•机械工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400233

本刊网刊

基于生物运动特性的四足机器人仿生轨迹规划与实现

陈久朋[1,2,3],李春磊[1],伞红军[1,2*],何朝银[1],罗缨栾[1]

(1.昆明理工大学 机电工程学院,云南 昆明 650500;2.云南省先进装备智能制造技术重点实验室,云南 昆明 650500;
3.玉溪新天力农业装备制造有限公司,云南 玉溪 652600)

摘　要:为解决四足机器人行走不稳定和打滑问题,通常从仿生和轨迹规划两个层面综合考虑,进行有效控制。但传统的轨迹规划方法仅聚焦于足端的零冲击特性,忽略了结构层面的稳定布置和仿生层面的运动控制。因此,为了提高四足机器人运动的稳定性,本文以德国牧羊犬为仿生蓝本,基于连杆机构实现了机器人在结构层面的仿生,利用二段式单腿结构推导了单腿的逆运动学模型。考虑到四足哺乳动物在运动工程中的抬腿后摆和落腿回缩特性,在足端轨迹的起止位置设置了抬腿后摆段和落腿回缩段,并引入边界条件,提出了一种新型五次多项式足端零冲击轨迹。与传统的三次多项式足端轨迹、复合摆线足端轨迹与五次多项式足端轨迹在轨迹轮廓、速度和加速度层面的性能进行对比,结果表明所提五次多项式足端轨迹不仅具备仿生特性和足端零冲击特性,且具有较大的避障空间。为验证所提足端轨迹规划的正确性,采用四足哺乳动物能耗最小的对角步态作为规划步态,搭建了ADAMS-Simulink联合仿真平台,实现了单腿和整机的轨迹规划和步态控制。仿真实验表明,采用3种足端轨迹规划方法均能实现机器人稳定行走,但五次多项式足端轨迹在10 s内的实际行走位移更接近理论行走位移(500 mm),复合摆线轨迹和三次多项式足端轨迹打滑较为明显。单腿轨迹跟踪实验和整机步态规划实验证明,除装配和不可避免的地面打滑等因素影响外,四足机器人能按照预定的五次多项式足端轨迹行走且运动过程平稳,验证了所提足端轨迹的正确性。

关键词:四足机器人;轨迹规划;德国牧羊犬;五次多项式足端轨迹;trot步态

中图分类号:TH113.2　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0330-14

四足哺乳动物经过数百万年的自然选择,进化出了最优的骨骼特征和运动控制模式,可在山地、丘陵、雪地等复杂地形或地表类型行走。模仿和借鉴生物运动特性,可为工程实践和开发提供积极的意义[1-3]。随着传感技术和智能控制的进步,人们对四足机器人的控制提出了更高的要求。常用的控制方法有基于模型的控制方法[4]、基于中枢模式发生器的控制方法[5]、基于弹簧倒立摆的控制方法[6]以及基于足端轨迹规划的方法[7]。

在机器人逆运动学的实用化和发展过程中,轨迹规划为研究机器人结构设计合理性和运动控制可行性提供了重要的参考。目前,该方法仍然是四足机器人研究的主要方向。四足机器人足端轨迹规划常用的函数有摆线方程[8]、复合摆线轨迹[9]、改进复合摆线轨迹[10]、椭圆轨迹[11]、三次多项式轨迹[12]等。陈久朋等[13]在复合摆线的基础上,提出过渡段变周期控制,实现了机器人行走时的变速度控制和定速度控制。为了将笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划相结合,魏顺祥等[14]提出了一种新型仿生足端轨迹,使用等间距点、第二类切比雪夫点和等时点3种不同方式对该足端轨迹进行离散采样并确定插补点位置,将插补点映射到关节空间,进行机器人关节控制。Hua等[15]在Scalf机器人上采用五次多项式和四次多项式组成的足端轨迹进行实验。马慧姝等[16]利用视频分析技术提取生物犬类骨骼三维数据,采用三次B样条曲线和三次贝塞尔曲线对足端点进行轨迹拟合,提出了基于

收稿日期:2024-04-03　　**修回日期:**2024-06-09　　**网络出版日期:**2024-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52565057);云南省重大科技专项计划(202502AC080001);云南省科技厅科技计划项目-青年基金(202301AU070059);云南省"彩云博士后"创新项目;昆明理工大学人才培养项目(KKZ3202301041)

作者简介:陈久朋(1993—),男,副教授,博士. 研究方向:机器人技术及应用. E-mail:18314490225@163.com

* **通信作者:**伞红军,副教授,E-mail:sanhjun@163.com

哺乳动物运动轨迹的仿生步态策略，证明了三次B样条曲线在轨迹拟合方面具有更高的精度。雷静桃等[17]对比了摆线轨迹、正弦轨迹和直线轨迹的行走能耗，其中复合摆线速度和加速度具备零冲击特性，证明了复合摆线在足端轨迹规划中的合理性。张秋实[18]为了使足端轨迹实用化，将笛卡尔空间轨迹规划与关节空间规划结合，利用粒子群算法对关节空间中的驱动角进行详细优化，获得了较优的足端轨迹。Chen 等[19]采用分段插值方法将复合摆线应用于电驱动单腿模型，通过激光跟踪仪实时采集足端空间点，该方法不仅提高了机器人的运行效率，还获得了较高的位置精度。Yuan 等[20]改进了摆线轨迹，在摆动相中间加了一条水平线，增强了足端的跨障能力。周坤等[21]利用五次多项式规划了摆动腿跨步阶段的足端轨迹，并在四足机器人上进行了实验验证。

虽然四足机器人在结构设计和运动控制上均取得了较大进展，但还有许多问题需要解决，如结构设计上的合理性问题、运动控制的仿生性问题。四足哺乳动物在实际运动过程中的足端轨迹普遍存在后摆和回缩特性，该特性能保证运动的连续性并减小受地面的冲击[22–23]。为了使机器人的足端轨迹具备仿生特性，Kim 等[24]提出了一种椭圆轨迹来模拟动物在起足和落足时的后摆和回缩特性，并采用遗传算法在能耗和稳定性层面对足端轨迹进行了优化。刘永超[25]根据猎豹运动轨迹中的落腿回缩和抬腿后摆现象提出了改进的椭圆轨迹和修正的摆线足端轨迹两种机器人奔跑的足端轨迹，证明了修正的摆线足端轨迹更适合奔跑。一些学者采用智能算法提高拟合轨迹与真实轨迹的接近程度，这些算法也为机器人足端轨迹的研究做出了重要贡献[26–28]。

通过以上分析可知，尽管四足机器人足端轨迹一直被研究，但运动的仿生性和足端行走的冲击等问题并未完全解决，对足端轨迹的探索依然是目前研究的重点。本文借鉴四足哺乳动物的运动特性，在充分考虑仿生特性的基础上，引入抬腿后摆段和落腿回缩段，提出了一种新型足端轨迹，通过仿真分析、对比验证等多种方式证明了所提算法的有效性，最后在课题组设计的实验样机上开展了运动控制研究。

1　机构描述

德国牧羊犬肌肉强健富有韧性，骨骼坚硬结实，动作敏捷，聪明易训，适合多种复杂的工作环境，经常被安排参加各种不同的任务，成为最受欢迎的犬类动物之一[29]。本文设计思路源于德国牧羊犬，以德国牧羊犬标准公犬身高 625 mm 为参考值，依据德国牧羊犬研究中心发布的相关身体比例数据，获得四足机器人结构参数，如表 1 所示。

表 1　四足机器人结构参数

Tab. 1　Structure parameters of quadruped robot

结构参数	设计值
机身长度/mm	790
机身宽度/mm	440
机身高度/mm	418
整机质量/kg	37.5
大腿长度/mm	200
小腿长度/mm	200
髋关节初始角度/(°)	−120
膝关节初始角度/(°)	60

为了便于后续机构设计及对步态进行规划，需要将犬类腿部简化，常见的腿部构造有三段式结构和二段式结构[30]。二段式腿部结构比较简单，在众多科研机构的研究中较为常用。图 1 为二段式腿部结构。该结构的明显特征是缺乏踝关节自由度，仅保留髋关节自由度和膝关节自由度。

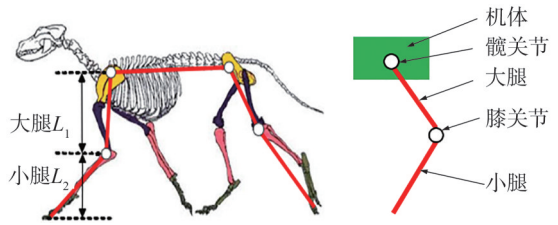


图 1　二段式腿部结构

Fig. 1　Two-stage leg structure

根据表 1 的相关数据，采用二段式腿部构型，在机体上布置电机、控制器、驱动器和相应传感器，搭建了四足机器人样机，如图 2 所示。整机采用前肘后膝式关节配置，大腿和小腿间的运动是通过连杆实现传递的，电机等惯量较大的部件均集成到机体上，腿部具有较小的惯量，行走过程中的稳定性得到了较大的提高。

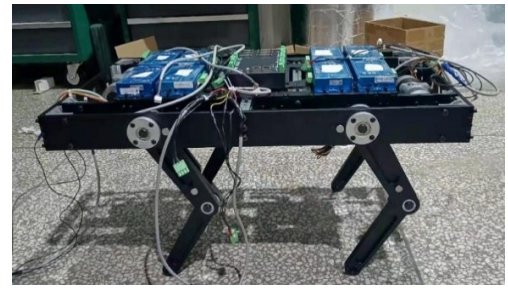


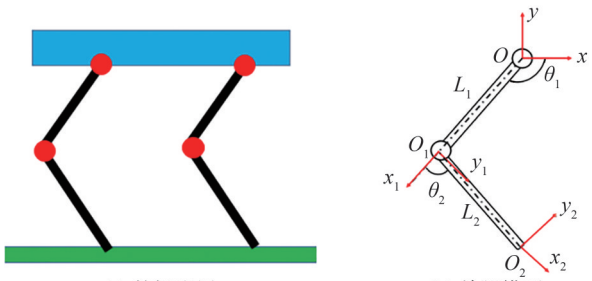
图 2　四足机器人样机

Fig. 2　Quadruped robot prototype

2　腿部运动学分析

对四足机器人腿部的控制，首先需获得髋关节和膝关节的驱动角度，再以脉冲的方式进行控制。二段

式腿部结构的髋关节和膝关节角位移很容易通过逆运动学方程获得。本文设计的连杆腿型在二段式结构基础上进行了扩展，其本质还是二段式腿部结构，因此，可先获得二段式腿部结构的逆运动学模型，进而推导本文腿型的运动学模型。图 3 为四足机器人机构简图。图 3 中，θ_1 为髋关节角位移，θ_2 为膝关节角位移，L_1 为大腿长度，L_2 为小腿长度，O 为髋关节中心点，O_1 为膝关节中心点，O_2 为足端，O-xy、O_1-x_1y_1 和 O_2-x_2y_2 分别为在 O、O_1、O_2 处建立的坐标系。处于初始位置时，θ_1=120°，θ_2=60°。



(a) 整机配置 (b) 单腿模型

图3 四足机器人机构简图

Fig. 3 Schematic diagram of quadruped robot mechanism

以左后（LH）腿为例对机器人单腿进行运动学分析。将 x 轴与大腿、x_1 轴与小腿间的夹角定义为关节驱动角；小腿绕点 O_1 逆时针转动定义为正值。根据图 3 可得二段式单腿的髋关节和膝关节角位移分别为：

$$\theta_1 = 2\arctan\left(\frac{B' - \sqrt{A'^2 + B'^2 + C'^2}}{A' + C'}\right) \tag{1}$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{y_{_feet} - L_1 \sin\theta_2}{L_2}\right) - \theta_1 \tag{2}$$

式（1）、（2）中：A'、B'、C' 为中间变量，$A' = 2L_1 x_{_feet}$，$B' = 2L_1 y_{_feet}$，$C' = x_{_feet} + y_{_feet} + L_1 - L_2$；$x_{_feet}$ 为足端在水平方向的位移；$y_{_feet}$ 为足端在竖直方向的位移。

本文连杆机构腿部在形式上与二段式腿部结构类似，图 4 为左后腿的三维模型，图 5 为左后腿机构简图。图 5 中：a、b、a_1、b_1、L_1 和 L_2 均为杆机构参数，a 为 111.5 mm，b 为 165.0 mm，a_1 为 65.0 mm，b_1 为 130.0 mm，L_1 为 200.0 mm，L_2 为 200.0 mm；σ 为 AB 与 AC 的夹角，φ 为 BD 与 BE 的夹角，ε 为 BD 与 DC 的夹角，α 为 GH 与 GB 的夹角；g_i 为 GH 的长度，d_i 为 AC 的长度，f_i 为 BD 的长度，c 为 DE 的长度；点 F 所处的位置是初始状态位置，点 F' 所处位置是单腿摆动到当前时刻的状态。

当单腿处于初始位置时，髋关节角位移 θ_1 为 120°，膝关节角位移 θ_2 为 60°。点 C 为大腿电机放置位置，点 H 为小腿电机放置位置。在髋关节处建立坐标系 B-x_0y_0，θ_h 为大腿电机驱动角度，θ_k 为小腿电机驱动角度，实体模型大腿由连杆 AB 和连杆 BE 组成，两者间

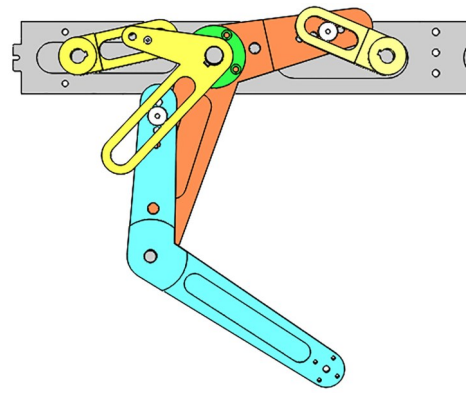


图4 左后腿的三维模型

Fig. 4 3D model of the left hind leg

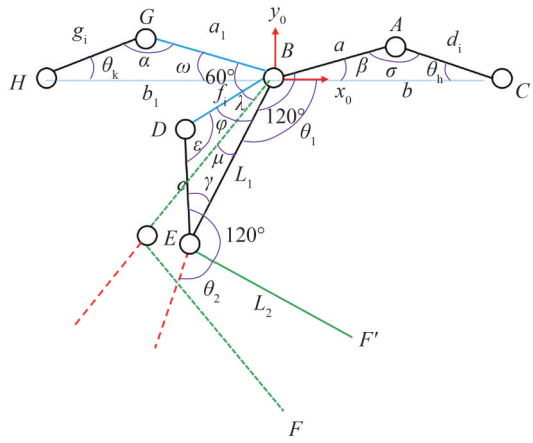


图5 左后腿机构简图

Fig. 5 Schematic diagram of left hind leg mechanism

的夹角为 120°，其中 BE 等效于简化模型中的大腿长度 L_1。实体模型小腿由连杆 DE 和连杆 EF' 组成，两者的夹角为 120°，其中 EF' 等效于简化模型中的小腿长度 L_2。大腿主要靠大腿曲柄 AC 驱动，大腿髋关节角位移 θ_1 和膝关节角位移 θ_2 与简化模型定义一致，设定图示时刻大腿摆动量为 μ，小腿摆动量为 λ，通过几何关系容易证明 $\mu=\beta$，$\lambda=\gamma$，因此以 β 为大腿摆动量，以 γ 为小腿摆动量，$\angle DEF'$=120°，$\angle ABE$=120°，$\angle GBD$=60°。

根据图 5 所示的几何关系，利用式（1）、（2）获得的相关关系，可得大腿摆动量 β 和小腿摆动量 γ 分别为：

$$\beta = \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \tag{3}$$

$$\gamma = \theta_2 - \frac{\pi}{3} \tag{4}$$

在 $\triangle ABC$ 中，根据正弦定理可得：

$$\frac{a}{\sin\theta_h} = \frac{b}{\sin\sigma} = \frac{b}{\sin(\theta_h + \beta)} \tag{5}$$

由式（5）可得如下关系式：

$$\theta_h = \arctan\left(\frac{a\sin\beta}{b - a\cos\beta}\right) \tag{6}$$

考虑电机转向，修正大腿电机驱动角度为：

$$\theta_h=-\arctan\left(\frac{a\sin\beta}{b-a\cos\beta}\right) \tag{7}$$

在△BDE中，根据正弦定理可得：

$$\frac{c}{\sin\varphi}=\frac{L_1}{\sin\varepsilon}=\frac{L_1}{\sin(\varphi+\gamma)} \tag{8}$$

由式(8)可得如下关系式：

$$\varphi=\arctan\left(\frac{c\sin\gamma}{L_1-c\cos\gamma}\right) \tag{9}$$

根据几何关系可以得出连杆GB的摆动量ω为：

$$\omega=-\theta_1+\varphi-\frac{2}{3}\pi \tag{10}$$

在△HGB中，根据正弦定理可得：

$$\frac{a_1}{\sin\theta_k}=\frac{b_1}{\sin\alpha}=\frac{b_1}{\sin(\theta_k+\omega)} \tag{11}$$

由式(11)可得如下关系式：

$$\theta_k=\arctan\left(\frac{a_1\sin\omega}{b_1-a_1\cos\omega}\right) \tag{12}$$

将式(3)、(10)分别代入式(7)、(12)，LH腿的逆运动学模型可表示为：

$$\theta_h=-\arctan\left(\frac{a\sin\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)}{b-a\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)}\right) \tag{13}$$

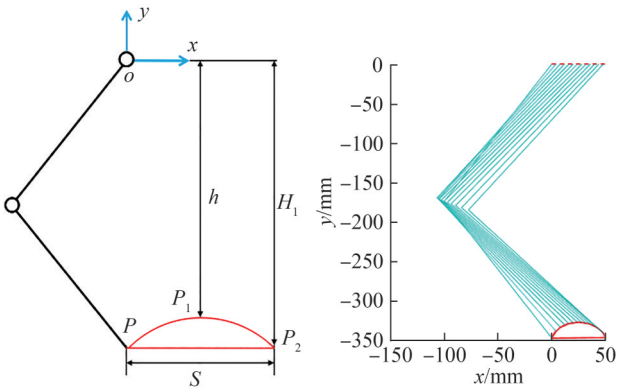
$$\theta_k=\arctan\left(\frac{a_1\sin\left(-\theta_1-\frac{2}{3}\pi+\varphi\right)}{b_1-a_1\cos\left(-\theta_1-\frac{2}{3}\pi+\varphi\right)}\right) \tag{14}$$

控制大腿电机和小腿电机的转动角度，可以实现单腿的复杂运动。

3　仿生轨迹规划与实现

四足机器人按预定轨迹行走的整体控制思路如下：先规划单腿模型的足端轨迹，然后引入每个腿之间的相位差即可实现不同步态的行走。单腿轨迹在一个周期内主要分为摆动相轨迹和支撑相轨迹，不同步态的占空比不同，导致支撑相和摆动相的时长也不同，每条腿按照相序行走即可实现机体的移动。四足机器人的单腿轨迹决定其运行速度和越障能力。图6为足端轨迹示意图。

图6中，弧$P\rightarrow P_2$为足端摆动相轨迹，直线$P_2\rightarrow P$为足端支撑相轨迹，S为迈步步长，它决定了机器人行走的速度，H_1为初始时刻髋关节与足端垂直高度，h为到达摆动相中点P_1时，足端与髋关节的垂直距离。对机器人的轨迹规划实际上是规划迈步步长S和抬腿高度H，$H=H_1-h$，抬腿高度决定了机器人的越障能力。



(a) 足端轨迹规划　　(b) 腿部变化过程

图6　足端轨迹示意图

Fig. 6　Foot trajectory diagram

3.1　足端零冲击轨迹规划模型搭建

有学者对四足哺乳动物进行了研究，发现四足哺乳运动普遍存在一种运动规律，即四足生物足端回缩和后摆特征，如图7所示。由图7可见，无论是犬类还是豹子等哺乳动物，在行走或奔跑时都存在这种现象。文献[18,24]对这个现象进行了解释和描述。这种运动形式极大地减少了足端与地面的冲击，保证了运动的稳定性。为了借鉴生物运动特性，同时保证足端轨迹在抬腿和落腿瞬间达到零冲击的效果，在前进方向的轨迹中引入抬腿后摆段和落腿回缩段，以提高四足机器人运动的稳定性。

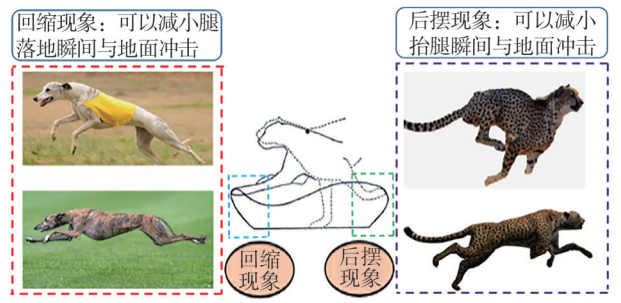


图7　四足生物足端回缩和后摆现象

Fig. 7　Phenomenon of foot end retraction and backswing in quadrupeds

犬类动物最常见的中等速度行走对角(trot)步态如图8所示，该行走模式是在一个周期内摆动相和支撑相相等。对角腿交替运行实现了身体的移动运动。文献[30]证明了中等速度行走的步态能耗最小，这也是自然界哺乳动物采用该方式行走的重要原因。为不失一般性，本文重点对trot步态进行规划。

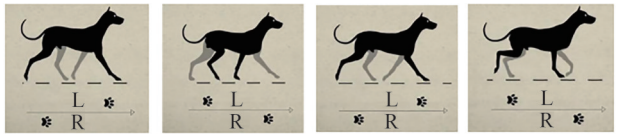


图8　Trot步态

Fig. 8　Trot gait

无论是摆动相还是支撑相均可分解为x方向位移和y方向位移。本文提出的足端轨迹在x轴和y轴方向的仿生轨迹分别如图9、10所示。图9、10中，t_0为初始时刻，t_1为后摆结束时刻，t_2为前进结束时刻，t_f为落腿回缩时刻，t_w为摆动相处于中间时刻，T为一个周期，S_f为落腿回缩后摆动相在水平方向的位移，S_w为支撑相前进的距离，S_1为摆动相抬腿后摆段位移，S_2为后摆结束后摆动相前进的位移。首先规划x方向位移，在$[0,t_1]$内抬腿并后摆了S_1，在$[t_1,t_2]$内正常向前运动，在$[t_2,t_f]$内足端开始下落并伴随着回缩现象发生。在$[t_f, T]$内，机器人足端与地面接触并推动机身继续向前运动，此时机身相对于足端的位移可等效为足端相对于机身的位移，机器人处于支撑相阶段。

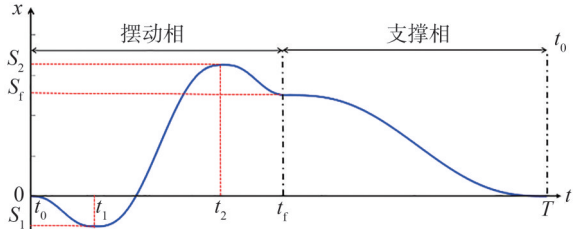


图9 x轴方向的仿生轨迹

Fig. 9 Bionic trajectory in x-axis direction

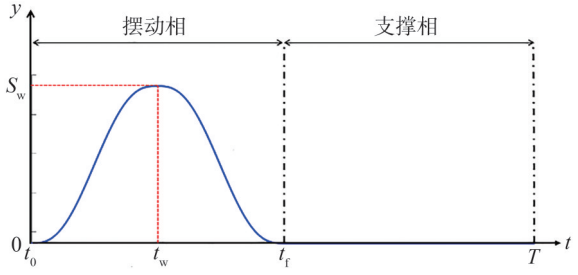


图10 y轴方向的仿生轨迹

Fig. 10 Bionic trajectory in y-axis direction

四足机器人x方向的跨步决定了其运行速度，对x方向各段均采用五次多项式进行拟合，式(15)为x方向的位移方程。

$$\begin{cases} x_{sw1}=A_1(t-t_0)^5-A_2(t-t_0)^4+A_3(t-t_0)^3+ \\ \quad C_1(t-t_0)^2+C_2(t-t_0)+C_3, t_0\le t\le t_1; \\ x_{sw2}=A_4(t-t_1)^5-A_5(t-t_1)^4+A_6(t-t_1)^3+ \\ \quad A_7(t-t_1)^2+C_4(t-t_1)+C_5, t_0\le t\le t_1; \\ x_{sw3}=A_8(t-t_2)^5-A_9(t-t_2)^4+A_{10}(t-t_2)^3+ \\ \quad A_{11}(t-t_2)^2+C_6(t-t_2)+C_7, t_2\le t\le t_f; \\ x_{st}=A_{12}(t-t_f)^5-A_{13}(t-t_f)^4+A_{14}(t-t_f)^3+ \\ \quad A_{15}(t-t_f)^2+C_8(t-t_f)+C_9, t_f\le t\le T; \end{cases} \tag{15}$$

式中：A_1～A_{15}、C_1～C_9为五次多项式系数；x_{sw1}、x_{sw2}、x_{sw3}、x_{st}分别为抬腿后摆段、向前跨步段、落腿回缩段、支撑段沿x方向的位移，下标sw表示摆动相，st表示支撑相。

生物犬具备缓冲机制，可根据外界环境减小足端与地面的冲击。机器人为保证自身行走稳定性，需要保证抬腿和落腿的瞬间速度和加速度为0，给定x轴方向的边界条件为：

$$\begin{cases} x_{sw1}(0)=0, \\ \dot{x}_{sw1}(0)=0, \\ \ddot{x}_{sw1}(0)=0, \\ x_{sw1}(t_1)=x_{sw2}(t_1)=S_1, \\ \dot{x}_{sw1}(t_1)=\dot{x}_{sw2}(t_1), \\ \ddot{x}_{sw1}(t_1)=\ddot{x}_{sw2}(t_1), \\ x_{sw2}(t_2)=x_{sw3}(t_2)=S_2, \\ \dot{x}_{sw2}(t_2)=\dot{x}_{sw3}(t_2), \\ \ddot{x}_{sw2}(t_2)=\ddot{x}_{sw3}(t_2), \\ x_{sw3}(t_f)=x_{st}(t_f)=S, \\ \dot{x}_{sw3}(t_f)=\dot{x}_{st}(t_f)=0, \\ \ddot{x}_{sw3}(t_f)=\ddot{x}_{st}(t_f)=0, \\ x_{st}(T)=0, \\ \dot{x}_{st}(T)=0, \\ \ddot{x}_{st}(T)=0 \end{cases} \tag{16}$$

将式(16)代入式(15)并对式(15)求1阶导和2阶导得到速度和加速度方程。其中，x方向的位移方程为：

$$\begin{cases} x_{sw1}=A_1(t-t_0)^5-A_2(t-t_0)^4+A_3(t-t_0)^3, t_0\le t\le t_1; \\ x_{sw2}=A_4(t-t_1)^5-A_5(t-t_1)^4+A_6(t-t_1)^3+ \\ \quad A_7(t-t_1)^2+S_1, t_1\le t\le t_2; \\ x_{sw3}=A_8(t-t_2)^5-A_9(t-t_2)^4+A_{10}(t-t_2)^3+ \\ \quad A_{11}(t-t_2)^2+S_2, t_2\le t\le t_f; \\ x_{st}=A_{12}(t-t_f)^5-A_{13}(t-t_f)^4+A_{14}(t-t_f)^3+ \\ \quad A_{15}(t-t_f)^2+S_f, t_f\le t\le T \end{cases} \tag{17}$$

式中：

$$A_1=[12S_1+a_1(t_1-t_0)^2]/2(t_1-t_0)^5,$$
$$A_2=[30S_1+2a_1(t_1-t_0)^2]/2(t_1-t_0)^4,$$
$$A_3=[20S_1+a_1(t_1-t_0)^2]/2(t_1-t_0)^3,$$
$$A_4=[12S_2-12S_1-(a_1-a_2)(t_2-t_1)^2]/2(t_2-t_1)^5,$$
$$A_5=[30S_1-30S_2-(3a_1-2a_2)(t_2-t_1)^2]/2(t_2-t_1)^4,$$
$$A_6=[20S_2-20S_1-(3a_1-a_2)(t_2-t_1)^2]/2(t_2-t_1)^3,$$
$$A_7=a_1/2,$$
$$A_8=[12S_f-12S_2-a_2(t_f-t_2)^2]/2(t_f-t_2)^5,$$
$$A_9=[30S_2-30S_f+3a_2(t_f-t_2)^2]/2(t_f-t_2)^4,$$
$$A_{10}=[20S_f-20S_2-3a_2(t_f-t_2)^2]/2(t_f-t_2)^3,$$
$$A_{11}=a_2/2,$$
$$A_{12}=[12S_w-12S_f-a_2(T-t_f)^2]/2(T-t_f)^5,$$
$$A_{13}=[30S_f-30S_w+3a_2(T-t_f)^2]/2(T-t_f)^4,$$
$$A_{14}=[20S_w-20S_f-3a_3(T-t_f)^2]/2(T-t_f)^3,$$
$$A_{15}=a_3/2;$$

其中，a_1、a_2和a_3为多项式求解常数。

四足机器人主要通过y方向上的位移完成抬腿动

作，从而实现腿部离地并跨越障碍物。y方向上的具体轨迹规划为：在$[t_0,t_w]$内，机器人足端摆动到最高点；在$[t_w,t_f]$内，机器人足端由最高点摆动到与地面接触；在$[t_f,T]$内，机器人处于支撑相并向前运动。由于髋关节在竖直方向的波动量较小，可认为是一个常数，因此给定机器人单腿在y方向上的位移表达式为：

$$\begin{cases} y_{sw1}=-H_1+B_1(t-t_1)^5+B_2(t-t_1)^4+B_3(t-t_1)^3+ \\ \quad D_1(t-t_1)^2+D_2(t-t_1)+D_3, t_0\le t\le t_w; \\ y_{sw2}=-H_1+B_4(t-t_f)^5+B_5(t-t_f)^4+B_6(t-t_f)^3+ \\ \quad B_7(t-t_f)^2+D_4(t-t_1)+D_5, t_1\le t\le t_f; \\ y_{st}=-H_1, t\ge t_f \end{cases} \tag{18}$$

式中，B_1～B_7、D_1～D_5均为五次多项式系数，y_{sw1}、y_{sw2}、y_{st}分别为摆动相前半段、摆动相后半段、支撑段在y轴的分量。

y方向的边界条件为：

$$\begin{cases} y_{sw1}(0)=-H_1, \\ \dot{y}_{sw1}(0)=0, \\ \ddot{y}_{sw1}(0)=0, \\ y_{sw1}(t_w)=y_{sw2}(t_w)=-h, \\ \dot{y}_{sw1}(t_w)=\dot{y}_{sw2}(t_w), \\ \ddot{y}_{sw1}(t_w)=\ddot{y}_{sw2}(t_w), \\ y_{sw2}(t_f)=-H_1, \\ \dot{y}_{sw2}(t_f)=0, \\ \ddot{y}_{sw2}(t_f)=0 \end{cases} \tag{19}$$

将式(19)代入式(18)并对式(18)求一阶导和二阶导得到速度和加速度方程，可得y方向上的位移表达式为：

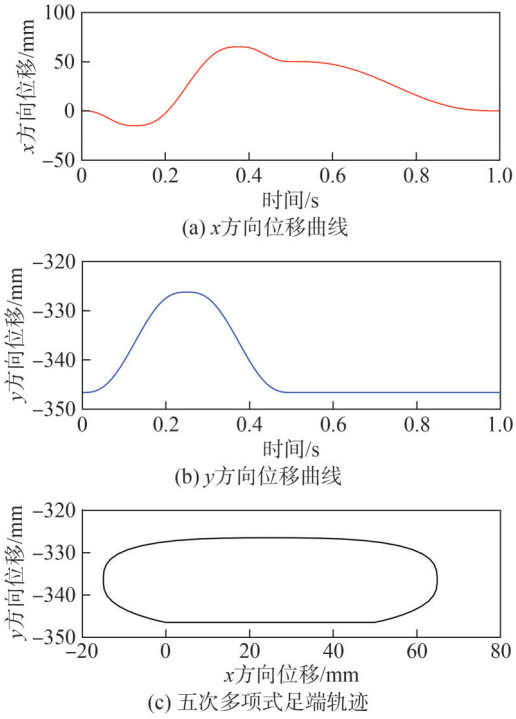
$$\begin{cases} y_{sw1}=-H_1+B_1(t-t_1)^5-B_2(t-t_1)^4+ \\ \quad B_3(t-t_1)^3, t_0\le t\le t_w; \\ y_{sw2}=-H_1+B_4(t-t_f)^5-B_5(t-t_f)^4+ \\ \quad B_6(t-t_f)^3+B_7(t-t_f), t_1\le t\le t_f; \\ y_{st}=-H_1, t\ge t_f \end{cases} \tag{20}$$

式中：

$$\begin{aligned} B_1&=[12(H_1-h)+b_1(t_w-t_0)^2]/2(t_w-t_0)^5, \\ B_2&=[30(H_1-h)+2b_1(t_w-t_0)^2]/2(t_w-t_0)^4, \\ B_3&=[20(H_1-h)+b_1(t_w-t_0)^2]/2(t_w-t_0)^3, \\ B_4&=[-12(H_1-h)-b_1(t_f-t_w)^2]/2(t_f-t_w)^5, \\ B_5&=[30(H_1-h)+3b_1(t_f-t_w)^2]/2(t_f-t_w)^4, \\ B_6&=[-20(H_1-h)-3b_1(t_f-t_w)^2]/2(t_f-t_w)^3, \\ B_7&=b_1/2; \end{aligned}$$

其中，b_1为多项式求解常数。

给定一组参数：S_1=15 mm，S_2=65 mm，S_f=S=50 mm，$h=(200\sqrt{3}-20)$ mm，$H_1=200\sqrt{3}$ mm，S_w=0，t_0=0，$t_1=T/8$，$t_2=3T/8$，$t_w=T/4$，$t_f=T/2$，T=1 s，$a_1=a_2=a_3$=0，b_1=−20。图 11 为五次多项式足端零冲击轨迹。将所给参数代入给定的五次多项式足端零冲击轨迹方程，可得图 11(c)的轨迹曲线。由图 11(a)、(b)可见，x和y方向位移曲线均平滑无突变，x方向上的位移变化为先增大后减小，符合机器人前进运动的需求。y方向的位移在摆动相呈先增大后减小的函数关系，在支撑相保持不变，严格符合竖直方向运动的需求。



(a) x方向位移曲线
(b) y方向位移曲线
(c) 五次多项式足端轨迹

图 11　五次多项式足端零冲击轨迹

Fig. 11　Quintic polynomial foot zero impact trajectory

3.2　足端轨迹的对比分析

为验证所提五次多项式零冲击足端轨迹的优劣，采用两种被广泛使用的足端轨迹进行对比分析，式(21)为目前科研机构常用的复合摆线足端轨迹方程，式(22)为三次多项式足端轨迹方程。

$$\begin{cases} x_{sw}=S(2t/T-1/2\pi)\times\sin(4\pi t/T), 0\le t\le T/2; \\ x_{st}=-S(2t/T-1/2\pi)\times\sin(4\pi t/T)+S, T/2\le t\le T; \\ y_{sw1}=2(H_1-h)(2t/T-1/4\pi)\times \\ \quad \sin(8\pi t/T)-H_1, 0\le t\le T/4; \\ y_{sw2}=2(h-H_1)(2t/T-1/4\pi)\times \\ \quad \sin(8\pi t/T)+H_1-2h, T/4\le t\le T/2; \\ y_{st}=-H_1, T/2\le t\le T \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} x_{sw}=-16St^3/T^3+12St^2/T^2+S, 0\le t\le T/2; \\ x_{st}=16St^3/T^3-36St^2/T^2+24St/T-4S, T/2\le t\le T; \\ y_{sw1}=-128(H_1-h)t^3/T^3+ \\ \quad 48(H_1-h)t^2/T^2-H_1, 0\le t\le T/4; \\ y_{sw2}=128(H_1-h)t^3/T^3-144(H_1-h)t^2/T^2+ \\ \quad 48(H_1-h)/T+4h-5H_1, T/4\le t\le T/2; \\ y_{st}=-H_1, T/2\le t\le T \end{cases} \tag{22}$$

式(21)、(22)中，x_{sw}为摆动段沿x方向的位移。

给定相同的轨迹参数S=50 mm，T=1 s，h=(200$\sqrt{3}$−20) mm，H_1=200$\sqrt{3}$ mm。图 12 为 3 种足端轨迹曲线，描绘了一个周期内采用 3 种轨迹绘制的足端运动轨迹。从宏观上看，3 种轨迹均能实现机器人特定的运动，其中，三次多项式足端轨迹在摆动空间位移最小，而采用五次多项式足端轨迹在空间内摆动的位移最大，复合摆线的摆动位移居中。从避障角度来说，腿部在空间内的摆动在一定程度上能实现避障。从仿生特点来说，三次多项式轨迹和复合摆线轨迹虽然能实现空间轨迹的运动，但未考虑四足哺乳动物普遍存在的抬腿后摆和落腿回缩现象，而在摆动相轨迹中增加了后摆段和回缩段得到的五次多项式足端轨迹实现了仿生。

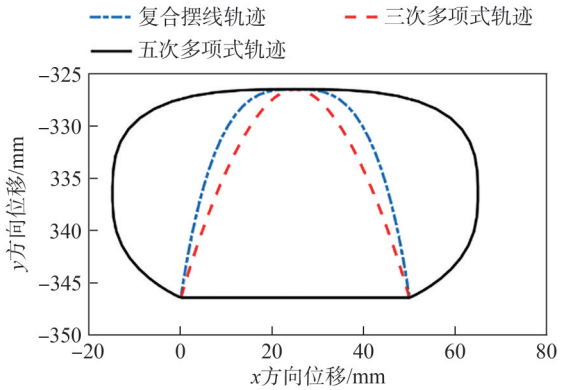


图 12　3 种足端轨迹曲线

Fig. 12　Three kinds of foot trajectory curves

图 13、14 分别为水平、竖直方向上 3 种轨迹的速度对比。由图 13、14 可见，机器人单腿在抬腿瞬间和落腿瞬间均实现了速度为 0，减小了足端与地面的冲击，3 种速度曲线平滑无突变。在不考虑加速度影响的情况下，3 种轨迹均能够实现在水平方向和竖直方向的零冲击。

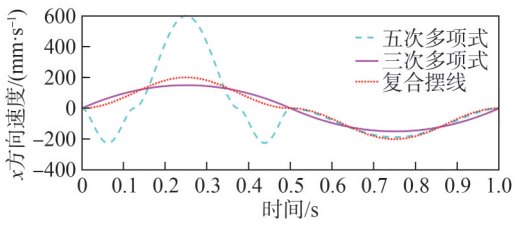


图 13　水平方向上 3 种轨迹的速度对比

Fig. 13　Comparison of velocities of three trajectories in the horizontal direction

从加速度层面考虑，竖直方向上 3 种轨迹的加速度对比如图 15 所示。由于三次多项式轨迹的加速度曲线是直线形式，不可能获得平滑的加速度曲线，尽管通过规划可达到抬腿和落腿时刻加速度值为 0，但这并不是一种理想的足端轨迹。

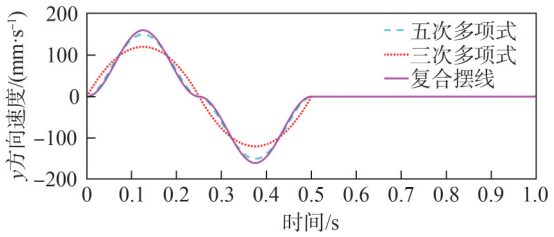


图 14　竖直方向上 3 种轨迹的速度对比

Fig. 14　Comparison of velocities of three trajectories in the vertical direction

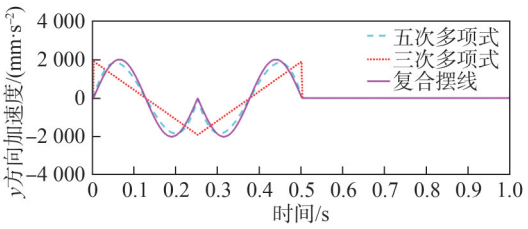


图 15　竖直方向上 3 种轨迹的加速度对比

Fig. 15　Comparison of accelerations of three trajectories in the vertical direction

复合摆线与本文所提轨迹在y方向具有相同的变化趋势，且水平方向的加速度曲线平滑，两种轨迹均符合设定要求，但是复合摆线无法实现抬腿后摆和落腿回缩段的拟合，不符合生物运动特性。五次多项式拟合使得足端能够更接近仿生轨迹，具备二阶导函数，速度和加速度曲线均不是固定斜率或固定值，能实现速度和加速度在抬腿和落腿瞬间为 0，是一种较为理想的足端轨迹，符合生物减振运动。

4　仿生轨迹规划实现

4.1　单腿模块的搭建

采用 SolidWorks 和 Sim−Mechanics 软件联合搭建的单腿控制系统如图 16 所示。该控制系统主要由单腿物理样机模块、控制模块和传感检测模块组成，其中，传感检测模块可实时采集关节角位移、速度、加速度及力矩信号，并通过示波器实时显示。图 17、18 分别为髋、膝关节驱动角。由图 17、18 可见，无论是髋关节角度驱动还是膝关节角度驱动，3 种轨迹角度变化都有着非常相似的特征，3 条转角驱动曲线非常平滑且无突变，证明了 3 种足端轨迹规划在实际四足机器人的行走中是可行的。图 19、20 分别为髋、膝关节角速度。由图 19、20 可见，3 种足端轨迹的髋、膝关节角速度曲线平滑无突变，从髋关节角速度可以看出五次多项式足端零冲击轨迹虽然在速度上变化较大，对电机特性要求较高，但目前市面上的电机大多能满足要求。综上所述，本文设计的足端轨迹与复合摆线和三次多项式足端轨迹均能实现机器人的稳定行走，但从仿生特性来说，五次多项式足端零冲击轨迹更符合生物仿生特性。

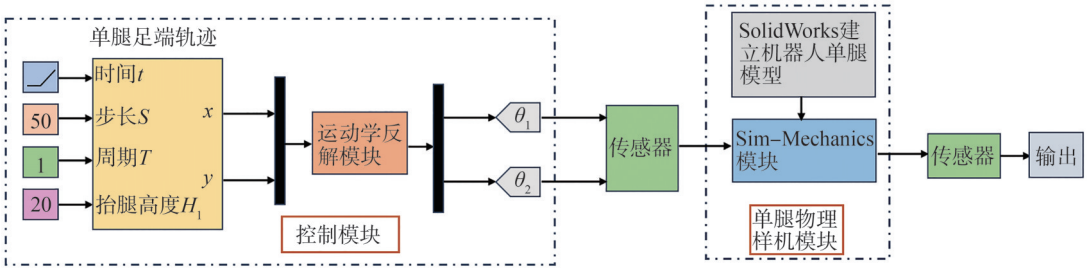


图16　单腿控制系统

Fig. 16　Single leg control system

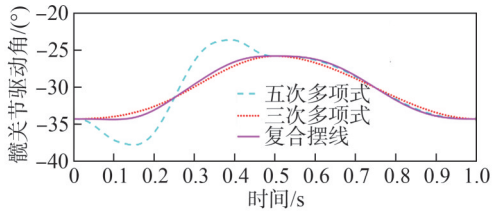


图17　髋关节驱动角

Fig. 17　Hip joint driving angle

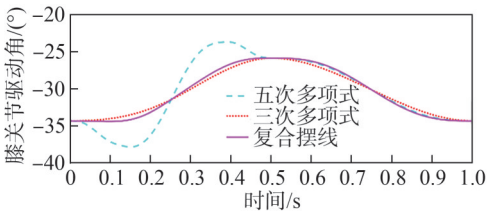


图18　膝关节驱动角

Fig. 18　Knee joint driving angle

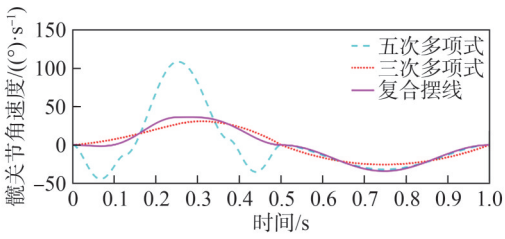


图19　髋关节角速度

Fig. 19　Hip joint angular velocity

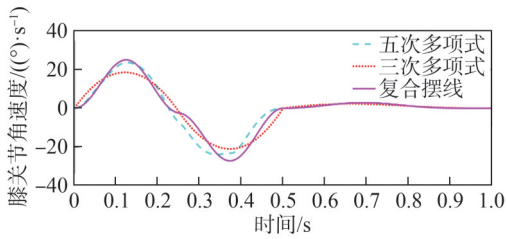


图20　膝关节角速度

Fig. 20　Knee joint angular velocity

4.2　单腿运动控制效果

ADAMS 是一种主要用于多体动力学分析的软件，具有强大的机械系统建模能力；Simulink 拥有强大的控制系统建模功能。采用 ADAMS 和 Simulink 联合仿真的方式不仅能实现复杂机械系统的搭建，还能实现复杂的控制算法。图 21 为 LH 腿 ADAMS-Simulink 联合仿真平台。

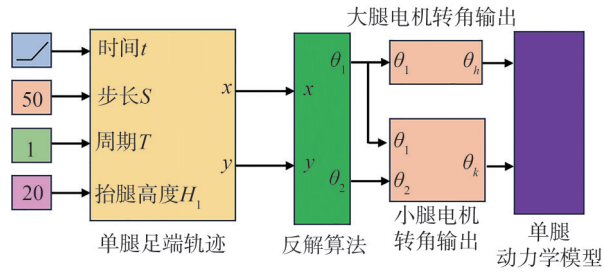


图21　LH 腿 ADAMS–Simulink 联合仿真平台

Fig. 21　ADAMS and Simulink co-simulation platform for the LH leg

图 22 为 LH 腿轨迹仿真图，该腿部模型能按照预设轨迹完成周期运动，证明了机构设计的合理性和运动学建模的正确性。

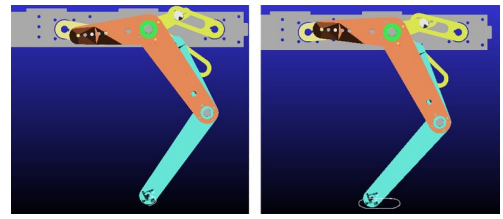


图22　LH 腿轨迹仿真图

Fig. 22　Simulation diagram of the LH leg trajectory

在单腿仿真的基础上，搭建联合仿真平台并开展整机运动仿真实验，图 23 为四足驱动程序，其中，左半部分是 Simulink 控制模块，右半部分是 ADAMS 多体动力学模块。在 Simulink 中搭建四条腿的控制系统，为了使控制模块更简洁，单腿模块已封装。在 ADAMS 中搭建多体动力学系统，蓝色模块是整个 ADAMS 模型的集成。四足机器人在行走过程中有着明显的相位关系，这决定了机器人行走的步态和运行效果，本文采用的行走方式为对角行走，因此采用延时模块设置左前腿和右后腿的相位差一致，右前腿和左后腿相位差一致。其他足端轨迹参数与单腿轨迹规划参数一致。

本文四足机器人是在二段式腿部机构上进行拓展的，因此，只需从逆解中获得髋、膝关节驱动角度即可。图 24 为 trot 步态行走效果。由图 24 可见，该机器人能平稳行走，对角腿之间能够按预定规律交替运行，符合 Trot 步态的行走要求。对于本文所设计的图 4 腿

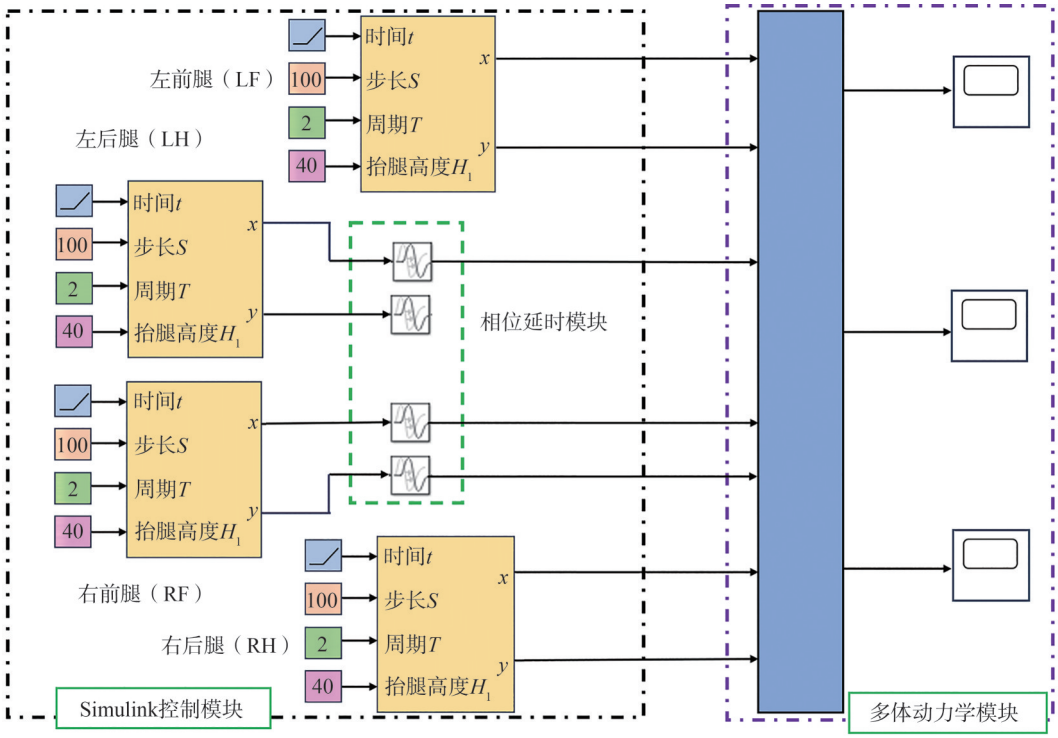


图 23 四足机器人程序框图

Fig. 23 Programming block diagram for quadruped robot

型，只需将该运动规律结合式(13)、(14)即可获得对应的角位移曲线，这里不再赘述。

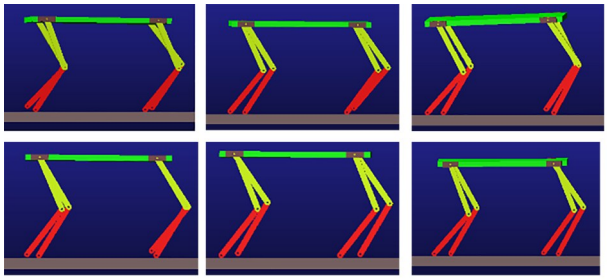


图 24 Trot 步态行走效果

Fig. 24 Trot gait walking effect

设置理论行走速度为 50 mm/s，图 25 为四足机器人在 x 轴方向的位移和速度曲线。由图 25 可见，机器人在 10 s 内行走超过了 500 mm，其仿真行走速度与理论行走速度 50 mm/s 相近。

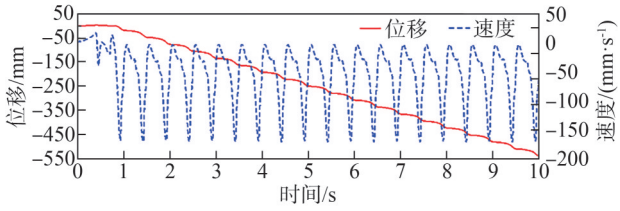


图 25 四足机器人在 x 轴方向的位移和速度曲线

Fig. 25 Displacement and velocity curves of quadruped robot in *x*-axis direction

图 26 为 3 种足端轨迹下机体前进位移。由图 26 可见，复合摆线和五次多项式足端轨迹基本能达到预期给定位移−500 mm，且五次多项式足端轨迹行走得更远一些。尽管三次多项式足端轨迹行走得最远，但与预期行走位移不符合，这是由于存在打滑现象。综上所述，本文提出的五次多项式足端零冲击足端轨迹具备较好的行走稳定性，能有效地克服地面打滑现象。

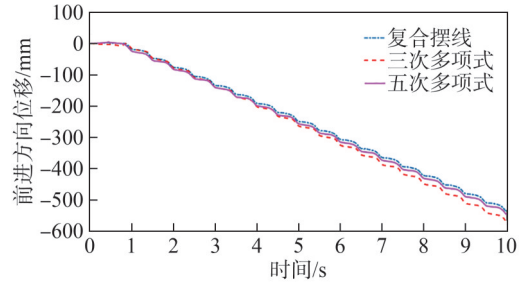


图 26 3 种足端轨迹下机体前进位移

Fig. 26 Forward displacement of the body under three foot-end trajectories

5 单腿轨迹跟踪实验

在开始实体实验前，需在控制器匹配的上位机软件 ZDevelop 中对逆运动学求解结果进行虚拟仿真，以验证获取的髋关节电机和膝关节电机的输出曲线与 MATLAB 求解曲线是否吻合，防止机器人因随意乱动而干涉其他部件或卡死电机。因为单腿所处的初始位置决定了后续的动作，所以快速给定初始位置至关重要。本文在设计机器人时已在相关位置安装定位销以

保证机器人单腿在初始位置时髋关节与足端的连线垂直于地面，且大腿和小腿之间的夹角为120°。完成上述工作后，拔掉定位销，按下启动按钮，检查腿部是否处于初始位置，若处于初始位置时则可通过上位机下载程序，若腿部偏离初始位置则执行回零程序，使腿处于初始位置以便后续的步态控制。程序下载后，外部因素可能导致编码器连接线断路，使电机不按规律运动，进而导致腿部连杆间发生严重干涉，此时应立刻按下急停按钮切断电源，且应再次检查硬件连接并执行回零程序以保证单腿从初始位置开始运行。图27为LH腿在一个周期内的运动轨迹。由图27可见，LH腿能按照五次多项式足端零冲击轨迹向前迈步。

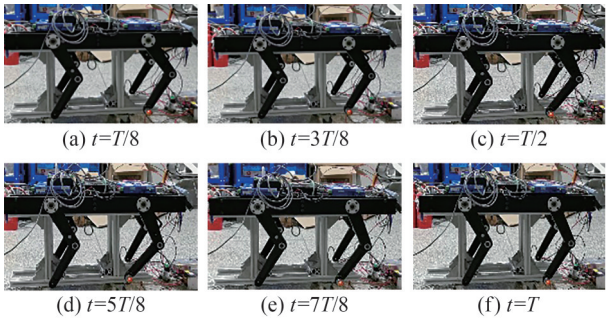


图27　LH腿在一个周期内的运动轨迹

Fig. 27　Movement trajectory of the LH leg in one cycle

为了直观验证五次多项式足端零冲击轨迹规划的正确性，本文采用激光跟踪仪对足端轨迹进行跟踪，测量系统采用美国自动精密工程公司（API）的激光跟踪仪R–20 Radian。用热熔胶将靶球固定在机器人足端位置，通过激光跟踪仪实时采集足端点并通过数据采集软件Spatial Analyzer（SA）实时获取足端运行数据点，利用软件内部的拟合功能可获得相应的足端轨迹曲线。图28为SA数据采集界面。除去装配和安装误差，足端运行轨迹基本与规划一致，证明了本文算法的有效性。

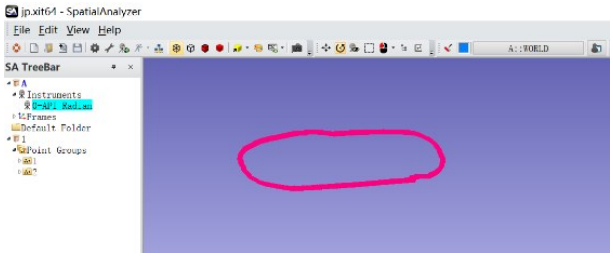


图28　SA数据采集界面

Fig. 28　SA data collection interface

为了定量比较仿真轨迹与实际运行轨迹的一致性，采用激光跟踪仪获得轨迹的实际点。图29为仿真轨迹与实验轨迹对比。由图29可见，图12中五次多项式轨迹与数据采集得到的图28中的实际轨迹基本一致，实验模型获得的实际运行轨迹与仿真轨迹有一定偏差，但趋势基本一致，证明了五次多项式轨迹规划和运动学求解的正确性。但从图29来看，仿真轨迹与实际轨迹在左上角区域和右下角区域有明显差距，最大偏差为5 mm左右，具体原因有多种情况。

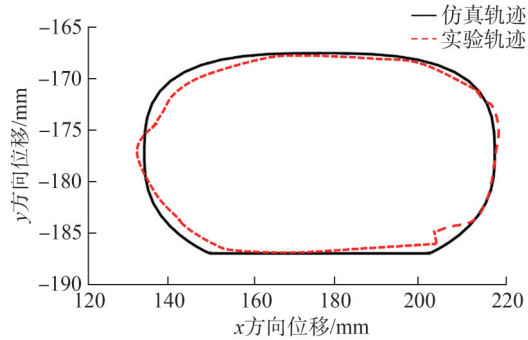


图29　仿真轨迹与实验轨迹对比

Fig. 29　Comparison of simulation trajectory and experimental trajectory

首先，本文机器人腿部安装有滚子，靠滚子实现运动的传递，曲柄内轨道与滚子间的摩擦接触造成了一定的误差。且机器人本体是在实验室环境下简装的，运动副位置处的关节间隙和润滑等也对实验结果有一定的影响。其次，机器人系统的电机是工业电机而非关节电机，其长度较长、质量较大且输出力矩较小，快速响应能力和机构运动特性方面均与目前市面上的关节电机性能差距较大。再次，在整机控制方面，重点验证轨迹规划算法的可行性，并未对机体质心的平衡性进行规划，导致在实际行走过程中腿部有拖地现象，这也是仿真轨迹与实际轨迹不重合的原因之一。在后续研究中，将重点开展基于零力矩点的质心规划算法，将该算法与本文足端轨迹规划算法结合，实现机器人更为平滑的行走。这对后期机器人应用于坡地地形或其他复杂地形有重要意义。

图29反映了所提仿生轨迹在位移空间中理论行走速度与实际行走速度之间的差别，为了动态表征仿真轨迹与实际运行轨迹在速度层面上的差异，在激光跟踪仪获取足端点的基础上，分别对拟合的足端轨迹在x方向和y方向的位移曲线求一阶导数，获得实际轨迹与理论轨迹在x方向和y方向上的速度曲线分别如图30、31所示。

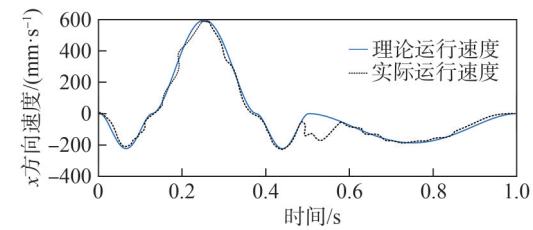


图30　理论运行速度与实际运行速度在x方向上的曲线

Fig. 30　Speed curves of theoretical operating speed and actual operating speed in the x direction

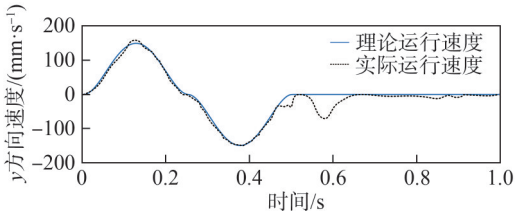


图31 理论运行速度与实际运行速度在y方向上的曲线

Fig. 31 Speed curves of theoretical operating speed and actual operating speed in the y direction

由图30、31可见，机器人的实际运行速度曲线与理论运行速度曲线近似，但在落腿回缩阶段结束后存在速度上的局部突变，这在图29中也能明显看出。这是因为所设计的机器人机构中采用滚子带动杆机构运动（图4），在这一瞬时流畅性不好，出现瞬间抖动现象。但从实际运行速度与理论运行速度的对比可以看出，在忽略机构本身的不足和摩擦等因素影响后，机器人在x和y方向的实际运行速度和理论运行速度一致，证明了本文算法在实际运行中的有效性。

6 整机步态规划实验

在完成单腿运动控制实验后，使用正运动公司开发的正运动控制器ZMC432，采用Basic语言编写8个电机的控制程序，图32为trot步态实验结果。由图32可见，机器人能按照trot步态交替运动实现迈步，但所选电机驱动力矩较小且地面较为光滑，导致整机出现较为严重的拖地和打滑现象，特别是2个后腿的拖地现象较为明显。从trot步态实验整体运行趋势来看，机器人能按照所规划轨迹完成对角腿之间的交替运动，符合预期运动控制要求。从该实验也能明显看出，仅从轨迹规划的角度来看，本文算法满足机器人步态控制的需求，但由于环境和机体运动的复杂性，控制效果并不特别理想，后续还应结合零力矩点控制算法等共同对机器人进行控制，从动力学的角度提高机器人的动态稳定性。

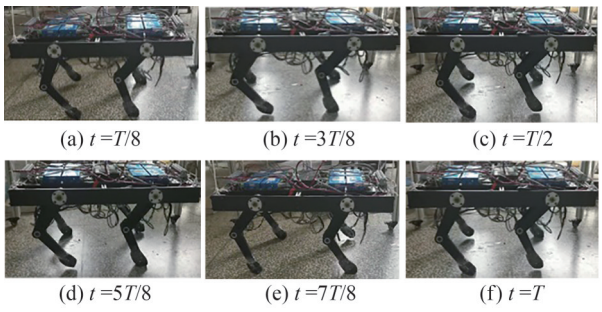


图32 Trot步态实验结果

Fig. 32 Results of trot gait experiment

7 结 论

本文针对四足机器人行走仿生性和稳定性问题，以德国牧羊犬为仿生蓝本，在运动学分析的基础上，开展了新型足端轨迹规划研究，得出如下结论：

1）综合考虑犬类动物特征，采用连杆机构设计了一种四足机器人。在简化模型的基础上完成了复杂腿型的运动学分析与求解。

2）根据四足哺乳动物的抬腿后摆和落腿回缩特性提出了五次多项式足端轨迹，完成了3种足端轨迹在避障、速度和加速度层面的对比分析。与三次多项式轨迹和复合摆线轨迹相比，本文提出的轨迹综合考虑了哺乳动物的抬腿后摆和落腿回缩特性，具有较大的避障空间，并且拥有较好的防滑性能。

3）搭建了单腿的物理样机系统，对腿部运动进行了仿真分析，证明了所提算法的合理性。通过单腿的轨迹规划实验以及整机的步态控制实验验证了五次多项式足端轨迹在四足机器人中具有较好的应用效果，充分证明了本文提出的足端轨迹的有效性。

参考文献：

[1] Kang Ru, Meng Fei, Chen Xuechao, et al. Structural design and crawling pattern generator of a planar quadruped robot for high-payload locomotion[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6543.

[2] Chen Jiupeng, San Hongjun, Wu Xing, et al. Structural design and gait research of a new bionic quadruped robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(14): 1912–1922.

[3] Shi Haojie, Zhou Bo, Zeng Hongsheng, et al. Reinforcement learning with evolutionary trajectory generator: A general approach for quadrupedal locomotion[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 3085–3092.

[4] Meng Xin, Liu Wenfei, Tang Leijie, et al. Trot gait stability control of small quadruped robot based on MPC and ZMP methods[J]. Processes, 2023, 11(1): 252.

[5] Zhang Yihui, Hu Cong, Qiu Binbin, et al. Responsive CPG-based locomotion control for Quadruped robots[C]//Neural Information Processing. Singapore: Springer, 2024: 279–290.

[6] Xiao Le, San Hongjun, Sun Haijie, et al. Motion control of upward jumping step for SLIP model of legged robot[J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(4): 631−637. [肖乐, 伞红军, 孙海杰, 等. 足式机器人SLIP模型向上跳跃台阶的运动控制[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(4): 631–637.]

[7] Huang Senwei, Zhang Xiuli. Biologically inspired planning and optimization of foot trajectory of a quadruped robot [C]//Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer, 2021: 192–203.

[8] Lei Jingtao, Wang Feng, Yu Huangying, et al. Energy efficiency analysis of quadruped robot with trot gait and com-

bined cycloid foot trajectory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2014,27(1):138–145.

[9] Yang Chaofeng. Research on gait planning for a hydraulic quadruped robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2015.[杨超峰. 液压四足机器人的步态规划研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.]

[10] Wang Lipeng, Wang Junzheng, Wang Shoukun, et al. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(1):39–44.[王立鹏,王军政,汪首坤,等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报,2013,49(1):39–44.]

[11] Kim K Y, Kwon O, Yeon J S, et al. Elliptic trajectory generation for galloping quadruped robots[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Kunming: IEEE,2007:103–108.

[12] Luo Hongyan. Mechanical characteristics and gait planning of bionic robot dogs[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2018.[罗红艳. 仿生机器狗机构特性与步态规划[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.]

[13] Chen Jiupeng, Li Chunlei, San Hongjun, et al. Model based gait transition control for quadruped robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(3):431–440.[陈久朋,李春磊,伞红军,等. 基于模型的四足机器人步态转换控制研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(3):431–440.]

[14] Wei Shunxiang, Wu Haibo, Chen Jiupeng, et al. Optimization and performance analysis of foot compound trajectory of quadruped robot[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2022,61(4):142–150.[魏顺祥,吴海波,陈久朋,等. 四足机器人足端复合轨迹的优化与性能分析[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文),2022, 61(4):142–150.]

[15] Hua Zisen, Rong Xuewen, Li Yibin, et al. Active compliance control on the hydraulic quadruped robot with passive compliant servo actuator[J]. IEEE Access, 2019, 7: 163449–163460.

[16] 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.[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.]

[17] Lei Jingtao, Wang Feng, Yu Huangying. Analysis on trajectory planning and energy consumption of quadruped robot [J]. Machine Design & Research,2014,30(1):29–34.[雷静桃,王峰,俞煌颖. 四足机器人轨迹规划及移动能耗分析[J]. 机械设计与研究,2014,30(1):29–34.]

[18] Zhang Qiushi. Jumping motion control of quadruped robot based on trajectory optimization[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2024.[张秋实. 基于轨迹优化的四足机器人跳跃运动控制[D]. 秦皇岛:燕山大学,2024.]

[19] Chen Mingfang, Chen Hao, Wang Xuejun, et al. Design and control of a novel single leg structure of electrically driven quadruped robot[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,2020:3943867.

[20] Yuan Shuaidong, Zhou Yijun, Luo Chen. Crawling gait planning based on foot trajectory optimization for quadruped robot[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA). Tianjin: IEEE,2019:1490–1495.

[21] Zhou Kun, Li Chuan, Li Chao, et al. Motion planning method for quadruped robots walking on unknown rough terrain [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2):210–219.[周坤,李川,李超,等. 面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法[J]. 机械工程学报,2020,56(2):210–219.]

[22] Chen Mingfang, Zhang Kaixiang, Wang Sen, et al. Analysis and optimization of interpolation points for quadruped robots joint trajectory[J]. Complexity,2020,2020:3507679.

[23] Usherwood J R. An extension to the collisional model of the energetic cost of support qualitatively explains trotting and the trot-canter transition[J]. Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2020,333(1):9–19.

[24] 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.

[25] Liu Yongchao. Research on structure design and foot trajectory planning of imitating cheetah quadruped robots[D]. Jinan: Shandong University,2017.[刘永超. 仿猎豹四足机器人结构设计与足端轨迹规划研究[D]. 济南:山东大学, 2017.]

[26] Ben Cheikh S, Hammadi S. Multi-hop ridematching optimization problem: Intelligent chromosome agent-driven approach[J]. Expert Systems with Applications,2016,62: 161–176.

[27] Chen Qiang, Shi Huihui, Sun Mingxuan. Echo state network-based backstepping adaptive iterative learning control for strict-feedback systems: An error-tracking approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2020,50(7):3009–3022.

[28] Na Jing, Jing Baorui, Huang Yingbo, et al. Unknown system dynamics estimator for motion control of nonlinear robotic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(5):3850–3859.

[29] Chen Jiupeng. Research on gait and motion control of quadruped robot[D]. Kunming: Kunming University of Sci-

ence and Technology,2021.[陈久朋.四足机器人步态及运动控制研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.]
[30] Li Huashi. Biomimetic locomotion control theories and methods of quadruped robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2014.[李华师.四足机器人仿生运动控制理论与方法的研究[D].北京:北京理工大学,2014.]

Biomimetic Trajectory Planning and Implementation of Quadruped Robots Based on Biological Motion Characteristics

CHEN Jiupeng[1,2,3], *LI Chunlei*[1], *SAN Hongjun*[1,2*], *HE Chaoyin*[1], *LUO Yingluan*[1]

(1.Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2.Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China;
3. Yuxi Xintianli Agricultural Equipment Manufacturing Co., Ltd., Yuxi 652600, China)

Abstract:

Objective Quadruped robots gain widespread attention in hazardous and complex tasks such as search and rescue, mine clearance, and steep slope climbing due to their superior terrain adaptability compared to wheeled and tracked robots. However, existing trajectory planning algorithms predominantly focus on slip control and kinematic optimization, often neglecting the biological motion characteristics and walking stability observed in natural quadruped mammals. After millions of years of natural selection, quadruped mammals evolve optimal locomotion patterns, such as leg-lifting backswing and leg-lowering retraction, which minimize ground impact and ensure motion continuity. This study aims to develop a zero-impact foot-end trajectory that integrates biological motion mechanisms to address the limitations of traditional trajectories, including insufficient bionic adaptability, abrupt acceleration at leg lifting and lowering instants, and poor stability in complex environments. The goal is to enhance walking stability, reduce ground impact, and improve the bionic performance of quadruped robots, providing a reliable solution for their practical application in complex terrains.

Methods Firstly, a bionic quadruped robot was designed with reference to the physical characteristics of German Shepherds, a breed known for robust muscles, strong bones, and agile movements. Key structural parameters were determined based on standard German Shepherd dimensions, including a body length of 790 mm, a body width of 440 mm, a body height of 418 mm, thigh and calf lengths of 200 mm each, and an overall weight of 37.5 kg. The robot adopted a front-elbow and rear-knee joint configuration, with four legs symmetrically arranged and motion transmitted through linkages. A two-stage leg structure was simplified for kinematic analysis, and a coordinate system was established at the hip joint to derive the inverse kinematic models of the hip and knee joints. Using geometric relationships and the sine theorem, mapping equations between foot-end position coordinates and joint driving angles were deduced, which laid the foundation for trajectory tracking control. Secondly, a quintic polynomial zero-impact foot-end trajectory was proposed by mimicking the biological motion characteristics of quadruped mammals. The trajectory was divided into a swing phase and a support phase, with separate planning for the x (forward) and y (vertical) directions. In the x-direction, the swing phase was divided into three segments: backswing (0 to T/8), forward movement (T/8 to 3T/8), and retraction (3T/8 to T/2), where T represented the gait cycle (1 s). This design replicated natural mammalian locomotion and reduced impact during leg lifting and lowering. In the y-direction, the swing phase included a lifting segment (0 to T/4) and a lowering segment (T/4 to T/2), which ensured smooth vertical motion. Boundary conditions were defined to achieve zero velocity and acceleration at the beginning and end of the swing phase, eliminating impact between the foot-end and the ground. For comparison, traditional cubic polynomial and composite cycloid trajectories were selected as benchmarks, with identical gait parameters, including a step length of 50 mm and a lifting height of 20 mm, applied to all three trajectories. Finally, comprehensive simulations and physical experiments were conducted to validate the proposed trajectory. ADAMS and Simulink were used for co-simulation: the mechanical model of the robot was developed in ADAMS, while the control system, including inverse kinematic solutions and trajectory generation, was constructed in Simulink. The simulations analyzed joint angles, angular velocities, and acceleration curves for the three trajectories. Physical experiments were performed on the prototype robot equipped with a ZMC432 motion controller. A laser tracker (API R-20 Radian) was utilized to capture the actual foot-end trajectory, and trot gait control experiments were conducted to evaluate walking stability, slip resistance, and motion continuity. The performance of the three trajectories was compared in terms of bionic characteristics, impact reduction, and stability.

Results and Discussions Kinematic analysis verified the correctness of the inverse kinematic models, and smooth and continuous joint angle curves were obtained for all three trajectories. Simulation results showed that the quintic polynomial trajectory exhibited distinct bionic characteristics. In the x-direction, the backswing (15 mm) and retraction (15 mm) segments were clearly observed, whereas the cubic polynomial and composite cycloid trajectories lacked these biological features. Velocity and acceleration curves in both x and y directions confirmed that the quintic polynomial trajectory achieved zero impact at the instants of leg lifting and lowering, with no abrupt changes. In contrast, the cubic polynomial

trajectory exhibited constant acceleration slopes that led to potential impact. The composite cycloid trajectory also achieved zero velocity and acceleration at key points but failed to reproduce the backswing and retraction behaviors.

Physical experiment results demonstrated that the prototype robot stably walked using the proposed quintic polynomial trajectory. The forward displacement over 10 seconds reached approximately 500 mm, which was consistent with the theoretical speed of 50 mm/s. Laser tracking data indicated that the actual foot-end trajectory closely matched the planned trajectory, with a maximum position deviation of less than 5 mm. This deviation was primarily caused by assembly gaps, frictional contact between links, and slight motor torque insufficiency. Compared to the cubic polynomial and composite cycloid trajectories, the quintic polynomial trajectory significantly reduced slip phenomena, with the slip rate reduced by approximately 30% and 15%, respectively. The robot's center of mass remained stable during locomotion, with vertical fluctuations of less than 10 mm, which confirmed improved walking stability. In addition, the bionic backswing and retraction behaviors effectively reduced ground impact, as evidenced by smoother joint torque curves and lower operational noise.

Conclusions This study successfully integrates biological motion characteristics into quadruped robot trajectory planning, addressing the limitations of traditional trajectories in terms of bionic adaptability and impact control. The proposed quintic polynomial zero-impact foot-end trajectory, which mimics the leg-lifting backswing and leg-lowering retraction of quadruped mammals, achieves smooth motion with zero impact at critical instants. The designed bionic quadruped robot, developed based on German Shepherd parameters, validates the effectiveness of the trajectory through rigorous simulations and physical experiments. The results demonstrate that the proposed trajectory outperforms traditional cubic polynomial and composite cycloid trajectories in terms of stability, slip resistance, and bionic performance. This research provides a solid theoretical and technical foundation for the development of high-performance quadruped robots and raises their practical application in complex terrains, such as mountainous areas, disaster sites, and unstructured environments. Future work will focus on optimizing the trajectory for dynamic locomotion, such as trotting and galloping, and on enhancing adaptability to variable terrains through real-time sensor feedback and adaptive control algorithms.

Key words: quadruped robot; trajectory planning; German shepherd dog; quintic polynomial foot trajectory; trot gait

（编辑　周　璇）

引用格式: Chen Jiupeng,Li Chunlei,San Hongjun,et al.Biomimetic trajectory planning and implementation of quadruped robots based on biological motion characteristics[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):330–343.[陈久朋,李春磊,伞红军,等.基于生物运动特性的四足机器人仿生轨迹规划与实现[J].工程科学与技术,2026,58(3):330–343.]