

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.044

仿蜘蛛六足机器人设计与分析

周娟利¹, 顾仁碗², 韩斌慧^{1,3}

(1. 西安航空职业技术学院 航空材料工程学院, 陕西 西安 710089;

2. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089;

3. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:为增强足式机器人在非结构化环境中的运动自适应,基于蜘蛛在非结构化环境中的运动特点,设计一种蜘蛛型足式机器人。采用 $D-H$ 参数建立六足机器人运动学模型,对足式机器人的运动轨迹规划进行数值分析;结合空间运动机器人的系数关联矩阵,建立蜘蛛型足式机器人的动力学模型;采用多输入多输出的模糊控制网络对其进行控制,对其髋关节、膝关节的位置进行轨迹跟踪,同时补偿摩擦等不确定因素的误差。仿真结果表明:基于多输入多输出的模糊控制网络可实现六足机器人位置跟踪的有效控制,为智能机器人的设计提供参考依据。

关键词:运动学模型;动力学模型;模糊控制网络

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0243-05

Research and Analysis of Spider Like Hexapod Robot

ZHOU Juanli¹, GU Renwan², HAN Binhui^{1,3}

(1. School of Aeronautical Materials Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China;

2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;

3. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the movement characteristics of the spider in unstructured environment, the bionic structure of the spider is designed in order to enhance the motion adaptation of legged robot in the unstructured environment. $D-H$ parameters are applied to establish the kinematics modeling of the hexapod robot, and its trajectory is planned by numerical simulation. The coefficient correlation matrix of the space robot is used to build the dynamic model of the hexapod robot. The fuzzy control network with multi-input and multi-output is adopted to control the robot, whose trajectory of hip and knee joint positions are tracked, and the error compensation of uncertain factors such as friction is carried out. The simulation results show that the fuzzy control network based on multi-input and multi-output can realize the position tracking of the hexapod robot and provide a reference for the design of hexapod intelligent robot.

Keywords: kinematic model; dynamic model; fuzzy control network

0 引言

从动物的感知机制和运动行为规律中凝练仿生原理,指导智能机器人的设计是生命科学服务与国家战略目标的重要结合点^[1]。为实现运动机器人在非结构化环境中的运动优势,国内外诸多学者从生物界的运动机制中汲取原理,用于实现足式机器人的智能化,主要包括运动仿生、结构仿生和功能仿生等几个方面^[2]。张雨航等^[3]为增强机器人在非结构化环境中的运动灵活性,采用甲虫结构进行仿生设计,并对其步态进行运动仿真分析。为提高六足机器人运动规划方面的功能

仿生,刘天成等^[4]研究了一种仿蜘蛛式六足机器人,先后对其几种典型步态进行了验证与分析。同时,夏文强等^[5]结合多足昆虫结构和运动特点,研究设计了六足机器人的中枢模式发生器 (central pattern generators, CPG) 控制模型,对步态运动进行指导控制。孔令超等^[6]应用 ADAMS 进一步分析了关节和关节臂刚性对机器人整机模态的影响规律,为整机结构优化设计和改进提供了参考价值。张明路等^[7]基于多足机器人非结构化环境中的自适应能力,研究了一种三维感知能力的足端机构并先后对其原理和有效性进行了验证,达到了生物的部分功能仿生。

基金项目:西安航空职业技术学院高层次人才科研启动金项目(2025XHQDJ04)

第一作者简介:周娟利(1983—),女,陕西西安人,教授,硕士,研究方向为数字化产品设计与加工方向,jlzhou520@163.com。

由上可知,国内学者在足式机器人方面做了很多的工作。然而,在多足仿生机器人非线性及不确定项这方面的文献还是较少。基于多足蜘蛛的运动特点,本文设计一种六足机器人,采用 $D-H$ 模型对机器人的机体和各腿建立坐标系,在求解运动学模型的基础上,对其轨迹规划进行数值仿真^[8-11];采用空间结构学的关联矩阵方法,对六足机器人进行动力学建模^[12];为提升该机器人在非结构化环境中的运动自适应,尤其考虑到机器人摩擦、外界干扰及不确定项的影响,采用多输入多输出的模糊控制网络对其进行仿真分析,所设计的多输入多输出模糊控制网络的合理性和有效性得到了验证,为多足机器人的智能化设计提供了一定程度的理论基础^[13-16]。

1 仿蜘蛛机器人运动学分析

1.1 结构设计

生物蜘蛛是对节肢动物门蛛形纲蜘蛛目所有种的通称,如图 1 所示。由图 1 可知,生物蜘蛛腿部结构呈对称分布,若将蜘蛛与地面落脚点用圆滑曲线连接起来,可得其腿部结构分布在椭圆范围内。若对生物蜘蛛的腿部进行简化,可得其单个腿具有 3 个自由度,本文机器人结构采用对称的方式进行设计,结合非结构化环境的特点,并将其腿关节进行简化设计,包括 3 个自由度,具体如图 2 所示。

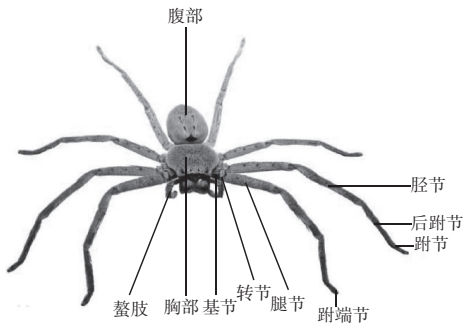


图 1 生物蜘蛛实图

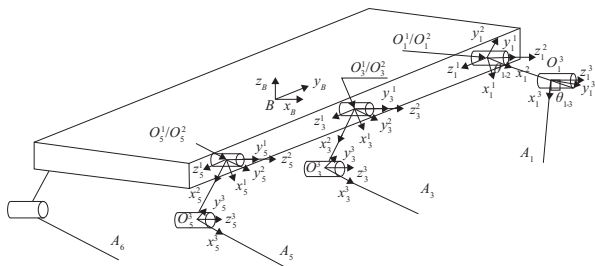


图 2 六足机器人

1.2 运动学分析及运动空间云图

如图 2 所示,该六足机器人每条腿可看作具有 2 自由度的两连杆串联机构,机体被视为圆柱体。构建机体坐标系 $\{B\}$,其与六足机器人机体固联,坐标原点与六足机体形心重合,具体如图 2 所示。定义髋关节固定坐标系 $\{O_i^0\}$,其坐标原点位于 i 号腿根关节与髋关节转轴的交点, $x_{O_i^0}$ 、 $y_{O_i^0}$ 、 $z_{O_i^0}$ 与坐标系 $\{B\}$ 的 x_B 、 y_B 、 z_B 分别平行, $i=1,2,3,4,5,6$;其余坐标系 $\{O_i^1\}$ 、 $\{O_i^2\}$ 均可通过 $D-H$ 模型建立^[17-18], $i=1,2,3,4,5,6$ 。各腿 $D-H$ 模型参数如表 1 所示,其中 l_1 、 l_2 分别表示髋关节、腿关节的长度。

表 1 第 i 条腿的 $D-H$ 参数

连杆 i	连杆转角 α_{i-1}	连杆长度 l_i	连杆偏距 d_i	关节角 θ_i
1	α_0	l_1	0	θ_{i-1}
2	α_1	l_2	0	θ_{i-2}
3	α_1	l_3	0	θ_{i-3}

建立步行机器人 $D-H$ 模型,以机体坐标系 $\{B\}$ 为参考坐标系,腿关节与机体的关节角为 θ_{i-1} ,髋关节关节角为 θ_{i-2} ,膝关节关节角为 θ_{i-3} 。坐标系 $\{O_i^1\}$ 相对于机体坐标 $\{B\}$ 的齐次坐标变换矩阵为

$${}^B_1T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_0 \\ \sin\theta_1 \cos\alpha_B & \cos\theta_1 \cos\alpha_B & -\sin\alpha_B & -\sin\alpha_B d_1 \\ \sin\theta_1 \sin\alpha_B & \cos\theta_1 \sin\alpha_B & \cos\alpha_B & \cos\alpha_B d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i-1} & -\sin\theta_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_{i-1} & \cos\theta_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理坐标系 $\{O_i^2\}$ 相对于坐标 $\{O_i^1\}$ 的齐次坐标变换矩阵、坐标系 $\{O_i^3\}$ 相对于坐标 $\{O_i^2\}$ 的齐次坐标变换矩阵分别为 ${}^1_2T_i$ 、 ${}^2_3T_i$,即:

$${}^1_2T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i-2} & -\sin\theta_{i-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{i-2} & -\cos\theta_{i-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i-3} & -\sin\theta_{i-3} & 0 & l_2 \\ \sin\theta_{i-3} & \cos\theta_{i-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则坐标系 $\{O_i^3\}$ 相对于机体坐标系 $\{B\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^B_3T_i = {}^B_1T_i {}^1_2T_i {}^2_3T_i \quad (4)$$

由 ${}^3P_{A,i} = [l_2 \ 0 \ 0]^T$, 则有

$${}^B_3P_{A,i} = {}^B_3T_i {}^3P_{A,i} = \begin{bmatrix} l_2 \cos \theta_{i-1} \cos(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \cos \theta_{i-1} \cos \theta_{i-2} \\ l_2 \sin(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \sin \theta_{i-2} \\ l_2 \sin \theta_{i-1} \cos(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \sin \theta_{i-1} \cos \theta_{i-2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

以机体坐标系 $\{B\}$ 为参考坐标系, 足端 A_i 的位置为

$$\begin{cases} {}^B x_{A,i} = {}^B x_{O_0} + l_2 \cos \theta_{i-1} \cos(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \cos \theta_{i-1} \cos \theta_{i-2} \\ {}^B y_{A,i} = {}^B y_{O_0} + l_2 \sin(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \sin \theta_{i-2} \\ {}^B z_{A,i} = {}^B z_{O_0} + l_2 \sin \theta_{i-1} \cos(\theta_{i-2} + \theta_{i-3}) + l_1 \sin \theta_{i-1} \cos \theta_{i-2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

此处跟关节、髌关节和膝关节的角度范围分别取 $\theta_{i-1} \in [-\pi/4, \pi/4]$; $\theta_{i-2} \in [-\pi/4, \pi/2]$; $\theta_{i-3} \in [0, 2\pi/3]$; $l_1 = 1.0 \text{ m}$; $l_2 = 0.8 \text{ m}$ 。

对某一单腿进行运动数值轨迹规划, 并求解其在 x, y, z 方向的数值变化, 如图3、图4所示。

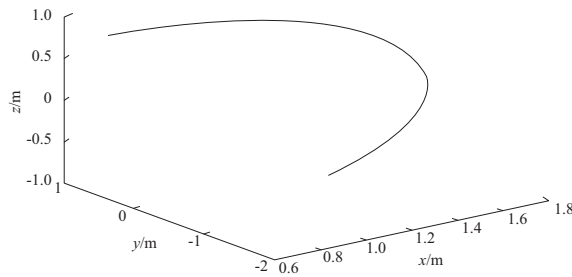


图3 足端空间运动轨迹

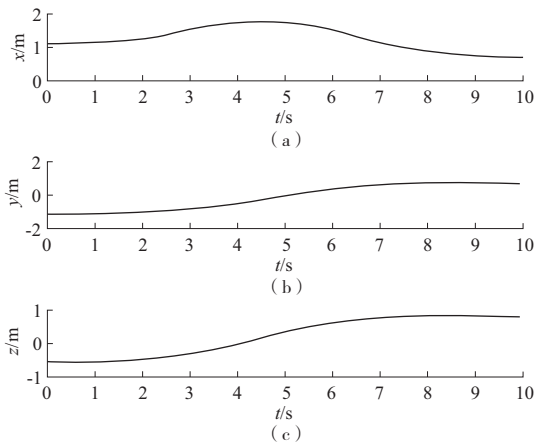


图4 足端运动轨迹在 x, y, z 方向的映射

2 动力学模型分析

该步行机器人单腿机构简图如图5所示。

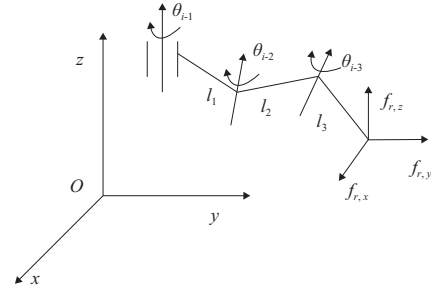


图5 单腿机构简图

由图5可知, 每条腿由3个连杆和3个回转副与躯体相连, $O-xyz$ 为惯性坐标系。对于支撑腿, 与地面接触且不打滑的接触点可视为球副。由影响系数法可知, 躯体的速度 $V_p = [\omega_p \ v_p]^T$ 与第 i 支腿中的角速度矢量 $\dot{\varphi}_i = [\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dots \ \dot{\varphi}_6]^T$ 关系为

$$V_p = J_{\varphi,i}^p \dot{\varphi}_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (7)$$

式中: $J_{\varphi,i}^p \in R^{6 \times 6}$ 为第 i 支承腿对躯体的影响系数矩阵, 只与机构的运动学参数和机构的位形有关; $\dot{\varphi}_i = [\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dots \ \dot{\varphi}_6]^T$, 6个转动副的顺序以从地面依次计到与躯体相连; n 为该时刻支撑腿的数量。

定义该6自由度的步行机器人所有支撑腿的驱动关节构成的关节空间为 Φ , 在 Φ 任意选出6个驱动关节组成广义的坐标向量 τ , 由式(7)可得

$$\dot{\tau} = J_p^p V_p \quad (8)$$

式中: $\dot{\tau}$ 表示广义坐标速度矢量; J_p^p 表示躯体运动相对广义坐标的影响系数矩阵, 只与机构的运动参数及位形有关; $\tau \in R^6$ ($\tau \subset \Phi$); $\Phi = \varphi_{i,j}$, ($i=1, 2, \dots, n; j=4, 5, 6$)。

假设 J_p^p 满秩, 令 $J_\tau^p = [J_p^p]^{-1}$, 则式(8)为

$$V_p = J_\tau^p \dot{\tau} \quad (9)$$

式中 $J_\tau^p \in R^{6 \times 6}$ 表示广义坐标对躯体的关联系数矩阵, 则由式(8)、式(9)得

$$\dot{\varphi}_i = J_\tau^i \dot{\tau} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (10)$$

式中: $\dot{\varphi}_i \in R^6$ 为第 i 支撑腿的关节角速度矢量; $J \in R^{6 \times 6}$ 为广义坐标对第 i 支撑腿关节坐标的影响系数矩阵。同理可得任意支撑腿第 m 杆的速度与广义坐标之间的映射关系, 即

$$V_{i,m} = J_\tau^{i,m} \dot{\tau} \quad m=1, 2 \quad (11)$$

式中 $J_{\tau}^{i,m} \in R^{6 \times 6}$ 表示广义坐标对第 i 支撑腿第 m 杆的影响系数矩阵。

该六足机器人机体及第 i 支撑腿第 m 杆的加速度与广义坐标之间的映射关系为

$$\begin{cases} a_p = \dot{\tau}^T H_{\pi}^p \dot{\tau} + J_{\tau}^p \ddot{\tau} \\ a_{i,m} = \dot{\tau}^T H_{\pi}^{i,m} \dot{\tau} + J_{\tau}^{i,m} \ddot{\tau} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $H_{\pi}^p, H_{\pi}^{i,m}$ 分别为广义坐标对机体及第 i 支撑腿第 m 杆的 2 阶影响系数矩阵, $i = 1, 2, \dots, 6; m = 1, 2$ 。

此时,六足机器人机体及其他任意杆件的惯性力可表示为

$$F = [Mf]^T = -[I]a - \begin{bmatrix} \omega^T I_c \omega \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式 13 表示的是系统惯性力的表达式,其中 F 是惯性力, f 是与广义坐标相关的力向量。 $[Mf]^T$ 表示质量矩阵 M 与力向量 f 的乘积的转置,这在动力学方程中用于描述系统的惯性效应。

式中 I, I_c 分别表示构件对质心的 6 阶和 3 阶惯性矩阵。

则有该六足机器人的动力学方程为

$$[J_{\tau}^p]^T F_p + \sum_{i=1}^6 \left\{ [J_{\tau}^i]^T \tau_i + \sum_{m=1}^3 [J_{\tau}^{i,m}]^T F_{i,m} \right\} = \{0\} \quad (14)$$

式中: $\tau_i \in R^6$ 表示第 i 支撑腿上的驱动力矩; F_p 表示作用在机体上的外力、惯性力合成的力矢量, $F_{i,m}$ 表示第 i 支撑腿 m 构件上外力及惯性力的合成矢量。

3 轨迹跟踪控制

为增强该机器人在非结构化环境中的自适应特点,减弱外界干扰因素(如关节摩擦、外部扰动和负载变化等方面)的影响,此处采用多输入多输出的模糊控制网络对其进行优化设计^[19-20]。其中,自适应模糊系统可视为如图 6 所示的神经网络类型。

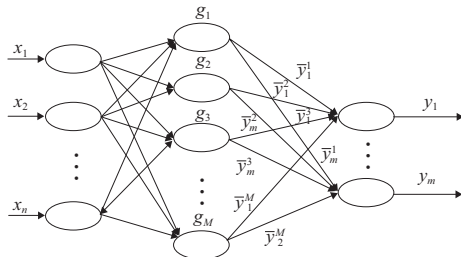


图 6 多输入多输出模糊控制网络

$$\begin{cases} y_j = \sum_{l=1}^M \bar{y}_j^l g_l(x) = \Psi_j^T g(x) \\ g_l(x) = \frac{\prod_{i=1}^p \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^p \mu_{A_i^l}(x_i))} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $g(x)$ 为模糊基函数, $g(x) = [g_1(x), \dots, g_M(x)]^T \in R^M$; $g_l(x)$ 为隐层网络中的非线性映射; Ψ_j 为参数向量, $\Psi_j = [\bar{y}_j^1, \dots, \bar{y}_j^M]^T \in R^M$; $\bar{y}_j^l$ 表示可变权重。上述自适应模糊系统可任意精度逼近任意真实连续函数。

则有多输入多输出模糊控制系统模型为

$$y = \Psi^T g(x) \quad (16)$$

式中: Ψ 表示 $M \times m$ 矩阵; Ψ_j 表示矩阵 Ψ 的第 j 列。

3.1 六足机器人自适应模糊控制器

此处将六足机器人等效为机体与 6 个串联的 2 关节机械臂,机械臂的每个自由度由独立的力矩驱动。考虑机器人机械手的不确定性,结合拉格朗日公式,式(14)化简得

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = \tau \quad (17)$$

式中: $q \in R^n$ 为关节角度; $D(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性力矩,且为对称的、有界的、正定的惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \dot{q} \in R^n$ 为向心力和哥氏力矩, $G(q) \in R^n$, $\tau \in R^n$ 分别为重力力矩、施加的关节力矩; $F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t)$ 为模型中所有不确定的因素,且有

$$F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = e(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) + F_r(\dot{q}) + \tau_d \quad (18)$$

式中: $F_r(\dot{q}) \in R^n$ 和 $\tau_d \in R^n$ 分别为摩擦力矩、扰动力矩。

结合前文中的自适应控制网络,由式(15)、式(16)可得控制律:

$$\tau = D(q) \ddot{q}_r + C(q, \dot{q}) \dot{q}_r + G(q) + \hat{F}_{\Psi}(q, \dot{q}, \ddot{q}) - K_D s \quad (19)$$

式中: $K_D = \text{diag}(K_i)$, $K_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$; $\hat{F}_{\Psi}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为多输入多输出模糊控制网络的 $F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t)$ 。

$$\hat{F}_{\Psi}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \begin{bmatrix} \hat{F}_{\Psi_1}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \hat{F}_{\Psi_2}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \vdots \\ \hat{F}_{\Psi_n}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1^T g(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \Psi_2^T g(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \vdots \\ \Psi_n^T g(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

利用模糊控制系统的最优参数矩阵,定义最小逼近误差向量

$$\omega = F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) - \hat{F}_{\Psi^*}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (21)$$

自适应律设计为

$$\dot{\Psi}_i = -\Gamma_i^{-1} s_i g(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

控制方案如图 7 所示。

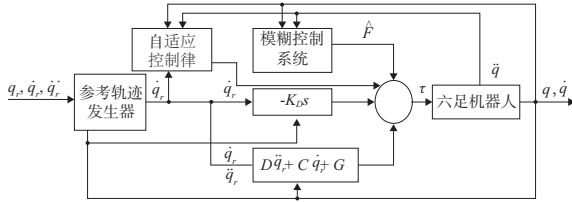


图 7 控制网络结构

为了消除逼近误差造成的影响,鲁棒自适应律为

$$\tau = \ddot{D}q_r + \dot{C}q_r + G + \hat{F}_{\Psi^*}(q, \dot{q}, \ddot{q}) - K_D s - W \text{sgn}(s) \quad (23)$$

式中 $W = \text{diag} [\omega_{M_1}, \dots, \omega_{M_n}]$, $\omega_{M_i} \geq |\omega_i|$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

3.2 仿真研究

完成控制律和自适应律之后,选取合适的控制参数对髋关节、膝关节的位置进行跟踪试验,取 $l_1 = 1.0 \text{ m}$; $l_2 = 0.8 \text{ m}$; $m_1 = 1.0 \text{ kg}$; $m_2 = 1.5 \text{ kg}$;期望轨迹 $q_1 = q_2 = 0.3 \sin t$; $M = 1$ 。

定义隶属函数 $\mu_{A_i^l}$,且满足

$$\mu_{A_i^l}(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - x_i^{-l}}{\pi/24} \right)^2 \right] \quad (24)$$

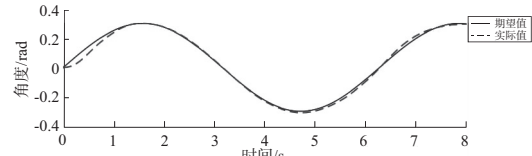
式中: x_i^{-l} 分别取 $-\pi/6, -\pi/12, 0, \pi/12, \pi/6$; $i = 1, 2, 3, 4, 5$; A_i 分别取模糊集常用量 NB(负大)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PB(正大)。

$$\begin{cases} F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 3\dot{q}_1 + 0.2 \text{sgn} \dot{q}_1 \\ 2\dot{q}_2 + 0.2 \text{sgn} \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ \tau_d = \begin{bmatrix} 0.05 & \sin 20t \\ 0.1 & \sin 20t \end{bmatrix} \\ K_D = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \\ W = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

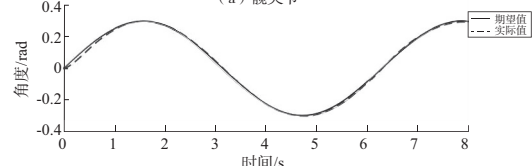
仿真结果如图 8、图 9、图 10 所示

图 8-图 10 仿真结果表面在考虑到摩擦等外界干扰的条件下,所设计的多输入多输出的模糊控制网络优化效果有效,六足机器人各腿的关节

位置跟踪效果良好。

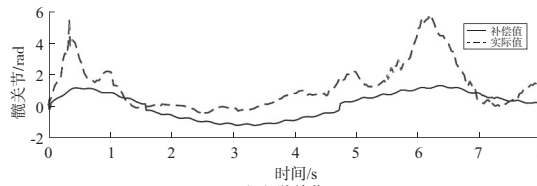


(a) 髋关节

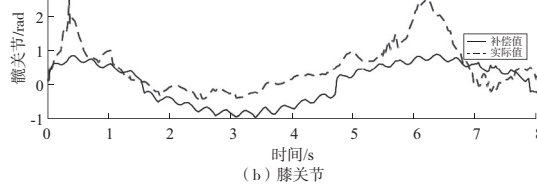


(b) 膝关节

图 8 第 i 腿关节角度跟踪

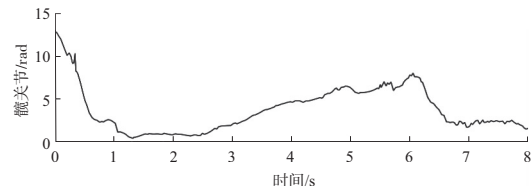


(a) 髋关节

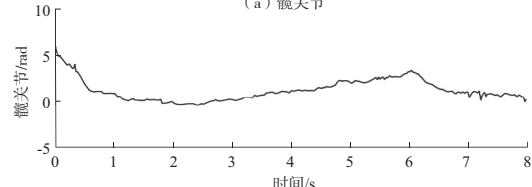


(b) 膝关节

图 9 双关节摩擦及补偿



(a) 髋关节



(b) 膝关节

图 10 关节输入角度

4 结语

为提升足式机器人在非结构环境下的适应性,提出一种蜘蛛型六足机器人并进一步求解了动力学模型,同时采用多输入多输出的模糊控制网络进行轨迹跟踪控制,以减小外界干扰对足式机器人运动的影响。研究结果表明了该控制网络在六足机器人位置跟踪中的有效性,为六足机器人的功能仿生设计提供了参考依据。

(下转第 278 页)

- 学版),2024,43(12):111-117.
- [14] USAMAH N M, AHMAD MAZLAN A Z, RIPIN Z M. Investigation of motorcycle handle vibration attenuation using a suspended handlebar with different rubber mount characteristics[J]. The International Journal of Acoustics and Vibration,2022,27(3):276-284.
- [15] SEGLA S, ROY S. Simulation analysis of a motorcycle with passive, idealized semi-active and active suspension systems [C]// Advances in Mechanism Design III. Cham: Springer International Publishing, 2022:144-151.
- [16] BUI Q D, NGUYEN Q H. Development of a novel self-adaptive shear-mode magneto-rheological shock absorber for motorcycles [M]//Advances in Asian Mechanism and Machine Science. Cham: Springer International Publishing, 2021:744-754.
- [17] GONZÁLEZ A, OLAZAGOITIA J L, VINOLAS J, et al. An innovative energy harvesting shock absorber system for motorbikes [J]. ASME Transactions on Mechatronics,2022,27(5):3110-3120.
- [18] PODOSEK K, JAŚKIEWICZ M, ZUSKA A. Testing the relationship between the technical condition of motorcycle shock absorbers determined on the diagnostic line and their characteristics [J]. Open Engineering,2023,13(1):20220435.
- [19] JIMÉNEZ-CANOAS R, COLLAZOS-BURBANO D A, GARCÍA-MELO J I, et al. Experimental analysis of passenger comfort with variable preloaded rear springs on a low-cylinder motorcycle [J]. Sensors, 2023, 23(13):6204.
- [20] WU L J, REN W, BA K X, et al. Control algorithm design of motorcycle semi-active suspension system via frequency division[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2024,38(1):33-47.

收稿日期:2023-10-30

(上接第 247 页)

参考文献:

- [1] 周梦,郝同鑫,闰文彬,等. 六足仿生机器人结构设计及运动仿真[J]. 机电工程技术,2024,53(3):172-175,233.
- [2] 陈斯琴,李思瑶,鲁志刚,等. 六足机器人关键技术综述[J]. 机电工程技术,2022,51(11):146-152.
- [3] 张雨航,钱亚伟,鲁航. 六足全地形机器人结构设计[J]. 现代机械,2021(5):8-11.
- [4] 刘天成,卢振利,陈勇,等. 基于 CPG 的六足机器人运动控制方法研究综述[J]. 高技术通讯,2023,33(7):762-771.
- [5] 夏文强,王书涵,曾理湛,等. 面向林地环境的四足机器人自主定位方法[J]. 计算机工程与科学,2024,46(3):499-507.
- [6] 孔令超,钟城堡,王长恺. 基于 ADAMS 的六关节工业机器人模态仿真分析研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(2):182-187.
- [7] 张明路,王哲,李满宏,等. 基于足端位置的六足机器人漫游地形感知与表征[J]. 机械工程学报,2021,57(19):48-60.
- [8] 乔栋,姚涛,王玉龙,等. 六足机器人步态仿真与实验研究[J]. 机床与液压,2021,49(19):32-37.
- [9] 张亮,赵飞跃. 基于 STM32-PCA9685 的四足机器人控制系统设计[J]. 南方农机,2020,51(14):117-119.
- [10] 胡俊山,弥世青,张胜平,等. 航空复合材料结构分层损伤机器人自动钻铆修复技术与装备[J]. 航空制造技术,2024,67(20):44-57, 67, 11.
- [11] 叶敏捷,梁丹,李平,等. 仿尺蠖变径伸缩式管道机器人的设计与分析[J]. 机械制造,2024,62(10):25-30.
- [12] 王丹丹,郭铠宁,谭开拓. 机器人学课程对本科生专业技能与创新思维的影响[J]. 济源职业技术学院学报,2024,23(4):21-26.
- [13] 鄢智超,周勇,胡楷雄,等. 考虑可变旋转参数的机器人多轴孔装配强化学习策略[J]. 计算机集成制造系统,2025,31(3):815-827.
- [14] 刘宇,张磊,邵建根,等. 一种可伸缩旋臂的楼梯清洁机器人及其控制设计[J]. 现代制造工程,2025(3):60-68, 51.
- [15] 贾亮,赵小溪,叶长龙,等. 仿生六足机器人的运动分析及步态仿真[J]. 机械设计与制造,2024(7):351-355.
- [16] 黄仿元. 应用型本科院校机器人学导论课程教学改革方案研究[J]. 机器人技术与应用,2023(1):42-44.
- [17] 潘兵;陈炳伟. 基于项目驱动的机器人学课程教学研究[J]. 现代制造技术与装备,2023,59(2):213-215.
- [18] 王福杰,张佳宁,秦毅,等. 新工科建设下校企协同育人应用型教学模式探索——以机器人学课程为例[J]. 产业创新研究,2021(2):114-116.
- [19] 梁凯,韩西. 基于 IBWO-TEB 算法的移动机器人自主路径规划[J]. 制造技术与机床,2025(3):49-55.
- [20] 张艳军,杨一坤,肖子翔,等. 六足蚂蚁仿生机器人动力学仿真分析[J]. 机械设计与制造,2024(11):83-87,92.

收稿日期:2024-07-11