

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2015.16.034

· 技术与方法 ·

便携式上肢运动协调性检测系统设计* 与实现 *

盛亮 禹东川[△] 陈鸿雁 王新军 刘金双 李杨韬

(东南大学 儿童发展与学习科学教育部重点实验室 江苏南京 210096)

摘要 目的: 研究人体上肢协调性运动的相关指标,以此来检测儿童先天性发育不良以及预防老年人的协调性相关疾病等问题。**方法:** 本文设计了一种上肢协调性运动检测系统,检测被试的上肢运动状态,研究其协调性运动指标。本系统由运动感知单元、PC 机端的控制台以及协调性运动指标数据分析组成。**结果:** 利用该系统检测被试的运动协调性,给出了被试的准确性运动指标 0.23 以及协同性运动指标 0.18。**结论:** 经试验该系统对检测上肢的运动协调性有帮助,且方便携带与操作。

关键词: 运动感知;传感器;数据融合;分析方法**中图分类号:** Q-337;Q-31 **文献标识码:** B **文章编号:** 1673-6273(2015)16-3132-04

Portable Detection System Design and Implementation for the Upper Limb Motor Coordination*

SHENG Liang, YU Dong-chuan[△], CHEN Hong-yan, WANG Xin-jun, LIU Jin-shuang, LI Yang-tao

(China Key Laboratory of Ministry of Education, Child Development Learning Science, Southeast University,

Nanjing, Jiangsu, 210096, China)

ABSTRACT Objective: Researching related indicators of human upper limb coordination movement is to detect children with congenital hypogenesis and prevent the elderly from coordination-related diseases and other problems. **Method:** This paper designs a detection system for the upper limb coordination motion that detects the subjects' upper limb motion, studies coordination movement indicators. The system consists of motion sensing unit, PC-side console, and data analysis on the coordination movement indicators. **Result:** The system was used to detect the subjects' movement coordination, and to and to give the accuracy of the subjects' movement index 0.23 and 0.18 index collaborative movement. **Conclusion:** The testing proves that the system can detect the upper limb motion coordination, and is easy to carry and operate.

Key words: Motion perception; Sensor; Data Fusion; Analytical methods**Chinese Library Classification (CLC):** Q-337; Q-31 **Document code:** B**Article ID:** 1673-6273(2015)16-3132-04

前言

人体上肢协调性运动的理论及方法的研究程度越深入,其应用范围越广泛。在儿童健康成长方面,对协调性运动有缺陷的儿童进行早期诊断以及通过运动学或医学干预治疗,对改善或矫正儿童的运动协调性有重大的意义^[1]。在老年人监护治疗方面,对老年人的上肢协调性进行检测,可以及早发现老年人协调性运动问题,预防协调性相关疾病^[2]。

目前,国内外关于上肢协调性运动的神经控制机制还未完完全揭示清楚,测评体系尚未建立^[3]。当前对人体上肢协调性的研究主要是利用 Fugl-Meyer 评测量表法^[4],该量表法需要专业的医师来操作且检测项目多、复杂,每次检查的时间过长^[5]。基于此,本文研制了操作方便、检测时间短的上肢运动协调性检测

系统具有一定的应用价值。该便携式运动检测系统由可穿戴式运动感知单元、便携式运动引导界面以及数据分析单元组成。该系统能够避免现有上肢运动协调性检测方法的不足,测试结果也可以保存到数据库方便数据的存储和联网查看。

1 上肢运动协调性检测系统设计

为了检测上肢运动的协调性,我们需要采集上肢在完成动作任务过程中的数据。考虑到获取数据准确性的因素,我们的设计原则是采用有意义的、简单的实验方法来获取运动数据。检测系统设计方案如图 1 所示,系统的可穿戴式运动感知单元 (Sensors) 采集被试上肢运动数据,便携式的引导动作界面指示被试的动作任务,计算机控制界面以及数据分析单元方便了测试操作和协调性指标分析。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61273224)

作者简介:盛亮(1987-),男,硕士,研究方向:人机交互、机器学习,电话:18795958056, E-mail: shengliangcumt@163.com

△ 通讯作者:禹东川, E-mail: dcyu@seu.edu.cn

(收稿日期:2015-01-21 接受日期:2015-02-15)

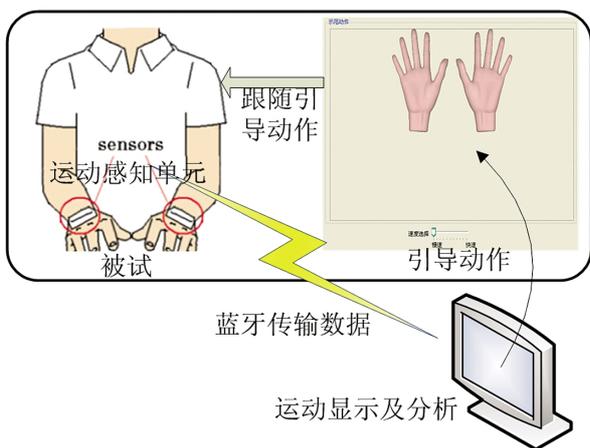


图 1 上肢协调性运动评测系统示意图

Fig. 1 Upper limb movement coordination evaluation system diagram

可穿戴式运动感知单元主要由加速度传感器、陀螺仪以及地磁传感器组成，传感器组用来实时感知被试的上肢运动信息。引导动作在控制界面中实现，被试跟随引导动作做正反手翻转动作任务^[6]。被试在跟随引导动作做运动产生的运动信息由这些传感器实时的将数据传输到 PC 机端进行数据处理，最后完成协调性运动指标的分析。

1.1 穿戴式运动感知单元的设计

基于对模拟电路、PCB 设计以及对电磁兼容特性的研究，设计出了便携式运动感知单元的硬件设备。运动感知单元由陀螺仪传感器 (ITG-3200)、加速度传感器 (LIS3DH) 和地磁传感器 (HMC5883) 形成传感器组，通过处理器 STM32F103 (Cortex-M3) 对采集到的运动数据进行预处理，经蓝牙发送数据到 PC 机端^[7]。底层用 STM32F103 基于 ST 库编写各器件的驱动代码、FIR 数字滤波^[8]以及数据传输代码^[9]。在 PC 机端编写了控制界面并处理可穿戴式运动感知单元传输来的运动数据，在

PC 机端可以实时显示上肢运动的运动曲线。该上肢运动检测系统的运动感知单元结构设计如图 2 所示。

1.2 引导动作的控制界面设计

为了方便做上肢运动的检测研究，设计了系统的引导动作控制界面，它主要完成控制任务以及数据处理、显示等。下面我们来介绍一下上肢运动检测系统的界面设计，控制界面如图 3 所示。

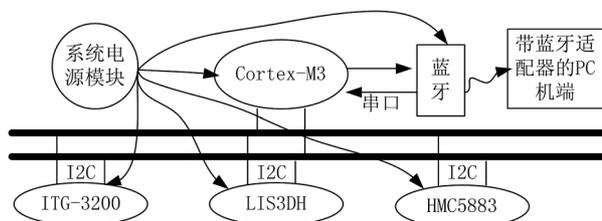


图 2 运动感知单元的设计结构

Fig. 2 Motion sensing unit design structure

图 3 为系统的引导动作控制界面在运行状态下的测试界面。左边的上下两个框图区域可以实时显示左右上肢的运动曲线。界面的右边是一个运动示范单元，它是运动检测系统做测试的引导动作，该示范动作的速度可以调节，被试跟随引导动作来做运动，可穿戴式运动感知单元采集运动数据，利用采集的运动数据来分析被试的上肢协调性状况。检测系统的下方是一些控制按键，点击“退出测试”按键，该界面就会自动关闭。点击“暂停传输”按键，此时运动感知单元会停止数据的发送，控制界面会处于暂停状态。点击“同步传输”按键，右边的运动范式和左右上肢的运动感知单元会协同工作，同时实验时间也将开启计时工作。点击“数据分析”按键，将会给出上肢运动数据的分析结果。

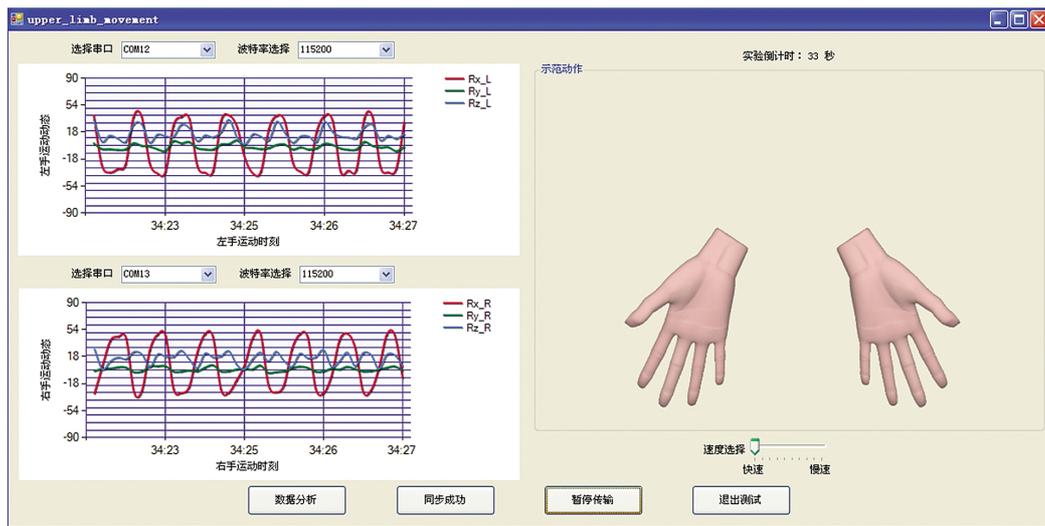


图 3 引导动作的控制界面设计

Fig. 3 Motion control interface design guide

图 3 中的示范动作区是运动检测系统的动作任务设定单元，它由 48 幅不同运动位点的图片组成，该组图片是利用 3Dmaya 制作软件建模设计而成的^[10]。每个时间点触发一张图

片，由定时器来触发图片的切换，这样的设计便于上肢动作任务次数的设定，方便实验方案的调整。

运动数据同步设计的作用是在示范动作开启时，同时实现

左右前臂运动信息的采集、动作任务的开始执行以及对上肢运动数据的同步存储。同步实现机制如图 4 所示。

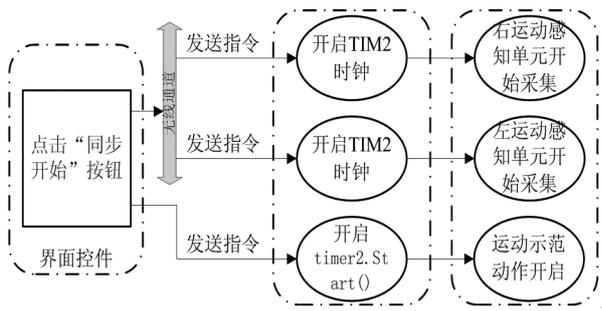


图 4 左右上肢数据同步设计实现机制

Fig. 4 Left and right upper limb data synchronization design and implementation of mechanism

图 4 中, TIM2 是运动感知单元的核心芯片 STM32 中的定时器, 该定时器开启时, 运动感知单元就开始了采集运动数据。Timer2.Start() 是 PC 机端示范动作执行的时钟, 开启这个时钟后, 示范动作区就开始了动作引导, 同时也开启了上肢运动的数据存储。界面上的这个“同步开始”按钮主要执行以上几个任务来实现同步操作的。

界面设计主要基于 Winform 平台来设计的, 运动感知单元采集的运动数据通过蓝牙设备将数据传输到 PC 机端, 应用程序通过读串口来获取数据。界面上所有控件的具体功能实现都是利用 C# 来编写的, 界面设计尽量做到简洁、易操作的目的。

1.3 上肢运动协调性的数据分析

1.3.1 上肢运动的数据融合算法 被试左右前臂各携带的运动感知单元中含有一组传感器, 为了准确的检测出被试上肢的实时运动信息, 我们需要对加速度传感器、陀螺仪以及地磁传感器产生的各轴向数据进行融合。加速度传感器检测的是加速度信号, 它对机械振动以及噪声比较敏感^[11]。陀螺仪检测的是旋转, 它对机械振动的干扰影响很小, 但自身容易漂移^[12]。地磁传感器检测的是磁场变化, 它与前两者的干扰源不同。考虑到这些因素我们需要对这三个传感器采集的轴向数据进行数据融合, 以期得到更加准确的数据。通常的方法是对变化较快的信号乘上相对小一些的权重系数, 这样可以削弱突变信号对整体产生的影响^[13]。

基于上述分析, 本文定义反应上肢运动的融合向量为 $Rs\tau(n)$, 利用加权算法得到:

$$Rs\tau(n) = \frac{R_{acc} + R_{gyro} * W_{ay} + R_{hmc} * W_{ah}}{1 + W_{ay} + W_{ah}} \quad (1)$$

其中: $Rs\tau(n) = [R_{st}^x, R_{st}^y, R_{st}^z]^T$ 为融合向量, $R_{acc} = [R_{acc}^x, R_{acc}^y, R_{acc}^z]^T$ 为三轴加速度传感器输出向量, $R_{gyro} = [R_{gyro}^x, R_{gyro}^y, R_{gyro}^z]^T$ 为三轴陀螺仪输出向量, $R_{hmc} = [R_{hmc}^x, R_{hmc}^y, R_{hmc}^z]^T$ 为三轴地磁传感器输出向量; 加速度传感器的加权系数为 1, 陀螺仪的加权系数为 W_{ay} , 地磁传感器的加权系数为 W_{ah} , W_{ay} 和 W_{ah} 的取值根据经验确定在 5-20 之间^[14]。

为进一步提高计算的鲁棒性本文对融合向量作进一步归一化处理, 得到反映上肢运动的归一化融合向量 $R\tau(n)$ 。最后, 需要标准化融合后的各轴向向量, 标准化方法如下:

$$R\tau(n) = \frac{Rs\tau(n)}{\sqrt{Rs\tau(n)^T * Rs\tau(n)}} \quad (2)$$

其中: $R\tau(n) = [R\tau^x(n), R\tau^y(n), R\tau^z(n)]^T$ 。由于被试左右手臂携带的运动感知单元的硬件组成是一样的, 所以数据处理方法也是一致的。经过上述数据融合处理以后, 我们就可以得到相对准确的左右手臂的运动数据融合向量 $R\tau_L(n)$ 和 $R\tau_R(n)$, 利用这些运动数据可用来分析和评测被试的上肢运动协调性。

1.3.2 协调性运动的分析算法 对被试的上肢协调性运动数据分析中, 我们主要考察指标有以下几项: 指标一、考察被试能否准确跟踪动作任务以及跟踪示范动作运动时的节拍是否一致^[15]。分析被试双手运动过平衡零轴的时间与动作任务运动过平衡零轴的时间均值差。被试在完成动作任务时准确性分析值 K 如下:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_{Li}^\alpha - t_i^\beta| + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_{Ri}^\alpha - t_i^\beta| \quad (3)$$

其中, t_{Li}^α 和 t_{Ri}^α 为左右手第 i 次分别过平衡零轴的时刻点, t_i^β 为示范动作过第 i 次平衡零轴的时刻点, n 为示范动作过平衡零轴的总次数。

指标二、分析被试在双手运动时, 双手的协同运动指标^[16]。双手协同运动反映左右手之间对称运动的细微差异。双手各自运动感知单元采集的运动数据经过融合算法后计算 X 轴向的相位差, 通过此相位差参量来得到这个指标, 协同性分析值 λ 如下:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\theta_{Li}^\tau - \theta_{Ri}^\tau| \quad (4)$$

其中, θ_{Li}^τ 和 θ_{Ri}^τ 为左右手第 i 次分别过平衡零轴时刻点时的相位, n 为示范动作过平衡零轴的总次数。

为简化计算, 我们只考虑双手运动曲线由正值向负值运动经过零点轴时称为过平衡零轴。

1.3.3 检测方法 基于上述的算法分析, 我们设计了以下三种检测模式来检测被试的上肢运动协调性。

模式 1: 被试左右手一同跟随引导动作做翻转手臂运动, 每分钟做 63 次, 测试时间为 1 分钟。

模式 2: 被试左右手一同跟随引导动作做翻转手臂运动, 每分钟做 125 次, 测试时间为 1 分钟。

模式 3: 将 1)、2) 项测试时间延长至 2 到 3 分钟。

1.3.4 基线校准 被试佩戴运动感知单元处于静止状态下, 观察实时运动曲线中 X、Y 和 Z 轴输出的曲线是否都共线于平衡零轴(基线), 若有偏移就需要做基线对准。对准方法是: 通过自动校正程序将各轴输出值减去基线偏移值。

2 测试结果

下面是某被试在模式 2 检测方法下的测试结果。如 5 图所示为该被试的左手经过融合后的轴向运动曲线, 右手运动曲线类似此图。

图 5 中, 横轴为当前运动的实时时间, 纵轴为该被试左手运动的融合向量 $R\tau_L(n)$ 在 X、Y 和 Z 轴的运动分量曲线。从图 5 中不难看出, 经过数据融合算法处理后的运动数据获得了

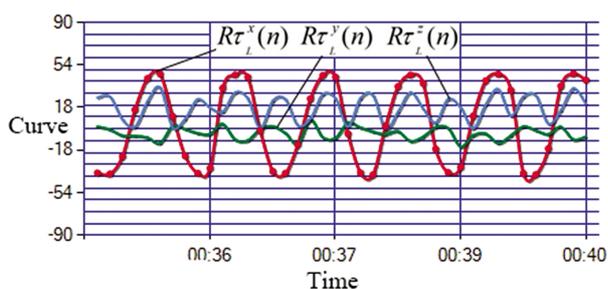


图5 被试的左手运动曲线

Fig. 5 Subjects Left hand motion curve

比较光滑的运动曲线。双手的运动数据经过融合后就可以计算和分析上肢运动协调性指标了。

按照公式(3)和(4)计算准确性和协同性指标,为了方便分析运动协调性,我们把准确性值 κ 以及协同性值 λ 归一化到0-1之间^[7],在控制界面出点击"数据分析"按钮将给出本次被试在测试方法为模式2下的运动分析结果显示:1号被试的准确性运动指标为0.23,协同性运动指标为0.18。准确性值 κ 越小,表示被试跟随示范动作运动的节拍性越好,双手跟随运动的误差越小。协同性值 λ 越小,表示被试上肢对称运动的差异性越小。通过这两个指标可以反映出被试上肢运动协调性的基本状况了。

上面,利用该系统对一个健康的(26岁)被试做了检测以及给出了检测结果,该测试结果反映了被试的上肢协调性情况。为了使测试者的测试结果有意义,我们需要对大量的、同年龄段的、健康的被试做测试,对测试结果进行一次筛选,去掉那些不合理的、有错误的测试数据。然后,我们对这些测试数据取个均值,这个均值就是我们要得到的在相同年龄段内的上肢协调性"常模"。这个常模代表着上肢运动协调性正常的人的测试数据值,在以后的检测中我们把被试的测试结果与这个常模做对比,就会考察出该被试的运动协调性状况了。这种方法可以很快的检测出那些先天性发育不良或上肢协调性有缺陷的人。

该系统也可以用来检测有注意力缺陷多动障碍(ADHD)的儿童^[8]。首先我们需要建立儿童的协调性运动准确性常模以及协同性常模。然后利用该系统来计算儿童在做动作任务时的运动数据,得到的准确性运动指标和协同性运动指标与常模做对比,这样就能发现儿童的运动缺陷问题了。为了科学的检测ADHD儿童,还需要借助Fugl-Meyer评测量表检测的数据,以此数据和系统检测的数据做关联性分析,这样可以对被试的协调性研究作综合性的分析。

3 结论

人体协调性运动研究既是技能学习、行为科学、运动控制等众多学科的基础理论问题^[9],在儿童技能发展和运动训练等领域具有很大的应用空间。本文针对Fugl-Meyer评测量表法检测人体上肢运动协调性的不足,而提出并设计了便携式运动协调性检测系统,该系统具有携带方便、检测时间短、运动协调性分析结果指标化的特点。因此,该系统具有一定的应用前景和价值。通过此检测系统的设计来进一步研究上肢运动的协调性,这有助于检测有注意力缺陷多动障碍(ADHD)的儿童,及早

发现先天性发育不良以及小脑的共济失调的儿童,这对儿童早期进行医学治疗提供了一定的科学依据^[10]。

参考文献(References)

- [1] 花静,蔡康,古桂雄,等.发育性协调障碍儿童的运动控制缺陷[J].中国心理卫生杂志,2008,22(3):170-174
Hua Jing, Cai Geng, Gu Gui-xiong, et al. Sports developmental coordination disorder control deficiencies [J]. Chinese Journal of Mental Health, 2008, 22(3): 170-174
- [2] Arampatzis A, Peper A, Bierbaum S. Exercise of mechanisms for dynamic stability control increases stability performance in the elderly [J]. Journal of biomechanics, 2011, 44(1): 52-58
- [3] 李阳. 1999-2009年我国人体运动协调研究综述[J]. 贵州体育科技, 2010, (1): 50-53
Li Yang. 1999-2009 Review of coordination of human movement[J]. Guizhou Sports Science, 2010, (1): 50-53
- [4] Wang J, Yu L, Wang J, et al. Automated Fugl-Meyer Assessment using SVR model [C]//Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), 2014 IEEE International Symposium on. IEEE, 2014: 1-4
- [5] 王景丽,李亮,郝磊,等.基于遗传算法和极限学习机的Fugl-Meyer量表自动评估[J]. 计算机应用, 2014, 34(3): 907-910
Wang Jing-li, Li Liang, Yu Lei, et al. Automatic assessment is based on genetic algorithms and extreme learning machine Fugl-Meyer Scale[J]. Computer Applications, 2014, 34(3): 907-910
- [6] Johnson P W, Jonsson P, Hagberg M. Comparison of measurement accuracy between two wrist goniometer systems during pronation and supination [J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2002, 12(5): 413-420
- [7] Friedman R, Kogan A, Krivolapov Y. On power and throughput tradeoffs of wifi and bluetooth in smartphones[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2013, 12(7): 1363-1376
- [8] Tsao Y C, Choi K. Area-efficient parallel FIR digital filter structures for symmetric convolutions based on fast FIR algorithm [J]. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, 2012, 20(2): 366-371
- [9] Hu Y, Zhang Y, Xu C, et al. Self-powered system with wireless data transmission[J]. Nano Letters, 2011, 11(6): 2572-2577
- [10] Liu S, Zhang H B. Parsing of 3 ds Data File Provided by Three Dimensional Modelling Software 3 ds Max [J]. Dalian Minzu Xueyuan Xuebao (Journal of Dalian Nationalities University), 2012, 14(3): 260-264
- [11] 冯智勇,曾瀚,张力,等.基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量①[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011(4):137-141
Feng Zhi-yong, Zeng Han, Zhang Li, et al. Measured on a gyroscope and accelerometer signal integration posture angle ① [J] Southwest China Normal University (Natural Science), 2011(4): 137-141
- [12] Xu X, Teng F, Zhang C, et al. Investigation of polarization nonreciprocity in dual-interference fiber optical gyroscope[J]. Optical Review, 2014, 21(5): 486-489
- [13] 赵翔,杜普选,李虎,等.基于MEMS加速度计和陀螺仪的姿态检测系统[J].铁路计算机应用,2012,21(3):15-18
Zhao Xiang, Du Pu-xuan, Li Hu, et al. MEMS-based accelerometers and gyroscopes gesture detection system [J]. Railway Computer Applications, 2012, 21(3): 15-18

- [26] Kirchhoff SR, Gupta S, Knowlton AA. Cytosolic heat shock protein 60, apoptosis, and myocardial injury [J]. *Circulation*, 2002, 105(24): 2899-2904
- [27] Rocnik E, Chow LH, Pickering JG. Heat shock protein 47 is expressed in fibrous regions of human atheroma and is regulated by growth factors and oxidized low-density lipoprotein [J]. *Circulation*, 2000, 101(11): 1229-1233
- [28] Iliodromitis E K, Karavelias G K, Botilis E, et al. Enhanced Protection of heat shock in myocardial infarction: Inhibition of detrimental Effect of systemic hyperthermia [J]. *Cardiovasc Drugs Ther*, 1999, 13(3): 223-231
- [29] Baljinnnyam E, Hasebe N, Morihira M, et al. Oral pretreatment with ebselen enhances heat shock protein 72 expression and reduces myocardial infarct size[J]. *Hypertens Res*, 2006, 29(11): 905-913
- [30] Hampton CR, Shimamoto A, Rot hnie CL, et al. HSP70. 1 and -70. 3 are required for late phase protection induced by ischemic preconditioning of mouse hearts[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2003, 285(2): H866-H874
- [31] 宋伟,张玲,马艳红,等.热休克蛋白 70mRNA 表达上调对兔心房快速起搏电重构的影响[J]. *心血管康复医学杂志*, 2011, 20(1): 05-09
- Song Wei, Zhang Ling, Ma Yan-Hong et al. Effects of up regulated expression of heart shock protein 70 mRNA on electrical remodeling induced by rapid atrial pacing in rabbits[J]. *Chin J Cardiovasc Rshabil Med*, 2011, 20(1): 05-09
- [32] Tup ling AR, Bombardier E, Vigna C, et al. Interaction between Hsp70 and the SR Ca²⁺ pump: a potential mechanism for cytoprotection in heart and skeletal muscle [J]. *Appl Physiol NutrMetab*, 2008, 33 (5): 1023-1032
- [33] Ficker E, DennisAT, Wang L, et al. Role of the cytosolic chaper ones Hsp70 and Hsp90 in maturation of the cardiac potassium channel HERG[J]. *Circ Res*, 2003, 92(12): e87-100
- [34] Giffard RG, Han RQ, Emery JF, et al. Regulation of apoptotic and inflammatory cell signaling in cerebral ischemia: the complex roles of heat shock protein 70[J]. *Anesthesiology*, 2008, 109(2): 339-348
- [35] Kumar Y, Tatu U. Stress protein flux during recovery from simulated ischemia; induced heat shock protein70 confers cytoprotection by suppressing JNK activation and inhibiting apoptotic cell death [J]. *Proteomics*, 2003, 3(4): 513-526
- [36] 鲍宏刚,张卫泽,马凌,等.谷氨酰胺诱导热休克蛋白 70 高表达可抑制大鼠心房纤维化及缝隙连接蛋白 43 重构 [J]. *中华心血管病杂志*, 2013, 41(4): 320-326
- Bao Hong-gang, Zhang Wei-ze, Ma-Ling et al. Effects of glutamine induced heat shock protein 70 overexpression on atrial fibrosis and connexin43 remodeling in isoprenaline-treated rats[J]. *Chin J Cardiol*, 2013, 41(4): 320-326
- [37] 张卫泽,鲍宏刚,马凌,等.谷氨酰胺与缬沙坦对大鼠心房纤维化及缝隙连接蛋白 43 重构的影响 [J]. *中华心律失常学杂志*, 2013, 17(2): 97-102
- Zhang Wei-ze, Bao Hong-gang, Ma-Ling et al. Effects of glutamine and valsartan on atrial fibrosis and connexin43 remodeling in rats[J]. *Chin J Cardiac Arrhyth*, 2013, 17(2): 97-102
- [38] Wakisaka O, Takahashi N, Shinohara T, et al. Hyperthermia treatment prevents angiotensin II -mediated atrial fibrosis and fibrillation via induction of heat-shock protein 72[J]. *J Mol Cell Can*; lid, 2007, 43(5): 616-626
- [39] St Rammos K, Koullias GJ, Hassan MO, et al. Low preoperative HSP70 atrial myocardial levels correlate significantly with high incidence of postoperative atrial fibrillation after cardiac surgery [J]. *Cardiovasc Surg*, 2002, 10(3): 228-232
- [40] Mandal K, Torsney E, Poloniecki J, et al. Association of high intracellular, but not serum, heat shock protein 70 with postoperative atrial fibrillation [J]. *Ann Thorac Surg*, 2005, 79(3): 865-871
- [41] Gong J, Jing L. Glutamine induces heat shock protein 70 expression via O-GlcNAc modification and subsequent increased expression and transcriptional activity of heat shock factor-1 [J]. *Minerva Anestesiol*, 2011, 77(5): 488-495
- [42] Lindemann G, Grohs M, Stange EF, et al. Limited heat-shock protein 72 induction in Caco-2 cells by L-glutamine [J]. *Digestion*, 2001, 64(2): 81-86

(上接第 3135 页)

- [14] 张杰. 基于 MEMS 陀螺仪和加速度计的动态倾角传感器[J]. *机械设计与制造*, 2012 (9): 141-143
- Zhang Jie. Dynamic tilt sensor based MEMS gyroscopes and accelerometers[J]. *Mechanical design and manufacturing*, 2012(9): 141-143
- [15] M Kreulen, M J Smeulders, H E Veeger, et al. Three-dimensional video analysis of forearm rotation before and after combined pronator teres rerouting and flexor carpi ulnaris tendon transfer surgery in patients with cerebral palsy [J]. *J Hand Surg Br*, 2004, 29(1):55-60
- [16] Wang Y Q, Chen H F, Zeng L. Evaluation of Causal Influences in Model of Motor Control in Left Hands Movement-Readiness State[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 195: 418-423
- [17] Gouwanda D, Arossha Senanayake S M N. Identifying gait asymmetry using gyroscopes-A cross-correlation and Normalized Symmetry Index approach[J]. *Journal of biomechanics*, 2011, 44(5): 972-978
- [18] Cortese S, Kelly C, Chabernaud C, et al. Toward systems neuroscience of ADHD: a meta-analysis of 55 fMRI studies [J]. *American Journal of Psychiatry*, 2012, 169(10): 1038-1055
- [19] Ashburn A, Kampshoff C, Burnett M, et al. Sequence and onset of whole-body coordination when turning in response to a visual trigger: Comparing people with Parkinson's disease and healthy adults[J]. *Gait & posture*, 2014, 39(1): 278-283
- [20] Cooper W O, Habel L A, Sox C M, et al. ADHD drugs and serious cardiovascular events in children and young adults [J]. *New England Journal of Medicine*, 2011, 365(20): 1896-1904