

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.05.006

基于 Bezier 曲线的四足机器人 Trot 步态优化

薛晨慷, 李光, 易静, 谭薪兴

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为实现四足机器人的稳定行走, 需要对其足端轨迹进行合理规划。首先, 以 Bezier 曲线为基础, 规划四足机器人的足端轨迹, 并依据足端轨迹约束条件对足端轨迹进行优化; 其次, 通过多组对比实验确定出最优的一组控制点坐标, 设计四足机器人的足端轨迹, 并找到最佳的步长和抬腿高度组合; 最后, 基于 Matlab/Simulink 搭建仿真平台进行仿真实验, 与应用复合摆线规划的足端轨迹在足端落地时的冲击力、质心的波动范围、机体的偏航距离、前进距离 4 个方面进行比较, 分析四足机器人的稳定性。仿真结果表明: 采用 Bezier 曲线规划的足端轨迹, 提高了机器人运动的稳定性。

关键词: 四足机器人; 足端轨迹; Trot 步态; Bezier 曲线

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)05-0042-08

引文格式: 薛晨慷, 李光, 易静, 等. 基于 Bezier 曲线的四足机器人 Trot 步态优化 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(5): 42-49.

Trot Gait Optimization of Quadruped Robots Based on Bezier Curves

XUE Chenkang, LI Guang, YI Jing, TAN Xinxing

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of realizing a stable walking of quadruped robots, it is necessary to lay out a reasonable plan of its foot trajectory. Based on Bezier curves, the foot end trajectory of quadruped robots has thus been planned, with the foot end trajectory optimized according to the constraint conditions of the foot end trajectory. On the basis of multiple groups of comparative experiments, the optimal coordinates of a group of control points can be determined, followed by a design of the foot end trajectory of the quadruped robot, thus obtaining the optimal combination of step length and leg lifting height. A simulation platform is built based on Matlab/Simulink for simulation experiments, followed by an analysis of the stability of the quadruped robots by comparing it with the impact force of foot end trajectory on foot end landing by using compound cycloid planning, the fluctuation range of the centroid, the yaw distance and the forward distance of the body. The simulation results show that the trajectory of the foot end planned by Bezier curves improves the stability of the robot motion.

Keywords: quadruped robot; foot trajectory; Trot gait; Bezier curve

收稿日期: 2021-11-02

作者简介: 薛晨慷 (1998-), 男, 山西运城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为仿生四足机器人运动及控制, E-mail: 1349657167@qq.com

通信作者: 李光 (1963-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为机器人智能控制, E-mail: liguang@hut.edu.cn

1 研究背景

近年来, 移动式机器人受到了社会各界的关注, 越来越多的科研工作者对其进行研究^[1]。当前, 移动式机器人主要分为履带式、轮式、足式、爬行或蠕动式等^[2]。履带式、轮式机器人对地形有严格要求, 一般要在较平坦、无障碍物的地面工作, 而足式机器人运动更灵活, 可在复杂崎岖路面上行走, 如沙地等^[3], 可被应用于资源探查、军事运输^[4]等方面。

足式机器人包括单足、双足、四足和六足机器人等^[5]。与单足、双足机器人相比, 四足机器人的运动稳定性更好、负载能力更强、运动灵活性更佳^[6]; 与六足机器人相比, 则四足机器人结构简单^[7]、成本较低, 且具备更好的机动性。基于此, 本研究选取四足机器人为研究对象。

目前, 对四足机器人的研究主要集中在结构设计、运动规划、算法控制 3 个方面^[8]。其中运动规划在四足机器人中起着至关重要的作用, 可分为路径规划和轨迹规划两个部分。合理规划足端轨迹有助于减小机器人触地时的冲击, 减少对机体的伤害; 而且足端轨迹对机器人的稳定性有着非常大的影响。

关于足端轨迹规划的方法, 田俊等^[9]提出了一种基于五次多项式的静步态足端轨迹, 五次多项式规划足端轨迹能够保证加速度连续过度, 缺点在于加速度处于不断加速减速的过程中, 容易出现加速度过大的问题。马慧姝等^[10]人利用相机拾取生物大步行时的足端数据点, 再通过三次 B 样条曲线拟合的方法形成足端轨迹, 但规划的轨迹曲线不经过拟合数据的原始点。Liu C. H. 等^[11]利用直线轨迹来规划四足机器人的足端轨迹, 而直线轨迹的缺点在于抬腿和落地的瞬间速度以及加速度不为 0。也有学者利用复合摆线^[12]、椭圆曲线^[13]等规划四足机器人的足端轨迹; 利用函数公式规划足端轨迹的优点在于方法简单, 但是会限制机器人足端轨迹的形状。

综上所述, 本研究旨在遵守质心稳定的原则, 结合四足机器人足端轨迹约束条件, 利用 Bezier 曲线规划四足机器人的足端轨迹, 并在仿真平台上验证此步态的可行性; 然后, 将所得到的结果与复合摆线规划足端轨迹法得到的结果进行比较, 以此验证 Bezier 曲线轨迹优化的可行性与有效性, 以期为机器人足端轨迹的研究提供理论参考。

2 四足机器人结构及运动学模型

2.1 四足机器人结构

四足机器人的结构是根据四足哺乳动物的身体

结构, 并基于仿生学原理设计而成的。四足机器人主要由机身和 4 条腿组成, 根据腿部结构的不同可划分为全膝式、全肘式、外膝肘式和内膝肘式机器人。本研究采用的四足机器人为全肘式结构, 每条腿有侧摆关节、髌关节和膝关节 3 个关节, 共 3 个自由度, 其中侧摆关节可以实现机器人的侧向运动, 而髌关节和膝关节组合可以实现机器人的前后向运动以及俯仰运动。

2.2 四足机器人运动学模型

以四足机器人右前腿为例, 采用标准 D-H 法建立坐标系, 其运动学模型如图 1 所示。

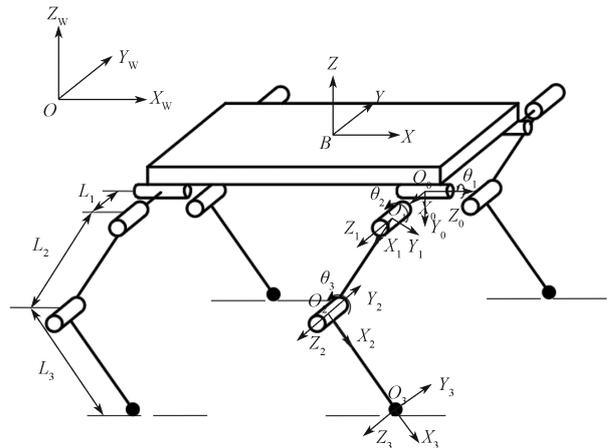


图 1 四足机器人运动学模型

Fig. 1 Kinematics model of quadruped robots

图 1 中, 坐标系 $O\{X_w, Y_w, Z_w\}$ 为世界坐标系; 坐标系 $B\{X, Y, Z\}$ 为机身坐标系, 原点在机器人躯干的质心处, X 轴正方向为机器人前进的方向, Z 轴正方向为竖直朝上, Y 轴的正方向根据右手定则确定。坐标系 $\{0\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}$ 分别为侧摆关节、髌关节、膝关节以及足端的坐标系; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为 3 个关节的关节转角; L_1, L_2, L_3 分别为侧摆、大腿、小腿 3 根连杆的长度。

2.2.1 正运动学

以四足机器人的右前腿为例, 依据所建立的坐标系, 推导出机器人的运动学方程, 其 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 右前腿 D-H 参数表

Table 1 D-H parameter table of right front legs

连杆 i	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	0	θ_1	0	-90°
2	L_1	θ_2	L_2	0
3	0	θ_3	L_3	0

表 1 中, a_i 为连杆长度, α_i 为关节扭角, d_i 为关节距离, θ_i 为关节转角。

机器人矩阵变换的通式为

$${}^{i+1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & -\sin \theta_{i+1} \cos \alpha_{i+1} & \sin \theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & a_{i+1} \cos \theta_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \cos \alpha_{i+1} & -\cos \theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & a_{i+1} \sin \theta_{i+1} \\ 0 & \sin \alpha_{i+1} & \cos \alpha_{i+1} & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \quad (1)$$

于是得到如下各关节之间的变换矩阵:

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^0\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin \theta_1 \\ \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 & \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_1 \cos \theta_1 \\ -\sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \quad (6)$$

最终可以确定机器人足端正运动学方程为

$$\begin{cases} P_x = L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin \theta_1, \\ P_y = L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_3 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_1 \cos \theta_1, \\ P_z = -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 \sin \theta_2. \end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 逆运动学

如果机器人末端的位姿已经给出, 要求其各关节的值, 则需运动反解。逆运动学主要有代数法和几何法两种, 本文采用代数法求逆运动学解。

1) 求 θ_3 。对式 (7) 进行平方和, 得

$$P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 = L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos \theta_3, \quad (8)$$

则有

$$\cos \theta_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_1^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}, \quad (9)$$

$$\sin \theta_3 = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}, \quad (10)$$

$$\theta_3 = \pm \operatorname{atan2}(\sin \theta_3, \cos \theta_3). \quad (11)$$

2) 求 θ_1 。用逆变换 ${}^0\mathbf{T}_1^{-1}$ 左乘等式 (5) 两边可得

$${}^0\mathbf{T}_1^{-1} {}^0\mathbf{T}_3 = {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3. \quad (12)$$

令矩阵方程中对应元素相等, 可得到:

$$\begin{cases} P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1 = L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 - \\ P_z = L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_2; \\ P_y \cos \theta_1 - P_x \sin \theta_1 = L_1. \end{cases} \quad (13)$$

利用式中第三个等式条件, 同时令

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \\ \phi = \operatorname{atan2}(P_y, P_x); \end{cases} \quad (14)$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & L_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \quad (4)$$

以侧摆关节处坐标系为基座标, 则足端对基座标的关系可以表示为

$${}^0\mathbf{T}_3 = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3. \quad (5)$$

将表 1 各参数代入式 (5) 中得到:

$$\begin{cases} P_x = \rho \cos \phi, \\ P_y = \rho \sin \phi; \end{cases} \quad (15)$$

经三角代换得

$$\theta_1 = \operatorname{atan2}(P_y, P_x) - \operatorname{atan2}\left(L_1, \pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2}\right). \quad (16)$$

3) 求 θ_2 。利用式 (13) 中的两个等式条件, 可以得到式 (17):

$$\begin{cases} P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1 = L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 - \\ P_z = L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_2, \end{cases} \quad (17)$$

联立式 (9) (10) (11) (17), 计算可得

$$\begin{cases} \theta_2 = \operatorname{atan2}\left[-\rho L_3 \sin \theta_3 - P_z (L_2 + L_3 \cos \theta_3), \right. \\ \left. \rho (L_2 + L_3 \cos \theta_3) - P_z L_3 \sin \theta_3\right]. \end{cases} \quad (18)$$

3 四足机器人足端轨迹规划与优化

根据抬腿顺序的不同, 四足机器人步态可分为对称步态和不对称步态^[14]。对称步态中, 对角步态即 Trot 步态, 因其稳定性好、速度大^[15]、重心偏移量小等优点成为最常见的研究步态。因此本研究采用 Trot 步态进行研究, 即行走过程中同时抬起、落下右前和左后腿 (或左前和右后腿)。Trot 步态的时序图

如图 2 所示。

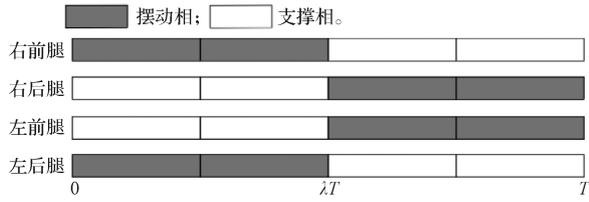


图 2 对角步态时序图

Fig. 2 Diagonal gait sequence diagram

3.1 足端轨迹规划

根据参考文献 [16], 可以得到复合摆线轨迹摆动相的方程为

$$\begin{cases} x(t) = s \left(\frac{t}{\lambda T} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{\lambda T} \right) \right), & 0 \leq t < \lambda T; \\ z(t) = h \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{t}{\lambda T} \right) \right), & 0 \leq t < \lambda T. \end{cases} \quad (19)$$

式中: s 为步长; h 为抬腿高度; T 为步态周期; λ 为腾空率, 即摆动相占整个步态周期的比例。

复合摆线规划的足端轨迹, 其水平和垂直方向上速度、加速度分量在初始及结束的瞬间都为 0。因此利用五次 Bezier 曲线对复合摆线足端轨迹进行拟合。

Bezier 曲线于 1962 年, 由法国工程师 Pierre Bezier 发明, 并被成功应用于汽车车体工业设计, 且将其广泛应用^[17]。现如今 Bezier 曲线主要用于 Photoshop 等计算机绘图软件中曲线的绘制。Bezier 曲线由线段与节点组成, 可以依据起始点、控制点、终止点的坐标绘制出一条光滑的曲线^[18]。如图 3 所示为根据 4 个点绘制的 Bezier 曲线。图中控制点之间的连线为 Bezier 曲线的控制多边形, 生成的光滑曲线则为 Bezier 曲线。

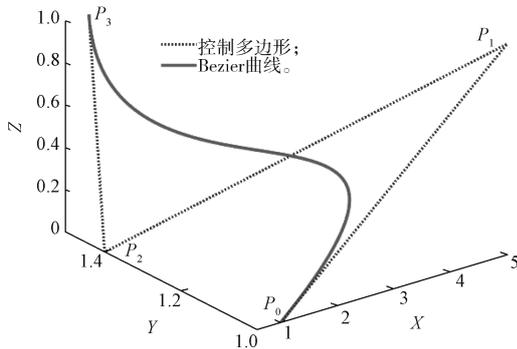


图 3 Bezier 曲线及其控制多边形

Fig. 3 Bezier curves with its control polygon

通过 Bezier 曲线拟合得到的摆动相轨迹方程为

$$\begin{cases} x(t) = \left[\sum_{i=0}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} t^i (1-t)^{5-i} P_{xi} \right], \\ z(t) = \left[\sum_{i=0}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} t^i (1-t)^{5-i} P_{zi} \right]. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $i=0, 1, \dots, 5$; P_{xi} 为第 i 点的横坐标, 取值为 $0, 0, 0.5s, 0.5s, s, s$; P_{zi} 为第 i 点的纵坐标, 取值为 $0, 0.65h, 1.3h, 1.3h, 0.65h, 0$ 。

设置步长 $s=20$ mm, 抬腿高度 $h=10$ mm。

综上可得, 复合摆线规划的足端轨迹和五次 Bezier 曲线的足端轨迹拟合曲线如图 4 所示。

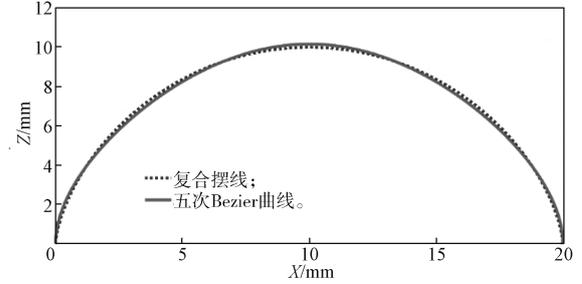


图 4 足端轨迹拟合曲线

Fig. 4 Foot trajectory fitting curve

结合参考文献 [19] 的研究可知, 当足端轨迹与地面的底角为钝角时, 冲击力更小, 机器人行进更加稳定。因此在五次 Bezier 曲线的基础上对轨迹进行修改, 使其满足抬腿与落地时足端轨迹与地面的底角大于 90° 。为实现这一条件, 需要在 Bezier 曲线的起始点和终止点处额外添加 3 个控制点, 用该方法形成的 Bezier 曲线最终共需 12 个点控制。

首先对 Z 轴坐标进行重新规划, 原五次 Bezier 曲线中最高点的纵坐标为 $1.3h$, 现将 $0 \sim 1.3h$ 重新划分为 6 等分。预设足端轨迹与地面的夹角为 135° , 并根据 $P_{x0}=0, P_{z0}=0, P_{z1}=0.26h$, 通过斜率公式计算得到 $P_{x1}=-0.13s$, 令 $P_{x2}=P_{x1}=-0.13s$ 。用同样的方法可得到 $P_{x9}=P_{x10}=1.13s$, 最终得到的所有控制点的坐标如表 2 所示。

表 2 初始控制点坐标

Table 2 Initial control point coordinates

i	P_{xi}	P_{zi}	i	P_{xi}	P_{zi}
0	0	0	7	s	$1.04h$
1	$-0.13s$	$0.26h$	8	s	$0.78h$
2	$-0.13s$	$0.52h$	9	$1.13s$	$0.52h$
3	0	$0.78h$	10	$1.13s$	$0.26h$
4	0	$1.04h$	11	s	0
5	$0.5s$	$1.3h$			

依据表 2 中数据, 最终得到一个周期内摆动相的足端轨迹方程, 为

$$\begin{cases} x(t) = s \left[\sum_{i=0}^{11} \frac{11!}{i!(11-i)!} t^i (1-t)^{11-i} P_{xi} \right], \\ z(t) = h \left[\sum_{i=0}^{11} \frac{11!}{i!(11-i)!} t^i (1-t)^{11-i} P_{zi} \right]. \end{cases} \quad (21)$$

足端轨迹曲线如图 5 所示。

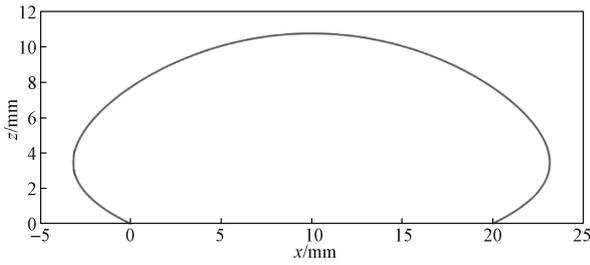


图5 优化前的足端轨迹

Fig. 5 Foot trajectory before optimization

对轨迹进行求导，可以得到其速度与加速度。由于 Bezier 曲线控制点的坐标是常数，并且与变量 t 无关，因此对函数的求导转化为对伯恩斯坦多项式 $B_{n,i}(t)$ 的求导：

$$\frac{d}{dt} B_{n,i}(t) = n(B_{n-1,i-1}(t) - B_{n-1,i}(t)) \quad (22)$$

最终计算得到轨迹的速度、加速度方程分别为

$$v = \frac{d}{dt} B(t) = n \sum_{i=0}^{n-1} B_{n-1,i}(t)(P_{i+1} - P_i) \quad (23)$$

$$a(t) = \frac{d}{dt} v(t) = n(n-1) \sum_{i=0}^{n-2} B_{n-2,i}(t)(P_{i+1} - P_i) \quad (24)$$

水平和竖直方向上的速度、加速度分量曲线图像分别为图 6、图 7 所示。

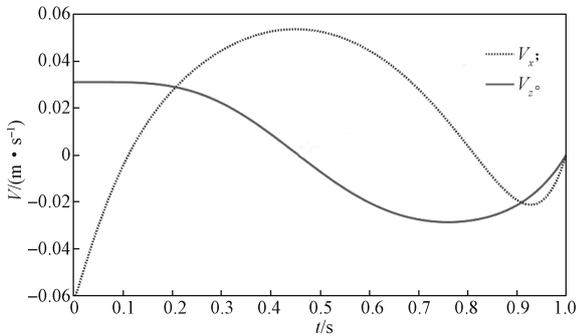


图6 优化前的速度分量

Fig. 6 Velocity component before optimization

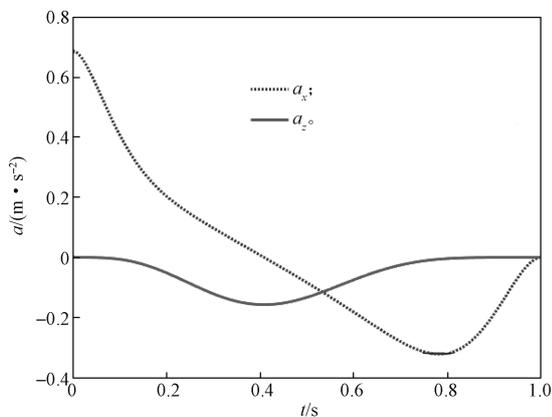


图7 优化前的加速度分量

Fig. 7 Acceleration component before optimization

观察图 5、图 6、图 7 中的曲线，发现形成的轨迹存在以下问题：

- 1) 实际抬腿高度会超出预设的抬腿高度 10%；
- 2) 水平方向的速度和加速度在 $t=0$ 时刻过大；
- 3) 水平方向上的速度和加速度在一个摆动相的时间内振幅过大。

针对以上问题，依据 Trot 步态约束条件对控制点的坐标进行优化。

3.2 足端轨迹优化

Trot 步态约束条件如下：

水平方向为

$$\begin{cases} x|_{t=0} = 0, \\ x|_{t=\lambda T} = s, \\ x|_{t=T} = 0; \end{cases} \begin{cases} \dot{x}|_{t=0} = 0, \\ \dot{x}|_{t=\lambda T} = 0, \\ \dot{x}|_{t=T} = 0; \end{cases} \begin{cases} \ddot{x}|_{t=0} = 0, \\ \ddot{x}|_{t=\lambda T} = 0, \\ \ddot{x}|_{t=T} = 0 \end{cases}$$

竖直方向为

$$\begin{cases} z|_{t=0} = 0, \\ z|_{t=\lambda T/2} = h, \\ z|_{\lambda T \leq t \leq T} = 0; \end{cases} \begin{cases} \dot{z}|_{t=0} = 0, \\ \dot{z}|_{t=\lambda T/2} = 0, \\ \dot{z}|_{\lambda T \leq t \leq T} = 0; \end{cases} \begin{cases} \ddot{z}|_{t=0} = 0, \\ \ddot{z}|_{t=\lambda T/2} = 0, \\ \ddot{z}|_{\lambda T \leq t \leq T} = 0 \end{cases}$$

针对速度：通过改变 3 个控制点的横坐标使两个一阶插值点为 0，让速度等于 0；

针对加速度：通过改变 4 个控制点的横坐标使其两个二阶插值点为 0，让加速度等于 0；

针对抬腿高度：通过减小各控制点的纵坐标，使抬腿高度满足要求。

依据上述条件，经过多组数据对比，最终得到一组最优控制的点坐标，如表 3 所示。

表3 最优控制点坐标

Table 3 Optimal control point coordinates

i	P_{xi}	P_{zi}	i	P_{xi}	P_{zi}
0	0	0	7	s	$0.8h$
1	$-0.05s$	$0.2h$	8	$1.05s$	$0.8h$
2	$-0.10s$	$0.4h$	9	$1.10s$	$0.4h$
3	$-0.05s$	$0.8h$	10	$1.05s$	$0.2h$
4	0	$0.8h$	11	s	0
5	$0.50s$	$1.3h$			

优化后一个周期内摆动相轨迹函数为

$$\begin{cases} x(t) = \left[\sum_{i=0}^{11} \frac{11!}{i!(11-i)!} t^i (1-t)^{11-i} P_{xi} \right], \\ z(t) = \left[\sum_{i=0}^{11} \frac{11!}{i!(11-i)!} t^i (1-t)^{11-i} P_{zi} \right]. \end{cases} \quad (25)$$

一个周期内摆动相的足端轨迹如图 8 所示。

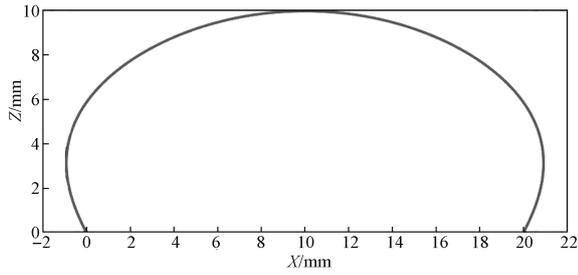


图 8 优化后的足端轨迹

Fig. 8 Optimized foot trajectory

其速度与加速度图像如图 9 和图 10 所示。

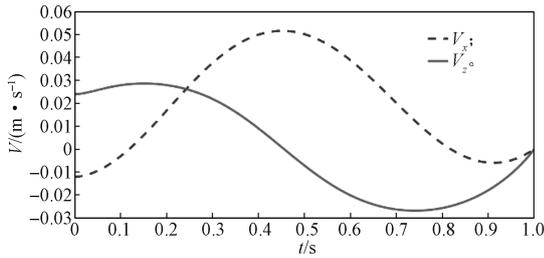


图 9 优化后的速度分量

Fig. 9 Optimized velocity component

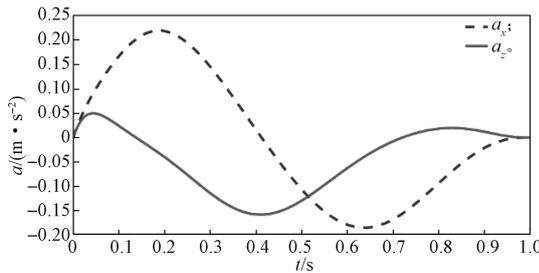


图 10 优化后的加速度分量

Fig. 10 Optimized acceleration component

4 实验仿真与结果分析

4.1 仿真平台搭建

本文采用 Solidworks 软件, 以“YOBOGO”四足机器人为模型, 建立四足机器人的虚拟样机。四足机器人的结构参数如表 4 所示。

表 4 四足机器人结构参数表

Table 4 Structural parameters of quadruped robots

参数名	取值
质量 /kg	10.5
机体长度 /mm	485
机体宽度 /mm	275
机体初始高度 /mm	200
侧摆关节长度 L_1 /mm	76
大腿长度 L_2 /mm	210
小腿及足总长度 L_3 /mm	210

将模型导入 Matlab/Simulink 中, 结合实际情况, 设置机器人的材料为铝合金, 地面的接触刚度为 1×10^4 N/m, 接触阻尼为 1×10^2 N/m, 静摩擦系数为 0.9, 动摩擦系数为 0.75。之后通过 Simulink 模块并结合编写的程序, 搭建如图 11 所示仿真平台, 并进

行仿真实验。

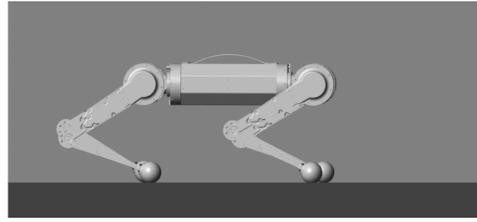


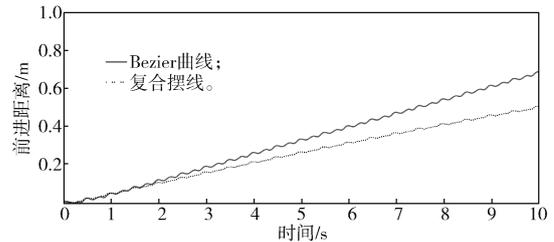
图 11 四足机器人仿真模型

Fig. 11 Simulation model of quadruped robots

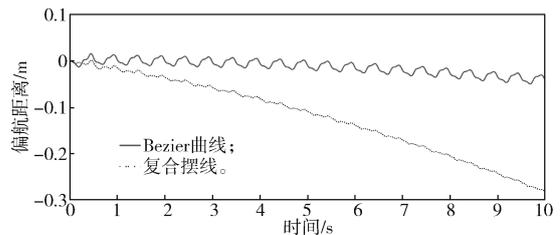
4.2 仿真实验结果分析

4.2.1 实验一结果分析

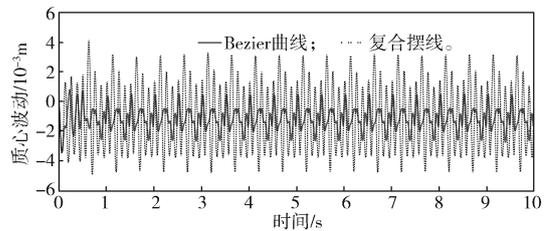
实验一将复合摆线规划的足端轨迹与 Bezier 曲线规划的足端轨迹进行对比。仿真过程中, 除足端轨迹函数外, 保证机器人的初始位置、步态周期 T 、占空比、步长 s 及抬腿高度 h 都完全相同。仿真结果如图 12、13 所示, 分别从机体前进距离、偏航距离、质心波动范围、足端的冲击力等方面判断机器人稳定性。又因机器人初始时刻距离地面有微小高度, 落地期间产生的数据不准确, 因此, 为保证数据的有效性, 对前两个周期即 1 s 内的数据不予采用。



a) 前进距离



b) 偏航距离



c) 质心波动

图 12 不同步态下 3 个方向质心运动对比曲线

Fig. 12 Centroid motion comparison in three directions under different gaits

由图 12 可看出, 10 s 仿真时间内, 无论是 x 轴方向的前进距离, y 轴方向的偏航距离, 以及 z 轴方

向的波动范围, 都有较大改善。由图 13 所示不同步态下冲击力对比曲线可看出, Bezier 曲线规划的轨迹下, 足端与地面接触时的冲击力更小。

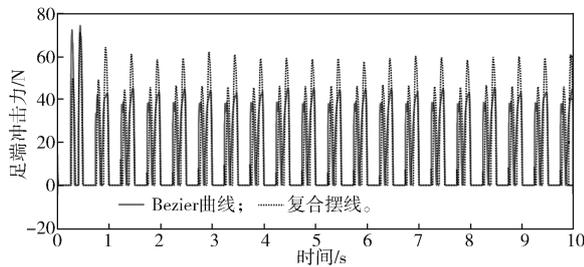
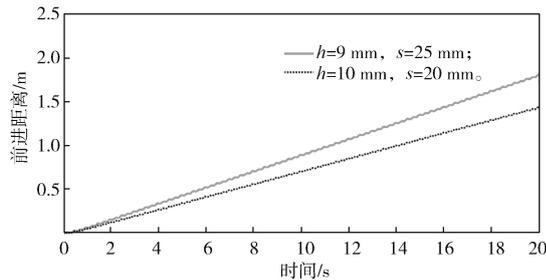


图 13 足端冲击力对比曲线

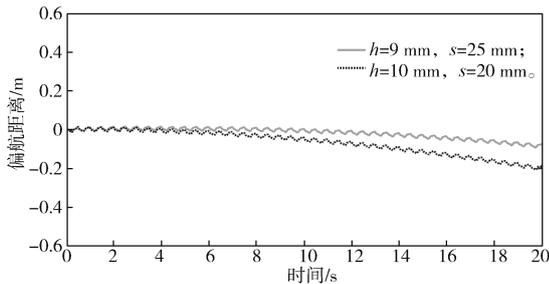
Fig. 13 Foot impact force comparison

4.2.2 实验二结果分析

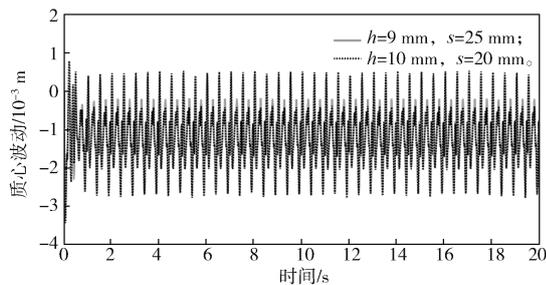
实验二通过改变四足机器人步长 s 和抬腿高度 h , 对照步长 $s=20\text{ mm}$, 抬腿高度 $h=10\text{ mm}$ 时的冲击力和质心位移, 找到足端轨迹最优步长和抬腿高度。设置步长范围为 $20\sim 40\text{ mm}$, 间距为 5 mm ; 抬腿高度区间为 $7\sim 15\text{ mm}$, 间距为 2 mm 。每两组进行一次对比实验, 选择数据更好的一组进入下一组对比实验, 仿真时间设置为 20 s 。仿真结果见图 14、15。



a) 前进距离



c) 偏航距离



d) 质心波动

图 14 不同步长、抬腿高度下 3 方向质心运动对比曲线
Fig. 14 Comparison of centroid motion in three directions under different step lengths and leg lifting heights

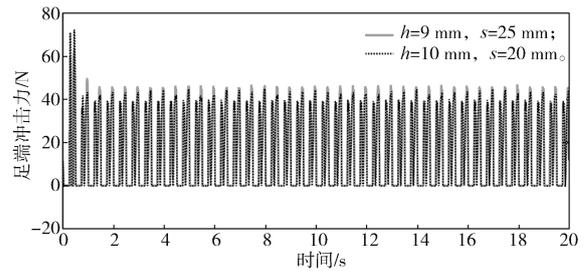


图 15 足端冲击力对比曲线

Fig. 15 Comparison of foot impact force

由图 14 和 15 可看出, $h=9\text{ mm}$, $s=25\text{ mm}$ 时, 机器人行走距离更远、速度更快, 偏航距离及偏航角度更小; 质心的上下波动范围以及足端冲击力几乎没变化。因此, 此组步长及抬腿高度最佳。

5 结语

本研究应用 Bezier 曲线规划四足机器人的足端轨迹。首先, 采用五次 Bezier 曲线对复合摆线规划的足端轨迹进行拟合, 并依据足端轨迹规划约束条件, 使足端冲击力最小的规划方法, 对曲线的控制点进行增加和修改, 最终得到 Bezier 曲线规划四足机器人的足端轨迹方程。其次, 在 Matlab/Simulink 软件中建立机器人仿真平台, 计算并建立机器人的正逆运动学模型; 从机器人的前进距离、偏航距离、质心波动程度及落地时足端对地面的冲击力 4 个方面, 与复合摆线规划的足端轨迹进行对比, 验证了 Bezier 曲线规划下的足端轨迹效率更高, 机器人运动也更稳定。最后, 在 Bezier 曲线规划的足端轨迹下对抬腿高度及步长之间的关系进行研究, 找到了抬腿高度与步长组合的最优解, 完成对四足机器人行走的最优规划。结果表明: 采用 Bezier 曲线规划足端轨迹, 能较好地优化机器人的运动效率及稳定性。

参考文献:

[1] 纪鹏飞, 陈劲杰, 宁方宽, 等. 基于 ADAMS 的四足机器人 trot 步态仿真 [J]. 通信电源技术, 2015, 32(4): 57-59.
JI Pengfei, CHEN Jinjie, NING Fangkuan, et al. Simulation of Trot Gait for Quadruped Robot Based on ADAMS[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(4): 57-59.

[2] 王春兰. 液压驱动四足机器人的关节控制 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
WANG Chunlan. Joint Control of Quadruped Robot Driven by Hydraulic Cylinder[D]. Jinan: Shandong University, 2010.

- [3] 谢楚政, 李光, 于权伟, 等. 四足机器人 Trot 步态规划与仿真分析[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(5): 32-40.
XIE Chuzheng, LI Guang, YU Quanwei, et al. Trot Gait Planning and Simulation Analysis of Quadruped Robots[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(5): 32-40.
- [4] 雷成林. 四足机器人对角小跑步态运动控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
LEI Chenglin. Research on Trotting Gait Control of a Quadruped Robot[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [5] 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.
- [6] 田宣. 仿生四足机器人稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
TIAN Xuan. Research on the Stability of Bionic Quadruped Robot[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [7] 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人, 2006, 28(1): 81-88.
LIU Jing, ZHAO Xiaoguang, TAN Min. Legged Robots: a Review[J]. Robot, 2006, 28(1): 81-88.
- [8] 常青, 韩宝玲, 乔志霞, 等. 四足机器人斜坡运动的自适应控制算法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(9): 900-906.
CHANG Qing, HAN Baoling, QIAO Zhixia, et al. An Adaptive Control Algorithm for Quadruped Robot Trotting on a Slope[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(9): 900-906.
- [9] 田俊, 郑云涛, 刘铭. 基于五次多项式的四足机器人轨迹规划[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(3): 140-143.
TIAN Jun, JIA Yuntao, LIU Ming. Trajectory Planning of Quadruped Robot Based on Fifth-Order Polynomial[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(3): 140-143.
- [10] 马慧姝, 刘艳霞, 方建军, 等. 四足仿生机器人仿生足端轨迹规划研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(3): 66-71.
MA Huishu, LIU Yanxia, FANG Jianjun, et al. Research on Bionic Foot-End Trajectory Planning for Bionic Quadruped Robot[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(3): 66-71.
- [11] LIU C H, SU N W, LIN M H, et al. A Multi-Legged Biomimetic Stair Climbing Robot with Human Foot Trajectory[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai: IEEE, 2015: 559-563.
- [12] LEI J T, WANG F, YU H Y, et al. Energy Efficiency Analysis of Quadruped Robot with Trot Gait and Combined Cycloid Foot Trajectory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 138-145.
- [13] KIM K Y, PARK J H. Ellipse-Based Leg-Trajectory Generation for Galloping Quadruped Robots[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(11): 2099-2106.
- [14] 陈林. 基于双足机器人步态规划的研究[D]. 深圳: 中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院), 2020.
CHEN Lin. The Gait Planning of the Biped Robot[D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [15] 盛名. 液压四足机器人对角步态优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
SHENG Ming. Research on Diagonal Gait Optimization of Hydraulic Quadruped Robot[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [16] 李贻斌, 李彬, 荣学文, 等. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(5): 32-36, 45.
LI Yibin, LI Bin, RONG Xuewen, et al. Mechanical Design and Gait Planning of a Hydraulically Actuated Quadruped Bionic Robot[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(5): 32-36, 45.
- [17] 杨智, 张伟, 武海明, 等. 四足机器人步态时间顺序分析[J]. 机械与电子, 2013, 31(10): 64-67.
YANG Zhi, ZHANG Wei, WU Haiming, et al. Time Order Analysis of Gait for Quadruped Robot[J]. Machinery & Electronics, 2013, 31(10): 64-67.
- [18] MA J W, LIU Y, ZANG S F, et al. Robot Path Planning Based on Genetic Algorithm Fused with Continuous Bezier Optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2020, 2020: 9813040.
- [19] 赵锐. 四足机器人步态规划及其优化方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHAO Rui. The Gait Planning and Optimization of Quadruped Robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

(责任编辑: 姜利民)