

轮腿式爬楼梯移动机器人的设计及运动特性分析

朱坚民 李付才 李海伟 翟东婷

上海理工大学,上海,200093

摘要:针对非结构化复杂环境对移动机器人的运动要求,结合轮式和腿式移动机构的优点,设计了一种高效、稳定的轮腿式爬楼梯移动机器人。设计了机器人的主要结构,分析了机器人的稳定性及转向性能。平地行走、转向、越障、上下楼梯等实验结果表明:设计的轮腿式爬楼梯移动机器人结构简单,运动灵活,控制方便,控制精度高,不需对运行步态进行预先规划,它不仅可以在崎岖不平的环境中实现快速行驶,而且实现了快速稳定的爬楼梯功能,具有很强的越障能力和环境适应能力。

关键词:移动机器人;爬楼梯;轮腿机构;稳定性;越障能力

中图分类号:TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.20.005

Design and Motion Analysis of Wheel—legged Step—climbing Mobile Robot

Zhu Jianmin Li Fucal Li Haiwei Zhai Dongting

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093

Abstract: In allusion to the motion requirements of mobile robot under unstructured complex environments, combining the advantages of wheeled and legged mobile mechanisms, a high efficient and stable wheel—legged step—climbing mobile robot was designed. The principal structure of the robot was designed, and the stability and the steering performance of the robot were analyzed. The experimental results of running on a flat ground, turning, surmounting obstacle and climbing up and down stairs etc. show that the wheel—legged step—climbing mobile robot designed herein has the characteristics of simple structure, flexible movement, convenient control and high control precision, and it is unnecessary to plan the motion gait in advance. The robot can ride rapidly in the rugged environment and realize the function of fast and stable climbing steps, in addition, it is provided with strong surmounting obstacle capability and better environmental adaptability.

Key words: mobile robot; step—climbing; wheel—legged mechanism; stability; surmounting obstacle capability

0 引言

移动机器人可以完成危险环境下的探查、侦察、巡逻、救灾和排爆等工作,其应用前景越来越广泛。楼梯是移动机器人在工作中最常见、最难跨越的障碍之一,所以攀爬楼梯是移动机器人适应非结构化环境所必备的功能之一。

国内外现有爬楼梯移动机器人按实现爬楼梯功能的原理主要分为轮式、腿式、履带式、复合式(如轮腿式、关节履带式、轮履式)等。轮式爬楼梯移动机器人具有结构简单、效率高、重量轻和易于控制的优点^[1-3],但其环境适应性较差,很难适应楼梯这类特殊的结构化环境。腿式爬楼梯移动机器人具有较强的环境适应能力,可通过调整腿部姿态来适应崎岖不平的地形^[4-7],但这种机器人结构复杂、移动速度慢、效率低,难以实现稳定步态规划和稳定平衡的控制。履带式爬楼梯移动机器

人具有良好的爬楼梯性能和一定的越障能力^[8-10],但其灵活机动性较差,自身重量较大,爬越楼梯的速度较慢。复合式爬楼梯移动机器人具有很强的地形适应能力和较好的机动性^[11-16],但其结构和控制系统一般较复杂,需要进行复杂的轨迹规划和步态规划等。

针对上述问题,为了同时实现机器人高速、高效和稳定的爬楼梯功能,通过对不同类型爬楼梯移动机器人运动特性进行综合分析,我们设计并实现了一种新型轮腿式爬楼梯移动机器人,本文对该机器人进行了结构设计计算与分析,并进行了实验研究。

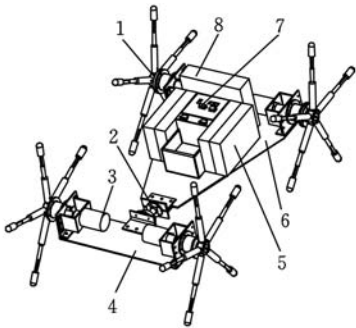
1 轮腿式爬楼梯移动机器人的总体结构

所设计的轮腿式爬楼梯移动机器人采用对称结构,由机身和 4 个结构尺寸完全相同的独立驱动单元构成,如图 1 所示。

每个驱动单元的轮腿机构包括 5 个轮腿系杆和轮腿本体。图 2a 所示为轮腿系杆,其前端固定有橡胶帽以增加摩擦力,吸收机器人运动时产生

收稿日期:2012—08—31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975179);上海市教委科研创新项目(11ZZ136);上海市科委科研计划资助项目(12DZ2252300)



1. 轮腿机构 2. 铰接机构 3. 直流伺服电机 4. 后机身
5. 电机控制卡 6. 前机身 7. 实时控制单元 8. 电池

图 1 轮腿式爬楼梯移动机器人总体结构

的冲击和振动,起到防滑减振效果,并确保机器人在爬楼梯等越障过程中的运动稳定性。轮腿系杆底端设计有两个螺纹孔以便于安装到轮腿本体上。图 2b 所示为轮腿本体,5 个轮腿系杆沿轮腿本体的轮毂圆周均匀分布,相互之间的夹角相等均为 72° ,轮腿系杆通过 2 个螺栓固定在轮腿本体上,调节轮腿系杆与轮腿本体的配合深度可以适应不同高度的楼梯、台阶。图 2c 为轮腿机构装配后的实物照片。

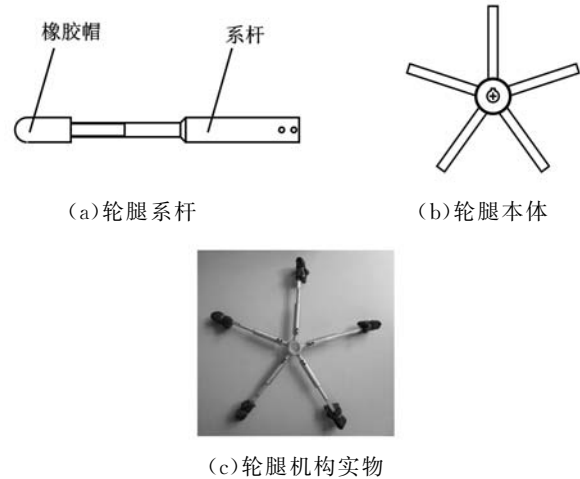


图 2 轮腿系杆、轮腿本体与轮腿机构

机器人的每个独立驱动单元均采用体积小、输出转矩大的直流无刷伺服电机驱动。伺服电机的输出转矩经减速器传输至轮腿机构,对其进行直接驱动。通过控制驱动电机的转速实现对机器人移动和转向的控制,可以实现枢轴旋转和自旋旋转等转向动作^[17]。机器人机身在机器人中部,用于装载控制系统、电池及遥控通信设备等。前后机身通过铰接机构连接,使前后机身和固定在机身上的 4 个独立运动单元沿连接轴轴线相对转动,形成一个转动自由度,如图 3 所示。这种结构保证了机器人爬楼梯或在崎岖不平的地形环境中运行时,其 4 个轮腿机构均能与地面保持可靠接触,提高了机器人越障能力和运行稳定性。

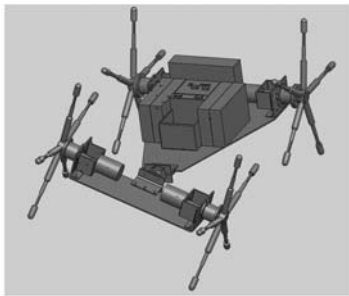


图 3 机器人的越障运行状态

本文设计的机器人控制系统采用基于 CAN 总线的嵌入式实时控制系统,具有实时性好、抗干扰能力强、成本低、可靠性高、开放性好的特点,可以满足机器人的实时控制要求。控制系统由一个紧凑型嵌入式实时系统(CompactRIO-9025)和 4 个伺服从控制器(EPOS2 70/10)组成 CAN 网络,如图 4 所示。机器人各轮腿机构驱动控制系统通过 CAN 总线与嵌入式系统传输数据,给出每个驱动器的控制信号。每个驱动电机的控制均采用独立的 PID 闭环控制,电机的电流、转速、位置等实时信号反馈到控制器上,组成闭环控制系统。嵌入式实时系统通过 IEEE 802.11b 无线通信与上位机进行人机交互,实现对机器人运动状态的实时监控。

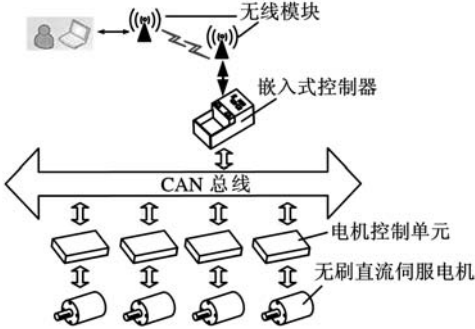


图 4 机器人控制系统结构

表 1 所示为本文设计的轮腿式爬楼梯移动机器人的基本技术参数。通过对楼梯台阶高度和宽度的统计分析,本文所设计的机器人长度为 580mm,宽度为 465mm,轮腿长度可调节范围为 180~220mm。根据设计目标,计算机器人行驶、

表 1 机器人的基本参数

项目	基本参数
长度	580mm
宽度	465mm
轮腿长度	180~220mm 可调节
重量	4.5kg
控制器	CompactRIO 9025, NI 9853 CAN 模块
电机	4 台 24V、50W Maxon EC 45 盘式无刷直流伺服电机,156 : 1 的行星齿轮减速器
电池	6Ah/24V 锂电池,1.2kg

转向、爬越楼梯时所需功率、转速等参数,选取 Maxon EC45 盘式无刷直流伺服电机作为驱动电机。考虑机器人的整体质量、电机的额定电压和功率等因素,经过计算,选择 VFEB-2401-21 型锂电池作为机器人的电源。

2 机器人轮腿机构系杆数的确定

轮腿机构是轮腿式移动机器人能否顺利、高效、稳定、精确地完成爬楼梯等越障任务的关键,对轮腿式移动机器人的工作能力有着决定性影响。轮腿机构的系杆数决定了机器人的越障能力、机器人驱动力及机器人质心的波动,它对机器人的运行性能至关重要。

2.1 轮腿机构系杆数对机器人越障能力的影响

如图 5a 所示,标准轮式机构可爬越障碍的高度 h_0 受限于轮式机构的半径 r , $h_0 \leq r$ 。对于轮腿式移动机构,其系杆数对其越障能力存在确定的影响关系。

图 5b~图 5d 分别为系杆数 3、5、6 的轮腿机构越障示意图。假设它们均处于越障极限状态的初始位置,轮腿旋转方向均为顺时针,每一个轮腿系杆之间以夹角 ϕ_i 均匀分布在轮毂圆周上,轮腿机构半径为轮毂轴心到轮腿系杆顶端的距离 r ,接触支撑面的轮腿系杆与轮轴中心到支撑面垂线的夹角为 θ_i 。受到摩擦力和驱动力的限制,轮腿机构可以翻越障碍的极限高度与其几何尺寸有关,它可翻越的障碍高度为 h_i ($i=1,2,3,\dots$),即

$$h_i = r(\sin \frac{\phi_i}{2} + \cos \theta_i) \quad (1)$$

图 5b~图 5d 中, $\theta_3=30^\circ$, $\phi_3=120^\circ$; $\theta_5=18^\circ$, $\phi_5=72^\circ$; $\theta_6=0^\circ$, $\phi_6=60^\circ$ 。由式(1)计算可得: $h_3=1.732r$, $h_5=1.539r$, $h_6=1.500r$ 。同样地,也可以计算系杆数为 2、4、8、12 的轮腿机构所能翻越障碍的高度分别为 $h_2=2r$, $h_4=1.414r$, $h_8=1.38r$, $h_{12}=1.258r$ 。

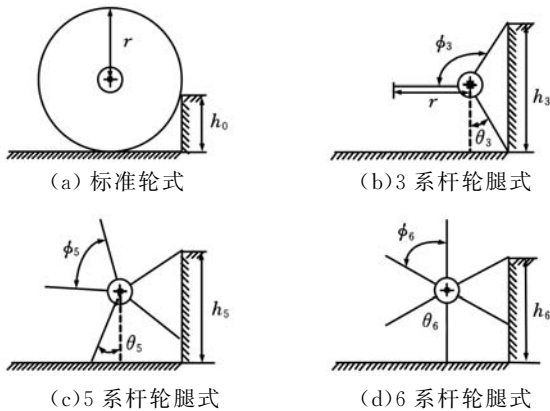


图 5 标准轮式和轮腿机构越障示意图

由上述计算结果可知:轮腿式移动机构的越障能力优于标准轮式移动机构,且其越障能力的变化趋势随着系杆数的增大而逐渐降低。

2.2 轮腿机构系杆数对机器人驱动力的影响

不同的轮腿系杆数对机器人越障时所需的驱动力要求是不一样的。为方便说明,本文以系杆数为 5 的轮腿机构为例来进行驱动力分析。假定轮腿机构所受驱动转矩为 M ,轮腿机构与接触面之间的摩擦因数为 μ ,机器人在越障时的受力情况如图 6 所示。设 G_1 为机器人对该驱动机构所作用的重力, N_1 、 N_2 为台阶面对轮腿机构的支撑力, F_1 为轮腿机构越障所需的驱动力,它是电机驱动机器人后作用于轮腿机构的水平分力, F_1 、 F_2 为台阶面对轮腿机构的摩擦力, σ 为接触台阶面的系杆和水平面之间的夹角。

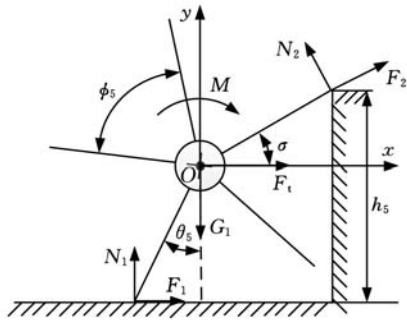


图 6 轮腿机构爬越障碍时的受力示意图

在轮腿机构爬越障碍的瞬时,有 $N_1=0$,由此时轮腿机构在 x 和 y 两个方向上的受力平衡分析,有

$$G_1 - N_2 \cos \sigma - F_2 \sin \sigma = 0 \quad (2)$$

$$F_1 - N_2 \sin \sigma + F_2 \cos \sigma = 0 \quad (3)$$

$$N_2 r - M = 0 \quad (4)$$

式(2)、式(3)中, $F_2 = \mu N_2$, $0 \leq \sigma \leq 90^\circ$,由几何关系得

$$h_5 = r(\sin \sigma + \cos \theta_5) \quad (5)$$

由式(2)、式(3)可解得

$$F_1 = \frac{1 - \mu \cot \sigma}{\mu + \cot \sigma} G_1 \quad (6)$$

由式(5)、式(6)知,当 $\sigma = \frac{\phi_5}{2}$ 时 h_5 达到最大,此时机器人所需的驱动力为

$$F_1 = \frac{1 - 1.3765\mu}{\mu + 1.3765} G_1$$

同样由式(2)~式(6)也可计算出系杆数为 2、3、4、6、8、12 的轮腿式机器人在攀爬极限高度时所需驱动力大小分别为

$$F_{12} = \frac{1}{\mu} G_1$$

$$F_{13} = \frac{1 - 0.5774\mu}{\mu + 0.5774} G_1$$

$$F_{c1} = \frac{1-\mu}{\mu+1}G_1$$
$$F_{c6} = \frac{1-1.7321\mu}{\mu+1.7321}G_1$$
$$F_{c8} = \frac{1-2.4142\mu}{\mu+2.4142}G_1$$
$$F_{c12} = \frac{1-3.7320\mu}{\mu+3.7320}G_1$$

由以上分析可知:在摩擦因数和机器人重力一定的情况下,轮腿式移动机构所需驱动力与系杆数和所爬越障碍的高度有关。随着系杆数的增加,机器人攀爬极限高度所需的驱动力减小。

2.3 轮腿机构系杆数对机器人移动中质心波动的影响

标准轮式机器人在平地上行走时其质心不存在上下波动的现象,而轮腿式机器人的质心会随着轮腿机构的转动产生周期性的上下波动。为方便说明,以系杆数为 5 的轮腿机构为例分析其质心波动情况。当机器人单个轮腿系杆垂直接触地面时其质心处在最高位置,此时质心高为轮腿机构的半径 r ,如图 7a 所示。当两轮腿系杆同时接触地面时,机器人质心处在最低位置,其高度为 h_{\min} ,如图 7b 所示。由几何关系可得

$$h_{\min} = r\cos\frac{\phi}{2} \tag{7}$$

则质心波动幅度为

$$\Delta h = r - h_{\min} \tag{8}$$

由式(7)、式(8)可计算出系杆数为 2、3、4、5、6、8、12 的轮腿式机器人质心波动幅度分别为 $\Delta h_2 = 1.000r$, $\Delta h_3 = 0.500r$, $\Delta h_4 = 0.293r$, $\Delta h_5 = 0.191r$, $\Delta h_6 = 0.134r$, $\Delta h_8 = 0.076r$, $\Delta h_{12} = 0.034r$ 。

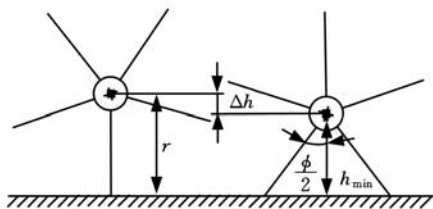


图 7 轮腿机构运行时的两种状态

分析上述计算结果可知:轮腿式机器人在行走时,其质心波动幅度随着系杆数的增加而减小。

综合上述三个方面的分析结果,不同系杆数的轮腿式机器人的越障能力、所需驱动力大小以及在移动过程中质心波动状况如图 8 所示(图 8 摩擦因数按 $\mu=0.1$ 绘制)。对于本文设计的爬楼梯移动机器人,越障能力是其设计的重要技术指标,由图 8 可知:轮腿机构系杆数为 2、3、5 的机器人的越障能力明显优于其他系杆数的机器人。在

这 3 种系杆数的轮腿机构中,系杆数为 2、3 的机器人所需驱动力较大,且机器人移动时的质心波动幅度较大。综合以上三方面的因素,本文确定机器人的轮腿机构系杆数为 5。

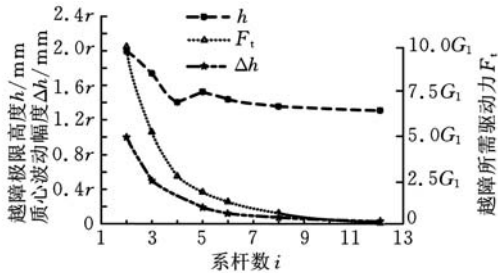


图 8 轮腿机构的系杆数对机器人移动性能的影响($\mu=0.1$)

3 机器人稳定性分析

移动机器人在非结构化环境和楼梯等结构化环境下,由于受力不平衡将会发生倾翻从而导致驱动系统失去牵引、失控等问题,因此移动机器人的倾翻稳定性即是否具有足够的抗倾翻能力非常重要,也是评价机器人越障性能的重要指标。

本文对轮腿式移动机器人越障稳定性采用静态分析方法,即只分析机器人重力与支撑力对其倾翻失稳的影响^[18]。在静态条件下,若机器人以任意方位角置于楼梯上,随着楼梯坡度角的增大,机器人重心线与楼梯坡面的交点将沿楼梯梯度线向下移动,当该交点越过倾翻轴时,机器人会在倾翻力矩作用下倾翻失稳。本文设计的机器人在爬楼梯时,存在绕机器人边线倾翻和角点倾翻的情况,可通过建立稳定锥^[19]的方法对边线倾翻、角点倾翻的静态倾翻稳定性进行综合分析。稳定锥判定方法即是以受力锥作为机器人稳定性判定的基础,根据机器人发生倾翻失稳时所需的最小势能来判断其可能的倾翻方向。

在爬楼梯过程中,机器人的前后两组轮腿机构在楼梯台阶面上的支撑点形成的平面为一个斜坡面,为了便于分析,将楼梯面简化为斜坡面来分析机器人重力与支撑力对其倾翻失稳的影响,如图 9 所示。图 9 中, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为机器人各轮腿与地面的接触点; W 为机器人的质心; S_w 为质心 W 在斜坡面上的投影; T 为点 S_w 到直线 P_1P_2 的垂足; P 为倾翻轴线 P_1P_2 上的任意一点。机器人与斜坡面的 4 个支撑点依次连接形成四边形作为稳定锥底面,质心作为稳定锥的顶点,构成受力锥。机器人以任意方位角 δ 置于斜坡上,其产生倾翻失稳的倾翻轴可能为 P_1P_2 、 P_2P_3 、 P_3P_4 、 P_4P_1 , 倾翻点可能为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。下面以倾翻

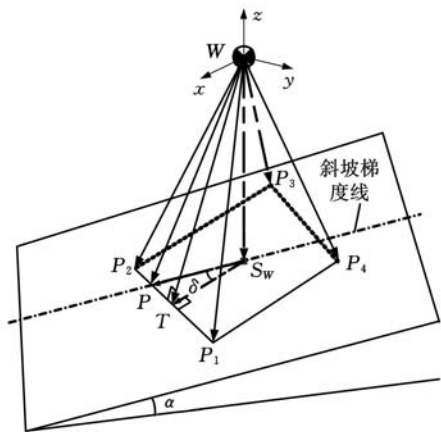


图 9 机器人倾翻稳定锥示意图

轴 P_1P_2 为例分析机器人整体倾翻失稳情况。当斜坡梯度线平行于 S_wP 时,随着坡度逐渐增大,机器人重心线与斜坡的交点 S_w 沿着 S_wP 方向朝倾翻轴 P_1P_2 逐渐移动,当此交点 S_w 落在 P_1P_2 上时,机器人处于临界失稳状态,此时斜坡坡度角 α 就是机器人以方位角 δ 置于斜坡上时的失稳坡度角, $\alpha = \angle PWS_w$ 。当机器人在斜坡上的方位角 δ 改变时,机器人绕倾翻轴 P_1P_2 的倾翻失稳坡度角也将改变,因此存在一个绕倾翻轴 P_1P_2 倾翻失稳的最小失稳坡度角。因为 $S_wT \perp P_1P_2$,所以 S_wT 是 S_w 点到倾翻轴 P_1P_2 的最短距离,当方位角 $\delta = 0$ 时,斜坡梯度线平行于 S_wT , $\angle TWS_w$ 为机器人绕倾翻轴 P_1P_2 倾翻失稳的最小失稳坡度角,且有

$$\tan(\angle TWS_w) = \frac{S_wT}{WS_w} \quad (9)$$

同理可分析机器人绕其他倾翻轴的倾翻稳定性。当斜坡梯度线的方向分别平行于 S_wP_1 、 S_wP_2 、 S_wP_3 、 S_wP_4 时,机器人将发生纵向和横向失稳,即此时机器人将分别绕倾翻点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 发生倾翻失稳。

以上分析讨论给出了移动机器人的倾翻失稳判据:当斜坡坡度角大于机器人绕各倾翻轴和倾翻点倾翻的最小失稳坡度角时,机器人将在斜坡上发生失稳倾翻。最小失稳坡度角越大,在各种运动状态下轮腿式移动机器人的稳定性越好。由式(9)可知:当 WS_w 减小或者 S_wT 增大时,即机器人重心前移或者降低,倾翻失稳角的极限值会增大,即机器人的抗倾翻性能将提高。

4 机器人转向性能分析

由图 1,本文设计的轮腿式机器人为差速转向系统,其转向原理是通过控制左右两侧驱动机构产生速度差来实现转向,这样设计可简化移动机构,提高机构的可靠性,但同侧驱动机构转动

方向和转速必须一致以避免发生拖滑现象^[20]。

如图 10 所示,设机器人向右转向,机器人运行速度为 v_0 , v_i 为第 i 个轮腿机构的纵向速度, $i = 1, 2, 3, 4$, v_{ij} 为第 i 个轮腿机构的实际运行速度, v_{ic} 为第 i 个轮腿机构的侧向速度, θ_i 为 v_i 与 v_{ij} 的夹角, O_1 为机器人几何中心, O_2 为转向中心, ω 为

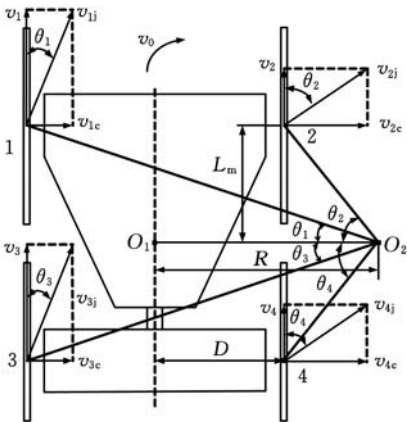


图 10 轮腿式爬楼梯移动机器人转向性能示意图

机器人对转向中心 O_2 的角速度, R 为转向半径, D 为轮腿机构到机器人轴线的距离, L_m 为前轮轴到机器人几何中心的距离。因为同侧驱动机构的转向和转速相同,故取前面两驱动轮腿机构 1、2 进行分析,有

$$v_0 = \omega R \quad (10)$$

$$\frac{v_1}{\cos\theta_1} = \sqrt{(R+D)^2 + L_m^2} \omega \quad (11)$$

$$\frac{v_2}{\cos\theta_2} = \sqrt{(R-D)^2 + L_m^2} \omega \quad (12)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{R+D}{\sqrt{(R+D)^2 + L_m^2}} \quad (13)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{R-D}{\sqrt{(R-D)^2 + L_m^2}} \quad (14)$$

由式(10) ~ 式(14) 可解得机器人的转向半径为

$$R = \frac{k+1}{k-1} D \quad (15)$$

$$k = v_1/v_2$$

由式(15) 可知:当 $v_1 = v_2$ 时,机器人直线前进;当 v_1 与 v_2 方向相同大小不等时,两侧轮腿机构同向差速,可以使机器人绕不同的半径 $R \neq 0$ 转向;当 $v_1 \neq 0$ 且 $v_2 = 0$ 时,机器人绕半径 $R = D$ 转向即枢轴旋转;当 v_1 与 v_2 方向相反时, R 的数值较小,可以实现小半径转向;当 $v_1 = -v_2$ 时, $R = 0$,可以实现原地零半径转向即自旋旋转。

5 实验研究

本文设计的轮腿式移动机器人的实物照片见图 11,根据倾翻稳定性分析,将机身上所搭载的设备安放在机身前端。实验结果表明:机器人在

平坦地面上行走的最大速度为 2.2km/h,爬楼梯时,轮腿机构转过一周能够攀爬五个楼梯的台阶,机器人越障的最大高度为 310mm,楼梯的最大坡度角为45°。

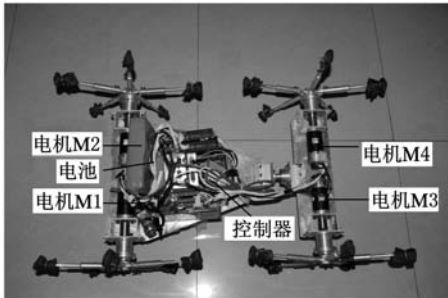
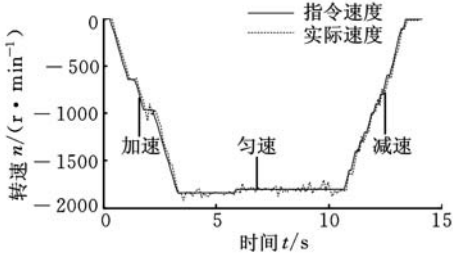


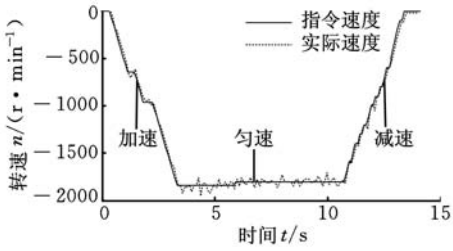
图 11 轮腿式爬楼梯移动机器人实物图

5.1 平地行走实验

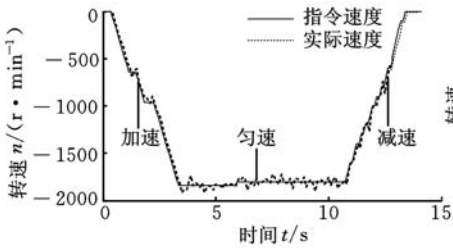
图 12 为机器人在平地行走时的一个加速、匀速及减速周期中各驱动电机的速度跟踪曲线,可



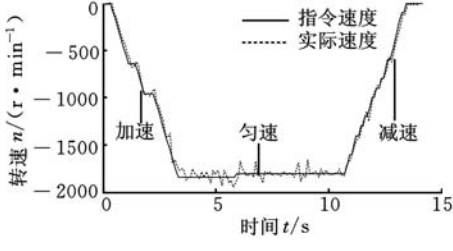
(a)电机 M1



(b)电机 M3



(c)电机 M2



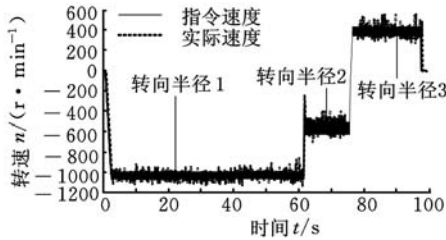
(d)电机 M4

图 12 平地行走时各轮腿驱动电机速度跟踪曲线

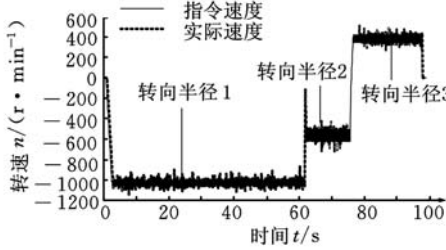
以看出:机器人实现了对指令速度的快速响应,具有较好的跟踪精度;但由于驱动单元传动件的惯性力矩和各轮腿机构负载差异等方面的原因,4个轮腿机构出现了轻微的不同步现象。

5.2 转向实验

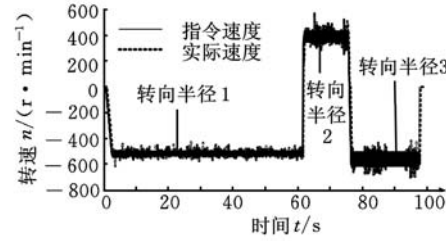
图 13 为机器人在平地上连续实现 3 种不同转向半径时各驱动电机的速度跟踪曲线,转向半径 1 为 1.5m,转向半径 2 和转向半径 3 分别为零半径左右转向。从图 13 可看出:有半径转向比零半径转向速度响应更快,电机运行平稳,零半径转向的速度波动较小,实现了平稳的转向。



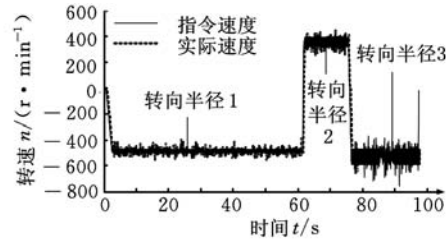
(a)电机 M1



(b)电机 M3



(c)电机 M2



(d)电机 M4

图 13 平地转向时各轮腿驱动电机速度跟踪曲线

5.3 越障性能实验

在平坦地面上放置高度分别为 120mm 和 220mm 的障碍,让驱动电机为 M2、M4 的左侧轮腿机构依次攀爬通过,各驱动电机的速度跟踪曲线如图 14 所示。从图中可看出:随着障碍高度的

增大,机器人通过时电机转动不平稳性明显加大。由于轮腿式移动机器人前后机身由铰接机构连接,有一个相对转动自由度,所以在机身左侧轮腿机构登上障碍后,随着机器人的运动,前机身逐渐倾斜,达到最大倾斜角 25° 后,倾斜角又逐渐减小至零,此后,后驱动机构继续重复上述过程。实验结果表明:本文设计的具有铰接机构的机器人,其单侧轮腿机构均可以顺利通过障碍。

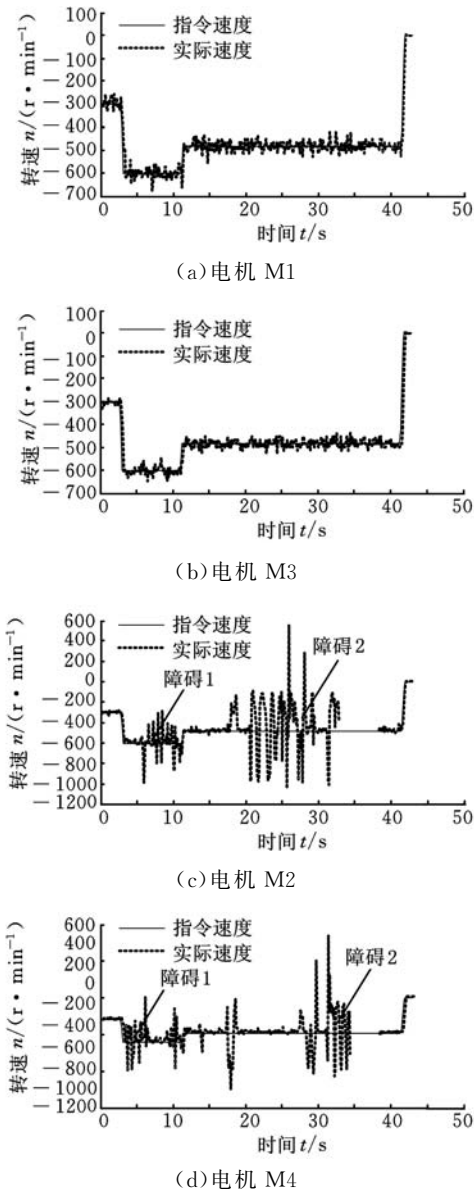


图 14 越障时各轮腿驱动电机速度跟踪曲线

5.4 爬楼梯性能实验

本实验中所用楼梯为自行设计的步长为 250mm、步高为 160mm、坡度角为 32° 的木质楼梯,如图 15 所示。机器人在上下楼梯过程中对指令速度进行跟踪,各驱动电机的速度跟踪曲线如图 16 和图 17 所示。从图中可看出:在机器人上下楼梯的过程中,随着指令速度的不断增大,只要对机器人的位置进行左右微小调整,即可以保证

机器人快速、安全地攀爬楼梯。另外,由于所攀爬楼梯的坡度角小于机器人的倾翻失稳角,所以机器人在上下楼梯过程中未发生倾翻。

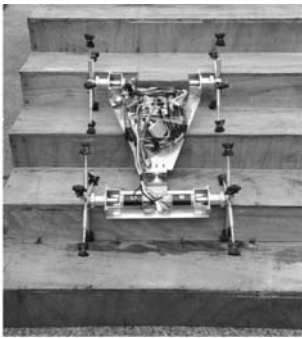


图 15 轮腿式移动机器人爬楼梯实验

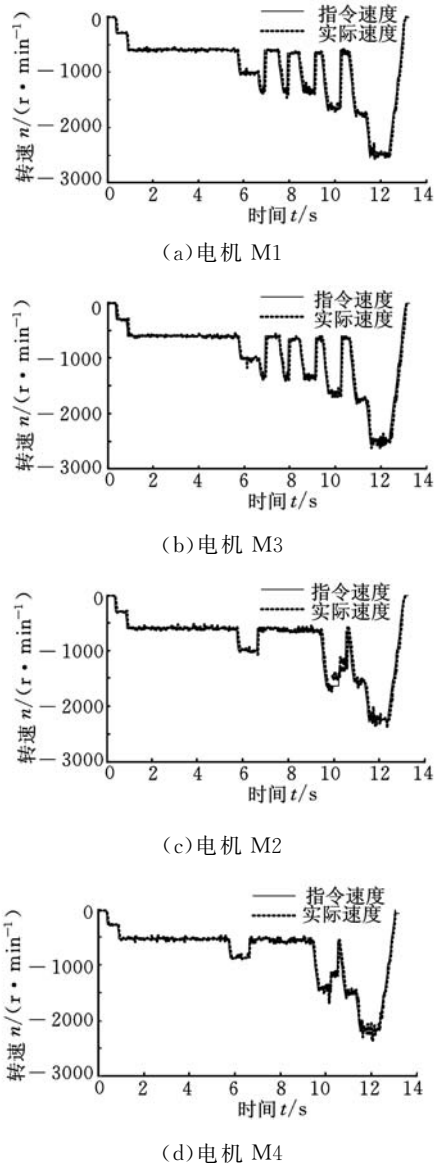


图 16 上楼梯时各轮腿驱动电机速度跟踪曲线

6 结论

本文设计并实现了一种能适应非结构化复杂三维环境的轮腿式爬楼梯移动机器人,对其进行

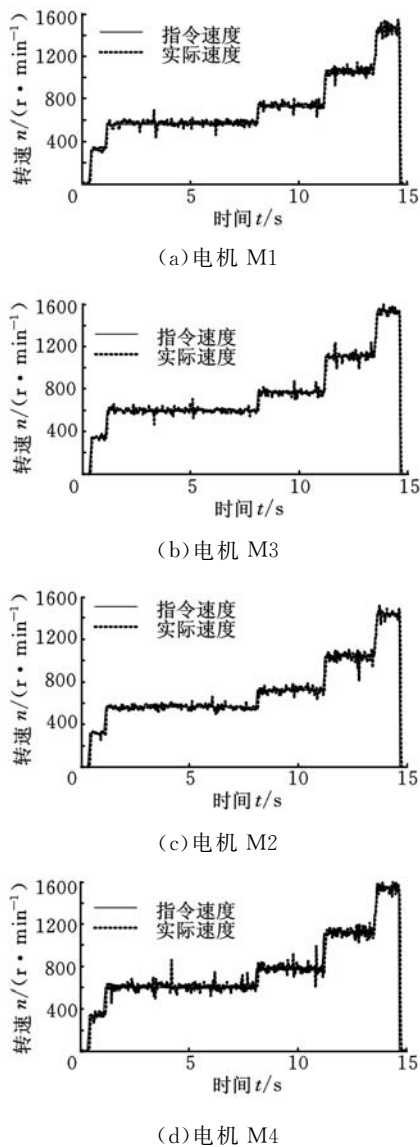


图 17 下楼梯时各轮腿驱动电机速度跟踪曲线

了结构设计计算、控制系统设计、倾翻稳定性及转向性能分析等,进行了平地快速行走、转向、越障、爬楼梯等实验。实验结果表明:嵌入式实时控制系统能满足机器人对无线操控的要求,所设计的机器人具有质量小、结构紧凑、转向灵活、越障能力强等特点,可以快速稳定地攀爬楼梯,且不需要对其进行步态规划,达到了预期的设计目标。

参考文献:

[1] Tao Jianguo, Deng Zongquan, Hu Ming, et al. A Small Wheeled Robotic Rover for Planetary Exploration[C]//ISSCAA 2006 1st Int. Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. Harbin, 2006: 413-418.

[2] Nakajima S. Concept of a Novel Four-wheel-type Mobile Robot for Rough Terrain, RT-Mover [C]//Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Sys-

tems, St. Louis, 2009: 3257-3264.

[3] Fauroux J C, Chapelle F, Bouzgarrou B C. A New Principle for Climbing Wheeled Robots; Serpentine Climbing with the Open Wheel Platform[C]//Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006: 3405-3410.

[4] Moore E Z, Campbell D, Grimminger F, et al. Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex' [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington D C, 2002: 222-2227.

[5] Mrinal K, Jonas B, Peter P, et al. Learning, Planning, and Control for Quadruped Locomotion over Challenging Terrain[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 236-258.

[6] Daniel K, Felix G, Frank B, et al. Additional DOFs and Sensors for Bio-inspired Locomotion: Towards Active Spine, Ankle Joints, and Feet for a Quadruped Robot [C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket, 2011: 2780-2786.

[7] 王新杰, 李培根, 陈学东, 等. 四足步行机器人关节位姿和稳定性研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(17): 1561-1566.

Wang Xinjie, Li Peigen, Chen Xuedong, et al. Research on Joint Positions and Robot Stability of an Omnidirectional Crawling Quadruped Robot[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(17): 1561-1566.

[8] Mourikis A I, Trawny N, Stergios I R, et al. Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles[J]. International Journal of Robotics Research, 2007, 26(7): 737-758.

[9] Woosub L, Sungchul K, Munsang K, et al. ROBHAZ-DT3; Teleoperated Mobile Platform with Passively Adaptive Double-track Hazardous Environment Applications[C]//Proceedings of IROS, Sendal, 2004: 33-38.

[10] Daniele C, Daniele N, Kazunori O, et al. A Semi-autonomous Tracked Robot System for Rescue Missions [C]//SICE Annual Conference, Tokyo, 2008: 2066-2069.

[11] Roger D Q, John T O, Daniel A K, et al. Improved Mobility through Abstracted Biological Principles [C]//Proceedings of the 2002 IEEE/RSI Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, 2002: 2652-2657.

[12] Koh Dooyeol, Hyun Kyunghak, Kim Soohyun. Design of Multi-joint Tracked Robot for Adaptive Uneven Terrain Driving [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous

平面冗余驱动并联机构自适应滑模同步控制

龙 亿 杨晓钧 李 兵

哈尔滨工业大学深圳研究生院,深圳,518055

摘要:基于 Kane 方程,建立了平面二自由度冗余驱动并联机构的动力学模型。基于轨迹轮廓误差,定义了机构的同步误差及滑模面,将动力学方程线性化,设计了自适应滑模同步控制器并对机构进行了稳定性分析。通过 MATLAB 仿真计算,并与计算力矩法进行比较发现,自适应滑模同步控制法优于计算力矩法,能够很好地实现轨迹跟踪。

关键词:冗余驱动;Kane 方程;自适应滑模控制;同步

中图分类号:TH112; TP24

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.20.006

Adaptive Sliding Mode Synchronous Control of a Planar Redundantly Actuated Parallel Mechanism

Long Yi Yang Xiaojun Li Bing

Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong, 518055

Abstract: Based on Kane equation, a planar 2-DOF redundantly actuated parallel mechanism dynamics model was formulated. With trajectory contour error, the synchronization error was defined and the sliding surface was determined. After dynamic equation linearization, an adaptive sliding mode synchronous controller was designed with a stability analysis. MATLAB simulation results show that the adaptive sliding mode synchronous control can be able to achieve good trajectory tracking compared with general computed torque method.

Key words: redundant actuation; Kane equation; adaptive sliding mode control; synchronization

0 引言

冗余驱动并联机器人不但具有一般并联机器

人高精度、高刚度的优越性,并且在很大程度上能够消除机构奇异位形,从而在机器人领域应用广泛。并联机构的动力学建模是控制器设计的基础,美国学者 Kane 等^[1]提出了不用求动力学参

收稿日期:2012-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105089)

Robots and Agents, Wellington D C, 2009:464-469.

[13] Giuseppe Q, Luca B, Giorgio B, et al. Epi. q-TG: Mobile Robot for Surveillance[J]. Industrial Robot: an International Journal, 2011, 38(3):282-291.

[14] 段星光,黄强,李京涛,等.多运动模式的小型地面移动机器人设计与实现[J].中国机械工程,2007, 18(1):8-12.

Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Jingtao, et al. Design and Implementation of a Small Ground Mobile Robot with Multi-locomotion Modes[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(1):8-12.

[15] Florian C, Alexander D, Frank K. Locomotion Modes for a Hybrid Wheeled-Leg Planetary Rover[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket, 2011:2586-2592.

[16] Francois M, Dominic L, Martin A, et al. AZIMUT, a Leg-Track-Wheel Robot[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, 2003: 2553-2558.

[17] 日本机器人学会. 机器人技术手册[M]. 宗光华,程君实,等,译. 2 版. 北京:科学出版社,2007.

[18] Papadopoulos E G, Rey D A. A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators [C]//Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minneapolis, 1996:3111-3116.

[19] 李斌,刘金国,谈大龙.可重构模块机器人倾翻稳定性研究[J].机器人,2005,27(3):241-283.

Li Bin, Liu Jinguo, Tan Dalong. Research on the Tipover Stability of a Reconfigurable Modular Robot [J]. Robot, 2005, 27(3):241-283.

[20] 尚伟燕,邱法聚,杨超珍.差速转向复合式探测机器人运动学分析[J].中国机械工程,2012,23(2): 166-171.

Shang Weiyan, Qiu Faju, Yang Chaozhen. Kinematics Analysis of Differential Steering Exploration Robot with Compound Walking Mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(2): 166-171.

(编辑 苏卫国)

作者简介:朱坚民,男,1968 年生。上海理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为机电系统的智能测控。
李付才,男,1986 年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。
李海伟,男,1985 年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。
瞿东峰,女,1985 年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。