



基于 MEMS 惯性传感器的机器人水平姿态检测系统设计

何伟 陈伟

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙, 410073

【摘要】 本文以 Robocon2009 亚太机器人大赛国内选拔赛为背景, 研究了基于 MEMS 惯性传感器的机器人水平姿态检测与处理系统设计。在本文中, 机器人指双轮差速小车, 姿态信息包括俯仰角和横滚角。我们采用多处理器和模块化的设计思想, 整个系统以数字信号处理器 TMS320F2812 为核心处理器, 分别以双轴加速度计 ADXL202E 和石英角速率微机械陀螺 HZ1-100-100C 作为机器人内部传感器, 实现机器人静态和动态环境下的姿态测量, 并开发了基于 MATLAB GUI 的串口数据接收与处理软件。

【关键词】 机器人, MEMS, 加速度计, 陀螺

0 前言

机器人水平姿态检测方式的选取取决于所使用的传感器。水平姿态检测技术依据输入信息源是位于机器人的内部还是外部, 可以分为两类^[1]: 一是基于机器人外部传感器信息的姿态检测, 摄像机、测距仪和接近觉传感器等是主要的传感器; 一是基于机器人内

部传感器信息的检测技术, 内部传感器如加速度计、微机械陀螺、磁盘计、里程计(编码盘)等。

基于 MEMS 惯性传感器(加速度计和微机械陀螺)的姿态检测, 不需要对机器人进行精确建模, 得到的方法和结果适用性广泛, 在机器人的位姿估计中得到较广泛的研究和应用, 也是我们研究的重点。

1 机器人水平姿态检测系统设计

本文的姿态定义是相对于地球惯性坐标系而言的,机器人指的是我校参加 Robocon2009 国内选拔赛的双轮差速小车(后文不再对机器人和双轮差速小车作区分)。水平姿态信息包括俯仰角(pitch)和横滚角(roll),本文采用内部传感器来实现机器人姿态信息的获取,主要是 MEMS 惯性传感器:加速度计和陀螺仪。对于姿态估计有三种方法,一是利用加速度计实现姿态测量,二是使用陀螺获取姿态信息,三是结合加速度计和陀螺输出信息,采用数据融合的方法。

针对不同的测量任务,本文利用不同的惯性器件进行了设计与实验。

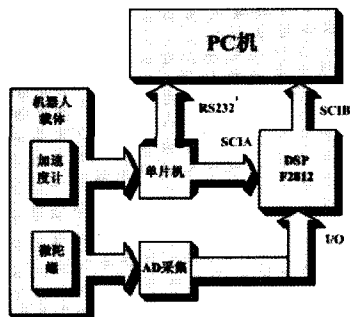


图1 水平姿态检测与处理系统结构框图

图1是本系统的结构框图, MEMS 惯性传感器——加速度计和微陀螺分别作为系统的敏感元件,感应机器人所处的姿态信息,经过数据采集和处理得到我们所需的姿态信息。

针对静态的测量场合,本系统设计了基于加速度计的倾角测量系统。该设计采用多处理器的设计理念,分为下位机和上位机两部分。下位机核心的处理器采用单片机完成对加速度计信号采集与处理,上位机采用PC机和DSP。我们利用PC机MATLAB强大的数据处理功能,完成加速度数据的采集和处理,以便于分析该测量系统的各项性能。接着,我们利用DSP的串行口SCI实现对该数据的采集解算,使得该处理系统可以适用于各个参赛机器人。使用加速度计测量的基本原理是,测量重力加速度在加速度计敏感轴上的分量值。该分量值与重力加速度之商通过求反正弦即可得到所需求的倾角值。

针对动态测量要求,本文提出利用微机械陀螺实现运动过程中倾角的测量。角速率陀螺输出与角速率成

比例的电压信号,通过AD转换,将数字量采入处理器DSP,经过相应的处理,即可得到所求角度值。

本系统 MEMS 惯性传感器选用双轴加速度计 ADXL202E 和微机械谐振陀螺仪 HZ1-100-100, 下位机选用 Philips 单片机 P89C51RD2FN, 上位机选用 DSP TMS320F2812。

2 系统实现

2.1 基于加速度计的测量实现

在本系统中,双轴加速度计 ADXL202E 水平放置,它的两个敏感轴均与重力场垂直,其输出两路 PWM 信号的测量电路主要由以下几部分组成,如图2,包括加速度计模块、单片机模块和人机交互模块。

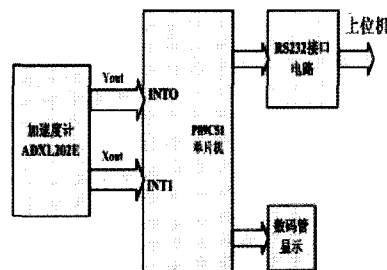


图2 加速度计测量结构图

加速度传感器部分由 ADXL202E 及其外围滤波和调节电路组成,该部分完成带宽和测量频率的选择与设置;利用 P89C51 RD2FN 单片机处理 ADXL202E 产生的两路占空比调制信号,在 LCD 上可以实时地显示我们关心的参数;通过单片机的串行通信功能和 RS232 转换电路与外围设备连接,外围设备是 PC 机和 DSP。

在单片机中预先存储采样参数和误差校正参数,有利于提高测量的精度。电路原理图见图3。

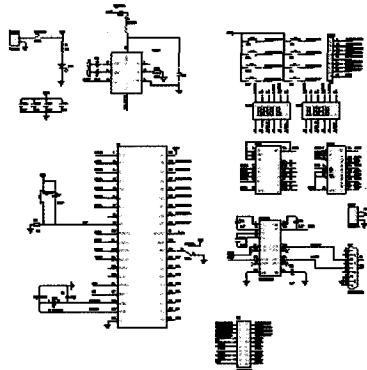


图3 加速度计测量电路原理图



单片机P89C51最核心的任务,就是测量加速度计ADXL202E输出两路PWM波的占空比,并将测得的数据通过串口发送给上位机进行处理。对两路PWM波占空比进行测量有多种方式,既可以通过普通I/O口,也可以通过外部中断INT0和INT1进行。本文采取通过外部中断口INT0和INT1实现两路PWM波的测量。X轴输出PWM波接到INT0口,Y轴输出PWM波连到INT1口,通过设置定时器0和定时器1的工作模式,实现对PWM波的周期和高电平的计数;采用定时器2的波特率工作模式,使用中断方式实现数据传送。相关软件流程图如图4所示。

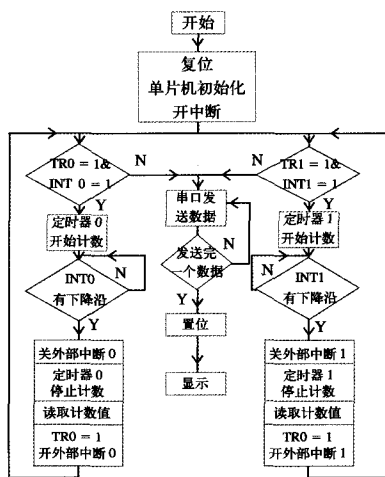


图4 倾角测量软件流程图

上位机选用TMS320F2812,这是一款32位定点DSP芯片,它既具有数字信号处理能力,又具有强大的事件

管理能力和嵌入式控制功能,特别适用于有大量数据处理测控场合。倾角传感器模块接口为RS232,它在与DSP芯片的SCI口通信之前,必须进行电平转换。我校机器人创新基地的主控板提供了两路

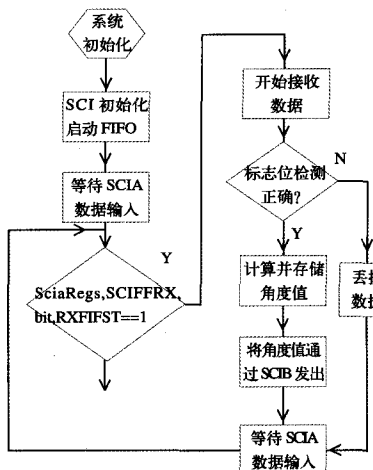


图5 上位机DSP程序流程图

SCI接口,并且这两路接口已经经过了电平转换,不需要额外的设计。图5给出了上位机DSP的程序流程图。

2.2 基于微机械陀螺的测量实现

陀螺敏感轴敏感角速度不受加速度及振动的影响,能够测量动态环境下的姿态角。使用该微机械陀螺,只能测量一个姿态角,这里我们对机器人俯仰角感兴趣,故着重研究。微机械陀螺HZ1-100-100因不同的安装方式其测量角度不同。参考文献^[4]指出,陀螺测量的角度与陀螺的安装方位有关,依据不同的安装方位可以实现俯仰角、横滚角和偏航角的测量。当垂直放置时,它测试的是偏航角速率,如果需要测试俯仰或横滚角速率,只需水平放置即可。图6给出了示意图。

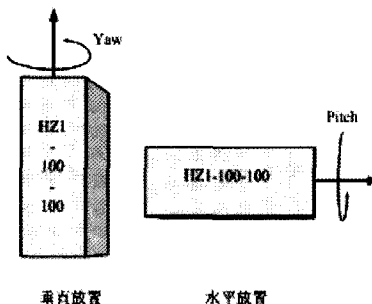


图6 微机械陀螺测量安装示意图

陀螺供电使用稳压电源,我们采用金升阳的WRB2412CS-1W宽压模块,其输入电压范围在18~36V,输出12V电压;陀螺输出信号采用DSP自带的12位带流水线的模数转换器(ADC)进行采样,采用顺序采样模式,ADC模块时钟为1MHz,采样窗口大小为4个时钟周期,排序器为级联模式,工作在开始/停止方式;只要进行一次线性校正和积分处理,便可以得到任意时刻机器人的角度变化及姿态。

3 试验结果及分析

借助MATLAB GUI工具箱,我们编制了一个数据采集和处理系统,实现了命令、参数以及数据的双向传输及显示、数据的滤波处理及绘图。如图7所示,本设计可分为4个区域:串口通信设置区域,接收数据实时显示区域,曲线显示区域和发送区。在以下的测量中我们将用它来接收处理采集的数据。

3.1 静态测量

将倾角仪分别固定在水平面上和场地高山的斜坡

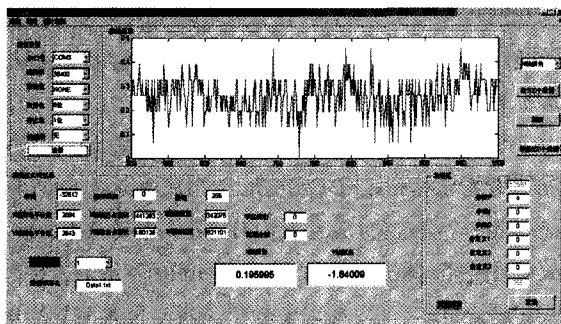


图7 PC机数据接收界面

上,静止放置,通过设计的基于PC机的数据采集和处理系统接收约5min的数据。倾角仪包括自制的基于加速度计ADXL202E的倾角仪、基于微机械陀螺的倾角仪和从长沙斌青电子公司购买的双轴倾角仪BQ-2XN-232。

图8给出了在静态情况下三个倾角仪的测量结果示意图。左上角的图是理想的角度值 16.699° ,右上角的图是使用商用双轴倾角传感器BQ-2XN-232测量的结果,左下角的图是使用自制基于加速度计ADXL202E的测量结果,数据存在波动,这是因为输出叠加了噪声的缘故,在加了butterworth低通滤波之后,数据波动降低了许多,如右下角的示意图。

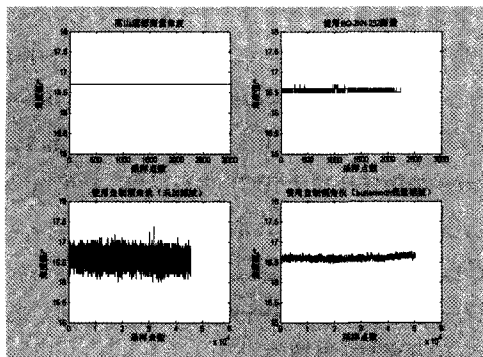


图8 静态情况下高山倾斜角度测量

3.2 动态测量

动态测试的被测量是随时间或空间而变化的,仪器的输入量及测试结果(数据或信号)也是随时间而变化的。我们使用基于加速度计ADXL202E的倾角仪和基于微机械陀螺HZ1-100-100C的倾角测量方法,分别对小车翻越“高山”过程中的姿态进行测量,并采用PC机接收采集的数据,对数据进行分析。

图9反映了使用基于加速度计的倾角仪测量小车过高山时倾角变化情况。当未对测量数据进行任何处理时,

原始倾角数据是极度波动不可信的。依据图9的数据,我们不能对小车过高山是上坡、在坡顶、或下坡三个过程进行区分,测得的倾角值最大达到了 52.74° ,最小达到了 -90° 。

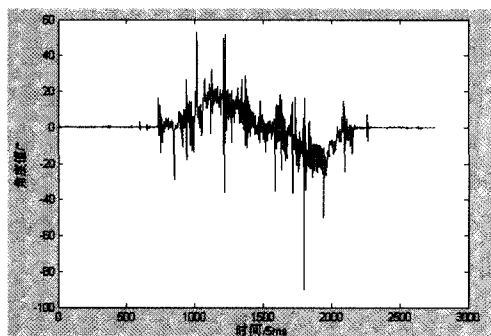


图9 使用基于加速度计的倾角仪测量小车过高山时角度变化情况

于是,我们采用PC机MATLAB GUI串口数据接收系统,接收DSP SCI口发出的数据。DSP中设置的波特率为38400 bps,每5ms发送一组共7个8位数据,包括3个标志帧、2个角度信息和2个时间信息。利用MATLAB绘出采集到的数据见图10。

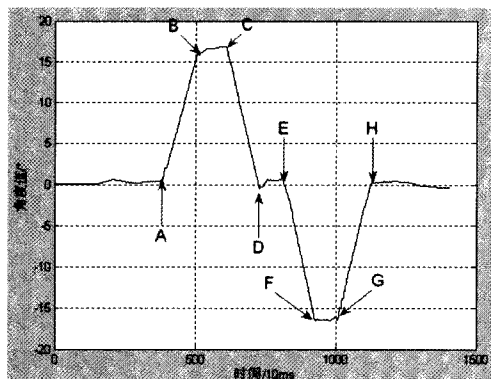


图10 使用微陀螺测量小车过高山倾角变化情况

采集数据时,输出频率为100 Hz。图10中点A~H分别表示小车过山时角度变化的特征点。图中的数据已经经过处理,使得上坡时角度为正,下坡时角度为负。AB为小车车体从上坡到车体完全位于坡上的角度区间,BC为车体完全位于上坡区的角度区间,CD为车体从接触坡顶到完全位于坡顶的角度区间,DE为车体完全位于坡顶的角度区间。EF、FG和GH分别为DE、BC和AB的逆过程。可见,使用陀螺积分计算得到的角度值能较好地反映车体运动过程中的姿态信息,借此,我们可以清晰地分辨出车体处于上坡、坡顶和下坡的各个运动过程。借助于MATLAB信



号处理工具箱 sptool 确定各个特征点的采样时间信息,如表 1 所示,我们可以进一步确定各个过程中车体角度信息情况。

对于具有明显角度信息的角度值区间 BC、DE 和 FG,其测量数据信息见表 1。基于陀螺信息得到的角度值信息相较于加速度计而言,误差要小得多,可信度高

表 1 基于微机械陀螺测得小车过高山特征点

| 特征点 | A | B | C | D |
|-------------|-----|-----|-------|-------|
| 时间信息 /10 ms | 385 | 510 | 603 | 728 |
| 特征点 | E | F | G | H |
| 时间信息 /10ms | 806 | 931 | 1 002 | 1 133 |

3.3 姿态测量精度分析

$$\text{angle} = \text{asin}[(d - m) / n] \quad (1)$$

根据误差传递公式,可以得到姿态角的理论精度:

$$\sigma_{\text{angle}}^2 = \sigma_d^2 \cdot \left(\frac{\partial \text{angle}}{\partial d} \right)^2 + \sigma_m^2 \cdot \left(\frac{\partial \text{angle}}{\partial m} \right)^2 + \sigma_n^2 \cdot \left(\frac{\partial \text{angle}}{\partial n} \right)^2 \quad (2)$$

其中, σ_d^2 , σ_m^2 , σ_n^2 为采集数据误差;

$$\frac{\partial \text{angle}}{\partial d} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d - m}{n} \right)^2}} \times \frac{1}{n} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - (d - m)^2}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \text{angle}}{\partial m} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d - m}{n} \right)^2}} \times -\frac{1}{n} = \frac{-1}{\sqrt{n^2 - (d - m)^2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \text{angle}}{\partial n} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d - m}{n} \right)^2}} \times \frac{m - d}{n^2} = \frac{m - d}{\sqrt{n^2 - (d - m)^2}} \quad (5)$$

通过对采集的数据进行求均值,我们得到 m、n 的值,对于每一个确定的 d、m、n,只要 $n^2 \neq (d - m)^2$,那么

$$\left| \frac{\partial \text{angle}}{\partial d} \right| \leq 1, \left| \frac{\partial \text{angle}}{\partial m} \right| \leq 1, \left| \frac{\partial \text{angle}}{\partial n} \right| \leq 1$$

最后我们得到基于加速度计的物体姿态测量理论精度计算公式:

$$\sigma_{\text{angle}}^2 \leq \sigma_d^2 + \sigma_m^2 + \sigma_n^2 \quad (6)$$

4 结论

本系统是基于 MEMS 惯性传感器的机器人水平

姿态检测与处理系统,以 Robocon2009 大赛为应用背景,实现参赛机器人的俯仰角和横滚角的测量。我们设计的基于双轴加速度计 ADXL202E 的倾角仪具有良好的静态特性,能够测量俯仰角和横滚角,量程范围在,分辨率,精度 0.60%,但是动态测试效果不好;基于微机械陀螺 HZ1-100-100 的倾角检测具有较好的动态特性,测量的俯仰角量程范围为,动态精度 2.0%。

本文工作中所使用的软件开发工具有 DSP 开发软件 CCS2000、Altium Designer 6 (protel)、Keil2.0、Flashmagic、Matlab 7.1,所使用的主要硬件有双轮差动的 Robocon 机器人、基于 Philips 单片机 P89C51RD2FN 的最小系统、基于 TMS320F2812 型号的 DSP 控制板和 DSP 仿真器。

我们完成了机器人姿态检测技术的研究和初步应用,但是离实时精确地提供动态角度信息还有一定差距。

融合加速度计信息和陀螺信息,采用 Kalman 滤波算法实现精确的角度预测是值得研究的方向。

参考文献

- [1] 宗光华,程君实,等译.日本机器人学会编 新版机器人技术手册[M].北京:科学出版社.2007.
- [2] Young Soo Suh. Attitude Estimation by Multiple-Mode Kalman Filters[J].IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2006, 53 (4).
- [3] 田小芳,陆起涌,熊超.基于加速度传感器的倾角仪设计[J].传感技术学报, 2006, 19 (2).
- [4] 曾庆华,张为华.IMEMS 速率陀螺芯片在 MAV 飞行控制系统中应用研究[J].测控技术,2004,23(2).

附

指导老师:

郑志强 张辉 吴学忠 李迅 崔红娟 邢克飞 唐康华

参赛学生:

陈伟 李金辉 湛彤童 孔维韦 何伟 史宝鲁 王南天 杨恒 王星 徐志乾 卢江松 黄亮明 彭杨林 李浩 邓海涛 李辉北 宋玉宝 周力 魏家华 肖良 陈实 赵元 胡海韵 何娟 刘美洁 罗平 赵博欣 徐瑶