

# 轮足式动力切换四足机器人建模 及其足端轨迹规划\*

陈明方<sup>1</sup>, 胡新坤<sup>1</sup>, 张永霞<sup>1</sup>, 成之煜<sup>2</sup>, 徐亮<sup>3</sup>, 方旗<sup>1</sup>

1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500
2. 华工科技产业股份有限公司孝感华工高理电子有限公司, 湖北 孝感 432000
3. 中检质技检验检测科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310022

**摘要:** 基于行星系齿轮, 设计了一种适应能力强、动力可切换型轮足机器人腿部结构。引入优化后的修正摆线轨迹规划与轮足切换足端轨迹规划, 在不同方向上的位置、速度和加速度曲线均连续、平滑、无突变, 满足机器人控制要求。基于虚拟模型控制方法, 通过 WEBOTS 平台仿真与单腿实物样机实验, 得出摆线轨迹偏差集中于摆动相终点位置和抬腿最高点处, 分别为 20 和 5 mm; 机构重复定位最大偏差为 4 mm, 仅为其足端零部件半径 (18 mm) 的 22.2%; 轮足切换足端轨迹在 X 方向的平均误差约为 2.4 mm, 在 Y 方向的平均误差为 1.26 mm, 可完成姿态切换任务。研究成果为轮足式复合机器人设计提供了较好的指导。

**关键词:** 轮足式机器人; 动力切换; 轨迹规划; 虚拟模型控制

**中图分类号:** TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)01-0033-10

## Modeling and trajectory planning of four-legged robot with rotating feet for power switching

CHEN Mingfang<sup>1</sup>, HU Xinkun<sup>1</sup>, ZHANG Yongxia<sup>1</sup>, CHENG Zhiyu<sup>2</sup>, XU Liang<sup>3</sup>, FANG Qi<sup>1</sup>

1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Xiaogan Huagong Gaoli Electronics Company Limited, Huagong Technology Industry Company Limited, Xiaogan 432000, China
3. China Inspection and Testing Research Institute Company Limited, Hangzhou 310022, China

**Abstract:** This paper designs a leg structure of a wheel-legged robot with strong adaptability and power switching capability based on planetary gear systems. The optimized modified cycloidal trajectory planning and wheel-legged switching foot-end trajectory planning are introduced. The position, speed and acceleration curves in different directions are continuous, smooth and without sudden changes, meeting the control requirements of the robot. Based on the virtual model control method, through WEBOTS platform simulation and single-leg physical prototype experiments, it is found that the deviation of the swing trajectory is concentrated at the end position of the swing phase and the highest point of the lifting leg, respectively, about 20 mm and 5 mm; the maximum deviation of the repeated positioning of the mechanism is 4 mm, which is only about 22.2% of the radius of the

\* 收稿日期: 2025-05-14 录用日期: 2025-05-29 网络首发日期: 2025-07-07  
基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202502AC08006); 国家自然科学基金 (52465063)  
作者简介: 陈明方 (1975 年生), 男; 研究方向: 机器人控制算法; E-mail: mfchen@kust.edu.cn  
通信作者: 成之煜 (1999 年生), 男; 研究方向: 机器人控制算法; E-mail: czy\_730@163.com

全文阅读



ZR20250083

foot-end components (18 mm); the average error of the wheel-legged switching foot-end trajectory in the  $X$  direction is approximately 2.4 mm, and of 1.26 mm in the  $Y$  direction, which can complete the posture switching task. The above conclusions provides better guidance for the design of wheel-legged composite robots.

**Key words:** wheel-legged robots; power switching; trajectory planning; virtual model control

移动机器人亟需在动态环境中实现高效率、快速运动与强地形适应性的协同优化(Zhao et al., 2021)。但单独的轮式或腿式机器人都难以满足多元化场景下多目标性能的耦合,一种可以结合轮式和腿式机器人优点的新型移动平台(Zhu et al., 2024)成为了工业智能化进程的迫切需求。

苏黎世联邦理工学院的 ANYmal 机器人(Bjelonic et al., 2020)足端添加动力轮,创造性地开发了模块化轮足复合系统。Motiv Robotics 公司研发的四轮足机器人 RoboMantis(Klamt et al., 2020)采用创新型异构驱动架构,其底盘系统由四组独立驱动的轮-腿复合单元构成。中国科学技术大学提出的一种新型的机械解耦腿轮混合变形机器人 HyTro-I(Li et al., 2021)采用独特的“四轮四足”异构布局,其创新性体现在轮组与腿组的物理分离设计(汪首坤等, 2021)。北京理工大学王军政团队研发的可实现轮式、足式和轮足复合式运动的机器人—北理哪吒(BIT-NAZA)采用“混联驱动”架构(王修文等, 2020),其核心突破在于将五自由度并联机构与滑轮复合驱动深度整合(刘尚非等, 2024)。腾讯 Robotics X 实验室研发的双轮足机器人 Ollie(Jun et al., 2022; 腾讯 Robotics X 实验室, 2022)采用“双轮五杆”仿生架构,其核心创新在于将轮式机动性与高动态腿式运动深度融合。

足端轨迹一定程度上决定着机器人腿式运动模式,可提高机器人的移动效率(Madridano et al., 2021)。Yoshihiro et al.(1992)提出了一种基于波形运动和复合摆线的足部轨迹设计方法,以适应不同地形和高速行驶的需求。何冬青等(2005)对其进行了修正,分析了初始姿态对行走稳定性的影响。Parikh et al.(2020)利用七次和九次多项式进行五自由度串联机械臂轨迹规划,以提高机器人的运动效率和准确性。魏顺祥等(2022)将摆线与五次多项式复合,在关节空间使用 Hermite 多项式曲线插补,提高了四足机器人的运动学性能。

虚拟模型控制(VMC, virtual model control)通过设计虚拟的力或力矩,使机器人运动符合预设的

虚拟模型行为,从而实现对复杂运动的高效控制(谭永营等, 2020)。赵江波等(2022)提出一种分数阶的虚拟模型控制,进一步提高了运动性能。Huang et al.(2022)将虚拟模型控制和线性二次调节器(LQR, linear quadratic regulator)相结合,实现了双轮足机器人的平衡和控制。Ji et al.(2023)将中枢模式发生器(CPG, central pattern generator)和 VMC 相结合,在平坦地面和斜坡上的实验证明了该机器人运动性能得到了加强。Liu et al.(2025)将 BP 神经网络与虚拟模型控制相结合,以实现参数的自适应调整。仿真实验表明,该方法在控制精度和稳定性方面均有提升。

本文针对轮足式四足机器人的腿部动力切换结构进行了改进(陈明方等, 2023)。首先,基于行星系齿轮建立了四足机器人腿部模型,引入足端摆线轨迹规划与轮足式切换轨迹规划,对机器人腿部进行了运动学分析。其次,在 WEBOTS 平台对动力可切换型轮足机器人进行简化建模,基于 VMC 方法完成机器人 Trot 步态的行走、轮足切换等仿真运动。仿真结果与理论数据相符合,满足轮足复合式机器人的控制需求。最后,结合机器人单腿实物模型进行单腿运动实验,验证动力可切换型轮足机器人腿部结构的可靠性以及足端轨迹规划的准确性,为轮足式复合机器人设计提供理论指导。

## 1 机器人腿部结构建模

一般的轮足复合式机器人需要 3 个电机来独立控制大腿、小腿和轮子等 3 个运动构件,这无形中增加了制造和维护成本。因此,急需一种结构更紧凑、运动更可靠并且电机少的轮腿复合式机器人。

### 1.1 轮足式动力切换模块

本文设计了一种行星齿轮系动力切换机构,根据不同的运动模式实现动力切换。在腿式运动时,2 个电机可分别控制大腿和小腿;在轮式运动时,用大腿电机或者小腿电机中的 1 个来控制轮子运动。如图 1 所示,行星齿轮离合器的工作原理如下:

(1) 太阳轮作为动力源,以同一个行星架连接

多个行星轮,当限制行星架的旋转时就会限制行星轮的公转,此时各个行星轮以各自的中心进行自转从而带动齿圈转动,齿圈作为输出。

(2)太阳轮作为动力源,以同一个行星架连接多个行星轮,当限制齿圈自转时,此时行星轮围绕着太阳轮进行公转从而带动行星架转动,行星架作为输出。

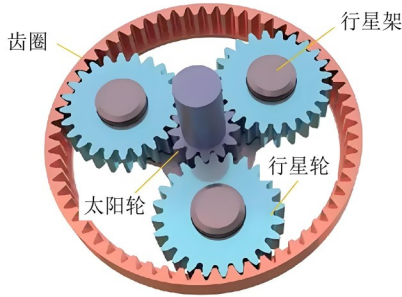


图 1 行星齿轮系

Fig. 1 Planetary gear system

电机的动力切换原理如图 2 所示。轮式状态时舵机控制的限位杆位于左侧,穿过机架底座和小腿锁紧盘,对同步轮 1 进行位置限定,同步轮 1 连接外输出轴、小腿等同一个传动链的动力传动,此时电机产生的动力抵达行星减速机后,只能将动力传输至内输出轴,而后通过同步轮 2 将动力传输至轮子。当轮式切换指令下达后,舵机控制限位杆向右移动并保持与同步轮 2 连接,切换过程中电机不输出力矩。当同步轮 2 被限制位置移动后,电机动力将通过行星减速机的外输出轴输送至同步轮 1 处,最终转动至腿部膝关节处,实现该轮足机器人的足式控制,轮式切换过程正好相反。

### 1.2 基于行星齿轮系的单腿结构

单腿结构主要由大腿、小腿、轮子、轮式限位机构、大腿电机、小腿电机、动力分流机构、舵机互锁机构等组成,如图 3 所示。

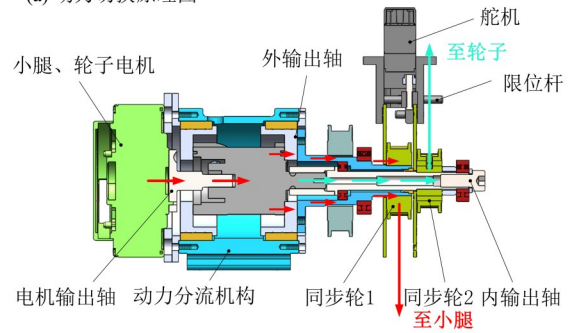
## 2 腿部运动学分析

### 2.1 腿部运动学正逆解

用 Denavit-Hartenberg 建模法(D-H 法)进行腿部运动学分析。在机身中心处建立机身坐标系, $X$ 方向为机器人前进方向, $Y$ 方向为机器人重力方向, $Z$ 方向为机身侧面,机器人整机模型和腿部动力学模型如图 4 所示。其中, $l_0, l_1, l_2$ 为连杆长度,即机器人腿部关节的长度; $P_0, P_1, P_2, P_3$ 为关节点。

该坐标系的 D-H 参数如表 1 所示。表中, $a_i$ 为

(a) 动力切换原理图



(b) 动力切换过程示意图

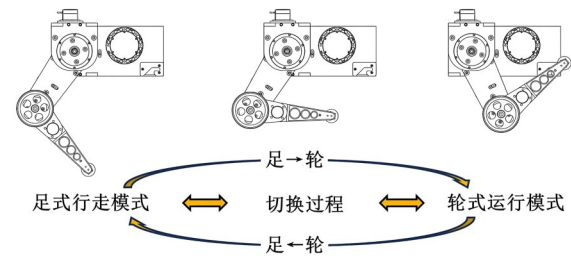


图 2 轮足式机器人的动力切换过程

Fig. 2 Power switching process of the wheel-legged robot

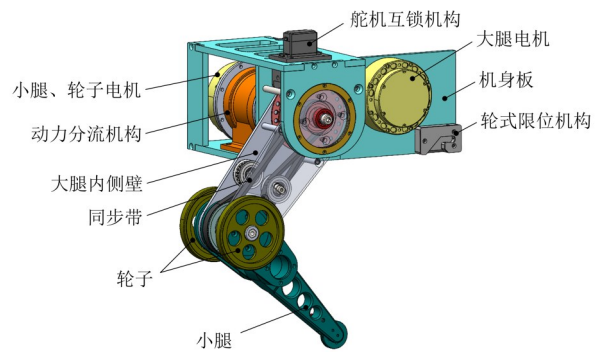


图 3 机器人单腿设计

Fig. 3 The single leg design of robot

机器人腿部关节的长度, $\alpha_i$ 为第  $i$  个关节与第  $i$  坐标系的扭角, $d_i$ 表示关节  $i$  与关节  $i-1$  间的距离, $\theta_i$ 为第  $i$  个关节的转角。 $L_1, L_2$ 为常量, $l_0 = 0, l_1 = L_1, l_2 = L_2$ 。 $\theta_1, \theta_2$ 为随机器人运动而变化的变量。

结合杆件与运动副之间的关系,推导出任意关节坐标系在基坐标系中的齐次变换矩阵

$${}^{i-1}T = \text{Rot}(x, \alpha_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

令

$$\begin{cases} s_1 = \sin \theta_1, & c_1 = \cos \theta_1, \\ s_2 = \sin \theta_2, & c_2 = \cos \theta_2, \end{cases}$$

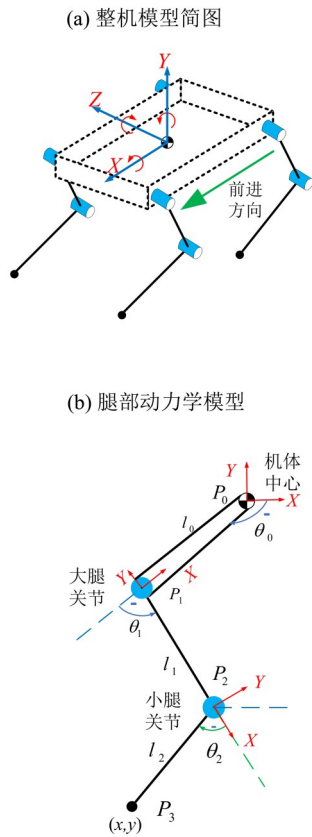


图4 腿部动力学模型和机器人整机模型

Fig. 4 The kinematics model for the robot's leg and the complete robot model

表1 机器人腿部的D-H参数

Table 1 D-H parameters of the robot's leg

$i$	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$\pi/2$	0	$\theta_1$
2	$L_1$	0	0	$\theta_2$
3	$L_2$	0	0	0

$$\begin{cases} s_{1+2} = \sin(\theta_1 + \theta_2), & c_{1+2} = \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ s_{1-2} = \sin(\theta_1 - \theta_2), & c_{1-2} = \cos(\theta_1 - \theta_2), \end{cases}$$

代入表1中的数据,得

$$\begin{aligned} {}^0T_3 &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_{1+2} & -s_{1+2} & 0 & L_1 c_1 + L_2 c_{1+2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_{1+2} & c_{1+2} & 0 & L_1 s_1 + L_2 s_{1+2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

根据式(1)可得机器人腿部运动学正解为

$$\begin{cases} p_x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ p_z = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2). \end{cases} \quad (2)$$

将  $\theta_2 = \theta_3 - \theta_1$  代入式(2),对腿部进行运动学求反解,得  $y < 0$  时的逆运动学方程为

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_3 - \arccos \frac{x^2 + z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}, \\ \theta_3 = \arctan \frac{-x}{z} - \arcsin \frac{x^2 + z^2 + L_2^2 - L_1^2}{2L_2 \sqrt{x^2 + z^2}}. \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 基于摆线的足端轨迹规划

**2.2.1 摆线足端轨迹约束** 在轮足式机器人的腿式运动中,四条腿交替摆动并按特定顺序接触地面。为了使四足机器人在运动中更加平稳,需对腿式运动时的足端动作进行轨迹规划。摆线轨迹用于规划摆动相,设定一个运动周期为  $T$ ,在  $0 \sim T/2$  范围内处于摆动相,在  $T/2 \sim T$  范围内处于支撑相。摆线轨迹分别受到  $X$  与  $Y$  方向上的位置、速度和加速度约束,即

$$\begin{cases} x = y = 0, & t = 0, \\ x_{t=T/2} = S, & y_{t=T/4} = H, & 0 < t < T/2, \\ x_{t=T} = 0, & y = 0, & T/2 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x' = y' = 0, & t = 0, \\ x'_{t=T/2} = 0, & y'_{t=T/4} = 0, & 0 < t < T/2, \\ x'_{t=T} = 0, & y' = 0, & T/2 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x'' = y'' = 0, & t = 0, \\ x''_{t=T/2} = 0, & y''_{t=T/4} = 0, & 0 < t < T/2, \\ x''_{t=T} = 0, & y'' = 0, & T/2 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (6)$$

其中  $S$  为步幅长度,  $H$  为抬腿高度。

**2.2.2 修正摆线轨迹优化** 由于普通摆线轨迹无法同时满足式(4)~(6)的约束条件,故需对摆线轨迹进行修正优化设计,修正后的摆线轨迹为

$$\begin{cases} x = S \left[ \frac{t}{T_m} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi t}{T_m} \right], \\ y = H \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi t}{T_m} \right], \end{cases}$$

其中  $T_m$  为摆动相周期,  $T_m = T/2$ 。设定  $S = 0.1 \text{ m}$ ,  $H = 0.03 \text{ m}$ ,  $T_m = 2 \text{ s}$ ,绘制修正摆线轨迹曲线如图5(a)所示。

对  $x, y$  关于时间  $t$  进行一次、二次求导,得到摆线速度与加速度。速度和加速度曲线如图5(b)所

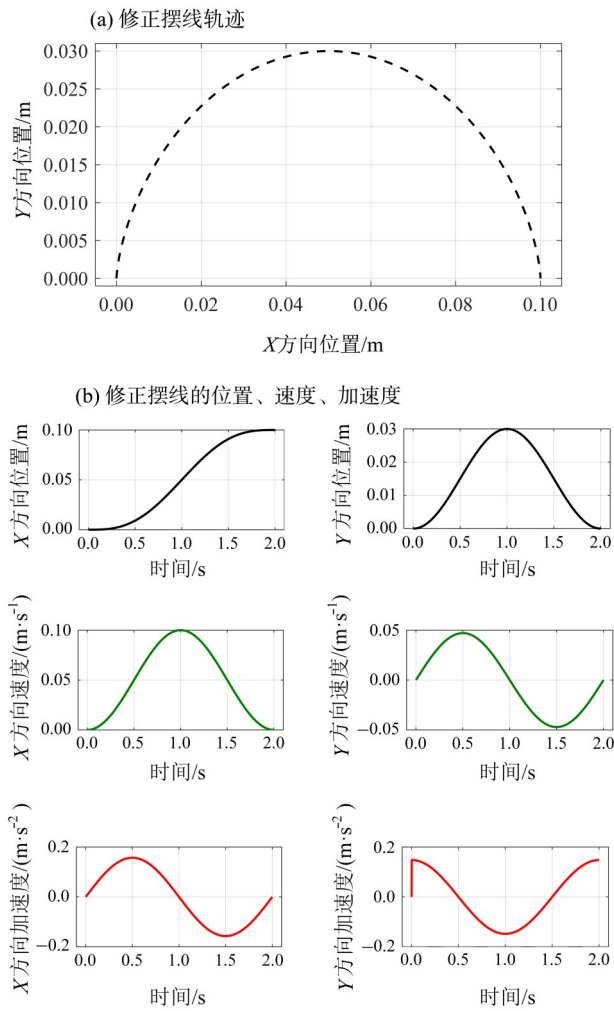


图 5 修正摆线轨迹及其位置、速度、加速度

Fig. 5 The corrected cycloidal trajectory and its position, velocity, acceleration

示。由图 5(b)可知,  $Y$  方向关于  $t$  的加速度在  $t = 0$  时刻存在较大的突变, 在抬腿和落地瞬间需要电机产生较大的力矩, 故需对  $Y$  方向的加速度进行进一步优化。假设优化的表达式为

$$y'' = A \sin \frac{n\pi t}{T_m}, \quad t \in [0, T].$$

根据初始条件, 可解得  $Y$  方向上的位置为

$$y = \begin{cases} 2H \left[ \frac{t}{T_m} - \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi t}{T_m} \right], & 0 \leq t < \frac{T_m}{2}; \\ 2H \left[ 1 - \frac{t}{T_m} + \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi t}{T_m} \right], & \frac{T_m}{2} \leq t \leq T_m. \end{cases}$$

取  $n$  为 2、4、6、8, 绘制  $Y$  方向的位置、速度和加速度曲线如图 6 所示。在  $n = 4$  时, 位置曲线光滑、无突变; 在不同的  $n$  值下, 加速度曲线均为连续变

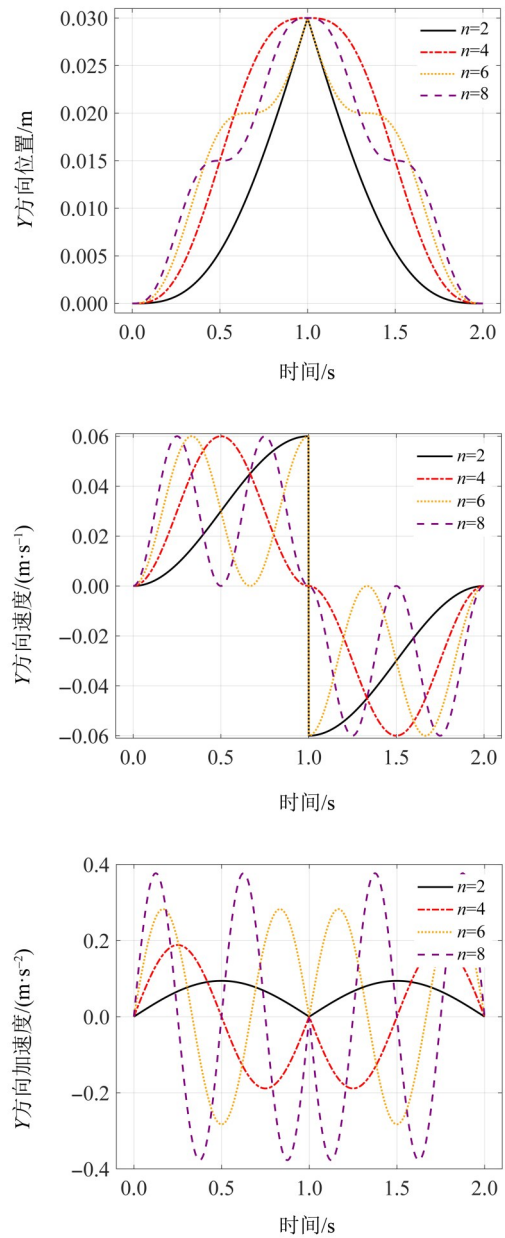


图 6 不同  $n$  值时  $Y$  方向的位置、速度和加速度

Fig. 6 The position, velocity and acceleration in the  $Y$ -direction for different  $n$

化; 速度曲线的周期随着  $n$  值的增加而减少。在实际控制中, 过小的周期会导致机器人能耗增加, 不利于机器人续航时间。综合考虑, 取  $n = 4$  作为  $Y$  方向轨迹规划曲线的最优值, 则

$$x = S \left[ \frac{t}{T_m} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi t}{T_m} \right],$$

$$y = \begin{cases} H \left[ \frac{2t}{T_m} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{4\pi t}{T_m} \right], & 0 \leq t < \frac{T_m}{2}, \\ H \left[ 2 - \frac{2t}{T_m} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{4\pi t}{T_m} \right], & \frac{T_m}{2} \leq t \leq T_m. \end{cases}$$

绘制位置、速度和加速度曲线如图 7 所示。由图可得,在  $X$  与  $Y$  方向上的位置、速度和加速度曲线均无突变,满足机器人控制要求。

### 2.3 轮足式切换轨迹规划

轮足式切换控制方法是轮足式机器人实现多地形适应能力的关键环节,其核心在于确保机器人在不同运动模式之间平滑切换,从而保证其稳定性与控制效率。为了提高机器人的移动效率,采用五次多项式进行轮足式切换轨迹规划,其表达式为

$$\begin{cases} x(t) = k_0 + k_1(t-t_0) + k_2(t-t_0)^2 + k_3(t-t_0)^3 \\ \quad + k_4(t-t_0)^4 + k_5(t-t_0)^5, \\ x'(t) = k_1 + 2k_2(t-t_0) + 3k_3(t-t_0)^2 \\ \quad + 4k_4(t-t_0)^3 + 5k_5(t-t_0)^4, \\ x''(t) = 2k_2 + 6k_3(t-t_0) + 12k_4(t-t_0)^2 \\ \quad + 20k_5(t-t_0)^3. \end{cases} \quad (7)$$

在周期  $T$  内,位置、速度和加速度在起始时刻  $t_0$  和终点时刻  $t_1$  的值如式(8)所示,即

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0, & x(t_1) = x_1, \\ x'(t_0) = v_0, & x'(t_1) = v_1, \\ x''(t_0) = a_0, & x''(t_1) = a_1. \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入五次多项式(7)中,令  $T = t_1 - t_0$ ,  $h = x_1 - x_0$ ,得

$$k_0 = x_0, \quad k_1 = v_0, \quad k_2 = \frac{a_0}{2},$$

$$k_3 = \frac{1}{2T^3} [20h - (8v_1 + 12v_0)T - (3a_0 - a_1)T^2],$$

$$k_4 = \frac{1}{2T^4} [-30h + (14v_1 + 16v_0)T + (3a_0 - 2a_1)T^2],$$

$$k_5 = \frac{1}{2T^5} [12h - 6(v_1 + v_0)T + (a_1 - a_0)T^2],$$

其中  $Y$  与  $X$  方向上设置相同,根据 SolidWorks 模型参数,取  $T = 4$ ,  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = -0.34$ ,  $v_0 = a_0 = 0$ ,  $x_1 = 0.25$ ,  $y_1 = 0$ ,  $v_1 = a_1 = 0$ ,绘制位置、速度和加速度曲线如图 8 所示。由图可得,在  $X$  与  $Y$  方向上的位置、速度和加速度曲线均无突变,满足机器人控制要求。轮足式切换足端轨迹在  $X$ - $Y$  平面上为直线,切换路径最短,可完成快速高效的轮足式切换,故采用该五次多项式作为切换轨迹。

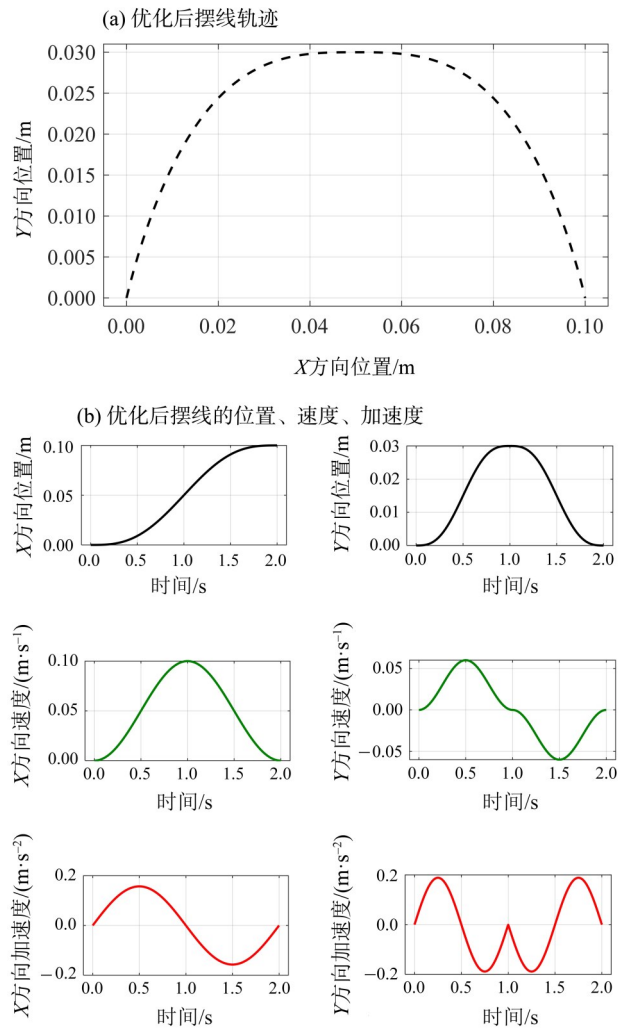


图 7 优化后的摆线轨迹及其位置、速度、加速度

Fig. 7 The optimized cycloidal trajectory and its position, velocity, acceleration

## 3 基于VMC的仿真分析

利用 WEBOTS 平台作为仿真工具,建立一个简化的轮足式机器人,所有构件均具有质量和惯量属性,基于 VMC 方法完成机器人 Trot 步态的行走、轮足切换等运动仿真。

### 3.1 Trot 步态运动仿真

腿式运动模式作为轮腿机器人应对复杂地形的一种适应方案,是轮腿机器人运动中的重要一环。在站立仿真实验的基础上,对机器人进行 Trot 步态下的运动仿真实验。在仿真开始之前,规定一个步态周期为  $T$ ,支撑相和摆动相的周期设定为  $T_{st} = T_{sw} = \frac{1}{2}T$ 。仿真结果如图 9 所示。

图 9 中,黑色曲线为经过优化后得到的理论足端摆线轨迹,红色曲线为仿真实验的足端摆线轨

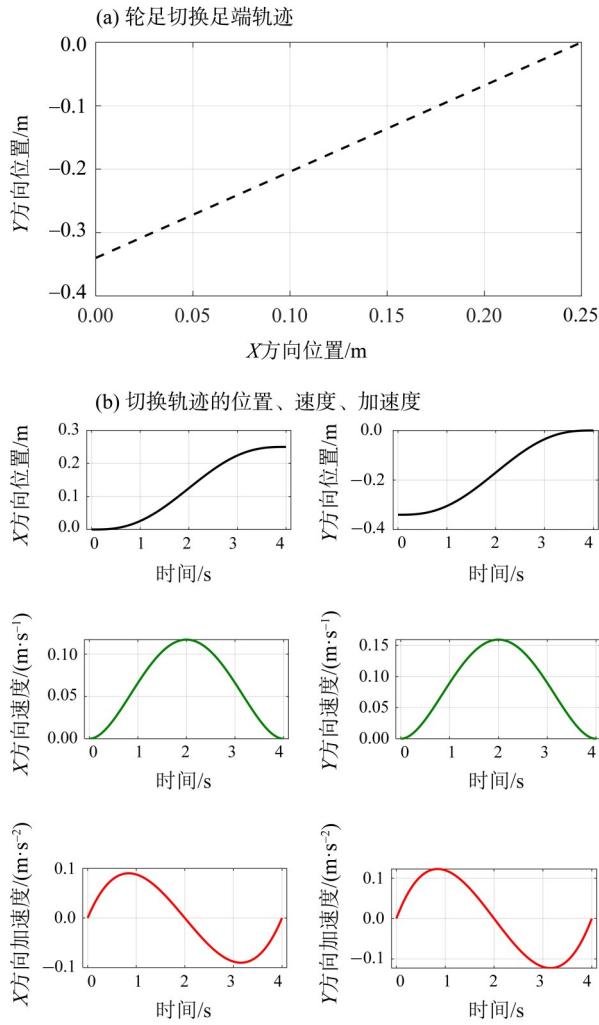


图 8 轮足切换的足端轨迹及其位置、速度、加速度  
Fig. 8 The foot-end trajectory of the wheel-foot switch and its position, velocity, and acceleration

迹。仿真和理论轨迹曲线变化趋势一致,但也存在一定的偏差,这是因为:(1)机器人腿部各关节之间存在一定的摩擦力,无法达到理论的理想状态。(2)仿真设置的摆动相弹簧刚度系数与阻尼系数直接影响足端摆线轨迹效果,系数越大效果越好。但过大的系数会导致虚拟力变大,产生较大的输出力矩,导致机器人运行不稳定,故系数设定存在上限,造成了仿真偏差。

### 3.2 轮足式切换运动仿真

考虑到实物模型仅有一条腿,且仅做单腿轨迹实验,故对单腿轮足切换的整个过程进行仿真,以便与后文实验进行对比。记录机器人的足端横纵坐标的变化,生成一个切换流程的足端轨迹,如图 10(b)所示。轮足切换过程从左下角向右上角移动(左下角为起始点、右上角为目标点)。黑色曲线为

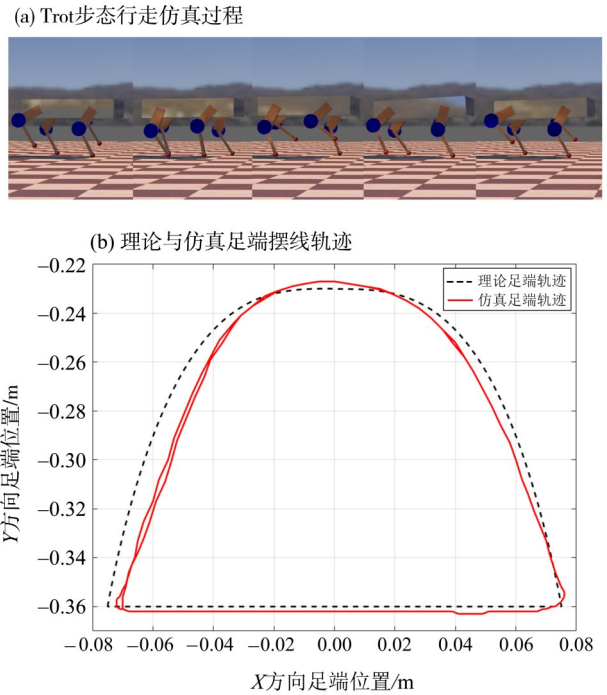


图 9 Trot 步态行走仿真和摆线轨迹

Fig. 9 Trot gait walking simulation and cycloidal trajectory

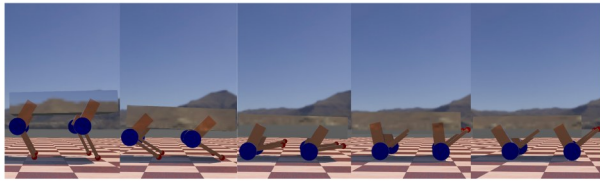
五次多项式规划得到的理论切换轨迹,红色与蓝色曲线为仿真实验的足端轨迹曲线,其中红色曲线为快速切换曲线(0.8~1 s 左右完成切换),蓝色曲线为慢速切换曲线(8 s 左右完成切换)。

从图 10 可以看出,轮足快速切换时,0~0.12 m 的仿真曲线基本贴合理论曲线,但由于轮足切换速度快、系统响应滞后,使得仿真轨迹与理论轨迹存在一定偏差;仿真曲线在 0.12 m 左右出现拐点,由于轮子接地后会产生刚性冲击并通过小腿放大,导致足端的位置轨迹产生轻微失真;0.12~0.25 m 时轮子完全着地,小腿电机的驱动力按分担机身重量的状态计算,导致小腿呈现向左上方移动的趋势,形成仿真曲线后半段所示的特征。慢速切换时,整体轨迹更贴合理论曲线,但后半段仍出现与快速切换类似的现象,导致慢速切换后半部分曲线偏移的原因与快速切换一致。

## 4 单腿运动实验

加工并组装单腿实物样机作为实验对象,为了更好地实现单腿结构的固定与定向运动确保其实验效果,设计单腿固定机构,并在机构底部设置滑轮、内部添加导轨,以辅助单腿结构完成升降、跟随腿部进行前后移动等功能。通过激光跟踪仪与 Spatial Analyzer(SA)三维测量分析软件的协同工

(a) 轮足切换过程仿真



(b) 单腿轮足切换过程足端轨迹

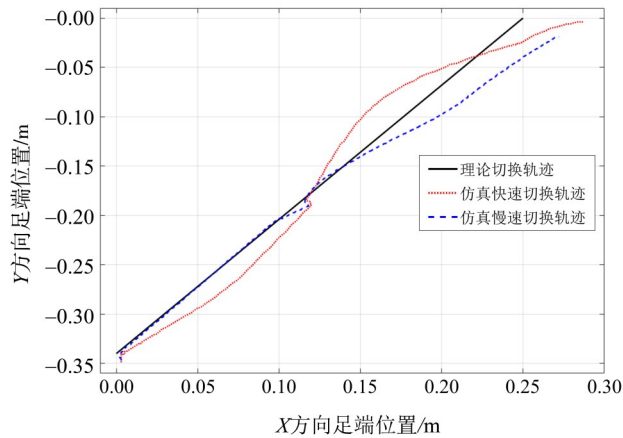


图 10 轮足式切换运动仿真和足端轨迹

Fig. 10 Simulation of wheel-foot switching motion and the foot-end trajectory

作,得到轮足式机器人的足端运动轨迹和足端切换轨迹。实验平台如图 11 所示,实验过程中将激光跟踪仪的靶球座固定在机器人足端位置,以足端位置为目标采集点,持续采集多个周期的足端轨迹,绘制曲线并进行分析。

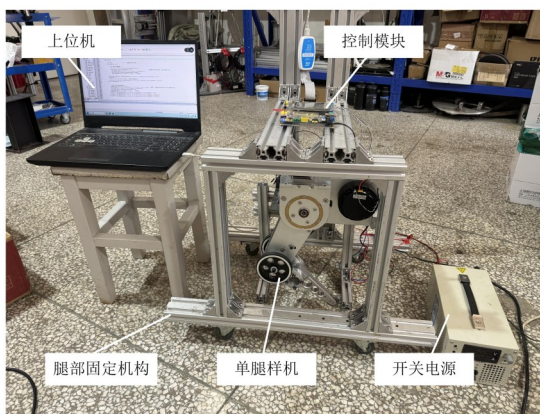


图 11 实验平台

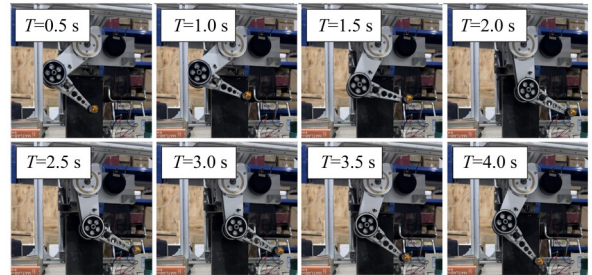
Fig. 11 Experimental platform

#### 4.1 单腿摆腿实验

将轮足腿悬空放置,位置设定为足式正常站立状态,即大腿关节为 $-120^\circ$ ,小腿关节为 $60^\circ$ ,足端轨迹以 $(0, -0.36)$ 为起始点,同时在控制代码中对其初

始角度和坐标进行输入。预设足端步长  $S = 150 \text{ mm}$ ,抬腿高度  $H = 110 \text{ mm}$ ,在单片机控制下,机器人腿部进行 3~4 个周期的摆动。实时运动过程如图 12(a)所示。

(a) 单腿摆腿运动过程



(b) 单腿摆腿足端轨迹

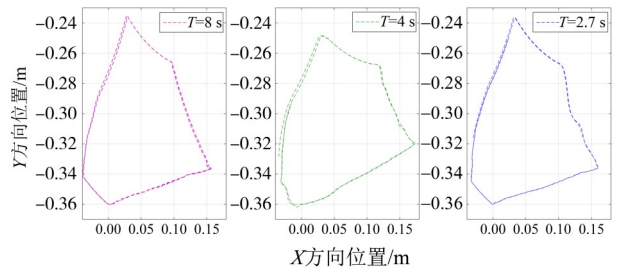


图 12 单腿摆腿运动实验和足端轨迹

Fig. 12 Single-leg leg swing experiment and the foot-end trajectory

由图 12(b)可知,足端轨迹以 $(0, -0.36)$ 为起始点,顺时针方向为运动方向,使足端轨迹形成一个闭环。摆动轨迹的数据偏差集中于摆动相终点位置和抬腿最高点处,分别为 20 和 5 mm 左右。测量过程中,以 3 个摆动周期为一组数据,测得该机构重复定位的最大偏差为 4 mm,仅为其足端零部件半径(18 mm)的 22.2%,误差值处于预设的容差区间内。这表明机械系统具备良好的运行稳定性。同时,轨迹规划控制也能较好地实现,有利于机构腿的越障。但实际轨迹曲线与理论轨迹有一定偏差,这主要是因为:

(1)机构的加工、装配误差以及大腿转动关节与机身挡板相贴合等因素,导致转动位置的摩擦系数增大且不均匀,在摆动过程产生不均匀的摩擦力,影响实际曲线。

(2)机构传动方式为皮带传送,在传递力矩过程中存在能量损耗,且小腿关节的同步带不够紧凑,空载状态下存在 1~2 cm 的位置误差,此为导致终点误差较大的主要原因。

(3)控制算法具有提升的空间。因此,可以通过实时监测合外力的变化,对控制系数进行实时补偿,从而减少摩擦力对运动过程的影响。

#### 4.2 单腿轮足式切换实验

实验时使用的实验平台为单腿模型,故机器人不能实时移动,为了得到轮腿切换的足端轨迹,选择将轮腿机器人托起进行轮腿切换实验,实时运动结果如图13(a)所示。整理采集到的足端轨迹点后,得到轨迹曲线如图13(b)所示。

由图13(b)可知,轮足切换足端轨迹曲线在 $X$ 方向的平均误差约为2.4 mm,在 $Y$ 方向的平均误差

为1.26 mm,实际足端轨迹与仿真轨迹有些许出入,但总体趋势都是从左下角起始位置到右上角目标位置。其中,切换时间 $T = 8$  s时的实际曲线与理论切换曲线相差最大,这是因为电机输出力矩较小,导致运动速度慢,使相当一部分力矩用来抵抗机构内部的摩擦力,故力矩达不到理论值。切换时间 $T = 2.7$  s和 $T = 4$  s时的实际曲线与理论切换曲线较为贴合,但依旧有偏移,这是因为机构零件较为繁多复杂,导致零件的加工、装配存在误差和间隙;同时,控制算法中的弹簧刚度与阻尼系数没有达到最优值,导致缺乏控制精度。

## 5 结论

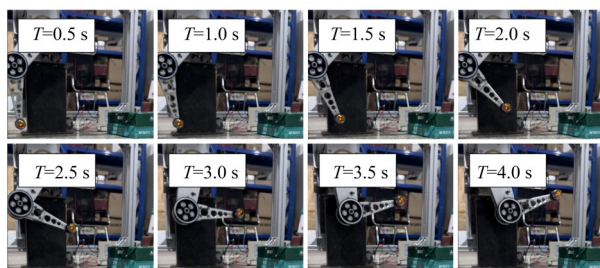
1)本文考虑影响动力切换的因素,对轮足式四足机器人腿部结构进行了改进,基于行星系齿轮建立了四足机器人的腿部模型。

2)引入足端摆线轨迹规划与轮足式切换轨迹规划,对机器人腿部进行运动学分析。在WEBOTS平台上,对动力可切换型轮足机器人进行了简化建模;基于VMC方法完成了机器人Trot步态的行走、轮足切换等仿真,仿真结果与理论数据相符合,满足轮足复合式机器人的控制需求。

3)基于上述仿真分析,结合机器人单腿实物模型进行单腿运动实验。对仿真与实物实验结果进行对比,可以发现:本文的足端摆线轨迹规划较为准确。基于五次多项式的轮足式切换运动轨迹规划,明确了轮足式动力切换的优化方向,为后续整机集成与更复杂场景验证奠定了基础。

4)本文设计的动力可切换型轮足机器人腿部结构可以实现轮式运动、足式运动、轮足切换等一系列动作,不仅能够提高能量利用率,而且机器人腿部结构稳定可靠,为轮足式复合机器人设计提供了理论参考。

(a) 轮足切换运动过程



(b) 轮足切换足端轨迹

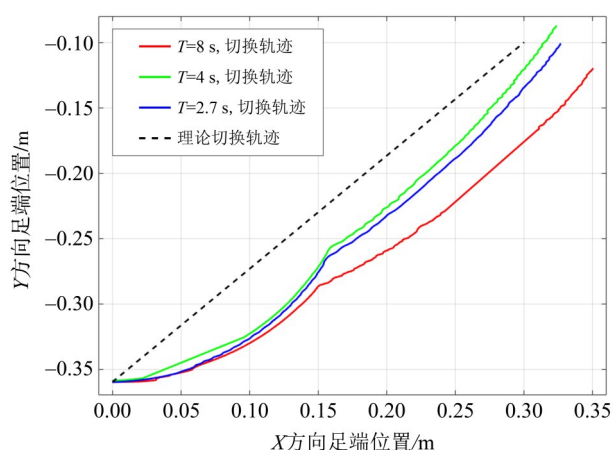


图13 轮足切换实验和足端轨迹

Fig. 13 The wheel-foot switch experiment and the foot-end trajectory

#### 参考文献:

- 陈明方,朱恩泉,魏松坡,等,2023.一种新颖的轮腿式机器人腿部结构设计与分析[J/OL].机械科学与技术,1-15. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230251>.
- 何冬青,马培菀,2005.四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析[J].计算机仿真,22(2):146-149.
- 刘尚非,王军政,刘冬琛,等,2024.多功能并联式六轮足救援机器人[J].机械工程学报,60(21):14-26.

- 谭永营,晁智强,韩寿松,2020.基于重心动力学及虚拟模型的负载型四足步行平台对角步态控制方法[J].机器人,42(4):448-459.

- 腾讯Robotics X实验室,2022.腾讯轮腿式机器人“Ollie”升级增加触觉感知功能[J].机器人技术与应用,2022(5):8.

- 汪首坤,刘大江,郭非,等,2021.基于动力学模型预测控制

- 的 Stewart 型轮足腿控制方法[J]. 北京理工大学学报, 41(4): 418-424.
- 王修文, 汪首坤, 王军政, 等, 2020. 基于异形 Stewart 平台的电动并联式六轮足机器人[J]. 机械工程学报, 56(13): 84-92.
- 魏顺祥, 吴海波, 陈久朋, 等, 2022. 四足机器人足端复合轨迹的优化与性能分析[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 61(4): 142-150.
- 赵江波, 龚思进, 马世成, 等, 2022. 液压四足机器人单腿的分数阶虚拟模型控制[J]. 北京理工大学学报, 42(3): 304-311.
- BJELONIC M, SANKAR P K, BELLICOSO C D, et al, 2020. Rolling in the deep-hybrid locomotion for wheeled-legged robots using online trajectory optimization[J]. IEEE Robot Autom Lett, 5(2): 3626-3633.
- HUANG X, LIU T, HAN M, et al, 2022. Virtual model control for dynamic balance of a two wheeled-legged robot[C]//International Conference on Service Robotics (ICoSR). Chengdu, China: 31-37.
- JI T, ZHU X, RUAN X, et al, 2023. An improved stable motion control method for quadruped robot based on CPG and VMC[C]// The 35th Chinese Control and Decision Conference. Yichang, China: 4928-4933.
- JUN H, YANLONG S, LIMIN Y, et al, 2022. Design and control of TAWL—A wheel-legged rover with terrain-adaptive wheel speed allocation capability [J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 27(4): 2212-2223.
- KLAMT T, SCHWARZ M, LENZ C, et al, 2020. Remote mobile manipulation with the centauro robot: Full-body telepresence and autonomous operator assistance [J]. J Field Robot, 37(5): 889-919
- LI X, ZHANG S, ZHOU H, et al, 2021. Locomotion adaption for hydraulic humanoid wheel-legged robots over rough terrains [J]. Int J Human Robot, 18(1): 2150001.
- LIU J, XU X, WANG W, et al, 2025. Adaptive optimization for virtual model control of quadruped robots based on BP neural network [EB/OL]. Robotica, 1-33. doi: 10.1017/S0263574725000244.
- MADRIDANO Á, AL-KAFF A, MARTÍN D, et al, 2021. Trajectory planning for multi-robot systems: Methods and applications[J]. Expert Syst Appl, 173: 114660.
- PARIKH P A, TRIVEDI R, DAVE J, 2020. Trajectory planning for the five degree of freedom feeding robot using septic and nonic functions [J]. Int J Mech Eng Robot Res, 9(7): 1043-1050.
- YOSHIHIRO S, KAZUTOSHI K, YUUJI H, et al, 1992. Low-impact foot trajectory for a quadruped walking machine[J]. Adv Robot, 7(4): 343-360.
- ZHAO J, HAN T, WANG S, et al, 2021. Design and research of all-terrain wheel-legged robot[J]. Sensors, 21(16): 5367.
- ZHU Q, GUAN X, YU B, et al, 2024. Overview of structure and drive for wheel-legged robots[J]. Robot Auton Syst, 181: 104777.

(责任编辑 王海蓉)