

电动并联六轮足机器人的运动驱动与多模态控制方法

陈志华^{1,2}, 汪首坤^{1,2}, 王军政^{1,2}, 徐康^{1,2}, 王修文^{1,2}, 刘道和^{1,2},
雷涛^{1,2}, 司金戈^{1,2}

(1. 北京理工大学自动化学院复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081;
2. 北京理工大学自动化学院伺服运动系统驱动与控制工业和信息化部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 提出一种并联六轮足移动机器人. 该机器人设有多模式 Stewart 型腿结构, 其负载能力大, 集成了轮式运动和足式运动的优点, 可实现足式、轮式、轮足复合式运动. 首先, 阐述了机器人设计思路, 对电动并联六轮足机器人的硬件系统和控制系统进行设计. 其次, 针对足式运动模式, 设计了一套完整的足式“三角”步态和稳定行走算法, 该算法可降低足端与地面之间的垂直方向冲击, 防止足式运动拖腿或打滑; 针对轮式运动模式, 设计并介绍了 6 轮协同控制和轮式协同转向原理; 针对轮足复合式运动模式, 介绍了变高度、变支撑面、变轮距、主动隔振控制原理, 重点分析了主动隔振控制和变轮距控制, 可实现主动隔振及姿态平稳控制, 提高了机器人在崎岖颠簸地形下的轮足复合式运动的稳定性. 最后, 对电动并联六轮足机器人的足式、轮式、轮足复合式运动模式进行实验, 实验结果验证了本文提出的并联六轮足移动机器人设计的可行性和各运动模式下驱动与控制算法的有效性.

关键词: 轮足移动机器人; 足式运动; 轮式运动; 轮足复合式运动; 驱动与控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2020)-05-0534-16

Motion Drive and Multi-mode Control Method of an Electric Parallel Six Wheel-Legged Robot

CHEN Zhihua^{1,2}, WANG Shoukun^{1,2}, WANG Junzheng^{1,2}, XU Kang^{1,2}, WANG Xiuwen^{1,2},
LIU Daohe^{1,2}, LEI Tao^{1,2}, SI Jinge^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Servo Motion System Drive and Control, Ministry of Industry and Information Technology, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A parallel six wheel-legged mobile robot is proposed. The robot adopts a multi-mode Stewart leg structure with large load capacity, which integrates the advantages of wheeled motion and legged motion, and can realize legged, wheeled and wheel-legged compound motions. Firstly, the design idea of the robot is described, and the hardware system and control system of the electric parallel six wheel-legged robot are designed. Secondly, a complete set of legged “triangle” gaits and a stable walking algorithm are designed for the legged motion mode, which can reduce the vertical impact between the foot and the ground, and prevent foot motion from dragging or skidding. For the wheeled motion mode, the principles of cooperative control and steering of 6 wheels are designed and introduced. For the wheel-legged compound motion mode, the principles of variable height, variable support surface, variable wheel track and active vibration isolation controls are introduced with the analysis emphasis on active vibration isolation control and variable wheel track control, which can realize active vibration isolation and attitude stabilization control, and improve the stability of the wheel-legged compound motion of the robot on rough terrain. Finally, the legged, wheeled and wheel-legged compound motion modes of the electric parallel six wheel-legged robot are tested. The experimental results verify the feasibility of the design of the parallel six wheel-legged mobile robot and the effectiveness of the driving and control algorithm of each motion mode.

Keywords: wheel-legged mobile robot; legged motion; wheeled motion; wheel-legged compound motion; driving and control

1 引言 (Introduction)

移动机器人作为机器人研究领域的重要分支, 应用范围覆盖地面、空中和水下, 乃至外太空^[1-3].

现有的机器人结构类型包括: 轮式^[4]、足式^[5-6]、履带式^[7]以及仿人式^[8], 各种结构因其自身的限制都存在相应的缺陷. 目前, 移动机器人多以四足机器人^[9]为主, 其足式行走稳定性较弱, 而六足机

机器人能够提高足式行走稳定性, 足式运动能力大幅度增强^[10-12]。此外, 轮足复合式机器人^[13]很好地兼顾了足式和轮式机器人的优点, 使之兼具不同运动形式的优势, 最大限度地提高了机器人的运动性能。

近年来, 轮足式机器人已成为国内外研究热点, 如图 1(a) 所示, 由苏黎世联邦理工学院研究的四轮足机器人 ANY-mal^[14], 该轮式四足机器人在地面和倾斜地形上行走时, 表现出高鲁棒性和动态稳定性, 这依赖于基于零力矩点的运动优化策略。芬兰的赫尔辛基工业大学自主研发了一款四腿轮足式机器人 Work Partner (图 1(b))^[15], 机器人单腿采用串联式被动结构, 运行速度和负载能力一般; 美国航空航天局自行研制了六足机器人 ATHLETE (全地形六足地外探测器), 见图 1(c)^[16], 该机器人腿部同样采用串联结构, 且可完成轮式运动; 法国巴黎大学研制的 Hylos 机器人如图 1(d) 所示^[17], 该机器人腿部利用电动推杆机构实现转动, 穿越复杂地形的能力强; 国内对六轮足机器人研究相对不多, 哈尔滨工业大学自主研发的轮足混合运动机器人如图 1(e) 所示^[18], 机器人结构轻便, 单腿采用串联机构, 且足端安装有被动轮, 可实现轮足运动; 清华大学研发的轮足机器人如图 1(f) 所示^[19], 该机器人结构灵活, 复杂环境下的适应能力很强。而上述研究的轮足机器人大体可以分为 2 类: (1) 基本采用四轮足结构的移动机器人; (2) 采用串联式腿结构的六轮足复合移动机器人。这两类机器人存在以下不足之处: (1) 虽然采用串联式腿结构的六腿机器人结构简单、运动空间大, 但是其负载能力不足, 不适合大负载工况; (2) 采用四轮腿结构的机器人的足式运动速度慢, 运动效率低。

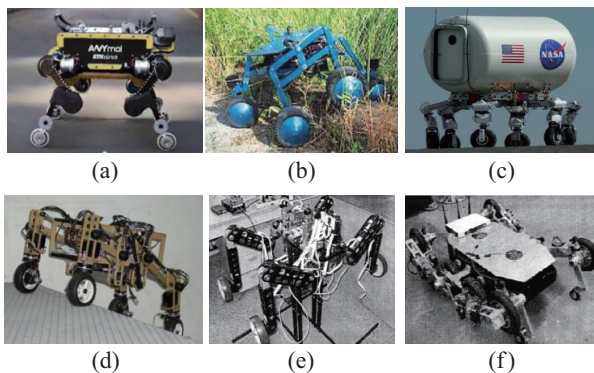


图 1 轮足机器人物理样机

Fig.1 Physical prototypes of the wheel-legged robot

因此, 针对上述两大不足之处, 本文提出了一种并联大负载多模式电动并联六轮足机器人。机器

人单腿采用并联式 6 自由度结构, 各腿均匀分布在六边形顶角处, 可实现机器人大负载能力下的足式、轮式、轮足复合式运动。

2 电动并联六轮足机器人 (Electric parallel six wheel-legged robot)

2.1 设计构思

图 2 描述了电动并联六轮足机器人的设计构思和依据。Stewart 平台是 6 自由度并联机构的基础平台, 具有多自由度、大负载、高精度等特点。因此, 将 Stewart 平台倒置, 在动平台上增加车轮驱动装置, 形成轮足混合式单腿。6 条 Stewart 异型结构腿相对于机身平台呈正六边形均匀分布。机器人的 6 足采用六边形分布方式的优点有 3 个: 首先, 在保证机器人每条腿运动过程中互相不发生干涉的前提下, 使得机器人单腿之间足式迈步的步幅能够达到最大; 其次, 便于实现机器人静步态和动步态规划, 使得足式运动稳定性强, 尤其在动步态行走中, 每次有 3 条腿处于支撑, 且 3 条支撑腿呈正三角形分布, 可实现横向和纵向快步行走, 增强了全方位行走能力; 最后, 机器人的 6 条腿呈正六边形分布, 便于实现机器人轮式原地转向和协同转弯。

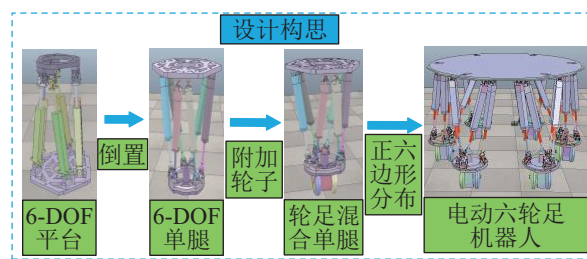


图 2 电动并联六轮足机器人设计构思

Fig.2 Design idea of the electric parallel six wheel-legged robot

2.2 系统概述

针对郝仁剑^[20]的第一代电动并联四轮足机器人 (如图 3 所示) 足式运动速度慢和稳定性低的问题, 提出一种大负载电动并联六轮足机器人 (如图 4 所示)。机器人主要由环境感知系统、运动驱动系统、电动执行机构、平台机械结构、硬件控制系统、能源系统、传感器系统等 7 大系统组成, 其基本运动性能参数如表 1 所示。

环境感知系统利用激光雷达、双目视觉以及红外摄像来采集外界信息, 为机器人运动控制提供信息, 可实现机器人在复杂环境下的全天候行走。运动驱动系统采用分布式协同控制方法, 用于实现 6 轮足机器人的足式、轮式以及轮足协同控制。机器

人单腿由电动执行机构和平台机械结构系统组成,包括6个电动缸、被动减震装置、轮式运动装置、减速器等。电动缸末端安装有位移和力传感器,且足端安装被动减震装置,可实现机器人主被动柔顺控制;而单腿轮式电机上移至机身,通过传动连杆传输动力,可降低单腿重力,有利于在足式步态下实现稳定行走控制。传感系统包括姿态传感器、位移传感器、力传感器。姿态传感器测量机身姿态,衡量机身平稳性;位移传感器用于测量机器人位置变化;力传感器安装在电动缸末端,用于柔顺控制。此外,能源系统由7块电芯、逆变器以及能源管理系统等组成,每2块电芯由一个BMS(电池管理系统)进行能源管理,可以为机器人多种类型的元器件提供能源和动力。



图3 电动并联四轮足机器人

Fig.3 The electric parallel four wheel-legged robot

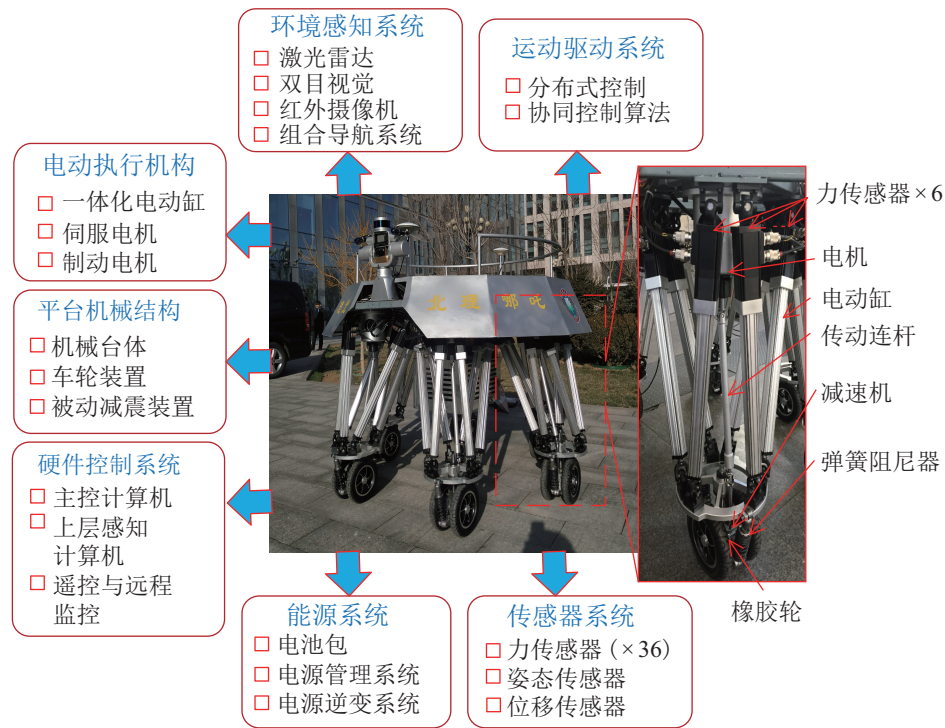


图4 电动并联六轮足机器人

Fig.4 The electric parallel six wheel-legged robot

表1 电动并联六轮足机器人运动性能参数

Tab.1 Motion performance parameters of the electric parallel six wheel-legged robot

描述	值	描述	值
躯干长度	1.8 m	最大负载	350 kg
躯干宽度	1.8 m	自重	400 kg
躯干高度	1.4 m	总功率	20 kW
减速机减速比	40:1	续航时间	4 h
足式最大速度	1.2 m/s	变高度调整范围	1.17 m~1.62 m
轮式最大速度	20 km/h	变轮距调整范围	0.66 m~1.26 m

2.3 环境感知与自主导航系统

环境感知与自主导航系统的组成如图5所示。机器人前方采用自主创新设计的2维转台,搭载有激光雷达、红外相机与双目相机,可以实现俯仰方向与方位方向上的运动,以此增大传感器的探测范围。组合导航系统安装在机器人上平台的中间位置,在没有遮挡情况下能够达到厘米级定位精度,对室外运动定位导航起着重要作用。激光雷达、红外相机、双目相机、组合导航分别通过以太网和串口通信将外界信息传输至上层控制器处理,上

层控制器将处理后的信号经过 UDP (user datagram protocol) 传送给主控计算机.

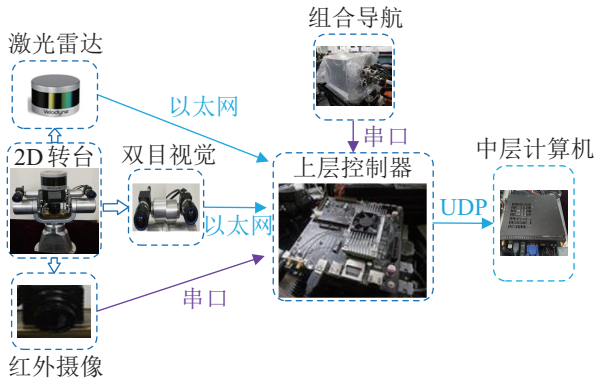


图 5 机器人环境感知系统

Fig.5 Environment perception system of the robot

2.4 控制与通信系统

如图 6 所示, 电动并联六轮足机器人的控制与通信系统主要由上、中、底 3 层组成. 其中上层为环境感知系统, 中层为主控计算机系统 ROS (机器人操作系统), 下层为 6 条腿的运动控制系统. 上层系统和底层系统通过 UDP 通讯方式与中层主控计算机进行数据传输, 上位机与主控计算机之间则使用 Wi-Fi 建立联系, 以便远程操控.

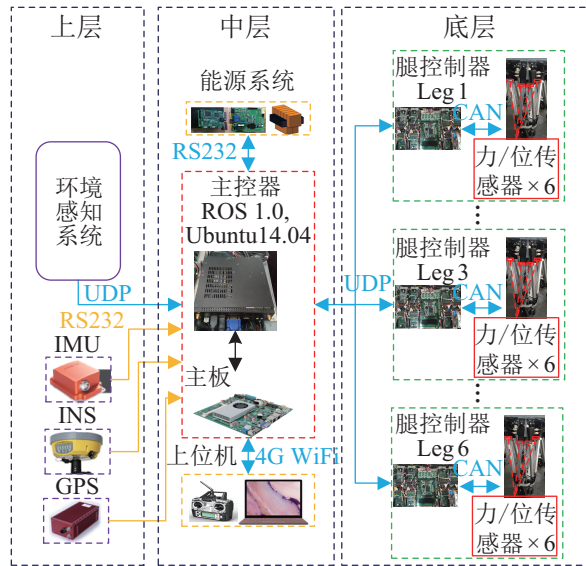


图 6 电动并联六轮足机器人控制与通信系统

Fig.6 Control and communication system of the electric parallel six wheel-legged robot

此外, 机器人的中层主控计算机采用 ROS 机器人多任务操作系统, 通过不同功能节点的进程能接收、发布、聚合各种信息 (例如传感、运动控制、状态切换、步态规划等等), 而每条腿主要采用嵌入式控制器, 6 条腿的控制器和中层主控计算

机之间采用 UDP 通信, 可实现轮式、足式、轮足复合式运动; 通过 RS232 总线从姿态传感器、GPS (全球定位系统) 和惯导模块获取自身的姿态和位置信息, 进行轮足式机器人的整体稳定控制与运动规划; 步态规划、轮足协同控制、位姿检测与重心调整等控制环节均在主控计算机中完成; 足端轨迹规划和柔性基座补偿在单腿控制器完成. 此外, 单腿 6 个电动缸末端安装有力/位传感器, 利用传感器反馈来精确地控制电动缸的位置及触地检测.

2.5 单腿运动学分析

基于 Stewart 异型结构的单腿控制是六轮足机器人整体运动控制的基础. 六轮足机器人的单腿运动学分析对六轮足机器人足式、轮式以及轮足复合式协同控制具有重要意义.

以图 4 中 RM (右中) 腿为例, 简化六轮足机器人的单腿结构模型, 如图 7 所示. RM 腿定平台坐标系 $X_B Y_B Z_B$ 建立在机器人机身六边形处, 且坐标系原点 O_B 与定平台铰链点 $B_i (i = 1, \dots, 6)$ 外接圆心重合, Y_B 位于定平面内, 且垂直于 $B_2 B_3$ 连线, Z_B 垂直于定平面向上, 而 X_B 轴方向可根据右手螺旋定则判断. 同理, RM 腿动平台坐标系 $X_P Y_P Z_P$ 分别建立在机器人腿的足端处, 且坐标系原点 O_P 与动平台铰链点 $P_i (i = 1, \dots, 6)$ 外接圆心重合, Y_P 位于动平面内, 垂直于 $P_2 P_3$ 连线, 且与定平台坐标原点 O_B 相距 L , Z_P 垂直于动平面向上, X_P 轴方向可根据右手螺旋定则判断.

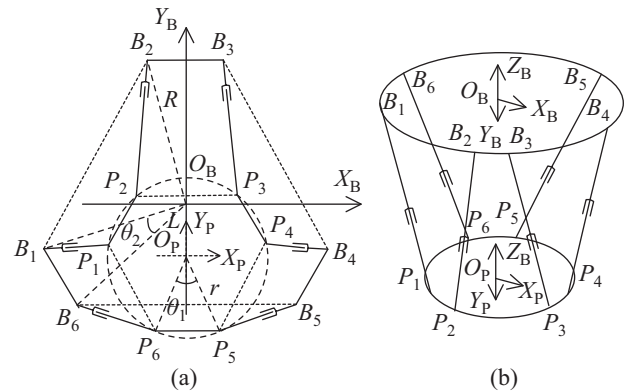


图 7 六轮足机器人 RM 腿简化模型

Fig.7 The simplified model of the RM leg of the six wheel-legged robot

由图 7 可知, RM 腿动平台坐标系 $X_P Y_P Z_P$ 在定平台坐标系 $X_B Y_B Z_B$ 中的平移矢量可表述为 $\mathbf{P} = [X \ Y \ Z]^T$, 动平台相对于动坐标系 $X_P Y_P Z_P$ 的旋转角度可表示为 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, 且动坐标系 $X_P Y_P Z_P$ 原点 O_B 固定在动平台外接圆平面中心上. 那么, 在机器人 RM 腿运动过程中, 单腿足端动坐标系相对于定坐

标系的位置姿态可用向量表示:

$$\mathbf{q} = [Z \ Y \ Z \ \varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T \quad (1)$$

式中, \mathbf{q} 表示机器人单腿足端动平台在机器人任务空间中的广义坐标. 此外, 动平台上的铰链点 P_i ($i = 1, \dots, 6$) 在动坐标系中的坐标可表示为 $\mathbf{p}_i^P = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$ ($i = 1, \dots, 6$), 定平台上的铰链点 B_i ($i = 1, \dots, 6$) 在定坐标系中的坐标可表示为 $\mathbf{b}_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$ ($i = 1, \dots, 6$). 因此, 利用空间坐标变换方法将动平台上的任意向量坐标 \mathbf{p}_i^P 转化到定平台坐标系上, 其变换后的坐标 \mathbf{P}_i 可表述为

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{T}\mathbf{p}_i^P + \mathbf{P}, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\varphi_z c\varphi_y & -s\varphi_z c\varphi_y & s\varphi_y \\ c\varphi_z s\varphi_y s\varphi_x + s\varphi_z c\varphi_x & -s\varphi_z s\varphi_y s\varphi_x + c\varphi_z c\varphi_x & -c\varphi_y s\varphi_x \\ -c\varphi_z s\varphi_y c\varphi_x + s\varphi_z c\varphi_x & s\varphi_z s\varphi_y c\varphi_x + c\varphi_z s\varphi_x & c\varphi_y c\varphi_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, \mathbf{T} 表示机器人足端动平台坐标系到定平台坐标系的旋转变换矩阵, s、c 表示正弦和余弦函数. 机器人足端动平台坐标系到定平台坐标系的旋转变换矩阵, 动平台相对于动坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 的旋转角度 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 可如下定义:

- (1) 旋转角度 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 分别表示动平台绕动坐标系 X, Y, Z 所旋转的角度;
- (2) 按照右手螺旋定则判断旋转方向正负;
- (3) 依次按照 $X-Y-Z$ 方向旋转.

因此, 根据上述运动学分析可知, 机器人单腿 6 个电动缸的位移 $\overrightarrow{B_i P_i}$ ($i = 1, \dots, 6$) 矢量方程可表述为

$$\overrightarrow{B_i P_i} = \mathbf{T}\mathbf{p}_i^P + \mathbf{P} - \mathbf{b}_i \quad (4)$$

结合式 (1)~(4) 即可得到单腿足端位置变化, 求取 6 个电动缸的位移变化量 $B_i P_i$ ($i = 1, \dots, 6$):

$$\begin{aligned} l_i = B_i P_i &= \left[(T_{11}p_{ix} + T_{12}p_{iy} + T_{13}p_{iz} + Z - b_{ix})^2 + \right. \\ &\quad (T_{21}p_{ix} + T_{22}p_{iy} + T_{23}p_{iz} + Y - b_{iy})^2 + \\ &\quad \left. (T_{31}p_{ix} + T_{32}p_{iy} + T_{33}p_{iz} + Z - b_{iz})^2 \right]^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

此外, 结合表 1, 根据机器人自身单腿机械结构, 计算出机器人足端的有效工作空间范围如图 8 所示. Z_p 轴方向的运动空间受电动缸有效伸长长度的影响, 取值范围为 $-0.222 \text{ m} \sim 0.222 \text{ m}$; 而 X_p 和 Y_p 轴方向的运动空间主要受 6 条腿在正六边形上的分布的影响, 为防止互相干涉, X_p 和 Y_p 轴方

向的运动空间取值范围分别为 $-0.35 \text{ m} \sim 0.35 \text{ m}$ 和 $-0.30 \text{ m} \sim 0.30 \text{ m}$.

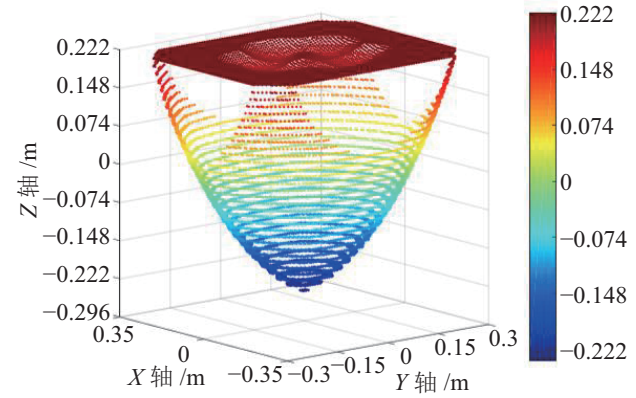


图 8 电动并联六轮足机器人控制系统

Fig.8 Control system of the electric parallel six wheel-legged robot

2.6 单腿动力学分析

建立电动并联六轮足机器人单腿动力学模型, 是为了研究 Stewart 平台 6 个电动缸输出力与足端运动参数 (如位姿、速度、加速度) 之间的关系, 为设计腿部控制器提供数学模型. 由于 Stewart 型单腿的复杂性, 其动力学模型是一个多自由度、多变量、高度非线性的复杂系统^[20], 本文采用经典拉格朗日方法来建立 Stewart 型单腿的动力学方程.

拉格朗日函数的基本形式为

$$L = K - P \quad (6)$$

式中, K 表示系统的动能, P 表示系统的势能.

对于广义坐标 \mathbf{q} , 拉格朗日函数 L 的机械系统的运动方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}$ 表示作用在机器人足端的广义力矢量.

将式 (6) 代入式 (7) 中得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

电动并联六轮足机器人单腿足端质量远超过单个电动缸质量, 所以可以省略电动缸自身惯性力的影响. 因此, 机器人单腿足端平动和转动的动能 K_p 可描述为

$$K_p = \frac{1}{2} (m_p (x_p^2 + y_p^2 + z_p^2) + \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I}_p \boldsymbol{\omega}) \quad (9)$$

式中, m_p 为单腿足端动平台的质量, x_p, y_p, z_p 为足端动平台在动平台坐标系中的坐标值, $\boldsymbol{\omega}^T$ 为动

平台转动矩阵, I_p 为动平台相对于动坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 的惯量矩阵, 其表达式为

$$I_p = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

由此, 电动并联六轮足机器人 Stewart 型单腿足端动平台的动能描述如下:

$$K_p = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (11)$$

$\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 表示广义惯量矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ 0 & 0 & 0 & m_{54} & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $m_{11} = m_p$, $m_{22} = m_p$, $m_{33} = m_p$, $m_{44} = I_x c\phi_y^2 \cdot c\psi_z^2 + I_y c\psi_y^2 s\psi_z^2 + I_z s\psi_y^2$, $m_{45} = (I_x - I_y) c\psi_y s\psi_z c\psi_z$, $m_{46} = I_z s\psi_y$, $m_{54} = (I_z - I_y) c\psi_y s\psi_z c\psi_z$, $m_{55} = I_x s\psi_z^2 + I_y c\psi_z^2$, $m_{64} = I_z s\psi_y$, $m_{66} = I_z$.

因而, 机器人单腿足端动平台的势能为

$$P_p = m_p g z = [0 \ 0 \ m_p g \ 0 \ 0 \ 0]^T \mathbf{q} \quad (13)$$

进而将式 (9)(13) 代入式 (8) 可以得到单腿足端动平台动力学方程如下:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力项, 其表现形式为

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = [0 \ 0 \ m_p g \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

式中, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 $\dot{\mathbf{q}}$ 分别表示向心力和科氏力, 推导过程可参考文 [20] 中式 (4.35), 这里不再推导.

3 电动并联六轮足机器人的足式运动 (Legged motion of the electric parallel six wheel-legged robot)

3.1 足式运动控制策略

机器人在足式运动过程中, 从迈腿到落地过程, 足端与地面水平方向和竖直方向发生冲击, 因此需要对机器人腿进行柔顺控制以消除落地冲击给机器人带来的影响.

当机器人行走在一一般平坦路面时, 由于地面不

是绝对的平坦, 如果按照给定足端轨迹进行纯位置控制, 则机器人可能出现摆动相足端提前触地或者踏空的现象, 造成机身摇晃. 为解决这种问题, 加入了足端触地检测, 将足端力传感器的反馈信息作为状态切换机, 使得摆动腿立刻切换至支撑相, 机器人提前结束摆动相阶段而进入“支撑相延时”阶段, 并在支撑相后半段伸出至中位补偿, 防止机器人连续踏入高地路面导致腿越来越短; 相反, 当机器人摆动相踏入地势不平路面时, 原有的摆动相轨迹不能使机器人的足端寻找到新的落地点, 此时机器人需要延长摆动相而进入“摆动相延迟”阶段来寻找新的落足点, 并在支撑相后半段缩回至中位补偿, 防止机器人连续踏入低势路面导致腿越来越长. 因此, 将足力检测的步态反馈作为状态切换机, 实现足端不同状态之间的切换, 从而在不平路面上实现平稳行走. 图 9 和 10 分别表示机器人在不平路面上的行走工况及步态反馈控制框图.

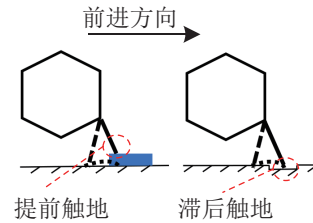


图 9 不平路面行走工况图

Fig.9 Walking condition on uneven pavement

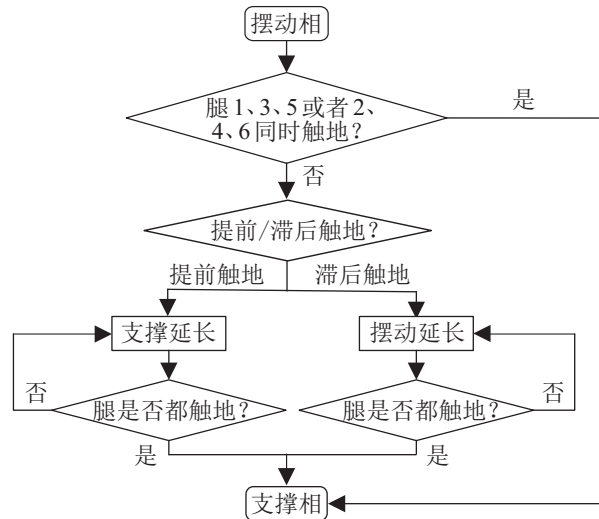


图 10 不平路面步态反馈控制框图

Fig.10 Block diagram of the gait feedback control on uneven pavement

针对机器人在复杂地形 (例如凹凸面、楼梯、斜坡等) 或者未知地形下行走的情况, 不仅仅需要在机器人足端加入触地检测, 还要对机器人进行足力分配和姿态调整, 时刻保持机器人足端与地面

完全接触且姿态水平平稳，避免踩空发生倾倒。此外，机器人在复杂地形上动态行走过程中，机器人在竖直方向上会受到较大冲击且在水平方向上容易出现打滑或者拖腿现象。为解决两大问题，首先在机器人竖直方向上加入了阻抗控制，降低竖直方向冲击力。鉴于精确的机器人动力学模型难以获取且控制精度要求高，在柔顺控制中采用了基于位置内环的阻抗控制。为了提高阻抗控制效果，文 [21] 提到需要提高位置内环的控制精度和抗干扰性，本文位置内环系统采用 ADRC（自抗扰控制）算法，有效提高位置内环控制精度，间接改善了机器人柔顺控制效果；其次，机器人在摆动相腿过程中，加入了摆腿回缩技术 [22] 和贝塞尔曲线 [23] 来设计足端

轨迹，可提高机器人水平方向的稳定性，防止机器人足端打滑或拖腿。复杂地形或者未知地形情况下的足式运动控制方法设计如图 11 所示。

3.2 “改进”三角步态设计

步态规划是让机器人腿按照一定的时间顺序和预先设定的足端轨迹进行规则运动。常见步态可划分为静步态和动步态。静步态是指机器人每次至少有 3 条以上的腿处于支撑相，其行走速度缓慢，但稳定性高。动步态是指机器人在行走过程中，处于支撑相的腿少于 3 条，且重心在不同的支撑多边形内循环切换，其行走速度快，但稳定性较差。

六足机器人具有丰富的足式步态，因篇幅有限，本文只讨论动步态。为了提高机器人行走速度

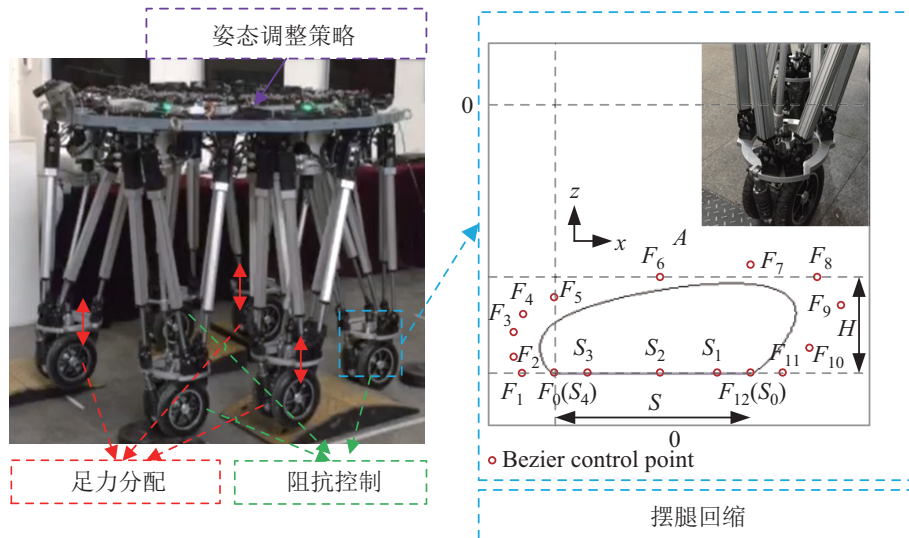


图 11 复杂地形足式运动控制方法设计

Fig.11 Design of the control method for legged motion on complex terrain

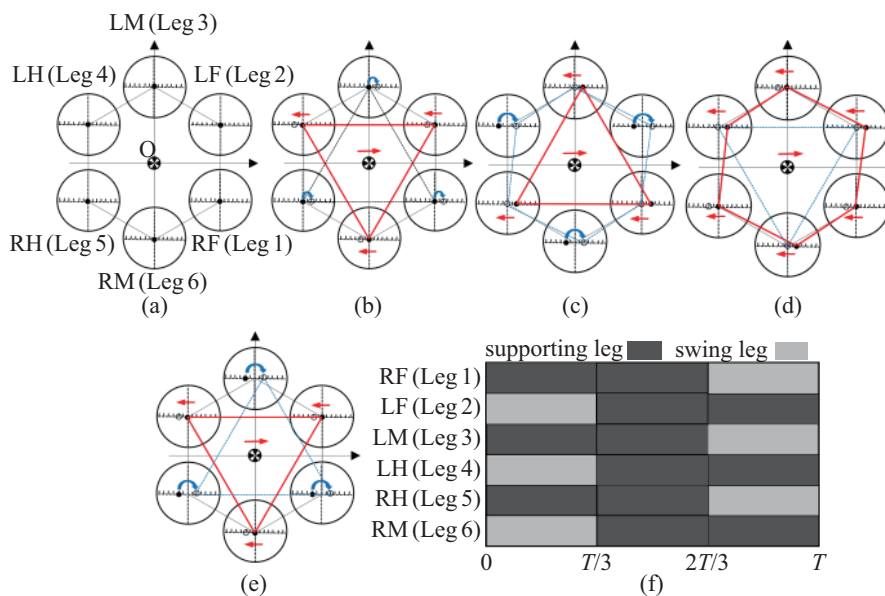


图 12 机器人改进“三角”步态及时序示意图

Fig.12 Schematic diagram of the improved triangular gait and time sequence of the robot

及稳定性, 设计了六足机器人“改进”三角步态, 步态腿可分为 A (1、3、5 腿) 和 B (2、4、6) 两组, 该三角步态满足: ①机身连续动态行走, 任意时刻都有 3 条以上的腿处于支撑相, 消除传统“3+3”步态中支撑相与摆动相交替瞬间所带来的抖振; ②设计的三角步态为最优组合, 支撑相呈正三角形分布, 可实现最大稳定裕度; ③为了使得机器人在动态行走过程中摆动相与支撑相移动距离 S 相同, 机器人在第 1 步迈腿初始状态下, 支撑相和摆动相需要移动半个步长 $0.5S$; ④在机器人行走结束的最后一个周期内, 支撑相和摆动相同样需要移动半个步长 $0.5S$, 目的是使得机器人每条腿回到初始位置. 图 12(a)~(f) 表示六轮足机器人的三角步态行走俯视图, 机器人的 6 条腿呈六边形分布, 每个圆形表示单腿的工作空间, 机器人三角步态实现过程如下: (a) 原始状态下, 机器人的 6 条腿都处于支撑状态. (b) 准备阶段, A 组所有处于腾空相的腿和 B 组所有处于支撑相的腿都需要移动半个步长 $0.5S$, 以便下一步机器人在动态行走过程中在摆动相与支撑相能够移动相同的距离 S . (c) A 组腿落地转化为支撑相, B 组支撑腿转化为摆动相. (d) A 组腿继续支撑, B 组腿落地转化为支撑相, A、B 两组同时处于支撑相. (e) B 组腿继续处于支撑相, A 组支撑腿转化为摆动相. (f) A 组腿落地转化为支撑相, B 组支撑腿转化为摆动相, 且重复进行 (c)~(e) 动作.

为了详细地描述六轮足机器人在单个周期内“改进”三角步态的工作机理, 给出了“改进”三角步态时序图. 图 12(f) 表示六轮足机器人以三角步态行走时单周期的相位图, 由图可知单步态周期 T 内, 六轮足机器人单腿摆动相和支撑相所占时间分别为 $T/3$ 和 $2T/3$, 三角步态占空比为 $T/3$, 且任意时刻都有 3 条以上的腿处于支撑相, 消除了传统“3+3”步态中支撑相与摆动相交替瞬间所带来的抖振, 可实现大负载六轮足机器人机身的连续平稳移动.

4 电动并联六轮足机器人的轮式运动 (Wheeled motion of the electric parallel six wheel-legged robot)

电动并联六轮足机器人单腿采用 Stewart 平台, 其足端动平台具有 6 个空间自由度, 使得机器人轮式转向更加灵活. 机器人足端动平台绕 Z_p 轴旋转, 可实现车轮转角控制, 沿 Z_p 轴方向移动可调整车体重心高度, 沿 X_p 轴和 Y_p 轴平移可改变车轮在底

盘的相对位置. 因此, 从轮式运动的观点来说, 电动并联六轮足机器人实质上是六轮驱动、六轮独立转向和六轮原地转向的轮足移动机器人.

4.1 基于阿克曼转向的六轮转向控制算法

图 12(a) 所示为独立驱动独立转向模式. 机器人差速转向耗能较大, 而轮足式机器人可以利用腿的灵活性进行转向. 对机器人进行运动学建模, 计算出内侧轮、外侧轮的速度与转向角度的关系, 图 13 中 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 、 v_6 分别为 1~6 号轮的速度. 当六轮足机器人的 6 轮独立转向时, 需要满足阿克曼转向原理 (图 13(b)). 此外, 为实现 6 轮转向时无侧向滑动来保证转弯过程中各车轮满足纯滚动条件, 机器人需要绕 O 点进行转弯.

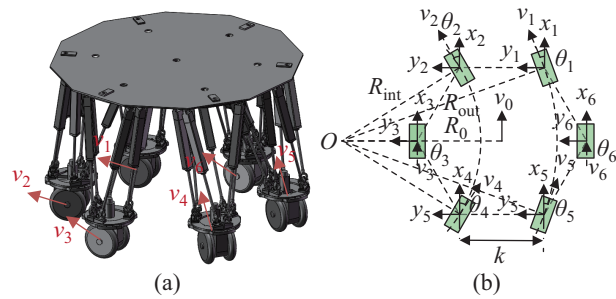


图 13 独立驱动及独立转向

Fig.13 Independent drive and independent steering

如图 13(b) 所示, 前轮 1、2 的轴距为 k , 前轮 1 的转角为 θ_1 , 前轮 2 的转角为 θ_2 , 左中轮 3 的转角为 θ_3 , 后轮 4 的转角为 θ_4 , 后轮 5 的转角为 θ_5 , 右中轮 6 的转角为 θ_6 , 内侧转弯半径为 R_{int} , 外侧转弯半径为 R_{out} , 转弯半径为 R_0 . 当机器人实现六轮独立转向时, 要想实现阿克曼转向, 即绕中心点 O 做纯滚动, 需满足式 (16):

$$\begin{aligned} v_1 &= v_5 = v_{out} = R_{out} v_0 / R_0 \\ v_2 &= v_4 = v_{int} = R_{int} v_0 / R_0 \\ v_3 &= (R_0 - k) v_0 / R_0 \\ v_6 &= (R_0 + k) v_0 / R_0 \end{aligned} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tan \theta_1 &= \frac{\sqrt{3}k}{2} \bigg/ \left(R_0 + \frac{k}{2} \right) \\ R_0 &= \frac{\sqrt{3}k}{2 \tan \theta_1} - \frac{k}{2} \\ R_{int} &= \sqrt{\left(R_0 - \frac{k}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}k}{2} \right)^2} \\ R_{out} &= \sqrt{\left(R_0 + \frac{k}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}k}{2} \right)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 六轮协同原地转向模式

图 14(a) 所示为机器人原地转向模式. 要想实现原地转向, 机器人每条腿足端动平台需绕 Z_p 轴方向旋转 60° . 此外, 机器人由姿态传感器测量目标偏航角 γ , 然后 6 轮绕机身中心做旋转运动并修正该目标偏航角 γ , 极大地提高了机器人的灵活性和旋转精度. 当机器人遇到的障碍物的宽度、高度都超过机器人所能达到的运动空间时, 机器人无法越过障碍物, 可通过原地打转调头返回或者继续寻找其他路径. 如图 14(b) 所示, 机器人原地转向需满足:

$$\begin{aligned} \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 60^\circ \\ v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v_6 \end{aligned} \quad (18)$$

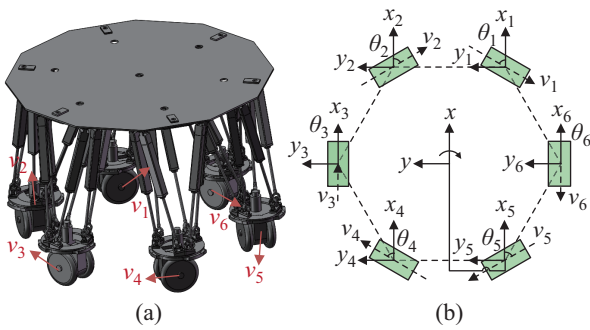
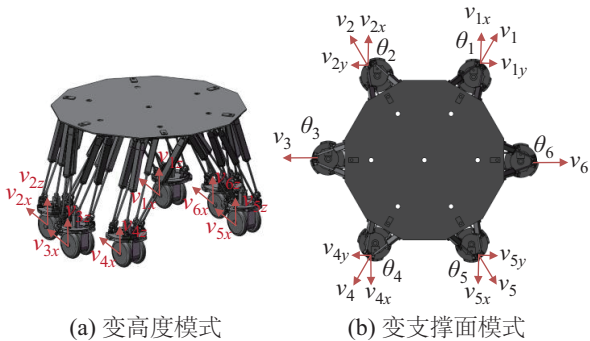


图 14 原地转向
Fig.14 Turning in situ

5 电动并联六轮足机器人的轮足复合式运动 (Wheel-legged compound motion of the electric parallel six wheel-legged robot)

轮足复合式运动的实质是在轮式运动的同时, 通过动态调整动平台基座的姿态, 提高运动过程的稳定性和灵活性^[20]. 6 自由度并联平台赋予了轮足机器人丰富的轮足复合运动形式, 包括主动变高度、变支撑面、变轮距、主动隔振控制等.



(a) 变高度模式 (b) 变支撑面模式
图 15 机器人变高度和变支撑面

Fig.15 Robot with variable height and variable support surface

5.1 变高度和变支撑面模式

图 15(a) 所示为变高度模式, 当机器人在轮式行走过程中检测到障碍物的宽度小于机身底盘的宽度且障碍物的高度大于机身当前高度时, 在不超出自身运动空间极限的情况下, 机器人可以将每条腿 6 个电动缸同时伸出, 增大 Z_p 方向高度, 通过提高自身高度来越过障碍物. 图 15(b) 所示为变支撑面模式, 当机器人在不平路面上做轮式行走时, 为了提高轮式运动稳定性, 可改变支撑面来扩大轮子之间的距离, 实现机器人重心降低, 机器人在变支撑面模式下轮子的速度与腿伸出长度之间的关系如式 (19) 所示:

$$\begin{aligned} v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v_6 \\ \theta_1 = \theta_2 = \theta_4 = \theta_5 = 30^\circ, \quad \theta_3 = \theta_6 = 90^\circ \\ v_{3x} = v_{6x} = 0, \quad v_{3y} = v_{6y} = v_3 = v_6 \\ l_{3x} = l_{6x} = 0, \quad l_{3y} = l_{6y} = \int_0^t v_3 dt = \int_0^t v_6 dt \quad (19) \\ v_{ix} = v_i \cos \theta_i, \quad v_{iy} = v_i \sin \theta_i \\ l_{ix} = \int_0^t v_{ix} dt, \quad l_{iy} = \int_0^t v_{iy} dt \end{aligned}$$

式中 $i = 1, 2, 4, 5$, l_{ix} 和 l_{iy} 分别表示机器人腿沿 X_p 和 Y_p 轴方向移动的距离; v_{ix} 为轮子速度 v_i 在 X_p 轴方向上的分量; v_{iy} 为轮子速度 v_i 在 Y_p 轴方向上的分量; t 表示机器人完成越障的时间.

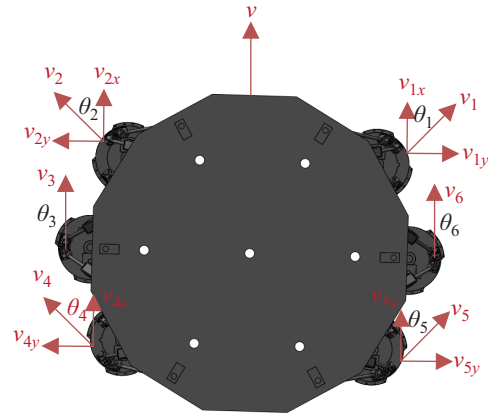


图 16 机器人变轮距
Fig.16 Robot with variable wheel track

5.2 变轮距模式

图 16 所示为变轮距模式, 当机器人遇到的障碍物的宽度大于轮距且高度小于当前机器人高度时, 机器人可通过改变轮距来越过障碍物. 机器人在越障时, 轮子速度与腿伸出长度之间的关系如式 (20) 所示:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= v_2 = v_4 = v_5, & v_3 &= v_6 = v_{ix} \\
 \theta_1 &= \theta_2 = \theta_4 = \theta_5, & \theta_3 &= \theta_6 = 0 \\
 v_{3x} &= v_{6x} = v_3 = v_6, & v_{3y} &= v_{6y} = 0 \\
 l_{3x} &= l_{6x} = \int_0^t v_3 dt = \int_0^t v_6 dt, & l_{3y} &= l_{6y} = 0 \quad (20) \\
 v_{ix} &= v_i \cos \theta_i, & v_{iy} &= v_i \sin \theta_i \\
 l_{ix} &= \int_0^t v_{ix} dt, & l_{iy} &= \int_0^t v_{iy} dt
 \end{aligned}$$

式中 $i = 1, 2, 4, 5$, θ_i 表示机器人腿绕 Z_p 轴旋转的角度.

5.3 主动隔振控制模式

当机器人在复杂地形上运动时, 主被动隔振控制可以减小机身的振动, 消除复杂地形对机身的影响, 使机身保持水平稳定. 图 17 为六轮足机器人轮式运动下的单腿主被动隔振控制模型. 主动隔振(图 18 详细讲解)由 Stewart 平台的 6 个电动缸基于阻抗控制来完成. 机器人的单腿可以看作是一个刚度和阻尼系统, 通过跟踪单腿足端期望力, 可以实现单腿足端位置的动态调整, 从而达到对复杂路面的隔振效果. 被动隔振由足端橡胶车轮和机械弹簧阻尼器组成, 用于吸收高频扰动信号.

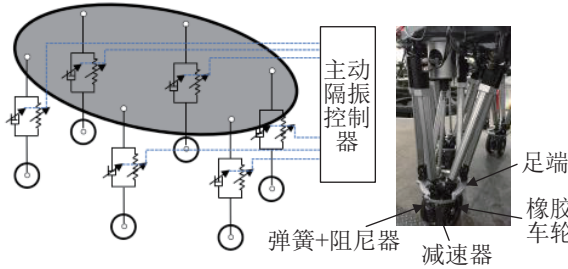


图 17 电动并联六轮足机器人的单腿主动隔振控制示意图
Fig.17 Schematic diagram of the active vibration isolation control for a single leg of the electric parallel six wheel-legged robot

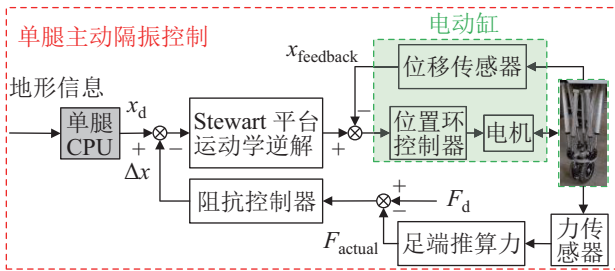


图 18 电动并联六轮足机器人的单腿主动隔振控制原理
Fig.18 Principle of the active vibration isolation control for a single leg of the electric parallel six wheel-legged robot

图 18 为电动并联六轮足式机器人的单腿主动隔振控制原理图. x_d 表示机器人足端期望轨迹, Δx 表示位置修正量, F_d 表示足端期望力, F_{actual} 表示

机器人足端在垂直方向上的推算力. 当机器人在复杂地形(如斜坡、起伏地形)上做轮式运动时, 被动隔振控制无法完全保证机身水平稳定, 为了解决机身不平稳问题, 采用基于阻抗控制的主动隔振控制算法来动态调整电动缸长度, 实现机身水平稳定. 阻抗控制器由位置内环和阻抗外环组成. 将期望力 F_d 与足端实际力 F_{actual} 的偏差作为阻抗控制器的输入, 由阻抗控制器外环产生位置校正量 Δx . 然后, 将期望轨迹 x_d 与位置修正量 Δx 相减并反解为单缸位置闭环控制器的输入量, 从而实现单腿足端轨迹跟踪控制, 最终通过调整足端垂直方向上的位置高度实现主动隔振控制. 基于阻抗控制的主动隔振控制表达式如下:

$$M\Delta\ddot{x} + B\Delta\dot{x} + K\Delta x = F_\zeta \quad (21)$$

其中, $F_\zeta = F_d - F_{actual}$ 表示足端力的偏差, $F_{actual} = F_{iz}$ ($i = 1, \dots, 6$) 表示每条腿的足端与地面在垂直方向上的接触力, M, B, K 分别表示目标惯性参数、目标阻尼参数和目标刚度参数.

6 实验 (Experiment)

本文设计的电动并联六轮足机器人是一个多自由度、强耦合、非线性的复杂系统, 该机器人单腿采用异形结构的 Stewart 平台, 不仅可以增加机器人 6 条腿的支撑面, 提高机器人稳定性, 而且并联 Stewart 平台负载能力大, 集成了轮式运动和足式运动的优点, 可实现轮式、足式、轮足复合式运动. 此外, 对电动并联六轮足机器人在轮式、足式、轮足复合式等运动方式下的野外运动性能进行实验, 通过实验验证了本文所提出的并联式六轮足机器人设计的可行性和各运动模式下驱动与控制的有效性.

6.1 轮式运动

轮式运动模式下, 通过视觉传感系统将外界信息传输至机器人中心控制器, 中心控制器进行决策并下发至底层单腿控制器, 可实现轮式转向和六轮独立驱动. 轮式运动续航时间为 2 h, 最快速度可达 20 km/h, 最大负载为 350 kg.

6.1.1 载人原地转向实验

实验如图 19 所示, 机器人在最大负载范围内, 负载 3 人可实现原地转向运动. 当机器人检测到障碍物的宽度和高度都超过机器人所能达到的运动空间时, 机器人无法越过障碍物, 其将 6 条 Stewart 型腿的足端动平台相向转动 60° , 通过六轮独立驱动实现原地打转调头返回或者继续寻找其他路径.

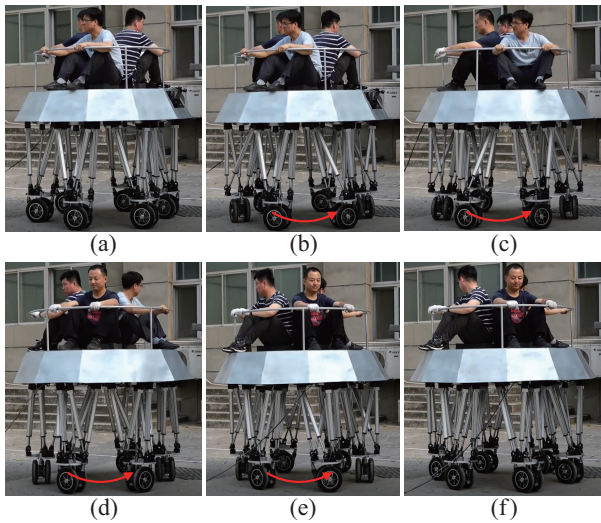


图 19 载人原地转向实验结果

Fig.19 Experimental results of manned steering in situ

6.1.2 “正六边形”轮式载人实验

当机器人检测到障碍物的宽度和高度都在其所能达到的运动空间内时,为了提高轮式运动的稳定性,调整单腿之间的轮距,使机器人6条腿足端支撑点呈正六边形分布,实现机器人稳定性最大化,载人正六边形轮式运动实验结果如图20所示。

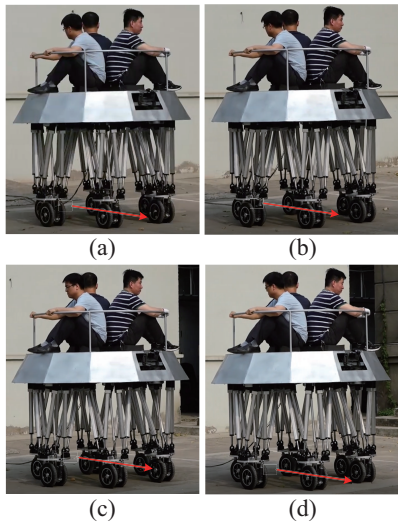


图 20 “正六边形”载人运动实验结果

Fig.20 Experiment results of manned motion with “regular hexagon” configuration

6.1.3 “矩形”轮式载人实验

当机器人在特殊环境下做轮式运动时,例如“双边桥梁”“狭窄的道路”“起伏地形”等,为了更好地适应不同环境道路,提高机器人轮式运动的穿越能力,机器人通过调整两侧轮腿之间的距离,实现齐轮距运动。此时,机器人6条腿足端支撑点呈“矩形分布”,机器人可在特殊环境下运动。由于无法找到双边桥实验环境,因此只在地面模拟了

载人矩形轮式运动,实验结果如图21所示。

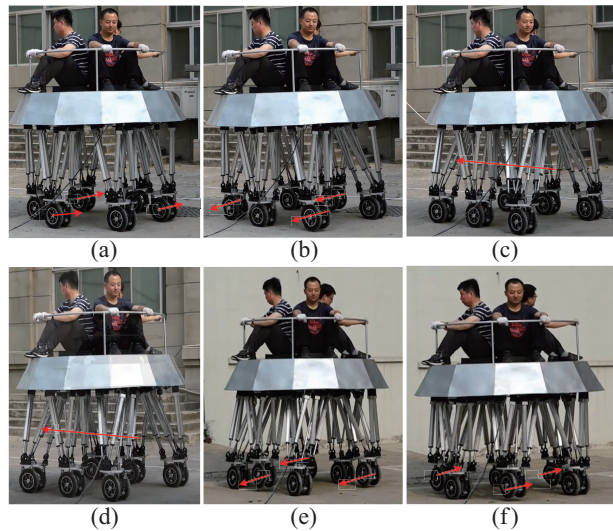


图 21 “矩形”距轮式载人实验结果

Fig.21 Experimental results of manned motion with “rectangular” configuration

6.2 足式运动

为了提高轮足机器人的足式动态行走能力,在郝仁剑^[20]博士的四轮足机器人基础上,设计了六轮足并联机器人。六轮足机器人不仅具备文[20]中机器人的所有功能,最重要的是足式步态种类多,稳定性高,环境适应能力强。为了解决足式对角步态切换瞬间的稳定性问题,设计了六足机器人“改进”三角主步态,机器人腿可分为A(1、3、5腿)和B(2、4、6)两组,足式“改进”三角步态规划参数如表2所示。

表 2 改进“三角”步态参数
Tab.2 Parameters of the improved “triangle” gait

步态参数	值
步长	0.20 m
步高	0.18 m
周期	3 s
支撑相时间	2 s
摆动相时间	1 s

6.2.1 改进“三角”步态越障实验

为验证本文的“改进三角”步态的有效性,以六轮足机器人为实验平台,在室内和室外进行越障实验。图22为在不同地形下的改进三角步态越障实验。其中,图22(a)(b)实验分别在室内不平整地形和木台阶环境下进行,通过足式运动控制方法实现不平路面和复杂环境下的足式稳定行走。此外,为了更好地验证步行性能,如图22(c)(d)所示,还对机器人在室外地形(如松软地形、水泥台阶)下的步行越障性能进行了验证。实验结果良好。

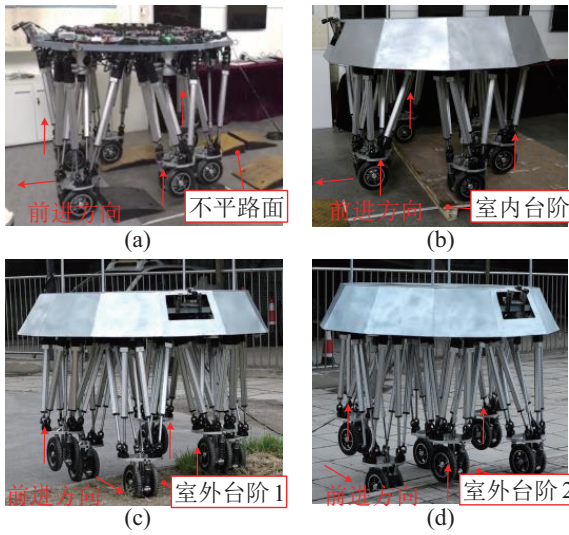


图 22 室内/外改进“三角”步态越障实验

Fig.22 Obstacle surmounting experiment with the improved “triangle” gait in indoor/outdoor environments

6.2.2 室内复杂地形“对角”步态行走实验

为了进一步量化并验证六轮足机器人在复杂地

形下的稳定行走策略设计的合理性, 设计了室外起伏地形载人足式行走实验, 实验中设置障碍物尺寸分别为 $1.20\text{ m} \times 0.80\text{ m} \times 0.06\text{ m}$, $0.70\text{ m} \times 0.30\text{ m} \times 0.04\text{ m}$, 以及半径 $0.10\text{ m} \times$ 高度 0.05 m 的圆柱(图 23). 整个实验过程中, 在使用/未使用足式稳定行走控制算法的条件下, 做了实验进行对比, 各腿受力及姿态角变化如图 24、25 所示.

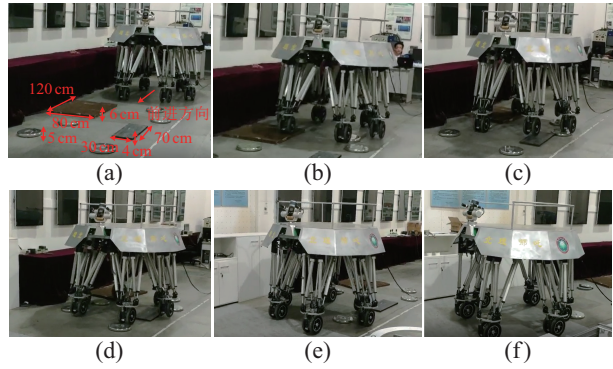


图 23 复杂地形下足式稳定行走实验

Fig.23 Experiment of stable legged walking on complex terrain

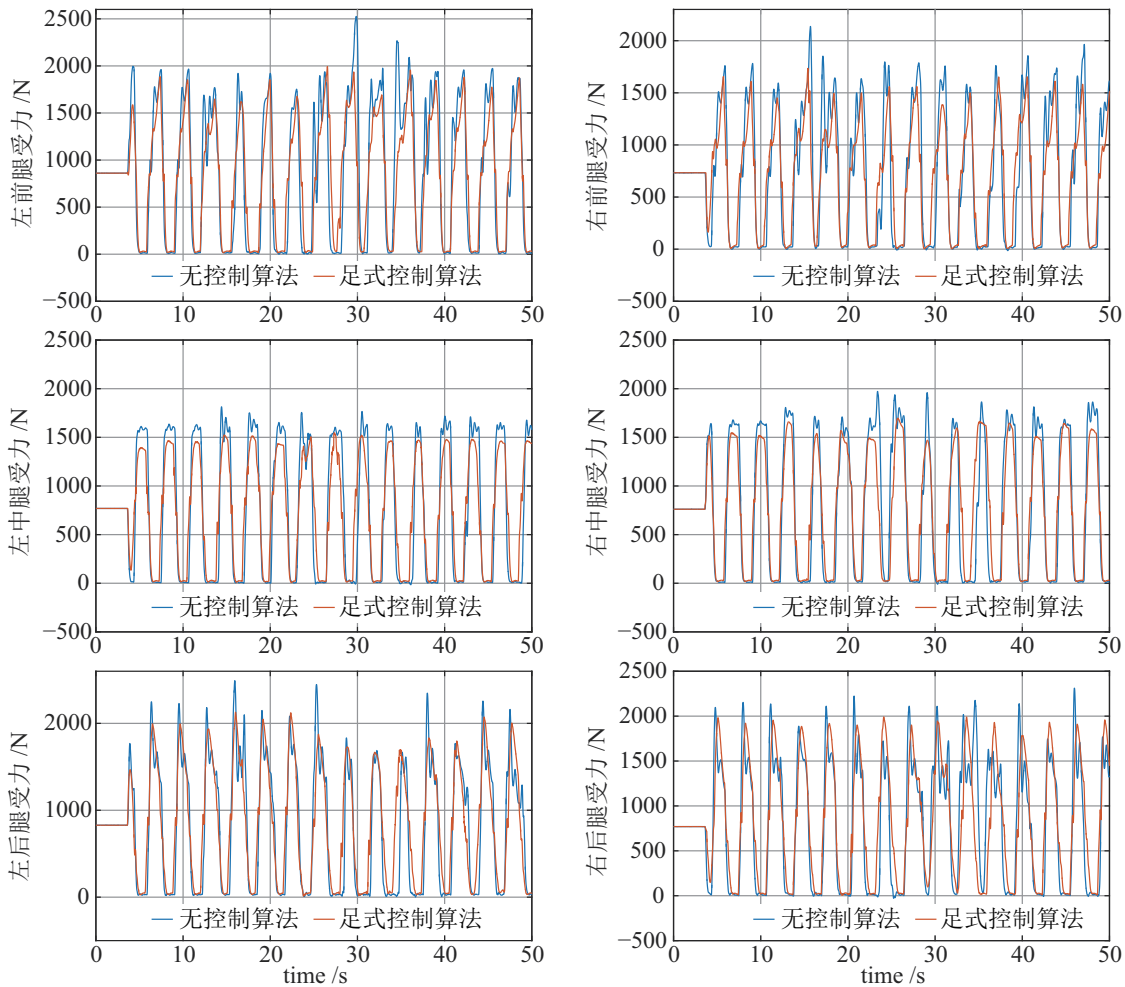


图 24 复杂地形下足式行走各腿足端的竖直方向受力

Fig.24 Vertical forces on the foot end of each leg in legged walking on complex terrain

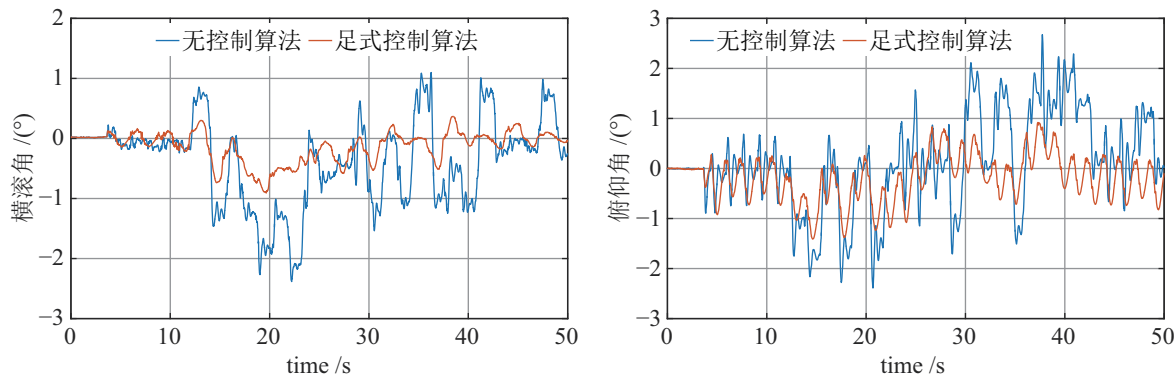


图 25 复杂地形下机身姿态角

Fig.25 Attitude angle of the robot body on complex terrain

图 24 说明了机器人足端受到的地面冲击力大小, 其中蓝色线表示无阻抗控制的力曲线, 红色线表示有阻抗控制的力曲线. 从图 24 可以看出, 在足式行走过程中, 无阻抗控制的足端与地面接触力较大, 尤其是足端踩到凸起障碍物上, 每条腿的足端冲击基本在 $1500\text{ N}\sim 2000\text{ N}$, 远远超过每条腿足端期望力 800 N 左右, 且冲击力大幅度变化会直接影响到机身在垂直方向上的稳定性. 而稳定性可通过图 25 的姿态角获取, 后续将针对姿态变化作详细阐述. 相比之下, 垂直方向上加入阻抗控制之后, 机器人足端力由之前的 2000 N 及以上降到 $1400\text{ N}\sim 1700\text{ N}$ 左右, 足端力减小了 300 N 左右, 显著降低了垂直方向上的足端冲击力.

同理, 图 25 说明了机器人在整个足式行走过程中机身的姿态变化情况. 图中蓝色线表示未加入足式控制算法(阻抗控制和摆腿回缩技术)的姿态曲线, 红色线表示加入足式控制算法(阻抗控制和摆腿回缩技术)后的姿态曲线. 从实验结果可以看出, 未加入足式控制算法时横滚角在 $-2.4^\circ\sim 1.3^\circ$ 之间变化, 俯仰角在 $-2.4^\circ\sim 2.8^\circ$ 之间变化, 且变化幅度都较大. 造成此现象是由于没有通过阻抗控制来消除机器人足端与凸起障碍物之间的垂直方向冲击力. 但是, 加入足式控制算法之后, 机器人机身的横滚角和俯仰角平均降低了 70% , 且横滚角保持在 $-1.0^\circ\sim 0.45^\circ$, 俯仰角保持在 $-1.4^\circ\sim 0.9^\circ$, 大大提高了机身稳定性.

6.3 轮足复合运动

六轮足机器人轮足复合式运动的核心是足端轮子和 Stewart 平台协同工作, 两者控制相互耦合. 为了验证机器人轮足复合运动模式的合理性, 对变高度、变轮距、主动隔振等情况进行实验.

6.3.1 变高度越障实验

机器人在有障碍物的非结构化道路上运动时,

利用激光雷达检测其前方障碍物的大小, 如果所遇到的障碍物的高度大于当前机身底盘的高度, 且障碍物宽度小于两侧轮子的间距, 在不超过自身运动空间极限的情况下, 机器人可以通过提高机身底盘的高度来越过障碍物, 实验测试结果如图 26 所示. 其中, 机身底盘高度的可调范围为 $1.178\text{ m}\sim 1.622\text{ m}$.

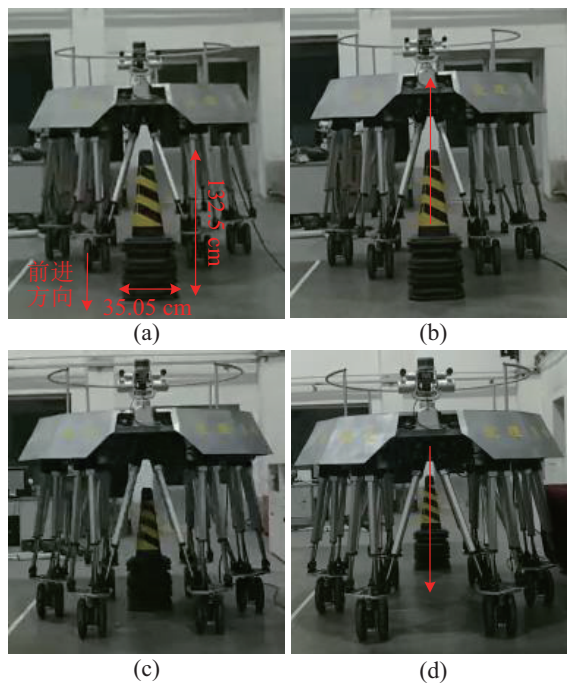


图 26 变高度越障实验

Fig.26 Experiment of obstacle surmounting with variable height

6.3.2 变轮距越障实验

同理, 当机器人利用激光雷达检测前方障碍物时, 如果障碍物的宽度大于轮距, 且高度小于当前机器人高度, 那么机器人可通过变轮距越过障碍物, 实验测试结果如图 27 所示. 轮距的可调整范围为 $0.66\text{ m}\sim 1.26\text{ m}$.

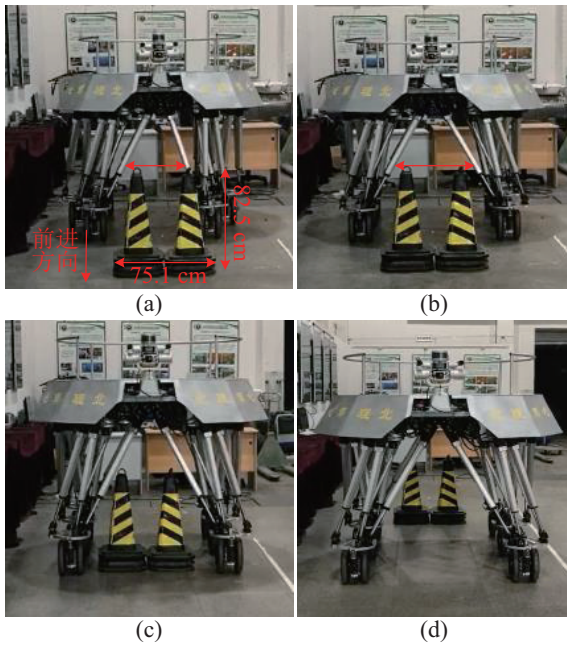


图 27 变轮距越障实验

Fig.27 Obstacles surmounting experiments with variable wheel track

6.3.3 不同地形下的姿态平稳控制实验

在野外不同地形环境下, 对电动并联六轮足机器人做了一系列实验, 见图 28. 在轮腿复合运动模式下, 采用轮式姿态平稳控制策略(包括高度调整、主动隔振、姿态调整)在不平整路面、沟壑地形、松软地形、雪地等不同地形下进行测试, 实验结果显示机器人能保持机身水平稳定.

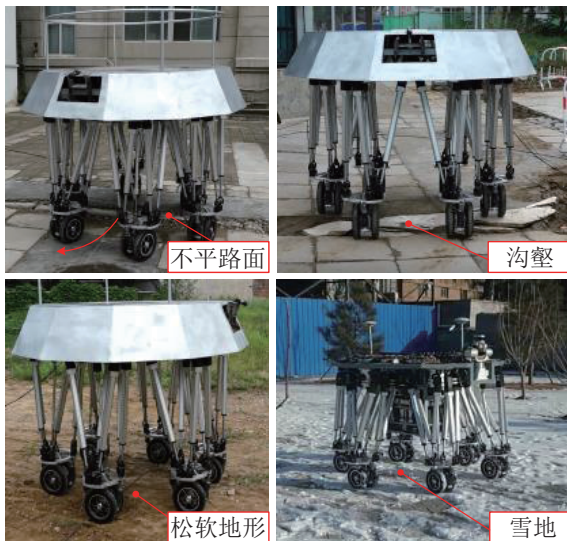


图 28 不同地形下主动隔振实验

Fig.28 Active vibration isolation experiment on different terrains

为了进一步验证本文针对轮腿复合运动模式提出的轮式姿态平稳控制算法的有效性, 通过机器人各腿足端受力和机身姿态角变化来衡量机身是否

水平稳定. 如图 29 所示, 在室内搭建斜坡地形, 2 个斜坡的长、宽、高分别为 85 cm、50 cm、10 cm, 83 cm、47 cm、8 cm. 此外, 轮式电机工作在力矩模式下, 外环采用速度闭环控制模式. 机器人以 0.5 m/s 的速度前进. 整个实验过程中, 在使用/未使用轮式姿态平稳控制算法的条件下做了实验进行对比, 各腿的受力及姿态角变化如图 30、31 所示.

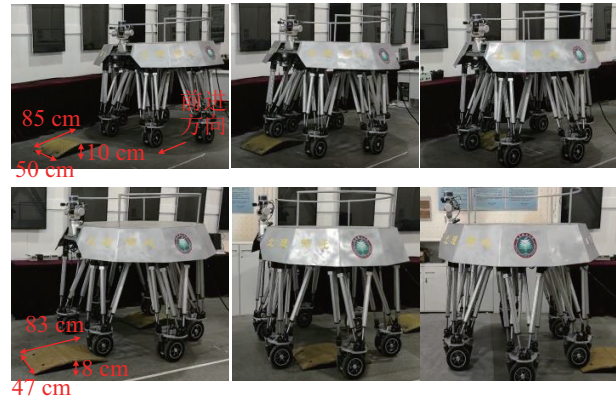


图 29 斜坡地形下轮式平稳控制实验

Fig.29 Stable control experiment of wheeled motion on slope terrain

图 30 表示机器人在斜坡地形下做轮式运动时, 足端受到来自地面和斜坡的作用力, 其中蓝色线表示未采用轮式平稳控制时的足端受力曲线, 红色线表示采用轮式平稳控制后的足端受力曲线. 从图中可以看出, 在轮式运动过程中, 一旦足端轮子接触斜坡, 在未采用主动隔振控制时, 足端与地面接触力较大, 尤其是足端踩到凸起障碍物上时, 特别是左前腿和右后腿在 40 s~50 s 之间, 接触力在 2000 N 以上, 远远超过每条腿足端期望力 800 N, 且从接触力可以看出, 未采用主动隔振控制时, 6 条腿都出现了悬空现象, 即足端接触力为 0. 而加入主动隔振控制后, 每条腿在不同时段接触斜坡时, 足端与地面接触力大大降低, 都在 1500 N 以下, 最主要的是 6 条腿都没有出现悬空现象, 即足端接触力远远大于 0. 因此, 主动隔振不仅可以降低足端接触力, 而且能够防止腿悬空.

同理, 图 31 表示机器人沿斜坡做轮式运动的过程中机身姿态的变化情况. 从实验结果可以看出, 未加入轮式平稳控制算法时横滚角(蓝色线)在 $-2.1^{\circ} \sim 1.8^{\circ}$ 变化, 俯仰角在 $-4.6^{\circ} \sim 4.3^{\circ}$ 变化, 且变化幅度都较大. 造成此现象是由于机器人车轮与斜坡接触过程中, 没有通过轮式平稳控制来消除接触力. 但是, 加入轮式平稳控制算法之后, 机器人机身横滚角和俯仰角分别保持在 $-0.7^{\circ} \sim 0.6^{\circ}$ 和 $-1.8^{\circ} \sim 1.6^{\circ}$ 之间, 大大提高了机身稳定性.

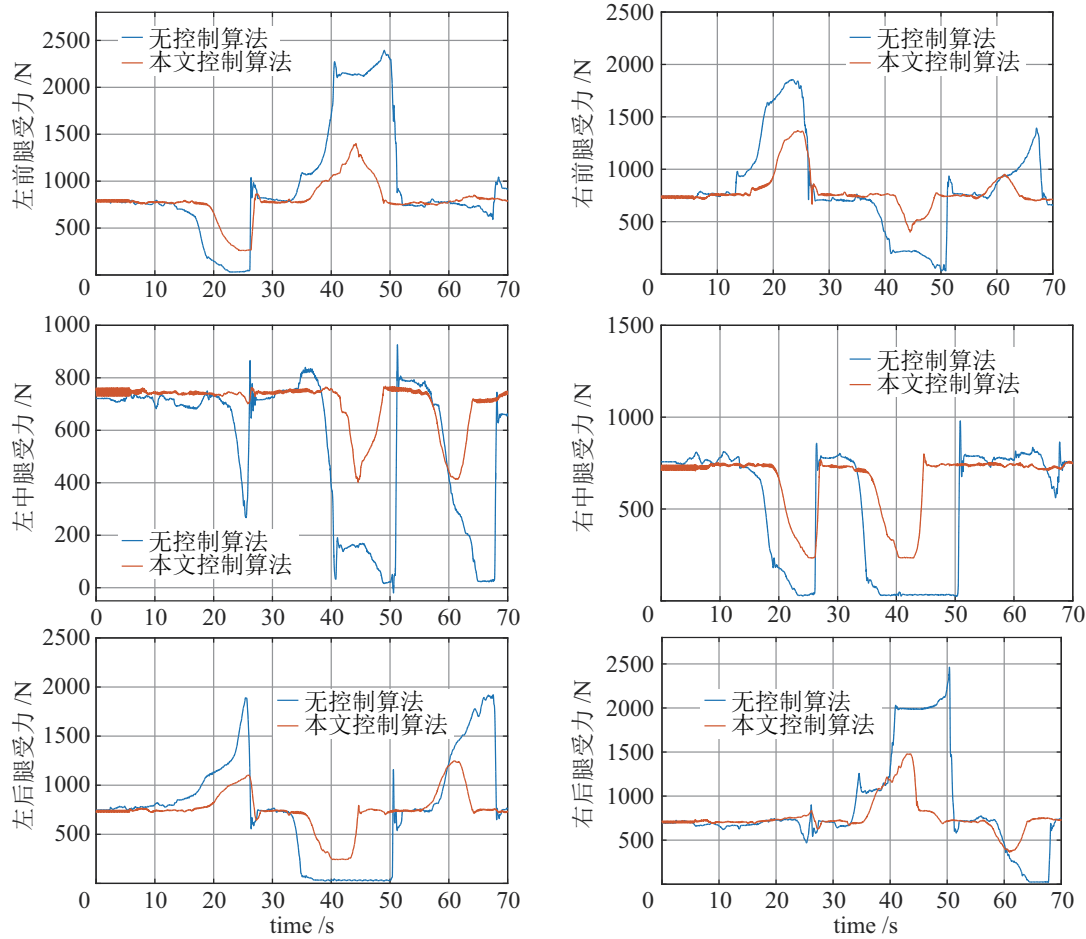


图 30 斜坡地形下各腿足端的竖直方向受力

Fig.30 Vertical forces on the foot end of each leg on slope terrain

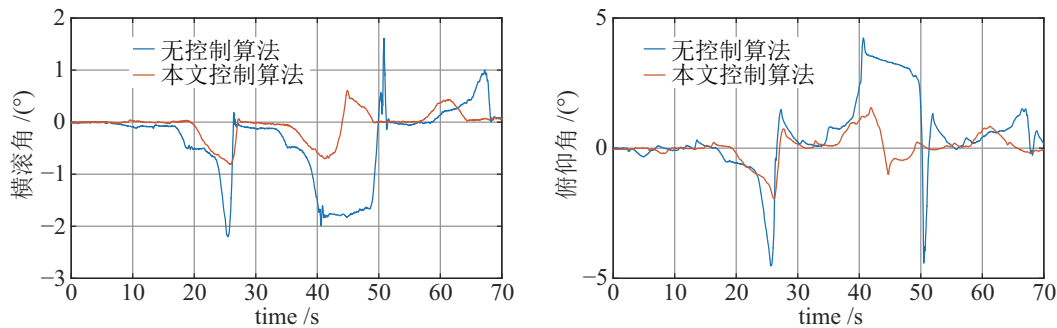


图 31 斜坡地形下的机身姿态角

Fig.31 Attitude angle of the robot body on slope terrain

7 结论 (Conclusion)

本文创新性地提出了一种多模式 Stewart 型电动并联六轮足移动机器人, 有效地解决了传统四足机器人不能以足式方式快速稳定行走的问题, 该机器人单腿采用异形结构的 Stewart 平台, 相比传统串联足式机器人, 不仅可以增加机器人 6 条腿的支撑面, 提高机器人稳定性, 而且并联 Stewart 平台负载能力大, 集成了轮式运动和足式运动的优点,

可实现轮式、足式、轮足复合式运动. 六轮足机器人足式运动和轮式运动的最大速度可达 1.2 m/s 和 5.6 m/s, 最大负载为 350 kg, 机器人机身平台有望用于物资运输、资源勘探、星表探测、无人机运输平台. 在足式步态设计基础上, 提出了不平路面和复杂地形下的稳定行走控制策略, 通过实验验证了方法的可行性. 分析了轮式运动原地转向和六轮独立驱动原理, 实验实现了轮式运动基本功能. 为增强机器人在复杂环境下的适应性, 提高轮式运行速

度, 设计了轮足复合运动模式, 提出一套轮足机器人在各种地形下的平稳控制策略, 实验结果表明该策略对机器人机身姿态调整具有明显效果。

参考文献 (References)

- [1] Hong D K, Hwang W, Lee J Y. Design, analysis, and experimental validation of a permanent magnet synchronous motor for articulated robot applications[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(3). DOI: 10.1109/TMAG.2017.2752080.
- [2] 柳倩, 桂建军, 杨小微. 工业机器人传感控制技术研究现状及发展态势——基于专利文献计量分析视角[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 612-620.
Liu Q, Gui J J, Yang X W. Research status and development trends for sensing and control technologies of industrial robot from the viewpoint of patent analysis[J]. *Robot*, 2016, 38(5): 612-620.
- [3] 王天然. 机器人技术的发展[J]. *机器人*, 2017, 39(4): 385-386.
Wang T R. Development of robotics[J]. *Robot*, 2017, 39(4): 385-386.
- [4] Sorour M, Cherubini A, Khelloufi A, et al. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 118: 131-143.
- [5] Chen J, Liang Z C, Zhu Y H, et al. Improving kinematic flexibility and walking performance of a six-legged robot by rationally designing leg morphology[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(4): 608-620.
- [6] Fang L, Gao F. Type design and behavior control for six legged robots[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(3). DOI: 10.1186/s10033-018-0259-9.
- [7] 刘彦伟, 刘三娃, 梅涛, 等. 一种仿生爪刺式履带爬壁机器人设计与分析[J]. *机器人*, 2019, 41(4): 526-533.
Liu Y W, Liu S W, Mei T, et al. Design and analysis of a bio-inspired tracked wall-climbing robot with spines[J]. *Robot*, 2019, 41(4): 526-533.
- [8] 王海涛, 彭熙凤, 林本末. 软体机器人研究进展[J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(2): 94-106.
Wang H T, Peng X F, Lin B M. Research development of soft robots[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 94-106.
- [9] 周坤, 李川, 李超, 等. 面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 210-219.
Zhou K, Li C, Li C, et al. Motion planning method for quadruped robots walking on unknown rough terrain[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 210-219.
- [10] 李满宏, 张明路, 张建华, 等. 六足机器人关键技术综述[J]. *机械设计*, 2015, 32(10): 1-8.
Li M H, Zhang M L, Zhang J H, et al. Review on key technology of the hexapod robot[J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(10): 1-8.
- [11] 王冠宇, 丁亮, 高海波, 等. 增强爬坡能力的六足机器人分步二次规划足力分配算法及试验验证[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 11-20.
Wang G Y, Ding L, Gao H B, et al. Decomposed QP CFDA for hexapod robots to enhance the slope-climbing ability and experimental validation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 11-20.
- [12] 陈杰. 六足机器人崎岖地形步行运动规划与控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Chen J. Research on motion planning and control strategy of hexapod robot walking in rugged terrain[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] Xu K, Wang S K, Yue B K, et al. Obstacle-negotiation performance on challenging terrain for a parallel leg-wheeled robot[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(1): 377-386.
- [14] de Viragh Y, Bjelonic M, Bellicoso C D, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized ZMP constraints[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1633-1640.
- [15] Halme A, Luksch T, Ylönen S. Biomimicking motion control of the WorkPartner robot[J]. *Industrial Robot*, 2004, 31(2): 209-217.
- [16] Estremera J, Cobano J A, Gonzalez de Santos P. Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5): 700-711.
- [17] Grand C, Benamar F, Plumet F. Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(3): 477-495.
- [18] Wang P F, Huang B, Sun L N. Walking research on multi-motion mode quadruped bionic robot based on moving ZMP [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 1935-1940.
- [19] 郭丽峰, 陈慧, 赵旦谱. 一种轮腿式变结构移动机器人研究[J]. *制造业自动化*, 2009, 31(10): 1-6.
Guo L F, Chen K, Zhao D P. Study on a wheel-legged hybrid mobile robot[J]. *Manufacturing Automation*, 2009, 31(10): 1-6.
- [20] 郝仁剑, 王军政, 史大威, 等. 基于速度矢量的四足机器人间歇步态规划方法[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 540-549.
Hao R J, Wang J Z, Shi D W, et al. Intermittent gait planning method of quadruped robot based on velocity vector[J]. *Robot*, 2016, 38(5): 540-549.
- [21] Chen Z H, Wang S K, Xu K, et al. Research on high precision control of joint position servo system for hydraulic quadruped robot[C]//38th Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 755-760.
- [22] Karssen J G D, Haberland M, Wisse M, et al. The effects of swing-leg retraction on running performance: Analysis, simulation, and experiment[J]. *Robotica*, 2015, 33(10): 2137-2155.
- [23] He Y D, Wang J Z, Ke X F, et al. Stable walking for legged robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 1-7.

作者简介:

陈志华 (1991 -), 男, 博士生. 研究领域: 机器人步态规划与运动控制.

汪首坤 (1977 -), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 运动驱动与控制, 电液伺服系统静态性能测试.

王军政 (1964 -), 男, 博士, 教授. 研究领域: 伺服运动驱动与控制, 机器人控制, 负载模拟与静态试验.