

基于 Trot 步态的四足机器人行走姿态控制策略

李龙坤, 方鸿磊

上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093

摘要:目的 文章针对 Trot 步态下的四足机器人构型与运动学、步态与足端轨迹规划、姿态控制等问题展开研究。方法 首先,根据足式机器人腿部构型特点,选定具有前肘后膝式的四足机器人,其腿部结构为关节式腿足构型;其次,采用 $D-H$ 坐标法建立四足机器人运动学,并利用各关节的几何关系采用几何图解法实现从 Joint Space 到 Task Space 之间的推导,对足端轨迹的需求进行了分析,采用五次多项式对足端轨迹进行规划;然后,设计了姿态控制策略,通过在 4 条腿足端与机身之间添加相对位置控制,并使用 PI 控制器对机身姿态传感器输出的姿态数据修正,与轨迹规划结果结合,通过逆运动学解算,调整 4 条腿足端与机身之间相对位置以达到控制机身姿态的目的,将其应用在四足机器人的 Trot 步态行走中。结果 为了证明其有效性,采用 MATLAB 的 Simulink 进行姿态控制与开环控制的仿真对比,结果显示四足机器人姿态控制策略下行走时的 R 、 P 、 Y 角明显小于开环控制下的 R 、 P 、 Y 角。结论 结果表明该姿态控制策略应用在 Trot 步态中具有可行性,并且大幅提高四足机器人的行走稳定性。

关键词:四足机器人;Trot 步态;姿态控制;仿真分析

中图分类号:TP273;TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0002.008

Walking Attitude Control Strategy for Quadruped Robot Based on Trot Gait

LI Longkun, FANG Honglei

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

Abstract: Objective This paper investigated the configuration and kinematics, gait and foot trajectory planning, and attitude control of a quadrupedal robot in Trot gait. **Methods** First, according to the leg configuration characteristics of the foot robot, the quadruped robot with front elbows and back knees was selected, and its leg structure was the jointed leg and foot configuration. Secondly, the kinematics of the quadruped robot was established by the $D-H$ coordinate method, and the derivation from Joint Space to Task Space was realized by using the geometric relationship of each joint and the geometric graphical method. The requirements of the foot trajectory were analyzed, and a fifth-degree polynomial was used to plan the foot trajectory. The attitude control strategy was designed: relative position controls were added between the ends of the four legs and the body; the PI controller was used to correct the attitude data output from the body attitude sensor; the output attitude data were combined with the results of trajectory planning; through the inverse kinematics solution, the relative positions between the foot ends of the four legs and the body were adjusted to control the body attitude. This attitude control strategy was applied to the Trot gait walking of the quadruped robot. **Results** To prove its effectiveness, Simulink of MATLAB was used to simulate and compare the attitude control with the open-loop control, and the results showed that R , P , and Y angles of the quadruped robot walking under the attitude control strategy were significantly smaller than those under the open-loop control. **Conclusion** The results show that this attitude control strategy is feasible to be applied to the Trot gait, and the walking stability of the quadruped robot is greatly improved.

Keywords: quadruped robot; Trot gait; attitude control; simulation analysis

收稿日期:2023-09-05 修回日期:2023-11-18 文章编号:1672-058X(2025)02-0056-07

作者简介:李龙坤(1998—),男,河南周口人,硕士研究生,从事足式机器人智能控制研究。

通讯作者:方鸿磊(1999—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,从事足式机器人智能控制研究。Email:1402601521@qq.com.

引用格式:李龙坤,方鸿磊.基于 Trot 步态的四足机器人行走姿态控制策略[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):56-62.

LI Longkun, FANG Honglei. Walking attitude control strategy for quadruped robot based on trot gait[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(2): 56-62.

1 引言

四足机器人兴起于 20 世纪 60 年代,目前在结构设计、运动控制等方面已取得了众多的突破。而现代四足机器人不仅具备在复杂环境,如废墟、雪地、丛林中稳定行走的能力,而且还具备一定的智能化,如自主导航、躲避障碍等。对四足机器人而言,步态是其运动的基础,仿生四足机器人比较常见的步态形式是 Trot 步态,作为最稳定与常用的中低速运动步态^[1],具有较高的能量利用效率^[2-3]。

在已公开的四足机器人中,麻省理工学院开发的 Cheetah^[4]猎豹机器人、苏黎世联邦理工大学研制的 AnyMal^[5]狗型机器人在性能方面都是行业里的翘楚。为了改变这种现象,国内诸多专家学者对四足机器人步态轨迹规划进行了分析研究:陈佳等^[6]采用复合摆线和五次多项式对仿生四足机器人采用复合摆线和五次多项式进行了单腿轨迹规划研究;周枫林等^[7]对四足机器人规划了 3 种足端轨迹对比出五次多项式的优越性;陈辉等^[8]提出一种融合惯性测量单元和运动学约束的状态估计算法。但如何有效提高四足机器人的控制性能仍是国内研究热点。

本文针对 Trot 步态下的四足机器人运动学、步态与足端轨迹规划、姿态控制等问题进行研究。首先对四足机器人模型腿部构型优缺点进行分析,然后建立四足机器人的正逆运动学,并使用机器人工具箱快速有效地验证了准确性,对机器人步态和足端轨迹进行规划。

本文主要工作创新点在于设计了一种姿态控制策略,该控制策略简单有效,只需确定足端与机身的向量关系,通过调整各腿足端与机身坐标关系来实现稳定行走,并将其应用在四足机器人的 Trot 步态行走中。最后使用 MATLAB 软件的 Simulink 进行四足机器人 Trot 步态下行走姿态控制仿真,并对行走时的机身姿态进行分析,验证了所设计姿态控制策略的有效性。

2 四足机器人的结构与运动学分析

2.1 机身结构

四足机器人制作过程复杂,制造成本较高,但是通过三维软件进行结构设计建立虚拟模型,并使用 MATLAB 软件进行四足机器人的运动控制仿真,可以解决研发成本高和研发周期长等问题,大大加快了四足机器人的研发进度。图 1 为四足机器人三维模型,整体结构可以视为 4 条串联机器腿并联在机身上的结构。四足机器人的腿部构型将直接决定其运动学、动力学方程,进而影响到控制算法的复杂程度。因此,其腿足构型对机器人运动的稳定性及抗干扰能力非常重要。四足机器人的腿部结构采用前肘后膝式构型,该构型腿足位形空间对称,具有稳定性好,干涉的可能性小等优点。四足机器人结构尺寸如表 1 所示。

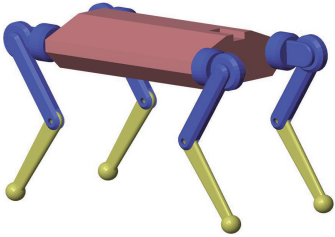


图 1 四足机器人三维模型图
Fig. 1 Three-dimensional model of a quadruped robot
表 1 机器人结构尺寸
Table 1 Structure dimensions of the robot

参数名称	参数符号	设定值/mm
机体长度	L	300
机体宽度	W	160
机体高度	H	280

2.2 正运动学分析

机器人正运动学用于在已知仿生机构各关节角度和连杆(腿长)长度的情况下确定机器人末端(足端)在空间中的具体位置。由于每条液压腿的结构与参数都相同,故本节只需对其中一条腿做运动学分析,其余腿的坐标系建立与之相同,如图 2 所示。其中, $\{O_w\}$ 与 $\{O_B\}$ 分别为大地与机身坐标系; $\{O_{0,1}\}$ 为腿部基坐标系与侧摆坐标系; $\{O_2\}$ $\{O_3\}$ $\{O_4\}$ 分别为髋关节、膝关节与足端坐标系。 $D-H$ 参数如表 2 所示。

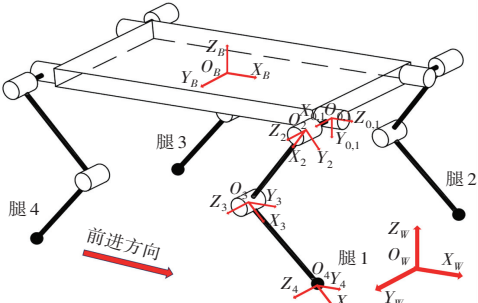


图 2 四足机器人单腿 D-H 坐标系
Fig. 2 D-H coordinate system of a single leg of the quadruped robot

表 2 D-H 参数

Table 2 D-H parameters				
i	连杆长度 α_{i-1}/mm	关节扭角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	关节距离 d_i/mm	关节角 $\theta_{i-1}/(^{\circ})$
1	0	0	0	θ_1
2	L_1	-90	0	θ_2
3	L_2	0	0	θ_3
4	L_3	0	0	0

将表 2 的 $D-H$ 参数代入 $D-H$ 变换矩阵中,可求腿部各连杆之间的变换关系:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(1)一式(4)可得腿部足端位姿与基坐标系的变换关系为

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} {}^0_4R & P \\ O & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{23}c_1 & -s_{23}c_1 & -s_1 & c_1(L_1+L_3c_{23}+L_2c_2) \\ c_{23}s_1 & -s_{23}s_1 & c_1 & s_1(L_1+L_3c_{23}+L_2c_2) \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 & -L_3s_{23}-L_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

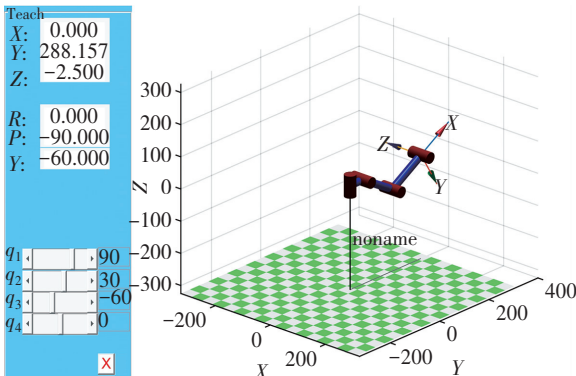
式(5)中, 0_4R 为描述足端在基坐标系下姿态的矩阵, P_x, P_y, P_z 描述足端在基坐标系下 3 个方向的位置, $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$, 则单腿运动学正解为

$$\begin{cases} P_x = c_1(L_1+L_3c_{23}+L_2c_2) \\ P_y = s_1(L_1+L_3c_{23}+L_2c_2) \\ P_z = -L_3s_{23}-L_2s_2 \end{cases} \quad (6)$$

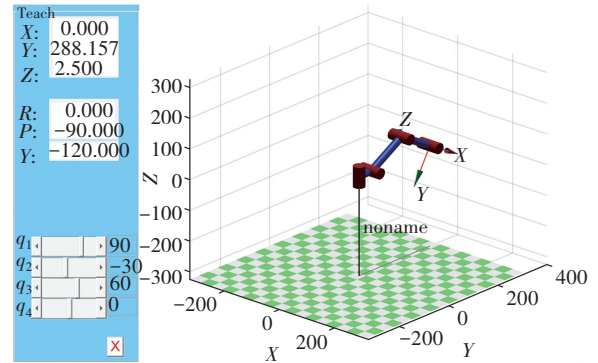
式(6)中, $s_i = \sin \theta_i, c_i = \cos \theta_i, s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

2.3 正运动学仿真验证

为了保证正运动学的正确性,使用 MATLAB 机器人工具箱进行验证,输入单腿参数在工具箱中生成四足机器人的单腿模型,输入不同组的各个关节角度,即可得到对应组末端位置在坐标系 0 (图 2 坐标系 O_0) 上的坐标。将侧摆关节、髋关节和膝关节角度分别设置为 $90^\circ, 30^\circ, -60^\circ$ 与 $90^\circ, -30^\circ, 60^\circ$ 两组。仿真结果如图 3 所示。



(a) 验证一



(b) 验证二

图 3 正运动学仿真验证

Fig. 3 Positive kinematics simulation verification

将两组关节角与几何参数代入正运动学中可得两种仿真状态的结果如下:

$${}^0_4T_{(90^\circ, 30^\circ, -60^\circ)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.866 & 0.5 & 0 & 288.156\ 99 \\ 0.5 & -0.866 & 0 & -2.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_4T_{(90^\circ, -30^\circ, 60^\circ)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.866 & -0.5 & 0 & 288.156\ 99 \\ -0.5 & -0.866 & 0 & 2.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由计算结果与机器人工具箱仿真结果一致,可知所推导的正运动学正确。

2.4 逆运动学分析

由于机器人单腿具有 3 个自由度,其结构较为简单,因此考虑采用几何图解法来求解逆运动学问题。以右前腿为例,已知足端在基坐标系中的位置 (P_x, P_y, P_z) 以及各关节连杆的长度分别为 L_1, L_2 及 L_3 ,反求出腿部各关节角度。根据图 4 中各关节的几何关系,可知足端位置在基坐标系的 x_0-y_0 平面内的投影为 (P_x, P_y) , 则

$$\theta_1 = \arctan \frac{P_y}{P_x}$$

图 4 中, A 点为基坐标系原点, D 点为足端坐标系原点, 则 AE 线段的长度为

$$L = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

BD 线段的长度为

$$M = \sqrt{(L-L_1)^2 + P_z^2}$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{L^2 + M^2 - L_3^2}{2L_2M} \right)$$

由此可得

$$\theta_3 = \theta_1 - \pi$$

$$\varphi_2 = \arctan \left(\frac{-P_z}{L-L_1} \right)$$

$$\theta_2 = \varphi_2 + \arccos \left(\frac{L^2 - M^2 - L_3^2}{2L_2M} \right)$$

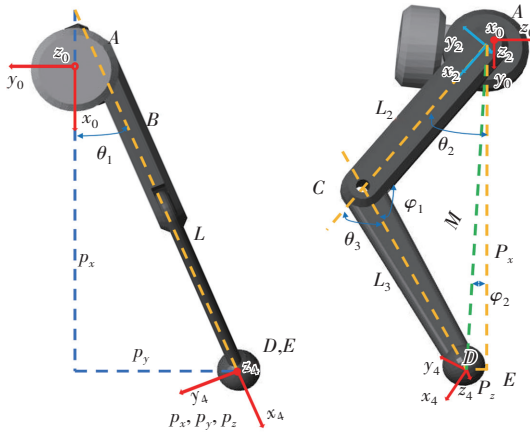


图4 四足机器人单腿几何关系

Fig. 4 Single-legged geometric relationship of the quadruped robot

2.5 逆运动学仿真验证

上述逆运动学内容使用 MATLAB 的机器人工具箱功能验证其正确性。输入两组关节角度,进行仿真计算即可得到两组末端位置在坐标系 0 上的坐标,如图 5 所示。

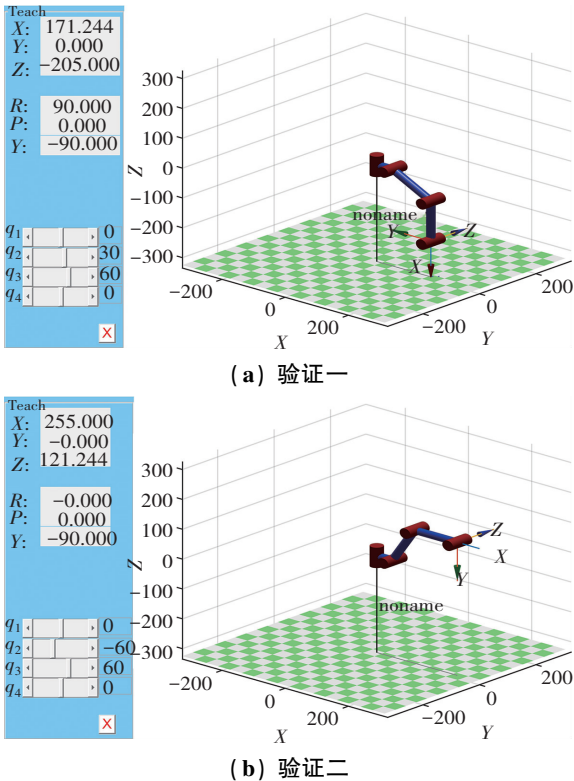


图5 逆运动学仿真验证

Fig. 5 Inverse kinematics simulation verification

将机器人工具箱仿真计算出的足端坐标:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 171.244 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -205 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 255 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 121.244 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

代入逆运动学,求得各关节角分别为

$$[0 \ 0.523 \ 6 \ 1.047 \ 2], [0 \ -1.047 \ 2 \ 1.047 \ 2]$$

与输入的两组关节角度一致。将机器人工具箱输出的足端坐标参数代入逆运动学计算的数值解,与输入机器人工具箱的关节角相同,验证了所推导逆运动学的正确性。

3 四足机器人足端轨迹规划

3.1 步态规划

由于Trot步态具有独特优点,运动稳定且具有较高的能量利用效率,所以主要对Trot步态进行分析。在理想情况下,Trot步态前后对角的两条腿会成对抬起或着地,各条腿的相位差为 $\varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 0.5^\circ, \varphi_3 = 0^\circ, \varphi_4 = 0.5^\circ$ 。理论上在一个步态周期中既不存在滞空相,也不存在全支撑相。

3.2 Trot步态轨迹规划

由于机身稳定性、步态切换协调性与步态平稳性决定了四足机器人能否稳定地按规划目标行走,为了满足四足机器人稳定连续行走的要求,在足端轨迹规划时,采用五次多项式规划足端轨迹。四足机器人前进状态由支撑相的运动决定,在本文研究中需要机器人保持恒定速度前进,故支撑相的足端轨迹采用一次多项式进行规划:

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (7)$$

确定式(7)求解的边界条件:在前进方向上,摆动相的足端初始位置与终止位置距离等于步长,并且两位置速度相等,加速度为零;在抬腿方向上,摆动相的足端初始位置与终止位置高度差等于步高,并且两位置的速度与加速度均为零。

$$\begin{bmatrix} p_i \\ p_j \\ v_i \\ v_j \\ a_i \\ a_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 & t_i^4 & t_i^5 \\ 1 & t_j & t_j^2 & t_j^3 & t_j^4 & t_j^5 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 & 4t_i^3 & 5t_i^4 \\ 0 & 1 & 2t_j & 3t_j^2 & 4t_j^3 & 5t_j^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_i & 12t_i^2 & 20t_i^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_j & 12t_j^2 & 20t_j^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, p_i, p_j 为开始位置和结束位置, v_i, v_j 为起点速度和终点速度, a_i, a_j 为起点加速度和终点加速度, t_i, t_j 分别为开始时间和结束时间。

足端轨迹在前进方向上要考虑四足机器人机身的前进速度 v_0 ,则前进方向的边界条件为 $p = [p_{xi} \ p_{xj} \ -v_0 \ -v_0 \ 0 \ 0]^T$,则得到的轨迹方程为

$$P_x = \begin{cases} p_{xi} - v_0 t + \frac{10(s + T_0 v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^3} t^3 - \frac{15(s + T_0 v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^4} + \frac{6(s + T_0 v_0)}{\left(\frac{1}{2}T_0\right)^5} t^5 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2}T_0 \\ p_{xj} - v_0 \left(t - \frac{1}{2}T_0\right) & \frac{1}{2}T_0 < t \leq T_0 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, $s = p_{xj} - p_{xi}$ 为四足机器人行走步长。

抬腿方向的边界条件为

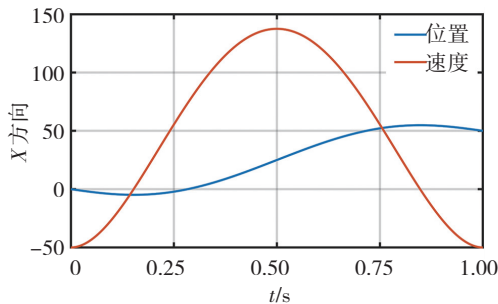
$I_z = [p_{zi} \ p_{zj} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 则得到的轨迹方程为

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

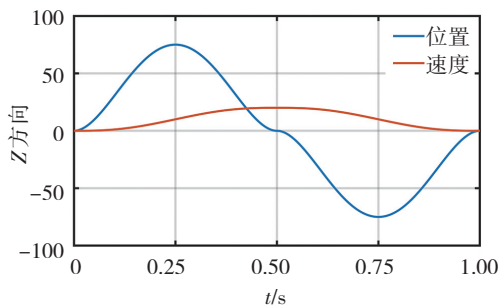
式(10)中, $h = p_{zj} - p_{zi}$ 为机器人行走步高, T_0 为一个步态周期时间。

本文设定足端轨迹: $h = 20 \text{ mm}$, $s = 50 \text{ mm}$, $T_0 = 1 \text{ s}$ 。如图 6(a) 和 6(b) 所示, 得到在 X 方向和 Z 方向上的足端位置曲线和速度曲线。综合 X 、 Z 方向上的足端轨迹得到符合设定参数的完整足端轨迹, 如图 7 所示。

从图 6(a) 可以看出: 本文规划出的足端轨迹, X 方向上, 满足轨迹初始位置和终止位置的加速度都为零, 初始位置和终止位置的速度与支撑相的速度相同的要求; 从图 6(b) 可以看出: Z 方向上, 满足轨迹初始位置和终止位置的速度与加速度均为零的要求。



(a) X 方向



(b) Z 方向

图 6 足端位置、速度曲线

Fig. 6 Curves of foot end position and velocity curve

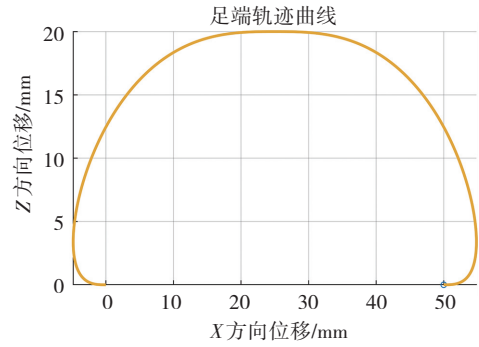


图 7 五次多项式规划的足端轨迹

Fig. 7 Foot-end trajectory of a five-order polynomial plan

4 四足机器人姿态控制策略

4.1 四足机器人姿态控制方法

四足机器人在行走时的机身姿态主要由 4 条腿的足端到对应腿的基坐标位置决定, 如此就可通过控制每条腿足端相对于该腿的基坐标位置坐标达到控制机身行走姿态的目的, 如图 8 所示。由于四足机器人的 4 条腿同理, 以右后腿为分析对象。图中 D 相对于该腿基坐标原点的位置就是该控制策略的控制变量, O' 点为机身坐标系的原点, O 点为机身坐标系的原点向地面的投影。

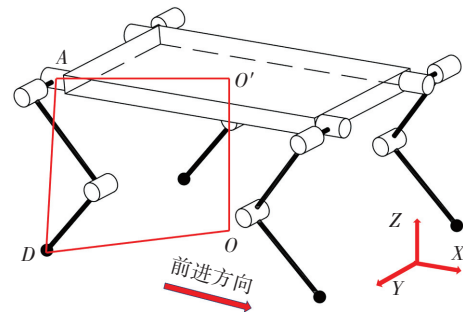


图 8 足端位置向量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the foot end position vector

可通过向量法来求 D 点相对于 A 点的位置关系, 图 8 中腿足与机身向量关系可以表示为

$$\overrightarrow{OD} + \overrightarrow{DA} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'A} \quad (11)$$

式(11)中, $\overrightarrow{OO'}$ 由机身姿态传感器可测得; 因机器人的结构参数已知, 故 $\overrightarrow{OD}$ 为恒定量已知; 随着机身姿态的变化, $\overrightarrow{OA}$ 会发生改变, 但在机身坐标系 O' 下, $\overrightarrow{O'A}_{\text{机身}}$ 为恒量, 由机器人结构决定。 $\overrightarrow{O'A}$ 由 $\overrightarrow{O'A}_{\text{机身}}$ 左乘旋转矩阵 R 表示, 即

$$\overrightarrow{O'A} = R \cdot \overrightarrow{O'A}_{\text{机身}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\overrightarrow{AD} = -\overrightarrow{O'O} - R \times \overrightarrow{O'A}_{\text{机身}} + \overrightarrow{OD} \quad (13)$$

通过式(13)可计算出各个腿足端相对于腿部基坐标系的位置关系, 将此式代入逆运动学即可得到各关节角度的取值。

4.2 稳定姿态行走控制策略

基于 Trot 步态的四足机器人行走姿态控制方法如图 9 所示。当四足机器人在 Simulink 仿真时,首先按照步态轨迹规划行走,机身姿态传感器测出每一时刻机身坐标系相对于地面坐标系的横滚角、俯仰角、偏航角以及沿 Y 、 Z 方向的位移;其次通过 PI 控制器进行修正,将修正后的数据通过姿态控制策略处理,姿态控制根据机身偏移角度与偏移量计算出能够抵消机身偏移与偏转所需要的补偿量;然后将计算出的补偿量与足端轨迹规划的足端坐标相加;最后输入到逆运动学中解算出保持机身平稳状的各个关节角度,输入到关节控制模组中,保持四足机器人以稳定的机身姿态向前行走。

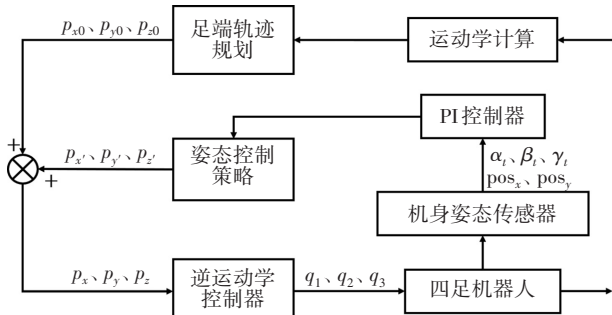


图 9 姿态控制策略框图
Fig. 9 Block diagram of the attitude control strategy

5 仿真实验与结果分析

为了证明本文提出的控制策略在四足机器人行走时的可行性,采用 MATLAB 软件 Simulink 平台对机器人模型进行搭建,然后将控制策略应用到模型中,对四足机器人行走进行仿真验证。在 MATLAB 中搭建四足机器人步态控制、轨迹规划与姿态调整控制系统,仿真时间为 15 s。从图 10 姿态控制下行走仿真动画中可以观察到:四足机器人在行走过程中,其机身保持稳定,没有产生明显的偏离预定轨迹的现象。

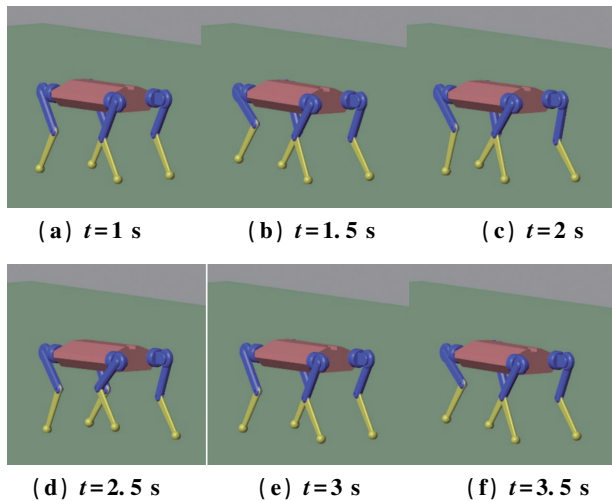


图 10 行走仿真图像
Fig. 10 Walking simulation image

图 11 为姿态控制下四足机器人行走时的机身姿

态曲线与开环行走时的机身姿态曲线对比图。从图 11(a)中可以看出:姿态控制策略下,四足机器人稳定行走时横滚角波动较小,在 $-0.4^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 之间,而开环控制下,横滚角波动幅度较大,最大波动范围超过 7° 。同样,从图 11(b)中可看出:姿态控制策略下,四足机器人行走时机身的俯仰角也较小,在 $-0.8^{\circ} \sim 0.8^{\circ}$ 之间,而开环控制下,机身俯仰角波动较大,最大偏转角度范围超过 4° 。从图 11(c)中可看出:姿态控制策略下,四足机器人在整个 15 s 的运动过程中机身偏航角一直在 0° 左右,幅度极小,而开环控制下,行走时偏航角从 0° 偏转到 4° ,说明有严重的偏航现象。根据开环与姿态控制下的 R 、 P 、 Y 角变化情况对比,可证明本姿态控制策略能够达到保持四足机器人行走时机身稳定的效果。

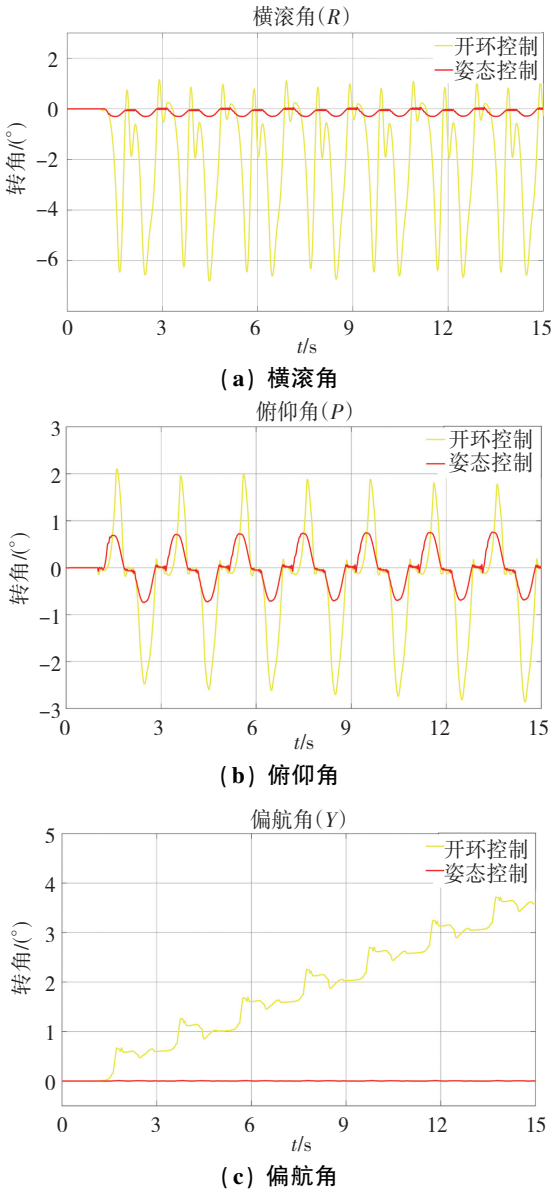


图 11 姿态角变化对比图

Fig. 11 Comparison chart of attitude angle changes

仿真结果表明:本文研究的运动学、步态与足端轨迹规划能够较好实现四足机器人的 Trot 步态行走,没有发生

打滑、侧翻与倾斜现象,并且在姿态控制策略下四足机器人的横滚角、俯仰角和偏航角均得到较大改善,相对于无姿态控制下的行走情况,具有较好的稳定性。

本节将提出的姿态控制用在四足机器人的摆动相与支撑相控制之中,采用此控制策略搭建四足机器人的行走仿真。通过机器人位姿曲线情况验证了本文提出的姿态控制策略可有效提高四足机器人行走的稳定性。

6 结论与展望

研究了 Trot 步态下四足机器人行走姿态控制。首先使用 MATLAB 机器人工具箱快速且有效地验证了建立的正、逆运动学正确性;其次基于机身稳定、步态动作连贯以及无冲击原则,使用五次多项式规划了足端轨迹;然后介绍了一种 Trot 步态下的四足机器人姿态控制策略,用来保证四足机器人行走时的稳定性,该控制策略通过调整足端与机身坐标关系,有效地实现了行走稳定控制;最后通过 MATLAB 软件的 Simulink 进行仿真实验,将姿态控制策略下行走时四足机器人的 R 、 P 、 Y 角与开环控制下的 R 、 P 、 Y 角进行对比,验证了本文提出姿态控制策略的有效性和优越性。

本文对四足机器人控制策略的研究均是通过 MATLAB 软件的 Simulink 进行仿真验证的。由于实际四足机器人系统的复杂性和外界环境的不确定因素,虚拟仿真的分析结果很难完全反映出机器人真实的运动状态,因此在后续控制算法的应用与开发中,还需要结合实际的物理样机进行实验验证。实际应用中,四足机器人仅具有稳定控制是完全不够的,还需加入更多的上层决策和算法,如采用蚁群算法、遗传算法等的全局路径规划,并将环境感知与底层平衡控制算法进行融合,如机器视觉、激光雷达等一些传感器的加入,从而使四足机器人具有真正意义上的智能化。而这一部分将作为本文的后续内容继续深入研究与探索。

参考文献(References):

- [1] ALEXANDER R M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals[J]. The International Journal of Robotics Research, 1984, 3(2): 49-59.
- [2] HOYT D, TAYLOR R. Gait and the energetics of locomotion in horses[J]. Nature, 1981, 292(1): 239-240.
- [3] WALDRON K J, NANUA P. Energy comparison between trot, bound, and gallop using a simple model[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 1995, 117(4): 466-473.
- [4] KATZ B, DI CARLO J, KIM S. MINI CHEETAH: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control [C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [5] HUTTER M, GEHRING C, JUD D, et al. Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [6] 陈佳, 伞红军, 陈久朋, 等. 仿生四足机器人单腿轨迹规划研究[J]. 电子科技, 2023, 36(8): 72-80.
CHEN Jia, SAN Hong-jun, CHEN Jiu-peng, et al. Research on single-legged trajectory planning of bionic quadruped robot [J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(8): 72-80.
- [7] 周枫林, 王瑾元, 杨帆, 等. 基于 Trot 步态的四足机器人轨迹规划与仿真[J]. 长江信息通信, 2022, 35(8): 13-19.
ZHOU Feng-lin, WANG Jin-yuan, YANG Fan, et al. Trajectory planning and simulation of quadruped robot based on trot gait [J]. Yangtze River Information and Communication, 2022, 35(8): 13-19.
- [8] 陈辉, 任志刚, 冯祖仁, 等. 基于 IMU 和运动学的四足机器人对角支撑状态估计算法[J]. 控制与决策, 2023 (9): 1-9.
CHEN Hui, REN Zhi-gang, FENG Zu-ren, et al. Diagonal support state estimation algorithm for quadruped robot based on IMU and kinematics [J]. Control and Decision, 2023 (9): 1-9.
- [9] 刘在阳. 电机驱动四足机器人控制系统与多步态控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
LIU Zai-yang. Research on motor driven quadruped robot control system and multi-gait control method [D]. Ji' nan: Shandong University, 2021.
- [10] 王银浩, 顾潭成, 徐彦伟, 等. 四足机器人侧摆型 trot 步态的运动学分析及仿真研究[J]. 现代制造工程, 2022(5): 24-29.
WANG Yin-hao, JIE Tan-cheng, XU Yan-wei, et al. Kinematic analysis and simulation study of side-swing trot gait of quadruped robot [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(5): 24-29.
- [11] REHER J P, HEREID A, KOLATHAYA S, et al. Algorithmic foundations of realizing multi-contact locomotion on the humanoid robot DURUS [C]//Springer Proceedings in Advanced Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2020: 400-415.
- [12] 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]. Ji' nan: Shandong University, 2016.
- [13] KOLATHAYA S. Local stability of PD controlled bipedal walking robots [J]. Automatica, 2020, 114: 108841 - 108847.
- [14] 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.

责任编辑:李翠薇