doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.069

可适应复杂地形的轮足式机器腿运动控制研究

陈明方[1]　李　明[1]　陈南霆[2]　高汉东[1]　王　岩[1]　王俊智[1]
(1.昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500;2.西安交通大学电气工程学院,西安 710049)

摘要:农业机器人作业场地复杂多变,研究地形适应性优良的腿部结构是关键。目前大部分轮足机器人将行走轮安装在足端,本文提出一种轮足式机器腿结构,将行走轮安装在膝关节,设计轮足 2 种运动模式。针对机器人关节摩擦、机构误差等因素对足端力触地检测的影响,以及负载对机器人动力学模型干扰问题,通过建立机身到足端的简化动力学模型,将对足端力的观测转为对足端力变化率的观测,利用卡尔曼滤波算法结合在世界系下的步态相位、足端高度等参数实现足端触地检测;设计自主辨识负载质量算法实时更新动力学模型,降低模型误差对控制系统的影响。最后通过仿真、实物实验验证了腿部机构可行性、实用性,以及算法有效性、自适应性。

关键词:轮足式结构;触地检测;自适应负载检测;虚拟模型控制

中图分类号:TP242　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0789-09　　**OSID**:

Motion Control of Wheel-leg Hybrid Robotic Leg for Adaptive Locomotion in Complex Terrain

CHEN Mingfang[1]　LI Ming[1]　CHEN Nanting[2]　GAO Handong[1]　WANG Yan[1]　WANG Junzhi[1]
(1. *Faculty of Mechanical and Electrical Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *School of Electrical Engineering*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*)

Abstract: Due to the complex and highly variable operational environments of agricultural robots, the exploration and development of leg structures with superior terrain adaptability have consistently been a central and critical focal point of research. Currently, most wheeled robots feature walking wheels installed directly at the foot end. In contrast, this paper proposes a novel wheel-footed robot leg structure, where the walking wheel is strategically positioned at the knee joint, and two distinct movement modes for the wheel-footed robot are designed accordingly. In consideration of the significant impact of robot joint friction, mechanism errors, and other practical factors on the accurate detection of ground contact based on foot force, as well as the substantial interference of variable loads on the robot's dynamics model, the observation of foot force was innovatively transformed into monitoring the rate of change of foot force. This approach was achieved by developing a simplified yet effective dynamics model from the robot's body to the foot. Reliable foot contact detection was then accomplished by intelligently integrating gait phase and foot height above the ground using the Kalman filter algorithm. Furthermore, an independent load mass identification algorithm was designed to update the dynamic model in real-time, thereby reducing the influence of model errors on the control system performance. Finally, the feasibility and practicality of the proposed leg mechanism, as well as the effectiveness and strong adaptability of the algorithm, were comprehensively verified through both simulation and real-world experiments.

Key words: wheeled-legged structure; touchdown detection; adaptive load detection; virtual model control

0　引言

近年来,随着农业智能化发展[1],越来越多的机器人参与到农业生产中的播种、采摘、运输等环节[2],提高了生产效率、解决了人力短缺和环境保护等问题[3]。轮足机器人兼具足式、轮式 2 种运动

收稿日期:2024-05-20　修回日期:2024-07-11
基金项目:国家自然科学基金项目(52065035)
作者简介:陈明方(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事机器人控制理论研究,E-mail:mfchen_robot@126.com

模式,具有卓越的地形适应能力和良好的续航性能等优点[4],是地面移动机器人研究热点[5]。

近年来,为进一步提升轮足机器人运动续航能力,国内外学者从机构创新、运动控制等方面开展研究。文献[6]在 ANYmal 机器人足端添加动力轮,通过采用轮足复合式控制,提升了机器人速度、越障性能。Motiv Robotics 公司推出的四轮足机器人 RoboMantis 采用模块化结构,搭载机械臂、摄像头、激光雷达等设备,可实现各种地形的运动控制[7]。刘尚非等[8]通过将机器人腿部设计为并联连杆机构,以增强负载能力,足端采用滑轮机构优化续航能力。文献[9]推出了双轮足机器人 Ollie,腿部采用五连杆结构,可实现跳跃、空翻等高难度动作。上述轮足机器人机构设计从运动性能方面考虑,均采用足端添加滑轮方案,也是目前轮足机器人腿部结构的主流方案[10-11]。但这类机器人在足式运动时,离散落脚点的特点和复杂地形下地面高度不一的情况,会导致足端所受冲击载荷较大,容易造成足端滑轮磨损和滑轮内部电机破坏,增加开发和维护成本。

随着机器人工作环境日益复杂,足式机器人行走、跳跃等动作都需要与各种外部环境接触。为实现机器人合理的状态估计和精准的运动控制以及对复杂地形的适应能力,须具备可靠的触地检测能力。目前触地检测方法主要有:①基于外部传感器的直接检测[12-14]。②利用本体传感器间接检测。第 1 种方法主要是在足端添加力传感器,检测触地时刻足端传感器的碰撞、挤压信号。BigDog[15] 和 ATLAS[16] 由于机器人整体质量偏大,不易获得精准的动力学模型,故配置力传感器,但这种方式成本高、且传感器的寿命受限,因此大多使用第 2 种方法。例如 Cheetah 3[17]、Jueying[18]、ANYmalC[19]、RHex[20]、Minitaur[21] 等中小型机器人,均采用足端力估计的间接检测方法。该方法先构建机器人状态估计、动力学模型,求出足端所受合外力数据来进行触地判断。NEUNERT 等[22]通过对机器人动力学设定阈值判断,得到优化机器人运动状态。BLEDT 等[23]构建出一种概率融合模型的框架,提高了机器人在动态动力学建模过程中的稳定性。刘忠振等[24]提出一种基于集中质量矩阵法的动力学建模方法,降低了机器人建模难度,并提高了控制精度。WANG 等[25]提出通过测量加速度来表达机器人本体的动力学,以解决机器人触地位置不稳定的问题。BLOESCH 等[26]提出利用拓展卡尔曼滤波融合足端力信息,得到拟合接触概率,提高精度和稳定性。BLOESCH 等[27]采用无迹卡尔曼滤波器,提升了状态估计稳定性和精确度。HARTLEY 等[28]在双足机器人中采用不变扩展卡尔曼滤波器,对机器人状态估计、触地检测进行优化。上述研究未能解决机器人关节摩擦、机械误差等情况对足端力的影响,动态动力学模型实时更新存在不足。

针对目前大部分轮腿式机器人将滑轮安装在足端存在的问题,本文提出一种轮足式机械腿结构,将滑轮安装在腿部膝关节处,设定轮、足两种运动模式,建立运动学、动力学模型,采用虚拟模型控制方法(Virtual model control, VMC),对摆动相进行多项式轨迹规划,设计一种触地检测算法,通过观测足端力变化率,利用卡尔曼滤波算法结合步态相位、足端离地高度等参数得到拟合触地概率,设计自主辨识负载质量算法,实时更新动力学模型,以降低模型误差对控制系统的影响,最后进行仿真、实物实验。

1 轮足机构工作原理

设计的轮足式机器人腿部结构如图 1 所示。大部分轮腿式机器人需在足端行走轮处也添加电机,导致机器人质量、整机成本增加。而本文采用将行走轮安装在膝关节处的方案,通过轮足切换装置实现两个电机控制 3 个运动模块,兼顾轻量化和精准性。其运动控制流程如图 2 所示。

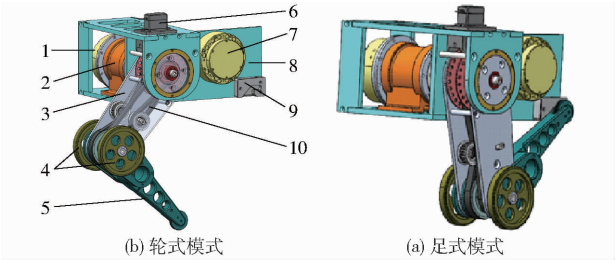

图 1 轮足腿设计结构

Fig. 1 Design structure of wheeled-legged leg

1. 小腿关节 + 轮电机 2. 动力分流机构 3. 大腿内侧壁 4. 行走轮 5. 小腿机构 6. 舵机互锁装置 7. 大腿关节电机 8. 机身板 9. 限位滑槽 10. 同步带

由于本文不涉及机器视觉的地形感知,地形崎岖、平整为通过人为判断,施加轮足切换指令。舵机互锁装置原理是通过舵机转动带动限位杆移动,实现小腿、行走轮之间的机械互锁。

2 机器腿模型

2.1 运动学模型

运动学模型是运动控制基础,采用 D-H 法对机器腿进行分析,腿部简图如图 3 所示。每条机器腿有 3 个自由度,包括 1 个滑轮自由度和 2 个足式俯仰自由度。

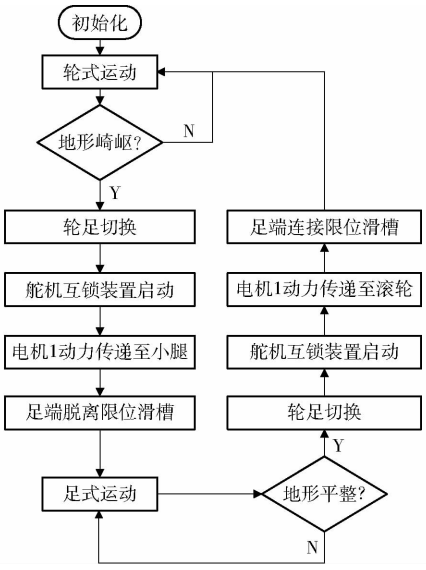

图 2　运动控制流程图

Fig. 2　Motion control flowchart

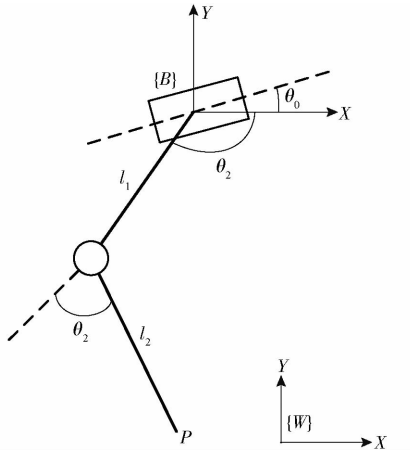

图 3　腿部简图

Fig. 3　Schematic of leg

在髋关节点 O 建立坐标系，可得机身到足端运动学方程为

$$^{B}\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} l_1c_1+l_2c_{1+2} \\ l_1s_1+l_2s_{1+2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中　$^{B}\boldsymbol{P}$——髋关节坐标系下足端位置

l_1、l_2——大腿、小腿长度

c_1 表示 $\cos\theta_1$、s_{1+2}表示 $\sin(\theta_1+\theta_2)$，下同。

其雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} -(l_1s_1+l_2s_{1+2}) & -l_2s_{1+2} \\ l_1c_1+l_2c_{1+2} & l_2c_{1+2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

足端在世界系下位置矢量 $^{W}\boldsymbol{P}=[\,^{W}P_x \quad ^{W}P_y\,]^{\mathrm{T}}$ 可表示为

$$^{W}\boldsymbol{P}=\,^{W}\boldsymbol{P}_{com}+\,^{W}\boldsymbol{R}_{B}\,^{B}\boldsymbol{P} \tag{3}$$

式中　$^{W}\boldsymbol{P}_{com}$——在世界系下机体中心位置

$^{W}\boldsymbol{R}_{B}$——髋关节到世界系旋转矩阵

四足机器人中 $^{W}\boldsymbol{P}_{com}$ 求解涉及里程计设计和推导，在此不做详述，本文研究对象是机器腿，在摆动相中需要将机体中心固定在某一点，因此 $^{W}\boldsymbol{P}_{com}$ 位置矢量固定且可直接测出，由图 3 可知，髋关节系 $\{B\}$ 和世界系 $\{W\}$ 坐标原点不同，方向一致，因此 $^{W}\boldsymbol{R}_{B}$ 为单位矩阵。

2.2　动力学建模

动力学建模是实现机器人精准控制的关键。本文作出如下假设：①机器人各部件均为刚体，质量分布均匀。②任一时刻系统均达到稳定状态。

采用拉格朗日法建立动力学模型，即

$$\tau=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial L}{\partial\dot{q}}-\frac{\partial L}{\partial q} \tag{4}$$

参照文献[29]关节动能和势能计算方法，每个关节处动能 E_{ki}、势能 E_{pi} 计算式为

$$E_{ki}=\int_0^{l_i}\frac{m_i}{2l_i}\left(\frac{v_{i+1}-v_i}{l_i}x+v_i\right)^2\mathrm{d}x=\frac{m_i}{6}(v_{i+1}^2+v_i^2+v_{i+1}v_i) \tag{5}$$

$$E_{pi}=m_ig\frac{y_i+y_{i+1}}{2} \tag{6}$$

式中　m_i——各杆件质量

l_i——杆件长度

g——重力加速度，取 9.81 m/s^2

v_i——各杆件质心速度

y_i——各杆件质心处高度

得到拉格朗日函数为

$$L=\sum_{i=1}^{n}E_{ki}-\sum_{i=1}^{n}E_{pi} \tag{7}$$

最终求解后动力学方程为

$$\begin{bmatrix}\tau_0\\ \tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_{3\times3}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_0\\ \ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix}+\boldsymbol{V}_{3\times6}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_0^2\\ \dot{\theta}_1^2\\ \dot{\theta}_2^2\\ \dot{\theta}_0\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_0\dot{\theta}_2\\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\end{bmatrix}+\boldsymbol{G}_{3\times1} \tag{8}$$

式中　τ_0——作用机身处力矩

τ_1——作用髋关节处力矩

τ_2——作用膝关节处力矩

$\boldsymbol{M}_{3\times3}$——惯性矩阵

$\boldsymbol{V}_{3\times6}$——科式力和离心力矩阵

$\boldsymbol{G}_{3\times1}$——重力矩阵

具体数值为

$$
\begin{cases}
M_{11}=m_0l_3^2/3+m_1(l_3^2+l_1l_3c_1+l_1^2/3)+\\
\quad m_2(l_3^2+l_1^2+l_2^2/3+2l_1l_3c_1+l_3l_2c_{12}+l_1l_2c_2)\\
M_{12}=M_{21}=m_1(3l_1l_3c_1+2l_1^2)/6+\\
\quad m_2(l_1^2+l_2^2/3+l_1l_3c_1+l_3l_2c_{12}/2+l_1l_2c_2)\\
M_{13}=M_{31}=m_2(3l_2l_3c_{12}+3l_2l_1c_1+2l_2^2)/6\\
M_{22}=m_1l_1^2+m_2(l_1^2+l_2^2/3+l_2l_1c_2)\\
M_{23}=M_{32}=m_2(2l_2^2+3l_2l_1c_2)/6\\
M_{33}=m_2l_2^2/3\\
V_{12}=-m_2(3l_1l_3s_1+l_2l_3s_{12})/2\\
V_{13}=-m_2(l_1l_2s_2+l_2l_3s_{12})/2\\
V_{14}=-m_1l_1l_3s_1-m_2(2l_1l_3s_1+l_2l_3s_{12})\\
V_{15}=V_{16}=-m_2(l_1l_2s_2+l_2l_3s_{12})\\
V_{21}=m_1l_1l_3s_1/2+m_2(2l_1l_3s_1+l_2l_3s_{12})/2\\
V_{23}=V_{34}/2=-m_2l_1l_2s_2/2\\
V_{25}=m_1l_2l_3s_{12}/2-m_2(2l_1l_2s_2+l_2l_3s_{12})/2\\
V_{32}=V_{26}/2=m_2l_1l_2s_2/2\\
V_{31}=m_2(l_1l_2s_2+l_3l_2s_{12})/2\\
V_{11}=V_{22}=V_{24}=V_{33}=V_{35}=V_{36}=0\\
G_0=[m_0gl_0c_0+m_1g(2l_0c_0+l_1c_{01})+\\
\quad m_2g(2l_0c_0+2l_1c_{01}+l_2c_{012})]/2\\
G_1=[m_1gl_1c_{01}+m_2g(2l_1c_{01}+l_2c_{012})]/2\\
G_3=m_2gl_2c_{012}/2
\end{cases}
\tag{9}
$$

根据上述动力学方程,机器腿足端所受外力方程为

$$
F=\boldsymbol{J}^{-\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\ddot{\theta}+\boldsymbol{V}\dot{\theta}+\boldsymbol{G}-\boldsymbol{\tau}) \tag{10}
$$

受摩擦、机身质量分布和关节速度等情况影响,足端所受外力在摆动相不为 0。但所受外力的变化速度在摆动相时连续变化且不大;当足端着地或碰到障碍时,所受外力变化速度会发生突变且较大。因此,可通过观测足端外力变化速度,预估机器人触地状态。

3 虚拟模型控制

机器腿控制方法可分为支撑相控制和摆动相控制。支撑相以 VMC 模型为底层框架,建立弹簧阻尼模型进行运动控制;摆动相轨迹规划采用多项式方法。

3.1 支撑相控制

VMC 作为一种直觉控制方法,其核心思想是用设定的虚拟构件(如弹簧、阻尼等)去等效髋关节到足端腿部结构,通过控制虚拟弹簧、阻尼,得到整体系统所需的虚拟力,通过雅可比矩阵将其转换为腿部各关节所需的力矩。VMC 控制原理如图 4 所示。

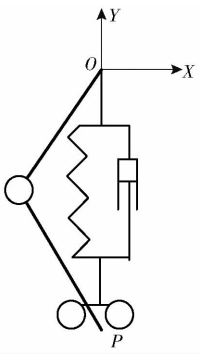

图 4 VMC 控制原理图

Fig. 4 VMC control schematic

其转换关系式为

$$
\begin{cases}
\tau_d=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}F_u\\
F_u=k_u(u_d-u)+c_u(\dot{u}_d-\dot{u})
\end{cases}
\tag{11}
$$

式中 τ_d——期望关节力矩 F_u——虚拟力

k_u——系统弹簧刚度

c_u——系统阻尼系数

u——相应坐标下位置

$\dot{u}$——相应坐标下速度

下标 d 表示期望值。

3.2 摆动相控制

摆动相仍以 VMC 模型为基础,轨迹规划采用多项式。摆动相足端 x 方向目标位置点参照 RAIBERT[30] 的思路,x 方向期望位置点为

$$
x_f=\frac{xT_s}{2}+k_v(\dot{x}_d-\dot{x}) \tag{12}
$$

式中 x_f——x 方向期望位置点

T_s——摆动相周期

k_v——速度比例系数

为降低运动过程足端遭受的冲击,设摆动相开始和结束时刻速度、加速度均为 0。为保证机器人越障能力,设摆动相周期中点时抬腿高度为 h_s,摆动曲线为

$$
\begin{cases}
x_{des}=a_xt^5+b_xt^4+c_xt^3+d_xt^2+e_xt+f_x\\
y_{des}=a_yt^6+b_yt^5+c_yt^4+d_yt^3+e_yt^2+f_yt+g_y
\end{cases}
\tag{13}
$$

根据上述约束条件,可求解得

$$
\begin{cases}
a_x=\dfrac{6(x_f-x_0)}{T_s^5} \quad b_x=\dfrac{-15(x_f-x_0)}{T_s^4} \quad c_x=\dfrac{10(x_f-x_0)}{T_s^3}\\
d_x=0 \quad e_x=0 \quad f_x=x_0\\
a_y=\dfrac{-32(2y_h-y_0-y_f)}{T_s^6} \quad b_y=\dfrac{6(32y_h-17y_0-15y_f)}{T_s^5}\\
c_y=\dfrac{-3(64y_h-37y_0-27y_f)}{T_s^4} \quad d_y=\dfrac{2(32y_h-21y_0-11y_f)}{T_s^3}\\
e_y=0 \quad f_y=0 \quad g_y=y_0
\end{cases}
\tag{14}
$$

其中　　$$y_h = y_0 + h_s \tag{15}$$

式中　x_0、y_0——足端在摆动相开始时 x、y 方向位置

y_f——y 方向期望位置点

y_h——足端在摆动相中点时 y 方向位置

4　触地检测

状态估计是运动控制的基础，根据对机器腿是否触地的判断进行相应的运动控制。本文触地检测不依赖多余环境感知设备，如激光雷达、深度相机、足端传感器情况下，通过动力学建模和卡尔曼滤波算法对机器腿触地状态进行估计。

尽管在运动过程中摆动腿足端会出现提前触地或延迟触地情况，但总体上符合摆动规律。因此，触地检测模块以步态规划的触地概率为基础，再融合所受外力变化速度、在世界系下足端高度${}^{W}P_v$为判据的触地概率，最终得到综合概率，通过阈值判断足端是否触地。根据步态相位预估的足端触地概率 $P(\phi)$ 为

$$P(\phi) = \begin{cases} \dfrac{1}{2}\left(\operatorname{erf}\left(\dfrac{\phi - 0}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right) + \operatorname{erf}\left(\dfrac{\phi_{switch} - 0}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right)\right) & (c_\phi = 1) \\ 1 + \dfrac{1}{2}\left(\operatorname{erf}\left(\dfrac{\phi_{switch} - \phi}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right) + \operatorname{erf}\left(\dfrac{\phi - 1}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right)\right) & (c_\phi = 0) \end{cases} \tag{16}$$

其中　　$$c_\phi = \begin{cases} 0 & (\text{摆动相}) \\ 1 & (\text{支撑相}) \end{cases} \tag{17}$$

式中　ϕ——步态相位，[0,0.5)为支撑相，[0.5,1)为摆动相

ϕ_{switch}——机器腿从支撑相变为摆动相时的相位值，取 0.5

σ_ϕ——步态相位方差

根据动力学建模可知，足端所受外力变化速度一般为均匀变化且数值不大，当足端在摆动相触地时，所受外力变化速度会发生较大突变。因此，假设运动过程中足端所受外力变化速度是一个随机变量 $\dot{F}$，且服从均值为 $\mu_{\dot{F}}$，方差为 $\sigma_{\dot{F}}$ 的高斯分布。则足端外力速率预估的足端触地概率 $P(\dot{F})$ 为

$$P(\dot{F}) = \frac{1}{2}\left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\dot{F} - \mu_{\dot{F}}}{\sqrt{2}\sigma_{\dot{F}}}\right)\right) \tag{18}$$

假设当四足机器人足端与地面接触时，在世界系下足端高度${}^{W}P_v$为随机变量，且服从均值为 μ_{Py}，方差为 σ_{Py}的高斯分布。平面地形中均值 μ_{Py}为 0，则在世界系下足端高度${}^{W}P_v$足端触地概率函数 $P({}^{W}P_v)$为

$$P({}^{W}P_y) = \frac{1}{2}\left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\mu_{Py} - {}^{W}P_y}{\sqrt{2}\sigma_{Py}}\right)\right) \tag{19}$$

得到上述 3 种触地概率后，利用线性卡尔曼滤波进行融合，拟合方程为

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k \\ \boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \end{cases} \tag{20}$$

其中　　$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_k = \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}) \\ \boldsymbol{P}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_{k|k-1} \\ K_k = \dfrac{\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}} \end{cases} \tag{21}$$

式中　$\boldsymbol{Q}$——过程噪声协方差矩阵

$\boldsymbol{R}$——观测噪声协方差矩阵

$\boldsymbol{P}_k$——先验估计协方差矩阵

$\boldsymbol{P}_{k|k-1}$——后验估计协方差矩阵

$\boldsymbol{K}_k$——卡尔曼滤波增益

$\boldsymbol{A}$——状态矩阵

$\boldsymbol{B}$——输入矩阵

$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

5　负载检测

轮足机器人因优异的越障和续航能力，是复杂地形下运输货物的首选，而机器人对负载缺乏先验信息，当负载质量过大时，将会对机器人动力学模型产生较大误差，从而影响机器人运动控制，但每次都通过设备对负载进行参数辨识，将消耗时间、人力成本，实际应用中并不现实。

因此，设计算法自主辨识负载质量，须更新机器人动力学模型参数。利用机器人基本传感器信息进行预估，得到添加负载前后电机转矩变化，反推出足端虚拟力在重力方向的变化值 f_y 为

$$f_y = \boldsymbol{J}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau} \tag{22}$$

根据虚功定理，可求出负载质量为

$$m_{load} = \sum_{i=1}^{4} \frac{f_{yi,2} - f_{yi,1}}{g} \tag{23}$$

式中　m_{load}——负载质量

$f_{yi,1}$——添加负载前第 i 条腿所受的足端虚拟力

$f_{yi,2}$——添加负载后第 i 条腿所受的足端虚拟力

添加负载后让机器人继续保持静止，其速度、加速度均为 0，根据欧拉定理可得机器人质心处合力矩为 0，即

$$\boldsymbol{\Gamma}_{com} = \sum_{i=1}^{4} f_{yi}\boldsymbol{w}_{rcom,i} = \sum_{i=1}^{4} f_{yi}({}^{w}\boldsymbol{p}_i - {}^{w}\boldsymbol{p}_{com}) = 0 \tag{24}$$

式中　$\boldsymbol{w}_{rcom,i}$——世界系下第 i 条腿足端与添加负载后质心距离矢量

${}^{w}\boldsymbol{p}_i$——世界系下第 i 条腿足端位置矢量

通过求解式(22)可求出添加负载前后机器人质心位置变化值,修正动力学模型中刚体质量和转动惯量等参数。

6 实验

6.1 仿真实验

使用 webots 软件对机器人和上述算法进行测试,轮足机器人模型如图 5 所示,其主要参数如表 1 所示。仿真过程中控制参数如表 2 所示。

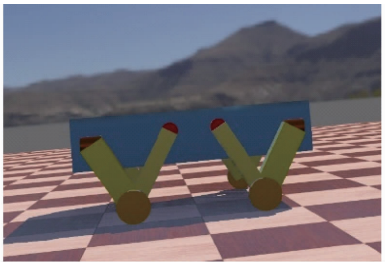

图 5 机器人仿真结果

Fig. 5 Robot simulation diagram

表 1 机器人结构参数

Tab. 1 Structural parameters of robot

参数	数值
整机质量/kg	20
机身长度/(mm × mm × mm)	40 × 50 × 60
大腿长度/mm	38
小腿长度/mm	28
每条腿自由度	2

表 2 机器人运动控制参数

Tab. 2 Control parameters of robot motion

参数	数值
T_s/s	0.25
h_s/mm	10
$\dot{x}_d$/(m·s^{-1})	0.3
y_d/mm	36
k_g	0.15

6.1.1 触地检测验证

设定轮足机器人以足式状态开始运动,采用 tort 步态进行仿真,得到机器人足端所受合外力变化率曲线如图 6 所示。

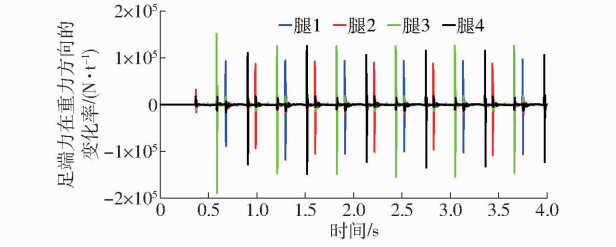

图 6 足端力变化率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of foot force change rate

由图 6 可知,该轮足机器人在运动过程中 4 条腿足端所受合外力在重力方向的变化率,在触地时刻会有较大突变,可达到 ±(0.8 ~ 1.5) × 10^5 N/t。经过调试分析,设置足端外力变化率预估的足端触地概率函数均值 μ_{Py} 为 5 × 10^4 N/t、方差 σ_{Py} 为 10^4 N^2/t^2。随后,与步态相位预估的足端触地概率、根据在世界系下足端高度预估的足端触地概率相结合,采用卡尔曼滤波方程进行拟合,得到触地检测概率如图 7 所示。

将算法检测概率和仿真中添加的足端传感器相比较,传感器数据 1 表示足端触地、0 表示足端腾空。由图 7 可知,在腿部摆动相开始时,初始触地概率为 0.167;随着步态相位变化和抬腿高度提升,接触概率逐渐变小,在摆动腿足端移动到最高点时达到最小值 0;随后,在摆动相后期概率又逐渐增大,当合外力变化率产生突变时,足端触地概率也突变到 0.95 以上,因此设置触地概率阈值为 0.8,当触地概率大于 0.8 时,认为足端触地,将运动状态由摆动相切换为支撑相。每次算法概率突变时间与传感器时间都很接近,变化时间差不超过 8 × 10^{-3} s。通过放大卡尔曼滤波中过程噪声并降低观测噪声,使

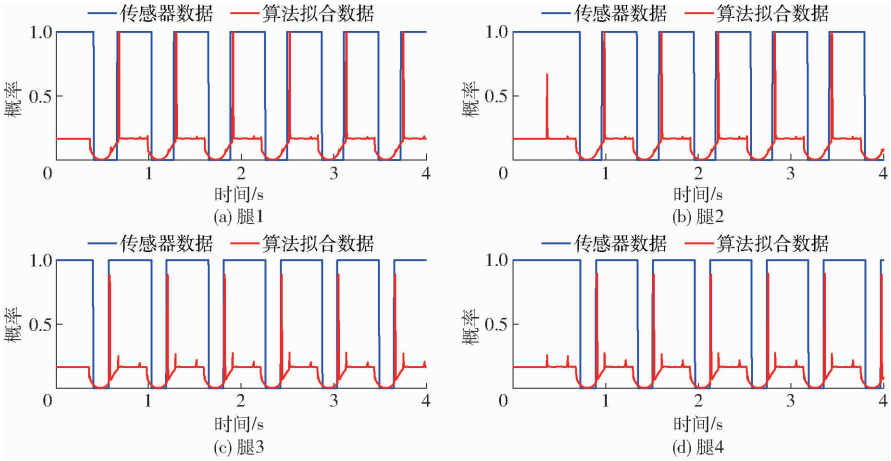

图 7 触地检测概率仿真结果

Fig. 7 Simulation results of touchdown detection probability

最终拟合结果更倾向于观测值，由此可见基于动力学模型触地检测算法具有可行性。

使用触地检测算法进行触地判断，机器人足式模式下运动过程如图 8、9 所示。图 8a 为在平坦地形下，机器人前进速度和期望速度（0.3 m/s）变化值；图 8b 为机身质心高度和期望高度（0.34 m）的变化值。图 9 为运动过程中，机器人横滚角、俯仰角、偏航角变化幅度。其中俯仰角变化波动较大，最大值为 0.06 rad；横滚角、偏航角变化较小，均在 −0.02 ~ 0.02 rad 之间。结果表明该触地检测算法可实现轮足机器人正常行走。

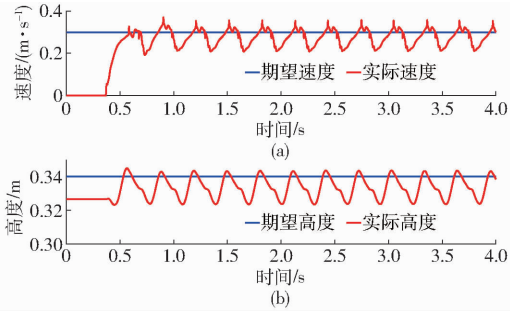

图 8　运动过程速度和高度曲线

Fig. 8　Velocity and height curves of motion process

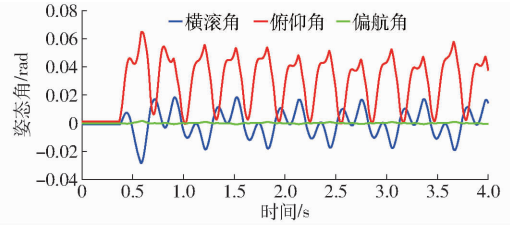

图 9　运动过程姿态角变化

Fig. 9　Attitude angle variation during motion

6.1.2　负载检测测试

当轮足机器人处于静止站立状态时，负载设置为 10 kg，占机身质量 50%，仿真效果如图 10 所示。

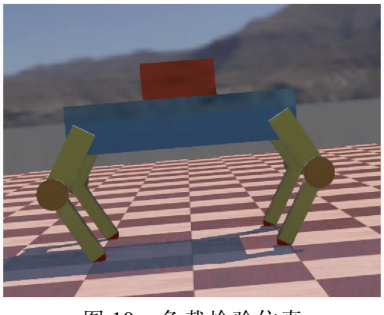

图 10　负载检验仿真

Fig. 10　Load test simulation

添加负载前后参数如表 3 所示。根据式（23）可反推出负载质量为 10.255 kg，误差为 2.55%，负载检测精度较高，表明了方法可行性和准确性。通过求解式（22）得到添加负载后质心位置高度为 28.5 mm，相对误差为 8.8%，出现偏差的原因：①忽略了腿部重力对机体质心产生的力矩作用。②腿部关节运动的摩擦力也会对合力矩产生一定影响。

表 3　仿真负载检测参数

Tab. 3　Simulation load detection parameters

参数		添加负载前	添加负载后
质心位置高度/mm		33.40	31.25
膝关节力矩/(N·m)	腿 1	5.326	7.237 7
	腿 2	5.324	7.128 5
	腿 3	5.189	7.028 1
	腿 4	5.228	7.094 0
足端虚拟力/N	腿 1	34.902	59.691 8
	腿 2	34.894	59.992 2
	腿 3	34.172	59.975 5
	腿 4	34.445	59.358 5

6.2　实物实验

搭建的单腿样机模型如图 11 所示，测量得到，大腿、小腿质量分别为 2、1 kg；大腿、小腿长度分别为 38、28 mm。

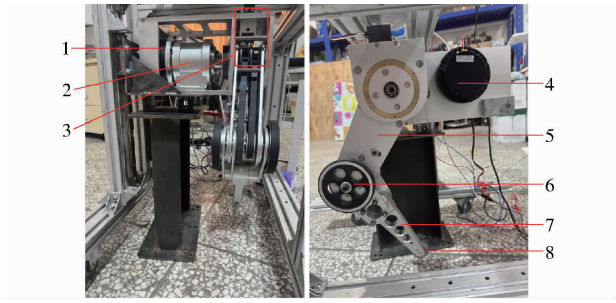

图 11　单腿实物结构

Fig. 11　Single leg physical structure

1. 小腿关节 + 轮电机　2. 动力分流机构　3. 动力切换机构　4. 大腿关节电机　5. 大腿机构　6. 行走轮　7. 小腿机构　8. 足端

设计的单腿固定机构可辅助单腿结构完成升降，跟随腿部进行前后移动等，拥有水平与竖直方向 2 个自由度，结构如图 12 所示。

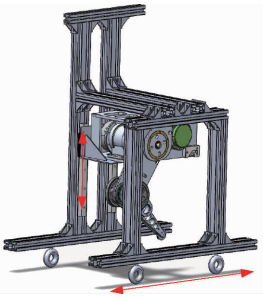

图 12　单腿固定机构

Fig. 12　Fixation mechanism of single leg

6.2.1　摆动相实验

先将机器腿设定为足式状态，设定预期步长为 0.15 m，预期抬腿高度为 0.11 m。将靶球座固定在腿部足端附近上，使用激光跟踪仪采集足端轨迹数据集，实验实物如图 13 所示，以不同切换速度共采集 3 组数据，机器腿摆动相过程如图 14 所示。

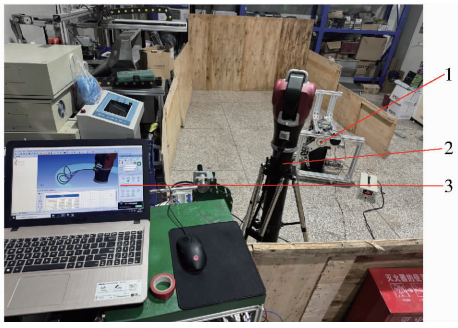

图 13 实验实物

Fig. 13 Actual experiment diagram

1. 轮足腿结构 2. 激光跟踪仪 3. 便携式计算机

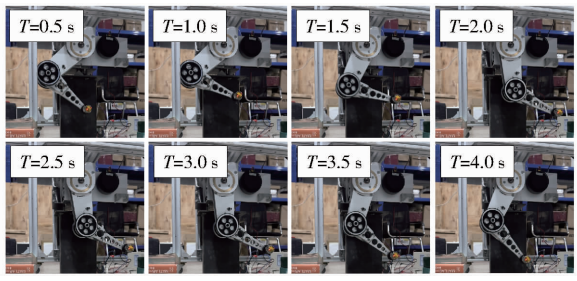

图 14 机器腿摆动过程图

Fig. 14 Process diagram of machine leg swing

摆动腿足端轨迹曲线如图 15 所示，从起始点（0，-0.36 m）顺时针旋转为运动方向，每个周期均测量 3 次摆动周期，其中 3 组数据中最大偏差为 4 mm，远小于机器人足端零部件半径 18 mm，因此重复定位误差在合理范围内，表明本机构有较好的稳定性。实际轨迹与理论轨迹有一定偏差，产生该误差的原因为机构加工、装配误差，大小腿转动存在间隙，缺乏控制精度，同时算法中的弹簧刚度与阻尼系数并不是最优值，没有达到最优控制效果。

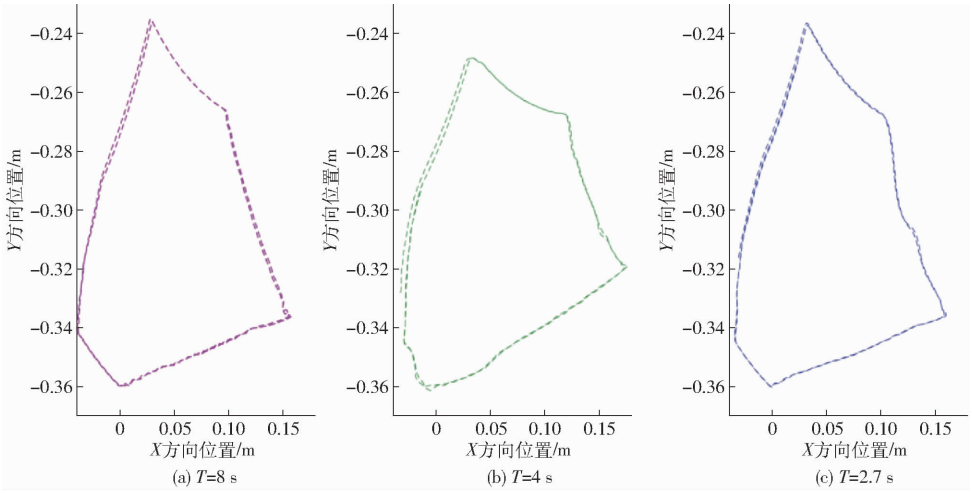

图 15 摆动腿足端轨迹曲线

Fig. 15 Swing leg foot trajectory curves

6.2.2 触地检测验证

设定机器腿摆动周期为 4 s，控制频率为 20 Hz，运动 3 个周期，机器腿足端力变化率和触地检测概率如图 16 所示。在支撑相和摆动相初期，足端所受合外力变化率较为稳定，均在 100 ~ 200 N/t 内，足端触地时刻突变到 600 N/t 左右，设置足端外力变化率预估的足端触地概率函数均值 μ_{P_y} 为 300 N/t、方差 σ_{P_y} 为 50 N^2/t^2，采用卡尔曼滤波方程进行拟合，最终得到总体概率，取置触地概率阈值为 0.8。

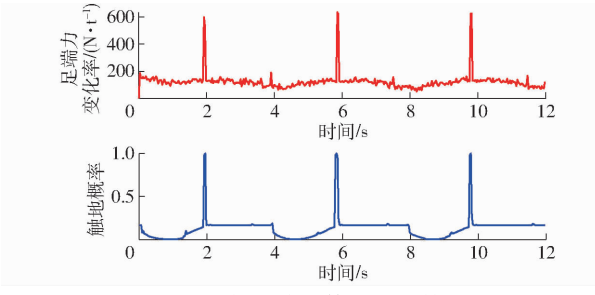

图 16 触地检测算法实验结果

Fig. 16 Touchdown detection experimental results

6.2.3 自适应负载实验

采用 MIT 开源 HT-04 电机，扭矩常数 K_t 为 3.5 (N·m)/A，电机到控制部位传动减速比较低（小于 0.1），电机 1 到小腿传动比为 4.152，电机 2 到大腿传动比为 2.417。利用电机电流 I 近似计算输出转矩 T，计算式为

$$T = K_t I \tag{25}$$

设负载为 2 kg，添加负载前后机器腿参数变化如表 4 所示。

计算出负载质量为 1.87 kg，误差为 6.48%，排除电流采集传感器的噪声、机械误差等影响，本文方法在自适应负载检测方面效果较好。求解得到添加负载后质心位置高度为 29.5 mm，与髋关节位置相对误差为 12.2%，但髋关节并不是准确的质心位置，总体上讲符合变化规律，通过分析机体质心位置变化值，能较准确地确定负载在机体上的位置，有助

表 4　实物负载检测参数

Tab.4　Physical load detection parameters

参数	添加负载前	添加负载后
髋关节高度/mm	34.2	33.6
电机 1 电流/A	1.538	1.984
电机 2 电流/A	1.929	1.929
膝关节力矩/(N·m)	5.383	9.323 6
髋关节力矩/(N·m)	6.751 5	6.752 3
足端力/N	20.007 1	38.712 0

于修正动力学模型，提高运动控制精度。

7　结束语

设计了一种轮足式机器腿结构，采用轮足切换的方案，提升续航能力的同时降低成本，并研究其运动控制算法，为减少关节摩擦、机构误差等因素对足端力的影响，得到关节摩擦等因素引起的动力学模型合外力连续且不规律，在足端触地时刻会产生突变。因此，没有采用传统的足端力观测和补偿抵消摩擦力等方法，而是观测足端力变化率，同时利用卡尔曼滤波器融合步态相位和在世界系下足端高度等参数去代替足端传感器进行触地检测，针对负载对机器人动力学模型的干扰，利用添加负载前后关节电机电流、力矩变化值预估负载质量，质心高度变化，并实时更新动力学模型质量、转动惯量等参数，提高了运动控制精度。

参　考　文　献

[1] 窦汉杰，陈震宇，翟长远，等. 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：1－22.
DOU Hanjie, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 1－22. (in Chinese)

[2] 刘继展，江应星. 农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：1－17.
LIU Jizhan, JIANG Yingxing. Industrialization trends and multi-arm technology direction of harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 1－17. (in Chinese)

[3] 刘成良，贡亮，苑进，等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报，2022，53(7)：1－22，55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Research status and development trend of key technologies of agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1－22, 55. (in Chinese)

[4] 张庆，潘烤鑫，王振宇，等. 复杂地形下仿生轮腿式机器人位姿控制研究[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：380－391，403.
ZHANG Qing, PAN Kaoxin, WANG Zhenyu, et al. Pose control of biomimetic wheel-legged robots in complex terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 380－391, 403. (in Chinese)

[5] 郭非，汪首坤，王军政. 轮足复合移动机器人运动规划发展现状及关键技术分析[J]. 控制与决策，2022，37(6)：1433－1444.
GUO Fei, WANG Shoukun, WANG Junzheng. Wheel foot compound mobile robot motion planning development situation and key technical analysis[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1433－1444. (in Chinese)

[6] BJELONIC M, SANKAR P K, BELLICOSO C D, et al. Rolling in the deep-hybrid locomotion for wheeled-legged robots using online trajectory optimization[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 3626－3633.

[7] KLAMT T, SCHWARZ M, LENZ C, et al. Remote mobile manipulation with the centauro robot: full-body telepresence and autonomous operator assistance[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(5): 889－919.

[8] 刘尚非，王军政，刘冬琛，等. 多功能并联式六轮足救援机器人[J]. 机械工程学报，2024，60(21)：14－26.
LIU Shangfei, WANG Junzheng, LIU Dongchen, et al. Multifunctional parallel six-wheel-legged rescue robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(21): 14－26. (in Chinese)

[9] HE Jun, SUN Yanlong, YANG Limin, et al. Design and control of TAWL—a wheel-legged rover with terrain-adaptive wheel speed allocation capability[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(4): 2212－2223.

[10] LIU X, SUN Y, WEN S, et al. Development of wheel-legged biped robots: a review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2024, 21(2): 607－634.

[11] VIVIAN S M, EDO J, MARKO B, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4172－4179.

[12] KOCO E, MIRKOVIC D, KOVACIC Z. Hybrid compliance control for locomotion of electrically actuated quadruped robot [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2019, 94(3): 537－563.

[13] ZU L, WEN J, WANG S, et al. Multiangle, self-powered sensor array for monitoring head impacts[J]. Science Advances, 2023, 9(20): 5152.

[14] PIPERAKIS S, TRAHANIAS P. Non-linear ZMP based state estimation for humanoid robot locomotion[C]// IEEE－RAS 16th International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2016: 202－209.

[15] PLAYTER R, BUEHLER M, RAIBERT M. BigDog[C]// Unmanned Systems Technology Ⅷ. SPIE, 2006: 896－901.

[16] KATZ B, DI CARLO J, KIM S. Mini cheetah: a platform for pushing the limits of dynamic quadruped control[C]// International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2019: 6295－6301.

(下转第 808 页)

responsibility[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010. (in Chinese)
[20] ZHANG Z, YAN Y, LI L, et al. Reearch on multi-mode control of electro-hydraulic variable displacement pump driven by servo motor[J]. Actuators, 2024,13(5):1 - 20.
[21] YUAN Z, GILMARTIN M, DOUGLAS S. Design of hybrid machines for nonuniform motion production[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(5): 491 - 499.
[22] 韩明兴,徐琨,廖宜涛,等. 液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 396 - 408,418.
HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of electro - hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 396 - 408,418. (in Chinese)
[23] 文兴娅. 履带拖拉机坡地自适应调平系统研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
WEN Xingya. Research on adaptive slope leveling system of crawler tractor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024. (in Chinese)
[24] 高国民. 基于多源信息融合的红花采摘机器人田间导航系统研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2023.
GAO Guomin. Research on field navigation system of redflower picking robot based on multi-source information fusion [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[25] GAO D, WAND S, YANG Y, et al. An intelligent control method for servo motor based on reinforcement learning[J]. Algorithms, 2023, 17(1): 14 - 25.
[26] SHEN B, PAN J, NING D, et al. Research on trajectory tracking control method for agricultural robot permanent magnet synchronous motor servo system based on improved EMD threshold wavelet filtering[J]. AIP Advances, 2024, 14(10):12 - 26.

(上接第 797 页)

[17] BLEDT G, POWELL M J, KATZ B, et al. Mit cheetah 3: design and control of a robust, dynamic quadruped robot[C]// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2018: 2245 - 2252.
[18] YANG C, YUAN K, ZHU Q, et al. Multi-expert learning of adaptive legged locomotion[J]. Science Robotics, 2020, 5(49): 2174.
[19] SHI F, HOMBERGER T, LEE J, et al. Circus anymal: a quadruped learning dexterous manipulation with its limbs[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2021: 2316 - 2323.
[20] ALTENDORFER R, MOORE N, KOMSUOGLU H, et al. Rhex: a biologically inspired hexapod runner[J]. Autonomous Robots, 2001, 11(3): 207 - 213.
[21] BLACKMAN D J, NICHOLSON J V, ORDONEZ C, et al. Gait development on minitaur, a direct drive quadrupedal robot [C]// Unmanned Systems Technology XVIII. SPIE,2016: 141 - 155.
[22] NEUNERT M, FARSHIDIAN F, WINKLER A W, et al. Trajectory optimization through contacts and automatic gait discovery for quadrupeds[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(3): 1502 - 1509.
[23] BLEDT G, WENSING P M, INGERSOLL S, et al. Contact model fusion for event-based locomotion in unstructured terrains [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2018: 4399 - 4406.
[24] 刘忠振,蔡志勤,彭海军,等. 位-力驱动的线驱连续型机器人的动力学建模及实验验证[J]. 机器人,2022,44(4):410 - 417,430.
LIU Zhongzhen, CAI Zhiqin, PENG Haijun, et al. Dynamic modeling and experimental verification of a bit-force driven linear continuous robot[J]. Robot, 2022,44(4):410 - 417,430. (in Chinese)
[25] WANG S, BHATIA A, MASON M T, et al. Contact localization using velocity constraints[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2020: 7351 - 7358.
[26] BLOESCH M, HUTTER M, HOEPFLINGER M A, et al. State estimation for legged robots- consistent fusion of leg kinematics and IMU[J]. Robotics, 2013, 17: 17 - 24.
[27] BLOESCH M, GEHRING C, FANKHAUSER P, et al. State estimation for legged robots on unstable and slippery terrain[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 6058 - 6064.
[28] HARTLEY R, GHAFFARI M, EUSTICE R M, et al. Contact-aided invariant extended Kalman filtering for robot state estimation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2020, 39(4): 402 - 430.
[29] 陈腾,李贻斌,荣学文. 四足机器人动步态下实时足底力优化方法的设计与验证[J]. 机器人,2019,41(3):307 - 316.
CHEN Teng, LI Yibin, RONG Xuewen. Design and validation of a real-time foot force optimization method for quadruped robots in dynamic gaits[J]. Robot, 2019, 41(3): 307 - 316. (in Chinese)
[30] RAIBERT M H. Legged robots that balance[M]. MIT Press Cambridge, MA, 1986.