

基于虚拟模型的四足机器人控制策略

许安定, 魏炳胜

上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093

摘要:为提高四足机器人在对角小跑(Trot)步态下的行走稳定性,并减小控制策略的复杂程度,提出了一种基于虚拟模型的四足机器人控制策略;将四足机器人控制策略分为支撑相及机身运动控制、摆动腿相运动控制及足端轨迹规划三部分;在Trot步态下行走时支撑相中存在的前后对角支撑足,在分析四足机器人支撑足受力情况后,并添加相关的约束条件,实现了四足机器人足端力及力矩可控;并通过在四足机器人机身的质心位置添加相应的虚拟弹簧阻尼组件,实现了四足机器人姿态和高度控制;通过在摆动腿足端实际位置与环境之间添加虚拟的弹簧阻尼组件并结合足端轨迹规划实现了四足机器人柔顺行走以及足端轨迹跟踪精确性;通过Matlab和CoppeliaSim建立联合对比仿真验证了控制策略的有效性和优越性。

关键词:四足机器人;虚拟模型控制;主动柔顺控制;对角小跑步态

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0002.005

Control Strategy of Quadruped Robot Based on Virtual Model

XU Anding, WEI Bingsheng

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

Abstract: In order to improve the stability of the quadruped robot in Trot gait and reduce the complexity of control strategy, a control strategy of quadruped robot based on virtual model was proposed. The control strategy of quadruped robot is divided into three parts: support phase and body locomotion control, swing leg phase locomotion control and foot trajectory planning. The forward and backward diagonal supporting feet existed in the supporting phase of Trot gait. After analyzing the stress situation of the supporting feet of the quadruped robot, related constraints were added to achieve the controllable force and torque of the quadruped foot. The attitude and height control of the quadruped robot were realized by adding corresponding virtual spring damping components in the centroid position of the robot body. By adding a virtual spring damping component between the actual position of the swinging leg and the environment and combining with the foot trajectory planning, the flexible walking and foot trajectory tracking accuracy of the quadruped robot were realized. The effectiveness and superiority of the control strategy are verified by establishing a joint comparison simulation through Matlab and CoppeliaSim.

Keywords: quadruped robot; Virtual Model Control; active compliant control; Trot gait

1 引言

因为足式机器人对复杂环境的适应性高且运动方式灵活而成为近些年的研究热点,但足式机器人控制十分复杂与困难。目前,已经研究了许多控制方法来

处理足式机器人的步态和动态平衡问题^[1-2]。针对四足步态的研究中发现,对角(Trot)步态作为一种中低速步态^[3],不仅可以使四足机器人的运动速度在大范围变化,而且还具有较高的能量效率和运动控制可行性。

收稿日期:2022-03-10 修回日期:2022-04-12 文章编号:1672-058X(2023)02-0029-07

作者简介:许安定(1990—),男,安徽池州人,硕士研究生,从事足式机器人智能控制研究。

引用格式:许安定,魏炳胜.基于虚拟模型的四足机器人控制策略[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(2):29—35.

XU Anding, WEI Bingsheng. Control strategy of quadruped robot based on virtual model[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 29—35.

这些优点使得对角步态控制方法成为目前最热门的研究方法之一。而零力矩点(ZMP)一直是分析足式机器人稳定性的一种常见方法^[4-5],但如果机器人采用Trot步态行走时,两个双支撑三角形变成了一条直线,使ZMP判据难以应用。意大利理工学院(IIT)的HyQ研究团队通过使用逆动力学(ID)方法提出了一种反馈/前馈控制结构控制四足机器人^[6-7],成功实现调节四足机器人的高度、速度和身体姿态角;密歇根大学的研究人员提出了一种用于平面双足步行者的混合零动力学方法^[8],并用于证明PD控制的双足步行机器人的局部稳定性^[9-10]。类似地,虚拟约束(VC)方法与模型预测控制(MPC)和二次规划(QP)相结合,开发了一种用于稳定四足运动模式的分层非线性控制算法^[11]。Kalakrishnan等^[12]提出一种基于浮基逆动力学及阻抗控制对四机器人静步态进行控制,实现了四足机器人在复杂地形下的行走。但由于这类控制策略必须要得到精确的动力学方程,且计算过程非常复杂,控制效果很大程度上动力学方程的参数设置。Kitani等^[13]提出了一种基于中枢模式发生器(CPG)的方法,通过不对称放大CPG输出波形来抑制四足机器人转动时的滚动振荡,但是在实际的工程中,往往需要结合仿生学和优化算法来确定控制的参数,而且在复杂地形中,机器人会受到来自环境的较大扰动,因此很大程度上CPG算法将不再适用。此外,D. J. Hyun等^[14]在MIT Cheetah中使用分层控制器进行四足运动,然而机器人通常在每个关节处都有一个单独的执行器,这可能会导致不直观且难以控制的问题,所以以上控制策略实现的稳定性相对较弱。

基于此,提出了一种简单有效虚拟模型控制策略来提高四足机器人Trot行走稳定性。这种控制策略不需要使用机器人动力学方程,只需通过雅可比矩阵来计算出各关节的控制扭矩,也不需要分层控制器,机器人行走速度、姿态以及足端轨迹可以直接通过关节扭矩控制来实现,从而实现四足机器人在Trot下行走的柔顺性。

2 模型设计

四足机器人模型结构如图1所示。其主要由机身和4条全肘式的腿组成,每条单腿具有3个主动驱动关节,分别为侧摆关节、髋关节和膝关节。

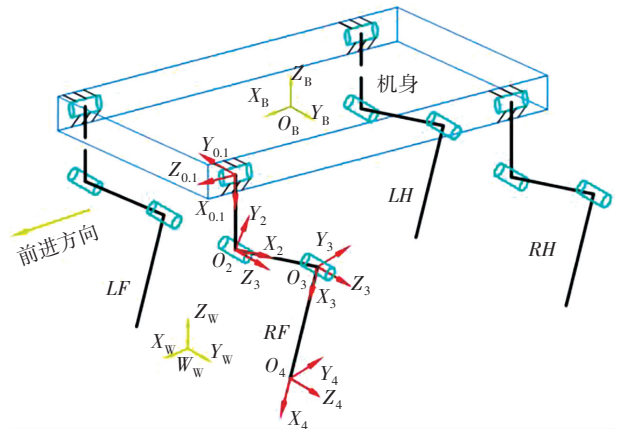


图1 四足机器人模型

Fig. 1 Structure of quadruped robot

因为各腿结构参数相同,则仅需对右前腿进行运动学分析和建立D-H坐标。在机器人的质心上建立身体坐标系 $\{O_B\}$,其中, $\{W\}$ 为世界坐标系; $\{O_{0.1}\}$ 为基坐标系和侧摆关节坐标系; $\{O_2\}$ 、 $\{O_3\}$ 和 $\{O_4\}$ 分别为髋关节坐标系、膝关节坐标系和为足端坐标系。

机身长度为 $2l$,宽度为 $2w$,侧摆、大腿以及小腿的长度分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 ,则可以得到 $\{O_4\}$ 到 $\{O_B\}$ 的运动学映射关系为

$${}^{O_B}P = \begin{cases} -L_1c_1 + L_2s_1c_2 + L_3s_1c_{23} + \lambda l \\ -L_1c_1 + L_2s_1c_2 + L_3s_1c_{23} + \delta w \\ -L_1s_1 - L_2c_1c_2 - L_3c_1c_{23} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $s_1 = \sin(\theta_1)$ 、 $c_1 = \cos(\theta_1)$ 、 $s_2 = \sin(\theta_2)$ 、 $c_2 = \cos(\theta_2)$ 、 $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ 、 $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ 。

其中 δ 和 λ 定义如下:

$$\delta = \begin{cases} 1, & LF \text{ 或 } RF \\ -1, & LB \text{ 或 } RH \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} 1, & LF \text{ 或 } RH \\ -1, & RF \text{ 或 } LH \end{cases} \quad (2)$$

则相应的雅克比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} L_3c_1c_{23} & -c_1(L_3s_{23} + L_2s_2) & -L_3s_1c_{23} + L_1c_1 - L_2s_1c_2 \\ L_3s_1s_{23} & -s_1(L_3s_{23} + L_2s_2) & L_1s_1 + L_3c_1s_2 + L_2c_1c_2 \\ -L_3c_{23} & L_3c_{23} + L_2c_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

四足机器人在Trot步态下行走时,前后对角支撑相的足端受到大地对其的合力为 F_r ,则其与关节输出力矩的关系:

$$\tau_r = -J^T f_r \quad (4)$$

式(4)中, τ_r 为因足端受地面的作用力使腿部所需关节力矩, $\tau_r = [\tau_{r1} \ \tau_{r2} \ \tau_{r3}]$ 分别侧摆关节、髋关节、膝关节因 f_r 所需的力矩。

在满足腿部工作空间范围内,该雅克比矩阵的秩

为满秩,故足端受到大地的3个方向分力均可控。

3 模型控制与策略分析

3.1 支撑相虚拟模型控制

主要考虑 Trot 步态下四足机器人的控制,理论上机器人在任意时刻都有两条腿处于支撑状态。图2所示为机器人双足支撑相模型示意图,下标 F 、 H 分别表示前腿和后腿。

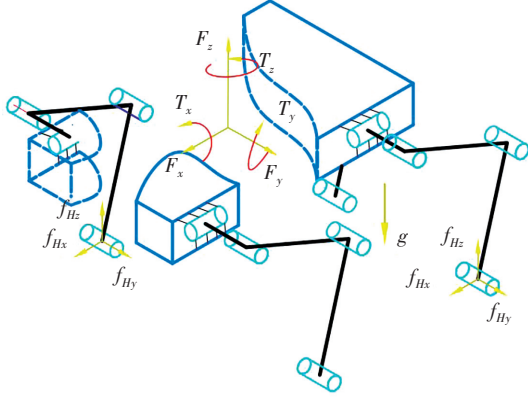


图2 四足机器人受力图

Fig. 2 Force diagram of the quadruped robot

假设四足机器人的机身的转动是缓慢的且腿的质量相对于四足机器人的总质量可以忽略不计,则质心集中于几何中心。当四足机器人行走时,可将四足机器人视为一个整体进行静力学分析,则可设其前后对角支撑足分别受到大地的支撑反力为 f_F 和 f_H ,四足机器人机身因受到竖直向下重力 G 影响,将其分别沿 ${}^{0_B}x$ 、 ${}^{0_B}y$ 和 ${}^{0_B}z$ 进行分解,则作用在四足机器人机身的虚拟力及力矩大小为

$$\begin{cases} F_x = f_{F,x} + f_{H,x} + G_x \\ F_y = f_{F,y} + f_{H,y} + G_y \\ F_z = f_{F,z} + f_{H,z} + G_z \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_x = f_{F,z}y_F + f_{H,z}y_H - f_{F,y}z_F - f_{H,y}z_H \\ T_y = -f_{F,z}x_F - f_{H,z}x_H + f_{F,x}z_F + f_{H,x}z_H \\ T_z = -f_{F,x}y_F - f_{H,x}y_H + f_{F,y}x_F + f_{H,y}x_H \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $\{x_F, y_F, z_F\}$ 和 $\{x_H, y_H, z_H\}$ 分别表示在 $\{O_B\}$ 坐标系下的前后对角支撑足的足端坐标。

在四足机器人行走时,一般希望四足机器人的机身横滚角 φ 为0,因此在 ${}^{0_B}y$ 方向上重力分量趋近于0。 G_x 、 G_y 和 G_z 的大小可以近似为

$$\begin{cases} G_x = mg \sin \theta \\ G_y = 0 \\ G_z = -mg \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, θ 为四足机器人机身的俯仰角, g 为重力加速度。

由式(5)、式(6)、式(7),可得:

$$\begin{bmatrix} F_x - mg \sin \theta \\ F_y \\ F_z + mg \cos \theta \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -z_F & y_F & 0 & -z_H & y_H \\ z_F & 0 & -x_F & z_H & 0 & -x_H \\ -y_F & x_F & 0 & -y_H & x_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{F,x} \\ f_{F,y} \\ f_{F,z} \\ f_{H,x} \\ f_{H,y} \\ f_{H,z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于式(8)中的 6×6 矩阵的秩为5,则添加一个约束,令 $f_{Fy} = f_{Hy}$,联立以上各式,可得:

$$\begin{bmatrix} F_x - mg \sin \theta \\ F_z + mg \cos \theta \\ T_x \\ T_y \\ T_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -z_F & y_F & 0 & -z_H & y_H \\ z_F & 0 & -x_F & z_H & 0 & -x_H \\ -y_F & x_F & 0 & -y_H & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{F,x} \\ f_{F,y} \\ f_{F,z} \\ f_{H,x} \\ f_{H,y} \\ f_{H,z} \end{bmatrix} \quad (9)$$

记式(9)中的 6×6 矩阵为 Q ,则各支撑相受到的支持力的大小为

$$\begin{bmatrix} f_{F,x} \\ f_{F,y} \\ f_{F,z} \\ f_{H,x} \\ f_{H,y} \\ f_{H,z} \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} F_x - mg \sin \theta \\ F_z + mg \cos \theta \\ T_x \\ T_y \\ T_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于力的是相互的,则对角支撑相足端的输出力与大地对其的支撑力为一对作用力与反作用力,则由式(3)可知对角支撑相的雅克比矩阵分别为 J_F 和 J_H ,则各关节输出扭矩为

$$\begin{bmatrix} \tau_{F,1} \\ \tau_{F,2} \\ \tau_{F,3} \\ \tau_{H,1} \\ \tau_{H,2} \\ \tau_{H,3} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_F^T & 0 \\ 0 & J_H^T \end{bmatrix} Q^{-1} \begin{bmatrix} F_x - mg \sin \theta \\ F_z + mg \cos \theta \\ T_x \\ T_y \\ T_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

为使四足机器人在 Trot 步态下能够稳定行走,则需要控制四足机器人机身的姿态角和站立高度,并同时控制四足机器人前进速度和偏航角的角速度。一般希望四足机器人机身始终与大地平行。为此,引入如图3所示的“伪俯仰角”概念^[15]。在 ${}^{0_B}x$ - ${}^{0_B}z$ 平面上,前后对角支撑相足端的连线与四足机器人机身之间的夹角记为伪俯仰角 ψ ,则其俯仰角 ψ 为

$$\psi = \arctan\left(\frac{z_F - z_H}{x_F - x_H}\right) \quad (12)$$

当俯仰角 $\psi=0$ 时,则四足机器人机身平行于前后对角支撑相足端的连线,即四足机器人机身平行于大地。

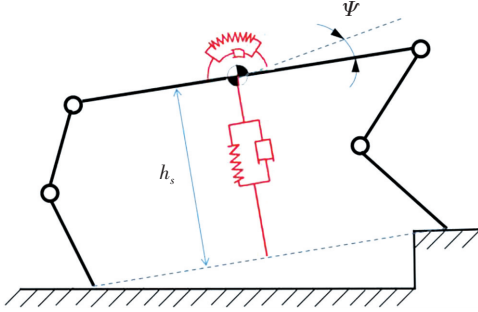


图 3 机身俯仰角与高度控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the pitch angle and height control of robot body

定义四足机器人机身高度 h_s 为四足机器人机身的质心与前后对角支撑相足端的连线之间沿 0B_z 方向的垂直距离,则:

$$h_s = -\frac{z_F + z_H}{2} \quad (13)$$

通过在机身质心处安装“弹簧-阻尼”虚拟组件,则控制四足机器人机身姿态角和高度的虚拟力和力矩为

$$\begin{cases} T_x = k_x^{st} \varphi + d_x^{st} \dot{\varphi} \\ T_y = k_y^{st} \psi + d_y^{st} \dot{\psi} \\ F_z = k_z^{st} (h_s - h_d) + d_z^{st} \dot{h}_s \end{cases} \quad (14)$$

在前进及偏航方向上,通过四足机器人行走速度 v_x 和偏航角角速度 ω_z 与期望值的误差产生相应的虚拟力和力矩进行控制,即:

$$\begin{cases} F_x = k_{v_x}^{st} (v_x - v_d) \\ T_z = k_{\omega_z}^{st} (\omega_z - \omega_{zd}) \end{cases} \quad (15)$$

3.2 摆动相虚拟模型控制

如图 4 所示,为了实现对摆动腿的控制采用在摆动足与环境之间增加虚拟“弹簧-阻尼”组件来控制摆动相运动。该虚拟组件会保证前后对角的摆动相足端沿着期望轨迹运动,则前后对角摆动相产生虚拟力和力矩为

$$\begin{cases} f_{F,x} = k_{F_x}^{sw} (x_F - x_{Fd}) + d_{F_x}^{sw} (\dot{x}_F - \dot{x}_{Fd}) \\ f_{F,y} = k_{F_y}^{sw} (y_F - y_{Fd}) + d_{F_y}^{sw} (\dot{y}_F - \dot{y}_{Fd}) \\ f_{F,z} = k_{F_z}^{sw} (z_F - z_{Fd}) + d_{F_z}^{sw} (\dot{z}_F - \dot{z}_{Fd}) \\ f_{H,x} = k_{H_x}^{sw} (x_H - x_{Hd}) + d_{H_x}^{sw} (\dot{x}_H - \dot{x}_{Hd}) \\ f_{H,y} = k_{H_y}^{sw} (y_H - y_{Hd}) + d_{H_y}^{sw} (\dot{y}_H - \dot{y}_{Hd}) \\ f_{H,z} = k_{H_z}^{sw} (z_H - z_{Hd}) + d_{H_z}^{sw} (\dot{z}_H - \dot{z}_{Hd}) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中 $f_{F,x}, f_{F,y}, f_{F,z}, f_{H,x}, f_{H,y}, f_{H,z}$ 分别为前后对角摆

动腿的足端在坐标系 $\{O_B\}$ 下沿着 x 方向、 y 方向和 z 方向所受虚拟力。

$x_F, y_F, z_F, x_{Fd}, y_{Fd}, z_{Fd}$ 分别为相应方向的实际位置和期望位置。

$\dot{x}_F, \dot{y}_F, \dot{z}_F, \dot{x}_{Fd}, \dot{y}_{Fd}, \dot{z}_{Fd}$ 分别为相应方向的实际速度和期望速度。

k 和 d 分别为虚拟组件的增益系数,其中上标 sw 表示摆动相。

由式(3)可知对角摆动相的各关节扭矩为

$$\begin{bmatrix} \tau_{F,1} \\ \tau_{F,2} \\ \tau_{F,3} \\ \tau_{H,1} \\ \tau_{H,2} \\ \tau_{H,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_F^T & 0 \\ 0 & J_H^T \end{bmatrix} Q^{-1} \begin{bmatrix} f_{F,x} \\ f_{F,y} \\ f_{F,z} \\ f_{H,x} \\ f_{H,y} \\ f_{H,z} \end{bmatrix} \quad (17)$$

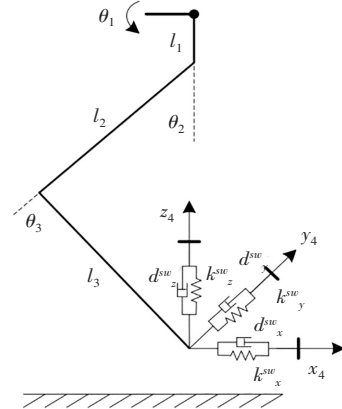


图 4 摆动相虚拟模型控制

Fig. 4 Swing phase virtual model control

3.3 足端轨迹规划

四足机器人仅通过足端与大地的接触实现与环境的交互,故其足端轨迹决定了四足机器人的运动状态。为实现机器人的稳定行走,需要从机身稳定性、步态切换协调性以及步态平稳性上对足端轨迹提出 3 点要求:

(1) 足端轨迹在 3 个运动方向上的位移、速度和加速度不应有突变;

(2) 单腿在摆动相和支撑相之间切换时应考虑动作的连贯性;

(3) 机器人行走时保持速度的稳定。

为满足以上条件,摆动相足端轨迹的竖直方向和前进方向上均采用五次多项式进行规划,由于支撑项保持机器人速度稳定,则支撑相足端轨迹采用一次多项式进行规划:

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (18)$$

通过对足端轨迹的 3 点要求可以确定相应的边界条件。根据要求(1)(2),可以确定方程求解的边界条件为

z 方向上,摆动相轨迹的开始和结束时的位置满足设定的步高要求,速度和加速度都应该为零; x 方向上,摆动相轨迹开始和结束时的位置应满足设计的步长要求,速度应等于支撑相轨迹的速度,而加速度应该为零。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ v_i \\ v_j \\ a_i \\ a_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 & t_i^4 & t_i^5 \\ 1 & t_j & t_j^2 & t_j^3 & t_j^4 & t_j^5 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 & 4t_i^3 & 5t_i^4 \\ 0 & 1 & 2t_j & 3t_j^2 & 4t_j^3 & 5t_j^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_i & 12t_i^2 & 20t_i^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_j & 12t_j^2 & 20t_j^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中, P_i 为轨迹的起始坐标, P_j 为轨迹的终止位置; v_i 为轨迹的起始速度, v_j 为轨迹的终止速度; a_i 为轨迹的起始加速度, a_j 为轨迹的终止加速度; t_i 为轨迹的时间和 t_j 为轨迹的终止时间。

分别通过边界条件解出 x 方向和 z 方向上的轨迹方程,即可得到轨迹多项式。根据前文提到的足端轨迹应满足的 3 个要求,则在 z 方向上边界条件为

$$I_z = [P_{zi} \ P_{zj} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

足端得到轨迹方程为

$$p_z = \begin{cases} p_{zi} + \frac{10h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^3}t^3 - \frac{15h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^4}t^4 + \frac{6h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^5}t^5 & 0 \leq t \leq \frac{1}{4}T_0 \\ p_{zi} + \frac{10h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^3}(T_0-t)^3 - \frac{15h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^4}(T_0-t)^4 + \frac{6h}{\left(\frac{1}{4}T_0\right)^5}(T_0-t)^5 & \frac{1}{4}T_0 < t \leq \frac{1}{2}T_0 \\ p_{zi} & \frac{1}{2}T_0 < t \leq T_0 \end{cases} \quad (20)$$

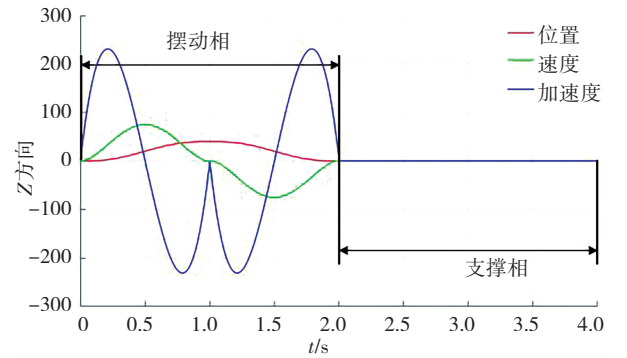
式(20)中, $h=p_{zj}-p_{zi}$ 为机器人步高; T_0 为一个步态周期的时长。

$$p_x = \begin{cases} p_{xi} - v_0 + \frac{10(s+T_0v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^3}t^3 - \frac{15(s+T_0v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^4}t^4 + \frac{6(s+T_0v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^5}t^5 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2}T_0 \\ p_{xj} - v_0 \left(t - \frac{1}{2}T_0\right) & \frac{1}{2}T_0 < t \leq T_0 \end{cases} \quad (21)$$

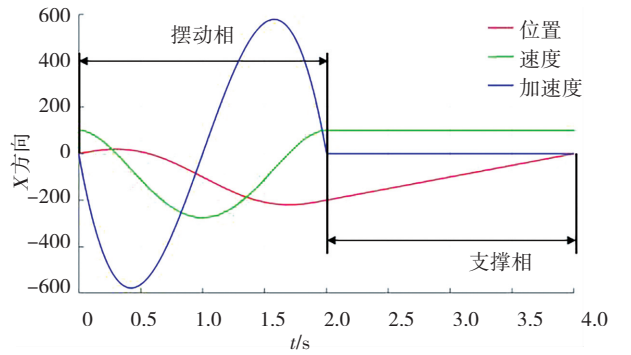
式(21)中, v_0 为四足机器人机身的速度; $s=p_{xj}-p_{xi}$ 为四足机器人行走步长。

现定轨迹步高 $h=40$ mm,步长 $s=200$ mm,周期 $T_0=4$ s 的情况下,根据给定的步高、步长以及周期可以得到在 x 方向和 z 方向上的足端位置、速度以及加速度曲线,如图 5 所示。将两个方向足端轨迹综合可得到一个周期内完整的足端轨迹,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,利用 5 次多项式规划的轨迹,在 Z 方向上轨迹起始点和结束点的速度加速度均为 0 的要求,在 X 方向上,摆动相轨迹的起始点和结束点加速度均为 0,且速度都与支撑相同,保证了运动的连续性。



(a) z 方向



(b) x 方向

图 5 x 、 z 方向上的足端位置、速度以及加速度曲线

Fig. 5 Foot position, velocity, and acceleration curves in X and Z directions

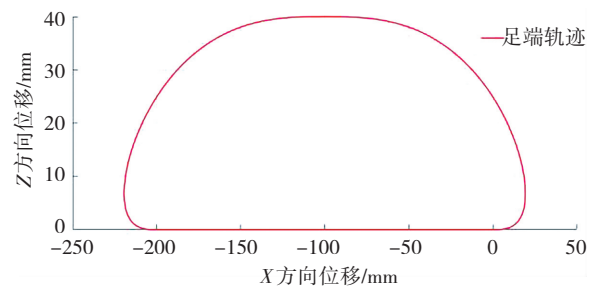


图 6 采用 5 次多项式规划的足端轨迹

Fig. 6 Foot trajectory programmed by quintic polynomial

3.4 对角步态行走控制策略

四足机器人对角小跑步控制策略,如图 7 所示。当其以 Trot 步态行走时,则步态占空比为 $\beta=0.5$,理论上四足机器人的支撑相和摆动相的运动时间相等。但是在实际行走过程中,然而一旦四足机器人机身发生倾斜或地面不平相时,两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。因此在 Trot 步态控制器中需要引入基于摆动腿触地状态位切换机制,通过足端力传感器判断足端触底情况。当一条摆动腿触地后保持当前位置不变,在另一摆动腿触地之前,四足机器人的腿部会短暂地处于三足支撑状态,当另一条摆动相足端触底后,则进行各腿的相位切换。

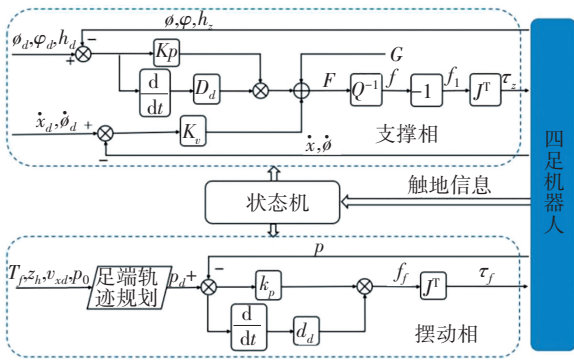


图 7 对角小跑步控制器框图

Fig. 7 Block diagram of the Trot controller

4 实验与仿真分析

为了验证控制策略有效性和优越性,以图 1 所示的四足机器人结构作为控制对象,同时以 PD 控制与方法进行对比,采用 Matlab 和 CoppeliaSim 建立联合仿真模型。仿真时间为 16 s。图 8 所示为四足机器人在虚拟模型控制下以 Trot 步态行走的仿真图像,从图 8 中可以初步看出,四足机器人在整个行走过程中可以保持稳定,且无偏航现象。

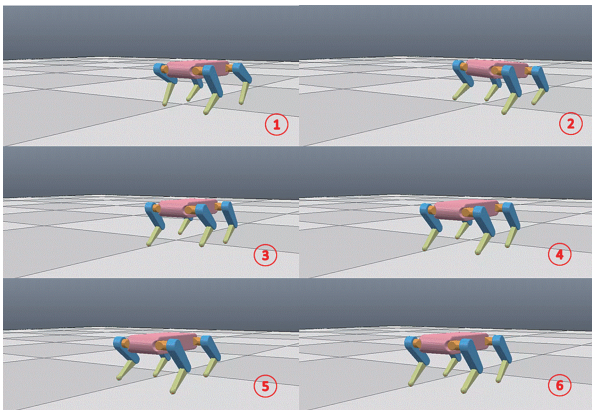
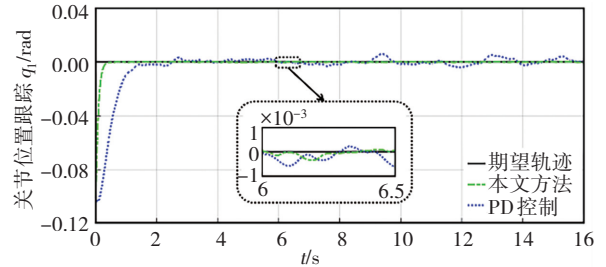


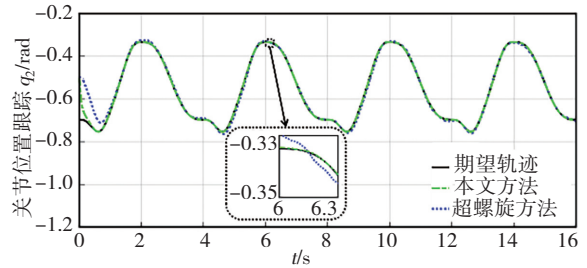
图 8 对角步态行走仿真图像

Fig. 8 Simulation images of the robot in Trot gait

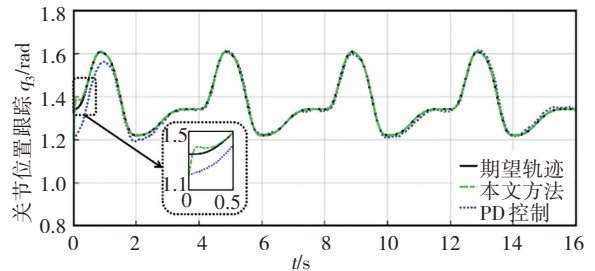
图 9 为四足机器人在 Trot 步态行走时一条腿的各关节位置跟踪控制效果曲线图。在本文策略下,各关节位置跟踪期望的关节轨迹只需 0.5 s 左右即可,且各关节稳态误差均在 10^{-3} rad 以内。对比之下,PD 控制需要 1~2 s 才能跟踪上期望轨迹,且出现了明显的波动。



(a) 侧摆关节



(b) 髋关节

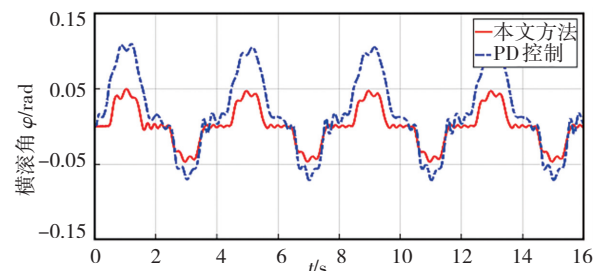


(c) 膝关节

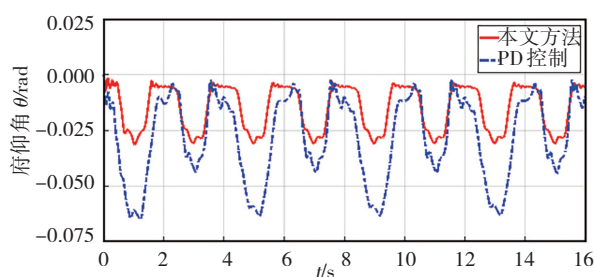
图 9 关节位置跟踪曲线

Fig. 9 Tracking curves of joint positions

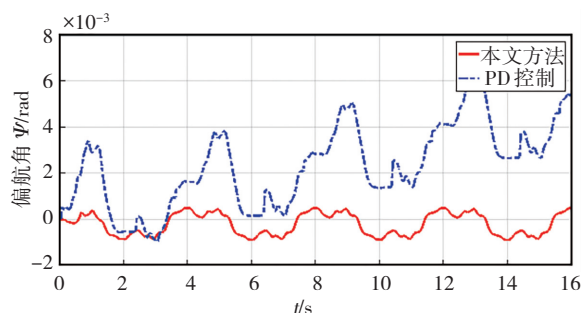
图 10 为两种控制方法下四足机器人以 Trot 步态行走机身姿态曲线。经过对不同控制方法下机身横滚角、俯仰角以及偏航角的分析,方法控制的四足机器人机身姿态角波动明显小于 PD 控制下的机身姿态角波动。在整个行走过程中,前者控制下机身更为平稳,而后者控制出现了明显的偏航现象。



(a) 横滚角曲线



(b) 俯仰角曲线



(c) 偏航角曲线

图10 Trot步态下行走姿态角曲线

Fig.10 Curves of walking posture of quadruped robot in Trot gait

5 结论

介绍了一种在Trot步态下基于虚拟模型控制的四足机器人控制策略。将虚拟模型用于四足机器人摆动相控制,可以实现相较于精准的轨迹跟踪,虚拟模型用于四足机器人撑相控制则可以实现对机器人机身姿态及高度的控制。通过Matlab/CoppeliaSim联合对比仿真实验,验证了虚拟模型控制策略的有效性和优越性。

参考文献(References):

- [1] CHIGNOLI M, WENSING P M. Variational-based optimal control of underactuated balancing for dynamic quadrupeds[J]. IEEE Access, 2020, 99(8): 49785—49797.
- [2] LI Z, LI Y B, RONG X W, et al. Grid map construction and terrain prediction for quadruped robot based on C-terrain path[J]. IEEE Access, 2020(8): 56572—56580.
- [3] HOBBS S J, CLAYTON H M. Collisional mechanics of the diagonal gaits of horses over a range of speeds[J]. PeerJ, 2019, 7(7): 76—89.
- [4] CHEN G R, WANG J Z, WANG L P. Gait planning and compliance control of a biped robot on stairs with desired ZMP[J]. IFAC Proc, 2014, 47(3): 2165—2170.
- [5] DE VIRAGH Y, BJELONIC M, BELLICOSO C D, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized ZMP constraints [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2019, 4(2): 1633—1640.
- [6] SEMINI C. Hyq-design and development of a hydraulically actuated quadruped robot [D]. Genoa: Istituto Italiano di Tecnologia, 2010.
- [7] FOCCHI M, DEL PRETE A, HAVOUTIS I, et al. High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots[J]. Autonomous Robots, 2016, 4(11): 259—272.
- [8] WESTERVELT E R, GRIZZLE J W, KODITSCHKE D E. Hybrid zero dynamics of planar biped walkers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(1): 42—56.
- [9] KOLATHAYA S. Local stability of PD controlled bipedal walking robots [J]. Automatica, 2020, 114 (C): 108841—108847.
- [10] REHER J P, HEREID A, KOLATHAYA S, et al. Algorithmic foundations of realizing multi-contact locomotion on the humanoid robot DURUS[M]//Algorithmic Foundations of Robotics XII. Springer, Cham, 2020: 400—415.
- [11] KAVEH A H, JEESEOP K, ABHISHEK P. Quadrupedal locomotion via event-based predictive control and qp-based virtual constraints[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3).
- [12] KALAKRISHNAN M, BUCHLI J, PASTOR P, et al. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain [J]. International Journal of Robotic Research, 2011, 30(2): 236—258.
- [13] KITANI M, ASAMI R, SATO N, et al. Suppression of roll oscillation in turning of quadruped robot by asymmetric amplification of central pattern generator output waveform[J]. Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics, 2019(24): 679—682.
- [14] HYUN D J, SEOK S, LEE J, et al. [J]. International Journal of Robotics Research, 2014, 33(11): 1417—1445.
- [15] 张国腾. 四足机器人主动柔顺及对角小跑步态运动控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

ZHANG Guo-teng. Research on active compliance and trotting gait control of a quadruped robot [D]. Jinan: Shangdong Univesity, 2016.