

Research on Filtering Problem in Inertial Sensors for a Two-Wheeled Self-Balanced Robot *

GAO Yuanyuan, RUAN Xiaogang^{*}, SONG Hongjun, CHEN Jing

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the random drift error from inertial sensors of a two-wheeled self-balanced robot attitude measuring, a simple and practical filtering algorithm based on Kalman filter which was implemented to information fusion for inclinometer and gyroscope was proposed, thus realizing optimal estimation for the robot gesture signal after sensors error compensation. The experimental results showed that the method based on Kalman information fusion to obtain the optimal estimation was effective and feasible. It is also beneficial to complete the robot self-balancing control.

Key words: attitude estimation; information fusion; Kalman filter; inertial sensors

EEACC: 2575; 7230

两轮自平衡机器人惯性传感器滤波问题的研究 *

郜园园,阮晓钢^{*},宋洪军,陈 静

(北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京 100124)

摘 要:针对惯性传感器在两轮机器人姿态检测中存在随机漂移误差的问题,基于卡尔曼滤波实现对倾角仪与陀螺仪的信息融合,设计了简单而实用的滤波算法,对传感器的误差进行补偿后得到机器人姿态信号的最优估计,从而将其应用于两轮自平衡机器人系统。实验结果表明,采用卡尔曼信息融合的方法,来得到机器人姿态信息最优估计是有效可行的,并且有利于机器人完成自平衡的控制。

关键词:姿态检测;信息融合;卡尔曼滤波;惯性传感器

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 1699(2010)05 - 0696 - 05

两轮自平衡机器人是一个典型的欠驱动系统,它是通过姿态传感器来检测车体的倾斜角度与角速度,并将其检测到的信号传递给控制器,计算得到控制量驱动左右电机,控制机器人前进或后退从而实现自平衡控制。因此传感器姿态信号的优劣直接影响了机器人的控制性能。而一般的惯性传感器所测量的数据存在大量的噪声,两轮自平衡机器人一般采用的姿态传感器有倾角计和陀螺仪。用陀螺仪一般测量机器人的角速度,其动态性能好,适于测量快速变化的信息,测量数据经积分处理后得到机器人车体的倾斜角度,但数据存在累积误差。当其长时间工作时累积误差会无限增大,导致系统无法正常工作。用倾角计测量车体的倾斜角度,它静态性能好,适用于测量缓慢变化的信息,数据也存在误差。

针对这两种传感器的特点需要对其采集的信息进行融合,来得到可靠的姿态信息。卡尔曼滤波具有较强的抑制干扰的能力,并能使控制方式具有良好的动态性能,在非线性最优估计领域得到了很好的应用。采用卡尔曼滤波器对倾角计和陀螺仪的数据进行融合,来实现机器人的自平衡控制。

针对姿态传感器的信息融合问题,采用卡尔曼滤波来实现的研究已有许多。澳大利亚西澳大学机械工程学院 Rich Chi Ooi 所设计的卡尔曼滤波器没有考虑传感器误差模型^[1],倾角滤波后误差还比较大。哈尔滨工业大学机器人研究所王晓宇,赵杰等人提出了用扩展卡尔曼滤波的算法来设计滤波器,他们考虑了传感器误差模型,但其状态方程相对来说较为复杂,应用在机器人上难以得到快速响

项目来源:国家自然科学基金资助项目资助(60774077);国家“863计划”资助项目资助(2007AA04Z226)

收稿日期: 2009 - 11 - 18 修改日期: 2009 - 12 - 29

应^[2]。本实验室在之前也针对两轮机器人设计了一种卡尔曼滤波器,但是只是针对陀螺仪进行卡尔曼滤波,没有实现传感器数据融合^[3]。本文针对惯性传感器在两轮机器人姿态检测中存在随机漂移误差的问题,基于卡尔曼滤波实现对倾角仪与陀螺仪的信息融合,设计了简单而实用的滤波算法,对传感器的误差进行补偿后得到机器人姿态信号的最优估计,从而将其应用于我们机器人研究所的两轮自平衡机器人系统,并且得到了很好的实用效果,有利于机器人完成自平衡的控制^[4-6]。

1 两轮自平衡机器人姿态传感系统

根据两轮自平衡机器人的应用环境,一般选择倾角计、加速度计和陀螺仪三种传感器来采集两轮自平衡机器人的姿态信息。表 1 列出了这三种传感器的性能比较^[1]。

表 1 常用的三种传感器的性能比较

	倾角计	加速度计	陀螺仪
被测量	角度	加速度	角速度
优点	静态性能好	静态性能好	动态性能好
缺点	动态响应慢,不适合跟踪动态角度运动	动态响应慢,不适合跟踪动态角度运动	存在累积漂移误差,不适合长时间单独工作

综合考虑各传感器优缺点、两轮自平衡机器人控制实际和经济性要求,选用的是倾角计和陀螺仪两种传感器。图 1 为北京工业大学人工智能与机器人研究所自主研制的自平衡两轮机器人的姿态感觉运动系统。采用倾角计和陀螺仪组合构成姿态监测传感器。

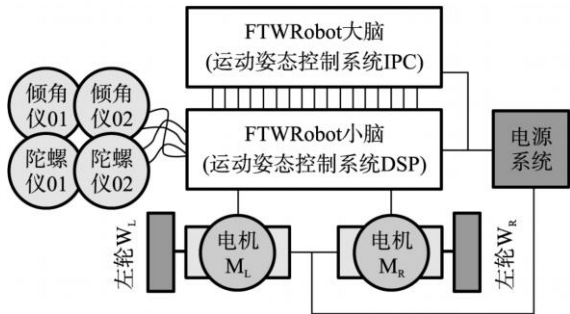


图 1 姿态感觉运动系统

本系统中采用通磁伟业的 WQ90 系列倾角仪,该型倾角仪最大测量角度 $\pm 45^\circ$ 分辨率 $\pm 0.01^\circ$ 温度系数 $0.005\%/10^\circ\text{C}$,经过标准电压变送,在特定的角度范围内分别输出 $0\sim 5\text{ V}$ 、 $1\sim 5\text{ V}$ 标准电压信号或 $4\sim 20\text{ mA}$ 标准电流信号。本实验中采用输

出为 $0\sim 5\text{ V}$ 的标准电压信号。实物如图 2 所示:



图 2 WQ90 型倾角仪

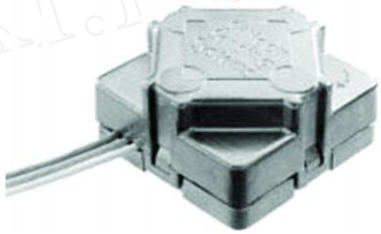


图 3 陀螺仪 CRS03

机器人处于平衡位置,测量倾角传感器的输出信号,可得到倾角传感器的零位电压。图 4 示出了安装在机器人上的倾角传感器的零位电压信号。可取均值作为倾角传感器的零位电压,图中虚线所示。另外,WQ90 倾角计由于测值原理因素,当倾斜角比较大时,其灵敏度会变得越来越差。再加上倾角计相比陀螺仪动态响应慢,不适合跟踪动态角度运动。所以,要得到机器人精确的倾角,单独使用倾角计是不够的,需要与其它传感器共同使用。

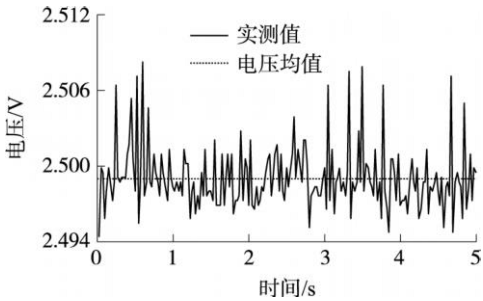


图 4 倾角传感器的零位电压信号

速度陀螺仪采用的是 CRS03 系列角速度传感器,其测量角速度的范围是 $0\sim \pm 100\text{ }^\circ/\text{s}$,灵敏度 $20\text{ mV}/(\text{deg}/\text{s})$,线性度 $0.5\%\text{ F.S.}$,分辨率 $0.05\text{ }^\circ/\text{s}$ ($0\sim 10\text{ Hz}$)。在机器人里使用 CRS03,可以有效地减小体积,降低成本。一般陀螺仪的正常工作温度为 23°C ,输入电压 5 V ,则静止时输出电压零位应该是 2.5 V 。在实际使用中,经观测发现陀螺仪在静止时的输出波形如图 5 所示,出现零位漂移。陀螺仪是用来测量角速度的,通过积分能得到角度值。但由于温度变化、摩擦力

和不稳定力矩等因素,陀螺仪会产生漂移误差。随着时间加长,无论多么小的常值误差,积分后都会得到无限大的角度误差。因此,也不能单独使用陀螺仪作为机器人的倾角传感器。

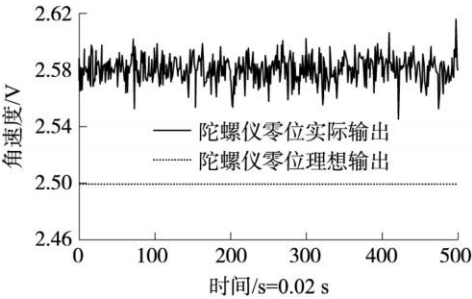


图 5 静止时陀螺仪输出波形

传感器数据融合 (Multi-sensor Data Fusion) 是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理,从而产生新的有意义的信息,而这种新信息是任何单一传感器所无法获得的^[4]。

本文所设计的传感器信息融合算法正是结合了上面两种传感器的优缺点,对其数据进行数据融合,以得到精确的数据。因卡尔曼滤波具有较强的抑制干扰的能力,并能使控制方式具有良好的动态性能,在非线性最优估计领域得到了很好的应用,故采用卡尔曼滤波器对机器人姿态传感器倾角计和陀螺仪的数据进行融合,来更好的实现机器人的自平衡控制^[7]。

2 传感器信息融合

2.1 陀螺仪与倾角计模型

陀螺仪能直接测量机器人本体的倾斜角速度,同时陀螺仪又有相应的漂移误差,其测量模型如下^[8]:

$$\dot{g}_{\text{yro}}(t) = \dot{\theta}(t) + \dot{\theta}(t) + v_{\text{gyro}}(t) \tag{1}$$
式中, $\dot{g}_{\text{yro}}(t)$ 是陀螺仪的测量输出, $\dot{\theta}(t)$ 为所测量机器人本体的真实姿态角速度。 $v_{\text{gyro}}(t)$ 为测量白噪声,这里假设为均匀分布的高斯白噪声, $\dot{\theta}(t)$ 为陀螺仪的漂移误差,通常被描述为如下方程^[9],即

$$\dot{\theta}(t) = \frac{C_1 + C_2}{T} - \frac{1}{T} \cdot \dot{\theta}(t) \tag{2}$$

式中,初始化条件 $\dot{\theta}(0) = C_2$, $\dot{\theta}(0) = C_1 / T_s$, 进行离散化后得到

$$\dot{\theta}(k+1) = \frac{T}{T + T_s} \cdot \dot{\theta}(k) + \frac{T_s \cdot (C_1 + C_2)}{T} \tag{3}$$

式中, T 为总的采样时间, T_s 为采样时间, C_1 和 C_2 由实际拟合误差决定。

倾角计的测量值会带有高斯白噪声,其模型可描述为:

$$\dot{\theta}_{\text{inc}}(t) = \dot{\theta}(t) + v_{\text{inc}}(t) \tag{4}$$

式中, $v_{\text{inc}}(t)$ 为测量白噪声,这里假设为均匀分布的高斯白噪声,

2.2 机器人姿态模型

大范围的温度变化和噪声影响是陀螺仪产生漂移误差的主要原因,事实上温度变化与机器人的姿态变化相比要缓慢很多,可以认为在两个相邻采样周期随机漂移误差不变,故

$$\dot{\theta}(k+1) = \dot{\theta}(k) \tag{5}$$

使用陀螺仪和倾角计共同对两轮自平衡机器人的姿态进行监测,机器人姿态的差分方程模型即可描述为^[2]:

$$\dot{\theta}(k+1) = \dot{\theta}(k) + T_s \cdot (\dot{g}_{\text{yro}}(k) - \dot{\theta}(k)) \tag{6}$$

2.3 卡尔曼滤波器设计

卡尔曼滤波是 R. E. Kalman 于 1960 年提出的从与被提取信号有关的观测中通过算法估计出所需信号的一种滤波算法^[10]。实际上,卡尔曼滤波是一套由计算机实现的实时递推算法,它所处理的对象是随机信号,利用系统噪声和观测噪声的统计特性,以系统的观测值作为滤波器的输入,以所要估计值(系统的状态或参数)作为滤波器的输出,滤波器的输入与输出之间是由时间更新和观测更新算法联系在一起的,根据系统方程和观测方程估计出所有需要处理的信号。它与常规滤波的涵义与方法完全不同,实际上是一种最优估计方法^[11-12]。

本文所设计的卡尔曼滤波状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(k) \\ \dot{g}_{\text{yro}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, & -T_s \\ 0, & \frac{T}{T + T_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(k-1) \\ \dot{g}_{\text{yro}}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_s \cdot \dot{g}_{\text{yro}} \\ \frac{T_s \cdot (C_1 + C_2)}{T + T_s} \end{bmatrix}$$
$$Y = \dot{\theta}_{\text{inc}} \tag{7}$$

其中 \dot{g}_{yro} 为陀螺仪的测量值, $\dot{\theta}_{\text{inc}}$ 为倾角计的测量值。取采样时间为 $T_s = 0.02 \text{ s}$ 。

卡尔曼滤波器过程和测量的协方差矩阵有^[11]

$$Q = \begin{bmatrix} q_{\text{inc}}, & 0 \\ 0, & q_{\text{gyro}} \end{bmatrix}, R = r_{\text{inc}}$$

q_{inc} 和 q_{gyro} 是倾角计和陀螺仪测量各自协方差,不同的取值代表了不同的信任程度,取决于各自传感器的精确度。 R 矩阵代表测量误差的协方差。如果 R 取值较大,那就意味着倾角计测量误差有很大的噪声。快速而合适的决定 Q 和 R 矩阵的值要求对整个实验过程有个很好的理解。在本文设计中不断通过实验来修正其参数值。

3 实验结果分析

图 6 为在机器人上倾角计和陀螺仪静止时采集

的信号数据,通过卡尔曼滤波,从图 6 中可以看出,刚开始时,滤波会出现振荡,因为卡尔曼滤波器在刚开始时要进行参数调整,待大约 1 s 后迅速跟踪上机

器人的角度,明显减少了噪声误差。可以看出卡尔曼滤波器对于高频信号的抑制以及零位误差的修正有很好的效果。

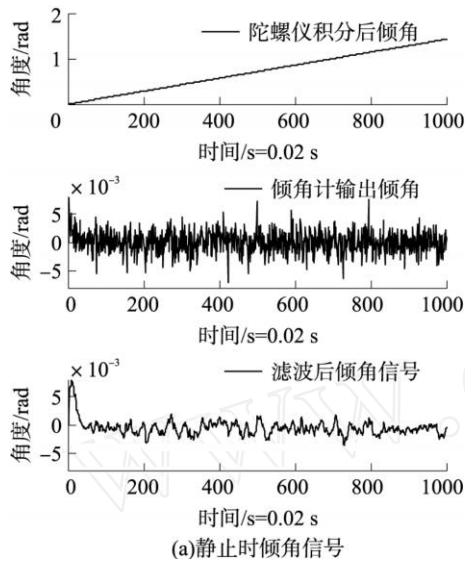


图 6(a) 静止时倾角信号

如图 6(a)所示,当姿态传感器处于零位时,单独使用倾角计时,输出的倾角信号带有一定的干扰噪声,误差在 0.5 左右,不能得到精确的倾角值。而单独使用陀螺仪,通过把其输出积分来得到机器人的倾角信号时,大约 14 s 时,角度值已达到 57.3°。在使用了卡尔曼滤波对倾角计与陀螺仪进行数据融合后,误差控制在 0.1 以内,可满足检测机器人倾斜角度的控制要求。图 6(b)所示,单独使用陀螺仪来检测机器人的倾角速度时,会有一个零位漂移误差大约 5 %s,而单独使用倾角计来检测时,微分后得到角速度值,零位时其干扰噪声误差在 23 %s。在使用卡尔曼滤波补偿后,消除了零位漂移误差,并把误差控制在 3 %s

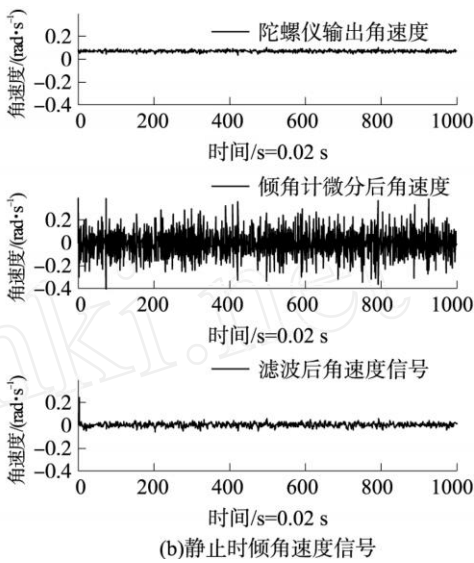


图 6(b) 静止时倾角速度信号

以内,达到了控制要求。

图 7 为采用卡尔曼滤波对自平衡两轮机器人上姿态传感器进行的动态角度与角速度估计,通过给它一个较大范围的倾角来检验滤波器的鲁棒性和精确性,从图 7 中可以看出,无论单独使用倾角计还是陀螺仪作为姿态传感器都有其不足之处,这里采用的卡尔曼信息融合技术大大减少了倾角计的干扰噪声、消除了陀螺仪的漂移误差,达到了设计要求,具有很好的鲁棒性和精确性。图 8 分别为静态与动态情况下采用卡尔曼滤波对陀螺的漂移误差估计,可以看出使用卡尔曼滤波后对陀螺的零漂进行了有效的修正。

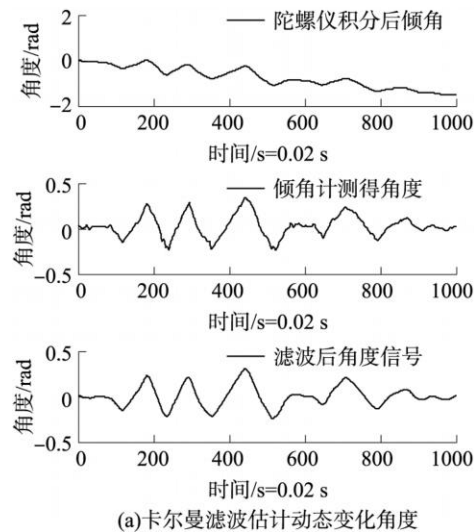


图 7(a) 卡尔曼滤波估计动态变化角度

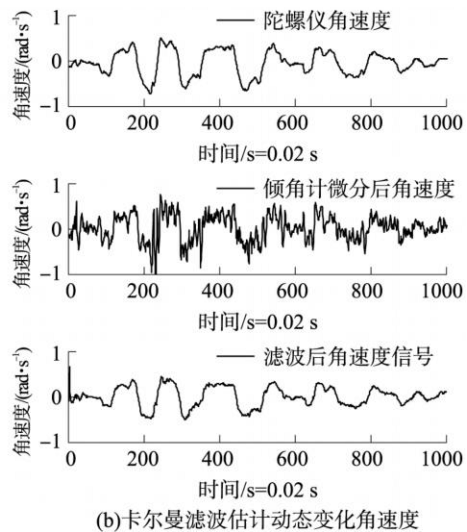


图 7(b) 卡尔曼滤波估计动态变化角速度

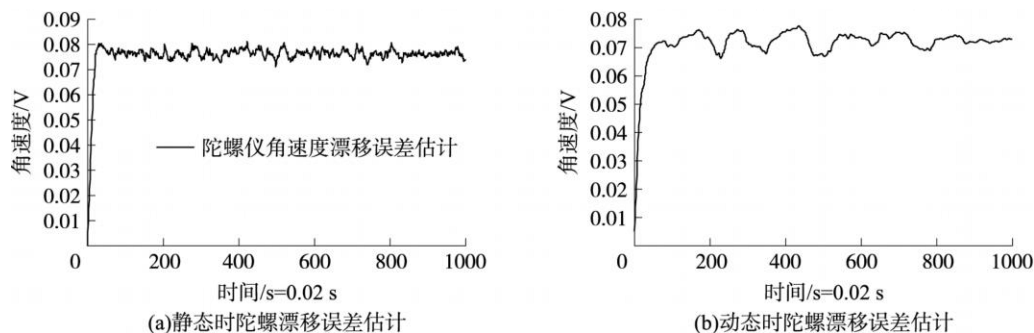


图 8 陀螺漂移误差估计

4 结论

本文分析了两轮自平衡机器人采用的惯性传感器的优缺点,指出了其数据融合的必要性和为两轮自平衡机器人的姿态传感系统设计了卡尔曼滤波器,实验结果表明,本文所设计的卡尔曼滤波算法简单可靠,成功的实现了倾角计和陀螺仪的数据融合,不但有效地消除了零位误差,而且对于陀螺信号中的高频噪声有很好的抑制作用,以及对于动态变化角度也有很好的跟踪效果。经过卡尔曼滤波后得到了最优的倾角与角速度估计,可以有效地提高自平衡机器人的控制性能,为之后研究更好的自平衡机器人学习控制算法提供了一个很好的平台。

参考文献:

- [1] Rich Chi Ooi. Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot[D]. The University of Western Australia School of Mechanical Engineering, Final Year Thesis 2003: 44 - 47.
- [2] 王晓宇, 闫继宏, 秦勇, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的两轮机器人姿态估计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 29(12): - .
- [3] 阮晓钢, 狄海江, 刘江. 自平衡机器人姿态传感信号的滤波问题研究[C]//第七届全国智能控制与自动化大会. 2008. 5.
- [4] 邓自立. 信息融合滤波理论及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [5] Young Soo Suh. Attitude Estimation Using Low Cost Accelerometer and Gyroscope[C]//The 7 th Korea Russia International Symposium on Science and Technology. Ulsan: the University of Ulsan, 2003. 423 - 427.
- [6] Ashokaraj I, Silson P, Tsourdosa. Application of An Extended Kalman Filter to Multiple Low Cost Navigation Sensors in Wheeled Mobile Robots [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Sensors. Orlando: 2002. 1660 - 1664.
- [7] 孙华, 陈俊凤, 吴林. 多传感器信息融合技术及其在机器人中的应用[J]. 传感器技术, 2003, 22.
- [8] 杨大明. 空间飞行器姿态控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 26 - 48.
- [9] Billu Barshan, Hugh F. Durrant-Whyte. Inertial Navigation Systems for Mobile Robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995, 11(3): - .
- [10] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, 1960, 35 - 45.
- [11] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [12] 万永革. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京: 科学出版社, 2006.



郜园园 (1984 -), 女, 北京工业大学电子信息与控制工程学院人工智能与机器人研究所, 博士研究生, 研究方向为移动机器人控制, 机器学习, 智能控制, 传感器信息融合等, yuangao @ emails.bjtu.edu.cn;



阮晓钢 (1958 -), 男, 北京工业大学电子信息与控制工程学院人工智能与机器人研究所所长, 教授, 博导, 研究方向为机器人, 自动控制与人工智能, 智能信息处理, 智能控制等, adrxg@bjtu.edu.cn