

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802288

# 可穿戴的实时检测走姿矫正仪设计\*

李继传 杨克莉 刘莉 韩俊杰 杨柳

(上海电机学院 电子信息学院 上海 201306)

**摘要:** 在走姿矫正导航精度优化问题的研究中,针对当前姿态解算技术的精度不足,设计了一款在Linux环境下嵌入式走姿矫正设计方案,基于先验的位置磁矩迭代修正方程系数的方法,建立迭代误差指标函数及迭代公式,并进行了数值仿真实验。为实现姿态解算中姿态角实时检测,提出将传感器采集到的加速度、角速度以及磁场强度数据进行融合,利用三轴加速度传感器和磁力计的向量偏差来对姿态解算过程中积分累计误差进行修正。最后传感器将数据结果分别通过 ZigBee 和蓝牙协议将其传输到电脑端或手机 APP 客户端显示,以达到走姿检测和矫正的目的。实测结果表明,这种方案使得走姿矫正的精度准确度更高,实时检测性能更强。

**关键词:** 走姿矫正;姿态解算;Linux;蓝牙;ZigBee

**中图分类号:** TN9    **文献标识码:** B    **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Real-time detection of wearable walking posture corrector

Li Jichuan Yang Keli Liu Li Han Junjie Yang Liu

(School of Electronic Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Study on optimization of the accuracy of navigation in walking posture corrector, in view of the lack of accuracy of the current attitude calculation technology, this is a design scheme of embedded stance posture correction in Linux environment. Based on a priori iteration method of correcting equation coefficients of position magnetic moment, an iterative error index function and an iterative formula are established, and numerical simulation experiments are carried out. In order to detect the attitude angle in real time, the integration of data collected by sensors is proposed including acceleration, angular velocity and magnetic field strength. The accumulated error of the integration is corrected by using the vector deviation of the three-axis acceleration sensor and magnetometer. The sensors transmit the final data results to the computer and mobile APP via the ZigBee and Bluetooth protocols to achieve the purpose of walking posture detection and correction. By the actual measurement results, the design improves the accuracy of walking position correction and strengthens the performance of real-time detection.

**Keywords:** walking posture corrector; attitude calculation; Linux; Bluetooth; ZigBee

## 0 引言

“内八字脚”专业术语称为足内旋,是指行走时足趾尖朝向中线,内八字走路容易使更多的压力积聚在脚外侧,增加了脚外侧和地面接触的机会,增大了关节的压力,久而久之,腿部的骨骼变形为O型腿。“外八字脚”专业术语称为足外旋,是指行走时足趾尖背离中线,长久以外八字姿态行走,随着膝盖的外移,双腿变型为X型腿。随着年龄的增长,骨骼的定型,八字脚便极难得到改善<sup>[1]</sup>。

人的步行过程包含着丰富的运动学以及动力学信息,对这些信息的数据进行提取并算法分析就可以获得人体步

态的描述。通过科学的手段将走姿进行解算具有重要的现实意义,如可用于临床医学中的康复评定、下肢术后恢复等。本文提出了一种基于数字信号处理的可穿戴的走姿矫正仪。该系统可以采集行走过程中脚步的数据大小及方向信息,通过多层次的传感器数据融合进行姿态解算。在姿态模块中,由传感器信息获取姿态角的过程称之为姿态解算,姿态模块的性能好坏取决于两个方面:传感器芯片和姿态解算算法的性能。目前为止,已经提出了多种姿态解算算法,文献[2]提出姿态不能通过直接测量获得,需要利用目标物体的各种运动信息进行数据融合获得;文献[3]提出利用信息融合算法对组合测姿冗余信息进行估计来提高精

收稿日期:2018-11-06

\* 基金项目:青年国家自然科学基金(61801285)、大学生科创项目资助

度;文献[4]提出低动态过程中,旋转四元数算法不仅可以有效抑制不可交换误差,而且在大失准角环境下也能够有效工作,更具有算法计算量小、易实现和精度较高等优点;文献[5]提出了一种处理矢量信息的方法来估计姿态参数,而不使用任何关于三面体相对运动角速度的信息;文献[6]提出将身体带入三维坐标系。本文在总结国内外已有研究内容的基础上提出和解决了如何减少姿态解算误差,主要用到三轴加速度传感器与磁力计传感器<sup>[7-9]</sup>,在佩戴好走姿矫正仪后开始行走,通过固定在脚上的三轴加速度和磁力计传感器采集到的 6 个数据,通过姿态解算公式计算出航向角,通过与初始航向角做比较可判断走姿是否正确。其中初始航向角由固定在身体上的磁力计传感器实时检测获得。采集的数据由 ZigBee 传输到电脑或者通过蓝牙传输到手机 APP 上,采集数据结果表明,本方法可提高步态检测精度。

### 1 总体方案

本文设计是基于 Linux 下的系统设计,可搭载更多的判断模型,同时使用交叉编译器作为编译环境,具有良好的可移植性。上位机与下位机通过 ZigBee 传送协议,完美实现了短距离通信<sup>[10-11]</sup>。

同时采用蓝牙通信,与手机 APP 结合,数据可以显示在 APP 界面<sup>[12-15]</sup>。系统分为如图 1 所示的 4 个模块,其中压力传感器用于判断运动状态,以保证脚落地时加速度与磁力计才开始进行数据采集,从而避免了由于运动状态不同而测到错误数据。再通过数据处理、通信模块、矫正部分各部分的联合高效运行,从而实现走姿矫正功能。

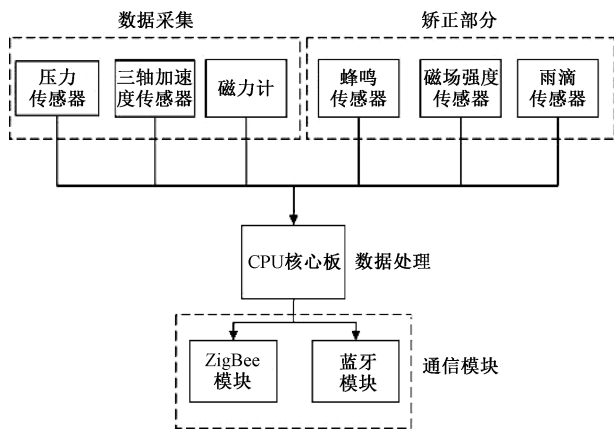


图 1 系统总体模块图

## 2 系统设计

### 2.1 数据采集与处理

由三轴加速度传感器实时采集人体  $x, y, z$  轴 3 个方向的加速度数据,磁力计实时采集地磁方向的  $x, y, z$  轴的磁场强度,通过姿态解算后得到俯仰角、翻滚角和偏航角,

其中,两个相同磁力计一个置于腰部用于判别走姿正误的标准方向,另一个穿戴在脚用于检测脚的行走状态。

假定导航坐标系选为“东北天”,则重力加速度和磁力计在导航坐标系中可分别表示为  $[0, 0, -g]^T$ ,  $[0, m_y^b, m_z^b]^T$ , 三轴加速度计和磁力计的输出生可分别表示为  $[a_x, a_y, a_z]^T$ ,  $[m_x^b, m_y^b, m_z^b]^T$ 。若加速度为 0, 则:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ m_y^b \\ m_z^b \end{bmatrix} = \mathbf{R}_n^b \begin{bmatrix} m_x^b \\ m_y^b \\ m_z^b \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,  $\mathbf{R}_n^b = (\mathbf{R}_n^b)^T$ 。  $\mathbf{R}_n^b$  可以用四元数表示形式为:

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

选其中 4 个方程如下:

$$\begin{cases} 2(q_1q_3 - q_0q_2) + \frac{-a_x}{g} = 0 \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) + \frac{-a_x}{g} = 0 \\ q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + \frac{a_z}{g} = 0 \\ m_x^b(q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) + m_y^b(2(q_1q_2 - q_0q_3)) + m_z^b(2(q_1q_3 + q_0q_2)) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

迭代初值的选取会影响迭代次数和迭代结果。首先,初值离真值越近,迭代次数越少。此外,如果方程有多个解,选取不同的初值会得到不同的解,而正确的解只有一个,这就需要选取的初值必须距离正确的解最近。上面选取了 4 个方程,理论上有很多个解。最开始时,将初值固定为  $[1, 0, 0, 0]$ , 某些情况下解算出来的偏航角会差  $180^\circ$ 。这意味着,最终的结果满足选取的 4 个方程,却不满足剩下的 2 个方程。

用欧拉角表示  $\mathbf{R}_n^b$ , 并将式(1)展开可以得到:

$$\begin{cases} \sin(\theta) = \frac{a_x}{g} \\ \cos(\theta)\sin(\varphi) = \frac{-a_y}{g} \\ \cos(\theta)\cos(\varphi) = \frac{-a_z}{g} \end{cases} \tag{5}$$

当  $\cos(\theta) \neq 0$  时,仅根据加速度计的输出生便可以得到俯仰角和滚转角:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(ax/g) \\ \varphi = \arctan(-ay, -az) \end{cases} \tag{6}$$

选取的 4 个方程包括加速度计的 3 个方程,迭代结果

一定满足式(1),而式(1)又唯一确定俯仰角和滚转角,因此二者解算结果正确。接下来要选取合适的初值,如下:

$$\begin{bmatrix} a_x & m_x^b \\ a_y & m_y^b \\ a_z & m_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{12} & R_{13} \\ R_{22} & R_{23} \\ R_{23} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & m_y^n \\ -g & m_z^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $R_{ij}$  是旋转矩阵的后两列,等式右边的  $2 \times 2$  方阵是可逆的,并且是常数矩阵,这样也就可以求出这两列元素。俯仰角和滚转角都已知的情况下,根据旋转矩阵第2列便可以求出偏航角的正弦和余弦,进而得到偏航角。把得到的欧拉角转化为四元数来作为迭代的初值,就可以得到正确的解。

解决了初值选取的问题之后,发现在俯仰角为  $\pm 90^\circ$  的时候,不仅迭代次数剧增,而且迭代结果偏航角和滚转角都会出错,这就是万向节锁。当  $\cos(\theta) \neq 0$  时,根据加速度计可以正确得到俯仰角和滚转角,是因为如果  $\cos(\theta) = 0$ ,  $\phi = \arctan(0, 0)$  是无意义的。况且实际中加速度计都存在误差,如果俯仰角过分接近  $\pm 90^\circ$ ,加速度计  $a_y$  和  $a_z$  轴的理论值会被误差淹没,也就无法得到正确的滚转角和偏航角。目前有一个解决办法,就是对初始姿态解算时的俯仰角进行限制,设置在  $\pm 75^\circ$  之间。

于是,得出式(8)、(9)为姿态解算最终表达式:

$$\theta = \arcsin(a_x/g), \phi = \arctan(-a_y, -a_z) \quad (8)$$

$$\varphi_m = \arctan\left(-\frac{m_y^b \cos\phi - m_z^b \sin\phi}{m_x^b \cos\theta + m_y^b \sin\phi \sin\theta + m_z^b \sin\theta \cos\phi}\right) \quad (9)$$

## 2.2 数据信息传输与矫正

串口的数据可以采用2种方式进行传输:第1种是利用 ZigBee 通信,将所接收到的数据在上位机上处理,PC 端显示出图形化界面;第2种是利用蓝牙无线传输,将所接收到的数据传到手机 APP 上,APP 统计出内八、外八及正常的步数,同时根据统计状况给出相应的建议,如图2所示。

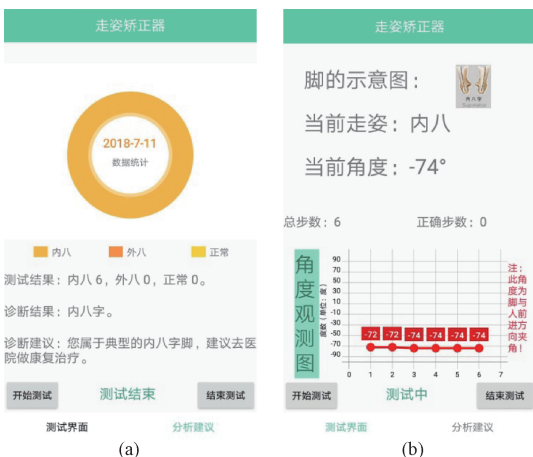


图2 APP 端观测图

若检测结果为错误姿势,则通过磁场强度传感器与

带有磁场的地毯间的磁力作用来吸引脚踩到正确的位置从而矫正姿势,也可通过蜂鸣器的报警来达到纠正目的。

## 3 测试结果

测试比对结果是以间隔为  $5^\circ$  进行的多组实验,如表1、图3与图4所示,测量角度与实际角度曲线近似重合,角度偏差值在0上下均匀波动,且波动幅度小,从而证实了本方案的精确与稳定性能高。

表1所示为通过随机抽样的方法选取不同的测试者,在若干次大量实验中选取具有代表性的数据,由实际角度与测量角度的数据进行对比,最终得出平均偏差率为5.7%。由此证明了本方案的精确度较高。

表1 测量角度与实际角度值

测量角度/ $^\circ$	实际角度/ $^\circ$	角度差/ $^\circ$	平均偏差率
0	0	0	5.7%
43	40	3	
84	85	-1	
-4	-5	1	
-47	-45	-2	
-89	-90	1	

图3所示为与表1相对应的曲线图,从图中可更加直观地看出,测量角度与实际角度的数据变化曲线基本重合。由此,更直观地证实了方案的高精确度。

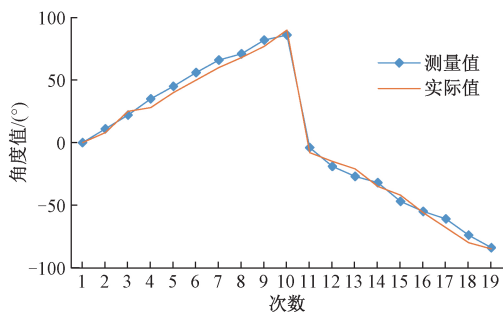


图3 测量角度与实际角度值对比曲线

图4所示为测量与实际的角度差值的变化曲线图,从图中看出角度差值在0周围小幅度上下均匀波动。可见本方案不仅精确度高,稳定性也较好。

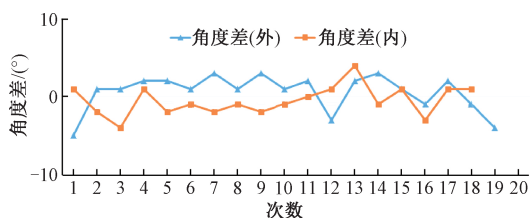


图4 测量角度与实际角度差值曲线

## 4 结 论

本研究的结果说明了姿态解算优化的问题,得出了用俯仰角、翻滚角和偏航角计算姿态的算法可以使得数据更加贴近实际的规律。在理论方面,该方案解决了国内外已有研究的姿态解算误差问题,增加了步态实时检测精度。传统姿态解算方面使用的是光电传感器,导致在测量时受外界环境影响因素较大。而本文采用磁力计和三轴加速度传感器进行解算,消除了外界的干扰因素。本研究测量姿态的过程中需要使用移动电源进行供电,在未来的发展中,可以尝试动力发电,从而避免携带移动电源的弊端。

## 参考文献

- [1] 雷文志,江少锋,马继鹏,等.基于光电传感器的走姿矫正器[J].科技资讯,2011(12):120-121.
- [2] 刘星.多维 MEMS 惯性传感器的姿态解算算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [3] 王嘉雨.地磁/陀螺信息融合的姿态解算算法研究[D].太原:中北大学,2015.
- [4] 王彤,马建仓,秦涛,等.基于旋转四元数的姿态解算算法[J].弹箭与制导学报,2014,34(3):15-16,20.
- [5] TKACHENKO A I. Calculation and correction of attitude parameters without measuring angular velocity[J]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2007, 46(2):295-301.
- [6] BRAUNE W, FISCHER O. Determining the position of the centre of gravity in the living body in different attitudes and with different loads[J]. Springer Berlin Heidelberg,1985:47-94.
- [7] 张炜,程锦房.一种三轴磁传感器正交误差校正的简便方法[J].兵工自动化,2009,28(12):75-78.
- [8] 林春生,向前,龚沈光.三轴磁强计正交误差分析与校正[J].探测与控制学报,2005(2):9-12
- [9] 郭敏,尹光洪,田曦,等.基于三轴加速度计的倾斜角传感器的研究与设计[J].现代电子技术,2010,33(8):173-177.
- [10] 冷亮,刘丹.基于 ZigBee 的无线传感器网络[J].中国科技财富,2008(7):116,113.
- [11] 姚铮.无线传感器网络协议栈与低功耗技术的研究与实现 [D].南京:东南大学,2012.
- [12] 李彦,李镡.基于嵌入式 Linux 系统的双网卡大数据传输[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1027-1032.
- [13] 张群,杨絮,张正言,等.蓝牙模块串口通信的设计与实现[J].实验室研究与探索,2012,31(3):79-82.
- [14] 曾瑞,侯正庆.交通量数据采集集中蓝牙通信的实现[J].中国科技论文在线,2007(6):450-452.
- [15] 彭玉海.基于蓝牙通信的无线制造网络的构建[J].机械与电子,2008,3(3):78-80.

## 作者简介

**李继传**,本科,主要研究方向为嵌入式系统开发。

E-mail:262296453@qq.com

**杨克莉**,本科,主要研究方向为嵌入式系统开发。

E-mail:15021187793@163.com

**刘莉**,本科,主要研究方向为数字信号处理。

E-mail:1251908227@qq.com

**韩俊杰**,本科,主要研究方向为安卓手机系统开发。

E-mail:2598413906@qq.com

**杨柳**,博士、讲师,主要研究方向为嵌入式系统开发、数字信号处理。

E-mail: yangliu@sdju.edu.cn