

基于 CSSD 和 FDA 的单次手指运动诱发脑电分类算法

王毅军, 张志广, 李勇, 高小榕

清华大学生物医学工程系, 北京, 100084, 中国

摘要

本文介绍了一种针对单次手指运动诱发脑电分类的算法, 它有效地结合共空域子空间分解(CSSD)和 Fisher 线性判别分析(FDA)进行特征的提取。根据单次手指运动的运动前准备电位(BP)和事件相关去同步化(ERD)这两个生理现象, 从运动前多导联诱发脑电中提取出三个相对独立的有效特征, 通过单层感知机神经网络训练来设计分类器识别手指运动模式。本算法用于 BCI Competition 2003 的单次手指运动诱发脑电实验数据集<self-paced 1s>, 对测试集的分类准确率为 84%。

关键词—脑机接口, 脑电, 共空域子空间分解, Fisher 线性判别分析

1. 引言

最近几年, 基于单次手运动脑电诱发电位的脑机接口(BCI)系统发展迅速。对手运动诱发脑电的研究结果表明, 在真实左右手运动中, 大脑左右半球的脑电存在着差异, 运动前在皮层顶部观察到显著的运动前准备电位(BP) [1]-[3], 并且在运动前后还伴随着事件相关去同步化和同步化(ERD/ERS)的现象 [3]-[6]。单次手指运动诱发电位分类技术, 因为其实验方法简单, 抗扰性强, 分类准确率较高, 响应速度快, 且无需经过训练等优点而成为近期 BCI 研究的热点之一。

II. 方法

BCI Competition 2003 数据集<self-paced 1s>是实验条件为受试者以约每秒一次的速度敲击电脑键盘时采集的脑电数据 [7]。一共给出了 316 个样本的训练集和 100 个样本的测试集, 训练集用于分类器的设计, 测试集用于检测算法的性能。详细的描述见网页: http://ida.first.gmd.de/~blanker/competition/berlin_desc.html。

A. 特征分析

1) 运动前准备电位

在自主手运动前能记录到幅值缓慢下降的皮层电位, 运动前准备电位是其主成分之一。单次手指运动前记录到的运动前准备电位具有偏侧优势, 在对侧皮层的分布要明显

强于同侧(Fig. 1)。不同运动模式下 BP 在头皮空间分布上的不同可以作为手指运动诱发脑电分类的一个根据。

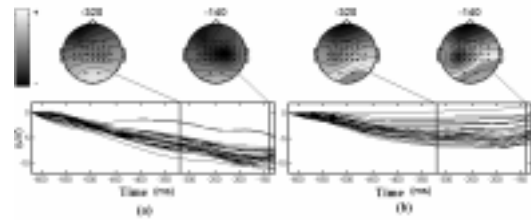


Fig.1. 左手运动(a)和右手运动(b)在运动前 320ms 和 140ms 时刻运动前准备电位地形图及平均后的各导联时域波形。地形图中用灰阶亮度映射幅值大小, 电位幅值越小, 亮度越小。起始时刻的幅值指定为 0。

2) 事件相关去同步化

事件相关去同步化表现为在某些频带范围内, 脑电中同特定的神经活动事件相关的振动幅值的衰减过程。在真实手指运动前, mu 和 beta 节律的事件相关去同步化过程是一个明显的特征, 它同样具有侧偏性, 主要出现在大脑对侧的运动皮层和体感皮层区域(Fig. 2)。手指运动前的 mu 和 beta 节律的 ERD 在头皮空间分布上的差异可以作为手指运动诱发脑电分类的另一个根据。

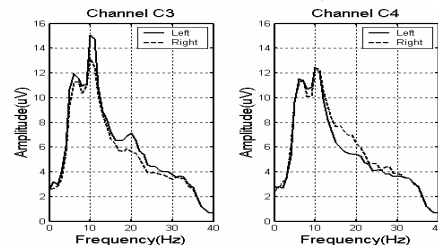


Fig.2. 左右手运动前 C3 和 C4 导联诱发脑电的能量分布图。图例“—”对应于左手运动, “- - -”与右手运动相对应。

B. 特征提取

本文采用了共空域子空间分解滤波的方法对多导脑电进行空域滤波处理。Yunhua Wang 等人用 CSSD 的方法来分析多任务条件下的脑电响应, 表明 CSSD 能有效地分离混叠在头皮脑电中不同的大脑活动的响应 [8]。H. Ramoser 等人用相似的方法来设计空域滤波器用到想象手运动的诱发脑电分类算法中, 获得了较高的分类准确率 [9]。

在特征提取中使用了 FDA 的方法来计算线性判别函数 $f(x)=W^T x+b$ 。对于左右手指运动诱发脑电分类的问题, 它解决了将从信号

中提取出的对应于 x 的多维特征空间降到 1 维空间的问题，用投影值 f 作为特征来表示单次实验脑电与左右手两类运动模式的贴程度。

根据 BP 和 ERD 这两个生理现象来进行特征提取。用 CSSD 滤波的方法对分布在与 BP 和 ERD 相应的频带的脑电信号提取出两个特征，用 FD 的方法根据 BP 的负向波特征从多导联脑电中提取出第三个特征。Fig.3 描述了整个算法流程：结合 CSSD 和 FDA 从单次手指运动诱发脑电中提取出三个特征 ($f_i, i=1, 2, 3$)，然后用单层感知机神经网络对这三个特征进行分类器设计，来识别单次手指运动的模式。



Fig.3. 分类算法流程图，包括了频域滤波，CSSD，特征提取，导联选择，感知器训练等模块。

C. 分类

在得到以上三个特征后，用单层感知机神经网络训练分类器。对于左右手运动这个两类问题，用已知类别的特征向量作为训练集，输入特征向量 $p=[f_1 f_2 f_3]^T$ ，左手运动时使输出为 0，右手运动则输出为 1，输出表达式可写为： $a=\text{hardlim}(W^T p+b)$ 。

III. 结果

TABLE I 中列出了 316 个样本的训练集用留一法测试的结果。对测试集的 100 个样本进行测试，分类准确率为 84%。

Features	Accuracy(%)
f_1	81.59 ± 3.78
f_2	89.06 ± 2.97
f_3	83.94 ± 3.70
$f_{1,2,3}$	92.98 ± 2.50

测试集使用留一法训练的分类准确率， f_i 指用于分类的单个或多个特征。

致谢

本项目得到中国自然科学基金 (#59937160)，国家 863 计划(2001AA422310)和国家十五计划(2001BA706B-12)的支持。同时我们要感谢 Benjamin Blankertz, Klaus-Robert Müller 和 Gabriel Curio 提供实验数据集。

联系人：

王毅军(wyj97@mails.tsi nghua. edu. cn)

参考文献

- [1] B.Blankertz, G.Curio, and K.R.Müller, "Classifying Single Trial EEG: Towards Brain Computer Interfacing," T. G. Diettrich, S. Becker, Z. Ghahramani. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 01)*. New York, MIT Press. 2002.
- [2] M.Kukleta, and M.Lamarche, "Steep early negative slopes can be demonstrated in pre-movement Bereitschaftspotential," *Clinical Neurophysiology*, vol. 112, pp. 1642-1649, Sept. 2001.
- [3] J.A.Pineda, B.Z.Allison, and A.Vankov, "The effects of self-movement, observation, and imagination on mu rhythms and readiness potentials (RP's): toward a brain-computer interface (BCI)," *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol.8, no.2, pp.219-222, Jun. 2000.
- [4] G.Pfurtscheller, and F.H.Lopes da Silva, "Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles," *Clinical Neurophysiology*, vol.110, pp.1842-1857, 1999.
- [5] G.Pfurtscheller, J.Kalcher, Ch.Neuper, D.Flötzinger, and M.Pregenger, "On-line EEG classification during externally-paced hand movements using a neural network-based classifier," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 99, pp. 416-425, Oct. 1996.
- [6] J.Müller-Gerking, G.Pfurtscheller, and H.Flyvbjerg, "Classification of movement-related EEG in a memorized delay task experiment," *Clinical Neurophysiology*, vol. 111, no. 8, pp. 1353-1365, Aug. 2000.
- [7] B.Blankertz, K.R.Müller, G.Curio, T.M.Vaughan, G.Schalk, J.R.Wolpaw, A.Schloegl, C.Neuper, G.Pfurtscheller, T.Hinterberger, M.Schroeder, and N.Birbaumer, "The BCI Competition 2003", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2003, submitted.
- [8] Y.H.Wang, P.Berg, and M.Scherg, "Common spatial subspace decomposition applied to analysis of brain responses under multiple task conditions: a simulation study," *Clinical Neurophysiology*, vol.110, pp.604-614, 1999.
- [9] H.Ramoser, J.Muller-Gerking, and G.Pfurtscheller, "Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement," *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol.8,no.4, pp.441-446, Dec.2000.
- [10] J.R.Wolpaw, N.Birbaumer, D.J.McFarland, G.Pfurtscheller, and T.M.Vaughan, "Brain-computer interfaces for communication and control," *Clinical Neurophysiology*, vol.113, pp.767-791, 2002.