

【飞行器设计与制造】

飞机蒙皮爬壁机器人设计与运动学分析

孙荣荣, 王开元

(山东航空学院 航空宇航与机械学院, 山东 滨州 256603)

摘要:为满足飞机蒙皮损伤智能化检测的要求,设计了一种应用于飞机蒙皮损伤检测的四足真空吸附式爬壁机器人。基于拮抗式气动关节原理进行机器人腿部结构设计,考虑到其实际的工作环境,采用电机驱动与气动肌腱驱动相结合的方式和三吸盘的真空吸附方式,使机器人可以在曲率较大的飞机表面灵活运动。利用改进 D-H 分析法建立单腿正、逆运动学方程并进行求解,利用 Matlab 软件建立了机器人的运动仿真模型,对机器人进行了工作空间仿真和轨迹规划仿真。结果显示,机器人足端几乎可以触及机身所有区域,且末端吸盘运动轨迹平滑,表明所设计的机器人可以很好地适应飞机表面的曲率变化以完成指定任务。

关键词:爬壁机器人;气动肌腱;运动学分析;工作空间;轨迹规划

中图分类号: TP 242 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.005

飞机蒙皮的表面积很大,这使飞机蒙皮检测的工作量和检测难度大大增加。为解决工作人员在飞机蒙皮检测过程中的漏检和易疲劳等问题,国内外科研单位都开发了机器人配合检测技术实现缺陷检测^[1]。机器代替人工检测蒙皮可以大大提高检测效率和准确率,这对飞机的生产和维护具有重要意义。

近年来,国内外学者针对爬壁机器人开展了大量研究,并成功研制出多种移动方式和吸附方式的样机或产品^[2],且广泛应用在检测、清洁、维修等高空作业领域。目前,爬壁机器人吸附方式主要包括负压吸附、磁吸附、静电吸附、振动吸附等^[3],其中前两种吸附方式比较成熟。沈顺喜等^[4]设计了一种永磁吸附、轮式行走的风电塔筒自动化喷涂爬壁机器人,眭翔等^[5]研发了一种真空负压吸附和仿生爪刺抓附的仿尺蠖多连杆双足爬壁机器人,谢晓轩等^[6]研制了一种真空负压吸附、舵机驱动的六足式爬壁机器人。由于飞机结构材料不适合采用磁吸,而且飞机表面曲面多且相对光滑,因此飞机蒙皮爬壁机器人多采用负压吸附方式,其研究方向主要集中在机器人的结构和移动方式上。Amakawa 等^[7-8]设计了两款不同结构形式的负压吸附爬壁机器人,机器人可通过控制机身结构框架的变形实现全向移动;Shang 等^[9]设计了一种用于飞机机身和机翼无损检测的框架结构真空吸附式爬壁机器人;文献^[10-11]研究了不同框架形式的飞机表面爬壁机器人。综上所述,国内外研发的飞机蒙皮爬壁机器人多采用框架式结构,其结构简单,便于控制,但在运动时连续性和机动性差。而足式爬壁机器人具有负载能力强、越障性能好及转向灵活等优点,能够更好地适应飞机蒙皮表面的铆缝凹凸和曲率变化。

本文综合考虑飞机蒙皮环境爬壁需求,设计了一款机器人,吸附方式选用负压吸附,行走方式采用四足对角式,基于拮抗式气动关节原理进行腿部结构设计,并采用三吸盘的足端吸附装置,使机器人具有更高的壁面适应性与运动自由度。对机器人进行了正、逆运动学分析,并进行了运动空间和轨迹规划仿真,

收稿日期:2024-09-25

基金项目:山东省大学生创新创业训练计划项目(S202310449232)

第一作者简介:孙荣荣(1989—),女,山东泰安人,讲师,硕士,从事民机维修工程技术研究。E-mail:1085466015@qq.com

确保其腿部工作空间能够适应飞机表面的大曲率变化,希望此研究能为机器人的实际工作提供理论依据。

1 机器人结构设计

1.1 总体结构

机器人采用类似蜘蛛的仿生设计,其整体结构主要由机身与 4 条腿构成(图 1)。机身选用上下两块正方形铝板,用来连接腿部结构,安装检测装置和控制元件。腿部结构由气动肌腱和连接件组成,形成 3 个转动副,其中腿部结构和机身之间连接的转轴为髋关节,主干腿和机身转轴的连接点为膝关节,吸盘组件和主干腿的连接点为踝关节。机器人通过控制系统驱动腿部运动,并利用足端吸附装置吸附于飞机表面。在机器人机身上搭载探测装置,采用计算机视觉对蒙皮缺陷进行图像处理,识别并标记飞机蒙皮缺陷损伤,实现对飞机蒙皮的检测。

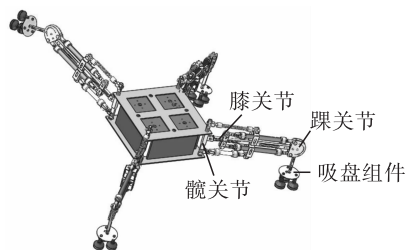


图 1 机器人结构示意图

1.2 腿部结构与选型

1.2.1 设计原理

腿部设计是爬壁机器人设计的关键,因为机器人的运动性能很大程度上取决于其腿部设计。图 2 为腿部简图,A 为髋关节,B 为膝关节,C 为踝关节。机器人以气动驱动为主,电机驱动为辅,A 关节运动需要大扭矩,所以 A 关节采用电机驱动,B 和 C 关节采用气动肌腱驱动。气动肌腱是在橡胶圆管内植入一种不能拉伸的纤维,随着橡皮管的膨胀,纤维网也会随之扩张,而气动肌腱则会产生径向扩张和轴向收缩。B、C 关节中的两条拮抗气动肌腱的配置方式采用杠杆式(图 3),两根气动肌腱与杠杆的两端相铰接,杠杆在支点处与支架相铰接。这种配置方式可以使关节的角度范围变大,弥补气动肌腱收缩性不足的缺陷,使机器人在运动时具备更高的爆发力和稳定性,并且在力矩和输出方式上拥有优势。此外,杠杆结构与生物关节的构型更加相似,因此可完美地发挥仿生学的优势。在关节运动中原动肌产生原动力,拮抗肌产生拮抗力,两者既相互对抗,又互相协调。两者出力的配比,直接合成关节输出的力矩;两者拉伸的配比,直接决定关节转动的角度。这种驱动方式相对于电机驱动更简单,没有复杂的减速装置和传动元件,因而惯量更小,灵活程度更高。

1.2.2 吸盘布置与选型

吸盘吸附属于负压吸附的一种,通过真空泵或真空发生器和吸盘来实现吸附功能。真空吸盘布置主要分为单吸盘和多吸盘两种,考虑到飞机蒙皮表面铆钉的存在与曲率的变化,本文选择真空多吸盘的吸附方式,且配合具有褶边的吸盘,让机器人能够适应飞机表面一定程度的凹凸以及一定曲率的曲面。由于三角吸盘组两个相反方向的抗倾覆能力相差很大,适用于一边受压一边受拉的场合,结合爬壁机器人的实际作业,选择三角布置方式(图 4)。

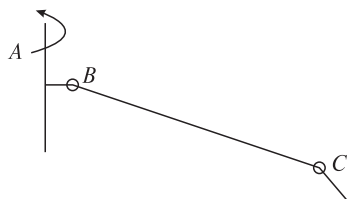


图 2 腿部简图

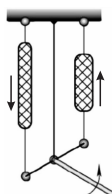


图 3 拮抗式关节



图 4 吸盘结构

腿部结构的布置方式如图 5 所示,气动肌腱 1 和 2 采用直径为 20 mm、长为 200 mm 的气动肌腱,气动肌腱 3 的直径为 20 mm、长为 70 mm。主干腿采用铝合金制造,并且在右端点处设计方便调节气动肌腱的预紧量,可以调节其与主干腿的角度,以此来适应不同机型表面的曲率。

2 机器人运动学分析

2.1 摆动腿正运动学分析

四足爬壁机器人 4 条腿结构完全相同且对称布置,故可以只对其中 1 条腿进行运动学分析。使用改进 D-H(Denavit-Hartenberg)分析法对机器人进行运动学建模与分析^[12],以髌关节和机架连接点为基坐标系的坐标原点,建立单腿的 D-H 参数坐标系如图 6 所示,其中坐标系 1、2、3 分别为髌关节、膝关节和踝关节的坐标系,坐标系 4 为末端执行器坐标系。

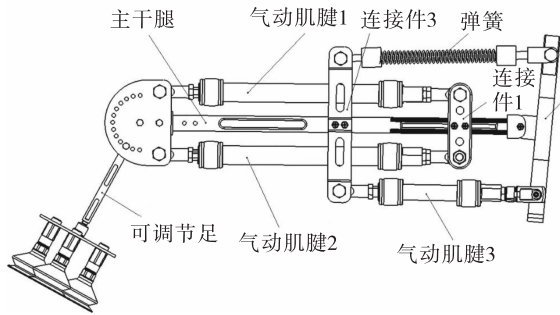


图 5 腿部结构图

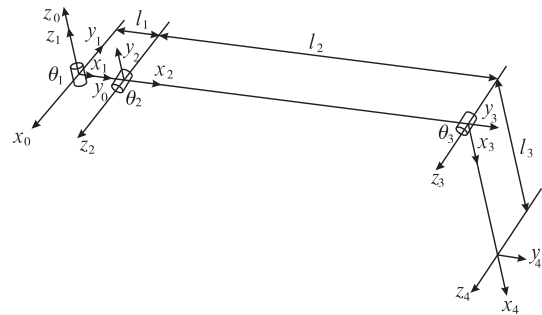


图 6 D-H 参数坐标系

进一步根据连杆坐标系可推导出相邻连杆间的几何关系,D-H 参数如表 1 所示。表 1 中, α_{i-1} 表示绕 x_{i-1} 轴, z_{i-1} 旋转到 z_i 的角度,即连杆扭角; a_{i-1} 表示沿 x_{i-1} 轴, z_{i-1} 移动到 z_i 的距离,即连杆长度; d_i 表示沿 z_i 轴, x_{i-1} 移动到 x_i 的距离,即连杆偏距; θ_i 表示绕 z_i 轴, x_{i-1} 旋转到 x_i 的角度,即关节转角。

表 1 D-H 参数表

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1	3	0	$l_2 = 480 \text{ mm}$	0	θ_3
2	90°	$l_1 = 35 \text{ mm}$	0	θ_2	4	0	$l_3 = 180 \text{ mm}$	0	0

正运动学分析是在已知各运动关节的旋转角度、旋转方向以及各关节之间的连杆长度的情况下,求解机器人足末端相对于载体坐标系的平移量以及旋转量,即足末端位置和姿态信息。根据改进 D-H 参数转换法则,得到转换矩阵转换通式为

$${}_{i-1}^{i}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表 1 中参数带入式(1)得

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

机器人末端的位姿可以用连杆变换的乘积表示:

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T}. \quad (2)$$

将式(2)展开计算后得

$${}^0_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin \theta_1 & l_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_1) \\ \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 & l_3 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_1) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

为了验证上式的正确性, 将 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = -90^\circ$ 带入式(2)可得

$${}^0_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 + l_1 \\ -1 & 0 & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

计算结果与图 6 所示足末端位姿一致。

2.2 摆动腿逆运动学分析

逆运动学是在已知各关节之间的连杆长度、末端执行器相对载体坐标系的位置姿态信息的情况下, 求解机体各关节旋转角度及方向。假设足端位置为

$${}^0_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在式(2)两边同左乘 ${}^0_1\mathbf{T}^{-1}$ 可得

$${}^0_1\mathbf{T}^{-1} {}^0_4\mathbf{T} = {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T}. \quad (4)$$

将式(4)展开可得

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 n_x + \sin \theta_1 n_y & \cos \theta_1 o_x + \sin \theta_1 o_y & \cos \theta_1 a_x + \sin \theta_1 a_y & \cos \theta_1 p_x + \sin \theta_1 p_y \\ -\sin \theta_1 n_x + \cos \theta_1 n_y & -\sin \theta_1 o_x + \cos \theta_1 o_y & -\sin \theta_1 a_x + \cos \theta_1 a_y & -\sin \theta_1 p_x + \cos \theta_1 p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_2 + l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

令式(4)两边矩阵(2,4)元素相等, 可建立等式

$$-\sin \theta_1 p_x + \cos \theta_1 p_y = 0. \quad (5)$$

求解式(5)可得

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{p_x}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right). \quad (6)$$

下面计算 θ_2, θ_3 。将式(2)两边同时左乘 ${}^1_2\mathbf{T}^{-1} {}^0_1\mathbf{T}^{-1}$ 可得

$${}^1_2\mathbf{T}^{-1} {}^0_1\mathbf{T}^{-1} {}^0_4\mathbf{T} = {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T}. \quad (7)$$

与求 θ_1 方法相同, 将式(7)展开寻找两个等式, 可分别解得

$$\theta_2 = \arccos \frac{p_z}{\sqrt{(\cos \theta_1 p_x + \sin \theta_1 p_y - l_2)^2 + p_z^2}} - \arcsin \left[\frac{(\cos \theta_1 p_x + \sin \theta_1 p_y - l_2)^2 + p_z^2 + l_2^2 - l_3^2}{\sqrt{4l_2^2 ((\cos \theta_1 p_x + \sin \theta_1 p_y - l_2)^2 + p_z^2)}} \right], \quad (8)$$

$$\theta_3 = -\arccos\left[\frac{(\cos \theta_1 p_x + \sin \theta_1 p_y - l_2)c_2 + p_z \sin \theta_2 - l_2}{l_3}\right]. \quad (9)$$

为验证逆运动学分析结果,将足端位置 $p_x=0, p_y=515, p_z=-180$ 分别代入式(6)(8)(9),求解得 $\theta_1=90^\circ, \theta_2=0^\circ, \theta_3=-90^\circ$,结果与图 6 所示状态一致,也与 Matlab 计算结果相同。

3 仿真分析

3.1 仿真模型建立

根据表 1,利用 Matlab 机器人工具箱的 Link 函数与 Seriallink 函数建立单腿的仿真模型,用 Qlim 函数来限制 3 个关节的运动转动角度范围,并用 Plot 函数显示出在 $[0, -30^\circ, -30^\circ]$ 状态时的模型,如图 7 所示。单腿的 3D 模型如图 8 所示。

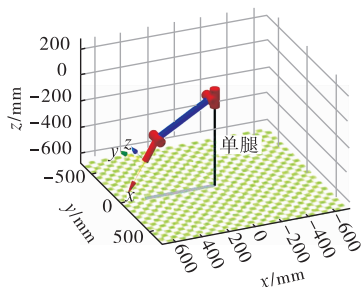


图 7 Matlab 模型

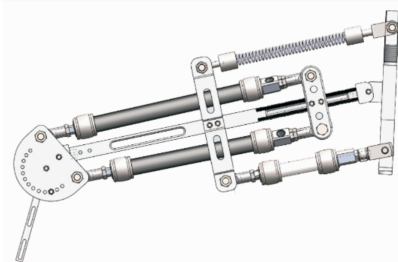


图 8 单腿 3D 模型

3.2 腿部结构工作空间仿真

用工作空间仿真衡量机器人腿部结构在真实空间下可以到达的活动范围,即步行足吸盘可以到达的所有位置的集合。采用蒙特卡洛算法对机器人单足的工作空间进行仿真实验^[13]。蒙特卡洛算法利用随机采样进行求解,具有快速、高效等优点,适用于多种运动机构的工作空间分析。其内容包括:(1)从机器人的正运动学方程出发,获得末端执行机构在基准坐标系下的相对基准坐标系的位置矢量;(2)利用机器人工具包中的 Qlim 函数,限定各个关节的运动角度范围,并在 Matlab 中利用 Rand 函数产生各个关节变量的任意值;(3)将各关节的任意值代入运动学正解方程,生成任意点的云图,通过 Plot 函数将其绘制成云图,从而获得蒙特卡洛工作空间。分别取随机值迭代 5 000 次与 50 000 次进行对比,结果见图 9 和图 10。

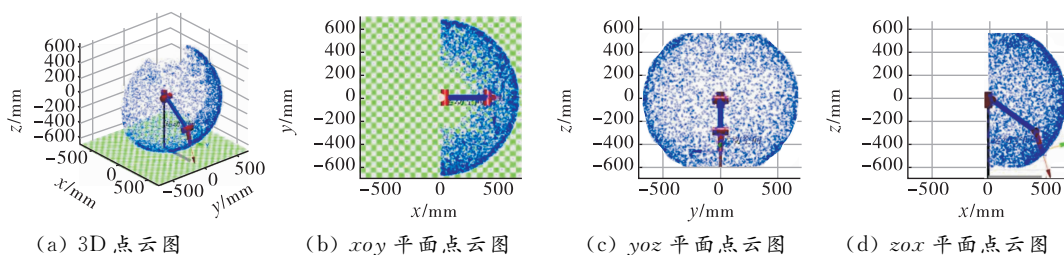


图 9 迭代 5 000 次的仿真结果

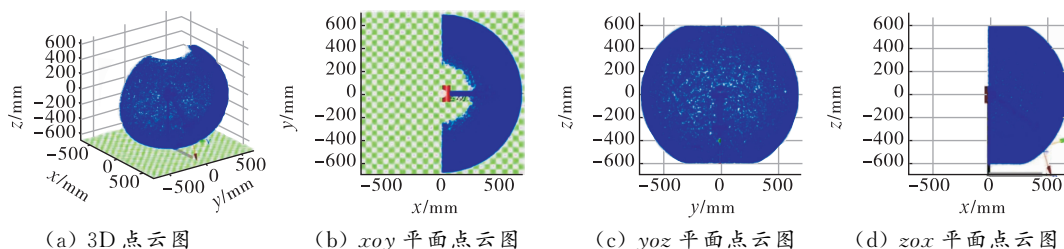


图 10 迭代 50 000 次的仿真结果

从仿真结果可以看出,在迭代次数不同的情况下,得到腿部结构的工作空间云图密度不同,但是所得

出的工作空间范围基本相同,说明足端吸盘几乎能达到最大范围内的所有空间。

机器人整机工作空间如图 11 所示。可以看到,机器人足端几乎可以触及机身周围所有区域,且机身到 xy 平面的极限高度为 576.103 7 mm。这既可以使机器人具有很好的越障能力,又可以使机身下部有足够的空间搭载蒙皮损伤检测设备。与目前大多数的框架式飞机蒙皮爬壁机器人相比,本文所设计的机器人具有更大的运动空间和更好的通过性,可以很好地适应飞机表面的曲率变化,完成在机身与机翼之间的运动。

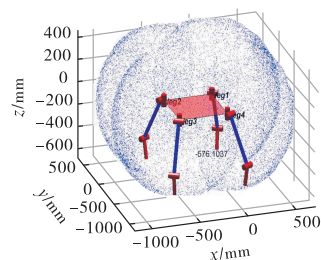


图 11 整机工作空间

3.3 轨迹规划仿真

在 Matlab 机器人工具箱中采用插值算法对单腿进行轨迹规划仿真实验,位于初始点 O 初始各个关节角度分别为 $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$,运动到终止点 F 时各关节角度为 $[70^\circ, 10^\circ, -60^\circ]$,得到各关节的角度、角速度、角加速度如图 12 所示,末端运动轨迹如图 13 所示。由图 13 可知,足端吸盘运动轨迹平滑,不存在突变。

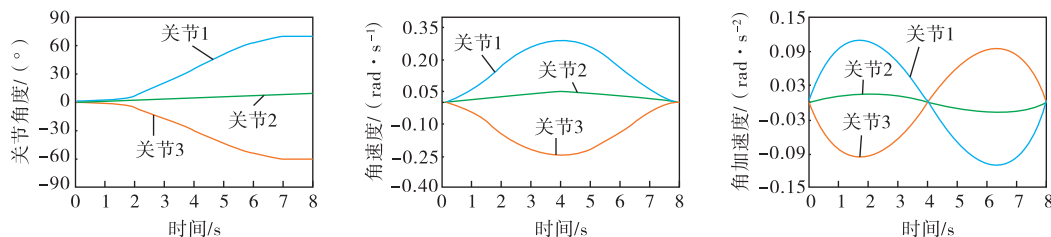


图 12 各关节运动曲线

4 结论

本文基于拮抗式气动关节原理,设计了一种气动肌腱与电机混合驱动的四足真空吸附式爬壁机器人。采用改进 D-H 参数法建立单腿的正逆运动学方程,其求解结果与足末端位姿和 Matlab 计算结果一致。通过蒙特卡洛方法对机器人进行单腿和整机工作空间仿真,结果表明足端吸盘几乎能触及机身周围所有区域,且机身距离地面最大可抬高 576.103 7 mm,满足了机器人运动空间和通过性的要求。最后采用插值算法对机器人进行运动轨迹规划仿真,得到的腿部各关节和足端吸盘运动曲线平滑,表明腿部驱动运行平稳,验证了机器人结构设计的合理性和运动的连续性,为样机的制造与控制奠定了良好的基础。

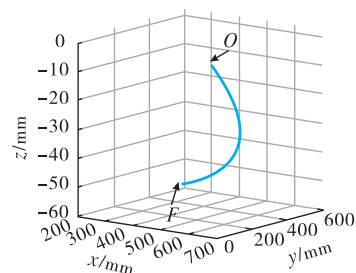


图 13 足端吸盘运动轨迹

参考文献:

- [1] 刘芳,夏桂锁,温志辉,等.飞机蒙皮缺陷检测的现状与展望[J].数字化检测,2021,64(23/24):39-50.
- [2] 聂佩晗,张雅婷,陈勇.爬壁机器人发展与关键技术综述[J].机床与液压,2022,50(4):155-161.
- [3] 杨慧轩,刘荣,何建东,等.爬壁机器人吸附方法研究综述[J].机床与液压,2023,51(21):206-216.
- [4] 沈顺喜,涂德贵,陈立志,等.风电塔筒自动化喷涂爬壁机器人设计[J].机电工程技术,2024,53(2):168-172.
- [5] 眭翔,徐林森,周瑞吉,等.仿尺蠖多模式爬壁机器人设计与控制方法研究[J].计算机测量与控制,2022,30(10):155-161.
- [6] 谢晓轩,李自胜,留沧海,等.六足式幕墙清洗爬壁机器人设计与控制[J].自动化与仪表,2021,36(5):41-46.

- [7] AMAKAWA T, YAMAGUCHI T, YAMADA Y, et al. Development of an adhesion unit for a traveling-wave-type, omnidirectional wall-climbing robot in airplane body inspection[C]. 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM), Munich: IEEE, 2017.
- [8] AMAKAWA T, YAMAGUCHI T, TADAMI N, et al. Development of omnidirectional wall-climbing robot for aircraft inspection[C]//SILVA M F, VIRK G S, TOKHI M O, et al. Human-Centric Robotics: Proceedings of the 20th International Conference on CLAWAR 2017, World Scientific, 2017.
- [9] SHANG J Z, SATTAR T, CHEN S, et al. Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage[J]. Industrial robot, 2007, 34(6): 495-502.
- [10] 牛国臣, 党长河, 韩伟, 等. 飞机表面爬行机器人轨迹跟踪控制方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2007, 118(2): 4-8.
- [11] 沈桂鹏, 王从庆, 王琪. 双框架飞机蒙皮检测机器人切换运动控制方法[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2064-2073.
- [12] 黄晓辰, 张明路, 张小俊, 等. 机器人坐标系建立的改进 DH 方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 313-318.
- [13] 万琴, 宁顺兴, 李智, 等. 6DOF 机械臂运动学分析与轨迹规划仿真[J]. 制造业自动化, 2024(4): 42-47.

Design and kinematic analysis of aircraft skin climbing robot

SUN Rongrong, WANG Kaiyuan

(Aerospace and Mechanical College, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China)

Abstract: To meet the requirements of intelligent detection of large aircraft skin damage, a quadruped vacuum suction wall climbing robot was designed for aircraft skin damage detection. The leg structure design of the robot was based on the principle of antagonistic pneumatic joints. Considering its actual working environment, a combination of motor drive and pneumatic tendon drive, as well as a vacuum suction method with three suction cups, were adopted to enable the robot to move flexibly on the surface of the aircraft with large curvature. The improved D-H analysis method was used to establish and solve the forward and inverse kinematic equations of a single leg. A motion simulation model of the robot was established using Matlab software, and workspace simulation and trajectory planning simulation were carried out for the robot. The results showed that the robot's foot could almost touch all areas of the aircraft body, and the motion trajectory of the end suction cup was smooth, indicating that the designed robot can adapt well to the curvature changes of the aircraft surface to complete the specified tasks.

Keywords: wall climbing robot; pneumatic muscle; kinematic analysis; workspace; trajectory planning

(责任编辑:王新亮)

- 引用格式 孙荣荣,王开元. 飞机蒙皮爬壁机器人设计与运动学分析[J]. 山东航空学院学报, 2025, 42(2): 36-42.
SUN R R, WANG K Y. Design and kinematic analysis of aircraft skin climbing robot[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(2): 36-42.