

一种具有不确定性和可变高度的双腿车轮机器人的模糊LQR PID控制

东帝汶公爵¹*明勇², 阮胡洛克³, Thanh Truong⁴Nguyen Thanh Nha⁵

¹, ², ³, ⁵越南胡志明市技术与教育大学自动化控制系

⁴越南胡志明市理工大学机械工程学院

电子邮件¹thientd@hcmute.edu.vn, ²nguyenhoangbh182@gmail.com, ³nguyenhuuloc.0373170240@gmail.com,

⁴tqthanh@hcmut.edu.vn, ⁵ntnha0639@gmail.com

*通讯作者

摘要: 本文提出了一种双腿轮式平衡机器人的模糊LQR PID控制方法, 以保持其对不确定性和不同高度的稳定性。建议的控制包括模糊监督器、LQR、PID和两个校准。采用模糊LQR来控制机器人的稳定性和运动, 同时其姿态随时间的变化。使用模糊监控器来根据机器人的高度来调整LQR控制。它由一个输入和一个输出组成。输入和输出分别有三个隶属函数。PID控制件用于控制机器人的姿态。第一校准用于补偿当机器人改变其姿态时的倾斜角度的偏置值。第二次校准是根据髋关节角度计算机器人的高度。为了验证该控制器的有效性, 构造了一个实用的变高度机器人, 并将该控制器嵌入到控制板中。最后, 通过两个实验验证了机器人的平衡和移动能力。

关键词-模糊LQR控制; 双腿轮式平衡机器人, PID控制, 模糊逻辑系统。

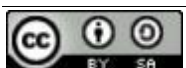
1. 介绍

近年来, 自动机器人被迅速发明出来, 以分享工厂、餐厅[1]、机场[2]和配送[3][4]的人力需求。与传统的机器人和人类工人作为独立的工作空间进行操作不同, 人机合作被用来完成复杂的任务。因此, 在机器人设计中必须考虑人机交互, 这意味着机器人和人可以一起共享工作空间[5]。两轮倒立摆(TWIP)机器人[6]是一个由倒立摆组成的扩展系统和移动机器人, 具有紧凑性、移动性和类人功能等优点。这种机器人在物流运输、通勤、导航、自平衡能力等方面有更多的应用。因为TWIP移动平台[7]被归类为一个欠驱动系统实现3-DOF运动俯仰, 偏航, 和直接运动只有两个执行器输入, 高性能运动控制这个机器人是一个非常具有挑战性的任务控制社区和最近许多结果被报道为分类。

当TWIP机器人在平衡点周围以一个较小的俯仰角工作时, 已经采用了一些传统的线性控制技术, 如PID控制[811]和线性二次调节器(LQR)[8][9][1216]。

然而, 当机器人由于外部干扰、建模误差或内部机动而在俯仰角较大的非线性区域工作时, 线性控制方法的控制性能将会下降。为了缓解这些问题, 提高控制性能, 我们研究了许多非线性控制方法, 如反馈线性化控制[17][18]、滑模控制[19-21]、后退控制[22-24]和模型预测控制[25][26]。这些方法通常需要一个数学模型来进行设计过程。在实践中, 很难准确地确定数学模型, 由于老化和外部环境的影响, 参数往往随时间而变化。为了应对这些挑战, 我们对TWIP机器人进行了自适应控制[19][27-29]、神经网络控制[19][30-32]和模糊控制[33-36]的研究。在[19]中, 采用神经网络来估计未知的模型参数, 并采用鲁棒自适应控制来补偿两轮自平衡机器人系统中的估计误差和不确定性。在[27]中, 在模型参数不确定的情况下, 建立了轮式倒立摆系统的自适应后退控制。在[30]中, 我们使用自适应神经网络来补偿自平衡机器人输出动力学中的未知项。在[33]中, 为两轮自平衡机器人设计了模糊逻辑控制和极点放置状态反馈控制器。采用极点放置状态反馈控制器来保持机器人的平衡, 并采用模糊逻辑控制器来控制机器人的位置。在[37]中, 采用模糊和PD控制控制具有结构和非结构不确定性的两轮自平衡机器人。采用PD控制控制机器人的平衡, 采用模糊PD控制控制机器人的位置。

众所周知, 传统的TWIP机器人可以在平坦的道路上快速、稳定地移动。然而, 当它们在不平坦的地形上移动时, 如沟壑和斜坡时, 它们的局限性就出现了。当车轮半径小于障碍物高度或接触点在车轮[38]中心以上时, 它们无法克服障碍物。为了应对这一挑战, 一些先进的自平衡机器人[38-41]被构造成与人一起工作。[38]的研究设计了一种地形自适应的双腿轮式机器人, 其腿部机构可以跳过障碍物。Klemm等人。[39]描述了Ascento的基本设计



两条腿的轮式跳跃机器人，在不平的地形上移动，也通过跳跃爬上楼梯。周等人。[40]提出了一种质心调整控制方法，使机器人具有更高的移动鲁棒性。研究了一些传统的控制方法[39][42-48]来处理这类机器人的平衡和高度控制问题。在[39]中，采用线性二次调节器（LQR）和PID控制器来控制稳定、驾驶和跳跃。为了稳定和驱动，LQR控制器是由线性化状态空间模型线性化大约10个不同的腿高度设计的。在[42]中，提出了一种双足腿轮机器人的级联PID控制器，以保证其稳定和驾驶。在[49]中，LQR控制器和模糊PD控制器研究了一种新型的具有平行四杆机构的轮腿机器人，以稳定运动和跳跃障碍物。

在此基础上，本文提出了一种双腿轮式机器人（TLWR）的模糊LQR PID控制方法，以保持其对不确定性和不同高度的稳定性。基于模糊监控器、LQR和PID设计了该控制方法。因此，这种方法不需要严格的数学模型。利用模糊LQR，包括LQR控制器和模糊监控器，来控制变姿态机器人的稳定性和运动。根据机器人的高度，模糊监督器将估计LQR控制的增益。主管由一个输入和一个输出组成，它们分别有三个成员函数，对机器人的三个姿势。PID控制件用于控制机器人的姿态。为了验证该控制的有效性，构建了实用的机器人，并将该控制嵌入控制板。此外，还进行了两个实验来验证机器人的平衡和移动能力。由于传感器的位移平面根据机器人的姿态而倾斜，因此进行了一些计算来补偿这个倾斜角度。本文的主要贡献总结如下：

1. 基于模糊监控器和三个LQR控制器，构造了三种控制器。因此，在控制设计中降低了TLWR的复杂性。
2. 在一个实际测试台上验证了该控制方法的有效性，并讨论了在实际测试台中测量机器人高度和俯仰角的补偿角所面临的挑战。

本文构造如下：第二节讨论了变高度双腿轮式平衡机器人的问题公式，包括等效质心计算、TLWR建模和线性状态空间模型。第3节设计了由PID控制和模糊LQR控制组成的建议控制器。在第4节中，在实际机器人中进行了一些实验，并将该控制的结果与另一个控制的结果进行了比较。最后，在第5节中提到了一些结论和未来的工作。

微光双腿轮式机器人的描述与建模

自平衡双腿轮式机器人的结构如图所示。1. 该机器人系统配备了一个控制板，一个惯性测量单元（IMU），一个Zigbee模块，三个包括编码器的直流电机，和一个12V可充电铅酸电池。控制板设计为主控制器，IMU用于计算平台倾斜度的速率和角度。此外，控制板还可以驱动机器人平台的偏航控制装置。在机器人的脚上安装了两个电机，包括编码器来驱动机器人的运动。另一个被添加在臀部来调整机器人的高度。为了节省髋关节电机的能量，在机器人膝关节的内关节处安装了扭转弹簧。推算推算计算是基于安装在驱动电机中的两个光学编码器的信息来操作的。

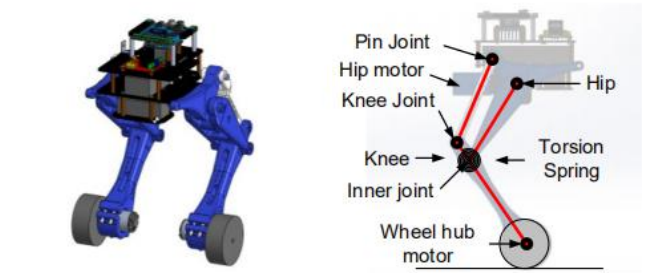


图1. 该机器人的CAD模型

备注1：在本文中，我们限制了上半身对矢状面运动的应用。机器人的偏航控制由两个轮子的差动运动实现，躯干的俯仰角由髋关节控制。TLWR的滚动角度可以通过调整两条腿的高度来控制，但在本文中，两条腿的运动是相同的，所以滚动角度始终保持在零。此外，本文中使用的TLWR的符号总结见表一。

表 i. TLWR的参数

符号	定义
e_w (rad)	车轮的旋转角度
e_b (rad)	等效WIP模型本体的倾斜角度
r	驱动轮的半径
I_b	在TLWR模型中，驱动轮上方的总惯性矩
l_c	TLWR模型中的质心（CoM）位置与车轮轴之间的距离
d	两个车轮之间的距离
m_1	柄的质量
m_2	大腿下部的肿块
m_3	大腿上部的肿块
m_4	身体质量
l_1	柄的长度
l_2	大腿下部的长度
l_3	大腿上部的长度
l_4	坐标系之间的距离4 th 和5 th
l_5	坐标系之间的距离5 th 和6 th
T_L	左轮的扭矩
T_R	右车轮的扭矩
l_{c1}	柄芯位置
l_{c2}	大腿下段CoM的位置
l_{c3}	大腿上部CoM的位置
l_{c4}	车身CoM的位置

符号	定义
e1	坐标系0之间的关节夹角 th 和1 th
e2	坐标系之间的关节夹角1 th 和2 th
e3	坐标系之间的关节夹角2 th 和3 th
e4	坐标系之间的关节夹角2 th 和4 th
e5	坐标系之间的关节夹角4 th 和5 th
e6	坐标系之间的关节夹角5 th 和6 th
a	坐标系之间的距离2 th 和3 th

A. 等效质心计算

本文所涉及的坐标系用0表示G_xG_yG_zG的通用框架和0_wx_wy_wz_w轮轴框架。在解耦过程中，五连杆多刚体系统等价于一个如图所示的集总质量点。2. 等效质心的位置由单个链接的质量及其质心位置来加权。为了建立该质心与轴坐标系之间的关系，采用德纳维特-hartenberg (D-H) 约定建立了运动学模型。通过设置现有的坐标在无花果。3、TLWR的D-H参数见表II。

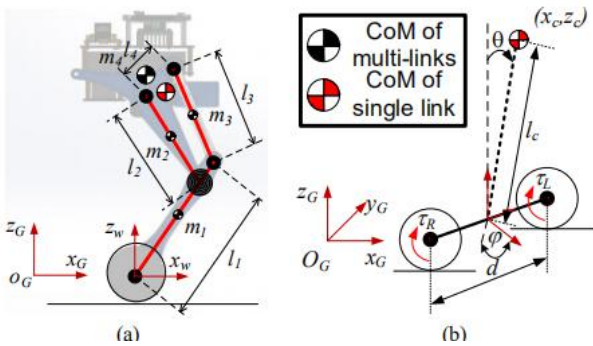


图2. 机器人(a)双轮式机器人的动力学模型示意图, (b)解耦等效WIP模型

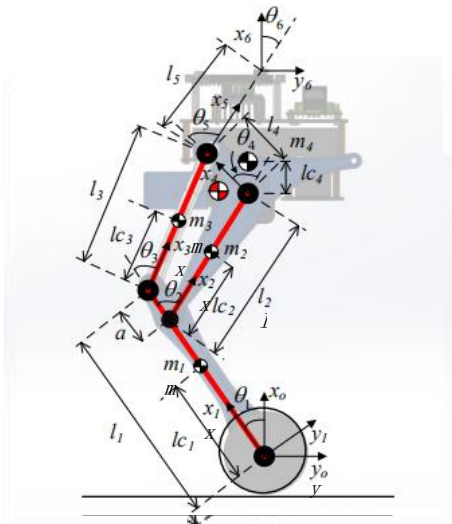


图3. TLWR的运动学参数

表二. TLWR的dh参数

坐标	a _{i-1}	a _{i-1}	d _i	e _i
1	0	0	0	e ₁
2	l ₁ -a	0	0	e ₂
3	l ₂	0	0	e ₄
4	l ₃	0	0	e ₅
5	l ₄	0	0	e ₆

从第i个坐标到第i+1个坐标的齐次变换矩阵为(1)。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

坐标系i与轴坐标系之间的均次变换矩阵为(2)。

$${}^wT_i = T_1 T_2 \dots T_{i-1} \quad (2)$$

上半身的CoM相对于世界坐标系的位置可以表示为(3)。

$${}^wP_C(q_b) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i {}^wP_{Ci}(q_b)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

$${}^wP_{Ci}(q_b) = {}^wT_i(q_b) {}^iP_{Ci}$$

其中m_i是第i个链接的质量, q_b = [q_{b1}, ..., q_{b4}]^T是实际角度, ^wP_C = [x_c, z_c]^T是等效CoM相对于轴坐标系的位置坐标, ^wP_{象牙海岸}是轮轴坐标系中第一根链接的坐标系的位置坐标, 以及ⁱP_{象牙海岸}是第一条链路的CoM在局部坐标系中的位置。根据CoM的坐标, 可以得到倒立摆的摆长c和倾角e, 如式(4)和(5)所示。

(4)

$$l_c = \sqrt{x_c^2 + z_c^2} \quad (5)$$

$$\theta = a \tan \left(\frac{x_c}{z_c} \right)$$

B. TLWR建模

假设2: 驱动轮受滚动约束, 车轮和地面之间没有滑移。

本研究利用(4)中的摆长来分析倒立摆的动力学特性。选择车轮倒立摆的状态变量作为q_w = [x e p]^T。利用欧拉拉格朗日方法, TLWR的动力学方程可以表示为(6)。

$$M(q_w) \ddot{q}_w + V(q_w, \dot{q}_w) + G(q_w) + T_{ext} = B T_w \quad (6)$$

其中M(q_w) ∈ R^{3×3}, V(q_w, q̇_w) ∈ R³和G(q_w) ∈ R³分别是惯性矩阵, 科里奥利力矢量和向心力矢量, 重力矢量; B是输入矩阵, T_{ext}包括建模误差和外部扭矩, T_w = [T_L T_R]^T是车轮的驱动扭矩。在差速器驱动的移动机器人中,

$$\text{输入矩阵定义为 } B = \begin{bmatrix} -1 & r^{-1} \\ -1 & r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{2r} \\ -\frac{d}{2r} \end{bmatrix}^T$$

C. 线性状态空间模型

在本研究中, 图中显示了TLWR的三种姿势。在控制设计中考虑了4个问题。其线性状态空间模型为(7)。

$$\begin{cases} \dot{x} = A_i x + B_i u \\ y = C_i x \end{cases} \quad (7)$$

其中 $x = [x_e \quad p \quad x \quad e]$ 是国家空间, $u = T_w \in R^{2 \times 1}$ 是控制输入。 A_i, B_i, C_i 与 $i=1, 2, 3$ 分别是TLWR的三种姿态下的矩阵, 计算为[50]。

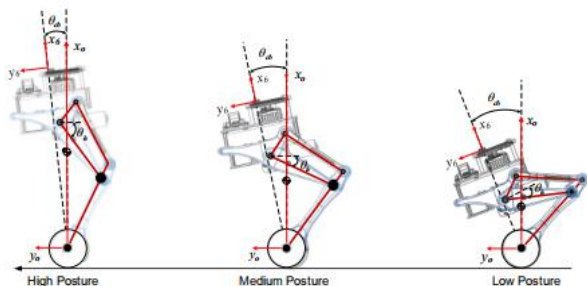


图4. TLWR的三个姿势

罗马数字 3控制设计

如图所示。5、建议控制的结构包括模糊LQR控制和姿态控制。姿势控制由PID控制设计, 以调整机器人的臀部角度。机器人的高度通过校准1计算, 它显示了臀部角与机器人高度之间的关系。模糊LQR控制结合了模糊监督器和LQR控制。模糊监督器包括一个输入和六个输出, 它们是LQR控制的控制增益。输入模糊对机器人的低、中、高姿态有三个隶属度函数。不同的姿势, 机器人的质心不同, 机器人的动力学也发生了变化。由于LQR的控制增益依赖于机器人的动力学, 因此它们在每个姿势上也有所不同。模糊监督器被设计用于计算LQR相对于机器人高度的控制增益。当机器人的姿势改变时, IMU传感器的倾角也会改变。因此, 由IMU传感器计算出的倾角应通过校准2进行调整。根据机器人的运动学, 计算了相对于机器人高度的辅助角度。利用输入变换矩阵将从所述控制中计算出的控制输入转换为每个车轮电机的输入电压。

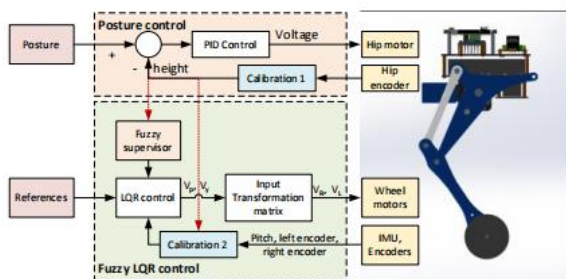


图5. 建议的控制装置的结构

A. PID控制

为了控制TLWR的姿势, 根据姿势轮廓和TLWR的真实姿势的差异, 使用PID控制来驱动臀部运动。根据图中TLWR的几何结构。3、传感器的长度可以根据髋部角计算出来。利用校准值1来计算机器人的高度

根据臀部角度。PID控制律被提出为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

其中 K_p 这是一个成比例的增益, K_i 是一个积分增益和 K_d 是微分增益。

B. 线性二次调节器 (LQR)

在LQR控制器中, 最优控制增益 K 是基于代价函数(J)计算出来的, 该函数优化了系统(9)的状态 $x(t)$ 和控制信号 $u(t)$ 。控制信号 $u(t)$ 和成本函数 J 的选择如(9)和(10)所示。

$$u(t) = -Kx(t) \quad (9)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (10)$$

其中 Q 和 R 是正的半定义矩阵。为了使代价函数 J 最小化, 控制增益 K 表示为(11)。

$$K = R^{-1}B^T P \in R^{2 \times 6} \quad (11)$$

其中, P 为Riccati的微分方程的解, 为(12)。

$$-PA^T - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (12)$$

备注2: LQR控制器的性能依赖于权值矩阵和线性化矩阵 A 和 B 的选择。因此, 不同的姿势会给出不同的最优控制增益, K_1, K_2 和 K_3 分别是在低、中、高的姿势中。

备注3: 当TLWR的高度随姿势发生变化时, 传感器平面将以相应的角度命名。校准2用于补偿传感器的这个倾斜角。应用代数解技术计算了标准2中的方程。在6之间的变换矩阵 0T_6 协调系统和原点协调可以由式(13)计算出来。

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{23} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过实现一些操作, 变换矩阵 T 将只依赖于髋关节角。 0T_6 由于两条腿的高度是同时调整的, 所以变换矩阵的方向矩阵 T 是一个围绕 z 轴的旋转操作。 0T_6 因此, 这个矩阵可以表示为(14)。

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{comp}) & -\sin(\theta_{comp}) & 0 & {}^0p_x \\ \sin(\theta_{comp}) & \cos(\theta_{comp}) & 0 & {}^0p_y \\ 0 & 0 & 1 & {}^0p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

传感器的补偿角度计算为（15）。

$$e_{补偿} = \arctan \left(\frac{r_{21}}{r_{11}} \right)$$

(15)

校准的输出显示为（16）。

$$e_p = e_{p_raw} + e_{补偿}$$

(16)

C. 模糊主管

根据从髌关节角估计的机器人高度，模糊监督器将分别计算LQR中的控制增益。图6介绍了模糊监控器的结构，其中包括一个输入和8个输出，对LQR的控制增益。输入中的三个隶属度函数在图中显示为低、中、高。7。

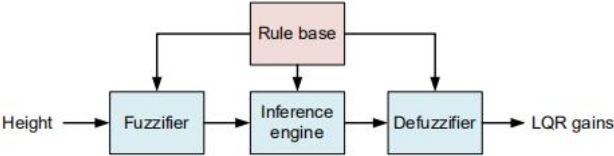


图6. 模糊监控器的结构

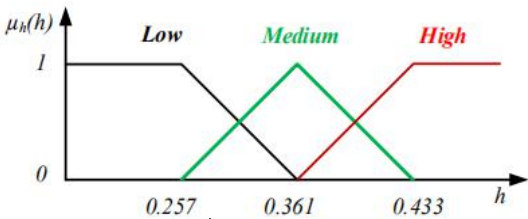


图7. 模糊主管的输入成员资格功能

模糊主管的模糊规则如下：

- 如果 h 很低，那么 $K = K_1$ ，
- 如果 h 是中的，那么 $K = K_2$ ，
- 如果 h 很高，那么 $K = K_3$ 。

其中， h 为机器人的高度； K_i ($i=1, 2, 3$) 分别是低、中、高姿势的控制增益。

采用MAX-PROD聚合方法和“质心”去模糊化方法。控制上的增益可以是
在（17）中计算。

$$K = \frac{mf_{low}(h)K_1 + mf_{Medium}(h)K_2 + mf_{High}(h)K_3}{mf_{low}(h) + mf_{Medium}(h) + mf_{High}(h)}$$

(17)

增值实验讨论

A. 试验台描述

实际使用的TLWR机器人如图所示。8包括一个板控制，两轮电机与编码器，一个髌关节电机，一个髌关节编码器，和一个IMU传感器。由ATmega2560开发的控制板用于控制机器人的稳定性、姿态和运动。两轮电机是两台直流电机，JGB37-520，速度为每分钟333转（RPM），连接到增量编码器，每转11次脉冲（PPR）。根据从控制板产生的控制信号，它们将保持机器人的稳定或驱动机器人的运动。为了调整机器人的姿势，在臀部安装了一个高扭矩5840-31ZT电机和一个编码器AMT332D-V。利用IMU传感器MPU9250来计算标题

的机器人。整个系统的电源都是由一个12 V的锂电池供电的。经过实际测量，该机器人的重量为3.15公斤，电池寿命约为2.5公斤h。

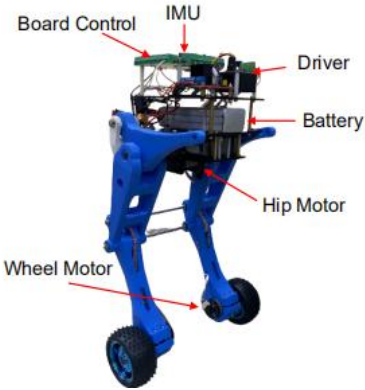


图8. 双轮轮式机器人在实践中可以改变高度

试验台的硬件连接图如图所示。9. 由VisualStudioc#在笔记本电脑上构建的图形用户界面，获取机器人的位置、俯仰、臀部和偏航角以及控制信号，并通过射频（RF）收发器Zigbee C2530实时无线通信将控制增益发送给机器人。控制板通过从IMU传感器和编码器获取信息进行建议的控制。在控制板计算出控制信号后，它们将被提供给髌关节电机和腿部电机的驾驶员。

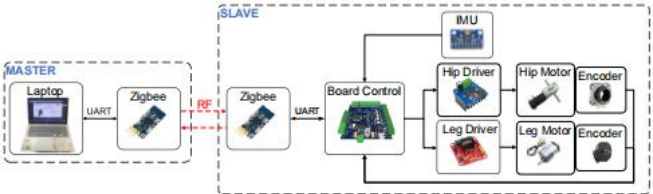


图9. 硬件连接图

备注4：表三中的TLWR参数，如长度、质量、力矩惯性和车轮半径，都是根据固体中的质量特性计算的。

表III. 双腿轮式机器人的参数

符号	价值	单元	符号	价值	单元
a	0.035	m	l ₂	0.145	m
r	0.0425	m	l ₃	0.145	m
d	0.276	m	l ₄	0.055	m
m ₁	0.56	kg	l ₅	0.09275	m
m ₂	0.44	kg	lc ₁	0.09636	m
m ₃	0.19	kg	lc ₂	0.07251	m
m ₄	1.96	kg	lc ₃	0.07251	m
l ₁	0.19	m	lc ₄	0.028	m

备注5：在本研究中，提出了对实用的双腿轮式机器人进行的控制。本研究中采取的步骤总结如下：步骤1步从要求中选择设备；步骤2步设计双腿轮式机器人；第3步构建真实模型；第4步评估执行器、传感器和机械结构的性能；步骤5步执行LQR控制器

在实际模式下的不同姿势；最后，步骤6对机器人实现了所提出的控制。

B. 实验描述

为了验证该控制的有效性，将其与具有两个隶属度函数的模糊LQR控制进行了比较，该模糊监督器称为具有两个隶属度函数的模糊LQR控制（FLQR with TMF）。这种控制是基于LQR控制器在高姿态和低姿态下设计的。姿势中PID和LQR控制的控制参数见表4。

表iv. 控制参数

控制器	参数
椎间盘突出	$K_p=40, K_I=3, K_D=0.02$
LQR低	$K_1 = \begin{bmatrix} 12. & 18. & 680 & 276 & 24 & 47 \\ 6 & 3 & 680 & 276 & -24 & -47 \\ & 18. & & & & \\ & 3 & & & & \end{bmatrix}$
LQR介质	$K_2 = \begin{bmatrix} 13. & 19. & 700 & 286 & 26 & 50 \\ 5 & 5 & 700 & 286 & -26 & -50 \\ & 19. & & & & \\ & 5 & & & & \end{bmatrix}$
LQR高	$K_3 = \begin{bmatrix} 14.1 & 22 & 756 & 296 & 28 & 53 \\ 2 & 22 & 756 & 296 & -28 & -53 \end{bmatrix}$

备注6：由于机器人姿态改变过程中不能保持平衡，因此只单独应用低、中、高姿势的LQR。采用模糊监督中具有两个隶属度函数的模糊LQR控制进行比较。

为了评价该控制器与机器人的平衡性和移动性能，在不同的场景下进行了两个实验，以评价该控制器的优越性。在第一个实验中，机器人在60秒内保持高度从高到低、从低到高时保持平衡。在第二种情况下，机器人在60秒内保持平衡、向前和向后移动，并同时改变其姿势。机器人的姿态随时间而变化，如图所示。10。

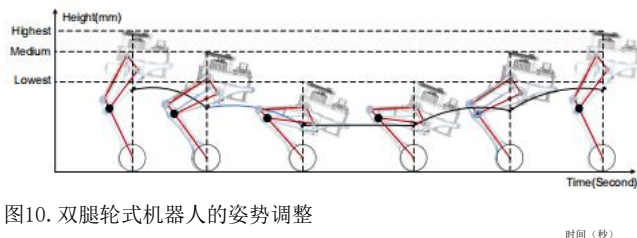


图10. 双腿轮式机器人的姿势调整

C. 实验结果

在第一种情况下，实验验证了所提出的控制保持机器人的平衡。这个机器人最初会保持在较高的姿势。它的姿势将从15个转变为较低姿势th第二至25th第二然后这个状态将在从40秒改变到高姿势后保持15秒th至50th第二最后，机器人将在最后一次保持这种姿势。在机器人姿势改变的过程中，机器人保持平衡。图11显示了机器人的输出响应，即机器人的位置、俯仰角、旋转角和机器人的高度，带参考的黑线，带TMF的FLQR的蓝线和提出的控制的红线。结果表明，当姿态随时间变化时，两个控制器保持良好的平衡。此外，还提出了一种具有模糊性的控制方法

由LQR控制器设计的三维控制器比由两种LQR控制器设计的模糊控制器具有更好的性能。12给出了机器人的误差性能，即机器人的位置、俯仰角、旋转角度和机器人的高度，其中FLQR与TMF的蓝线和建议控制的红线。图13表示左、右、髋电机控制器的控制信号，用TMF FLQR的蓝线和建议控制的红线。电机中的抖振效应很显著。

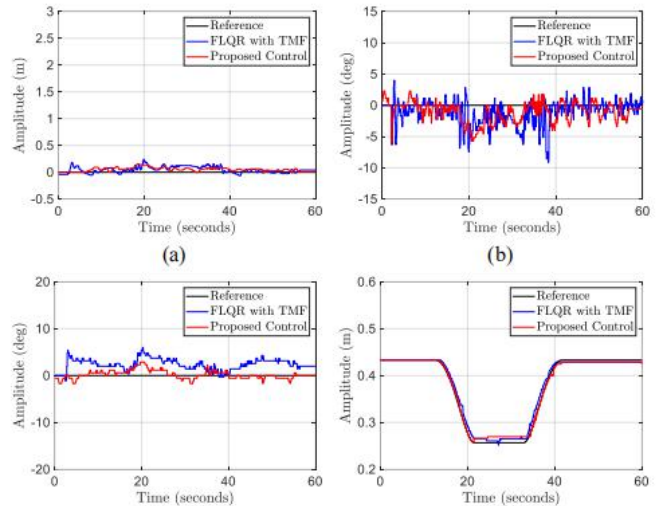


图11. 具有两个控制器的双腿轮式机器人的输出响应 (b) 俯仰角 (c) 旋转角机器人的 (d) 高度

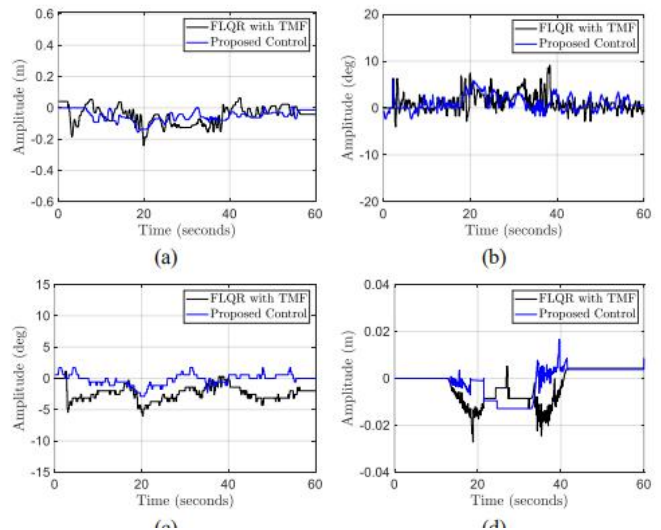
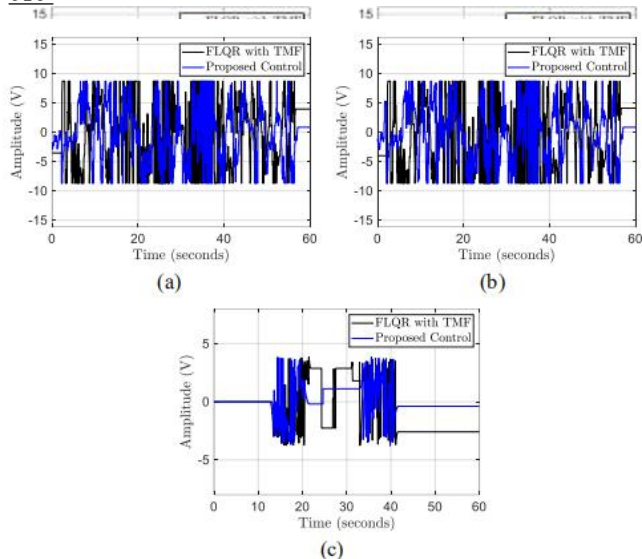


图12. 两个控制器在 (a) 机器人位置 (b) 俯仰角 (c) 旋转角 (d) 高度

在第二种情况下，该实验评估了所提控制在机器人向前和向后移动时保持不同姿势的机器人平衡的有效性。机器人将在初始时间内保持高姿势，然后开始将其高度从10降低到低姿势th到20th第二它将在15秒内保持低姿势，并将高度从35秒增加到高姿势th到45th第二



(a) 左电机中的控制信号；(b) 右电机；(c) 髋关节电机

最后，它将在最后一次保持这个状态。除了姿势随时间而变化，机器人也会移动从原点位置到1.6米的设定点从10th到20th第二然后，它就会停留在这个地方在向后移动到原点位置之前从35th到45th第二

最后，它将在最后一次保持在原点位置。图14表示机器人的输出响应，即机器人的位置、俯仰角、旋转角度和高度机器人的黑线为参考，蓝线为FLQR与TMF和建议控制的红线。结果表明，两个控制器保持了机器人当机器人前后移动时，保持平衡

机器人的输出响应

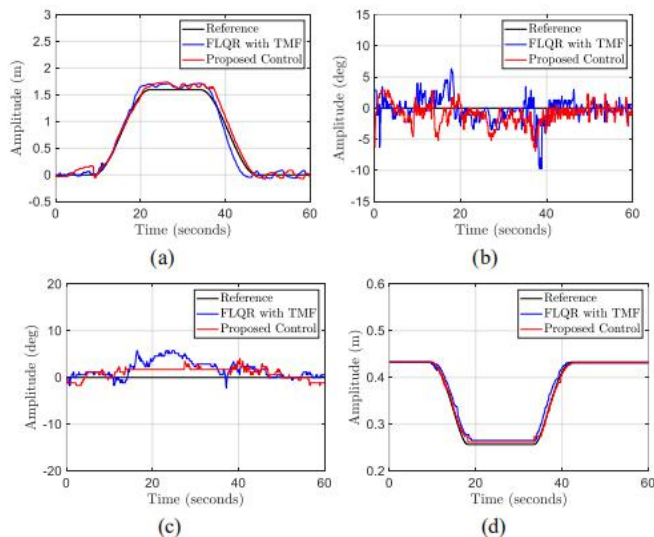


图14. 具有两个控制器的双腿轮式机器人的输出响应(b)俯仰角(c)旋转角机器人的(d)高度

此外，提出的模糊控制比TMF的FLQR具有更好的性能。图15表示机器人的误差性能，即机器人的位置、螺距角、旋转角和机器人的高度，FLQR的蓝色线为TMF和红色

建议的控制图。16表示左、右、髋电机控制器的控制信号，用TMF FLQR的蓝线和建议控制的红线。在本案例研究中，电机中的颤振效应也很重要。

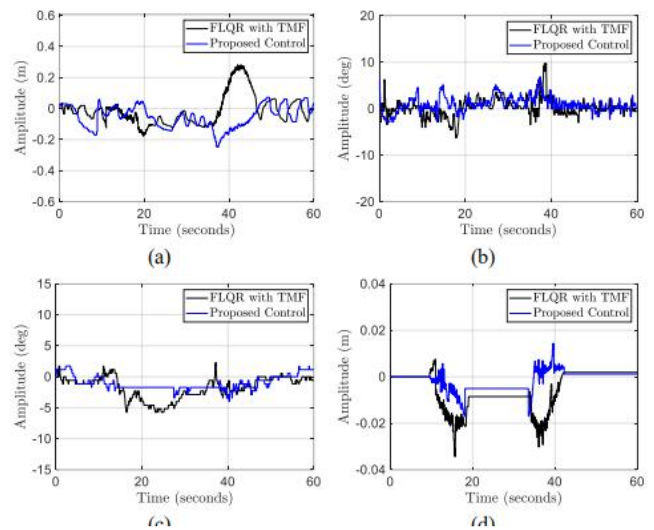


图15. 两个控制器在(a)机器人位置(b)俯仰角(c)旋转角(d)高度

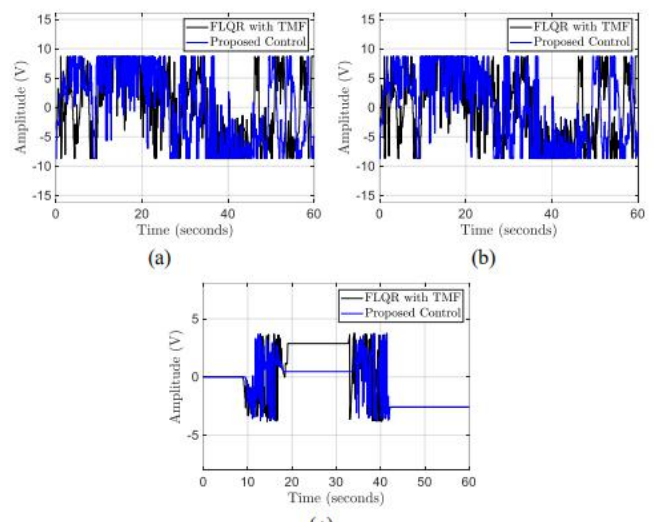


图16. 带有两个控制器的双腿轮式机器人的控制信号响应：(a)左电机；(b)右电机；和(c)髋关节电机

V. 结论和未来的工作

本文提出了一种双轮式平衡机器人的模糊LQR PID控制方法，以保持其在不确定性和不同高度条件下的稳定性。建议的控制包括模糊监控器、LQR和PID。采用模糊LQR方法控制不同姿态下的机器人的稳定性和运动能力。使用模糊监控器来根据机器人的高度来调整LQR控制。它由一个输入和一个输出组成。输入和输出分别对机器人的三种姿态有三个隶属度函数。PID控制件用于控制机器人的姿态。为了验证该控制装置的有效性，构建了实用机器人，并将该控制装置嵌入控制板。并进行了两个实验来验证平衡和平衡

机器人的移动能力。在实践中，当机器人的姿势改变时，传感器安装平面相对于机器人的高度倾斜一个角度。因此，利用IMU传感器计算出的俯仰角进行了校准补偿。

本研究今后的工作重点是：1)抑制震颤效应；2)改进机器人试验台，分别控制两条腿的长度；3)应用2型模糊系统来管理系统中的不确定性；4)利用激光雷达和CCD图像研究一些先进的导航方法。

致谢

研究主题是由青年孵化器科技项目，由青年促进科技中心——胡志明共产主义青年联盟和胡志明市科技部，合同编号是“22/2022/HĐ-KHCNT-VU”签署了12月30日，2022年。

参考文献

- [1] S. Harapanahalli, N. O. 马霍尼. V. 埃尔南德斯. 坎贝尔, D. 里奥丹和J. “工厂环境下移动机器人的自主导航”, 国立台湾大学制造研究所硕士论文. 38, pp. 15241531, 2019.
- [2] D. 迪波拉, D. Naso. Milella, G. 西里利和A. 迪斯坦特, “多《自主移动机器人的室内环境传感器监测》”, 《国际智能系统技术与应用杂志》, 第1卷. 8、没有. 1-4, pp. 18-35, 2010, doi: 10.1504/IJISTA.2010.030187.
- [3] S. Srinivas. 拉马坎迪兰和S. Rajendran, “自主机器人驱动交付: 最近的发展和未来方向的回顾”, “运输研究E部分: 物流和运输评论”, 卷. 165, p. 102834, 2022.
- [4] C. H. G. 李, L. P. 周和Y. H. 赵小兰, “自我平衡, 两轮式”具有智能端到端深度视觉转向的机器人, “IEEE/ASME机电一体化交易, vol. 26日, 没有. 5, pp. 22632273, 2021, doi: 10.1109/TMECH.2020.3036579.
- [5] W. 鲍尔, M. 本德, M. 布劳恩, P. 拉力赛和O. 肖尔茨, “轻量级”人工组装的机器人-最好简单地开始,” 国际动物研究所, 斯图加特, 卷. 1, 2016.
- [6] H. W. 金和S. “模糊逻辑在两轮移动设备中的应用”《机器人平衡控制性能》, 《国际模糊逻辑与智能系统杂志》, 第1卷. 12日, 没有. 2, pp. 154-161, 2012.
- [7] S. 金和S. “非线性最优控制设计”欠驱动的两轮倒立钟摆移动平台, “IEEE/ASME机电一体化交易”, vol. 22日, 没有. 6, pp. 28032808, 2017, doi: 10.1109/TMECH7085..2017.276
- [8] K. V. 乔特加西亚, O. E. 普拉多·拉米雷斯和C. F. 伦吉福罗达斯, “两轮倒立摆的模糊逻辑控制、卡尔曼滤波器的lqr控制与pid控制的比较分析”, 《拉丁美洲自动化与机器人研究进展: 第一届拉丁美洲自动化与机器人大会论文集》, 第页. 144-156, 2017.
- [9] A. A. 特征, S. Buyamin, M. N. 艾哈迈德和M. 穆罕默德 《两轮倒立摆机器人控制器比较》, 《国际机械与机电工程杂志》, 卷. 14日, 没有. 3, pp. 62-68, 2014.
- [10] N. G. M. ThaoD. H. Nghia和N. H. Phuc, “PID后退”“两轮自平衡机器人控制器”, “国际战略技术论坛2010”, 页. 76-81, 2010, doi: 10.1109/IFOST1..2010.566800
- [11] T. 尼基塔和K. T. “基于两轮自我的PID控制器”《平衡机器人》, 2022年第15届电子与信息学趋势国际会议 (ICOET), 页. 1-4, 2021, doi: 10.1109/ICOET151242.2021.9453091.
- [12] F. 太阳, Z. Yu和H. “两轮自平衡的设计”基于卡尔曼滤波器和LQR的机器人”, “2014年机电一体化与控制国际会议 (ICMC)”, 页. 612-616, 2014, doi: 10.1109/ICMC.2014.7231628.
- [13] J. “两轮自平衡的LQR控制器设计”基于粒子群优化算法的机器人, “工程中的数学问题”, 卷. 2014, p. 729095, 2014, doi: 10.1155/2014/729095.
- [14] H. F. 穆尔西亚和A. E. 冈萨雷斯, “性能比较”两轮倒立摆机器人的PID和LQR控制”, 2016年IEEE哥伦比亚机器人和自动化会议 (CCRA), 页. 1-6, 2016, doi: 10.1109/CCRA..2016.7811420
- [15] C. 徐, M. 李和F. 系统设计和LQR控制 “两轮自平衡移动机器人”, 2011年国际电气与控制工程会议, 页. 2786-2789, 2011, doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057680.
- [16] M. 穆罕默德, S. Buyamin, M. N. 艾哈迈德, S. Nawawi和A. 特征, 《基于两轮倒摆移动机器人的多操作点控制》, 《国际机械与机电工程杂志》, 第1卷. 13, pp. 1-9, 2013.
- [17] A. I. Glushchenko. A. 拉斯托克金和V. A. “Petrov” 开发基于反馈线性化的两轮平衡机器人最优控制系统, “2019年国际工业工程与现代技术多重会议 (法伊斯特con)”, 页. 1-6, 2019, doi: 10.1109/FarEastCon5..2019.893424
- [18] J. 凯泽尔斯基和K. 《平衡机器人的反馈控制》, IFAC程序卷, 卷. 42岁, 没有. 13, pp. 495-500, 2009.
- [19] V. B. V. Nghia, T. 范蒂恩, N. N. 儿子和M. T. 长, “适应性”《两轮自平衡机器人的神经滑动模式控制》, 《国际动力学与控制杂志》, 第1卷. 10, 没有. 3, pp. 771784, 2022, doi: 10.1007/s40435-021-00832-1.
- [20] S. 元, G. 雷和X. 本书, “动态建模和滑动模式”“两轮自平衡机器人的控制器设计”, 2016年IEEE机电一体化与自动化国际会议, 第页. 24372442, 2016, doi: 10.1109/ICMA.2016.7558948.
- [21] M. Hou, X. 张, D. 陈和Z. 徐, “层次滑动模式”轮式倒摆机器人轨迹跟踪的控制结合非线性扰动观察器, “应用科学”, 第1卷. 13日, 没有. 7, p. 4350, 2023.
- [22] E. 艾哈迈德. U. 雷曼兄弟. 汗, M. Haseeb和N. 高的 “两轮自平衡机器人的后退控制设计” 2018年第一届电力、能源和智能电网国际会议 (ICPESG), 页. 1-6, 2018, doi: 10.1109/ICPESG.2018.8384494.
- [23] N. 埃斯梅里, A. Alfi和H. 科斯拉维, “平衡与轨迹”利用反向滑动模式控制的两轮移动机器人跟踪: 设计与实验》, 《智能与机器人系统杂志》, 第1卷. 87岁, 没有. 3, pp. 601-613, 2017, doi: 10.1007/s10846-017-0486-9.
- [24] A. J. Humaidi等人, “块后退的算法设计”《赛格威移动机器人的运动与稳定控制》, 《移动机器人: 运动控制与路径规划》. 557-607, 2023.
- [25] S. Sekiguchi, 。YorozuK. 库诺, M. 冈田, Y. 渡边和M. 高桥, “具有最优控制方法的两轮服务机器人的人性化控制系统设计”, 《机器人与自主系统, 第1卷. 131, p. 103562, 2020.
- [26] M. M. Azimi和H. R. “a2的模型预测控制”“轮式自平衡机器人”, 2013年第一届RSI/ISM机器人与机电一体化国际会议 (ICRoM), 页. 152157, 2013, doi: 10.1109/ICRoM.2013.6510097.
- [27] R. Cui, J. 郭和Z. 毛, “自适应的后退控制的轮式倒摆模型”, “非线性动力学, 卷. 79岁, 没有. 1, pp. 501-511, 2015, doi: 10.1007/s11071-014-1682-9.
- [28] W. 太阳, S. F. 苏, J. 夏和Y. 吴教授, “自适应跟踪控制”轮式倒摆, “IEEE控制学学报”, 卷. 50岁, 没有. 5, pp. 1867-1876, 2020, doi: 10.1109/TCYB707..2018.2884
- [29] C. 杨, Z. 李和J. 李彦, 《轨迹规划与优化适应性》控制为一类轮式倒摆车辆模型, “IEEE交易在控制论, 卷. 43岁, 没有. 1, pp. 24-36, 2013, doi: 10.1109/TSMCB.2012.2198813.

- [30] I. Gandarilla, J. 蒙托亚-柴雷斯, V. 圣地亚哥. 阿吉拉尔-阿维拉尔和J. “通过自适应神经网络的自平衡机器人的轨迹跟踪控制”, 《工程科学与技术》, 国际期刊. 35, p.101259, 2022.
- [31] S. 荣格和S. S. 金妍, “车轮驱动手机的控制实验”
利用神经网络倒摆, *IEEE控制系统技术学报*, 卷. 16日, 没有。2, pp. 297-303, 2008, doi: 10.1109/TCST.2007.903396.
- [32] J. S. Noh, G. H. 李, H. J. 崔和S. 荣格, “稳健的控制a
使用RBF神经网络控制器的移动倒立摆机器人”, “2008年IEEE机器人与仿生学国际会议”, 页. 19321937, 2009, doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913296.
- [33] W. 俊峰和Z. ”模糊逻辑控制器的设计
轮式自平衡机器人”, 2011年第6届战略技术国际论坛, 卷. 2, pp. 12661270, 2011, doi: 10.1109/IFOST.2011.6021250.
- [34] J. 吴, W. 张和S. “两轮自平衡机器人
用模糊PD控制方法”, “工程中的数学问题”, 第1卷. 2012, p. 469491, 2012, doi: 10.1155/2012/469491.
- [35] K. 纳德和D. “两轮车的建模和控制”
使用模糊pid修正状态反馈的倒立摆, 《机器人杂志》, 第1卷. 2023, p. 4178227, 2023, doi: 10.1155/2023/4178227.
- [36] C. H. 黄, W. J. 王和C. H. Chiu, “设计和实现”
《两轮倒立钟摆的模糊控制》, 《工业电子学报》, 第1卷. 58岁, 没有。7, pp. 2988-3001, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2069076.
- [37] T. 赵, 问. Yu, S. DianR. 郭和S. 李, “非单列将军”
“两轮自平衡机器人的第2型模糊控制”, 《国际模糊系统杂志》, 第1卷. 21日. 6, pp. 17241737, 2019, doi: 10.1007/s40815-019-00664-4.
- [38] Y. 张, L. 张, W. 王, Y. 李和Q. 张, “设计和
一种带有联动机构的两轮跳跃机器人的实现. 6, pp. 42422-42430, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2859840.
- [39] V. Klemm等人, “上升上升: 两轮跳跃机器人”, 2019年
国际机器人与自动化会议 (ICRA), pp. 7515-7521, 2019, doi: 10.1109/ICRA92..2019.87937
- [40] H. 周, X. 李, H. 冯, J. 李, S. 张和Y. Fu, 模型解耦
以及轮状人形机器人在矢状面运动的控制
第19届国际类人机器人 (类人机器人) 会议, 2019年, 第页. 1-6, 2019, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035069.
- [41] S. 王等人., “一种新型轮腿机器人的平衡控制”:
设计与实验, 2021 IEEE机器人与自动化国际会议 (ICRA), 页. 6782-6788, 2021, doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561579.
- [42] C. 张, T. 刘, S. 宋和M. Q.-H. 孟, “系统设计和
双足式机器人的平衡控制, 2019 IEEE机器人与仿生学国际会议 (ROBIO), 页. 18691874, 2019, doi: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961814.
- [43] F. Raza和M. “走向强壮的轮腿双足动物”
“机器人系统: 结合前馈和反馈控制”, 2021年IEEE/SICE系统集成国际研讨会 (SII), 页. 606-612, 2021, doi: 10.1109/IEEECONF49454.2021.9382678.
- [44] J. 董, R. 刘, B. LU, X. 郭和H. 刘, “基于LQR的平衡
《双腿机器人控制》, 2022 41届中国控制会议 (CCC), 页. 450-455, 2022, doi: 10.23919/CCC55666.2022.9902200.
- [45] Y. 欣, H. 柴, Y. 李, X. 荣, B. 李和Y. 李, “速度和
基于分布式动力学模型和全身控制的双轮腿机器人的加速度控制. 7, pp. 180630180639, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2959333.
- [46] V. Klemm等人, “LQR辅助全身控制的轮式
具有运动学循环的两足机器人”, 在IEEE机器人和自动化字母, 卷. 5、没有。2, pp. 3745-3752, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2979625.
- [47] S. 辛和S. “在线动态运动规划和
轮式两足机器人控制”, 2020 IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议 (IROS), 页. 3892-3899, 2020, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340967.
- [48] H. 陈, B. 王, Z. 香港, C. 沈, P. M. 温辛和W. 张,
“欠驱动的运动规划和控制与车轮-两足机器人跳跃”, IEEE机器人和自动化字母, 卷. 6、没有。2, pp. 747-754, 2021, doi: 10.1109/Lra.2020.3047787.
- [49] T. 郭等人, “轮腿跳跃的设计与动态分析”
机器人在复杂的地形环境中, “前沿”
神经动力学, 卷. 16, p. 1066714, 2022.
- [50] H. G. “非线性控制的线性化”
《非线性控制系统的线性化》, pp. 1-589, 2022.