

融合串级 PID 和虚拟模型的双足轮腿复合机器人控制

李宇¹, 罗晶¹, 曾超², 齐雯³, 杨辰光³

(1 武汉理工大学, 武汉, 430070; 2 汉堡大学, 汉堡, 22527; 3 华南理工大学, 广州, 510641)

摘要: 为满足双足轮腿复合机器人在复杂地面柔顺、平稳运动控制需求, 本文提出融合串级 PID 和虚拟模型控制的方法, 分别对机器人轮腿与机身进行柔顺控制和姿态控制, 实现双足轮腿复合机器人的稳定行走; 同时, 本文采用虚拟模型控制, 结合冲击控制策略, 提出机器人抗竖直方向冲击方法, 保证双足轮腿复合机器人在不同地面运动中受竖直方向冲击干扰后, 能够保持平衡并快速恢复运动状态; 最后, 仿真结果验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 双足轮腿复合机器人; 虚拟模型控制; 串级 PID 控制; 竖直方向冲击; 平衡恢复

Control of Biped Wheel-Legged Hybrid Robot based on Cascade PID and Virtual Model

Jing Luo¹, Yu Li¹, Chao Zeng², Wen Qi³, Chenguang Yang³

(1Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070; 2University of Hamburg, Hamburg, 22527; 3South China University of Technology, Guangzhou, 510641)

Abstract: In order to meet the requirements of flexible and stable motion control of the biped wheel leg composite robot on complex ground, this paper proposes a method that combines cascade PID and virtual model control to perform compliance control and posture control on the robot wheel leg and the fuselage, respectively, to achieve stable walking of the biped wheel leg composite robot; In addition, this paper adopts virtual model control combined with impact control strategies to propose a method for robot anti vertical impact, which ensures that the biped wheel leg composite robot can maintain balance and quickly recover its motion state after being disturbed by vertical impact in different ground motions; Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: Biped wheel leg composite robot; Virtual model control; Cascade PID control; Vertical impact; Balance recovery

引言

目前, 移动机器人成为了机器人研究领域中的热点之一。随着机器人的应用场景由单一环境扩展到复杂环境, 机器人面对的任务要求变得多样化, 现有的足式或者轮式机器人已难以满足复杂环境的任务要求。兼具轮式和腿足式机器人特点的双足轮腿复合机器人受到了学者们的广泛关注。双足轮腿复合机器人既有轮式结构又具备类人形的双足, 大大提升了轮式机器人在多种复杂地面环境下的适应能力^[1]。双足轮腿复合机器人在复杂环境下的稳定行走以及腿部的柔顺性需要考虑其机械结构、控制方法等多方面因素^[2]。

PID 控制在双足机器人研究中较为常见, 具有形式简洁、应用方便和鲁棒性强等特点^[3]。但随着任务场景的复杂化与精细化, PID 控制方法已经难以满足双足机器人复杂的控制需求。有学者指出, 虚拟模型控制方法不仅可以用于双足机器人平衡姿态的稳定控制, 还适用于多种运动模式控制^[4-7]。基于上述启发, 本文将在 PID 控制的基础上, 探究虚拟模型控制方法在双足轮腿复合机器人运动控制的可行性。

具体而言, 本文提出一种基于串级 PID 控制与虚拟模型控制的双足轮腿复合机器人控制方法, 可以提高机器人腿部柔顺性, 实现较为稳定的机器人速度调整, 同时还可

收稿日期: 2023.3.20

基金项目: 国家自然科学基金 (62203341), 国家大学生创新创业训练项目资助 (3120400002231)

以对机器人机身姿态进行稳定调整。此外，本文提出一种基于冲击策略的有效抗垂直方向冲击的控制方法。最后，MATLAB 与 WEBOTS 联合仿真实验结果验证了本文提出的控制方法的有效性。

1 双足轮腿复合机器人模型

在实际任务中，机器人自由度数量必须与任务需求相符，并在确保任务需求得以实现的情况下，尽量减少机器人自由度数量，以便减少机器人研制的困难与复杂度^[8]。

为了让机器人具备轮式平衡和双足移动的基本结构，本文选择了髋关节、踝关节和膝关节各 1 个自由度的方案。对于双足机器人构型，轮腿复合机器人的构型可分为轮腿融接型和轮腿独立型两类^[9]。作者选择了灵活性更强的轮腿融接构型方案。模型主要参数如表 1 所示。

2 串级 PID 控制

在间断控制系统中，按运动产生的偏差量的比例、积分、微分来进行机器人控制的 PID 控制应用普遍^[10]。为了将其应用在双足轮腿复合机器人上，需要根据性能需求选择合适的待选择控制项。本文主要进行平衡 PD 控制器和速度 PI 控制器设计。

针对平衡控制设计，机器人需要在平衡位置附近保持静止，在设计时不仅需要增加和角速度成正比、方向与运动方向相反的阻尼力，还需要在电机上施加和倾角成正比的回复力^[11]。PD 控制器具体公式为：

$$a = k_p \phi + k_d \dot{\phi} \quad (1)$$

式中， ϕ 为机器人倾角偏差， $\dot{\phi}$ 为机器人角速度， a 为机器人运动加速度。

表 1 双足轮腿复合机器人
主要参数

| 结构参数描述 | 数值 | 单位 |
|---------|------|----|
| 机器人初始高度 | 310 | mm |
| 机身最大高度 | 618 | mm |
| 机器人小腿长度 | 250 | mm |
| 机器人质量 | 11.3 | Kg |
| 机器人腰身宽度 | 300 | mm |
| 驱动轮直径 | 200 | mm |
| 机器人大腿长度 | 300 | mm |

基于平衡 PD 控制器的基础，我们进行速度控制的设计。其控制原理示意图如图 1 所示：

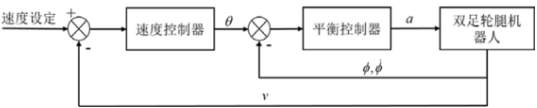


图 1 机器人串级 PID 控制原理示意图

引入速度 PI 控制器的控制率^[12]：

$$\theta = k_{p1} e(k) + k_{i1} \sum_{j=1}^k e(j) \quad (2)$$

式中： θ 是机器人速度控制器输出量； k_{p1} ， k_{i1} 是设定的比例系数； $e(k)$ 是产生的速度偏差。

联立公式（1）和（2），可得到满足平衡优先条件的速度控制器，具体为：

$$a = k_p \phi + k_d \dot{\phi} - k_p \left[k_{p1} e(k) + k_{i1} \sum_{j=1}^k e(j) \right] \quad (3)$$

将机器人平衡控制、速度控制的输出量转换为电机转速量，再加上设定好的转向控制器的输出量转换的电机转速量叠加，可以实现对驱动轮的控制^[13]。

3 虚拟模型控制

虚拟模型控制 (Virtual Model Control, VMC) 是 Pratt 等人基于力位混合控制、阻抗控制以及刚度控制提出的一种主动阻抗控制方法, 广泛应用于四足机器人的稳定行走领域^[14-15]。本文在机器人机身质心与周围环境之间建立 3 个不同的虚拟模型构件, 当实际轨迹与参考轨迹之间存在偏差时, 虚拟“弹簧-阻尼”元件产生虚拟力。其中, F_x 、 F_y 、 τ_r 分别表示用于控制机器人垂直高度、水平距离以及姿态角的水平虚拟力、竖直虚拟力以及虚拟力矩。

三个虚拟模型构件产生的虚拟力为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d - x \\ Y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 \\ 0 & 0 & b_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_d - \dot{x} \\ \dot{Y}_d - \dot{y} \\ \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了将操作空间的虚拟力映射成关节空间的关节力矩, 首先需要通过正运动学求出躯干质心位姿从关节空间到操作空间的映射关系。 θ_1 为小腿连杆与 y 轴正方向的夹角, 当小腿连杆在 y 轴右侧时该值为正; θ_2 为小腿连杆与大腿连杆的夹角, 以小腿连杆为分界线, 当在其右侧时该值为正。 θ_3 为躯干连杆与大腿连杆的夹角, 以大腿连杆为分界线, 当在其右侧时该值为正。令小腿、大腿和躯干连杆的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 , 小腿、大腿和躯干质心处的长度分别为 l_{m1} 、 l_{m2} 和 l_{m3} 。在人体足底坐标系 O 中, 躯干质心位姿可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_{m3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_{m3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ -\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对公式 (5) 进行微分, 并整理得到雅各比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_{m3} c_{123} & l_2 c_{12} + l_{m3} c_{123} & l_{m3} c_{123} \\ -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_{m3} s_{123} & -l_2 s_{12} - l_{m3} s_{123} & -l_{m3} s_{123} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(6)

在确定了躯干质心位姿与各关节的速度关系后, 还需要分析二者之间的力学关系。根据虚功原理, 各关节所作的功与躯干质心处各组虚拟元件所作的虚功相等。即:

$$\tau_F^T d\theta = F^T dx \quad (7)$$

综合上述式子, 可得:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_F & D_F & 1 \\ E_F & G_F & 1 \\ H_F & P_F & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_F &= l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_{m3} c_{123} \\ D_F &= -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_{m3} s_{123} \\ E_F &= l_2 c_{12} + l_{m3} c_{123} \\ G_F &= -l_2 s_{12} - l_{m3} s_{123} \\ H_F &= l_{m3} c_{123} \\ P_F &= -l_{m3} s_{123} \end{aligned}$$

双足轮腿式机器人踝关节用驱动轮替代, 踝关节处的虚拟力矩为零。添加约束条件:

最终整理得到:

$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_F & G_F & 1 \\ H_F & P_F & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

公式 (10) 给出了双足轮腿复合机器人的虚拟模型控制控制率。它可以反映出机器人左右 4 个主动关节的关节力矩。

4 机器人控制策略：

4.1. 平地行走控制策略

本文基于串级PID控制与虚拟模型控制设计机器人平衡控制器与速度控制器。当双足轮腿复合机器人在平地上行走时，机器人的平衡控制与速度控制同时生效，串级PID控制器产生的电机调速与虚拟模型控制器产生的虚拟力矩，通过相对应的转换器，同时对机器人开始进行控制。

4.2 竖直向冲击控制策略

4.2.1 基于虚拟模型控制的冲击控制策略

本文通过虚拟模型控制对机器人机身高度进行控制，给机器人系统加一个绕 x 轴的虚拟弹簧-阻尼构件，通过这个虚拟构件可以产生一个绕 x 轴的虚拟力矩 M ，使机器人的高度得到控制，从而调节机身的高度。

为了提高机器人受到冲击的稳定性，当机器人高度低于设定阈值，根据时间分三个阶段，每 $0.2s$ 一个机器步长，前四个步长对虚拟力 F_x, F_y 的刚度系数，阻尼系数，位置偏差与速度偏差的值进行调整：增大 F_x 的速度偏差，增大 F_y 的位置偏差。

在受到冲击后四个步长到八个步长里，减小 F_x 的速度偏差，减小 F_y 的位置偏差。在受到冲击的八个步长之后，参数调整成与常态行走一致。

4.2.2 竖直向冲击控制流程

在双足轮腿复合机器人启动后，时刻检测机器人高度，同时机器人按照平地行走控制策略正常行走。当机器人受竖直冲击的影响导致机器人高度低于设定的值时，双足轮腿复合机器人的控制策略由平地正常行走策略切换为基于虚拟模型控制的冲击控制

策略，从而维持机器人的平衡性。

5 仿真实验

本文利用 Matlab/WEBOTS 进行联合仿真实验来验证上文提出的控制方法的可行性，

机器人控制相关参数如下表：

表二

| 参数 | 数值 | 单位 |
|------------|------|------------------------|
| 与地面接触刚度 | 2855 | N/m |
| 机器步长 | 0.20 | s |
| 控制频率 | 250 | Hz |
| K_x | 0.5 | N/m |
| K_y | 700 | N/m |
| K_θ | 0 | N·m/rad |
| b_x | 18 | N/(m·s ⁻¹) |
| b_y | 40 | N/(m·s ⁻¹) |

5.1 仿真实验

双足轮腿复合机器人主要应用环境平地，下面基于这个环境进行仿真验证。我们在不同条件下进行双足机器人运动控制行走仿真，并且将本文提出的控制方法与传统PID控制进行比较。在 WEBOTS 中设定仿真时间为 $12s$ ，系统每 $20ms$ 记录一次数据。

5.1.1 平地行驶的运动控制

下面是双足轮腿式机器人运动控制仿真实验的主要数据对比曲线，红色代表传统PID控制曲线。图2和图3表明，基于串级PID和虚拟模型控制的双足轮腿式机器人的机身姿态角误差，明显小于传统PID控制下的机身姿态角变化，在机器人运动过程中前者的运动变化更为平稳，且不会因地面环境变化导致机器人出现较大波动。而且，前者的控制曲线的速度变化明显更小，反映了提出的控制方法的可行性与有效性。

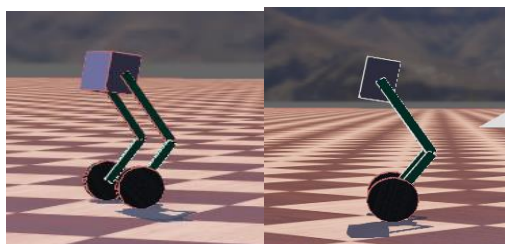


图2 平地行走运动仿真实验

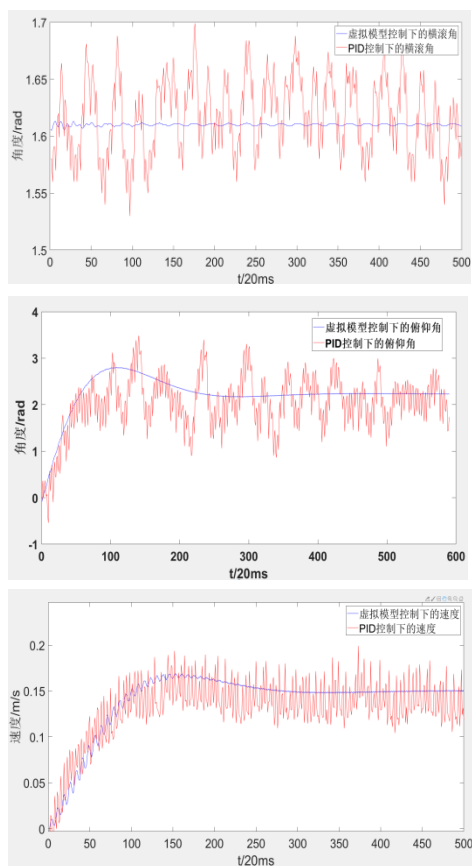


图3 两种控制横滚角、俯仰角、速度对比图

5.1.2 竖直冲击控制平衡性验证实验

通过机器人受竖直向冲击的仿真实验,验证本文提出的控制方法的可行性。在本实验中,机器人受到作用时长为 0.1s、大小为 113 N 的侧向冲击力,冲击力作用于机器人机体质心,在 WEBOTS 中设置仿真时间为 24s (如图 4)。

图5为受冲击后机器人姿态角的变化曲线。由图5可知,当机器人收到冲击力后,机身姿态角增大,而当机身高度低于设定的值时(值设 200mm),机器人切换到基于虚拟模型控制的冲击控制策略,进行虚拟力调

整,使机身姿态角的变化得到抑制,并且渐渐恢复正常。

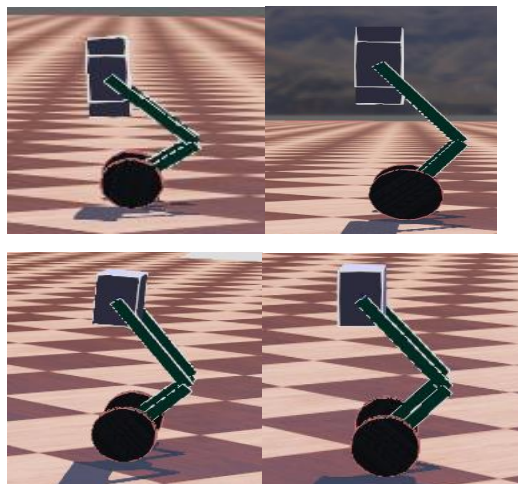


图4 受竖直向冲击的运动仿真

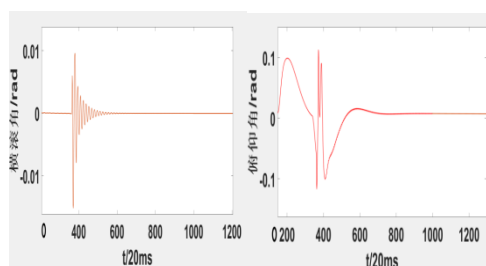


图5 横滚角与俯仰角变化曲线

实验结果表明,本文提出的抗竖直方向冲击策略,不仅可以使机器人在短暂时间内迅速恢复平衡,而且还减小了机身姿态角的波动,验证了方法的可行性。

6 结论

本文提出了一种基于串级 PID 控制和虚拟模型控制的双足轮腿复合机器人运动控制方法,有效的保证了机器人运动时机身姿态角的稳定与腿部的柔顺控制。同时,提出的基于虚拟模型的冲击控制策略可以抑制竖直方向的干扰冲击。最后,仿真实验验证了所提出方法的有效性。不足与未来工作可以简单提一下

参考文献

- [1] Eiji N, Sei N. Leg-wheel Robot: A Futuristic Mobile Platform for Forestry

- Industry[C]//International Workshop on Advanced Robotics, 1993: 109-112.
- [2] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 浙江: 浙江大学控制科学与工程学科硕士学位论文, 2005: 2-4.
- [3] 韩佳宏. 基于 Flying trot 步态的四足机器人奔跑控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [4] Klemm V, Morra A, Salzmann C, et al. Ascento: A Two-Wheeled Jumping Robot[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, 2019: 7515-7521.
- [5] Bae H, Lee I, Jung T, et al. Walking wheeling Dual Mode Strategy for Humanoid Robot DRC-HUBO+[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016: 1342-1348
- [6] Oh P, Sohn K, Jang G, et al. Technical Overview of Team DRC-Hubo@ UNLV's Approach to the 2015 DARPA Robotics Challenge Finals[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(5): 874-896.
- [7] 北京康力优蓝机器人科技有限公司. 一种轮式双足机器人: CN20182167 1758.8[P]. 2019-06-21.
- [8] Liu S Y, Xu Y, Yin M. Analysis on Degree of Freedom of Leg Joint of Humanoid Robot for Fashion Show[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 29-32:1728-1731.
- [9] Chan R P M, Stol K A, Halkyard C R. Review of Modelling and Control of Two-wheeled robots[J]. Annual reviews in control, 2013, 37(1): 89-103.
- [10] 姜利彬. 一种双足自平衡车的设计和实现[D]. 江苏: 东南大学机械电子工程学科硕士学位论文, 2016:10-13.
- [11] 汪宇辰. 智能轮式机器人平台软硬件设计和系统控制[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学科硕士学位论文, 2016: 39-43.
- [12] JianW Z, Gang X. The Control and Design of Dual-wheel Upright Self-balance Robot[J]. Intelligent Control and Automation, 2008: 4172-4177.
- [13] 绳涛. 欠驱动两足机器人控制策略及其应用研究[D]. 湖南: 国防科技大学控制科学与工程博士学位论文, 2009: 2-4.
- [14] 韩佳宏. 基于Flying trot步态的四足机器人奔跑控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [15] 杨琨. 液压驱动四足机器人能耗分析、优化及动力系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [16] 宫赤坤, 吴浔炜, 袁立鹏. 基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2152-2161. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0532.