

· 康复工程 ·

基于肌音信号的上肢康复训练动作模式识别方法

孟巧玲 易金花 喻洪流 赵胜楠 石萍

研究表明,建立受损大脑与障碍肢体运动间的联系是加速恢复肢体功能的有效办法,而生物反馈则是借助精密的专业工具,探查和放大人体固有的生理变化过程中所产生的各种信息,通过显示系统将此种信息转变为易于为患者理解的信号或读数,在医务人员的指导下进行训练,使患者学会利用经过处理的自身信号,有意识地控制体内各种生理、病理的过程^[1]。上肢功能康复是康复治疗的难题之一,而可靠的生物信号源的采集及其模式识别则是上肢康复训练机器人的关键之一^[2]。目前,可作为控制源的人体生物信号有肌电信号、肌音信号、脑电信号等。肌音信号作为一种机械振动信号,具有抗干扰性强、采集操作要求低、不受生理现象影响等优点,与肌电信号和脑电信号相比,肌音信号在肌肉收缩疲劳时具有更高的准确率^[2,4]。

肌音信号自从 1810 年被 Wollaston 发现可以采集以来,很多学者即开展了相关研究,并将其应用到如肌力评估、肌肉疲劳评估、假手控制等诸多领域^[2-11]。1980 年, Oster 等^[5]的研究发现,肌音信号的强度与肌肉收缩程度成正比;1986 年, Barry 等^[6]的研究首次尝试了将肌音信号作为假肢控制信号源;随后, Silva 等^[7]用肌音信号模拟肌电信号,实现了单自由度的肌音信号驱动的假肢控制;Shinohara 等^[8]研究了在力作用下和肌肉疲劳状态时的肌音信号,提出了肌音信号评估肌力的方法;Madeleine 等^[9]的研究则分析了肌肉疲劳状态的肌音信号的特性。21 世纪初,柴京京^[10]研究了局部肌肉在运动诱发下产生疲劳状态时肌音信号的非线性特性;2010 年,夏春明等^[11]通过提取肌音信号时域统计特征成功分辨手部动作类型,为我国肌音信号在假肢控制领域的应用提供了基础。虽然肌音信号可取代肌电信号被应用于假肢的控制,但目前鲜见将肌音信号应用于康复机器人的报道。

本研究以肱二头肌在肘关节屈伸动作时由于肌肉收缩所产生的肌音信号作为研究对象,旨在阐述一种新的肌音信号采集模式和识别方法,以期证明肌音信号作为上肢康复机器人控制信号源的可行性。

资料与方法

一、研究对象

选取具有完整上臂肌肉组织和功能的身体健康受试者 10 例,其中男 5 例,女 5 例;平均年龄 (30 ± 5) 岁,根据性别将受试者分为男组和女组。所有受试者均签署知情同意书。

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.011.021

基金项目:上海市科技支撑项目(1444190442);上海市工程技术研究中心建设专项(15DZ2251700)

作者单位:200093 上海,上海理工大学医疗器械与食品学院康复工程与技术研究所,上海康复器械工程技术中心

通信作者:喻洪流, Email: yhl98@hotmail.com

二、实验设备及系统

(一)肌音信号采集设备

使用北京产 XY-TD6 型肌振传感器采集肱二头肌在肌肉收缩时所产生的肌音信号(图 1),采用巴特沃兹低通滤波器对肌音信号进行有源低通滤波放大,然后通过 NI-PCI6221 采集卡设定 A/D 转换的采样率和采样点等相关参数对肌音模拟信号进行数字转化,其中采样频率为 500 Hz。



图 1 传感器安放位置

(二)肌音信号采集系统

肌音信号采集系统主要包括信号采集模块、信号放大模块和滤波电路测试模块。本研究采集肱二头肌的最大自主收缩力(maximum volunteer contraction, MVC)的 20%、40%、60%、80%、100% 五个动作模式下所产生的肌音信号。为了提高实验的可靠性和稳定性,本研究采用双通道单边输入加权平均法来处理采集到的肌音信号,依据肱二头肌产生肌音信号频率特点,选取二阶巴特沃兹多项式,截止频率 100 Hz,同时搭建基于贴片元件的电子电路,通过信号发生器和示波器对滤波电路进行测试。测试结果显示,频率为 30 Hz 时,信号幅值没有衰减;至 100 Hz 时衰减明显;至 200 Hz 时信号幅值已全部衰减,即表明,本研究所设计的滤波器是可靠的。将得到的放大信号输入数据采集卡中,实现数据的 A/D 转换,利用 Matlab 提供的数据采集工具箱完成对受测者在不同百分比的 MVC 下肱二头肌产生的肌音信号从模拟到数字的转化与储存。

(三)肌音信号特征提取与模式识别系统设计

本研究借鉴肌电信号的特征提取方法,从时域、频域及时频域分别对肌电信号进行特征分析。

1. 肌音信号时域特征:肌音信号时域特征主要是利用加权平均方法提取采集到的肌音信号的均方根(root mean square, RMS),公式为 $RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}$ (x_i 为采样点, N 为所取信号样本的数目, $N=100$)。经过对不同百分比 MVC 下所采集的信号进行计算所得到的均方根值分析,结果显示, RMS 值与 MVC 的改变密切相关。因此, RMS 既可以作为阈值判断是否有动作发生,也可以作为识别多自由度动作的特征值,以实

现肌肉动作模式识别的目的。

2. 肌音信号的频域特征:依据不同百分比 MVC 下采集肱二头肌产生的肌音信号,利用功率谱密度来提高随机信号分析的准确性和可靠性,采样时间间隔设定为 $1/500\text{ s}$ 。通过对受试者在分别完成同一动作时所采集到的数据(取均值),按照自相关函数法的经典功率谱估算方法计算均值后序列的自相关函数,从而得到肱二头肌不同百分比 MVC 运动动作时的肌音信号功率谱($S_x(f)$)估计,其中肱二头肌 60% MVC 的肌音信号功率谱如图 2。

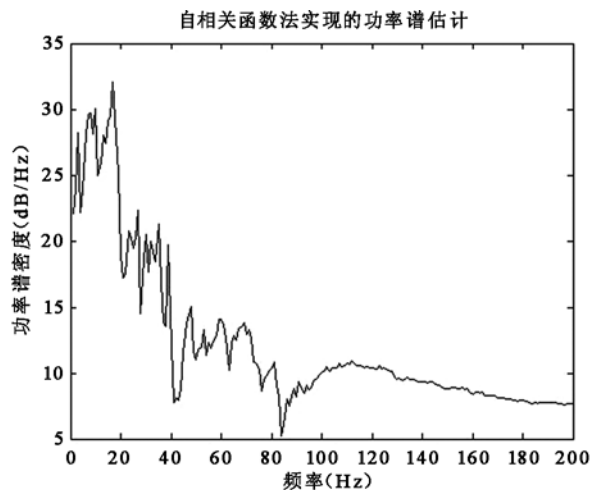


图2 肱二头肌 60% MVC 的功率谱

在每个动作模式中,肱二头肌收缩时的肌音信号的功率谱密度分析结果表明,功率谱密度主要集中分布在 $10 \sim 30\text{ dB/Hz}$,因此,本研究在 $5 \sim 30\text{ dB/Hz}$ 区间设定特征值,即平均功率频率(mean power frequency, MPF)。根据其在这个区间上的功率谱密度均值来判断动作发生,同时也可以作为特征来判断肌肉动作模式。根据公式计算出不同 MVC 等张收缩动作模式下的 MPF 和中值频率(median frequency, MP)(表1)。表1可见,通道1的 MPF 和 MP 分别与通道2相同 MVC 下的 MPF 和 MP 比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$),说明平均功率频率的聚类性更好,更易于作为特征值来进行动作模式识别。

表1 2种通道不同 MVC 等张收缩动作模式下肱二头肌产生的肌音信号频域特征值(Hz, $\bar{x} \pm s$)

通道	20% MVC	40% MVC	60% MVC	80% MVC	100% MVC
通道1					
MPF	86.3 ± 8.1	96.9 ± 5.4	100.9 ± 11.7	115.4 ± 22.8	135.3 ± 19.7
MF	17.3 ± 2.3	23.3 ± 2.9	28.3 ± 3.7	32.3 ± 7.9	36.3 ± 1.8
通道2					
MPF	83.3 ± 4.7	97.3 ± 6.3	$103. \pm 9.7$	117.7 ± 13.2	142.4 ± 28.9
MF	18.3 ± 1.7	22.2 ± 1.2	27.1 ± 3.4	31.3 ± 5.7	34.7 ± 0.7

3. 时频域特征:利用自回归(auto regressive, AR)参数法来确定肌音信号与肢体相关动作的关系。根据采集到的肌音信号,求出模型的参数和残差,提取特征来实现控制。研究表明,一般而言,当人体生理信号的自回归模型的阶数为4时,信号处理的计算量较低,并可提供较高的重返信号时域波形。因此,本文先将估计出的模型参数带入模型的理论功率谱密度公式,给出一个较好的谱估计值,然后利用 Burg 算法来求解 AR

模型参数,通过递推算出4阶AR模型。

4. 肌音信号特征矩阵:根据如上所述方法,调用 Matlab 库函数分别提取了6个肌音信号特征,分别为时域内肌音信号的均方根,频域内平均功率频率和 AR 自回归模型参数4个重特征,得出肱二头肌产生的肌音信号的特征矩阵,公式为 $X = \{RMS, MPF, AR1, AR2, AR3, AR4\}$ 。

5. 动作模式识别:肌音信号的模式识别是指对采集处理过的肌音信号和其时域、频域及时频域中提取的数字特征相关进行动作模式分类,然后输出结果作为系统控制信号的过程。本文采用线性分类器对肌音信号进行动作分类识别,将6维特征矩阵投影到一维空间进行分类。利用 Matlab 软件,通过线性分类器把高维特征矩阵投影到容易划分的一维向量空间中,先通过学习训练样本先计算出不同百分比的 MVC(20% MVC、40% MVC、60% MVC、80% MVC、100% MVC)动作模式的样本加权投影值,然后设定允许误差,得到判别函数值,最后再应用于需要进行分类的实验样本中对其在允许的误差范围内进行动作模式识别。利用训练样本训练分类器后,将验证样本导入分类器验证动作模式。实验证明,线性分类器对肱二头肌收缩动作判别正确率最高可达90%。

三、实验方法

首先,建立人机交互上肢康复训练系统,根据图3上肢康复训练系统示意图建立本实验所需的测试系统。在 Adams 虚拟环境下建立肘关节骨骼及其旋转约束关系虚拟模型。由于本实验主要以肘关节的屈/伸运动来进行实验测试,因此在系统中建立一个状态变量:转动副的角加速度,再将已定义的状态变量应用到旋转副的角速度测量的函数表达式中,以便和控制平台进行数据实时交换。然后学习样本设定线性分类器的权向量,再要求受试者分别做肘关节屈伸动作,使肱二头肌实现 20% MVC、40% MVC、60% MVC、80% MVC、100% MVC 动作模式,每例受试者做同一动作100次,每次动作时间持续5s,观察虚拟环境 Adams 中三维上肢模型动作相应的改变,实时观察其反馈值,并记录其动作识别准确率(图4)。

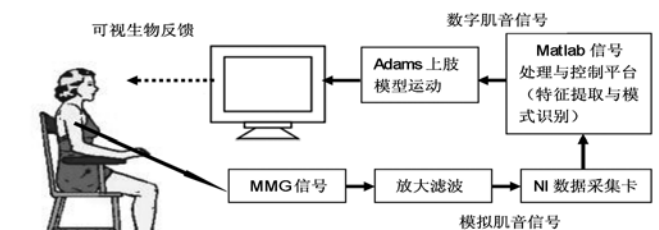


图3 基于肌音信号控制功能康复训练系统示意图



图4 肌音信号功能康复训练系统实验

四、统计学方法

本研究数据以($\bar{x} \pm s$)表示,采用 SPSS 10.0 版统计学软件进行数据分析,组间比较采用单因素方差分析,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

2 组受试者不同 MVC 等张收缩动作模式下动作识别准确率组间差异均无统计学意义($P > 0.05$),详见表 2。

表 2 2 组受试者不同 MVC 等张收缩动作模式下动作识别准确率(%, $\bar{x} \pm s$)

组别	例数	20% MVC	40% MVC	60% MVC	80% MVC	100% MVC
男组	5	91.0 $\pm$ 2.0	85.3 $\pm$ 3.3	89.9 $\pm$ 3.6	90.5 $\pm$ 2.9	97.9 $\pm$ 1.8
女组	5	85.4 $\pm$ 2.5	86.3 $\pm$ 2.7	91.5 $\pm$ 1.7	90.0 $\pm$ 2.6	95.6 $\pm$ 1.9

讨 论

本研究阐述了一种新的肌音信号的采集与模式识别方法。该方法首先提取肌音信号在时域、频域以及时频域的特征生成 6 维特征矩阵,然后使用线性分类器代替阈值的判定方法对不同 MVC 等张收缩动作模式下的肌音信号进行了识别并分类,最后将分类后的肌音控制信号反馈到实时控制虚拟环境中的三维上肢模型,驱动其进行肘关节屈伸运动,以实现上肢功能康复训练。

本研究结果显示,男、女 2 组的动作识别准确率组间差异均无统计学意义($P > 0.05$),因此,基于肌音信号的 RMS、MPF 以及 AR 的模式识别方法不存在男女性别差异,动作识别准确率达到 85%~95.5%,表明将人体肌音信号作为上肢康复训练系统的控制信号源是可行的。

综上所述,肌音信号不仅可以用于肌力、肌肉疲劳状态的评估、假肢的控制,还可作为康复机器人的控制信号源。本研究结果解决了肌电信号在复杂电势环境下模式识别准确率低的问题,也为今后肌音信号的应用研究提供了一个新方向。

参 考 文 献

- [1] 韩宏云,刘保群,程云. 精神病人焦虑的生物反馈治疗[J]. 当代医学, 2011, 17(8):46-47.
- [2] Orizio C. Muscle sound: Bases for the introduction of a mechanomyographic signal in muscle studies[J]. Crit Rev Biomed Eng, 1993, 21(3):201-243.
- [3] Orizio C, Liberati D, Locatelli C. Surface mechanomyogram reflects muscle fibres twitches summation[J]. J Biomech 1996, 29(4):475-481.
- [4] Orizio C, Perini R, Diemont B. Spectral analysis of muscular sound during isometric contraction of biceps brachii[J]. J Appl Physiol, 1990, 68(2):508-512.
- [5] Oster G, Jaffe JS. Low frequency sounds from sustained contraction of human skeletal muscle [J]. Biophys J, 1980, 30(1):119-127.
- [6] Barry DT, Leonard JA, Gitter AJ. Acoustic myography as a control signal for an externally powered prosthesis[J]. Arch Phys Med Rehabil, 1986, 67(4):267-269.
- [7] Silva J, Heim W, Chau T. A self-contained, mechanomyography-driven externally powered prosthesis[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2005, 10, 86(10):2066-2070.
- [8] Shinohara M, Sogaard K. Mechanomyography for studying force fluctuations and muscle fatigue [J]. Exerc Sport Sci Rev, 2006, 34(2):59-64.
- [9] Madeleine P, Jorgensen LV, Sogaard K, et al. Development of muscle fatigue as assessed by electromyography and mechanomyography during continuous and intermittent low-force contractions: effects of the feedback mode[J]. Eur J Appl Physiol, 2002, 87(1):28-37.
- [10] 柴京京. 运动诱发局部肌肉疲劳肌音信号非线性特性分析[D]. 陕西师范大学, 2009.
- [11] 夏春明, 杨正宜, 曹炜, 等. 基于肌音信号的虚拟假肢控制[J]. 华东理工大学学报自然科学版, 2010, 36(4):591-595.

(修回日期:2015-09-29)

(本文编辑:阮仕衡)

· 外刊摘英 ·

Blood pressure and recurrent intracerebral hemorrhage

BACKGROUND AND OBJECTIVE Intracerebral hemorrhages (ICHs) present in two predominant forms; lobar (cortical-subcortical regions), which are associated with cerebral amyloid angiopathy, and non-lobar (deep structures), which are associated with arteriosclerosis. This study assessed the association between blood pressure control and the risk of recurrent non-lobar and lobar ICH.

METHODS This longitudinal cohort study enrolled consecutive patients 18 years or older, admitted to Massachusetts General Hospital with ICH between July, 1994, and December, 2011. The survivors or their caregivers were contacted and interviewed at three, six, nine and 12 months after the index ICH, and every six months thereafter. Blood-pressure control was assessed and classified according to the American Heart Association/American Stroke Association guidelines. The primary outcome measure was recurrent ICH.

RESULTS Subjects were 1,145 patients with ICH, including 505 lobar and 640 non-lobar cases, with survival of at least 90 days. Inadequate blood pressure control was associated with an increased risk of both recurrent lobar and non-lobar ICH, with hazard ratios of 3.53 ($P < 0.001$) and 4.23 ($P < 0.048$), respectively. Systolic blood pressure was associated with increased risk of both recurrent lobar and non-lobar ICH. Diastolic blood pressure was associated with an increased risk of recurrent non-lobar, but not lobar, ICH.

CONCLUSION This study reported on the associations between inadequate blood pressure control and recurrent lobar and non-lobar intracranial hemorrhage.

【摘自:Biffi A, Anderson CD, Battey TW, et al. Association between blood pressure control and risk of recurrent intracerebral hemorrhage. JAMA, 2015, 1; 314(9):904-912.】