

可穿戴运动捕捉系统

陈晓 宋晓梅 张意华

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘要:本文设计了一种基于 MPU9250 9 轴姿态传感器与 STM32F103C8T6 系列 ARM 的可穿戴运动捕捉系统。MPU9250 内部合成 3 轴加速度计、3 轴磁强计及 3 轴陀螺仪,通过检测该传感器的 9 轴姿态信息,得到相应的姿态角。利用非线性扩展卡尔曼滤波算法进行数据融合,将数据进行去噪处理,利用蓝牙技术将处理完成的数据传至上位机用以显示。该系统具有体积小、动态响应好、实时监测等特点。

关键词:MPU9250; 运动捕捉; 扩展卡尔曼滤波; 蓝牙

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.403

Wearable motion capture system

Chen Xiao Song Xiaomei Zhang Yihua

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Designed a wearable motion capture system, which uses the MPU9250 nine-axis attitude sensor and STM32F103C8T6 series ARM. The MPU9250 integrated accelerometer, gyroscope and magnetometer, by detecting the information of the nine-axis attitude sensor, to give the corresponding attitude angle. An EKF (extended kalman filter) algorithm aimed at the attitude fusion was proposed to take the data remove noise. The system takes the data to the computer with the help of Bluetooth technology. The design has a small size, dynamic response, real-time monitoring and so on.

Keywords: MPU9250; motion capture; EKF; Bluetooth

0 引言

随着微电子技术的发展,人们对于可穿戴技术以及运动捕捉技术^[1-3]的需求越来越大,运动捕捉系统可以广泛应用于惯性导航、虚拟现实(VR)、生物医学、人机控制、运动生物力学等领域^[4-6]。机械式的运动捕捉系统^[7-8]容易使人体受到限制,而光学式运动捕捉^[9,10]系统成本较高,安装更为复杂,因此采用微机电技术^[11]的运动捕捉系统,使得系统更加小巧,方便。

本设计是集硬件采集和软件平台实现为一体的数据采集系统,硬件系统主要由采集单元、传输单元、处理单元组成,采集单元模块将产生的节点数据通过传输单元传送到微机计算机的处理单元,并完成数据处理和姿态解算,最终实时显示节点的姿态信息。

1 系统总体设计

本设计采用 STM32F103C8T6 作为主控芯片,通过

MPU9250 惯性传感器测量得到九轴加速度数据,通过采取四元数或欧拉角方法用来描述人体运动姿态,将测量得到的数据通过四元数或欧拉角表示出来,通过采取扩展卡尔曼滤波法完成对姿态角的计算,将计算结果通过蓝牙模块传输至上位机。系统框图如图 1 所示。

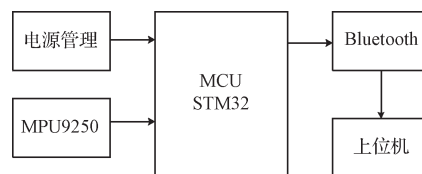


图 1 系统框图

2 系统硬件设计

2.1 主控芯片设计

STM32F103C8T6 作为 STM 公司的主打芯片^[12-13],该处理器是一款 32 位基于 ARM 核心的带 64 KB 闪存的

微控制器,供电范围为2~3.6 V,CPU工作频率最大可达72 MHz,具有单周期的乘法指令和硬件除法,以及优先级可编程的中断系统^[5]。同时它还具有64 KB的Flash存储器与20 KB的SRAM存储器,另外还集成了丰富的片内外设,如看门狗、7个定时器、GPIO接口、7通道DMA控制器、ADC、3个UART接口、2个SPI接口、2个IIC接口等,具有成本低廉、速度快、性价比高等优点。

2.2 传感器模块设计

MPU9250内部集成有3轴陀螺仪、3轴加速度计^[14]、3轴磁强计,输出信号都是16位的数字量;可以通过集成电路总线(I²C)接口和单片机进行数据互传,陀螺仪的角速度测量范围最高达±2 000/(°)/s,加速度的测量范围为±16 g,静态精度高。磁强计测量范围为±4 800 μT,具有良好的动态响应特性。

2.3 电源模块设计

电源模块通过锂电池或Molex连接器进行供电,采用MCP73833芯片作为锂电池充电集成电路,通过TPS62233降压转换芯片得到所需的电压值,采用

$$C_b^a = \begin{cases} \cos\theta\cos\psi & -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & \sin\varphi + \sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\cos\psi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

四元数姿态表示式是一个4参数的表达式,基本思路是一个坐标系到另一个坐标系的变换可以通过绕一个定义在参考系中的矢量的单次转动来实现。四元数用符号 q 表示,是一个具有4个元素的矢量,表示方法为:

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \quad (2)$$

四元数的方向余弦的表示方法为:

$$C_b^a = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

用欧拉角表示四元数:

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_1 &= \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_2 &= \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_3 &= \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$q_2 = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2}$$

$$q_3 = \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2}$$

用四元数表示欧拉角:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \left(\frac{2(q_2q_3 + q_0q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right) \\ \theta &= \arcsin(-2(q_2q_3 - q_0q_1)) \\ \psi &= \arctan \left(\frac{2(q_1q_2 - q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

max17048作为电池电量的检测,通过IIC传输至主控芯片,可以用来显示电池电量。

2.4 蓝牙模块设计

蓝牙模块采用Panasonic公司的PAN1322蓝牙无线模块,采用Bluetooth2.1+EDR解决方案^[7],通过UART接口用于数据通信、事件和AT命令,超低功耗设计,采用0.13 μm CMOS技术,在闲置状态^[15]和监听间隔期间,模块可进入低功耗模式。

3 数据融合处理

3.1 姿态数学描述方法

欧拉角为当一个坐标系到另一个坐标系的变换,可以通过绕不同坐标系的3次连续转动来实现,但定义上的欧拉角与姿态角不同,定义上的欧拉角就是刚体绕3个轴的旋转角度,该旋转与外界参考系无关,而姿态角是载体对于参考系来说的,从参考系到一个新的坐标系的变化可以表示为:俯仰角 φ ,翻滚角 θ ,航向角 Ψ 。欧拉角的方向余弦矩阵表示为^[6]:

3.2 数据融合方法

将数据采集到的数据通过采用扩展卡尔曼滤波法进行数据融合,卡尔曼最初提出的滤波理论一般只适用于线性系统,在状态方程或测量方程为非线性的,通常采用扩展卡尔曼滤波。假设非线性离散系统的数学模型如下:

$$\begin{cases} X_k = f[X_{k-1}, k-1] + \Gamma[X_{k-1}, k-1]W_{k-1} \\ Z_k = h[X_{k-1}, k-1] + V_k \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_k 是系统的 n 维状态向量, $\Gamma[X_{k-1}, k-1]$ 为 $n \times p$ 维系统噪声输入矩阵, W_{k-1} 为 P 维观测噪声, Z_k 是系统 m 维观测向量, V_k 是 m 维观测噪声。

首先定义:

$$\frac{\partial f}{\partial X_{k-1}} = \frac{\partial f[X_{k-1}, k-1]}{\partial X_{k-1}} \Big|_{X_{k-1} = \hat{X}_{k-1} = \Phi_{K-1}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial h}{\partial X_k} \Big|_{\hat{X}_{k,k-1}} = H_k \quad (8)$$

状态预测量:

$$\hat{X}_{k,k-1} = f[\hat{X}_{k-1}, k-1] \quad (9)$$

状态估计量:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k[Z_k - h[\hat{X}_{k,k-1}, k]] \quad (10)$$

滤波增益矩阵:

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (11)$$

进一步预测方差矩阵:

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1}^T \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma[\hat{X}_{k-1}, k-1] Q_{k-1} \Gamma^T[\hat{X}_{k-1}, k-1] \quad (12)$$

估计误差方差矩阵:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (13)$$

根据上面几个方程可知,首先将上一次的状态估计量带入系统状态方程,得到状态预测量 $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$,将 $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$ 带入观测方程得到观测量的预测值 $h[\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}, k]$,利用公式求出协方差矩阵预测 $\mathbf{P}_{k,k-1}$,接着求出卡尔曼增益 $\mathbf{K}_k$,将状态更新,协方差更新,进行下一个周期。

定义初始俯仰角(Pitch)为

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right) \quad (14)$$

初始翻滚角(Roll)为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{g_x}{g_y}\right) \quad (15)$$

初始偏航角(Yaw)为:

$$\psi = \arctan\left(\frac{m_y \cos\theta - m_x \sin\theta}{m_x \cos\varphi + m_y \sin\varphi \sin\theta + m_z \sin\varphi \cos\theta}\right) \quad (16)$$

4 实验结果分析

当本设计系统将加速度、陀螺仪、磁强计的信息采集到后,传至 MCU 端进行数据的处理与融合,并将处理后的结果通过蓝牙端传至上位机,通过上位机编程软件进行绘图,显示数据结果。

以手腕为参考节点,可以发现手腕控制手的活动姿态,将设备水平放置于手腕处,姿态角处于初始状态静止 0° 时的波形图,如图 2 所示,消除了陀螺仪的累计误差,波形处于光滑的曲线。将手腕顺时针旋转 30° 时产生的姿态角波形图如图 3 所示。当翻转时可以看到明显的 3 个姿态角的变化,将如图 2 的水平状态作为起始点,当手腕顺时针旋转时可以将传感器沿 X 轴旋转,所以可以看到俯仰角(Pitch)从 0° 变为 30°,因为不可能保证完全水平旋转,所以 Y 轴与 Z 轴会产生一定程度的偏差,所以如图会产生一定程度的改变,但很快会趋于平滑。将手腕逆时针旋转 90° 的波形图,如图 4 所示,可以看作是将传感器

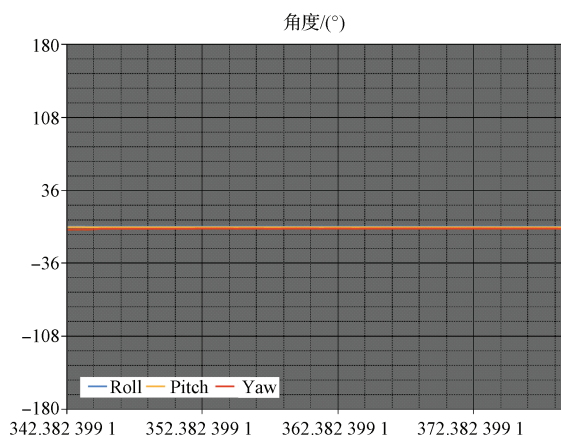


图 2 静止位置的姿态角

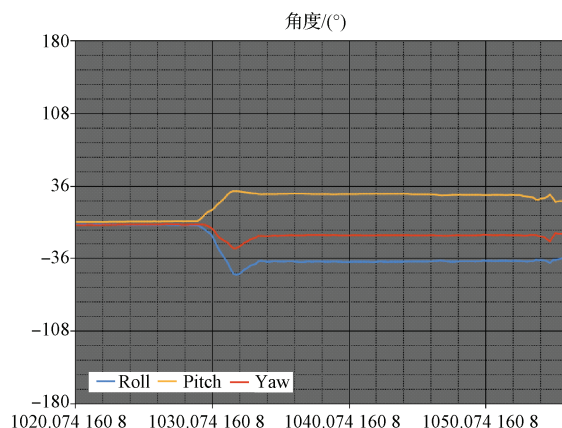


图 3 顺时针旋转 30 度的姿态角

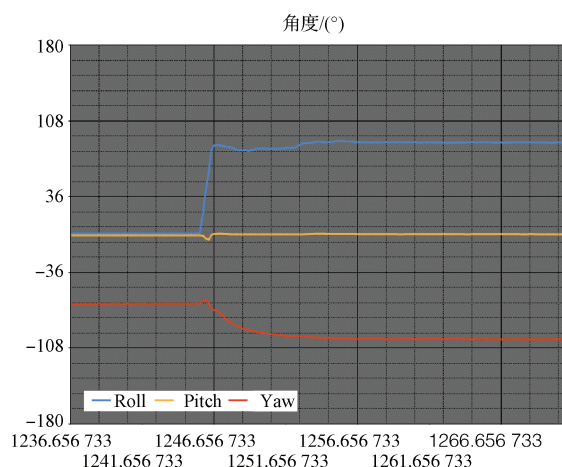


图 4 逆时针旋转 90 度的姿态角

沿 Y 轴旋转,所以翻滚角(Roll)由 0° 变为 90°,俯仰角改变较小,航向角因为人为转动会产生偏差,运动开始时航向角为 60°,当发生旋转后航向角发生改变,并持续下去,由此可知该改变并非为噪声。

由此可以得到处理完成的姿态角信息,用以显示当前的物体姿态,输出曲线平滑,滤除了噪音,能够准确的显示姿态角角度。

5 结 论

本文研究设计了一种人体可穿戴设备的运动捕捉系统,可以更好的应用于医疗,VR 技术等领域。通过 MPU9250 9 轴姿态传感器测量得到姿态数据,通过扩展卡尔曼滤波系统完成对姿态的数据融合,通过无线蓝牙技术将结果显示于自制的上位机软件上进行显示,具有实时传输的特点,有良好的开发前景,为下一步动作显示开发奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] 段世梅,孙倩,陈彦明. 人体运动捕捉仪的设计与实现[J]. 中国科技信息, 2011(6): 43-45.

- [2] 李晓丹,肖明,曾莉. 人体运动捕捉技术综述以及一种新的运动捕捉方案陈述[J]. 中国西部科技,2011,10(15):35-37.
- [3] 向泽锐,支锦亦,徐伯初,等. 运动捕捉技术及其应用研究综述[J]. 计算机应用研究,2013,30(8):2241-2245.
- [4] 郭志虎,费洁,钱峰. 基于微惯性全姿态测量的人体运动捕捉系统研究[J]. 微型电脑应用,2013,29(2):29-32.
- [5] 李红岩,毛征,袁建建,等. 一种基于算法融合的运动目标跟踪算法[J]. 国外电子测量技术,2013,32(12):36-40.
- [6] 尤文坚. 现代传感器输出特性拟合技术研究进展[J], 国外电子测量技术,2013,32(3):25-27.
- [7] 丁杰. 基于无线传感器网络的定位问题研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
- [8] 彭雷. 人体运动加速度信息无线获取系统的设计与应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
- [9] 汪少初,刘昱,郝文飞,等. 基于惯性传感的人员行进动作识别方法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(6):630-636.
- [10] 夏凌楠,张波,王营冠,等. 基于惯性传感器和机器视觉里程计的机器人定位[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):166-172.
- [11] 冯玉光,单珊,奚文骏. MEMS在运动轨迹显示中的应用[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):77-81.
- [12] 项贤军,周荣晶,王才峰. 基于STM32的智能探测小车控制系统设计[J]. 电子测量技术,2016,39(4):86-89.
- [13] 吕书信,张北伟,王泽澄. 基于STM32分拣搬运机器人控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(9):101-104.
- [14] 刘春阳,徐军领,程洪涛,等. MPU9250传感器的姿态检测与数据融合[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2015,36(4):5,14-17,22.
- [15] 李杰,陈庆奎. 基于蓝牙4.0的GPU集群功耗测量系统设计[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):314-319.

作者简介

陈晓,1993年出生,工学硕士,主要研究方向为可穿戴设备设计、IOS开发等。

E-mail:chenxiao.54@qq.com