

基于相关跟踪的声肌图(SMG)初步研究

施 俊¹, 郑永平², 严壮志¹, 周康源³

(1. 上海大学通信与信息工程学院生物医学工程研究所, 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: 骨骼肌的力学特性总是和它的结构形态相关的。超声可以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。文章介绍了一套可以无干扰、同步、连续采集超声信号、力或力矩、角度、肌电信号等骨骼肌相关参量的超声运动与弹性测量系统, 并基于此系统, 利用相关跟踪算法来获取前臂桡侧腕伸肌在手腕屈伸时的运动轨迹。实验结果表明, 相关跟踪算法简单、直接, 而又不失准确性, 而由相关跟踪得到的前臂桡侧腕伸肌的肌肉厚度和手腕屈伸角度之间存在着非线性的关系, 同时骨骼肌的多参量结合研究也是可行的。

关键词: 超声, 声肌图, 相关跟踪

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-01-0040-06

Preliminary research of sonomyography (SMG) based on correlation tracking

SHI Jun¹, ZHENG Yong-ping², YAN Zhuang-zhi¹, ZHOU Kang-yuan³

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

Abstract: The mechanical properties of skeletal muscles are always related to their architectural changes. Ultrasound is a useful tool to study skeletal muscle that can be used to monitor dimensional architectural changes of muscle. In this paper, ultrasound measurement of motion and elasticity system is introduced, which can synchronously and continuously acquire different kinds of data including ultrasound signals, EMG signals, angle, force, etc., without disturbance. Based on this system, the locomotory track of muscle thickness of extensor carpi radialis is obtained with a correlation tracking algorithm during wrist flexion-extension. The results show that the correlation-tracking algorithm is simple, fast, and accurate. They also prove that relation between wrist angle and muscle thickness of extensor carpi radialis is nonlinear. The study of skeletal muscle with multi-parameters is feasible.

Key words: ultrasound; sonomyography; correlation tracking

收稿日期 2005-11-07; 修回日期 2006-02-14

基金项目: 上海市重点学科建设项目资助(T0102), 上海市教委发展基金(05AZ49), 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)和香港理工大学(G-U064)

作者简介: 施俊(1977-)男, 江苏人, 讲师, 博士。研究方向: 生物医学信号、超声信号处理。

通信作者: 施俊, E-mail: junshi@staff.shu.edu.cn

1 引 言

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(pennation angle)和肌肉生理横截面积(physiologic cross-sectional area, PCSA)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。

自上个世纪三四十年代超声技术渗透到生物学、医学领域以来,超声诊断技术已经广泛的应用于生物医学的研究,临床医学的诊断。超声可以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,有研究人员开始利用超声测量肌肉厚度^[2]、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,但测量均在静态或者准静态的条件下进行的。而且只在最近才有研究超声参数和肌电信号之间关系的文献出现,但这种研究也是在静态或者准静态、有干扰、非同步的方式下进行的^[5,6],目前还很少有在无干扰、连续、同步方式下利用多参量来研究关节运动与骨骼肌结构形态变化之间的关系。

通过几年的努力,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 信号等骨骼肌相关参量的超声运动与弹性测量系统,这就使得多参量的结合研究骨骼肌特性成为可能。由于从超声信号中可以提取出有关骨骼肌运动时的结构形态方面的信息,提出了“声肌图”这一概念^[7,8]: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参量的定义。

本文将介绍这套超声运动与弹性测量系统,并基于相关跟踪算法来获取前臂桡侧腕伸肌在手腕屈伸时的运动轨迹,分析手腕关节屈伸角度和前臂桡侧腕伸肌的肌肉厚度之间的关系,同时对多参量结合研究骨骼肌进行了初步的研究。

2 互相关算法选择

在文献 [7] 中已经利用一种图像处理的算法成功地从前臂桡侧腕伸肌处采集得到的 M 超图像中获取了前臂桡侧腕伸肌的运动轨迹,并得到桡侧腕伸肌的肌肉厚度变化率 SMG 和手腕屈伸角度之间的

关系。在着一些弊端,如图像处理过程繁琐,需要多步的人为参与,受主观因素影响比较大,而且在处理过程中(如平滑、腐蚀、细化、提取)会遗失很多细节信息,特别是会丢失起止两端的部分运动轨迹信息,这就影响了桡侧腕伸肌的肌肉厚度变化率 SMG 和手腕屈伸角度之间关系的正确定量估计。因此,一种简洁有效的跟踪算法是非常必要的。

目前有多种算法可用于目标跟踪,如:形心跟踪、质心跟踪、波门跟踪、边缘跟踪、区域平衡跟踪、相关跟踪等。在众多的成像跟踪算法中,相关跟踪是基于图像的相似性度量,在当前图像中寻找最接近基准图像模板区域的一种跟踪方法。它对场景图像质量要求不高,不要求分割目标和背景,对与选定的跟踪目标图像不相似的其它一切景物都不敏感,能跟踪较小的目标以及目标区域的某一特殊部分或对比度比较差的目标,具有较强的局部抗干扰能力等特点。而且相对于文献 [7] 中的图像处理方法,使用相关法跟踪桡侧腕伸肌的运动轨迹,只需在初始帧设定追踪位置以后,就不需要人为干预,简单、直接、快速,而且保证了每一帧图像都有对应的运动轨迹数据,不会丢失任何一帧的位置信息,细节信息也更丰富。因此选择相关法进行桡侧腕伸肌的运动轨迹跟踪。

相关跟踪是将系统的基准图像在当前图像上以不同的偏移值位移,根据测量两幅图像之间的相关度函数去判断目标在当前图像中的位置,跟踪点就是两个图像匹配最好的位置,即相关函数的峰值。归一化的二维互相关系数计算公式如公式 (1) 所示:

$$R(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} [x(i, j) - \bar{X}] [y(i+m, j+n) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} [x(i, j) - \bar{X}]^2 \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} [y(i+m, j+n) - \bar{Y}]^2}} \quad (1)$$

其中 $x(i, j)$ 是基准图像模板, $y(i, j)$ 是当前目标图像, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别是基准图像模板和当前目标图像的灰度均值, $R(m, n)$ 为最大值时的 (m, n) 就是最佳匹配点位置。

3 实验装置与步骤

文献 [7] 中采用的声肌图采集系统,虽然可以准

过于庞大,数据采集繁琐,数据分析不直接,工作量大,而且采集的信号类型有限。因此,在进行实验之前,首先对实验系统进行了改进,开发了可以无干扰、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参量的超声运动与弹性测量系统。

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、装在计算机内的一块数据采集卡(PCI-6024E)和一块视频捕获卡(PCI-1411),以及自行开发的信号采集与处理软件。图1所示即为超声运动与弹性测量系统的组成框图。由B超获取的超声图像传送到视频捕获卡,由它数字化并以一定的采样率采集到计算机内;手腕屈伸角度由电角度计来测量记录,再通过数据采集卡送入计算机内;数据采集卡同时也采集SEMG信号,而由EMG采集器采集的SEMG信号,已经被10倍的放大和10-800Hz的滤波。整个数据采集过程由自行开发的软件控制,并采用多线程技术来保证B超图像、手腕角度和SEMG信号的同步。B超图像一帧接着一帧地由程序自动保存,同时每一帧B超图像伴随一个角度值和一段SEMG信号。

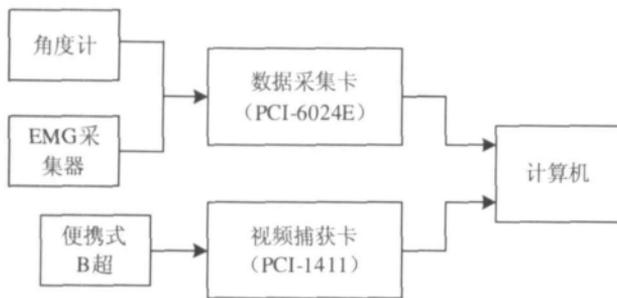


图1 实验系统原理框图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental system

7名健康志愿者加入了本次实验(6男1女,年龄26±3岁,身高:170±3.5cm,体重:62±4.7kg)均无神经肌肉病史。实验开始时,志愿者姿势舒适地坐在椅子上,前臂紧贴在桌面上,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,探头和皮肤填充大量耦合剂而保持不接触,以防止运动过程中探头对肌肉压迫影响结果。B超探头的固定通过一个改装过的三角架实现,以便能适应不同的实验志愿者。酒精清洁皮肤后,SEMG的电极对平行于桡侧腕伸肌的肌纤维方向,贴在靠近

B超探头附近的伸肌处,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,并且两端固定。图2是固定在前臂桡侧腕伸肌部位的B超探头以及电角度计示意图。试验开始后,要求志愿者在一个音频节拍器(45拍/分钟)的引导下,重复进行从手掌平放正常位置伸展到最大位置,再弯屈恢复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3个周期以上的手腕屈伸运动,每次实验之间最少休息2分钟。

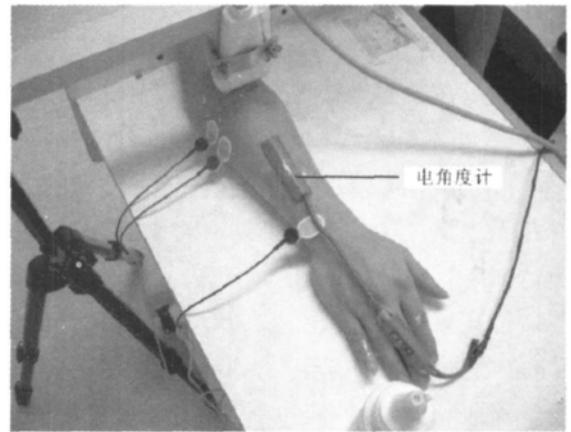


图2 前臂部分实验装置图

Fig.2 The diagram experimental setup of forearm

4 数据处理

基于自行研发的超声运动与弹性测量系统,对桡侧腕伸肌的运动轨迹进行了跟踪计算。在起始帧的B超图上添加两个矩形框选定感兴趣的区域(如图3所示),分别位于桡侧腕伸肌的前后缘,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两个矩形框内的图像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,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图像更新为新的模板,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伸肌的肌肉厚度,再按照公式(2)计算肌肉厚度变化率 ρ :

$$\rho = \frac{\Delta d - \Delta d_0}{\Delta d} \times 100\% \quad (2)$$

其中 Δd_0 为初始肌肉厚度, Δd 是当前帧肌肉厚度。

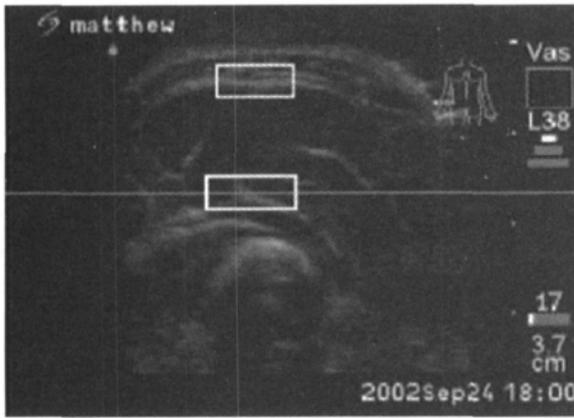


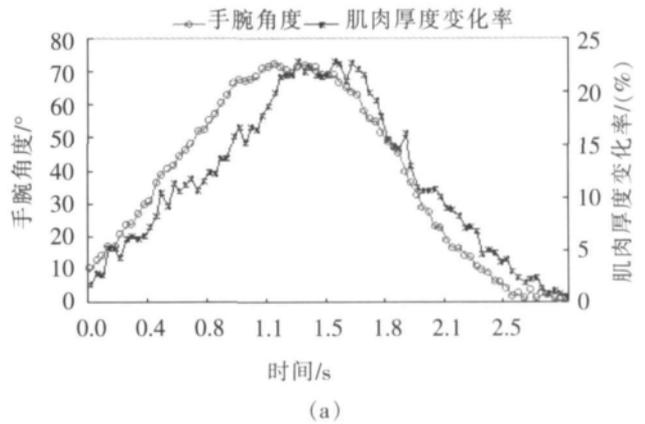
图 3 B 超图像上添加的感兴趣区域的矩形框示意图

Fig.3 The schematic diagram of the template block added in the interested areas of B-mode ultrasound image

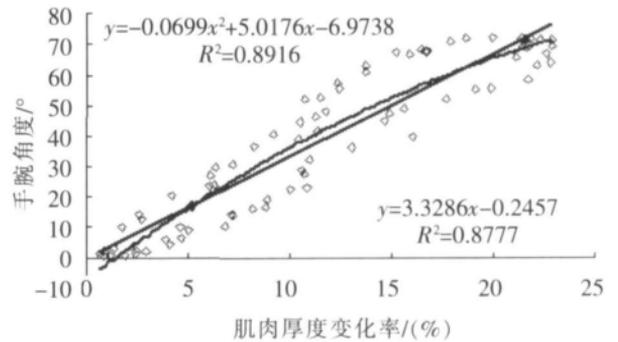
图 4(a)所示为经公式(2)计算得到的一个典型的手腕屈伸周期的肌肉厚度变化率 SMG 曲线图,图 4(a)中还显示了手腕屈伸角度曲线,所有志愿者的结果都显示了相似的形状。而图 4(b)则显示了肌肉厚度变化率 SMG 对手腕屈伸角度的关系图。比起文献[7]中由图像处理方法得到的肌肉厚度变化率 SMG,相关跟踪得到的结果更能体现细节信息,运动轨迹信息也更完整。由图 4(a)和图 4(b)的结果可以发现,手腕屈伸角度和肌肉厚度变化率之间存在着密切的关系,简单的一次线性和二次多项式回归拟合结果也已经显示在图中。

图 5 显示了分别用一次线性和二次多项式去拟合手腕屈伸角度和肌肉厚度变化率 SMG 之间关系而得到的相关系数 (R^2) 结果统计图。从图中可以发现,无论是单个个体还是平均值,二次多项式拟合得到的结果要优于一次线性拟合得到的结果,这表明手腕屈伸角度和肌肉厚度变化率之间的关系更可能是非线性关系。

由于在采集 SMG 信号和手腕角度的同时,还采集了 SEMG 信号,因此对它也进行了数据处理,计算它的均方根值(Root Mean Square, RMS),它表示信号能量。由于 SEMG 易受噪声干扰,所以对得到的 RMS 还进一步利用小波变换进行平滑处理,并根据平滑后的最大和最小值进行归一化处理。图 6 所示即为手腕角度、RMS 和肌肉厚度变化率 SMG 曲线显示在同一幅图上,所有志愿者的结果都显示了相似的形状。从图中可以发现, RMS 信号虽然已经经过了平滑处理,但是波动相对于肌肉厚度变化,还



(a)



(b)

图 4 (a)瞬时手腕屈伸角度值和肌肉厚度变化率 SMG 曲线图 (b)手腕屈伸角度对肌肉厚度变化率 SMG 的关系图

Fig.4 (a)Transient curves of wrist flexion-extension angle and the change rate of muscle deformation SMG; (b)The relationship plot of the wrist angle versus the change rate of muscle deformation SMG

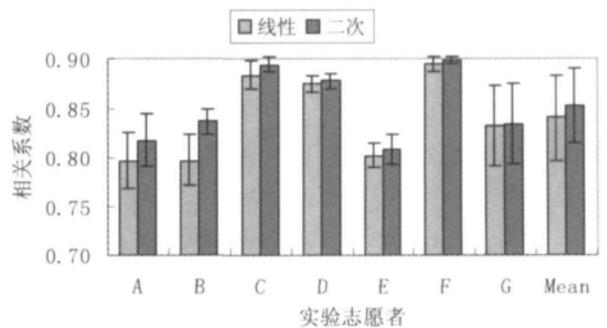


图 5 一次线性和二次多项式回归拟合的相关系数 (R^2) 结果统计图 Fig.5 The statistical result of the correlation coefficient resulted from the linear regression and quadratic polynomial regression

扰。但图中三种信号之间也有相似性,这就为多参量结合研究骨骼肌提供了可能性。

5 讨论

上文中基于相关跟踪算法对 SMG 进行了初步的研究,结果表明,相关跟踪算法简单有效,保证了

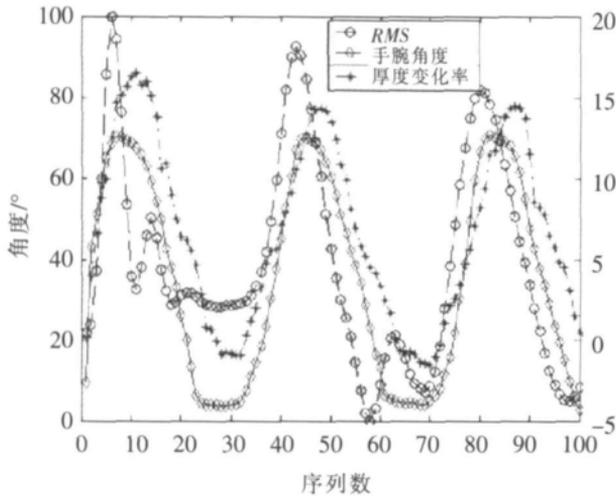


图6 手腕角度、SEMG的RMS和肌肉厚度变化率SMG曲线

Fig.6 The curves of wrist angle, RMS of SEMG and the change rate of muscle deformation SMG

数据的完整性和细节信息的可靠性,所得结果能充分反映骨骼肌的结构形态变化。

从上面的实验结果可以发现,手腕屈伸角度和前臂桡侧腕伸肌的肌肉厚度之间有着密切的关系。这种关系可以从生理学方面的角度进行解释。

骨骼肌是通过肌腱附着在骨骼上,多半附着于两块骨上,至少跨过一个关节,在神经系统的调节支配下,骨骼肌收缩时,以关节为轴,使附着的两骨产生位置变化而运动。手腕的伸展是由于前臂桡侧腕伸肌的起点对止点的牵引而引起的,这就意味着前臂桡侧腕伸肌的缩短。当支配前臂桡侧腕伸肌的神经纤维有神经冲动传来,就引起肌肉收缩变短。这种肌肉收缩变短的机制可以用滑行理论模型解释。一块骨骼肌可以被认为是具有特定的立体几何形状的肌肉。Swammerdam^[9]发现即使骨骼肌收缩或者变长,其体积是不变的,这点也已经被大家公认了。既然前臂桡侧腕伸肌的体积不变,那么由于肌纤维长度缩短,必然会使得肌肉的横截面积增大,因此,肌肉厚度增加。所以,手腕伸展时,手腕角度变大,肌肉厚度也会增加。反之亦然。推广到一般,其它关节角度和其相连的牵引骨骼肌的肌肉厚度之间也存在着相似的关系。而且由于肌肉的横截面积是不规则的,以及运动单位募集、放电等其它的一些原因,这种关节角度与肌肉厚度之间的关系应该是非线性的。而目前的初步研究结果也表明,用二次多项式拟合的结果要优于线性拟合的结果,理论解释和实验结果是一致的。但是,目前的研究结果还不能证明

与肌肉厚度之间的关系,在进一步的研究中,将进行更多的实验,研究分析这种非线性关系。另外还将把手腕伸展和弯屈这两个过程分开研究,分别选择合适的函数去拟合这两个过程中手腕角度与肌肉厚度变化率的关系,原因之一在于手腕的屈伸运动由桡侧腕伸肌与尺侧腕屈肌等肌群的共同配合完成,而桡侧腕伸肌的主要作用是伸腕,尺侧腕屈肌的主要作用是屈腕,所以桡侧腕伸肌的肌肉厚度变化与手腕角度之间的关系,在手腕的伸展和弯屈这两个过程中应略有所不同。而且肌肉在变形过程中需消耗能量,这一能量与肌肉厚度变化率曲线之间是否存在关系,也是值得研究探讨的。

目前,SEMG是研究骨骼肌力学、电生理学特性最普遍的工具,但它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)、电磁干扰等对于SEMG信号的影响。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SMG信号来讲都是不存在的,因此SMG信号是研究骨骼肌结构形态变化的有效工具,也具有应用于康复设备、体育研究的潜在价值。同时,由图(6)可以发现,利用超声运动与弹性测量系统可以同步、连续采集B超图像、SEMG信号和手腕角度,这些信号之间存在着相似性,因此多参量研究骨骼肌的特性是可行的,它们可以互相补充,取长补短,从多个角度比较全面的描述骨骼肌的特性,了解骨骼肌的内部结构形态变化与外部表现之间的关系,这将对骨骼肌的研究和应用起到极大的推动作用。在进一步的研究中,骨骼肌的多参量结合研究也将深入展开。

6 结论

本文基于超声运动与弹性测量系统,利用相关跟踪算法来获取前臂桡侧腕伸肌在手腕屈伸时的运动轨迹。结果表明,互相关法简单直接又不失准确性,而由相关跟踪得到的前臂桡侧腕伸肌的肌肉厚度变化率SMG和手腕屈伸角度之间存在着非线性的关系,同时骨骼肌的多参量结合研究也是可行的。

参 考 文 献

- [1] Lieber R L, Friden J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture[J]. *Muscle & Nerve*, 2000, 23(11): 1647-1666.

- [2] Misuri G , Colagrande S , Gorini M , et al. In vivo ultrasound assessment of respiratory function of abdominal muscles in normal subjects[J] European Respiratory Journal , 1997 , 10(12) : 2 861-2 867.
- [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] Reeves N D , Maganaris C N , Narici M V. Ultrasonographic assessment of human skeletal muscle size[J] Eur J Appl Physiol , 2004 , 91(1) : 116-118.
- [5] Hodges P W , Pengel L H M , Herbert R D , et al. Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging[J] Muscle & Nerve , 2003 , 27(6) : 682-692.
- [6] McMeeken J M , Beith I D , Newham D J , et al. The relationship between EMG and change in thickness of transversus abdomini[J] Clinical Biomechanics , 2004 , 19(4) : 337-342.
- [7] 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.
- [8] CHAN M , ZHENG Y P , CHEN X , et al. Sonomyography: sonographical analysis of morphological changes of muscles in action[A] The 11th World Congress of the International Society for Prosthetics & Orthotics[C] Hong Kong , 2004 , 229.
- [9] Jenkyn T R , Koopman B , Huijing P , et al. Finite element model of intramuscular pressure during isometric contraction of skeletal muscle[J] Physics in Medicine and Biology , 2002 , 47(22) : 4 043-4 061.



简 讯

“ 中国功率超声网 ”正式开通

由中国声学学会功率超声分会主办、广东顺德长兴超声设备有限公司协办的“中国功率超声网(www.cnglcs.com.cn)”经过半年多的试运行后,已于今年正式开通。网站作为学会与企业间的桥梁,主要目的是为功率超声专业的专家、学者和技术人员提供一个交流技术、探讨问题的平台,为超声企业提供一个展示自己的窗口,也为广大的功率超声设备用户提供一个方便而且可靠的采供渠道。网站设有学会介绍、学会会员、技术园地、超声论坛、企业库、采供平台等栏目和版块,将定期发布学会公告、前沿动态、技术资料、采供信息等等。相信“中国功率超声网”的正式开通,将会对我国功率超声事业的发展起到推动和促进作用。

陕西师范大学 鲍善惠