

计算机技术

轮腿式机器人的稳定性控制准则

徐岩¹ 赵秀平¹ 段星光^{2*}

(河北师范大学¹, 石家庄 050024; 北京理工大学², 北京 100081)

摘要 腿式运动模式具有运动灵活、环境适应能力强的特点,但其稳定性控制是一个重要的问题。在分析轮腿式机器人运动特性的基础上,建立了轮腿式机器人的稳定性姿态描述方法,分析了不同稳定性准则的特性和适用性,提出了适合于轮腿式机器人稳定性控制的倾斜边界稳定性准则,并给出相应的稳定性控制方法,为轮腿式机器人的稳定性控制奠定基础。

关键词 轮腿式机器人 稳定性 倾斜边界 机器人姿态

中图分类号 TP242.3; **文献标志码** A

轮腿式机器人可以通过控制四个摆臂来抬起车体形成一种非常有意义的腿式模式,在该模式下,机器人具有控制自身姿态的能力^[1-3]。它所具有的一些共同的特点:①每个轮子单独驱动,提供机器人平台运动的牵引力;②可以独立控制的腿部关节角位置,使得机器人具有控制自身姿态的能力;③具有冗余的驱动系统。

由于轮腿式机器人将轮式机构驱动效率高、速度快、方便控制的优点和腿式机构环境适应性强、越障能力强、可以实现主动的姿态控制等优点结合为一体,使得该类机器人具有较高机动性、一定的越障能力和环境适应能力,更由于其姿态可控性可以满足稳定的视觉系统、操作臂准确作业等的作业需求,使得轮腿式形式的机器人得到广泛的应用^[4]。

在各种应用环境下,要求机器人在保证一定的能源消耗、自主能力、可靠性的基础上进行作业,机器人运动能力是最基本的要求,而机器人的稳定性是首要的问题^[5,6]。本文提出基于少传感信息的机器人稳定性姿态控制方法,提出了机器人稳定性控制准则。

1 机器人稳定性控制问题描述

移动机器人的机构特点和运动方式在很大程度上决定了其运动控制的方法。虽然腿式运动模式具有运动灵活、环境适应能力强的特点,是拓宽机器人可进入地形方面的一种可能的有效方式^[7,8],但是其稳定性控制问题则变得异常重要。需要特别指出

的是,对于轮腿式机器人的稳定性控制不是独立的,主要是由于在该模式下还存在稳定运动前提下的驱动牵引特性、稳定姿态等的耦合优化问题,但机器人的稳定性运动是最基本的要求,是确保整个系统运动安全性的首要前提。

机器人轮式模式或履带模式运动时,机器人的稳定性主要依赖于运动环境的状况,只要机器人重心位于机器人的支撑多边形内,就可以保证机器人的稳定性,所以此时的稳定性问题不是很突出。然而在腿式模式时,机器人运动时的稳定性控制将成为一个重要的问题。主要原因在于:

第一,由于在轮腿模式下,机器人依靠摆臂来抬高车体,势必导致机器人重心提高而不利于机器人运动的稳定性。

第二,在一般情况下,机器人的理想姿态应首先始终保证机器人有四个轮-地接触点,但是,当机器人运行在不平坦的自然环境中时,未知多变的环境特点将不可避免的导致机器人在运动中可能出现三点接触的情况。在有的轮子没有接触到地面或者在接触点有切换的时候,作用于机器人的接触力会发生跳变,很容易导致机器人失去稳定性。

第三,如果没有稳定的视觉反馈信息将很难实现机器人的远程控制以及视觉信息的实时处理,同时相对稳定的机器人姿态将更有利于平台搭载作业系统的作业,并可以有效的防止意外的碰撞或损坏。

所以需要通过控制四个摆臂的关节角变量 $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$ 来进行姿态控制,以尽量保证机器人车体保持水平状态。而在控制 $\{\alpha_i\}$ 变化以改变机器人姿态时,不仅会改变机器人的接触区域从而改变机器人的稳定性边界,而且会改变机器人重心在支撑区域中的投影位置,甚至出现临界稳定状态

2015年6月23日收到

* 通信作者简介:段星光,教授。E-mail:duanstar@bit.edu.cn。

等情况。所以在轮腿模式下,保证机器人运动的稳定性是一个重要的控制内容。

2 机器人姿态与稳定性控制参数

2.1 机器人姿态描述

机器人的姿态定义随着要研究的问题和达到目的的不同而不同。当讨论轮腿式机器人的稳定性时,是要通过控制摆臂的各个关节变量来实现控制机器人车体相对于地面的位姿变化,通过一定的控制方法使车体实现在三维空间的稳定运动。因此,此时的机器人姿态描述将会包含多种信息,如机器人车体在空间角度变化、车体相对于运行地面的位置变化、两侧摆臂相对于车体以及摆臂之间的方位、距离等信息。

虽然用方向余弦法作为坐标系之间的映射和作为点的运动算子都得到广泛的应用,但是方向余弦矩阵对描述物体在空间的姿态不是很方便,具有计算参数多、物理意义不明确等缺点。另一种描述物体空间姿态的方法称为“角度给定法”。在角度给定法中的一种方法为 RPY 法,它通过车体绕三个轴的旋转来达到表示船体姿态的目的,一个是绕前进方向即 X 轴方向的横滚角(Roll) φ ,第二个是绕水平轴 Y 方向的俯仰角(Pitch) ψ ,第三个是绕铅垂轴 Z 方向的偏转角(Yaw) θ 。对于给定的旋转序列,就可以形成表示运动姿态的旋转矩阵从而表示了刚体的横滚、俯仰和偏转三个旋转的组合变换。

基于上述分析,结合机器人在腿式运动时空间姿态的表示需要,采用 RPY 法来表示其的空间姿态。

定义 $R_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ 为一个任意的被固定在运动平面内的世界坐标系, $R = \{G, X, Y, Z\}$ 为固连在机器人平台上的任一参考点 G 的机器人平台坐标系, G 为机器人重心。

机器人平台车体 B 相对于世界坐标系的方位参数通过三个角度来描述,为保持符号表述的一致,特定义如下:

绕 X 轴的旋转角度为横滚角(Roll) φ ;

绕水平轴 Y 的旋转为俯仰角(Pitch) ψ ;

绕铅垂轴 Z 旋转为偏转角(Yaw) θ (图 1)。

于是,用 **RPY** 表示横滚、俯仰和偏转三个旋转的组合所构成的旋转矩阵, **Rot** 来表示机器人车体的姿态。

$RPY(\varphi, \psi, \theta) = Rot(z, \theta) Rot(y, \psi) Rot(x, \varphi) =$

$$\begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & -S_\theta C_\psi + C_\theta S_\psi S_\varphi & S_\theta S_\psi + C_\theta S_\psi C_\varphi \\ S_\theta C_\psi & C_\theta C_\psi + S_\theta S_\psi S_\varphi & -C_\theta S_\psi + S_\theta S_\psi C_\varphi \\ -S_\psi & C_\psi S_\varphi & C_\psi C_\varphi \end{bmatrix}$$

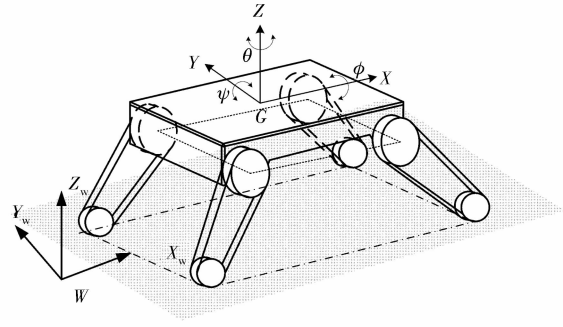


图 1 机器人车体姿态描述

Fig. 1 Posture description of robot

2.2 腿部控制参数

机器人姿态由每条腿的位置来决定,因此机器人的姿态可以通过一套关节角参数 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ 来确定。如图 2 所示。

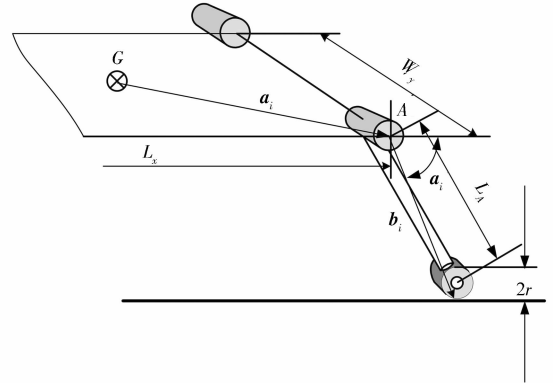


图 2 机器人腿部控制参数

Fig. 2 Control parameters of robot's legs

定义: 向量 a_i 是用来确定关节点 A 位置的向量, 方向从重心 G 指向点 A ; 向量 b_i 从 A 点指向轮地接触点 P_i , 对特定结构的机器人结构来说, A 点的位置是固定的, 与 P_i 一起位于平台坐标系 XGZ 的矢状平面内。因此有:

$$a_i = [x_i \ y_i \ z]^T \quad (1)$$

$$b_i = [X_i \ 0 \ Z_i]^T \quad (2)$$

在平台坐标系的 XGZ 的矢状平面内有:

$$X_i = \pm \frac{L_x}{2} + L_A \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$Z_i = -(L_A \sin \alpha_i + r) \quad (4)$$

于是:

$$a_i = \left[\pm \frac{L_x}{2} \ \pm \frac{W_y}{2} \ 0 \right]^T,$$

$$b_i = [X_i \ 0 \ Z_i]^T =$$

$$\left[\pm \frac{L_x}{2} + L_A \cos \alpha_i \ -(L_A \sin \alpha_i + r) \ 0 \right]^T \quad (5)$$

也就是说, 位置矢量 b_i 是以关节角 α_i 为自变量的函

数。

设矢状平面在水平面 XOY 上的投影为 X' , 其规格化向量为 X^n 。把轮距参数 D_i 定义为在矢状平面内两个轮地接触点中间的距离, 也就是在机器人平台的同侧一对履带腿两个接触点定义 P_i 沿着 X^n 方向的距离。在初始条件下, 规定左右两侧的理想轮距 D_d 相同, 如图 3 所示。

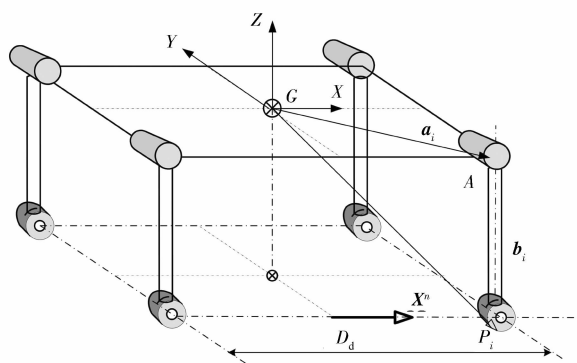


图 3 轮距控制参数

Fig. 3 Control parameters of wheel distance

对于每条腿来说, 随着 α_i 的变化, 沿理想轮距方向, 即 X^n 方向, 实际轮距 D_i 发生变化, 为此定义 D_i 为从机器人重心到轮地接触点 P_i 的向量沿矢状平面的投影。在初始理想情况下有关系:

$$D_i = \frac{D_d}{2} \quad (6)$$

易得出, D_i 是 X_i 的函数, 也就是 α_i 的函数, 并且有如下关系:

$$D_i = (x_i + X_i) X' X^n \quad (7)$$

3 腿式运动的稳定性

3.1 稳定性描述

在腿式运动模式下, 机器人运动的稳定性显得异常重要。无论是出于何种目的, 在腿式模式下机器人运动稳定性都是一个必须要考虑的重要因素^[9,10]。出于机器人姿态控制的目的, 选择合适的性能评价准则是必须的。控制的目的是寻找优化的运动姿态以便改善其运动性能, 而在机器人完成任务的运动过程中, 其最基本的要求是需要机器人具有稳定可靠地穿越不平坦地形的能力。

3.2 稳定性准则

移动机器人在运动过程中如果发生不稳定则可能导致机器人发生倾覆, 机器人与地面的各个接触点顺次连接就构成了机器人发生倾覆时的旋转轴线, 称之为倾覆轴。当机器人发生倾覆时, 机器人绕倾覆轴线旋转, 从而减少了与地面的接触点的数量, 使

得机器人与地面的接触点位于一条直线上, 此时不稳定倾覆就会发生。

许多学者针对腿式机器人或带机械臂移动机器人的稳定性评价准则进行了研究, 提出了各种不同的稳定性评价标准。归纳起来, 可以大致分为以下主要三类^[11]:

(1) 以重心的投影中心距支撑边界的距离作为稳定性边界^[12]。

(2) 以机构的临界倾覆角度“倾角稳定边界”作为评价标准^[13]。

(3) 评价机器人倾覆时所需能力的“能量稳定性”评价标准^[14,15]。

3.2.1 ZMP 边界稳定性

所提出的第一个静态稳定性评价准则用来评价一个行走机构以固定速度在平坦地形下运动时的稳定性能。采用了重心在水平面上的投影距离支撑边界在水平面上投影的最短距离作为评价标准, 如果机器人重心的投影位于支撑多边形的边界之内, 则是稳定的, 是一种基于 ZMP (zero moment point) 的移动机器人稳定裕度和有效稳定区域的标准^[16]。

ZMP 稳定性描述可以用图 4 表示。在不考虑外界干扰的情况下, 其 ZMP 计算公式可以表示为:

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)},$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)}.$$

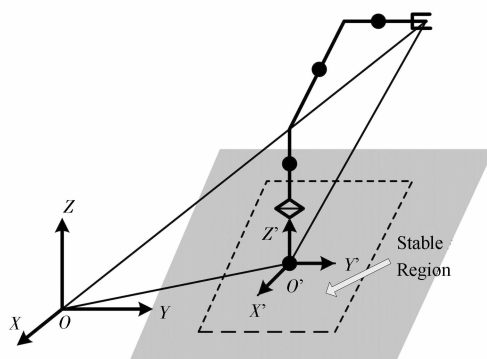


图 4 ZMP 稳定性区域

Fig. 4 ZMP stability region

基于 ZMP 的思想, 为了定量描述稳定程度, 作者提出了移动机器人稳定裕度的概念。在图 5 中, α 表示稳定度, $d(ZMP)$ 是一系列从 ZMP 到稳定区域边界线的距离, d 为 $d(ZMP)$ 当中的最小距离, 而且假定: 如果 ZMP 在稳定区域之内, d 为正; r_0 代表

稳定距离的最大值。

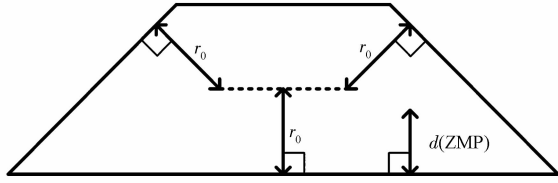


图5 ZMP 稳定性裕度

Fig. 5 ZMP stability margin

依据 ZMP 位置和稳定性边界,其稳定裕度表示为:

$$a = d/r_0。$$

式中: $d = \min\{d(ZMP)\}$; $r_0 = \max\{d; d \in A(d)\}$ 。

稳定性极限为: $\begin{cases} a < 0, & \text{不稳定} \\ 0 < a \leq 1, & \text{稳定} \end{cases}$ 。

即如果稳定裕度为正,则机器人稳定,否则不稳定。

3.2.2 倾斜边界稳定性

Papadopoulos 在文献[13]中提出了另外一种稳定性判断准则,类似于文献[11]中的“倾斜边界稳定性”。

在图6中描述了一种简单的两个接触点在平面上运动时的稳定性,车体的重心受到净力 f_r 的作用, f_r 是除支撑交互力之外的作用于车体的合力,(因为支撑交互作用力对倾覆不起作用),这个合力向量 f_r 与两个倾覆轴的法向量 I_1 和 I_2 分别形成两个夹角 θ_1 和 θ_2 ,倾角稳定性标准通过两个夹角的最小值给出,并通过力向量 f_r 的大小 $\|f_r\|$ 来描述重量对稳定性的影响程度。表示为: $\alpha = \theta_i \cdot \|f_r\|$ 。

当 $\theta = 0$ 时, f_r 与 I_1 或者 I_2 重合,机器人就会发生不稳定性倾覆,此时,即使 $f_r = 0$,一个极小的扰动也会引起倾覆。如果 f_r 位于 I_1 或者 I_2 之外,夹角变为负值。

在图7中表示了一般的三维倾角的稳定性问题。对于所有与地面接触的点,只需要考虑那些最外侧的接触点,这些点在投影到水平面上时,形成一个凸多边形。若以 P_i 表示第 i 个与地面的接触点,即 $P_i = [p_x, p_y, p_z]^T$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$, P_c 表示车轮重心的位置,顺次连接各个接触点形成各个倾覆轴,并得到与重心相交的各个倾覆轴的法向量 I_i 。于是其整体的稳定性准则可以表示为:

$\alpha = \min(\theta_i) \|f_r\|$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 。当 $\alpha = 0$ 时,倾覆就会发生。

3.2.3 能量稳定性

为了进一步控制机器人在不平坦地形下的稳定性问题,D. A. Messuri and Klein 提出了另外一种能

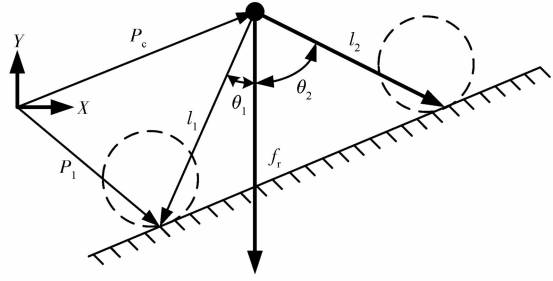


图6 二维运动表面的倾斜稳定性

Fig. 6 Slope stability of the 2D surface

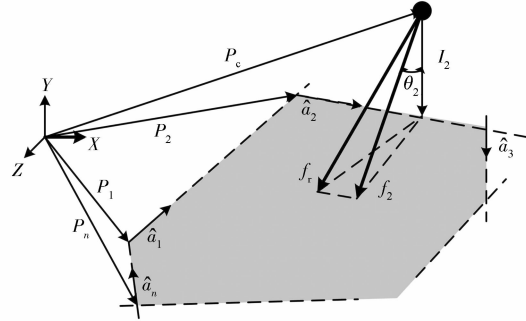


图7 三维运动表面的倾斜稳定性

Fig. 7 Slope stability of the 3D surface

量稳定性准则。其基本思想是利用了机器人在发生倾覆时所需要的最小能量^[14]。

在图8所示的四腿支撑的机器人位于一斜面表面上,车体保持水平。能量稳定性准则的原理是:能量稳定度等于重心绕一个特定的支撑边旋转直到重心的垂直投影位于这个支撑边上所需要的能量。对所有支撑边的能量稳定性边界就是各个支撑边能量稳定度中的最小值。图中,从 F_1 到重心 CG 的距离表示了当机器人沿后面的支撑边发生倾覆时,重心将沿半径为 R_1 的圆弧运动,直到重心投影位于这个支撑边上的临界稳定位置,在整个倾覆的过程中重心所移动的垂直高度为 h_1 。因此,从初始位置到临界稳定状态所需要的势能为 mgh_1 。

类似地,如果绕着前面的支撑边界发生倾覆,所需要的势能为 mgh_2 。由于 $h_2 = h_1 + \Delta h$,所以,沿着后支撑边发生倾覆时所需要的能量要少于前支撑发生倾覆所需要的能量。如果需要改变车体以便获得更大的整体稳定性,就要使 $h_1 = h_2$,此时前后的能量稳定性相同。应用能力稳定性就是要在所有支撑边界的倾覆能量度中寻求最大值。

即: $PE = \max\{mgh_i\}$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

由于该稳定性标准只考虑了重心垂直位置的影响,Ghasempoor and Sepheri 对此能量稳定性准则进行了扩展,提出了基于操作臂的移动机器人能量稳

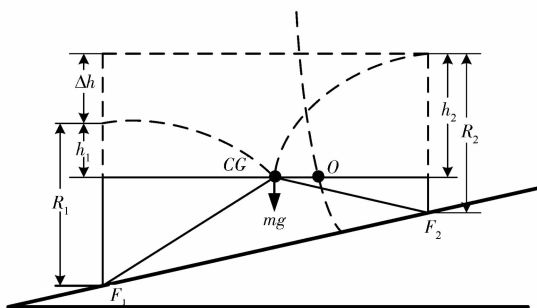


图8 前后支撑边能量稳定性比较

Fig. 8 Energy stability comparison of the front and rear support edges

定性准则^[15],它是一种可以包括外力和惯性负载在内的能量稳定性方法。

3.2.4 稳定性评价准则

选择合适的稳定性评价准则对于机器人运动来说是异常重要的。稳定性准则的选取不仅要考虑到机器人在腿式运动模式下的特殊性,还要考虑到其运动地形的特性以及计算、耦合控制等的方便性。如果出于纯粹的稳定性评价准则考虑,它与牵引驱动力是彼此独立的。由于机器人是在不平坦的地形下运动的,所以倾覆稳定性边界主要是被地形的几何参数所约束。在上面所描述的稳定性准则中 Papadopoulos 提出的“倾斜边界稳定性”也适合于一般的应用条件。这个稳定性准则综合了重心投影到支撑边界的距离和由接触点 P_i 所定义的平均平面的垂直方向的位置两个要素,并且这种方法的计算是有效的。可以概况如下:

如图9所示, G 为机器人重心, P_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为机器人的轮-地接触点,顺次连接两个连续地形之间接触点 P_i 构成各条倾覆轴线,连接重心 G 到倾覆轴线中点构成单位向量 I_i ,首先计算各单位矢量 I_i 。然后计算由每一个 I_i 与作用到机器人上的合外力 f_r 形成的夹角 θ_i 作为各个倾覆轴的稳定角度,由各个 θ_i 给出了相应于该倾覆轴的稳定角度。整个机器人车辆的稳定边界定义为使所有稳定角的最小值,即:

$$\varphi_s = \min\{\theta_i, i = 1, 2, 3, 4\}$$

当 $\varphi_s < 0$ 时,不稳定倾倒就会发生。

4 结束语

本文就机器人腿式模式时机器人的运动特性,分析了机器人稳定性控制的重要性,并综合分析了各种稳定性控制准则的特性和使用范围,在此基础上提出了轮腿式机器人的倾斜稳定性评价准则,为轮腿式机器人的稳定性控制方法奠定基础。

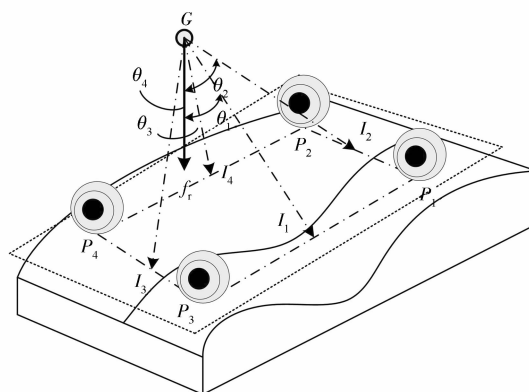


图9 轮腿机器人倾斜稳定性

Fig. 9 Slope stability of wheel-legged robot

参考文献

- Grand C, *et al.* Stability and traction optimization of a reconfigurable wheel-legged robot. *The International Journal of Robotics Research*, 2004;23(10-11):1041—1058
- Glocker M, von Stryk O. A hybrid dynamic systems approach to optimal dynamic role assignment and physics-based robot trajectory planning in robocup. *RoboCup International Symposium*, 2005
- Grand C, BenAmar F, Plumet F, *et al.* Decoupled control of posture and trajectory of the hybrid wheel-legged robot hylos. *Proc of the IEEE Int Conf on Robotics & Automation*, 2004;5111—5116
- 段星光, 黄强, 李科杰. 小型轮履腿复合式机器人设计及运动特性分析. *机械工程学报*, 2005;41(8):108—114
Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Kejie. Miniature wheel-track-legged mobile robot. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005;41(8):108—114
- 田海波, 方宗德, 周勇, 等. 轮腿式机器人倾覆稳定性分析与控制. *机器人*, 2009;31(2):159—165
Tian Haibo, Fang Zongde, Zhou Yong, *et al.* Analysis and control for tumble stability of wheel-legged robots. *Robot*, 2009;31(2):159—165
- Duan X G, Huang Q, Nasir R. Development and motion analysis of a miniature wheel-track-legged mobile robot. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006
- Sreenivasan S V, Wilcox B H. Stability and traction control of an actively actuated micro-rover. *Journal of Robotic Systems*, 1994;11(6):487—502
- Low K H, Leow W K, Marcelo H. *et al.* A hybrid mobile robot architecture with integrated planning and control. *Proc 1st AAMAS'02*, 2002;219—226
- Messuri D A, Klein C A. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1985;RA-1(3):132—141
- Grand C, BenAmar F, Bidaud P. Stability control of a wheel-legged mini-rover. *Proceedings of the CLAWAR Conference*, 2002;323—330
- Hirose S, Tsukagoshi H, Yoneda K. Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automa-*

- tion, 2001;181—186
- 12 McGhee R, Frank A. On the stability properties of quadruped creeping gait. *Mathematical Bioscience*, 1968;3: 331—351
 - 13 Papadopoulos E G, Rey D A. A new mesure of tipover stability for mobile manipulators. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1996;3111—3116
 - 14 Messuri D A, Klein C A. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough terrain locomotion. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1985;RA-1(3): 132—141
 - 15 Ghasempoor A, Sepehri N. A measure of machine stability for moving base manipulators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995; 2249—2254
 - 16 Sugano S, Huang Q, Kato I. Stability criteria in controlling mobile robotic systems. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1993;832—838

The Stability Control Criteria of the Wheel-legged Robot

XU Yan¹, ZHAO Xiu-ping¹, DUAN Xing-guang^{2*}

(Hebei Normal University¹, Shijiazhuang 050024, P. R. China;

Beijing Institute of Technology², Beijing 100081, P. R. China)

[**Abstract**] Legged mode of mobile robot has the characteristics of good mobility and high environment adoptability, however, the stability control becomes an important issue. Based on the analysis of motion characteristics of the wheel-legged robot, the stability posture description method was established. The characteristics and adoption of different stability criteria were analyzed. The slope stability criterion of wheel-legged robot and the corresponding stability controlling method were proposed. The results contribute to the stability control of the wheel-legged robot.

[**Key words**] wheel-legged robot stability slope boundary robot posture

(上接第 17 页)

Experimental Study on the Transmission Characteristics of Transducer Acoustic Signal within Drill String

ZHAO Guo-shan¹, WANG Bin-bin², DU Zhen-chuan¹,

HUANG Ming-quan¹, ZHAI Wen-tao¹

(Drilling Engineering & Technology Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation¹, Dongying 257064, P. R. China;

Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation², Dongying, 257000, P. R. China)

[**Abstract**] The drill string provides advantaged conditions for high-speed acoustic transmission. But the characteristics of acoustic waves transmitting through the drill string have not been adequately studied, especially the experimental studies are rarely carried out and there is no mature approach. Test device for measuring the transmission of acoustic waves in a drill string channel is established by means of a low frequency band transducer. Low frequency band transducer has influence on transmission characteristics are studied and analyzed based on experiments. The results show that the amplitude of the received signal is increasing with the increase of the transducer excitation voltage. The received signal amplitude will express saturation phenomenon when voltage is more than 130 V. The characteristic of the frequency domain obtained by both theoretical and experimental analysis is comb filter. However, there are some differences in band structure, and the frequency domain of the actual drill string channel is more complex. Mainly based on experiment, the nonlinear character of low frequency band transducer and drill string channel frequency band have an effect on the received signal. The spectrum variation rules of drill string structure and nonlinear character of low frequency band transducer are analyzed to determine the elemental communication frequency band is 3 100 Hz using in the acoustic telemetry system based on the drill string.

[**Key words**] drill string acoustic wave low frequency band transducer transmission characteristic