** A

Neural engineering and brain-computer interface

GAO Shang-kai

(Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Neural engineering is an emerging research area in biomedical engineering. Neural engineering brings to bear neuroscience and engineering methods to analyze neurological function as well as to design solutions to problems associated with neurological limitations and dysfunction. Currently, brain-computer interface has become one of the most active research directions in neural engineering. Brain-computer interface (BCI) is a direct non-muscular communication or control channel between brain and computer or external devices. In a BCI system, users produce special pattern of brain signals which encode his/her intention, and computer will translate the signals into control commands so that people with severe motor disorders can use it for communication or controls. Electroencephalogram (EEG) based BCI is a non-invasive technology and probably the most acceptable system for various users. In EEG based BCI systems, brain signals are usually be classified as endogenous and exogenous. The exogenous components are determined by the parameters of the physical stimulus (visual, auditory or tactile) rather than by a cognitive event, whereas the endogenous components are determined by some cognitive event rather than by the physical stimulus. In many cases, transient evoked potentials adopted in BCI systems are composed of both endogenous and exogenous components. Seeking for new BCI modalities, which can significant enhance both endogenous and exogenous components in recorded

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(30630022); 国家科技支撑项目(2006BAI103A17)

通讯作者: gsk-dea@tsinghua.edu.cn

EEG signals is of great importance in BCI system development. A novel design of BCI paradigms based on motion-onset visual evoked potentials is presented. Finally, an overview of the trend and future development of BCI is discussed.

Key words: neural engineering; brain-computer interface; motion perception

1 神经工程简介

神经工程(neural engineering)是近年来生物医学工程领域中备受关注的学科发展新方向。学术界取得共识的关于神经工程的定义如下^[1]:神经工程是一个前沿交叉学科领域,它运用神经科学和工程学的方法来分析神经功能并为神经功能缺失与紊乱的修复提供新的解决问题的方案。它的主要目的一方面是解决那些与神经科学相关的问题;另一方面是为神经系统功能的康复提供新方法。需要提醒的是,神经工程与传统神经科学(例如神经生理学的)的区别在于其强调神经系统分析中的工程学及定量的方法,而神经科学与工程学的整合又使它有别于其他工程领域(例如人工神经网络)。

众所周知,神经疾病与精神疾病是严重威胁人类健康的重大疾病,其中包括各种意外或疾病造成的神经系统损伤、各类神经退行性疾病和许多发病原因尚不明确的精神疾病。这些疾病严重影响着患者的正常生活。许多患者失去了与外界交流或运动控制能力,而长期的生活不能自理给患者和他们的家庭都带来了巨大的痛苦和烦恼。临床上处理此类疾病的常规方法是药物和手术治疗。但实践证明,现有的方法和疗效还是十分有限的。面对这样的困境,生物医学工程的研究人员正在设法将现代工程技术方法与医学相结合,在疾病的诊断、监测、康复等方面寻找新方法,而这些工作大都属于神经工程研究的范畴。

神经工程的大量研究工作是关于神经信号的检测与处理。在临床应用方面,神经工程的一个成功应用范例是关于感觉神经功能的修复,特别是人工耳蜗植入已经为众多聋人恢复了听力。近年来,在神经工程领域最引人注目的成就是有关脑-机接口的研究,它可以帮助瘫痪患者实现与外界的交流和对外部设备的控制。

2 脑-机接口简介

脑-机接口(brain-computer interface, BCI)是一种全新的通信方式,被传输的信号直接来自中枢神经系统,而与外周神经或肌肉无关。换言之,脑-机接口是在脑与计算机或者外部设备之间建立起

来的一种直接的交流通道。很显然,如果我们能把脑信号转换成相应的控制命令,我们就能够实现对各种各样外部设备的控制。

最初研究脑-机接口的目的是要提供一种无需肌肉参与的通讯渠道,由此使得那些有严重运动障碍的患者能使用脑-机接口系统来实现对外部设备的控制。当然,此项技术还可以扩展到对更复杂设备的控制,例如对神经假体的控制。而对于那些完全丧失了运动控制能力的患者来说,脑-机接口已经成为他们表达自己意愿的唯一的通道。此外,近来有关脑-机接口的研究还展示此项技术有望在神经康复工程中使用。

已经有许多技术在脑-机接口研究中被采用,包括功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)、脑磁图(magnetoencephalogram, MEG)和脑电图(electroencephalogram, EEG)等。在这些技术中,fMRI、MEG和NIRS的设备不仅价格十分昂贵,而且体积也很庞大,因此很难大量推广使用。此外,fMRI和NIRS由于不能直接测量到神经电活动信息,其时间响应的速度相对较慢。考虑到EEG能够直接反映脑的电活动信息且设备的价格相对便宜,我们的研究主要集中在基于头皮脑电的脑-机接口系统方面。

3 基于头皮脑电信号的脑-机接口系统

与其他通讯系统一样,脑-机接口系统也包含输入、输出以及一个介于输入和输出间的部件。在脑-机接口系统中的输入信号是所采集的脑电信号,输出信号是对外部设备的控制命令,而处于其间的信号处理部件则将要输入信号“翻译”成相应的输出命令。由此可见,在脑-机接口系统中,涉及到三个关键的问题,即如何产生能携带受试者意愿的脑信号;如何将记录到的脑信号转换成相应的控制命令;如何开发完成一个真正实用的脑-机接口系统。本文将重点讨论“脑信号”与“实用系统开发”这两个关键点问题。

4 脑-机接口系统中脑信号的产生

成功产生能代表受试者意愿的脑信号是实现一

个可靠的脑-机接口系统的关键问题之一。成功产生的脑信号应该具有如下特征：(1)可测量；(2)可区分；(3)稳定可靠；(4)可重复。

实际上，许多电生理信号已经在脑-机接口系统中被采用。这些信号大致可以分为内源性(endogenous)和外源性(exogenous)两类。其中外源性的成分主要取决于外部物理刺激(视觉、听觉或触觉)的参数而与认知行为无关，常见的视觉诱发电位、听觉诱发电位等是典型的外源性成份；而内源性成分则主要由认知行为产生而与外部的物理刺激无关，皮层慢电位、事件相关同步/去同步信号等典型的例子。在有些情况下，记录的瞬态诱发电位中还会同时包含内源性和外源性两种成分。下面我们将介绍几种在脑-机接口系统中广泛采用的脑信号。

4.1 稳态视觉诱发电位 当受试者受到闪光刺激的时候，我们会在靠近大脑皮层枕区的部位记录到相应的视觉诱发电位。如果这种闪光刺激的频率高于6Hz，那么记录的脑电信号中就会包含与刺激频率相同的节律成分。这种带有周期性成分的响应信号被称为稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potentials, SSVEP)。实际上，只要我们对记录到的脑电信号做频谱分析，就可以很容易地在刺激频率及其谐波位置上看到明显的SSVEP峰值成份。

在基于SSVEP的脑-机接口系统中，研究人员通常要设计一个由多个闪烁目标构成的刺激器，这些闪烁目标按照不同的频率同时闪烁，每个目标代表一种对外部设备的控制功能。当受试者注视某一个特定的目标时，在其脑电信号中就可以发现与所注视目标的闪烁频率一样的频率成份。反过来，当我们在受试者脑电信号的频谱中发现了某一种特定的频率成份后，我们就可以断定受试者所注视的目标，由此我们就可以对相应的被控设备发出控制命令。

4.2 基于想象运动的事件相关电位 对于清醒的受试者来说，在没有参与输入感知信息处理和输出运动控制的行为时，我们可以在其运动皮层附近记录到一种被称之为 μ 节律的成份，它的频率范围大概在9—13Hz。但是，当受试者执行某种运动控制或者只是在想象某种运动控制的时候，这种 μ 节律成份在不同脑区的分布就会发生变化。例如，受试者想象自己的左手运动时，在受试者右侧运动皮层区域记录的脑电信号中的 μ 节律成份的能量会明显下降，类似的情况会发生在受试者想象右手运动的情

况。

由此，我们可以设计基于想象运动的脑-机接口系统，将想象运动时不同的脑电模式转换成不同的控制命令来实现不同的控制。

4.3 P300 在一个序列的刺激中如果突然出现了某种新异成份(通常被称为“目标刺激”)，则在此新异刺激出现后大约300ms左右就可以在大脑的顶区记录到一种正波成份，此正向波被称为P300成份。为了诱发出明显的P300成份，在实验过程中通常要求受试者在发现新异刺激出现后完成一种心理作业(例如进行一次计数)。基于P300成份的脑-机接口系统已经被用来实现打字输入的功能。

4.4 基于运动开始时刻的视觉诱发电位 前面介绍的三种在脑-机接口广泛采用的脑信号在实际使用中或多或少存在一些缺陷，有的在信号产生的过程中要给受试者较强的光线刺激，很容易造成不适的视觉疲劳；有的信号在脑-机接口系统中使用时带来的信息传输率比较低。为此，寻找新的脑-机接口模式使之不仅能显著提升记录脑电信号中的内源性与外源性成分而且也不至于产生明显的视觉疲劳，这在脑-机接口系统的研究与开发中具有重要意义。

以下将介绍我们新近研制成功的一种基于运动起始时刻(motion-onset)的脑-机接口实验新范式^[2]。当一个目标突然出现在受试者前面并朝某个方向运动时，受试者的特定脑区会产生一种与目标出现的时相锁定的响应信号，这一诱发电位被称之为与运动开始时刻相关的视觉诱发电位。我们在屏幕上设计了若干个虚拟按键，每个中空的按键中随机地会出现一个彩色竖条从右边框向左方运动。我们要求受试者把自己的注意力集中在所希望选择的目标上。当发现运动的竖条从右向左运动时，在心里判别竖条的颜色。实验表明，以运动目标出现时刻为基准，大约200ms前后记录的脑电信号中会出现一个明显的负峰(N2)和紧跟的一个正峰(P2)。在受试者完成了颜色识别的心理作业后，还可以发现在300ms之后出现的晚期正成份。新范式的实验结果表明，将脑信号中的外源性与内源性成分组合起来进行特征提取与分类能有效提升脑-机接口系统的性能。

5 实用脑-机接口系统的开发

从目前文献报告的情况看，有不少脑-机接口研究小组的工作还集中在离线数据的分析中，而多

数成功开发的脑-机接口在线系统则还停留在实验室演示的阶段。只有少数研究小组针对运动障碍的残疾人尝试了脑-机接口的实际应用。这些情况告诉我们研发真正实用的脑-机接口系统还面临着许多极具挑战性的问题。除了我们在前面介绍的特定脑信号产生的问题之外，在实用系统的开发中还需要解决整个系统优化的问题，例如，最好能设法减少使用的电极/通道的数目，这样不仅能使操作简单，用户使用舒适，还可以降低系统的制作成本。

以基于 SSVEP 的脑-机接口实用系统的开发为例，我们在研发的过程中着力解决了电极位置、刺激频率和特征提取等方面参数的优化问题。最终完成的系统只用了三个电极(实际上，脑电信号的测量至少应有三个电极，即接地电极、参考电极与信号电极)，就达到了相当高的判别正确率和传输速率。SSVEP 的脑-机接口实用系统明显的优势表现在如下多个方面：电极数量少、使用者操作简单；仅需要较少的训练时间就能达到较高的操作正确率；可供选择的目标数量多，可以实现多目标的控制，同时也有效提高了系统的信息传输率；系统结构简单，成本低，易于普通家庭使用。

6 发展趋势与展望

前面已经提到，脑-机接口系统可以帮助运动功能障碍的残疾人实现与外界的交流和对外部设备的控制，这是脑-机接口系统最直接的也是已经开始实施的应用。此项应用有望直接改善残疾人或老

年人的生活质量。

此外，面向残疾人康复的应用正在日益受到重视。我们研究小组已经开始尝试将脑-机接口系统用于中风患者的康复训练。也有学者提出是否可以基于脑-机接口平台，通过生物反馈训练的方法来缓解一些精神疾病的症状。

当然，对健康人群而言，脑-机接口也为我们提供了一种新的更自然的人-机交互的手段。特别是对于一些在特殊环境中工作的人员来说，脑-机接口有可能帮助他们完成更复杂的控制。

实际上，脑-机接口系统从本质上来讲是将人脑(生物智能系统)与电脑(人工智能系统)建立在一个动态交互的平台上。这就为脑科学的研究提供了新的方法和途径。在这个平台上，我们有可能更多地了解脑工作机制，诸如与可塑性、功能重组、学习、记忆、注意和情感等相关的问题。当然，脑-机接口也为高级智能系统的开发创造了条件。

ÖÄD»£º±³¼íîÿÊÇÓÉ,ßÐíéÁ½ìÈÚ;ç°é²²³ÔË;¹²í-íê³É
µÄ£-VEäÖDÖªUÀÊµñêÉÒÁÚªÄÇÑD¾;ÉµÄ¹x:-£-ÓÚÈÒ»
²ç±È¾,ÐÐ»;£

[参 考 文 献]

[1] Durand DM. What is neural engineering? J Neural Eng, 2007, 4 (4)
[2] Guo F, Hong B, Gao XR, et al. A brain-computer interface using motion-onset visual evoked potential. J Neural Eng, 2008, 5: 477-85