

复杂地形下仿生轮腿式机器人位姿控制研究

张庆^{1,2} 潘烤鑫^{1,2} 王振宇^{1,2} 黄韶炯¹ 尤泳^{1,2} 王德成^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学草业机械装备研究中心, 北京 100083)

摘要: 丘陵山地地势复杂、地形多变, 农机装备作业环境以倾斜角度较大的斜坡为主, 传统农机装备在丘陵山区复杂地形下作业时效率低、稳定性差, 甚至会出现侧倾、翻车等现象。本文从仿生机械设计角度出发, 提出一种在丘陵山地复杂地形下能够自主实现位姿调平控制的轮腿式机器人平台, 提升复杂地形下的作业稳定性和安全性。以昆虫后足为仿生机械设计对象, 并结合多连杆机构原理, 完成新型变行程轮腿机构及机器人平台的整体架构设计。采用 D-H 参数法分析了轮腿机构运动学特性, 结果显示轮腿式机器人离地间隙最大调整量为 574 mm, 具备较强的越障能力。在空间坐标系上定义轮腿式机器人空间姿态参数, 推导得到机身姿态角与轮腿伸缩量之间的空间姿态模型, 并设计了基于 NSGA-II 的机身空间姿态逆解算法。基于空间姿态逆解算法构建了轮腿式机器人全向位姿调平位姿控制系统, 包含机身调平控制器、“虚腿”补偿控制器和质心高度控制器, 在复杂地形下行驶时能够控制轮腿式机器人俯仰角、侧倾角、接地力、质心高度等空间姿态参数, 然后通过搭建的轮腿式机器人 ADAMS-Matlab 联合仿真模型完成了位姿控制系统算法仿真验证。在机器人样机上开展了离地间隙自动调整和机身全向位姿调平试验, 试验结果表明, 试验样机离地间隙最大调整量为 574 mm, 同时在复杂地形下能够实现机身位姿全向自动调平, 调平平均时间约为 1.2 s, 调平平均误差为 0.8°, 位姿控制响应速度与调平精度能够满足实际工作要求。

关键词: 轮腿式机器人; 复杂地形; 仿生; 位姿控制; 样机试验

中图分类号: S219.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0380-12

OSID:



Pose Control of Biomimetic Wheel-legged Robots in Complex Terrain

ZHANG Qing^{1,2} PAN Kaixin^{1,2} WANG Zhenyu^{1,2} HUANG Shaojong¹ YOU Yong^{1,2} WANG Decheng^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Grassland Machinery and Equipment Research Center, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The terrain in hilly and mountainous areas is complex and diverse, and the operating environment of agricultural machinery equipment is mainly inclined slopes. Traditional agricultural machinery equipment has low efficiency and poor stability when operating in complex terrain in hilly and mountainous areas, and may even cause serious accidents such as tilting and overturning. A wheel-legged robot platform that can autonomously achieve pose leveling control in complex terrain of hills and mountains was proposed from the perspective of biomimetic mechanical design, improving the stability and safety of operations in complex terrain. Firstly, taking the insect hind foot as the biomimetic mechanical design object, and combining the principle of multi link mechanism, the overall architecture design of the new variable stroke wheel-legged mechanism and robot platform was completed. The kinematics characteristics of the wheel leg mechanism were analyzed by using the D-H parameter method. The results showed that the maximum adjustment of the ground clearance of the wheel-legged robot was 574 mm, and it had a strong ability to surmount obstacles. Then the spatial attitude parameters of the wheel-legged robot were defined in the spatial coordinate system, and the spatial attitude model between the fuselage attitude angle and the wheel leg extension was derived. An NSGA-II based algorithm for inverse solution of the fuselage spatial attitude was designed. Based on the spatial attitude inverse solution algorithm, an omnidirectional attitude control system for wheel-legged robots was constructed, which included a vehicle body leveling controller, a “virtual leg” compensation controller, and a centroid height

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2023-12-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2202102)和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)

作者简介: 张庆(1986—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能车辆及智能农机装备技术研究, E-mail: zhangqingbit@cau.edu.cn

controller. It can control the spatial attitude parameters of wheel-legged robots such as pitch angle, roll angle, grounding force, and centroid height when driving in complex terrain. The algorithm simulation verification of the pose control system was completed through the ADAMS - Matlab joint simulation model of the wheel-legged robot. Finally, experiments on automatic adjustment of ground clearance and omnidirectional posture adjustment of the vehicle body were conducted on the robot prototype. The results showed that the maximum adjustment amount of the ground clearance of the test prototype was 574 mm, and the omnidirectional automatic leveling of the vehicle body posture could be achieved in complex terrain. The average leveling time was about 1.2 s, and the average leveling error was 0.8° . The response speed and leveling accuracy of the posture control could meet the actual work requirements.

Key words: wheel-legged robots; complex terrain; bionic; posture control; prototype testing

0 引言

丘陵山区是我国粮食和特色农产品的重要生产地,耕地和播种面积均占全国的三分之一,涉及农业人口近3亿,推进丘陵山区农业机械化对丘陵山区建设现代农业、推进脱贫攻坚、加快乡村振兴都具有十分重要的意义^[1]。丘陵山区农业用地以梯田和山地坡面地形为主,这大大增加了农业装备的作业难度,常规农业机械装备难以适应地势多变、路面坡度较大的作业环境^[2]。因此,为满足丘陵山地复杂地形下各类作业需求,设计一款运动灵活、具备高越障和机身全向位姿调平能力的智能化无人作业平台具有重要意义。

轮腿式机器人兼具轮式机器人和腿式机器人的优点,在具备轮式机器人移动效率高优点的同时,还与腿式机器人一样有较强的地形适应性和越障性能^[3-8]。轮腿式机器人按照轮腿复合方式的不同可分为串联式、一体式和分离式,不同复合方式有不同优点^[9-15]。目前在外星探测、灾后搜救、农林生产等领域有着广泛应用^[16-22]。GRAND等^[23]设计了一种串联式轮腿机器人 Hylos,该机器人由4条腿组成,每条腿的连接处通过滚珠丝杠和气动机构进行驱动,其轮胎由直流电机进行轮边独立驱动,在复杂地形条件下这种结构具有较好的姿态自适应性,但是由于姿态调平误差没有得到很好的控制,其应用尚存在较多限制。荣誉等^[24]设计一款能够适应复杂地形的并联式六足农业机器人,并对其动力学特性进行了理论分析,确定了最优关键结构参数,具有较好环境自适应性,然而并未对如何改善地面对轮腿机器人产生冲击而导致机身倾斜等问题进行具体研究。日本大阪大学设计了一种轮腿变换式复合机器人^[25-26],该机器人轮腿机构由3个圆弧连杆构成,3个圆弧连杆收拢时组成一个完整的圆形,可作为车轮滚动,展开时可作为支腿行走,能够通过感知路面状况在轮式行走和腿式行走进行切换,这种行走方式虽能够进行快速行进和有效越障,但并未对

位姿控制进行系统研究,在复杂地形下能否保持行进稳定尚未可知。罗洋等^[27]设计了一款具有减振系统的轮腿机器人,并分析了其运动学和动力学特性,由于采用滚珠丝杠机构,该机器人具有较强承载能力和良好越障性能,但这也影响了关节响应速度,因此位姿调平响应速度始终未能得到较好的提升。徐岩等^[28]为其设计的轮腿式机器人创建了一套位姿控制耦合优化方法,在运动学模型基础上建立了机器人稳定性控制与驱动牵引力控制的耦合优化控制准则,可以使机体始终保持水平稳定的姿态,但是设计的轮腿机器人由于轮腿结构原因始终未能克服越障问题,这使得轮腿机器人搭载作业设备时的工作效能大大降低。苏黎世衍生公司开发了一款名为 Swiss - Mile 的轮腿式机器人^[29],该款机器人能够有效克服平坦地形,越过台阶和楼梯等障碍物,具有良好的地形自适应性,并且依靠所携带的位姿控制器能够保持自身姿态稳定,在地形探测、救灾、物流等方面应用效果良好,受限于应用场景以及设计理念等因素,设计团队并未对机器人行进时的机身调平问题进行系统研究,因此该款机器人不能进行机身实时调平。

本文从仿生机械设计角度研发一款轮腿式机器人平台,采用仿生昆虫足部运动原理的串联式轮腿结构,并基于空间姿态逆解算法构建轮腿式机器人的全向位姿调平位姿控制系统,使机器人平台在部分非结构地面上动态调整机身水平姿态,同时搭建轮腿式机器人 ADAMS - Matlab 联合仿真模型,以验证位姿控制系统算法的有效性。

1 轮腿机构设计与运动学特性

1.1 轮腿机构仿生机械设计

轮腿结构是轮腿式机器人的重要组成部分,是实现自主越障、位姿调平等关键技术目标的执行机构。轮腿结构设计大多都基于仿生学原理,仿照自然界的多足动物,以其腿部特征作为轮腿结构设计的参考源。从仿生学角度出发,轮腿机器人轮腿结

构设计以蝗虫后足为参考。图1a为蝗虫后足构造情况,其包含基节、股节、胫节以及足端4部分,各部分之间通过关节进行连接。当后足足端着地时,通常把足端与地面的接触等效处理,不考虑足端姿态问题。因此,基于蝗虫后足的构造特点,由仿生机械思想构建的轮腿式机器人轮腿结构构型如图1b所示。

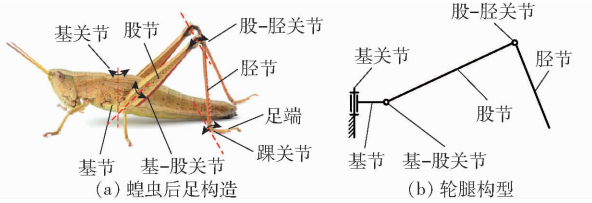


图1 基于蝗虫后足生物学特征构建的轮腿结构特征
Fig. 1 Construction of wheel-legged mechanism features from biological characteristics of locust posterior feet

为了使机构运动始末位置形成高度差,协助轮腿式机器人实现机身升降动作,将多连杆机构合理地运用到轮腿式机器人轮腿结构中,形成如图2所示的轮腿机构,4个绞点B、D、E和H构成一个平行四连杆机构,边BH始终位于竖直方向,由平行四边形的限制关系可以保证该四连杆机构运动变形过程中边DE及安装在该机构上的轮腿前叉始终保持竖直方向;轮腿前叉安装在平行四连杆机构右下方,并能够绕绞点F进行旋转,带动安装在轮腿前叉上的车轮完成转向动作;车轮通过绞点G安装在前叉上,为整机提供驱动力。整个轮腿机构需要3处驱动,分别为驱动平行四连杆机构进行变形进而驱动轮腿机构末端在轮腿平面内运动的移动副,驱动车轮转向旋转副和驱动车轮转动旋转副。

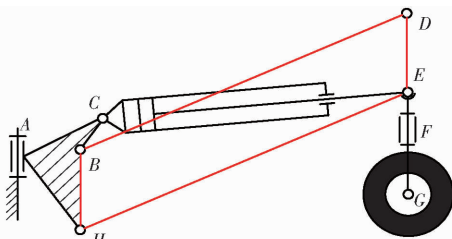


图2 轮腿机构原理图

Fig. 2 Schematic of wheel-legged mechanism principle

1.2 轮腿机构运动学特性

本文主要研究轮腿式机器人平台工作时越障性能以及位姿控制问题,机器人前后、左右均为对称结构,因此可取整机四分之一(此处为右前腿)进行运动学分析。如图3所示,为了得到轮心G位置坐标与CE长度L之间的关系,在机体坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 外建立轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$,原点 O_1 为轮腿大臂中心, X_1 轴指向轮腿大臂方向, Z_1 轴平行于机体坐标系 Z_0 轴,方向向上, Y_1 轴由右手螺旋法则确

定。坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 由轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 通过平移 l_{AH} 并旋转角度 α 得到,同理坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 由坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 平移 l_{HE} 并旋转角度 β 得到,坐标系 $O_4X_4Y_4Z_4$ 由坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 平移 l_{EG} 并旋转角度 γ 得到。

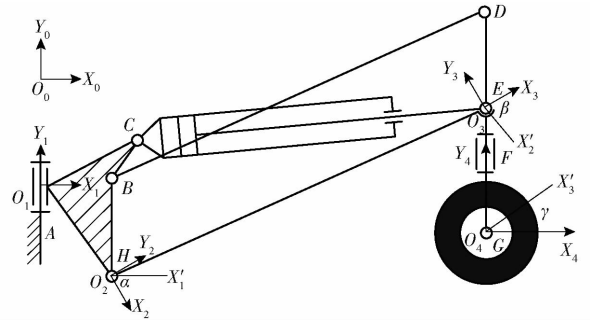


图3 坐标系变换

Fig. 3 Coordinate transformation

上述坐标系变换过程中所涉及的参数均已知,其中平移过程所涉及的参数均为固定值,旋转过程所涉及的参数与边CE长度L有关,在由绞点C、E和H组成的三角形结构中,边CH长度 l_{CH} 与HE长度 l_{HE} 均为已知固定值,边CE长度为已知变量L,由三角函数公式可得 $\angle CHE$ 与对边CE长度L间的数学关系,经角度变换可得旋转角 α 、 β 、 γ ,将角度以边CE的长度L表示为

$$\begin{cases} \alpha = f_1(L) \\ \beta = f_2(L) \\ \gamma = f_3(L) \end{cases} \quad (1)$$

由D-H坐标变换法可逐步推导出轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 到坐标系 $O_4X_4Y_4Z_4$ 的变换矩阵,以下为由轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 到 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的变换过程。坐标原点 O_2 在轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中位置坐标已知,此处记为 (m, n, p) ,两坐标系间角度已知,为 α ,则轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 到 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的变换矩阵 2_1T 可表示为

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m \\ 0 & 1 & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & m \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 m ——原点 O_2 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中X方向坐标

n ——原点 O_2 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中Y方向坐标

p ——原点 O_2 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中 Z 方向坐标

同理可得坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 到 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的变换矩阵³ T 和坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 到 $O_3X_3Y_3Z_3$ 的变换矩阵⁴ T , 则 $O_4X_4Y_4Z_4$ 在轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下的变换矩阵⁴ T 可表示为

$${}^4_1T = {}^2_1T {}^3_2T {}^4_3T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & P_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & P_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 P_x ——原点 O_4 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中 X 方向坐标

P_y ——原点 O_4 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中 Y 方向坐标

P_z ——原点 O_4 在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中 Z 方向坐标

该矩阵可变换为车轮轮心 G 位置坐标与边 CE 长度 L 的关系公式

$$[P_x \ P_y \ P_z]^T = f(L) \quad (4)$$

其中 P_y 恒为零, P_x 及 P_z 与 L 的关系曲线如图 4 所示, L 原始长度为 472 mm, 范围 422 ~ 572 mm。其中 P_x 呈先增大后减小的近似抛物线形式, 结合 P_z 与 L 呈现正相关, 这说明在同一 P_x 时轮腿机构会有两个不同高度的对应位置, 即轮腿式机器人能够进行足式运动。 P_z 变化范围 - 78.5 ~ 471.1 mm, 此处以 P_z 垂直地面向下方向为正, 相对

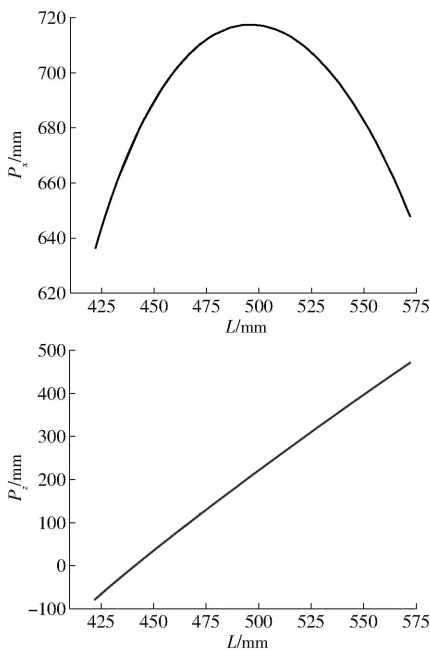


图 4 轮腿坐标系中轮心位置曲线

Fig. 4 Curve of wheel center position in wheel leg coordinate system

于地面的高度调整范围为 24 ~ 574mm, 因此该结构下轮腿式机器人质心高度调整范围大于 500 mm, 而丘陵山地障碍高度多在 350 ~ 500 mm 之间^[30], 说明该轮腿式机器人平台能够满足在丘陵山地作业时的高通过性要求。

1.3 轮腿式机器人整机结构及性能参数

轮腿式机器人行驶速度较慢, 风阻影响很小, 因此在机体结构设计中采用长方体结构以便于布置电源系统、控制系统等子系统。机体底部以 3 根矩形钢管作为纵梁, 6 根角钢作为横梁, 其中中间 4 根横梁中安装动力电池, 机体两侧各布置 6 根矩形钢管作为立柱, 轮腿安装支座通过螺栓连接安装在立柱上, 其余各边以角钢作为支撑, 外部覆盖一层薄钢板蒙皮, 通过螺栓连接安装在机体骨架上, 最终确定轮腿式机器人结构方案如图 5 所示。

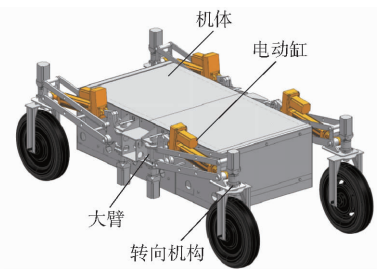


图 5 轮腿式机器人整机结构

Fig. 5 Wheel-legged robot vehicle structure

为满足丘陵山地复杂地形条件下稳定作业的要求, 轮腿式机器人需要较强的动力性和通过性, 确立轮腿式机器人性能参数如表 1 所示。

表 1 轮腿式机器人性能参数

Tab. 1 Various parameters of wheel-legged robots

参数	数值/型式
满载质量/kg	356
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 900 × 850 × 585
驱动形式	四轮驱动
续航里程/km	50
最高时速/(km · h ⁻¹)	30
最大爬坡度/(°)	30
机身调平范围/(°)	0 ~ 20(俯仰角) 0 ~ 10(侧倾角)
越障高度/mm	550

2 机器人空间姿态模型建立

2.1 空间姿态参数定义

位姿控制首先需要确定机器人自身当前姿态, 姿态通常定义为物体自身坐标系与大地坐标系间的角度关系。常用的姿态表示方法有四元数、欧拉角、旋转矩阵等, 此处选择车辆领域运用较多的欧拉角来描述机器人姿态, 如图 6 所示定义欧拉角转动顺

序为 $Z-Y-X$, 其中绕 Z 轴转动为横摆角 (Y), 绕 Y 轴转动为俯仰角 (P), 绕 X 轴转动为侧倾角 (R)。在轮腿式机器人行驶过程中, 地形的变化会引起机身的侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y 变化, 行驶时通过调节 4 条轮腿电动缸长度 (CE 长度 L) 改变车轮相对位置来实现主动位姿控制。

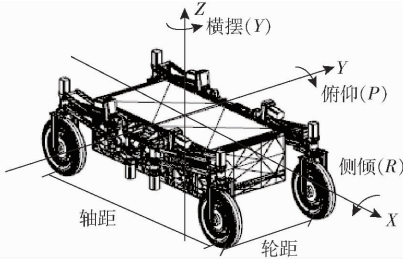


图6 轮腿式机器人空间坐标系示意图

Fig. 6 Schematic of spatial coordinate system for wheel-legged robots

2.2 空间姿态模型推导

轮腿式机器人在越过障碍的过程中, 空间姿态相对于初始状态发生改变, 取轮腿电动缸长度 L_i (图3中 CE 长度 L)、轮腿摆臂角度 θ_i (图3中 A 处转动角度)、侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y 为表征轮腿式机器人空间姿态参数, 一旦轮腿式机器人空间参数确定, 其 4 个车轮之间的相对空间坐标也就确定, 由 4 个电动缸长度、4 个轮腿摆臂角度、3 个机身姿态角度求解出 4 个车轮相对位置的过程称为空间姿态模型正解, 反之, 由其他参数信息求解达到目标姿态参数所需要的 4 个电动缸长度的过程称为空间姿态模型逆解。

轮腿式机器人空间姿态模型推导过程如图7所示, 通过轮腿机构运动学分析推导出的轮心 G 在轮腿坐标系中的位置与电动缸长度间的数学关系, 在此基础上对其进行进一步坐标变换, 将轮心 G 在轮腿坐标系中的位置变换为其在机体坐标系中的位置。

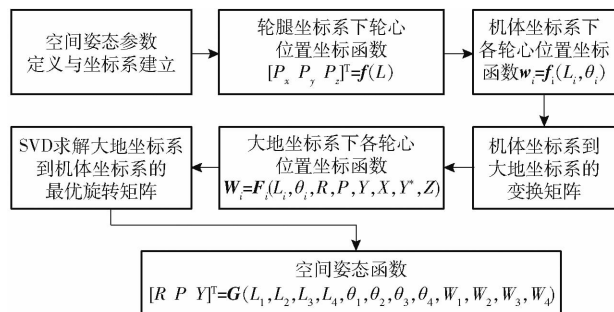


图7 空间姿态模型推导过程

Fig. 7 Derivation process of space attitude model

同样以轮腿式机器人右前腿为例, 如图3所示, 设轮腿坐标系原点 O_1 在机体坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中的

坐标为 (x, y, z) , 原点 O_4 (轮心 G) 在轮腿坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中位置坐标为 (P_x, P_y, P_z) , 轮腿摆臂角度为 θ , 则原点 O_4 (轮心 G) 在机体坐标系中位置坐标 w_1 为

$$w_1 = \begin{bmatrix} w_{x1} \\ w_{y1} \\ w_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + P_x \cos\theta \\ y - P_x \sin\theta \\ z + P_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 x ——原点 O_1 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 X 方向坐标

y ——原点 O_1 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 Y 方向坐标

z ——原点 O_1 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 Z 方向坐标

其余 3 轮腿处的变换同理, 由此可推导出机体坐标系下各轮腿末端点的位置坐标 w_i 与对应电动缸长度 L_i 、轮腿摆臂角度 θ_i 间的数学关系, 即轮心相对位置函数 w_i 为

$$[w_{xi} \ w_{yi} \ w_{zi}]^T = w_i(L_i, \theta_i) \quad (6)$$

式中 w_i ——各轮轮心 G 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中的坐标

w_{xi} ——各轮轮心 G 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 X 方向坐标

w_{yi} ——各轮轮心 G 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 Y 方向坐标

w_{zi} ——各轮轮心 G 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中 Z 方向坐标

i ——车轮序号

由侧倾角 (R)、俯仰角 (P) 和横摆角 (Y) 3 个姿态参数 R, P, Y 得到旋转矩阵 R 为

$$R = \text{rot}_x(R) \text{rot}_y(P) \text{rot}_z(Y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ 0 & \sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos Y & -\sin Y & 0 \\ \sin Y & \cos Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由机体坐标系原点 O_0 在大地坐标系下位置坐标 (X, Y^*, Z) 得到位移矩阵 T_1 为

$$T_1 = [X \ Y^* \ Z]^T \quad (8)$$

式中 X ——原点 O_0 在大地坐标系中 X 方向坐标

Y^* ——原点 O_0 在大地坐标系中 Y 方向坐标

Z ——原点 O_0 在大地坐标系中 Z 方向坐标

最终推导出机体坐标系到大地坐标系位姿变换矩阵 T_2 为

$$T_2 = \begin{bmatrix} R & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可得到轮心 G 在大地坐标系下的坐标 W_i 为

$$W_i = [W_{xi} \ W_{yi} \ W_{zi}]^T = T_2 w_i \quad (10)$$

式中 W_i ——各轮轮心 G 在大地坐标系中位置坐标
 W_{xi} ——各轮轮心 G 在大地坐标系 X 方向坐标
 W_{yi} ——各轮轮心 G 在大地坐标系 Y 方向坐标
 W_{zi} ——各轮轮心 G 在大地坐标系 Z 方向坐标

最终可得轮心在大地坐标系下的位置坐标与轮腿电动缸伸缩量及轮腿大臂摆角间的数学关系为

$$W_i = F_i(L_i, \theta_i, R, P, Y, X, Y^*, Z) \quad (11)$$

即轮心绝对位置函数 F_i , 该函数以各轮腿油缸伸缩量 L_i 、各轮腿摆臂角度 θ_i 、侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y , 机体坐标系原点在大地坐标系下的位置坐标 (X, Y^*, Z) 为输入, 以轮心在大地坐标系中的位置坐标为输出。

2.3 空间姿态模型逆解

针对轮腿式机器人空间姿态模型逆解问题, 首先需要推导大地坐标系到机体坐标系的变换矩阵, 两个坐标系尺度相同, 可通过旋转和平移进行转换, 求解最优刚性变换矩阵首先要求出两个坐标系中对应数据点集的质心, 然后将两个数据点集提到原点, 求解最优旋转矩阵, 最后求解平移矩阵。计算此转换关系需知双方一个或多个对应点的坐标点集, 设为 A 、 B 。此处分别取轮心 G 在大地坐标系位置坐标和轮心机体坐标系中位置坐标, 求解 $B = RA + T$ 即可, 求解最优旋转最简单的方法是使用奇异值分解 (Singular value decomposition, SVD) 进行计算, 其内部原理是最小二乘法, 计算式为

$$H = \sum_{i=1}^N (P_A^i - centroid_A)(P_B^i - centroid_B)^T \quad (12)$$

$$[U \ S \ V] = SVD(H) \quad (13)$$

$$R = VU^T \quad (14)$$

$$T = -Rcentroid_A + centroid_B \quad (15)$$

式中 $centroid_A$ ——坐标点集 A 的平均中心

$centroid_B$ ——坐标点集 B 的平均中心

U —— H 的左奇异矩阵

V —— H 的右奇异矩阵

S —— H 的奇异值矩阵

H ——奇异值分解矩阵

以此法求得大地坐标系到机体坐标系的旋转变换矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

因此侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y 可表示为

$$R = \arctan(R_{32}/R_{33}) \quad (17)$$

$$P = \arctan(-R_{31}/\sqrt{R_{32}^2 + R_{33}^2}) \quad (18)$$

$$Y = \arctan(R_{21}/R_{11}) \quad (19)$$

将式(17)~(19)代入式(13)可得空间姿态参数侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y 与控制参数电动缸长度 L_i 间的数学关系为

$$[R \ P \ Y]^T =$$

$$G(L_1, L_2, L_3, L_4, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, W_1, W_2, W_3, W_4) \quad (20)$$

即空间姿态函数 G , 该函数以各轮腿电动缸当前长度 L_i 、各轮腿摆臂角度 θ_i 、各轮心在大地坐标系位置坐标 W_i 为输入, 空间姿态参数侧倾角 R 、俯仰角 P 和横摆角 Y 为输出。

2.4 空间姿态模型验证

为了验证空间姿态模型正确性, 通过将电动缸调整至某一长度后由空间模型进行解算得出理论机身倾角, 再利用 ADAMS 仿真模型计算对应的数值解, 再将两者进行对比分析。由于轮腿式机器人横摆角在实际作业过程中并不影响机身保持水平, 所以暂不将横摆角纳入原地调平的考量范围, 此处将机身俯仰和侧倾作为两个单独情形进行理论值和仿真值的对比。

在 ADAMS 将解算姿态模型所需的各项参数设置为相应的联合仿真变量, 在 Matlab 中建立推导的空间姿态模型, 接收 ADAMS 中输出的各项参数并输出解算出的对应状态下侧倾角 R 和俯仰角 P , 同时在 ADAMS 中输出仿真模型侧倾角 R 和俯仰角 P , 与姿态模型解算值进行对比。设置各轮腿大臂 (图 2 中 A 处) 和轮腿前叉 (图 2 中 F 处) 的转动副驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 5, \pi/6)$, 右前轮腿电动缸处移动副驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 5, 0, 15, 100)$, 左前轮腿电动缸处移动副驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 5, 0, 15, 70)$, 左后轮腿电动缸处移动副驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 5, 0, 15, -20)$, 右后轮腿电动缸处移动副驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 5, 0, 15, -50)$, 在以上函数驱动下轮腿式机器人仿真模型在 $0 \sim 5$ s 内进行摆臂动作, 摆臂角度从 0° 变为 30° , 而后固定不变, $5 \sim 15$ s 内各轮腿进行不同的伸缩动作, 引起机体倾角变化, 如图 8 所示。

联合仿真完成后提取空间姿态模型解算结果与仿真模型测量结果进行对比, 结果如图 9 所示, 两者的结果曲线基本重合, 以仿真模型测量结果为基准, 姿态模型解算侧倾角误差均值为 -0.02332° , 标准差为 0.07333° , 俯仰角误差均值为 0.02228° , 标准差为 0.07476° , 误差均小于 0.10° , 验证了空间姿态模型的正确性。

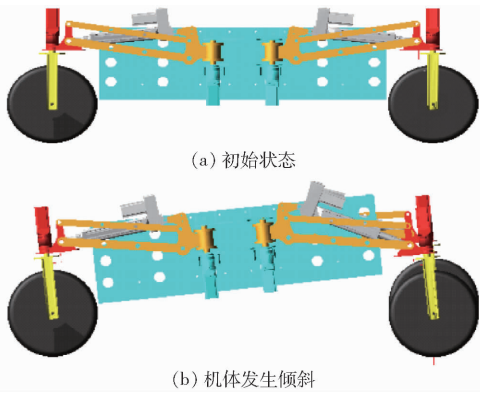


图8 轮腿式机器人机身姿态变化

Fig. 8 Changes in body posture of wheel-legged robots

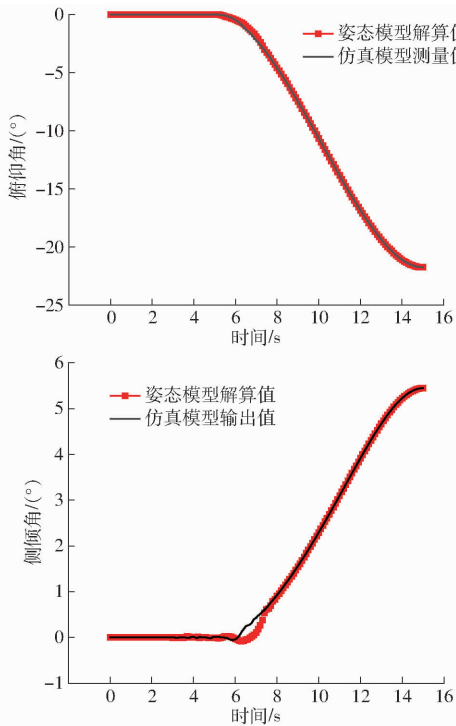


图9 姿态模型与仿真模型输出对比

Fig. 9 Comparison of output between attitude model and simulation model

3 位姿控制系统设计

3.1 位姿控制系统逻辑

复杂地形下机身姿态角已不足以完全表征轮腿式机器人当前姿态信息,越障过程中可能出现某一轮腿悬空但机身仍保持水平的情况,这种轮腿悬空的情况称为“虚腿”现象,如图10所示,若不能及时对“虚腿”进行干涉,可能会出现机体突然失稳倾翻。同时“虚腿”的出现意味着对应车轮驱动力的消失,减弱了轮腿式机器人驱动能力。

在提高轮腿式机器人越障能力的同时,对行驶稳定性也有影响,机身离地间隙增大也意味着整车质心高度增加,增大了轮腿式机器人倾翻风险。因此轮腿式机器人越障过程中主动位姿控制需要更多

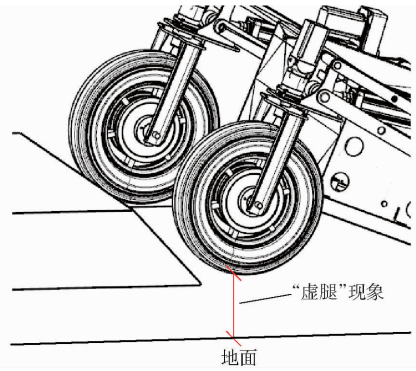


图10 “虚腿”现象示意图

Fig. 10 Schematic of phenomenon of ‘virtual legs’

的外界和整车信息,位姿控制系统的设计需综合考虑俯仰角、侧倾角、“虚腿”、质心高度等因素,系统控制逻辑如图11所示,具体包括机身调平控制器、“虚腿”补偿器和质心高度控制器。

其中机身调平控制器实时监控机身俯仰角和侧倾角,当机身倾角达到调平界限时,机身调平控制器根据输入信息和空间姿态模型输出对应的4条轮腿电动缸调整量,对机身进行调平控制。“虚腿”补偿控制器实时监控轮腿式机器人四轮接地力,接地力小于一定范围即认定对应轮腿悬空,悬空时长超过某一限度即控制对应轮腿的电动缸伸长,对悬空轮腿进行“虚腿”补偿。此外,具体补偿量还需考虑调平控制量,当调平需求与“虚腿”补偿需求相同时,输出基础补偿量,反之则应以“虚腿”补偿需求为主,放大基础补偿量以覆盖调平控制量。质心高度控制器实时监控轮腿式机器人的质心高度,当质心高度超过一定范围时认定质心进入危险高度,同时查询机身调平控制器和“虚腿”补偿器的输出量,若两者在接下来的一定时间内输出的4条轮腿电动缸调整量均为零,则认定此时未处于机身调平和“虚腿”补偿状态,质心高度控制器控制4条轮腿电动缸收缩,降低质心高度,提高行驶稳定性。

3.2 位姿控制算法

在越过障碍时,轮腿式机器人通过安装在机体的姿态传感器获取机体的姿态角,通过轮腿电动缸的实时反馈获取电动缸长度信息,通过轮腿大臂处的角度传感器获取轮腿摆臂角度,代入相应公式求得各轮心相对位置坐标,根据调平前后轮心位置坐标不变的特点,逆解空间姿态模型输出机体调平所需的各轮腿调整量。

逆解空间姿态模型问题可转换为多目标优化问题,在多目标优化问题中,优化目标之间存在一定的制约关系,一个优化目标性能的提高通常伴随着其它目标性能降低,因此多个优化目标很难同时达到最优。而多目标优化算法全局搜索能力能够避免传

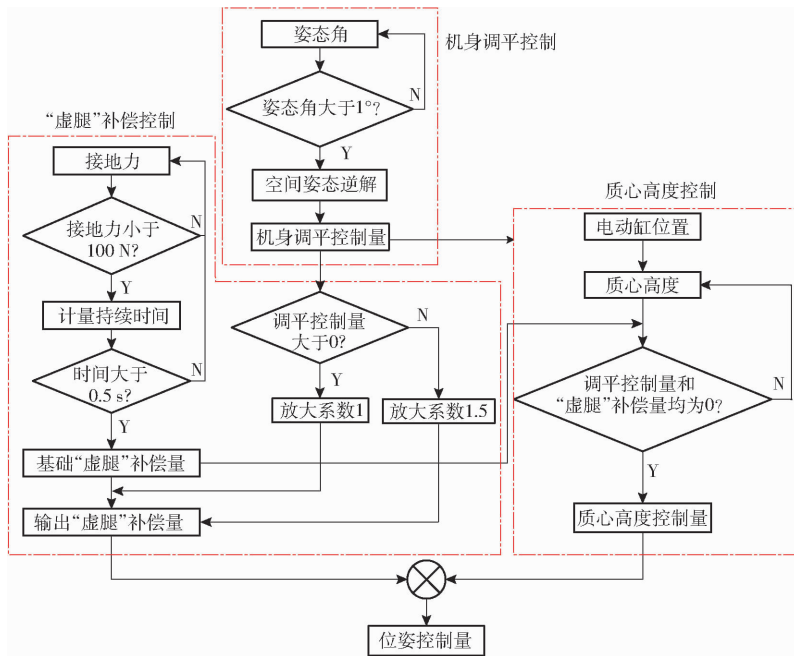


图 11 位姿控制系统逻辑框图

Fig. 11 Logic diagram of pose control system

统的多目标优化方法在寻优过程中陷入局部最优解的问题。常用的多目标优化算法有 NSGA - II (带精英策略的非支配排序遗传算法) 以及 PSO (多目标粒子群算法), 两者都属于全局优化方法, 都能够在全局的解空间里寻找到性能最高的解集。

由于轮腿式机器人的应用场景为丘陵山地, 道路情况复杂, “虚腿”现象频繁发生, 因此各控制器补偿量的是非连续变化量, 在该种情况下 PSO 算法收敛性较差, 而 NSGA - II 算法收敛性较好^[31], 并且 PSO 算法针对离散优化问题容易与传统多目标优化方法一样陷入局部最优解, 因此选用 NSGA - II 作为轮腿式机器人的位姿控制算法。

NSGA - II 算法流程如图 12 所示, 该算法以当前各轮腿电动缸长度生成初始种群, 以机体俯仰角和侧倾角为优化目标, 设计基于空间姿态模型的目标函数。首先对初始种群设置初始参数, 对各电动缸长度变化所引起的机身侧倾角与俯仰角采用整数编码赋予其相应的序号, 在满足目标函数和约束条件的基础上随机生成 n 个粒子, 每个粒子都包含侧倾角、俯仰角、接地力等参数。在生成第 1 代子群之前, 需对粒子进行非支配排序, 即将其中部分较优个体进行赋予相应的适应度, 其余个体与之对比, 若大于则进行保留, 并将其赋予一个新的适应度, 然后再将新的层级进行分层操作, 直至所有个体都被分层从而形成新种群。再通过计算种群拥挤度, 即保证种群多样性同时减轻种群冗余度。如不同的粒子导致极为接近的优化效果时, 则保留其中一个粒子即可。当种群拥挤度达到较为合适值时, 即两个相邻

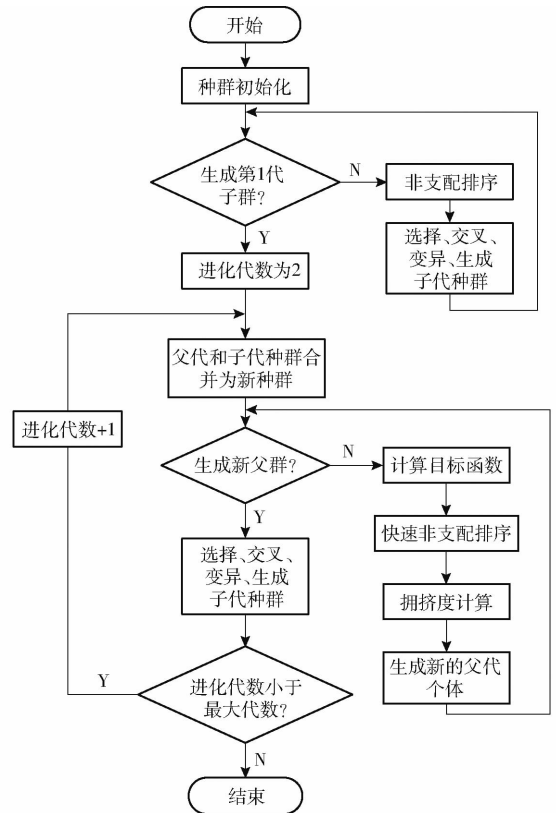


图 12 NSGA - II 算法流程图

Fig. 12 NSGA - II algorithm flowchart

的个体适应度差值的绝对值大于两端无穷远个体的差值绝对值时, 则生成新一代父群。最后, 通过选择、交叉、变异 (轮盘赌法) 生成子代种群, 即逐项比较各项目标优化参数, 未达标者先淘汰, 重复操作直至到达指定代数后将最优个体作为调平控制的轮腿电动缸调整量。

3.3 位姿控制联合仿真

3.3.1 仿真路面

为模拟轮腿式机器人在丘陵山区的非结构地面作业情况,仿照丘陵山区地形多坡面且坡度大的特点,建立图 13 所示路面模型来模拟轮腿式机器人的工作路况,图中弧状突起路段长 10 m,高 1.3 m,第 1 个梯形路段长 10 m,高 0.3 m,坡度 15°,第 2 个梯形路段长 9.5 m,高 0.5 m,坡度 30°,弧状凹坑路段长 7.2 m,深 0.4 m。

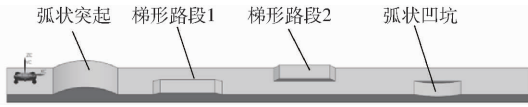


图 13 仿真路面

Fig. 13 Simulated road surface

3.3.2 位姿控制系统

根据前文所述的运动学分析及空间姿态模型,结合位姿控制算法控制逻辑建立轮腿式机器人 Matlab 运动学模型、位姿控制系统模型和 ADAMS - Matlab 联合仿真模型,如图 14 所示。位姿控制系统

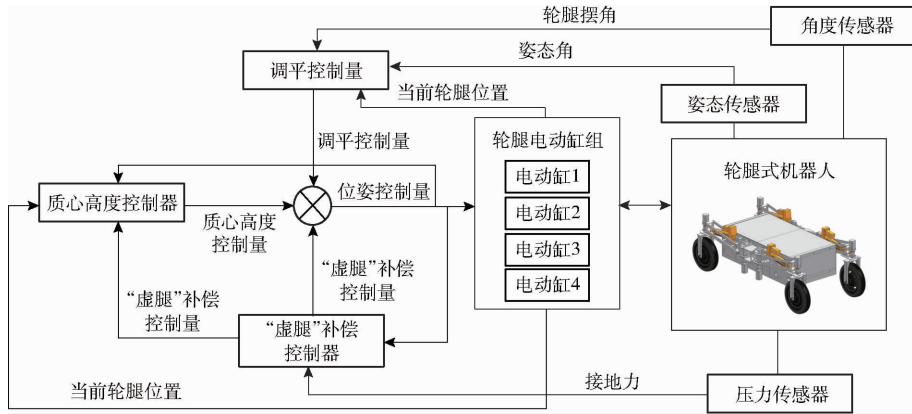


图 14 位姿控制联合仿真模型

Fig. 14 Joint simulation of pose control

3.3.3 联合仿真结果

为了验证 NSGA - II 算法应用在多目标优化领域的优越性,将其与传统的 PID 控制算法进行仿真对比,结果如图 15 所示。由图 15 可以看出,基于 NSGA - II 算法位姿控制方案俯仰角最大调平误差为 1.08°,侧倾角最大调平误差为 1.19°,控制精度远高于传统 PID 控制方法。这是因为基于 PID 控制算法的调平方案只能对当前状态的最大影响因素进行调平而忽略了其它因素,导致系统调平精度较低,且经常出现调平“过度”而导致的机身反方向倾斜现象。而基于 NSGA - II 算法所设计的位姿控制系统能够通过检测质心高度、轮腿接地力和机身姿态角来求解各轮腿机构作动行程最优量,且能够通过检测机身姿态角进行调平效果的反馈,达到调平全过程闭环控制,因此调平精度大幅度提升,验证了基

以 ADAMS 模块输出的各项参数为输入,经机身调平控制器、“虚腿”补偿控制器和质心高度控制器输出控制量相耦合并转换为轮腿式机器人 4 条轮腿电动缸伸缩速度控制量,考虑到轮腿电动缸实际运行速度,添加 Saturation 模块限制该耦合量上下限为 ± 30 ,即仿真中轮腿电动缸伸缩速度最大为 30 mm/s,将限制后的耦合控制量作为位姿控制系统的输出,传递给 ADAMS 系统模块的输入端。由于道路模型为丘陵山地林间的极限路面,且实际作业过程中需搭载作业机具,为保证作业安全性车速不宜过快,当仿真车速设定较高时电动缸响应将会不及时而造成调平效果不佳的情况,因此结合电动缸响应速度将作业时速度设定为 2 km/h。

位姿控制联合仿真的具体流程为:机身调平控制器实时检测机身位姿倾角,并通过 Matlab 中的调平控制算法进行各电动缸伸缩量的计算,之后将其反馈至 ADAMS 各电动缸进行调平,同时 ADAMS 输出轮腿式机器人位姿状态进行反馈从而实现闭环的联合仿真。

于 NSGA - II 算法的位姿控制方案的可行性。

4 实车试验

4.1 位姿控制硬件系统搭建

位姿控制硬件系统搭建需要用角度传感器、姿态传感器、步进电机、电动缸、整车控制器及电源等硬件,图 16 为位姿控制系统的硬件组成及各元件间的连接关系,根据各元件信号输出形式为各传感器和执行电机编写相应的通信和控制程序,最终实现对轮腿式机器人位姿控制。

4.2 位姿控制系统调试

为验证样机空间姿态与各轮腿电动缸伸长量的对应关系,与前文所得的仿真结果进行对比,进行空间姿态模型验证试验。将样机水平停放于地面,倾角传感器安装于样机顶部中心,以电动缸最短时的

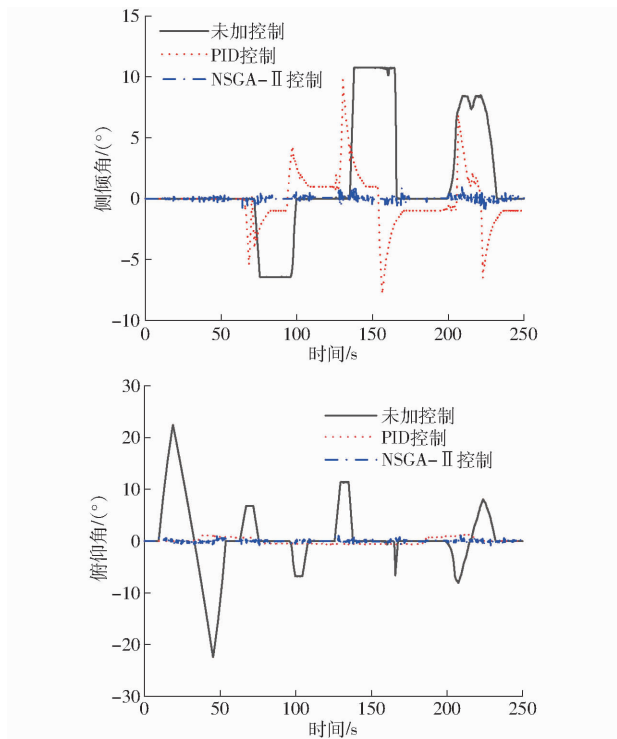


图 15 侧倾角、俯仰角变化曲线

Fig. 15 Roll angle and pitch angle variation curves

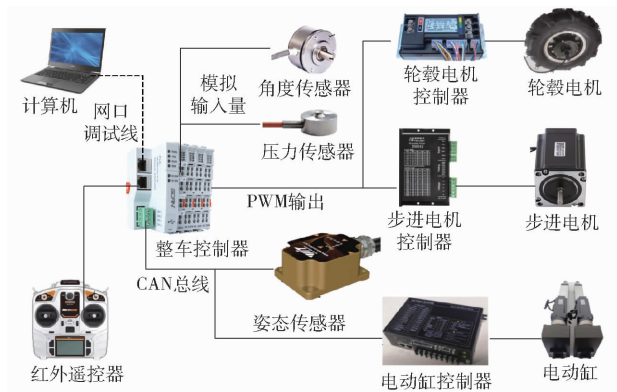


图 16 位姿控制系统硬件架构

Fig. 16 Hardware architecture of pose control system

位置为零位,4 个电动缸初始状态均为 50 mm,然后右前轮腿电动缸伸长 100 mm,左前轮腿电动缸伸长 70 mm,左后轮腿电动缸收缩 20 mm,右后轮腿电动缸收缩 50 mm,如图 17 所示。



图 17 空间姿态模型验证

Fig. 17 Space attitude model validation

将电动缸动作期间的倾角值导出,与前文的仿真倾角值进行对比,结果如图 18 所示。从图 18 可

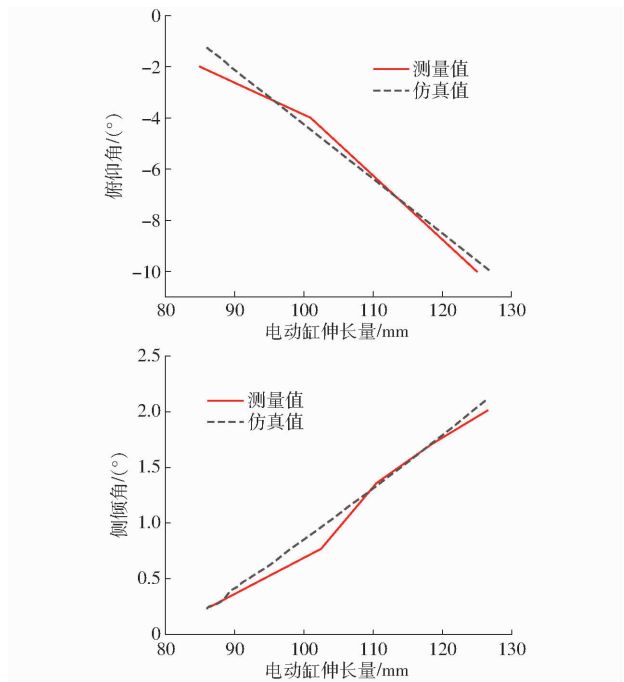


图 18 空间姿态角对比曲线

Fig. 18 Space attitude angle comparison curves

以看出,俯仰角与侧倾角实测值与仿真值较为吻合,只有轮腿伸长量约为 103 mm 时测量值与仿真值有较大差别,约为 0.5°,出现这种情况的主要原因与轮腿加工和安装精度有关,但仍在误差允许范围内。因此可认为实际空间姿态模型与推导的空间姿态模型一致。

4.3 样机试验

4.3.1 离地间隙调整试验

轮腿式机器人离地间隙调整范围对应其越障能力,其实际越障过程是通过障碍物识别后将相应的数据传输至控制中枢,再将相应的指令传输给电动缸进行动作。为了验证轮腿式机器人结构原理上所能达到离地间隙的范围,将轮腿式机器人样车停放在水平地面,遥控电动缸进行伸缩。如图 19 所示,进行了轮腿式机器人离地间隙调整试验。

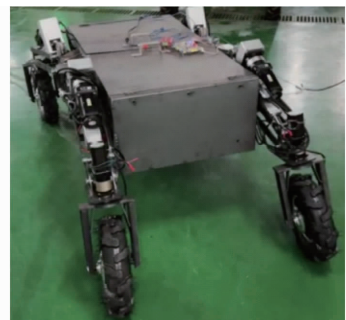


图 19 离地间隙调整试验

Fig. 19 Ground clearance adjustment test

记录遥控期间轮腿式机器人机身四角离地间隙,如表 2 所示。由表 2 可知,在电动缸行程范围

表2 离地间隙调整试验结果

表3 原地调平试验结果

Tab.2 Ground clearance adjustment test data

Tab.3 In-situ leveling test data

电动缸伸 长量/mm	离地间隙/mm				
	右前	左前	左后	右后	平均值
0	24.5	25.1	24.7	24.2	24.6
30	134.6	135.3	134.2	134.7	134.7
60	244.2	244.6	244.2	244.0	244.3
90	354.0	354.1	354.0	354.2	354.1
120	464.7	464.6	464.0	464.0	464.3
150	574.3	574.3	574.5	574.1	574.3

序号	调平前		调平后		调平 时间/s
	俯仰角/ (°)	侧倾角/ (°)	俯仰角/ (°)	侧倾角/ (°)	
1	15.7	-2.2	-0.7	1.2	1.3
2	3.2	9.6	0.8	1.5	0.8
3	-10.9	10.1	-1.3	0.9	1.0
4	-20.1	3.2	1.1	-0.7	1.4
5	-7.9	-8.5	-0.2	0.5	1.6

内,轮腿式机器人离地间隙可在 24 ~ 574 mm 范围内自动调整,越障高度超过 500 mm,能够满足在丘陵山地复杂地形高通过性要求。

4.3.2 原地调平试验

轮腿式机器人机身调平主要通过控制俯仰角与侧倾角来实现,机身的横摆角在实际的作业过程是通过车轮差速进行调整,并不影响机身保持水平,因此不纳入考量范围。原地调平试验原理为:计算机通过 CAN 总线控制部分轮腿进行伸缩动作,机身出现一定范围内的倾角变化,如图 20 所示,然后开启调平开关,轮腿机器人在整机控制器控制下自动进行调平,记录调平前后角度及调平时间,结果如表 3 所示。

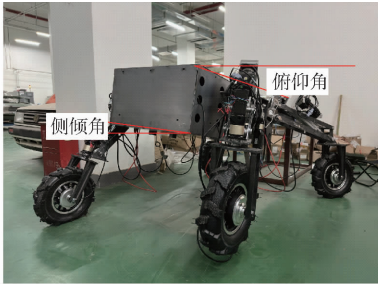


图20 原地调平试验

Fig.20 In-situ leveling test

根据表 3 可知,调平后平均俯仰角约为 0.8° ,侧倾角约为 1.0° ,平均调平时间约为 1.2 s,表明轮腿式机器人位姿控制响应速度较为灵敏且拥有良好

的调平效果。

5 结论

(1)通过仿照蝗虫后足运动机理并结合多连杆机构原理,设计了一种新型轮腿组合式结构。利用 D-H 参数法分析了该轮腿结构的运动学特性,结果显示其机构行程为 0 ~ 150 mm 时,轮腿式机器人离地间隙调整范围为 24 ~ 574 mm,具备较强的越障能力。

(2)推导得到姿态角与轮腿伸长量的空间姿态模型,并设计了基于 NSGA-Ⅱ 的车身空间姿态逆解算法。基于该算法构建了轮腿式机器人全向调平位姿控制系统,并通过 ADAMS-Matlab 联合仿真完成了位姿控制系统的算法仿真验证,结果表明在丘陵山地复杂地形下该轮腿式机器人俯仰角最大调平误差为 1.08° ,侧倾角最大调平误差为 1.19° ,调平效果优于传统的 PID 控制算法。

(3)完成了轮腿式机器人样机试制,并进行了离地间隙调整与原地调平试验。结果表明,试验样机能够实现机身位姿全向自动调平,调平平均时间约为 1.2 s,调平平均误差为 0.8° ,位姿控制响应速度与调平精度能够满足实际工作要求;离地间隙可在 24 ~ 574 mm 范围自动调整,能够满足丘陵山地复杂地形下高通过性要求。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文,廖娟,臧英,等.我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J].中国工程科学,2022,24(1):46-54.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZANG Ying, et al. The development direction of agricultural production in China: from mechanization to intelligence[J]. China Engineering Science, 2022, 24(1): 46-54. (in Chinese)
- [2] 杨再红.丘陵山区农业机械化的现状、问题及对策[J].南方农机,2022,53(20):72-74.
YANG Zaihong. Current situation, problems and countermeasures of mechanised agriculture in hilly and mountainous areas[J]. South Agricultural Machinery, 2022, 53(20): 72-74. (in Chinese)
- [3] 刘超,谭稀岑,姚燕安,等.一种新型可变形轮腿式机器人的设计与分析[J].机械工程学报,2022,58(3):65-74.
LIU Chao, TAN Xicen, YAO Yan'an, et al. Design and analysis of a new type of deformable wheel-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 65-74. (in Chinese)
- [4] 陈刚,金波,陈鹰.基于速度逆运动学的六足步行机器人位姿闭环控制[J].农业机械学报,2014,45(5):265-270,264.
CHEN Gang, JIN Bo, CHEN Ying. Closed loop control of position and posture of hexapod walking robot based on velocity inverse kinematics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 265-270, 264. (in Chinese)

- [5] 苏文海,李冰,袁立鹏,等. 立体坡面农业四足移动平台姿态控制策略与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4):80-91.
SU Wenhai, LI Bing, YUAN Lipeng, et al. Attitude control strategy and test of three-dimensional slope agricultural quadruped mobile platform[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(4): 80-91. (in Chinese)
- [6] 陈志伟,金波,朱世强,等. 液压驱动仿生多足机器人单腿设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(5):36-42.
CHEN Zhiwei, JIN Bo, ZHU Shiqiang, et al. Design and test of a single leg of a hydraulically driven bionic multi legged robot [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(5): 36-42. (in Chinese)
- [7] LI Z, LIU J, SUN Z, et al. Dynamic research and analysis for a wheel-legged harvester chassis during tilting process[J]. Advances in Mechanical Engineering,2019,11(6):1-9.
- [8] SUN Z, ZHANG D, LI Z, et al. Optimum design and trafficability analysis for an articulated wheel-legged forestry chassis[J]. Journal of Mechanical Design,2022,144(1):301-310.
- [9] KIM Y, JUNG G, KIM H, et al. Wheel transformer: a wheel-leg hybrid robot with passive transformable wheels[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014,30(6):1487-1498.
- [10] 曲梦可,王洪波,荣誉. 轮腿混合四足机器人六自由度并联机械腿设计[J]. 农业工程学报,2017,33(11):29-37.
QU Mengke, WANG Hongbo, RONG Yu. Design of six degrees of freedom parallel leg of a wheel legged hybrid quadruped robot[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(11): 29-37. (in Chinese)
- [11] 张金柱,金振林,张天浩. 并联驱动机械腿运动学静力学性能评价及几何参数设计[J]. 农业工程学报,2017,33(21):61-69.
ZHANG Jinzhu, JIN Zhenlin, ZHANG Tianhao. Kinematics statics performance evaluation and geometric parameter design of parallel drive mechanical leg[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(21): 61-69. (in Chinese)
- [12] 张东胜,许允斗,姚建涛,等. 五自由度混联机器人逆动力学分析[J]. 农业机械学报,2017,48(9):384-391.
ZHANG Dongsheng, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Inverse dynamics analysis of a five degree of freedom hybrid robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9): 384-391. (in Chinese)
- [13] 常勇,马书根,王洪光,等. 轮式移动机器人运动学建模方法[J]. 机械工程学报,2010,46(5):30-36.
CHANG Yong, MA Shugen, WANG Hongguang, et al. Modeling method of kinematics for wheeled mobile robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(5): 30-36. (in Chinese)
- [14] 王修文,汪首坤,王军政,等. 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,2020,56(13):84-92.
WANG Xiwen, WANG Shoukun, WANG Junzheng, et al. Electric parallel hexapod robot based on heterogeneous Stewart platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 84-92. (in Chinese)
- [15] ARM P, ZENKL R, SUN B, et al. SpaceBok: a dynamic legged robot for space exploration[C]// 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019.
- [16] 田兴华,高峰,陈先宝. 四足仿生机器人混联腿构型设计及比较[J]. 机械工程学报,2013,49(6):81-88.
TIAN Xinghua, GAO Feng, CHEN Xianbao. Design and comparison of hybrid leg configurations for quadruped biomimetic robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(6):81-88. (in Chinese)
- [17] TAKEI T, IMAMURA R, YUTA S I. Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10):3985-3994.
- [18] PAN Y, GAO F, DU H. Fault tolerance criteria and walking capability analysis of a novel parallel-parallel hexapod break walking robot[J]. Robotica, 2016, 34(3): 619-633.
- [19] WALAS K, BELTER D. Messor-versatile walking robot for search and rescue missions[J]. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 2011, 5(2): 28-34.
- [20] KIM J Y. Dynamic balance control algorithm of a six-legged walking robot, little crabster[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 78(1): 47-64.
- [21] 沈惠平,吉恩成,丁文芹,等. 6-DOF 混联采茶机器人机构设计与动平衡分析[J]. 农业机械学报,2023,54(5):416-426.
SHEN Huiping, JI Encheng, DING Wenqin, et al. Mechanism design and dynamic balance analysis of 6-DOF hybrid robot for tea-picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):416-426. (in Chinese)
- [22] 刘毅,丰宗强,刘洋,等. 轮式并联调姿机器人冗余控制策略研究[J]. 农业机械学报,2022,53(10):423-435.
LIU Yi, FENG Zongqiang, LIU Yang, et al. Investigation on wheeled parallel pose-tuning robot redundant control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):423-435. (in Chinese)
- [23] GRAND C, BENAMAR F, PLUMET F. Motion kinematics analysis of wheel-legged rover over 3D surface with posture adaptation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009,45(3):477-495.
- [24] 荣誉,金振林,崔冰艳. 六足农业机器人并联腿构型分析与结构参数设计[J]. 农业工程学报,2012,28(15):9-14.
RONG Yu, JIN Zhenlin, CUI Bingyan. Configuration analysis and structural parameter design of hexapod agricultural robot parallel leg[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 9-14. (in Chinese)
- [25] NAGANO K, FUJIMOTO Y. The stable wheeled locomotion in low speed region for a wheel-legged mobile robot[C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2015:404-409.

- ZHONG Kun, LI Hongqian, LI Zhengping, et al. Design and simulation of wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(1): 247 – 251. (in Chinese)
- [18] 周开波, 王旭永, 罗小桃, 等. 摇臂式六轮探测车空间姿态建模与求解[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(7): 1093 – 1098.
ZHOU Kaibo, WANG Xuyong, LUO Xiaotao, et al. Spatial attitude model of six-wheeled rocker rover and its mathematical solution[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(7): 1093 – 1098. (in Chinese)
- [19] JIANG H, XU G, ZENG W, et al. Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103591.
- [20] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 358 – 369.
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 358 – 369. (in Chinese)
- [21] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(10): 2911 – 2916.
GE Jike, QIU Yuhui, WU Chunming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 2911 – 2916. (in Chinese)
- [22] 林阳, 赵欢, 丁汉. 基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(3): 1 – 8.
LIN Yang, ZHAO Huan, DING Han. Solution of inverse kinematics for general robot manipulators based on multiple population genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(3): 1 – 8. (in Chinese)
- [23] 仪孝展. 基于改进遗传算法的物流车辆路径规划方法研究与应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
YI Xiaozhan. Research and application of logistics vehicle route planning based on improved genetic algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology 2018. (in Chinese)
- [24] 张立博, 李宇鹏, 朱德明, 等. 基于遗传算法的护理机器人逆运动学求解方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 48(10): 1925 – 1932.
ZHANG Libo, LI Yupeng, ZHU Deming, et al. Inverse kinematic solution of nursing robot based on genetic algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 48(10): 1925 – 1932. (in Chinese)
- [25] 戈新生, 张奇志, 刘延柱. 基于遗传算法的空间机械臂运动规划的最优控制[J]. *空间科学学报*, 2000, 20(2): 185 – 191.
GE Xinsheng, ZHANG Qizhi, LIU Yanzhu. An optimized method to control the motion planning of space manipulators base genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, 20(2): 185 – 191. (in Chinese)
- [26] 李翠明, 任柯州, 龚俊. 基于改进遗传算法的清洁移动机械臂运动学逆解[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(7): 180 – 185.
LI Cuiming, REN Kezhou, GONG Jun. Inverse kinematic solution of cleaning mobile manipulator based on improved genetic algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(7): 180 – 185. (in Chinese)
- [27] PENCHEVA T, ATANASSOV K, SHANNON A. Modelling of a stochastic universal sampling selection operator in genetic algorithms using generalized nets[C]//*Proceedings of the Tenth International Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 2009: 1 – 7.
- [28] WANG K, LI X, GAO L, et al. A genetic simulated annealing algorithm for parallel partial disassembly line balancing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 107: 107404.
- [29] SAVSANI V, RAO R V, VAKHARIA D P. Optimal weight design of a gear train using particle swarm optimization and simulated annealing algorithms[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(3): 531 – 541.
- [30] 刘本勇, 高峰, 姜惠, 等. 平衡摇臂式移动机器人姿态控制算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(2): 391 – 398.
LIU Benyong, GAO Feng, JIANG Hui, et al. Attitude control algorithm of balancing-arm mobile robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(2): 391 – 398. (in Chinese)

(上接第 391 页)

- [26] NAGANO K, FUJIMOTO Y. A control method of low speed wheeled locomotion for a wheel-legged mobile robot[C]//*2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 2014: 332 – 337.
- [27] 罗洋, 李奇敏, 温皓宇. 一种新型轮腿式机器人设计与分析[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(22): 3018 – 3023.
LUO Yang, LI Qimin, WEN Haoyu. Design and analysis of a new type of wheeled legged robot[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(22): 3018 – 3023. (in Chinese)
- [28] 徐岩, 段星光. 轮腿式机器人的姿态耦合优化控制[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(4): 427 – 432.
XU Yan, DUAN Xingguang. Attitude coupling optimization control of wheeled legged robots[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(4): 427 – 432. (in Chinese)
- [29] BOB Y. A wheeled car, quadruped and humanoid robot: Swiss-Mile robot from ETH Zurich[N]. *Tech Xplore*, 2021 – 12 – 08.
- [30] 王峻, 王辉, 傅杰, 等. 丘陵山地两段式履带行走机构的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2023, 45(9): 217 – 225.
WANG Jun, WANG Hui, FU Jie, et al. Design and experiment of a two stage crawler walking mechanism in hilly and mountainous areas[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(9): 217 – 225. (in Chinese)
- [31] MA Z, WANG J, ZHAO Y, et al. Research on multi-objective optimization model of foundation pit dewatering based on NSGA – II algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10865.