

骨骼肌运动特性的多信号结合研究

施 俊¹, 郑永平², 周康源³

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 香港理工大学医疗科技及资讯学系, 香港;
3. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

摘要: 超声可以清晰地观测骨骼肌空间形态变化, 是研究骨骼肌运动形态特性非常有效的工具。定义超声扫描骨骼肌得到的有关骨骼肌结构的形态变化信息为“声肌图(sonomyography, SMG)”。文章通过一套自行开发的可以无干扰、同步、连续采集 B 超图像、力或力矩、角度、肌电信号等骨骼肌相关信号的超声运动与弹性测量系统, 记录了手腕屈伸运动时前臂桡侧腕伸肌处的 B 超图像、表面肌电信号和手腕屈伸角度, 讨论了多信号研究骨骼肌运动特性的可行性, 结果表明了多信号研究骨骼肌特性的优越性。

关键词: 超声图像; 声肌图; 表面肌电信号; 手腕角度

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-02-0201-05

Study of the kinematics properties of skeletal muscle with multi-signals

SHI Jun¹, ZHENG Yong-ping², ZHOU Kang-yuan³

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
(2. Department of Health Technology and Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong;
(3. Department of Electronic Engineering and Information Science, the University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Ultrasound can be used to monitor the dimensional architectural change of muscle clearly, and it is a useful tool to study skeletal muscle. We defined the dimensional architectural change of muscle continuously extracted from ultrasound images as “sonomyography (SMG)”. In this paper, we used the ultrasound measurement of motion and elasticity system, which could synchronously and continuously acquire different data including the ultrasound images, force or moment, angle, EMG signals, and so on without disturbance, to record the ultrasound images and surface EMG signals sampled from the extensor carpi radialis with the wrist angles during the cycle of wrist flexion-extension. The feasibility of studying the skeletal muscle in motion with multi-signals was discussed, and the results illuminate the advantage to study the properties of skeletal muscle with multi-signals.

Key words: ultrasound images; sonomyography; surface electromyography; wrist angle

1 引 言

骨骼肌是人体内最多的组织, 约占体重的 40%, 是人体最大的运动器官, 骨骼肌是运动的主动部

分, 骨和关节是运动的被动部分。骨骼肌数量或者功能的减少, 都会引起对人体有害的变化, 特别是各种疾病的出现。因此对骨骼肌的研究有着重要的意义, 受到临床医学、康复医学、生理学、生物力学、运动学、国防科学、航空航天等各领域科研人员的高度重视。

骨骼肌的力学特性总是和它的结构形态相关的, 如肌束长度、羽状肌的肌纤维角度和肌肉生理横截面积等骨骼肌结构参数都直接或间接的影响肌肉力的产生和输出^[1]。在众多研究骨骼肌力学特性的

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(60701021), 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金, 香港研究资助局(PolyU 5245/03E)

作者简介: 施俊(1977-), 男, 江苏人, 上海大学通信与信息工程学院讲师, 研究方向: 生物医学信号、超声信号处理。

通讯作者: 施俊, E-mail: junshi@staff.shu.edu.cn

方法中,表面肌电图(Surface Electromyography, SEMG)是最常用的方法之一,它是骨骼肌电生理学特性的表现,但它不能表征骨骼肌的结构形态特征。

超声可用来准确的反映骨骼肌运动过程中的空间形态变化,是研究骨骼肌运动形态特性非常有效的工具。近年来,已有研究人员利用超声测量肌肉厚度^[2]、羽状肌的肌纤维角度^[3]、肌束长度^[3]、肌肉生理横截面积^[4]等骨骼肌结构参数,但测量均在静态或准静态的条件下独立进行的。最近又有了研究骨骼肌结构和肌电信号之间关系的文献报导^[5-7]。而这种结合研究大都是在准静态、有干扰、非同步方式下进行的,未能连续记录整个肌肉收缩过程中的相关信息。这和市场上缺乏能同时采集 B 超图像、SEMG 等多种信号的仪器设备有关。

通过几年的努力,本研究小组自行开发了一套可以无干扰、同步、连续采集超声信号、力或力矩、角度、EMG 信号等骨骼肌相关信号的超声运动与弹性测量系统,从而使得多信号结合研究骨骼肌的特性成为可能。由于从超声信号中可提取有关骨骼肌运动时的结构形态方面的信息,在此提出了“声肌图”这一概念^[8,9]:把超声扫描骨骼肌得到的有关骨骼肌结构的形态变化信息定义为“声肌图(sonomyography)”,简写成 SMG,这一个概念是对将超声成像技术应用于骨骼肌运动形态学中产生的一种新的肌肉运动形态信号的定义。

本文将通过超声运动与弹性测量系统,记录手腕屈伸运动时的前臂桡侧腕伸肌的 B 超图像和 SEMG 信号以及手腕屈伸角度,对多信号结合研究骨骼肌特性进行初步的研究分析。

2 系统与实验

由于文献[7]中所开发的实验系统,只能同时采集 B 超图像和手腕屈伸运动轨迹,并没有很好的实现更多信号的采集,而且实验设备非常昂贵,实验装置繁多,对于由 4 个红外相机所记录的运动轨迹的处理也非常繁琐。为此,又自行开发了超声运动与弹性测量系统,图(1)所示为系统组成和试验装置图。超声运动与弹性测量系统由以下几个部分组成:便携式 B 超、电角度计、EMG 采集器、一块数据采集卡和一块视频捕获卡,以及自行开发的信号采集和处理软件。通过 B 超获取的超声图像由一块装在计算机内的视频捕获卡数字化,并以一定的采样率采集到计算机内;而电角度计和 EMG 采集器

都通过一块装在计算机内的数据采集卡采集送入计算机内。EMG 信号在被送到数据采集卡之前,已经被放大 10 倍和做 10Hz~800Hz 的滤波。整个数据采集过程由自行开发的信号采集和处理软件控制,并采用多线程技术来保证 B 超图像、角度和肌电信号的同步。B 超图像一帧接一帧的保存,同时每一帧 B 超图像伴随一个角度值和一段 SEMG 信号。

手腕屈伸运动是日常生活中很常见很频繁的一个动作,也是人体关节运动的一个典型动作,因此研究手腕屈伸引起的骨骼肌运动特性对于医学特别是康复医学有着重要意义。

7 名志愿者加入了本次实验(年龄:26±3 岁,身高:170±3.5cm,体重:62±4.7kg)。如图 1 所示,实验开始时,志愿者以自然的姿势坐在椅子上,前臂紧贴桌面上,B 超探头垂直于桡侧腕伸肌的肌纤维方向,横向放置在桡侧腕伸肌的肌腹位置。B 超探头由一个改装过的三角架固定,以便能适应不同的实验志愿者。SEMG 的电极平行于桡侧腕长伸肌方向,靠近 B 超探头附近贴在伸肌位置,电极对之间的距离大概是 20mm,参考电极贴在茎突处。电角度计贯穿整个手背,并两端固定。志愿者被要求在一个音频节拍器(45 拍/分钟)的引导下,从手掌平放正常位置开始进行重复的手腕伸展到最大位置,再弯屈回到平放正常位置的运动。在实验过程中,尽量保持前臂紧贴桌面而不横向移动,而且保持肘关节固定不动,只是手腕进行屈伸。每个志愿者进行 5 次独立的实验,在每次实验时执行 5 个周期以上的手腕屈伸运动,每次实验之间至少休息 2 分钟。

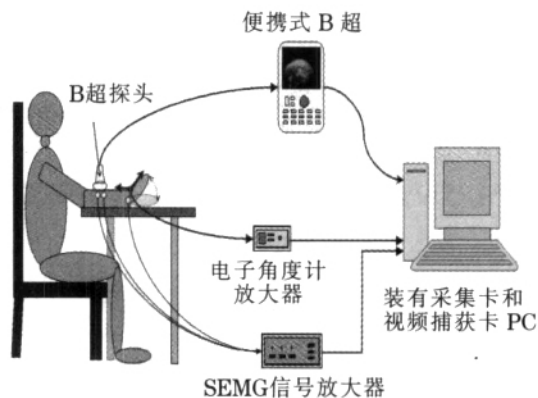


图 1 超声运动与弹性测量系统组成和实验装置图
Fig.1 Experimental setup of ultrasound measurement of motion and elasticity system

3 数据处理

对于实验得到的数据通过自行开发的信号采集

和处理软件进行如下的离线处理: 对于一系列的 B 超图像, 如图 2 所示在起始帧的图像上添加两个矩形框以选定特殊区域, 分别位于桡侧腕长伸肌的前后缘, 两个框中心点之间的距离就作为桡侧腕伸肌的肌肉厚度。然后把第一帧图像中的两个矩形框内区域分别作为模板一和模板二, 在第二帧图像内对两个模板都进行二维互相关计算, 利用相关跟踪算法找到最佳匹配位置, 同时把第二帧图像内的最佳匹配位置处的矩形框内区域更新为新的模板, 进行下一帧图像的匹配。以此类推直到最后一帧 B 超图像。对于得到的每帧图像中桡侧腕长伸肌的肌肉厚度, 再按照公式 (1) 计算肌肉厚度变化率 SMG:

$$\rho = \frac{\Delta d - \Delta d}{\Delta d} \times 100\% \quad (1)$$

其中 ρ 为肌肉厚度变化率 SMG, Δd 为初始肌肉厚度, Δd 是当前帧肌肉厚度。而对于 SEMG 信号, 计算其均方根值(Root Mean Square, RMS), 它表示了信号能量。由于 SEMG 易受噪声干扰, 所以对得到的 RMS 值还进一步利用小波变换进行平滑处理。

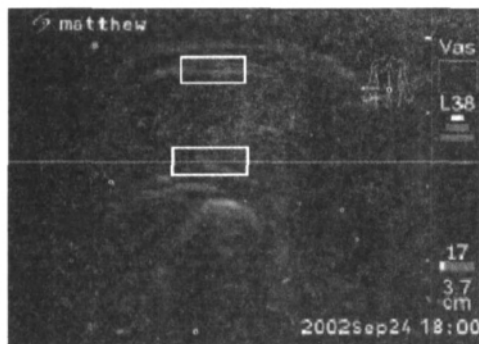


图 2 B 超图像上添加矩形框示意图

Fig.2 The schematic diagram of the template block added in B-mode ultrasound image

如图 3 所示, 手腕角度、SEMG 的 RMS 和归一化肌肉厚度变化率 SMG 可显示在同一幅图上。图中的 RMS 是根据平滑后的最大和最小 RMS 值来归一化而得到的。而图 3 中左边的坐标轴反映的是手腕角度范围, 右边的坐标轴表示的是肌肉厚度变化率 SMG 范围。所有志愿者的结果都显示了相似的曲线形状。由图 3 可以发现, 手腕屈伸角度的曲线和 SEMG 的 RMS 以及肌肉厚度变化率 SMG 的曲线在形状上都有着一定的相似性, 表明这些信号之间应该存在着一定的关系。

图 4 所示为典型的肌肉厚度变化率 SMG 与手腕屈伸角度之间的关系图, 此处采用二次多项式拟合它们之间的关系。其他志愿者的结果都显示了相

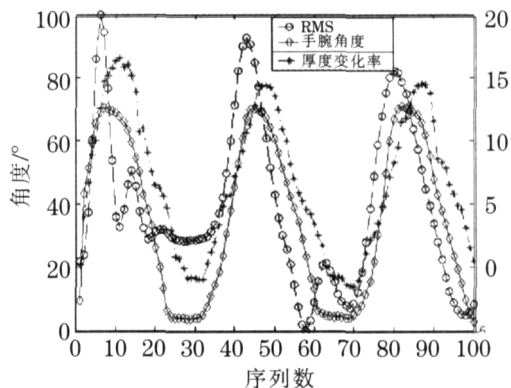


图 3 一个周期的手腕角度、SEMG 的 RMS 和肌肉厚度变化率 SMG
Fig.3 The curves of wrist angle, RMS and the change rate of muscle thickness SMG in one cycle

似的形状。图 5 所示是典型归一化的 SEMG 的 RMS 和手腕屈伸角度之间的关系图, 同样采用二次多项式拟合它们之间的关系。其他志愿者的结果都显示了相似的形状。图 6 所示为分别用二次多项式拟合肌肉厚度变化率 SMG 与手腕屈伸角度之间的关系, 以及归一化的 SEMG 的 RMS 和手腕屈伸角度之间的关系, 所得到的相关系数 (R^2) 结果统计图。从图中可以发现, 肌肉厚度变化率 SMG 拟合手腕屈伸角度所得的结果要优于 RMS 拟合手腕屈伸角度的结果。

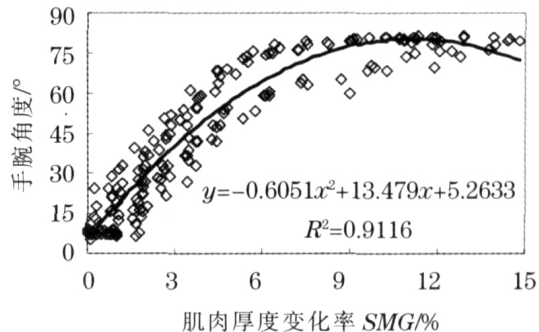


图 4 肌肉厚度变化率 SMG 与手腕屈伸角度之间的关系图
Fig.4 The relationship plot of the change rate of muscle thickness SMG versus wrist angle

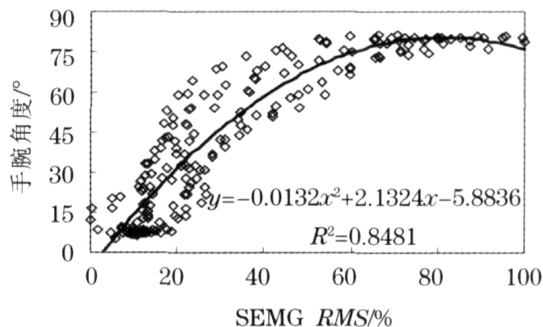


图 5 归一化的 SEMG 的 RMS 和手腕屈伸角度之间的关系图
Fig.5 The relationship plot of the normalized RMS versus wrist angle

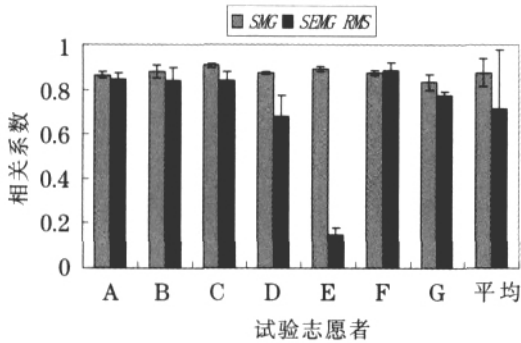


图6 SMG拟合手腕角度和RMS拟合手腕角度所得的两种相关系数(R^2)结果比较图

Fig.6 The diagram of the correlation coefficient (R^2) results gotten from the SMG and RMS fitting wrist angles respectively

4 讨论

自从1957年发明肌电假肢以来,基于肌电信号控制算法的假肢已经成为主流^[10,11]。在过去的几十年中肌电假肢有了很大的发展,但也存在一些固有的限制和缺点,如皮肤阻抗变化(例如出汗或者有油脂)对于SEMG信号的影响,电磁信号对于EMG信号的影响等,而肌肉厚度变化率SMG信号是测量相对位移,所以这些影响对于肌肉厚度变化率SMG来讲都是不存在的。图(3)结果也表明了RMS虽然已经经过了平滑处理,但是相对于肌肉厚度变化率SMG,波动还是比较大。而图(4)和图(5)的直观对比,以及图(6)的回归拟合结果比较,则证实了这一点。从图(6)可以发现,基本每个志愿者的结果,都是肌肉厚度变化率SMG拟合手腕角度要优于RMS拟合手腕角度,特别是第E个志愿者的结果,由肌肉厚度变化率SMG拟合手腕角度所得的相关系数(R^2)为 0.892 ± 0.011 ,而RMS拟合手腕角度所得的相关系数(R^2)为 0.152 ± 0.028 ,两者相差特别大。这是因为该志愿者较肥胖,其SEMG值受到的干扰特别大,所以拟合所得的结果也就特别差了。而通过超声图像获取的肌肉厚度变化却并没有因其肥胖而受到干扰。从生理角度来看,这点也是可以解释的:从超声图像中获取的是骨骼肌的结构参数,而人体运动总是和骨骼肌的结构形态的改变相关联的,因此手腕屈伸运动由前臂的伸肌和屈肌协同完成,表现在桡侧腕伸肌部位,肌肉厚度的变化就是结构形态变化之一;而SEMG信号是骨骼肌的电生理学特性的表现,和骨骼肌的力学特性有着密切的关系,是所测肌肉群肌电反应的总和,综合反映该部分肌肉

的活动程度,因此受到的干扰也很多,其拟合结果相对较差也就不难理解了。由上面的结果分析表明SMG信号具有较强的抗干扰能力,是研究骨骼肌运动形态特性的有效信号。

实验结果表明从超声图像中准确地提取出了骨骼肌的肌肉厚度变化信息,证实了超声可以准确的对运动过程中的骨骼肌空间形态变化进行观测跟踪,并能获得很多的特征信息,是研究骨骼肌运动形态特性非常有效的工具。而SEMG是研究骨骼肌的传统方法,它反映了骨骼肌的电生理特性。因此,结合SMG和SEMG以及其它相关信号对骨骼肌进行研究,可以互相补充,取长补短,从结构、运动形态、力学、电生理学等多个角度比较全面的描述骨骼肌的结构、行为和功能特性,对于研究骨骼肌有着重要的意义,对肌肉建模会起到极大的推动作用,而且具有实际的应用价值。

应用自行开发的运动与弹性测量系统可以无干扰的、同步、连续采集超声信号、角度和EMG等信号,较文献[7]有了极大的改进,摒弃了昂贵的Vicon运动捕获系统,取而代之的是通过多通道的数据采集卡来获取更多的信号,简化了实验装置,提高了性能,也使得多种信号的信号处理更为容易,而且实验结果也更为真实可靠。而从实验过程和图示结果可以发现,验证了该系统的可行性与有效性,也证明了多信号结合研究骨骼肌的特性是可行的,而且这种多信号的结合研究,也具有潜在的应用于康复工程、运动体育等领域的价值。

当然,目前的研究还不是很深入,二次多项式拟合的关系也不能完全代表肌肉厚度变化SMG和手腕屈伸角度之间的这种非线性关系。在进一步的研究中,还将进行更多的实验,对更多的部位以及相关信号进行处理,采用更多的算法分析研究这些信号和它们之间的关系,从而更全面的了解骨骼肌。

5 结论

本文通过自行开发的一套可以无干扰、同步、连续采集超声信号、力或力矩、角度、肌电信号等多种骨骼肌相关信号的超声运动与弹性测量系统,记录了手腕屈伸运动时前臂桡侧腕伸肌处的B超图像、表面肌电信号和手腕屈伸角度,实验结果表明了利用多种信号结合研究骨骼肌的特性是可行的,而且能更全面的反映骨骼肌的特性,体现了多信号结合研究的优越性。

参 考 文 献

- [1] Richard L. Lieber. Skeletal muscle structure, function, and plasticity: the physiological basis of rehabilitation[M]. Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 2nd Edition. 2002.
- [2] Misuri G, Colagrande S, Gorini M, Iandelli I, Mancini M, Duranti R, Scano G. In vivo ultrasound assessment of respiratory function of abdominal muscles in normal subjects[J]. Eur Respir, 1997, 10: 2861-2867.
- [3] Fukunaga T, Ichinose Y, Ito M, et al. Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo[J]. Journal of Applied Physiology, 1997, 82(1): 354-358.
- [4] Neil D. Reeves, Constantinos N. Maganaris, Marco V. Narici. Ultrasonographic assessment of human skeletal muscle size[J]. Eur J Appl Physiol, 2004, 91: 116-118.
- [5] Hodges PW, Pengel LHM, Herbert RD. Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging[J]. Muscle and Nerve, 2003, 27(6): 682-692.
- [6] McMeeken JM, Beith ID, Newham DJ. The relationship between EMG and change in thickness of transversus abdominis[J]. Clinical Biomechanics, 2004, 19(4): 337-342.
- [7] Mademli L, Arampatzis A. Behaviour of the human gastrocnemius 495 muscle architecture during submaximal isometric fatigue[J]. European Journal of Applied Physiology, 2005, 94(5-6): 611-617.
- [8] 施俊, 郑永平, 陈文辉, 等. 声肌图(SMG)的初步研究[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 29-33.
- SHI Jun, ZHENG Yongping, CHEN Wenhui, et al. The preliminary study of sonomyography (SMG)[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 29-33.
- [9] ZHENG Yongping, CHAN M F, SHI Jun, et al. Sonomyography: monitoring morphological changes of forearm muscles in actions with the feasibility for the control of powered prosthesis[J]. Medical Engineering and Physics, 2006, 28: 405-415.
- [10] Kuribayashi K, Shimizu S, Okimura K, et al. A discrimination system using neural network for EMG-controlled prostheses-Integral type of EMG signal processing [A]. Intelligent Robots and Systems 93, IROS 93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference[C]. 1993, 3: 1750-1755.
- [11] Zardoshti-Kermani M, Wheeler B C, Badie K, et al. EMG feature evaluation for movement control of upper extremity prostheses[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1995, 3(4): 324-333.

欢迎订阅 欢迎投稿

本刊编辑部地址: 上海市小木桥路 456 号 邮编: 200032

电话: (021) 64048159- 222 传真: (021) 64174105