

引文格式: 李特, 阮文俊, 潘新, 等. 航空装备深腔作业超冗余机器人路径实时跟随方法与试验[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 68-73, 83.  
LI Te, RUAN Wenjun, PAN Xin, et al. Real-time path-following method and experiment of hyper-redundant robot in deep cavity operation of aviation equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 68-73, 83.

# 航空装备深腔作业超冗余机器人路径实时跟随方法与试验\*

李特<sup>1</sup>, 阮文俊<sup>1</sup>, 潘新<sup>2</sup>, 罗超<sup>1</sup>, 刘海波<sup>1</sup>, 王永青<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024;

2. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 高灵活性、大长径比结构的超冗余机器人是实现航空装备制造、装配、维修过程中深腔作业任务智能化操作的可行途径。针对超冗余机器人在复杂深腔空间的高效安全操作问题, 提出了适用于实时遥控操作的超冗余机器人路径跟随运动方法。仿真结果表明, 路径跟随方法平均解算时间为 0.413 ms, 圆锥螺旋形曲线路径运动最大偏差为 0.011 mm, 满足了实时运动和安全精确操作需求。开发了基于 ROS-Gazebo 的遥控操作虚拟仿真平台, 提供了低成本的虚拟训练、模拟操作手段。试验结果表明, 路径跟随方法保障了超冗余机器人复杂深腔中的高效安全运动。

关键词: 超冗余机器人; 路径跟随; 运动仿真; 运动规划; 深腔作业

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.068



李特  
副教授, 博士, 研究方向为仿生机器人、特种机器人及机器人控制。

飞机是典型的具有复杂结构、复杂系统的高端装备, 在制造、装配、维

护等环节存在诸多极其复杂、狭小的深腔空间作业任务, 如航空发动机检修、电控线缆装配、油箱内部检测等。由于操作空间狭小, 智能化机电设备应用难度大, 长期依赖工人手工实现。在高服役性能飞机制造、智能制造的大背景下, 探索基于高灵活度机器人的智能制造技术极其必要。

仿蛇形的超冗余机器人具有大长径比结构, 运动灵活性高, 在飞机等装备的复杂深腔任务中具有广泛应用前景<sup>[1-3]</sup>。考虑目标环境的复杂性和机器人冗余多解性, 超冗余机器人的运动轨迹规划技术一直是国内外学者关注的焦点。

超冗余机器人运动规划技术主要分为雅可比伪逆法、脊线法、智能优化方法、几何法<sup>[4]</sup>。Colomé 等<sup>[5]</sup>

提出了基于阻尼最小二乘法的雅可比伪逆改进算法, 避免了奇异位姿。Peng 等<sup>[6]</sup>提出了一种集成臂形约束的增广雅可比伪逆矩阵, 实现了约束下的运动学逆解。雅可比伪逆法是求解超冗余机器人的运动学逆解的有效方法, 但该方法求解效率较低, 不适用于实时高效控制。Chirikjian 等<sup>[7]</sup>率先提出了二维超冗余度机器人的“脊线”规划方法, 并逐渐形成了模态函数曲线<sup>[8]</sup>、空间圆弧曲线<sup>[9]</sup>、贝塞尔曲线<sup>[10]</sup>等规划方法。此类方法一定程度上限制了超冗余机器人的运动能力, 在超冗余机器人狭小空间实时控制任务中应用受限。Liu 等<sup>[11]</sup>通过 BP 神经网络进行蛇形臂机器人运动规划, 该方法具备控制参数少、精度高的优点。面对复杂环境,

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费(DUT22GF301、DUT21RC(3)037)。

Aristidou 等<sup>[12]</sup>提出了基于几何迭代的 Fabrik 算法,实现了关节节点沿自身臂形高效匹配。Xie 等<sup>[13]</sup>提出了基于几何迭代的末端跟随方法,实现了高效的末端跟随运动,几何法通过自身构型进行运动更新,存在一定的迭代误差,因此易引发机器人的运动偏差。

为了充分发挥超冗余机器人灵巧的空间避障能力,王俊刚等<sup>[14]</sup>提出了基于路径点匹配的路径跟随算法,实现了较高精度的实时路径跟随。Palmer 等<sup>[15]</sup>提出了基于最优化理论的路径跟随方法,即通过优化机器人与路径偏差函数,获得较高精度的跟随效果。路径跟随方法兼顾了机器人的运动精度和求解效率,在超冗余机器人狭小空间运动中具备较大优势。

超冗余机器人狭小空间运动规划方法的实时性与准确性尤为重要。运动规划算法的解算时延过大会导致操作者无法根据视觉反馈画面准确操作,引发机器人与环境之间发生干涉。为提升超冗余机器人深腔空间运动实时性与准确性,本文提出了一种运动约束的自适应二分搜索的超冗余机器人路径跟随方法,可在考虑超冗余机器人运动能力的情况下实现高精度高效求解,本文构建了超冗余机器人遥控操作虚拟仿真平台并进行算法性能仿真验证,最终通过深腔空间运动试验验证了方法的实际有效性。

## 1 超冗余机器人运动学模型

### 1.1 机器人结构

为了适应深腔环境,将超冗余机器人设计为万向节、短连杆构成的大长径比结构,如图 1 所示。每个机器人关节由周向分布的 3 组钢丝绳索驱动,伺服电机、驱动器、滚珠丝杠副等部件后置。其末端添加了工具安装盘,用以安装作业装置。为了增强机器人深腔探入能力,可将超冗余

机器人集成在移动滑台或 AGV 移动车上。本文所述超冗余机器人具有 21 个关节自由度,关节数 10;最大关节转角  $\pm 30^\circ$ ;连杆长度  $L_0=131$  mm、 $L_1=146$  mm、 $L_2=37$  mm。

### 1.2 超冗余机器人正向运动学

如图 2 所示,根据 D-H 参数法建立超冗余机器人坐标系。 $O_0-X_0Y_0Z_0$  为机器人固定全局坐标系;其余坐标系为机器人局部坐标系; $O_{2k}-X_{2k}Y_{2k}Z_{2k}$  与  $O_{2k+1}-X_{2k+1}Y_{2k+1}Z_{2k+1}$  ( $k=1, 2, \dots, 10$ ) 为关节节点  $P_{k-1}$  处的俯仰或偏航转动副的坐标系,其 Z 轴与转动副旋转轴重合; $O_{22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$  为机器人工具坐标系。

相邻两坐标系  $O_{k-1}-X_{k-1}Y_{k-1}Z_{k-1}$  与  $O_k-X_kY_kZ_k$  之间的相对关系齐次变换矩阵为

$${}^{k-1}T_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 0 & 0 \\ \sin \theta_k \cos \alpha_{k-1} & \cos \theta_k \cos \alpha_{k-1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_k \sin \alpha_{k-1} & \cos \theta_k \sin \alpha_{k-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & a_{k-1} \\ -\sin \alpha_{k-1} & -d_k \sin \alpha_{k-1} \\ \cos \alpha_{k-1} & d_k \cos \alpha_{k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{k-1}R & {}^{k-1}P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $a_{k-1}$ 为轴  $Z_{k-1}$  与  $Z_k$  沿轴  $X_{k-1}$  距离; $d_k$ 为轴  $X_{k-1}$  与  $X_k$  沿轴  $Z_k$  之间的距离; $\alpha_{k-1}$ 为轴  $Z_{k-1}$  与  $Z_k$  绕轴  $X_{k-1}$  的转角; $\theta_k$ 为轴  $X_{k-1}$  与  $X_k$  绕轴  $Z_k$  的转角; ${}^{k-1}R$ 为  $3 \times 3$  旋转矩阵; ${}^{k-1}P$ 为  $3 \times 1$  位移矩阵。

### 1.3 超冗余机器人运动学逆解

通过正向运动学可以求解超冗余机器人各关键点(万向节与机器人末端位置) $P_k$ 的坐标,设其坐标为

$$P_k = [X_{A(k)}, Y_{A(k)}, Z_{A(k)}]^T \quad (k=0, 1, \dots, 10) \quad (2)$$

机器人控制所需关节角度与进给值通过运动学逆解计算得出,需要求解的关节变量为基座位移  $d$  与关节角度  $\theta_1 \sim \theta_{20}$ ,相邻两万向节位置关

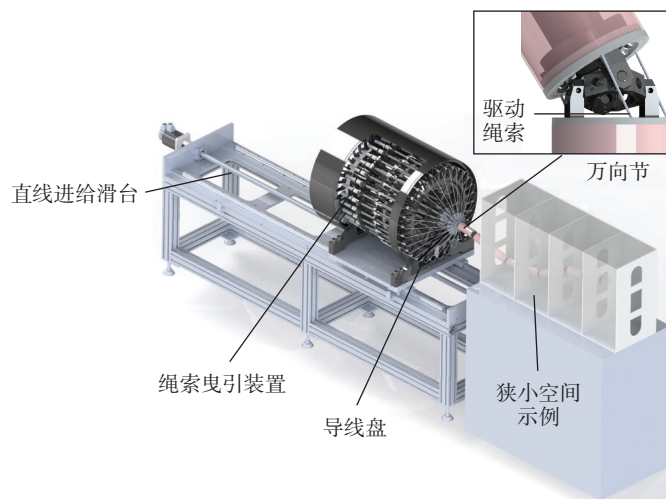


图1 超冗余机器人结构

Fig.1 Structure of hyper-redundant robot

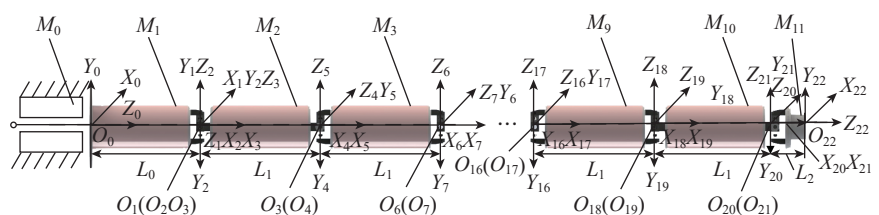


图2 超冗余机器人坐标系

Fig.2 Coordinate systems of hyper-redundant robot

系满足:

$${}_{(2k-1)}^0 \mathbf{R}^T [(\mathbf{P}_k)^T - (\mathbf{P}_{k-1})^T] = {}_{2k+1}^{2k-1} \mathbf{R} {}_{2k+2}^{2k+1} \mathbf{p} \quad (3)$$

当  $k=1$  时,对于连杆  $M_1$  与连杆  $M_2$  可得:

$$d = Z_{A(0)} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{Y_{A(1)}}{L_1}\right) \quad (5)$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{X_{A(1)}}{L_1 \cdot \cos(\theta_2)}\right) \quad (6)$$

式(3)中,  ${}_{(2k-1)}^0 \mathbf{R}^T [(\mathbf{P}_k)^T - (\mathbf{P}_{k-1})^T]$  为已知量,设其为

$${}_{(2k-1)}^0 \mathbf{R}^T [(\mathbf{P}_k)^T - (\mathbf{P}_{k-1})^T] = [a, b, c]^T \quad (7)$$

则式(3)可以转换为

$${}_{2k+1}^{2k-1} \mathbf{R} {}_{2k+2}^{2k+1} \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{2k} \cos\theta_{2k+1} L_{k+1} \\ \sin\theta_{2k} \cos\theta_{2k+1} L_{k+1} \\ s(k) \sin\theta_{2k+1} L_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$s(k) = \begin{cases} 1 & (k = 2, 4, 6, 8, 10) \\ -1 & (k = 3, 5, 7, 9) \end{cases} \quad (9)$$

则超冗余机器人关节角度可以通过迭代过程求解

$$\theta_{2k+1} = \arcsin\left(\frac{c}{s(k)L_{k+1}}\right) \quad (10)$$

$$\theta_{2k} = \arcsin\left(\frac{b}{\cos\theta_{2k+1} L_{k+1}}\right) \quad (11)$$

## 2 超冗余机器人路径跟随算法

### 2.1 自适应二分搜索路径点匹配方法

超冗余机器人路径点匹配,即在路径中寻找满足机器人结构尺寸、运动能力要求的机械臂关节节点所在路径点。

如图3所示,路径离散点间距为  $\delta L$ ;  $\mathbf{P}_{B(k-1)} \mathbf{P}_{B(k)}$  为超冗余机器人连杆  $M_k$  初始位置;其杆长为  $L_k$ ;  $B(k)$  与  $A(k)$  分别为关节节点更新前后处于路径中的位置;  $S_{B(k)}$  为关节节点  $\mathbf{P}_{B(k)}$  沿路径运动前一步的进给值,  $\mathbf{P}_{A(k-1)}$  与  $\mathbf{P}_{A(k)}$  需满足:

$$|\mathbf{P}_{A(k-1)} - \mathbf{P}_{A(k)}| = L_k \quad (12)$$

采用自适应长度区间内二分搜索获取  $\mathbf{P}_{A(k-1)}$  的位置,即已知  $\mathbf{P}_{A(k)}$  位置时,设置自适应搜索区间为

$$\varepsilon = [\mathbf{P}_{B(k)}, \mathbf{P}_{B(k)} + 3 \cdot S_{B(k)}] \quad (13)$$

超冗余机器人关节前后两次进给所在路径特征较为相似,因此根据前一步该关节进给长度确定搜索区间范围,实现区间长度的自适应变化。机器人前向进给情况下,此区间各路径点与已更新节点距离逐步递增,通过二分搜索方法查找此区间首次出现的与已更新节点距离超过关节长度的路径点即可进行插补求解。

### 2.2 超冗余机器人结构尺度约束

图4为路径跟随运动关节角度约束,如图4(a)所示,当连杆  $\mathbf{P}_{A(k-1)}$ 、

$\mathbf{P}_{A(k)}$  已经完成路径点匹配时,关节节点  $\mathbf{P}_m$  的匹配应遵循超冗余机器人关节最大转角为  $\beta=30^\circ$ ,即节点应更新在图4中蓝色球锥面上,因此要在路径跟随算法中添加关节角度限制;  $\alpha$  为实际相邻关节角度;  $\mathbf{P}_e$  为连杆  $M_k$  延长线与球锥面交点,若关节角度超出限制,将待更新关节节点更新至最大角度位置。当关节角度超限时,关节节点的位置更新原理为

$$\mathbf{P}_{A(k-2)} = (\mathbf{P}_{A(k-1)} - \mathbf{P}_m) \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} + (\mathbf{P}_{A(k-1)} - \mathbf{P}_e) \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha} \quad (14)$$

超冗余机器人直线进给单元仅能在同一水平轴线运动。针对超冗余机器人的基座直线更新的运动约束,采用初始机械臂构型生成初始路

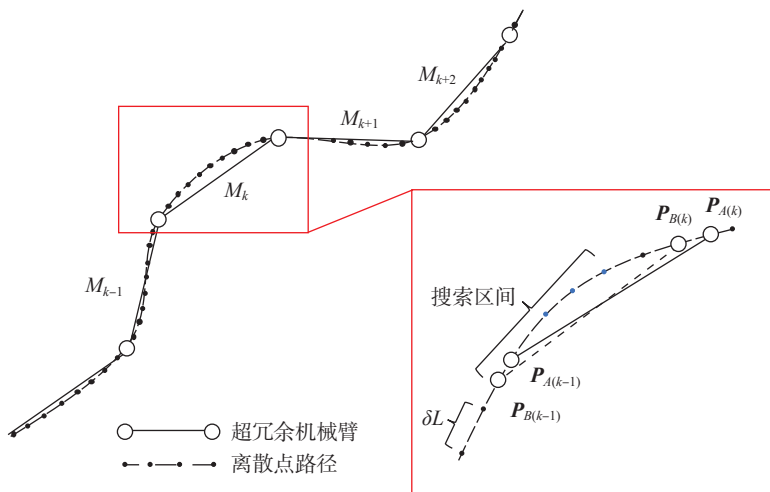
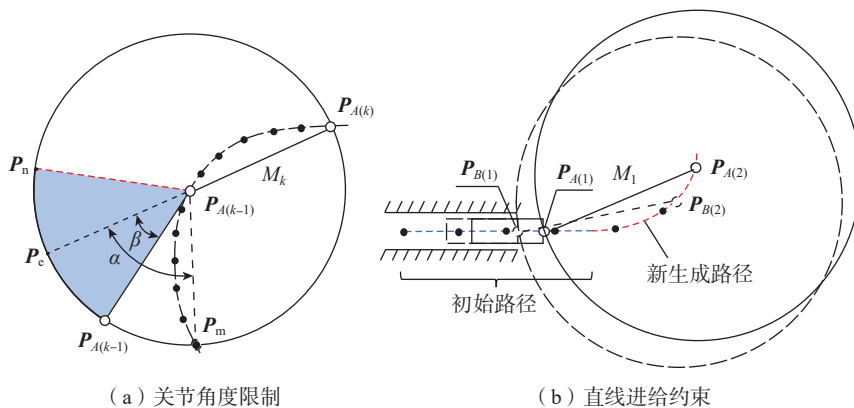


图3 超冗余机器人路径点匹配示意图

Fig.3 Diagram of path point matching for hyper-redundant robot



(a) 关节角度限制

(b) 直线进给约束

图4 路径跟随运动关节角度约束

Fig.4 Angle constraint of path-following movement

径作为基座端限制路径曲线,基座坐标  $P_0(0,0,Z_{A(0)})$  更新原则为

$$Z_{A(0)} = Z_{A(1)} - \sqrt{L_1^2 - (X_{A(1)})^2 - (Y_{A(1)})^2} \quad (15)$$

### 2.3 离散路径在线插补

路径跟随的核心要求是找到路径中与已更新关节节点的距离为杆长且满足运动约束的节点。由于路径离散化的原因,需要对原有路径进行插值获取符合要求的节点位置。

如图 5 所示,相邻路径离散点  $J_{A(k-1)-1}$  与  $J_{A(k-1)}$  与关节节点  $P_{A(k)}$  的距离分别为  $L_a$  和  $L_b$ ,连杆长为  $L_k$ ,其中三者满足  $L_a > L_k > L_b$ ,为了提升插补效率,采用近似形式求解插补点,其插补原理如式(16)和(17)所示:

$$P_r = \frac{L_a - L_k}{\delta L} \cdot J_{A(k-1)-1} + \left(1 - \frac{L_a - L_k}{\delta L}\right) \cdot J_{A(k-1)} \quad (16)$$

$$P_{A(k-1)} = P_{A(k)} + \frac{L_k}{|P_r - P_{A(k)}|} \cdot (P_r - P_{A(k)}) \quad (17)$$

## 3 仿真分析

### 3.1 平面路径跟随性能分析

如图 6 所示,分别针对平面路径与空间路径对本文路径跟随方法进行性能分析,针对平面路径选取  $[0,0,1482; 0,0,1582; 0,0,1682; 0,500,2082; 0,500,2182; 0,500,2282]$  点集进行 3 次样条插补形成平面平滑路径。取运动时长为 30 s 进行分析,黑色线条为平面轨迹,红色阴影部分为超冗余机器人运动空间,机器人运动结束时,根据其跟随情况可知

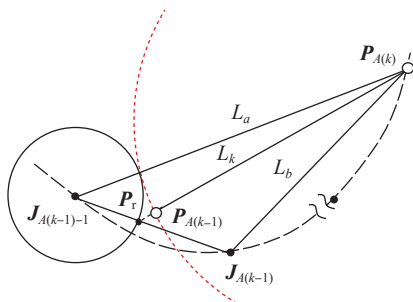


图 5 离散路径插补原理

Fig.5 Principle of discrete path interpolation

机器人可实现路径的较高精度跟随效果。

图 7 为平面路径关节转角变化情况,当机器人关节角度超出其运动能力时,本文路径跟随算法可以将机器人关节转角约束在安全范围内。并在一定程度上维持了路径跟随运动的运动精度。

### 3.2 空间路径跟随性能分析

为了验证超冗余机器人空间中的综合运动性能并判定路径跟随算法的有效性,通过空间曲线验证机器人运动的灵活性,本文建立空间圆锥螺旋曲线路径:

$$\begin{cases} x = 12t' \cdot \cos(0.5t') \\ y = 12t' \cdot \sin(0.5t') \\ z = 65t' + 1482 \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $t'$  为曲线参数。

上述空间路径起点与超冗余机器人末端关节重合,截取部分曲线。超冗余机器人末端关节从起点出发,逐渐沿路径进给,取运动时长为 30 s,其跟随运动过程如图 8 所示。当机器人运动到路径终点时,机械臂与给定路径间偏差保证在较精确范围内。

### 3.3 路径跟随方法运动精度与效率分析

机器人的实时控制需要路径跟

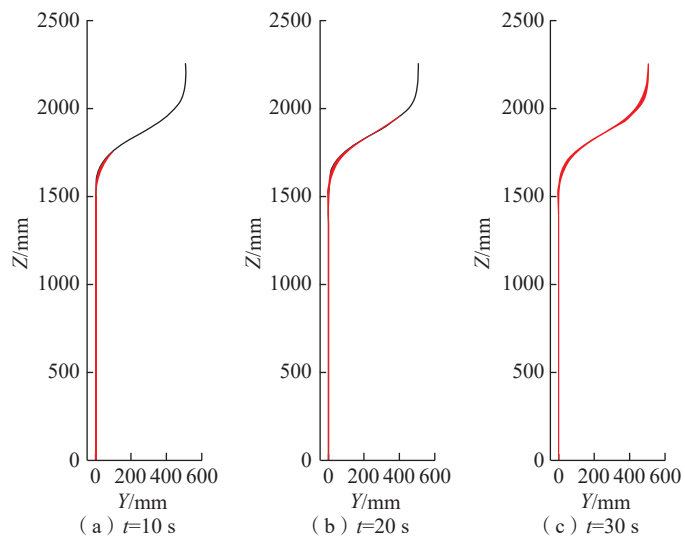


图 6 平面路径运动情况

Fig.6 Motion of planar path

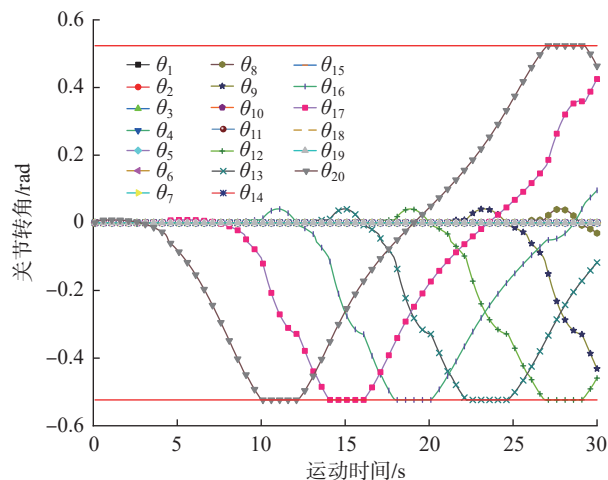


图 7 平面路径关节转角变化情况

Fig.7 Joint angle variation of planar path

随算法具备一定解算效率。本文提出的路径跟随算法流程为：已知当前关节节点位置情况下，给出末端关节目标点，通过区间内二分搜索方法与插补逐步获得每个关节的位置，形成机器人新的构型。本文通过测定超冗余机器人关节位置与给定空间圆锥曲线偏离距离作为运动误差分析。

本文路径跟随方法单次计算耗时为 0.413 ms，给定空间路径最大运动偏差为 0.011 mm，迭代次数为 10000，路径类型为空间圆锥曲线。以个人计算机的 Matlab R2018b 软件作为仿真平台，计算机的操作系统为 64 位 Windows 10，处理器为 Intel Core i5，内存为 4 GB。

## 4 仿真平台与试验分析

### 4.1 遥控操作虚拟仿真平台开发

为了进一步验证算法有效性，开发了基于 ROS-Gazebo 架构的遥控操作虚拟仿真平台。通过对本仿真平台里的机器人末端工具、目标环境进行适应性更换，可以为操作者提供一个可视化的虚拟仿真训练功能，增加了操作安全性，同时也为数字孪生式操作提供了可能。

如图 9 所示，超冗余机器人遥控操作虚拟仿真平台开发流程如下。

(1) 基于机器人 Solidworks 模型导出 URDF 文件与 STL 文件，并将 URDF 文件精简为 Xacro 文件，实现对机器人的文本化描述。

(2) 编写 YAML 文件，配置机器人运动控制器，添加虚拟关节电机并配置相关变量。

(3) 写手柄外部控制程序，该程序包含超冗余机器人正逆运动学、路径跟随算法、逻辑操作功能和通信功能，可将控制变量发送到虚拟机器人电机进行运动控制。

仿真系统效果如图 9 所示，机器人可通过路径跟随算法在人的实时控制下穿越狭小空间。

### 4.2 实时路径跟随运动试验

为了进一步验证算法有效性，本文基于 21 关节自由度超冗余机器人和深腔结构件开展了路径实时跟随运动试验。如图 10 所示，试验平台由超冗余机器人、控制中心、末端执行器（相机）、试验环境构成。机器人伺服电机与传感器等元件通过 EtherCAT 总线连接，并与 Beckhoff 工控机建立通信。机器人通过 TwinCAT 平台进行运动控制，操作者可通过操作手柄实现机器人的跟随运动。试验环境为模拟某航空结构件的透明板材箱体。

如图 11 (a) 所示，由于试验环境摆放的位置不固定，操作者需通过观察机器人末端摄像头反馈的图像画面判断机器人下一步前进方向，即通过操作遥控手柄上方向按键生成机器人末端运动路径离散点集合，并基于本文所提出的实时路径跟随运动算法控制机器人运动。试验结果表明，在人机交互操作下，机器人从初始状态，顺利抵达深腔目标区域，如图 11 (b) 所示。

## 5 结论

(1) 提出考虑运动约束的自适应

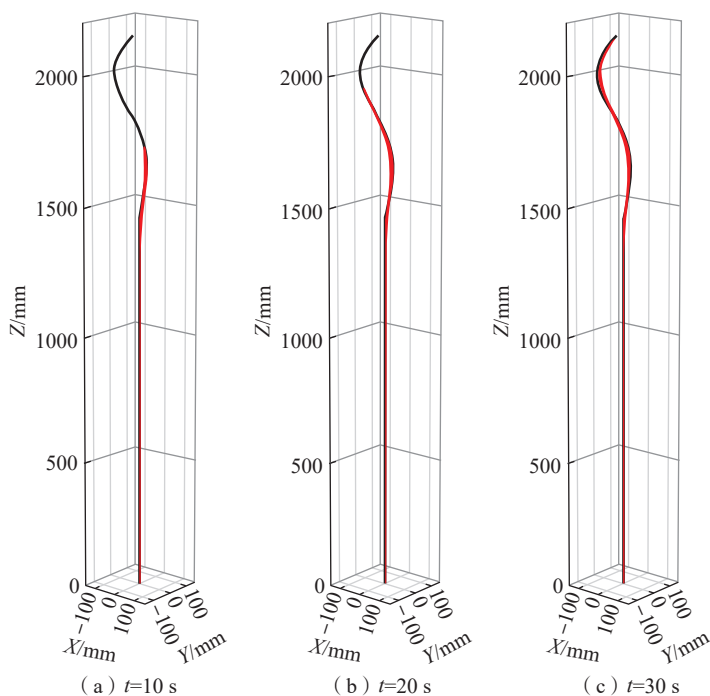


图 8 空间路径运动情况  
Fig.8 Motion of spatial path

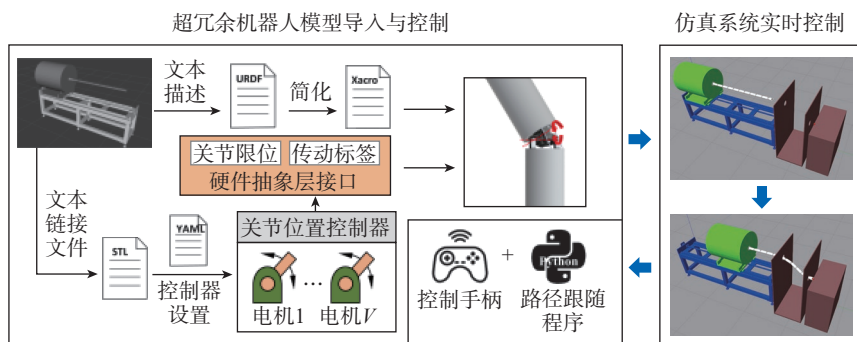


图 9 仿真系统开发流程  
Fig.9 Development process of simulation system

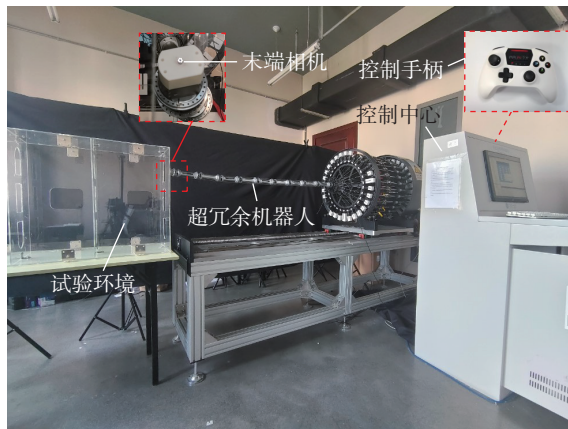
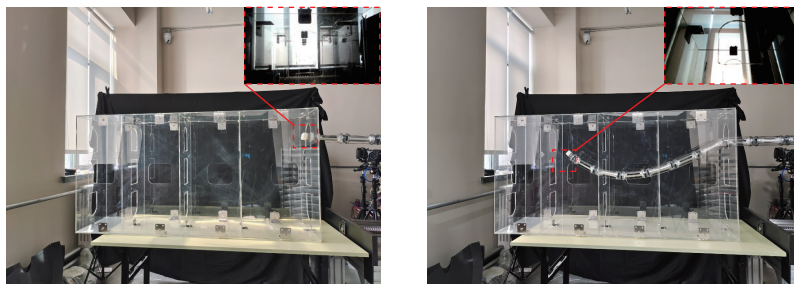


图 10 超冗余机器人试验平台

Fig.10 Experimental platform of hyper-redundant robot



(a) 开始运动

(b) 抵达任务区

图 11 超冗余机器人深腔空间探查试验

Fig.11 Narrow space exploration by hyper-redundant robot

应二分搜索的超冗余机器人路径跟随算法,保证关节转角均在 $\pm 30^\circ$ 范围,实现 0.413 ms 单次求解。

(2) 路径跟随算法具备较高的运动精度。机器人关节角度未超限情况下,给定空间圆锥形曲线的最大运动误差为 0.011 mm。

(3) 基于 ROS-Gazebo 搭建了超冗余机器人遥控操作虚拟仿真平台,实现了机器人算法高效安全验证与操作训练。

(4) 进行了超冗余机器人的深腔空间实时控制试验。试验结果表明,本文提出的路径跟随算法可有效应用于深腔空间任务作业。

## 参考文献

[1] BA W M, DONG X, MOHAMMAD A, et al. Design and validation of a novel fuzzy-logic-based static feedback controller for tendon-driven continuum robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(6): 3010–3021.

[2] NIU G C, WANG L, ZONG G H, et al. Attitude control based on fuzzy logic for continuum aircraft fuel tank inspection robot[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2015, 29(6): 2495–2503.

[3] 姚艳彬, 杜兆才, 魏志强. 蛇形臂机器人装配系统研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 26–30.

YAO Yanbin, DU Zhao cai, WEI Zhiqiang. Research on snake-arm robot assembly system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 26–30.

[4] WANG Y Q, YAN Q Z, LI T, et al. Efficient inverse kinematics optimization solution method of smooth configuration for hyper-redundant robot[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 625–630.

[5] COLOMÉ A, TORRAS C. Closed-loop inverse kinematics for redundant robots: Comparative assessment and two enhancements[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 944–955.

[6] PENG J Q, XU W F, LIU T L, et al. End-effector pose and arm-shape synchronous

planning methods of a hyper-redundant manipulator for spacecraft repairing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104062.

[7] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(3): 343–354.

[8] XU W F, MU Z G, LIU T L, et al. A modified modal method for solving the mission-oriented inverse kinematics of hyper-redundant space manipulators for on-orbit servicing[J]. Acta Astronautica, 2017, 139: 54–66.

[9] S A M E R Y, H A I D E R A, M O G H A V V E M I M. A new geometrical approach for the inverse kinematics of the hyper redundant equal length links planar manipulators[J]. Engineering Transactions, 2009, 12(2): 109–114.

[10] SONG S, LI Z, MENG M Q H, et al. Real-time shape estimation for wire-driven flexible robots with multiple bending sections based on quadratic Bézier curves[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6326–6334.

[11] LIU J G, WANG Y C, LI B, et al. Neural network based kinematic control of the hyper-redundant snake-like manipulator[C]// International Symposium on Neural Networks. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 767–775.

[12] ARISTIDOU A, LASENBY J. FABRIK: A fast, iterative solver for the inverse kinematics problem[J]. Graphical Models, 2011, 73(5): 243–260.

[13] XIE H B, WANG C, LI S S, et al. A geometric approach for follow-the-leader motion of serpentine manipulator[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(5): 172988141987463.

[14] 王俊刚, 汤磊, 谷国迎, 等. 超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法及其性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 18–25.

WANG Jungang, TANG Lei, GU Guoying, et al. Tip-following path planning and its performance analysis for hyper-redundant manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 18–25.

[15] PALMER D, COBOS-GUZMAN S, AXINTE D. Real-time method for tip following navigation of continuum snake arm robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(10): 1478–1485.

通讯作者: 刘海波, 教授, 博士, 研究方向为测量-加工一体化制造方法与装备、工业机器人辅助制造技术与系统等。

(下转第 83 页)

## Research Status and Development Trend of Automated Fiber Placement Machine for Advanced Composite Materials

LI Yan<sup>1</sup>, JIANG Junxia<sup>1</sup>, HE Yuxiao<sup>1,2</sup>, TANG Sijia<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201100, China;

3. AVIC Huiyang Aviation Propeller Co., Ltd., Baoding 071025, China)

**[ABSTRACT]** Advanced composite materials have been widely used in the aerospace industry and other fields due to their high specific strength, specific modulus, substantial weight reduction and good corrosion resistance. AFP machine is the necessary equipment to realize automatic laying, which is an important link affecting the laying quality and production efficiency. Therefore, the development and improvement of AFP machine has become one of the most critical issues in the manufacture of complex components of composite materials. Based on the automatic laying equipment at home and abroad in recent years, this paper discusses and analyzes the current research and application status of AFP machine based on the main structure of machine tool, the form of yarn frame, the pressure system of laying head, the heating system and the tension system, summarizes the research results of automatic laying equipment at home and abroad, analyzes the advantages and disadvantages of domestic and foreign laying equipment. Finally, the future development trend of automatic silk laying equipment is discussed and summarized, which provides a reference direction for the design and optimization of silk laying machine.

**Keywords:** Automated fiber placement (AFP); Advanced composite materials; AFP machine; AFP head; Prepreg tow; AFP process

(责编 七七)

(上接第 73 页)

## Real-Time Path-Following Method and Experiment of Hyper-Redundant Robot in Deep Cavity Operation of Aviation Equipment

LI Te<sup>1</sup>, RUAN Wenjun<sup>1</sup>, PAN Xin<sup>2</sup>, LUO Chao<sup>1</sup>, LIU Haibo<sup>1</sup>, WANG Yongqing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

**[ABSTRACT]** The hyper-redundant robot with high flexibility and large aspect ratio structure is a feasible way to accomplish the intelligent operation of deep cavity tasks in the process of manufacturing, assembly and maintenance of aviation equipment. Aiming at the problem of efficient and safe operation of the hyper-redundant robot in complex deep cavity space, a path-following motion method for hyper-redundant robot suitable for real-time teleoperation was proposed. The simulation results show that the average solution time of the path-following method is 0.413 ms, and the maximum deviation of the conical spiral curve path movement is 0.011 mm, which meet the requirements of real-time movement and safe and precise operation. A virtual teleoperation simulation platform based on ROS-Gazebo is developed, which provides a low-cost means of virtual training and simulated operation. The experimental results show that the path-following method ensures the efficient and safe movement of the hyper-redundant robot in the complex deep cavity.

**Keywords:** Hyper-redundant robot; Path-following; Motion simulation; Motion planning; Deep cavity operation

(责编 七七)