

基于PID控制系统的反作用力轮式倒立摆作为控制系统训练器的设计

Roche Alimin^{1*}, Joshua Tandio², Handry Khoswanto³

^{1,2}机械工程系, ³电气工程系, 佩特拉基督教大学工业技术学院, Jl. Siwalankerto 121-131,
Surabaya 60236, 印度尼西亚

* 通讯作者; 电子邮件: ralimin@petra.ac.id

ABSTRACT

如果有可以作为学习媒介的道具, 控制系统将更容易理解。反作用轮倒立摆是一个欠驱动的装置, 所以控制器的存在是绝对必要的。当作为控制系统的一个道具使用时, 这将是非常有趣的。这种反作用轮倒立摆的应用之一是用于仿人机器人的平衡系统。在这个设计中, 进行了道具的物理设计和控制器设计。设计首先从设计机械道具开始, 从工具的尺寸和形状到电机的要求。接下来, 设计了一个控制器, 可以自动平衡设备。使用的控制器是基于Arduino的。从测试结果来看, 这个反作用力轮倒摆训练器虽然有一些缺陷, 但可以很好地发挥作用。

关键词。 PID控制系统; 倒立摆; 反作用轮; 自动化道具。

ABSTRACT

如果有可以作为学习媒介的演示设备, 控制系统将更容易理解。反作用轮倒立摆是一个欠驱动的装置, 因此, 控制器的存在是绝对必要的。如果作为一个控制系统的教学辅助工具, 这将是非常有趣的。这种反作用轮倒立摆的一个应用是用于仿人机器人平衡系统。在这个研究项目中, 进行了教具的物理设计和控制器的设计。设计首先从设计机械部分开始, 从工具的尺寸和形状到电机的需求。此外, 还设计了一个控制器, 可以自动平衡设备。使用的控制器是基于Arduino的。测试结果表明, 尽管存在一些缺点, 但反作用力轮倒立摆演示装置可以很好地工作。

关键词。 PID控制系统; 倒立摆; 反作用轮; 自动化演示装置。

简介

倒立摆是一种倒立的钟摆, 质心在枢轴中心之上。赛格威自行车是其实施的一个例子。倒立摆可以被归类为欠驱动系统, 即系统的自由度数量多于执行器的数量。这使得倒立摆成为测试控制系统算法的有趣工具。

在学习自动化技术的过程中, 有些概念是难

以想象的。因此, 需要有能够帮助人们了解概念的道具。

这是由学生学习的。通过尝试在这些道具上实施学生在课堂上所学的知识，学生将能够更容易地理解所教的材料[1]。

Chia做了一个沿线的机器人，作为PID控制器的培训者。机器人所遵循的线路是一条放置在白色场地上的黑色丝带，形状为长

方形[2]。这种工具在流动性方面有优势，但需要很大的空间。

冈萨雷斯做了一个道具来应用PI控制器，它的形状像一个赛格威。该物体将倾向于坠落，因为该物体靠在位于地面的两个电动轮上。

每个轮子的功能是重新平衡物体，使其不致坠落[3]。本文将介绍设计一个带有反作用力轮的倒立摆模型的训练器来应用控制技术。这个模型有一个反作用力轮，位于杆的一端，另一端是轴[4]。在这个设计中，摆锤运动被限制在 -5° 到 5° 的角度，位置在垂直摆锤位置的 0° 。这种限制是必要的，因为所研究的PID控制器仍然限于LTI（线性时间不变）。

如果摆锤只移动了一个小角度，那么可以假设系统是线性的[5]。

对该装置的测试是通过将摆锤垂直放置，轮子在上面来完成的。然后给定一个扰动是不平衡的。当摆锤不在垂直位置时，摆锤将试图平衡自己到垂直位置。

方法论

第一步是使用Inventor软件设计和确定要控制的对象的参数，然后创建模型。

该道具由图1所示的部分组成。

- 矩形杆。1件。
- 环形的轮子。1件
- 容器(安装)。1件

摆锤的尺寸是考虑到该工具作为教学辅助工具的使用而确定的。因为要制作的物体是一个教学辅助工具，所以这个物体的尺寸不应该太大。它应该便于携带，也应该足够清晰，以显示其运动。该物体是使用PLA材料的3D打印机制作的。

建立一个由MPU-6050加速度传感器、Arduino微控制器和一个直流电机组成的电路。反作用轮倒立摆需要传感器作为输入，以便向控制器提供反馈。微控制器需要作为“控制中心”来工作。一个直流电动机被用作输出，为反作用力轮提供扭矩，这个受控扭矩将起到平衡倒立摆的作用。电子电路如图2所示。



部分反应轮倒立摆

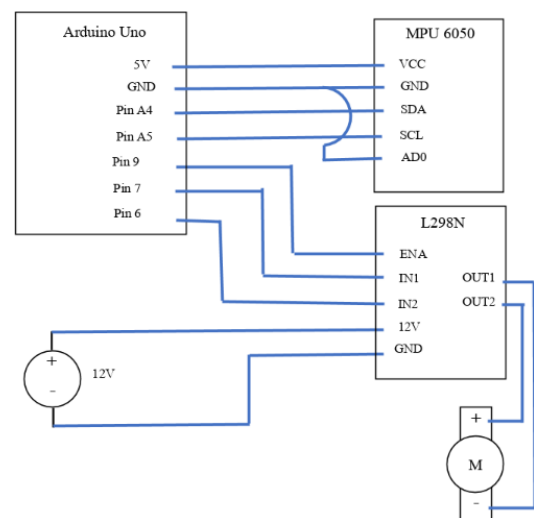


图2.电子电路



反作用轮倒立摆

在图3中, 反应轮被画了出来

倒钟摆。该设备不使用

不是用旋转编码器作为测量钟摆垂直度的工具, 而是用一个

数字式勒索仪。

规格 反作用力轮倒立摆。

摆锤质量, $m_p=0.02$ 公斤

电机质量, $m_m=0.06$ 公斤

车轮质量, $m_r=0.01$ kg

总质量, $m = m_p + m_m + m_r = 0.09$ kg 直流

电机半径, $r_m = 0.012$ m

车轮半径, $r = 0.05$ m 重力加速度, $g = 9.81$ m/s²

枢轴和摆锤质心之间的距离, $l_p = 0.05$ m

枢轴和车轮质心之间的距离, $l_r=0.1$ 米 枢轴和总质心之间的距离, $l_r=0.1$ 米。

$(m_p l_p + m_r l_r + m_m l_r)/m = 0.0889$ m = 棒

材宽度, $b = 0.025$ m

摆锤 (杆) 在杆中心的惯性矩, $J_{pp}=1.77 \cdot 10^{-5}$ kg. m²

电机中心的惯性矩, $J_{mm}=4.32 \cdot 10^{-6}$ kg. m²

轮子中心的惯性矩, $J_{rr}=2.50 \cdot 10^{-5}$ kg. m²

总惯性矩, $J_t = J_p + J_r + J_{mm} + (m_r \cdot l_r) + (m_p \cdot l_p) + (m_m \cdot l_r) = 7.97 \cdot 10^{-4}$ kg. m²

电枢电阻, $R_a = 8.6$ ohm

电机常数, $km = 0.0188$ Nm/A

为了控制器的设计, 根据已经做出的反作用力轮倒立摆数据, 建立了一个数学模型。这个数学模型用于描述系统并给出系统行为的概念, 用于确定和设计PID控制器的参数。在制作这个数学模型时, 使用拉格朗日方法来获得运动方程和直流电动机方程来连接物体的运动和直流电动机。该数学模型可描述如下。

$$\ddot{\theta} + J_r \ddot{\theta} = mgl \theta \quad (1)$$

$$J_r(\ddot{\theta} + \ddot{\theta}) = kmia \quad (2)$$

$$va = Raia + km\theta r \quad (3)$$

基于上述方程的状态空间模型如下。

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \theta$$

$$\ddot{x} = \ddot{\theta} = \frac{mgl}{J_t - J_r} \theta + \frac{km}{Ra(J_t - J_r)} \theta - \frac{km}{J_r} u$$

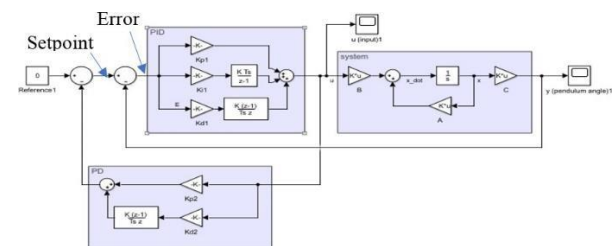
$$\dot{x}_3 = \ddot{\theta} r = -\frac{mgl}{J_t - J_r} \theta - R \frac{km}{Ra(J_t - J_r)} \theta + J_r \frac{km}{Ra(J_t - J_r)} u$$

$$x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T = [\theta]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{mgl}{J_t - J_r} & 0 & 0 \\ \frac{km}{Ra(J_t - J_r)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{km}{Ra(J_t - J_r)} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0] D = 0$$

然后设计控制器, 通过使用PID控制器模型和PI控制器来平衡摆锤, 防止电机达到饱和状态。为了调整P、I和D的增益, 使用了Matlab软件, 并使用Ziegler Nichols方法调整P和I的增益。



系统及其控制器的方框图

系统和控制器的极点在s平面上的虚轴左侧, 但虚轴上有一个极点。这说明有一种可能性, 即系统很容易处于临界稳定状态。一旦获得控制参数 (在Matlab的帮助下), PID控制器将在Arduino微控制器上实现。系统的框图如图4所示。

结果和讨论

完成的反作用力轮倒摆训练器被测试。目标是找出控制器是否能平衡摆锤到垂直位置。

阶梯 检验 始于 通过下载已经制作好的Arduino程序到电脑上。

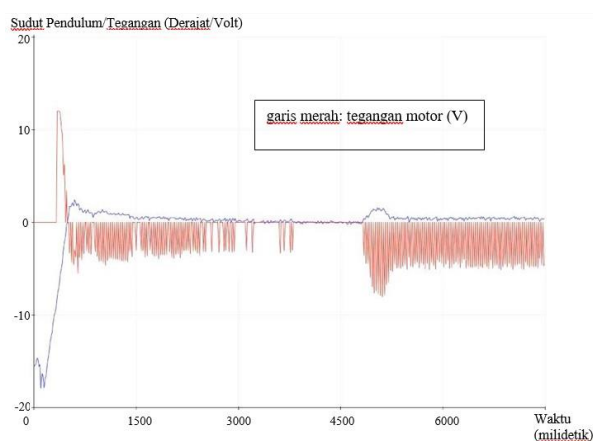
Arduino微控制器。然后将摆锤置于垂直位置, 角度为0°。在垂直位置上保持平衡后, 摆锤以手的形式被慢慢地吹动, 给予干扰。而测试结果则由Arduino的串行绘图仪显示。

从Arduino串行绘图仪中, 可以得到一个图表是摆锤的位置与 $Ra(J_t - J_r)$

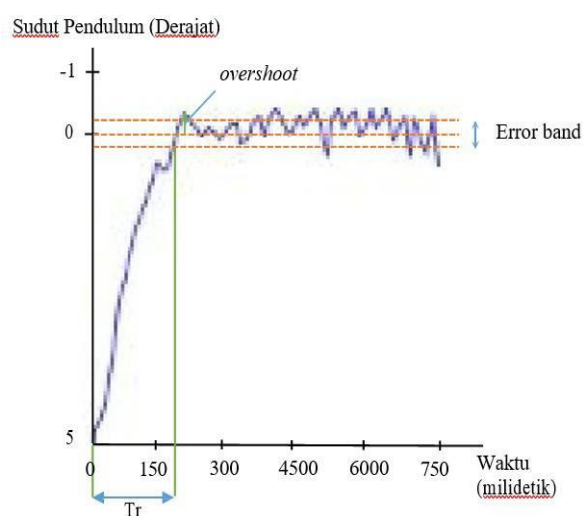
直流电动机 压。这在图 5中显示。

图5所示的测试结果显示，当摆锤处于 -15° 位置时，然后定位在 0° 位置（手动）。然后，在第4800毫秒时，摆锤被轻轻吹动，这表明摆锤由于扰动而偏离了中心位置。控制系统对这一事件的反应是以电压变化的形式提供给电机。从图中可以看出，摆锤最终回到了中心位置（垂直 0° ），并能从给定的干扰中保持其位置。

对反作用轮倒立摆进行阶跃响应测试，以观察控制系统在瞬态和稳态时的特性。要知道的一些特性是上升时间、稳定时间和过冲。这在图5中显示。



摆锤位置和直流电动机电压之间的关系图



控制系统的阶跃响应

摆锤首先定位在 5° ，然后由于控制作用，摆锤被直流电动机移动到 0° 位置。

串行绘图仪显示的响应结果 Arduino，并在图6中显示。

从图6中可以看出，上升时间 (Tr) 为225毫秒，过冲率约为7%，稳定时间为零。

摆锤没有稳定下来，因为它一直在误差带内和误差带外摆动。这可能是由于系统的一个极点正好在假想的 s -平面线上的事实。另一个原因是摆轴上的显著摩擦。系统所要求的响应速度仍然不能由差动控制部分来满足，所以比例控制部分仍然太占优势，无法克服摩擦，造成轻微的过冲。

结论

从阶跃响应测试中发现，所设计的控制系统仍有缺点，那就是在应该处于稳定状态时却出现了振荡。其原因被怀疑是由于摆轴的摩擦力相当大，以及为设计PID控制系统而建立的数学模型的不完善。上升时间为225毫秒，超调为7%，在给定的 5° 偏差干扰下，反应轮倒立摆系统仍能正常工作。

这个反作用轮倒立摆训练器可以作为控制系统讲座的教具之一。通过使用Arduino微控制器作为控制器，可以很容易地改变PID常数并看到其对系统性能的影响。这将大大有助于学生学习控制系统的概念。

文学

- [1].Perrenet, J.C., Bouhuijs, P.A. and Smits, J.G., 2000, *The Suitability of Problem-Based Learning for Engineering Education:理论与实践*, 《高等教育教学》，第345-358页。
- [2].Chia, K.S. and Yap, X.Y., 2016, A Portable PID Control Learning Tool by Means of Mobile Robot, *International Journal of Online Engineering*, pp.54-57.
- [3].Gonzalez, C., Alvarado, I. and Munoz La Pena, D., 2017, *Low Cost Two-Wheels Self-Balancing Robot for Control Education*, IFAC Papers Online, pp.9174-9179.
- [4].Block, D.J., Astrom, K.J. and Spong, M.W., 2007, *The Reaction Wheel Pendulum*, Morgan & Claypool Publishers, the United State of Ame-rica.
- [5].Olivares, M. and Albertos, P., 2013, *Linear Control of The Flywheel Inverted Pendulum*, ISA Transactions, 53, 5, pp.1396-1403.