



# 平衡步兵

平衡车原理其实很简单，

直立环控制器：以俯仰角做反馈相当于弹簧，以0为中值，以俯仰角速度做反馈为阻尼，也以0为中值。

速度环控制器：以轮子速度（位置）的总和/2为反馈，（PI），这里必须得有积分，不然平衡车无法保持完全静止，不过具体现象还是得看你们实际上手体验才能真正了解是什么问题。

转向环控制器：以轮子速度(位置)的差值为反馈，（PD）

不过具体原理自己翻查资料吧。

你们可以根据网上最普遍的平衡小车的控制原理，用PID试着调一下车，自己把握一下各种参数调大或调小究竟会产生什么效果，有一定的了解后，再进行深入的理论学习更有实感一些。

简要说明本人的平衡步兵入门学习步骤：

## 1、物理建模

对平衡步兵进行物理建模，理论力学或分析力学，自选一门学习，分析力学偏数学但比较难，理论力学是经典牛顿力学相对简单。

学习课程：理论力学/分析力学

## 2、matlab设计控制器

解微分方程组，根据你物理模型的状态数目，是否线性，再看你是否要对其进行线性化，转换成状态空间方程，最后设计Q权重矩阵、R代偿矩阵、再使用matlab里的LQR函数，计算控制器参数K矩阵。

注意，轮腿平衡步需根据不同腿长需重复计算多次K矩阵，再使用多项式拟合，得到K矩阵与腿长的关系。

而动量块平衡步我并没有投入过多时间调试，或许也需要根据重心偏移重复计算多次K矩阵，这部分不难，你们可以自己实践看效果。

这部分需要自控、现控和线代的知识，对了，关于机器人物理参数，部分数据你得找机械索要图纸里的参数，虽然不准确，但也能用。

学习课程：自控、现控、LQR、matlab

### 3、simulink仿真

根据先前对平衡车的物理建模，再simulink编写控制框图仿真，调节不同参数，观察示波器的波形，以此检验参数的可靠性。

学习课程：simulink

以上的是我上赛季走下来的流程，我用的模型也是纯纯的一阶倒立摆模型，入门比较简单了，哈工程开源的轮腿是类似二阶倒立摆模型的，非线性模型，复杂程度更高，参数更多，腿的控制也是VMC，也比较复杂，我个人也仍在学习中。

我用到的是 一阶倒立摆模型+腿PID位置环+五连杆机构正逆运动学，也能做出一定的效果，但是路面适应能力太差。

下面简单的说明本赛季我做的功能：

首先是轮腿：

#### 1、主动悬挂

与其说是主动悬挂，不如说是roll补偿罢了。

根据已补偿的roll和需要补偿的roll，来设置目标值。详见代码。

目前用的位置环，有一定的悬挂效果，但参数和效果并不能简单的调P调D，所以需要更新算法，需要将关节扭矩，根据物理力学，转换成“虚拟的”竖直方向和水平方向的力，再对其进行PD控制器，对竖直方向的力和参数有线性控制，会比较好调一些，不然以目前的控制方案很难走盲道。

#### 2、重心偏移加速

在pitch接近 $0^\circ$ 的状态下实现整车加减速，我是根据速度环计算出来的轮毂电机扭矩，进行滑动平均滤波，再做一个一次或二次的参数关系，转换成需要偏移的重心角度，输入到腿的x轴控制。

重心偏移，五连杆的正逆运动学，这部分属于是几何转换，我已经完成了相关代码的编写，不过具体如何转换，详见我一些参考资料。

### 3、倒地自救：

首先是判断倒地的条件，这里看你怎么想，我个人是如果超过一定值，就判断倒地，然后轮子停止输出，等到达可控的状态，我再开启整车平衡控制。

注意判断倒地的角度，因为腿的位置是可变的，所以倒地的角度也在不断变化，不过这个角度是可以通过几何计算得到的，不过我没有算，而是直接看机械图上的不同腿长和倒地角度的关系，做一个多项式拟合，虽然计算结果不够准确，但算法上速度比较快，不涉及什么复杂的三角函数。

### 4、悬空：

我只根据陀螺仪的加速度计判断，并通过低频滤波，设置一定的判断延迟时间，和判断条件，判断很简单，效果也不好，这是用于飞坡和下台阶的，对于单腿离地并不适用。

在悬空时，根据简单的几何计算，调整腿的姿态，pitch保证重心与轮子连线，与地面垂直，roll保证双腿同时着地。

### 5、功率控制：

这部分由于平衡步兵功率其实比较冗余，在保证轮子不暴走的情况下，限制速度的期望即可实现不超功率，不过目前轮腿走盲道会摔，并且关节电机没有用于平衡，所以纯靠轮毂电机走盲道会超功率。要用到关节电机保持机体平衡的话，从理论上，还是得采取二阶倒立摆模型。

### 6、跳跃：

普通位置环，从最低到最高给个阶跃目标，根据误差判断收腿伸腿动作，跳跃时关闭平衡控制，否则轮子容易暴走，我并没有检测地面接触，仅做了个延迟控制轮子，不过本身机器人也无法满足200mm跳跃，我已经没再研究了。

你们如果要学这部分内容的话，我觉得比起实践、不如先从理论入手，建立一个可靠的物理模型仿真，根据外校的意见，大家都在用webots仿真。根据离台阶的距离判断跳跃时机，这里需要用到测距模块。

不过这个功能我建议还是等最后其他什么功能都调完了再做吧，不要本末倒置了。

其次是动量块：

#### 1、重心偏移：

将动量块和机体的重心分成两部分，设置xy轴，计算合成重心的坐标。其保持pitch  $0^\circ$ 加速的控制方案和轮腿一样。

#### 2、悬空：

判断条件和轮腿一样，在悬空时调整动量块位置，使得合成重心与轮子的两点连线与地面垂直，以保证完美着地。

### 3、平衡算法：

同LQR，没用pid试过，在光滑地板上无法保证完全静止，同时会有高频抖动，这是因为轮毂联轴器有虚位导致的，这锅得机械背，这得机械改善，电控最多也就能做个滤波吧。

其他一些简单的模块或者细节我就不一一赘述了。

害，怎么说呢，这赛季平衡步兵属于是诞生的第二年，去年的资料并没留下太多，一路摸索下来踩了很多坑，最后总结了以上一些学习路程，和一些学习资料，虽然和目前的平衡步兵天花板差了一大截。希望后人能努力追赶上这一段差距吧 T\_T

资料见RP的百度网盘 平衡步兵 (忽略里面的私货)