

The Design and Analysis of the Biomimetic Adherent Inchworm-Like Robot

Yanmao Ye¹, Yaolei Zhang², Hu Huang², Guochen Fan², Mingying Huo^{1*}, Naiming Qi¹

¹Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

²China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing

Email: huomingying123@163.com

Received: Dec. 7th, 2017; accepted: Dec. 21st, 2017; published: Dec. 28th, 2017

Abstract

In view of the need of future space weapons' development, it proposes a kind of biomimetic adherent inchworm-like robot, which combines the biomimetic gecko adhesive material and the movement mode of geometer. The mechanism, electrical system and control strategy of the biomimetic adherent inchworm-like robot are designed in this paper. Then, it designs the interface relationships between each electrical element and the semi-autonomous control strategy. The major structure and adherent material structure of adherent sucker are designed in this paper. Then it accomplishes the comparison of the adherent material and the calculation of the adhesive power. After that, it designs three range sensors for the adherent sucker. And base on the range sensors, it accomplishes the calculation of the position and pose between the adherent sucker and target surface. This paper uses the Deanvit-Hartenberg method to set up the kinematic model of the biomimetic adherent inchworm-like robot. Then it accomplishes the gait planning of the robot, and designs the "One Gait". At last, it sets up the virtual prototype model of the robot in the software Adams, and it carries out the simulation of robot's gait, verifying the correctness of the gait planning.

Keywords

Space Weapon, Biomimetic, Inchworm-Like Robot, Mechanism Modeling, Kinematics, Gait Planning

仿生粘附式尺蠖机器人设计及分析

叶炎茂¹, 张耀磊², 黄 虎², 范国臣², 霍明英^{1*}, 齐乃明¹

¹哈尔滨工业大学, 航空宇航与力学工程系, 黑龙江 哈尔滨

²中国运载火箭技术研究院, 北京

Email: huomingying123@163.com

收稿日期: 2017年12月7日; 录用日期: 2017年12月21日; 发布日期: 2017年12月28日

*通讯作者。

文章引用: 叶炎茂, 张耀磊, 黄虎, 范国臣, 霍明英, 齐乃明. 仿生粘附式尺蠖机器人设计及分析[J]. 国际航空航天科学, 2017, 5(4): 194-211. DOI: [10.12677/jast.2017.54022](https://doi.org/10.12677/jast.2017.54022)

摘要

本文针对未来空间寄生武器发展的需要,提出了一种结合壁虎刚毛粘附材料和尺蠖运动形式的仿生粘附尺蠖机器人。本文首先对仿生粘附式尺蠖机器人的机构、电气系统和控制策略进行总体设计,并设计出机器人各电气元件之间的接口关系和半自主的控制策略。设计了粘附吸盘的主体结构 and 粘附材料结构,并完成了粘附材料的对比选型和粘附力计算。为粘附吸盘设计了3个距离传感器,并完成了基于距离传感器的粘附吸盘和目标表面的位姿解算。采用Deanvit-Hartenberg方法对仿生粘附式尺蠖机器人进行了运动学建模,并进行了机器人的步态规划,设计了机器人的“一字”步态。最后利用Adams软件搭建机器人的虚拟样机模型,对尺蠖机器人的“一字”步态进行了仿真,验证了步态规划结果的准确性。

关键词

空间武器, 仿生, 尺蠖机器人, 机构建模, 运动学, 步态规划

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着空间技术的迅猛发展, 世界各军事大国对于外层空间的争夺日趋激烈, 空间飞行器在现代战争中的重要性也日益凸显。以卫星为主体的空间力量在现代战争中起到军事侦察、导航定位、作战指挥通讯等关键作用, 且能实施全天候、多方位的作战支援[1]。在未来的空间攻防对抗中, 空间武器因其能够快速打击敌方的关键领域而起到重要作用。因此, 各国都在积极部署空间军事力量, 研制天基武器和空间武器平台[2]。

在当今军事背景下已经出现的空间武器方案有动能撞击器、天基激光器、轨道位置推移器、天基微波干扰器和寄生式空间武器等[3]。寄生式空间武器相比于其他空间武器有成本低、起效快、隐蔽性高等优点, 能适应未来空间武器的发展要求。因此, 发展能够在非合作目标卫星上吸附、移动、潜伏和破坏的微型反卫星机器人具有重要的现实意义。反卫星机器人平时需要寄生在敌方卫星上, 要求体积和质量尽量小, 且对能量的消耗较小。此外, 反卫星机器人需要具备在真空零重力环境下对非合作目标卫星进行吸附巡游的能力。

针对以上问题, 本文提出一种结合仿壁虎粘附材料和尺蠖运动方式的新型机器人。此种机器人利用仿壁虎粘附材料与空间非合作目标表面间形成的范德华力完成吸附, 能够适用于真空环境。运动形式采用自然界尺蠖的运动方式, 具有地形适应能力强、质量轻和能耗低等优点, 避免了传统四足机器人由于驱动关节多造成的质量高且能耗大等缺点, 非常适用于空间无重力环境下的复杂地形移动。

2. 仿生黏附式尺蠖机器人设计

2.1. 仿生粘附式尺蠖机器人机构设计

本仿生粘附式尺蠖机器人的机构设计是基于已有的舵机和控制器等元器件, 对尺蠖机器人进行设计。采用三维软件对尺蠖机器人进行三维实体建模, 所得的模型整体结构图如图1所示。

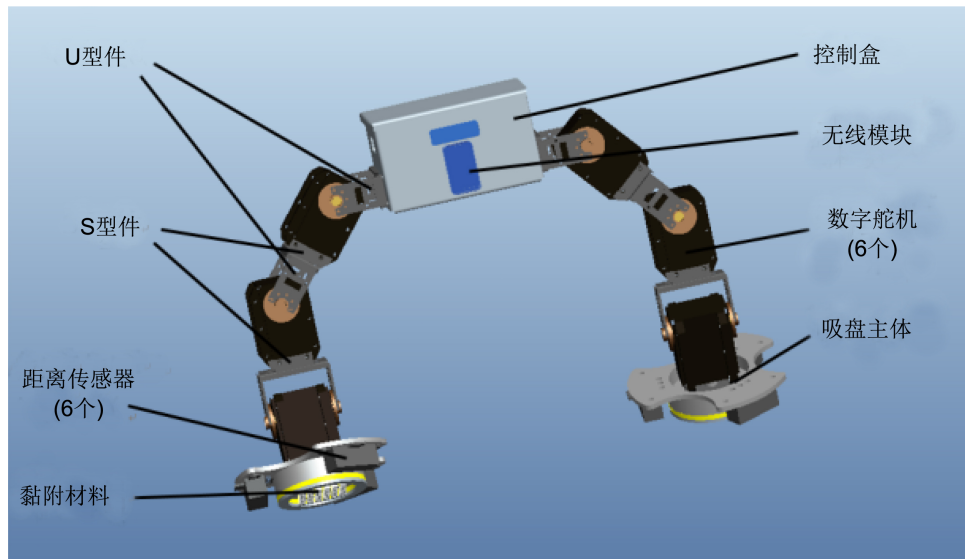


Figure 1. General design structure of the biomimetic adherent inchworm-like robot

图 1. 仿生粘附式尺蠖机器人整体结构图

尺蠖机器人的关节由舵机上的舵机轴加上前后舵盘组成，整个机器人有 6 个关节。靠近控制盒的 4 个关节的轴线在空间的指向保持平行，靠近吸盘的 2 个关节的轴线在空间上与另外 4 个关节保持垂直。整个机器人一共有 6 个臂杆，每个臂杆由舵机主体和 U 型转接架、S 型转接架三者组成。S 转接型架通过螺栓连接到舵机的底部，U 型转接架通过螺钉与舵机的前后舵盘相连，最后相邻的 S 型转接架与 U 型转接架通过 4 个螺栓连接。机器人控制盒采用铝合金材料加工而成，其基本尺寸为 $95 \times 65 \times 55$ mm (长宽高)。在控制盒的两面留有舵机 U 型转接架的接口，四面留有电缆出口，底部留有电池连接螺栓口和充电线出口。控制盒的内部组成主要包含电池、控制器和无线传输模块、以及各种连接线。粘附吸盘组成部分包括吸盘主体结构件、粘附材料和距离传感器(三个沿径向均布)。吸盘主体结构件用于与底部舵机相连，同时安装三个距离传感器和粘附材料。

如图 2 所示为设计制造加工得到的仿生粘附式尺蠖机器人实物图。

2.2. 仿生粘附式子尺蠖机器人控制策略设计

根据运动学原理，尺蠖机器人的姿态由 6 个关节的角度唯一确定。此外，在本文中，对于仿生粘附式尺蠖机器人的控制还涉及到吸盘吸附和脱附状态的控制。综合来讲，对仿生粘附式尺蠖机器人的控制本质上就是对 6 个舵机转动角度和吸盘粘附材料电压通断的控制。仿生粘附式尺蠖机器人的控制策略如图 3 所示。

仿生粘附式尺蠖机器人的控制流程如下：

1) 6 个距离传感器测得吸盘上三个点与目标平面的距离，6 个舵机的绝对码盘测得舵机轴的绝对转角，传送到控制器。

2) 控制器根据距离传感器的数值解算吸盘底部平面与目标平面的姿态和距离关系，根据舵机轴的转角解算尺蠖机器人的姿态。之后根据吸盘与目标平面的关系进行机器人步态的规划，计算出 6 个舵机和粘附吸盘的控制量，并输送给执行机构。

3) 执行机构接收到控制器的控制指令后，驱动 6 舵机转动到对应的角度，并控制吸盘的通断状态。

4) 尺蠖机器人完成一个步态，进入下一个步态。



Figure 2. Practicality picture of the biomimetic adherent inchworm-like robot
图 2. 仿生粘附式尺蠖机器人实物图

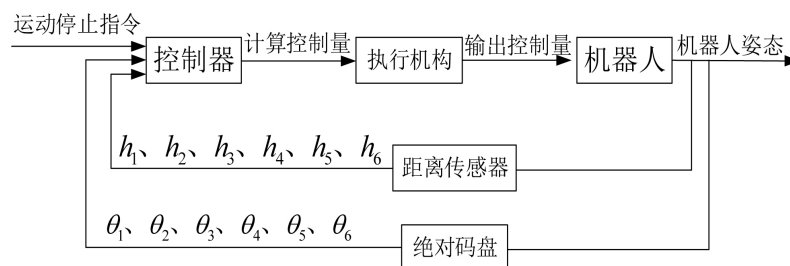


Figure 3. Conceptual sketch of control strategy
图 3. 控制策略示意图

3. 仿生粘附式尺蠖机器人粘附吸盘设计

3.1. 粘附吸盘结构详细设计

吸盘的主体结构包括两部分，一部分是底部的圆柱形结构，一部分是顶部的“三花瓣”结构。如图 4 所示，主体结构有一个凹槽，且凹槽的中间有一个圆柱形的突起，用于与机器人的底部舵机的 S 型转接架连接。吸盘上部的三个花瓣形结构上留有传感器的安装孔，用于与三个传感器相连。此外，底部留有粘附材料附着圆盘，用于与粘附材料的连接。

每一个吸盘的底端装有 3 个距离传感器，沿径向呈 120° 均布。每个传感器通过两个螺栓与吸盘主体结构连接，传感器的安装朝向指向吸盘的底部。

三个距离传感器可以测得吸盘上的三个点与目标平面的距离。通过对三个距离数据的解算，可以得到地面与当前吸盘底面的夹角和距离。

1) 粘附材料的结构设计

粘附材料的分层结构如图 5 所示，分为弹性层和刚毛层。弹性层采用的是航天级的橡胶材料，其主要作用是使粘附材料能够随粘附表面发生形变，以适应不平整表面，其次还起到缓冲减震的作用。刚

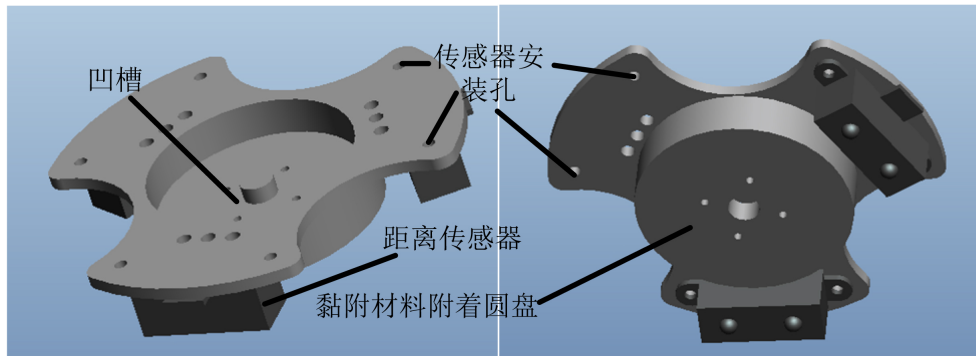


Figure 4. Conceptual sketch of control strategy

图 4. 控制策略示意图

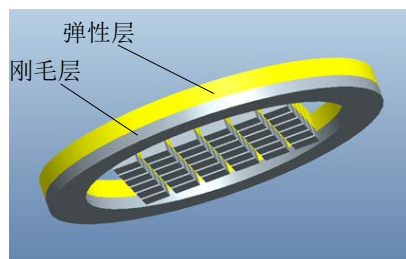


Figure 5. Structure drawing of the adhesive material

图 5. 粘附材料结构示意图

毛层主要作用为提供吸盘的粘附力。

吸盘的平面结构组成包括外围圆环和中心 6×6 的正方形阵列。内部的每个小方块都是附着于弹性层上的，且方块间存在间隙，此结构能允许小方块发生形变和小范围位移，从而适应不平坦的目标表面。外部圆环为完整的表面，能够对平坦的表面有良好的适应性。

2) 粘附材料的选型

国内外对仿壁虎粘附材料的研究已十分广泛，目前用于制备仿壁虎干性粘附阵列(GSAs 阵列)的材料主要有两种：高分子聚合物基 GSAs 阵列和碳纳米管基 GSAs 阵列，它们在弹性模量、黏附力方面有不同的表现。参考国内相关文献，归纳得到不同仿壁虎刚毛干性粘附材料的对比表如表 1 所示。

从表格中可以看出，在各种粘附材料中，粘附力表现比较好的是聚氨酯材料和碳纳米管材料，目前关于这两种材料的仿壁虎刚毛干性粘附阵列的研究也是最成熟的。此外，预压力也是衡量粘附材料好坏的一个重要指标，预压力过大会限制粘附材料的使用范围。碳纳米管所需的预压力较大。而本论文中的仿生粘附式尺蠖机器人电机功率较小，且单独工作，没有外界提供的额外支撑，难以提供较大的预压力。而在太空的微低重力环境下，尺蠖机器人对目标的粘附不需要太大的粘附力。

综上所述，选择基于聚氨酯材料的仿壁虎刚毛干性粘附阵列作为本论文中粘附吸盘的粘附材料是最为合适的。

3.2. 吸盘底部与目标平面的位姿解算

3.2.1. 目标平面姿态的解算

为了解算目标平面和吸盘底部平面的夹角，建立如图 6 所示坐标系。

坐标原点位于三个传感器的中心点 A、B、C 所形成的平面上，处于圆盘的中心位置。

Table 1. Comparison table of different gecko-seta-like dry adhesive material
表 1. 不同仿壁虎刚毛干性粘附材料对比表

材料	弹性模量	结构特征	制备方法	预压力 (N/cm ²)	法向粘附力 (N/cm ²)	切向粘附力 (N/cm ²)	相关文献
聚丙烯(PP)	1 GPa	倾斜阵列	模塑和辊压成型	0.1	~0	9	[4]
聚酰亚胺(PI)	3 GPa	大长径比	电子束刻蚀	50	3	—	[5]
聚氨酯(PU)	3 MPa	带有铲状末端的 倾斜阵列	软光刻	12	5	10	[6] [7]
碳纳米管	>500 GPa	大长径比	催化化学气相 沉积法	28	~2.2	~23	[8]

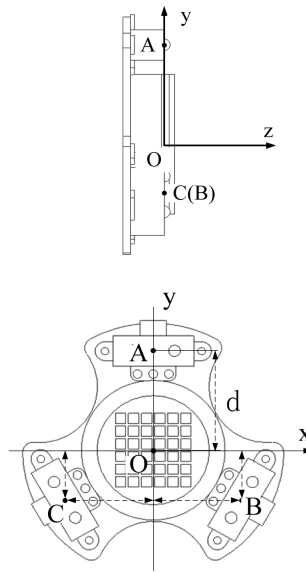


Figure 6. Conceptual sketch of the distance sensor's coordinate
图 6. 距离传感器坐标示意图

设传感器中心点到圆心 O 的距离为 $d = 39.125$ 。由几何关系可以得到 A 、 B 、 C 三点的坐标为： $A(0, d, 0)$ 、 $B(\sqrt{3}d/2, -d/2, 0)$ 、 $C(-\sqrt{3}d/2, -d/2, 0)$ 。如图 7 所示。

设目标平面上对应的传感器的三个探测点的为 A' 、 B' 、 C' ，坐标为 $A'(0, d, h_1)$ 、 $B'(\sqrt{3}d/2, -d/2, h_2)$ 、 $C'(-\sqrt{3}d/2, -d/2, h_3)$ 。

设 A' 、 B' 、 C' 所在的目标平面的平面方程为：

$$x + ay + bz + c = 0$$

将 A' 、 B' 、 C' 的坐标代入平面方程中，可以解得：

$$\begin{cases} a = \frac{2(h_1 - h_2)(h_2 - h_3)}{3\sqrt{3}d^2} + \frac{\sqrt{3}}{3} \\ b = \frac{h_3 - h_2}{\sqrt{3}d} \\ c = \frac{2(h_2 - h_1)(h_2 - h_3) + 3h_1(h_2 - h_3)}{3\sqrt{3}d} - \frac{\sqrt{3}}{3}d \end{cases}$$

设目标平面与坐标系三个轴的交点分别为 X 、 Y 、 Z ，由几何关系可以求得三个点的坐标为 $X(-c,0,0)$ 、 $Y(0,-c/a,0)$ 、 $Z(0,0,-c/b)$ 。

设目标平面与 oyz 平面的交线 YZ 与 y 轴的夹角为 α ，由几何关系可得 $\tan \alpha = -(c/b)/-(c/a) = a/b$ ， $\alpha = \arctan(a/b)$ 。由尺蠖机器人的结构示意图可知，靠近吸盘的舵机轴线是与 x 轴平行的。因此，只要驱动舵机沿着逆时针方向(从 x 轴方向往原点 O 看)转动 α 角，便可使目标平面与 y 轴平行(如图 8 所示)。

再用同样的方法，可以测算得到此时目标平面与 y 轴的夹角 β 。由尺蠖机器人的结构示意图可知，远离吸盘的两个舵机轴线是与 y 轴平行的。只要驱动任一个舵机沿着顺时针方向(从 y 轴方向往原点 O 看)转动 β 角，便可使得目标平面与 oxy 平面(即吸盘底部平面)平行，从而为下一步驱动吸盘与目标平面粘附做准备。

3.2.2. 目标平面与吸盘距离的解算

目标平面与吸盘的距离可以定义为吸盘中心点(即坐标原点)与目标平面的距离，也就是坐标原点 O 到目标平面与 z 轴交点 Z 的距离 OZ 。当用前面的方法计算出目标平面在坐标系中的表达式 $x+ay+bz+c=0$ 后，令 $x=0, y=0$ ，可得目标平面与吸盘的距离： $H = OZ = |c/b|$ (如图 9 所示)。

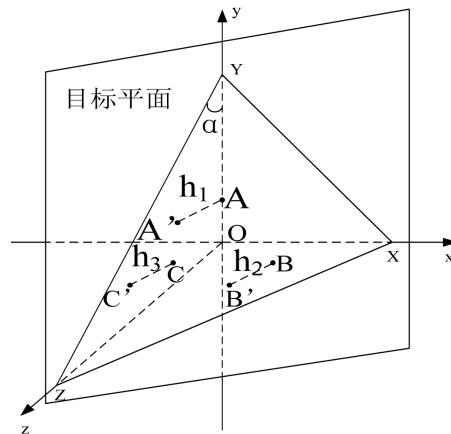


Figure 7. Position sketch of the points in distance sensor

图 7. 距离传感器各点位置示意图

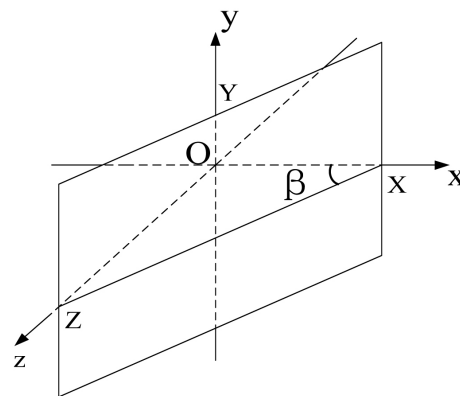


Figure 8. Position relationship of target plane and coordinate after first rotation

图 8. 一次旋转后目标平面与坐标系位置关系图

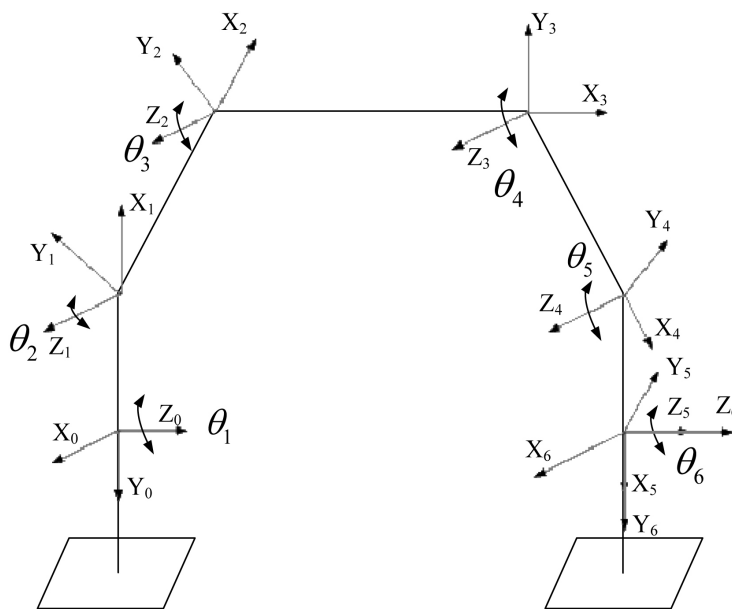


Figure 10. The coordinate of inchworm-like robot
图 10. 尺蠖机器人坐标系

Table 2. D-H parameter table of inchworm-like robot
表 2. 尺蠖机器人 D-H 参数表

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	-90°	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4
5	a_5	-90°	0	θ_5
6	0	0	0	θ_6

求得尺蠖机器人相邻坐标系之间的转换矩阵 0A_1 、 1A_2 、 2A_3 、 3A_4 、 4A_5 、 5A_6 后，可以求得尺蠖机器人的左脚和右脚上坐标系之间的转换矩阵为：

$$\begin{aligned}
 {}^0A_6 &= {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \\
 &= \begin{bmatrix} s_1 s_6 + c_1 c_6 c_{2345} & s_1 c_6 - c_1 s_6 c_{2345} \\ -c_1 s_6 + s_1 c_6 c_{2345} & -c_1 c_6 - s_1 s_6 c_{2345} \\ -c_6 s_{2345} & s_6 s_{2345} \\ 0 & 0 & 0 \\ -c_1 s_{2345} & a_1 c_1 + a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} + a_4 c_1 c_{234} + a_5 c_1 c_{2345} \\ a_1 s_1 + a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} + a_4 s_1 c_{234} + a_5 s_1 c_{2345} \\ -a_2 s_2 - a_3 s_{23} - a_4 s_{234} - a_5 s_{2345} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)
 \end{aligned}$$

式中： $s_i = \sin \theta_i$ 、 $c_i = \cos \theta_i$ 、 $s_{ij\dots n} = \sin(\theta_i + \theta_j + \dots + \theta_n)$ 、 $c_{ij\dots n} = \cos(\theta_i + \theta_j + \dots + \theta_n)$ 。

4.2.3. 仿生粘附式尺蠖机器人的逆运动学

仿生粘附式尺蠖机器人的逆运动学实际上就是在已知机器人的姿态(即左右脚的相对位姿关系)的情况下, 寻找一种或者多种能够满足该姿态的关节转角[9]。本论文种的尺蠖机器人有 6 个转动关节, 明显存在冗余自由度, 理论上讲逆运动学问题具有无穷多解。下面对尺蠖机器人的逆运动学方程进行推导:

设右脚相对左脚(即坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$ 相对坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$) 的转换矩阵为 ${}^0A_6 = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 & \hat{z}_1 & p_1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 & \hat{z}_2 & p_1 \\ \hat{x}_3 & \hat{y}_3 & \hat{z}_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 两

边同时乘以 ${}^0A_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 得到 ${}^0A_1^{-1}{}^0A_6$, 该矩阵与矩阵 ${}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6$ 是等价的,

利用两个矩阵对应元素相等, 通过反三角函数的计算, 可以求得逆运动学的解为:

$$\begin{aligned} q_1 = \theta_1 &= \arctan 2 \left(\frac{-\hat{z}_1}{\hat{z}_2} \right) \pm \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{(-\hat{z}_1)^2 + \hat{z}_2^2} - 0}{0} \right) \\ &= \arctan 2 \left(\frac{-\hat{z}_1}{\hat{z}_2} \right) \pm \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4-3)$$

解得 $q_1 = \theta_1$ 有两个解, 角度上相差 π 。

$$q_6 = \theta_6 = \arctan 2 \left(\frac{\hat{x}_2 \cos \theta_1 - \hat{x}_1 \sin \theta_1}{\hat{y}_2 \cos \theta_1 - \hat{y}_1 \sin \theta_1} \right) \quad (4-4)$$

由于 $q_1 = \theta_1$ 有两个解, 故 $q_6 = \theta_6$ 相应地也有两个解。

$$q_3 = \theta_3 = \arctan 2 \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \pm \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_3^2}}{K_3} \right) \quad (4-5)$$

其中:

$$K_1 = -2a_2a_4 \sin \theta_4, \quad K_2 = 2a_2(a_3 + a_4 \cos \theta_4), \quad K_3 = A^2 + B^2 - a_2^2 - (a_3 + a_4 \cos \theta_4)^2 - a_4^2 \sin^2 \theta_4$$

$$\begin{aligned} A &= a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ &\quad - a_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ &= a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + a_4 \cos \theta_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - a_4 \sin \theta_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ &\quad + a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ &= a_2 \sin \theta_2 + (a_3 + a_4 \cos \theta_4) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + a_4 \sin \theta_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

需要注意的是:

- 1) 只有当 $K_1^2 + K_2^2 \geq K_3^2$ 时 q_3 才有解。当不满足此式时, 所给出的位姿不在尺蠖机器人的运动范围内。
- 2) q_3 有两个解, 分别对应尺蠖机器人关节 3 的两种状态。

$$q_2 = \theta_2 = \arctan 2 \left(\frac{K'_1}{K'_2} \right) \pm \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{K_1'^2 + K_2'^2 - K_3'^2}}{K_3'} \right) \quad (4-6)$$

其中, $K'_1 = B$ 、 $K'_2 = A$ 、 $K'_3 = \frac{-A^2 - B^2 - a_2^2 + (a_3 + a_4 \cos \theta_4)^2 + a_4^2 \sin^2 \theta_4}{2a_2}$

需要注意的是:

1) 只有当 $K_1'^2 + K_2'^2 \geq K_3'^2$ 时 q_2 才有解。当不满足此式时, 所给出的位姿不在尺蠖机器人的运动范围内。

2) q_2 有两个解, 着分别对应尺蠖机器人关节 2 的两种状态。

此外, 还存在角度关系:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = \arctan 2 \left(\frac{\hat{z}_1 \cos \theta_1 + \hat{z}_2 \sin \theta_1}{\hat{z}_3} \right) \quad (4-7)$$

由于 $q_1 = \theta_1$ 有两个解, 故 $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 也对应有两个解。

在 $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 中:

1) $q_4 = \theta_4$ 为假设的已知值, $q_2 = \theta_2$ 和 $q_3 = \theta_3$ 分别有两个解, 则 $(\theta_2, \theta_3, \theta_4)$ 有四组解

2) $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 有两个解, 故 θ_5 有 8 个解, $(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 有 8 组解。

由以上的分析可以得出仿生粘附式尺蠖机器人逆运动学的相关结论如下: 本论文中的仿生粘附式尺蠖机器人具有冗余的自由度, 满足尺蠖机器人位姿的机器人关节转角有无数多种组合。当指定机器人的关节 4 的转角 $q_4 = \theta_4$ 为指定值时, 可以解算得到有限的逆运动学的解为: $q_1 = \theta_1$ 有两个解, 对应 $q_6 = \theta_6$ 的两个解, 此外, 每一组解 (θ_1, θ_6) 对应 4 组解 $(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$, 故 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ 一共有 8 组解。

5. 仿生粘附式尺蠖机器人步态规划

5.1. 机器人姿态和轨迹规划

用几何约束法进行步态规划, 首先要规划好尺蠖机器人的行走姿态和轨迹。在本论文中, 研究尺蠖机器人的“一字”步态: 机器人两脚在目标平面的落脚痕迹在一条直线上。在“一字”步态下机器人的关节 J1 和 J6 不动, 对应的关节转角 $\theta_1 = \theta_6 = 90^\circ$ 且始终不变。因此, 机器人的自由度由 6 个变为 4 个。整个步态过程如图 11 所示。

一个尺蠖步态周期的运动过程为:

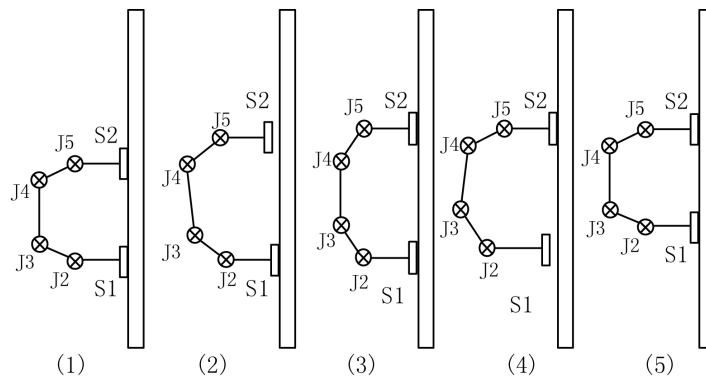


Figure 11. Gait sketch of inchworm
图 11. 尺蠖步态示意图

- 1) 初始步态, 尺蠖机器人两吸盘贴于目标平面。
- 2) 足 S1 保持吸附状态, 足 S2 的吸盘脱附, 关节 J2、J3、J4 和 J5 配合运动使足 S2 向上向前运动。
- 3) 关节 J2、J3、J4 和 J5 配合运动使足 S2 向下向前运动, 等足 S2 运动至合适位置时, 吸盘重新黏附到目标平面。
- 4) 足 S2 保持吸附状态, 足 S1 的吸盘脱附, 关节 J2、J3、J4 和 J5 配合运动使足 S1 向上向前运动。
- 5) 关节 J2、J3、J4 和 J5 配合运动使足 S1 向下向前运动, 等足 S1 运动至合适位置时, 吸盘重新黏附到目标平面。

考虑到黏附吸盘的尺寸较大, 为了避免干涉和方便吸盘进行黏附控制, 规划在行走过程中吸盘平面始终与目标平面保持平行, 此时有:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = -180^\circ \quad (5-1)$$

本论文中的尺蠖机器人存在冗余的自由度, 为了使步态规划中运动学方程解的唯一性, 需要引入额外约束降低尺蠖机器人的自由度。限定尺蠖机器人在运动过程中关节 J3 和 J4 始终处于对称状态, 即有:

$$\theta_3 = \theta_4 \quad (5-2)$$

5.2. 关节运动方程求解

5.2.1. 运动学方程的建立

在尺蠖机器人原有运动学模型的基础上, 引入约束, 可以建立约束条件下的运动学方程。

尺蠖机器人右脚相对左脚的坐标变化矩阵为:

$${}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 & \hat{z}_1 & p_1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 & \hat{z}_2 & p_1 \\ \hat{x}_3 & \hat{y}_3 & \hat{z}_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

其中, $\begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 & \hat{z}_1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 & \hat{z}_2 \\ \hat{x}_3 & \hat{y}_3 & \hat{z}_3 \end{bmatrix}$ 为坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$ 相对于坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 的其次坐标变化矩阵, $[p_1 \ p_2 \ p_3]^T$ 为

坐标原点 O_6 在坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 中的表达式。

根据步态规划, 机器人在行走过程中两个吸盘平面保持平行, 且与目标平面平行, 可知:

$$\begin{aligned} {}^0A_6 &= {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \\ &= \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 & \hat{z}_1 & p_1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 & \hat{z}_2 & p_1 \\ \hat{x}_3 & \hat{y}_3 & \hat{z}_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_1 \\ 0 & 1 & 0 & p_1 \\ 0 & 0 & 1 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-4)$$

且有:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = -180^\circ$$

将式有关表达式代入 ${}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6$ 中, 并限定 $\theta_3 = \theta_4$, 经过化简可以得到:

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_2 = -a_1 - a_2 \cos \theta_2 - a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) - a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_5 \\ p_3 = -a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_4 \sin(\theta_2 + 2\theta_3) \end{cases} \quad (5-5)$$

仿生粘附式尺蠖机器人一个完整的步态主要包括右脚迈步和左脚迈步两个过程。设尺蠖机器人初始状态下各关节的转角为 $\theta_2 = -30^\circ$ 、 $\theta_3 = -60^\circ$ 、 $\theta_4 = -60^\circ$ 、 $\theta_5 = -30^\circ$ ，此时可以求得左右脚在水平方向的距离为 $a_2 + a_3$ 。

当右脚往前迈时 $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 关节的运动轨迹可用下列方程组描述：

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_2 = -7t \\ p_3 = a_2 + a_3 + 7t \end{cases} \quad t \in (0, 3 \text{ s}) \quad (5-6)$$

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_2 = -21 + 7(t-3) \\ p_3 = a_2 + a_3 + 21 + 7(t-3) \end{cases} \quad t \in (3 \text{ s}, 6 \text{ s}) \quad (5-7)$$

当左脚往前迈时 $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 关节的运动轨迹可用下列方程组描述：

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_2 = 7(t-6) \\ p_3 = a_2 + a_3 + 42 - 7(t-6) \end{cases} \quad t \in (6 \text{ s}, 9 \text{ s}) \quad (5-8)$$

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_2 = 21 - 7(t-9) \\ p_3 = a_2 + a_3 + 21 - 7(t-9) \end{cases} \quad t \in (9 \text{ s}, 12 \text{ s}) \quad (5-9)$$

5.2.2. 运动学方程的求解

当 $t \in (0, 3 \text{ s})$ 时，由式(5-5)和(5-6)有：

$$-7t = -a_1 - a_2 \cos \theta_2 - a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) - a_4 \cos(\theta_2 + 2\theta_3) + a_5 \quad (5-10)$$

$$a_2 + a_3 + 7t = -a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_4 \sin(\theta_2 + 2\theta_3) \quad (5-11)$$

由于 $a_1 = a_2 = a_4 = a_5$ ，化简可得：

$$7t = a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos(\theta_2 + 2\theta_3) \quad (5-12)$$

$$a_2 + a_3 + 7t = -a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin(\theta_2 + 2\theta_3) \quad (5-13)$$

式(5-12)和(5-13)两边平方后相加，并利用 $\cos 2\theta_3 = 2\cos^2 \theta_3 - 1$ ，化简可得：

$$4a_2^2 \cos^2 \theta_3 + 4a_2 a_3 \cos \theta_3 + a_3^2 - 49t^2 - (a_2 + a_3 + 7t)^2 = 0 \quad (5-14)$$

解得：

$$\begin{aligned} \cos \theta_3 &= \frac{-4a_2 a_3 \pm \sqrt{16a_2^2 a_3^2 - 16a_2^2 [a_3^2 - 49t^2 - (a_2 + a_3 + 7t)^2]}}{8a_2^2} \\ &= \frac{-a_3 \pm \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \end{aligned} \quad (5-15)$$

因为 $\frac{-a_3}{2a_2} = \frac{-155.42}{2 \times 70.61} \approx -1.1$ ，故负号舍去。

若 θ_3 有解，则需满足 $-1 \leq \cos \theta_3 \leq 1$ ，即：

$$-1 \leq \frac{-a_3}{2a_2} + \frac{\sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \leq 1,$$

解得 $0 \leq t \leq 17.0$ ，符合实际情况，故可得：

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{-a_3 + \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \right) = \theta_4 \quad (5-16)$$

由 (5-12) $\times \cos \theta_2$ 和 (5-13) $\times \sin \theta_2$ 可得：

$$7t \cos \theta_2 = a_2 \cos^2 \theta_2 + a_3 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + 2\theta_3) \quad (5-17)$$

$$(a_2 + a_3 + 7t) \sin \theta_2 = -a_2 \sin^2 \theta_2 - a_3 \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + 2\theta_3) \quad (5-18)$$

两式相减，可得：

$$7t \cos \theta_2 - (a_2 + a_3 + 7t) \sin \theta_2 = a_2 + a_3 \cos \theta_3 + a_2 \cos 2\theta_3 \quad (5-19)$$

即：

$$\begin{aligned} & -(a_2 + a_3 + 7t) \sin \theta_2 + 7t \cos \theta_2 \\ &= a_2 + a_3 \left(\frac{-a_3 + \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \right) \\ &+ a_2 \left[2 \left(\frac{-a_3 + \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \right)^2 - 1 \right] \\ &= \frac{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2 - a_3 \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \end{aligned} \quad (5-20)$$

令：

$$k_1 = -(a_2 + a_3 + 7t)$$

$$k_2 = 10t$$

$$k_3 = \frac{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2 - a_3 \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2}$$

则有：

$$\theta_2 = \arctan 2 \left(\frac{k_1}{k_2} \right) \pm \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_3} \right) \quad (5-21)$$

为了使 θ_2 为负号且符合要求，取

$$\theta_2 = \arctan 2 \left(\frac{k_1}{k_2} \right) + \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_3} \right) \quad (5-22)$$

此外，可以求得关节 J5 的转角为：

$$\begin{aligned}
 \theta_5 &= \pi - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
 &= \pi - \left[\arctan 2 \left(\frac{k_1}{k_2} \right) + \arctan 2 \left(\frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_3} \right) \right] \\
 &\quad - 2 \arccos \left(\frac{-a_3 + \sqrt{49t^2 + (a_2 + a_3 + 7t)^2}}{2a_2} \right)
 \end{aligned} \tag{5-23}$$

同理可以求得 $t \in (3\text{ s}, 6\text{ s})$, $t \in (6\text{ s}, 9\text{ s})$, 和 $t \in (9\text{ s}, 12\text{ s})$ 时的运动学方程。

5.3. 虚拟样机建模及仿真

Adams 软件是一款常用的虚拟样机技术软件，可以用于运动学和动力学等的仿真。运用 ADAMS 软件对尺蠖机器人进行运动学仿真，可以验证运动学方程和步态规划结果的正确性。在软件中建立的模型如图 12 所示。

设定尺蠖机器人的初始位置为 $\theta_2 = -30^\circ$ 、 $\theta_3 = -60^\circ$ 、 $\theta_4 = -60^\circ$ 、 $\theta_5 = -30^\circ$ ，采用步态规划中的“一字”步态进行仿真。在 4 个关节上设置 4 个运动副，并设关节的转角为运动变量，将 5.2 节计算得到的关节转角随时间变化的方程作为机器人的运动函数。设定仿真时间为 13 s、步长为 0.1 后开始仿真，在 Adams 中自动生成尺蠖机器人行走的动画，如图 13 所示。从图中可以看出，尺蠖机器人按照规划的步态能够在平面上稳定的行走。仿真结果证明了运动学建模和步态规划结果的准确性。

利用 Adams 的角度测算功能，可以得到仿真过程中关节 J2、J3、J4、J5 的转角(相对值)随时间的变化曲线如图 14。

4 个关节转角曲线图是相对于尺蠖机器人的初始位置的关节转角。从曲线图中可以看出，在运动过程中可以看出，四个关节的转角之和始终为 0，考虑到初始位置有 $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = -180^\circ$ ，故运动过程中时刻满足 $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = -180^\circ$ ，且由动画可以看出尺蠖机器人的两个吸盘底部平面始终平行，与步态规划结果一致。

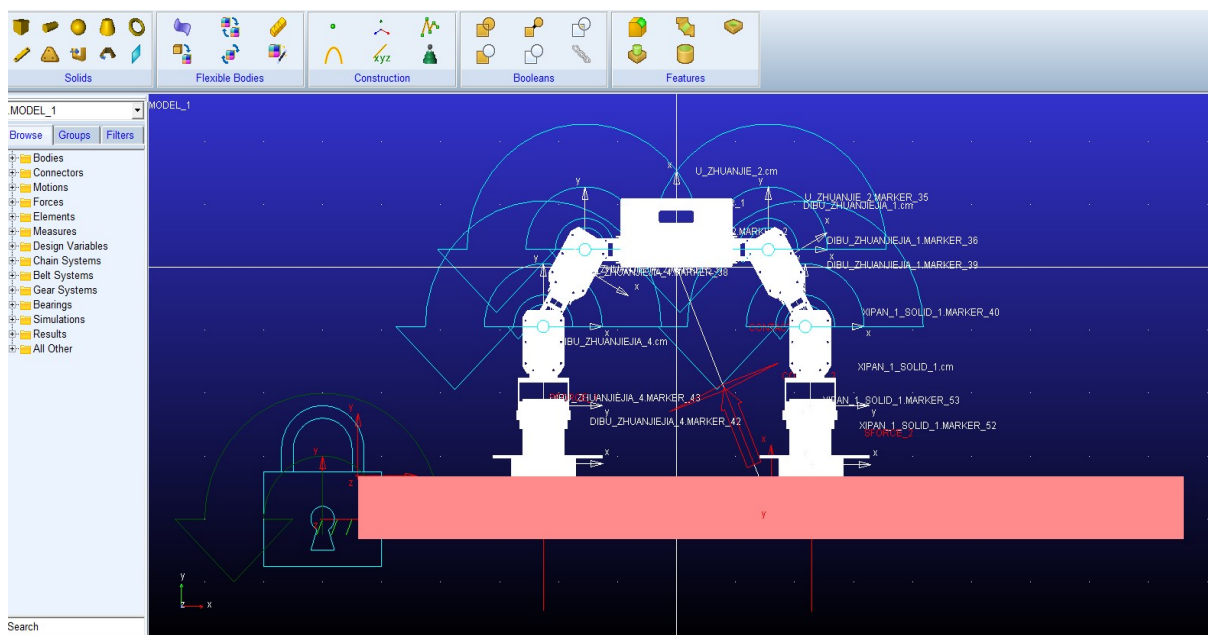


Figure 12. The model of inchworm-like robot in Adams

图 12. Adams 软件中的尺蠖机器人模型

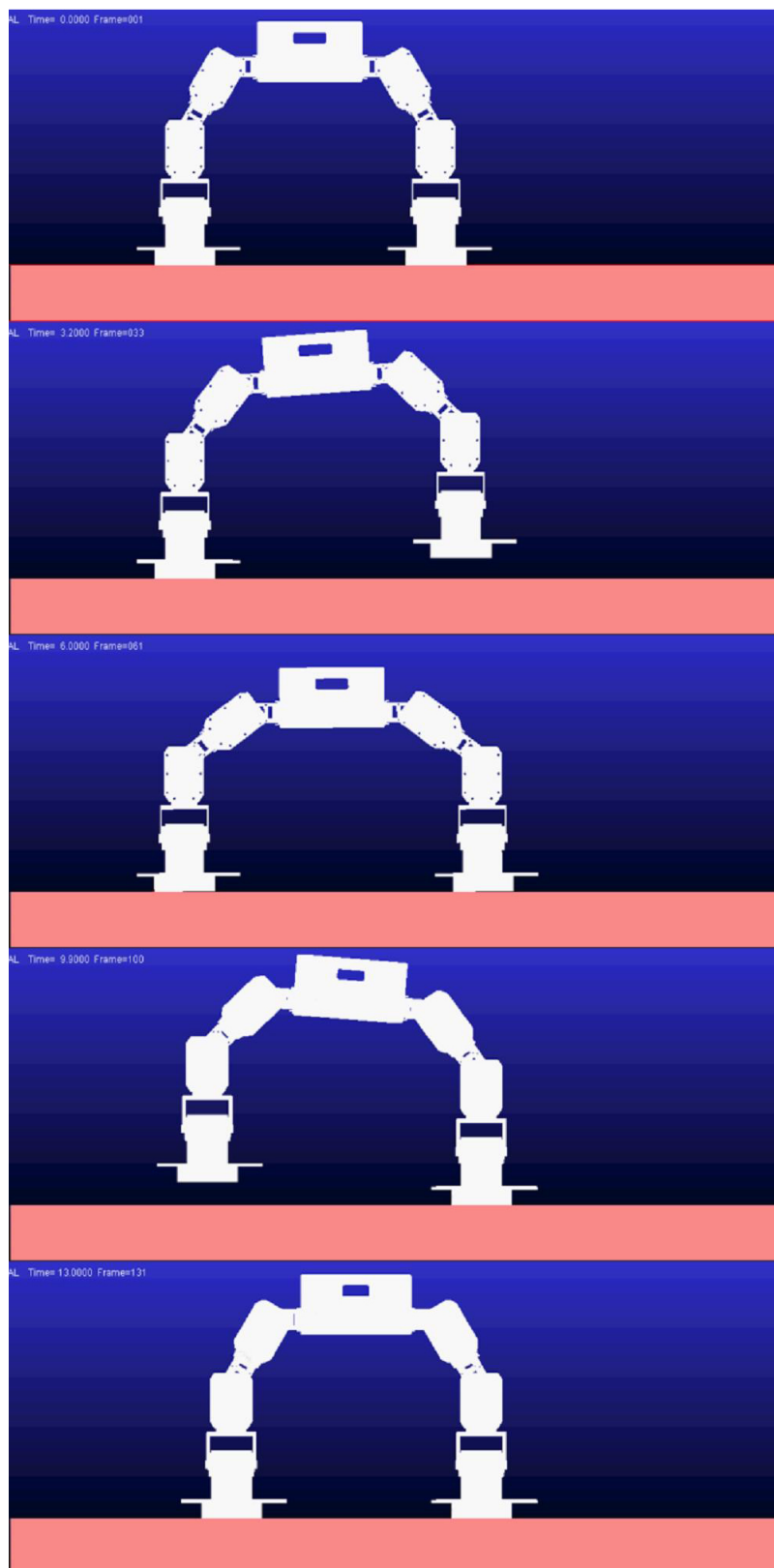


Figure 13. The animation the robot's inchworm gait in Adams
图 13. Adams 中尺蠖机器人尺蠖步态动画

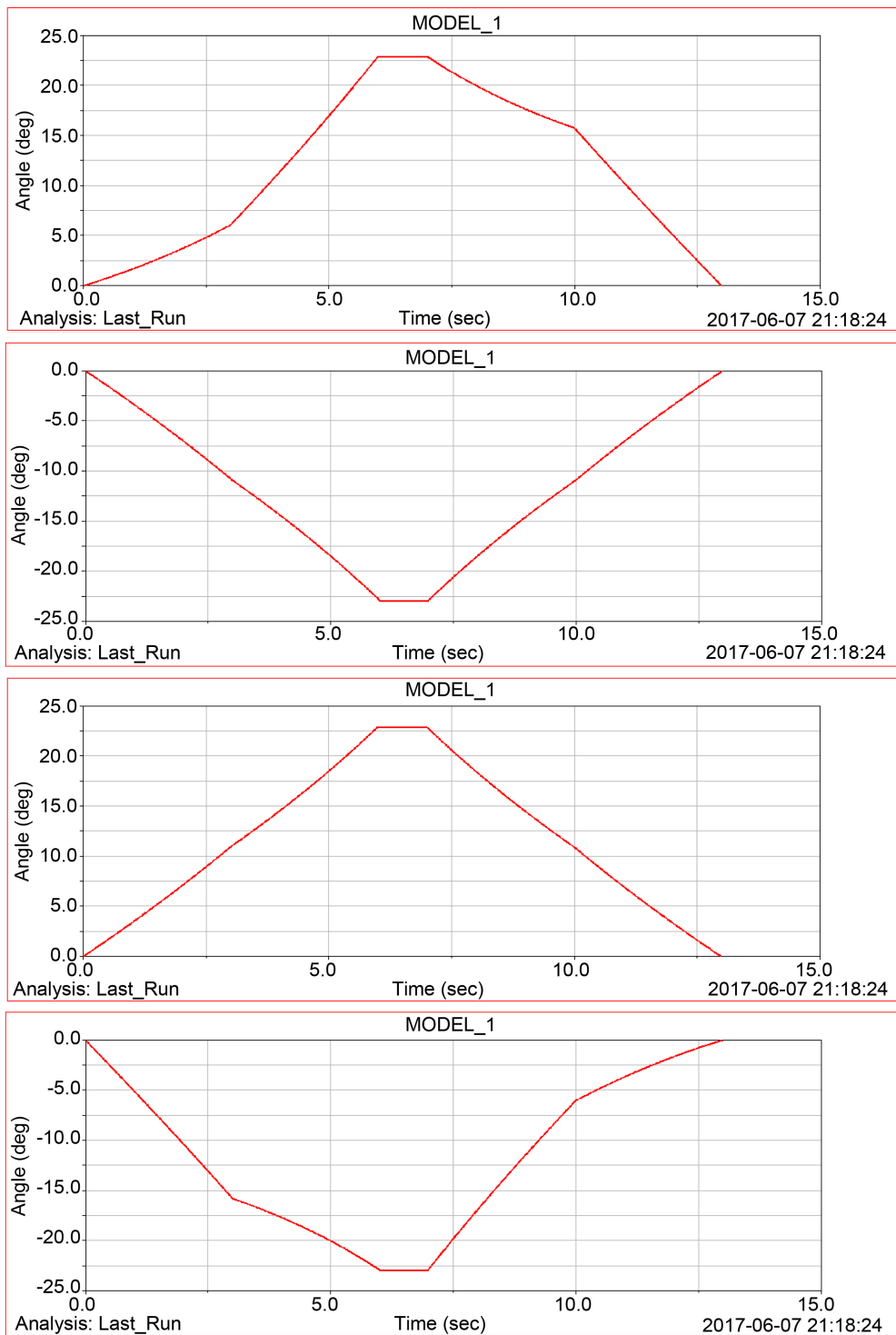


Figure 14. Curve the joint 2,3,4,5's rotation angle
图 14. 关节 2、3、4、5 转角曲线图

6. 结论

在总体上对仿生粘附式尺蠖机器人进行了设计，设计内容包括机构设计、质量校验、电气系统设计和控制策略设计，从而搭建了机器人的物理模型。在机构设计上详细设计了机器人关节、吸盘等零件的

结构,并完成了机器人 1:1 模型的装配;在电气系统设计上设计了各个接口之间的协议和通讯关系;在控制策略设计上设计了半自主的闭环控制策略。

在仿生粘附式子尺蠖机器人总体设计的基础上,对机器人的粘附吸盘进行详细设计,设计了“三花瓣”形的粘附吸盘和对称安装的距离传感器,并在对比各种粘附材料性能的基础上选择了聚氨酯粘附阵列作为粘附材料。在此基础上详细研究了吸盘地面与目标平面的位姿解算,探明了距离传感器测量位姿的原理。

完成了仿生粘附式尺蠖机器人的运动学建模。通过采用 D-H 齐次变换法,在建立机器人坐标系的基础上推导得到运动学方程,并对逆运动学问题进行了分析和求解,证明了尺蠖机器人的多解问题。

在运动学建模的基础上,进行仿生粘附式尺蠖机器人的简单步态规划。引入相关约束,设计了尺蠖机器人的“一字”步态,并在 Adams 软件中完成了动画仿真,验证了步态规划结果的正确性。

另外,本文中也存在许多不足之处。如电气系统设计和控制策略设计不够详细,与实际工程运用还有一定差距。在粘附材料的选型设计上,只是对粘附材料性能进行对比,未进行粘附材料力学模型的分析。此外,对于粘附材料的控制机理也未进行深入研究。最后,在实际的太空环境中,寄生式空间武器的活动目标不可能是完全平整的目标表面,单纯进行“一字”步态的步态规划只是起步,还需对复杂的行走步态进行深入研究。

基金资助

一院高校联合创新基金资助(CALT201601)。

参考文献 (References)

- [1] 李健,葛本利.浅析卫星在现代战争中的作用[J].数字通信世界,2009(6):52-55.
- [2] 马继峰,林金永,高晓颖,等.空间攻防对抗体系的建模与仿真研究[J].系统仿真学报,2007,19(23):5601-5602.
- [3] 张俊华,杨根,徐青.微小卫星的现状及其在空间攻防中的应用[J].航天电子对抗,2008,24(4):16-17.
- [4] Jeong, H.E., Lee, J.K., Kim, H.N., et al. (2009) A Nontransferring Dry Adhesive with Hierarchical polymer nanohaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 5639-5644. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900323106>
- [5] Geim, A.K., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., et al. (2003) Microfabricated Adhesive Mimicking Gecko Foot-Hair. *Nature Materials*, **2**, 464-463.
- [6] Aksak, B., Murphy, M.P. and Sitti, M. (2007) Adhesion of Biologically Inspired Vertical and Angled polymer Microfiber Arrays. *Langmuir*, **23**, 3322-3332. <https://doi.org/10.1021/la062697t>
- [7] 戴振东,彭福军.空间机器人的研究与仿壁虎机器人关键技术[J].科学通报,2015(32):3114-3124.
- [8] 龚玲.碳纳米管阵列的转移及粘附性能研究[D]:[硕士学位论文].南京:南京航空航天大学,2013:17-56.
- [9] 赵大伟.双足机器人的步态规划与仿真研究[D]:[硕士学位论文].北京:北京邮电大学,2009:11-21.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-474X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jast@hanspub.org