

基于惯性传感的穿戴式跌倒预警防护系统

姚冕^{1,3} 马英楠² 高星² 靳宗振² 李慧奇³ 宁运琨³ 赵国如³

¹(武汉理工大学信息工程学院 武汉 430000)

²(北京城市系统工程研究中心 北京 100035)

³(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘要 针对老人跌倒伤害预防的社会难题,设计了一种穿戴式跌倒预警和防护系统,该系统包括跌倒预警器、安全气囊装置、远程监护平台和监护人手机应用程序。当跌倒发生时,跌倒预警器会触发安全气囊快速充气,以减少老人跌倒后所受到的损伤。老人倒地后,跌倒预警器会报警,并发送短信给监护人求助。同时,跌倒过程人体运动学数据会发送到远程监护平台,并显示跌倒事件发生的位置。最后通过实验验证该跌倒预警和防护系统功能的可靠性。结果表明,该系统可以较准确地检测跌倒,完成跌倒预警报警、气囊快速充气、数据传输和存储、监护平台实时定位等一系列功能,对减少老年人跌倒的直接损伤和缩短救助老人的时间有一定帮助。

关键词 跌倒预警;防护气囊;惯性传感器;短信求助;实时定位

中图分类号 R 318.08 **文献标志码** A

A Wearable Pre-impact Fall Early Warning and Protection System Based on Inertial Sensor

YAO Mian^{1,3} MA Yingnan² GAO Xing² JIN Zongzhen² LI Huiqi³

NING Yunkun³ ZHAO Guoru³

¹(Department of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

²(Beijing Research Center of Urban System Engineering, Beijing 100035, China)

³(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract Aimed at the fall issues of the aged, a wearable pre-impact fall early warning and protection system which consists of an early fall alarm, protection airbags, a remote monitoring platform and a guardian's smart phone application was developed. When fall happens, the early fall alarm triggerd airbag system, then airbags in belt inflated as soon as possible to reduce the damage to the aged. After the aged fall down, the early fall

收稿日期: 2015-04-25 修回日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51105359, 61401454); 国家科技支撑计划(2015BAI06B02); 国家863计划(2012AA02A604); 广东省创新团队(2011S013 GIRTF-LCH-T); 国家科技重大专项新一代宽带无线移动通信网(2013ZX03005013); 广东省科技计划国际合作项目(2012B05020004); 北京市科学技术研究院市级财政(PXM2014178215000015)

作者简介: 姚冕, 硕士研究生, 研究方向为信息采集、传输与处理; 马英楠, 副研究员, 研究方向为安全工程、公共安全; 高星, 助理研究员, 研究方向为安全工程、公共安全; 靳宗振, 研究实习员, 研究方向为老年安全和公共管理; 李慧奇, 工程师, 研究方向为高精度人体运动测试和低负荷运动健康监测; 宁运琨, 工程师, 研究方向为运动监测与识别; 赵国如(通讯作者), 副研究员, 研究方向为高精度人体运动测试和低负荷运动健康监测, E-mail: gr.zhao@siat.ac.cn.

alarm rang and sent message to guardian for help. Meanwhile, the kinesiology data during falling time was sent to remote monitoring platform for storage, and falling location was showed in the electronic map. Finally, the reliability of this early fall alarm and protection system was verified. The results indicate that this system could detect falls accurately, accomplish a series functions such as early fall warning and alarm, airbag inflation, data transmission and storage and real-time location, which may be beneficial to reduce direct damage and shorten rescue time.

Keywords pre-impact fall early warning; protection airbags; inertial sensor; message for help; real-time location

1 引言

随着全球老龄化的加剧和老年人口的增多，老年人的身心健康问题成为我们亟需关注的问题。因身体机能下降等原因，老年人发生跌倒的概率非常高。据估计，每年约有 1/3 的 65 岁以上老年人发生过跌倒^[1-3]，而且比例随着年龄增长而增加。相关资料表明，很多因跌倒造成的死亡并非直接源自跌倒本身，而是在跌倒后没有得到及时救治造成的^[4]。针对老年人易跌倒的情况，除了事先预防，更重要的是尽可能地减少跌倒损伤，并且在跌倒后及时通知家人或监控中心从而缩短救助时间。

近年来，许多学者对跌倒预警和报警进行了研究，一般有三种方式：基于视频的，基于环境的，基于可穿戴设备的^[5]。其中基于视频的方法容易侵犯用户隐私；基于环境的方法设备不易安装；而基于可穿戴设备的方法，方便可行成本低，能够保持较高的准确性，具有更广阔的应用前景^[6]。

以往的老人跌倒相关的可穿戴设备或只有报警求助功能，或只具备跌倒伤害的防护功能^[7]，而本文设计的一套跌倒预警和防护系统旨在全方位解决老年人跌倒的一系列问题。在老人做可能导致跌倒的危险动作时进行预警，通过微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)惯性传感器获得人体三轴加速度、三轴姿态角的运动

学信息并运用跌倒检测算法检测出跌倒；在人体跌倒时启动安全气囊保护跌倒最易受到伤害的髌部，同时报警并发送信息给监护人；跌倒前后的运动学数据信息也将发送到监控中心数据库，可供跌倒算法的处理和分析，传感器中的 GPRS 模块会传递位置信息到监控中心并在地图中显示出来。

2 系统架构

整个跌倒预警和防护系统主要由跌倒预警器、防护气囊、远程监控平台和监护人手机组成，如图 1 所示。跌倒预警器和防护气囊集成在一个可穿戴的腰带上，如图 2 所示。

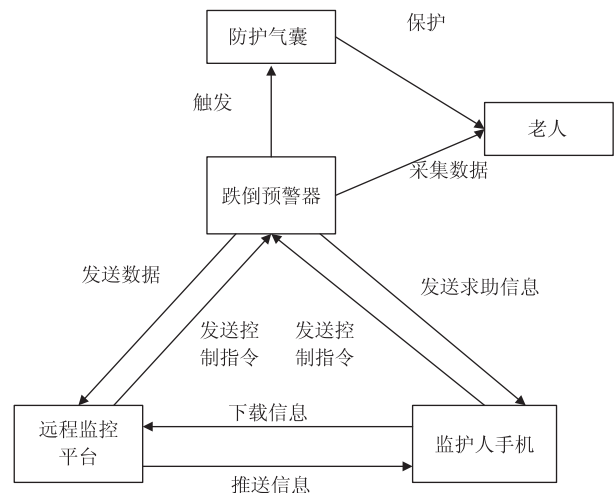


图 1 跌倒预警与防护系统框图

Fig. 1 Block diagram of the early fall warning and protection system

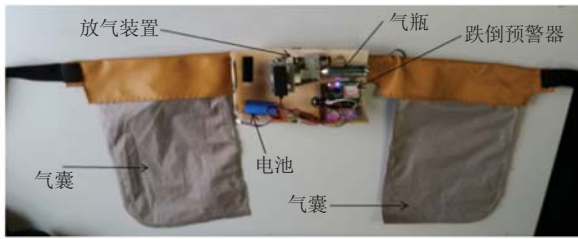


图 2 跌倒预警与防护腰带

Fig. 2 The early fall warning and protection belt

2.1 跌倒预警器设计

跌倒预警器是系统的核心部分, 其系统框图如图 3 所示, 实物如图 4 所示。

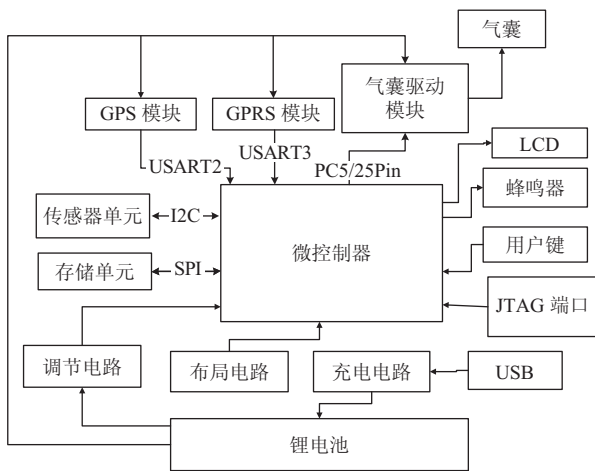


图 3 跌倒预警器系统框图

Fig. 3 Block diagram of the early fall alarm

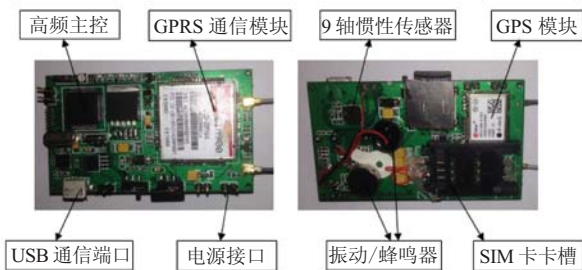


图 4 跌倒预警器实物图

Fig. 4 Picture of real early fall alarm

跌倒预警器主要由以下几个模块组成:

(1) 微控制器模块: 微控制器是整个预警器的核心, 具有实时信息传输的系统功能^[8]。本

设计中采用了基于 32 位 ARM Cortex-M4 内核的 STM32 F405RG 作为微控制器, 采用自适应实时存储器加速器 (Adaptive Real-Time Memory Accelerator, ART) 技术, 集成了单周期 DSP 指令和 FPU (浮点单元), 时钟频率高达 168 MHz, 1 MB 的闪存, 192 KB 的 SRAM 包含 64 KB 的数据内存; 含有 14 个定时器, 包括 2 个高级控制定时器、8 个通用定时器、2 个基本定时器和 2 个看门狗定时器; 包含 3 个 SPI、3 个 I2C、4 个 USART 和 2 个 UART。

(2) 传感器模块: 该传感器可以采集人体的运动学数据, 具有九轴数据融合功能, 能够提供多个非惯性数字传感器接口, 使得多参数多模态监测成为可能。采用的 MEMS 惯性传感器为 MPU9150, 它是 InvenSense 公司提供的世界首款九轴集成运动追踪器件, 整合了三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计, 输出精度分别为 16 bit、16 bit、13 bit。加速度可选的满量程范围有 $\pm 2 g$ 、 $\pm 4 g$ 、 $\pm 8 g$ 和 $\pm 16 g$; 陀螺仪可选的满量程有 $\pm 250^\circ / \text{sec}$ 、 $\pm 500^\circ / \text{sec}$ 、 $\pm 1000^\circ / \text{sec}$ 和 $\pm 2000^\circ / \text{sec}$; 磁力计的为 $\pm 1200 \mu\text{T}$ 。相对于采用分立器件, MPU9150 减少了占用空间, 降低了成本。封装尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 体积小, 噪音低, 性能高, 满足便携式设备的要求。

(3) GPS 模块: 选用了 UBLOX 公司性价比较高的 NE0-6M-0-001GPS 模块, 体积小, 灵敏度高, 含有 50 个通道的 u-blox 引擎, 可同时追踪多达 50 颗卫星, 热启动和辅助启动首次定位时间小于 1 s ^[9], 并拥有 UART、SPI、USB 等接口, 方便与微控制器建立连接。该模块供电电压设为 3 V, 上电后, GPS 模块通过串口 UART1 与 MCU 通讯, 两者的 TXD 和 RXD 引脚交叉相连即可。

(4) GPRS 模块: 采用内嵌有 TCP/IP 协议的 SIM900 作为 GPRS 模块, 该模块是 SIMCOM

推出的一款新型无线四频 GSM/GPRS 模块，功耗低，在待机模式下功耗只有 1.0 mA；采用 ARM926EJ-S 架构，性能强大；支持标准的 AT 命令并带有基站定位功能。SIM900 模块通过 UART0 接收 MCU 发送的 AT 指令，进而实现一系列的功能，两者的 TXD 和 RXD 引脚交叉相连即可^[10]。

跌倒预警器内置蜂鸣器、振动器和三色（青、蓝、红）LED 灯。其中蜂鸣器可以用来预警，当人体姿态向前、后、左、右倾斜的角度超过 40°，蜂鸣器就会按照一定频率连续地响，同时用红灯和蓝灯来区分是往前后方向还是往左右方向倾斜。当加速度和倾斜角均超过一定阈值时，就判断为跌倒，此时，青灯长亮、蜂鸣器长鸣。如果在设定的时间（8 s）内，用户没有按下解除报警键，那么将给监护人发送报警短信，告知发生跌倒，并且在判定跌倒的同时，预警器会触发防护气囊系统启动以保护用户。

跌倒预警器内置了复杂的状态信息提醒和命令操作功能，通过 USB 接口可以控制预警器的工作模式（实时运动监测模式、远程定位和跟踪模式、跌倒关键数据和历史运动轨迹数据上传模式），控制 TF 卡的读写，连接和断开服务器、重启 GPRS 模块等。

在实时运动检测模式下，跌倒预警器把实时运动数据存储到 TF 卡；在远程定位和跟踪模式下，跌倒预警器会把日常生活运动轨迹和运动参数等数据存到 TF 卡；在数据上传模式下，跌倒前后几秒钟的运动数据、定位信息、用户信息、电压值等通过 GPRS 网络上传到监控平台服务器，发生跌倒时，数据上传模式会自动开启。

跌倒预警器实现了三种命令和数据传输接口，分别是预警器端的 USB 接口、监护人端的短信接口和服务器端的 GPRS 网络接口。在获得权限的情况下，可以对预警器进行全方位的操控。

2.2 防护气囊系统设计

气囊系统要满足安全可靠，便于携带，经济实惠的条件，才能真正用于有跌倒风险的老年人身上，才能据市场需求进行大规模生产，给老年人带来福音。

本文设计的防护气囊系统主要由气源、放气机构、三通接头和气囊构成，各部分之间由聚氯乙烯（Polyvinyl Chloride, PVC）气管连接，如图 5 所示。气源储存了一定体积的压缩气体，放气机构在收到放气信号后能够在极短时间内把气源里的气体通过三通接头充入两个气囊。

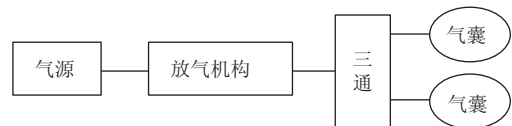


图 5 防护气囊系统设计框图

Fig. 5 Block diagram of protection airbag system design

本设计选用了 16 g 二氧化碳（CO₂）气瓶作为气源。CO₂ 本身是惰性气体，不可燃不易爆，相对安全。该气瓶是将 CO₂ 经过精制、压缩、冷却液化、灌装而制成的，在救生衣、啤酒机、便携式气筒等设备上已有广泛应用，市场上容易购买。同时，16 g CO₂ 气瓶还能满足压力大、放气快，气量合适的特点，可作为防护气囊系统的气源^[11]。

放气装置由电动舵机控制，该装置主要由接头、底座、刺针、连接杆、复位弹簧、电动舵机构成。当电动舵机收到微处理器发出的电信号后立即转动舵机摇臂，并带动直线连杆和凸轮连杆从而推动刺针在空腔内直线前进，同时压缩复位弹簧，当刺针前进到一定距离后就能刺破压缩气瓶瓶口。而当电动舵机转动到一定角度后立即反向转动，带动舵机摇臂、直线连杆、凸轮连杆迅速返回到初始位置，此时刺针会在接头内部空腔的复位弹簧作用力下返回初始位置，气体就可以从刺针刺破的瓶口快速放出，从而实现自动放气^[9]。该放气装置结构示意图如图 6 所示，实物图如图 7 所示。

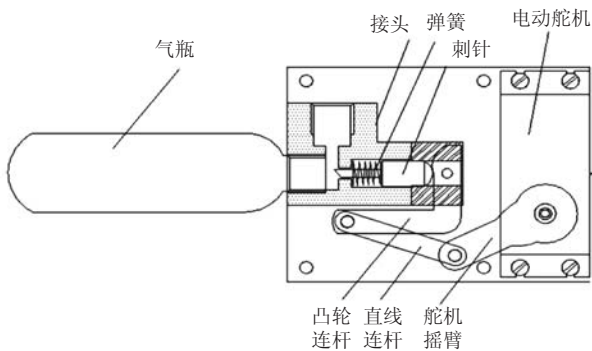


图 6 放气装置结构图

Fig. 6 Structure chart of the air bleeder



图 7 放气装置实物图

Fig. 7 Picture of the real air bleeder

该设计的气囊在不充气时尺寸为 $33\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$, 充满气体时尺寸约为 $30\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 12\text{ cm}$, 即最大充气体积为约为 9 L , 足够储存 16 g CO_2 (在标准大气压下的体积约为 8.14 L)。测试结果表明触发放气装置 300 ms 后气囊完全展开, 在 540 ms 时气囊充满。在 380 ms 时气囊已经充入了超过 80% 的气体, 此时形成一个尺寸约 $30\text{ cm} \times 26\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的缓冲层, 基本可以达到保护目的。

2.3 远程监护平台设计

整个 web 监控平台采用 B/S 架构, 网站的浏览器端及后台管理以 PHP 为开发语言、Apache 为服务器、MySQL 为存储数据库。基于 PHP 的 Web 远程监测与定位系统整体构架如图 8 所示。

远程监控平台主要有以下功能:

- (1) 接收和存储跌倒预警器传回的数据
远程监控平台能通过 GPRS 网络接收跌倒

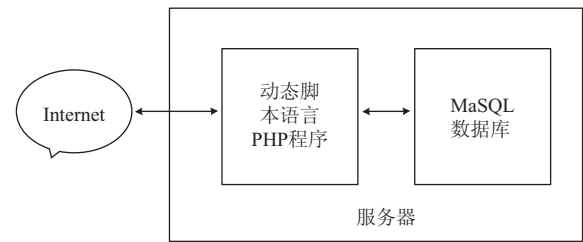


图 8 监控平台架构

Fig. 8 Architecture of the monitoring platform

预警器按照约定的协议格式和固定时间间隔发回的 GPS 定位信息 (主要是经纬度、高度、速度、实时时间、方向信息), 以及传感器获得的运动监测信息 (如老年人的身体加速度、角速度信息, 跌倒预警报警信息、紧急呼叫等) 和基本数据信息 (如终端编号、个人基本信息等)。收到数据包后, 对包内数据按照协议规定的格式进行解析, 并按照数据表和 ER 模型存储到数据库当中。

- (2) 向跌倒预警器和监护人手机发送数据

监控平台可对跌倒预警器发送控制指令 (如终端参数配置、终端某些功能的关闭和开启), 还可对监护人手机进行基于短信的各种信息推送, 同时监护人也可以登录到监控平台下载用户的跌倒信息、身体健康状况和行踪信息等数据。

- (3) 提供地图服务

① 用户位置实时定位: 当前位置信息主要有三种展现方式, 一是在地图上直接展现, 标注老年人当前所处的位置; 二是文字描述老年人当前的位置信息; 三是直接显示老年人的经纬度信息。所走过的 GPS 位置在地图上通过一条轨迹连接起来, 监护人或者系统管理者可以根据用户注册信息获取定位信息^[12]。用户位置实时定位图如图 9 所示。

② 用户行踪历史轨迹回放: 用户或管理员登录平台选取所查询终端轨迹的时间起止节点, 平台就向数据库发送数据请求, 数据返回给平台客户端, 用户行踪历史轨迹信息便可在地图上显示

出来。考虑系统效率和实际工作管理要求, 轨迹回放最长的时间间隔为 7 天。用户历史轨迹回放如图 10 所示。

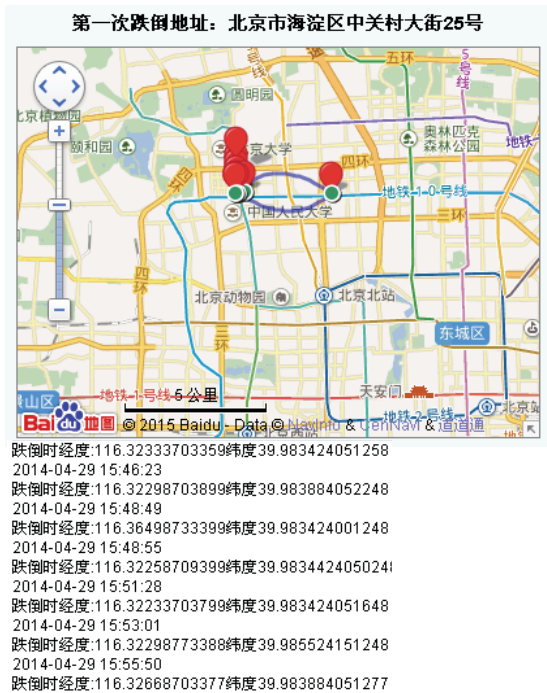


图 9 用户位置实时定位图

Fig. 9 User's real-time location



图 10 用户历史轨迹回放图

Fig. 10 Replay of user's historical track

3 实验和算法设计

孙新香等^[13]研究表明合加速度 (Acc) 能够用来区分跌倒行为和日常行为。为了能够实现跌中防护, 给安全气囊展开留出时间, 有必要提高检测的灵敏度和特异度。本设计提出了基于姿态角、俯仰角 ($Pitch$ 角), 并在俯仰角大于设定阈值的基础上再判断加速度的跌倒报警算法。计算公式如 (1) 所示:

$$Acc = \sqrt{Acc_x^2 + Acc_y^2 + Acc_z^2} \quad (1)$$

其中, Acc_x 、 Acc_y 、 Acc_z 是三轴加速度计在 x 、 y 、 z 轴三个轴向的输出信号。

为了将跌倒与日常行为区别开来, 由 8 名年龄在 23~26 岁的志愿者在实验室对老年人的行为进行了模拟测试。实验时将该预警防护终端束在腰部 (如图 11 所示), 执行动作包括日常动作 (如慢走、慢跑、上下楼梯、下蹲) 和跌倒动作 (如前向跌倒、后向跌倒、左向跌倒和右向跌倒)。上述行为各测试 3 次, 合加速度与姿态角、俯仰角的测试结果分别如图 12 和图 13 所示。



图 11 实验者佩戴跌倒预警与防护腰带

Fig. 11 Experimenter wearing fall warning and protective belt

通过分析图 12 发现, 当进行走、跑、上下楼梯和下蹲动作时, $Pitch$ 角基本上无变化, 在 0°

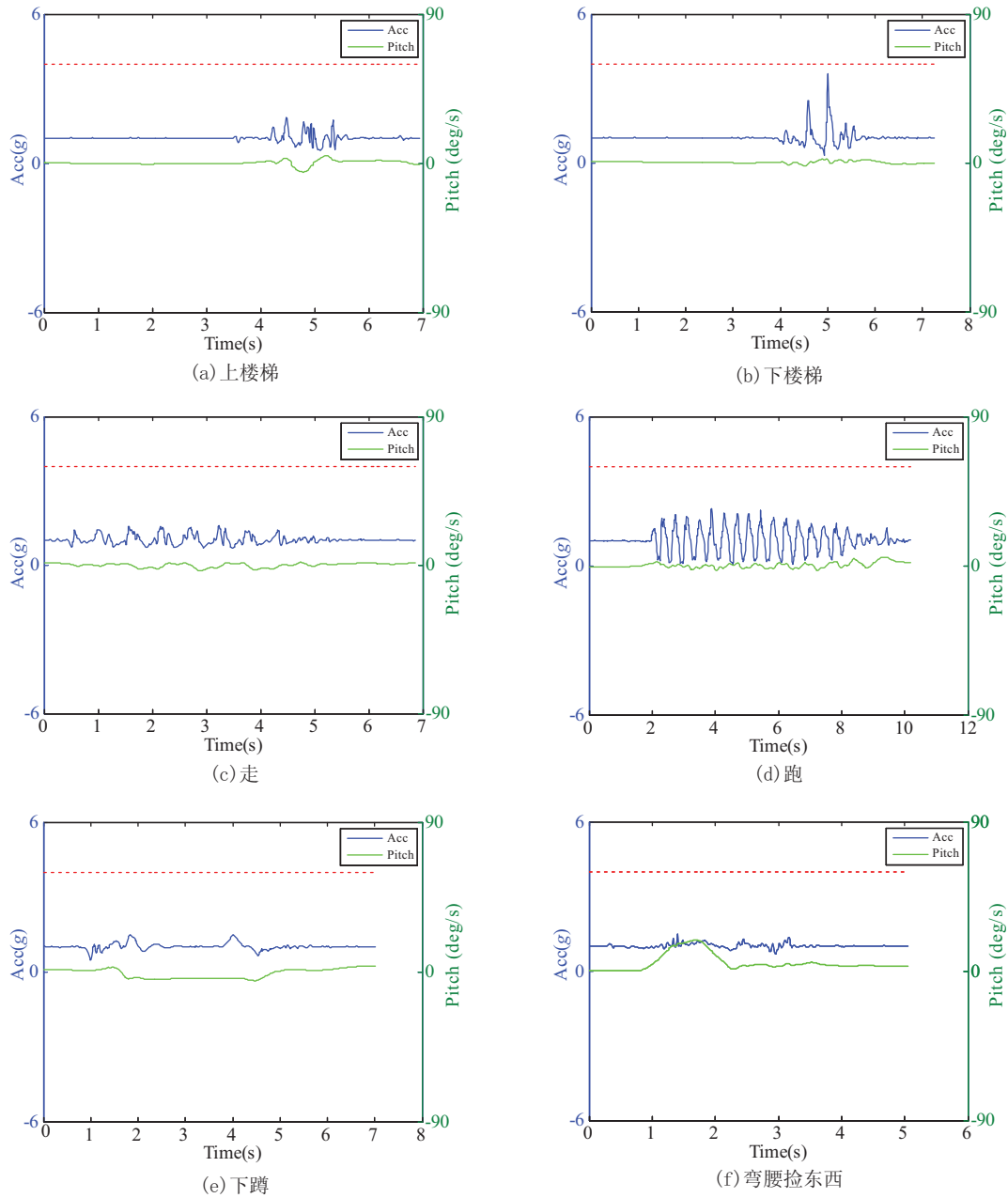


图 12 日常动作时合加速度与姿态角数据曲线

Fig. 12 Data curves of resultant acceleration and pitch angle of ADLs

左右有微小波动; 当弯腰捡东西时, 姿态角虽有变化, 但最大幅值为 18° , 加速度的变化也比较小; 除了下楼梯和剧烈动作跑时加速度变化比较剧烈, 幅值在 $2\text{ g}\sim 4\text{ g}$ 变化外, 其他基本在 1 g 左右略微浮动。

通过图 13 发现, 四种跌倒动作的加速度最小值范围分别为 $0.076\text{ g}\sim 0.15\text{ g}$, $0.08\text{ g}\sim 2.6\text{ g}$, $0.09\text{ g}\sim 1.7\text{ g}$, $0.78\text{ g}\sim 0.14\text{ g}$, 加速度最大值变化范围为 $5.4\text{ g}\sim 7.8\text{ g}$ 。由图 13(a)可知, 当加速度最小时, 对应俯仰角分别为: 38.67° 、

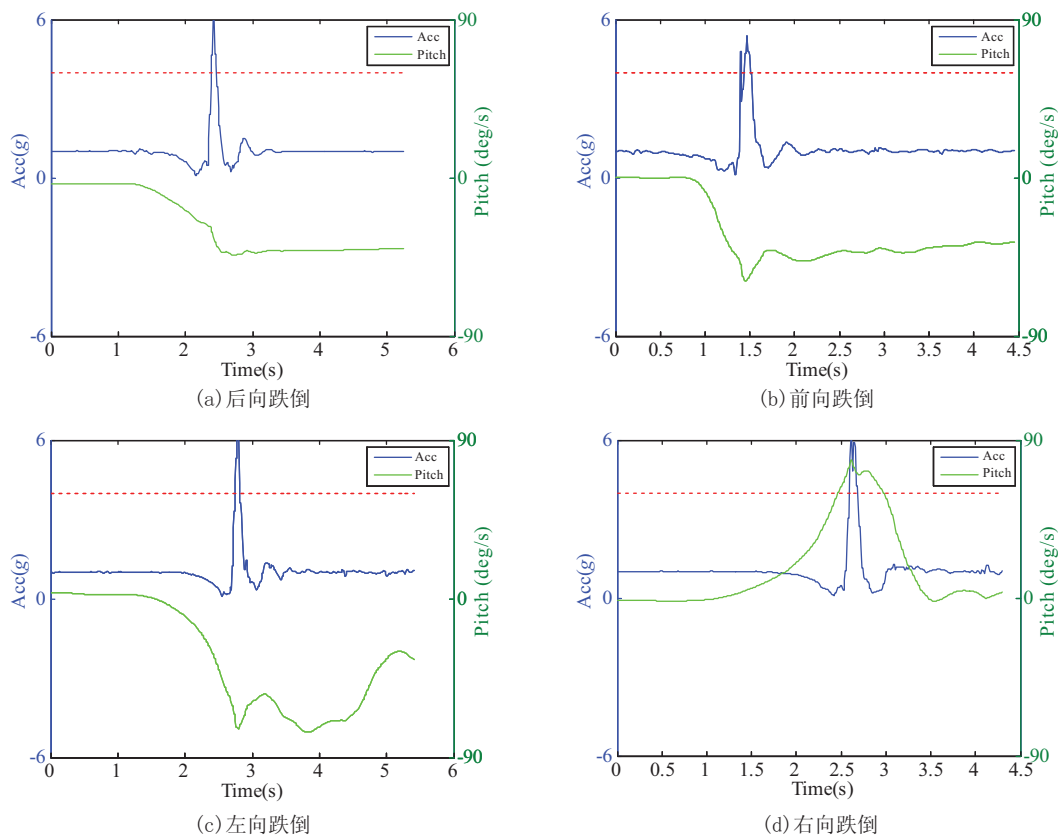


图 13 跌倒动作时合加速度与姿态角数据曲线

Fig. 13 Data curves of resultant acceleration and pitch angle of falls

43.45°、47.17° 和 56.4°。

跌倒预警算法要考虑的一个关键参数是跌倒预警时间^[14]，通过对实验结果进行分析发现，可以采用基于加速度最小值或基于俯仰角的方法来进行预警，后者可以获得更长的预撞击前置时间。

跌倒报警在检测姿态角大于设定阈值的基础上，再通过检测合加速度的阈值来判定。由于该实验中青年人不能完全模拟老年人的跌倒行为，在实际应用中可能需要根据个体差异进行参数调整，以满足不同个体、不同年龄段的用户需要。

4 结论

关于跌倒预警和防护方面，目前日本千叶大学田村等^[15]设计了一种穿戴式人体保护气囊装置。该

系统包括传感器、CPU、电池、可充气的气袋、压缩气体和触发机构等。其中，气袋可以保护头部和腕部，尺寸为 470 mm×330 mm，容积为 10 L，储气瓶是通过火药来放气。此系统能达到较好的防护效果，但结构复杂，体积较庞大，不易穿戴。

香港中文大学的研究人员也研究了一种髌骨保护气囊系统^[16]，包括传感器、处理器、通讯模块、放气机械机构、压缩二氧化碳气体和气囊等模块。气囊充气可以在 0.333 s 内完成，整个过程从跌倒识别、机械机构触发到气囊充入足够气体在 0.9 s 内完成。此系统有较高的跌倒检测率和较快的放气速率，但没有加入管理平台、定位、数据存储等功能模块，功能相对单一。

本文提出的跌倒预警和防护系统主要由跌倒预警器、安全气囊装置、远程监控平台和监护人

手机构成, 结构简单轻便, 易于穿戴。通过采集人体运动学数据进行跌倒预警和报警, 在跌倒时打开安全气囊对人体进行保护, 在跌倒后将位置信息和跌倒前后运动学信息上传到服务器, 并向监护人手机或社区医院及时发出求助请求, 为老年人尤其是独居老年人提供了全方位的、及时的跌倒报警和救助服务。

参 考 文 献

- [1] 张玉, 陈蔚. 老年跌倒研究概况和进展 [J]. 中国老年学杂志, 2008, 28 (9): 929-931.
- [2] Zhao GR, Mei ZY, Liang D, et al. Exploration and implementation of a pre-impact fall recognition method based on an inertial body sensor network [J]. *Sensors*, 2012, 12 (11): 15338-15355.
- [3] Liang D, Zhao GR, Guo YW, et al. Pre-impact & impact detection of falls using wireless body sensor network [C] // *Proceedings of the IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics*, 2012: 763-766.
- [4] 张其. 人体跌倒髌关节防护气囊系统的设计和实现 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2013.
- [5] Tong LN, Song QJ, Ge YJ, et al. HMM-based human fall detection and prediction method using tri-axial accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13 (5): 1849-1856.
- [6] Loue S, Sajatovic M. *Encyclopedia of Immigrant Health* [M]. New York: Springer-Verlag, 2012: 671-672.
- [7] 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*, 2011, 33 (5): 712-716.
- [8] 胡大可. *MSP430 系列超低功耗 16 位单片机原理与应用* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [9] 秦龙. *MSP430 单片机 C 语言应用程序设计实例精讲* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10] Ning YK, Liang D, Li HQ. Design and realization of a wireless data acquisition system based on multi-nodes and multi-base-stations [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 461: 581-588.
- [11] Zhang AH, Wang L, Tumble detection based on three-dimensional acceleration transducer [J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2010, 14 (28): 9029-9032.
- [12] Liang D, Ivanov K, Li HQ. Exploration and comparison of the pre-impact lead time of active and passive falls based on inertial sensors [J]. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 2013, 24 (1): 279-288.
- [13] 孙新香. 基于三轴加速度传感器的跌倒检测技术的研究与应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [14] 郑立, 蔡萍. 人体跌倒监测方法及装置设计 [J]. *中国医疗器械*, 2009, 33 (2): 99-102.
- [15] Tamura T, Yoshimura T, Sekine M, et al. A wearable airbag to prevent fall injuries [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2009, 13 (6): 910-914.
- [16] Shi GY, Chan CS, Zhang GL, et al. Towards a mobile airbag system using MEMS sensors and embedded intelligence [C] // *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2007: 634-639.