

基于模板 CAD 模型的任意位姿注塑件 抛光轨迹生成与重用方法研究

陈乾宝, 吴雷, 林俊义*, 江开勇, 黄常标

(华侨大学 a.厦门市数字化视觉测量重点实验室 b.福建省特种能场制造重点实验室,
福建 厦门 361021)

摘要: **目的** 提高注塑零件机器人抛光轨迹的生成效率和柔性。**方法** 以注塑件毛边抛光为对象, 首先根据已知的模板 CAD 模型信息建立局部坐标系, 并提取抛光特征线及抛光区域, 通过等距截面法计算生成一系列加工轨迹点。为了提高抛光轨迹的生成效率, 提出根据模型特征直接计算同类产品加工轨迹的方法, 实现相似模型产品抛光轨迹的重用。然后, 利用多线结构光技术快速测量当前位姿下的零件三维信息, 通过三维点云匹配方法计算出任意当前位姿下的零件模型与模板 CAD 模型之间的转换关系。最后, 结合手眼标定结果, 计算出任意位姿零件的机器人抛光轨迹。**结果** 以注塑件毛边抛光为例, 进行模拟仿真和实验验证, 结果表明, 文中提出的方法只需单次测量即可计算出待加工零件的抛光轨迹, 避免了在线完整物体的重构, 使得物体测量和轨迹计算效率得到显著提高。此外, 通过点云匹配与手眼标定方法, 可完成任意位姿零件抛光轨迹的计算。**结论** 文中提出的方法能够实现基于 CAD 模型的机器人抛光轨迹高效生成和重用, 通过轨迹转换可实现任意位姿的轨迹计算, 提高了机器人抛光轨迹生成的效率和柔性。

关键词: 机器人抛光轨迹; 轨迹生成; 轨迹重用; 任意位姿; 坐标转换

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0065-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.007

Method of Generating and Reusing Polishing Trajectory for Injection Molding Parts with Arbitrary Position Based on Template CAD Model

CHEN Qianbao, WU Lei, LIN Junyi*, JIANG Kaiyong, HUANG Changbiao

(a. Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, b. Fujian Provincial Key Laboratory of Special Energy
Manufacturing, Huaqiao University, Fujian Xiamen 361021, China)

ABSTRACT: With the development of intelligent manufacturing technology, the application of robots in the field of processing has been widely concerned, especially in labor-intensive product processing applications, such as shower parts polishing in the

收稿日期: 2023-10-14; 修订日期: 2024-01-08

Received: 2023-10-14; Revised: 2024-01-08

基金项目: 厦门市自然科学基金 (3502Z20227201); 福建省引导性项目 (2017H0019); 福建省产学研项目 (2023H6015)

Fund: Natural Science Foundation of Xiamen, China (502Z20227201); Industrial Leading Program of Fujian Province, China (2017H0019); Industry-University Cooperation Plan of Fujian Province, China (2023H6015)

引文格式: 陈乾宝, 吴雷, 林俊义, 等. 基于模板 CAD 模型的任意位姿注塑件抛光轨迹生成与重用方法研究[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 65-74.

CHEN Qianbao, WU Lei, LIN Junyi, et al. Method of Generating and Reusing Polishing Trajectory for Injection Molding Parts with Arbitrary Position Based on Template CAD Model[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 65-74.

*通信作者 (Corresponding author)

bathroom industry, laser cutting of stamping parts in the automotive field and raw edge polishing of injection parts in the field of shoes and clothing. However, the development trend of small batch and multi variety products has put forward higher requirements for the processing efficiency and flexibility of robots. To this end, the work aims propose a CAD model-based method for generating and reusing polishing trajectory of parts with arbitrary position and posture.

Based on the known template CAD model information, the local coordinate system was established, the polishing feature lines and polishing regions were extracted, and a series of machining trajectory points were generated by equidistant section method. Further, in order to improve the generation efficiency of polishing trajectory, a method was proposed to directly calculate the processing trajectory of similar products according to the characteristics of the model, so as to realize the reuse of polishing trajectory of similar models. Then, multi-line structured light technology was used to quickly measure the 3D information of the part under the current posture, and the transformation relationship between the part model and the template CAD model was calculated by the 3D point cloud matching method. Finally, combined with the hand-eye calibration results, the robot polishing trajectory of parts with arbitrary position and posture could be calculated.

The raw edge polishing of injection molding products was taken as the object of simulation and experimental verification. First of all, the simulation results showed that the robot could move to the correct polishing position by the arbitrary posture polishing trajectory generated by this method. In addition, the experimental results of the built hardware system showed that the proposed method could effectively transform the trajectory of the ideal robot posture to any part posture, which provided a good basis for further processing. The advantages of the proposed method lie in the following three points. First, usually a complete model reconstruction needs to be measured from at least 3-4 different views and data from different views need to be unified in coordinate system, which cannot be applied to online real-time measurement. However, the method proposed only needs to be measured from one view, enables significant improvements in the efficiency of object measurements and trajectory calculations. Further, it is very difficult and time-consuming to calculate polishing trajectory directly based on measuring point cloud. To tackle this issue, the CAD model is adopted to generate the machining trajectory in advance and then only a single view measurement data are need to align with the CAD model, which can complete the transformation of the trajectory effectively. In addition, combined with the hand-eye calibration results of the robot, the polishing trajectory of the parts with arbitrary position and posture can be quickly calculated.

The proposed method can realize the efficient generation of robot polishing trajectory based on CAD model, and can realize the trajectory calculation of arbitrary position and posture through trajectory transformation, which improves the efficiency and flexibility of robot polishing trajectory generation.

KEY WORDS: robot polishing trajectory; trajectory generation; trajectory reuse; arbitrary position and posture; coordinate transformation

机器人具有灵活性好、工作空间大、成本较低等优势,不仅在智能抓取、产品装配等行业中得到广泛应用,在加工领域也具有巨大的潜力^[1],如机器人在抛磨加工中的应用日趋成熟^[2-3]。对于小批量、多品种零件的定制化加工,机器人更是表现出灵活性好、成本低等优势^[4]。随着视觉测量技术的发展,如何结合视觉传感技术将机器人应用于加工领域,解决高端制造业的痛点问题,是机器人加工技术亟须研究的难题^[5]。近年来,基于视觉引导的工业机器人柔性加工方法得到快速发展^[6],同时随着机器人技术的成熟,机器人磨抛具有越来越广阔的发展前景^[7]。利用视觉引导技术可在很大程度上改善机器人自身、视觉系统及外部环境的不确定性,使零件定位与加工精度得到极大提高,进一步扩展了机器人在加工领域中的应用。

零件加工轨迹生成与坐标转换是实现机器人加

工的关键技术。加工轨迹的生成效率决定了机器人的加工效率及在线加工的可行性,轨迹坐标转换是实现机器人加工的基础。目前,轨迹生成主要有 3 种方法:示教再现方法、离线编程方法、视觉引导方法。其中,基于示教再现的方法在大批量产品制造中具有明显优势,但对于小批量、多品种、短周期的生产需求则显得柔性不足。基于 CAD 模型的离线编程方法,节省了示教时间,已有较多成熟的商用软件,如: Robot Studios、Robot master 等,但这些软件存在成本昂贵、兼容性差及无法进行二次开发等缺点^[8-10]。此外, CAD 模型与物体实际尺寸不完全符合,同一批次零件的几何形状也存在差异,导致示教或预生成的轨迹无法直接用于同批次的所有产品上。利用视觉引导技术可对加工轨迹进行实时纠正,结合视觉引导的机器人加工方法得到研究者的重视。如, Park 等^[11]利用视

觉测量方法对物体表面进行三维重建, 以此生成磨削路径, 并应用于轮船和飞机螺旋桨的磨削加工中, 验证了刀具路径生成的有效性。Schmidt 等^[12]将单目相机固定于机器人末端, 采用“眼在手上”的方式, 结合工件表面的标记实现工件智能抓取的精确定位, 为机器人加工提供了基础。陈影等^[13]采用点云切片法得到熔覆路径上的点集, 根据点集拟合出加工点的曲线, 从而计算末端运动轨迹, 提高了视觉引导熔覆加工的可行性和鲁棒性。刘金朵等^[14]利用零件的 STL 三角网格模型计算轨迹线段, 采用搜索插补点算法得到最终轨迹路径点, 实现了激光熔覆轨迹的快速、自动生成方法。赵耀耀等^[15]利用曲面三维模型与 UG 后处理功能, 生成了原始轨迹点, 采用积累弦长参数化法和三次 B 样条插值法获得了较均匀的轨迹点, 将磁粒研磨与机械臂结合进行曲面的光整加工, 可有效提高工件的表面质量。其中, 基于点云扫描的测量技术在目标定位上具有显著优势, 因此基于点云的轨迹生成方法成为目前测量加工一体化的主流方法^[16]。如, 王鑫龙等^[17]通过三维扫描获得了物体表面的点云信息, 以此进行曲面重构, 并利用三维模型提出一种基于切平面的路径生成方法。Masood 等^[18]提出, 利用点云数据生成数控加工路径, 然后通过刀具偏置将刀触点路径转换为机器人加工路径。张铁等^[19]提出, 利用点云拟合光滑曲线, 生成机器人加工轨迹, 通过三角拓扑关系考虑机器人的加工姿态, 并完成机器人的运动仿真验证。刘丽等^[20]提出, 基于 CAD 模型信息进行布点, 结合法向精度控制, 实现了机器人 TCP 轨迹的准确测量。Kuss 等^[21]利用 CAD 模型信息生成轨迹, 再利用点对匹配和对对应点距离调整由形状差异引起的加工轨迹偏差。目前, 此类方法往往需要对待加工零件进行全面测量, 零件的完整测量与重构非常耗时, 无法满足机器人在线加工的要求。

上述方法生成的轨迹都基于点云或 CAD 模型坐标系, 需要进一步转换到机器人基坐标系下才能应用于加工。此转换关系主要包括 2 个方面: 手眼关系、点云匹配关系。机器人手眼关系标定方法已较成熟, 由于不是本文的研究重点, 因此这里不再累述。将测量点云与工件原有的 CAD 模型进行匹配, 可以快速实现对工件的识别和定位^[22], 即获得零件实际位姿与理想 CAD 模型位姿之间的转换关系。目前, 点云匹配应用最广泛的为迭代邻近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法^[23], 为了提高 ICP 算法的收敛速度和配准精度, 国内外学者对原始 ICP 算法进行了不断的改进和优化。如, Yang 等^[24]结合分支定界 (Branch and Bound, BNB) 和 ICP 算法对转换矩阵实现了全局优化, 但采用的是全部点云, 速度较慢。为此, Combes 等^[25]提出一种新的三维点集非线性成对配准方法, 首先将第 1 组点视为高斯混合模型的图, 将该模型的中心视为第 2 组点的位移点, 然后使用期望-

最大化 (Expectations Maximize, EM) 算法对该模型的参数 (包括未知变换) 进行最大后验概率估计, 从而提高了匹配速度。此外, ICP 算法需要良好的初始值。为此, Magnusson 等^[26]将正态分布变换 (Normal Distribution Transformation, NDT) 算法用于 3D 点云配准中, 该方法的优点是无需寻找对应的点, 只需用 1 组高斯分布来描述点云, 因此大大加快了点云配准的速度。范强等^[27]针对未进行点云初始变换估计的情况, 传统 3D-NDT 算法和 ICP 算法存在配准效果差、时间长、误差大等缺点, 利用 Harris 算法提取特征点, 计算特征点的快速点对特征直方图 (Fast Point Feature Histogram, FPFH) 描述子, 结合最小中值法删除误匹配点, 提高了点云配准的速度和精度。

综上所述, 针对机器人加工轨迹生成的效率与柔性问题, 文中提出基于模板 CAD 模型的任意位姿毛边抛光轨迹生成与重用方法。该方法利用模板 CAD 模型信息生成加工轨迹, 利用多线激光在线测量技术获得物体表面三维点云, 通过点云匹配与手眼转换关系任意位姿的轨迹转换, 大大缩短了加工轨迹在线生成时间; 利用测量点云与模板 CAD 模型点云的相似特征, 实现相似模型的轨迹重用, 解决实际物体之间, 以及物体与模板 CAD 模型之间存在差异导致轨迹误差的问题, 以期提高机器人加工的效率 and 柔性。

1 整体方案

在机器人自动抛光过程中, 每次机器人末端夹持的零件位姿都存在差异, 而且工业生产中存在大量相似零件的加工, 采用示教编程、离线编程的方法已无法适应要求。通过在线多次测量、实时构建 CAD 模型与基于 CAD 模型重新生成轨迹会非常耗时, 不满足机器人在线加工的要求。由此, 提出基于模板 CAD 模型与轨迹转换相结合的方法, 该方法首先根据零件的模板 CAD 模型, 预先生成加工轨迹; 对于相似模型, 利用相似特征实现轨迹的重用; 利用机器人在线测量与点云匹配方法实现轨迹的快速转换。整体方案: 首先在机器人加工模拟器中导入模板 CAD 模型, 建立模板 CAD 模型坐标系, 并计算点云的法向量, 基于法向估计值提取特征边缘, 依据边缘信息确定零件的抛光区域, 并利用等距截面法提取抛光轨迹线, 并生成抛光轨迹点。利用机器人在线激光测量系统对待加工零件进行测量, 获得局部点云数据, 并根据零件特征相似性生成重用轨迹。利用局部点云与模板 CAD 模型进行匹配, 计算当前位姿零件与模板 CAD 模型的转换关系, 实现轨迹转换, 即将轨迹点转换为机器人可执行的加工路径点, 从而实现机器人抛光轨迹高效生成与任意位姿的灵活加工。具体方案流程如图 1 所示。

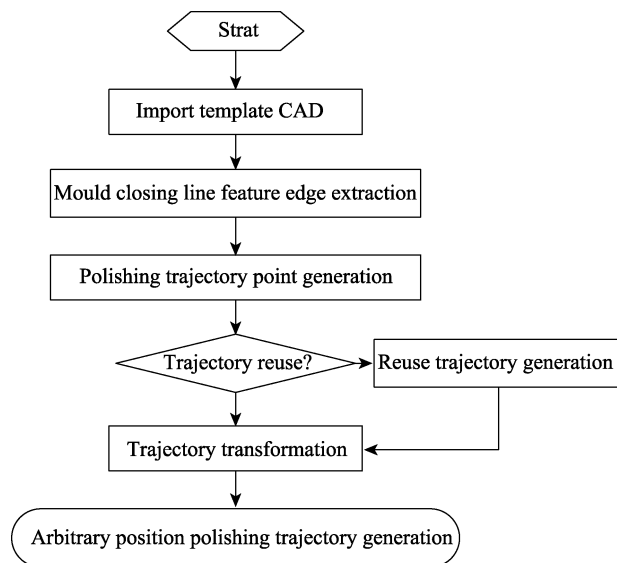


图1 整体方案流程
Fig.1 Flow chart of overall scheme

2 轨迹生成与重用方法

2.1 合模线特征边缘提取

注塑模具一般由2个半边模具组成,在注塑压力作用下,塑料会渗入模具的接合部位,从而形成合模线,即注塑件的毛边。在后续处理中,必须将毛边加工去除。根据注塑成形原理,合模线应位于最大平面处,因此可以基于离散的模板CAD模型信息进行合模线特征边缘的提取。具体步骤:建立模板CAD模型的坐标系;利用点云参数化模型投影的方法建立投影平面,并将模板CAD模型的点云数据投影到平面上;基于法线估计的合模线特征边缘提取。

2.1.1 建立模板CAD模型坐标系

以模板CAD模型为设计模型,建立零件模板CAD模型时都需要独立的模型坐标系。为了合模线提取的方便,需要根据零件的形状建立合理提取合模线的坐标系。以花洒手柄注塑件为例,其主体为2个不同方向的空心圆柱体(或圆锥体)相贯而成。如图2所示,若机器人夹持零件后,则合模线为水平圆柱体与水平面的最大截面线。有别于模板CAD模型建模坐标系,需要重新建立合模线特征边缘提取坐标系。

以竖直圆柱底面的中心位置为花洒模板CAD模型点云的坐标系原点,其轴线方向为坐标系的 z 轴方向,以水平圆柱的轴线方向为坐标系的 y 轴方向,最后以右手准则定出坐标系的 x 轴方向,建立模板CAD模型点云的坐标系,如图2中 $O_m x_m y_m z_m$ 所示。其中, m 表示模型坐标系。机器人基坐标系和末端坐标系分别如图2中 $O_w x_w y_w z_w$ 、 $O_e x_e y_e z_e$ 所示,其中 w 表示机器人坐标系,也为世界坐标系, e 表示机器人末端坐标系。

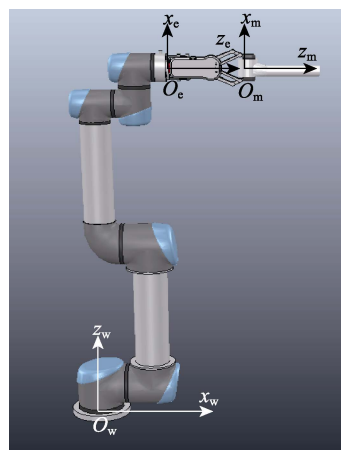


图2 模板CAD模型点云的坐标系
Fig.2 Coordinate system of template CAD model point cloud

2.1.2 建立投影平面及点云投影

为了后续任意位姿的轨迹计算,需要先将设计的模板CAD模型转换为三维CAD点云模型。三维点云模型仅包含一些离散的空间数据点,并且不包含其内在的拓扑信息,不易直接进行采样和边缘提取。为了便于提取特征边缘信息,需要将三维点云模型投影到参数化投影模型上,常用的参数化投影模型有平面、球体、柱体等。基于以上花洒手柄模板CAD模型的特点,采用平面参数化投影模型,将合模线特征边缘沿着 z 轴方向进行投影,即可获得所有特征边缘的投影信息。所建立的投影平面应平行于 Oyz 平面,且可让该平面与水平圆柱体的轴线重合。参数化平面模型的表达式见式(1)。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为平面方程的4个参数; (x, y, z) 为空间点坐标。该平面方程可以基于已知的三维模板CAD模型信息求得。

以2个圆柱体相贯而成的花洒手柄为例,假设水平圆柱体的半径为 r_h ,则该平面方程可以表示为式(2)。

$$x - r_h = 0 \quad (2)$$

式中: $a=1, b=0, c=0, d=-r_h$ 。式(2)表示模板CAD模型点云的参数化投影平面,可将模板CAD模型上所有的点云投影至该平面。

2.1.3 投影点云边缘提取

将模板CAD模型点云全部投影到合模线特征边缘所在平面,根据模型的几何特性,特征边缘应为投影点云的边界点。参考文献[28-29],这里提出基于法线估计方法提取投影点云的边界。每个点的法线估计方法:首先采用 k 近邻搜索算法查找每个查询点 P_k 的 n 个近邻点 $N_i (i=0, 1, \dots, n-1)$,然后将这些近邻点与当前点组成局部平面点集 $(x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, \dots, n)$,最后估计局部平面的方程,并得出平面的法线。

利用最小二乘法, 拟合估计局部平面, 具体过程如下。

1) 假设一组局部平面点集 $(x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, \dots, n)$ 构成的平面方程, 见式 (3), 则空间任意点到该平面的距离的计算见式 (4)。

$$ax+by+cz=d \quad (d \geq 0), a^2+b^2+c^2=1 \quad (3)$$

$$d_i = |ax+by+cz-d| \quad (4)$$

2) 计算局部平面点集到该平面距离的平方和, 见式 (5)。若需获得最佳拟合平面, 则需要满足各点到平面的误差 e 最小, 因此转化为最小二乘法求解极值问题, 见式 (6)。

$$e = \sum_{i=0}^n d_i^2 \quad (5)$$

$$f = e - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1) \quad (6)$$

3) 对 d 求偏导, 见式 (7)。令 $\frac{\partial f}{\partial d} = 0$, 则有式 (8)。将 d 代入式 (4), 得到式 (9)。

$$\frac{\partial f}{\partial d} = -2 \sum_{i=0}^n (ax_i + by_i + cz_i - d) \quad (7)$$

$$d = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n+1} \cdot a + \frac{\sum_{i=0}^n y_i}{n+1} \cdot b + \frac{\sum_{i=0}^n z_i}{n+1} \cdot c \quad (8)$$

$$d_i = |a(x_i - \bar{x}) + b(y_i - \bar{y}) + c(z_i - \bar{z})| \quad (9)$$

$$\text{式中: } \bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n+1}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^n y_i}{n+1}, \bar{z} = \frac{\sum_{i=0}^n z_i}{n+1}, \text{为均值。}$$

同样对 a 、 b 、 c 求偏导, 得到式 (10)。

$$\frac{\partial f}{\partial a} = 2 \sum_{i=0}^n [a(x_i - \bar{x}) + b(y_i - \bar{y}) + c(z_i - \bar{z})] (x_i - \bar{x}) - 2\lambda a = 0 \quad (10)$$

令 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, $\Delta y_i = y_i - \bar{y}$, $\Delta z_i = z_i - \bar{z}$, 则有式 (11)。

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a} = 2 \sum_{i=0}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i) \Delta x_i - 2\lambda a = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial b} = 2 \sum_{i=0}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i) \Delta y_i - 2\lambda b = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial c} = 2 \sum_{i=0}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i) \Delta z_i - 2\lambda c = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式 (11) 转换为矩阵表达式, 见式 (12)。

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

式中: A 为 $n+1$ 个点的协方差矩阵; $(a, b, c)^T$ 为

该矩阵的一个特征向量, 记为 \mathbf{x} ; λ 为特征值。可将式 (12) 简化为式 (13), 即转化为求解 A 的特征值与特征向量的问题。

$$A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x} \quad (13)$$

4) 由 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, 可得到式 (14)。由式 (13) 可推导出式 (15), 则有式 (16)。由此可见, 最小特征值对应的特征向量即为法向量。

$$(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = 1 \quad (14)$$

$$(A\mathbf{x}, \mathbf{x}) = (\lambda\mathbf{x}, \mathbf{x}) \quad (15)$$

$$\lambda = (A\mathbf{x}, \mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)^2 = e \quad (16)$$

在得到局部拟合平面方程后, 将局部平面点集 $P_i (x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, \dots, n)$ 投影到上述拟合平面, 如图 3 所示^[28]。对于投影后的点集, 需要设置一个角度阈值来判断当前点是否为边界点。在投影平面上, 以当前投影点 P'_i 为起始点, 以 $N'_j (j=0, 1, \dots, n-1)$ 为终点, 定义为 $P'_i N'_j$, 如图 4 所示^[28]。任选其中一个方向 $P'_i N'_{j-1}$, 求其与局部拟合平面法向量的叉积 V , 定义其他向量与 $P'_i N'_{j-1}$ 的夹角为 α_j , 其他向量与 V 的夹角为 β_j 。若 $\beta_j \geq 90^\circ$, 则 $\alpha_j = 360^\circ - \alpha_j$ 。利用快速排序法将 α_j 从小到大排序, 则将相邻向量的夹角 θ 表示为式 (17)。

$$\theta = \begin{cases} 360^\circ - \alpha_j & j=0 \\ \alpha_{j-1} - \alpha_j & j=1, 2, \dots, n-2 \\ \alpha_j & j=n-1 \end{cases} \quad (17)$$

根据式 (17) 计算相邻向量的夹角, 并通过快速排序算法求出相邻向量夹角的最大值, 当最大值大于设置的阈值时, 则认为当前点为边界点。

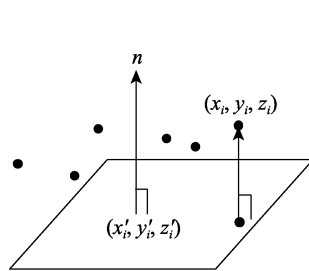


图 3 点集投影
Fig.3 Projection figure of point cloud

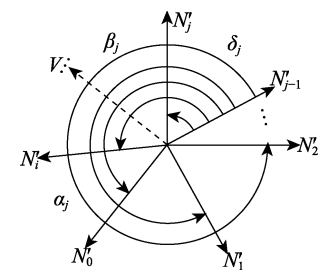


图 4 相邻向量夹角示意图
Fig.4 Angle diagram of adjacent vectors

2.2 抛光轨迹点生成

在实际抛光过程中, 只针对毛边特征边缘周围特定区域进行抛光, 而抛光区域的大小与走刀方式的选择存在很大关系。常用的机器人磨削加工走刀方式有横向磨削和纵向磨削, 如图 5 所示。考虑加工效率与机器人夹取工件进行抛光的可行性, 以横向磨削的方

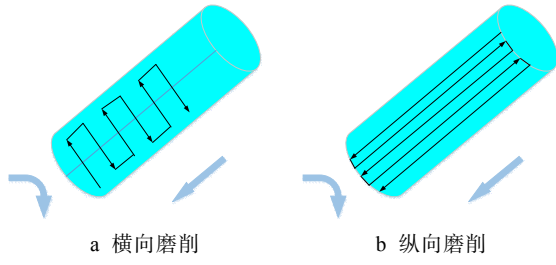


图5 磨削加工的走刀方式

Fig.5 Cutting mode of grinding processing: a) horizontal grinding; b) longitudinal grinding

式计算抛光轨迹,然后根据零件形状及加工要求,对合模线毛边区域进行提取。

在确定抛光加工区域后,需要进一步确定加工行距才能生成抛光轨迹。常用的机器人抛磨加工行距方法有等残留高度法、等距截面法。采用等距截面法计算抛光轨迹,如图6所示。假设加工布轮宽度为 W_b ,以布轮宽度为行距,设定加工行距为 $W_b/3$ 。将一组该间距的截面与抛光区域相交,即可获得截面线。

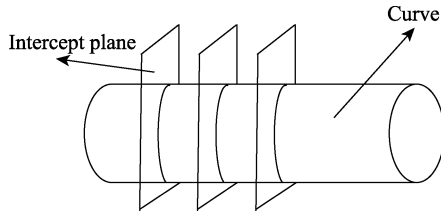


图6 等距截面法

Fig.6 Isometric cross-section method

由于截面线上的点存在噪声,因此利用欧式聚类分割算法^[30]进行截面线分离。具体步骤:对于空间中的点 P ,采用k-d树最近邻搜索算法找到 k 个最近点。将距离小于设定阈值的点聚类到集合 Q 中,如果 Q 中的元素数量不增加,则整个聚类过程结束;否则,必须在集合 Q 中选择 P 以外的点,重复上述过程,直到 Q 中的元素数量不增加为止。

经过欧式聚类分割后,每条截面线上的点分别被保存到不同的集合里。假设其中一个集合中的点集为 $Q_i\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ($n=1, 2, \dots, N$), N 为该集合中点的数量,再利用滑动平均滤波算法对每条截面线上的轨迹点进行平滑,将平滑后的点坐标变为式(18)。

$$\begin{cases} \bar{x}_n = \frac{1}{2a+1} \sum_{i=-a}^{i=a} x_{(n+i)} \\ \bar{y}_n = \frac{1}{2a+1} \sum_{i=-a}^{i=a} y_{(n+i)} \\ \bar{z}_n = \frac{1}{2a+1} \sum_{i=-a}^{i=a} z_{(n+i)} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$ 为平滑后轨迹点的坐标; $2a+1$ 为滑动窗口的大小。至此,可以计算得到各个抛光轨迹点。

2.3 重用轨迹点生成

注塑件都会收缩,导致实际工件与模板CAD模型极相似,但存在微小差异。此外,在实际生产中存在大量相似产品,即产品的形状一样,只是尺寸上存在差异。对于此类相似的产品,重新根据模板CAD模型生成轨迹耗工、耗时,不利于在线机器人加工,因此提出轨迹重用方法。即,利用产品模型之间几何特性相似的特点,对模型进行变换,包括位姿与尺寸的变换,然后通过此类变换,将已有的轨迹应用于新产品,可提高加工轨迹的生成效率和精度。以花洒手柄为例,可将花洒手柄看作由2个圆柱体相贯而成,为此可以借助圆柱体的几何特征进行变换。首先,获得重用模型的水平方向圆柱体的轴心和轴线,使其与原模型水平方向的圆柱保持同轴,实现轴线与端面对齐。然后,任取平行于花洒手柄模型坐标系 Oxz 平面的一个截面,假设原模型水平方向的圆柱半径为 R_{origin} 、长度为 L_{origin} ,重用模型水平方向的圆柱半径为 R_{reuse} 、长度为 L_{reuse} ,如图7所示,则原模型的 x 、 z 轴坐标 (x_{reuse}, z_{reuse}) 和重用模型的 x 、 z 轴坐标 (x_{reuse}, z_{reuse}) 存在如下关系,见式(19)。

$$\frac{x_{reuse} - 0}{x_{origin} - 0} = \frac{z_{reuse} - R_{origin}}{z_{origin} - R_{origin}} = \frac{R_{reuse}}{R_{origin}} \quad (19)$$

原模型和重用模型的 y 坐标可以通过手柄的长度比例来计算,见式(20)。

$$\frac{y_{reuse}}{y_{origin}} = \frac{L_{reuse}}{L_{origin}} \quad (20)$$

这里只对尺寸变换进行计算,位姿转换原理同2.4节,不再累述,因此重用轨迹点转换见式(21)。

$$\begin{cases} x_{reuse} = x_{origin} \cdot \frac{R_{reuse}}{R_{origin}} \\ y_{reuse} = y_{origin} \cdot \frac{L_{reuse}}{L_{origin}} \\ z_{reuse} = (z_{origin} - R_{origin}) \cdot \frac{R_{reuse}}{R_{origin}} + R_{origin} \end{cases} \quad (21)$$

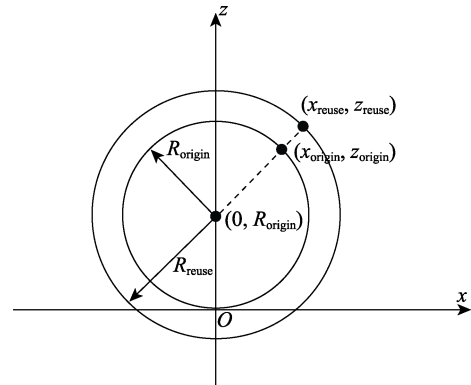


图7 原模型和重用模型的坐标关系

Fig.7 Coordinate relationship between the original model and the reuse model

2.4 轨迹转换

基于模板 CAD 模型点云生成的抛光轨迹和基于重用方法生成的抛光轨迹都在工件坐标系下, 无法直接作为机器人的加工路径点, 需要进一步将轨迹点从工件坐标系转换到机器人基坐标系下, 因此需要建立工件坐标系与机器人基坐标系之间的位姿变换关系, 主要包括机器人基坐标系与机器人末端之间的关系 (H_B^E)、机器人末端与视觉测量系统坐标系之间的关系 (手眼关系 H_E^C), 以及测量点云与模板 CAD 模型之间的转换关系 (H_P^M)。其中, B 表示机器人基坐标系, E 表示机器人末端坐标系, C 表示视觉测量系统, M 表示测量点坐标系, P 表示模板 CAD 模型坐标系。 H_B^E 可以由控制器直接读取, 而手眼关系 H_E^C 的标定采用文献[31]提出的混合标定方法, 因此转换的重点在于建立任意位姿的局部测量点云与模板 CAD 模型之间的转换关系。

利用在线激光测量系统可以快速获取任意位姿的工件表面三维数据, 通过三维数据配准定位方法, 可以得到该转换关系。综合考虑配准的速度和精度问题, 利用 ICP 算法和 NDT 算法各自的优势, 提出基于随机采样一致性 (RANSAC) 与 NDT 融合的点云初始配准算法, 以及 EM-ICP 点云精细配准方法。具体步骤如下。

- 1) 对测量点云与模板 CAD 模型点云进行体素滤波, 获得降采样后密度相似的 2 组点集。
- 2) 分别计算 2 组点集的快速点对特征直方图 (FPFH)。
- 3) 引入采样一致性算法, 基于 FPFH 特征查找匹配点对, 再利用这些匹配点对 2 组点云的初始变换进行估计。
- 4) 以这一变换结果作为 NDT 算法的输入, 从而减小 2 组点云之间旋转矩阵和平移向量的误差。
- 5) 利用 k-d 树近邻搜索算法加快搜寻匹配点对, 并通过方向向量阈值法剔除错误的匹配点对。
- 6) 基于 EM-ICP 算法进行精确配准。

通过上述三维点云数据的配准, 可以获得任意位姿下的工件测量数据与模板 CAD 模型之间的转换关系 H_P^M 。由于测量数据基于视觉测量系统坐标系, 即 $H_P^M = H_P^C$, 因此将基于模板 CAD 模型生成的轨迹转换到视觉测量坐标系下的矩阵 $[H_P^C]^{-1}$ 。

综上所述, 将模板 CAD 模型轨迹直接转换至正确加工位姿的转换关系 T , 可用式 (22) 表示。

$$T = H_B^E H_E^C [H_P^C]^{-1} = H_B^E H_E^C H_P^M = H_B^P \quad (22)$$

3 实验与结果分析

3.1 基于 CoppeliaSim 的机器人运动仿真

对 UR5 机器人、外部视觉系统、抛光机等设备

进行建模, 搭建基于 CoppeliaSim 的仿真环境, 如图 8 所示。其中, 机器人、视觉系统、抛光机位置均可由标定结果预先设定。将模板 CAD 模型置于视觉系统的测量视场范围中, 如图 8 中 B 位置, 计算模板 CAD 模型的机器人运行轨迹包括从 B 点到抛光起始点 C, 以及上述抛光轨迹。利用 IKgroup 模块自动计算仿真体之间的逆解, 并且实现自动跟随。利用 CoppeliaSim 的监控模块将抛光过程用小窗口动态显示出来, 监视工件和抛光机是否会发生碰撞干涉。

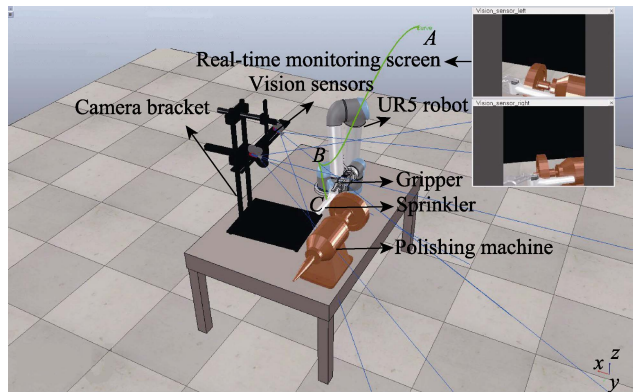


图 8 抛光轨迹仿真实验结果
Fig.8 Simulation results of polishing trajectory

仿真运动过程: 以随机位姿抓取工件, 并从 A 点开始运动到 B 点, 在 B 点利用多线测量系统对工件进行在线测量, 并按文中所述方法计算获得测量点云与模板 CAD 模型之间的转换关系, 从而获得实际零件位姿的运行轨迹。即, 从 B 点到抛光起始点 C 及等距抛光轨迹, 并对抛光过程进行仿真, 通过实时画面监控加工过程。

在仿真中, 以不同零件位姿从 A 点开始运行, 其中一个位姿仿真示意图如图 8 所示。结果显示, 在抛光起始点 C, 工件可以进入正确的加工位姿。利用上述生成的轨迹运行, 截取部分运行过程并放大, 如图 9 所示。图 9a 表示开始抛光状态, 图 9b、c 表示中间抛光状态, 图 9d 表示抛光末尾状态, 可以看出, 在整个加工过程中, 零件始终处于正确的加工位姿状态。由此可见, 利用文中所提的方法可以使机器人快速、准确地按照生成的抛光轨迹运行, 验证了此方法的可行性和有效性。

3.2 机器人实际抛光实验验证

搭建实验平台, 其中硬件系统包括多线激光视觉测量系统、UR5 机器人、SISL-250 小型抛光机及台式计算机等, 如图 10 所示。文中以 Visual Studio 2013 为开发平台, 基于 C++ 开发语言进行视觉测量、轨迹生成、轨迹转换等软件功能开发, 基于 Matlab 2016a 进行机器人部分编程。

按照上述理论, 首先建立模板 CAD 模型的坐标系及投影平面, 根据投影边界点判定规则, 提取的特

征边缘线如图 11 所示。由图 11 可以看出, 投影边界点包含竖直圆柱体侧面和右端面, 而在实际抛光过程中不涉及这 2 处毛边, 因此根据几何参数可以对 2 处的边界点进行处理, 结果如图 12 所示。

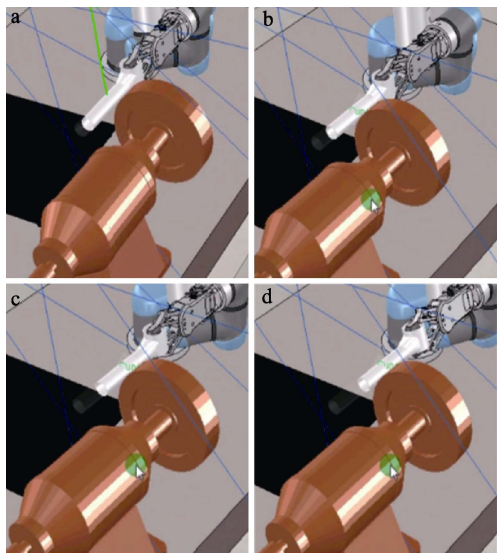


图 9 仿真抛光过程局部放大
Fig.9 Local magnification of simulated polishing process

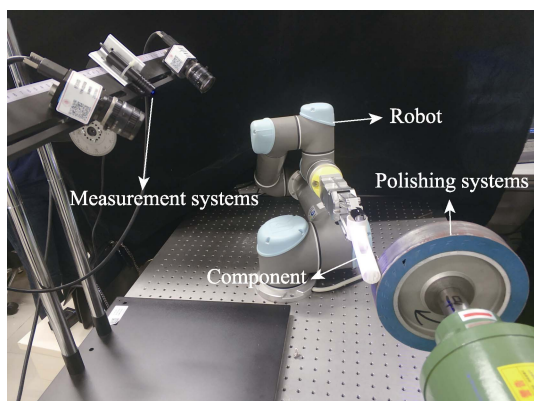


图 10 抛光实验平台
Fig.10 Polishing experimental platform

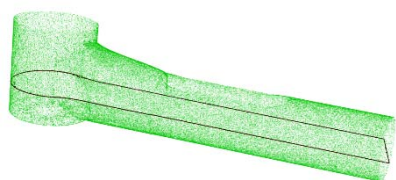


图 11 特征边缘提取结果
Fig.11 Feature edge extraction results

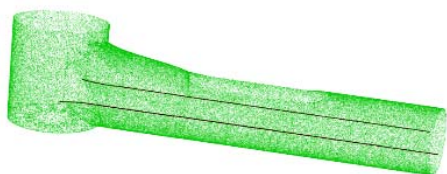


图 12 处理后的特征边缘
Fig.12 Processed feature edges

根据抛光要求和磨削方式, 假设抛光区域圆柱体的半径为 r_h , 则设置抛光范围以特征边缘线为基准, 上下各取 $0.25r_h$ 的范围, 所提取抛光区域如图 13 所示。利用等距截面法与聚类分割后得到的轨迹点 (如图 14 所示), 经过滑动平均滤波后得到光滑、均匀的轨迹点, 如图 15 所示。对应同批产品中的相似模型, 利用文中提出的方法进行轨迹重用, 可以快速完成正确的轨迹生成, 如图 16 所示。

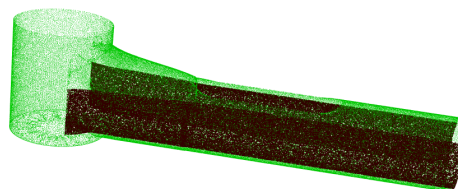


图 13 抛光区域提取结果
Fig.13 Extraction results of polishing area

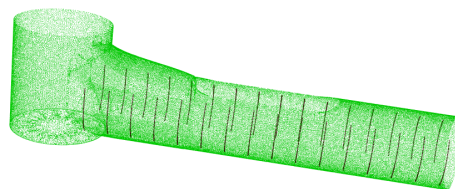


图 14 分割后的轨迹点
Fig.14 Segmented trace points

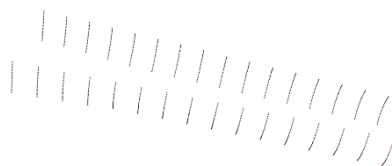


图 15 光顺处理后的轨迹点
Fig.15 Trajectories points after smooth processing



图 16 轨迹重用示例
Fig.16 Trajectories reuse example

为了将任意位姿的工件快速转换到理想的位姿下进行抛光加工, 采用多线激光在线视觉测量系统 (如图 10 所示) 对工件进行在线测量。将测量点云与模板 CAD 模型点云进行配准, 计算当前位姿与理想位姿之间的转换关系。将任意位姿轨迹转换到理想位姿下, 某位姿下的在线测量如图 17 所示, 测量点云与模板 CAD 模型点云初始位置如图 18 所示。经过配准定位后的结果如图 19 所示, 可以获得准确的转换关系。结合手眼关系与机器人运动学关系, 即可将基于模板 CAD 模型生成的轨迹转换至机器人基坐标系。

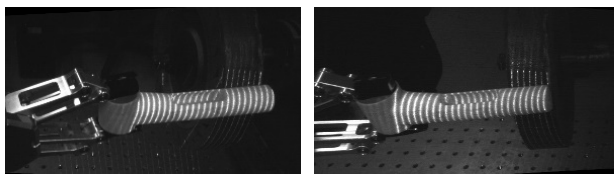


图 17 多线激光在线测量
Fig.17 Multi-line laser online measurement

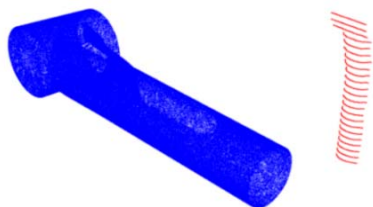


图 18 测量点云与模板 CAD 模型点云的初始位置
Fig.18 Initial position of measurement point cloud and template CAD model point cloud

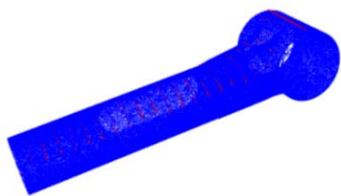


图 19 配准定位后的结果
Fig.19 Result after registration and localization

最后, 对不同位姿的零件进行重复实验, 其中一个位姿的实际轨迹运行结果如图 10 所示。在实际运行过程中, 零件相对于抛光工具的位置表明: 在任意初始位姿情况下, 机器人都能按照上述轨迹运行到正确的轨迹位置。与理想的轨迹相比, 最终的轨迹误差主要包括视觉测量误差、坐标转换误差。实验室自主研发的多线结构光测量系统的测量误差为 0.02 mm, 测量点云与 CAD 模型点云配准的 RMS 值为 0.025 mm。由此可见, 文中提出的轨迹生成方法的精度可达到要求。

相较于传统的视觉引导方法, 文中提出的方法只需单次测量、单次配准, 无需重构 CAD 模型再计算轨迹, 因此抛光轨迹的生成效率得到显著提升。多线结构光测量系统单次测量时间为 0.9 s, 假设零件需要 4 个视角的测量才能重构出完整的零件 CAD 模型, 则传统视觉引导方法需要 3.6 s, 采用文中方法的测量时间仅为 1/4, 配准时间为其 1/3。此外, 文中方法可以解决相似模型的轨迹生成问题。下一步将深入研究机器人受力变形、机器人运动学误差及机器人末端颤动等对加工精度的影响。

4 结论

针对注塑件毛边抛光轨迹生成的效率和柔性问题, 文中以花洒注塑零件毛边抛光为例, 提出了任意

位姿机器人抛光轨迹生成与重用方法。该方法以模板 CAD 模型点云预先生成抛光轨迹, 通过在线视觉测量获得真实位姿的三维数据, 利用点云配准实现任意位姿与理想位姿之间的转换, 结合手眼关系与机器人运动学关系, 实现了抛光轨迹的快速转换, 无需在零件完整测量、配准、重构的基础上生成轨迹, 显著提高了机器人抛光轨迹的生成效率。通过几何特征实现轨迹重用, 有效提高了机器人加工的柔性, 仿真与实际实验均验证了所提方法的有效性与可行性。文中所提方法在机器人自动化加工领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] VERL A, VALENTE A, MELKOTE S, et al. Robots in Machining[J]. CIRP Annals, 2019, 68(2): 799-822.
- [2] 黄婷, 许辉, 樊成, 等. 叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 132-141.
HUANG T, XU H, FAN C, et al. Robotic Grinding Process Planning for Complex Blade Surfaces[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 132-141.
- [3] WANG Q L, WANG W, ZHENG L Y, et al. Force Control-Based Vibration Suppression in Robotic Grinding of Large Thin-Wall Shells[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102031.
- [4] 陶波, 赵兴伟, 李汝鹏, 等. 机器人测量-操作-加工一体化技术研究及其应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 49-56.
TAO B, ZHAO X W, LI R P, et al. Research on Robotic Measurement-Operation-Machining Technology and Its Application[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 49-56.
- [5] 陶波, 赵兴伟, 丁汉. 大型复杂构件机器人移动加工技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1302-1312.
TAO B, ZHAO X W, DING H. Study on Robotic Mobile Machining Techniques for Large Complex Components[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(12): 1302-1312.
- [6] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
WANG T M, TAO Y. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [7] 葛吉民, 邓朝晖, 李尉, 等. 机器人磨抛力柔顺控制研究进展[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2217-2230.
GE J M, DENG Z H, LI W, et al. Research Progresses of Robot Grinding and Polishing Force Compliance Controls[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18): 2217-2230.
- [8] ROSAS-ROMÁN I, OVANDO-VÁZQUEZ C, MORENO-PEDRAZA A, et al. Open LabBot and RmsiGUI: Community Development Kit for Sampling Automation and Ambient Imaging[J]. Microchemical Journal, 2020,

- 152: 104343.
- [9] HE S S, YAN C Y, DENG Y C, et al. A Tolerance Constrained G^2 Continuous Path Smoothing and Interpolation Method for Industrial SCARA Robots[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63: 101907.
- [10] ÇAKIR M, HEKIMOĞLU B, DENİZ C. Path Planning for Industrial Robot Milling Applications[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 158: 27-36.
- [11] PARK J W, CHO H U, CHUNG C W, et al. Modeling and Grinding Large Sculptured Surface by Robotic Digitization[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(7): 2087-2091.
- [12] SCHMIDT B, WANG L H. Automatic Work Objects Calibration via a Global-Local Camera System[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(6): 678-683.
- [13] 陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0502001.
CHEN Y, SUN W L, HUANG Y, et al. Robot Path Planning of Laser Cladding and Remanufacturing of Curved Surface Parts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0502001.
- [14] 刘金朵, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件激光熔覆轨迹的快速算法与自动生成[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 223-228.
LIU J D, SUN W L, HUANG Y, et al. Fast Algorithm and Auto Generation for Laser Cladding Trajectory on Curved Surface Parts[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(9): 223-228.
- [15] 赵耀耀, 陈松, 李昌龙, 等. 基于多轴刀路轨迹的自由曲面磁粒研磨试验[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 319-328.
ZHAO Y Y, CHEN S, LI C L, et al. Test on Magnetic Abrasive Finishing of Free-Form Surface Based on Multi-Axis Tool Path Trajectory[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 319-328.
- [16] SARBOLANDI H, LEFLOCH D, KOLB A. Kinect Range Sensing: Structured-Light Versus Time-of-Flight Kinect[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2015, 139: 1-20.
- [17] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于逆向工程的激光熔覆再制造路径规划[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051401.
WANG X L, SUN W L, ZHANG J J, et al. Path Planning of Laser Cladding and Remanufacturing Based on Reverse Engineering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051401.
- [18] MASOOD A, SIDDIQUI R, PINTO M, et al. Tool Path Generation, for Complex Surface Machining, Using Point Cloud Data[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 26: 397-402.
- [19] 张铁, 张美辉, 邹焱飏. 基于三维点云的机器人加工轨迹规划[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0502009.
ZHANG T, ZHANG M H, ZOU Y B. Path Planning of Robot Processing Based on Three-Dimensional Point Cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0502009.
- [20] 刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 三维形貌测量机器人的轨迹规划技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204005.
LIU L, MA G Q, GAO Y, et al. Trajectory Planning Technology of Three-Dimensional Shape Measurement Robots[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204005.
- [21] KUSS A, DRUST M, VERL A. Detection of Workpiece Shape Deviations for Tool Path Adaptation in Robotic Deburring Systems[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 57: 545-550.
- [22] LI W L, XIE H, ZHANG G, et al. 3-D Shape Matching of a Blade Surface in Robotic Grinding Applications[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(5): 2294-2306.
- [23] BESL P J, MCKAY N D. Method for Registration of 3-D Shapes[C]// *Proc SPIE 1611, Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, 1992, 1611: 586-606.
- [24] YANG J L, LI H D, CAMPBELL D, et al. Go-ICP: A Globally Optimal Solution to 3D ICP Point-Set Registration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(11): 2241-2254.
- [25] COMBÈS B, PRIMA S. An Efficient EM-ICP Algorithm for Non-Linear Registration of Large 3D Point Sets[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2020, 191: 102854.
- [26] MAGNUSSON M, LILIENTHAL A, DUCKETT T. Scan Registration for Autonomous Mining Vehicles Using 3D-NDT: Research Articles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(10): 803-827.
- [27] 范强, 刘鹏, 杨俊, 等. 基于 3D-Harris 与 FPFH 改进的 3D-NDT 配准算法[J]. *图形学报*, 2020, 41(4): 567-575.
FAN Q, LIU P, YANG J, et al. Improved 3D-NDT Point Cloud Registration Algorithm Based on 3D-Harris and FPFH[J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(4): 567-575.
- [28] 孙殿柱, 范志先, 李延瑞. 散乱数据点云边界特征自动提取算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(8): 82-84.
SUN D Z, FAN Z X, LI Y R. Automatic Extraction of Boundary Characteristic from Scatter Data[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2008, 36(8): 82-84.
- [29] 李帅, 杜玉红. 基于改进 3RDP 算法的法线估计散乱点云轮廓提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(16): 1610016.
LI S, DU Y H. Boundary Extraction of Scattered Point Cloud with Normal Estimation Based on Improved 3RDP Algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(16): 1610016.
- [30] 陈向阳, 杨洋, 向云飞. 欧氏聚类算法支持下的点云数据分割[J]. *测绘通报*, 2017(11): 27-31.
CHEN X Y, YANG Y, XIANG Y F. Measurement of Point Cloud Data Segmentation Based on Euclidean Clustering Algorithm[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(11): 27-31.
- [31] 林俊义, 林群鸿, 张雪枫, 等. 消除机械臂累积误差的手眼标定方法: 中国, 113787522B[P]. 2022-08-26.
LIN J Y, LIN Q H, ZHANG X F, et al. Hand-Eye Calibration Method for Eliminating Accumulated Errors of Mechanical Arm: China, 113787522B[P]. 2022-08-26.