DOI: 10.3901/JME.2021.07.169

机器人加工几何误差建模研究：II 参数辨识与位姿优化*

李文龙 谢 核 尹周平 丁 汉

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要：根据所构建的空间运动链，机器人加工几何误差一方面与手眼/工件/工具位姿参数辨识误差有关，另一方面与机器人关节运动学误差与弱刚度变形有关。针对这一问题，研究基于运动学误差补偿的手眼位姿参数辨识、考虑测量缺陷影响的工件位姿参数辨识、基于实际加工曲面误差估计的工具位姿参数辨识等新方法，解决位姿参数辨识精度受限于机器人运动精度、现场测点不封闭/密度不均/高斯噪声、加工抖动/受力变形/回转轴误差等多种因素影响的问题；综合考虑关节运动学误差、弱刚度变形、误差补偿，以整体误差控制为目标，建立加工误差补偿与机器人位姿优化通用模型，可推广应用于法向深度(磨削/铣削)、切向滑移(制孔)、角度倾斜(切边)等多种机器人加工误差控制；完成手眼/工件/工具位姿参数辨识试验、整体误差补偿与机器人加工试验，验证所提方法的有效性。

关键词：机器人加工；位姿参数辨识；整体误差控制；机器人位姿优化

中图分类号：TH161

The Research of Geometric Error Modeling of Robotic Machining: II Parameter Identification and Pose Optimization

LI Wenlong XIE He YIN Zhouping DING Han

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: According to the built spatial motion chain, the geometric error of robotic machining is not only related to the pose parameter identification errors of hand-eye/workpiece/tool, but the joint kinematic error and weak stiffness deformation of robot. This paper investigates the new methods of hand-eye pose parameter identification considering the joint kinematic error, the workpiece pose parameter identification considering the onsite measuring defects and the tool pose parameter identification based on the error evaluation of practical machined surface, and deals with the problem that the pose parameter identification accuracy is limited by various factors such as robot motion accuracy, unclosed/uneven/noisy measured points and machined jitter/stress deformation/rotation error. Then consider the joint kinematics error, weak rigidity deformation and error compensation, a general model of machining error compensation and robotic pose optimization is built, and can be applied to kinds of machining error control such as normal depth(grinding/milling), tangential slip(drilling) and angle incline (trimming). Finally, the experiments of hand-eye/workpiece/tool pose parameter identification, overall error compensation and robotic machining are carried out to verify the effectiveness of the proposed methods.

Key words: robotic machining; pose parameter identification; overall error control; robotic pose optimization

0 前言

第 I 部分研究了视觉引导的工件型机器人加工系统的空间运动链，该链由三条从运动单元出发的开环子链组成，得出影响机器人加工误差的几何因素包括

运动学误差 Δq 、关节刚度 k 、手眼位姿误差 ${}^S D$ 、工件位姿误差 ${}^W D$ 与工具位姿误差 ${}^T D$ 。系统位姿包括机器人位姿、手眼位姿、工件位姿、工具位姿，位姿之间通过运动链的实时约束保证加工过程的顺利进行，位姿误差通过运动链的传递引起加工误差。机器人位姿误差主要受关节运动学误差与关节刚度影响，手眼/工件/工具位姿误差通过空间运动链传递使得实际加工点与理论加工点之间产生位姿误差(引起加工误差)，同时手眼/工件位姿误差又受到关节运动学误差的影响。

* 国家自然科学基金(51535004, 52075203)、湖北省重点研发计划(2020BAA025)和武汉市科技计划(2020010601012173)资助项目。
20200403 收到初稿，20211105 收到修改稿

机械手-视觉传感器位姿参数(即手眼参数)用于重构工件测量点云,是实现工件位姿精确辨识的基础。在手眼参数辨识的现有研究^[1-3]中,通常假定机器人不存在关节误差,而将手眼参数辨识简化为只识别视觉传感器坐标系 $\{S\}$ 到机器人基坐标系 $\{B\}$ 的位姿关系,该过程忽略了机器人关节运动学误差对手眼参数辨识精度的影响,易造成误差累积。现场测量时易出现形状不封闭、密度不均匀、高斯噪声等固有缺陷,在存在测量缺陷的情况下提高点云匹配精度与稳定性是工件位姿参数辨识的难点。目前国内外主流匹配方法是 ICP(点-点距离)匹配^[4]及其改进算法、TDM(点-切面距离)匹配^[5]及其改进算法、ADF(适应性距离)匹配^[6]等均采用距离平方和最小化构建目标函数,存在测点不封闭、密度不均匀、高斯噪声等测量缺陷时匹配易失真,具体表现为设计模型向测量点云密集区域倾斜。常见的工具位姿参数辨识方法是通过外部靶标(顶针、测头、靶球等)获取工具坐标系的多个特征点(如三点),然后利用特征点构造坐标原点与坐标轴。构造法^[7-8]操作过程简单,但存在两大缺点:①特征点数量相对较少以及特征点难以精确定位大大限制了工具位姿参数的辨识精度;②构造法辨识的是工具在静止状态的位姿,而加工时工具会因抖动、受力变形、回转轴误差等产生位姿变化,这些因素在构造法辨识工具参数时并未考虑。

综上为控制加工误差,一方面要精确辨识手眼位姿、工件位姿、工具位姿,另一方面在考虑存在关节运动学误差、关节弱刚度变形的情况下,需要建立面向整体误差控制的机器人加工位姿优化通用模型^[9-14]。为此第 II 部分重点研究手眼/工件/工具参数精确辨识数学建模与计算方法,包括考虑关节运动学误差补偿的手眼参数辨识、考虑测量缺陷影响工件位姿参数辨识、基于加工误差估计的工具位姿参数辨识;研究微调工具/工件坐标系时目标点位姿变化矢量与补偿点位姿误差矢量的几何关系,建立考虑关节误差、关节刚度与误差补偿的机器人加工(磨削/铣削/切边/制孔等)位姿优化通用模型;通过手眼/工件/工具位姿参数辨识试验、整体误差补偿与机器人加工试验对所提方法进行验证。

1 考虑运动学误差补偿的手眼参数辨识

在手眼参数辨识研究中,通常假定机器人不存在位姿误差,将手眼参数辨识简化为只识别基坐标系 $\{B\}$ 到视觉坐标系 $\{S\}$ 的位姿关系,该过程忽略了关节运动学误差对手眼参数辨识精度的影响,而实

际由关节运动学误差引起的位姿误差可达毫米级。本文同时考虑运动学误差与手眼误差,以机器人末端与靶标相对位姿的不变性为约束,提出基于运动学误差补偿的手眼参数辨识方法,解决手眼参数辨识精度受限于机器人运动精度的问题^[11-12]。

根据 D-H 变换,相邻关节的位姿矩阵表示为

$${}^{j-1}T = \text{Rot}(x, \alpha_{j-1}) \text{Trans}(x, a_{j-1}) \text{Rot}(z, \theta_j) \text{Trans}(z, d_j) \\ = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & c\theta_j s\beta_j & a_{j-1} \\ s\theta_j c\alpha_{j-1} & c\theta_j c\alpha_{j-1} & -s\alpha_{j-1} & -d_j s\alpha_{j-1} \\ s\theta_j s\alpha_{j-1} & c\theta_j s\alpha_{j-1} & c\alpha_{j-1} & d_j c\alpha_{j-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,连杆长度 a_{j-1} 、扭角 α_{j-1} 、连杆偏移 d_j 与转角 θ_j 为第 j 个关节的运动学参数,机器人所有关节构成的运动学矢量 $q = [a^T, \alpha^T, d^T, \theta^T]^T$ 。因此 ${}^{j-1}T$ 的误差 $\Delta {}^{j-1}T$ 源于运动学误差 Δa_{j-1} 、 $\Delta \alpha_{j-1}$ 、 Δd_j 与 $\Delta \theta_j$ 。

对式(1)求全微分可得位姿误差矩阵

$$\Delta {}^{j-1}T = \frac{\partial {}^{j-1}T}{\partial a_{j-1}} \Delta a_{j-1} + \frac{\partial {}^{j-1}T}{\partial \alpha_{j-1}} \Delta \alpha_{j-1} + \frac{\partial {}^{j-1}T}{\partial d_j} \Delta d_j + \frac{\partial {}^{j-1}T}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j \quad (2)$$

上式可简化表示为

$$\Delta {}^{j-1}T = {}^{j-1}T^j \Delta = {}^{j-1}T \begin{bmatrix} 0 & -\Delta \theta_j & -\Delta \alpha_{j-1} s\theta_j & \Delta a_{j-1} c\theta_j - \Delta \alpha_{j-1} d_j s\theta_j \\ \Delta \theta_j & 0 & -\Delta \alpha_{j-1} c\theta_j & -\Delta a_{j-1} s\theta_j - \Delta \alpha_{j-1} d_j c\theta_j \\ \Delta \alpha_{j-1} s\theta_j & \Delta \alpha_{j-1} c\theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $s()$ 、 $c()$ 分别表示正弦、余弦算子,微分算子 ${}^j \Delta$ 表示由连杆 j 的运动学误差引起自身的位姿误差,可表示为如下微分算子和的形式

$${}^j \Delta = \Delta_{a_{j-1}} \Delta a_{j-1} + \Delta_{\alpha_{j-1}} \Delta \alpha_{j-1} + \Delta_{d_j} \Delta d_j + \Delta_{\theta_j} \Delta \theta_j \quad (4)$$

$$\Delta_{a_{j-1}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & c\theta_j \\ 0 & 0 & 0 & -s\theta_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \Delta_{\alpha_{j-1}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -s\theta_j & -d_j s\theta_j \\ 0 & 0 & -c\theta_j & -d_j c\theta_j \\ s\theta_j & c\theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \Delta_{d_j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & s\beta_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \Delta_{\theta_j} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当手眼参数 ${}^S_B T$ 存在位姿误差 $\Delta {}^S_B T$ 时, 位姿误差 $\Delta {}^S_B T$ 与微分算子 ${}^B \Delta$ 之间满足关系

$$\Delta {}^S_B T = {}^S_B T ({}^B \Delta) \quad (5)$$

如图 1 所示, 当同时存在关节位姿误差 $\Delta {}^{j-1}_j T$ 与手眼误差 $\Delta {}^S_B T$ 时, 机器人末端坐标系 $\{E\}$ 相对视觉传感器坐标系 $\{S\}$ 的位姿矩阵^[9]

$${}^S_E T + \Delta {}^S_E T = ({}^S_B T + \Delta {}^S_B T) \prod_{j=1}^m ({}^{j-1}_j T + \Delta {}^{j-1}_j T) \quad (6)$$

式中, m 为机器人关节数目, 将上式展开并忽略二阶微分误差项可得

$$\Delta {}^S_E T = {}^S_B T \sum_{j=1}^m ({}^B_j T ({}^j \Delta) {}^j_m T) + {}^S_B T ({}^B \Delta) {}^B_m T \quad (7)$$

将位姿误差 $\Delta {}^S_E T$ 转移到坐标系 $\{S\}$ 下表示, 对应微分算子

$$\begin{aligned} {}^S \Delta &= (\Delta {}^S_E T) {}^S_E T^{-1} = {}^S_B T ({}^B \Delta) {}^B_m T {}^S_E T^{-1} + {}^S_B T \sum_{j=1}^m ({}^B_j T ({}^j \Delta) {}^j_m T) {}^S_E T^{-1} = \\ &= \sum_{j=1}^m ({}^S_j T ({}^j \Delta) {}^j_S T) + {}^S_B T ({}^B \Delta) {}^B_S T = \\ &= \sum_{j=1}^m ({}^S_j T (\Delta a_{j-1} \Delta \alpha_{j-1} + \Delta \alpha_{j-1} \Delta \alpha_{j-1} + \Delta d_j \Delta d_j + \Delta \theta_j \Delta \theta_j) {}^j_S T) + {}^S_B T ({}^B \Delta) {}^B_S T = \\ &= \sum_{j=1}^m (({}^S_j T \Delta a_{j-1} {}^j_S T) \Delta a_{j-1} + ({}^S_j T \Delta \alpha_{j-1} {}^j_S T) \Delta \alpha_{j-1} + ({}^S_j T \Delta d_j {}^j_S T) \Delta d_j + ({}^S_j T \Delta \theta_j {}^j_S T) \Delta \theta_j) + {}^S_B T ({}^B \Delta) {}^B_S T \end{aligned} \quad (8)$$

对上式的微分算子取 $\vee$ 算子符操作

$$\begin{aligned} ({}^S \Delta)^\vee &= \sum_{j=1}^m (({}^S_j T \Delta a_{j-1} {}^j_S T)^\vee \Delta a_{j-1} + ({}^S_j T \Delta \alpha_{j-1} {}^j_S T)^\vee \Delta \alpha_{j-1} + ({}^S_j T \Delta d_j {}^j_S T)^\vee \Delta d_j + ({}^S_j T \Delta \theta_j {}^j_S T)^\vee \Delta \theta_j) + \text{Ad}_V ({}^S_B T)^B D = \\ &= \sum_{j=1}^m (M_{a_{j-1}} \Delta a_{j-1} + M_{\alpha_{j-1}} \Delta \alpha_{j-1} + M_{d_j} \Delta d_j + M_{\theta_{j-1}} \Delta \theta_j) + \text{Ad}_V ({}^S_B T)^B D = \\ &= [M_{a_1} \cdots M_{a_{m-1}}] \Delta a + [M_{\alpha_0} \cdots M_{\alpha_{m-1}}] \Delta \alpha + [M_{d_1} \cdots M_{d_m}] \Delta d + [M_{\theta_1} \cdots M_{\theta_m}] \Delta \theta + \text{Ad}_V ({}^S_B T)^B D = \\ &= [M_a, M_\alpha, M_d, M_\theta] \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta \alpha \\ \Delta d \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \text{Ad}_V ({}^S_B T)^B D = [M_a, M_\alpha, M_d, M_\theta, \text{Ad}_V ({}^S_B T)] \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta \alpha \\ \Delta d \\ \Delta \theta \\ {}^B D \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$G_{6 \times (4m+6)} \Delta q_{(4m+6) \times 1}$$

式中, ${}^B D$ 表示微分算子 ${}^B \Delta$ 对应的微分运动矢量, 即手眼误差, 上式可简写为

$${}^S D = ({}^S \Delta)^\vee = G \Delta q \quad (10)$$

式中, 广义运动学误差 Δq 包含关节运动学误差与手眼误差, 因此上式构建了关节运动学误差/手眼误差与机器人末端位姿误差矢量的线性映射关系。

由方程 ${}^E p = {}^S_E T^{-1} {}^S p$ 得误差补偿后的特征点坐标满足

图 1 机器人关节运动学误差与手眼误差算子

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^E p + \Delta {}^E p \\ 1 \end{bmatrix} &= ({}^S_E T + \Delta {}^S_E T)^{-1} \begin{bmatrix} {}^S p \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \left(\begin{bmatrix} {}^S R & {}^S p_{EO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^S \delta & {}^S d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S R & {}^S p_{EO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} {}^S p \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} {}^S R^T (I + [{}^S \delta]^T) - {}^S R^T (I + [{}^S \delta]^T) \times \\ 0 \\ ({}^S p_{EO} + [{}^S \delta] {}^S p_{EO} + {}^S d) \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S p \\ 1 \end{bmatrix} \approx \\ &= \begin{bmatrix} {}^S R^T (I + [{}^S \delta]^T) & -{}^S R^T ({}^S p_{EO} + {}^S d) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S p \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
& \text{上式忽略了二阶微分项} [{}^S\delta]^\top [{}^S\delta], \text{ 展开可得} \\
& {}^E p_i + \Delta {}^E p_i = {}^S R_i^\top (I + [{}^S\delta]^\top) {}^S p_i - {}^S R_i^\top ({}^S t_{EOi} + {}^S d) = \\
& {}^S R_i^\top ({}^S p_i - {}^S t_{EOi} + [{}^S p_i] {}^S \delta - {}^S d) = \\
& {}^S R_i^\top ({}^S p_i - {}^S t_{EOi} + [-I, [{}^S p_i]]) [{}^S d^\top, {}^S \delta^\top]^\top = \\
& {}^S R_i^\top ({}^S p_i - {}^S t_{EOi}) + {}^S R_i^\top [-I, [{}^S p_i]] ({}^S D) = \\
& {}^E p_i + {}^S R_i^\top [-I, [{}^S p_i]] G_i \Delta q = {}^E p_i + K_i \Delta q
\end{aligned} \quad (12)$$

式中, ${}^E p_i = {}^S R_i^\top ({}^S p_i - {}^S t_{EOi})$ 由 ${}^S p_i = {}^S R_i {}^E p_i + {}^S t_{EOi}$ 反算得到。为提高计算精度, 微分算子 $[{}^S\delta]$ 可用式 $(R({}^S\delta) - I)$ 代替^[10]。由上式可得特征点测量误差 $\Delta {}^E p_i$ 与广义运动学误差 Δq 的线性关系

$$\Delta {}^E p_i = K_i \Delta q \quad (13)$$

由于存在运动学误差与手眼误差, 两次测量的特征点坐标 ${}^E p_i$ 并不完全相等, 但补偿后的特征点坐标 $\{{}^E p_i + \Delta {}^E p_i\}$ 应相等, 故

$${}^E p_{i1} + K_{i1} \Delta q = {}^E p_{i2} + K_{i2} \Delta q \quad (14)$$

得 $(K_{i1} - K_{i2}) = {}^E p_{i1} - {}^E p_{i2}$, 对 n 组测点有

$$\begin{bmatrix} K_{i1} - K_{i2} \\ \vdots \\ K_{in1} - K_{in2} \end{bmatrix} \Delta q = \begin{bmatrix} {}^E p_{i2} - {}^E p_{i1} \\ \vdots \\ {}^E p_{in2} - {}^E p_{in1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

对上式用伪逆求解 Δq , 其中 $n \geq [(4m+6)/3]$ 。根据式(9)得关节运动学误差为 Δq 的前 $4m$ 项元素

$$\begin{aligned}
\Delta a_{j-1} &= \Delta q(4j-3), \Delta \alpha_{j-1} = \Delta q(4j-2) \\
\Delta d_j &= \Delta q(4j-1), \Delta \theta_j = \Delta q(4j)
\end{aligned} \quad (16)$$

其中, $j=1, 2, \dots, m$, 对应的误差矩阵

$$\Delta {}^{j-1} T = \frac{\partial {}^{j-1} T}{\partial a_{j-1}} \Delta a_{j-1} + \frac{\partial {}^{j-1} T}{\partial \alpha_{j-1}} \Delta \alpha_{j-1} + \frac{\partial {}^{j-1} T}{\partial d_j} \Delta d_j + \frac{\partial {}^{j-1} T}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j \quad (17)$$

则校正后末端坐标系到基坐标系的变换矩阵

$${}^B T + \Delta {}^B T = \prod_{j=1}^m ({}^{j-1} T + \Delta {}^{j-1} T) \quad (18)$$

手眼误差 ${}^B D$ 为 Δq 的后 6 项元素, 校正后的手眼变换矩阵

$${}^S T + \Delta {}^S T = {}^S T + {}^S T [{}^B D] \quad (19)$$

运动学参数/手眼参数辨识的具体步骤: ① 不考虑运动学误差的情况下求解初始手眼矩阵 ${}^S T$; ② 根据 ${}^S T$ 、 q 和 $\{{}^S p_i\}$ 计算 K_i ; ③ 根据式(12)构建 $\{{}^E p_i + \Delta {}^E p_i\}$, 然后根据多组 $\{{}^E p_i + \Delta {}^E p_i\}$ 相等建立线性方程组, 用伪逆求解误差 Δq ; ④ 根据式(16)校正运动学参数, 根据式(18)输出优化后末端坐标系到基坐标系的变换矩阵; ⑤ 用 ${}^B D$ 校正手眼参数, 根据

式(19)输出优化后的手眼变换矩阵。为保持与第 1 部分的统一, 手眼变换矩阵表示为 ${}^B T = {}^S T^{-1}$ 。

上述参数辨识方法特点: 同时考虑运动学误差 $(\Delta a, \Delta \alpha, \Delta d, \Delta \theta)$ 与手眼误差 ${}^B D$ 的补偿与校正, 可提升手眼参数辨识精度。值得注意的是, 通过式(19)得到的校正值 ${}^S R$ 是基于最小二乘法计算的逼近值, 一般不满足正交性条件, 此时可采用文献[11]的方法实现旋转矩阵的单位正交优化求解。

2 考虑测量缺陷影响的工件位姿参数辨识

点云匹配是辨识工件位姿参数 ${}^E T$ 的通用方法, 其匹配精度通过空间运动链影响机器人加工误差^[13]。点云匹配前需要通过视觉传感器与手眼参数获取工件的三维点云, 测点易出现形状不封闭、密度不均匀、高斯噪声等现场缺陷, 现有的采用距离平方和最小化构建目标函数的方法易出现匹配失真, 具体表现为测点密集区域向设计模型倾斜。本文介绍一种新的工件点云三维匹配方法, 通过在目标函数中减去平均距离项抑制现场测量缺陷对匹配失真的影响, 提升点云匹配与位姿参数辨识精度。

如图 2 所示, 定义测点 $P = \{p_{1s}, p_{1s}, \dots, p_{ns}\}$ 中点 $p_{is} \in \mathbb{R}^3$ 在设计模型 $Q = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 中的距离最近点为 $p_i \in \mathbb{R}^3$, 以运动旋量 V 与旋转角度 θ 描述刚体变换^[10], 则测点 p_{is} 经刚体变换后

$$p_{is+} = e^{[V]\theta} p_{is} = e^{[\xi]} p_{is} = g(\xi) p_{is} \quad (20)$$

式中, $\xi = V\theta = \left[\begin{pmatrix} {}^w d \end{pmatrix}^\top, \begin{pmatrix} {}^w \delta \end{pmatrix}^\top \right]^\top$ 表示微分运动矢量, $g(\xi) = e^{[\xi]}$ 表示刚体变换矩阵, 则测量点云 P 与设计模型 Q 匹配的目标函数可表示为

$$\min F_S(\xi) = \sum_{i=1}^n \|p_{is+} - p_{i+}\|^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2(p_{is}, p_{i+}, \xi) \quad (21)$$

式中, p_{i+} 为 p_{is+} 在 Q 中的最近点, $d_i = \|p_{is+} - p_{i+}\|$ 为最近距离。求解刚体变换参数 $g(\xi)$ 时, ICP 和 TDM 方法分别采用表 1 所示的点一点距离 $\|p_{is+} - p_{i+}\|$ 、点一切面距离 $\|p_{is+} - a\|$ 近似表示 $\|p_{is+} - p_{i+}\|$ 。点一点距离 $\|p_{is+} - p_{i+}\|$ 由切向距离 $\|p_{i+} - a\|$ 和法向距离 $\|p_{is+} - a\|$ 两部分构成, 在双向距离约束情况下可提高 ICP 收敛稳定性, 但具备一阶收敛速度; TDM 中点一切面距离仅包含法向距离约束, 容易沿切向滑移, 但具备二阶收敛速度。

图 2 测点到设计模型最近点距离的示意图

表 1 不同匹配方法所采用的距离度量

方法	距离 d_i	几何表达	代数表达
ICP	点一点距离	p_{is}, p_i	$\ e^{[\xi]} p_{is} - p_i\ $
TDM	点一切面距离	p_{is}, a	$(e^{[\xi]} p_{is} - p_i)^T n_i$

如图 3 所示, 理想测点在匹配完成后应充分接近设计模型, 即满足 $d_i = 0$, 但由于存在测量噪声与加工余量影响, 这一条件很难满足。如图 4 所示, 假定测量噪声服从高斯分布 $(\varepsilon_n + \varepsilon_{ri}) \sim N(\varepsilon_n, \sigma^2)$, 其中 ε_n 为平均值, ε_{ri} 为随机噪声, σ 为标准差。若工件设计余量为 ε_a , 则距离 d_i

图 3 距离 d_i 的构成

$$d_i = (\varepsilon_a + (\varepsilon_n + \varepsilon_{ri})) \sim N(\varepsilon_a + \varepsilon_n, \sigma^2) \quad (22)$$

式中, $(\varepsilon_a + \varepsilon_n)$ 为 d_i 的决定性偏差。在粗加工时, 余量 ε_a 远大于噪声 ε_n , 上式等价于 $d_i \sim N(\varepsilon_a, \sigma^2)$; 在精加工时, d_i 主要源于噪声, 上式等价于 $d_i \sim N(\varepsilon_n, \sigma^2)$ 。当存在 $(\varepsilon_a + \varepsilon_n) \neq 0$ 时, 对于如图 4 所示测点形状不封闭或密度不均匀情况, ICP/TDM 匹配将使测点密集区域倾向于设计模型, 即出现匹配失真。原因如下: 将所有测点划分为两个区域 $P_1 = \{p_{1s}, \dots, p_{1s}\}$ 和 $P_2 = \{p_{(l+1)s}, \dots, p_{ns}\}$, 其中 P_1 表示稀疏区域, $P_1 = \emptyset$ 表示该区域无测点, P_1 以外区域定义为密集区域 P_2 , 则 ICP/TDM 的目标函数(21)可表示为

图 4 测量缺陷

$$\begin{aligned} \min F_S(\xi) &= \min \sum_{i=1}^n d_i^2 = \\ &= \min \left(\sum_{i=1}^l d_i^2 + \sum_{i=l+1}^n d_i^2 \right) = \\ &= \min [F_{P1}(\xi) + F_{P2}(\xi)] \end{aligned} \quad (23)$$

式中, F_{P1} 和 F_{P2} 分别表示稀疏区域和密集区域关于微分运动矢量 ξ 的函数。若 $d_i = 0$, F_S 实现全局最小时, 子函数 F_{P1} 和 F_{P2} 同时实现局部最小; 但存在噪声与余量时 $d_i \neq 0$, F_S 实现全局最小时, 子函数 F_{P1} 和 F_{P2} 无法同时实现局部最小, 即存在

$$\min F_S \neq \min F_{P1} + \min F_{P2} \quad (24)$$

由于区域 P_2 在测点中占据主导, 区域 P_2 中测点距离将会整体小于区域 P_1 中的测点距离, 在几何上表现为区域 P_2 靠近设计模型, 区域 P_1 远离设计模型, 从而导致匹配出现失真。针对这一问题, 定义如下方差最小化匹配目标函数^[12-13]

$$\min F_V(\xi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i')^2 \quad (25)$$

式中, $\bar{d}$ 表示 d_i 的平均距离。新定义距离 d_i' 的平均距离 $\bar{d}'$ 恒为 0, 与决定性偏差 $(\varepsilon_a + \varepsilon_n)$ 无关, 满足正态分布 $d_i' \sim N(0, \sigma^2)$, 即式(25)中 F_V 最小化对应 $d_1 = d_2 = \dots = d_n = \bar{d}$, 故匹配后不易出现测点倾斜现象(密集区域 d_i' 小、稀疏区域 d_i' 大)。

将式(25)中目标函数进一步表示为

$$\min F_V(\xi) = \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 / n = F_S - F_A \quad (26)$$

式中, F_S 为 ICP/TDM 使用的目标函数, F_A 为平均距离项。 F_S 没有考虑 $\varepsilon_a + \varepsilon_n$ (噪声与余量), 易导致 ICP/TDM 匹配失真, 而所提方法通过减去平均距离项 F_A , 抑制了 $(\varepsilon_a + \varepsilon_n)$ 对匹配失真的影响。

为简化计算, 将点一切面距离 $(e^{[\xi]} p_{is} - p_i)^T n_i$ 代入式(26), 通过最小化目标函数 F_V 可计算得到微分运动矢量 ξ^* , 并由下式更新 ξ^*

$$\begin{aligned} \xi^* &= \begin{bmatrix} (R({}^W \delta)^W d^* + {}^W d)^T & ({}^W \delta^* + {}^W \delta)^T \end{bmatrix}^T \\ R^* &= R({}^W \delta^*) R({}^W \delta) \quad d^* = R({}^W \delta) {}^W d^* + {}^W d \end{aligned} \quad (27)$$

式中, ξ^* 在迭代前的初始解可设为 $\xi^* = \mathbf{0}_{6 \times 1}$ 。

工件位姿参数辨识的具体步骤: ① 根据第 1 节计算结果, 将视觉传感器采集的测点与目标点表示在同一坐标系下; ② 搜索测点 p_{is} 的距离最近点 p_i , 最小化式(26)的目标函数, 计算微分运动矢量 ξ ; ③ 根据式(27)更新当前最优 ξ^* , 并更新测点 $p_{is} = \mathbf{R}^* p_{is} + \mathbf{t}^*$; ④ 重复步骤(1)~(3), 直到迭代次数达到设定值或定义的均值误差小于阈值; ⑤ 输出最优的微分运动矢量 ξ^* 和工件位姿参数 $\mathbf{R}^*, \mathbf{d}^*$ 。

3 基于加工误差估计的工具位姿参数辨识

根据第 I 部分构建的机器人加工系统空间运动链, 除关节运动学参数、手眼参数与工件位姿参数外, 工具位姿参数 ${}^B T$ 的精确辨识也是影响加工误差的重要因素。本文建立曲面加工误差与工件/工具位姿误差的映射模型, 将包含 7 个变量的位姿误差辨识转换为基于最小二乘估计的点云匹配问题, 一方面可校正工具在实际加工状态的位姿参数, 另一方面可预测工件受力变形或者抖动需要的坐标系微调量, 有利于提高后续同批次零件的加工精度。

如图 5 所示, 以点接触加工为例, 若工件坐标系 $\{W\}$ 存在位姿误差 ${}^W D = [({}^W d)^T, ({}^W \delta)^T]^T$, 其中 ${}^W d$ 为位置误差, ${}^W \delta$ 为姿态误差, 根据第 I 部分误差传递公式(16)可得目标点 p_i 位置误差

$${}^P_i d = ({}^P_i R^T) {}^W d - ({}^P_i R^T) [{}^W t_{ro}] {}^W \delta \quad (28)$$

其中误差 ${}^P_i d$ 在工件坐标系 $\{W\}$ 中可表示为

$${}^W d_{P_i} = ({}^P_i R) {}^P_i d = ({}^P_i R) ({}^P_i R^T {}^W d - {}^P_i R^T [{}^W t_{ro}] {}^W \delta) = {}^W d - [{}^W t_{ro}] {}^W \delta \quad (29)$$

图 5 工件/工具坐标系位姿误差矢量示意图

目标点 p_i 在工件坐标系 $\{W\}$ 中的实际位置

$$p'_i = p_i + {}^W d_{P_i} = p_i + {}^W d - [{}^W t_{ro}] {}^W \delta = p_i + {}^W d - [p_i] {}^W \delta \quad (30)$$

若工具坐标系 $\{T\}$ 存在位姿误差 ${}^T D$, 根据第 I 部分式(22)可得点 p_i 实际位置

$$p'_i = p_i + {}^P_i d_z n_i = p_i + {}^T d_z n_i \quad (31)$$

若同时存在位姿误差 ${}^W D$ 和 ${}^T D$, 综合式(30)和(31)可得点 p_i 实际位置

$$p'_i = p_i + {}^W d - [p_i] {}^W \delta + {}^T d_z n_i = (I_{3 \times 3} + [{}^W \delta]) p_i + {}^W d + {}^T d_z n_i \quad (32)$$

式中, p'_i 可认为是存在工件/工具位姿误差时目标点的估计值, 为计算上式中的位姿误差 $({}^W d, {}^W \delta, {}^T d_z)$, 定义如下最小二乘估计目标函数

$$\min F = \sum_{i=1}^n \|p'_i({}^W d, {}^W \delta, {}^T d_z) - p_{is}\|^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2({}^W d, {}^W \delta, {}^T d_z) \quad (33)$$

式中, p_{is} 是目标点的实测值(p_{is} 与 p_i 在同一坐标系表示), ε_i 表示估计值 p'_i 与实测值 p_{is} 之间的残差, 该残差可表示为点一切面距离形式

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= (p'_i - p_{is})^T n_i = ((I_{3 \times 3} + [{}^W \delta]) p_i + {}^W d + {}^T d_z n_i - p_{is})^T n_i = \\ &= (p_i - p_{is})^T n_i + ([{}^W \delta] p_i)^T n_i + ({}^W d)^T n_i + {}^T d_z n_i^T n_i = \\ &= d_{i0} + ([{}^W \delta] p_i)^T n_i + (n_i^T) {}^W d + {}^T d_z \end{aligned} \quad (34)$$

式中, 第二项 $([{}^W \delta] p_i)^T n_i$ 可表示为 $(p_i \times n_i)^T {}^W \delta$, 代入式 $d_{i0} + ([{}^W \delta] p_i)^T n_i + (n_i^T) {}^W d + {}^T d_z$ (34) 可得

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= d_{i0} + (p_i \times n_i)^T {}^W \delta + n_i^T {}^W d + {}^T d_z = \\ &= d_{i0} + \begin{bmatrix} p_i \times n_i \\ {}^W d \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} {}^W \delta \\ {}^W d \\ {}^T d_z \end{bmatrix} = d_{i0} + A_i \xi \\ \xi &= [({}^W d)^T, ({}^W \delta)^T, ({}^T d_z)^T]^T \end{aligned} \quad (35)$$

式中, ξ 表示需辨识的广义位姿误差矢量, 式(35)将工件/工具位姿误差参数辨识问题转换为实测点 (p_{is}) 与设计模型目标点 (p_i) 的点云匹配问题。将上式代入式(33)得

$$\min F = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (d_{i0}^2 + 2d_{i0} A_i \xi + \xi^T A_i A_i^T \xi) \quad (36)$$

对上式求导置零, 计算广义位姿误差矢量

$$\xi = - \left(\sum_{i=1}^n A_i A_i^T \right)^{-1} \sum_{i=1}^n d_{i0} A_i \quad (37)$$

应用上式计算的位姿误差 $({}^W d, {}^W \delta, {}^T d_z)$ 可校正工具位姿误差和工件位姿误差, 具体步骤如下。

(1) 由构造法获得工具的初始姿态 ${}^B_T T$, 并用视觉传感器对加工后的工件进行测量。

(2) 设工件加工后在视觉传感器坐标系 $\{S\}$ 下的测点为 ${}^S P$, 包括未参与加工区域 ${}^S P_1$ (装配基准面、夹持特征面等, 加工精度已保证)和已加工区域 ${}^S P_2$, 将测点 ${}^S P_1$ 与设计模型匹配, 得到相对位姿 ${}^S_T T$, 然后由式 ${}^W P = {}^S_T T {}^S P$ 获取坐标系 $\{W\}$ 下的测点 ${}^W P$, 同样包括未加工区域 ${}^W P_1$ 与已加工区域 ${}^W P_2$, 其中 ${}^W P_2$ 即实测点集 ${}^W P_2 = \{p_{1s}, \dots, p_{is}, \dots, p_{ns}\}$ 。

(3) 搜索实测点 p_{is} 的最近点 p_i , 并根据式(32)计算估计值 p'_i , 实测点与最近点的距离误差可认为是由工件位姿误差/工具位姿误差引起的。

(4) 根据式(35)~(37)计算广义位姿误差矢量 $\xi({}^W d, {}^W \delta, {}^T d_z)$, 输出合成误差矢量和位姿参数 $\xi^* = [({}^R({}^W \delta) {}^W d^* + {}^W d)^T, ({}^W \delta^* + {}^W \delta)^T, ({}^T d_z^* + {}^T d_z)^T]^T$, $R^* = R({}^W \delta^*) R({}^W \delta)$, $d^* = R({}^W \delta^*) {}^W d^* + {}^W d$, ξ^* 在迭代前的初始解设为 $\xi^* = \mathbf{0}_{7 \times 1}$ 。

(5) 更新实测点位置 $p_{is} = R^* p_{is} + d^*$, 重复步骤(3)、(4), 直到迭代次数达到设定值或定义的均值误差小于阈值, 输出最优的微分运动矢量 ξ^* 、工件位姿参数 R^* , d^* 和工具位姿参数 ${}^T d_z^*$ 。参数 ${}^T d_z^*$ 可用于校正工具位姿误差, 参数 R^* , d^* 可用于指导工件受力变形或者抖动时需工件坐标系做出的微调。

4 基于整体误差控制的位姿优化通用模型

前面介绍了手眼参数辨识、工件位姿辨识、工具位姿辨识等数学模型和计算方法, 提升了机器人加工系统参数辨识精度。但由关节运动学误差、关节刚度引起的加工目标点的位姿误差依然存在。下面综合考虑关节运动学误差、弱刚度变形、误差补偿, 以整体目标点加工误差控制为目标, 建立加工误差补偿与机器人位姿优化通用模型。

根据第 I 部分误差传递公式, 由关节运动学误差/关节刚度共同引起目标点 p_i 的位姿误差矢量

$${}^P_i D_{qk} = {}^P_i D_q + {}^P_i D_k \quad (38)$$

为减小整体加工误差, 可以选取工件上的一点 p_0 , 通过微调工件/工具坐标系, 使 p_0 处对应的位姿误差矢量置零, 以此实现自动调整所有目标点 p_i 加工时的机器人位姿。

加工目标点 p_0 时机器人已补偿的关节变量为 $\theta_0^* = \theta_0 + \Delta \theta$, 由补偿量 $\Delta \theta$ 引起点 p_0 的位姿变化矢

量为 ${}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*)$, 误差补偿使点 p_0 的位姿误差矢量 ${}^P_0 D_{qk}(\theta_0^*)$ 与位姿变化矢量 ${}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*)$ 相互抵消, 即存在方程

$${}^P_0 D_{qk} = {}^P_0 D_{qk}(\theta_0^*) + {}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*) = \mathbf{0}_{6 \times 1} \quad (39)$$

根据式(38)、(39)得

$${}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*) = -({}^P_0 D_q(\theta_0 + \Delta \theta_0) + {}^P_0 D_k(\theta_0 + \Delta \theta_0)) \quad (40)$$

对上式进行一阶泰勒展开

$${}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*) = -\left[{}^P_0 D_q(\theta_0) + {}^P_0 D_k(\theta_0) + \frac{\partial({}^P_0 D_q(\theta) + {}^P_0 D_k(\theta))}{\partial \theta} \bigg|_{\theta_0} \Delta \theta_0 \right] \quad (41)$$

由于 $\Delta \theta_0 = o(\theta_0)$ 为 θ_0 的一阶无穷小, 上式可简写为

$$\begin{aligned} {}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*) &= -({}^P_0 D_q(\theta_0) + {}^P_0 D_k(\theta_0)) - o({}^P_0 D_q(\theta_0) + {}^P_0 D_k(\theta_0)) \\ &\approx -({}^P_0 D_q(\theta_0) + {}^P_0 D_k(\theta_0)) = -{}^P_0 D_{qk}(\theta_0) \end{aligned} \quad (42)$$

这说明进行位姿误差补偿($\Delta \theta$)时, 由关节运动学误差/关节刚度引起的一阶位姿变化 $\frac{\partial({}^P_0 D_q(\theta) + {}^P_0 D_k(\theta))}{\partial \theta} \bigg|_{\theta_0} \Delta \theta_0$ 可忽略不计, 但由 $\Delta \theta$ 引起的位姿变化 ${}^P_0 D_{\Delta \theta}(\theta_0^*)$ 不能忽略。由 $\Delta \theta$ 引起末端坐标系 $\{E\}$ 的位姿变化矢量 ${}^E D_{\Delta \theta}$ 与点 p_0 的位姿变化矢量 ${}^P_0 D_{\Delta \theta}$ 满足速度伴随变换

$${}^E D_{\Delta \theta} = \text{Ad}_V({}^E_T P_0) {}^P_0 D_{\Delta \theta} \quad (43)$$

该矢量对应机器人位姿变换矩阵

$$\Delta {}^B_T T_{\Delta \theta} = {}^B_T T(q, \theta_0) [{}^E D_{\Delta \theta}] \quad (44)$$

式中, θ_0 表示关节参数 q 中的关节变量。根据式(42)和式(44), 加工目标点 p_0 时调整后的机器人位姿

$$\begin{aligned} {}^B_T T(q, \theta_0^*) &= {}^B_T T(q, \theta_0) + \Delta {}^B_T T_{\Delta \theta} = \\ &= {}^B_T T(q, \theta_0) + {}^B_T T(q, \theta_0) [{}^E D_{\Delta \theta}] \approx \\ &= {}^B_T T(q, \theta_0) \left(I - [\text{Ad}_V({}^E_T P_0) {}^P_0 D_{qk}(\theta_0)] \right) \end{aligned} \quad (45)$$

进行位姿误差补偿时需要将机器人名义位姿由 ${}^B_T T(q, \theta_0)$ 调整为 ${}^B_T T(q, \theta_0^*)$, 这一过程可以通过调整工具位姿 ${}^B_T T$ 或工件位姿 ${}^E_T T$ 实现, 而其他目标点加工误差则根据调整后工具或工件位姿自动补偿。

4.1 工具位姿补偿方法

假设通过调整工具位姿 ${}^B_T T$ 补偿加工误差, 定义工具位姿调整量 $\Delta {}^B_T T$ 对应的微分运动矢量为 ${}^T D$, 则调整后的位姿为 ${}^B_T T^* = {}^B_T T(I + [{}^T D])$, 调整前后机器人加工系统的空间运动链方程

$$\begin{cases} {}^B_E T(q, \theta_0) {}^E_W T {}^W_{P_0} T = {}^B_T T \\ {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_W T {}^W_{P_0} T = {}^B_T T(I + [{}^T D]) = {}^B_T T' \end{cases} \quad (46)$$

将式(45)调整后的机器人位姿代入上式, 可求解工具坐标系 $\{T\}$ 位姿调整对应的微分运动矢量

$$\begin{aligned} {}^T D &= ({}^B_T T^{-1} ({}^B_T T' - {}^B_T T))^\vee = ({}^B_T T^{-1} ({}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_W T {}^W_{P_0} T - {}^B_T T))^\vee \approx \\ &= \left\{ {}^B_T T^{-1} \left(\left({}^B_E T(q, \theta_0) [I - \text{Ad}_V({}^E_{P_0} T) {}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)] \right) {}^E_W T {}^W_{P_0} T - {}^B_T T \right) \right\}^\vee = \\ &= \left\{ {}^E_{P_0} T^{-1} [-\text{Ad}_V({}^E_{P_0} T) {}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)] {}^E_{P_0} T \right\}^\vee = \\ &= [-\text{Ad}_V({}^E_{P_0} T^{-1} \text{Ad}_V({}^E_{P_0} T) {}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0))]^\vee = \\ &= -[{}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)]^\vee = -{}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0) \end{aligned} \quad (47)$$

因此工具坐标系 $\{T\}$ 的位姿调整矢量 ${}^T D$ 与点 p_0 对应的位姿误差矢量 ${}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)$ 互为相反数。位姿调整后工件上点 p_i 和 p_0 在加工时都应满足与工具坐标系 $\{T\}$ 的零点重合, 即满足空间运动链约束

$${}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_W T {}^W_{P_0} T = {}^B_E T(q, \theta_i^*) {}^E_W T {}^W_{P_i} T = {}^B_T T' \quad (48)$$

目标点 p_i 在工件坐标系 $\{W\}$ 中的位姿 ${}^W_{P_i} T$ 不受工具位姿调整的影响, 但对应的机器人名义位姿会根据空间运动链约束进行调整, 即

$${}^B_E T(q, \theta_i^*) = {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T {}^E_{P_i} T^{-1} \quad (49)$$

为计算位姿调整后每个目标点 p_i 的加工误差, 需先计算点 p_i 的位姿变化矢量 ${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta}$ 。由式(49)得调整后目标点坐标系 $\{P_i\}$ 的位姿矩阵变化量

$$\begin{aligned} \Delta {}^E_{P_i} T_{\Delta\theta} &= ({}^B_E T(q, \theta_i^*) - {}^B_E T(q, \theta_0^*)) {}^E_{P_i} T = \\ &= {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T {}^E_{P_i} T^{-1} - {}^B_E T \end{aligned} \quad (50)$$

式中, 工具位姿 ${}^B_T T = {}^B_E T(q, \theta_i^*) {}^E_{P_i} T = {}^B_{P_i} T$, $\Delta {}^E_{P_i} T_{\Delta\theta}$ 对应的微分算子和位姿变化矢量

$$\begin{aligned} {}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} &= ({}^E_{P_i} T^{-1}) \Delta {}^E_{P_i} T_{\Delta\theta} = {}^E_{P_i} T {}^B_E T(q, \theta_i^*) {}^E_{P_i} T^{-1} - I_{4 \times 4} \\ {}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} &= ({}^E_{P_i} D_{\Delta\theta})^\vee \end{aligned} \quad (51)$$

推论 1: 工具坐标系微调后各目标点的位姿变化矢量满足 ${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} = {}^E_{P_0} D_{\Delta\theta} = {}^T D = -{}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)$ 。

证明: 根据第 I 部分公式 ${}^M \Delta = (\Delta {}^M_N T) {}^N_M T$ 和公式 ${}^N \Delta = {}^N_M T (\Delta {}^M_N T)$, 可得

$${}^M \Delta = {}^M_N T ({}^N \Delta) {}^N_M T = {}^M_N T [{}^N D] {}^N_M T \quad (52)$$

另由速度伴随变换公式可得

$${}^M \Delta = [{}^M D] = [\text{Ad}_V({}^M_N T) {}^N D] \quad (53)$$

对比式(52)和(53)可得微分运动矢量 ${}^N D$ 满足

$$[\text{Ad}_V({}^M_N T) {}^N D] = {}^M_N T [{}^N D] {}^N_M T \quad (54)$$

将上式代入式(45), 得误差补偿后加工目标点

p_0 时的机器人位姿

$${}^B_E T(q, \theta_0^*) = {}^B_E T(q, \theta_0) (I - {}^E_{P_0} T [{}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)] {}^E_{P_0} T) \quad (55)$$

根据上式反求点 p_0 的位姿误差矢量

$${}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0) = (I - {}^E_{P_0} T {}^B_E T^{-1}(q, \theta_0) {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T)^\vee \quad (56)$$

结合式(42), 可得点 p_0 在工具坐标系 $\{T\}$ 调整后的位姿变化矢量

$${}^E_{P_0} D_{\Delta\theta} = ({}^E_{P_0} T {}^B_E T^{-1}(q, \theta_0) {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T - I)^\vee \quad (57)$$

将加工点 p_i 时的机器人位姿调整公式(49)代入式(51), 可得点 p_i 调整后的位姿变化矢量

$$\begin{aligned} {}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} &= ({}^E_{P_i} T {}^B_E T^{-1}(q, \theta_i^*) {}^E_{P_i} T - I)^\vee = \\ &= ({}^E_{P_0} T {}^B_E T^{-1}(q, \theta_0) {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T {}^E_{P_i} T {}^E_{P_i} T^{-1} - I)^\vee = \\ &= ({}^E_{P_0} T {}^B_E T^{-1}(q, \theta_0) {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_{P_0} T - I)^\vee \end{aligned} \quad (58)$$

对比式(57)和(58)得 ${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta}(\theta_0^*) = {}^E_{P_0} D_{\Delta\theta}(\theta_0^*)$, 并由式(42)和(47)进一步得

$${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} = {}^E_{P_0} D_{\Delta\theta} = {}^T D = -{}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0) \quad (59)$$

推论得证。该推论说明: (1) 当通过微调工具坐标系位姿使目标点 p_0 对应的位姿误差矢量置零时, 工具坐标系微调的位姿调整矢量 ${}^T D$ 等于目标点 p_0 的位姿误差矢量 ${}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)$ 的负值; (2) 由工具坐标系微调引起每个目标点坐标系 $\{P_i\}$ 的位姿变化矢量 ${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta}$ 与 ${}^T D$ 相等, 即当微调工具坐标系时, 每个目标点加工误差变化量相等。这一特点说明通过微调工具坐标系对选定的目标点 p_0 进行位姿误差补偿时, 可自动调整所有目标点的机器人加工位姿, 适合补偿位置类加工误差。

4.2 工件位姿补偿方法

推论 2: 工件坐标系微调后各目标点的位姿变化矢量满足

$${}^E_{P_i} D_{\Delta\theta} = \text{Ad}_V({}^E_{P_0} T) {}^E_{P_0} D_{\Delta\theta} = -\text{Ad}_V({}^E_{P_0} T) {}^E_{P_0} D_{qk}(\theta_0)$$

证明: 假设通过调整工件位姿 ${}^E_W T$ 补偿加工误差, 则调整后的位姿为 ${}^E_W T(I + [{}^W D])$, 由工具位姿 ${}^B_T T$ 的不变性得位姿调整前后空间运动链

$$\begin{cases} {}^B_E T(q, \theta_0) {}^E_W T {}^W_{P_0} T = {}^B_T T \\ {}^B_E T(q, \theta_0^*) {}^E_W T (I + [{}^W D]) {}^W_{P_0} T = {}^B_T T \end{cases} \quad (60)$$

将式(45)调整后的机器人位姿代入上式, 可求解工件坐标系 $\{W\}$ 的位姿调整矢量

$$\begin{aligned}
[{}^W D] &= {}^E T^{-1} {}^B T(q, \theta_0^*)^{-1} {}^B T(q, \theta_0) {}^E T - I = \\
& {}^E T^{-1} \left({}^B T(q, \theta_0) \left(I - \left[\text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right] \right) \right)^{-1} {}^B T(q, \theta_0) {}^E T - I = \\
& {}^E T^{-1} \left(I - \left[\text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right] \right)^{-1} {}^B T^{-1}(q, \theta_0) {}^B T(q, \theta_0) {}^E T - I \approx \\
& {}^E T^{-1} \left(I + \left[\text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right] \right) {}^E T - I = \\
& {}^E T^{-1} \left[\text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right] {}^E T = \\
& \left[\text{Ad}_V({}^E T^{-1}) \text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right] = \\
& \left[\text{Ad}_V({}^W T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \right]
\end{aligned} \quad (61)$$

式中, $\Delta = [\text{Ad}_V({}^E T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0)]$ 已通过公式 $(I - \Delta)^{-1} \approx (I + \Delta)$ 进行简化, 根据式(42)得

$${}^W D = \text{Ad}_V({}^W T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) = -\text{Ad}_V({}^W T) {}^R_0 D_{\Delta\theta} \quad (62)$$

因此工件坐标系的位姿调整矢量 ${}^W D$ 与点 p_0 的位姿变化矢量 ${}^R_0 D_{\Delta\theta}$ 服从负向的速度伴随变换。对于工件上任意目标点 p_i , 位姿调整前后目标点坐标系 $\{P_i\}$ 都应工具坐标系 $\{T\}$ 重合(零点与坐标轴), 即满足空间运动链约束

$${}^B T(q, \theta_i) {}^E T {}^W T {}^R_i T = {}^B T(q, \theta_i^*) {}^E T {}^W T (I + [{}^W D]) {}^R_i T = {}^B T \quad (63)$$

当工件坐标系调整后加工目标点 p_i 时, 机器人的名义位姿

$$\begin{aligned}
{}^B T(q, \theta_i^*) &= {}^B T {}^W T {}^R_i T^{-1} (I + [{}^W D])^{-1} {}^E T^{-1} = \\
& {}^B T {}^W T {}^R_i T^{-1} (I - [{}^W D]) {}^E T^{-1}
\end{aligned} \quad (64)$$

工件坐标系调整后的名义位姿虽然变为 ${}^E T(I + [{}^W D])$, 但工件真实位姿依旧为 ${}^E T$, 根据式(63)

$${}^R_i D_{\Delta\theta} = \text{Ad}_V({}^R_i T) {}^R_0 D_{\Delta\theta} = -\text{Ad}_V({}^R_i T) {}^W D = -\text{Ad}_V({}^R_i T) {}^R_0 D_{qk}(\theta_0) \quad (67)$$

推论得证。上式表明通过微调工件坐标系降低各目标点的加工误差时, 各目标点的加工误差变化量并不相等, 数值上服从速度伴随变换。这一特点说明通过微调工件坐标系对选定的目标点 p_0 进行位姿误差补偿时, 也可自动调整所有目标点的机器人加工位姿, 更适合补偿方向类加工误差。

4.3 位姿优化通用模型

第 4.1、4.2 节介绍了通过调整目标点 p_0 处对应的工具位姿或工件位姿, 可自动调整所有目标点 p_i 的机器人加工位姿, 这种调整降低了目标点 p_i 的加工误差, 但整体加工误差的最小化与目标点 p_0 的选取位置有关, 下面介绍如何优选 p_0 。根据计算出的目标点位姿变化矢量 ${}^R_i D_{\Delta\theta}$, 对于由关节运动学误差、关节刚度、误差补偿引起点 p_i 处的位姿误差矢量分别表示为 ${}^R_i D_q$ 、 ${}^R_i D_k$ 、 ${}^R_i D_{\Delta\theta}$, 存在

$${}^R_i D_{qk\theta} = {}^R_i D_q + {}^R_i D_k + {}^R_i D_{\Delta\theta} \quad (68)$$

得调整后点 p_i 的位姿矩阵变化量

$$\begin{aligned}
\Delta {}^B T_{\Delta\theta} &= {}^B T(q, \theta_i^*) {}^E T {}^W T {}^R_i T - {}^B T(q, \theta_i) {}^E T {}^W T {}^R_i T = \\
& {}^B T(q, \theta_i^*) {}^E T {}^W T {}^R_i T - {}^B T
\end{aligned} \quad (65)$$

将式(64)代入式(65), $\Delta {}^B T_{\Delta\theta}$ 对应的微分算子和位姿变化矢量

$$\begin{aligned}
{}^R_i D_{\Delta\theta} &= {}^R_i T^{-1} (\Delta {}^B T_{\Delta\theta}) = \\
& \left({}^B T^{-1} \left({}^B T {}^W T {}^R_i T^{-1} (I - [{}^W D]) \right) {}^E T^{-1} {}^E T {}^W T {}^R_i T - {}^B T \right) = \\
& - \left({}^W T^{-1} [{}^W D] {}^W T \right) = - \left[\text{Ad}_V({}^W T^{-1}) {}^W D \right] = \\
& - \left[\text{Ad}_V({}^R_i T) {}^W D \right] \\
{}^R_i D_{\Delta\theta} &= ({}^R_i D_{\Delta\theta})^v = -\text{Ad}_V({}^R_i T) {}^W D
\end{aligned} \quad (66)$$

因此工件坐标系的位姿调整矢量 ${}^W D$ 与点 p_i 的位姿变化矢量 ${}^R_i D_{\Delta\theta}$ 服从负向的速度伴随变换。对比式(66)和(62)得点 p_i 、 p_0 位姿变化矢量满足

位姿误差矢量 ${}^R_i D_q$ 和 ${}^R_i D_k$ 与机器人位姿 ${}^B T$ 有关, 位姿变化矢量 ${}^R_i D_{\Delta\theta}$ 与补偿点 p_0 有关。考虑目标点所在坐标系相对工件坐标系位姿不变, 根据第 I 部分式(1), 机器人位姿可表示为有关 $({}^B T, {}^E T)$ 的形式, 故点 p_i 对应的位姿误差矢量

$${}^R_i D_{qk\theta} = {}^R_i D_{qk\theta}({}^B T, {}^E T, p_0, p_i) \quad (69)$$

因此位姿误差矢量 ${}^R_i D_{qk\theta}$ 与工具位姿 ${}^B T$ 、工件位姿 ${}^E T$ 和补偿点 p_0 三因素相关。根据第 I 部分式(22)可得法向加工误差

$${}^R_i d_\gamma({}^B T, {}^E T, p_0, p_i) = ({}^R_i D_{qk\theta})^T D_\gamma \quad (70)$$

式中, 系数 D_γ 与第 I 部分表 1 中机器人加工的误差类型有关。为使整体目标点 $\{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ 的加工误差最小化, 定义如下目标函数

$$\min F({}^B T, {}^E T, p_0) = \sum_{i=1}^n \left(({}^R_i D_{qk\theta})^T ({}^R_i D_{qk\theta} \circ D_\gamma) \right) \quad (71)$$

式中, 符号“ $\circ$ ”表示 Hadamard 积, 单点加工(如制孔)时 $n=1$; 该方程通过系数 $\mathbf{D}_\gamma$ 和误差矢量 ${}^R \mathbf{D}_{qk\theta} = [{}^R d_x, {}^R d_y, {}^R d_z, {}^R \delta_x, {}^R \delta_y, {}^R \delta_z]^T$ 统一了不同类型机器人加工误差的目标函数, 下面以磨削/铣削、制孔、切边等常见加工方式为例进行介绍。

加工类型 1: 对于曲面磨削/铣削, 关注的是曲面上每个加工点的余量误差, 在几何上表示为法向深度误差, 此时有 $\mathbf{D}_\gamma = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$, 将 $\mathbf{D}_\gamma$ 代入式(71)得目标函数

$$F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n {}^R d_z^2 \quad (72)$$

式中, ${}^R d_z$ 是常见的加工误差表达式, 它表示点 $\mathbf{p}_i$ 在法矢方向上的位置误差, 即理论余量与实际余量的偏差, 因此式(72)主要用于整体加工余量偏差控制。上式也可以写成绝对值求和的形式

$$F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n |{}^R d_z| \quad (73)$$

加工类型 2: 对于制孔, 孔在所在表面的加工位置误差会影响后续孔的装配精度, 该误差在几何上表示为切向滑移误差, 此时有 $\mathbf{D}_\gamma = [1, 1, 0, 0, 0, 0]^T$, 将 $\mathbf{D}_\gamma$ 代入式(71)得目标函数

$$F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n ({}^R d_x^2 + {}^R d_y^2) \quad (74)$$

式中, $({}^R d_x, {}^R d_y)$ 表示坐标系 $\{P_i\}$ 在 (x, y) 轴方向的微分平移误差, (x, y) 轴对应点 $\mathbf{p}_i$ 所在切平面上两个相互垂直的切方向。目标函数 F 主要用于控制制孔过程刀具沿着工件表面的切向滑移误差。

加工类型 3: 对于制孔/切边, 为控制轴向倾斜误差, 将 $\mathbf{D}_\gamma = [0, 0, 0, 1, 1, 0]^T$ 代入式(71)得目标函数

$$F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n ({}^R \delta_x^2 + {}^R \delta_y^2) \quad (75)$$

式中, ${}^R \delta_x$ 和 ${}^R \delta_y$ 表示坐标系 $\{P_i\}$ 绕自身 (x, y) 轴的微分旋转误差, 可用于评估刀具理论轴线与实际轴线方向(z 轴)的角度偏差。目标函数 F 主要用于对刀具轴向(蒙皮切边与机翼制孔)倾斜度的控制, 例如蒙皮切边后需将多块蒙皮在边缘区域装配成大型壁板, 而刀具的倾斜误差会影响相邻蒙皮边缘横截面的贴合程度, 加大对缝间隙误差。

下面以加工类型 1 为例介绍位姿优化模型的求解过程。根据函数 $F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0)$ 求解最佳的工具位姿 ${}^B \mathbf{T}$ 、工件位姿 ${}^E \mathbf{T}$ 和补偿目标点 $\mathbf{p}_0$ 。对于目标点 $\mathbf{p}_0$ 的优化, 定义微分运动矢量 ${}^R \mathbf{D}_\chi = [{}^R d_{\chi x}, {}^R d_{\chi y}, {}^R d_{\chi z}, {}^R \delta_{\chi x}, {}^R \delta_{\chi y}, {}^R \delta_{\chi z}]^T$, 其中符号

$\chi \in \{q, k, \Delta\theta, qk\}$ 。则法向误差可表示为

$${}^R d_z = ({}^R \mathbf{D}_{qk\theta})^T \mathbf{D}_\gamma = \left({}^R \mathbf{D}_q + {}^R \mathbf{D}_k + {}^R \mathbf{D}_{\Delta\theta} \right)^T \mathbf{D}_\gamma = {}^R d_{qz} + {}^R d_{kz} + {}^R d_{\Delta\theta z} \quad (76)$$

若通过微调工具坐标系补偿整体加工误差, 根据式(59)得点 $\mathbf{p}_i$ 与点 $\mathbf{p}_0$ 具有相同的法向误差 ${}^R d_{\Delta\theta z} = {}^R d_{\Delta\theta z} = -({}^R d_{qz} + {}^R d_{kz}) = -{}^R d_{qkz}$, 则目标函数(72)变为

$$F({}^B \mathbf{T}, {}^E \mathbf{T}, \mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n ({}^R d_{qkz} + {}^R d_{\Delta\theta z})^2 = \sum_{i=1}^n ({}^R d_{qkz} - {}^R d_{qkz})^2 \quad (77)$$

式中, ${}^R d_{qkz} = {}^R d_{qz} + {}^R d_{kz}$, ${}^R d_{\Delta\theta z} = {}^R d_{qz} + {}^R d_{kz}$, 对上式求偏导 $\partial F / \partial ({}^R d_{qkz}) = 0$, 当 F 取最小值时, ${}^R d_{qkz}$ 等于所有 ${}^R d_{qkz}$ 的平均值。即当点 $\mathbf{p}_0$ 法向误差为所有目标点法向误差的平均值时, 整体加工误差最小。若选取式(73)作为目标函数, 则 $F = \sum_{i=1}^n |{}^R d_{qkz} - {}^R d_{qkz}|$, 此时当 ${}^R d_{qkz}$ 为所有目标点法向误差的中位数时, 整体加工误差最小。当点 $\mathbf{p}_0$ 位于加工区域中间时, 其误差接近整体误差的平均值或中位数, 整体加工误差较小; 相反, 当 $\mathbf{p}_0$ 向加工区域两端靠近时, 函数 F 会相应增大, 导致整体加工误差变大。优化点 $\mathbf{p}_0$ 位置后, 可进一步优化工件/工具/机器人位姿, 此时需考虑机器人操作灵巧性、碰撞避免、关节极限等约束条件。

可操作性度量: 为保证机器人加工的灵活性, 需约束可操作性度量指标 $\kappa(\mathbf{J})$ [14]

$$\kappa(\mathbf{J}) = \|\mathbf{J}(\mathbf{q})\| \times \|\mathbf{J}^+(\mathbf{q})\|, \quad 1 \leq \kappa \leq \infty \quad (78)$$

$$\kappa_{\max} = \max(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n) \leq \kappa_0$$

其中 κ_0 表示可操作性度量的阈值, κ_i 表示在加工目标点 $\mathbf{p}_i$ 时的可操作性度量, n 表示目标点数目。上式表明所有目标点的 κ_i 均需在合理范围内。

碰撞避免约束: 加工时需避免机器人与工具之间的碰撞, 假定机器人各关节与工具在水平面上的投影均为矩形, 则碰撞检验可通过关节矩形 A_{ij} 与工具矩形 A_T 之间的交点数目判断

$$\text{Num}(A_{ij}, A_T) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (79)$$

其中 m 表示关节数目, Num 表示交点数目。上式表明任意点 $\mathbf{p}_i$ 与 m 个关节都不允许出现碰撞, 当 $\text{Num} > 0$ 时说明存在碰撞, 如工具位于基坐标与工件中间时易出现碰撞。

关节极限约束: 所有关节变量需在机器人控制器允许范围内

$$\theta_{j \text{ low}} \leq \theta_{ij} \leq \theta_{j \text{ up}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (80)$$

在满足上述三个约束的条件下, 最佳工件/工具/机器人位姿可通过遗传算法求解。首先确定工件/工具位姿的变量与范围, 无约束条件下的位姿包括 3 个位置和 3 个旋转变量, 而工件/工具形状与加工现场等因素会限制变量可行域; 然后根据可操作性度量、碰撞避免与关节极限约束缩小工具/工件位姿的范围; 最后用式(71)中目标函数作为适应度函数 F , 在确定优化变量、变量范围与适应度函数后, 用遗传算法通用程序求解最佳位姿。适应度函数 F 计算步骤如下所述。

(1) 已知机器人运动学参数、关节刚度、工件设计模型、加工工艺参数与目标点 p_i , 根据第 I 部分式(27)计算运动学误差引起的位姿误差矢量 ${}^P_i D_q$, 根据第 I 部分式(34)计算关节刚度引起的位姿误差矢量 ${}^P_i D_k$ 。

(2) 取靠近所有 p_i 重心的点作为补偿点 p_0 , 计算位姿误差矢量(${}^P_0 D_q, {}^P_0 D_k$)。

(3) 根据式(66)计算位姿变化矢量 ${}^P_i D_{\Delta\theta}$, 根据式(68)计算综合位姿误差矢量 ${}^P_i D_{qk\theta}$ 。

(4) 根据加工类型确定系数 D_{γ} , 由式(71)计算适应度函数 F , 通过遗传算法优化工具/工件位姿(用于指导现场工具/工件位姿的实际调整), 并根据第 I 部分式(1)计算得到最优的机器人加工位姿。

本文在建立关节误差、关节刚度与加工误差传递模型基础上, 1) 采用微调工具/工件坐标系实现加工误差的整体补偿, 整体补偿方法仅在机器人控制系统中微调工具/工件坐标系位姿, 但并未实际改变工具/工件的真实位姿; 2) 通过所有目标点整体加工误差平方和最小化优化补偿点位置、工具/工件位姿(用于指导现场实际调整), 并通过空间运动链自动计算优化后的机器人位姿。

5 参数辨识与机器人加工试验验证

5.1 手眼位姿参数辨识试验

手眼参数辨识的输入数据包括扫描仪测量点云与机器人位姿, 数据获取的控制流程如 6 所示, 首先设置扫描仪曝光率和扫描频率, 然后触发机器人控制器中的 Rapid 自动扫描程序, 扫描程序包括运动指令与通讯指令, 通讯指令保证扫描过程中机器人位姿与扫描仪数据的同步获取。位姿存储格式定义为 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, 可通过自定义函数“RPY2R()”将其转换为旋转矩阵。线激光扫描仪获取的数据为激光平面投影到工件上的轮廓线所对应的二维测

点, 格式为 $(x, 0, z)$, 其中 x 为视野宽度方向, y 为激光平面的垂直方向, z 为景深方向。测量工件时机器人需沿着近似于 y 轴方向运动, 以保证工件在合适视野内获取较多的测量数据。

图 6 工件扫描流程

手眼参数与运动学参数辨识如图 7 所示, 激光扫描现场如图 8a 所示, 导入数据并应用节 1 中方法辨识手眼参数和运动学参数, 为解决传统 Schmidt 正交化计算旋转矩阵的不确定性, 采用文献[11]的微分迭代法计算最佳正交矩阵, 3 次手眼参数辨识结果如表 2 所示。应用计算得到的 ${}^B_s T$ 将二维圆弧测点重建成三维点云(图 8b), 并通过“点云去噪-创建特征-球拟合-最佳拟合”功能对测点进行球体拟合, 两种方法获得测点与计算偏差如图 9、表 3 所示。文献[3]和本文手眼参数辨识方法重建的半径分别为 29.952 mm、29.985 mm, 测点到球面距离的平均误差分别为 -0.046 mm、-0.013 mm, 可见本文考虑运动学误差补偿的计算结果更为准确。

图 7 手眼参数辨识与线扫描测点界面

图 8 测量数据获取及标准球

1. 激光扫描仪 2. 标准球 3. 磁座
4. 线激光扫描测点 5. 拟合球 6. 球心

表 2 手眼参数辨识结果

辨识次数	位置/mm			姿态/(°)		
	x	y	z	α	β	γ
1	823.692	1 619.938	1 539.847	-2.906	-7.570	-90.290
2	823.721	1 619.930	1 539.780	-2.893	-7.588	-90.278
3	823.753	1 619.956	1 539.833	-2.920	-7.611	-90.283
标准偏差	0.031	0.013	0.036	0.014	0.020	0.006
手眼位姿矢量	[823.722 mm, 1 619.941 mm, 1 539.820 mm, -90.284°, -7.590°, -2.906°] ^T					
手眼矩阵	${}^B_S T = \begin{bmatrix} 0.98996 & 0.13166 & 0.05135 & 823.722 \\ -0.05025 & -0.01164 & 0.99867 & 1 619.941 \\ 0.13208 & -0.99122 & -0.00491 & 1 539.820 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

图 9 标准球重建与误差分析

表 3 不同手眼参数辨识方法对比(mm)

	半径值	半径偏差	测点均值误差
理想值	29.998	—	—
文献[3]方法	29.952	-0.046	0.071
本文方法	29.985	-0.013	0.049

5.2 工件位姿参数辨识试验

基于点云匹配的工件位姿参数辨识界面如图 10 所示,匹配前的粗大噪点可通过孤立点自动选择功能或手选功能删除,手选方式包括点选、线选、多边形选。匹配时可以选择 ICP、TDM、ADF、方差最小化四种算法,选择迭代次数作为点云匹配与工件参数辨识终止条件,当初始位姿偏离较远时,ADF、TDM、方差最小化迭代次数通常设置在 30 次以内,ICP 迭代次数设置在 200 次以内。匹配完成后操作界面自动生成工件位姿参数、点云匹配时间与点云匹配误差等信息。

图 10 工件位姿辨识界面

X-01 型叶片测量现场如图 11 所示,为兼顾匹配效率与匹配精度,设计模型点云规模控制在 25 万以内,为控制扫描时间,通常只测量叶盆/叶背等关键区域,测点形状不封闭,如 12a 所示。测量数据是通过线激光扫描仪的二维截面测点沿着机器人运动方向重构生成,测点在截面内与垂直截面的运动方向上间距不相同,点云密度分布不均匀。在存在上述两种固有缺陷时采用方差最小化匹配方法辨识工件位姿,计算得到叶片的工件位姿矢量 $[0.273\ 0\ \text{mm}, -0.005\ 3\ \text{mm}, 292.444\ 3\ \text{mm}, 0.265\ 9^\circ, -0.022\ 7^\circ, -72.780\ 1^\circ]^T$,从图 12c 可以看出匹配后测量点云的榫头、叶身和叶冠三个区域均与设计模型紧密贴合,没有出现明显的倾斜现象。

图 11 X-01 型叶片测量现场

图 12 X-01 型叶片匹配结果

X-02 型导轮凹/凸面的预设余量为 0.1 mm/0.3 mm, 扫描仪测量叶身后将测量点云与设计模型匹配, 方差最小匹配与 TDM/ICP 匹配对比结果如图 13、表 4 所示。图 13 中方差最小化匹配后凹面色谱和凸面色谱以不同颜色区分, 两种颜色在两块区域各自保持一致, 而 TDM/ICP 匹配后凹面色谱、凸面色谱包含其他颜色, 在不同区域颜色不一致, 表 4 中凹面距离偏差绝对值(0.004 mm)、凸面距离偏差绝对值(0.005 mm)均最小。这说明方差最小化匹配后与余量预设值(0.1 mm、0.3 mm)基本一致, 而 TDM/ICP 产生相对较大的偏离。

图 13 X-02 型叶片匹配

表 4 匹配结果对比(mm)

对比指标	TDM	ICP	方差最小化
凹面平均距离	0.143	0.129	0.104
凹面距离偏差	0.043	0.029	0.004
凸面平均距离	0.266	0.270	0.295
凸面距离偏差	-0.034	-0.030	-0.005

5.3 工具位姿参数辨识试验

为精确辨识位姿参数, 本节首先用构造法初步

辨识工具位姿参数, 然后通过圆柱工件曲面特征测量与点云匹配, 进一步辨识工件/工具位姿参数, 采用柱面的原因是相比其他曲面能更直观地反映位姿参数辨识精度。如图 14 所示, 柱面高 250 mm, 第一段为夹持面, 通过三爪卡盘安装在机器人末端, 后三段为加工面, 圆柱直径为 60 mm, 加工后用末端夹持面阵列扫描仪的测量机器人获取工件整体测量点云, 测量机器人型号为 IRB 1600, 负载 10 kg, 重复定位精度 0.05 mm, 扫描仪型号 PowerScan-Super, 测量精度为 ± 0.015 mm, 测量范围 400 mm $\times$ 320 mm, 测量景深 400 mm $\sim$ 800 mm。

图 14 圆柱测量图

通过第一段未加工区域的测量点云与设计模型匹配, 将整体工件测量点云统一到设计模型坐标系 $\{W\}$ 下。将加工区域中任意测点作为实测值 p_{is} , 寻找其在设计模型中的最近点为 p_i , 将所有对应点集 (p_{is}, p_i) 代入式(34), 通过式(37)即可求解工件位置误差 ${}^Wd = [-0.104 \text{ mm}, 0.219 \text{ mm}, 0.003 \text{ mm}]^T$ 、工件姿态误差 ${}^W\delta = [-0.161, -0.142^\circ, 0.007^\circ]^T$ 、工具位置误差 ${}^T d_z = -0.201 \text{ mm}$, 将上述 7 个位姿误差校正构造法的初始位姿参数, 然后再进行柱面加工, 得到如图 15 所示的加工误差色谱图。可见, 应用本文辨识方法加工后的圆柱直径偏差均小于构造法, 主要原因在于: (1) 构造法是在加工前辨识工具位姿, 无法反应加工时因抖动、受力变形、回转轴运动误差等引起的工具位姿参数变化; (2) 构造法的数据量相对较少, 一定程度上限制了参数辨识精度。本文方法通过加工后工件的大规模测量点云进行 7 维参数辨识, 可反应实际加工状态, 且相对充足的测量数据(>20 万)提高了参数辨识精度。

图 15 误差色谱对比

5.4 整体误差补偿与机器人加工试验

本节依旧选用三个相同的高精度标准圆柱件进行整体误差补偿与加工对比试验,如图 16 所示,磨削机器人型号 IRB 6660,最大负载 205 kg,重复定位精度 0.1 mm,砂带磨削机固定在地面上,砂带宽度 20 mm,加工时砂带转速 7.3 m/s,圆柱工件固定在机器人末端,设计余量 0.3 mm,共分 2 次进行磨削,磨削余量分别为 0.2 mm、0.1 mm,余量调整通过微调工具坐标系 z 轴分量实现,加工轨迹为垂直于柱面轴线的圆弧,相邻路径间隔 10 mm。

辨识工件/工具位姿后首先加工 1 号工件,如图 17a 所示,底部出现明显欠切,平均误差达 0.153 mm;根据加工误差补偿公式(59),可通过在机器人控制系统中微调工具坐标系使补偿点 p_0 处的加工误差为 0,以此实现加工误差补偿。根据式(77)可知,补偿点选在加工区域中间时的整体加工误差最小,因此分别将 2 号和 3 号圆柱的补偿点 p_0 选在圆柱顶部(4#)和中部(3#)进行误差补偿对比试验:不断微调工具坐标系,微调后选择补偿点 p_0 所在路径进行加工,并通过游标卡尺测量该区域直径来检测实际加工余量,并继续微调工具坐标系,直到该区域的实际加工余量达到设计值,最后对整个零件进行加工。补偿加工后 2 号工件平均误差为 -0.089 mm,3 号工件的平均误差为 -0.053 mm,可见通过误差补偿和优选补偿点有助于降低加工误差。当补偿点选在加工区域中间时,底部和顶部的

加工误差能较好的均衡,所有目标点整体加工误差相对较小。

图 16 加工现场及加工后实物

(a) 1号工件在局部区域出现欠切

图 17 三个圆柱工件加工效果对比

6 结论

视觉引导的机器人加工系统通常包括机器人、工件、视觉传感器、工具等多个单元,如果应用场景为大范围多机器人操作,还需考虑附加机器人、视觉跟踪仪、运动导轨等单元,这些单元之间位姿参数精确标定与运动位姿优化是控制机器人加工误差的关键。本文综述了几何误差建模、手眼/工件/工具参数辨识、系统位姿优化等国内外现状,并围绕机器人加工的空间运动链与误差传递、参数辨识与位姿优化开展了系统研究,具体包括以下几个方面。

(1) 以机器人末端与靶标相对位姿的不变性为约束条件, 研究基于关节运动学误差补偿的手眼位姿参数精确辨识方法, 解决了传统方法手眼辨识精度受限于机器人运动精度的弊端。

(2) 提出基于测点距离与其平均距离平方和最小化的工件位姿参数辨识方法, 解决了现有的绝对距离平方和最小化存在测点不封闭、密度不均、高斯噪声时出现的点云匹配失真问题。

(3) 采用大规模测点提出基于实际曲面加工误差估计的工具位姿参数辨识方法, 解决了现有静态构造法无法辨识实际加工时因抖动、受力变形、回转轴误差等产生的位姿误差问题。

(4) 以整体目标点加工误差控制为目标, 建立加工误差补偿与机器人位姿优化通用模型, 可推广应用于法向深度(磨削/铣削)、切向滑移(制孔)、角度倾斜(切边)等多种机器人加工误差控制。

本文从机器人加工系统参数辨识与位姿优化方面研究了降低加工误差的理论方法, 但实际应用时仍有若干问题有待于进一步深入研究。

(1) 机器人加工表面质量控制。本文从几何学与静力学角度研究了机器人加工误差控制方法, 但未考虑工件加工后的表面粗糙度。当工件过重时机器人末端易抖动, 这将导致加工表面不光滑, 可通过动力学建模与振动控制方法加以抑制。

(2) 机器人加工系统结构改进。工业机器人悬臂结构限制了末端刚度, 可通过结构改进的方法提升机器人刚度, 譬如: 1) 在机器人基座/末端增加专用运动机构, 通过改善机器人的动力学性能降低刚度对加工误差的影响; 2) 在机器人本体增加绳缆、平衡块、平行四边形等机构约束机器人的变形; 3) 采用并联机器人或串并混合型机器人。

(3) 通用型机器人加工平台开发。机器人加工的一大难点是曲面加工的复杂性, 不同于模块化的 CNC 机床, 机器人加工系统属于集成系统, 不同零件加工所要求的配置参数差异较大。需开发通用型机器人加工平台, 对硬件参数选取、空间布局优化、手眼位姿辨识、点云匹配与工件位姿辨识、工具位姿辨识、轨迹编程等功能集成, 使机器人加工系统变成标准化模块化智能装备, 降低开发难度, 扩大机器人在大型复杂零件加工领域的应用。

参 考 文 献

- [1] HU J S, CHANG Y J. Automatic calibration of hand-eye-workspace and camera using hand-mounted line laser[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6): 1778-1786.
- [2] CHEN W Y, DU J, XIONG W, et al. A noise-tolerant algorithm for robot-sensor calibration using a planar disk of arbitrary 3D orientation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(1): 251-263.
- [3] LI J F, ZHU J H, GUO Y K, et al. Calibration of a portable laser 3-D scanner used by a robot and its use in measurement[J]. Optical Engineering, 2008, 47(1): 1-8.
- [4] BESL P J, MCKAY N. Method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [5] POTTMANN H, HUANG Q X, YANG Y L, et al. Geometry and convergence analysis of algorithms for registration of 3D shapes[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 67(3): 277-296.
- [6] LI W L, YIN Z P, HUANG Y A, et al. Three-dimensional point-based shape registration algorithm based on adaptive distance function[J]. IET Computer Vision, 2011, 5(1): 68-76.
- [7] WANG W, YUN C, SUN K. An experimental method to calibrate the robotic grinding tool[C] // IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, 2008: 2460-2465.
- [8] SUN Y Q, GIBLIN D J, KAZEROUNIAN K. Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 204-210.
- [9] LI W L, XIE H, ZHANG G, et al. Hand-eye calibration in visually-guided robot grinding[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(11): 2634-2642.
- [10] 熊有伦, 李文龙, 陈文斌, 等. 机器人学: 建模、控制与视觉[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
XIONG Youlun, LI Wenlong, CHEN Wenbin, et al. Robotics: modeling, control and vision[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018.
- [11] XIE H, PANG C T, LI W L, et al. Hand-eye calibration and its accuracy analysis in robotic grinding[C] // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Sweden, 2015: 862-867.
- [12] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 基于方差最小化原理的三维匹配数学建模与误差分析[J]. 机械工程学报, 2017,

53(16): 190-198.

LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. Mathematical modeling and error analysis of 3D matching based on variance minimization principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 20-27.

- [13] XIE H, LI W L, YIN Z P, et al. Variance-minimization iterative matching method for free-form surface[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3), 1181-1204.

- [14] CARDOU P, BOUCHARD S, GOSSELIN C. Kinematic-sensitivity indices for dimensionally nonhomogeneous Jacobian matrices[J]. IEEE Transactions

on Robotics, 2010, 26(1): 166-173.

作者简介: 李文龙(通信作者), 男, 1980 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人加工几何建模、大型复杂零件视觉测量。

E-mail: wlli@mail.hust.edu.cn

谢核, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人加工几何建模。

E-mail: xiehe@mail.hust.edu.cn

尹周平, 男, 1972 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电子制造技术与装备、数字化智能化制造等。

E-mail: yinzhp@mail.hust.edu.cn

丁汉, 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。中科院院士。主要研究方向为机器人加工、数字化智能化制造等。

E-mail: dinghan@mail.hust.edu.cn