DOI: 10.3901/JME.2021.21.034

并联六轮腿机器人机身平稳性控制方法研究*

雷涛^{1,2} 徐康^{1,2} 汪首坤^{1,2} 王军政^{1,2} 刘冬琛^{1,2} 刘鹏涛^{1,2}

(1. 北京理工大学复杂系统智能控制与决策国家重点实验室 北京 100081;

2. 北京理工大学伺服运动系统驱动与控制工信部重点实验室 北京 100081)

摘要: 轮腿式机器人在非结构化路面运动时, 机身平稳性控制对于提高运动平稳性、降低系统能耗、提高定位与建图精度等具有重要意义。针对并联式六轮腿机器人在通过不规则地形时足端悬空、姿态倾斜、机身晃动等问题, 提出一种融合足端力控制器、姿态控制器及重心高度控制器的机身平稳性控制框架。其中, 足端力控制器通过阻抗控制算法抑制机器人足端受力因地形变化带来的突变扰动; 机身姿态控制器对机身倾斜角进行解耦, 并控制各腿的长度补偿机身的偏移量; 重心高度控制器根据各腿的伸长量自适应地调节机身高度, 保证腿部执行机构具有足够的运动空间。针对三种控制器相互耦合、对外部扰动抑制效果不佳等问题, 利用串级控制的思想将三种控制目标统一为力跟踪控制, 降低机身振荡的风险。在并联式六轮腿机器人上进行了实验验证, 结果表明所提出的控制算法框架能有效抑制外部地形扰动, 当机器人以大约 0.6 m/s 的速度前进时, 机身的俯仰角及横滚角保持在 $-0.7^\circ \sim 0.7^\circ$ 范围内, 足端接触力维持在期望力附近, 且机身重心高度随地面起伏自适应地调整, 确保了机器人的运动平稳性。

关键词: 轮腿机器人; 平稳性控制; 串级控制

中图分类号: TP242

Research on Stability Control Method of Parallel Six-wheel-legged Robot

LEI Tao^{1,2} XU Kang^{1,2} WANG Shoukun^{1,2} WANG Junzheng^{1,2}
LIU Dongchen^{1,2} LIU Pengtao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Key Laboratory of Servo Motion System and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The stability control of the wheel-legged robot passing on uneven roads is the main challenge to improve the stability of the movement and reduce system energy consumption and increase the accuracy of positioning and mapping. Aiming at the problems of hanging legs, body shaking, and tilting of the body of a six-wheel-legged robot, a body stability control framework is proposed which integrates the leg force controller, the attitude controller, and the height controller. Firstly, the leg force controller uses an impedance control algorithm to limit the sudden disturbance of the force due to terrain changes; the attitude controller decouples the tilt angle of the body and changes the length of each leg to compensate for the offset of the body; The height controller adaptively adjusts the height of the center of the body according to the length of each leg to ensure that the leg actuator has enough space for movement. Furthermore, using the idea of the cascade controller to unify the three control targets into force tracking control to solve the problem of coupling of three controllers and restrain external disturbances. Finally, experimental results show that BIT-NAZA can move in an uneven road with a pitch and roll angle of -0.7° to 0.7° under the speeds of up to 0.6 m/s, as well as the foot contact force maintained near the expected force, and the height of the robot is adaptively adjusted with the undulation of the ground, which ensures the motion stability of the robot.

Key words: wheel-legged robot; stability control; cascade control

* 国家自然科学基金资助项目(61773060)。20201106 收到初稿, 20210308 收到修改稿

0 前言

轮腿式机器人兼具轮式机器人和腿式机器人的运动优势, 能实现轮式运动、腿式运动以及轮腿复合式运动等模式^[1-2]。因具有运动形式多样、移动速度快、运动效率高、越障性能好等优势, 轮腿式机器人广泛用于无人特种作战、抗灾救援、野外勘探、星表探测等领域。例如, 美国航空航天局(NASA)研发了一种大型六轮腿机器人 ATHLETE^[3], 该机器人每条腿具有 6 个自由度, 可用于外星球探测任务。意大利理工学院研制的“人马”型四轮腿机器人 Centauro^[4]具有高强度机械结构, 能够用于野外抢险。北京航空航天大学设计了一种六轮腿变结构机器人 NOROS^[5-6], 它通过改变腿的构型实现轮、腿运动模式切换, 在提高环境适应性的同时防止轮子在腿式运动过程中被磨损。

在轮式运动过程中, 轮腿式机器人的机身平稳性主要受地形因素影响。面对非结构化路面, 机器人易出现姿态倾斜、足端悬空等现象, 进而引发以下问题: ① 悬空轮无法提供驱动力, 削弱了机器人的爬坡能力; ② 机器人随地面起伏而晃动, 无法保持相对平稳的状态, 影响其环境感知系统的检测精度; ③ 机器人重心偏移, 在行进中可能引起机体侧翻; ④ 足端的摩擦力矩容易突变, 对轮式电机的转速控制提出了较高要求。因此机身姿态、足端接触力控制是确保轮腿机器人平稳行驶的前提, 可避免机体不确定的晃动、足端悬空、车轮打滑等问题。国内外众多学者针对以上问题对轮腿式机器人的机身平稳性控制展开了一系列研究。REID 等^[7]将轮腿机器人腿部执行机构作为主动悬架, 把地面接触约束条件引入到运动学模型中, 防止车轮悬空。马芳武等^[8]针对轮腿式农业机器人机身位姿变化的问题, 利用整车逆运动学模型对机身质心的位置和姿态进行解耦控制, 确保机器人在野外行驶的平稳性。文献[9]提出了一种带地形感知规划器和地形感知控制器的轨迹优化框架, 能对四轮腿机器人——ANYmal 的车轮位置、速度及接触力进行优化, 使机器人能在颠簸路面快速移动。文献[10]设计了一种四轮腿机器人机身姿态协同控制方法, 利用基于位置的阻抗控制器实现足端接触力控制, 并引入姿态控制器和高度控制器对足端位置进行修正, 使得机身保持水平的同时腿部拥有足够的运动空间。

以上机器人机身平稳性控制方法大多集中于四轮腿机器人, 对六轮腿机器人而言, 上述方法均具

有一定的局限性。六轮腿机器人有冗余腿支撑机身, 单纯的姿态控制不足以使机器人保持平稳, 即使姿态角为零, 其部分腿的足端也可能悬空。鉴于该特性, 仅用机身姿态角无法估计六轮腿机器人所处的地形, 文献[9]中的地形感知器应用受到限制。文献[10]提出的机身姿态与足端力协同控制方法存在两种控制器相互耦合甚至矛盾的问题, 可能引起机身振荡, 难以应用于耦合性更强的六轮腿机器人。

基于以上原因, 本文根据串级控制^[11]的思想, 提出一种包含足端力控制器、机身姿态控制器以及重心高度控制器的六轮腿机器人机身平稳性控制框架, 实现机器人通过复杂路面时机身保持水平、足端接触力维持在一定范围内、重心高度随地形起伏自适应调整的控制目标; 为解决三种控制器控制过程中的耦合问题, 将姿态控制器和重心高度控制器置于控制外环, 力控制器置于内环, 使得足端力控制、姿态控制和高度控制统一为力跟踪控制, 实现机器人在运动中保持平稳并避免机身振动。以并联式六轮腿机器人 BIT-NAZA 为实验平台, 建立机器人单腿运动学模型和机身姿态调整模型, 验证了控制算法的有效性。

1 电动并联式六轮腿机器人

1.1 系统组成

电动并联式六轮腿机器人物理样机如图 1 所示, 其详细参数如表 1 所示。机器人的单腿为倒置的 Stewart 结构, 其足端具有 6 个空间自由度。每条腿由 6 根电动缸驱动, 通过控制电动缸的伸缩长度, 使足端达到预设位姿。电动缸内置力传感器, 可用

图 1 电动并联式六轮腿机器人结构

于机器人足端受力检测。轮式电机安装于机身，能有效降低单腿的重力及抬腿能耗，有利于机器人行走。驱动轮及减速机位于腿的末端，利用传动连杆获取伺服电机提供的动力。机器人 6 条腿呈正六边形均匀分布，在各腿的配合下可实现原地转向、阿克曼转向、变高度、变轮距等运动形式^[12]。

表 1 电动并联式六轮腿机器人结构参数

参数	数值
机身长度/m	1.8
机身宽度/m	1.8
机身高度/m	1.4
总体质量/kg	400
最大负载质量/kg	200
轮式运动速度/(km/h)	20
足式运动速度/(km/h)	1.2
动力电池容量/(kW·h)	15
电动缸行程/mm	400

环境感知系统是实现机器人环境感知、智能避障及自主导航的基础，其主要包含激光雷达、可见光相机、红外相机、组合导航等部分。二维转台提供俯仰和偏航两个自由度的运动，可提升相机的检测范围以及激光雷达点云的密集度。机器人整体采用分布式控制系统结构原理，6 台底层计算机负责单腿电动缸及轮式电机的驱动控制并上传位置、力、转速等信息；环境感知计算机接收、处理各传感器的信息并生成决策指令；主控计算机根据反馈信息、决策指令规划 6 条腿的运动位置及运动时序，实现机器人在复杂环境下运行。此外，为防止强电对控制系统的影响，分别采用 300 V 动力电源和 24 V 控制电源为电机、控制系统供电，提高整体系统的安全性。

1.2 控制系统与通信架构

六轮腿机器人采用由底层计算机、环境感知计算机、主控计算机以及远程开发计算机构成的分布式控制框架，如图 2 所示。底层计算机安装嵌入式 Linux 系统，完成 Stewart 平台运动学逆解、电动缸及轮式电机控制、电动缸位置及力信息采集等任务，其控制周期约 1.5 ms。7 个伺服驱动器通过 CAN 总线扩展板与底层计算机并行通信，提高单腿控制的实时性。环境感知计算机的搭载 NVIDIA Jetson Xavier 核心板，具有较强的计算能

力，其获取摄像头、激光雷达及组合导航的数据，经处理分析后为机器人规划出合理的路径和速度，并将决策信息和聚类后的障碍物信息发送至主控计算机。主控计算机是机器人整体系统的控制核心，它综合 6 条腿的位置、力、转速信息以及环境感知系统发出的决策信息，为机器人规划出合理的足端轨迹和运动方向，并将运动指令按照一定时序以字符串的形式下发至各腿的底层计算机，驱动 6 条腿运动，其控制周期约 10 ms。主控计算机安装 Ubuntu 16.04 系统和 ROS(机器人操作系统)，利用 ROS^[13]特殊的通信机制将机器人的各种运动功能以节点(Node)的形式实现，以提高程序的实时性、扩展性和可维护性。电池管理系统(BMS)负责动力电池的状态(电量、电压、温度等)监测、充放电控制等，它与主控计算机以 CAN 协议进行信息交互。

图 2 六轮腿机器人控制系统与通信架构

六轮腿机器人的控制系统以局域网的形式组织在一起，各计算机之间通过 UDP 协议进行数据传输。远程开发计算机既可以通过“远程桌面”的形式修改主控计算机或环境感知计算机的程序，也能结合交叉编译环境及“远程终端”的方式修改器

人 6 台底层计算机的程序, 还能运行监控界面控制整体系统, 简化了机器人的调试过程。

2 单腿运动学分析及六维力解算

单腿运动学分析是六轮腿机器人运动控制的基础, 而足端力解算是实现机器人力跟踪控制的关键。

2.1 单腿运动学分析

六轮腿机器人单腿的简化模型如图 3 所示, 以固定平台所在圆心建立基坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$, 以运动平台所在圆心建立动坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 。6 根电动缸与基座平台、动平台的铰接点分别表示为 B_j, A_j ($j=1,2,\dots,6$)。设 A_j 在动坐标系中的坐标矢量为 $A_j=(a_{jx}, a_{jy}, a_{jz})$, 其在基坐标系中的坐标矢量为 $A'_j=(a'_{jx}, a'_{jy}, a'_{jz})$ 。设动坐标系原点 O_A 在基坐标系中的位置矢量为 $O_B O_A=(x, y, z)$, 则矢量 A_j 与 A'_j 的关系可表示为

$$A'_j = R A_j + O_B O_A \quad (1)$$

式(1)中, R 为动坐标系到基坐标系的旋转变换矩阵。设动平台绕依次绕其 X 、 Y 、 Z 轴旋转 α, β, γ 角度, 则旋转矩阵可表示为

$$R = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & -c_\beta s_\gamma & s_\beta \\ s_\alpha s_\beta c_\gamma + c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & -s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中 $c_x = \cos x$, $s_x = \sin x$ (x 代表 α, β 或 γ)。

由式(1)可得每一根电动缸的矢量为

$$l_j = R A_j + O_B O_A - B_j \quad (3)$$

式(3)即为机器人腿的运动学逆解, 由解算结果可知: 控制电动缸的长度, 可使机器人足端达到预设位姿。

图3 机器人单腿简化结构及空间坐标示意图

2.2 足端六维力解算

六轮腿机器人因具有特殊的“轮腿式”复合机构, 其足端不适合安装力传感器。为检测机器人足端受力, 在 6 根电动缸末端均安装一维拉-压力传感器, 则机器人腿类似一个 Stewart 结构的六维力传感器。

假设 6 个力传感器只受沿其轴线方向的拉力, 则力平衡方程的矩阵形式为^[14]

$$[F \ T]^T = G f \quad (4)$$

式中, F 、 T 分别表示施加在足端的力和转矩, $f=[f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T$ 是由 6 个力传感器测量值组成的矢量, G 被称为力的正映射矩阵, 可表示为如下形式^[15]

$$G = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \\ S'_1 & S'_2 & S'_3 & S'_4 & S'_5 & S'_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中 S_j ($j=1,2,\dots,6$) 和 S'_j 分别为

$$S_j = \frac{A'_j - B_j}{|A'_j - B_j|} \quad S'_j = B_j \times S_j = \frac{B_j \times A'_j}{|A'_j - B_j|} \quad (6)$$

式(6)中, B_j 和 A'_j 表示电动缸铰接点在基坐标系中的位置矢量。根据单腿运动学逆解结果以及式(1)、式(4)即可计算出机器人足端的六维力。

3 六轮腿机器人机身平稳性控制框架

机身姿态、足端接触力控制是确保六轮腿机器人机身平稳性的前提, 重心高度控制可避免腿部调整空间不足。

3.1 设计流程

以下方法以单腿的高精度位置伺服控制为基础。六轮腿机器人的姿态、足端受力及重心高度均通过调整腿的长度来实现。只考虑足端沿竖直方向的自由度, 可设计如图 4 所示的控制框图。

图4 六轮腿机器人姿态-足端力-重心高度控制框架

图 4 中, $i=1,2,\dots,6$, 力控制器、姿态控制器以及重心高度控制器分别输出位移量 ΔL_i^F 、 ΔL_i^P 、 ΔL_i^H , ΔL_i^F 、 ΔL_i^P 、 ΔL_i^H 三者之和作为各腿的长度调整量 ΔL_i 。经分析, ΔL_i^F 与 ΔL_i^P 的符号并非一直相同, 例如, 当机身朝某方向倾斜时, 该方向腿的受力增大, 力控制器使腿回缩, 为了弥补姿态误差, 姿态控制器使腿伸出, 即 $\Delta L_i^F < 0$, $\Delta L_i^P > 0$ 。由于姿态控制器和力控制器同时调节腿的长度, 当 ΔL_i^F 与 ΔL_i^P 的符号相反时, 足端位置会被来回调整, 进而使机身振荡。另外, ΔL_i^H 与 ΔL_i^F 的符号也并非始终

一致。因此, 直接将三种控制器的输出相加, 存在控制过程相互耦合的问题。

为避免多个控制器直接调节执行机构, 对图 4 所示的控制框架进行改进, 如图 5 所示。该控制框架汲取串级控制的思想, 将足端力控制闭环作为内环, 姿态控制闭环作为外环, 姿态控制器的输出不直接进入执行机构, 而是对足端期望力进行修正。调整重心高度时, 6 条腿同时伸出或缩回, 该过程对机身姿态影响较小, 因此将重心高度控制闭环与姿态控制闭环并联。

图 5 六轮腿机器人机身平稳性控制框架

图 5 中, 姿态调整运动学模型根据姿态传感器的测量值计算出 6 条腿的位置调整量 ΔL_i^P , ΔL_i^P 经 G_p 环节后, 输出作用力 ΔF_i^P , ΔF_i^P 对足端力跟踪偏差 F_i^e 进行修正。为简化分析, 在机身姿态调整过程中, 设第 i 号腿在 Δt 时间内沿竖直方向做初始速度为零的匀加速运动, 加速度为 a , 位移量为 ΔL_i^P , 机体分担到该腿上的质量为 m , 则该过程所需的驱动力为

$$\Delta F_i^P = ma = \frac{2m\Delta L_i^P}{\Delta t^2} \quad (7)$$

ΔL_i^P 与 ΔF_i^P 的转换关系可表述为

$$G_p = 2m / \Delta t^2 \quad (8)$$

同理, G_H 的物理意义与 G_p 类似。在实际控制过程中, G_p 与 G_H 的值根据控制效果进行合理地调节。因此, 图 5 所示的控制框架是将机身姿态控制、重心高度控制转换为两个具有一定刚度的弹簧模

型, 从而使运动学控制转变为足端力控制。姿态控制器与重心高度控制器不直接调整足端的位置, 而是通过 ΔF_i^P 、 ΔF_i^H 来调节力控制器的作用(加剧或削弱)。当姿态和高度不需要调节时, 力控制器对原始足端期望力 F_i^r 进行跟踪。可见, 上述控制框架可避免三种控制器的耦合过程, 以下详细阐述三种控制器。

3.2 机身姿态控制

为使机器人在行进过程中机身保持水平, 建立如图 6 所示的坐标系, 设计机身姿态调整方法。按逆时针方向依次为机器人 6 条腿编号, 机器人的连体坐标系为 Σ , 其基坐标系为 Σ' 。连体坐标系的原点位于机身中心, x 轴与线段 $O_{B1}O_{B2}$ 垂直, y 轴与线段 $O_{B3}O_{B6}$ 平行, z 轴垂直于机身平面向上。初始时, 机器人机身保持水平, 基坐标系与连体坐标系重合, 点 O_{Bi} ($i=1,2,\dots,6$) 表示 6 条腿在机身的铰接中心, 也为各腿的基坐标系原点。

图6 六轮腿机器人简化运动学模型

该模型忽略了机器人足端的轮式驱动，且假设单腿只有沿竖直方向一个自由度，即腿只能沿竖直方向伸长或缩短。机器人受障碍物影响时，设 O_{Bi} 分别绕连体坐标系 z 、 y 、 x 轴旋转的角度为 ϕ ， θ ， ϕ ，旋转正方向为右手螺旋方向。设 O_{Bi} 在连体坐标系中的坐标矢量为 $\mathbf{O}_{Bi} = (x_{Bi}, y_{Bi}, 0)$ ，在基坐标系中的坐标矢量为 $\mathbf{O}'_{Bi}$ ，则

$$\mathbf{O}'_{Bi} = \mathbf{T}(\phi)\mathbf{T}(\theta)\mathbf{T}(\phi)\mathbf{O}_{Bi} \quad (9)$$

式中， $\mathbf{T}(\phi)$ 、 $\mathbf{T}(\theta)$ 、 $\mathbf{T}(\phi)$ 分别为绕连体坐标系 x 、 y 、 z 轴的旋转变换矩阵。设 O_{Bi} 在基坐标系中沿竖直方向的坐标值为 ΔL_i^P ，则由式(9)得

$$\Delta L_i^P = (-\cos\phi\sin\theta\cos\phi + \sin\phi\sin\phi)x_{Bi} + (\cos\phi\sin\theta\sin\phi + \sin\phi\cos\phi)y_{Bi} \quad (10)$$

若机器人的 6 条腿沿竖直方向伸缩的位移量为 $-\Delta L_i^P$ ，即可将机身姿态调至水平。这种方式只需要控制腿的一个自由度，在实际应用中较为方便。

如前所述， ΔL_i^P 被转换为作用力 ΔF_i^P ，通过足端力控制实现姿态调整。从本质上讲，上述姿态控制方法是将机器人机身看作刚体，6 条腿施加垂直于机身的作用力，将该刚体的姿态变化归结于作用力的变化，而非作用点的位置变化(腿的长度)，这与旋翼飞机的姿态控制有相似之处^[16]。

3.3 足端力跟踪控制

因对单腿位置控制的精度要求较低，本文采用基于位置的阻抗控制算法实现六轮腿机器人足端力跟踪控制。需指出，本文只考虑足端沿竖直方向的受力。阻抗控制的基本原理是通过一个阻抗模型，将机器人末端的位置与环境力动态地联系起来，从而间接控制这两个量^[17]。将足端与环境的接触力模型简化为弹簧阻尼模型， B^e 与 K^e 分别表示环境阻尼和环境刚度，如图 7 所示。用弹簧-阻尼-质量块系统描述机器人单腿的物理特性^[18-19]，其动力学模型为

$$M(\ddot{X} - \ddot{X}_r) + B(\dot{X} - \dot{X}_r) + K(X - X_r) = -F_c \quad (11)$$

式中， M 、 B 、 K 分别为质量系数，阻尼系数，及刚度系数； X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 分别表示机器人足端的位置，速度，加速度； X_r 、 $\dot{X}_r$ 、 $\ddot{X}_r$ 分别代表足端期望位置、期望速度以及期望加速度； F_c 为接触力。为使接触力保持在一定范围内，引入一个力参考信号 F_r ，以力偏差 $F_e = F_r - F_c$ 作为阻抗模型的输入，则式(11)可改写为

$$M(\ddot{X} - \ddot{X}_r) + B(\dot{X} - \dot{X}_r) + K(X - X_r) = F_e \quad (12)$$

设 $\Delta X = X - X_r$ ，并对式(12)进行拉氏变换得

$$\frac{\Delta X(s)}{F_e(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (13)$$

机器人单腿的力跟踪控制框图如图 8 所示，卡尔曼滤波器用于过滤力信号中的白噪声^[20]。力参考信号 F_r 为机器人初始状态足端沿竖直方向的受力。力偏差 F_e 经阻抗模型后转化为位置修正量 ΔX ，此时 ΔX 不能直接作用于驱动机构——电动缸。运动学逆解模块将 $X_d = X_r - \Delta X$ 解耦成 6 根电动缸的位置控制信号，从而驱动单腿运动实现力跟踪控制。

图7 机器人单腿阻抗模型及环境接触模型

机器人的 6 个力控制器之间会互相影响，若没有姿态控制器，轻微的干扰可导致机身朝某一方向倾倒。上述耦合影响会被姿态控制器大幅度削减，但姿态传感器和力传感器均具有一定噪声，机器人在平衡点附近微调而抖振。针对该问题，设计变阻尼的阻抗控制器，式(13)中，将阻尼系数 B 与力偏差 F_e 的函数关系设置为

$$B = \psi(F_e) = B_0 \exp\left(-\frac{|F_e|}{F_r}\right) \quad (14)$$

式中， B_0 为初始阻尼系数，阻尼系数 B 随力偏差绝对值减小而增大。力控制器在平衡点附近增大阻尼特性，防止机身抖振；而当力偏差增大时，力控制器自适应地减小阻尼作用，加快执行机构

的反应速度。

图8 足端力跟踪控制框图

3.4 重心高度控制

力控制器和姿态控制器能保证机器人足端触地且机身保持水平。当障碍物较高时，力控制器和姿态控制器产生的控制量可能超出腿的运动空间。当机器人腿完全缩回或伸出时，姿态控制器和力控制器的作用失效。在重心高度控制器的作用下，机器人可根据地形变化自适应地调整腿的长度。

重心高度调整模型如图9所示。模型的输入为6条腿的伸出长度，设最短腿长为 L ， P_L 与 P_H 为两个阈值。当 $L < P_L$ 时，说明某腿的工作空间不足，6条腿的位置调整量为

$$\Delta L_i = P_L - L \quad (15)$$

图9 重心高度调整模型

因 $\Delta L_i > 0$ ，机器人所有腿同时伸出，从而在不干扰机身姿态的前提下提升腿的工作空间。相反，当 $L > P_H$ 时，说明机器人所有腿的工作空间均能适应当前地形，可适当降低重心高度， ΔL_i 为

$$\Delta L_i = P_H - L \quad (16)$$

因 $\Delta L_i < 0$ ，6条腿同时缩回，使机身重心保持在较低的高度，提高机器人的运动平稳性。当腿的

长度均处于区间 (P_L, P_H) 内时，重心高度控制器输出为0，避免重心高度频繁地调节，节省能耗。

重心高度控制器不仅能保证力控制器和姿态控制器正常运行，还能使机器人适应更复杂的地形。

4 试验

为验证所提出控制算法的有效性，本文利用电动并联式六轮腿机器人进行了试验测试。

4.1 单腿力跟踪控制及参数整定

力控制器能防止足端悬空，它也是姿态控制及重心高度控制的基础，需要单独设计试验整定其参数。如图10所示，锁定机器人2~5号腿的位置，以支撑机身，在1号腿前方放置障碍物(长、宽、高分别为85 cm, 48 cm, 8 cm)，并在其底层计算机上单独实施力控制器。

图10 单腿力跟踪控制试验

机器人以轮式运动形式通过障碍物时，通过调整阻抗控制器的参数，改变足端的受力特性，实验结果如图11所示。为便于对比，将三组受力曲线的时间基准进行了平移。由试验结果可知，阻抗控制器的刚度系数 K 与阻尼系数 B 均较小时，足端受力波动较剧烈；当 K 与 B 均较大时，单腿的柔顺性不足以适应路面的起伏变化，无法将受力维持在一定范围内。因此，在保证柔顺性和稳定性的前提下适当调整 M 、 B 、 K 的值，其典型值为： $M=6$ kg， $B=10\,000$ N·s/m， $K=4\,200$ N/m。其中 B 按式(14)自适应调整，式(14)中的 F_r 为足端的初始受力，约900 N。2~6号腿的力控制器参数也利用类似方法逐个进行标定。

图11 单腿力跟踪控制试验结果

4.2 六轮腿机器人机身平稳性控制方法验证

在单腿力控制的基础上,依次加入姿态控制器、重心高度控制器,测试机身平稳性控制算法的可行性。力控制器在各腿所属的底层计算机上运行,控制周期约 1.5 ms,姿态控制器和重心高度控制器则部署在主控计算机上,控制周期约 10 ms,主控计算机以 UDP 协议将控制量分发至各底层计算机。实验中使用荷兰 Xsens 公司的 MTi-300 姿态传感器(图 2),该传感器输出的俯仰/横滚角度误差不超过 0.2° 。

如图 12 所示,在机器人正前方放置两个障碍物,左侧障碍物的尺寸为 $83\text{ cm} \times 48\text{ cm} \times 8\text{ cm}$,右侧障碍物的尺寸为 $85\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。当机器人以轮式运动方式前进时(速度约 0.6 m/s),1、2 号腿和 4、5 号腿依次越过障碍物,3、6 号腿则始终与地板接触。

图 12 六轮腿机器人机身平稳性控制试验

在加入重心高度控制器之前,把 6 条腿的伸出长度设置为 200 mm ,以便于调整姿态控制器的参数 G_p 。当机器人能够在力控制器和姿态控制器的作用下平稳地通过障碍物时,引入重心高度控制器,并调整其参数 G_H 。高度控制器中的 P_L 与 P_H 分别设为 60 mm 及 80 mm 。

在通过障碍物的全过程中,机器人的机身角度变化情况如图 13 所示,6 条腿的足端受力曲线如图 14 所示。由实验结果可知,机器人的足端受力始终在初始值附近变化,其最大值约 1350 N ,最小值约 350 N 。6 个车轮没有出现“悬空”或“超重”的情况,能够保证机器人平稳地行驶。图 14 中,当 1、2 号腿通过障碍物时(约 7.0 s 处),3、6 号腿的受力急剧增大,4、5 号腿的受力减小,但在力控制器的作用下,其受力较快地回到平衡点附近。由角度曲线可知,整个过程机身的俯仰角和横滚角维持在 $-0.4^\circ \sim 0.4^\circ$ 之间,机器人保持在一个较平稳的状态。

图 13 六轮腿机器人的机身角度

图 14 机器人 6 条腿的受力情况

图 15 为机器人通过障碍物过程中足端在竖直

图 15 机器人 6 条腿的足端位移

方向的位移曲线。由于机身的姿态角较小,且3、6腿始终与地板接触,可将3、6腿的位移曲线近似看作机器人的重心高度变化曲线。由结果可知,机器人重心高度能随着障碍物起伏自适应地调整,使得所有腿都具有足够的工作空间。图15中第5.3 s处,1号腿的伸出量小于 P_L (60 mm),3~6号腿同时伸出,便于机器人通过障碍物。当机器人整体处于平地上时,机身重心高度恢复至初值,从而提高运动平稳性。

为进一步验证机器人通过障碍物的能力,设置了如图16所示的试验场景,障碍物将同时影响到机身的俯仰角及横滚角。

图16 单侧障碍物影响下机身平稳性控制试验

此处简要分析试验结果,图17给出了机器人通过障碍物全过程中机身姿态角,1、2号腿的足端受力和足端位移。由试验结果可知,机器人能较好地克服障碍物的影响,机身俯仰角和横滚角维持在 $-0.7^\circ \sim 0.7^\circ$ 范围内,足端受力保持在初始值附近。此外,由足端位移曲线可知,执行机构没有出现抖振现象。

图17 单侧障碍物影响下机身平稳性控制试验结果

4.3 六轮腿机器人机身平稳性控制效果对比

为便于对比所设计的算法框架的效果,本文设置了一组对照试验。对照组按照图4所示的控制框架、图12所示的实验场景进行试验。

对照组的试验结果如图18所示,机器人的足端受力变化范围较大,最大值超过2 500 N,而最小值约-100 N(足端悬空),机器人处于不稳定的状态。由1、2号腿的足端位移曲线可知,机器人在通过障碍物时(2.6 s处),其足端受力增大,而腿却向外伸出,说明力控制器和高度控制器、姿态控制器相互矛盾或耦合。此外,由足端位移曲线的“毛刺”可知,机器人的执行机构来回调整,造成了机身抖振,这也是三个控制器的控制作用来回切换引起的。

图18 对照组机身平稳性控制试验结果

根据对照组的试验结果可知,本文所设计的六轮腿机器人机身平稳性控制方法能够有效降低力控制器、姿态控制器、重心高度控制器之间的耦合程度。通过将三种控制目标统一为力跟踪控制能有效抑制外部地形扰动,提高了机器人的运动平稳性。

5 结论

(1) 针对六轮腿机器人在通过非结构化的未知路面时足端悬空、机身姿态倾斜、机体晃动等问题,提出一种融合足端力控制器、姿态控制器及重心高度控制器的机身平稳性控制框架。该框架利用串级控制的思想将姿态控制和重心高度控制转化为力跟踪控制,极大地降低了三种控制器的耦合影响,有

效地抑制了外界地形扰动, 确保了机器人轮式运动的平稳性。

(2) 在电动并联式六轮腿机器人上的实际试验表明, 当机器人以 0.6 m/s 的速度通过障碍物时, 足端受力始终维持在初始值附近, 机身姿态变化小于 0.7° , 且机体重心随地形起伏自适应调整, 使得每条腿都具有足够的调整空间。

(3) 本文所提出的控制框架有效地提高了轮腿式机器人的运动平稳性, 为将来机器人搭载设备实际应用于抗灾救援、野外勘探等领域提供了可能。此外, 本文所设计的方法在实际工程上简单易行, 不仅提高了轮腿式机器人对复杂环境的适应性, 也可用于具有主动悬架的车辆平稳性控制。

参 考 文 献

- [1] BJELONIC M, BELLICOSO C D, DE VIRAGH Y, et al. Keep rollin' - whole-body motion control and planning for wheeled quadrupedal robots[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2019, 4(2): 2116-2123.
- [2] 刘冬琛, 王军政, 汪首坤, 等. 一种基于并联 6 自由度结构的电动轮足机器人[J]. 机器人, 2019, 41(1): 67-76, 82.
LIU Dongchen, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. An electric wheel-foot-robot based on parallel 6-DOF structure[J]. ROBOT, 2019, 41(1): 67-76, 82.
- [3] SUNSPIRAL V, WHEELER D W, CHAVEZ-CLEMENTE D, et al. Development and field testing of the football planning system for the ATHLETE robots[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(3): 483-505.
- [4] KASHIRI N, BACCELLIERE L, MURATORE L, et al. CENTAURO: A hybrid locomotion and high power resilient manipulation platform[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1595-1602.
- [5] 徐坤, 郑羿, 丁希仑. 六轮腿式机器人结构设计与运动模式分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1): 59-71.
XU Kun, ZHENG Yi, DING Xilun. Structure design and motion mode analysis of a six wheel-legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 59-71.
- [6] DING Xilun, LI Kejia, XU Kun. Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 1060-1067.
- [7] REID W. Actively articulated suspension for a wheel-on-leg rover operating on a martian analog surface[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm: IEEE, 2016: 5596-5602.
- [8] 马芳武, 倪利伟, 吴量, 等. 轮腿式全地形移动机器人位姿闭环控制[J]. 吉林大学学报, 2019, 49(6): 1745-1755.
MA Fangwu, NI Liwei, WU Liang, et al. Position and attitude closed loop control of wheel-legged all terrain mobile robot[J]. Journal of Jilin University, 2019, 49(6): 1745-1755.
- [9] MEDEIROS V S, JELAVIC E, BJELONIC M, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4172-4179.
- [10] PENG Hui, WANG Junzheng, SHEN Wei, et al. Cooperative attitude control for a wheel-legged robot[J]. Peer to Peer Networking & Applications, 2019, 12(3): 1741-1752.
- [11] 孙洪程. 过程控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
SUN Hongcheng. Process control engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 王修文, 汪首坤, 王军政. 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 Xiuwen, WANG Shoukun, WANG Junzheng. Parallel electric six-wheeled-foot robot based on special-shaped stewart platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 84-92.
- [13] PYO Y S. ROS Robot Programming[M]. Seoul: ROBOTIS Co., Ltd, 2017.
- [14] 姚建涛, 侯雨雷, 毛海峡. Stewart 结构六维力传感器各向同性的解析分析与优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 22-28.
YAO Jiantao, HOU Yulei, MAO Haixia. Analytic analysis and optimal design of isotropy performance of six-dimensional force sensor based on stewart platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 22-28.
- [15] 赵磊, 刘巍, 巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2954-2962.
ZHAO Lei, LIU Wei, GONG Yan. Pre-stressed six-axis force/ torque sensor based on stewart platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2954-2962.
- [16] 史艳霞, 乔佳, 薛琰. 基于自抗扰控制耦合四旋翼姿态稳定性研究[J]. 控制工程, 2019, 26(11): 2099-2103.
SHI Yanxia, QIAO Jia, XUE Long. The stability of

- coupled four rotor unmanned aerial vehicle based on ADRC controller[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(11): 2099-2103.
- [17] 丁润泽. 基于阻抗控制的机器人力控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- DING Runze. Research on robot force control based on impedance control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [18] XU Kang, WANG Shoukun, YUE Binkai, et al. Adaptive impedance control with variable target stiffness for wheel-legged robot on complex unknown terrain[J]. Mechatronics, 2020, 69: 102388.
- [19] WANG Lihang, CUI Shaofei, MA Chong, et al. Compound impedance control of a hydraulic driven parallel 3UPS/S manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1):56-69.
- [20] 张志勇, 张淑芝, 黄彩霞, 等. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的分布式驱动电动汽车状态估计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 156-165.
- ZHANG Zhiyong, ZHANG Shuzhi, HUANG Caixia, et al. State estimation of distributed drive electric vehicle based on adaptive extended Kalman filter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 156-165.
-
- 作者简介: 雷涛, 男, 1996 年出生。主要研究方向为机器人运动驱动与控制。
E-mail: leitao080709@163.com
- 徐康(通信作者), 男, 1991 年出生, 博士。主要研究方向为机器人运动与驱动控制, 机器人运动规划。
E-mail: xukang_bit@163.com