

单轴双轮自平衡车姿态检测方案设计*

张吉昌, 程 凯, 郑荣儿

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 针对单轴双轮自平衡车介绍一种基于惯性传感器的姿态检测系统, 分析比较各惯性传感器在姿态检测系统中的性能优劣以及功能互补的特点。提出一种简易互补滤波算法对陀螺仪和加速度计进行数据融合, 并对实际应用中可能出现的几个问题进行了探讨, 从而有效地提高了系统的检测性能。通过系统实际测试得到的数据绘制了曲线图, 表明滤波算法对于提高系统精度是切实有效的。

关键词: 惯性传感器; 陀螺仪; 加速度计; 互补滤波; 姿态检测

中图法分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1672-5174(2009)03-II-467-04

单轴双轮自平衡车是一种两轮左右平行布置的单人电动车, 可实现原地回转和任意半径转向, 移动灵活、控制简单、轻便节能, 适合于繁华市区行人比较多的步行街、游乐场等地方推广使用。近年来, 国内外多家科研单位和企业以及自平衡车的爱好者都对自平衡理论的应用和发展做出了许多的有益的贡献, 大大推进了自平衡技术的发展, 同时也推出了一批杰出的自平衡机器人和载人代步车作品。其中以 2002 年美国 Segway 公司推出的能够自平衡的两轮电动滑车为最具代表性的作品。

像传统的倒立摆一样, 单轴双轮车系统本身是一个自然不稳定体, 必须施加一定的控制手段才能使之平衡。控制系统的任务是不断检测车体所处的姿态,

通过中央微处理器计算出适当的指令和数据后, 驱动装在车轮上的电动机达到车体平衡的效果。可见要实现车体的自平衡控制, 首先必须对检测系统做合理的设计, 以获得足够精确的车体姿态信息。

1 系统概述

根据单轴双轮自平衡车的功能特征, 在姿态检测系统中, 一般选择陀螺仪和加速度计两种惯性传感器来采集车体的姿态信息^[1]。控制单元采用高速处理器完成数据采集与处理, 包括传感器信号的获取、车体姿态的估计、电机控制算法的实现及其他外围的控制等功能。系统功能架构如图 1(a) 所示, 车体结构如图 1(b) 所示。

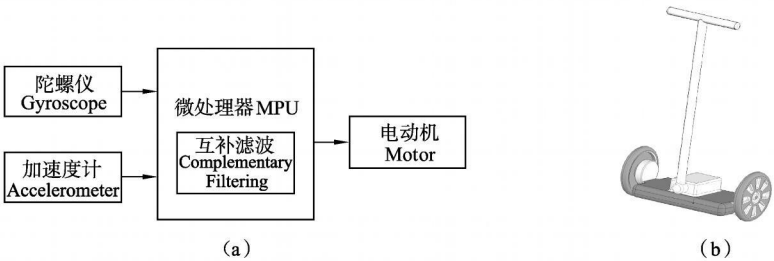


图 1 系统架构

Fig. 1 The system structure

2 惯性传感器介绍与选取

2.1 陀螺仪

如图 2 所示, 陀螺仪的输出值是相对灵敏轴的角速率, 角速率对时间积分即可得到围绕灵敏轴旋转过

的角度值。由于系统采用微控制器循环采样程序获取陀螺仪角速率信息, 即每隔一段很小的时间值采样一次, 所以可采用逐次累加的方法代替连续积分计算角度值:

$$\text{angle}_n = \text{angle}_{n-1} + \text{gyron} \cdot dt \quad (1)$$

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2006AA09Z243)资助

收稿日期: 2009-3-12; 修订日期: 2009-03-22

作者简介: 张吉昌(1982), 男, 硕士生。E-mail: ouc1982@163.com

式中 angle_n 为陀螺仪第 n 次采样时转过的角度值; angle_{n-1} 为陀螺仪第 $n-1$ 次采样时的角度值; gyro_n 为陀螺仪的第 n 次采样得到的瞬时角速率值; dt 为循环程序运行一遍所用时间。可见, 用陀螺仪输出累积积分计算角度, 要求处理器运算速度足够快, 采样程序应尽量简练, 程序循环一遍所用时间 dt 越小, 采样频率越高, 最后积分得到的角度值才能越精确。

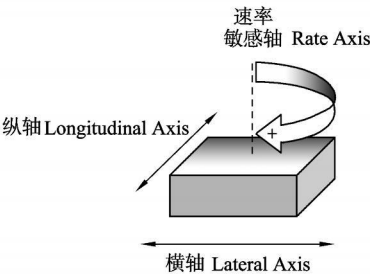


图2 陀螺仪的速率敏感轴和旋转方向
(图中从上部看为顺时针旋转)

Fig. 2 The rate axis of the gyro and the clockwise rotation

2.2 加速度计

加速度计可以测量动态和静态的加速度。静态加速度的一个典型例子就是重力加速度。当加速度传感器静止时, 加速度传感器仅仅输出作用在灵敏轴上的重力加速度值, 即重力加速度的分量值。加速度传感器输出值和重力加速度之间的关系见图3。

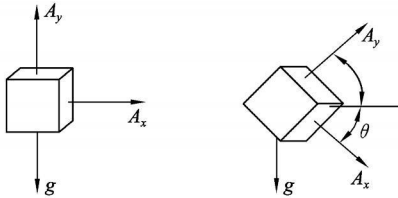


图3 双轴加速度计的灵敏轴与重力场

Fig. 3 The axis of the accelerometer and the gravity field

加速度计输出与重力加速度的关系^[5]可表示为

$$A_x = g \cdot \sin \theta \tag{2}$$

$$A_y = g \cdot \cos \theta = g \cdot \sin (90^\circ - \theta) \tag{3}$$

式中 A_x 和 A_y 为加速度计 x 灵敏轴和 y 灵敏轴的输出; g 为重力加速度; θ 为倾斜角度, 可见 θ 通过反三角函数很容易求得。而式子也可以由正切来表示:

$$\theta = \tan^{-1}(A_x/A_y) \tag{4}$$

通过(4)式即可得到倾斜角度值。在自平衡小车系统中, 由于一般情况下车体倾斜角度 $< 30^\circ$, 即 0.52 rad , 所以可近似得到

$$\theta \approx A_x/A_y \tag{5}$$

由于三角函数的计算会占用微控制器大量的时间, 所以可用式(5)近似计算, 可大大提高微控制器的采样频率。

2.3 传感器选取

经过对资料的分析和对性能价格比的衡量, 惯性传感器检测单元采用 Analog Device 公司的 ADIS16100 (陀螺仪) 和 Freescale 公司的 MMA7260 (加速度计), 其基本性能指标如下。

ADIS16100 是具有数字输出接口的陀螺仪芯片^[2]。它的测量范围达 $\pm 300^\circ/\text{s}$; 灵敏度 $0.244^\circ/\text{s} \cdot \text{LSB}^{-1}$; 可直接通过 SPI 数字接口读取角速率信息, 也可通过测量陀螺仪的模拟输出电压值计算角速率值。

MMA7260 是一款低成本单芯片三轴加速度传感器^[3]。该微型电容式加速传感器出厂时已设定好低通滤波、温度补偿和四种可选加速度测量范围 ($\pm 1.5 \text{ g}$ 、 $\pm 2 \text{ g}$ 、 $\pm 4 \text{ g}$ 和 $\pm 6 \text{ g}$) 的功能, 无需增加外部器件; MMA7260 还具有很高的灵敏度, 当选择 $\pm 1.5 \text{ g}$ 的测量范围时, 灵敏度达到 800 mV/g 。

3 基于互补滤波的数据融合

对于姿态检测系统而言, 单独使用陀螺仪或者加速度计, 都不能提供有效而可靠的信息来保证车体的平衡。陀螺仪虽然动态性能良好, 不受加速度变化的影响, 但是存在累积漂移误差, 不适合长时间单独工作; 加速度计静态响应好, 但受动态加速度影响较大, 不适合跟踪动态角度运动^[4]。为了克服这些困难, 采用一种简易互补滤波方法来融合陀螺仪和加速度计的输出信号, 补偿陀螺仪的漂移误差和加速度计的动态误差, 得到一个更优的倾角近似值。

对于加速度计, 需要采用滤波算法除去短时性快速变化的信号, 保留长时性缓慢变化的信号, 所以可对加速度计应用低通滤波。一种常用的方法是给变化较快的角度信号乘上一个很小权重系数, 以削弱突变信号对整体产生的影响^[8], 如式(6)所示。

$$\text{angle}_n = 0.97 \cdot \text{angle}_{n-1} + 0.03 \cdot \theta_{\text{acce}} \tag{6}$$

式中 angle_n 为第 n 次滤波后的角度; angle_{n-1} 为第 n 次滤波前的角度, θ_{acce} 为第 n 次加速度计采样测定的角度值。

例如, 加速度计传感器输出信号的倾角值突然由 0 变为 10° , 则角度估计值按照表1步骤逐次变化。

表1 加速度计低通滤波

Table 1 The low pass filter based on the accelerometer

采样次数 Hits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
滤波角度 Filtering angle / (°)	0.00	0.30	0.74	1.17	1.58	1.99	2.38	2.76	3.12	3.48	3.82

如果传感器停留在 $10(^{\circ})$, 滤波后角度值会在一段时间后逐渐增大到 $10(^{\circ})$ 。这段时间的长短依赖于滤波常数和循环程序的采样速率(程序循环一次所用时间)。

对于陀螺仪, 情况正好相反, 应用高通滤波方法处理陀螺仪数据, 来抑制陀螺仪积分的漂移。针对加速度计和陀螺仪的姿态检测系统滤波器结构见图 4。

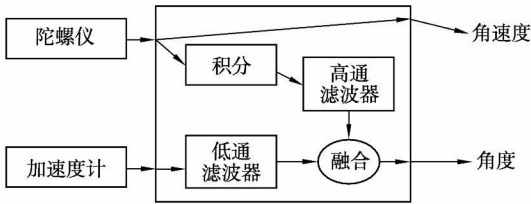


图 4 简易互补滤波器设计

Fig. 4 The design of the complementary filter

简易互补滤波器可表示为

$$\text{angle}_n = a_{\text{gyro}} \cdot (\text{angle}_{n-1} + \text{gyro}_n \cdot dt) + a_{\text{acce}} \cdot \theta_{\text{acce}} \quad (7)$$

式中 $a_{\text{gyro}} = \frac{\tau}{\tau + dt}$ 为陀螺仪的高通滤波系数, $a_{\text{acce}} = \frac{dt}{\tau + dt}$ 为加速度计的低通滤波系数。 τ 为滤波器的时间常数(time constant)。对于低通滤波而言, 变化周期大于时间常数的信号, 可以完整的通过; 变化周期小于时间常数的信号被过滤掉; 高通滤波刚好相反。 τ 这个时间常数, 是更相信陀螺仪还是更相信加速度计的一个界限值。变化周期比 τ 短的, 陀螺仪积分的角度

更让人相信, 而加速度计噪声被过滤掉; 变化周期比 τ 长的, 加速度计测定的角度值比陀螺仪更重要, 因为此时陀螺仪会发生漂移了。

针对陀螺仪的高通滤波和针对加速度计的低通滤波两部分恰好可组成一个互补滤波器。可以看到, 两滤波系数之和为 1, 所以滤波结果是一个比较精确的、线性的角度估计值。

在大多情况下, 滤波器通常是按照这样的顺序设计的^[8]。首先选取时间常数 τ , 然后用 τ 来计算滤波系数。比如, 如果陀螺仪平均每秒漂移 $1(^{\circ})$, 那就可以选取时间常数 $\tau = 1 \text{ s}$, 这样就可以保证每秒的漂移量不会超过 $1(^{\circ})$ 。但该常数值越小, 通过的加速度计噪声就越多。所以必须找到一个最为合适的中间值, 找到该值最好的办法是实验测试。采样频率也是一个重要的数值。例如, 程序的更新时间(循环一次所用时间)为 25 ms , 如果选定时间常数为 0.8 s , 则滤波系数应该这样计算:

$$a_{\text{gyro}} = \frac{0.8}{0.8 + 0.025} = 0.97, a_{\text{acce}} = 1 - a_{\text{gyro}} = 0.03$$

所以滤波器为: $\text{angle} = 0.97 \cdot (\text{angle} + \text{gyro} \cdot 0.025) + 0.03 \cdot \theta_{\text{acce}}$ (8)

通过表 2 可以看出增加了陀螺仪高通滤波的效果。假设系统以 $90(^{\circ})/\text{s}$ 的角速度从 0 旋转到 $10(^{\circ})$, 然后静止不动, 角度评估值按表 2 步骤逐次变化:

表 2 加速度计和陀螺仪的互补滤波

Table 2 The complementary filter based on the accelerometer and rate gyro

循环次数 Hits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
滤波角度 Filtering angle / ($^{\circ}$)	0.00	2.48	4.89	7.23	9.50	9.51	9.53	9.54	9.55	9.57	9.58

程序循环一次用时 25 ms , 计算可知, 前 4 次采样时系统角速度为 $90(^{\circ})/\text{s}$, 此时针对陀螺仪的高通滤波起主要作用, 可以看出角度评估值从 0 快速增加到 $9.50(^{\circ})$; 程序运行至第五次时, 系统已转至 $10(^{\circ})$ 保持不变, 从此时开始后六次采样角速度值都是 0, 这时仅有针对加速度计的低通滤波起作用, 角度值缓慢增加。

4 系统实际测试分析

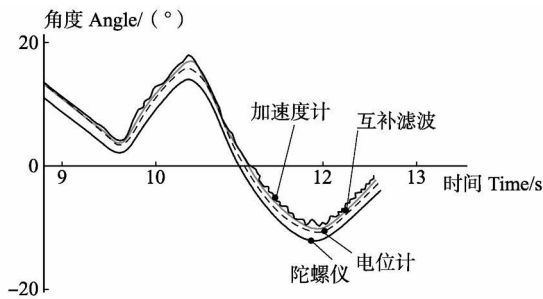


图 5 互补滤波

Fig. 5 The complementary filter

简易互补滤波的效果可以通过图 5 得到一个十分直观的认识。图中横轴为时间轴, 纵轴为角度轴。在实际完成的代步车系统中, 主程序循环周期约为 30 ms , 经多次实验, 在 $\tau = 1.5 \text{ s}$ 可获得最佳平衡效果, 此时 $a_{\text{gyro}} = 0.98, a_{\text{acce}} = 0.02$ 。图 5 是根据实际测试中得到的数据绘制而成。

从图 5 可以看到, 随着检测系统工作时间的增长, 陀螺仪积分得到的角度值逐渐偏离真实角度值, 尤其在大角度时更加明显, 这是陀螺仪积分的漂移造成的; 加速度计输出的角度值在有些地方存在快速的微小波动, 这增加了姿态检测的不稳定性。采用简易互补滤波对两传感器进行数据融合后, 两个问题都得到了较好的解决, 滤波后的角度估计值已十分接近由电位计测量得到的真实角度值, 角度曲线也变得平滑了。可见, 该滤波方法非常有效地融合了两个传感器的数据。

5 结语

本文研究了基于惯性传感器的应用于单轴双轮自

平衡车的检测系统。应用惯性传感器建立的姿态检测单元,完成了对车体姿态的检测,使双轮车能够保持自平衡。通过系统的实际测试应用,表明运用互补滤波算法对传感器进行数据融合所得到的结果是切实有效的,明显提高了动态环境下的姿态检测精度,以达到整车系统精确控制的要求。该检测方案也可应用到其他类似的轮式机器人控制中,应用前景非常广阔。

参考文献:

[1] Albert Jan Baerveldt, Robert Klang. A Low cost and Low weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter //Proc of the IEEE Int Conf on Intelligent Engineering Systems [C]. Sweden: 1997, 391-395.

[2] Data Sheet. $\pm 300^{\circ}/\text{sec}$ Yaw Rate Gyro with SPI Interface [EB/OL]. http://www.analog.com/static/imported_files/data_sheets/ADIS16100.pdf.

[3] Data Sheet. $\pm 1.5\text{ g} \sim 6\text{ g}$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer [EB/OL]. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf.

[4] 秦勇, 臧希喆, 王晓宇, 等. 基于MEMS惯性传感器的机器人姿态检测系统的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 298-301.

[5] 韩宏, 吴嘉澍. 基于加速度计的数字式倾角仪的设计[J]. 传感器技术, 2005, 24(4): 48-50.

[6] 毛强. 基于MEMS技术的倾角传感器的研制[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(10): 1428-1430.

[7] 陈亮, 黄玉美, 林义忠, 等. 陀螺仪角速度的检测与处理[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(4): 58-59.

[8] The Balance Filter [EB/OL]. web.mit.edu/first/segway/. 2008-1-18.

The Design of the Self-Balance Two Wheel Vehicle's Attitude Estimation System

ZHANG Ji-Chang, CHENG Kai, ZHENG Rong-er
(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: An attitude estimation system based on the inertial sensors was proposed. The composition of system was discussed, and the advantages and disadvantages of the sensors were analyzed. The data coming from the inertial sensors was fused through the complementary filter. In this way the characteristic of the sensors can be effectively compensated. There were good results in the actual experiment also, and it had been applied in the attitude estimation of the two wheeled self-balance vehicles. The graphics based on the collected data were made, which indicated that the complementary filter was effectively to enhance the precision of the system.

Key words: inertial sensors; gyro; accelerometer; complementary filter; attitude estimation

责任编辑 陈呈超