

文章编号:1000-582X(2010)04-101-05

手指按键相关脑磁图信号的功能源提取

侯文生^{1,2}, 李卫娜^{1,3}, 蒋应涛², 吴国材³, 冯华³

- (1. 重庆大学 生物工程学院 生物流变科学与技术教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 内华达大学拉斯维加斯分校 电子与计算机工程系, 美国内华达州, 拉斯维加斯, 89154;
3. 第三军医大学 附属西南医院 神经外科, 重庆 400038)

摘要:独立分量分析(ICA)可用于分离多通道脑磁图信号(MEG)中的信号源。基于约束ICA的思想,通过在ICA模型中加入能够反映事件相关皮层神经活动特征的功能约束条件,实现了一种脑磁逆问题的解决方法,即功能源提取(FSS)方法。文中利用该方法对一例手指按键诱发MEG信号进行功能源提取,结果表明功能源位置位于对侧中央前回皮质运动区,且通过验证功能源提取所得到的分离向量与SAM法计算得到的空间滤波器系数间的相关性,验证了所提取的功能源有效。同时,功能源提取方法所提供的神经活动源的时域与频域信息,为在大量样本中探索大脑对手指运动控制的时间演化机制奠定了基础。

关键词:脑磁图;功能源提取;约束ICA

中图分类号: R318.04

文献标志码: A

Functional source separation to finger tapping related magnetoencephalography signal

HOU Wen-sheng^{1,2}, LI Wei-na^{1,3}, JIANG Ying-tao², WU Guo-cai³, FENG Hua³

- (1. Key Laboratory of Biorheological Science and Technology, Ministry of Education, Couege of Bioengineering fi, Chongqing University, Chongqing 400004, P. R. China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Nevada, Las Vegas, NV 89154, USA; 3. Department of Neurosurgery, Southwest Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400038, P. R. China)

Abstract: It has been verified that the ICA can isolate sources from multi-channel magnetoencephalography (MEG) signals. Based on the route of constrained ICA (cICA), this paper achieves a new solution of MEG inverse problem called functional source separation (FSS) by adding a functional constraint to the cost function of a basic ICA model. Source activity is obtained by applying this method to one MEG signal dataset under a self-paced finger tapping task. The result is proved effective by calculating correlation coefficients between the weight vectors of function source separation method and the spatial filter coefficients of SAM method. It is found that finger tapping related functional source was localized in motor cortex of precentral gyrus. At the same time, the temporal and frequency information provided by FSS method could be a basis of exploring cortical control timing mechanisms associated with finger movements and extracting time frequency characteristics of the functional source.

Key words: Magnetoencephalography (MEG); Functional Source Separation (FSS); Constrained ICA (cICA)

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30770546, 30970758); 重庆市自然科学基金资助项目(2006BB2043, 2007BB5148); 重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-09104)

作者简介: 侯文生(1968-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事生物医学信号检测与信号处理研究, (E-mail)hws21cn@yahoo.com.cn.

脑磁逆问题是脑磁图(MEG)信号处理中的一个主要问题,它利用头外探测的时、空脑磁场数据推断脑内电流源的信息。常用的方法有:等效电流偶极子法(equivalent current dipole, ECD)^[1],多重信号分类法(multiple signal classification, MUSIC)^[2],合成孔径法(synthetic aperture magnetometry, SAM)^[3]等。这些方法的确立均依赖于头模型(head model,如球对称导体模型、真实头模型)或源模型(source model,如电流偶极子模型)的物理性质^[4],然而这些模型的参数并不能被准确获得。

独立分量分析(ICA)技术是近来源信号分离方法的研究热点^[5-6],它以随机变量的非高斯性和相互独立为目标,最终目的是从多通道观测数据中分离出相互独立的信号源。除了要求源信号统计独立外,ICA不需要另外的模型假设。然而,如何对ICA分离出来的众多独立分量(IC)赋予实际的生理意义(或噪声性质)是一个很困难的问题。半盲ICA(semi-blind ICA)方法^[7],如约束ICA法(constrained ICA, cICA),将一些与源相关的先验信息作为目标约束条件,为直接提取与源相关的分量提供了帮助^[8]。

Barbati等^[9-10]提出了一种用于分离大脑功能信息的半盲ICA方法——FSS法(functional source separation),即在ICA追求“最独立”的目标函数上,加入能够反映大脑功能的约束条件,从而实现对大脑功能信息源提取的方法。借助该方法的思想,在原ICA目标函数中加入能够反映与手指按键相关的大脑活动特征的约束条件,实现了食指按键动作相关MEG信号的功能源提取。

1 数据采集

MEG数据采集于重庆西南医院脑磁图中心。实验对象为一正常女大学生志愿者,右利手,无神经系统疾病病史,无特殊医疗状态。志愿者受试前明确受试任务,并签署了知情同意书。数据采集时,志愿者平躺于磁屏蔽室内,做右手食指自主按键动作(Self-paced Task)。按键每隔3~4s被按1次,共按键75次,由操作医师提示停止。在按键过程中,受试者的大脑活动被151道的CTF MEG系统(CTF Systems Inc, Vancouver, Canada)记录(有效记录通道为144道)。每次按键记录MEG数据4s,包括按键前2s和按键后2s,总数据长度共300s。记录带通设置为0~150Hz,采样率600Hz。

2 手指按键相关脑磁图信号的功能源提取

2.1 功能源提取的模型

设信号源为 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$, $t = 0, 1, 2, \dots, T$ 为离散采样时间; m 维观测信号 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$; \mathbf{A} 为混合矩阵,则有:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t), \quad (1)$$

ICA的目的是:在混合矩阵 \mathbf{A} 和源信号未知的情况下,只根据观测信号 $\mathbf{x}(t)$ 确定分离矩阵 \mathbf{W} ,使得变换后的输出 $\mathbf{y}(t)$ 是对源信号 $\mathbf{s}(t)$ 的估计^[11]。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{s}(t), \quad (2)$$

由于式(2)中只有 $\mathbf{x}(t)$ 是已知的,所以ICA的求解过程转化成为在合适的约束条件下,使得 $\mathbf{y}(t)$ 的各分量最大程度的独立的过程。其目标函数通常依据某种独立性度量准则而建立。

然而ICA独立性的测度仅考虑了信号的统计独立特征,对信号自身的特征(如生物学信号通常有一定的生理含义,且这些生理含义还极有可能是已知的)却没有考虑。功能源提取(FSS)的思想就是在原独立约束条件中加入一些能够反映生理特征的功能约束条件,从而使独立分解过程朝着具有生理意义的方向发展。其目标函数为^[9]

$$F = J + \lambda \cdot H, \quad (3)$$

其中, J 是对独立性的测度,即ICA的目标函数; H 是功能约束条件,即源的先验信息;参数 λ 是权重因子,用来衡量独立性 J 和源先验信息 H 在当前目标函数中的比重,当 $\lambda=0$ 时,相当于对信号做独立分量分析。

优化算法选取模拟退火算法(simulated annealing, SA)^[12],而不是常用的梯度法。由于模拟退火算法是一种非导数优化算法,这样就不用限制 H 必须为可微分的形式。且模拟退火算法结果相对稳定,其所得点为全局最小值点或非常靠近全局最小值点。

2.2 功能约束条件

由于是针对食指按键动作相关皮层神经活动功能源的提取,所以功能约束条件选择与食指按键相关的皮层神经活动特征。这里选取食指按键相关MEG信号beta节律的时频特征^[13],作为功能源的先验信息。

定义按键动作相关皮层神经活动源的功能特征约束为标准按键前后beta频段的功率谱密度之差:

$$H = \frac{\sum_{\text{beta}} \text{PSD}_{\text{post}}^{\text{FS}} - \sum_{\text{beta}} \text{PSD}_{\text{pre}}^{\text{FS}}}{\sum_{\text{beta}} \text{PSD}_{\text{pre}}^{\text{FS}}}, \quad (4)$$

其中, $\text{PSD}_{\text{post}}^{\text{FS}}$ 为按键后(即从 0.5~1 s)的功率谱密度, $\text{PSD}_{\text{pre}}^{\text{FS}}$ 为按键前(即从 -0.5~0 s)的功率谱密度。所以最终建立目标函数:

$$\min: F(\mathbf{W}) = -J - \lambda \cdot H, \quad (5)$$

其中, J 选择为基于峭度的非高斯度量。目的是求合适的分离向量 \mathbf{W} , 使得 $F(\mathbf{W})$ 的值最小。模拟退火算法的输入数据为伪迹去除、滤波并叠加平均后的 MEG 信号 MEG_{Avg} 。对于最优的 \mathbf{W} , 其对应的功能源信号为

$$\text{FS} = \mathbf{W} \cdot \text{MEG}_{\text{Avg}}. \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 参数 λ 的确定

在目标函数 $F = -J - \lambda \cdot H$ 中, 参数 λ 用于分配独立性和功能约束在目标函数中的贡献, 算法的结果对 λ 的取值很敏感。所以在 H 的选择时, 要求 H 在其解的邻域中也要很稳定。为了使结果最优, 这里分析了 λ 的取值对算法结果的影响。

计算 λ 取值分别为 0.1, 1, 10, 100, 1 000 及 OC (only constraint) 情况下(即仍取 $\lambda=1$, 但 J 的系数为 0) 功能源(FS)的功能指数, 即各情况下的 H 值(如式(4)), 并计算了个情况下所耗时长, 如表 1

所示。

表 1 λ 的取值对功能指数及计算时间的影响

λ	0.1	1	10	100	1 000	OC
功能指数	0.154 9	0.401 9	0.432 6	0.522 5	0.541 2	0.543 7
计算时间/s	292.89	275.72	240.74	238.61	188.20	255.76

计算机性能为: 3.0 GHz 的 CPU, 2.0 GB 的 RAM; 数据格式为 144 × 2 400 (channels × samples)。选取 λ 应使得功能指数尽量最大而计算时间又尽量最小, 故最终选取 $\lambda=1 000$ 。

3.2 功能源的位置及对提取结果的评价

首先, 将所求功能源 FS 反向投射到各通道位置上, 观察其位置分布, FS 的计算方法如式(6), MEG_{Rec} 即为反向投射后各通道的信号:

$$\text{MEG}_{\text{Rec}} = \hat{\mathbf{a}} \cdot \text{FS}, \quad (7)$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}$ 为 \mathbf{W} 的广义逆矩阵, 它被定义为^[14]

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{W})^{-1} \cdot \mathbf{W}^T, \quad (8)$$

图 1 所示为功能源活动在通道位置上的显示, 颜色表示皮层神经活动的极性与幅值的大小。由图可以看出, 功能源活动主要集中在左侧中央区(C区)通道的后沿, 大致对应中央沟的前侧, 即中央前回皮质运动区。

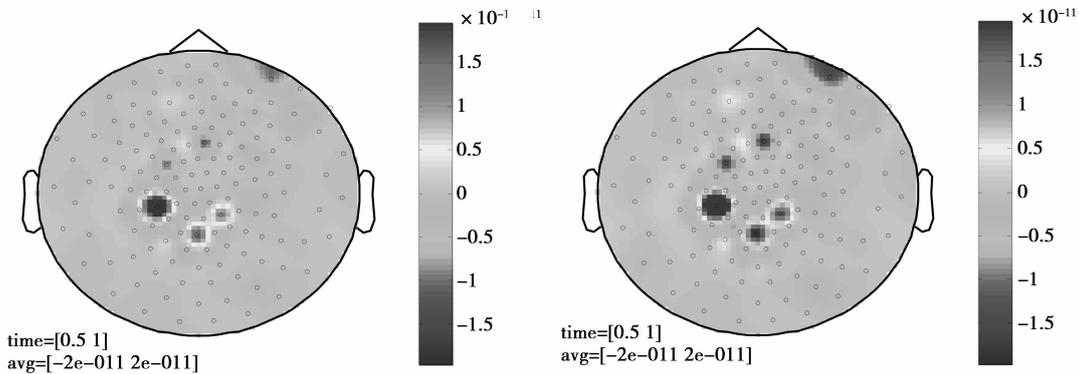


图 1 按键动作前(左)后(右)功能源活动在通道位置上的信息

为了进一步证明所提取功能源的有效性, 接着对所提取的功能源进行了评价。功能源提取的关键是分离向量 \mathbf{W} 的确定, \mathbf{W} 的物理意义是功能源信号在各通道上分布的权重, 它最终决定着源信号的位置信息。所以对所提取的功能源质量的评价, 最直接的方法是判断分离向量与实际源信号在各通道上分布的权重之间的相关性, 如果相关性显著则表明

提取源信号正确, 若相关性不显著则表面所提取的源信号有误。实际源信号在各通道上分布的权重以 CTF 脑磁图系统中 SAM 软件计算的空间滤波器系数为标准。图 2 显示了 SAM 法计算得到的空间滤波器系数和文中所得到的分离向量, 由图可见, 二者经过一些线性变换后是完全一致的。计算二者的相关系数为 0.175 7; 不相关假设 P 值为 0.031 5, 小于

0.05, 故二者显著相关, 从而证明了所提取功能源有效。

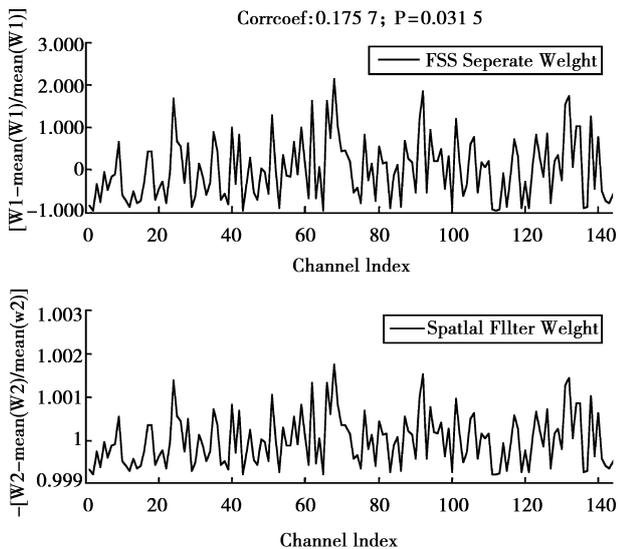


图 2 FSS 算法得到的分离向量(上)与 SAM 算法得到的空间滤波器系数(下)及二者间的相关性

3.3 功能源的时频域特征

图 3 显示了当 $\lambda=1\ 000$ 时, 所提取的功能源随时间变化的趋势以及其在手指按键前 ($-0.5\sim 0$ s) 和按键后 ($0.5\sim 1$ s) 的频域幅值特性。

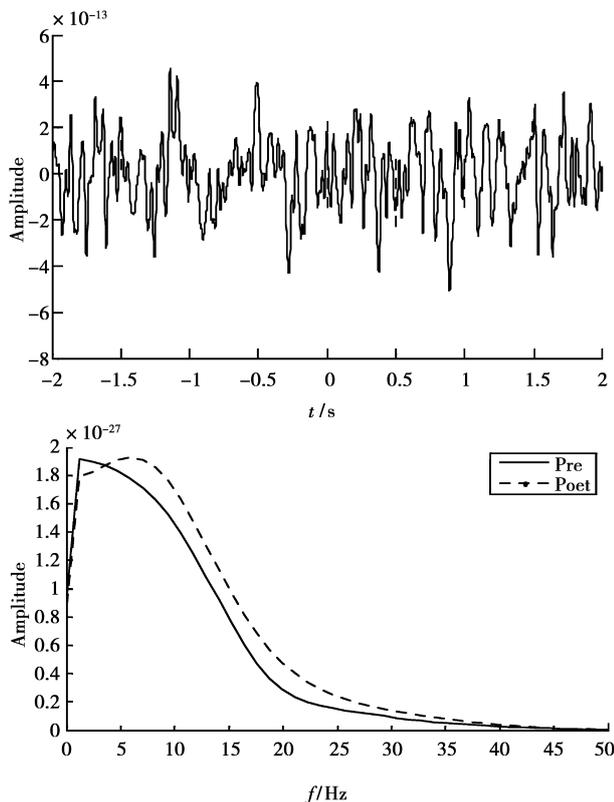


图 3 功能源的时域(上)和频域特征(下)

由功能源随时间变化的趋势可知, 调控手指按键的皮层神经源其时域特征并没有很明显, 不像体感或刺激诱发神经活动那样, 有标志性的刺激诱发电位, 如 M20、M35 等^[15]。推测其原因: 随意运动是由皮层发出指令到达主导运动行为的肌肉而引起的兴奋、收缩; 而手指的动作需要许多前臂肌和手肌的协同作用, 皮层对手指动作的支配非常精细复杂, 所以运动诱发电位也不会像感觉诱发电位那样简单。根据前期对 MEG 数据时域处理的经验, 手指按键相关的皮层神经活动也确实很难寻得共同规律。

由功能源按键前后的频域幅度曲线的对比来看, 按键后 beta 频段节律的功率谱密度较按键前的均有增长, 即按键后皮层神经活动表现出功率大幅增长现象(事件相关同步), 这与先前的研究结论是一致的。

4 结 论

利用头外探测的脑电磁生理信号有效提取脑内神经活动源信息是基于皮层电生理研究皮层神经控制机制的基础。基于约束 ICA 的思想, 通过在 ICA 模型中加入能够反映大脑功能的约束条件, 实现了一种脑磁逆问题解决方法——功能源提取方法。通过对一例实测手指按键诱发脑磁图信号进行功能源提取, 验证了该方法的有效性。同时, 功能源提取方法对功能源信号时域、频域信息的提供, 弥补了临床商业软件只对源位置信息提供的不足。通过改变功能约束条件, 功能源提取方法还可用于其他时间相关神经活动源的提取, 这为皮层控制机制的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] SCHERG M, BERG P. Use of Prior Knowledge in Brain Electromagnetic Source Analysis [J]. Brain Topography, 1991, 4: 143-150.
- [2] MOSHER J C, LEWIS P S, LEAHY R M. Multiple dipole modeling and localization from spatiotemporal MEG data [J]. IEEE Transactions Biomedical Engineering, 1992, 39(6): 541-557.
- [3] VRBA J, ROBINSON S E. Signal processing in magnetoencephalography [J]. Methods, 2001, 25: 249-271.
- [4] 马洁铭, 王斌, 张立明. 基于独立元分析的脑磁图源定位[J]. 生物物理学报, 2006(05): 389-396.
MA JIE-MING, WANG BIN, ZHANG LI-MING. MEG sources localization based on independent component analysis [J]. Acta Biophysica Sinica, 2006

- (05):389-396.
- [5] 赵丽, 万柏坤, 高扬. 独立分量分析方法在脑电信号预处理中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 496-498.
- ZHAO LI, WAN BO-KUN, GAO YANG. The applying research of independent component analysis on the preprocessing of EEG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(1): 496-498.
- [6] 周仲兴, 明东, 朱誉环, 等. 基于扩展 Infixmax ICA 的站起想象动作脑电特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(03): 459-464.
- ZHOU ZONG-XING, MING DONG, ZHU YU-HUAN, et al. EEG feature extraction for imaginary standing up based on extended infixmax independent component analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(03): 459-464.
- [7] WEI L, RAJAPAKSE J C. Approach and Applications of Constrained ICA [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 2005, 16(1): 203-212.
- [8] VALENTE G, DE MARTINO F, BALSÌ M, et al. Optimizing ICA using generic knowledge of the sources [J]. Research in Microelectronics and Electronics, 2005, 2: 206-209.
- [9] BARBATI G, SIGISMONDI R, ZAPPASODI F, et al. Functional source separation from magnetoencephalographic signals [J]. Human Brain Mapping, 2006, 27: 925-934.
- [10] BARBATI G, PORCARO C, HADJIPAPAS A, et al. Functional source separation applied to induced visual gamma activity [J]. Human Brain Mapping, 2008, 29: 131-141.
- [11] 海韦里恩(芬). 独立成分分析 [M]. 周宗潭译. 北京: 电子工业出版社, 2007, 108-201.
- [12] 王正林, 龚纯, 何倩. 精通 Matlab 科学计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 343-360.
- [13] MICHAEL T, JURKIEWICZ, WILLIAM C, et al. Post-movement beta rebound is generated in motor cortex: Evidence from neuromagnetic recordings [J]. NeuroImage, 2006, 32: 1281-1289.
- [14] 邓勇. 长方形矩阵的广义逆矩阵的计算方法 [J]. 绵阳师范学院学报, 2008, 27(2): 34-37.
- DENG YONG. A calculation method for generalized inverse matrix of rectangular matrix [J]. Journal of Mianyang Normal University, 2008, 27(2): 34-37.
- [15] 孙吉林, 吴杰, 李素敏, 等. 应用脑磁图对人脑初级体感皮质功能定位的研究 [J]. 中国医学影像技术, 2002, 18(04): 307-310.
- SUN JI-LIN, WU JIE, LI SU-MIN, et al. Functional localization of the human primary somatosensory cortex: A neuromagnetic study [J]. China Journal of Medical Imaging Technology, 2002, 18(04): 307-310.

(编辑 陈移峰)

(上接第 95 页)

- [13] MACHIRAFI H, CAVADIAS S, GILBERT P. An experimental and numerical analysis of the HCCI auto-ignition process of primary reference fuels, toluene reference fuels and diesel fuel in an engine, varying the engine parameters [J]. Fuel Processing Technology, 2008(89):1007-1016.
- [14] FIKRI M, HERZLER J, STARKE R, et al. Autoignition of gasoline surrogates mixtures at intermediate temperatures and high pressures [J]. Combustion and Flame, 2008 (152):276-281.
- [15] LENHERT D B, MILLER D L, CERNANSKY N P, et al. The oxidation of a gasoline surrogate in the negative temperature [J]. Combustion and Flame, 2009 (156):549-564.
- [16] CURRAN H J, PITZ W J, WESTBROOK C K, et al. Oxidation of automotive primary reference fuels at elevated pressures [C] // 27th International Symposium on Combustion. The Combustion Institute, 1998, 379-387.
- [17] AROONSRIOPON T, SOHM V, WERNER P, et al. An investigation into the effect of fuel composition on HCCI combustion characteristics [C]. SAE2002-01-2830, 2002.

(编辑 陈移峰)