

结合能量和相位特征的多分类想象运动脑-机接口¹

王毅军 洪波 高小榕 高上凯

清华大学生物医学工程系, 北京, 100084

摘要: 想象运动脑-机接口通过检测脑电信号的变化来判断大脑正在进行的运动想象状态, 如想象左右手动和想象脚动。在大脑进行想象运动的过程中, 脑电信号中同时伴随着能量和相位的变化。能量变化表现为运动相关的 μ 和 β 节律的事件相关去同步化, 相位变化可表现为运动皮层不同区域间的脑电信号同步化程度的改变。基于能量和相位变化间的独立性, 本文提出了结合能量和相位的特征提取算法, 并将其成功地应用到多分类脑-机接口控制机器人运动的实时系统中。

关键字: 脑-机接口; 想象运动; 事件相关去同步化; 相位同步化

Integrating Power and Phase features for Multi-class Motor Imagery Based Brain-Computer Interface

Wang Yijun, Hong Bo, Gao Xiaorong, Gao Shangkai

Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract: A motor imagery based Brain-Computer Interface (BCI) determines the motor imagery states, e.g. imagination of left/right hand and foot movements, through detecting the electroencephalogram (EEG) changes over the scalp. EEG signals accompany both power and phase changes during motor imagery. Event-Related Desynchronization (ERD) represents a power decrease in μ and β rhythms, while the phase synchronization between activated motor cortex areas displays an increase. Considering the independence between power and phase characteristics, we proposed an algorithm integrating power and phase features and successfully applied it to the real time BCI control of a robot's movement.

Keyword: Brain-Computer Interface (BCI); motor imagery; Event-Related Desynchronization (ERD); phase synchronization

1、引言

脑-机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术的出现使人脑与外界环境的直接通讯成为可能^[1]。基于想象运动的脑-机接口从 BCI 应用的角度看,具有较高的分类准确率, 并且能够实现多任务的模式; 从脑功能研究的角度看, 它能够作为运动控制和运动意图研究的平台。现有的想象运动 BCI 有两种模式: 一种是采用机器学习的算法来识别大脑的运动想象状态, 比如区分想象左手、右手、脚、舌头等不同的状态^[2]; 另一种是通过反馈训练来让使用者能够实时调节运动相关的 μ 和 β 节律的幅度, 从而控制一维或二维的光标运动^[3]。

现有的想象运动 BCI 的脑电信号数据分析主要针对的是大脑运动皮层相应区域的 μ 和 β 节律的事件相关去同步化和同步化(Event-Related Desynchronization/Synchronization, ERD/ERS)现象, ERD/ERS 表现为一定频带范围内脑电信号能量的下降或上升^[4]。想象运动引起的 ERD/ERS 通常出现在 μ 和 β 节律所在的 8-12Hz 和 18-26Hz 范围内, 其空间分布特性符合大脑运动皮层的躯体对应分布。想象左右手运动时, 最显著的 ERD 出现在对侧运动皮层的手对应区, 而想象脚动时 ERD 出现在中央区域。从运动想象脑电中提取出 ERD 在空间布上的特性是实现想象运动 BCI 的关键。

有关运动控制的脑功能成像研究结果表明, 在运动准备过程中, 运动皮层的兴奋同时出现在多个区域, 包括初级运动区(Primary Motor Area, M1)、运动前区(Premotor Area, PMA)和辅助运动区

¹国家自然科学基金项目 (60318001) 及北京市自然科学基金重点项目 (3051001) 资助

(Supplementary Motor Area, SMA)^[5]。运动皮层不同区域之间的协作和整合可以体现为不同区域记录到的脑电信号间的同步化，例如在想象左手运动时，右侧 M1 和 SMA 区域间脑电信号的同步化程度增强^[6]。多通道信号间的同步化程度可以用相位锁定值(Phase Locking Value, PLV)来量化^[7]，大脑运动皮层的区域间同步化特征检测是实现想象运动 BCI 的另一种方法。

考虑到信号能量和相位之间的独立性，本文以在线想象运动 BCI 平台为基础，从能量和相位分析相结合的角度来提取想象运动脑电的空间分布特征，进一步提高了 BCI 分类算法的性能，并在实时控制机器人运动的脑-机接口中得到成功应用。

2、实验方法

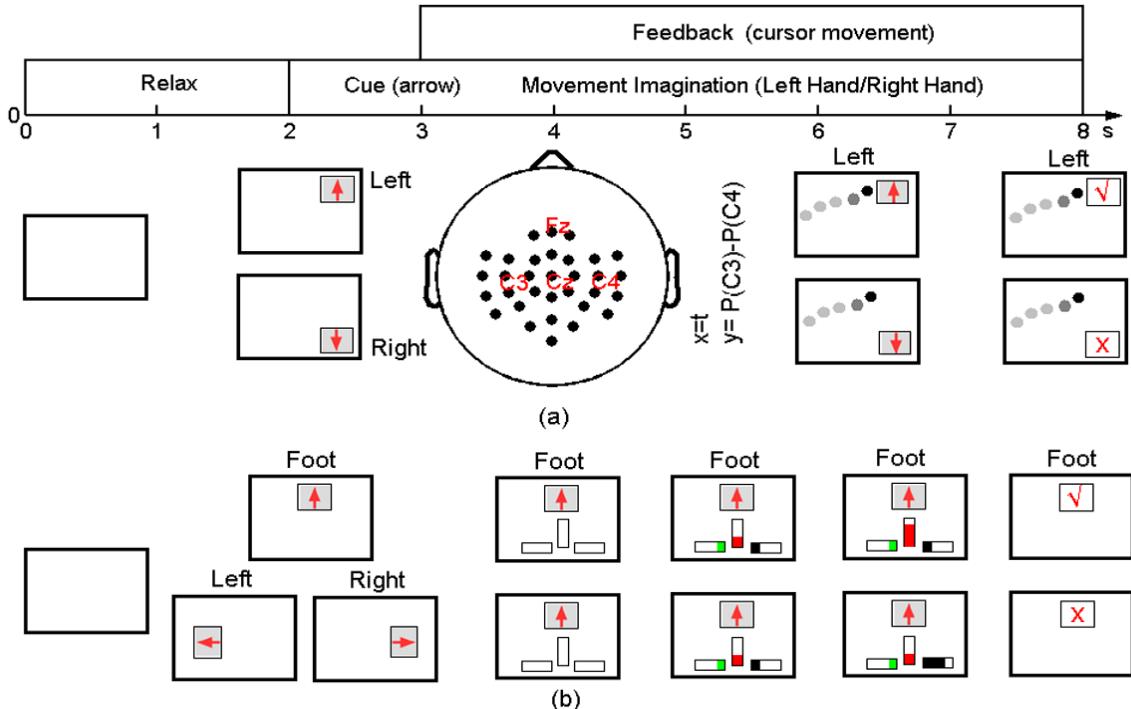


图 1. 想象运动脑-机接口在线实验框图，单次实验时间为 8 秒，前 2 秒为放松状态，第 3 秒开始时屏幕出现由不同方向箭头表示的任务提示，受试者开始时间为 6 秒的想象运动，其中后 5 秒有视觉反馈，实验中共采集 32 导联脑电信号。(a)两分类实验，通过比较 C3 和 C4 导联的能量差来控制光标的一维运动，想象左手运动对应控制光标向上运动，而想象右手运动则控制光标向下运动。(b)三分类实验，想象左右手和脚动，视觉反馈为三个不同颜色的进度条。

图 1(a)是想象运动控制一维光标运动的两分类任务框图。在线反馈算法的基本依据是想象左手和想象右手运动在两侧运动皮层区域(C3 和 C4)出现的 ERD 引起的能量变化，C3 与 C4 导联的能量差对应了屏幕光标在垂直方向的位置。图 1(b)是想象运动三分类实验框图。分类器每 0.125 秒输出一次结果，三个不同颜色的进度条分别指示想象左手、想象右手和想象脚动三种任务的分类器累积投票结果。特征提取方法和分类算法将在下一节中详细说明。

在线脑-机接口实验在无屏蔽的室内环境中进行，受试者坐在有扶手的椅子上，眼睛注视计算机屏幕上的视觉反馈。脑电信号使用 BioSemi 公司的 ActiveTwo 脑电记录设备，共记录 32 导头皮脑电信号（电极位置见图 1(a)，包括了 SMA, PMA, 和 M1 相应的区域），信号的采样率为 256Hz。6 名受试参加了两分类实验，其中 2 人(WW 和 SJH)参加了三分类实验。实验共分为 4 组，每组实验中每类任务 30 个样本，组间为 3-5 分钟的休息。两任务实验中共采集样本 240 个，每类 120 个，三任务实验共采集 360 个样本。数据预处理为频率范围为 μ 和 β 节律所在频带的双向 IIR 带通滤波。

3、特征提取和分类

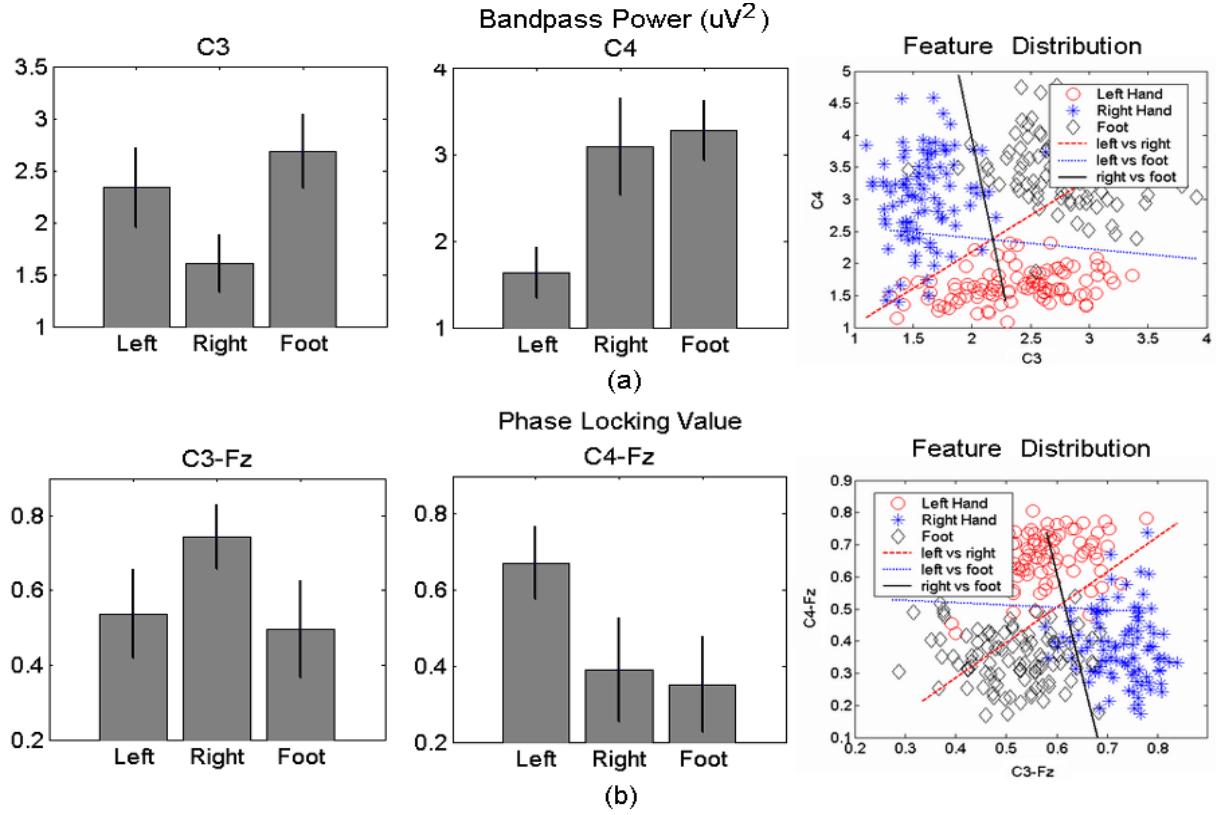


图 2. (a)C3 和 C4 导联的带通能量(μ 节律)的均值和标准差以及样本特征的二维分布。(b) C3-Fz 和 C4-Fz 导联对的相位锁定值(PLV)的均值和标准差, 以及样本特征的二维分布。(受试者为 SJH)

对于能量特征的提取, 我们采用的是计算平均带通能量的方法, 选择代表左右运动皮层的 C3 和 C4 导联。用于分类的能量特征定义为运动脑电相关节律在时域的平均能量值, 通过导联选择保证分类器有较好的泛化性能。图 2(a)显示了三种任务状态下 C3 和 C4 导联的平均能量, 它们代表了想象运动中 ERD 的空间分布情况: 想象手动时对侧强同侧弱, 而想象脚动时 C3 和 C4 导联没有 ERD。

对于相位特征的提取, 我们采用的是计算相位锁定值(Phase Locking Value, PLV)的方法。对于给定的两通道信号 $s_x(t)$ 和 $s_y(t)$, 其瞬时相位分别为 $\Phi_x(t)$ 和 $\Phi_y(t)$, 如果两个信号完全同步, 那么其瞬时相位差 $\Delta\Phi(t)$ 应为常数; 如果完全不同步, 那么瞬时相位差将服从均匀分布。PLV 的定义如下^[7]:

$$PLV = \left| \left\langle e^{j\Delta\phi(t)} \right\rangle_t \right| \quad (1)$$

其中 $\langle \cdot \rangle_t$ 表示时域上的平均。如果两个信号完全同步, PLV 为 1; 如果信号完全不同步, PLV 为 0。根据想象运动过程中 M1 (电极 C3/C4) 和 SMA (电极 Fz) 的同步化特征, 我们定义 C3-Fz 和 C4-Fz 两个导联对的 PLV 值为相位特征。图 2(b)显示了三种运动想象状态下 C3-Fz 和 C4-Fz 导联对的 PLV 的均值和标准差。想象左手运动时, C4-Fz 的同步化程度高; 想象右手运动时, C3-Fz 同步化程度高; 而想象脚动时, C3-Fz, C4-Fz 同步化程度都较低。对比图 2(a)和(b)可以看到同步化程度和 ERD 程度间的一致性: 能量越低, ERD 越显著, 同步化程度越高。

分类方法采用(2)式表示的线性分类器, \mathbf{x} 是拼接后的特征向量, 同时包括了能量特征和相位特征。分类结果由 10×10 的交叉检验得到, 对于三任务情况, 先将三分类问题转化为三个两分类问题。

$$y = \text{sign}(\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b) \quad (2)$$

4、结果

6名受试者两分类实验的结果见表1, 经过能量和相位的特征结合后, 所有受试的分类结果都得到了提高(均值为5.09%, 范围为1.88-7.93%)。2位受试者(WW和SJH)参加了三任务实验, 能量特征和相位特征的平均三分类准确率分别为92.6%和87.1%, 特征结合后的平均分类准确率为94.4%。

我们将在线三分类BCI系统成功地运用到机器人的运动控制中, 想象左手, 右手和想象脚动三种任务分别对应机器人往左, 往右和往前三种不同的运动方向。实验中使用的机器人为日本索尼公司的Aibo机器狗, BCI系统与Aibo通过无线网络进行TCP/IP实时通讯, Aibo接收到命令指令后马上执行与操作者大脑想象状态相应的运动。

受试者	相位特征	能量特征	特征结合	提高
WW	90.44±1.01	96.90±0.39	98.78±0.25	1.88
SJH	89.07±0.76	94.09±0.59	96.45±0.24	2.36
ZYJ	91.54±0.65	91.46±0.61	96.32±0.77	4.86
ZD	86.48±1.15	82.27±0.43	93.83±0.86	7.35
FL	76.15±0.92	78.20±0.95	86.13±1.34	7.93
PF	75.01±0.89	70.43±0.75	81.16±1.37	6.15
均值	84.78	85.56	92.11	5.09

表1. 想象运动两分类实验分类准确率(均值±标准差, %)及特征结合方法提高的百分比。

5、结论与讨论

数据分析的结果表明, 在想象运动过程中, 运动皮层不同区域间存在相互协作, 表现为SMA和M1区域间相位同步化程度的变化。相位同步化特征包含了能量变化外的附加信息, 因此通过特征结合的方法可以提高系统性能。以想象运动BCI系统的实用化为目标, 我们实现了较高准确率的在线三分类脑-机接口系统, 并成功用于机器人的运动控制中。在今后的工作中, 信号同步化检测方法以及特征结合的算法还有待改进, 另外, 还可以通过设计更多的任务模式来进一步提高系统的实用性。

参考文献

- [1] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, Pfurtscheller G, Vaughan T M. Brain-Computer Interfaces for Communication and Control, *Clin. Neurophysiol.*, 2002; 113: 767~791.
- [2] Pfurtscheller G, Brunner C, Schlogl A, Lopes da Silva F H, Mu Rhythm (De)Synchronization and EEG Single-Trial Classification of Different Motor Imagery Tasks, *Neuroimage*, 2006; 31: 153~159.
- [3] Wolpaw J R, McFarland D J, Control of a Two-Dimensional Movement Signal by a Noninvasive Brain-Computer Interface in Humans, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2004; 101: 17849~17854.
- [4] Pfurtscheller G, Lopes da Silva F H, Event-Related EEG/MEG Synchronization and Desynchronization: Basic Principles, *Clin. Neurophysiol.*, 1999; 110: 1842~1857.
- [5] Spiegel A, Graimann B, Pfurtscheller G, Phase Coupling between Different Motor Areas during Tongue-Movement Imagery, *Neurosci. Lett.*, 2004; 369: 50~54.
- [6] Wang Y, Hong B, Gao X, Gao S. Phase Synchrony Measurement in Motor Cortex for Classifying Single-trial EEG during Motor Imagery, *Proc. 28th Int. IEEE EMBS Conf.*, 2006; 75~78.
- [7] Lachaux J P, Rodriguez E, Martinerie J, Varela F J, Measuring Phase Synchrony in Brain Signals, *Hum. Brain Mapp.*, 1999; 8: 194~208.

作者简介

王毅军: 男, 博士生, 清华大学生物医学工程系, 研究方向: 脑-机接口, Email: wyj97@mails.tsinghua.edu.cn