

# 一种基于统计学判别分析的 老人摔倒检测算法的研究\*

金纯<sup>1,2</sup>, 尹远阳<sup>1†</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院无线传输重点实验室, 重庆400065; 2. 重庆金瓯科技发展有限公司, 重庆400041)

**摘要:** 针对传统通过阈值来确定老人摔倒检测算法中的不足和视频检测中容易泄露隐私等缺点, 提出了一种基于统计学判别分析的跌倒检测算法。该算法主要通过实验分析来提取行为的特征值并建立特征向量空间, 然后利用采样值与行为特征值空间的距离来判断匹配该行为是否为跌倒状态空间的值, 同时在算法中提出以智能机器人作为辅助检测的思想。最后通过实验验证了该算法具有较好的鲁棒性。

**关键词:** 跌倒检测算法; 统计学; 微电子; 传感器; 机器人

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)01-0089-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.020

## Old man fall detection algorithm research based on discriminant analysis of statistical

JIN Chun<sup>1,2</sup>, YIN Yuan-yang<sup>1†</sup>

(1. Wireless Transmission Key Laboratory, School of Communication & Information Engineering, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Jinou Science & Technology Development Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

**Abstract:** In view of the shortcoming of the old man fall detection based on threshold algorithm and detection method based video is easy to leak privacy, this paper proposed a decision analysis fall detection algorithm based on statistics. The algorithm extracted the behavior of the characteristic value and established the characteristic vector space mainly through the experiment, then used the sampling values and behavior characteristics of space distance to determine whether the behavior matched the falling value of the state space. At the same time, the algorithm introduced the idea of intelligent robot as auxiliary detection. Finally, through the experiment shows that the algorithm has good robustness.

**Key words:** fall detection algorithm; statistics; microelectronics; sensor; robot

随着微电子机械系统(micro electro mechanical system, MEMS)的发展,无线传感技术的进步和物联网的兴起,智能家居、智能远程医疗、智慧城市的相继提出,而且在“十二五”规划中我国明确提出“感知中国”的口号,进一步促进了我国无线传感及物联网领域的发展。而世界人口正走向老龄化,老年人的摔倒问题将成为世界性的一个难题。据医疗调查显示:摔倒导致的死亡成为我国人口死亡率的第四大因素,超过33%的社区老人和超过60%的养老院的老人平均每年都会发生一次摔倒,预计2030年“空巢老人”家庭所占比例将会达到90%<sup>[1]</sup>。那么如何提高老人的健康生活,为老年人群提供便利的医疗服务,在繁忙的工作中了解老人的生活动态,是近年来研究的一个热点课题。如果能正确对老人的日常生活进行看护,这将对远程医疗的发展具有重要意义,同时能大大提高医疗工作的效率。

### 1 对现有的摔倒检测算法的分析

无线通信技术的发展使远程医疗<sup>[2]</sup>成为了可能,相应的一些有关自主检测摔倒并进行报警的设备装置也相继问世。

最常见的方法就是通过采集人体运动时的线加速度及角速度并通过实验设定其阈值来检验所携带装置者是否发生跌倒<sup>[3-5]</sup>。目前拥有的摔倒检测系统及相关算法可以分为三种<sup>[6]</sup>:基于视频的摔倒检测系统、基于声学的摔倒检测系统和基于穿戴式的摔倒检测系统。在这三种摔倒检测系统中,第一种是通过在固定场所安装多个摄像头来捕捉人体的运动画面,运用图像处理算法来确定是否存在具有摔倒的图像特征。例如加拿大的Rougier等人<sup>[7]</sup>设计的通过在监测者家中安装视频摄像头,利用计算机视觉系统提供一种分析人体姿态的解决方案,他们通过将运动过程与人的形态变化相结合的方法,探测被监测者是否发生了摔倒。但这种系统的缺点是因为摄像头安装在固定的位置只能进行定点的检测,而人体是一个运动体,当监测体离开摄像头所能达到的范围时就无法正常检测摔倒行为的发生,同时该系统容易泄露被监测者的个人隐私。第二种是通过震动声音<sup>[6]</sup>特征来判断是否摔倒。由于环境的复杂性和多种声音的干扰同时安装复杂,该系统无法精确地判断出是否摔倒,一般只能作为辅助式的检测。另外,基于穿戴式<sup>[3,8]</sup>的摔倒检测系统是指嵌入微型控

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-05-20 基金项目: 国家科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目(11C26215113536)

作者简介: 金纯(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为无线通信、计算机软件、物联网等;尹远阳(1986-),男(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、无线通信等(yinyuanyang8888@163.com)。

制型的传感器设备。该种设备可以自由地穿戴在被检测人身上实现实时全天候地监测人体活动,当人体运动发生变化时通过算法来判断是否发生了摔倒。文献[8]采用三轴加速度传感器采集数据,计算三轴与重力加速度的夹角来确定姿态位置,并通过卡尔曼滤波算法来提高精度。文献[9]运用压力传感器做成鞋垫的形式,通过对压力的感测来判断老人是否跌倒。文献[10]采用了将多种传感器结合在一起最后通过阈值和摔倒前后的心率变化进行检测,虽然能取得较好的效果,但多传感器的携带在一定程度上会增加老人的心理负担,同时算法也变得复杂。

本文提出了一种基于统计学判别分析的摔倒检测算法,算法中对采集到的加速度数据进行处理,进一步通过计算得到人体倾角角度的变化,同时通过测量分析人体摔倒时的近似能量变化情况,通过多次实验取得摔倒过程中参数的平均值作为摔倒特征向量空间。

## 2 跌倒过程的特征信号的采集与处理

### 2.1 人体运动特征模型的建立

加速度是反映物体运动变化的最好参考量,而加速度传感器能够满足对加速度的数据采集。针对人体的运动模型,可以把人体抽象为一个刚体,建立模型如图 1 所示。

由图 1 可知,  $x, y, z$  彼此垂直,因此空间上任意矢量的变化都可以通过这三个向量基进行合成,如式(1)所示。

$$a = xi + yj + zk \tag{1}$$

其中:  $a$  代表空间任意向量,  $i, j, k$  分别为  $x, y, z$  上的单位矢量。人体运动时三轴的加速度传感器就会产生相应的变化。由文献[8]可知,人体加速度幅值矢量(sinnal magnitude vector, SVM)的变化可以很好地描述人体运动的剧烈程度。SVM 的计算公式如式(2)所示。

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \tag{2}$$

如果三轴上的加速度已知,可以通过式(3)计算出人体的姿态角度变化的正弦值。假设  $x, y$  与地面平行,  $z$  垂直地面,具体表示如图 1 所示,人体位置与重力方向的夹角设为  $\theta$ ,则

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{|a|} \tag{3}$$

其中:  $|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ 。由于只需确定人体姿态的变化,所以在本文中无须算出具体的角度值,只需算出初始状态和摔倒后的角度正弦函数的差值即  $\sin \theta_2 - \sin \theta_1$  来衡量人体倾角变化即可。同时也可以通过陀螺仪测量人体角度的变化进一步校正由加速度传感器所测量计算的角度值。

本文对人体的几种行为进行了实验,通过对采集的数据进行处理并计算实验过程中各种行为的加速度幅度值(SVM)绘制如图 2 所示的曲线图,纵坐标的单位是  $g$ ,其图中标注了各种行为的活动幅度值:(a)向前摔倒;(b)向后摔倒;(c)侧向摔倒;(d)往高凳子上坐下;(e)往比较低的凳子上坐下;(f)下蹲;(g)正常行走;(h)下楼梯;(i)上楼梯;(j)跳;(k)快速跑。在老年人群中一般都不会有剧烈的运动,假设在运动过程中加速度传感器采集数据的时间设为  $(0, T)$ ,由于摔倒时加速度值会有一个瞬变过程,因而导致该时间段内的瞬时能量相应会增大,在本文中采用的是各轴加速度与时间围成的面积和来近似地表示运动过程中能量的变化<sup>[11]</sup>。三轴加速度测量运动能量

消耗如式(4)所示。

$$V = \frac{1}{T} (\int_0^T |a_x| dt + \int_0^T |a_y| dt + \int_0^T |a_z| dt) \tag{4}$$

其中:  $V$  近似代表所消耗能量。结合式(2)~(4)计算得到的值,经过多次测量后再由统计分析取各值的平均作为本文算法设计的特征向量值。

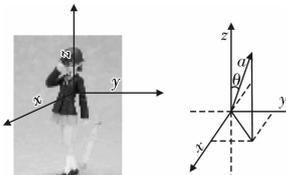


图 1 人体运动模型

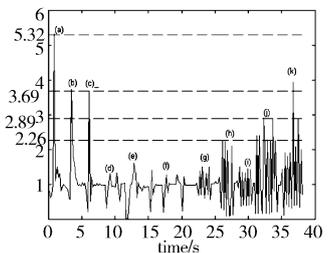


图 2 人体活动行为的合加速度曲线

### 2.2 硬件的选择

通过 2.1 节中建立的人体三维模型和相关分析并结合传感器的工作方式,本设计中采用的是美国 InvenSense 公司生产的 MPU6050 三轴数字加速度陀螺仪传感器来采集人体的运动数据。该传感器是全球第一款整合三轴陀螺仪与三轴加速度器于单一芯片,且具有超低功耗,可在不同电压模式下工作,测量模式下电流低至 3.6 mA,待机模式下为 5  $\mu A$ ,用户可选的分辨率 10 位固定、13 位全分辨率,支持加速度可测范围为  $\pm 2 g, \pm 4 g, \pm 8 g$  与  $\pm 16 g$ ,分辨率随着  $g$  的范围提高而提高。芯片寄存器管理采用的是 FIFO 技术,可以将主机处理器负荷降至最低。信号采集预处理的基本模块框图如图 3 所示。该芯片的数据采集模块与蓝牙无线传输模块相连接,通过无线传输可以减少布线的复杂性和增加用户使用该装置的自由度,减少老人的心理负担。该芯片内部将采集的数据通过 I<sup>2</sup>C 协议传输给蓝牙发射模块,再通过与电脑连接的蓝牙适配接收模块接收所采集的用户运动数据供单片机和 PC 处理与分析。通过多次实验发现佩戴在人体的腰部是最理想的,因为腰部相对而言是运动变化幅度最小,同时能满足用户佩戴方便的要求。

## 3 算法的设计思想

### 3.1 算法的思想概述

数理统计就是研究如何有效地收集、整理和分析受随机因素影响的数据,对所考察的问题作出推断,进而为制定决策和采取行动提供科学依据。本文算法设计就是运用该思想进行设计的。因统计模式识别就是通过把识别对象抽象地表示成由一些特征值构成的特征向量,这些特征向量就能代表某种动作或者某种特定的行为特征,因此把模式类可以看成由多个特征相似的模式组成一个集合。在该集合中可以提取一些特征数值构成特征向量来代表一种模式类,再通过特征空间对各种模式进行分类,这样就可以达到识别的效果。统计识别算法可以用较小的特征量来描述一个对象的行为,在一定程度上降低了模型的复杂度。在老人摔倒中有向前摔倒、向后摔倒、左侧摔倒、右侧摔倒,同时还有日常活动如走路、上下楼、坐下等一系列的动作。为此可以将行为分为摔倒和日常行为两种。在本文中主要研究的是对摔倒情况进行统计分类,可以根据统计学中的距离判别来确定定义样品指标  $X$  的观测值  $x$  ( $n$  维)到

各总体的距离,以其大小来判定观测样品属于哪个总体。因此本文的算法思想就是基于统计确定样品特征值向量,然后根据距离判别的方法来实现摔倒检测。摔倒的平面分类如图 4 所示。在三维空间每种活动行为就是一个立体空间,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  分别表示不同的摔倒特征类型。

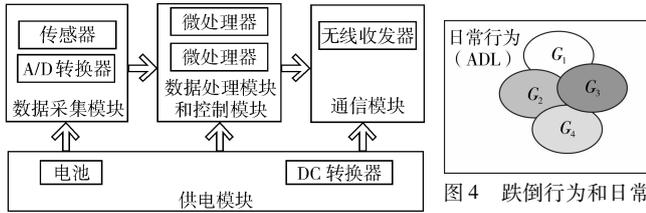


图 3 信号采集处理模块框图

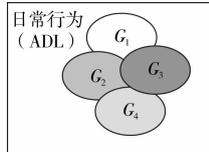


图 4 跌倒行为和日常活动的分类

### 3.2 算法设计方法

在本算法设计中主要分为两大类,一类是摔倒事件,一类是日常生活 (ADL) 事件 (走路、上下楼、坐下) 等日常行为。本文主要研究的是摔倒事件,除了摔倒外其他都认为是日常生活行为。摔倒事件又可以分为  $G_1$  (向前摔倒)、 $G_2$  (向后摔倒)、 $G_3$  (右侧摔倒)、 $G_4$  (左侧摔倒) 四类。样本值是统计通过 30 次实验后的样本特征值如 2.1 节所示的方法求出各种类型的特征值再取平均。本算法采用三维特征值组成一个样本空间,样本值的数学期望向量分别是  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ , 协方差矩阵为  $\Sigma_1$ 、 $\Sigma_2$ 、 $\Sigma_3$ 、 $\Sigma_4$ 。定义三维观测向量  $x$  到总体样本  $G_i$  的马氏距离为

$$u_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_k^i = \bar{x}^{(i)} \quad i=1 \sim 4; k=1 \sim n \quad (5)$$

$$d(x, G_i) = [(x - u_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - u_i)]^{\frac{1}{2}} \quad i=1 \sim 4 \quad (6)$$

通过式 (6) 可以得到各个样本空间的距离,而在上述实验中经过统计平均的方式设定每种行为的特征距离阈值,如果所求出的距离满足式 (7),则可以确定该观测值属于该样本空间。由文献 [12] 知道两个概念的差异程度越大,就具有越小的相似性;当两个概念不存在差异点,即当两个概念相同时,具有最大的相似性 [12],所以两个相似度越近的样本,它们的距离就会越接近。

$$\min_{1 \leq k \leq 4} \{d^2(x, G_k)\} \leq d^2(x, G_i), \text{ 则判定 } x \in G_i, \text{ 其中 } i=1 \sim 4 \quad (7)$$

该算法主要分成五步,第六步主要是提出引入机器人作为辅助检测的思想,通过机器人辅助检测来进一步提高算法检测跌倒的正确率。

a) 建立特征向量库。通过实验对摔倒事件进行分类统计,并计算出各种行为的特征空间的距离阈值。

b) 截取可疑信号。监测人体运动的数据变化,如果出现可疑信号,则提取该信号出现的前后 3 s 内的信号进行处理。

c) 提取特征向量值。截取的信号通过前述方法计算出各特征值作为观测特征向量。

d) 计算观测特征向量与特征库样本的距离。

e) 进行模式匹配。通过计算的特征空间距离来确定是否属于该空间范围。如果匹配成功,则判断为摔倒,并进行报警,持续时间 30 s,在 30 s 内可以人为取消。

f) 家庭服务机器人辅助检测。当机器人收到摔倒时的报警信号后,机器人对其进行定位处理,并到室内事发现场进行拍照发送。如果在 30 s 内报警信号取消,则机器人不需要对其进行辅助检测。

具体详细算法流程如图 5 所示。

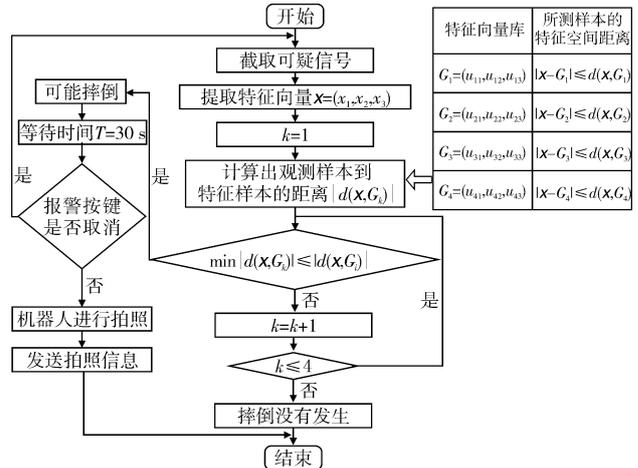


图 5 算法设计流程

### 4 实验

为了验证本算法的有效性,本文进行了相关实验。实验对象 1 人,年龄 26 岁,身体健康。分别进行了向前摔倒 10 次、向后摔倒 10 次、左侧摔倒 10 次、右侧摔倒 10 次,日常行为活动 60 次。通过多次实验总结,将加速度传感器数据采集模块佩戴在腰间,并通过在该传感器上集成的蓝牙无线传输模块将采集到的数据传送到 PC 机对数据进行辅助处理,最终完成实验。在实验中为了防止实验对象发生意外情况,在地面上垫了一层 10 cm 的海绵垫。对实验进行了统计分析,实验结果如图 6(a) 和 (b) 所示。结合文献 [9] 中的算法,本文算法通过不同行为活动来检测,具体实验结果如图 7 所示。通过分析可知,本文的跌倒检测算法能获得较高的准确率。

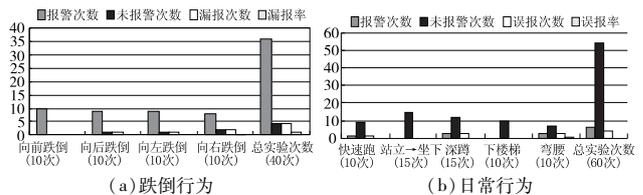


图 6 实验结果

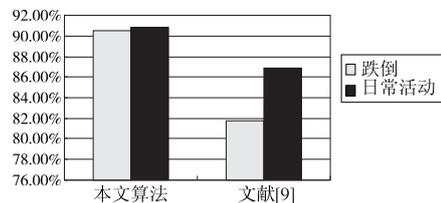


图 7 采用不同算法的实验结果

### 5 结束语

本文通过对算法进行分析,提出了一种基于统计学的判别分析的摔倒检测算法,并将该算法通过对日常生活动作和跌倒动作进行统计分类,确定各自的特征空间,采用距离来进行相似度的判断,从而确定行为所属的特征空间来检测老人跌倒行为。最后通过实验进行了验证,表明该算法具有较高的准确率。当摔倒时该装置可以报警,也可以通过网络服务器将人体姿态数据传送给远程云端医疗,这对远程医疗服务的发展具有重要意义。同时该算法可以通过采集更多的训练样本数据来提高准确度。

智能家居的发展给家庭服务机器人带来了 (下转第 94 页)

c)利用第二个观测信号与第一个观测信号的 LP 等式进行自相关;d)经过推导得到角频率的精确估计值。

### 3 仿真实验

为了更直观地评价本文算法的参数估计性能,本文先给出频率参数  $\omega_0$  无偏估计所能达到的最小方差,即克拉美—罗下限。对实正弦信号,在相位、幅值和频率三个参数均未知情况下,频率估计方差的 CRLB 为  $\text{var}\{\hat{\omega}\} = 12/[N(N^2 - 1)\text{SNR}]$ 。仿真时采样样本长度  $N = 200$ ,采样周期  $T = 8$  s,采样频率  $f_s = 25$  Hz/s,频率  $f_0 = 1$  Hz/s,幅值  $A = 1$ ,初相位  $\varphi_0 = \pi/6 = 0.5236$  rad,角频率  $\omega_0 = 0.08\pi = 0.2513$  rad/s。其中均方误差定义为:  $\text{MSE} = E\{(x - \hat{x})^2\}$ ,其中  $E$  为期望。图 1 分别显示了本文算法和 TSA1、TSA2 频率估计法的频率均方误差以 SNR 为自变量的函数。通过观察可知 TSA2 估计性能最好,TSA1 估计性能相对较差,而本文算法在效果上逼近 TSA2 算法。

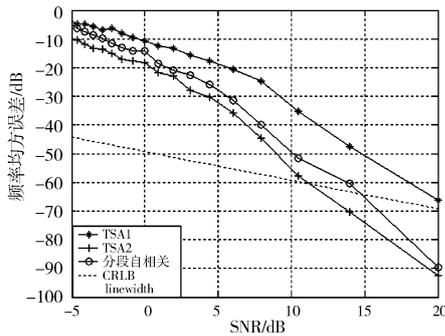


图 1 对比 TSA1、TSA2 和分段自相关算法的估计性能

最后,检查算法的复杂度,将分段自相关算法与文献[9]中的算法进行比较,所得结果如表 1 所示。

表 1 三种算法的计算复杂度

方法	加/减	乘
TSA1	$4mN - 8m^2 + 2m - 16$	$2mN - 4m^2 + 2m - 3$
TSA2	$2NM^2 + M^2 - \frac{8M^3}{3} - 32N + 224$	$NM^2 + M^2 - \frac{4M^3}{3} - \frac{26M}{3} - 16N + 104$
分段自相关	$N^2 - 6k + \frac{N}{2} - 3$	$3m^2 - mk - k^2 + 8$

### 4 结束语

针对加性高斯白噪声背景下观测信号,本文提出了分段自

(上接第 91 页)新的发展领域。在该算法中提出以机器人作为辅助检测,能进一步提高跌倒检测的结果,同时也能更直接地观察事情的现状,为老人摔倒后及时得到救援的远程医疗提供更好的服务。机器人辅助检测功能的具体实现将在后续工作中完成。

#### 参考文献:

[1] 杨冬叶,赵勇. 我国空巢老年人的现状与对策[J]. 现代临床护理,2004(5):60-62.

[2] 佟丽娜,宋全军,葛运建. 基于时序分析的人体摔倒预测方法[J]. 模式识别与人工智能,2012,25(2):273-279.

[3] LI Qiang, STANKOVIC J A, HANSON M A, et al. Accurate fast fall detection using gyroscopes and accelerometer derived posture information [C]//Proc of the 6th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks. 2009:138-143.

[4] BOURKE A K, LYONS G M. A threshold based fall detection algorithm using a bi-axial gyroscope sensor[J]. Medical Engineering & Physics, 2008, 30(1):84-90.

相关频率估计算法,解决了 TSA 算法估计性能和计算量不能兼顾的缺点。仿真实验和表 1 给出了本文算法与 TSA1、TSA2 性能及计算量的比较,可以直观地看到本文提出的算法可以在计算量较小的情况下逼近 TSA2 的性能,弥补了 TSA1 改进后带来的计算量增加的问题。

#### 参考文献:

[1] RIFE D C, BOORSTYN R R. Single-tone parameter estimation from discrete-time observation[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1974, 20(5):591-598.

[2] RIFE D C, VINCENT G A. Use of the discrete Fourier transform in the measurement of frequencies and levels of tone [J]. Bell System Technical Journal, 1970, 49(2):197-228.

[3] 王宏伟,赵国庆,齐飞林. 一种实时精确的正弦波频率估计算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2):208-211.

[4] 王宏伟,赵国庆. 正弦波频率估计的改进 Rife 算法[J]. 信号处理, 2010, 26(10):1573-1576.

[5] QUINN B G. Estimation of frequency, amplitude, and phase from the DFT of a time series[J]. IEEE Trans on SP, 1997, 45(3):814-817.

[6] 张英龙,刘渝,王旭东. 基于频移修正的奎因频率估计算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(5):597-600.

[7] 谢胜,陈航,于平,等. 基于 Quinn 算法和相位差法的正弦波频率估计综合算法[J]. 信号处理, 2011, 27(5):771-775.

[8] 齐国清. 几种基于 FFT 的频率估计方法精度分析 [J]. 振动工程学报, 2006, 19(1):86-92.

[9] TUFTS D, FIORE P. Simple, effective estimation of frequency based on Prony's method [C]//Proc of IEEE International Conference on Speech, and Signal Processing. [S. l.]: IEEE Press, 1996: 2801-2804.

[10] LUI K, SO H C. Improved variant of Pisarenko harmonic decomposition for single sinusoidal frequency estimation [J]. IEICE Trans on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2007, 90(11):2604-2607.

[11] CHAN K, SO H C. An exact analysis of Pisarenko's single-tone frequency estimation algorithm [J]. Signal Processing, 2003, 83(3):685-690.

[12] LUI K, SO H C. Modified Pisarenko harmonic decomposition for single-tone frequency estimation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(7):3351-3356.

[13] RIM E K, HICHEM B, ROBERTO L V, et al. Frequency estimation of real-valued single-tone in colored noise using multiple autocorrelation lags [J]. Signal Processing, 2010, 90(7):2303-2307.

[14] LUI K, SO H C. Two-stage autocorrelation approach for accurate single-sinusoidal frequency estimation [J]. Signal Processing, 2008, 88(7):1852-1857.

[5] NOURY N, RUMEAU P, BOURKE A K, et al. A proposal for the classification and evaluation of fall detectors [J]. IRBM, 2008, 29(6):340-349.

[6] LUO Su-huai, HU Qing-mao. A dynamic motion pattern analysis approach to fall detection [C]//Proc of IEEE International Workshop on Biomedical Circuits & Systems. 2004:53-56.

[7] ROUGIER C, MEUNIER J, ST-ARNAUD A, et al. Monocular 3D head tracking to detect falls of elderly people [C]//Proc of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference. 2006: 6384-6387.

[8] 王荣,章韵,陈建新,等. 基于三轴加速度传感器的人体跌倒检测系统设计与实现 [J]. 计算机应用, 2012, 32(5):1450-1453.

[9] 石欣,熊庆宇,雷璐宁,等. 基于压力传感的跌倒检测系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3):715-720.

[10] 薛源,高向阳. 基于多传感器信息融合的跌倒监测系统的设计 [J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2011, 33(5):712-716.

[11] 朱国忠,韦彩虹,潘敏. 基于三维加速度传感器的人体运动能耗检测算法的研究 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(8):1217-1221.

[12] 刘欣荣,阳光. 一种改进的基于加权模型的概念相似度计算方法 [J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(2):13-17.