[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.004

单腿三维跳跃机器人动力学建模及控制

高美妍¹, 许 勇^{2*}, 郑佳乐², 李俊楠², 张晨阳², 施浩然², 刘凌霄²

(1. 上海工程技术大学 航空运输学院,上海 201620; 2. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620)

摘 要:在三维环境中实现连续、稳定和准确地跳跃是单腿跳跃机器人的研究难点,课题组设计了一种质心可准确抵达三维空间中目标位置点的单腿跳跃机器人。基于弹簧加载倒立摆(SLIP)动力学模型,实现了对机器人起跳速度的控制,使可控连续跳跃成为可能;基于反作用轮倒立摆(RWP)动力学模型和角动量守恒定律,实现了在3个惯性尾辅助下的三维姿态实时控制;集成 SLIP 模型,RWP 模型和课题组提出的落地后转向策略,设计了机器人质心可精确到达预期三维目标点的连续跳跃算法。仿真结果表明:该单腿跳跃机器人可实现在三维环境中的连续、稳定和准确跳跃,从而验证了课题组提出的三维跳跃动力学模型及其控制算法的可行性。

关键词:单腿机器人;三维动态跳跃;弹簧加载倒立摆模型;反作用轮倒立摆模型

中图分类号: TP242; TH122 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895 (2023) 05-0022-07

Dynamic Modeling and Control of Monopod 3D Jumping Robot

GAO Meiyan¹, XU Yong²*, ZHENG Jiale², LI Junnan², ZHANG Chenyang², SHI Haoran², LIU Lingxiao²

(1. School of Air Transport, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Continuous, stable and accurate jumping in three-dimensional (3D) environment is the research difficulty of monopod jumping robot. A monopod jumping robot with the center of mass that can accurately reach a target position point in 3D space was designed. Based on the spring loaded inverted pendulum (SLIP) dynamics model, the control of robot take-off speed was realized, making the controllable continuous bounce possible. Based on the reaction wheel pendulum (RWP) dynamics model and the law of conservation of angular momentum, the real-time 3D attitude control of robot with three inertial tails was realized. By integrating SLIP model, RWP model and the proposed post-landing steering strategy, a continuous jumping algorithm for the center of mass of robot to accurately reach the expected 3D target point was designed. The simulation results show that the monopod robot can achieve continuous, stable and accurate jumping in 3D environment, which verifies the feasibility of the proposed 3D jump dynamics model and its control algorithm.

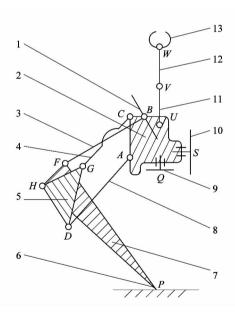
Keywords: one-legged robot; 3D dynamic jumping; SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) model; RWP (Reaction Wheel Pendulum) model

跳跃机器人可在非结构化环境中快速通过崎岖地 形、障碍,具有运动效率高、地形适应性好和灵活性佳 的优点^[1-2],有望被广泛应用于野外侦查、灾害救援、紧 急避险和星际探索等任务。但是,跳跃机器人的非线 性动力学方程复杂、数值求解难度大^[3],难以满足快速实时的运动控制要求;当前研究中的跳跃机器人多囿于平面跳跃^[4-7],难以实现三维空间内的稳定跳跃^[8-12]。针对上述问题,课题组将三维跳跃机器人的

腿机构等效为由集中质量躯干和无质量虚拟弹性腿构成的曲柄滑块机构,在常规单自由度跳跃腿机构上,配置了可实现空间三维转动自由度的俯仰惯性尾、偏航惯性尾和侧倾惯性尾,通过对腿机构的驱动电机及惯性尾扭矩的实时控制,实现了跳跃三维姿态的主动调节。

1 基于弹簧加载倒立摆(SLIP)模型的机器人腿机构动力学建模

课题组提出的三维跳跃单腿机器人机构如图 1 所示,机器人由 7 个伺服电机分别驱动腿机构中的大腿 3、上臂 11、下臂 12、机械夹爪 13、俯仰惯性尾 1、偏航惯性尾 9 和侧倾惯性尾 10 的转动。机器人足点 P 相对于躯干 2 的运动轨迹近似为一条直线,机器人腿机构为单自由度六杆机构,其驱动杆为大腿 3(BF),由安装于躯干 B 点处的串联弹性驱动器驱动,该驱动器转角记为 θ 。



1—安装于铰链 B 处的俯仰惯性尾;2—躯干 AQSUBC;3—大腿 BF;4—第 1 辅助连杆 CG;5—第 2 辅助连杆 DHG;6—机器人足尖点 P;7—小腿 FHP;8—第 3 辅助连杆 AD;9—安装于铰链 Q 处的偏航惯性尾;10—安装于铰链 S 处的侧倾惯性尾;11—机械臂上臂 UV;12—机械臂下臂 VW;13—安装于铰链 W 处的机械夹爪。

图 1 三维跳跃机器人机构简图

Figure 1 Mechanism schematic diagram of 3D jumping robot

已知机器人的当前位置、目标位置点和目标起跳速度,进行动力学建模,求解其腿部电机驱动扭矩 $\tau_{\rm M}$ 和 3 个惯性尾(1,9 和 10)电机的驱动扭矩,实现机器人落点位置和姿态可控的跳跃。

如图 2 所示, 机器人足部相对干躯干的运动轨迹 近似为直线,故腿机构可等效为曲柄滑块机构,等效腿 机构仅保留大腿和小腿;由于机械臂和机械腿相较于 安装了电机的躯干质量很小,所以课题组结合弹簧加 载倒立摆(spring loaded inverted pendulum, SLIP) 动力 学模型^[13-14] 和反作用轮倒立摆(reaction wheel pendulum,RWP)[15]模型将机器人抽象为如图 2(b)所 示的由无质量腿、无质量机械臂、质点和惯性尾组成的 倒立摆,该质点质量记为 m,位于质心 $R(x_R, y_R, z_R)$ 处。设质心要到达的目标位置点为 $\hat{R}(\hat{x}_R,\hat{y}_R,\hat{z}_R)$,目 标起跳速度为 $\hat{V}($ 文中所有目标值均用上标 * 表示)。 其中 O-xyz 是世界坐标系, R-x, y, z, 是位于机器人质心 R 处的动坐标系,2 者均为右手系。 ξ_x , ξ_y 和 ξ_z 分别是 侧倾、偏航和俯仰惯性尾绕自身转轴S,Q和B的旋转 角度;S,Q 和 B 的轴线依次平行于轴 x_c, y_c 和 $z_c \circ y_c$ 是 y_r 轴和通过 x_r 轴的铅垂面的夹角(侧倾角), y_r 是 x_r 轴 和铅垂面 O-xy 的夹角(偏航角), γ _a 是 x_r轴和水平面 O-xz 的夹角(俯仰角)。k 是扭簧刚度,该扭簧安装于 B点处,连接躯干2与大腿3。重力加速度是g。机械 臂中,上臂 11 绕铰链 U 的转角记为 φ_{U} ;下臂 12 绕铰 链 V 的转角记为 φ_V ;2 个末端夹爪 13 由安装于铰链 W处的伺服电机驱动同步对称动作,其转角记为 φ_v 。为 了便于表达令 $\varphi = [\varphi_U, \varphi_V, \varphi_W], \xi = [\xi_x, \xi_x, \xi_z], \gamma =$ $[\gamma_r, \gamma_v, \gamma_p]_{\circ}$

如图 3 所示,跳跃机器人的飞行轨迹为平面弹道轨迹,因此可以先研究平面 O-xy 内的动力学特性。因为机器人在飞行相不受外力的作用,只有 3 个惯性尾对其调姿,惯性尾对质心轨迹的微小影响可以忽略,因此机器人的目标起跳俯仰角 $\hat{\gamma}_p$ 和沿 PR 方向的目标起跳速度 \hat{V}_p 决定了其落点。

设从机器人足点 P 离地瞬时到落地瞬时的估计飞行时间为 \hat{t}_f ,机器人起跳时质心 R 的瞬时位置为 $R_0(x_{R_0},y_{R_0})$,机器人质心 R 的运动满足式(1)的自由 弹道方程^[16]:

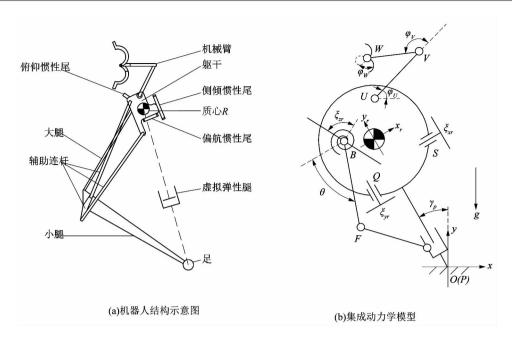


图 2 机器人结构示意图和集成动力学模型

Figure 2 Schematic diagram and integrated dynamic model of robot

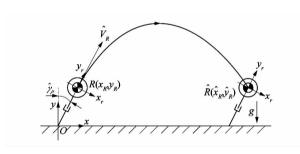


图 3 机器人飞行弹道轨迹

Figure 3 Robot flight trajectory

$$\hat{x}_{R} = x_{R_{0}} + \hat{V}_{R} \hat{t}_{f} \sin \hat{\gamma}_{p};$$

$$\hat{y}_{R} = y_{R_{0}} + \hat{V}_{R} \hat{t}_{f} \cos \hat{\gamma}_{p} - \frac{g \hat{t}_{f}^{2}}{2} \circ$$
(1)

由式(1)可得飞行时间 \hat{t}_f 和目标俯仰角 $\hat{\gamma}_p(x, \mathbf{m})$ 和水平面 O-xz 的目标夹角)。

$$\hat{t}_{\rm f} = \frac{\sqrt{2 \left[\hat{V}_R^2 - g(\hat{y}_R - y_{R_0}) + \sqrt{\hat{V}_R^4 - g^2(\hat{x}_R - x_{R_0})^2 - 2\hat{V}_R^2 g(\hat{y}_R - y_{R_0})} \right]}}{g};$$

$$\hat{\gamma}_p = \arcsin \frac{\hat{x}_R - x_{R_0}}{\hat{V}_R \hat{t}_{\rm f}}$$

$$(2)$$

要实现在三维空间 O-xyz 内的可控跳跃,需使机器人在落地时调整面向。如图 4 所示,在平面 O-xz 内,使其目标偏航角 $\hat{\gamma}_v(x_r$ 轴和铅垂面 O-xy 的目标夹

角)等于足点所在位置 $P(x_P, z_P)$ 与目标位置点 $\hat{R}(\hat{x}_R, \hat{y}_R, \hat{z}_R)$ 投影的连线与 x 轴的夹角。利用偏航惯性尾 9 调整该角度。

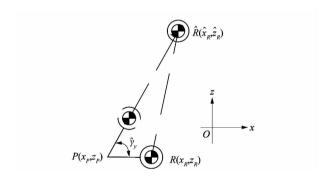


图 4 俯视平面 0-xz 内机器人落地后转向过程

Figure 4 Robot steering after landing in overlooking plane *O-xz*

目标偏航角 $\hat{\gamma}_{v}$ 为:

$$\hat{\gamma}_{y} = \arcsin \left(\frac{\hat{z}_{R} - z_{R}}{\sqrt{(\hat{x}_{R} - x_{p})^{2} + (\hat{z}_{R} - z_{p})^{2}}} \right)_{\circ}$$
 (3)

类似于动物或者人类跳跃时不会在冠状面左右摇摆一样,在本模型中不希望有侧向倾倒,因此设置目标侧倾角(y,轴和通过 x,轴的铅垂面的目标夹角) $\hat{\gamma}$,为0,利用侧倾惯性尾 10 调整该角度。

2 基于反作用轮倒立摆(RWP)模型的机器人

本模型通过俯仰惯性尾 1、偏航惯性尾 9 和侧倾惯性尾 10 的实时动作平衡机器人躯干 2 的角动量,从而控制机器人俯仰、偏航和侧倾运动的角度 γ 、角速度 $\dot{\gamma}$ 和角加速度 $\ddot{\gamma}$ 。记俯仰、侧倾和偏航惯性尾的驱动扭矩依次为 τ_{z_r} , τ_{x_r} 和 τ_{y_r} 。为了便于描述,首先在平面 O-xy 内建立模型,此时系统没有侧倾角 γ_{x_r} 和偏航角 γ_{y_r} ,根据文献[17]和[18],机器人惯性尾的 RWP 模型可以写成:

$$\tau = H\ddot{q} + C_{\circ} \tag{4}$$

式中: τ 是机器人俯仰惯性尾 1 的广义力向量, \ddot{q} 是机器人俯仰角和俯仰惯性尾转角的广义加速度向量,C 是由机器人受到的科氏力项、向心力项和重力项组成的向量,H 是机器人关节空间中的惯性矩阵。

其中:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 0 & \tau_{z_r} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix};$$

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\gamma}} & \ddot{\boldsymbol{\xi}}_{z_r} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} -mlg\sin \boldsymbol{\gamma}_{z_r} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

式中: $H_{11} = mlgT_{c}^{2}$,l 是机器人质心 R 到足点 P 的距离, T_{c} 是倾覆时间常数,表示机器人从平衡位置倾倒的自然时间; $H_{12} = H_{21} = H_{22} = -G_{v}H_{11}$, G_{v} 是机器人角速度增益,表示机器人质心的水平速度变化与正在使用的关节(或关节组合)速度变化的比率^[17],用来控制质心R 的位置。

 T_c 和 G_v 表达式如下:

$$T_{c} = \sqrt{\frac{ml^{2} + I_{b_{z}} + I_{p_{z}}}{mlg}};$$

$$G_{v} = -\frac{I_{p_{z}}}{ml^{2} + I_{b_{z}} + I_{p_{z}}} \circ$$
(6)

式中: I_{b_z} 和 I_{p_z} 依次是机器人躯干 2 和俯仰惯性尾 1 相对各自质心 R 和 B 绕 z 轴方向的转动惯量。

基于文献 [17] 的平面机器人平衡理论和文献 [18] 的 RWP 模型实验验证,选择 M,M,M 作为状态变量,这些状态变量是倾覆时间常数 T_c 、俯仰角 γ_p 、角速度增益 G_v 和俯仰惯性尾转角 ξ_x 等的复合变量,如式

(7)所示。

$$M = T_c^2 (\dot{\gamma}_p - G_v \dot{\xi}_{z_r}), \dot{M} = \gamma_p, \ddot{M} = \dot{\gamma}_p.$$
 (7)
机器人的俯仰惯性尾 1 的控制率可以写成:

$$\ddot{M} = k_{dd} \dot{M} + k_{d} \dot{M} + k_{m} M + k_{a} \dot{\xi}_{z,0} \tag{8}$$

式中: \ddot{M} 是 M 的三阶微分; $k_{\rm dd}$, $k_{\rm d}$, $k_{\rm m}$, $k_{\rm q}$ 是俯仰惯性尾 1 的 RWP 模型的极点增益系数^[20-21],可以通过闭环函数极点(令系统传递函数分母为零的根) λ_i (i=1,2,3,4)计算得出。

利用式(4)求得俯仰惯性尾电机驱动扭矩 τ_z 为:

$$\tau_{z_r} = H_{21} \ddot{M} + H_{22} \ddot{\xi}_{z_r};$$

$$\ddot{\xi}_{z_r} = (m l g \sin \dot{M} - H_{11} \ddot{M}) / H_{12} \circ$$

$$(9)$$

同理,将平面替换为 O-yz、O-xz,可以得出侧倾和偏航惯性尾电机的驱动扭矩 τ_x 和 τ_y :

$$\begin{split} \tau_{x_r} &= H_{21} \dddot{M} + H_{22} \ddot{\xi}_{x_r}, \\ \tau_{y_r} &= H_{21} \dddot{M} + H_{22} \ddot{\xi}_{y_r} \circ \end{split}$$

课题组使用 SolidWorks 对机器人进行三维建模后,导入到机器人仿真实验平台 Webots 中进行仿真实验,得到了机器人质心点 R 要到达的目标位置点 $\hat{R}(i=2,3,\cdots,6)$ 和目标起跳速度 $\hat{V}_R(i=1,2,\cdots,5)$,机器人进行了 5 个三维目标位置点的连续跳跃仿真。

机器人5次连续跳跃过程中的俯仰、偏航和侧倾 角的目标值 $\hat{\gamma}_{u}$, $\hat{\gamma}_{v}$, $\hat{\gamma}_{v}$ 和仿真值 γ_{u} , γ_{v} , γ_{v} 的变化如图 5 所示。由图 5(a) 可知,在仿真实验中,机器人在起跳 时的 γ_p 分别为 - 0. 266, - 0. 183, 0. 231, -0. 334 和 -0.095 rad,而由式(2)计算得出机器人起跳时的 $\hat{\gamma}_{s}$ 分 别为 - 0.241, - 0.205, -0.285, - 0.283 和 - 0.084 rad。因此,机器人起跳时的俯仰角误差 $e_{\gamma_0} = \gamma_p - \hat{\gamma}_p$, 分别为-0.025,0.022,0.054,-0.051 和-0.011,角 度误差较小,γ。的波动主要受到起跳冲击、落地冲击 和机械臂动作的影响。由图 5(b) 可知, 当 $0.0 s \le t \le$ 1.7 s 时, $\hat{\gamma}_{v} = 0$, $\gamma_{v} = \hat{\gamma}_{v}$ 基本相同; 当 t > 1.7 s 时,由 式(3)计算得 $\hat{\gamma}_p = \pi/2$,仿真得出在t = 2.2 s 时 γ_y 基 本达到 $\hat{\gamma}_v$ 。由图 5(c)可知,机器人在跳跃过程中的侧 倾角 γ , 基本围绕目标值 $\hat{\gamma}$, =0 上下波动,其中, γ , 在 8.0~10.0 s 的波动主要是受到机械臂动作导致的机 器人质心波动的影响。

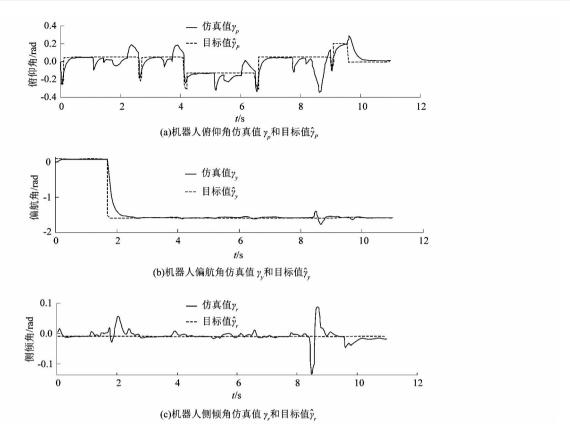


图 5 跳跃过程中俯仰、偏航和侧倾角目标值与仿真值随时间变化曲线

Figure 5 Variation curve of target and simulation values of pitch, yaw and roll angles with time during jumping

如图 6 所示, 为机器人跳跃过程中安装于 B 点处 的腿部电机驱动扭矩 τ_M 和驱动转角 θ 的变化曲线。 跳跃过程分解为 4 个步骤。①蹲伏: 当 $\theta \ge 67^{\circ}$ 时, 机器 人处于起跳前的蹲伏过程中。5次跳跃前的蹲伏过程 对应的时间段分别为 0.000~0.014 s, 2.206~2.216 s, $3.706 \sim 3.708 \text{ s}$, $6.006 \sim 6.014 \text{ s}$ 和 $8.406 \sim 8.414 \text{ s}$ ②起跳: θ 从 67°转到 2°时, 机器人将自己推离地面起 跳。5次跳跃的起跳过程对应时间段分别为0.014~ 0.366 s, 2.216 ~ 2.568 s, 3.708 ~ 4.060 s, 6.014 ~ 6.368 s 和 8.414~8.766 s。在起跳过程中,机器人所 需驱动转矩增大,电机转速减小。③飞行:当 $\theta \leq 2^\circ$ 时,机器人处于飞行过程中。5次跳跃的飞行过程对应 的持续时间分别为 0.366~2.204 s, 2.568~3.704 s, $4.060 \sim 6.004 \text{ s}$, $6.368 \sim 8.404 \text{ s}$ 和 $8.766 \sim 11.00 \text{ s}$ 。 ④落地:即 θ 从2°转到67°时。5次跳跃的落地过程对 应的持续时间分别为 2.204~2.206 s,3.704~3.706 s, 6.004~6.006 s 和 8.404~8.406 s_o

仿真结果表明:机器人实现了预期的跳跃动作,能

准确地按目标起跳速度跳跃至指定位置;可以利用俯仰、偏航和侧倾惯性尾实现机器人三维姿态的快速、准确和稳定控制;基于提出的动力学模型,实现了机器人遍历三维目标位置点的跳跃。

3 三维弹跳机器人样机设计

图 7 展示了高功率密度弹跳机器人的样机实物图,为了增加机器人与地面的接触面积,在其足尖点 P处安装可转动支架,并在足底贴了防滑胶带。

由于铝合金材质既可以满足强度要求,且密度较小,又可以使机器人满足质量小的设计要求,所以机器 人各杆件选择铝合金材质。

4 结语

课题组提出了基于 SLIP 和 RWP 模型的三维单腿 跳跃机器人动力学模型,将三维跳跃问题降维为具有 集中质量躯干和无质量弹性腿的模型的平面跳跃和落 地转向问题,实现了三维跳跃的解耦控制,从而降低了三维跳跃的实时控制难度。

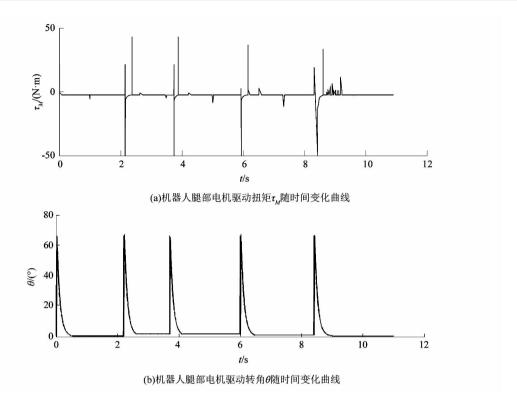


图 6 机器人腿部电机驱动扭矩和驱动转角随时间变化曲线

Figure 6 Variation curve of driving torque and driving angle of robot leg motor with time

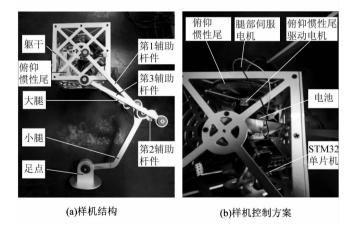


图 7 高功率密度弹跳机器人样机

Figure 7 Prototype of high power density jumping robot

通过控制腿机构驱动电机扭矩以及躯干上俯仰惯性尾、偏航惯性尾和侧倾惯性尾的驱动电机扭矩,实现了机器人从当前位置以目标速度跳跃至目标位置的可控三维跳跃,使三维跳跃机器人获得了一定的抓取、倚靠、空中栖息和远景观测能力,拓展了机器人的非结构环境适应能力,提升了操纵过程中的交互性。

参考文献:

- [1] GVIRSMAN O, KOSA G, AYALI A. Dynamics and stability of directional jumps in the desert locust [J]. Peer J, 2016, 4; e2481.
- [2] 刘磊,张岩.高性能变传动比的异形齿轮跳跃机构研究[J]. 机电工程,2021,38(9):1167-1173.
- [3] HYON S H, EMURA T, MITA T. Dynamics-based control of a one-legged hopping robot [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2003, 217(2):83 98.
- [4] ZHAO J G, XU J, GAO B T, et al. MSU jumper: a single-motor-actuated miniature steerable jumping robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3):602-614.
- [5] LIF, LIU W T, FU X, et al. Jumping like an insect; design and dynamic optimization of a jumping mini robot based on bio-mimetic inspiration [J]. Mechatronics, 2012, 22(2):167-176.
- [6] ZHANG Z Q, ZHAO J, CHEN H L, et al. A survey of bioinspired jumping robot: takeoff, air posture adjustment, and landing buffer [J]. Applied Bionics & Biomechanics, 2017, 2017;1-22.
- [7] 熊勇刚,陈鹏涛,王延炜,等. 基于 ADAMS 和 MATLAB 联合仿真的仿蚱蜢机器人腿部运动控制系统[J]. 机电工程技术,2023,52 (3):194-198.
- [8] RAIBERT M H, BROWN H B, CHEPPONIS M. Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine [J]. The International

Journal of Robotics Research, 1984, 3(2):75 - 92.

- [9] RAIBERT M H, WIMBERLY F C. Tabular control of balance in a dynamic legged system [J]. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, 1984, SMC – 14(2):334 – 339.
- [10] LEE S, GOSWAMI A. Reaction mass pendulum (RMP): an explicit model for centroidal angular momentum of humanoid robots [C]// Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma; IEEE, 2007; 4667 – 4672.
- [11] WOODWARD M A, SITTI M. MultiMo-Bat: a biologically inspired integrated jumping-gliding robot[J]. International Journal of Robotics Research, 2014, 33 (12):1511-1529.
- [12] 刘磊,张岩.高性能变传动比的异形齿轮跳跃机构研究[J]. 机电工程,2021,38(9):1167-1173.
- [13] 屈文天. 一种仿蝗虫跳跃机器人的研究[D]. 北京:北京工业大学,2015;16-19.
- [14] ZHAO J G, ZHAO T Y, XI N, et al. MSU tailbot: controlling aerial maneuver of a miniature-tailed jumping robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6):2903-2914.
- [15] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical

- jumping agility via series-elastic power modulation [J]. Science Robotics, 2016, 1(1); eaag2048.
- [16] 胡传俊,杨恢先. 弹道导弹被动段弹道方程与仿真[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(4):131-133.
- [17] FEATHERSTONE R. A simple model of balancing in the plane and a simple preview balance controller [J]. International Journal of Robotics Research, 2017, 36(13/14):1489-1507.
- [18] SPONG M W, CORKE P, LOZANO R. Nonlinear control of the reaction wheel pendulum [J]. Automatica, 2001, 37 (11): 1845 – 1851.
- [19] DRIESSEN J J M, GKIKAKIS A E, FEATHERSTONE R, et al. Experimental Demonstration of high-performance robotic balancing [C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal; IEEE, 2019;9459 – 9465.
- [20] BAEK J, JIN M, HAN S. A New Adaptive Sliding-Mode Control Scheme for Application to Robot Manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6):3628 3637.
- [21] CHEN Z S. PI and sliding mode control of a cuk converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8):3695 3703.

欢迎订阅2024年《中国特种设备安全》杂志

《中国特种设备安全》(原《中国锅炉压力容器安全》)是国家市场监督管理总局主管,中国特种设备检测研究院、中国特种设备检验协会和中国锅炉与锅炉水处理协会主办的国家级别科技期刊。创刊于1985年5月,是我国特种设备领域级别较高的优秀科技期刊,本刊论文目前已经被中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、中国核心期刊(遴选)数据库、超星期刊域出版平台等数据库确认收录。

《中国特种设备安全》刊号 CN 11-5345/TK, ISSN 1673-257X。月刊,大 16 开,每期定价 55.00 元,全年定价 660.00 元,邮发代号 82 -411,全国各地邮局均可订阅。

需要订阅 2024 年度《中国特种设备安全》杂志的读者,请及时到当地邮局订阅,也可直接向本刊发行部订阅。

户名:《中国特种设备安全》杂志社有限公司 纳税人识别号:91110105MA01U4AY4K

地址:北京市朝阳区和平街西苑 2 号 B 座 B506/B508

开户银行:交通银行股份有限公司北京和平里支行

银行帐号:110060224018800037260

联系人:沈建超 010 - 59068616 孙海祥 010 - 59068612

传 真:010-59068616或84279798

电子邮箱:zzs@csei.org.cn

网 址:http://www.csespub.cn

淘宝书店:《中国特种设备安全》杂志社有限公司



《中国特种设备安全》 公众号



淘宝书店二维码