

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.06.001

# 两轮自平衡车控制系统的研究

詹友基<sup>1,2</sup>, 应廉泽<sup>2</sup>, 戴福全<sup>2</sup>

(1. 福建省先进制造生产力促进中心制造技术分中心, 福建 福州 350118;  
2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 分析了两轮自平衡车的总体原理及数学模型, 针对单个传感器在两轮平衡车姿态检测中存在的干扰和漂移误差问题, 采用互补滤波算法对加速度计和陀螺仪输出的数据进行融合演算, 对噪声干扰进行了良好的抑制, 提高了输出姿态角的准确性。针对两轮平衡车自平衡控制问题, 采用比例、积分、微分控制器, 使平衡车的平衡系统得到良好的直立平衡控制。仿真数据和实验结果表明, 该方法解决了单个传感器对姿态角测量误差大的问题, 达到要求的控制性能。

**关键词:** 两轮平衡车; 互补滤波; PID; 数学建模; MATLAB

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0511-05

## Research on the control system of two-wheel self-balancing vehicles

ZHAN Youji<sup>1,2</sup>, YING Lianze<sup>2</sup>, DAI Fuquan<sup>2</sup>

(1. Manufacturing Technology Sub-center of Advanced Manufacturing Productivity Promotion Center of Fujian Province, Fuzhou 350118, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The general principle and mathematical model of the two-wheel self-balancing vehicle were analyzed. Aiming at the problem of interference and drift error of single sensors in the posture detection of two-wheel balanced vehicles, the complementary filter algorithm was used to carry out fusion calculation of the data output by the accelerometer and the gyroscope, and the noise interference was suppressed well and the accuracy of the output posture angle was improved. As to the self-balancing control of the two-wheel balancing vehicle, proportional, integral and differential controllers were adopted to achieve a good vertical balance control of the vehicle's balancing system. Simulation data and experimental results show that this method solves the problem that single sensors have great errors in posture angle measurement, and achieves the required control performance.

**Keywords:** two-wheel self-balancing vehicle; complementary filter; PID; mathematical modeling; MATLAB

两轮自平衡车是一种基于倒立摆模型的自然不稳定体, 具有非线性、多变量、强耦合等特点<sup>[1]</sup>。其动力学结构类似于倒立摆, 应使用控制系统控制在垂直位置附近<sup>①</sup>。两轮自平衡车拥有

灵活性和机动性, 对环境能作出快速响应, 在拥挤的城市中, 更能体现出便利性<sup>[2]</sup>。两轮自平衡车同时也是验证控制理论非常好的实验平台, 被广泛应用于代步、观光、娱乐等多个场合, 在实际应

收稿日期: 2018-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775113); 福建省自然科学基金项目(2016J01723); 石材产业加工技术与装备福建省 2011 协同创新中心合作项目(2017XT002)

第一作者简介: 詹友基(1972-), 男, 福建闽清人, 教授, 博士, 研究方向: 可持续设计与制造。

① SLAVOV T, KRALEV J, PETKOV P. Linear-quadratic control of a two-wheeled robot [J/OL]. [2014-06-19]. <https://www.researchgate.net/publication/289608821>.

用和研究领域都具有良好的应用前景<sup>[3]</sup>。目前国内外都对两轮平衡车进行了深入研究,早在 1986 年,日本的 Yamafuji 就利用两轮自平衡车的原理做出了样机。随后,日本又推出了基于倒立摆的轮式机器人,并且获得了相关的专利。2001 年,美国迪恩·卡曼成功设计出一款单脚滑轮车,名为 SEGWAY。国内对于平衡车的研究起步较晚,2003 年,台湾“中央大学”首先设计出两轮自平衡机器人<sup>[4]</sup>。2005 年,哈尔滨工程大学设计出两轮自平衡机器人 Sway<sup>[5]</sup>,该机器人使用 80C51 单片机作为主控制器。

数据融合的姿态解算算法一般有卡尔曼滤波、小波分析、神经网络等,但这些方法计算量大且具有较高阶数,对处理器的要求比较高。相比之下,互补滤波算法在满足系统实时计算的同时,运算要求简单而且可靠,完全能满足实验要求。PID 算法作为经典的控制算法已在工程中被广泛使用。比例-积分-微分(PID)控制器通常用于实现水平面上的垂直稳定和期望的位置<sup>[6]</sup>。所以本文采用互补滤波算法和 PID 控制算法实现小车的自平衡。将这两种算法结合使用,代码量少,运算速度快,参数调整简单,并且已经在自平衡控制实验中取得良好的试验效果。

## 1 两轮平衡车总体原理图设计

基于 PID 和互补滤波算法的两轮自平衡车的总体设计架构图如图 1。

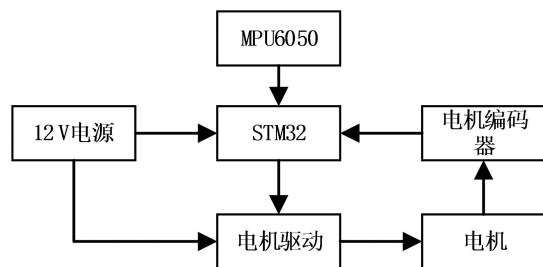


图 1 两轮自平衡车总体架构图

Fig.1 Overall structure of the two-wheel self-balancing vehicle

如图 1 所示,微处理器作为控制系统的核心,综合性能、功耗、成本等各方面考虑,本文以 STM32F103C8T6 单片机为控制核心进行数据处理。采用 MPU6050 传感器获取平衡车姿态信息与 STM32 进行通信,使用 TB6612FNG 电机驱动

模块驱动电机,将电机编码器信号反馈给 STM32。选取 12 V 的锂电池对电机驱动进行供电,再通过稳压模块 LM2596T 和 AMS1117 降压处理为单片机及其余模块进行供电。

## 2 姿态解算和直立控制算法

### 2.1 MPU6050 特点与互补滤波

根据自平衡原理可知,平衡车向一侧倾倒时,为保证车体能及时恢复平衡,电机必须向那一侧产生加速度使之前进来抵消倾斜趋势进而以维持系统的平衡,所以必须不断检测车体自身的姿态角并反馈给单片机,而后通过 PID 算法来实现平衡直立控制。本文采用 MPU6050 传感器来检测车体的姿态角。

对于 MPU6050 来说,陀螺仪有较好的动态响应特性,但是随着时间的累积,积分后所得到的数据误差比较大;小车的加速度计取瞬时值计算倾角误差比较大且动态响应慢,输出角度受高频振动响应<sup>[7]</sup>。所以,互补滤波器根据这两种传感器的不同特点进行数据融合演算以提高姿态角测量的准确性。互补滤波原理图如图 2。

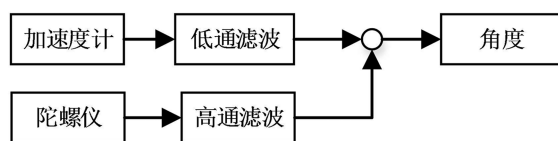


图 2 互补滤波原理图

Fig.2 Schematic diagram of the complementary filter

如图 2 所示,加速度计和陀螺仪分别经过低通滤波和高通滤波后,将两个传感器输出所得到的数据进行融合演算,滤波得到具体角度表达式如式(1)。

$$\text{angle} = a \times \text{accAngle} + (1 - a) \times (\text{angle} + f\text{GyroRate} \times dt) \quad (1)$$

其中,angle 为获得的实际姿态角度,  $f\text{GyroRate}$  为陀螺仪值,  $\text{accAngle}$  为加速度数据换算后的角度值,  $dt$  为计算周期,  $a$  为互补滤波系数。最后通过 MPU6050 和 STM32 之间的 IIC 总线将数据输送至微处理器进行处理。

### 2.2 PID 控制算法

根据互补滤波算法融合后的姿态信息,经过控制算法计算出 PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制),进而控制 PWM 波的占空比,从

而对电机驱动进行控制,调整平衡车的运动姿态使之保持平衡。

本文采用经典 PID 算法对平衡车进行自平衡控制。它将输入值和输出值的偏差通过比例、积分、微分进行数学计算,将所得计算结果作为控制系统的输出值反馈给系统<sup>[8-9]</sup>。如式(2)。

$$u(t) = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \times \int_0^t e(t) dt + T_d \times \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

其中,  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数,  $e(t)$  和  $u(t)$  分别为控制的输入和输出。为了便于程序处理,将公式(2)化简,得到如下表达式:

$$\text{CCR1\_Val} = K_p \times \text{pitch} + K_i \times \text{error} + K_d \times f\text{GyroRateY} \quad (3)$$

其中,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为比例系数、积分系数、微分系数。CCR1\_Val 为经过 PID 整定后的电压值,作为电机的输入。pitch 为经过互补滤波融合运算后的姿态倾角。Error 为真实姿态倾角与期望倾角(为零)的误差积分值。fGyroRateY 为陀螺仪所测得的角速度。

### 3 动力学建模及仿真

#### 3.1 车体模型

通过分析两轮平衡车的各个结构之间的力学关系建立数学模型,并通过 MATLAB 仿真平衡车姿态角、速度、角速度的变化过程,来验证平衡车系统是否可以通过 PID 控制器来实现直立平衡控制。

牛顿力学法经过一个复杂的过程,考虑组成机构之间的相互作用力,它通过处理力之间的矢量关系,对机器人运动和加速度提供了一个直观的理解<sup>[10]</sup>。所以本文采用牛顿力学法对平衡车系统建立动力学模型。通过分析车子内部的力学特性,分别得出车轮、车体、电机的数学模型。图3为平衡车结构简图。

因为平衡车摆动幅度很小,所以可近似化处为  $\cos\theta = 1$ ,  $\sin\theta = \theta$ ,  $\theta = 0$ , 令  $x_w = x$ , 所以车轮运动模型和车体运动模型可简化为如下方程<sup>[11]</sup>:

$$\ddot{x} \left( \frac{J_w}{R} + Rm - RM \right) + RLM\theta_b = T_w \quad (4)$$

$$\ddot{x}ML + (J_b + ML^2)\theta_b - MgL\theta_b = T_b \quad (5)$$

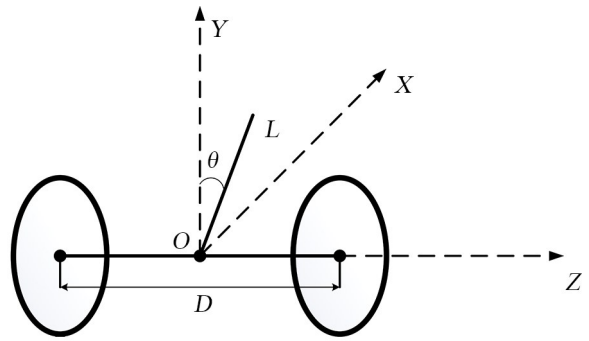


图3 平衡车结构简图

Fig.3 Structure diagram of the balancing vehicle

$$T_w = T_b = T \quad (6)$$

式中,  $x_w$  是车轮水平方向坐标(单位:m);  $m$ ,  $M$  分别为车轮和车体质量(单位:kg);  $g$  为重力加速度,  $\theta_b$  为车体与  $Y$  轴方向夹角(单位:rad),  $J_w$ 、 $J_b$  是车轮和车体绕  $Z$  轴方向的转动惯量(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),  $R$  为车轮半径(单位:m),  $L$  车体重心位置到车轴重心点距离(单位:m),  $T_w$  和  $T_b$  分别是左右轮转矩(单位:  $\text{N} \cdot \text{m}$ )。

#### 3.2 电机模型

根据电机转矩平衡方程和电枢电压方程建立电机模型,而后经过拉普拉斯变化可得式(7)。

$$I(s) = \frac{U(s) - K_n n(s)}{Ls + R} \quad (7)$$

式中,  $I$  电机电流;  $U$  电机输入端电压;  $R$  电阻;  $L$  电枢电感,  $K_n$  反向电动势常数;  $n$  电机转速。

图(4)为直流电机驱动系统模型。

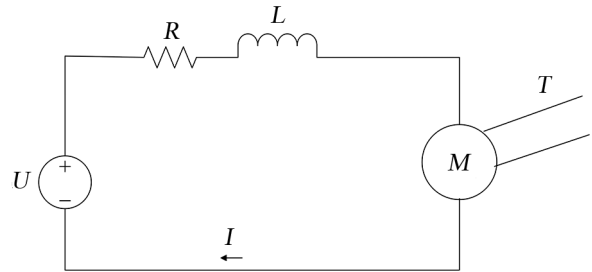


图4 直流电机驱动系统简化模型

Fig.4 Simplified model of the DC motor's drive system

由式(7)和图(4)可看出,由于电机内的电阻和电感固定,所以可以通过控制电机的输入电压来对电机电流和转速进行输出控制。

#### 3.3 MATLAB 平台建模仿真

SIMULINK 仿真的优点是框图搭建方便且直

观,同时省去大量编程的麻烦。所以,借助于 MATLAB 中的 SIMULINK 可视化仿真工具,根据以上的微分方程,分别建立平衡车车体、电机以及

系统控制总图模型。鉴于本文篇幅限制,只给出系统控制总图如图 5。

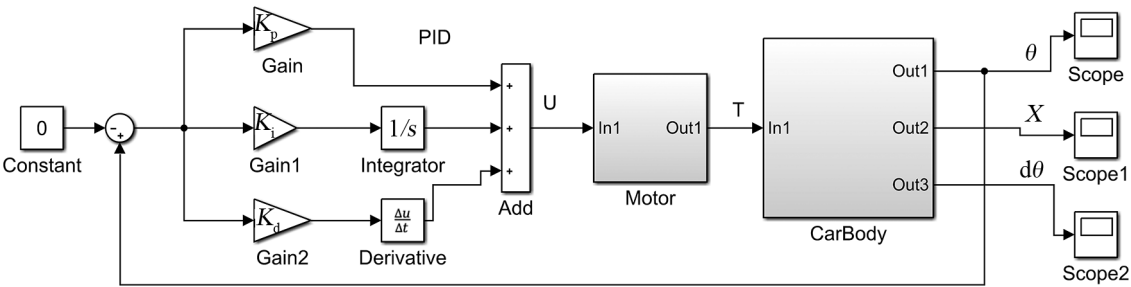


图 5 系统控制总图  
Fig.5 System control plan

图 5 中,从左至右分别是系统的输入(平衡车期望姿态角值  $0^\circ$ )、PID 控制器、电机模型、车体模型和系统的 3 个输出(平衡车姿态角  $\theta$ 、平衡车位移  $x$ 、平衡车角速度  $d\theta$ )。通过 SIMULINK 仿真,得到仿真曲线如图 6、7、8。

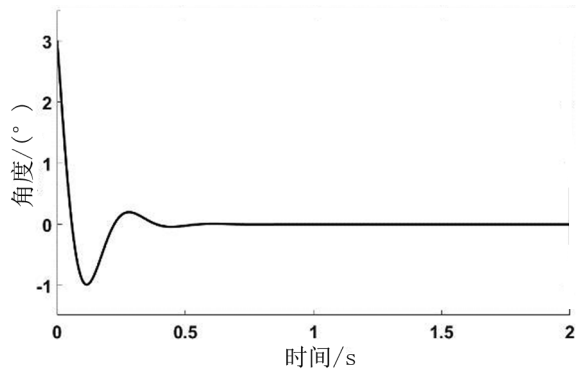


图 6 平衡车倾角  
Fig.6 Inclination of the balancing vehicle

根据以上 SIMULINK 仿真图可以看出,3 个变量都能在极短的时间内趋于稳定。倾角曲线中,给定一个  $3^\circ$  的初始倾角最后收敛至 0。位移曲线给定一个起始位置收敛至 0,角速度曲线到最后同样收敛至 0。说明在此闭环反馈系统中,系统输出的 3 个值都能被稳定控制。

4 实时姿态验证

采用无线蓝牙通讯方式,将 STM32 单片机解算出来的姿态角信息通过蓝牙发送至上位机进行实时观测,将在线采集的数据,绘制成实时波形曲线图如图 9。

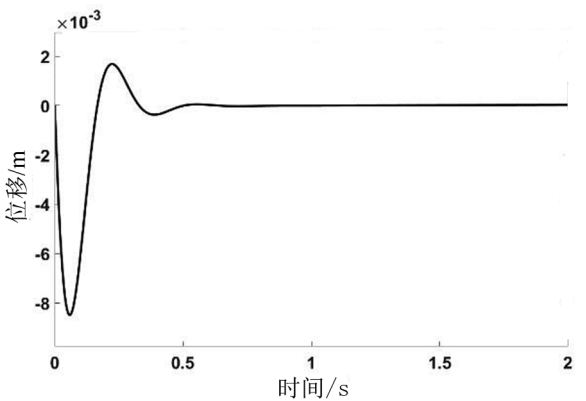


图 7 平衡车位移  
Fig.7 Displacement of the balancing vehicle

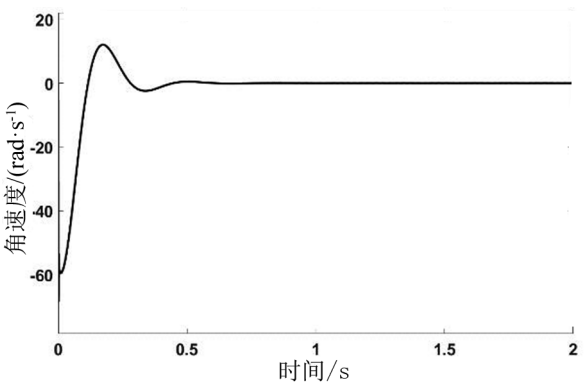


图 8 平衡车角速度  
Fig.8 Angular speed of the balancing vehicle

该方法摆脱了数据线的束缚,有助于实时观测平衡车的姿态角信息,反映数据状态,解决了需要通过数据线连接进行串口通信的问题。如图 9 所示,将坐标轴 Y 轴范围设置在  $(-10, 10)$ 。实时

测量数据结果表明,平衡车姿态角在 $(-2^{\circ}, 2^{\circ})$ 上下浮动,摆动幅度很小,证明实现了平衡车的直立控制。

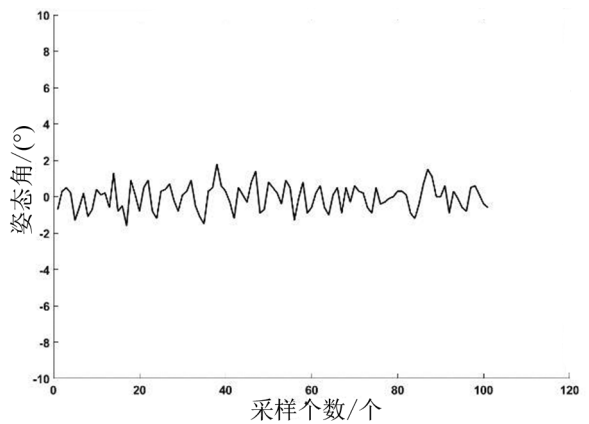


图 9 平衡车实时姿态角

Fig.9 Real-time posture angle of the balancing vehicle

## 5 结语

基于 STM32F103C8T6 单片机为核心,针对两轮自平衡车的平衡问题,研究了互补滤波算法和 PID 算法在平衡车上的应用。仿真结果表明,利用 PID 算法能够使控制系统快速进入稳定状态实现平衡控制。系统测试表明,平衡车在一定偏角内可自动调整姿态,证明互补滤波算法结合 PID 算法很好地实现了平衡车的自平衡控制,具有较强的实用性,满足实验要求。

## 参考文献:

[1] 姜香菊, 刘二林. 两轮自平衡机器人角度检测数据融合算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(8): 203-205.

[2] 姚尚明, 童亮, 杜迪. 自平衡两轮电动车控制系统仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 74-76.

[3] 戴福全, 李济泽, 朱悦涵, 等. 两轮自平衡机器人转向稳定性优化研究[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 256-257.

[4] 阮晓钢, 任红格. 两轮自平衡机器人动力学建模及其平衡控制[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 100-101.

[5] CHAN R P M, STOL K A, HALKYARD C R. Review of modelling and control of two-wheeled robots[J]. Annual Reviews in Control, 2013, 37(1): 89-103.

[6] 高正中, 龚群英, 宋森森. 基于 STM32 的智能平衡车控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(14): 47-49.

[7] 陈鹏展, 朱年华, 李杰. 两轮自平衡车姿态检测与平衡控制[J]. 控制工程, 2017, 24(8): 1575-1577.

[8] 杨树松, 曹艳玲, 徐锐良. 电动助力转向系统的 PID 控制研究[J]. 机械工程与自动化, 2011(6): 116-118.

[9] KIM S, KWON S J. Dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum balancing mobile robot[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2015, 13(4): 926-933.

[10] 赵磊. 两轮平衡车建模与系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

(责任编辑: 陈雯)