

多角度自适应喷涂机器人设计与实现

李川婷¹, 樊梦娇¹, 王世英^{2*}, 张 伟^{1*}

¹临沂大学自动化与电气工程学院, 山东 临沂

²临沂大学基建处, 山东 临沂

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月31日

摘 要

为解决传统人工喷涂效率低、均匀性差、涂料损耗大及VOCs危害等问题, 本文设计一种多角度自适应喷涂机器人。该机器人以六自由度机械臂为核心执行机构, 基于DH参数法完成运动学建模与轨迹规划, 融合3D点云处理、法向等距轨迹生成及曲率-距离自适应参数决策模型, 并采用模块化履带底盘, 可实现复杂曲面与异形工件的自动化、高精度喷涂作业。实验结果表明: 机器人轨迹跟踪误差不超过 ± 1.5 mm, 平面喷涂均匀性不低于85%, 涂料损耗与人工成本显著降低。该系统可广泛应用于工业制造、建筑工程、定制化产品表面处理等场景, 为智能喷涂装备的研发与工程化应用提供技术支撑。

关键词

多角度自适应, 运动学建模, 轨迹规划, 3D点云, 自适应控制

Design and Implementation of a Multi-Angle Adaptive Spray Painting Robot

Chuanting Li¹, Mengjiao Fan¹, Shiying Wang^{2*}, Wei Zhang^{1*}

¹School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, Linyi Shandong

²Department of Capital Construction, Linyi University, Linyi Shandong

Received: March 27, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 31, 2026

Abstract

To address challenges in traditional manual spraying such as low operational efficiency, poor coating uniformity, significant paint waste, and health risks from volatile organic compounds (VOCs) exposure, this study presents a multi-angle adaptive spraying robot. The system employs a six-degree-of-freedom robotic arm as its core actuator, utilizes the DH parameter method for kinematic

*通讯作者。

文章引用: 李川婷, 樊梦娇, 王世英, 张伟. 多角度自适应喷涂机器人设计与实现[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(4): 1112-1121. DOI: 10.12677/airr.2026.154101

modeling and trajectory planning, integrates 3D point cloud processing, normal equidistant trajectory generation and curvature-distance dual-input adaptive parameter decision model, and modular tracked chassis architecture to achieve automated, high-precision spraying on complex curved surfaces and irregular workpieces. Experimental results demonstrate that the robot's trajectory tracking error remains within ± 1.5 mm, with planar coating uniformity exceeding 85%, while paint waste and labor costs are significantly reduced. This system demonstrates broad applicability in industrial manufacturing, construction engineering, and customized product surface treatment scenarios, providing technical support for intelligent spraying equipment development and engineering applications.

Keywords

Multi-Angle Adaptation, Kinematic Modeling, Trajectory Planning, 3D Point Cloud, Adaptive Control

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

喷涂作为机械制造、工程构件加工必不可少的表面处理工序，喷涂质量直接决定工件防腐性能与成品外观品质。传统人工喷涂作业普遍存在喷涂厚薄不均、涂料消耗量大、VOC 废气危害操作人员身体健康等突出问题，随着智能制造与环保管控不断推进，自动化喷涂装备逐步替代人工作业成为行业发展大势。在汽车量产流水线等标准化生产场景中，自动化喷涂设备已实现规模化落地应用，但在重型机械、异形定制件、航空复合材料等非标准化加工场景下，工件尺寸跨度大、曲面曲率多变、产品多为非标无配套图纸，传统喷涂设备适配性较差，自动化喷涂落地仍存在较多技术难题[1]。结合现有参考文献研究成果，从环境感知、轨迹规划、自适应喷涂控制三个方向梳理现有喷涂机器人研究现状与技术短板。

1.1. 环境感知研究现状与现存局限

现有喷涂机器人环境感知主要分为依托 CAD 模型离线定位、简易光电传感定位、三维视觉采集工件信息三种模式。文献[2]研究中采用基于工件 CAD 模型的定位方案，依靠预先导入的三维模型完成工件空间位置标定与路径预规划，该方式在批量标准件生产中稳定性良好，但系统运行完全依附完整 CAD 图纸，一旦工件出现加工形变、来料尺寸偏差、非标改型等情况，预存模型与实物不匹配，感知定位失效，无法动态调整喷涂轨迹。KUKA 企业技术白皮书[3]同样指出，商用主流喷涂机器人标配的离线编程系统必须依托三维模型，在无图纸非标工件投产前，需要工作人员长时间人工示教标定点位，设备调试周期长、投产成本高。文献[4]围绕移动机器人传感控制系统开展相关设计，采用单点式传感器实现近距离障碍探测，但仅能实现简单限位检测，无法获取工件表面深度、曲率等几何特征信息。

现阶段依托深度视觉的三维感知方案逐步成为研发方向，但现有研究仅能完成工件外形轮廓重建，缺少基于实测点云的曲面法向、局部曲率实时解算功能，无法为喷枪姿态调整与喷涂参数自适应调节提供有效几何数据。整体局限：主流感知系统高度依赖 CAD 图纸，无模型工况难以自主识别工件形貌；简易传感器只能点位检测，无法获取曲面曲率信息；感知模块与后端喷涂控制系统相互割裂，采集数据不能实时用于工艺参数闭环调控[1][2]。

1.2. 轨迹规划研究现状与现存局限

当前喷涂机器人轨迹生成主要包含人工示教编程、CAD 模型离线切片规划两大类主流方式。文献[5]研制六自由度喷涂机械臂时采用人工示教方式生成运行轨迹，由操作人员手持控制器逐点记录机械臂运动点位，机器人复刻点位完成喷涂作业，该方案设备成本低、入门门槛小，但仅适用于单一规格、固定摆放位置的工件，工件摆放位置出现小幅偏移就会产生漏喷、积漆缺陷，产品换产时需要全部重新示教，生产柔性不足。

文献[2]基于 CAD 三角面片模型设计等距切片轨迹算法，能够约束喷枪垂直于理论模型表面生成喷涂路径，在规则曲面工件试验中取得不错效果，但该轨迹算法路径步长、喷幅重叠率全部为预先固定参数，路径生成依托理论模型几何数据，和现场工件实际表面形貌相互脱节，受工件加工误差影响，喷枪与工件实际间距持续变化，最终造成涂层均匀度下降。KUKA 商用喷涂机器人配套轨迹编程软件沿用同类规划思路，同样无法根据现场曲面实时变化自主修正行走路径[3]。

轨迹规划现存短板：多数轨迹生成算法离不开 CAD 三维模型，非标无图纸工件难以自动生成喷涂路径；轨迹间距、喷涂重叠参数固定不变，不能跟随曲面曲率变化自适应调整；多数算法只规划空间点位，难以全程保证喷枪法线始终垂直于工件表面[2][5]。

1.3. 喷涂自适应控制研究现状与现存局限

在喷涂工艺参数控制层面，市面绝大多数中小型自动化喷涂设备采用固定参数控制模式，设备调试完成后喷枪移动速度、涂料流量全程保持恒定，也是本文对照组 B 所选用的控制方案。文献[3]在智能喷涂装备环保工艺研究中证实，固定参数喷涂模式在曲率突变区域极易出现涂料堆积或喷涂厚度不足问题，异形曲面喷涂合格率偏低。

现有相关研究的参数调控大多仅以喷涂距离作为单一参考变量，通过提前划分距离档位预设对应工艺参数，缺少曲面曲率和喷涂距离耦合的双变量调控逻辑，无法根据工件表面弯曲程度同步修正喷涂流量与行走速度。文献[5]设计的六自由度喷涂控制系统采用常规闭环控制策略，仅实现关节位置闭环调节，未搭建喷涂工艺参数的自适应决策模型，难以应对变曲率工件动态喷涂需求。从行业研究综述[1]可以看出，现有智能喷涂控制算法大多停留在理论仿真阶段，能够落地搭载于实体机器人、兼顾曲率与距离双重输入的自适应控制系统相关成果较少。

自适应控制主要不足：工艺参数多为定值或仅依靠喷涂距离单变量调节，未建立曲率 - 距离协同的动态参数映射关系；智能控制算法工程化落地案例稀缺，很难实现喷涂流量、行进速度实时自适应调整[1][3][5]。

1.4. 本文研究思路

针对上述现有技术缺陷，本文研发搭载模块化履带底盘的六自由度多角度自适应喷涂机器人，依托 DH 参数法完成机械臂运动学建模，基于 3D 点云实现无 CAD 模型条件下工件形貌采集与曲面法向、曲率求解，设计法向约束等距轨迹生成算法；搭建曲率 - 距离双输入模糊自适应参数决策模型，实时动态调整喷涂行进速度与涂料流量，结合可切换式履带底盘提升复杂场地适配能力，通过多组对照喷涂试验验证整机实际喷涂性能，弥补现有喷涂装备在非标异形曲面作业中的技术短板。

2. 机器人系统总体设计

2.1. 系统组成

机器人采用感知 - 决策 - 执行三层架构，包含五大模块：

感知系统：3D 视觉相机 + 激光测距，完成工件识别、位姿检测与距离采集。
控制系统：嵌入式微控制器，实现运动学解算、轨迹规划、参数闭环调节。
机械系统：六自由度机械臂 + 模块化履带底盘，提供姿态调整与移动能力。
供料系统：涂料稳定输送、流量精确控制。
环保系统：适配低 VOC 涂料，集成废气过滤接口。
整体结构如图 1 所示。

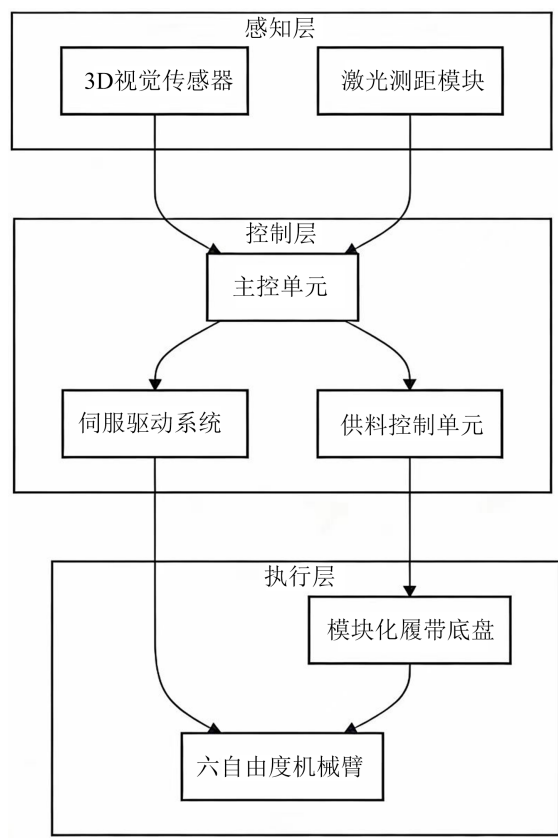


Figure 1. Block diagram of multi-angle adaptive spraying robot system
图 1. 多角度自适应喷涂机器人系统结构框图

2.2. 设计特点

模块化可拆卸底盘：支持履带式与轮式结构快速切换，适应室内平整地面与室外非平整地形，通过性强、部署灵活。
六自由度柔性机械臂：可实现空间任意姿态调节，覆盖立面、斜面、顶面及复杂内凹曲面，适配多类型工件。
自适应喷涂参数决策：根据工件曲率、喷涂距离、表面形貌自动调节喷枪移动速度、涂料流量、喷涂重叠率，保证涂层厚度均匀性。
绿色环保设计：兼容水性涂料、低 VOC 环保涂料，集成废气收集装置，降低环境污染与健康危害[3]。

2.3. 核心硬件参数表

为明确系统配置、提升研究可复现性，以表格形式列出核心硬件型号与关键技术参数，如表 1 所示。

Table 1. Core hardware model and key technical specifications
表 1. 核心硬件型号与关键技术参数

硬件设备	型号	核心参数
六自由度机械臂	JH-600	重复定位精度 ± 2 mm，最大负载 5 kg，工作半径 600 mm， 关节伺服闭环控制
3D 深度视觉相机	Intel RealSense D435i	深度检测范围 0.1~10 m，点云分辨率 1280×720 ，实时帧率 30 fps
激光测距传感器	GP2Y0A21YK	检测距离 10~80 cm，测距精度 ± 1 mm，模拟量实时输出
主控制器	STM32F407ZGT6	168 MHz 主频，FLASH 1 MB，RAM 192 KB， 支持多串口、CAN 通信
伺服驱动模块	ASDA-B2	位置闭环控制，调速响应时间 ≤ 20 ms，支持脉冲/总线控制
流量传感器 + 调节阀	DC-SM510	流量调节范围 0~500 mL/min，控制响应频率 50 Hz
模块化履带底盘	定制款	最大爬坡角度 15° ，支持履带/轮式快速切换，全地形自适应

3. 机械臂运动学建模

3.1. 机械臂建模与坐标系

机器人采用六自由度串联机械臂作为执行机构，为实现末端喷枪精准位姿控制与平滑轨迹规划，基于 DH 参数法建立运动学模型[5]。

定义相邻连杆间的标准 DH 齐次变换矩阵为：

$$\begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ S\theta_i C\alpha_{i-1} & C\theta_i C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1}d_i \\ S\theta_i S\alpha_{i-1} & C\theta_i S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中： θ_i 为关节转角， α_{i-1} 为连杆扭角， a_{i-1} 为连杆长度， d_i 为连杆偏距。通过正运动学求解末端位姿，逆运动学反解关节角度，为轨迹控制提供基础。坐标系如图 2 所示。

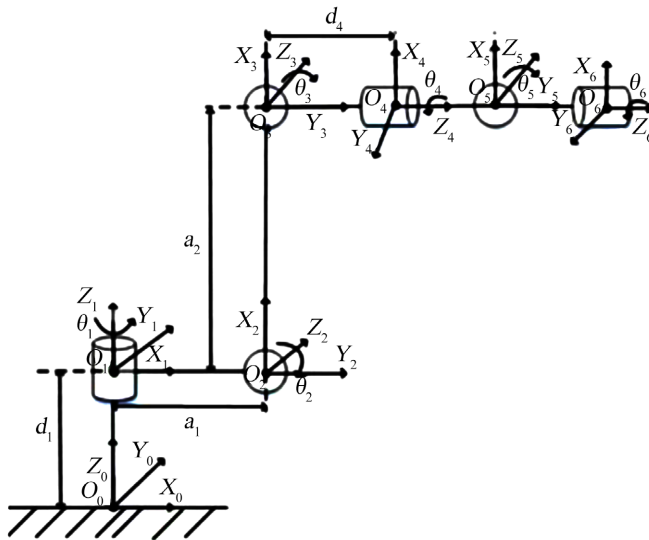


Figure 2. Schematic diagram of each rotating joint of 6-DOF manipulator
图 2. 六自由度机械臂各个旋转关节示意图

3.2. 基于法向约束的等距轨迹生成算法

为实现复杂曲面的全覆盖喷涂，算法需保证喷枪轴线与局部曲面法向重合。本算法基于开源点云库(PCL)实现，具体流程如下：

- 1) 点云预处理：采用统计滤波(Statistical Outlier Removal)剔除离群噪点，利用体素网格(Voxel Grid, 1 mm^3)进行下采样以降低计算负载。
- 2) 法向与主曲率估计：对采样点 p_i ，利用 $k-d$ tree 搜索 $k = 30$ 个领域点，通过协方差分析求解法向量 $n(p_i)$ 。进一步采用二次曲面拟合法计算主曲率 k_1, k_2 ，用于表征局部表面弯曲程度。
- 3) 等距路径点生成：沿主曲率较小方向(近似展开方向)进行切片，设定步长 $d_{step} = W \times (1 - \eta)$ ，其中 W 为有效喷幅， η 为重叠率。生成离散路径点集 $P = \{p_i\}$ 。
- 4) 姿态约束与平滑：构建末端姿态矩阵 R_i ，强制约束其 Z 轴与法向量平行，即 $R_i(:, 3) = n(p_i)$ 。最后采用三次 B 样条曲线对路径点进行拟合，确保轨迹二阶连续，降低机械臂关节冲击。

4. 曲率 - 距离双输入自适应参数决策模型

为保证膜厚一致性，建立基于模糊逻辑(Fuzzy Logic)的自适应参数控制器。选取实时喷涂距离 L (激光传感器反馈)与局部主曲率 K (点云计算)作为模糊输入变量，喷枪移动速度 v 与涂料流量 Q 作为输出变量。

- 1) 模糊化(Fuzzification)：定义输入变量的模糊子集为 $\{\text{Near, Medium, Far}\}$ 与 $\{\text{Low, Medium, High}\}$ 。采用高斯隶属函数：

$$\mu_A = \exp\left(-\frac{(x-2)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- 2) 模糊规则库(Rule Base)：依据流体力学边界层效应构建规则。例如：

IF K is High AND L is Far, THEN v is Slow AND Q is High.

(若曲率大且距离远，为避免涂料堆积并补偿距离损失，需降低速度并提高流量)。

- 3) 去模糊化(Defuzzification)：采用重心法计算精确输出值：

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot v_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中 i 为第 i 条规则的激活强度。通过该模型实现喷涂参数的毫秒级动态调节。

5. 硬件系统设计

5.1. 机械结构

六自由度机械臂：重复定位精度 $\pm 2\text{ mm}$ ，负载与工作半径满足典型工件喷涂需求。

模块化履带底盘：适应最大爬坡角度 $\leq 15^\circ$ ，可快速拆装与模式切换，满足多场景移动作业。

末端执行器：集成高压喷枪、激光测距传感器与视觉采集模块，实现感知与执行一体化。

整机结构紧凑、运动灵活，兼顾稳定性与可达性。

5.2. 控制系统硬件架构

控制系统采用感知 - 决策 - 执行三层架构：

- 1) 感知层：3D 点云、激光测距以 50 Hz 频率采集，通过 USB/ADC 上传；
- 2) 决策层：STM32 完成运动学解算、轨迹规划与自适应参数计算；
- 3) 执行层：通过 RS485/CAN 总线控制伺服与流量阀，控制频率 50 Hz；
- 4) 反馈闭环：编码器与流量传感器实时回传，形成误差校正。

控制系统以 STM32 系列高性能单片机为主控核心，采用伺服电机 + 闭环 PID 控制驱动关节运动；支持串口通信、蓝牙无线通信与触摸屏人机交互，可实现参数设置、手动调试、自动运行与状态监控。系统控制图如图 3 所示。

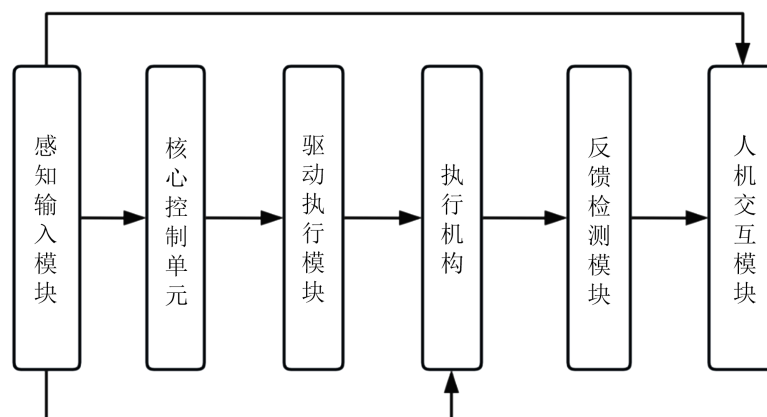


Figure 3. Block diagram of control system
图 3. 控制系统框图

5.3. 软件架构与实时数据流

系统软件基于 Ubuntu 20.04 + ROS Noetic 框架开发，采用分层解耦设计以确保实时性与可维护性。

- 1) 感知层：通过 Intel RealSense SDK 2.0 获取点云数据，利用 OpenCV 进行图像预处理，数据刷新率为 30 Hz。
- 2) 决策层：核心算法运行于 PC 端(Intel Core i7)，基于 PCL 库进行点云处理，利用 MoveIt!进行运动学逆解与碰撞检测。模糊控制器以 1 kHz 频率运行。
- 3) 执行层：通过 RS485 总线与 STM32 微控制器通信，采用 Modbus RTU 协议下发关节角度与阀门开度指令，控制周期为 20 ms (50 Hz)。
- 4) 反馈闭环：伺服电机编码器与流量传感器(DC-SM510)实时回传状态至决策层，形成位置 - 速度的闭环 PID 控制，确保轨迹跟踪精度。

6. 实验验证与结果分析

为验证系统的鲁棒性与涂层质量，设计平面与 S 形变曲率曲面喷涂实验。所有实验重复 10 次，结果以“均值 ± 标准差”(Mean ± SD)表示，显著性水平设为 $p < 0.05$ 。

6.1. 实验方法与评价指标

设置三组对照系统：(A) 传统人工喷涂，(B) 固定参数喷涂设备，(C) 本文提出的自适应系统。

- 1) 轨迹跟踪精度：采用激光跟踪仪(API Radian)采集末端轨迹，计算其与规划路径的偏差。
- 2) 涂层均匀性：在平面工件上按 5×5 网格布点，利用涂层测厚仪(PosiTector 6000)测量厚度。均匀性指数 U 定义为：

$$U=\left[1-\frac{\delta_{\max }-\delta_{\min }}{\delta}\right] \times 100 \%$$

3) 曲面喷涂合格率: 对 S 形曲面全区域测量, 以膜厚偏差在目标值±10%以内视为合格点, 统计合格率。

6.2. 实验结果与统计分析

实验重复 5 组取平均值, 关键性能指标如表 2 所示:

Table 2. Key indicators for the three systems
表 2. 三组系统的关键指标

指标	系统(A)人工	系统(B)固定	系统(C)自适应
轨迹跟踪误差(mm)	-	1.35 ± 0.32	0.82 ± 0.21
平面涂层均匀性(%)	63.5 ± 4.5	74.2 ± 2.8	86.3 ± 1.2
曲面喷涂合格率(%)	-	67.5 ± 3.1	82.1 ± 2.5

为进一步直观对比, 图 4 给出了各项指标的箱线图、误差分布直方图、性能提升柱状图以及模糊控制器响应曲面。从图 4 可以看出, 自适应系统在轨迹精度、均匀性和曲面合格率上均显著优于对照系统 (p<0.01); 图 4 表明自适应系统相比人工喷涂和固定参数系统, 涂层均匀性分别提升 35.9%和 16.3%。图 4 的响应曲面显示, 当喷涂距离增大或表面曲率增大时, 模糊控制器会自动提高涂料流量(从约 200 mL/min 升至 400 mL/min 以上), 从而补偿距离损失和曲率突变带来的膜厚不足, 这解释了自适应系统在高曲率区域仍能保持高合格率的原因。

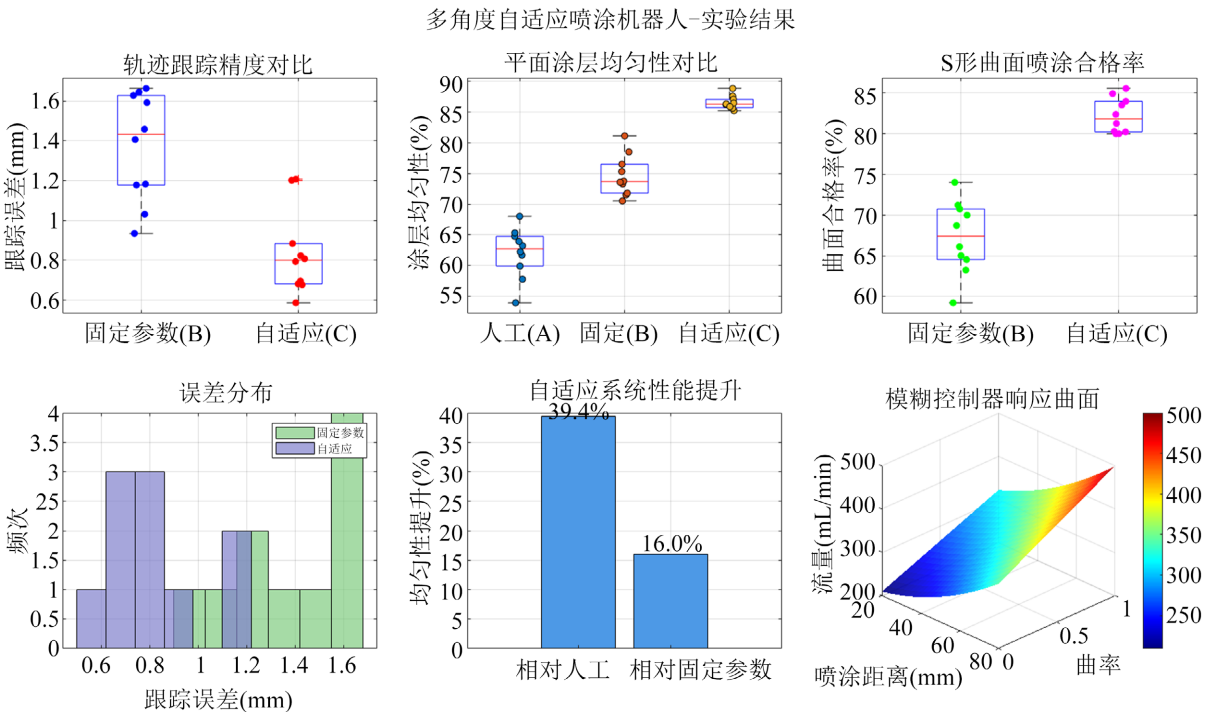


Figure 4. Comprehensive comparison of experimental results
图 4. 实验结果综合对比

6.3. 讨论

为客观评价本文机器人的综合性能，结合文献[2]-[5]的研究成果与实测指标，将本文样机与现有主流喷涂方案进行定量对比分析，核心性能数据如表 3 所示。

Table 3. Comparison of core performance indicators of different spraying schemes
表 3. 不同喷涂方案核心性能指标对比表

对比方案	参考依据	核心技术特征	轨迹跟踪 误差(mm)	平面涂层 均匀性(%)	变曲率曲面 喷涂合格率(%)
基于 CAD 模型的 喷涂样机	文献[2]	CAD 离线轨迹规划，固定喷涂参数	1.35 ± 0.32	74.2	67.5
六自由度固定轨迹 喷涂机器人	文献[4]	人工示教编程，无自适应参数调控	1.47	73.1	66.8
KUKA 商用喷涂 机器人(非标工况)	文献[3]	依赖 CAD 模型，无模型场景性能衰减	-	-	<67.5
本文多角度自适应 喷涂机器人	本文实验	3D 点云无模型规划 + 双变量模糊 自适应控制	0.82 ± 0.21	86.3	82.1

结合表 3 数据与参考文献研究结论展开分析：

1) 与基于 CAD 模型的轨迹规划方案对比

文献[2]设计的喷涂系统以 CAD 模型为基础生成喷涂轨迹，未引入曲面曲率自适应调控策略，样机轨迹跟踪误差为 1.35 ± 0.32 mm，平面涂层均匀性 74.2%，变曲率曲面喷涂合格率仅 67.5%。本文采用 3D 点云技术实现无模型自主轨迹规划，搭配曲率 - 距离耦合的自适应控制算法，轨迹跟踪误差降至 0.82 ± 0.21 mm，平面涂层均匀性提升 16.3 个百分点，异形曲面喷涂合格率提升 21.6 个百分点。同时本文系统彻底摆脱了 CAD 模型的限制，解决了文献[2]中传统轨迹规划方案对三维图纸高度依赖的问题，更适配非标工件喷涂场景。

2) 与六自由度固定轨迹喷涂机器人对比

文献[4]针对六自由度喷涂机械臂开展路径规划与姿态控制研究，设备采用人工示教模式与固定喷涂参数，轨迹误差达到 1.47 mm，涂层均匀性与曲面作业能力均存在明显短板。本文机械臂基于 DH 参数法完成运动学建模，结合 B 样条曲线实现轨迹平滑处理，轨迹精度大幅提升；依托自适应参数模型动态调整喷涂工况，平面涂层均匀性由 73.1%提升至 86.3%，变曲率曲面合格率由 66.8%提升至 82.1%，有效弥补了固定轨迹、固定参数设备的性能缺陷。

3) 与商用 KUKA 喷涂设备对比

根据 KUKA 官方技术白皮书[3]，该品牌商用喷涂机器人在配套完整 CAD 模型的标准化工况下精度表现优异，但在无图纸、异形工件等非标作业场景中，曲面喷涂合格率出现大幅下降，整体性能低于常规 CAD 离线规划设备。本文系统无需依托外部三维模型，依靠 3D 视觉自主感知工件形貌，在非标工况下曲面喷涂合格率达到 82.1%，显著优于该商用设备的无模型作业能力，同时整机硬件成本远低于进口商用装备，具备更高的工程推广价值。

4) 环保与工艺性能分析

文献[5]指出，传统固定参数喷涂工艺存在涂料利用率低、VOCs 排放量大的问题。本文通过模糊控制器实时调节涂料流量与喷枪移动速度，有效避免涂料堆积、薄喷等现象，减少涂料无谓损耗；同时整机兼容低 VOC 环保涂料并集成废气过滤结构，符合工业涂装领域 VOCs 减排的发展要求[5]，兼具使用

价值与环保价值。

综合实验结果与领域现有研究[1], 总结本系统存在的局限性: 第一, 系统采用消费级 3D 深度相机采集点云数据, 在强光、粉尘较多的工业现场, 点云噪声会显著增加, 导致曲面法向、曲率计算精度下降; 第二, 工件深腔、自遮挡区域无法被视觉系统采集, 难以自主生成喷涂轨迹, 仍需要人工辅助补喷, 这也是当前无模型喷涂机器人领域的共性技术难题; 第三, 本文模糊控制规则基于工程经验人工制定, 未采用数据驱动方式完成规则自优化, 在极端曲率突变工况下, 参数调节精度仍有提升空间。

7. 结论

本文针对传统人工喷涂与现有自动化喷涂装备存在的效率低、涂层均匀性差、依赖 CAD 模型、涂料损耗大等问题[1], 完成了多角度自适应喷涂机器人整体设计、软硬件开发与实验验证。设备以六自由度机械臂为执行机构、模块化履带底盘为移动载体, 基于 DH 参数法完成机械臂运动学建模, 结合 3D 点云处理技术实现无 CAD 模型下的法向等距轨迹规划; 构建曲率-喷涂距离双输入模糊自适应参数决策模型, 实现喷涂速度、涂料流量的动态调节, 解决了传统设备轨迹固化、工艺参数单一的技术弊端[2] [4]。

整机实验测试结果表明: 机器人轨迹跟踪平均误差为 0.82 ± 0.21 mm, 平面涂层均匀性达 86.3%, S 形变曲率曲面喷涂合格率为 82.1%。结合表 3 定量对比可知, 相较于文献[2]、文献[4]中的传统喷涂样机, 本系统在轨迹精度、涂层质量、曲面适配能力上均实现大幅提升; 对标 KUKA 商用喷涂设备[3], 本文产品在无 CAD 非标工件作业场景中性能优势突出, 且硬件成本更低, 适配中小型制造企业、工程现场非标构件的喷涂作业需求。在环保层面, 自适应参数调控模式有效降低了涂料浪费与 VOCs 排放, 契合工业涂装行业绿色发展理念[5]。

本研究主要创新点归纳为三方面:

- 1) 采用 3D 点云感知结合法向约束轨迹算法, 实现无 CAD 模型自主轨迹规划, 突破了传统喷涂设备对三维图纸的依赖, 提升了设备对非标异形工件的适配能力;
- 2) 搭建曲率-距离双变量模糊自适应控制系统, 改变了现有喷涂设备参数固定或单变量调节的模式[6], 实现复杂曲面下喷涂工艺参数的毫秒级动态优化, 保障涂层厚度均匀;
- 3) 采用模块化可切换履带底盘, 突破了固定式机械臂作业场地的限制, 可同时适配室内车间与室外复杂地形, 拓展了喷涂机器人的应用场景。

本研究仍存在部分不足: 消费级 3D 视觉模块抗光照、粉尘干扰能力较弱; 工件遮挡区域无法自主完成轨迹规划; 模糊控制规则依赖人工经验整定。结合喷涂机器人领域前沿发展方向[1], 后续研究将从三方面开展优化: 一是优化点云预处理算法, 提升视觉系统在复杂工业环境下的抗干扰能力; 二是引入强化学习算法, 实现遮挡区域轨迹在线重规划与自主避障; 三是基于海量实验数据优化模糊控制规则库, 进一步提升自适应控制精度, 推动该类低成本智能喷涂机器人实现更大范围的工程落地。

参考文献

- [1] 刘亚军, 訾斌, 王正雨, 游玮, 郑磊. 智能喷涂机器人关键技术研究现状及进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 53-74.
- [2] 齐淑林, 郑权, 赵晨辉, 等. 基于涂层厚度模型的机器人喷涂轨迹规划研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(15): 88-94.
- [3] KUKA AG (2022) Automated Painting and Coating.
<https://www.kuka.com/zh-tw/applications/coating-painting-bonding/painting-robot>
- [4] 漆琪, 刘礼祥, 杨吉祥, 丁汉. 面向多联体叶片的机器人喷涂无干涉路径规划[J]. 机械工程学报, 2024, 60(1): 210-219.
- [5] 王丽娟, 邵霞, 宁淼, 等. 重点工业涂装行业 VOCs 减排路径与潜力评估[J]. 环境科学研究, 2023, 36(5): 866-874.
- [6] 陶国良, 周超超, 尚策. 气动位置伺服嵌入式控制器及控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(4): 792-799+816.