

10-18-2022

Control of Quadraped Robot Based on Impedance and Virtual Model

Chikun Gong

1.School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; gongchikun@126.com

Xunwei Wu

1.School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Lipeng Yuan

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Control of Quadruped Robot Based on Impedance and Virtual Model

Abstract

Abstract: In order to improve the motion stability of quadruped robot, a control method based on impedance and virtual model is proposed. The force-based impedance control method is used to control the leg swing phase to realize the more accurate trajectory tracking and leg compliance control. The virtual model control method is used to control the support phase to realize the attitude control of the robot body and the stable walking of the quadruped robot. Combined with the lateral stride strategy and the yaw angle control strategy based on virtual model, a robot anti-lateral impact control method is proposed, which ensures that the quadruped robot maintains balance and resumes its motion state after being subjected to lateral impact. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords

quadruped robot, impedance control, virtual model control, lateral impact, balance recovery strategy

Recommended Citation

Chikun Gong, Xunwei Wu, Lipeng Yuan. Control of Quadruped Robot Based on Impedance and Virtual Model[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2152-2161.

基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法

宫赤坤¹, 吴浚炜¹, 袁立鹏²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为提高四足机器人的运动稳定性, 提出基于阻抗和虚拟模型的控制方法。采用基于力的阻抗控制方法进行腿部摆动相的控制, 实现摆动相较于精准的轨迹跟踪以及腿部的柔顺控制; 采用虚拟模型控制方法进行支撑相的控制, 实现对机器人机身姿态的控制, 实现了四足机器人的稳定行走。结合横向跨步策略以及虚拟模型的偏航角控制策略, 提出机器人抗侧向冲击控制方法, 保证了四足机器人受侧向冲击后能够保持平衡并恢复运动状态。仿真结果验证了所提出的控制方法的有效性。

关键词: 四足机器人; 阻抗控制; 虚拟模型控制; 侧向冲击; 平衡恢复策略

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)10-2152-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0532

Control of Quadruped Robot Based on Impedance and Virtual Model

Gong Chikun¹, Wu Xunwei¹, Yuan Lipeng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the motion stability of quadruped robot, a control method based on impedance and virtual model is proposed. The force-based impedance control method is used to control the leg swing phase to realize the more accurate trajectory tracking and leg compliance control. The virtual model control method is used to control the support phase to realize the attitude control of the robot body and the stable walking of the quadruped robot. Combined with the lateral stride strategy and the yaw angle control strategy based on virtual model, a robot anti-lateral impact control method is proposed, which ensures that the quadruped robot maintains balance and resumes its motion state after being subjected to lateral impact. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: quadruped robot; impedance control; virtual model control; lateral impact; balance recovery strategy

引言

目前, 移动机器人是机器人学研究的热点。轮式机器人和履带式机器人结构简单、速度快和稳定性强得到较为广泛的应用。与轮式和履带式机器人相比, 足式机器人在非结构化的复杂环境

中具有更强的适应性。在足式机器人中, 四足机器人在负重能力、运动形式和运动控制等方面都有着比较好的性能^[1], 四足机器人在保证实时性和良好的运动步态下稳定行走需要多方面的考虑, 国内外专家学者进行了大量的研究。

爬行步态作为四足动物中一种最为常见的步

收稿日期: 2021-06-08

修回日期: 2021-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2000700)

第一作者: 宫赤坤(1968-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为机器人学。E-mail: gongchikun@126.com

态规律, 具有负载能力强、稳定性高等优点, 在早期对四足机器人的研究中, 这种步态被广泛应用^[2]。爬行步态速度较慢, 随着四足机器人技术的不断发展, 这种步态不能满足研究者们对四足机器人速度性能的追求。在对四足步态的研究中发现, 对角步态作为一种中低速步态^[3], 不仅可以实现四足机器人运动速度的大范围变化, 还具有较高的能量效率和运动控制可行性。这些优点使得对角步态控制方法成为目前热门的研究方法之一。

在四足机器人常用的控制方法中, Vukobratovic 提出的零力矩点(zero moment point, ZMP)算法被用于四足机器人的对角步态控制中^[4-5], 用于分析机器人运动稳定性, 但相对而言, ZMP 并不适合用于对角步态的控制, 而主要应用于四足机器人爬行步态。Hiroshi Kimura 提出的 CPG(central pattern generator)算法, 通过数学方法描述生物体内节律运动的控制神经中枢, 在对四足机器人对角步态控制时有着很好的控制效果, 但是该算法比较复杂。哈尔滨工业大学研发的 HIT-HUBTO 四足机器人采用基于足端位置阻抗的控制方法对各腿单独控制。波士顿动力公司研发的 BigDog 机器人, 应用虚拟模型控制方法, 实现了步态协调控制。Claudio Semini 等研制出 HyQ 四足机器人, 分别使用了阻抗控制、虚拟模型控制等方法。瑞士苏黎世联邦理工学院研制的轮腿式四足机器人利用整体模型预测控制器实现相应控制^[6-7]。以上的控制方法都是单独应用在四足机器人上, 实现的稳定性相对较弱。

针对以上问题, 本文提出了一种简单有效且稳定性较强的四足机器人对角步态控制方法。采用阻抗控制和虚拟模型控制相结合的方法, 对四足机器人进行有效的实时稳定控制。在摆动相阶段, 采用阻抗控制方法, 驱动摆动足沿设定的轨迹运动, 并使足端体现出柔顺性, 实现较为精准的轨迹跟踪以及腿部柔顺控制。在支撑相阶段, 采用虚拟模型控制方法, 实现对机器人机身姿态的稳定调整。结合横向跨步策略以及虚拟模型的

偏航角控制策略, 提出机器人抗侧向冲击控制方法。通过在 Matlab 和 ADAMS 进行联合仿真实验, 验证了控制方法的有效性。

1 四足机器人模型

腿部的自由度越多, 机器人可实现的运动越灵活, 但对于控制的要求也越高, 腿部的结构也就越复杂。因此, 对于四足机器人来说, 在满足控制要求的前提下, 腿部自由度应越少越好。四足机器人在运动过程中往往只需考虑足端的位置, 而不用考虑足端的姿态。

本文选择每条腿具有 3 个主动空间自由度的四足机器人进行研究。对于机器人整体设计采用模块化的设计思想, 可通过快速拆卸以及重组实现不同的腿部构型。机器人腿部构型采用前肘后膝式, 与其他构型相比, 这种构型可以有效减小机器人足端与地面之间的相对滑动^[8-9], 可以体现出更好的运动性能, 更利于在复杂的地面上行走。四足机器人整机结构模型如图 1 所示, 模型的主要参数如表 1 所示。

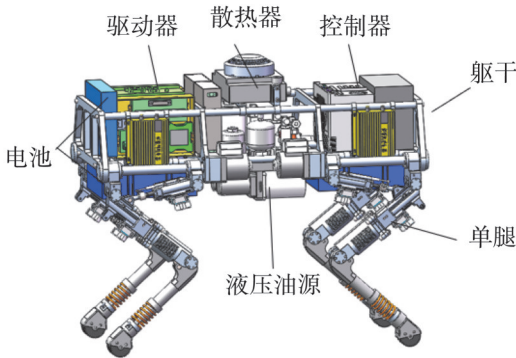


图 1 四足机器人结构模型
Fig. 1 Quadruped robot structure model

表 1 四足机器人模型主要参数 Table 1 Major parameters of the quadruped model			
参数	数值	参数	数值
躯干质量/kg	96	小腿质量/kg	2.5
前后髋关节距离/m	1.1	髋部侧摆长度/m	0.075
左右髋关节距离/m	0.5	大腿长度/m	0.4
髋部侧摆质量/kg	2	小腿长度/m	0.36
大腿质量/kg	3.5		

2 摆动相阻抗控制

四足机器人单腿的动力学方程为

$$D(q) \cdot \ddot{q} + h(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau - \tau_e \quad (1)$$

式中: q 为关节角度; $\dot{q}$ 为关节角速度; $\ddot{q}$ 为关节角加速度; τ 为机器人的关节控制力矩; τ_e 为外部接触力转化到关节的等效力矩。

阻抗控制不是直接对足端力进行控制, 而是通过控制关节力矩建立足端与环境之间的接触力 F_e 和足端位置之间的动态关系^[10-11]:

$$F_e = M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) + K_d(x - x_r) \quad (2)$$

式中: M_d 为期望惯量; B_d 为期望阻尼; K_d 为期望刚度; F_e 为外部接触力; x 为足端的实际位置; x_r 为足端的目标位置。

由于机器人的整体控制需要在关节空间实现, 因此需要将式(2)的阻抗模型转化到关节空间上, 并推导控制律。

当外部接触力作用于机器人系统时, 若机器人系统满足所设置的阻抗模型, 则根据式(2)可得到期望实现的足端加速度与外力之间的关系:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_r + M_d^{-1} [-B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) - K_d(x - x_r) + F_e] \quad (3)$$

雅可比矩阵可建立足端空间与关节空间之间的转换关系^[12-13]:

$$\begin{cases} \dot{x} = J(q)\dot{q} \\ \ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \end{cases} \quad (4)$$

通过联立式(3)和式(4), 可以得到期望阻抗所需要的关节角加速度:

$$\ddot{q}_d = J^{-1} \{ \ddot{x}_r + M_d^{-1} [-B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) - K_d(x - x_r) + F_e] - \dot{J}\dot{q} \} \quad (5)$$

机器人末端作用力可根据雅可比转置矩阵折算到关节空间, 即:

$$\tau_e = J^T F_e \quad (6)$$

根据式(1)~(6)可推出期望阻抗所需要的关节力矩:

$$\tau_{ref} = D(q)J^{-1} \{ \ddot{x}_r + M_d^{-1} [-B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) - K_d(x - x_r) + F_e] - \dot{J}\dot{q} \} + J^T F_e + h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (7)$$

式(7)即为关节空间的基于力的阻抗控制律。

根据式(7)可搭建基于力的阻抗控制器。

3 支撑相虚拟模型控制

虚拟模型控制方法是通过控制机器人机身的高度、前进速度以及机身姿态, 实现稳定行走的目的^[14-15]。将其应用于四足机器人上, 如图2所示, 在机身质心与环境之间建立3个虚拟模型, 以实现机体高度 Z 、前进速度 v 和机身姿态角 θ 的控制。

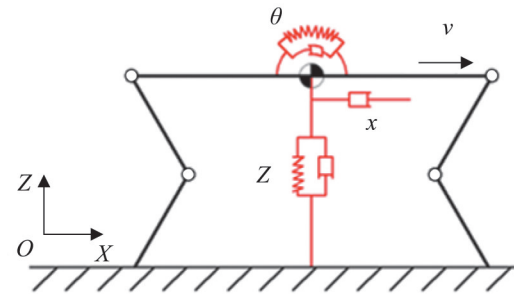


图2 四足机器人虚拟构件

Fig. 2 Quadraped robot virtual component

3个虚拟构件为: 水平方向阻尼器用以调节机器人前进速度; 竖直方向弹簧-阻尼用以调节机身高度; 绕机体中心的旋转弹簧-阻尼用以调节机身倾角大小。3个虚拟构件产生的虚拟力及力矩为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_z & 0 \\ 0 & 0 & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ z_d - z \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x & 0 & 0 \\ 0 & B_z & 0 \\ 0 & 0 & B_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{z}_d - \dot{z} \\ \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

建立雅可比矩阵, 以实现虚拟力和力矩与关节空间的关节力矩之间的转换。上述方法建立的虚拟构件是建立于机身与外界环境之间, 所以在进行雅可比矩阵求解时需要在地面坐标系 O 下建立。

本文主要考虑对角步态下四足机器人的控制, 理论上机器人在任意时刻都有2条腿处于支撑状态。图3为机器人双足支撑相模型示意图。

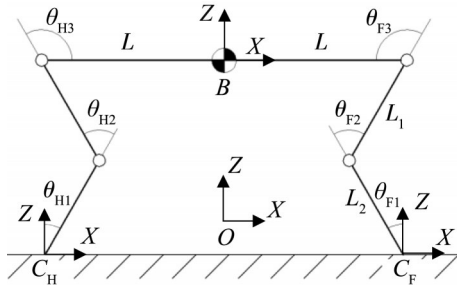


图3 支撑相模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of supporting phase model

在足端建立足端坐标系 C_F 以及 C_H , 下标 F、H 分别表示前腿和后腿。在机器人质心处建立机身坐标系 B 。机身长度、大腿长度以及小腿长度分别为 $2L$ 、 L_1 、 L_2 , 各关节角度定义如图3所示, 可以得到 C_F 到 B 的运动学映射关系为

$${}^{C_F}_B \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 s_{F1} - L_2 s_{F12} - L s_{F123} \\ L_1 c_{F1} + L_2 c_{F12} + L c_{F123} \\ -\pi/2 + \theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $s_{F12} = \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2})$, $c_{F1} = \cos \theta_{F1}$, $s_{F1} = \sin \theta_{F1}$, $c_{F12} = \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2})$, 以此类推。

对式(9)进行微分, 并整理得到雅可比矩阵为

$${}^{C_F}_B \mathbf{J} = \begin{bmatrix} -L_1 c_{F1} - L_2 c_{F12} - L c_{F123} & -L_2 c_{F12} - L c_{F123} & -L c_{F123} \\ -L_1 s_{F1} - L_2 s_{F12} - L s_{F123} & -L_2 s_{F12} - L s_{F123} & -L s_{F123} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过雅可比矩阵可以将虚拟力转化到关节空间:

$$\begin{bmatrix} \tau_F \\ \tau_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{C_F}_B \mathbf{J}^T & 0 \\ 0 & {}^{C_H}_B \mathbf{J}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_F \\ F_H \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)展开得:

$$\begin{bmatrix} \tau_{F1} \\ \tau_{F2} \\ \tau_{F3} \\ \tau_{H1} \\ \tau_{H2} \\ \tau_{H3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_F & D_F & 1 & 0 & 0 & 0 \\ E_F & G_F & 1 & 0 & 0 & 0 \\ H_F & P_F & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_H & D_H & 1 \\ 0 & 0 & 0 & E_H & G_H & 1 \\ 0 & 0 & 0 & H_H & P_H & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Fx} \\ F_{Fz} \\ M_{F\theta} \\ F_{Hx} \\ F_{Hz} \\ M_{H\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_F &= -L_1 \cos(\theta_{F1}) - L_2 \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2}) - L \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \\ D_F &= -L_1 \sin(\theta_{F1}) - L_2 \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2}) - L \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \\ E_F &= -L_2 \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2}) - L \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_F &= -L_2 \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2}) - L \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \\ H_F &= -L \cos(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \\ P_F &= -L \sin(\theta_{F1} + \theta_{F2} + \theta_{F3}) \\ A_H &= -L_1 \cos(\theta_{H1}) - L_2 \cos(\theta_{H1} + \theta_{H2}) - L \cos(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \\ D_H &= -L_1 \sin(\theta_{H1}) - L_2 \sin(\theta_{H1} + \theta_{H2}) - L \sin(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \\ E_H &= -L_2 \cos(\theta_{H1} + \theta_{H2}) - L \cos(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \\ G_H &= -L_2 \sin(\theta_{H1} + \theta_{H2}) - L \sin(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \\ H_H &= -L \cos(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \\ P_H &= -L \sin(\theta_{H1} + \theta_{H2} + \theta_{H3}) \end{aligned}$$

2条支撑腿具有相同的作用坐标系 B , 则质心处的虚拟力由2条支撑腿所产生的力耦合而成, 则:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{Fx} \\ F_{Fz} \\ M_{F\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Hx} \\ F_{Hz} \\ M_{H\theta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: 虚拟力 $\mathbf{F}_{VM} = [F_x \ F_z \ M_\theta]^T$ 为作用在机器人机身的虚拟力, 这3个虚拟力通过6个关节力矩进行控制, 因此需要添加3个约束:

$$\tau_{F1} = 0, \tau_{H1} = 0, M_{F\theta} = M_{H\theta} \quad (14)$$

结合式(13)和式(14), 得:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ A_F & D_F & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_H & D_H & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Fx} \\ F_{Fz} \\ M_{F\theta} \\ F_{Hx} \\ F_{Hz} \\ M_{H\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(11)~(15)联立, 并整理后得:

$$\begin{bmatrix} \tau_{F2} \\ \tau_{F3} \\ \tau_{H2} \\ \tau_{H3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_H S_F}{R} & \frac{D_H S_F}{R} & \frac{G_F T - E_F U}{2R} + \frac{1}{2} \\ \frac{A_H V_F}{R} & \frac{D_H V_F}{R} & \frac{P_F T - H_F U}{2R} + \frac{1}{2} \\ -\frac{A_F S_H}{R} & -\frac{D_F S_H}{R} & \frac{E_H U - G_H T}{2R} + \frac{1}{2} \\ -\frac{A_F V_H}{R} & -\frac{D_F V_H}{R} & \frac{H_H U - P_H T}{2R} + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $S_F = A_F G_F - D_F E_F$, $S_H = A_H G_H - D_H E_H$, $V_F = A_F P_F - D_F H_F$, $V_H = A_H P_H - D_H H_H$, $T = A_F + A_H$, $U = D_F + D_H$ 。

式(16)为四足机器人双足支撑相的虚拟模型控

制法则。它将机体上3个虚拟力或力矩通过整机的雅可比矩阵映射成为4个主动关节的关节力矩。

4 四足机器人控制策略

4.1 对角步态行走控制策略

四足机器人行走控制框图如图4所示, 本文利用阻抗控制搭建机器人摆动相控制器, 利用虚拟模型控制搭建机器人支撑相控制器。通过对机器人当前状态的判断, 在2个控制器之间切换。机器人反馈的各关节角度 q 和角速度 $\dot{q}$ 经过运动学以及雅可比计算, 可以得到足端的实际位置 x 以及实际速度 $\dot{x}$ 。通过轨迹规划输出期望位置 x_r 、期望速度 $\dot{x}_r$ 和期望加速度 $\ddot{x}_r$ 。阻抗控制器的输入为 x 、 $\dot{x}$ 、 x_r 、 $\dot{x}_r$ 、 $\ddot{x}_r$ 以及机器人反馈的足端力 F , 输出为控制力矩 τ 。虚拟模型控制器输入为 x 、 $\dot{x}$ 、 x_r 、 $\dot{x}_r$, 输出为控制力矩 τ 。

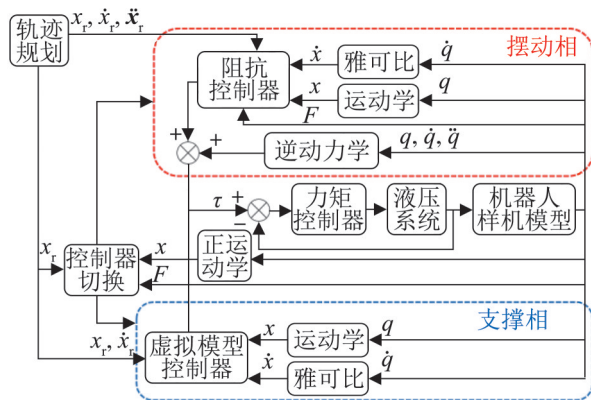


图4 四足机器人行走控制框图

Fig. 4 Quadruped robot walking control block diagram

当四足机器人以对角步态行走时, 如果设置的步态占空比为 $\beta=0.5$, 则理论上机器人腿部支撑相和摆动相的持续时间相同。但是在实际行走过程中, 机器人2条摆动腿不能同时落地。针对这种情况, 不能单纯利用步态占空比来切换腿部的相位, 需要考虑摆动腿着地的前后顺序。

初始调整姿态时, 机器人处于四足着地的状态。机器人启动后, 2条摆动腿运动过程中, 通过

足端力传感器判断足端触底情况, 当有一条摆动腿率先触地时, 则该腿保持当前位置不变。在另一摆动腿触地之前, 机器人会处于短暂的三足支撑的状态, 当另一条摆动腿触底后, 则进行各腿的相位切换。

4.2 侧向冲击控制策略

为提高四足机器人在受到侧向冲击时的稳定性, 以及受侧向冲击后对运动状态的恢复能力, 提出了横向跨步策略以及机身姿态角调整2种控制策略相结合的控制方法, 实现了四足机器人受侧向冲击时的稳定控制。

4.2.1 基于虚拟模型的偏航角调整

利用虚拟模型控制方法对机器人偏航角进行控制, 在机器人机体坐标系的 Oxy 平面内加一个绕 z 轴的虚拟弹簧-阻尼构件, 如图5所示。其中, LF代表左前腿; LH为左后腿; RF为右前腿; RH为右后腿。

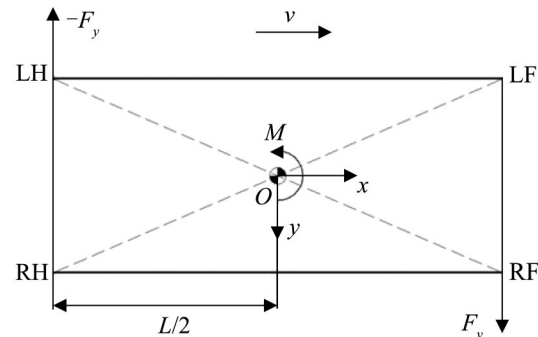


图5 偏航角控制

Fig. 5 Yaw angle control

通过虚拟构件可以产生一个绕 z 轴的虚拟力矩 M , 用来调节偏航角 θ 的大小, 可以得到虚拟力矩大小:

$$M = K_{\theta}(\theta_d - \theta) + B_{\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (17)$$

式中: K_{θ} 为虚拟构件弹簧刚度系数; B_{θ} 为虚拟构件阻尼系数; θ , θ_d 分别为角速度和期望偏航角。

在对角行走时, 偏航角的调整通过2条支撑腿实现, 当右前腿与左后腿为支撑相时, 虚拟力

矩 M 可以由2条支撑腿的横摆关节产生的侧向力 F_y 等效。

$$F_y = M/L \quad (18)$$

式中: L 为机身长度。

将式(17)代入式(18)中得到:

$$F_y = \frac{K_\theta}{L} (\theta_d - \theta) + \frac{B_\theta}{L} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (19)$$

虚拟力 F_y 可通过2条支撑腿的侧摆关节产生。

4.2.2 横向稳定性分析

建立四足机器人步行时横向运动简化模型, 如图6所示。其中, COG 为机器人的重心, 如果机器人不受到外部冲击的影响, 则机器人的落足点会在 D_0 点。 d_0 为落足点到机器人重心的水平距离; d_1 是新落足点到机身重心的水平距离; 机器人重心高度为 h ; v_0 为重心横向水平速度; D_1 为机器人横向迈步时落足点。

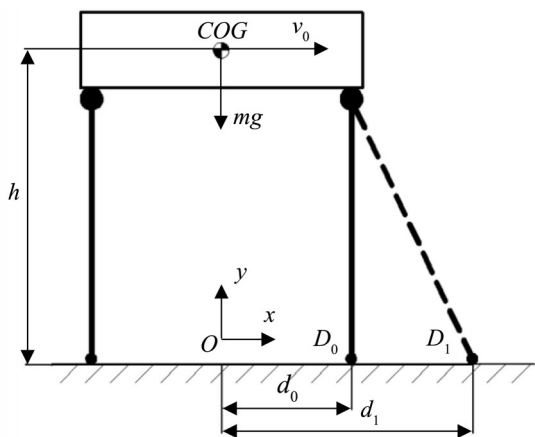


图6 机器人横向稳定分析简图

Fig. 6 Robot lateral stability analysis diagram

若机器人正常落在 D_0 点, 根据能量守恒定律有:

$$\int_0^{d_0} mg \frac{x}{h} dx = \frac{1}{2} mv_0^2 \quad (20)$$

由式(20)可得:

$$v_0 = d_0 \sqrt{g/h} \quad (21)$$

如果机器人受到外部冲击, 冲击会导致机身横向水平速度变大, 即 $v_c > d_0 \sqrt{g/h}$, 机器人会失稳。

如果需要机器人保持稳定, 可以控制正处于摆动相的腿进行横向跨步, 使足端到达新的落足点 D_1 , d_1 为新落足点到机身重心的水平距离, 通过横向跨步可以使机器人侧翻的临界横向速度变大:

$$v_c = d_1 \sqrt{g/h} \quad (22)$$

综上可得, 四足机器人以对角步态行走时, 如果侧向冲击导致机器人机身横向速度过大而引起机器人失稳, 则可以通过摆动腿横向跨步来防止机器人侧翻, 横向跨步的步长为

$$w = d_1 - d_0 = v_c \sqrt{h/g} - d_0 \quad (23)$$

4.2.3 侧向冲击控制

四足机器人启动后, 依据机身姿态角时刻检测机身状态。若当前机器人机身姿态角在设定的阈值之内, 则机器人进行正常的行走。当侧向冲击影响导致机身姿态角超过设定的阈值时, 机器人从正常行走状态切换为横跨步态。机器人根据足端力检测, 判断腿部的相位状态, 进行相应的横向跨步。机身恢复稳定后, 机器人切换为正常行走步态, 并对侧向冲击造成的偏航角偏移量进行修正。通过这样一套完整的控制策略, 可以抵消侧向冲击对机器人的影响。

5 联合仿真分析

为验证上述控制方法的有效性, 本文利用 Matlab/ADAMS 进行了联合仿真实验。

5.1 对角步态行走实验

利用上述的控制方法进行四足机器人对角步态行走仿真, 并与基于位置控制的控制方法进行对比。仿真参数设定如表2所示, 仿真时间为5 s, 机器人的速度为3 km/h, 即0.83 m/s。图7为四足机器人在阻抗、虚拟模型控制下行走的仿真图像可以初步看出, 机器人在整个运动过程中可以保持稳定。

表2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	数值
足端与地面接触刚度/(N/mm)	2 855
机器人与地面摩擦因数	0.35
步态周期/s	0.5
控制频率/Hz	250
M_d /kg	10
B_d /(N/(m·s ⁻¹))	[800, 800]
K_d /(N/m)	[5 000, 4 000]
K_x /(N/m)	0
K_z /(N/m)	7 000
K_θ /(N·m/rad)	8 000
B_x /(N/(m·s ⁻¹))	1 000
B_z /(N/(m·s ⁻¹))	800
B_θ /(N·m/(rad·s ⁻¹))	800
K_ϕ /(N·m/rad)	6 000
B_ϕ /(N·m/(rad·s ⁻¹))	500

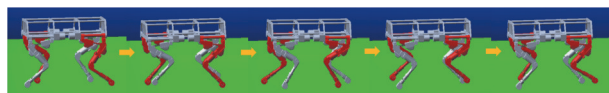
图7 对角步态行走仿真图像
Fig. 7 Trot gait walking simulation image

图8为不同控制方法下四足机器人对角步态行走仿真实验的主要数据曲线。经过对不同控制方法下机身横滚角以及俯仰角的分析，基于阻抗、虚拟模型控制的四足机器人机身姿态角波动，明显小于基于位置控制下的机身姿态角波动，在整个行走过程中前者的机身更为平稳，并且不会因足端冲击导致机身出现较大的波动。四足机器人机身速度变化反映了机器人运动时的稳定性，机身速度变化越小，说明机器人越趋于稳定。无论是横向还是竖直方向上，阻抗、虚拟模型控制下的四足机器人机身速度都明显小于位置控制下的机身速度。

5.2 侧向冲击实验

由于惯性的原因，四足机器人在正常行走时会有一定的抗干扰性，当外部干扰超出机器人抗干扰能力时，会导致机器人发生侧翻，采用上述侧向冲击控制方法可提高机器人抗扰能力。通过施加侧向冲击力的仿真，验证本文提出的控制方

法的有效性。设置仿真时间为10 s，机器人在3 s左右时受到一个作用时长为0.2 s、大小为1 200 N（机器人质量约为120 kg）的侧向冲击力，冲击力作用于机器人机体质心，方向垂直于前进方向。

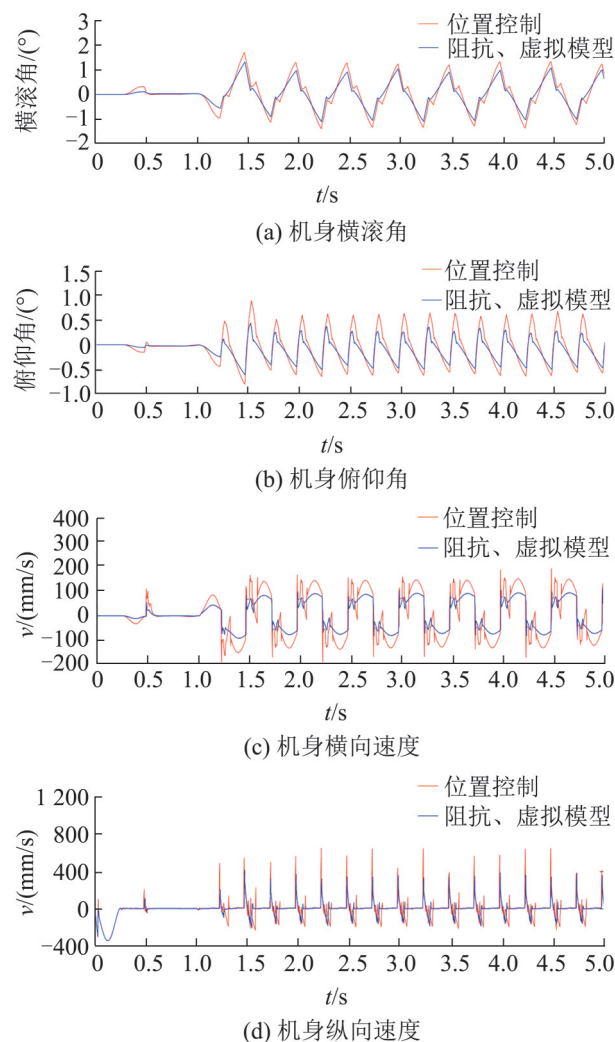
图8 对角步态行走仿真实验曲线
Fig. 8 Trot gait walking simulation experiment curve

图9为四足机器人在受侧向冲击后的运动仿真图像，仿真开始到受侧向冲击之前，机器人正常行走；机器人受侧向冲击后，机身发生翻转；机身检测到横滚角过大时，进行横向跨步；通过横向跨步抵消冲击力产生的横向机身速度，机器人恢复平衡；机器人恢复正常行走后对偏航角进行调整；经过偏航角的调整后，机器人恢复到正常的前进路线。

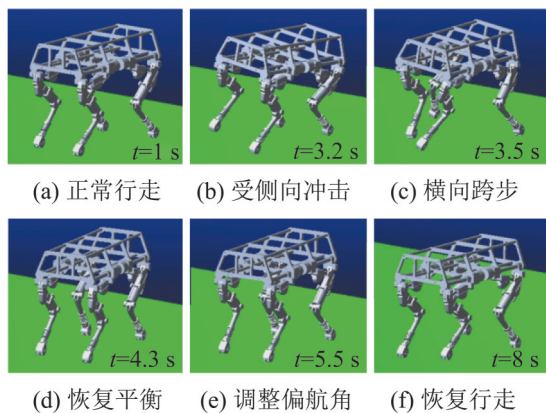


图9 侧向冲击下运动仿真图像
Fig. 9 Simulation image under side impact

图10为四足机器人受侧向冲击仿真实验过程中的主要数据曲线。在冲击力作用下, 机身横滚角以及俯仰角增大, 当横滚角或俯仰角大于设定的阈值时(阈值设置为 5°), 机器人切换到横跨步态, 进行横跨运动, 横滚角以及俯仰角的增大得到抑制, 并且慢慢恢复正常。

从机体质心的横向速度和前进速度曲线可以看出, 正常行走时, 质心横向速度会在 $\pm 0.1 \text{ m/s}$ 的范围内来回波动, 受侧向冲击力后, 机器人横向速度迅速增大, 机器人机身横向移动, 这也是导致机器人侧翻的重要原因。质心前进速度因为步态的切换而下降, 在4s时机器人恢复平稳, 切换为正常行走步态, 质心前进速度逐渐提高。

在受到侧向冲击后, 机器人偏航角会发生较大的变化。图11为不同控制策略下四足机器人受侧向冲击后的偏航角变化。无控制策略的四足机器人在受到侧向冲击后偏航角变大, 机器人发生侧翻, 机器人倒地后偏航角不再发生变化, 保持在 2.5° 左右。仅采用横跨策略的四足机器人在受到侧向冲击后, 其偏航角变大, 随后恢复稳定, 按照 5° 的偏航角一直前进。从偏航角的变化曲线分析, 仅采用横跨策略能够保证机器人受侧向冲击后不发生侧翻, 但是会偏离预设的前进方向。采用横跨及虚拟模型控制策略的机器人在受到侧向冲击后能够恢复机器人稳定, 并且将偏航角调整回 0° , 继续按照预定的方向前进。

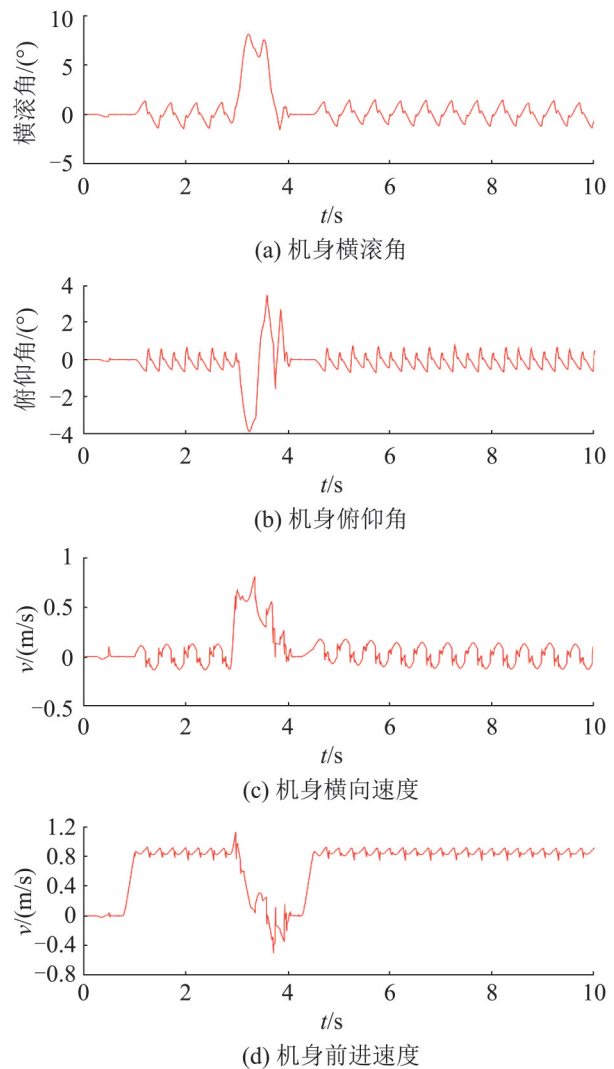


图10 侧向冲击下仿真实验曲线
Fig. 10 Simulation experiment curve under lateral impact

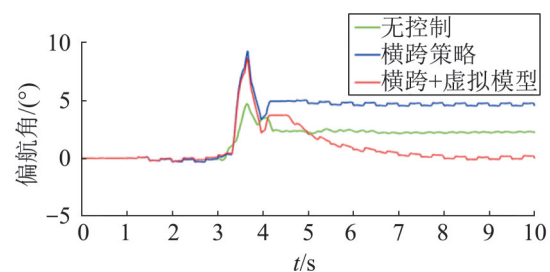


图11 机身偏航角变化曲线
Fig. 11 Fuselage yaw angle change curve

为了更直观地体现不同控制策略下机器人受到侧向冲击后的运动状态, 将机身质心在水平方向上的投影轨迹取出, 如图12所示。其中虚线为冲击出现的位置, 从图中可以看到, 无控制下的

四足机器人在受到侧向冲击后, 质心横向移动一段距离后不再移动, 说明此时机器人已经侧翻, 机器人无法正常行走。仅采用横跨策略的四足机器人在受到侧向冲击后, 质心横向移动了一段距离, 随后继续移动, 根据质心轨迹可以看出, 此时机器人的前进方向已经与原方向不同, 机器人将偏离原方向继续运动。采用横跨及虚拟模型控制策略的机器人在受到侧向冲击后, 质心横向移动了一段距离, 随后由于机器人对偏航角做了调整, 其质心的前进方向与原方向一致。

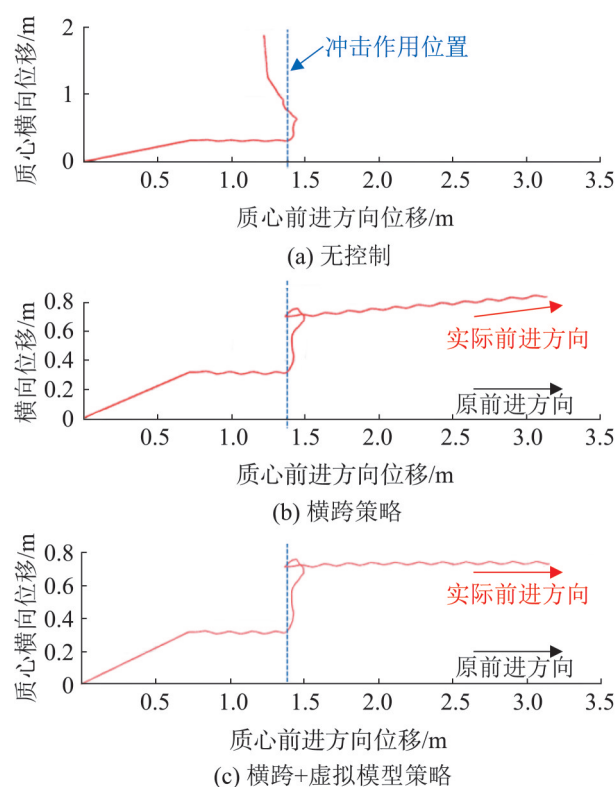


图12 质心在水平面中的轨迹

Fig. 12 Trajectory of center of mass in horizontal plane

综合对机身偏航角以及质心轨迹的观察, 机器人在受到侧向冲击时, 机器人通过对步态的切换以及对偏航角的控制, 可以完全抵消冲击带来的影响。

6 结论

本文介绍了一种基于阻抗控制和虚拟模型控

制的四足机器人控制方法。阻抗控制用于四足机器人腿部摆动相控制, 可以实现摆动较为精准的轨迹跟踪以及腿部的柔顺控制。虚拟模型用于四足机器人腿部支撑相控制, 可以实现对机器人机身姿态的控制。通过 Matlab/ADAMS 联合仿真实验, 验证了该控制方法的有效性。在此基础上, 结合横向跨步策略以及基于虚拟模型的偏航角控制策略, 提出机器人抗侧向冲击控制方法。联合仿真实验表明, 该方法可有效提高四足机器人抵御侧向冲击的能力。本研究对于提升四足机器人的动态稳定性具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Saradagi A, Muralidharan V, Krishnan V, et al. Formation Control and Trajectory Tracking of Nonholonomic Mobile Robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2018, 26(6): 2250-2258.
- [2] Neuhaus P D, Pratt J E, Johnson N M J. Comprehensive Summary of the Institute for Human and Machine Cognition's Experience with LittleDog[J]. The International Journal of Robotics Research(S0278-3649), 2011, 30(2): 216-235.
- [3] Hobbs Sarah Jane, Clayton Hilary M. Collisional Mechanics of the Diagonal Gaits of Horses Over a Range of Speeds [J]. PeerJ(S2167-8359), 2019, 7(7): 76-89.
- [4] Vukobratovic M, Borovac B, Potkonjak V. ZMP: are View of Some Basic Misunderstandings[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2006, 3(2): 153-175.
- [5] Kurazume R, Kan Y, Hirose S. Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for Quadruped Walking Vehicle[J]. Autonomous Robots, 2002, 12(2): 157-172.
- [6] Hutter M, Gehring C, Jud D, et al. ANYmal-A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Daejeon, Korea: IEEE, 2016: 38-44.
- [7] Neunert M, Farshidian F, Winkler A W, et al. Trajectory Optimization Through Contacts and Automatic Gait Discovery for Quadrupeds[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(3): 1502-1509.
- [8] Z Xiuli, Z Haojun, G Xu, et al. A Biological Inspired Quadruped Robot: Structure and Control[C]// International Conference on Robotics and Biomimetics. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 387-392.
- [9] 胡楠, 李少远, 黄丹, 等. 高负载四足机器人的步态规划

- 与控制[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 529-533.
- Hu Nan, Li Shaoyuan, Huang Dan, et al. Gait Planning and Control of Quadruped Robot with High Payload[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 529-533.
- [10] 丁庆鹏. 基于阻抗控制的四足仿生机器人稳定步态理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Ding Qingpeng. Theory And Experimental Research on Stable Gait of Quadruped Robot Based on Impedance Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [11] 张国腾, 荣学文, 李贻斌, 等. 基于虚拟模型的四足机器人对角小跑步态控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(1): 64-74.
- Zhang Guoteng, Rong Xuewen, Li Yibin, et al. Control of the Quadrupedal Trotting Based on Virtual Model[J]. Robot, 2016, 38(1): 64-74.
- [12] 谢惠祥. 四足机器人对角小跑步态虚拟模型直觉控制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- Xie Huixiang. Intuitive Control Based on Virtual Model for Quadruped Robot Trot Gait[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [13] 刘永, 周川, 郭健, 等. 四足机器人单步急停稳定控制策略[J]. 南京理工大学学报, 2020(3): 259-265.
- Liu Yong, Zhou Chuan, Guo Jian, et al. Stability Control Strategy of a Quadruped Robot During One-step Sudden Stop[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020(3): 259-265.
- [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.
- Han Jiahong. Control Strategy of Quadruped Robot Running Based on Flying Trot Gait[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 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.
- Yang Kun. Energy Consumption Analysis, Optimization and Power System Research for a Hydraulic Quadruped Robot[D]. Jinan: Shandong University, 2019.