

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312678

# 基于四元数的两轮自平衡车控制系统研究<sup>\*</sup>

孔德肖 王甲一 李俊毅 张晴晖 强振平  
(西南林业大学大数据与智能工程学院 昆明 650224)

**摘要:** 为了提高两轮自平衡控制系统的实时性和稳定性,提出了一种将四元数与PID相结合的两轮自平衡车控制机制。该机制基于四元数实现姿态角度的解算,基于PID算法实现平衡车的运动控制。该系统使用MPU-6050对平衡车的角速度和角加速度进行测量,使用编码器对电机转动速度进行测量,将这些测量数据作为平衡车控制系统的反馈,完成平衡车的控制,并可通过手机APP进行人机交互。在本文设计的控制算法下,平衡车在自平衡、载高度自平衡和载重自平衡三种场景下均可以保持良好的平衡性。采集了三种场景下平衡车俯仰角数据20 000组,方差分别为0.013、0.084、0.065。在静置状态下与卡尔曼滤波算法和互补滤波算法进行了对比,在5 000组的自平衡数据中平衡车的俯仰角方差为0.000 239,相较于其他两种算法更小。上述实验结果表明了本研究提出的控制机制能够在满足平衡车控制实时性的同时实现平衡车的稳定控制。

**关键词:** 自平衡车;四元数算法;直立环;速度环

**中图分类号:** TP272 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 51099

## Research on the control system of two-wheeled self-balancing car based on quaternions

Kong Dexiao Wang Jiayi Li Junqiu Zhang Qinghui Qiang Zhenping

(College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** To enhance the real-time performance and stability of the two-wheeled self-balancing control system, a mechanism combining quaternion and PID algorithms has been proposed for the control of the two-wheeled self-balancing vehicle. This mechanism is based on quaternion calculation to determine the attitude angles and uses the PID algorithm to achieve motion control of the balancing vehicle. The system measures the angular velocity and angular acceleration of the balancing vehicle using MPU-6050 and measures the motor rotation speed using encoders. These measurement data are used as feedback for the balancing vehicle control system, which enables the control of the vehicle and human-machine interaction through a mobile app. Under the control algorithm designed in this paper, the balanced vehicle can maintain good balance in three scenarios: self-balancing, self-balancing with high load and self-balancing with heavy load. In total, 20 000 sets of data of the pitch angle of the balanced vehicle in the three scenarios were collected, with variances of 0.013, 0.084 and 0.065 respectively. When compared to the Kalman filter and complementary filter algorithms in a stationary state, the pitch angle variance of the balanced car in the 5 000 sets of self-balancing data was 0.000 239, smaller than the other two algorithms. These experimental results show that the proposed control mechanism can achieve stable control of the balanced vehicle while satisfying the real-time requirements.

**Keywords:** self-balancing vehicle; quaternion algorithm; upright loop; speed loop

## 0 引言

两轮平衡车是一种同轴平行布置的结构,两个车轮围

绕同一条轴转动,它与倒立摆系统相似,但其重心位置在支点上方,属于自然不稳定系统。它具有运动灵活、操作简便、机械系统简单等特点,其在载人、载物以及算法控制研

收稿日期:2023-01-27

<sup>\*</sup> 基金项目:云南省农业联合专项(202301BD070001-127)、西南林业大学森林生态大数据国家林业和草原局重点实验室重点项目(2022-BDK-05)、云南省教育厅科学研究基金(2023Y0703)项目资助

究等方面都有一定的研究意义和实用价值<sup>[1-3]</sup>。

在平衡车的应用与算法控制上,国内外有大量学者对其进行了研究测试。文献[4]在平衡车上配备了超声波传感器、摄像机、陀螺仪和加速度计等设备,利用视觉系统和超声波传感器结合摄像机,使用模糊控制器对周围物体的位置进行模糊处理,实现了机器人跟踪移动的多方向导航功能。文献[5]研究了一种两轮动态机器人的建模和控制设计,通过拉格朗日方程建立机器人的数学模型,并转换为状态空间系统,为提高系统的鲁棒性使用了二次调节器(LQR),最终通过 Matlab 仿真验证了系统的可行性。文献[6]介绍了两轮自平衡机器人的车身设计,并对其控制算法和结果进行了研究。文献[7]提出了 PD-PI 控制器进行平衡车的控制,其设计的平衡车能够同时避开急性和动态障碍物,并能够进行无线控制,根据仿真实验结果表明了所提出控制算法的有效性,平衡车能够在多种环境干扰下保持平衡。文献[8-10]是在卡尔曼滤波算法上进行姿态求解实现平衡车的自平衡控制,其中,文献[8]还与互补滤波相结合实现了平衡车的自平衡控制。文献[11]使用 STM32F103C8T6 单片机,结合 IMU 和 UWB 技术设计了一种轨迹跟踪平衡车,并通过实验证明其设计的系统能够对给定的参考轨迹进行跟踪。文献[12]将常规的 PID 控制与单神经元控制思想相结合,通过其制定的学习规则,能够在线调整各控制环节参数,并通过模糊控制器对其增益系数进行自整定,通过 MATLAB 仿真验证,改进后的单神经元 PID 控制器具有较好的跟踪性能和抗干扰能力。文献[13]基于 STM32F103C8T6 单片机设计了平衡车系统,通过 PID 算法和互补滤波算法实现平衡车的自平衡控制,通过实验表明该平衡车系统具有良好的性能。文献[14]中将模糊控制和自适应控制相结合应用于平衡车系统中,通过仿真验证和实物验证,表明了该研究能够对平衡校车进行良好的控制。文献[15]为了提高平衡车自学习和自平衡能力,引入 OC 学习机制。仿真实验表明,控制器能够自主

设计模糊规则,具有自主学习能力,且实物测试也具有良好的控制性能。文献[16]中使用神经元 PID 控制算法替代传统 PID 控制算法,并通过实验验证得出 PID 控制算法具有更高好的性能。

本文对四元数算法原理与平衡车控制原理进行了分析,将平衡车的控制分为姿态解算和运动控制两大部分,以此构建了四元数与 PID 相结合的控制结构。以 STM32F103RCT6 单片机作为核心控制器设计了平衡车硬件系统,分别对四元数和 PID 进行了软件程序设计。在理论分析的基础上对每个部分进行了单独测试以及整个系统在多种场景下的完整测试,最终实现了两轮平衡车的运动控制。并将四元数算法与卡尔曼滤波算法和一阶互补滤波算法进行了对比测试。根据以上测试结果表明将四元数应用与平衡车的控制具有良好的实时性和稳定性。

## 1 系统算法与控制原理分析

### 1.1 四元素姿态求解算法实现

平衡车的自平衡和运动控制中需要用到俯仰角(Pitch)和航向角(Yaw)作为反馈来实现对平衡车的运动控制,该系统中使用 MPU-6050 传感器对平衡车运动过程中的角速度、角加速度进行测量,使用四元数算法根据  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴上采集到的数据对平衡车实时姿态进行解算。

物体在三维空间中从一个姿态转动到另一个姿态可以通过一个依次绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴进行旋转得到的复合矩阵表示。这里取平衡车旋转时绕轴的转动顺序为  $z$ 、 $y$ 、 $x$ ,根据该旋转顺序得到复合矩阵如式(1)所示,其中  $\phi$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$  分别表示平衡车绕  $z$ 、 $y$ 、 $x$  三轴转动的角度。

四元素可以将上述平衡车绕 3 个轴的旋转变换等效为绕空间中绕某一个向量旋转得到的结果,通过四元数表示平衡车到在地坐标系中的旋转变换矩阵如式(2)所示。

根据式(1)和(2)得到欧拉角和四元数的转换关系如下:

$$c_b^E = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\psi & \sin\theta \sin\gamma \cos\psi - \cos\theta \sin\psi & \cos\theta \sin\gamma \cos\psi + \sin\theta \sin\psi \\ \cos\gamma \sin\psi & \sin\theta \sin\gamma \cos\psi + \cos\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\gamma \sin\psi - \sin\theta \cos\psi \\ -\sin\gamma & \sin\theta \cos\gamma & \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} \gamma = -\arcsin(2(q_1q_3 - q_0q_2)) \\ \theta = \arcsin\left(\frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \\ \phi = \arcsin\left(\frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)的对应关系可知,只需要求解出四元数中的  $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  四个参数即可得到平衡车当前的姿态角。 $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  值通过四元数微分方程进行求解,其解的形式为式(4)。

式(4)中  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  分别当前时刻是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴上陀螺仪测量到的角速度值, $\Delta t$  是姿态更新间隔时间。具体实现步骤如下:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} \Delta t \begin{bmatrix} -\omega_x q_1 - \omega_y q_2 - \omega_z q_3 \\ \omega_x q_0 + \omega_z q_2 - \omega_y q_3 \\ \omega_y q_0 - \omega_z q_1 + \omega_x q_3 \\ \omega_z q_0 + \omega_y q_1 - \omega_x q_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对 3 个轴上的加速度值  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$  进行归一化(因为

计算使用的四元数是归一化的四元数),如下:

$$\begin{cases} ax = \frac{ax}{\sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}} \\ ay = \frac{ay}{\sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}} \\ az = \frac{az}{\sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}} \end{cases} \quad (5)$$

提取平衡车坐标系下的重力分量,3个轴上的重力分量分别记为  $V_x, V_y, V_z$ ,表示如下:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_0q_1 + q_2q_3) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过向量叉乘计算得到加速度计测量得到的误差,计算方法为:

$$\begin{bmatrix} ax \\ ay \\ az \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ay * Vz - az * Vy \\ az * Vx - ax * Vz \\ ax * Vy - ay * Vx \end{bmatrix} \quad (7)$$

使用  $ea_x, ea_y, ea_z$  表示 3 个轴上的误差,对其进行积分累加得到加速度计上的角速度误差,计算方法如下:

$$\begin{cases} accex = accex_{(t-1)} + ea_x \times ki \times dt \\ accey = accey_{(t-1)} + ea_y \times ki \times dt \\ accexz = accexz_{(t-1)} + ea_z \times ki \times dt \end{cases} \quad (8)$$

其中  $accex, accey, accexz$  为 3 个轴上的误差积分结果,  $accex_{(t-1)}, accey_{(t-1)}, accexz_{(t-1)}$  为上一次的积分累计结果,  $ki$  为积分系数,  $dt$  为积分时间。最后使用互补滤波的方式对陀螺仪测量值进行修正,计算方法如式(9)所示,其中  $\omega_x', \omega_y', \omega_z'$  分别是对陀螺仪三个轴上测量值  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  修正最后的结果,  $Kp$  为误差比例系数。

$$\begin{cases} \omega_x' = \omega_x + Kp \times ea_x + accex \\ \omega_y' = \omega_y + Kp \times ea_y + accey \\ \omega_z' = \omega_z + Kp \times ea_z + accexz \end{cases} \quad (9)$$

根据上述步骤进行程序设计即可实现四元数对平衡车的姿态解算过程。

## 1.2 平衡车直立环与速度环运动控制算法实现

直立环实现平衡车的自平衡控制,将平衡车当作倒立单摆来进行直立环分析,模型如图 1 所示,当平衡车向右倾斜了  $\theta$  角度时,为了保持平衡,需要车轮也向右加速,设加速度为  $a$ ,根据力学关系可以得到平衡车为了保持平衡的回复力计算公式为:

$$F1 = mg \sin\theta - m \cos\theta \quad (10)$$

由于  $\theta$  是一个很小的值,所以有  $\sin\theta = \theta$ ,由于车轮的加速度  $a$  与  $\theta$  成正比,设比例为  $k$ ,可以将式(11)改写为:

$$F1 = mg\theta - mk\theta \quad (11)$$

但是只有回复力会导致平衡车最终处于自由振荡,需要加入阻尼力来消除振荡,从而使平衡车达到真正的直立状态,增加的阻尼力与偏角的速度成正比、方向相反,最终

得到平衡车直立环的控制公式为:

$$F1 = mg\theta - mk\theta - mk_1\theta' \quad (12)$$

其中,  $k_1$  为阻尼力的比例系数,  $\theta'$  为角速度,进一步推导得出保持平衡车直立的控制算法为:

$$a = k\theta + k_1\theta' \quad (13)$$

由式(13)可以得到控制平衡车直立的算法是一个 PD 控制器,由此可将式(13)改写为:

$$a = k_{pv}\theta + k_{da}\theta' \quad (14)$$

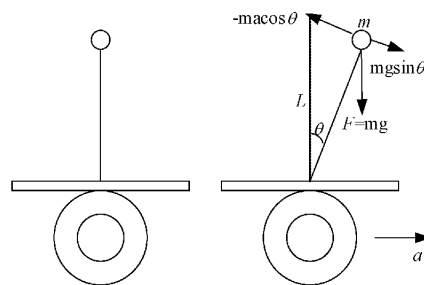


图 1 平衡车直立环分析模型图

通过上述的直立环只能实现平衡车的直立控制,但是需要控制平衡车前进或者后退还需要引入速度环。速度环以电机编码值为反馈,使用 PI 控制器来实现对电机转速的控制,从而达到实现平衡车运动的效果,但其只是一个辅助调节,为了实现平衡车能够在运动时保持直立的状态,该系统中将速度环的输出作为直立环的输入组成串级 PID 模型来实现控制,模型如图 2 所示,这个串级 PID 的计算公式如下:

$$v = k_{pv}e(k) + k_{iv} \sum e(k) \quad (15)$$

$$a = k_{pv}(\theta - v) + k_{da}\theta' \quad (16)$$

式(16)为速度 PI 控制器计算公式,  $k_{pv}$  为速度比例调节系数,  $k_{iv}$  为速度积分调节系数,  $e(k)$  为速度误差。将式(15)和(16)合并有:

$$a = k_{pv}\theta + k_{da}\theta' - k_{pv}[k_{pv}e(k) + k_{iv} \sum e(k)] \quad (17)$$

## 2 系统总体框架设计

图 3 所示为本次设计的平衡车实验系统结构框图,图 4 所示为平衡车实物图,系统主要分为手机端 APP 和平衡车两个部分,这两个部分之间使用 Socket 协议进行数据通信。平衡车由主控和电源两部分组成,主控部分以 CH32C8T6 单片机为核心控制器,主要分为外围设备和程序控制部分。外围设备包含 ESP-12F WIFI 模块、HC-SR04 超声波测距模块、姿态测量传感器 MPU-6050、OLED 显示器、LED 灯、蜂鸣器、编码器、TB6612FNG 电机驱动以及两个编码电机。电源部分对整个平衡车提供动力,输出 12、5 和 3.3 V 3 种电压。

平衡车的运动控制主要通过定时器中断来完成。其实现的流程如下:

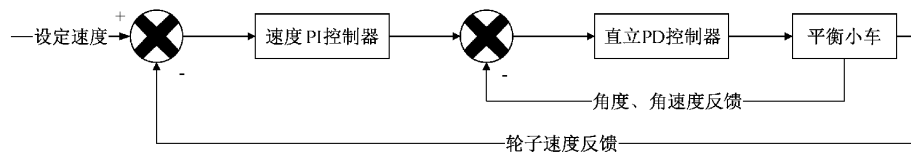


图 2 串级 PID 控制模型

步骤 1) 通过四元数算法对平衡车进行姿态解算。

步骤 2) 读取编码电机在定时器中断时间内转动的编码值。

步骤 3) 将姿态角和编码值传入 PID 控制器中计算

出 PWM。

步骤 4) 根据 PWM 的符号控制电机正反转动, 如果 PWM 为负, 电机反转, 否则为正转。并将 PWM 取绝对值输出到电机驱动实现电机速度的控制。

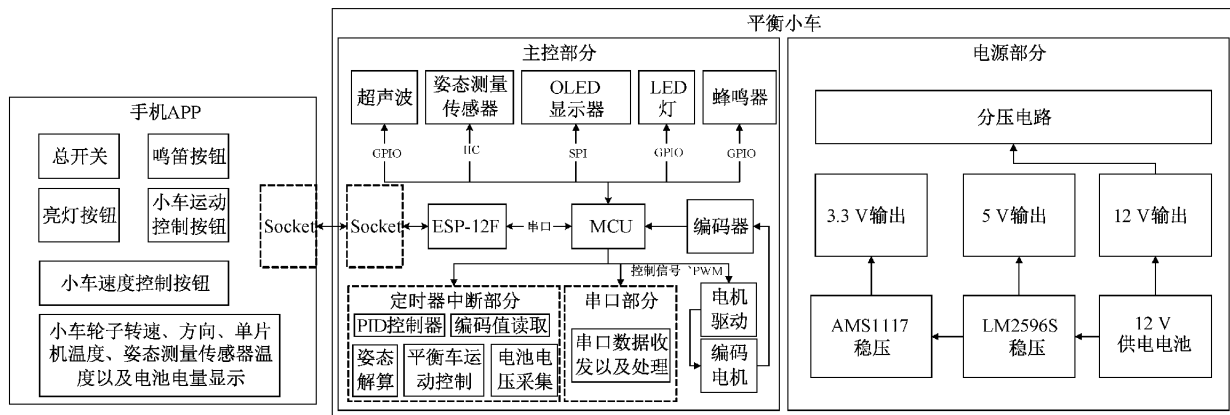


图 3 平衡车总体设计结构框图

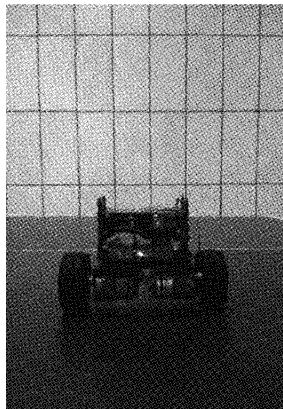


图 4 平衡车实物图

3 种情况均测试 100 s 并记录 20 000 组平衡车俯仰角的数据, 绘制曲线如图 8 所示。其中 pitch\_none 曲线为正常测试、pitch\_high 曲线为载高测试、pitch\_weight 为载重测试。由俯仰角变化曲线可以看出平衡车正常状态下的运动能够保持良好的自平衡状态。在载高度测试和载重运动测试过程中, 平衡车的俯仰角曲线出现了一定的角度波动, 这是由于在平衡车上放置物品之后导致平衡车重心改变, 致使原来的 PID 参数无法对改变重心后的平衡车进行良好的自平衡测试引起的, 虽然在测试过程中平衡车出现了一定幅度的摆动, 但是依然能够保持车体和放置物体的平衡。

### 3 系统测试

#### 3.1 平衡车运动时自平衡稳定性测试

为更好地验证平衡车的自平衡性能, 实验过程中对平衡车进行了正常、运载较高物体和运载较重物体三种测试。正常测试是不给平衡车附加任何外物进行测试; 运载较高物体测试是给平衡车增加在车体上放置较高的物品进行测试, 测试场景如图 5 所示; 载重测试使用一瓶 550 ml 的矿泉水, 质量约为 568 g, 测试场景如图 6 所示。测试过程中通过手机 APP 来对平衡车进行前进、后退、左传和右传四种运动方式的控制, 如图 7 所示是手机 APP 界面图。



图 5 平衡车载高度自平衡测试

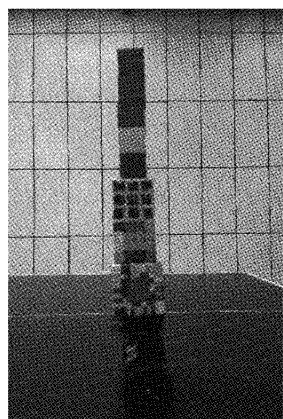


图 6 平衡车载重自平衡测试

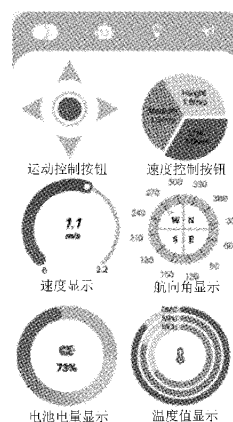


图 7 手机 APP 控制界面

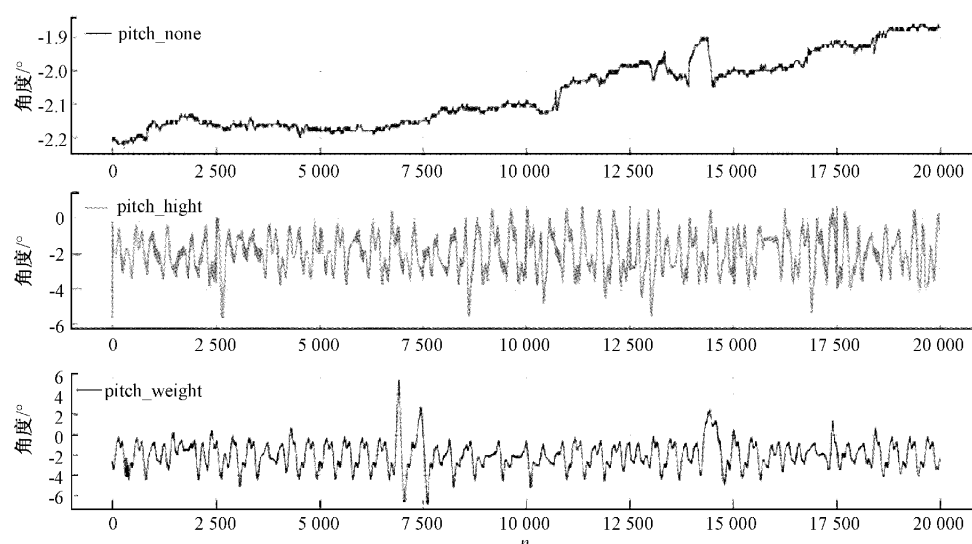


图 8 平衡车自平衡、载高自平衡和载重自平衡 3 种情况俯仰角变换曲线图

### 3.2 四元素与其他姿态算法对比测试

为更好地验证四元数算法在平衡车中使用的可行性, 本文将其与卡尔曼滤波和一阶互补滤波两种算法来进行 3 种算法性能上的测试对比, 测试过程中将平衡小车保持静态下(即人为放置水平的情况下), 每 100 ms 进行一次 Pitch 角度数据采集, 总共 5 000 组, 为更好的体现出 3 种算法上的差异, 将采集到的 5 000 组数据进行了多维度的对比, 对比方法如下:

1) 将 5 000 组数据绘制成图 9 所示的角度变化曲线图, 从图中曲线变化趋势可以看出四元数算法的曲线变化趋势是最稳定的, 一阶互补滤波的数据波动最大, 卡尔曼滤波算法位于两者之间。

2) 分别计算出 5 000 组角度数据的方差和平均计算耗时如表 1 所示。从方差来看 3 种算法中四元数算法的方差最小, 一阶互补滤波算法的方差最大, 卡尔曼滤波算法位于两者之间。从计算耗时来看, 四元数的耗时最长, 一阶互补滤波最短, 卡尔曼滤波位于两者之间。

根据上述性能测试对比结果, 3 种算法的对比结论

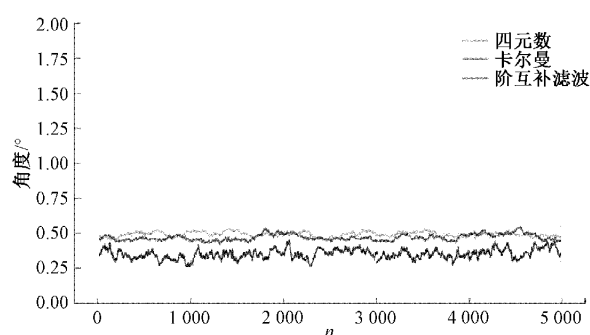


图 9 3 种姿态求解算法 Pitch 角角度变化曲线图

如下:

1) 四元数算法在 3 种算法中具有最好的稳定性, 能够同时计算出 Yaw、Roll、Pitch 3 个姿态角, 不足之处在于耗时比较长, 但其耗时也能够满足平衡车控制的实时性。

2) 卡尔曼滤波姿态算法虽然比较稳定, 但需要确定协方差矩阵, 且如果要同时求解 3 个姿态角, 平均耗时也会增加 3 倍。

表 1 3 种姿态求解算法对比测试结果

算法名称	5 000 组角度数据方差/ $\sigma^2$	5 000 次计算平均耗时/ms	备注
四元数	0.000 239	5.159	能同时计算出 Yaw、Roll、Pitch 三个姿态角
卡尔曼滤波	0.000 591	1.310	只计算 Pitch 角
一阶互补滤波	0.000 874	1.257	只计算 Pitch 角

3)一阶互补滤波计算方式简单,计算耗时也最少,但性能相较于前两种稳定性能较低。

根据上述对比结果可以得出四元数算法在平衡车的控制中具有一定的优越性,稳定性和可行性。

#### 4 结 论

本文对四元数算法原理与平衡车控制原理进行了分析,构建了四元数与 PID 相结合的控制结构。设计并制作了由平衡车实物和手机端 APP 组成的平衡车系统。在该系统的基础上进行了平衡车正常状态、运载较高物体和运载较重物体 3 种情况下的运动自平衡测试。并将四元数算法与卡尔曼滤波和一阶互补滤波两种算法进行了性能测试对比。测试结果表明,基于四元数的平衡车控制方法具有良好的稳定性和实时性,能够实现对平衡车的良好控制,具有一定的实际价值。

#### 参考文献

- [1] 梁文宇,周惠兴,曹荣敏,等. 双轮载人自平衡控制系统研究综述[J]. 控制工程, 2010, 17(S2): 139-144,190.
- [2] 黄健,吕林涛. 两轮自平衡车控制系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 95-97, 101, DOI:10.13873/J.1000-9787(2020)01-0095-03.
- [3] CORRAL C M, MORELOS D, MARRUFO I S, et al. Balancing control of an autonomous bicycle using a reaction wheel [J]. ArXiv Preprint, 2019, ArXiv:2227.1899.
- [4] GARCES S R, BEB M Y, BOUBAKARI A, et al. Hybrid self-balancing and object tracking robot using artificial intelligence and machine vision[C]. 2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference(NILES), 2020.
- [5] KAKINADA L, SINGH K. Modelling and analysis of two-wheeled self balanced robot [C]. 2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET), 2021.
- [6] PUTOV A V, ILATOVSKAYA E V, KOPICHEV M M. Self-balancing robot autonomous control system[C]. 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021.
- [7] IWENDI C, ALQARNI M A, ANAJEMBA J H, et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment[J]. IEEE Access, 2019(99):1-1.
- [8] 任国华,唐昌进,蒋刚. 一种基于 Kalman 滤波的双轮机器人姿态控制算法[J]. 机械设计与制造, 2013(2):39-41,44.
- [9] 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):1574-1578.
- [10] 王素青,熊维堂. 基于 STM32 的两轮自平衡小车系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(5):146-150.
- [11] 宁一高,岳明,许媛,等. 基于 IMU/UWB 的两轮自平衡车轨迹跟踪控制器设计与实现[J]. 控制与决策, 2019, 34(12):2635-2641.
- [12] 项思哲,周依涛,郑炜炀,等. 基于改进单神经元 PID 算法的平衡小车控制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13):68-72, DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106558.
- [13] 李姿景,张具琴,于俊杰,等. 基于单片机的两轮平衡车设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23):1.
- [14] 韩帅,刘满禄,张俊俊,等. 基于两轮自平衡小车的模糊自适应补偿算法研究[J]. 机械设计与制造 2020, 355(9): 197-200, DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.09.046.
- [15] 任红格,吴启隆,史涛. OC 学习机制的两轮平衡车模糊自平衡控制[J/OL]. 机械设计与制造:1-5[2023-04-25]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2023.0222.002>.
- [16] 沈浩宇,江先志,冯涛. 二轮平衡车的神经元控制算法及仿真[J]. 机床与液压, 2022, 50(19):159-166.

#### 作者简介

孔德肖,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式技术、机器学习

E-mail:909956681@qq.com

张晴晖(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为嵌入式技术、信号检测与处理

E-mail:huizq@163.com