

# 面向肢体残疾的辅助智能穿戴系统的设计

沈 澍<sup>1,2</sup>, 顾 康<sup>1</sup>, 刘小雨<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学 计算机学院、软件学院、网络空间安全学院, 江苏 南京 210023;  
2. 江苏省无线传感网高技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:**设计了一套智能穿戴系统,主要依靠惯性传感单元对人体手臂的姿态进行检测,从而控制机械臂能够同步做出人体手臂的动作,旨在帮助手臂残障的人士能如同正常人一般的生活。整个可穿戴式系统的设计以 STMicroelectronics 公司的微控制器作为核心,使用三轴加速度计和三轴陀螺仪对手臂的运动姿态进行检测,通过驱动六路数字舵机来实现机械臂与人体手臂动作的同步。在姿态融合部分,运用了基于 TensorFlow 的椭球面拟合方法对加速度计进行了校准,并且采用了基于四元数-梯度下降的方法来进行姿态角的融合计算,使系统能稳定地识别出当前手臂的运动姿态。在实验部分,针对系统搭建了相应的实验平台,对姿态融合模块性能和系统整体性能进行了测试,并对整个系统的实验结果进行总结和分

**关键词:**微控制器;可穿戴设备;惯性检测单元;姿态融合;机械臂

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)07-0124-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.07.025

## Design of an Intelligent Wearable System for Physical Disability

SHEN Shu<sup>1,2</sup>, GU Kang<sup>1</sup>, LIU Xiao-yu<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;  
2. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks,  
Nanjing 210023, China)

**Abstract:** An intelligent wearable system is designed, which mainly relies on the inertial sensing unit to detect the posture of the human arm, so as to control the mechanical arm to make the movement of the human arm synchronously, aiming to help people with arm disabilities live like normal people. The entire wearable system selects STMicroelectronics microcontroller as the core, uses three-axis accelerometer and three-axis gyro to detect the motion posture of the arm, and realizes the synchronization of the mechanical arm and the human arm by driving the six-way digital servo. In the attitude fusion, the accelerometer is calibrated based on TensorFlow ellipsoidal surface fitting method, and the quaternion-gradient descent method is used to perform the fusion calculation of the attitude angle, so that the system can stably identify the current arm athletic pose. In the experimental, the corresponding experimental platform is built and the attitude fusion part and overall performance are tested on it. Finally, the experimental results are summarized.

**Key words:** microcontroller; wearable device; inertial measurement unit; attitude fusion; robotic arm

## 0 引言

伴随计算机、无线传感网络、电子信息技术的逐渐发展与成熟,越来越多的可穿戴设备相继推出,对人们的生活产生了很大影响<sup>[1-3]</sup>。这不仅给普通人的生活带来许多便捷,而且帮助了大量的残障人士。文中提出了一种手臂姿态检测方案,通过三个六轴传感器来

采集手臂的三个不同位置的加速度和角加速度,检测出当前手臂的姿态,并通过蓝牙进行传输,从而控制机械臂能同步当前手臂的动作。

文中首先介绍了手臂姿态检测原理,即基于三个六轴传感器的手臂姿态检测原理,然后给出了系统的软硬件设计,最后通过实验对系统进行测试。

收稿日期:2018-08-14

修回日期:2018-12-18

网络出版时间:2019-03-21

基金项目:国家自然科学基金(61401221,61701168,51608437);中国博士后基金项目(2016M601860);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX17\_0237);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19\_0240,SJKY19\_0823);南京邮电大学教学改革研究项目(JG00417JX74)

作者简介:沈 澍(1982-),男,博士,副教授,硕导,CCF会员(96284M),研究方向为无线传感网、嵌入式开发、人工智能;顾 康(1995-),男,硕士研究生,通信作者,研究方向为体域网与可穿戴计算。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190321.0904.014.html>

### 1 手臂姿态检测原理

提出的手臂姿态检测可以分为三部分:大臂运动检测、小臂运动检测和手部运动检测<sup>[4]</sup>。图1为手臂姿态检测的原理图,三个六轴传感器①、②、③分别用于检测大臂、小臂和手部的运动角度,以此来展现整个手臂的姿态。

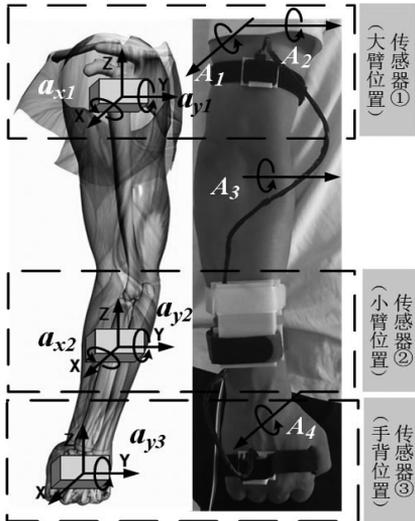


图1 手臂姿态检测原理

其中,  $A_1$  是大臂关节前后旋转的角度,与传感器①绕 X 轴旋转的角度  $a_{x1}$  相等;  $A_2$  是大臂关节抬起的角度,与传感器②绕 Y 轴旋转的角度  $a_{y1}$  相等;  $A_3$  是大臂与小臂之间的关节弯曲的角度,与传感器②相对于传感器①绕 X 轴旋转的角度  $a_{x2} - a_{x1}$  相等;  $A_4$  是手腕关节弯曲角度,与传感器②相对于传感器①绕 Y 轴旋转的角度  $a_{y2} - a_{y1}$  相等。

### 2 系统硬件设计

文中设计的硬件平台由两片 STM32F103C8T6 控制核心、三片 MPU6050 六轴传感器、两片 HC-05 蓝牙传输模块、六自由度机械臂和供电模块组成<sup>[5]</sup>。图2为系统组成框图。A 为姿态检测端,由控制核心、六轴传感器和蓝牙模块组成。B 为机械臂控制端,由控制核心、供电模组和蓝牙模块组成<sup>[6]</sup>。C 为六自由度机械臂,由六个数字舵机驱动。A、B 端之间以蓝牙方式传输手臂姿态信息。

本次设计的模块选型主要以体积小、计算量适中为主,以下对其主要特征进行了介绍。

(1) STM32F103C8T6 (控制芯片): 内核 ARM Cortex-M3, 主频最高为 72 MHz, 64 KB Flash, 20 KB SRAM, 36 个多功能 IO, 有 USART、IIC 等外设;

(2) MPU6050 (六轴传感器): IIC 通信方式, 16 位 ADC 输出, 陀螺仪敏感度为 131 LSBs/°/sec, 陀螺仪检测范围为 ±250、±500、±1 000 和 ±2 000 °/sec, 加速度计可编程控制, 加速度计测量范围为 ±2g、±4g、±8g、

±16g;

(3) HC-05 (蓝牙): UART 协议通信, 波特率可达 115 200 bps。

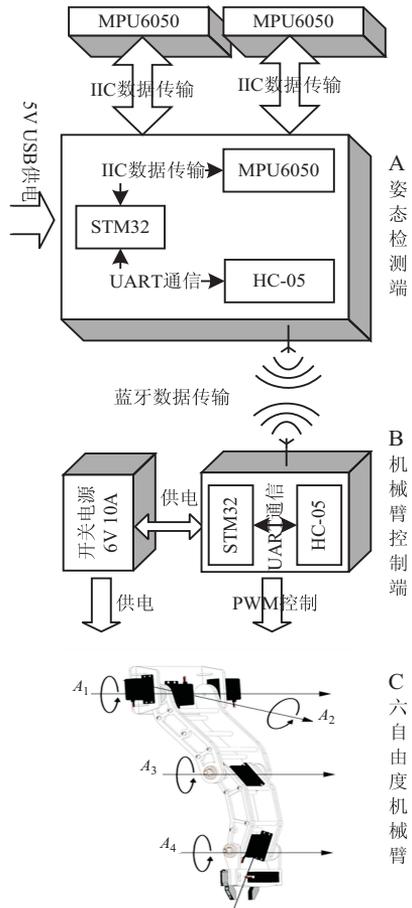


图2 系统组成框图

### 3 系统软件设计

#### 3.1 整体流程

系统的软件主要分为手臂端软件和机械臂端软件两个部分,以下分别对各个部分的软件流程进行介绍。

手臂端软件负责手臂姿态的融合和传输,分为以下五个步骤:

- (1) 通过 IIC 数据总线读入加速度计和陀螺仪数据;
- (2) 将读取的数据送入截止频率为 10 Hz 的 FIR 数字低通滤波器中, 获取滤波后的数据;
- (3) 将滤波后的数据送入姿态角融合模块, 获取手臂各个部分的欧拉角;
- (4) 通过欧拉角计算当前手臂的姿态;
- (5) 根据计算出的手臂姿态, 发送相应的控制数据。

机械臂端软件负责控制数据的接收和舵机的驱动,分为以下五个步骤:

- (1) 等待串口接收到相应的控制数据;

- (2) 根据制定好的协议,解析控制数据,获取机械臂关节的角度;
- (3) 将获取的角度写入列队中,待处理;
- (4) 读取列队中的角度,对机械臂做出相应的控制;
- (5) 对控制数据做出回复。

### 3.2 姿态融合模块设计

#### 3.2.1 基于椭球面拟合的加速度计矫正

MPU6050 中加速度计的原始数据存在一定的零偏,在进行姿态融合的时候会对精度产生较大的影响<sup>[7]</sup>。因此,采用基于椭球面拟合的方式对加速度计的零偏进行矫正。

加速度传感器在静止(只受重力)的状态时,重力在不同的姿态下,其向量的顶点,在三维空间中会落在一个球面上,但是惯性测量系统中  $x, y, z$  轴的度量单位可能有很大的不同,如果  $x, y, z$  轴相互垂直,那么各姿态重力点会落在一个椭球面上,椭球的球心坐标就是加速度计的零偏<sup>[8-9]</sup>。本次设计采用 TensorFlow 进行椭球面参数拟合,主要分为以下六个步骤:

- (1) 数据采集;
- (2) TensorFlow 拟合参数创建;
- (3) TensorFlow 优化器创建;
- (4) TensorFlow 会话创建;
- (5) TensorFlow 训练迭代;
- (6) 计算球心。

数据采集时需要将 MPU6050 芯片进行多个方向的旋转,采集静止状态下的三轴加速度数据,这样可以确保拟合的准确度<sup>[10-11]</sup>。

TensorFlow 的操作中主要为创建拟合需要的相关参数、确定损失函数和选择相应的优化器进行训练。本次设计中需要拟合的椭圆曲面,可以近似为一个圆心不在原点,但球体未进过旋转的椭球曲面,因此预测函数为:

$$h_a(x, y, z) = a_0 \times x^2 + a_1 \times y^2 + a_2 \times z^2 + a_3 \times x + a_4 \times y + a_5 \times z + a_6 \quad (1)$$

其中,  $a_0, a_1, \dots, a_6$  是椭球面的 7 个参数。

根据预测函数,可以选择拟合所使用的损失函数:

$$J(\mathbf{a}) = \frac{1}{N} \times \| a_0 \times \mathbf{X}^2 + a_1 \times \mathbf{Y}^2 + a_2 \times \mathbf{Z}^2 + a_3 \times \mathbf{X} + a_4 \times \mathbf{Y} + a_5 \times \mathbf{Z} + a_6 \|_2 \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{X}^2 = \mathbf{X} \times \mathbf{X}, \mathbf{Y}^2 = \mathbf{Y} \times \mathbf{Y}, \mathbf{Z}^2 = \mathbf{Z} \times \mathbf{Z}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$  为数据矩阵,  $N$  为数据总量,  $a_0, a_1, \dots, a_6$  为需要拟合的参数。

由以上的推导,在 TensorFlow 中创建相应的训练参数和损失函数,选择 0.5 的学习率进行训练,在误差小于 0.000 01 时停止训练,使用式 3 计算椭球的

球心<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} x = -0.5 \times \frac{a_3}{a_0} \\ y = -0.5 \times \frac{a_4}{a_1} \\ z = -0.5 \times \frac{a_5}{a_2} \end{cases} \quad (3)$$

#### 3.2.2 基于梯度下降的姿态融合

本次设计采用四元数-梯度下降方法对姿态进行融合,首先使用陀螺仪的数据计算出短时间内四元数的变化量,再使用加速度数据对陀螺仪更新的累计误差进行校准。根据一阶龙格库塔法,四元数可以使用式 4 进行更新:

$$q_t = q_{t-1} + \dot{q} \times \Delta t \quad (4)$$

其中,  $q_t$  为需要更新的四元数;  $q_{t-1}$  为上一时刻的四元数;  $\dot{q} = \frac{1}{2} \times q_{t-1} \times \omega_t$ <sup>[13-16]</sup>,  $\omega_t$  为当前时刻的角速度。

使用加速度计矫正时,使用式 5 将重力在世界坐标系  $[0, 0, 0, 1]$  下的矢量坐标转换为传感器坐标系  $[0, a_x, a_y, a_z]$  下的矢量坐标。

$$d_s = q^{-1} \times d_e \times q \quad (5)$$

其中,  $d_e$  为世界坐标系下的坐标;  $d_s$  是传感器坐标系下的坐标;  $q$  为四元数<sup>[17-19]</sup>。

因此,可以确定损失函数<sup>[20]</sup>为:

$$\begin{cases} f(q) = e(q)^T e(q) \\ e(q) = \begin{pmatrix} 2 \times (q_1 q_3 - q_0 q_2) - a_x \\ 2 \times (q_0 q_1 + q_2 q_3) - a_y \\ 2 \times (0.5 - q_1^2 - q_2^2) - a_z \end{pmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

然后根据式 7 使用梯度下降的方法对  $\dot{q}$  进行校正:

$$\begin{cases} q_t = q_{t-1} + \varepsilon \times \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \\ \nabla f = e(q) J(q) \\ J(q) = \begin{pmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 0 & -4q_1 & -4q_2 & 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\varepsilon$  为学习率;  $\nabla f$  为损失函数的梯度。

最后依据式 8 将四元数转换成欧拉角:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{2(q_1 q_2 - q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \\ \theta = \arcsin(-2(q_0 q_2 + q_1 q_3)) \\ \psi = \arctan \frac{2(q_3 q_2 - q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\varphi, \theta, \psi$  为绕三轴旋转的欧拉角度。

图3 为使用四元数-梯度下降方法进行姿态融合 的流程。

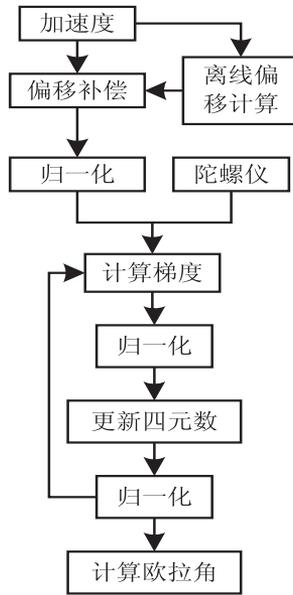


图3 姿态融合流程

首先将采集到的数据进行预处理,行偏移补偿和归一化。然后使用加速度、陀螺仪和前一时刻的四元数计算梯度,对四元数的更新量进行校正并且更新四元数,最后计算出欧拉角。

平面平行, z 轴与水平面垂直向下。在测试时,使六轴传感器模块处于静止状态,可近似认为 xy 轴的加速度为 0g, z 轴的加速度为 1g。

### 4 实验测试

#### 4.1 加速度矫正测试

在对加速度计进行矫正测试时,使用水平尺矫正测试平面,将传感器模块水平放在上面, xoy 平面与水

图4 为矫正测试数据图。其中图 A 为进行椭球面拟合的示意图,深色点为采样得到的三轴加速度数据,浅色点为对采样数据进行拟合出的球心。图 B、C、D 为原数据与矫正后数据的对比图。深色曲线表示原始数据,浅色曲线表示矫正后的数据,在进行矫正后,数据的准确性得到了改善。

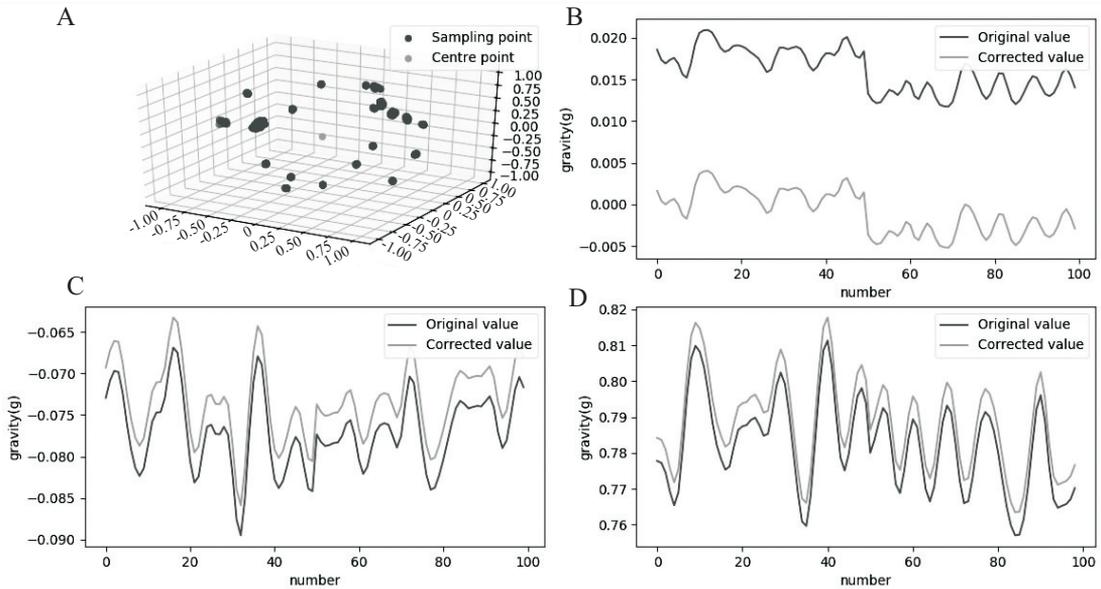


图4 矫正测试数据

#### 4.2 姿态融合测试

在对姿态融合进行测试时,同样使用水平尺矫正测试平面,在下方铺上量角器,将传感器模块旋转到 30°、45°、60°、90° 四个角度,在每个角度下分别检测

100 组数据。图5 为传感器绕 x 轴旋转的四个角度的测试数据图,图 A 对应 30°测试数据,图 B 对应 45°测试数据,图 C 对应 60°测试数据,图 D 对应 90°测试数据。测试数据的波动性很小,在运动速度不是非常大

的情况下,数据比较稳定。

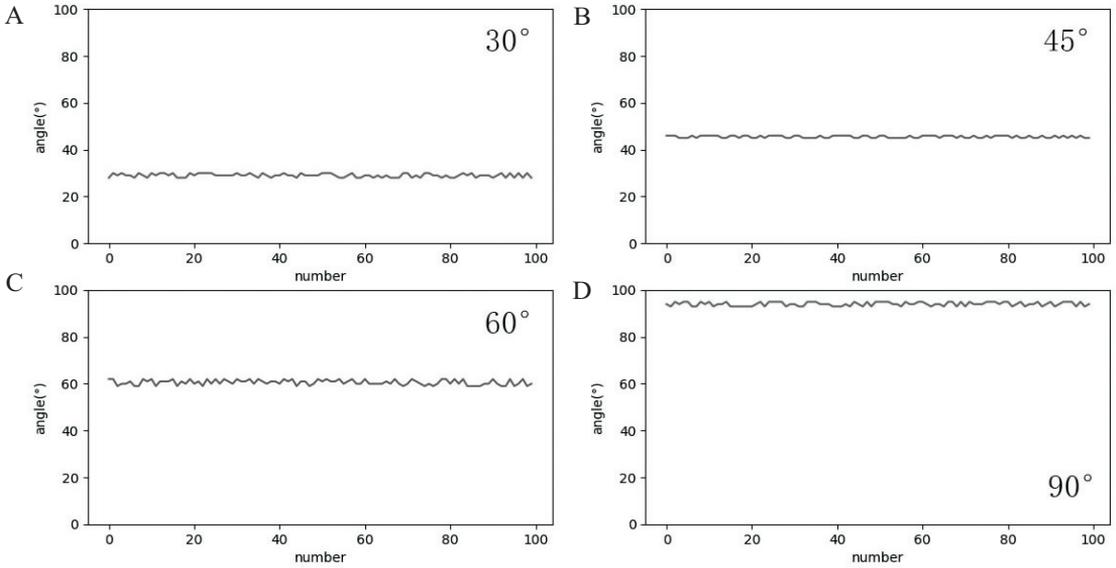


图 5 融合测试结果

### 4.3 系统整体测试

图 6 是手臂真实动作和机械臂动作的对比图,

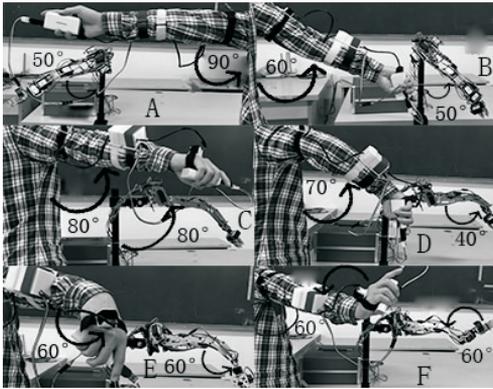


图 6 测试效果

其中,图 A 为大臂向前抬起的对比图,图 B 为大臂向后抬起的对比图,图 C 为大臂向侧面的抬起的对比图,图 D 为小臂的弯曲的对比图,图 E 为手向下弯曲对比图,图 F 为手向上抬起对比图。在小角度抬起和弯曲的时候,动作的一致程度是非常高的,但当角度增大到一定的程度后,性能就略有不足。

图 7 为每间隔 10° 统计的手臂实际值、机械臂测量值和误差的绝对值的折线图。图 A 为大臂向前抬升的测试数据图,图 B 为大臂向侧面抬升的测试数据图,图 C 为小臂向下弯曲的测试数据图,图 D 为手腕向上抬起的测试数据图。图中深色的虚线表示手臂的实际值,浅色的点化线表示机械臂的测量值,实线表示实际值与测量值之间误差的绝对值。

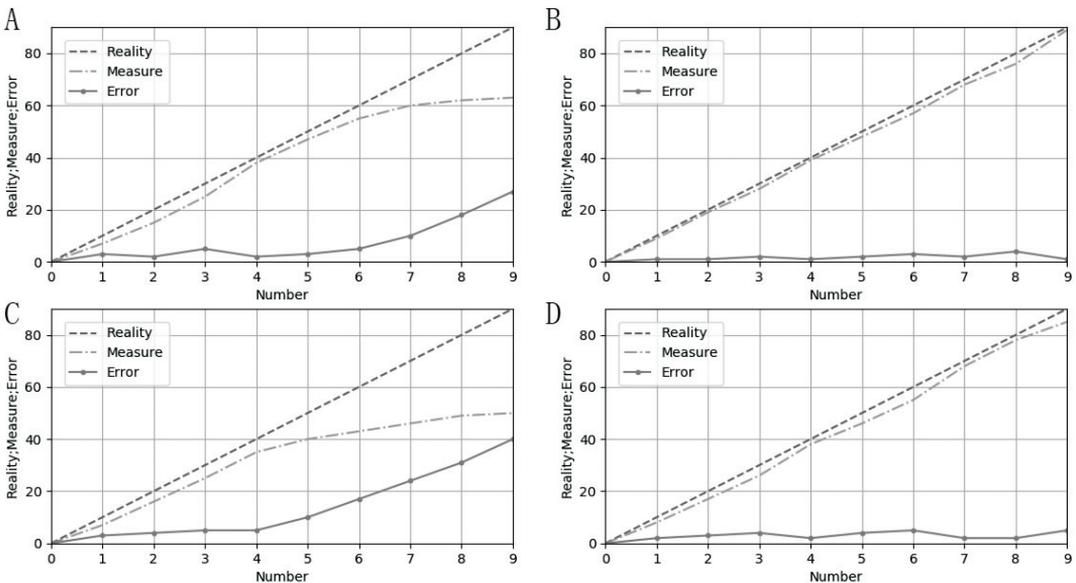


图 7 测试数据对比

从折线图中可以看到,在小臂向下弯折和大臂向前抬升的动作的角度越大则误差越大,在大臂向侧面抬升和手向上抬升的动作中基本吻合。

## 5 结束语

可穿戴设备正慢慢融入人们的日常生活,帮助人们提升生活质量。尤其对于残障人士,借助可穿戴设备,生活状况有望得到很大改善。文中设计的辅助智能穿戴系统,将三轴陀螺仪数据和三轴加速度计数据进行融合,用于检测手臂姿态,在动作角度较小时检测的精确度非常高,并且相对于其他复杂系统来说成本是比较低的,但针对运动范围比较大的动作以及非常精细的动作来说,则需要增加传感器的数量。并且需要进一步改进穿戴模式,如穿戴方式不合理,则会大大减小检测的准确度。

为了进一步增加动作识别的准确性和细致性,下一步计划加入肌肉电信号传感器,并与深度学习相结合,以实现更加稳定和高效的动作识别。

### 参考文献:

- [1] 封顺天. 可穿戴设备发展现状及趋势[J]. 信息通信技术, 2014(3):52-57.
- [2] 赵学玲,朱雁峰,郝立果,等. 加速度传感器在动作识别中的应用[J]. 机床与液压,2011,39(2):118-120.
- [3] 杨小帆,郭雅萍. 运动可穿戴设备的发展趋势研究[J]. 福建体育科技,2018,37(3):17-19.
- [4] 吴 斌,刘丽明,薛 婷,等. 基于惯性传感器的上肢位置跟踪[J]. 测控技术,2018,37(6):64-67.
- [5] 李晟镡. 六自由度机械臂控制系统设计与研究[J]. 长春大学学报,2017,27(12):10-14.
- [6] 林 宇,方 方,林泽萍,等. 基于 MPU6050 三轴倾角测控设计[J]. 数字技术与应用,2016(1):181.
- [7] 陈春行,林春生,翟国君. 基于 MSP430 单片机的姿态测量系统设计[J]. 船海工程,2018,47(1):46-50.
- [8] 王守华,邓桂辉,纪元法,等. 基于组合滤波的低成本飞行器姿态解算算法[J]. 计算机应用,2017,37(5):1507-1511.
- [9] 杨凌霄,李晓阳. 基于卡尔曼滤波的两轮自平衡车姿态检测方法[J]. 计算机仿真,2014,31(6):406-409.
- [10] 陈建翔,万子敬,王向军. 基于四元数的低成本姿态测量系

统设计[J]. 传感技术学报,2016,29(5):706-710.

- [11] 侯江宽,马 珺,贾华宇. 多旋翼姿态解算中的改进型 2 阶互补滤波算法[J]. 计算机仿真,2018,35(2):11-15.
- [12] MADGWICK S O H, HARRISON A J L, VAIDYANATHAN R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm[C]//2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics. Zurich, Switzerland; IEEE,2011:1-7.
- [13] ZHANG Zhiqiang, PANSIOT J, LO B, et al. Human back movement analysis using BSN[C]//International conference on body sensor networks. Dallas, TX, USA; IEEE,2011:13-18.
- [14] ZHOU Xuancheng, CHEN Jianxin, LU Xiruo, et al. A quaternion-based orientation estimation algorithm with adaptive interpolation for wearable computing[C]//2013 8th international conference on communications and networking in China. Guilin; IEEE,2013:846-851.
- [15] ZHOU Xuancheng, CHEN Jianxin, DONG Yi, et al. Pedestrian navigation with foot-mounted inertial sensors in wearable body area networks[C]//Signal and information processing association annual summit and conference, 2014 Asia-Pacific. Siem Reap, Cambodia; IEEE,2014:1-7.
- [16] CHEN Jianxin, ZHOU Liang, ZHANG Yun, et al. Human motion tracking with wireless wearable sensor network; experience and lessons[J]. TIIS,2013,7(5):998-1013.
- [17] JIANG Peng, ZHU Rong. Dual tri-axis accelerometers for monitoring physiological parameters of human body in sleep[C]//2016 IEEE SENSORS. Orlando, FL, USA; IEEE,2016:1-3.
- [18] HOSHI T, SHINODA H. Three-dimensional shape capture sheet using distributed six-axis sensors[C]//2008 5th international conference on networked sensing systems. Kanazawa; IEEE,2008:156-161.
- [19] LIU Weihua, DAI Jianxiong. Design of attitude sensor acquisition system based on STM32[C]//2015 5th international conference on instrumentation and measurement, computer, communication and control. Qinhuangdao; IEEE,2015:1850-1853.
- [20] XU Yejun. Application of extended Kalman filtering algorithm in multi-sensor information fusion[C]//2014 9th international conference on computer science & education. Vancouver, BC; IEEE,2014:687-689.