

基于运动传感器的远程健康监护系统研究

任 伟

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310012)

摘 要 设计了一种基于惯性测量单元(IMU Inertial Measurement Unit)的远程健康监护系统。首先采集固定在人体上的 4 个惯性测量单元的加速度、地磁和角速度数据,然后对数据采用卡尔曼滤波器进行融合,最后将融合后的姿态数据写入 BVH 文件后传输到远程医护人员的计算机,以便医护人员对病人进行监护。实验结果表明,系统能实时准确地采集到人体的姿态数据,并能实时地再现人体的动作。

关键词 无线体域网,IMU,BVH,卡尔曼滤波,动作识别

中图分类号 TP212.9 **文献标识码** A

Research on Remote Health Monitoring System Based on Motion Sensor

REN Wei

(Key Laboratory of Special Equipment and Advanced Processing Technology Ministry of Education,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract A remote health monitoring system based on IMU was presented. Acceleration data, magnetic data and angular data were collected by the IMU tied up on human body. The raw measurement data was then processed by Kalman filter algorithm to produce a quaternion representation of orientation. Finally the BVH file containing the data captured above was transmitted to a remote PC of the doctor. The results show that the system is able to capture the motion data accurately and reproduce the movement of the human in real time.

Keywords Wireless body sensor networks, IMU, BVH, Kalman filter, Motion capture

无线体域网(WBSN wireless body sensor networks)作为无线传感器网络(WSN wireless sensor networks)^[1,2]的一个分支,是人体生理参数采集传感器或植入人体内的生物传感器共同形成的一个无线网络,在远程医疗保健、特殊人群监护和社区医疗等服务领域有着巨大的应用意义和需求。近年来,随着微电机系统(MEMS Micro electromechanical Systems)工艺的发展,可穿戴传感器器件的性能得到了迅猛的提升,其质量轻、尺寸小、功耗低等优点为 WBSN 的发展提供了巨大的动力。低功耗、小尺寸 MEMS 传感器的出现使得构建一个自足的实时人体姿态检测系统成为可能。另外,内置有多种传感器的智能手机的出现给 WBSN 的发展带来前所未有的机遇。

远程医疗监护系统从信号采集的渠道可分为 3 类:基于视频的医疗监护系统,即在被监测者家中安装视频摄像头,通过对图像和视频进行分析得出人体的姿态^[3,4],其不足之处在于无法克服遮挡和用户的隐私问题;基于声学的医疗监护系统,其精度太低,多作为辅助方法;基于穿戴式传感器的医疗监护系统将嵌入了微型传感器的可穿戴的设备固定在人体上,通过采集人体运动参数来实时监测人体的活动的一种方案,它的优点在于不受遮挡和隐私问题的困扰而精度也比较高,因此受到国内外学者的关注。Nyan 和 Benocci 等人基于

三轴加速度传感器,构建了一个跌倒检测系统^[5,6],该系统将固定在人身上的加速度传感器采集到的信息通过无线传输到 PC,检测算法根据加速度传感器值的突变来确定跌倒。王昌喜等人在文献[7]中提出了一种基于三维加速度传感器的上肢动作识别系统,用以识别对乒乓球的挥拍等基本动作。但现有的研究多利用加速度传感器,其提供的信息不够丰富,只能检测跌倒等一些简单的动作,应用范围比较窄。

针对以上问题,本文提出了一种基于多个 IMU 模块的远程健康监护系统,它对人体动作进行建模后,通过基于 Kalman 滤波器的人体姿态测量算法进行姿态测量。开发了一套原型系统进行实验验证。

1 系统设计

1.1 系统流程

系统总体流程分为数据采集、数据传输、数据融合(卡尔曼滤波)和动作显示 4 个部分。数据采集部分采用带有 IMU 模块的 Android 智能手机作为数据采集模块,4 个智能手机将被固定在双腿相应的关节上,如图 1 所示,它们将以统一的频率采集模块的加速度、地磁和角速度信息。数据采集和传输是同时进行的两个部分,系统采用无线 WIFI 网络作为数据传输的媒介,各模块采集的数据将通过 WIFI 网络发送到

到稿日期:2010-12-21 返修日期:2011-05-07 本文受 2011 年度省级高技能人才培养和技术创新活动计划(2011R30056)资助。

任 伟(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向为先进生产与制造技术、物联网技术下的网络制造以及计算机应用技术,E-mail:renwei_zjut@163.com。

特定端口监听的 PC 上。PC 接收到一轮 4 组数据之后将通过本文第 2 节所述的算法进行数据融合,然后将滤波后的数据写入 BVH 文件。得到的 BVH 文件将被传输到远程的电脑进行解析和显示。

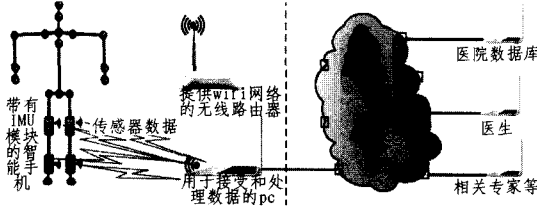


图1 系统总构架

1.2 硬件设计

信号采集模块采用搭载 Android 2.3.3 系统的 HTC HD2 手机,它装配了高通 Adreno200 微处理器,主频为 1GHz,内存容量为 512MB ROM+448MB RAM,自带 WIFI 传输模块。机身自带 MEMS 传感器 3 个:三轴陀螺仪、三轴加速度传感器和三轴地磁传感器。3 种传感器的输出数据都可以通过系统自带的 API 获取。

系统的主机端是 IBM ThinkPad R60E,处理器为 Intel 酷睿双核 T2300E(1.66GHz),内存容量为 2G。运行有数据接收、数据处理和 BVH 文件显示模块的原型系统。

2 算法设计

2.1 病人动作建模

为使采集的姿态数据具有较好的通用性,本文采用 BVH 格式来描述病人的骨架和动作。BVH 是 Biovision 公司开发的一种描述动作捕获的数据文件格式。文件包含人体的骨骼和肢体关节旋转的数据,可以利用 3DMAX、POSER 等软件制作,是一种通用的人体动画文件格式。BVH 关节点如图 2 所示。

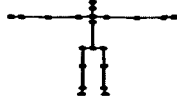


图2 BVH 关节点图

图 2 中的圆点表示关节,连线表示躯干,身体的各个部分形成了子树的形式。BVH 文件由骨架信息和关键帧数据块两个部分组成。骨架信息按图 2 所示的树型结构组织,定义了从根节点到终端节点的数据描述,包括各节点的偏移信息和旋转度。根节点包含模型在三维场景中的坐标值;非根节点则只含有偏移量和旋转角度。数据块用来存放运动帧信息。它定义了帧数和每一帧的播放时间以及每帧的实际数据。图 3 给出了一个 BVH 文件例子。

```
HIERARCHY
ROOT Hips
{
  OFFSET 0.00 0.00 0.00
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Zrotation Xrotation
  Yrotation
  JOINT LeftHip
  {
    OFFSET 3.0 0.000000 0.000000
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT LeftKnee
    {
      OFFSET 0.000000 -18.0 0.000000
```

```
CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
JOINT LeftAnkle
```

```
{
  OFFSET 0.000000 -17.0 0.000000
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  End Site
  {
    OFFSET 0.000000 -3.0 0.000000
  }
}
}
JOINT RightHip
  OFFSET -3.0 0.000000 0.000000
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  .....
}
.....
}
MOTION
Frames:1256
Frame Time:0.033333
0.00 39.88 -35.01 -1.79 -18.43 -1.74 5.02 -0.34 0.03 6.61
42.19 7.67 -3.87 -7.61 1.40 3.65 15.11 -0.95 2.33 11.06
15.20 -7.25 -10.08 1.61 4.89 18.33 11.12 -17.68 0.00 0.60
```

图3 BVH 文件示例

2.2 病人姿态测量算法设计

姿态测量是生成 BVH 文件的过程。对于单个 IMU 模块来说,它是将模块测量得到的数据融合在一起,得出一个模块坐标系和世界坐标系之间的旋转的过程,而这个旋转则用旋转角度表示。单个 IMU 模块的姿态测量如图 4 所示,流程包括两个步骤。首先将加速度向量和地磁向量转换成旋转矩阵,然后转换成姿态四元数;接着采用卡尔曼滤波器^[9]将它与陀螺仪输出的数据融合起来,最终输出四元数表示的 IMU 模块的姿态。

固定在身上的 4 个传感器模块的姿态测量完成之后将被转换成旋转角,写入到病人的 BVH 文件中。

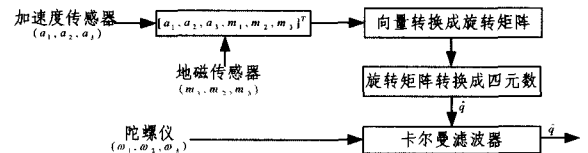


图4 IMU 模块姿态测量流程

本文所采用姿态测量算法是在 Bachmann^[10]提出的基于补偿滤波的姿态测量算法的基础之上进行改进而来,数据采集完成之后,Bachmann 采用简单的补偿滤波对传感器误差进行矫正,效果不太理想。因此,本文采用卡尔曼滤波器对陀螺仪累积偏移进行矫正,具体算法如下:

算法 1 姿态测量算法

输入: $\vec{a}$: 加速度传感器的输出向量, $\vec{m}$: 地磁传感器的输出向量, $\vec{\omega}$: 陀螺仪的输出向量

输出: $\hat{q}$: 加速度模块的姿态, 四元数表示
begin

$$\vec{e}_3 = \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|};$$

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{m} - \vec{e}_3(\vec{e}_3 \cdot \vec{m})}{\|\vec{m} - \vec{e}_3(\vec{e}_3 \cdot \vec{m})\|};$$

$\vec{e}_2 = \vec{e}_3 \times \vec{e}_1$;
 $\hat{R} = [\vec{e}_1; \vec{e}_2; \vec{e}_3]^T$;
 //将矩阵转换成四元数
 $\hat{q} = \text{Matrixtoquaternion}(\hat{R})$;
 $\dot{q} = \frac{1}{2} \omega \hat{q}_{t-1}$;
 $\hat{q}_t = \hat{q}_{t-1} + \dot{q}$;
 //单位化四元数从而降低旋转带来的误差
 $\hat{q}_t = \hat{q}_t / \|\hat{q}_t\|$;
 end

end

2.3 卡尔曼滤波器设计

陀螺仪在使用过程中会产生累积的漂移,加速度传感器和地磁传感器结合起来的数据则在测量 IMU 模块瞬间加速的情况下有较大测量偏差。因此,本文设计了卡尔曼滤波器,它将加速度和地磁传感器的数据用于对陀螺仪的偏移误差进行矫正,将两种数据的优点融合到一起。

图 5 是卡尔曼滤波器的设计流程。其中, ω 是三维角速度向量,由陀螺仪测量得出, $\hat{q}$ 是姿态四元数,由旋转矢量算法^[7]计算得出:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \omega \otimes q \quad (1)$$

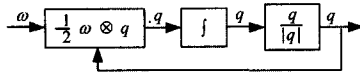


图 5 卡尔曼滤波器处理流程

然后将四元数的计算结果综合起来转化为单位四元数。状态向量 x 是一个 7 维向量,它的前 3 个元素由角速度向量 ω 给出,后 4 个向量则是式(1)给出的四元数:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (3)$$

测量向量用 z 表示,卡尔曼滤波所使用的测量公式如下:

$$z = Hx + v_n \quad (4)$$

式中, H 是一个测量得出的 7×7 的单位矩阵, v_n 表示测量噪声矩阵。为了使用卡尔曼滤波,首先将状态式(1)和式(2)以及式(3)离散化:

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (5)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (6)$$

式中, $x_k = x(t_k)$, $z_k = z(t_k)$, Φ_k 表示状态转移矩阵, $H_k = H$, w_k 和 v_k 是离散的高斯白噪声。这样就可以使用标准的卡尔曼滤波公式实现滤波器了。

3 实验结果

为验证系统和算法的正确和可靠性,本文构建了一套原型系统。数据采集模块用内置有三轴加速度传感器、三轴陀螺仪和三轴地磁传感器的 HTC HD2 手机实现,而 PC 端则构建了一套基于 WIFI 的数据收发和处理系统。

利用原型系统采集了行走、慢跑、跌倒、坡脚等日常动作。穿戴有 IMU 模块的人在 WIFI 信号覆盖的范围内,其 100m 左右自由行走的动作被有效地捕捉并传输到 PC 上。通过上

文所述算法对数据进行融合后得到图 6 所示的 BVH 文件的显示效果。从图中可以看出,本系统可以精确地再现病人的动作,坡脚行走、跌倒等动作都能清晰地显示出来,BVH 文件可以实时地传输到远程医疗系统。

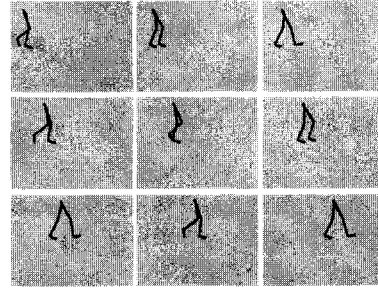


图 6 BVH 文件显示效果图

结束语 本文设计了一种基于 IMU 的远程健康监护系统,即将多个包含三轴加速度传感器、三轴陀螺仪、三轴地磁传感器的 IMU 模块固定在人体上,将人体的姿态信息实时地传送到远程监控系统并记录在 BVH 文件中。医生不仅可远程实时观察病人的动作,而且能把这些数据保存下来作为疾病诊断的重要依据。本系统只采集了双腿的动作,为了更加丰富地提供病人的数据,下一步工作是提供全身动作数据。另外为了提高实时性和进一步减少测量误差,对卡尔曼滤波器的改进也是下一步的工作。

参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330
- [2] Chen M, Gonzalez S, Vasilakos A, et al. Body area networks: a survey [J]. ACM Springer Mobile Netw Appl MONET, 2010, doi:10.1007/s11036-010-0260-8
- [3] Rougier C, Meunier J, St-Arnaud A, et al. Robust Video Surveillance for Fall Detection Based on Human Shape Deformation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2011, 21(5): 611-622
- [4] Diraco G, Leone A, Siciliano P. An Active Vision System for Fall Detection and Posture Recognition in Elderly Healthcare [Z]. Design Automation & Test, 2010: 1536-1541
- [5] Nyan M N, Tay F E H, Murugasu E. A wearable system for preimpact fall detection [J]. Journal of Biomechanics, 2008, 41(12): 3475-3481
- [6] Benocci M, Tacconi C, Farella E, et al. Accelerometer-based fall detection using optimized ZigBee data streaming [J]. Microelectronics Journal, 2010(41): 703-710
- [7] 王昌喜, 杨先军, 徐强, 等. 基于三维加速度传感器的上肢动作识别系统 [J]. 传感技术学报, 2010(6): 816-819
- [8] Quaternions and Rotation Sequences [M]. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999
- [9] Yao Xun-chen. An Introduction to the Kalman Filter [Z]. University of North Carolina SIGGRAPH 2007 course notes. ACM Inc, North Carolina, 2007
- [10] Xiaoping Y, Bachmann E, McGhee R. A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from Earth gravity and magnetic field measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(3): 638-650
- [11] 邓亚平, 杨佳, 胡亚明. 动态分簇的导航传感器网络安全路由协议 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2011, 23(3): 336-342