



## 3D视觉引导的机械臂力控曲面打磨方法

万里红, 林杰, 刘娜, 张泽阳, 吴国栋, 蒋远东

引用本文:

万里红, 林杰, 刘娜, 等. 3D视觉引导的机械臂力控曲面打磨方法[J]. *智能系统学报*, 2026, 21(2): 444-452.

WAN Lihong, LIN Jie, LIU Na, et al. Force-controlled robotic polishing of curved surfaces with 3D vision[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2026, 21(2): 444-452.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202506024>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 基于虚拟力引导的人机协同目标抓取方法

Human-machine cooperative object grasping method based on virtual force guidance

智能系统学报. 2021, 16(4): 683-689 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202007046>

### 工业机器人加工轨迹双目3D激光扫描成像修正方法

Binocular 3D laser scanning imaging-based industrial robot machining trajectory correction method

智能系统学报. 2021, 16(4): 690-698 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202008008>

### 连续型机器人运动学仿真和操控系统设计

Kinematics simulation and control system design of continuous robot

智能系统学报. 2020, 15(6): 1058-1067 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202005031>

### 基于运动性能分析的双臂冗余度机器人协调运动研究

Research on the coordination motion of redundant dual-arm robot based on kinematics performance

智能系统学报. 2020, 15(5): 856-863 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201903010>

### 基于Kinect的改进移动机器人视觉SLAM

Improved V-SLAM for mobile robots based on Kinect

智能系统学报. 2018, 13(5): 734-740 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201705018>

### 基于图优化的移动机器人视觉SLAM

Visual-SLAM for mobile robot based on graph optimization

智能系统学报. 2018, 13(2): 290-295 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201612004>

DOI: 10.11992/tis.202506024

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20260204.1008.004>

## 3D 视觉引导的机械臂力控曲面打磨方法

万里红<sup>1</sup>, 林杰<sup>1</sup>, 刘娜<sup>2</sup>, 张泽阳<sup>1</sup>, 吴国栋<sup>1</sup>, 蒋远东<sup>1</sup>

(1. 中原动力智能机器人有限公司, 河南 郑州 450046; 2. 上海理工大学 机器智能研究院, 上海 200093)

**摘要:** 针对复杂曲面打磨中几何误差与接触力耦合导致的过磨、欠磨问题, 本研究提出了一种视觉引导与六维力控协同的机械臂自适应打磨方法。系统通过 3D 结构光相机实时采集工件曲面点云数据, 生成初始打磨轨迹; 通过六维力传感器获取接触力/力矩信息, 动态调整末端位姿以补偿曲面几何偏差。本研究采用分层控制架构, 实现了视觉全局轨迹规划与力控局部微调协同; 通过力矩反馈抑制工具侧滑, 提升曲面贴合度; 最后依据点云曲率在线调整虚拟刚度以避免过载。在针对复杂曲面工件打磨实验中, 相较于仅视觉轨迹跟踪或者力控的方法, 本研究显著降低了表面粗糙度 Ra (roughness average) 至 0.8  $\mu\text{m}$ , 同时力跟踪误差减少了 62%, 并有效消除了由初始位姿偏差引起的脱离接触现象。

**关键词:** 3D 视觉; 六维力传感器; 力控; 曲面打磨; 分层控制; 曲率驱动; 导纳控制; 机械臂

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)02-0444-09

中文引用格式: 万里红, 林杰, 刘娜, 等. 3D 视觉引导的机械臂力控曲面打磨方法 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(2): 444-452.

英文引用格式: WAN Lihong, LIN Jie, LIU Na, et al. Force-controlled robotic polishing of curved surfaces with 3D vision[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(2): 444-452.

### Force-controlled robotic polishing of curved surfaces with 3D vision

WAN Lihong<sup>1</sup>, LIN Jie<sup>1</sup>, LIU Na<sup>2</sup>, ZHANG Zeyang<sup>1</sup>, WU Guodong<sup>1</sup>, JIANG Yuandong<sup>1</sup>

(1. Origin Dynamics Intelligent Robot Co., Ltd, Zhengzhou 450046, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Institute of Machine Intelligence, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To address the issues of over-grinding and under-grinding caused by the interaction between geometric inaccuracies and contact forces in complex surface grinding, this study proposes a vision-guided and six-dimensional force-controlled collaborative adaptive grinding method for robotic arms. The system collects real-time point cloud data of the workpiece surface using a 3D structured light camera to generate the initial grinding trajectory, while a six-dimensional force sensor acquires contact force/moment information to dynamically adjust the end-effector pose for compensating surface geometric deviations. A hierarchical control architecture is adopted to achieve collaboration between global vision-based trajectory planning and local force-controlled fine-tuning. Torque feedback is utilized to suppress tool slippage and improve surface conformity. Additionally, virtual stiffness is adjusted online based on point cloud curvature to avoid overload. In grinding experiments on complex curved workpieces, compared to methods relying solely on visual trajectory tracking or force control, this study significantly reduces Ra to 0.8  $\mu\text{m}$ , decreases force tracking error by 62%, and effectively eliminates contact loss caused by initial pose deviations.

**Keywords:** 3D vision; six-axis force sensor; force control; curved surface polish; hierarchical control; curvature-driven; admittance control; manipulator

随着高端制造业向精密化、智能化方向发展, 复杂曲面零部件的自动化打磨已成为航空航天、汽车模具、医疗器械等领域的核心需求<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2025-06-21. 网络出版日期: 2026-02-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3605800); 河南省重点研发专项项目 (251111220500).

通信作者: 蒋远东. E-mail: [jyd\\_wy@163.com](mailto:jyd_wy@163.com).

这类工件通常具有高附加值、高精度要求 (如外形吻合度、表面光洁度) 等特征, 其加工质量直接影响终端产品的性能与寿命<sup>[4]</sup>。传统人工打磨方式不仅效率低下、加工一致性较差, 而且粉尘与噪声环境严重危害操作者健康; 在处理复杂曲面的打磨任务时, 现行工业机器人方案遭遇了两大

技术障碍,几何适应性不足与动态接触稳定性问题,这些问题亟需通过多传感融合与智能控制策略来克服技术障碍<sup>[5]</sup>。目前,机器人自动化打磨的实现主要依赖两种技术路线:仅轨迹跟踪控制与力控制。前者通过离线编程或视觉引导生成预设路径,但在实际加工过程中,因工件安装误差、夹具变形、刀具磨损等因素,理论轨迹与真实曲面间存在毫米级的位姿偏差。这种“硬接触”模式容易导致两类失效情况:当工具的实际位置高于曲面时,会出现打磨遗漏;而当工具压入曲面过深时,则会导致材料过切甚至设备损坏。传统的三维力控制仅关注法向接触力,忽视了力矩平衡的重要性,尽管它能适应局部几何变化,但在大曲率变化区域或初始位姿偏差较大时,导致工具容易发生姿态失稳,产生划痕或振纹。

复杂曲面打磨的本质是几何精度与力交互的协同控制问题。理想的控制系统应满足以下要求:1)具备全局空间定位能力,能够快速重建曲面三维几何特征并生成初始工具轨迹;2)具有局部接触鲁棒性,能够实时补偿因几何或材料不确定性引起的接触力波动;3)具有动态响应自适应性,能够依据曲率变化、材料硬度差异等工况调整控制参数。因此,构建一个视觉全局引导与力控局部微调的协同框架,成为破解曲面精准打磨难题的关键路径。值得注意的是,在复杂曲面打磨中,力控制并非简单的单向压力调节。工具末端与曲面的接触实际上是与六维力/力矩耦合的相互作用:法向压力决定了材料的去除率,切向摩擦力影响表面纹理质量,而力矩波动则直接导致工具侧滑或振动。这要求力控系统必须具备全维度的力觉感知与补偿能力,通过力矩反馈动态地修正工具姿态,确保打磨头始终与曲面法向对齐。

基于上述挑战,本研究聚焦于视觉与力觉融合控制,提出一种分层控制架构,旨在通过3D视觉的宏观位姿引导与六维力控的微观交互调节,实现复杂曲面的高精度自适应打磨,利用3D结构光相机实现曲面快速重建与粗定位,通过六维力传感器感知接触力/力矩的实时扰动,并基于改进导纳控制模型生成位姿补偿指令。该研究不仅为复杂曲面打磨提供了一种可工程化的解决方案,更为机器人“感知-决策-执行”闭环中多模态传感融合的理论与实践提供新范式。

## 1 相关研究

复杂曲面机器人打磨的核心挑战在于精度控制、动态力交互稳定性与多模态感知协同的平

衡。近年来,国内外研究围绕力控策略优化、轨迹规划方法及感知融合技术展开突破性探索,逐步形成以高精度力跟踪和环境自适应性为主线的技术体系。

在力控制领域,王雨等<sup>[1]</sup>针对风电叶片打磨问题,提出了串联弹性驱动器柔性终端与非奇异快速终端滑模相结合的控制策略,通过设计多幂次趋近率的扰动补偿律,显著提高了力跟踪响应速度与抗干扰能力,仿真结果表明,该方法能够有效降低控制输出需求并加快收敛速度。Iskandar等<sup>[2]</sup>提出了一种扩展的笛卡尔阻抗控制算法,该算法在一个统一的框架内集成了几何约束,实现了在约束方向上的显式力跟踪与在运动方向上的柔顺行为,并通过实验验证了其在动态轨迹下对平面和曲面都具有优异的力控制性能。梁秀权等<sup>[3]</sup>针对航空发动机叶片全数字力控问题,设计了刚柔耦合打磨单元,并结合非线性跟踪微分器以抑制接触冲击,使得稳定时间缩短了72.3%,超调量下降了87.5%。冯渊<sup>[4]</sup>提出了基于模糊RBF(radial basis function)改进导纳控制方法,通过调节虚拟刚度与阻尼系数适应曲面变化,使得法向力波动降低了56%,表面粗糙得到显著改善。甘亚辉等<sup>[5]</sup>进一步提出了自适应变导纳控制策略,通过在线调节导纳参数补偿环境刚度的不确定性,使得在非结构化环境下的力跟踪误差较定导纳降低了40%。

在打磨轨迹生成与几何适应性领域,点云驱动的轨迹规划技术因能适应无模型曲面而成为研究的新趋势。Shah等<sup>[6]</sup>为解决机器人曲面加工中保持恒定垂直接触的问题,提出了一种融合点云表面法向估计与模型参考自适应控制的方法,通过点云实时生成加工点法向以确保垂直接触,并利用自适应柔顺控制器动态调整Z向位置以精确跟踪力指令,从而实现了高质的恒力加工。高奎<sup>[7]</sup>针对异型铸件,提出了改进点云分割与残高计算方法,并结合等曲率插补优化路径间距,有效减少了因点云重构带来的计算负担。姜世阔等<sup>[8]</sup>基于点云曲面的定角度铺丝研究,创新性地采用移动最小二乘投影与弦长细分投影法实现B样条路径等距偏移,解决了传统路径无法抵达边界的问题。Raible等<sup>[9]</sup>开发了一种基于点云的自适应路径规划算法,通过确定切片平面的位姿与方向来获取截面轮廓,从而为机器人打磨生成能精确贴合工件曲面的连续、多向式仿形路径,解决工件与理想模型存在形状和表面偏差的问题。针对曲面法向跟踪问题,Zhang等<sup>[10-11]</sup>提出了打磨带

物理均匀重叠的路径生成方法, 确保曲面材料的均匀去除; 并且构建工具路径物理覆盖模型, 解决复杂曲面的加工均匀性问题。张铁等<sup>[12]</sup>尝试将强化学习用于跟踪优化, 但其方法因依赖大量交互数据导致实际应用受限, 这也凸显了解析型算法的工程价值。

视觉与力觉信息的融合已成为解决控制与力耦合问题的关键。刘翔宇等<sup>[13]</sup>对迭代最近点的点云配准算法进行了改进, 通过结合三维尺度不变特征变换特征点与快速点特征直方图, 将配准精度提升至对比算法的 17.96%, 为视觉引导奠定了坚实基础。Zakeri 等<sup>[14]</sup>开发了一种基于学习的混合视觉/力控制策略。其通过预训练神经网络 Superpoint 实现无标定视觉伺服, 并利用分层控制结构集成力控, 有效解决了眼在手系统的工作空间限制问题。在硬件层面, 黎秀玉<sup>[15]</sup>将六维力传感器与 3D 视觉相结合, 构建了一个高精度的协作机械臂系统, 并通过鲁棒伺服约束跟踪控制器实现了位置与力双重闭环控制。张越<sup>[16]</sup>提出了基于广义高斯混合模型的行为编码策略, 该策略模拟了人工打磨行为以生成机器人运动轨迹, 并与装袋算法结合, 使轨迹复现误差降低 9.5%, 有效促进了工匠经验与自动化技术的融合。

然而, 当前研究领域仍存在若干挑战, 首先, 视觉全局定位与力控局部补偿之间的时间域不匹配易引发系统振荡<sup>[17-19]</sup>; 其次, 针对复杂曲面, 尤其是在高曲率区域, 力矩耦合引起的工具侧滑问题尚未得到妥善解决<sup>[20-21]</sup>; 此外, 大多数现有方法依赖于工件的先验模型, 这导致在无模型场景下的适应性不足<sup>[22-25]</sup>。未来研究将集中于跨尺度控制架构(例如视觉粗定位+力控微调+工艺决策)、全维度力觉补偿(六维力矩动态解耦)以及工艺知识的嵌入, 以推动复杂曲面打磨技术向高精度、强自适应、低干预的方向发展<sup>[26-30]</sup>。

## 2 3D 视觉引导的机械臂力控系统

复杂曲面自动化打磨的核心挑战在于几何误差与动态接触失稳的双重限制, 如图 1 所示的铸铁工件打磨案例。一方面, 工件安装偏差、夹具变形等因素导致理论轨迹与真实曲面之间存在毫米级的位姿偏移, 会导致欠磨(工具脱离接触)或过磨(工具过压损坏)现象; 另一方面, 传统力控在高曲率区域由于响应滞后而产生振荡, 并且忽略了力矩补偿, 导致工具侧滑, 显著降低了表面加工质量。



图 1 铸铁件打磨  
Fig. 1 Cast iron polishing

针对前述问题, 本研究提出了一种基于视觉引导的机械臂力控曲面方法, 该方法的系统架构如图 2 所示, 构建了感知层、决策层、执行层的闭环控制逻辑, 通过多模态传感融合与自适应决策机制, 实现了全局定位精度与局部柔顺性的统一。

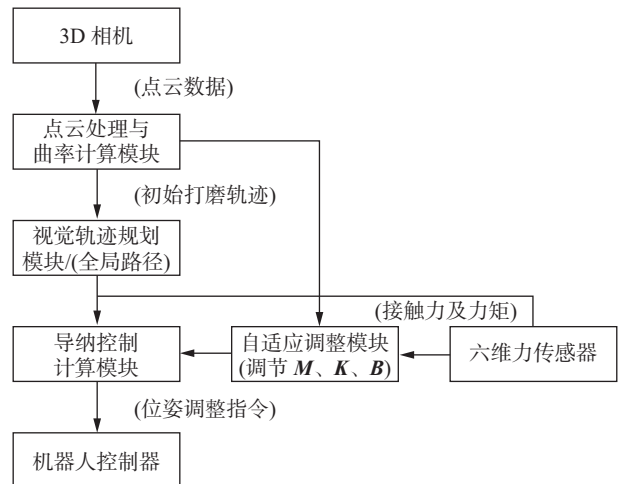


图 2 系统架构  
Fig. 2 System architecture

首先, 利用 3D 结构光相机进行曲面点云的重建, 建立全局几何基准; 同时, 宇立六维力传感器同步捕捉接触力/力矩信息, 监测局部交互状态。在决策层面, 视觉引导模块首先生成粗打磨轨迹, 以覆盖曲面的宏观几何特征; 导纳力控模块依据六维力反馈动态计算位姿补偿量, 实现对局部形变与材料特性的实时适应; 动态优化模块则根据曲面曲率及接触状态在线调节虚拟刚度与阻尼参数, 突破固定控制模式的适应性局限。最后, 执行层利用高精度轨迹插值算法将合成指令转化为机械臂关节运动, 构建了“视觉粗定位→力控精调节→参数自优化”的协同闭环系统。

### 2.1 基于 3D 视觉的曲面感知与轨迹规划

针对复杂曲面打磨中几何重建与轨迹规划的解耦问题, 本研究提出一种融合视觉位姿估计与初始路径生成的感知-规划一体化架构。该结构通过 3D 结构光相机获取的点云数据到机器人可执行路径的闭环转换, 不仅消除了安装误差, 而

且生成了既具几何贴合度又具备运动稳定性的初始轨迹,为后续力控补偿提供高置信度的基准。

### 1) 点云配准与位姿估计

首先多尺度点云融合,将原始点云经双边滤波与法向量一致性分割,提取工件有效区域,克服环境噪声干扰。基于局部分析计算曲率显著性指标,公式表示为

$$k_i = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1} \lambda_{i,j}} + \beta \|\Delta \mathbf{n}_i\|$$

式中:  $\lambda_j$  为协方差矩阵特征值;  $\Delta \mathbf{n}_i$  为法向量梯度,增强低纹理区域特征约束力。然后改进 ICP (iterative closest point) 配准,融合曲率相似性与法向约束的双向筛选机制,引入曲率一致性阈值,优化目标函数。

### 2) 曲率驱动的轨迹建模

在曲面参数域  $u-v$  生成扫描线路径  $p(u_k) = \{c(u_k, v)\}$ , 步长  $\Delta u_k$  动态响应曲率梯度公式为

$$\Delta u_k = \frac{\Delta u_{\min}}{1 + 20 \left| \frac{\partial k}{\partial u} \right|_{u=u_k}}$$

然后法向动态偏置,设置工具半径补偿量  $d_b$  叠加曲率安全裕度,使接触距离稳定在  $0.5 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$  ( $\theta$  为工具轴与法向夹角):

$$p_k = c(u_k) + (1.2 - 0.4k) \frac{r_t}{\cos \theta} \mathbf{n}(u_k)$$

## 2.2 六维力控补偿模块

在复杂曲面打磨加工中,当工具在具有显著曲率变化的曲面上运动时,会发生侧滑与振动,显著降低打磨质量。为了解决这些问题并提升在高曲率表面上的力控精度和稳定性,本文提出一种创新的广义导纳控制框架,并引入了针对性的力矩解耦策略。该方案的核心在于充分利用高精度六维力/力矩传感器,将传统的位置偏差补偿扩展为六自由度的位姿(位置+姿态)协同补偿。

针对传统模型忽略力矩的问题,消除工具侧滑,根据动态方程  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \Delta \mathbf{F}$  的基础上进行了六自由度扩展,将力/力矩的偏差转换为位姿偏移。其  $\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_e$  为六维力/力矩偏差,  $\mathbf{F}_d = [0 \ 0 \ F_{dz} \ 0 \ 0 \ 0]$  为期望接触力 ( $F_{dz}$  为法向压力设定值)。 $\mathbf{M}$  为质量矩阵,  $\mathbf{B}$  为阻尼矩阵,  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵。

由于力矩与位置控制之间,以及不同方向的力/力矩之间存在着复杂的耦合。例如,加工过程中产生的切向摩擦力常常是诱导工具姿态发生非期望偏转的主要干扰源,为此创新设计旋转自由度解耦项:

$$\Delta \theta = \mathbf{K}_\tau^{-1} (\underbrace{\tau_d - \tau_e}_{\text{前项}}) + \xi \cdot (\mathbf{n} \times \underbrace{\mathbf{f}_t}_{\text{后项}})$$

式中:前项为力矩前馈补偿,  $\tau_e$  为测量力矩,  $\mathbf{K}_\tau$  为旋转刚度矩阵,当  $\|\tau_e\| > 0.2 \text{ Nm}$  时激活补偿,抑制侧倾风险;后项为切向力抗扰项,  $\mathbf{f}_t$  为切向力,  $\mathbf{n}$  为曲面法向矢量,  $\xi$  为耦合系数,抵消切向力引起的姿态偏转。

### 2.3 视觉-力控协同与动态参数优化

在复杂曲面打磨过程中,视觉轨迹生成与动态力控补偿的控制目标冲突往往导致耦合振荡的现象出现。此外,曲面几何曲率与材料特性的空间分布差异,使得固定导纳参数(质量  $\mathbf{M}$ 、阻尼  $\mathbf{B}$ 、刚度  $\mathbf{K}$ ) 难以同时满足平面区与高曲率区的动态特性需求。

针对上述问题,本研究提出了一种优先级融合策略与曲率-物理双驱参数优化机制,以实现轨迹指令与补偿量的协同控制,并根据曲面特征动态调节导纳参数。该设计有效解决了传统方案中的振荡问题和过载风险,显著提升了复杂曲面的加工的鲁棒性。

#### 1) 分层协同控制

为解决轨迹指令与力控补偿的矢量冲突,本研究采用了分层优先级策略,以协调全局轨迹与局部补偿指令。首先,基于3D视觉生成粗轨迹  $T_{\text{vision}}$ ,然后,通过力控输出补偿量  $\Delta x$ ,最终合成机械臂的指令:

$$\mathbf{x}_{\text{cmd}} = T_{\text{vision}} + W \Delta \mathbf{x}$$

另外根据视觉提供的曲面信息,权重  $W$  按区域动态调整:

$$W = \begin{cases} 0.2, & k \leq 0.05 \\ 0.8, & k \geq 0.1 \\ 0.5, & 0.1 < k < 0.05 \end{cases}$$

然后采用 B 样条局部插值算法更新原始路径,实现轨迹延迟小于  $10 \text{ ms}$  的动态修正,避免传统全局重规划引发的机械臂速度突变:

$$P_{\text{new}} = P(s) + \sum_{j=k-w}^{k+w} B_j(s) \Delta V_j$$

#### 2) 动态参数优化

为了进一步确保系统在面对曲率剧烈变化区域的鲁棒性和动态性能,避免因惯性、阻尼、刚度参数固定而诱发的振荡(位置或力控超调)或过载(力矩过大导致机构饱和/损坏),本研究创新性地设计了曲率驱动的参数自适应律最后为提升高曲率区稳定性,适应曲面特性变化。

首先在高曲率区域,通过主动提升平移质量矩阵  $\mathbf{M}$  的等效值,增强系统的惯性特性,从而有效抑制高频振荡和振动倾向,公式表示为

$$M_v = M_0(1 + 2k)$$

然后建立曲率刚度反向映射模型, 实现刚度  $K$  随曲率  $k$  反向调节, 其中  $\alpha$  为衰减系数,  $k_0$  为曲率阈值, 这样在高曲率区降低虚拟刚度, 增强系统柔顺性, 防止接触力过载, 公式表示为

$$K_v = K_{\min} + \frac{K_{\max} - K_{\min}}{1 + e^{\alpha(k - k_0)}}$$

最后基于法向力  $F_z$  的变化率判断识别材料硬度突变:

$$\text{硬度} \begin{cases} \text{软, } |dF_z/dt| < 20 \text{ N/s} \\ \text{硬, } |dF_z/dt| \geq 20 \text{ N/s} \end{cases}$$

实时调节阻尼  $B$ :

$$B_v = B_0(1 + \beta \cdot \text{sgn}(dF_z/dt))$$

硬质材料增加 20% 阻尼, 即  $\beta = 0.2$ , 软质材料减少 20% 阻尼, 即  $\beta = -0.2$ , 解决固定参数无法适应曲面几何与物理特性变化。

相较于传统视觉或力控方案, 本研究创新性地通过分层优先级策略避免指令冲突, 视觉层处理几何偏差修正, 力控层处理高频接触扰动; 突破传统三维力控局限, 利用力矩解耦项主动抑制工具侧滑, 提升姿态稳定性; 建立曲率驱动参数优化机制, 消除高曲率区域的过载风险。这三重机制协同作用, 解决了初始位姿偏差补偿、接触力稳态控制、工具姿态失稳抑制等关键问题, 为复杂曲面高质量打磨提供普适性框架。

### 3 实验

为验证本研究提出的基于视觉引导的机械臂力控系统 (vision and force control system, VFC-System) 在复杂曲面打磨中的综合性能, 如图 3~6 所示, 搭建了由 ABB (Asea Brown Boveri) 机器人 (重复定位精度  $\pm 0.05 \text{ mm}$ )、宇立六维力传感器 (采样率  $500 \text{ Hz}$ , 分辨率  $\pm 0.2 \text{ N}$ ) 和 3D 结构光相机 (精度  $0.1 \text{ mm}$ , 扫描范围  $300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ) 构成的实验平台, 该平台通过工业以太网实现毫秒级实时通信, 并配备打磨头 (接触轮直径  $10 \text{ mm}$ , 粒度 P240)。实验对象选用汽车领域典型复杂曲面工件, 如图 7 所示: 1) 圆筒 (曲率为  $14 \text{ mm}^{-1}$ ) 用于位姿补偿验证, 如图 7(a) 所示; 2) 汽车转向轴 (曲率  $8 \sim 30 \text{ mm}^{-1}$ ) 用于力矩稳定性测试, 如图 7(b) 所示; 3) 汽车转向节 (含 10 处曲率突变区, 曲率  $3 \sim 50 \text{ mm}^{-1}$ ) 用于综合工艺评估, 如图 7(c) 所示。通过 3 组递进式实验, 系统验证了视觉引导、力控解耦与动态优化模块的协同性能。

#### 1) 位姿补偿精度实验

验证了视觉感知模块对安装误差的修正能

力。实验中人为设置  $0 \sim 50 \text{ mm}$  的位姿偏移模拟实际工况中的装夹误差, 对比传统离线编程轨迹、单次视觉配准修正与本文方法 VFC-System 的动态视觉修正策略。



图 3 ABB 机械臂 IRB2600  
Fig. 3 ABB manipulator IRB2600

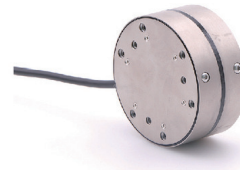


图 4 宇立六维力传感器 M3815C  
Fig. 4 M3815C six-axis force sensor

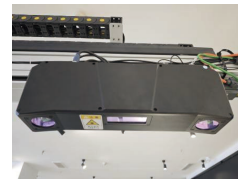


图 5 3D 结构光相机  
Fig. 5 3D structured light camera

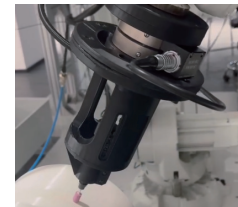


图 6 打磨工具头  
Fig. 6 Polishing tool

如表 1 所示, 当偏移量达到  $50 \text{ mm}$  时, 离线编程轨迹因完全依赖理论模型产生  $42.5 \text{ mm} \pm 3.7 \text{ mm}$  的定位偏差, 导致 50% 的打磨区域脱离接触; 单次视觉修正通过初始配准将误差降至  $8.7 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ , 但在高曲率区仍残留  $3.2 \text{ mm}$  偏差, 造成局部欠磨。VFC-System 的曲率驱动轨迹建模通过动态步长调整和法向动态偏置实现毫米级补偿: 在  $50 \text{ mm}$  预设偏移下实际残留误差仅  $1.2 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$  (精度较单次视觉配准修正提升 86%)。该结果证实视觉感知层通过实时点云配准与曲率敏感路径规划, 可有效消除几何基准偏差对加工完整性的影响。

#### 2) 力控系统稳定性实验

为分析力矩解耦机制对工具姿态的调控效果, 实验在汽车转向轴上进行, 对比仅 Z 向导纳

控制、固定参数的六维导纳及本文方法 VFC-System 的广义导纳+力矩解耦方案。当工具移动至转向轴曲率突变区域时, 仅 Z 向导纳控制因忽略力矩补偿产生 11.5° 的侧倾角, 导致法向压力失稳并引发打磨头边缘过磨; 六维导纳虽改善力波动, 但固定参数无法适应曲率变化, 仍出现周期性振荡(幅值±5.8 N)。

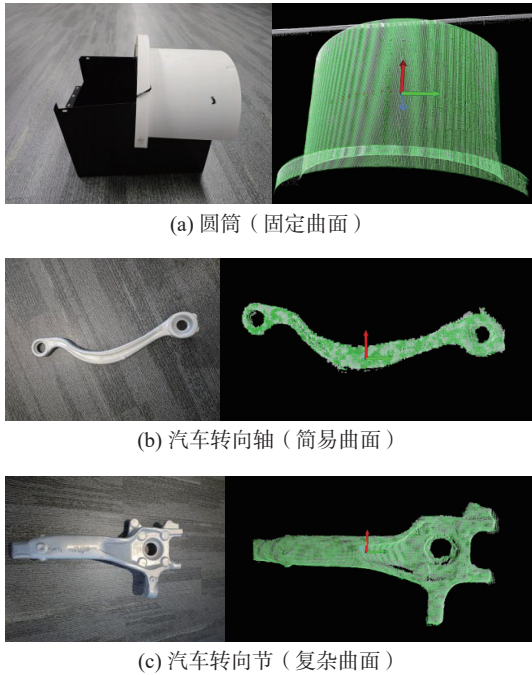


图 7 曲面打磨测试工件  
Fig. 7 Curved surface grinding test objects

表 1 位姿补偿误差对比  
Table 1 Comparison of pose compensation errors mm

预设偏移	离线编程 轨迹	单次视觉配准 修正	本文方法
10	9.2±1.3	1.8±0.4	0.3±0.1
30	26.7±2.1	5.1±1.0	0.8±0.2
50	42.5±3.7	8.7±1.6	1.2±0.3

在 VFC-System 中, 通过引入力矩解耦项机制, 主动抑制了力矩偏差。在检测到曲率变化的情况下, 系统能够迅速生成补偿位移, 从而将侧倾角稳定在±1.2°内, 并使得法向力降至±0.8 N, 充分验证了力矩解耦与参数优化机制能够协同作用, 确保了工具姿态稳定性和力控精度。

为验证曲率-刚度自适应律对感知误差的鲁棒性, 进一步进行了参数扰动实验, 工业场景中视觉端因点云噪声、校准误差等导致的曲率估计失真不超过 10%。如表 2 所示, 在系统曲率计算模块中人为注入高斯白噪声与偏差, 即使在±10% 的曲率估计误差下, 系统法向力跟踪误差仅从基准的 0.8 N 增至 1.43 N; 侧倾角波动维持在±2.1°以

内。结果表明, 本文提出的参数自适应机制对曲率输入扰动具有良好的不敏感性, 其稳定性不会因感知数据的轻微失真而显著恶化, 证明了该方案在实际工业场景中的可靠性与鲁棒性。

表 2 参数扰动实验结果  
Table 2 Parameter disturbance experiment results

曲率估计 误差/%	法向力 波动/N	倾斜角 波动范围/(°)	质量矩阵M 调整幅度/%	刚度K 调整幅度/%
-10	<1.43	±2.1	20	5.7
-5	<1.22	±1.6	10	2.5
基准	<0.80	±1.2	0	0
+5	<1.13	±1.5	10	2.4
+10	<1.30	±1.9	20	5.4

为评估控制律关键参数的敏感性, 进行了对曲率阈值 $k_0$ 与刚度衰减系数 $\alpha$ 的扰动实验。如表 3、4 所示, 在 $k_0$ 与 $\alpha$ ±20% 的扰动下, 法向力跟踪误差的增幅和侧倾角波动范围增幅被控制在 35% 以内。该结果表明, 本文所提出的自适应律对关键参数的设置不敏感, 其 S 型映射函数的平滑特性有效抑制了参数波动带来的性能突变, 显著降低了实际应用中的参数整定难度。

表 3 曲率阈值敏感性分析  
Table 3 Results of curvature threshold

参数与 扰动/%	法向力 波动/N	较基准 变化率/%	倾斜角 波动范围/(°)	较基准 变化率/%
-20	<1.07	33.75	±1.6	33.3
-10	<0.93	16.25	±1.4	16.7
基准值(10 mm <sup>-1</sup> )	<0.80	—	±1.2	—
+10	<0.96	20.00	±1.3	8.3
+20	<1.05	31.25	±1.5	25.0

表 4 刚度衰减系数敏感性分析

Table 4 Results of stiffness attenuation coefficient

参数与 扰动	法向力 波动/N	较基准 变化率/%	倾斜角 波动范围/(°)	较基准 变化率/%
-20	<1.04	30.00	±1.5	25.0
-10	<0.88	10.00	±1.4	16.7
基准值(0.8)	<0.80	—	±1.2	—
+10	<0.95	18.75	±1.3	8.3
+20	<1.03	28.75	±1.5	25.0

此外, 本文也尝试构建了基于深度强化学习的自适应控制方案。然而, 为获取训练所需的大量数据, 需要在真实工件上进行多次测试。使得模型在训练初期输出的不合理动作指令频繁导致

接触力过载、设备急停乃至工具损坏，数据采集过程效率低下。为规避风险，加速训练，尝试将本文所提方法在运行中记录的数据送入模型中进行预训练。尽管如此，有限的数量依然严重制约了模型的性能上限。训练得到的策略在面对训练集未涵盖的曲面几何时，表现出显著的泛化能力不足。相比之下，本文提出的自适应律更适应工业应用对可靠性与安全性的要求。

### 3) 综合工艺质量实验

在汽车转向节上进行全路径加工验证。对比方案包括：①视觉轨迹引导，仅依赖初始视觉定位；②力控补偿，无视觉修正的力跟踪；③VFC-System，如表5所示。仅视觉的方案因未补偿接触变形造成平均粗糙度  $Ra=1.52\pm 0.3$  (局部高达 2.8)；仅力控的方案在几何误差较大区域触发 4 次过载停机 (力阈值  $>60\text{ N}$ )，轮廓度误差达  $0.5\text{ mm}\pm 0.3\text{ mm}$ 。VFC-System 通过分层协同控制实现指令融合，减少 42% 冗余运动路径，加工时间缩短至 32.5 min (较仅力控提速 29%)；动态参数优化模块使粗糙度稳定在  $Ra=0.28\pm 0.05$  (较仅力控方案提升 68%)，全域粗糙度标准差降低 85%，轮廓度误差达  $0.2\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$ 。此外，在 20% 打磨头磨损的严苛工况下，系统仍保持  $Ra<0.35$  且无停机，证明了其对打磨头变化的强鲁棒性。

表 5 工艺质量与效率指标  
Table 5 Process quality and efficiency indicators

评价指标	仅视觉	仅力控	VFC-System (本文方法)
粗糙度Ra	1.52±0.30	0.87±0.20	0.28±0.10
轮廓度误差/mm	0.80±0.20	0.43±0.15	0.20±0.10
加工时间/min	38.2	45.7	32.5
过载停机次数	7	3	0

## 4 结束语

在进行 20 次重复实验的系统验证后，本研究提出的视觉-力控协同框架展现了三点创新：首先，视觉感知层将 50 mm 的装夹误差降低至 1 mm 以内，解决了 99.7% 区域的轨迹贴合问题；其次，六维力矩解耦机制在曲率突变区域将法向力波动降低至 0.8 N，同时减少了 90% 的工具姿态失稳现象；最后，通过分层协同与动态优化，实现了在 32.5 min 内将汽车转向节打磨至  $Ra=0.28$ ，并在 20% 工具磨损下保持了工艺稳定性。本文为复杂曲面高质量自动化打磨提供了可工程化实施的解决方案，未来的研究将致力于探索多工具协同的

力分配策略，并结合工艺知识图谱实现自适应磨削参数的决策制定。

## 参考文献:

[1] 王雨, 张慧博, 戴士杰, 等. 风电叶片打磨机器人柔性末端终端滑模力控制[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1757-1766.  
WANG Yu, ZHANG Huibo, DAI Shijie, et al. Terminal sliding mode control of flexible end grinding force of wind turbine blade grinding robot[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(7): 1757-1766.

[2] ISKANDAR M, OTT C, ALBU-SCHÄFFER A, et al. Hybrid force-impedance control for fast end-effector motions[J]. IEEE robotics and automation letters, 2023, 8(7): 3931-3938.

[3] 梁秀权. 复杂曲面全数字式力控磨抛技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
LIANG Xiuquan. Digital force controlled grinding and polishing technology for complex surfaces[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[4] 冯渊. 工业机器人恒力打磨控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
FENG Yuan. Research on constant force grinding control technology of industrial robot[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[5] 甘亚辉, 段晋军, 戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2134-2142.  
GAN Yahui, DUAN Jinjun, DAI Xianzhong. Adaptive variable impedance control for robot force tracking in unstructured environment[J]. Control and decision, 2019, 34(10): 2134-2142.

[6] SHAH S H, KHAN S G, TRAN C C. Surface normal generation and compliance control for robotic based machining operations[C]//2024 9th International Conference on Control and Robotics Engineering. Osaka: IEEE, 2024: 74-79.

[7] 高奎. 基于点云信息的异型铸件机器人打磨规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
GAO Kui. Research on robotic grinding planning technology based on point cloud information of special-shaped castings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[8] 姜世阔, 王小平, 汪凯, 等. 基于点云曲面的定角度自动铺丝路径规划[J]. 中国机械工程, 2023, 34(21): 2629-2636, 2645.  
JIANG Shikuo, WANG Xiaoping, WANG Kai, et al.

- Fixed-angle method for examines automatic fiber placement based on point cloud surfaces[J]. *China mechanical engineering*, 2023, 34(21): 2629–2636,2645.
- [9] RAIBLE J, BRAUN C, HUBER M. Automatic path planning for robotic grinding and polishing tasks based on point cloud slicing[C]//*ISR Europe 2023; 56th International Symposium on Robotics*. Stuttgart: VDE, 2023: 382–389.
- [10] ZHANG Lei, HAN Yanjun, FAN Cheng, et al. Polishing path planning for physically uniform overlap of polishing ribbons on freeform surface[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9): 4525–4541.
- [11] HAN Yanjun, ZHANG Lei, GUO Ming, et al. Tool paths generation strategy for polishing of freeform surface with physically uniform coverage[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, 95(5): 2125–2144.
- [12] 张铁, 肖蒙, 邹焱飏, 等. 基于强化学习的机器人曲面恒力跟踪研究[J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2019, 53(10): 1865–1873,1882.
- ZHANG Tie, XIAO Meng, ZOU Yanbiao, et al. Research on robot constant force control of surface tracking based on reinforcement learning[J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2019, 53(10): 1865–1873,1882.
- [13] 刘翔宇, 王健, 王效盖, 等. 基于 3DSIFT 特征点的改进 ICP 点云配准算法[J]. *应用激光*, 2023, 43(11): 153–160.
- LIU Xiangyu, WANG Jian, WANG Xiaogai, et al. Point cloud registration algorithm based on the 3DSIFT feature points with improved ICP algorithm[J]. *Applied laser*, 2023, 43(11): 153–160.
- [14] ZAKERI E, XIE Wenfang. Robust AI-driven target-object-free hybrid vision/force control of industrial robotic systems[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems*, 2025, 55(7): 4899–4914.
- [15] 黎秀玉. 基于轨迹跟踪和导纳控制高精度协作机械臂恒力打磨控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- LI Xiuyu. Research on constant force grinding control strategy of high precision cooperative manipulator based on trajectory tracking and admittance control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [16] 张越. 复杂曲面人工磨抛行为的机器人模仿学习方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- ZHANG Yue. Robot imitation learning method for artificial grinding and polishing behavior of complex curved surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [17] XIAO Mubang, DING Ye, FANG Zaojun, et al. Contact force modeling and analysis for robotic tilted-disc polishing of freeform workpieces[J]. *Precision engineering*, 2020, 66: 188–200.
- [18] 刘晓宇, 千登, 王锦鑫, 等. 大型液体火箭喷管冷却通道机器人自动去毛刺系统[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2024(1): 67–71.
- LIU Xiaoyu, QIAN Deng, WANG Jinxin, et al. Large liquid rocket nozzle cooling channel robot automatic deburring system[J]. *Modular machine tool & automatic manufacturing technique*, 2024(1): 67–71.
- [19] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 机器人加工几何误差建模研究: II 参数辨识与姿态优化[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(7): 169–184.
- LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. The research of geometric error modeling of robotic machining: II parameter identification and pose optimization[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2021, 57(7): 169–184.
- [20] 郭万金, 赵伍端, 于苏扬, 等. 无先验模型曲面的机器人打磨主动自适应在线轨迹预测方法[J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2023, 57(8): 1655–1666.
- GUO Wanjin, ZHAO Wuduan, YU Suyang, et al. Active adaptive online trajectory prediction for robotic grinding on surface without prior model[J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2023, 57(8): 1655–1666.
- [21] 张国军. 轻型机械臂打磨控制系统及表面粗糙度测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- ZHANG Guojun. Research on grinding control system of light-weight manipulator and method of measuring surface roughness[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [22] LIAO Zhaoyang, LI Jingrong, XIE Hailong, et al. Region-based toolpath generation for robotic milling of freeform surfaces with stiffness optimization[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2020, 64: 101953.
- [23] LIU Gang, YAO Bitao, XU Wenjun, et al. Optimizing non-diagonal stiffness matrix of compliance control for robotic assembly using deep reinforcement learning[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2402(1): 012013.
- [24] 王健. 基于力位混合控制的机器人曲面打磨研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- WANG Jian. Research on robot surface grinding based on mixed force control[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [25] 姜涛, 毕建民. 基于模糊 RBF 导纳控制的恒力打磨技

- 术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 67-73.
- JIANG Tao, BI Jianmin. Research on constant force grinding technology based on fuzzy RBF admittance control[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (natural science edition)*, 2022, 45(5): 67-73.
- [26] 马腾飞. 基于力位混合控制的铸锻件打磨机器人工艺规划研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- MA Tengfei. Research on process planning of casting and forging grinding robot based on hybrid control of force and position[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [27] 李锦, 戈海龙, 张红瑞, 等. 基于模糊自适应的变导纳柔顺控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(5): 121-124.
- LI Jin, GE Hailong, ZHANG Hongrui, et al. Research on variable admittance compliance control based on fuzzy adaptation[J]. *Modular machine tool & automatic manufacturing technique*, 2025(5): 121-124.
- [28] 田凤杰, 韩晓, 李论. 机器人自动打磨焊缝装备与实验分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(4): 139-142.
- TIAN Fengjie, HAN Xiao, LI Lun. Experiment analysis on robot automatic grinding of welding seam[J]. *Modular machine tool & automatic manufacturing technique*, 2022(4): 139-142.
- [29] 赵涛. 整体叶盘叶片百叶轮高效磨抛表面完整性控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.

ZHAO Tao. Study on surface integrity control of high efficiency grinding with flap wheel for blisk blade[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.

- [30] 肖蒙. 机器人打磨加工过程中恒力控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

XIAO Meng. Research on constant force control methods in robot grinding process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

#### 作者简介:



万里红, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为人工智能、机器人、跨模态学习, 发表学术论文 20 篇。E-mail: [lhwan917@163.com](mailto:lhwan917@163.com)。



林杰, 总经理, 硕士, 主要研究方向为人工智能、机器人。E-mail: [linjie@odrobots.com](mailto:linjie@odrobots.com)。



蒋远东, 机器人部门经理, 硕士, 主要研究方向为人工智能、机器人运动控制。E-mail: [jyd\\_wy@163.com](mailto:jyd_wy@163.com)。