

基于火星复杂环境的仿生六足机器人设计及运动学建模

韩阳¹, 顾若波¹, 李浩¹, 刘枫¹, 曹文成¹, 陈刚², 李月华³, 苏继满^{4*}

¹南通科技职业学院智能制造学院, 江苏 南通

²浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

³之江实验室, 浙江 杭州

⁴南通科技职业学院能源交通学院, 江苏 南通

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月12日

摘要

针对火星表面复杂、崎岖的地形环境, 为提高探测机器人的地形适应性与运动稳定性, 本文设计了一款基于蚂蚁仿生学原理的六足机器人, 并进行了系统的运动学建模与步态规划研究。首先, 通过对蚂蚁生理结构的分析, 提取其腿部比例与躯体布局特征, 设计了具有三自由度串联关节的腿部机构, 采用Roll-Pitch-Pitch关节布局与曲柄摇杆传动形式, 实现轻量化、低惯量的机械结构。其次, 建立了基于D-H参数法的运动学模型, 完成正逆运动学求解, 为足端轨迹控制提供理论依据。在此基础上, 采用多项式插值方法进行足端轨迹规划, 设置速度、加速度约束以实现运动过程的平稳性, 并通过Matlab仿真验证了轨迹的可行性与合理性。实验与仿真结果表明, 该仿生六足机器人结构设计合理, 运动学模型准确, 足端轨迹平滑, 具备在火星类复杂环境中稳定移动的潜力, 为后续动力学分析、步态优化及实际环境应用奠定了理论与技术基础。

关键词

六足机器人, 火星, 蚂蚁, 仿生设计, 适应性, 运动学建模

Design and Kinematic Modeling of Bionic Hexapod Robot Based on the Complex Environment of Mars

Yang Han¹, Ruobo Gu¹, Hao Li¹, Feng Liu¹, Wencheng Cao¹, Gang Chen², Yuehua Li³, Jiman Su^{4*}

¹School of Intelligent Manufacturing, Nantong College of Science and Technology, Nantong Jiangsu

²College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

³Zhejiang Laboratory, Hangzhou Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 韩阳, 顾若波, 李浩, 刘枫, 曹文成, 陈刚, 李月华, 苏继满. 基于火星复杂环境的仿生六足机器人设计及运动学建模[J]. 应用数学进展, 2026, 15(3): 253-265. DOI: 10.12677/aam.2026.153103

Abstract

In view of the complex and rugged terrain environment on the surface of Mars, to improve the terrain adaptability and motion stability of the exploration robot, this paper designs a six-legged robot based on the bionic principle of ants and conducts systematic kinematic modeling and gait planning research. Firstly, by analyzing the physiological structure of ants, the leg proportion and body layout characteristics are extracted, and a leg mechanism with a three-degree-of-freedom serial joint is designed. The Roll-Pitch-Pitch joint layout and crank-rocker transmission form are adopted to achieve a lightweight and low-inertia mechanical structure. Secondly, a kinematic model based on the D-H parameter method is established, and the forward and inverse kinematics solutions are completed, providing a theoretical basis for the control of the foot-end trajectory. On this basis, the polynomial interpolation method is used for foot-end trajectory planning, and speed and acceleration constraints are set to achieve the smoothness of the motion process. The feasibility and rationality of the trajectory are verified through Matlab simulation. Experimental and simulation results show that the bionic six-legged robot has a reasonable structure design, accurate kinematic model, and smooth foot-end trajectory, and has the potential to move stably in complex environments similar to Mars, laying a theoretical and technical foundation for subsequent dynamic analysis, gait optimization, and practical environmental applications.

Keywords

Hexapod Robot, Mars, Ant, Bionic Design, Adaptability, Kinematics Modeling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

火星地表蕴藏着丰富的矿产资源，这使得火星探测与开发长期以来备受科学界重视。作为一颗沙漠行星，火星是太阳系中距离地球较近的行星之一。如图 1 所示，其地表地貌类型多样，包括广阔的平原、起伏的山地以及遍布的沙石与岩石地面等。

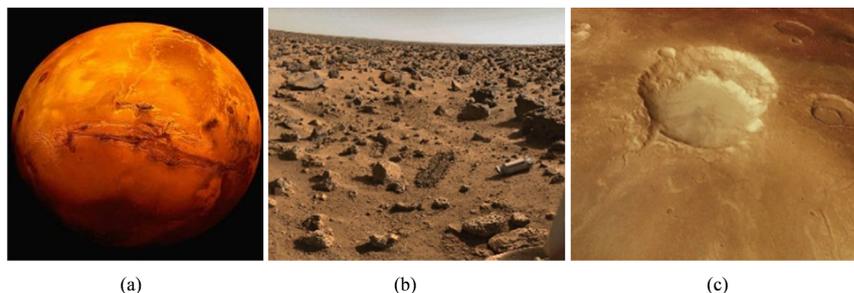


Figure 1. Map of the Martian surface environment
图 1. 火星地表环境图

为有效适应火星表面复杂地形并完成探测任务，需研制高性能移动机器人。目前常见的移动平台主要包括轮式、履带式及四足机器人。然而，传统轮式机器人对崎岖地形的适应能力有限；履带式机器人移动速度较低；四足机器人在运动稳定性方面仍存在不足，这些因素均不利于在火星复杂环境中可靠作业。相比之下，六足机器人依托多足支撑结构，展现出更优的稳定性与机械冗余性，承载能力更强，复杂地形通过性更好。此外，六足机器人在运动中可保持多个足端同时接触地面，有利于分散机体负载与接地压力，从而更好地适应火星地表环境。因此，六足机器人在应对火星探测任务方面具有明显优势，可为火星资源勘查与开发提供重要技术支持[1] [2]。

2. 仿生六足机器人机械结构

2.1. 蚂蚁的生理结构分析

蚂蚁作为全球广泛分布的小型昆虫，虽然体型细小，但其展现出的强大生存与繁殖能力十分引人注目(图 2)。蚂蚁卓越的运动能力为其带来了显著的生存优势，也为六足机器人的仿生设计提供了重要启发。如图 3(a)所示，蚂蚁的六足呈对称分布，这一结构特征对提升机器人的运动性能具有关键意义[3]。



Figure 2. Ant
图 2. 蚂蚁

通过对蚂蚁腿部结构的进一步观察可知，其单腿主要由基节、股节、胫节和跗节等部分构成，相邻两节之间均通过转动关节连接。其中，蚂蚁的基节较为短小，且“躯干-基节”与“基节-股节”两者的关节轴线互相垂直。从机构学角度分析，该结构相当于使蚂蚁的单腿通过一种近似球副的连接方式与躯干相连[4] [5]。

如图 3(b)所示，蚂蚁在运动时主要依靠跗节末端的刚毛与地面保持有效接触，并通过“股节-跗节”关节的被动调节能力来适应地形起伏。观测发现，在此过程中，跗节与胫节之间的相对位移较小，跗节的动作主要由胫节带动。基于这一特点，在六足机器人的腿部结构设计中，可将跗节与胫节进行合并，从而简化构型、提高整体运动效率。该设计思路有助于使机器人更贴近蚂蚁的自然运动模式，进而实现更高效、更稳定的移动表现[6]。

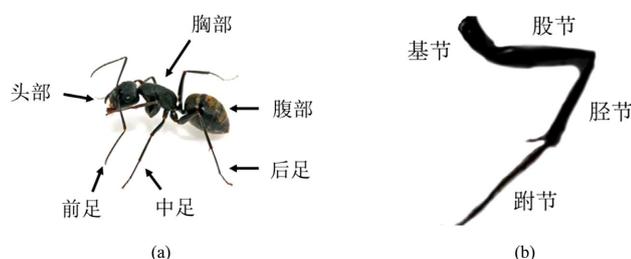


Figure 3. Ant physiological structure
图 3. 蚂蚁生理结构

在蚂蚁腿部结构的仿生设计中，主要考虑股节、胫节与跗节三者的长度比例。为简化设计，将跗节合并入胫节，此时股节与胫节的长度比约为 3:4。在躯体结构的仿生方面，如图 4(a)所示，蚂蚁六足对称分布于身体两侧。图 4(b)进一步显示，若依次连接相邻足的“躯干 - 基节”关节，可形成一个近似矩形，其长 L_2 与宽 L_1 之比约为 3:1。在该布局中，前足、中足与后足沿蚂蚁躯干轴线呈等间距排列[7]。

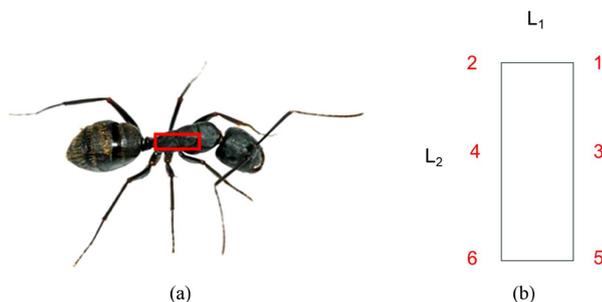


Figure 4. Size of ants
图 4. 蚂蚁身体尺寸

2.2. 仿生六足机器人机械结构

参考 2.1 对蚂蚁生物学机理的研究，如图 5，将腿部结构简化，“股节 - 胫节”关节连接，单足通过正交的“机身 - 基节”关节和“基节 - 股节”关节与机身连接。

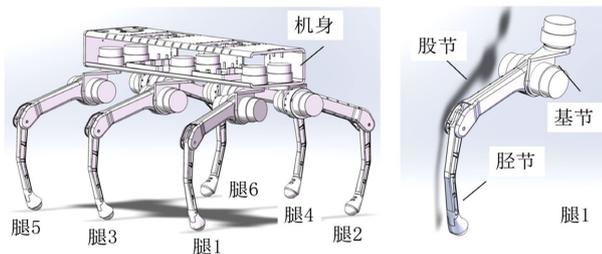


Figure 5. Mechanical structure diagram of the legs
图 5. 腿部机械结构图

在关节型三自由度串联腿部结构的设计中，虽然存在多种实现方式，但其共同目标均是降低腿部运动过程中的惯量影响。本研究采用连杆传动形式设计腿部构型，具体如图 5 所示，单腿关节采用 Roll-Pitch-Pitch 三个主动旋转关节的布局方式，该布局有助于降低运动惯量，并支持复杂轨迹的实现。胫节部分选用曲柄摇杆机构进行传动，该机构具备结构简洁、传动可靠及运动平稳等特点，满足整体设计要求。六条腿沿机身两侧对称分布，每条腿包含“躯干 - 基节”“基节 - 股节”“股节 - 胫节”三个关节，共具有 3 个自由度。相关尺寸参考蚂蚁生理结构比例确定，具体参数见表 1。

Table 1. Key dimensional parameters of the bionic hexapod robot
表 1. 仿生六足机器人关键尺寸参数

部件	数值
机身尺寸(长*宽*高)	97*30*20 (cm)
基节长度	9 (cm)
股节长度	20 (cm)
胫节长度	27 (cm)

机器人的结构材料选用铝合金，其具备轻质、高强度和耐腐蚀等特性。部件成型采用 3D 打印技术实现。加工完成的腿部结构实物如图 6 所示，腿部关节电机被集成在腿根部位。作为机器人运动的核心部件，电机布局对整体性能有重要影响。将电机设置在腿根处，能够在机器人执行各类动作时为其提供充分保护，从而降低因外部冲击而造成损坏的可能性[8] [9]。

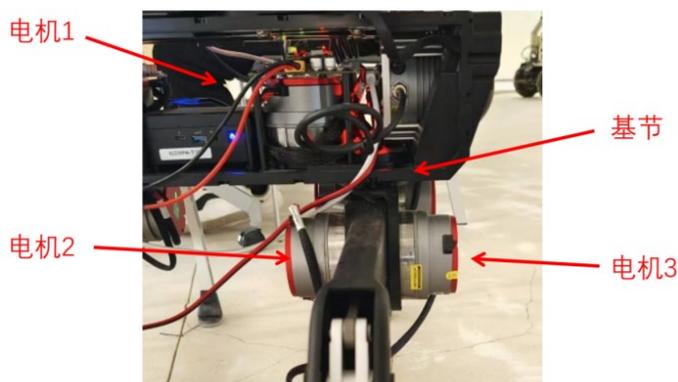


Figure 6. Physical diagram of the robot's leg structure
图 6. 机器人腿部结构实物图

基节是机器人的重要支撑构件，由电机 1 驱动实现内外转动。股节作为连接基节与胫节的中间部分，通过电机 2 控制其上下摆动。如图 7 所示，位于腿部末端的胫节则由电机 3 借助连杆 2 驱动，完成内外摆动动作。

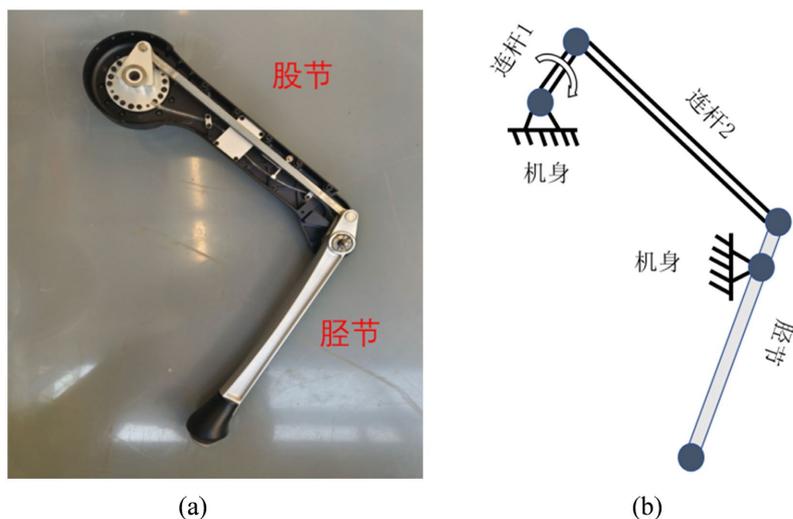


Figure 7. Internal structure diagram of a single leg. (a) Physical diagram of the institution; (b) Organization chart
图 7. 单腿内部结构示意图。(a) 机构实物图；(b) 机构简图

如图 8 所示，机器人机身实物在设计中于各关键部位均预留了安装孔，便于搭载姿态传感器、双目视觉相机等多种传感设备，为后续调试及功能扩展提供了便利。

机器人的装配质量直接影响其稳定运行与功能实现。如图 9 所示，装配完成的机器人整体结构稳定可靠，能够满足后续研究需要[10] [11]。

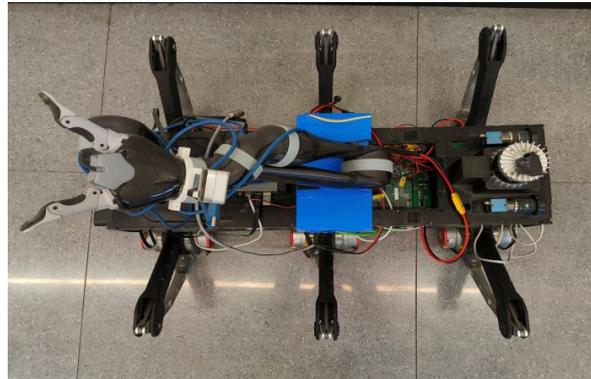


Figure 8. Physical image of the robot body
图 8. 机器人机身实物图

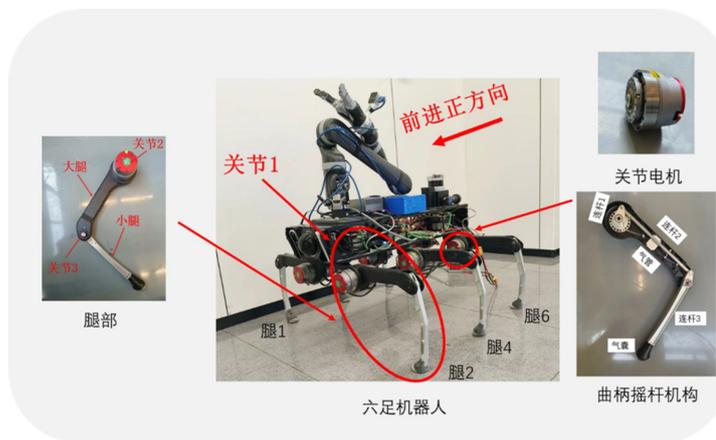


Figure 9. Assembly drawing of the six-legged robot
图 9. 六足机器人装配实物图

2.3. 仿生六足机器人硬件控制系统设计

如图 10、图 11，为应对火星复杂环境，六足机器人需具备实时感知环境与自身状态的能力，这对硬件系统提出了相应要求。其硬件控制系统主要由控制模块、感知模块与驱动模块三部分构成。

如表 2，在感知模块中，主要配置了姿态传感器(IMU_MTI_300)与深度相机(Real sense)两种传感器，两者均通过 USB 接口连接至控制器。IMU 用于实时获取机器人姿态信息，以判断运动稳定性；Real sense 则实时传输 RGB 图像至控制器，辅助分析外部环境。驱动模块选用 Mintasca 谐波电机作为关节执行器，该电机具有高分辨率和良好的重复定位精度(约 1 rad/s)，能够满足运动控制需求。关节电机基于 CAN 协议与控制器通信，接收并执行运动指令，实现对机器人运动的精确控制[12] [13]。

Table 2. List of main hardware components of the hexapod robot

表 2. 六足机器人主要硬件列表

硬件设备	设备型号	品牌
控制器	AGX Orin	NVIDIA
姿态传感器	MTI_300	北微传感
摄像头	Real sense	Intel
伺服电机	PRO60	Mintasca

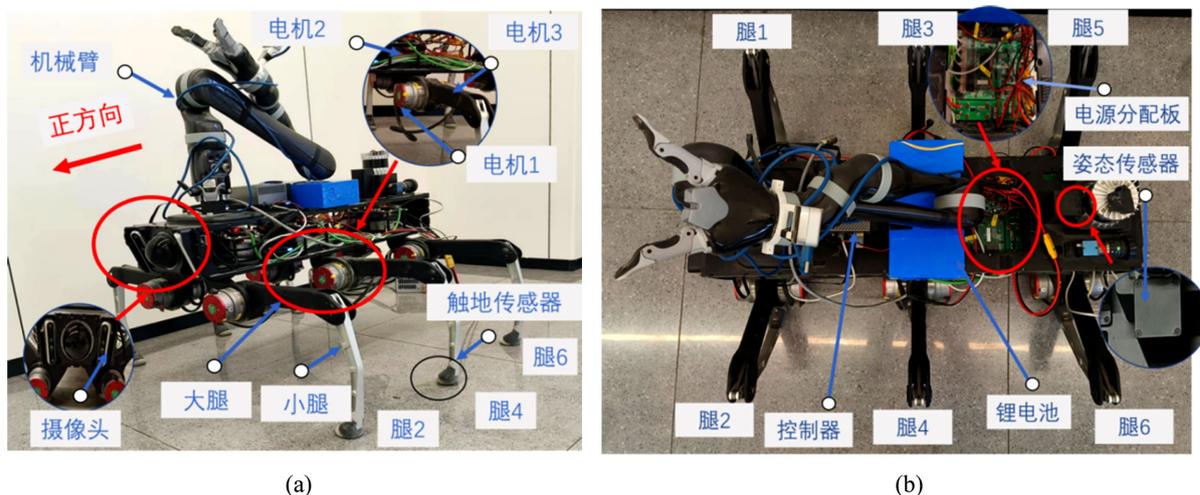


Figure 10. Hardware system of the hexapod robot
图 10. 六足机器人硬件系统

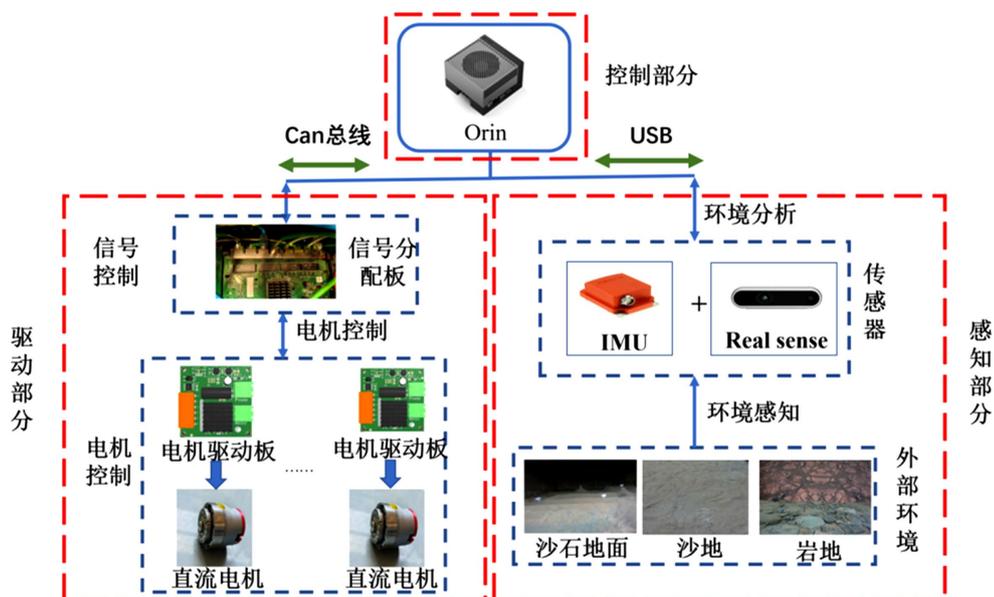


Figure 11. Robot control flowchart
图 11. 机器人控制流程图

3. 仿生六足机器人运动学建模及步态规划

3.1. 仿生六足机器人运动学建模

该仿生六足机器人的单腿可看作具有三个自由度的三连杆串联机构。机器人主体近似为长方体，六条腿对称且均匀地布置于机身两侧。参考图 12(a)，建立与地面固定的世界坐标系 $\{O_w\}$ 和与机器人机体固连的机体坐标系 $\{O_B\}$ 。机体坐标系 $\{O_B\}$ 的原点位于机身质心，其 X_B 轴沿机身横向对称轴方向， Z_B 轴垂直于机身上表面并竖直向上， Y_B 轴则依据右手定则确定。以腿 1 为例，其关节坐标系原点设在根关节与髋关节转轴的交点处，且该坐标系的 X_1 、 Y_1 、 Z_1 轴方向分别与机体坐标系 $\{O_B\}$ 的 X_w 、 Y_w 、 Z_w 轴保持一致，如图 12(b)所示。

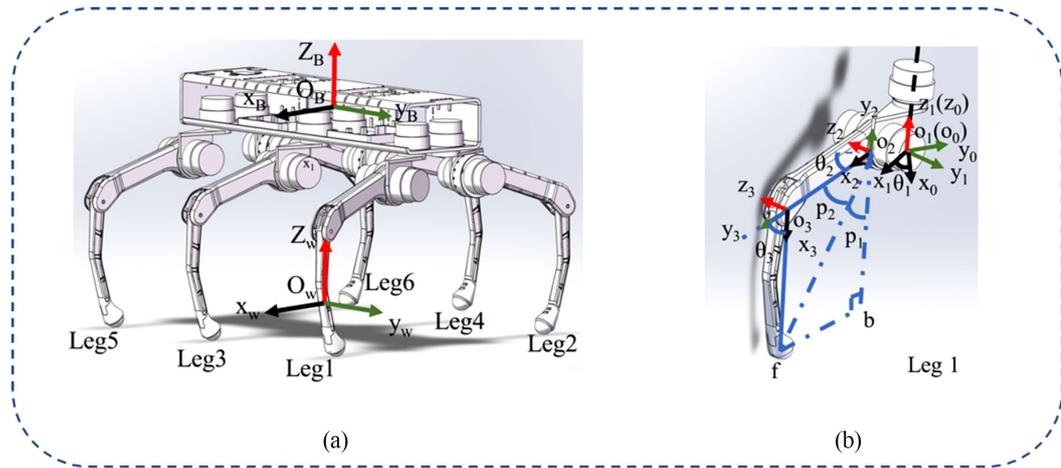


Figure 12. D-H Modeling schematic diagram
图 12. D-H 建模示意图

基于上述内容，可以得到当前坐标系下的 D-H 建模参数表，详见表 3：

Table 3. D-H modeling parameters of the hexapod robot
表 3. 六足机器人的 D-H 建模参数

连杆号 i	扭角 α_{i-1}	杆长 a_{i-1} (mm)	距离 d_i (mm)	关节转角 θ_i
$i = 1$	0	0	0	$(-45^\circ, 45^\circ)$
$i = 2$	90°	L_1	0	$(0^\circ, 30^\circ)$
$i = 3$	0	L_2	0	$(0^\circ, 45^\circ)$

关节 3 至足端间连杆长度为 L_3 。

3.1.1. 仿生六足机器人正运动学分析

机器人正运动学基于机体坐标系，在已知各腿关节角度的情况下，计算各腿足端的位置。通过该计算获得的足端位置信息，对机器人的运动控制、路径规划及任务执行等具有重要作用[14] [15]。

已知机器人各条腿中各个关节的关节角度，求解机器人各条腿足端的位置，以腿 1 为例。

利用表 3 的参数使用 D-H 齐次变换公式。

坐标系 $\{O_1\}$ 相对于坐标系 $\{O_0\}$ 的齐次坐标变换矩阵：

$${}^0_1T = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

坐标系 $\{O_2\}$ 相对于坐标系 $\{O_1\}$ 的齐次坐标变换矩阵：

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

坐标系 $\{O_3\}$ 相对于坐标系 $\{O_2\}$ 的齐次坐标变换矩阵：

$${}^2_3T = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

可得腿 1 的关节变换矩阵为 T :

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

可以求得六足机器人足端相对于根关节坐标系下的变换矩阵:

$$A = {}^0_3T \begin{pmatrix} L_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

同理, 其他的腿部的落足点也可以通过这种方法获得。

3.1.2. 仿生六足机器人逆运动学分析

在规划仿生六足机器人的行走轨迹时, 可依据各腿当前姿态, 利用逆运动学求解对应状态下各关节的转角, 进而通过设计足端轨迹函数完成各足端的运动规划。本文以腿 1 为例进行说明:

足端 A 坐标(相对于机体坐标系):

$$(x_A, y_A, z_A)$$

关节 1 中心坐标:

$$(x_1, y_1, z_1)$$

关节角 θ_1 :

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{y_1 - y_A}{|x_A - x_1|} \right)$$

关节 2 中心坐标:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + l_1 \cos \theta_1 \\ y_2 &= y_1 + l_1 \sin \theta_1 \\ z_2 &= z_1 \\ (x_2, y_2, z_2) \end{aligned}$$

足端 A 与关节 2 中心间距离 a :

$$a = \sqrt{(x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2 + (z_A - z_2)^2}$$

关节角 θ_3 :

$$\theta_3 = \pi - \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - a^2}{2l_2l_3}\right)$$

关节角 θ_2 :

$$p_1 = \arcsin\left(\frac{x_A - x_2}{a}\right)$$

$$p_2 = \arccos\left(\frac{l_2^2 + a^2 - l_3^2}{2l_2a}\right)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - p_1 - p_2$$

已知落足点的坐标, 进行逆运动学的计算, 可以计算出机器人腿部各个关节角度, 同理, 其他五条腿的关节角度也可以通过这种方法获取。

3.2. 仿生六足机器人足端轨迹规划及仿真

3.2.1. 仿生六足机器人足端轨迹规划

在规划机器人足端轨迹时, 需要减小机器人腿部在运动过程中所遇到的冲击, 可以使机器人整体运动更加稳定, 同时提高机器人的使用寿命, 所以需要对足端运动的速度以及加速度进行一定的约束[16][17]。

如表 4, 根据以上要求总结得到, 该六足机器人轨迹规划所需约束条件为:

Table 4. Constraint coefficients for trajectory planning of hexapod robot
表 4. 六足机器人轨迹规划的约束系数

约束系数	符号
初始位置	$P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$
中间位置	$P_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$
最终位置	$P_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$
初始速度	V_0
最终速度	V_2
初始加速度	a_0
最终加速度	a_2

根据上述七个约束条件, 可以用多项式进行表示:

$$p = c_6t^6 + c_5t^5 + c_4t^4 + c_3t^3 + c_2t^2 + c_1t + c_0$$

并将七个约束条件代入多项式中得:

$$p_0 = c_6t_0^6 + c_5t_0^5 + c_4t_0^4 + c_3t_0^3 + c_2t_0^2 + c_1t_0 + c_0$$

$$p_1 = c_6t_1^6 + c_5t_1^5 + c_4t_1^4 + c_3t_1^3 + c_2t_1^2 + c_1t_1 + c_0 \quad p_2 = c_6t_2^6 + c_5t_2^5 + c_4t_2^4 + c_3t_2^3 + c_2t_2^2 + c_1t_2 + c_0$$

$$v_0 = 6c_6t_0^5 + 5c_5t_0^4 + 4c_4t_0^3 + 3c_3t_0^2 + 2c_2t_0 + c_1$$

$$v_2 = 6c_6t_0^5 + 5c_5t_0^4 + 4c_4t_0^3 + 3c_3t_0^2 + 2c_2t_0 + c_1$$

$$a_0 = 30c_6t_0^4 + 20c_5t_0^3 + 12c_4t_0^2 + 6c_3t_0 + 2c_2$$

$$a_2 = 30c_6t_2^4 + 20c_5t_2^3 + 12c_4t_2^2 + 6c_3t_2 + 2c_2$$

式中, t_0 为初始时刻, 默认为 0; t_2 为由初位置到末位置所用时间; t_1 为中间时刻, 即: $(t_0 + t_2)/2$ 。其余约束条件 P_0 、 P_1 、 P_2 为常数项可保留, 为使初末状态时冲击减小, 运动平稳, 故令 V_0 、 V_2 、 a_0 、 a_2 均为 0。

可化简上式得到各系数 $c_0 \sim c_6$ 的值为:

$$c_0 = p_0$$

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = \frac{-42p_0 + 64p_1 - 22p_2}{t_2^3}$$

$$c_4 = \frac{111p_0 - 192p_1 + 81p_2}{t_2^4}$$

$$c_5 = \frac{-102p_0 + 192p_1 - 90p_2}{t_2^5}$$

$$c_6 = \frac{32p_0 - 64p_1 + 32p_2}{t_2^6}$$

在对位置约束条件进行多项式计算时, $P(X, Y, Z)$ 需要在 X 、 Y 、 Z 三个不同的方向上规划这些值的轨迹, 得到它们在 X 、 Y 、 Z 关于时间 t 的轨迹, 然后将这三个轨迹拟合到空间的三维坐标变化中, 可以得到机器人足端在三维空间中的运动轨迹[18] [19]。

3.2.2. 机器人足端轨迹规划仿真

基于 3.2.1 节所规划的机器人末端轨迹, 为检验其实际可行性, 本节借助 Matlab 对足端轨迹开展仿真分析。通过仿真可清晰呈现足端在关节空间中的运动轨迹曲线, 从而对轨迹规划的有效性与合理性进行评估[20]。

仿真中, 设置机器人运动速度 $v = 10 \text{ cm/s}$, 角速度 $w = 0 \text{ rad/s}$, 步态周期 $T = 2 \text{ s}$, 抬腿高度 $h = 80 \text{ mm}$ 。将上述参数输入 Matlab 仿真模型并运行, 所得曲线直观反映了足端在不同时刻的位置变化。

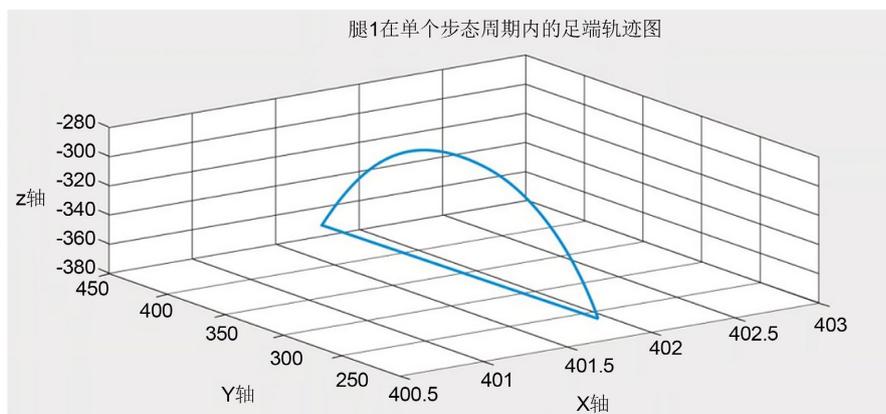


Figure 13. Trajectory of the sole of a single leg during a single gait cycle
图 13. 单腿在单个步态周期内的足端轨迹

从图 13 所示的关节空间足端轨迹曲线可以看出, 通过设定相应的运动速度与角速度, 能够精确得到机器人足端的预期运动轨迹。该轨迹不仅能使足端经过预先设定的位置点, 且整体曲线连贯无突变。此类轨迹设计有助于机器人在加速与减速阶段实现平稳着地, 显著减轻因关节角度突变带来的冲击, 从而提升腿部运动的流畅性与速度稳定性, 有利于实现更高效的机器人移动[21]。

4. 总结

为了适应火星环境下, 复杂的地形环境, 本文对蚂蚁的生理结构进行分析。基于分析结果, 对六足机器人的腿部结构和机身部分进行了三维建模。在设计过程中, 结合机器人性能需求, 进行了硬件控制系统的选型与搭建。同时, 根据机器人的运动需求, 对腿部的足端传感装置进行了相应设计。最后, 根据设计方案制作了六足机器人的样机。通过机器人机械结构的设计和硬件系统的搭建, 对相关功能进行测试, 为后续的机器人步态规划、动力学分析等理论奠定了基础。

基金项目

南通市科技项目市社会民生科技计划“基于智慧农业场景的三维重建与路径规划研究”(编号: MSZ2024106)。

参考文献

- [1] 周礼广. 基于机器学习的六足机器人波动步态自由切换控制研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [2] Wang, X.Y., Gao, L.J., Mao, S.W. and Pandey, S. (2017) CSI-Based Fingerprinting for Indoor Localization: A Deep Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **66**, 763-776.
- [3] Zhang, H., Hu, Z., Wei, J., et al. (2015) Poseidon: A System Architecture for Efficient GPU-based Deep Learning on Multiple Machines. arXiv: 1512.06216.
- [4] Takalkar, M.A. and Xu, M. (2017) Image Based Facial Micro-Expression Recognition Using Deep Learning on Small Datasets. 2017 *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, Sydney, 29 November-1 December 2017, 1-7. <https://doi.org/10.1109/dicta.2017.8227443>
- [5] Lotriet, A.P. and Engelbrecht, J.A.A. (2024) Foot Placement Optimisation for a Hexapod Robot on Uneven Terrain Using Heightmaps. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, **406**, Article ID: 04005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440604005>
- [6] 李满宏. 六足机器人自由步态规划及运动机理研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [7] 陈媛. 六足移动机器人的仿生机构设计与运动学分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [8] Liu, Z. and Karydis, K. (2021) Position Control and Variable-Height Trajectory Tracking of a Soft Pneumatic Legged Robot. 2021 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, 27 September-1 October 2021, 1708-1709. <https://doi.org/10.1109/iros51168.2021.9635966>
- [9] Chen, G., Zhao, Z., Wang, Z., Tu, J. and Hu, H. (2023) Swimming Modeling and Performance Optimization of a Fish-Inspired Underwater Vehicle (FIUV). *Ocean Engineering*, **271**, Article ID: 113748. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113748>
- [10] Zenker, S., Aksoy, E.E., Goldschmidt, D., Worgotter, F. and Manoonpong, P. (2013) Visual Terrain Classification for Selecting Energy Efficient Gaits of a Hexapod Robot. 2013 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Wollongong, 9-12 July 2013, 577-584. <https://doi.org/10.1109/aim.2013.6584154>
- [11] Juang, C., Chang, Y. and Hsiao, C. (2011) Evolving Gaits of a Hexapod Robot by Recurrent Neural Networks with Symbiotic Species-Based Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 3110-3119. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2072892>
- [12] Buchanan, R., Bandyopadhyay, T., Bjelonic, M., Wellhausen, L., Hutter, M. and Kottege, N. (2019) Walking Posture Adaptation for Legged Robot Navigation in Confined Spaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 2148-2155. <https://doi.org/10.1109/lra.2019.2899664>
- [13] Grezmak, J., Graf, N., Behr, A. and Daltorio, K. (2021) Terrain Classification Based on Sensed Leg Compliance for Amphibious Crab Robot. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 23308-23316. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3109864>

-
- [14] Kolvenbach, H., Bartschi, C., Wellhausen, L., Grandia, R. and Hutter, M. (2019) Haptic Inspection of Planetary Soils with Legged Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 1626-1632. <https://doi.org/10.1109/ra.2019.2896732>
- [15] Lin, P.C., Komsuglu, H. and Koditschek, D.E. (2006) Sensor Data Fusion for Body State Estimation in a Hexapod Robot with Dynamical Gaits. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, 18-22 April 2005, 4733-4738.
- [16] Yao, S., Yao, Y., Liu, R., *et al.* (2022) A Portable off-Road Crawling Hexapod Robot. *Journal of Field Robotics*, **39**, 739-762. <https://doi.org/10.1002/rob.22073>
- [17] Chen, W., Ren, G., Zhang, J. and Wang, J. (2012) Smooth Transition between Different Gaits of a Hexapod Robot via a Central Pattern Generators Algorithm. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **67**, 255-270. <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9661-1>
- [18] Zhong, G., Chen, L., Jiao, Z., *et al.* (2017) Locomotion Control and Gait Planning of a Novel Hexapod Robot Using Biomimetic Neurons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **26**, 624-636.
- [19] Chen, G., Peng, W., Wang, Z., Tu, J., Hu, H., Wang, D., *et al.* (2023) Modeling of Swimming Posture Dynamics for a Beaver-Like Robot. *Ocean Engineering*, **279**, Article ID: 114550. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114550>
- [20] Jiang, H. and Learned-Miller, E. (2017) Face Detection with the Faster R-CNN. *2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, Washington, 30 May-3 June 2017, 650-657. <https://doi.org/10.1109/fg.2017.82>
- [21] Deng, Z., Yang, R., Lan, R., Liu, Z. and Luo, X. (2020) SE-IYOLOV3: An Accurate Small Scale Face Detector for Outdoor Security. *Mathematics*, **8**, Article 93. <https://doi.org/10.3390/math8010093>