

轮腿式机器人的姿态耦合优化控制

徐 岩¹ 段星光²

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

摘要: 轮腿式移动机器人在不平坦地形下运动时涉及三个相互关联的控制问题: 稳定性控制、驱动牵引力控制和姿态控制。建立了适合于描述轮腿式机器人姿态的运动学模型, 提出了轮腿运动模式下的稳定性函数和驱动牵引控制函数, 为使机器人具有良好的地形适应能力、越障性能及运动稳定性, 在综合分析机器人稳定性和驱动牵引特性的基础上, 提出并构建了结合稳定性和驱动牵引性能的轮腿式机器人耦合优化控制准则, 并实现了机器人姿态的优化控制, 最后通过实验验证了该方法的可行性。

关键词: 轮腿式机器人; 稳定性; 驱动牵引特性; 耦合优化

中图分类号: TP24

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2016.04.001

Posture Coupled Optimization Control of Wheel-legged Robot

Xu Yan¹ Duan Xingguang²

1. Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050024 2. Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081

Abstract: When wheel-legged mobile robots moved in uneven terrains, three basic non-isolated control problems such as stability control, drive traction control, and posture control were produced. Herein kinematic model with wheel-legged mode was established firstly, which was suitable to describe the robot posture. Then stability and traction functions were addressed. In order to have good adaptability, high maneuverability of negotiation and high locomotion security, coupled optimization function was built and coupled optimization control was realized based on the comprehensive analyses of the stability and traction characteristics, which could supply the coupled optimization criteria for stability and traction, and realize the posture optimization control of the robots. The effectiveness of the method was confirmed by experiments.

Key words: wheel-legged robot; stability; drive traction characteristics; coupled optimization

0 引言

轮腿式机器人综合了轮式机构运动效率高、速度快、便于控制与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, 成为移动机器人中重要的一种类型, 应用非常广泛^[1-6]。轮腿式机器人的典型特点是在腿式运动模式下, 由于腿或轮子具有独立驱动的自由度, 所以姿态耦合优化后可使得这类系统具有控制自身姿态的能力^[7-9]。对机器人运动姿态的控制会直接影响到机器人能否顺利到达指定位置完成作业任务, 建立考虑机器人稳定性、驱动牵引特性在内的机器人姿态耦合优化控制方法, 实现机器人姿态的耦合优化控制, 使其在运动过程中尽量保持车体始终处于水平稳定的姿态并具有良好的稳定性和驱动牵引特性, 对稳定机器人视觉系统或作业系统, 有效完成作业任务十分有益。

1 优化控制问题描述

对轮腿式机器人的姿态优化控制的主要目的

在于当其以腿式模式运动时, 能够实现运动稳定性、驱动牵引特性、稳定姿态等的耦合优化。要想实现其具有自主性质的运动功能, 需要在确定各自优化控制标准的基础上综合考虑其耦合优化的控制方法。具体包含以下几个方面。

(1) 从轮腿式机器人的运动学模型来说, 描述其姿态不再是简单的姿态向量, 还包含了机器人车体在空间的俯仰角、横滚角、偏转角, 另外还包含了车体相对于运行地面的位置, 以及两侧摆臂相对于车体的方位和摆臂之间的距离等信息。

(2) 机器人的稳定性是确保整个系统运动安全的首要前提, 在腿式模式下, 其稳定性控制为一个重要的问题。主要原因在于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地导致在运动中出现机器人的接触力发生跳变, 并很容易导致机器人失稳的情况发生。

(3) 轮腿运动模式下的冗余驱动系统虽然提供了灵活的运动性能, 但也由此而产生了机器人与环境的复杂交互所带来的驱动力控制问题, 如复杂的轮-地交互特性^[10-11]。由此造成了机器人在运动过程中由于打滑、侧滑等情况的出现而引

收稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473111)

起的驱动牵引力问题,优化机器人驱动牵引控制的目的就是通过建立驱动牵引优化约束使机器人具有理想的运动性能。

(4)实现机器人耦合优化的目的是以机器人能够具有较高的运动能力和机动性并确保整个系统运动中的安全性为目标,通过对机器人运动控制中的姿态、稳定性、驱动牵引特性等的分析研究,建立机器人姿态耦合优化准则和控制策略,使机器人的总体自主性能可以通过最大程度地提高机构的运动特性来实现,在一定程度上弥补系统智能的不足。

(5)通过确定运动学姿态描述,利用必要的传感信息来获取机器人当前姿态,通过建立合理的优化姿态向量和优化目标函数,寻求优化的姿态控制向量,实现基于机器人姿态控制的少传感信息反馈的姿态优化运动控制。过于复杂的信息获取手段势必造成机器人系统的复杂性、信息处理的复杂性,甚至影响到机器人的总体性能指标。

2 轮腿模式运动学分析与建模

2.1 轮腿运动模式下机器人姿态

机器人在轮腿式运动模式下的机构简图见图 1。

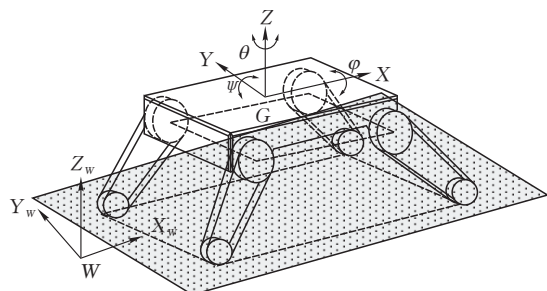


图 1 坐标系建立与姿态描述

描述机器人姿态可以采用方向余弦法、角度给定法等,本文采取欧拉角方位表示法。定义三个角度:绕 X 轴旋转的为横滚角 φ ;绕水平轴 Y 旋转的为俯仰角 Ψ ;绕铅垂轴 Z 旋转的为偏转角 θ 。用 M_{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来表示机器人车体的姿态,即

$$M_{RPY}(\varphi, \Psi, \theta) = R(z, \theta)R(y, \Psi)R(x, \varphi) = \begin{bmatrix} C_\theta C_\Psi & -S_\theta C_\Psi + C_\theta S_\Psi S_\varphi & S_\theta S_\varphi + C_\theta S_\Psi C_\varphi \\ S_\theta C_\Psi & C_\theta C_\Psi + S_\theta S_\Psi S_\varphi & -C_\theta S_\varphi + S_\theta S_\Psi C_\varphi \\ -S_\Psi & C_\Psi S_\varphi & C_\Psi C_\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, c_θ 、 c_φ 、 c_Ψ 为 $\cos \theta$ 、 $\cos \varphi$ 、 $\cos \Psi$ 的简写形式, s_θ 、 s_φ 、 s_Ψ 为 $\sin \theta$ 、 $\sin \varphi$ 、 $\sin \Psi$ 的简写形式。

2.2 轮-地接触点与腿部控制参数

定义 α_i ($i=1,2,3,4$) 为腿部的关节角变量,

代表从摆臂旋转中心沿摆臂长度方向与车体坐标系的 X 轴正向的夹角,并且逆时针方向为正。建立轮-地接触模型如图 2 所示。于是,每一个轮-地接触点 P_i 的位置 (x_i, y_i, z_i) 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \pm \frac{L_X}{2} + L_A \cos \alpha_i \\ y_i &= \pm \frac{w}{2} \\ z_i &= -(L_A \sin \alpha_i + r) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, L_X 为机器人前后轮之间的轴距; α_i 为关节角; L_A 为机器人履带腿长度; w 为两侧履带间的距离; r 为小履带轮的半径。

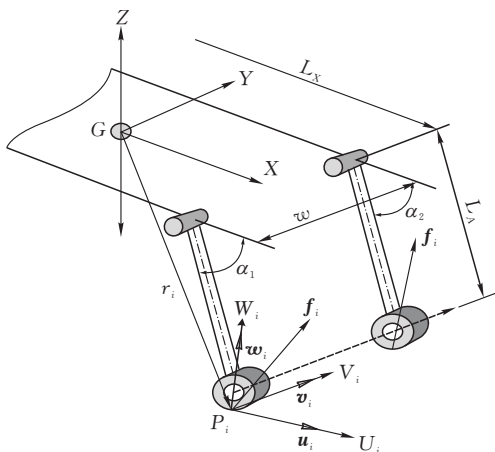


图 2 轮-地接触模型

对于特定的机器人机构来说,参数 L_X 、 w 、 L_A 、 r 为常量, α_i 为控制变量。机器人姿态由每条腿的位置决定,可通过一套关节角参数 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ 来确定(图 3)。

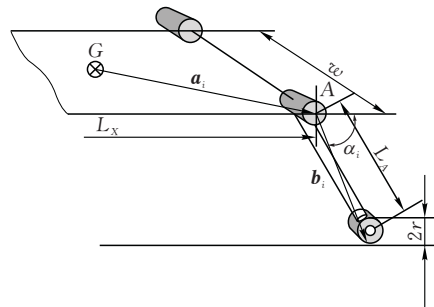


图 3 机器人腿部控制参数

定义 a_i 是用来确定关节点 A 位置的向量,用来确定每条腿的位置,方向从重心 G 指向点 A,定义向量 b_i 从 A 点指向轮-地接触点 P_i ,对特定的机器人结构, A 点的位置是固定的,即 a_i 是一个常向量,与 P_i 一起位于平台坐标系 XGZ 的矢状平面内。因此有

$$a_i = (x_i, y_i, z_i)^T$$

$$b_i = (X_i, 0, Z_i)^T$$

对于已经设计好的机器人来说,每条履带腿关节位置是固定的,在平台坐标系的 XGZ 的矢状

平面内有

$$\left. \begin{aligned} X_i &= x_i = \pm \frac{L_X}{2} + L_A \cos \alpha_i \\ Z_i &= z_i = -(L_A \sin \alpha_i + r) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

于是:

$$\mathbf{a}_i = (\pm \frac{L_X}{2} + L_A \cos \alpha_i, \pm \frac{w}{2}, -(L_A \sin \alpha_i + r))^T$$

$$\mathbf{b}_i = (X_i, 0, Z_i)^T =$$

$$(\pm \frac{L_X}{2} + L_A \cos \alpha_i, 0, -(L_A \sin \alpha_i + r))^T$$

即,位置矢量 \mathbf{b}_i 是以关节角 α_i 为自变量的函数。

3 倾斜边界稳定性准则

在腿式运动模式下,机器人运动的稳定性非常重要。针对腿式机器人的稳定性评价准则,许多学者提出了各种不同的稳定性评价标准^[12],主要有:稳定性边界^[13]、倾角稳定边界^[14]、能量稳定性评价标准^[15-16]等。通过综合比较各种稳定性评价标准的特点,采用 Papadopoulos 等^[14]提出的“倾斜边界稳定性”标准更加适用于轮腿式机器人的稳定性评价。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。

如图 4 所示,顺次连接两个连续地形之间接触点 $P_i (i=1,2,3,4)$ 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 \mathbf{I}_i ,首先计算各单位向量 \mathbf{I}_i ,然后计算由每一个 \mathbf{I}_i 与作用到机器人上的合外力 \mathbf{f}_r 形成夹角 θ_i 作为各个倾覆轴的稳定角度,由各个 θ_i 给出相应于该倾覆轴的稳定角度。整个机器人车辆的稳定边界 φ_s 定义为所有稳定角 θ_i 中的最小值,即

$$\varphi_s = \min \theta_i \quad (4)$$

当 $\varphi_s < 0$ 时,不稳定倾覆就会发生。

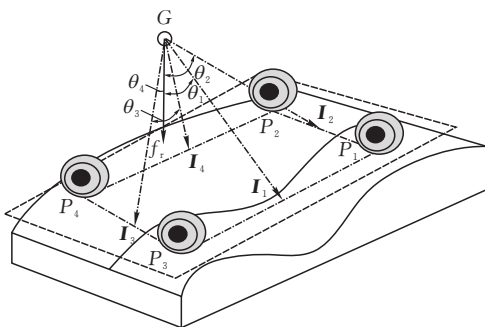


图 4 倾斜边界稳定性

4 驱动牵引力分析

4.1 力的分布

在图 2 中, P_i 为各个轮-地接触点, \mathbf{w}_i 为 P_i 点

处的局部法向量, \mathbf{f}_i 为接触力向量, G 为系统的质心。依据螺旋理论及其虚功原理可以获得系统的动力学方程为

$$\mathbf{L}\mathbf{f} = \mathbf{W}$$

其中, \mathbf{L} 为 $6 \times 3n$ 的位置关联矩阵, n 为接触点个数; \mathbf{f} 为 $3n \times 1$ 的接触力向量; \mathbf{W} 为 6×1 的负载旋量。

驱动力的控制问题实际上就是针对 \mathbf{W} 的接触力 \mathbf{f}_i 的分布计算问题。因为方程 $\mathbf{L}\mathbf{f} = \mathbf{W}$ 的位置关联矩阵 \mathbf{L} 可以通过改变机器人的姿态形状来变化,所以,改善牵引特性和稳定性可以通过改变机器人姿态和形状并应用力分布中的冗余特性来实现优化。类似的优化问题也存在于多指抓取的系统。

4.2 局部接触力

在建立了轮地接触点 P_i 处的局部坐标系 $\mathbf{R}_i = (P_i, U_i, V_i, W_i)$ 的基础上,把接触点处的接触力向量 \mathbf{f}_i 沿三个局部坐标系的坐标轴分解为 $\mathbf{f}_i = (f_{ui}, f_{vi}, f_{wi})$ 。其中, f_{wi} 为垂直于接触平面切线方向的法向分量; f_{ui} 为第 i 个车轮的切向力分量; f_{vi} 为沿第 i 个轮轴方向的分量。

从驱动牵引力的角度看,切向分力 f_{ui} 和法向分力 f_{wi} 的大小直接影响其牵引特性。为此定义滑行率 S_i 为切向合力与法向力之比来评价其牵引驱动特性,表示为

$$S_i = \frac{\sqrt{f_{ui}^2 + f_{vi}^2}}{f_{wi}} \quad (5)$$

牵引效率主要与每个轮地接触点的打滑特性有关,减小机器人打滑等价于使每一个 S_i 取得最小值,于是,对于每个轮地接触点 P_i ,提高其牵引特性就是使 S_i 最小,对整个机器人而言,为提高牵引力就是要使所有 S_i 中的最大值取得极小。于是得优化函数为

$$\varphi_f = \min(\max S_i)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{L}\mathbf{f} = \mathbf{W}$$

设轮地接触时的摩擦系数为 μ_f ,则在 $S_i \geq \mu_f$ 时就可以满足其能控性极限条件。

从接触力的角度来看机器人运动稳定性,可以直观地得到:为了使机器人保持稳定运动,必须保证所有法向分量为正,因为负的法向分量意味着机器人在该轮地接触点没有被地面支撑,即: $f_{wi} > 0$ 。

对于以上问题存在两个方面的限制。一是机器人通过相关信息的获取进行的主动姿态控制实际上所实现的是重心的变化,而这个变化的响应速度应该足够快以便适应地形条件,否则不能完

成实时的姿态调整控制。但是,由于机器人的运动速度在该种运动模式和地形条件下一般是很低的,所以这个限制不是一个严重的问题。第二个限制来自于复杂运动链的位置运动学分析,由于闭环位置运动学的复杂性以及源于力分布的冗余而带来的优化问题,不适合于实时求解,所以实现机器人优化控制采用了“准平面”地形的概念以及实时次优化的方法。

4.3 接触力的平衡

机器人接触力的平衡问题是机器人运动中影响牵引和稳定性能的重要因素,为此,我们建立机器人各个轮地接触力平衡的标准如下。

接触力平衡分布指标:

$$B_i = 4 \frac{\min f_{wi}}{G} \quad (6)$$

其中, $0 \leq B_i \leq 1$, f_{wi} 为第 i 个摆臂的垂直于接触平面切线方向的合力, G 为机器人重量。

当力平衡达到最优时, B_i 可取得最大值。当 $B_i = 0$ 时,表明至少有一个轮子没有与地面接触,是一种极易产生不稳定的状态。

5 耦合优化控制

5.1 耦合优化函数

机器人姿态在很大程度上取决于地形情况,耦合优化的目的是使车体尽量保持水平状态,并且实现稳定性与牵引力的优化控制。而能实现姿态优化控制的地形只有在一定的范围内才是可行的,也就是说,我们不能期望在任何地形几何特性剧烈变化的情况下都可以实现,其控制效果受到机器人本身结构大小及其机构运动特点的限制。为研究出可行的控制算法,有必要对机器人的运动地形作适当的限制或者简化。

由于在机器人运动的过程中,几乎不能够通过传感检测的方式得到轮地接触点 P_i 所在地形的切平面,因此可以假定在轮地接触点的局部小范围内接触表面是一个水平面,也就是说,用四个离散的、不连续的、具有不同高度的局部水平面来表示各个瞬时状态的地面情况,并假定机器人的每条腿均与地面接触。

对姿态优化控制可以表述为:对于特定的机器人系统,给定一套姿态控制参数 P ,通过适当地优化以便寻找优化姿态向量 P^* ,使得目标函数 $\Phi(P)$ 最小。

这个目标函数综合了对牵引力和稳定性的优化,是一个表征机器人运动性能标准的函数。结合稳定性准则和牵引力优化准则,取二者的加权

均方根之和作为耦合优化标准函数:

$$\Phi(P) = K_s \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \theta_i^2}} + K_f \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2} \quad (7)$$

其中, S_i 为滑行率,它是 f_i 的函数; θ_i 为稳定性倾角; K_s 和 K_f 为加权系数,是常量。

控制目标是使得该函数最小化,即使得 $\Phi(P)$ 最小,而这个函数的最小化必然导致 θ_i 的最大化和 S_i 的最小化, θ_i 的最大化就是最大化机器人的稳定性, S_i 的最小化也就是减小整个机器人的滑行运动。

由于应用该目标函数需要局部的地图信息以便定义接触点 P_i 和相应的法向量 w_i ,而一般情况下地形是未知的, P_i 和 w_i 不得不在线获得。因此,这种方法的主要缺点是接触法向量的测量以及在线优化过程的计算消耗。所以,需要在机器人的姿态控制中进行适当简化,并采用次优化的方法来实现姿态控制。

5.2 耦合优化控制与实现

耦合优化控制过程中,如果 $\varphi_s < 0$,则需要首先进行稳定性调节,否则可以进行组动力控制。其控制流程如图5所示。

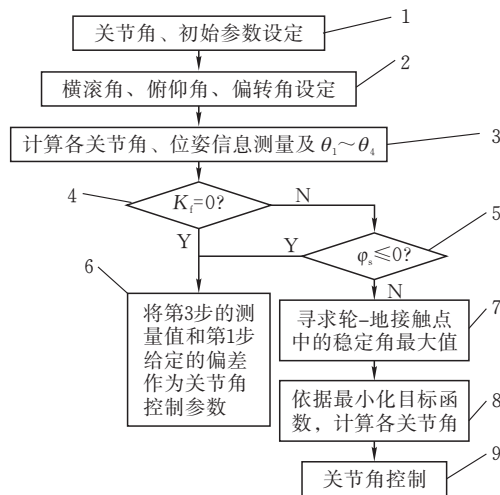


图5 控制流程图

系统控制由四部分构成:感知系统、机器人本体、决策单元和执行单元,如图6所示。机器人本体的初始姿态以及俯仰角、偏转角和横滚角及其重力信息通过机器人模型和感知系统获得,经传输转换到决策单元并经由决策单元传输到控制电机执行。利用感知信息和决策系统分别计算得到 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 。当 $K_f = 0$ 或 $K_f \neq 0$ 且 $\varphi_s \leq 0$ 时进行稳定性控制,并使得 $\varphi_s = \min \theta_i (i=1, 2, \dots, n)$; 当 $K_f \neq 0$ 并且 $\varphi_s > 0$ 时执行驱动牵引力控制。

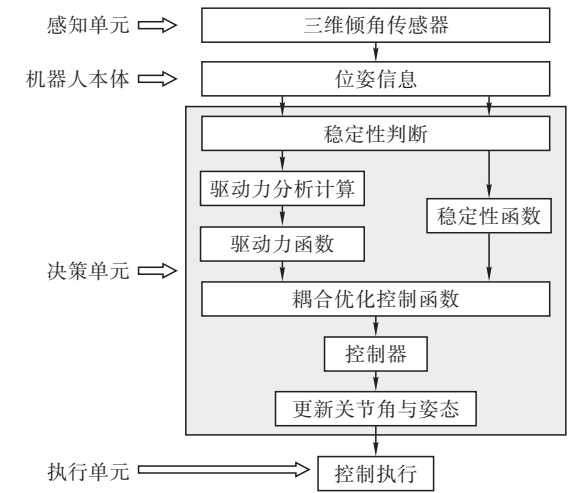


图 6 控制结构框图

6 实验

实验采用机器人在一定倾斜角度的水泥路面上运动来验证姿态控制的有效性。所采用的地形如图 7 所示。其斜面的倾斜角 $\beta_s = 12^\circ$ ，设机器人前进方向的偏航角为 θ （为机器人前进方向的 X 轴和斜面最大斜度线之间的夹角）。为了对姿态控制效果进行比较说明，选择一个在运动过程中始终保持不变的固定姿态为：在水平面上，机器人的所有摆臂均与地面垂直（即 $\alpha_i = \pm 90^\circ$ ），称这一姿态为固定姿态。

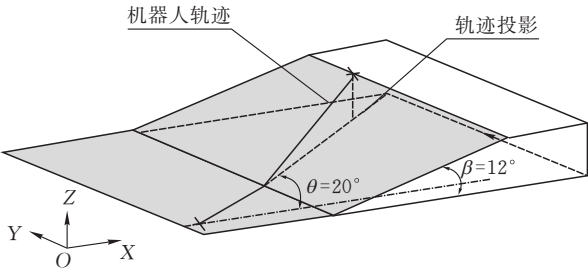


图 7 机器人姿态控制实验环境

(1) 设定偏航角 $\theta = 0^\circ$ ，使机器人采用固定姿态沿着最大斜度的方向以 20 cm/s 的速度移动。此时，由于不采用姿态控制方法，机器人的横滚角、俯仰角完全依赖于地形的变化，其横滚角始终为 0° ，而俯仰角（此处即为斜面倾角 β ）变化如图 8 所示。在图 8 中，虚线表示了地形轮廓变化，实线代表了机器人采用姿态控制时其横滚角和俯仰角的变化情况，从图中可以看出，由于采用了姿态控制，使得机器人的俯仰角减小并使机器人车体尽量保持水平状态，并且由于姿态优化控制使得 θ_i 增大，进一步提高了机器人运动的稳定性。

(2) 设定偏航角 $\theta = 20^\circ$ ，使机器人以 20 cm/s 的速度移动。此时，在运动过程中俯仰角 Ψ 和横滚角 φ 都需要控制。姿态控制的理想姿态是俯仰

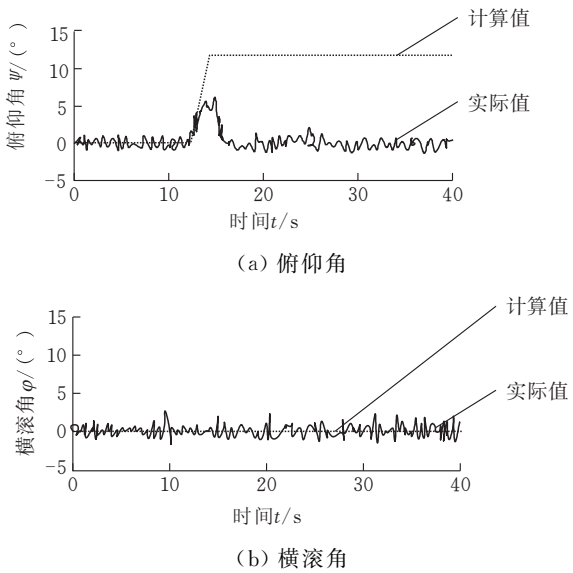


图 8 $\theta = 0^\circ$ 时斜面上的姿态控制

角和横滚角均为 0° 并保持一个不变的地面高度 H_g 。

在图 9 中，虚线表示了地面斜坡在俯仰和横滚两个方向的理论角度变化情况，依据如下公式计算得到其横滚角和俯仰角：

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arcsin(\sin \theta \sin \beta) \\ \Psi &= \arcsin(\cos \theta \sin \beta) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

图 9 中的实线代表了当采用了姿态控制时机机器人的俯仰角和横滚角。从图 9 中可以看出，当采用姿态控制后，机器人俯仰角和横滚角得到明显减小。在每一个斜坡最高点出现尖峰误差是受

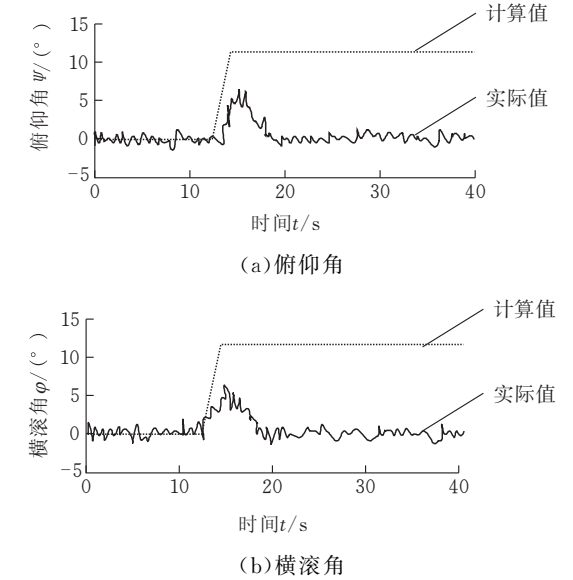


图 9 $\theta = 20^\circ$ 时斜面上的姿态控制

机器人腿部反馈控制的响应速度的影响所致。另外，由于姿态优化控制使得 θ_i 增大，提高了机器人运动的稳定性，但在驱动牵引特性方面， S_i 会适当增加，由于耦合优化控制函数 $\Phi(P)$ 既考虑到稳定性又考虑到驱动牵引特性，所以在采取耦

合优化控制后,兼顾了两个方面的要求,并保证机器人车体尽量保持水平状态,这对于机器人稳定视觉与机器人作业具有重要的意义。

7 结语

本文针对轮腿式机器人的姿态控制问题提出了一种机器人姿态耦合优化控制方法,在机器人运动学模型及姿态表达模型的基础上,建立了机器人稳定性控制与驱动牵引力控制准则,并结合轮腿式机器人的姿态控制特点,构建了耦合优化控制准则,实现了机器人姿态的优化控制,并通过实验进行了可行性验证。通过机器人的耦合优化控制,可以使机器人在运动过程中尽量保持车体处于水平稳定的姿态,这对稳定机器视觉系统、作业系统有着十分重要的意义,使得机器人的自主运动不过多地依赖于对环境的建模和大量信息处理,在一定程度上弥补了系统智能方面的不足。

参考文献:

- [1] Grand C, Amar B F, Plumet F, et al. Decoupled Control of Posture and Trajectory of the Hybrid Wheel-legged Robot Hylos[C]//Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, New Orleans, LA, United States, 2004: 5111-5116.
- [2] Choi B J, Sreenivasan S V. Motion Planning of a Wheeled Mobile Robot with Slip-free Motion Capability on a Smooth Uneven Surface[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven Belgium, 1998: 3727-3732.
- [3] Matthies L, Xiong Y, Hogg R, et al. A Portable, Autonomous, Urban Reconnaissance Robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40: 163-172.
- [4] Sreenivasan S V, Wilcox B H. Stability and Traction Control of an Actively Actuated Micro-rover[J]. Journal of Robotic Systems, 1994, 11(6): 487-502.
- [5] Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Kejie. Design and Motion Analysis of Miniature Wheel-track-legged Mobile Robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 108-114.
- [6] Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Jingtao. Design and Implementation of a Small Ground Mobile Robot with Multi-locomotion Modes[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 12(1): 8-12.
- [7] Grand C, Amst M B, Plumet F, et al. Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-legged Robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(10/11): 1041-1058.
- [8] Glocker M, von Stryk O. A Hybrid Dynamic Systems Approach to Optimal Dynamic Role Assignment and Physics-based Robot Trajectory Planning In Robocup[C]//Robocup International Symposium, Osaka, 2005: 18-19.
- [9] Amarbf G C, Plumet F, et al. Decoupled Control of Posture and Trajectory of the Hybrid Wheel-legged Robot Hylos[C]//Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, New Orleans, 2004: 5111-5116.
- [10] Choi B J, Sreenivasan S V. Gross Motion Characteristics of Articulated Mobile Robots with Pure Rolling Capability on Smooth Uneven Surfaces[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(2): 340-343.
- [11] Song Z, Hutangkabodee S, Zweiri Y H, et al. Identification of Soil Parameters for Unmanned Ground Vehicles Track-terrain Interaction Dynamics[C]//SICE Annual Conference, Sapporo, Japan, 2004: 2255-2260.
- [12] Hirose S, Tsukagoshi H, Yoneda K. Normalized Energy Stability Margin and Its Contour of Walking Vehicles on Rough Terrain[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, 2001: 181-186.
- [13] Mcghee R, Frank A. On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gait[J]. Mathematical Bioscience, 1968, 3: 331-351.
- [14] Papadopoulos E G, Rey D A. A New Measure of Tipover Stability for Mobile Manipulators[C]//IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, 1996: 3111-3116.
- [15] Messuri D A, Klein C A. Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle during Rough Terrain Locomotion[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1985, Ra-1(3): 132-141.
- [16] Ghasempoor A, Sepehri N. A Measure of Machine Stability for Moving Base Manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995: 2249-2254.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 徐岩,女,1966年生。河北师范大学职业技术学院教授。研究方向为先进制造技术、机器人技术。段星光,男,1966年生。北京理工大学机电学院教授、博士研究生导师。