

六轮多模式移动机器人设计与运动控制

朱群为 罗自荣 蒋涛 卢钟岳 夏明海 洪阳

(国防科技大学智能科学学院,长沙 410005)

摘要:针对传统六轮机器人转弯半径大、运动不灵活和地形适应性差等问题,提出了一种具有铰接式双摇臂悬架和独立驱动转向结构的六轮多模式移动机器人。机器人总体结构包括独立驱动转向模块、一体化机身、铰接式摇臂悬架模块和控制模块,能实现直行、平移、原地转向和绕任意点转弯等多模式运动方式,具有机动、灵活、地形适应性强等优势。分析了机器人多模式运动机理和越障原理,建立了机器人多模式运动学模型,确定了机器人多模式运动下的运动参数关系式。机器人控制系统采用电机任务、传感器任务和遥控器任务的多任务并行模式,采用一种基于UCOS III并行操作系统的多模式PID控制器,提高了机器人控制系统实时性、可靠性和可移植性。搭建了六轮多模式移动机器人仿真环境和试验样机,验证了机器人多种模式下的基本运动性能和楼梯、垂直障碍、壕沟等多种复杂地形的通过能力。测试了在不同地形下机器人运动姿态和运动速度等,分析了机器人多模式仿真运动和样机试验结果,证明该六轮多模式移动机器人结构具有比传统六轮机器人更好的通过性和地形适应性能,研究结果可为六轮机器人结构优化改进提供参考。

关键词:六轮驱动与转向;双摇臂悬架;UCOS III操作系统;多模式运动控制;PID控制

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2025)03-0523-08

OSID:



Design and Motion Control of Six-wheeled Multimodal Mobile Robot

ZHU Qunwei LUO Zirong JIANG Tao LU Zhongyue XIA Minghai HONG Yang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410005, China)

Abstract: Aiming at the problems of large turning radius, inflexible motion and poor terrain adaptability of traditional six-wheeled robots, a six-wheeled multimodal mobile robot with articulated double rocker arm suspension and independent drive steering structure was proposed. The overall robot architecture consisted of an independently driven steering module, an integrated body, an articulated rocker suspension module and a control module, which can realize multimodal movement modes such as straight running, translation, in-situ steering, and turning around any point, and had the advantages of manoeuvrability, flexibility, and strong adaptability to the terrain. The multimodal motion mechanism and obstacle-crossing principle of the robot were analyzed, the multimodal kinematics model of the robot was established, and the relational equations of motion parameters under the multimodal motion of the robot were determined. The robot control system adopted a multi-task parallel mode of motor task, sensor task and remote control task, and a multimodal PID controller based on UCOS III parallel operating system, which improved the real-time, reliability and portability of the robot control system. The simulation environment and test prototype of a six-wheeled multimodal mobile robot were built, and the basic motion performance of the robot in multiple modes and the ability to pass through various complex terrains such as stairs, vertical obstacles and trenches were verified. The data of the robot's motion attitude and motion speed under different terrains were tested, and the results of the robot's multi-mode simulation motion and prototype test were analyzed to prove that the six-wheeled multimodal mobile robot structure had a better performance of passability and terrain adaptability than that of the traditional six-wheeled robot, and the study can provide a reference for the optimization and improvement of the structure of six-wheeled robots.

Key words: six-wheel drive and steering; double rocker suspension; UCOS III operating system; multimodal motion control; PID control

收稿日期:2024-01-25 修回日期:2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52105289)

作者简介:朱群为(1999—),女,博士生,主要从事仿生机器人设计与驱动研究,E-mail:zhuqunwei@nudt.edu.cn

通信作者:罗自荣(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事仿生机器人、能源与动力和微纳机器人研究,E-mail:luozirong@nudt.edu.cn

0 引言

轮式移动机器人具有控制简单、速度快等优势,广泛应用于工农业生产、空间探测、资源勘探、抢险救灾等领域^[1-2]。相较于四轮移动机器人,六轮移动机器人由于承载能力强、稳定性强等优点受到了世界各国的广泛关注、研究和应用^[3-5],但同时传统的六轮机器人也具有地形适应性差、转弯能力弱、运动不灵活等问题亟待解决^[6]。

针对六轮移动机器人地形适应性差的问题,现有解决方案大致可分为:主动越障型、被动越障型、主被动越障结合型和结构复合型。其中主动越障型机器人^[7-9]主要通过改变车体姿态来翻越障碍,该结构形式具有高越障能力、高地形适应能力,但控制复杂、成本高、能耗大、效率低;被动越障型机器人^[10-12]依靠被动机构适应复杂地形,该结构机器人有较强越障能力,无需配备其他检测设备,降低了机构复杂度,控制简单,效率高,成本低;主被动越障结合型机器人^[13-16]结合主动越障和被动越障的优势,根据任务需求可在多种模式间切换。结构复合型机器人^[17-22]是一种将轮式与腿式或履带式组合而成的机器人,包括轮腿复合型和轮履复合型机器人,这类机器人往往地形适应性强、运动灵活,但结构和控制系统复杂、成本较高。

国内外已经提出了很多关于解决六轮移动机器人地形适应性差和运动不灵活^[23-24]等问题的办法,本文在现有解决方案的基础上设计一种全地形六轮多模式移动机器人,分析该平台机械结构设计和控制系统组成,并通过仿真和试验验证平台在多种复杂地形下的运动优势,以期机器人能够更好地应用于工农业生产和物流运输等实际任务。

1 结构设计

1.1 整体构型设计

针对传统六轮机器人地形适应性差、转弯不灵活等问题,设计一种全地形六轮多模式移动机器人^[25]如图1所示,机器人总体结构主要由独立驱动转向模块、一体化机身、铰接式摇臂悬架模块和控制模块组成。相比于传统六轮移动机器人,该六轮多模式移动机器人具备以下优势:①独特的铰接式双摇臂悬架,悬架模块利用悬架轴与车架铰接,双摇臂悬架模块能绕悬架轴转动,实现六轮独立悬挂,保证机器人在非平坦路面始终能够六轮着地,提高机器人整体通过性和地形适应能力。②六轮独立转向和驱动,机器人设计了模块化转向机构,安装在双摇臂悬架模块两端,机器人6个驱动车轮都能够绕轮架

轴转向。

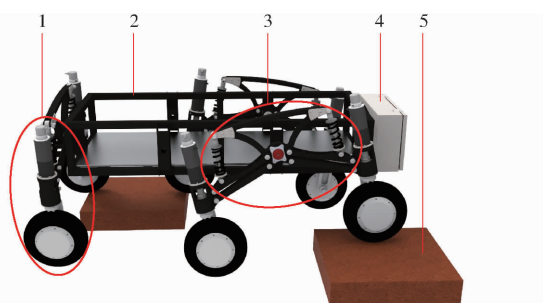


图1 整体结构

Fig. 1 Overall structure schematic of robot

1. 独立驱动转向模块
2. 一体化机身
3. 铰接式摇臂悬架模块
4. 控制模块
5. 障碍

1.2 铰接式双摇臂悬架模块设计与越障原理分析

机器人双摇臂悬架模块主要包括减振器、摇臂、一体悬架和悬架轴,其结构组成示意图如图2所示。减振器连接一体悬架和摇臂,起缓冲作用,在实际作业过程中能够一定程度降低机器人所受机械冲击,减少机械损伤。当机器人运行在非平坦地面时,双摇臂悬架模块能够帮助机器人适应地面环境;当遇到障碍物时,双摇臂悬架模块能够绕悬架轴自适应转动,带动机器人翻越障碍,其越障原理如图3所示。

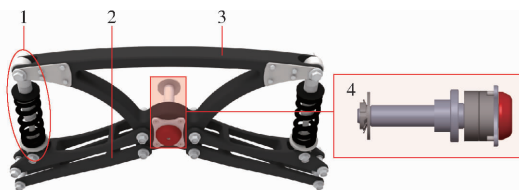
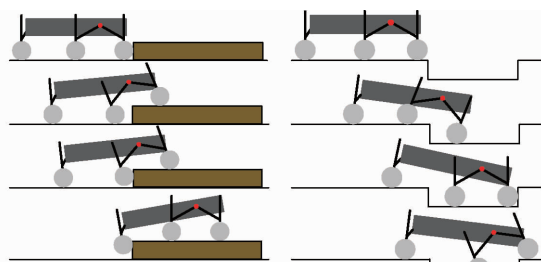


图2 双摇臂悬架模块结构示意图

Fig. 2 Principle structure of double rocker arm suspension

1. 减振器
2. 摇臂
3. 一体悬架
4. 悬架轴



(a) 垂直型障碍

(b) 壕沟型障碍

图3 翻越垂直障碍和壕沟工作原理图

Fig. 3 Principles of overcoming vertical and trench obstacles

垂直型障碍和壕沟型障碍是机器人运动过程中最常见的两种障碍,如果能够顺利通过这两种障碍,则机器人也能越过其他高度一致的障碍物。

图3a为机器人翻越垂直障碍原理图。当遇到垂直障碍物时,前轮依靠与障碍之间的摩擦力、中轮及后轮的推力,首先攀上障碍,此时机器人左右两侧双摇臂悬架被动抬起,维持机器人六轮着地的稳定

结构,保证机器人在后仰状态下不至于发生后翻事故。随着机器人继续前进,中轮和后轮顺势攀上障碍物,最终越过垂直障碍。

图 3b 为机器人通过壕沟障碍原理图。当通过壕沟障碍时,机器人前轮首先进入壕沟,此时车体前倾,机器人双摇臂悬架结构能够被动调整角度,使整车的运动保持稳定,同时,在机器人前轮通过障碍,而后轮还未进入壕沟时,机器人左右两侧的双摇臂悬架结构被动上抬,始终保持六轮着地的稳定结构,使机器人顺利通过壕沟。

1.3 独立驱动转向模块结构设计

机器人独立驱动转向模块安装于双摇臂悬架模块左右两侧,其整体结构设计如图 4 所示,主要包括编码器、转向电机、转向电机-轮架连接机构、轮架和轮毂电机。轮架与机器人驱动轮连接,转向电机带动轮架转动,从而带动机器人驱动轮绕转向电机中心轴转动,通过设置六轮不同转动角,机器人能够实现直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多种运动模式,图 5 为机器人多模式运动示意图。

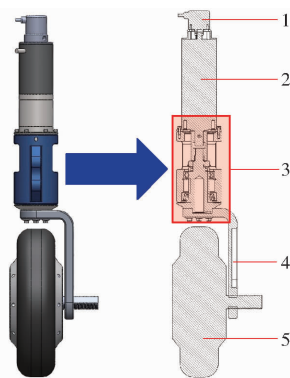


图 4 转向模块结构图

Fig. 4 Principle structure of steering module

1. 编码器
2. 转向电机
3. 转向电机-轮架连接机构
4. 轮架
5. 轮毂电机

图 5a 为机器人直行运动模式,此时转向电机都处于初始位置,通过控制六驱动轮旋转速度,实现整机前进后退运动;图 5b 为机器人平移运动模式,6 个转向电机同方向旋转相同角度,此时机器人能够实现空间内任意点的平移运动;图 5c 为机器人原地转向运动模式,此时机器人中间两驱动轮处于初始位置,前后四轮按照一定的角度配合关系转动,此时机器人能够实现原地转向运动;图 5d 为机器人绕任意点转弯模式,此时 6 个转向电机根据控制器指令分别旋转不同角度,配合不同的驱动轮运动速度,实现机器人快速转弯。机器人直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多种运动模式相互切换,可实现六轮移动机器人灵活运动。

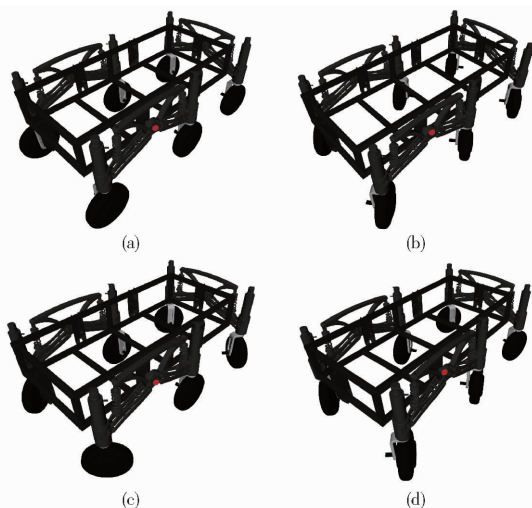


图 5 典型运动模式

Fig. 5 Simplified schematic of robot's multimodal motion

2 多模式运动学建模

六轮多模式移动机器人采用铰接式双摇臂悬架模块和独立驱动转向模块,能够实现直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多种运动模式。分析机器人多模式下运动学模型,为简化问题,假设机器人是刚体,车轮为刚性轮,不考虑变形,且不考虑机器人俯仰及垂直运动,不计侧倾影响^[26-29]。

2.1 绕任意点转弯模式

图 6 为六轮多模式移动机器人绕任意点转弯的简化示意图,为保证机器人运动时各车轮只滚动无滑动,要求 6 个车轮均绕同一个圆心 C 转动,即每个车轮轴线交于同一点。

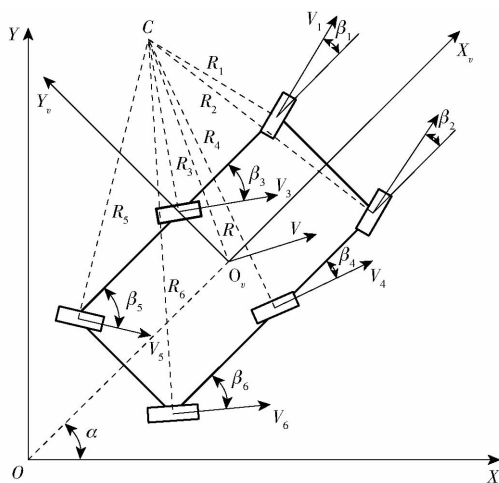


图 6 多模式运动学模型

Fig. 6 Multimodal kinematic model

设 OXY 为地面坐标系,整车长为 L , 宽为 B , α 为车体相对于地面坐标系 X 轴的转角, O_v 是机器人车体的中心位置, $O_v X_v Y_v$ 为机器人坐标系,设转动中心 C 为空间中任意点,则其在机器人坐标系中坐标可以表示为 (x_{vc}, y_{vc}) , 车轮中心在机器人坐标系中

表示为 $(x_{vi}, y_{vi}) (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。 V_i 和 $\beta_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 分别为6个车轮运动速度和旋转角度,正负表示旋转方向, $R_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为6个车轮绕旋转中心 C 的转向半径, V 和 ω 分别为机器人运动速度和旋转角速度。

由图6几何结构可得

$$\tan\beta_i = (x_{vi} - x_{vc}) / (y_{vc} - y_{vi}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{v1} = x_{v2} = L/2 \\ x_{v3} = x_{v4} = 0 \\ x_{v5} = x_{v6} = -L/2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_{v1} = y_{v5} = y_{v3} = B/2 \\ y_{v2} = y_{v4} = y_{v6} = -B/2 \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)可得机器人6个车轮旋转角为

$$\begin{cases} \beta_1 = \arctan \frac{\frac{L}{2} - x_{vc}}{y_{vc} - \frac{B}{2}} \\ \beta_2 = \arctan \frac{\frac{L}{2} - x_{vc}}{y_{vc} + \frac{B}{2}} \\ \beta_3 = \arctan \frac{-x_{vc}}{y_{vc} - \frac{B}{2}} \\ \beta_4 = \arctan \frac{-x_{vc}}{y_{vc} + \frac{B}{2}} \\ \beta_5 = \arctan \frac{-\frac{L}{2} - x_{vc}}{y_{vc} - \frac{B}{2}} \\ \beta_6 = \arctan \frac{-\frac{L}{2} - x_{vc}}{y_{vc} + \frac{B}{2}} \end{cases} \quad (4)$$

由瞬心定理可得

$$\frac{V}{R} = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_3}{R_3} = \frac{V_4}{R_4} = \frac{V_5}{R_5} = \frac{V_6}{R_6} = \omega \quad (5)$$

由式(5)可得各个车轮运动速度为

$$\begin{cases} V_1 = \omega R_1 \\ V_2 = \omega R_2 \\ V_3 = \omega R_3 \\ V_4 = \omega R_4 \\ V_5 = \omega R_5 \\ V_6 = \omega R_6 \end{cases} \quad (6)$$

2.2 原地转向模式

当机器人转动中心 C 与机器人中心点 O_v 重合时,机器人处于原地转向模式,此时 $x_{vc} = y_{vc} = 0$,代入式(4)可得

$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_6 = \arctan \left(-\frac{L}{B} \right) \\ \beta_2 = \beta_5 = \arctan \frac{L}{B} \\ \beta_3 = \beta_4 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由几何结构关系可得

$$R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + B^2} \quad (8)$$

$$R_3 = R_4 = \frac{B}{2} \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(6),则对于任意给定机器人旋转角速度 ω 都能得到对应的机器人6个车轮运动速度。

2.3 直行与平移模式

类似地,当机器人6个车轮旋转角为 0° 时,机器人处于直行模式;当机器人6个车轮旋转角相等且不等于 0° 时,机器人处于平移模式。

当机器人处于直行模式时,机器人运动速度等于6个车轮速度,且机器人6个车轮旋转角都等于 0° ,即

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0 \quad (10)$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 \quad (11)$$

当机器人处于平移模式时,6个车轮转向方向、大小和运动速度都相同,通过调整6个车轮旋转角,机器人能平移至空间内任意点,此时有

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 \neq 0 \quad (12)$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 \quad (13)$$

3 机电控制系统设计

六轮多模式移动机器人采用六轮独立驱动、独立转向设计,根据机器人多模式运动学建模和分析结果,设计基于UCOS III多任务并行操作系统的PID控制器,实现对六轮转向角度和六驱动轮速度闭环控制。

对六轮多模式移动机器人设计独立的串级PID闭环控制器,引入速度反馈提高系统的响应速度。系统控制器设计如图7所示,机器人6个驱动轮均采用闭环PID控制器,针对不同的轮毂电机调整不同的PID参数,最终实现6个驱动轮速度控制;同时,设计6个转向电机采用串级PID控制器,控制转向电机旋转角,最终实现6个驱动轮转向角控制。

图8为机器人控制系统框图,主要包括:电机任务、传感器任务和遥控器任务。其中,遥控器任务主

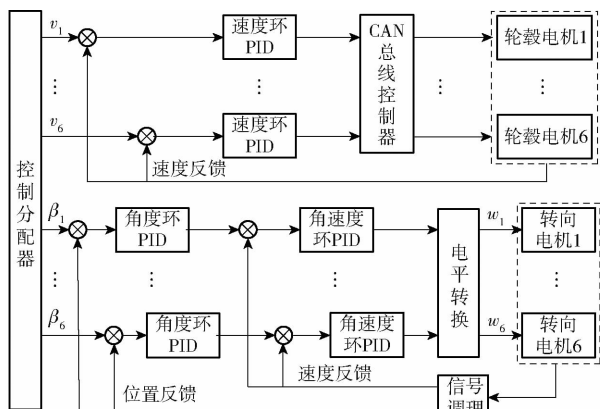


图 7 六轮多模式机器人串级 PID 控制器

Fig. 7 Six-wheel steering angle cascade PID controller

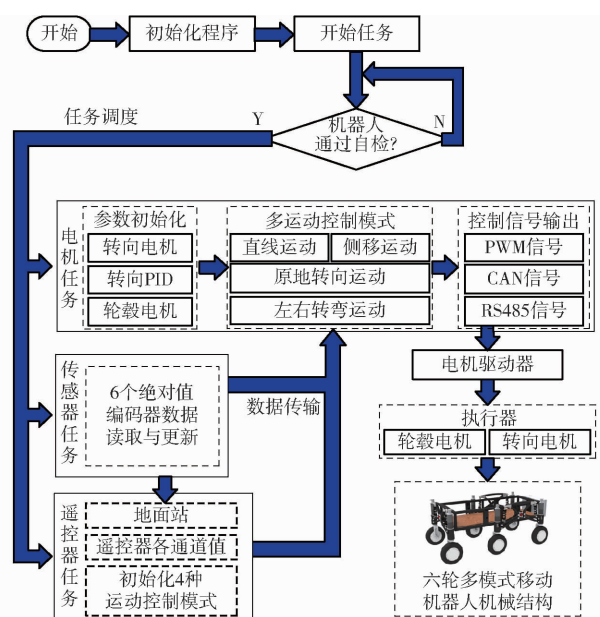


图 8 基于 UCOS III 多任务并行操作系统的多模式运动控制流程图

Fig. 8 Flowchart of multi-modal motion control based on parallel operating system

要完成运动模式初始化定义、遥控器各通道值读取和机器人运动状态可视化显示；传感器任务主要包括传感器数据迭代更新和读取传送；电机任务包括电机及驱动器参数初始化、多运动控制模式控制量计算及控制信号输出。控制系统各任务独立，互不干扰，最终实现机器人直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多模式运动。

4 多模式运动仿真与样机试验

六轮多模式移动机器人样机如图 9 所示，样机整体质量 103 kg，尺寸为 1.3 m × 0.7 m × 0.6 m。通过手持遥控器对机器人进行远程控制。机器人机载 STM32F767 单片机完成控制指令解析，并根据不同的解析信号进行运动学解算，最终生成 6 个车轮速度控制信号和角度控制信号，驱动机器人按要求完

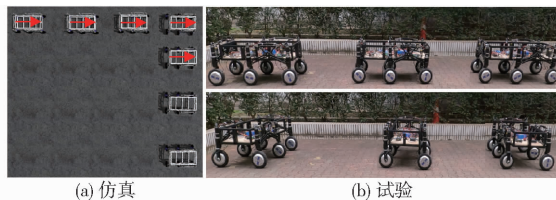
成直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多模式运动和模式切换。



图 9 六轮多模式移动机器人样机

Fig. 9 Six-wheeled multimodal mobile robot prototype

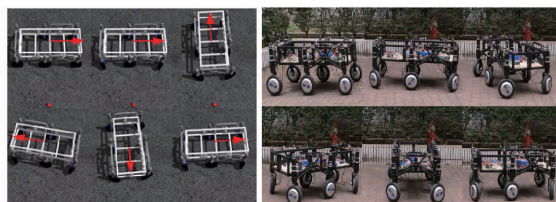
利用六轮多模式移动机器人模型和样机分别进行仿真和试验，主要包括 4 种基本运动模式试验和多种复杂地形试验两部分，其中 4 种基本运动模式仿真和试验结果如图 10 ~ 14 所示，包括直行、平移、原地转向和绕任意点转弯，多种复杂地形仿真和试验结果如图 15 ~ 17 所示，包括翻越垂直障碍、跨越壕沟和攀爬阶梯。



(a) 仿真 (b) 试验

图 10 直行、平移模式仿真与试验

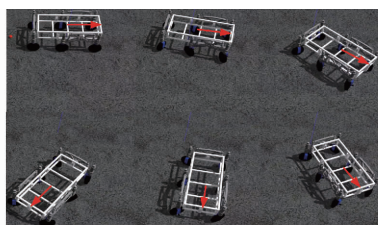
Fig. 10 Simulation and test of straight and translational mode



(a) 仿真 (b) 试验

图 11 原地转向模式仿真与试验

Fig. 11 Simulation and test of in-situ steering mode



(a) 仿真



(b) 试验

图 12 转弯模式仿真与试验

Fig. 12 Simulation and test of turning mode

图 10a 为直行、平移模式仿真结果，图 10b 为直行、平移模式样机试验，机器人在直行模式下从初始位置出发按照控制者的遥控指令向前运动，此时 6

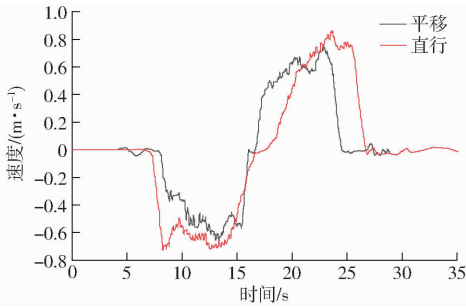


图 13 直行模式与平移模式运动速度测试结果

Fig. 13 Motion speed test in straight and translational mode

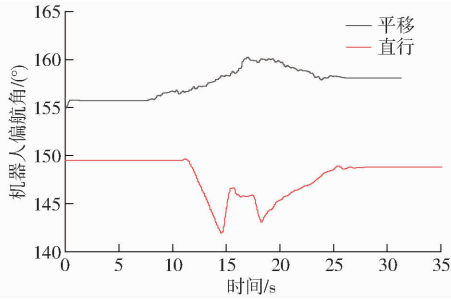
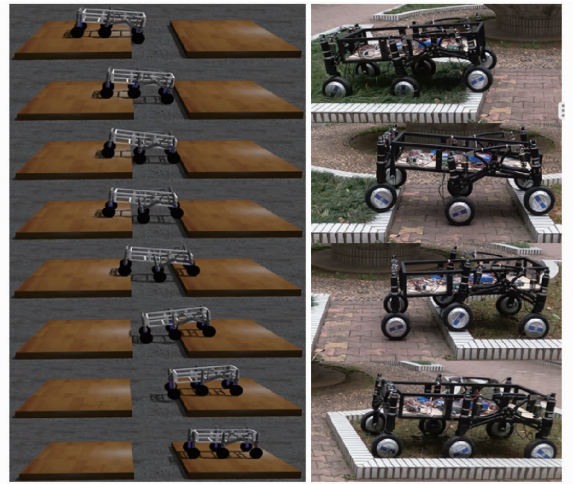


图 14 直行模式与平移模式运动偏航角测试结果

Fig. 14 Yaw angle test in straight and translational mode



(a) 仿真 (b) 试验

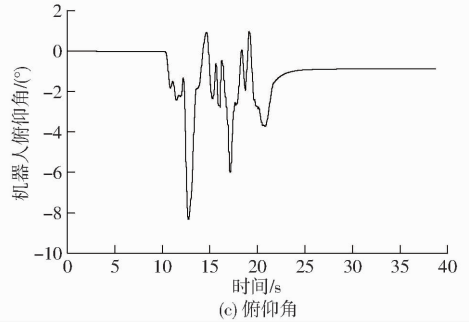
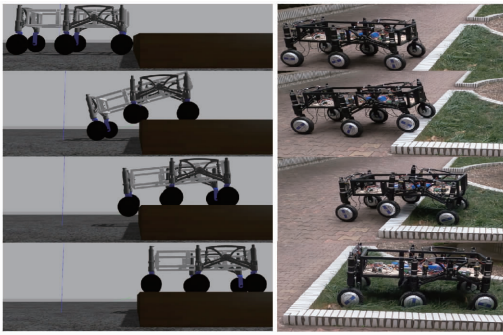


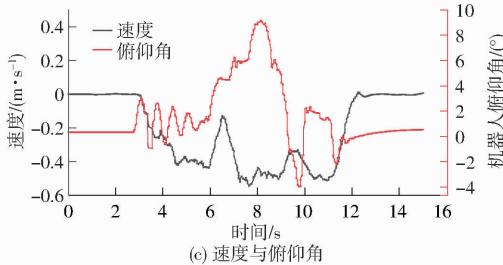
图 16 跨越壕沟障碍仿真与试验

Fig. 16 Simulation and test of crossing trench obstacles



(a) 仿真

(b) 试验

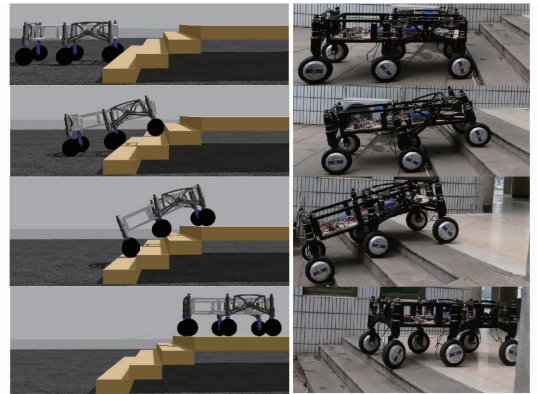


(c) 速度与俯仰角

图 15 翻越垂直障碍仿真与试验

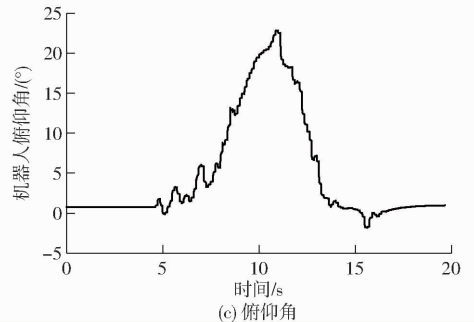
Fig. 15 Simulation and test of overcoming vertical obstacles

个车轮运动方向和速度大小都相同;当机器人切换至平移运动模式,车轮按照控制者指令旋转相同角度,此次试验中车轮旋转角为 90° ,使机器人能够沿机体侧向平移。图 11 为机器人原地转向模式仿真与样机试验,由式(7)计算出原地转向模式下车轮旋转角,其中左前轮和右后轮向右旋转约 67.4° ,左后轮和右前轮向左旋转约 67.4° ,试验证明机器人能顺利完成原地转向任务;图 12 为机器人绕任意点转弯仿真与试验,切换机器人运动模式为转弯模式,通过遥控器改变六轮转动角度,控制机器人通过弯



(a) 仿真

(b) 试验



(c) 俯仰角

图 17 攀爬阶梯障碍仿真与试验

Fig. 17 Simulation and test of climbing ladder obstacles

道。图 13、14 分别为机器人直行和平移模式下速度和偏航角变化曲线,在遥控器的控制下,机器人能以稳定的速度完成直行和平移运动,且偏航角最大不超过 5° 。

图 15a、15b 分别为机器人翻越垂直障碍仿真与试验,垂直障碍高度约 11 cm,机器人在直行运动模式下运动,图 15c 为机器人翻越垂直障碍运动速度和俯仰角变化曲线,首先前轮攀越上障碍,机器人俯仰角增大,随后中后轮依次越过垂直障碍,机器人俯仰角减小,且由于减振装置的缓冲作用,机器人运动参数呈波动式增加或降低。

图 16a、16b 分别为机器人跨越壕沟障碍仿真与试验,壕沟长 115 cm,高 11 cm,试验结果证明双摇臂悬架结构能够自适应旋转,保证机器人能顺利通过壕沟型障碍。图 16c 为机器人跨越壕沟障碍俯仰角变化曲线,曲线从左到右有 3 个负高峰,前 2 个负高峰在机器人前轮和中轮分别进入壕沟时产生,第 3 个负高峰由于花坛与草地之间的地势差产生。

图 17a、17b 分别为机器人攀爬阶梯障碍仿真与试验,阶梯高度从下往上分别为 11.5、15、13 cm,机器人运动在直行模式下,六轮依次攀上阶梯,顺利通过阶梯型障碍。图 17c 为机器人攀爬阶梯障碍俯仰角变化曲线,随着六轮依次登上阶梯,机身俯仰角逐渐增加,随着六轮依次越过阶梯障碍,机身俯仰角又逐渐减小,直到完全通过阶梯障碍,机器人俯仰角回

到初始状态。

5 结论

(1) 该机器人具有独特的铰接式双摇臂悬架和六轮独立驱动转向模块,通过调整 6 个驱动轮的旋转角度实现直行、平移、原地转向和绕任意点转弯 4 种基本运动模式,同时双摇臂悬架模块可以自适应爬升摇臂来跨越不同高度的障碍物,从而提高机器人运动灵活性、机动性、地形适应性和越障能力。

(2) 建立了机器人多模式运动学模型,推导多种模式下机器人 6 个驱动轮旋转角和运动速度关系式。

(3) 根据机器人多模式运动学模型,设计了基于 UCOS III 多任务并行操作系统的机器人多模式 PID 控制器,实现机器人多模式运动控制和模式切换。

(4) 结合机电控制系统,集成了机器人样机,开展样机仿真与试验,测试了机器人不同运动模式和复杂地形下的运动参数,证明了机器人能够按照控制指令实现直行、平移、原地转向和绕任意点转弯多模式运动,同时,机器人能顺利翻越阶梯、壕沟等复杂地形,具有较好的通过性和地形适应性能。

参 考 文 献

- [1] PICO N, KIM E C, PARK S H, et al. Geometric recognition of diverse terrain in real-time for a six-wheeled robot based on laser scanning sensors[C]//2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2022: 1924 - 1929.
- [2] GAO J, CHEN K, WU C, et al. Obstacle avoidance and formation transformation of multi-agent groups based on six-wheeled robot[C]//2022 First International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent Energy (ICCSIE). IEEE, 2023: 1 - 5.
- [3] PICO N, PARK S H, YI J, et al. Six-wheel robot design methodology and emergency control to prevent the robot from falling down the stairs[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4403.
- [4] REDDY S R V, PRAKASH T M, NAIK J S, et al. Designing of six wheel robotic vehicle for instant disinfection and sanitization [C]//2022 Trends in Electrical, Electronics, Computer Engineering Conference (TECCON). IEEE, 2022: 18 - 24.
- [5] PEPPER C, BALAKIRSKY S, SCRAPER C. Robot simulation physics validation [C] // 2007 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2007: 97 - 104.
- [6] XU T, MA S, XU H, et al. Application of ackermann steering in obstacle crossing platform of six-wheeled robots[C]//2023 2nd International Symposium on Control Engineering and Robotics (ISCER). IEEE, 2023: 239 - 243.
- [7] NAGATANI K, YAMASAKI A, YOSHIDA K, et al. Development and control method of six-wheel robot with rocker structure [C]//IEEE International Workshop on Safety, Security & Rescue Robotics. IEEE, 2007: 1 - 6.
- [8] LIU X, WU W. Analysis of the six wheels of bow-swing arm robot obstacle crossing[C]//2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 2017: 16 - 20.
- [9] KAO I H, SU J A, PERNG J W. Design of outdoor autonomous mobile robot[J]. arXiv preprint arXiv: 2201.12605, 2022.
- [10] ZHAO D, LAM T L. SnailBot: a continuously dockable modular self-reconfigurable robot using rocker-bogie suspension [C] // 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2022: 4261 - 4267.
- [11] LUO Z, SHANG J, ZHANG Z. Innovative design of six wheeled space exploration robot using module combination [C] // 2012 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). IEEE, 2013: 460 - 465.
- [12] PANDEY A, KUMAR A, DIWAN T D, et al. New concept-based six-wheels rocker-bogie robot: design and analysis[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 726 - 734.
- [13] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. Design and analysis of a six-wheeled companion robot with mechanical obstacle-overcoming adaptivity[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(2): 1115 - 1136.
- [14] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. Design and analysis of a portable six-wheeled mobile robot with a reconfigurable body and self-adaptable climbing obstacle mechanism [C] // Proceedings of the 5th IEEE/IFToMM International Conference on

Reconfigurable Mechanisms and Robots. ReMAR2021, 2021: 192.

- [15] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. A portable six-wheeled mobile robot with reconfigurable body and self-adaptable obstacle-climbing mechanisms[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(5): 051010.
- [16] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. Self-adaptive obstacle crossing of an AntiBot from reconfiguration control and mechanical adaptation[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024, 16(2): 021002.
- [17] LUO Z, SHANG J, WEI G, et al. A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2018, 128: 16–32.
- [18] LI J, WANG J, WANG S, et al. Parallel structure of six wheel-legged robot trajectory tracking control with heavy payload under uncertain physical interaction[J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(5): 675–687.
- [19] CHEN Z, LI J, WANG J, et al. Towards hybrid gait obstacle avoidance for a six wheel-legged robot with payload transportation [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102(3): 1–21.
- [20] CHEN Z, WANG S, WANG J, et al. Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot [J]. *ISA Transactions*, 2020, 108(3): 367–380.
- [21] CHEN Z, LI J, WANG S, et al. Flexible gait transition for six wheel-legged robot with unstructured terrains[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 150: 103989.
- [22] BOXERBAUM A S, WERK P, QUINN R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: part I mechanical design for multi-mode mobility [C] // *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2005: 1459–1464.
- [23] MOORE K L, FLANN N S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot[J]. *IEEE Control Systems*, 2001, 20(6): 53–66.
- [24] CHUGO D, KAWABATA K, KAETSU H, et al. 3D odometry based on body configuration [C] // *2008 SICE Annual Conference*. IEEE, 2008: 695–700.
- [25] ZHU Q, SHANG J, ZENG X, et al. Modeling and simulation analysis of a six wheel multimodal mobile robot[C] // *2023 8th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*. IEEE, 2023: 52–58.
- [26] GRIGORE L Ş, GORGOTEANU D, MOLDER C, et al. A dynamic motion analysis of a six-wheel ground vehicle for emergency intervention actions[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1618.
- [27] MOORE K L, DAVIDSON M, BAHL V, et al. Modelling and control of a six-wheeled autonomous robot[C] // *Proceedings of the 2000 American Control Conference*. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334). IEEE, 2000: 1483–1490.
- [28] JIANG Y, XU X, ZHANG L. Heading tracking of 6WID/4WIS unmanned ground vehicles with variable wheelbase based on model free adaptive control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159: 107715.
- [29] PICO N, JUNG H, MEDRANO J, et al. Climbing control of autonomous mobile robot with estimation of wheel slip and wheel-ground contact angle[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(2): 959–968.

(上接第 512 页)

- [20] 潘洵操, 谢宝贵. 荔枝果皮结构与果实贮藏性能关系的探讨[J]. *广西植物*, 1997, 17(1): 80–85.
PAN Xuncao, XIE Baogui. Study on the relationship between the peel structure and storage quality of litchi fruits[J]. *Guihaia*, 1997, 17(1): 80–85. (in Chinese)
- [21] 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
XU Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [22] ESEHAGHBEYGI A, HOSEINZADEH B, KHAZAEI M, et al. Bending and shearing properties of wheat stem of Alvand variety[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 6(8): 1028–1032.
- [23] 施彦宇. 沙果去核切分特性及其设备设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
SHI Yanyu. Related study on characteristic parameters of crab-apple and design of processing device[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [24] 闻邦椿. 机械设计手册(第1卷)[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2010.