DOI: 10.3901/JME.2021.07.154

机器人加工几何误差建模研究：I 空间运动链与误差传递*

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：以机器人作为制造装备执行体，集成视觉等智能传感器，实现大型复杂零件小余量磨削/铣削/切边/制孔是智能制造的前沿研究方向之一，目前加工误差难以降低是制约其应用的主要难题。以加工误差降低为主要目标，以机器人、视觉传感器、工件、工具为主要对象，研究视觉引导的机器人加工几何误差建模与精度控制，具体包括：在第 I 部分介绍几何误差建模与参数辨识国内外研究现状，研究机器人加工空间运动链与加工误差度量指标定义，推导静态误差(源于工件/工具位姿误差)定量传递模型与动态误差(源于关节运动学误差/关节弱刚度)定量传递模型；在第 II 部分建立手眼位姿参数、工件位姿参数、工具位姿参数等精确辨识的目标函数与计算方法，在考虑关节运动学误差和弱刚度变形的情况下，提出面向整体误差控制的机器人加工(磨削/铣削/切边/制孔等)位姿优化通用模型。

关键词：几何误差建模；空间运动链；位姿参数辨识；加工误差传递

中图分类号：TH161

The Research of Geometric Error Modeling of Robotic Machining: I Spatial Motion Chain and Error Transmission

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: It is one of the frontier research directions of intelligent manufacturing to use robots as manufacturing equipment executor integrating intelligent vision sensors to realize small margin grinding/milling/cutting/drilling for large and complex parts. At present, the main problem confronting in application is that the machining error is hard to reduce. The study systematically investigates the geometric error modeling and accuracy control of visually-guided robotic machining, where the machining error reduction is regarded as the main objective and the robot/visual sensor/workpiece/tool are regarded as the main targets. The first I part introduces the research status of geometric error modeling and parameter identification, studies the spatial motion chain and metric index definition of robotic machining, and derives the static error (originating from workpiece/tool pose error) transmission model as well as dynamic error (originating from joint kinematic error and joint weak stiffness) transmission model. The second II part builds the objective function and calculation method of accurate identification for hand-eye/workpiece/tool pose parameters, and proposes a general pose optimization model of robotic machining (grinding/milling/cutting/drilling) for overall error control, where the joint kinematic error and weak stiffness deformation are both considered.

Key words: geometric error modeling; spatial motion chain; pose parameter identification; machining error transmission

0 前言

航空/核电/风电叶片、船舰螺旋桨桨叶、飞机机

翼蒙皮等大型复杂零件广泛应用于国家高端装备领域，其几何精度对工作性能与服役寿命影响巨大，这一类零件的精密加工代表我国高端装备制造领域的核心竞争力。目前我国对该类零件的磨削/切边/制孔以手工为主，存在产品一致性差、精度难控、效率低下、现场粉尘/尖锐噪音对人体有害等诸多问

* 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, 20201101 收到修改稿

题, 如何实现该类零件的高效精密加工已成为我国高端装备制造业面临的难点问题之一。

机器人具备柔性高、成本低、工作范围大等优点, 以机器人作为制造装备执行体, 集成视觉/力觉智能传感器, 替代人类手工或数控机床, 实现大型复杂零件小余量磨削/铣削/切边/制孔为解决上述问题提供了新的研究思路^[1-5]。近年来, 国内外科研机构围绕机器人加工系统集成、理论方法与技术突破开展了深入研究。弗朗霍夫研究所、柯马机器人公司、马德里理工大学等联合发起了 HEPHESTOS 计划^[6-7], 研究难加工材料机器人磨削、抛光与铣削技术, 2010 年欧盟启动了 COMET 计划^[8], 以实现 $50\text{ }\mu\text{m}$ 铣削加工精度为目标, 研究机器人加工参数标定、轨迹实时跟踪、基于视觉/力觉感知的加工误差补偿等; 美国 EI 公司与波音公司共同研制了 ONCE 系统^[9], 该系统由移动导轨上的 KUKA 工业机器人搭载多功能末端执行器组成, 用于 F 系列战斗机副翼蒙皮制孔与镗窝加工, 孔位精度达 1.5 mm , 镗窝精度达 0.064 mm , 大大提高了飞机装配的数字化水平; 中航国际 ARITEX 公司采用发那科重型机器人研制了 ADH 智能钻孔机器人, 在空客 A380 腹板整流罩、A350 龙骨梁、A350 机身 19 段、A320 总装线成功应用; 德国航空航天中心与库卡公司联合设计了一套多机器人多功能柔性制造单元 MFZ, 用于机身、翼片等大型飞机构件小批量生产与检测, 系统定位精度可达 $\pm 0.2\text{ mm}$; 美国航空制造商 ATK 公司与国家国防制造与加工中心、英格索尔机床公司合作开发出复合材料结构自动化检测系统, 将库卡机器人与自动铺带设备集成起来, 对丝束褶皱、缝隙、重叠、杂质等进行在线检测; 浙江大学自主研发了机器人制孔系统^[10-11], 采用二维视觉传感器和激光跟踪仪进行工件定位和参数标定, 在某型号机身壁板装配中实现了钻、铰、镗窝等自动化制孔操作; 上海交通大学^[12-13]提出一种可用于并联机器人加工系统的运动参数标定方法, 计算效率相比传统方法提升 20%, 并考虑关节角约束、奇异性约束、轨迹光滑度约束等, 提出机器人位姿优化与刚度提升方法, 实验发现优化后加工特征几何误差提升 25% 以上。此外, 华中科技大学^[14-15]、天津大学^[16]、清华大学^[17]、北京航空航天大学^[18]、中航工业集团^[19]、ABB 公司^[20]、法国国家科学院^[21]、诺丁汉大学^[22]、阿肯色大学^[23]、摩德纳大学^[24]等围绕机器人加工系统参数辨识与加工误差控制开展了深入研究。

加工误差难以降低是制约工业机器人加工技术

应用的主要难题^[25-29], 具体原因包括以下几点。

(1) 机器人加工系统位姿误差: 包括机器人位姿、手眼位姿、工件位姿、工具位姿等误差。加工现场诸多不确定因素都会导致位姿误差, 如关节运动学误差易造成机器人位姿误差与手眼位姿辨识误差; 视觉传感器在测量过程中产生的点云不完整、密度不均等固有缺陷极易使匹配时设计模型倾向于高密度测点区域, 从而造成工件位姿辨识误差; 靶标难以直接精确获取工具坐标系特征点, 会造成工具位姿辨识误差。上述位姿误差都会通过空间运动链的传递造成加工误差的累积。

(2) 工业机器人绝对定位精度相对较低, 通常只有数控机床的 $1/30$ ^[30-31]。空载状态机器人绝对定位误差 90% 源于关节运动学误差, 没有运动学校正的机器人绝对定位精度仅为毫米级^[32]。手眼、工件等位姿参数辨识误差都与机器人绝对定位误差有关, 最终会引起机器人加工误差。

(3) 由于机器人的悬臂结构与关节减速器的弱刚性, 工业机器人的末端刚度 ($\leq 1\text{ N}/\mu\text{m}$) 通常只有数控机床的 $1/50$, 由于关节弱刚度, 500 N 可使机器人产生 1 mm 变形^[33-35]。此外难加工金属材料、薄壁自由曲面、大范围加工等技术特点和操作要求进一步加大了机器人加工受力与误差控制的复杂性。

视觉引导的工业机器人加工系统通常包括机器人、视觉传感器、工件、工具等硬件单元, 机器人加工误差一方面与手眼位姿参数辨识误差、工件位姿参数辨识误差、工具位姿参数误差有关, 另一方面即使位姿参数辨识无误, 工业机器人固有的关节运动学误差、弱刚度特性也会影响机器人加工误差。为此本文以“机器人加工几何误差建模”为题, 在第 1 部分介绍几何误差建模与参数辨识国内外现状, 研究视觉引导的机器人加工空间运动链与加工误差几何度量, 推导静态误差(源于工件/工具位姿误差)定量传递模型与动态误差(源于关节运动学误差/关节弱刚度)定量传递模型; 在第 2 部分建立手眼位姿参数、工件位姿参数、工具位姿参数等精确辨识目标函数与计算方法, 在考虑关节运动学误差和弱刚度变形的情况下, 提出面向整体误差控制的机器人加工位姿优化通用模型。

1 国内外研究现状

1.1 几何误差建模

机器人加工几何误差建模是系统参数辨识与整体误差控制的基础, 主要包含两个层面: 第一是定

义加工误差度量指标,即建立实际加工点与理论加工点空间距离的数学表达;第二是构建加工误差传递模型,即通过加工点位姿误差构建系统几何误差与加工误差的定量传递模型。

加工误差度量可定义为实际加工点到理论加工点所在设计曲面的最近距离,因此加工误差度量可以归结为点-曲面距离的计算问题。如果用微分运动描述实际加工点与理论加工点的位姿关系,则点-曲面距离可表示成微分运动的函数,即点-曲面距离函数。许多学者深入研究了距离函数的精确描述,常见的方式是将理论加工点作为最近点,从而衍生出点-点距离函数^[36]与点-切面距离函数^[37-38]。朱利民等^[39]在点-切面距离函数基础上推导了点-曲面距离函数的一阶/二阶微分增量,并将其用于曲面轮廓定位误差度量指标;HE 等^[40]考虑微分运动后加工点的法矢变化,推导了距离函数与二阶微分运动的线性表达式,仿真实验表明该方法在曲面误差评估时相比一阶距离函数的拟合精度更高;李文龙等^[41]考虑曲面特征,通过引入权重系数将点-点与点-切面距离进行线性组合,提出适应性距离函数(Adaptive distance function, ADF),其中高/低曲率区域需采用较小/大的权重系数,以此获得的点-曲面最近距离的近似表达式;POTTMANN 等^[42-43]将最近点所在邻域假定为曲率球推导了发生微分运动时的点-曲面距离,包括点-切面距离函数和考虑曲面最大最小曲率半径的距离函数两类,并将其应用于测点匹配定位与曲线曲面拟合计算。

加工误差传递模型是构建系统几何误差与加工误差的映射关系。系统位姿误差包括机器人、工件、工具等位姿误差,其中机器人位姿误差主要受关节运动学误差与关节刚度影响,位姿误差通过空间运动链的传递使实际加工点与理论加工点之间产生位姿误差,从而引起加工误差。运动学模型是误差传递建模的基础,D-H(Denavit-Hartenberg)变换^[44]是目前使用最多的运动学模型,它通过运动学方程的雅可比矩阵建立机器人关节误差与末端定位误差的传递关系。运动学模型也可用 POE (Product of exponential)^[45]公式表示,POE 公式用运动量表示相邻关节位姿,优点是在相邻关节平行时不会产生参数的不连续性,但是要建立关节运动学参数与矩阵指数的映射关系。WU 等^[46]在仅已知机器人位置条件下建立初始变换误差/关节零位误差与末端定位误差的映射模型;HE 等^[47]进一步考虑初始变换、关节零位与关节旋量等运动学误差的相关性,建立三种机器人运动学误差模型。关节弱刚度引起

的变形误差传递模型的研究重点是构建关节刚度与末端变形量之间的函数关系,刚度椭球^[48-49]是常见的关节刚度模型,它描述不同方向上的机器人末端刚度,如椭球长轴上的刚度最大而变形最小,刚度椭球对应 3×3 的力-线位移(位置误差)刚度矩阵,但该方法忽略了力矩与姿态误差。

综上所述:传统的点-点与点-切面距离形式未考虑曲率特征,难以准确描述实际加工点到理论加工点的空间距离(即加工误差);现有加工误差传递模型集中于研究关节运动学误差/弱刚度与末端定位误差的传递关系,对于机器人加工系统,需构建关节运动学误差/弱刚度变形、工件/工具位姿误差等系统几何误差与加工误差的传递模型,为从整体上实现加工误差控制提供基础。

1.2 手眼位姿参数辨识

手眼关系根据机器人与视觉传感器的相对位置可分为眼在手型和眼在外型,眼在手型是视觉传感器安装在机器人末端,可随机器人一起运动,眼在外型是视觉传感器固定在机器人本体以外,不跟随机器人运动,如图 1 所示。

图 1 机器人加工系统示意图

在手眼参数辨识时,常引入标准靶标作为测量对象,以眼在外型为例,定义 $\{B\}$ 、 $\{E\}$ 、 $\{P\}$ 和 $\{S\}$ 分别为机器人基坐标系、末端坐标系、靶标坐标系和视觉传感器坐标系,定义 4×4 齐次变换矩阵

$${}^M_N T = \begin{bmatrix} {}^M_N R & {}^M t_{NO} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \in SE(3)$$

式中, ${}^M_N\mathbf{T}$ 为 $\{N\}$ 相对 $\{M\}$ 的空间位姿, 其中 ${}^M_N\mathbf{R} \in SO(3)$ 和 ${}^M\mathbf{t}_{NO} \in \mathbb{R}^3$ 表示旋转矩阵和平移矢量。靶标坐标系 $\{P\}$ 相对基坐标系 $\{B\}$ 位姿可表示为变换矩阵乘积形式

$${}^B_E\mathbf{T}_P^E\mathbf{T} = {}^B_S\mathbf{T}_P^S\mathbf{T}$$

式中, 机器人位姿 ${}^B_S\mathbf{T}$ 可通过控制器获得; 靶标在 $\{S\}$ 中的位姿 ${}^S_P\mathbf{T}$ 可通过视觉传感器获得; 靶标位姿 ${}^E_P\mathbf{T}$ 为不变的未知量; ${}^B_S\mathbf{T}$ 为待求的手眼参数。

目前手眼参数辨识研究主要包括面向基本问题和面向特定场景应用两类。求解上述方程是手眼参数辨识中的第一种基本问题^[50-52], 可简写为 $\mathbf{AX}=\mathbf{YB}$ 。如图 1b 所示, 两次变换机器人的位姿可得方程组

$${}^B_E\mathbf{T}_1^E\mathbf{T} = {}^B_S\mathbf{T}_1^S\mathbf{T}_1 \text{ 和 } {}^B_E\mathbf{T}_2^E\mathbf{T} = {}^B_S\mathbf{T}_2^S\mathbf{T}_2$$

消去位姿 ${}^E_P\mathbf{T}$ 后可得

$$({}^B_E\mathbf{T}_2^E\mathbf{T}_1^{-1})_S\mathbf{T} = {}^B_S\mathbf{T}({}^S_P\mathbf{T}_2^S\mathbf{T}_1^{-1})$$

该式简写为

$$\mathbf{CX} = \mathbf{XD}$$

式中, $\mathbf{C} = {}^B_E\mathbf{T}_2^E\mathbf{T}_1^{-1}$ 和 $\mathbf{D} = {}^S_P\mathbf{T}_2^S\mathbf{T}_1^{-1}$ 分别表示坐标系 $\{E\}$ 和 $\{P\}$ 在两种机器人位姿 (${}^B_E\mathbf{T}_1$, ${}^B_E\mathbf{T}_2$) 下的相对位姿, 求解该方程是手眼参数辨识中的第二种基本问题^[53-55]。许多学者^[56-62]深入研究了这两种问题: ① 根据求解是否迭代可分为封闭解法与迭代解法^[56-57]。封闭解法速度快但缺乏稳定性, 迭代法精度高但严重依赖初值; ② 根据位置 $\mathbf{t}$ 与姿态 $\mathbf{R}$ 求解的先后顺序可分为分步求解法与同步求解法。分步求解简单高效, 但求解姿态 $\mathbf{R}$ 的误差会影响位置 $\mathbf{t}$ 的计算精度, 同步求解可有效避免该问题, 但易受测量噪声干扰, 姿态 $\mathbf{R}$ 也难以保证正交性; ③ 根据求解方程阶次可分为线性解与非线性解。线性解采用拟合算法计算手眼参数, 非线性解采用迭代法或高斯-牛顿等非线性优化算法计算手眼参数, 常见的方式是通过做差 ($\mathbf{AX}-\mathbf{YB}$) 构建误差平方和目标函数, 从而将手眼参数辨识转换为非线性最优化问题; ④ 根据位姿的数学表达式可分为纯四元数、对偶四元数、齐次矩阵、李群、欧几里得群等方法。如 LI 等^[51]通过对偶四元数表示旋转矩阵与平移矢量, 避免纯四元数法的误差传递, SHAH 等^[57]通过奇异值分解分步求解 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$, 改善了四元数法的不稳定性, 并建立手眼参数辨识误差矩阵, 将不同机器人位姿下所测特征点位置差的 Frobenius 范数作为手眼参数求解的评判指标。

面向特定场景应用的优化主要通过优选视觉传感器与靶标改进手眼参数辨识精度。常用视觉传感

器有跟踪系统^[44,63]、立体相机^[64-65]、线激光扫描仪^[60,66]与面阵激光扫描仪^[67]等, 常用的靶标有棋盘格^[68-69]、标准球^[60,70]、平面^[64,71]、圆盘^[66]等。目前很多视觉传感器都只能获取靶标位置, 无法获取靶标姿态, 此时方程 $\mathbf{AX}=\mathbf{YB}$ 中位姿 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 无法直接使用。WU 等^[63]避开测量靶标姿态, 通过只测量靶心位置识别手眼参数, REN 等^[67]在无法获取靶标位置的情况下, 用四元数求解跟踪系统中设备之间的相对姿态, HU 等^[64]将平面作为靶标, 利用不同机器人位姿下激光条纹的共面约束实现相机内部参数与空间位姿(机器人-相机-工作平面)同步辨识。综合考虑测量效率、精度与稳定性等因素, 大型复杂零件机器人加工系统常选择激光扫描仪作为视觉传感器, 以标准球作为靶标, 如扫描仪投射激光到球上生成圆弧状的二维测点, 圆弧拟合测点即可计算球心位置。由于无法获取球心姿态, 此时手眼辨识方程变成位置变换方程 ${}^B_E\mathbf{T}^E\mathbf{p} = {}^B_S\mathbf{T}^S\mathbf{p}$, 其中 S_P 和 E_P 分别表示靶标在坐标系 $\{S\}$ 和 $\{E\}$ 的位置。为此 XU 等^[60]利用三维旋转矩阵与欧拉角之间的转换关系计算正交矩阵, 并通过提高球心拟合精度提升手眼辨识精度和航空叶片机器人磨削质量; CHEN 等^[66]将圆盘作为靶标, 通过线激光的投射位置与投射宽度计算圆盘中心位置。

综上所述: ① 手眼参数辨识会引入毫米级的误差, 其辨识精度受限于机器人定位精度, 空载状态机器人的定位精度主要取决于运动学误差, 尽管可用激光跟踪仪进行校正^[72], 但操作设备昂贵、现场操作复杂; ② 上述方法通过最小二乘拟合得到的手眼旋转矩阵不满足正交性条件, 常用的 SCHMIDT^[70]与欧拉角^[60]法忽略了正交解的不唯一带来的不确定性误差。

1.3 工件位姿参数辨识

点云匹配是曲面工件参数位姿辨识的通用方法, 它通过形状对比将工件测量点云与设计模型统一到一个坐标系^[73]。点云匹配属于自动定位方法, 适合没有典型几何定位特征的工件, 可有效提高大型复杂零件机器人加工系统的灵活性。

ICP(Iterative closest point)^[36]是应用最广泛的迭代匹配算法之一, 它将测点到设计模型中的最近距离表示为点-点距离, 然后通过最小化距离平方和目标函数求解刚体变换参数, 其中搜索最近点与计算变换参数迭代进行。ICP 是线性收敛计算方法, 收敛速度慢、易陷入错误的局部最优值。改进 ICP 的第一种策略是定义新的距离函数, 如常见的 TDM(Tangent distance minimization)算法采用点-切

面距离^[38,42]构造目标函数,从而实现二次收敛。第二种策略是根据特定要求改进匹配算法,李泽湘等^[74]对比 ICP 等六种匹配算法对初始姿态的稳定性,提出针对局部加工工件和对称特征的匹配算法;WANG 等^[75]将匹配目标函数定义为参考点云中任意两点间距离与另一点云中对应的两个最近点之间的距离差的最大值,该方法可用于不同测量点云的数据融合。其他类似改进方法包括加速最近点搜索^[76]、增加几何约束^[77]、对测点分配不同权重^[78]、按比例缩放匹配 (Scale-ICP)^[79]、细分匹配 (Subdivision-ICP)^[80]等。第三种策略是通过全局搜索算法提升 ICP 匹配精度,如用遗传算法寻找目标函数全局最小值,用粒子群算法优化三维特征描述其参数^[81],用分支界定法约束目标函数值的上下限^[82],这些方法可用于获得全局最优解。

上述方法提升了 ICP 匹配精度、速度与稳定性,但在机器人加工中,测量点云通常存在形状不封闭、密度不均匀、高斯噪声等现场固有缺陷,如何在存在测量缺陷的情况下保证匹配精度是控制加工误差的关键之一。HUANG 等^[83]考虑不同扫描仪的测量点云差异,在保留整体几何特征的情况下,将三维测点转换为由超像素构成的三维图像,由于测量缺陷集中在局部区域,所以通过三维图像去除局部特征可降低对测量缺陷的敏感性;QUAN 等^[84]提出一种用于低质量测点匹配的局部特征描述器,该方法通过改进随机采样一致性等算法^[85]去除体外孤点并保留内部点集,然后在精匹配阶段用 ICP 匹配算法迭代计算最终的刚体变换参数;BING 等^[86]提出采用高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)进行点云匹配,该方法将参考点云表示为 GMM 质心,然后通过最大似然函数将质心拟合到目标点云,将点云匹配问题转换为概率密度估计问题,该方法对高斯噪声与孤立点有较好的稳定性。

综上所述:上述方法都是基于测点到设计模型对应点距离平方和最小化原理进行匹配操作的,当存在测点密度不均、测点不完整、高斯/粗大噪音时,设计模型会倾向于高密度测点区域,匹配陷入局部最优,可能导致手眼参数辨识失真。

1.4 工具位姿参数辨识

工具位姿辨识通常采用靶标在工具上的触碰与坐标轴方向上的运动构造工具坐标系,根据使用的靶标类型可分为顶针^[87-88]、线性可变差动变压器 (Linear variable differential transformer, LVDT)^[89]、测头^[60]、反射靶球^[44]等辨识方法。

(1) 顶针辨识:将顶针 A 固定在机器人末端,

取其顶点作为工具坐标中心点 (Tool center point, TCP)。TCP 位姿可结合多点构造法^[90-91]与固定在机器人以外的顶针 B 确定,然后采用构造法确定工具位姿。步骤如下:第一步,控制机器人运动,通过顶针 A 触碰工具确定工具原点 p_1 ,工具原点可作为线段中点或圆弧中心进行识别;第二步,顶针 A 从原点开始沿着工具坐标系的 x 轴运动,确定点 p_2 ;第三步,从原点开始沿着 z 轴运动,确定点 p_3 。通过点 p_1-p_3 即可构造工具坐标系。

(2) LVDT 辨识:该方法将顶针替换成 LVDT, LVDT 是一种接触式直线位移传感器,在触碰物体时会产生回弹,可避免顶针的刚性过接触和非接触导致的辨识精度降低问题。

(3) 测头辨识:该方法将顶针替换成可回弹的接触式测头,测头位姿可通过靶球确定。测点顶端是蓝宝石球,这种基于球-球接触计算工件坐标系的方法,可改善顶针法点-点接触不准的问题。

(4) 反射靶球辨识:该方法先识别机器人在激光跟踪仪坐标系下的位姿,然后将靶球粘到工具表面,通过精确测量靶球位置特征点提升辨识精度。

综上所述:① 上述方法可认为是静态构造法,即在工具静止状态时构造工具坐标系,但工具在加工时因抖动、受力变形、回转轴误差等都会产生位姿变化,工具在加工状态与静止状态的工具位姿并不相同;② 上述方法均先通过机器人的运动识别靶标位姿,然后采用多点法构造工具坐标系,靶标位姿累积误差、特征点定位误差、数据量少等因素极大地限制了工具位姿参数辨识精度。

1.5 系统位姿参数优化

机器人加工系统包括机器人位姿、工件位姿与工具位姿等三种基本位姿,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,位姿误差会通过空间运动链的传递造成加工误差。位姿的优化选取在几何与受力两方面同时影响加工精度、加工稳定性与加工效率,其中加工精度是制约工业机器人在加工领域应用的核心问题^[49,92],为此许多学者从关节运动学误差与弱刚度变形两方面研究工件/工具/机器人位姿优化方法^[93-95]。

基于关节运动学误差的位姿优化主要分为误差补偿与指标优化两类。误差补偿通常先识别运动学误差,然后根据运动学模型补偿关节变量实现位姿优化,如 NUBIOLA 等^[44]用最小二乘拟合激光跟踪仪的测量数据,识别机器人 29 个运动学误差,通过运动学误差补偿优化后的机器人定位误差从 0.968 mm 降到 0.364 mm;ZHAO 等^[96]通过迭代学

习与控制算法识别机器人运动学参数, 然后通过补偿机器人轨迹实现路径的精确跟踪; 另一种误差补偿方法不需要指定运动学模型, 只需给定机器人名义/真实位姿, 就能通过遗传规划^[97]计算最优运动学模型。基于运动学误差指标的位姿优化属于开环控制, 机器人位姿调整较大, 如 ZHANG 等^[98]提出基于递归神经网络的评价指标, 通过关节角度约束、速度约束与周期性干扰约束, 实现机器人位姿控制; MITSU 等^[99]提出一种用于优化机器人基坐标位置与末端位姿的目标函数, 该函数定义为预设与实际的末端位姿矩阵中各元素之差的距离平方和。

基于关节刚度的位姿优化主要分为变形补偿与指标优化两种。变形补偿先通过关节刚度与受力预测变形量, 然后通过位姿微调实现变形量的闭环控制。WANG 等^[100]将柔性臂测量机的测头固定在机器人末端, 用于跟踪机器人的变形量, 变形补偿后定位误差下降约 60%; BACKER 等^[101]建立工具变形模型, 由力传感器测得工具所受外力, 然后通过变形模型补偿机器人位姿, 实验表明在 2 000 N 受力下的加工路径最大偏差从补偿前的 1.62 mm 下降到 0.55 mm; SCHNEIDER 等^[102]采用光学测量仪辨识 KUKA 机器人关节刚度, 然后结合受力预测位姿误差, 并提出基于定位误差预测的离线补偿与基于实时测量 TCP 位姿的在线补偿方法^[28]。基于变形指标的位姿优化主要通过刚度椭球与关节力矩建立评价指标。BU 等^[49]以刚度椭球在钻孔深度方向上的投影为评价指标优化机器人钻孔位姿, 减小了沉头孔在深度上的加工误差; 柯映林等^[103]通过刚度椭球计算机器人在钻孔时的切向刚度, 并以切向刚度之和为评价指标优化机器人在导轨上的位置与加工轴的角度, 可减小工具沿工件表面的滑移; LIN 等^[48]综合刚度椭球与外部受力, 提出描述机器人的末端变形指标, 并生成与关节角和外力相关的运动性能映射图, 通过对六个关节映射图的综合分析优化机器人整体位姿、工作空间与工件位姿。

综上所述: ① 上述方法普遍单独考虑关节运动学误差或弱刚度变形误差, 而机器人加工时, 运动学误差和弱刚度变形都是不可忽略的因素。基于实测变形的补偿方法虽然不需要考虑具体误差源, 但系统配置相对较高、现场操作较为复杂; ② 上述刚度椭球等间接评价方法主要针对加工深度(切深)误差, 忽略了姿态误差与力矩, 难以直接应用于倾斜度等方向类加工误差的控制。

2 机器人加工空间运动链

机器人加工系统包括静态单元(工件、工具及辅助定位单元)与运动单元(机器人及附加运动模块)两大部分, 按工件安装位置可分为工件型(机器人夹持工件)与工具型(机器人夹持工具)两类, 其运动链具有相似性, 本文以工件型为例进行研究。如图 2 所示(其中工件固接在机器人末端), $\{B\}$ 、 $\{E\}$ 、 $\{W\}$ 、 $\{S\}$ 、 $\{T\}$ 分别表示机器人基坐标系、末端坐标系、工件坐标系、视觉传感器坐标系、工具坐标系。

图2 机器人加工系统示意图

在坐标系 $\{W\}$ 中, 按设计模型生成的加工路径被离散成 s 个目标点 $\{p_1, \dots, p_i, \dots, p_s\}$, 以点 p_i 为原点, 以点 p_i 法矢(切深方向) n_i 为 z 轴, 以任意两个互相垂直切矢 τ_1 、 τ_2 为 x 、 y 轴, 构造坐标系 $\{P_i\}$, 此时每一个目标点对应一个加工位姿。当加工点 p_i 时, 目标点坐标系 $\{P_i\}$ 与工具坐标系 $\{T\}$ 重合, 对应刚体变换方程

$$\begin{aligned} {}^B T_{P_i} &= {}^B T_E {}^E T_W {}^W T_{P_i}, \\ {}^B T_{P_i} &= {}^B T_T \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ${}^B T_E$ 表示运动单元位姿, 当无附加运动模块时 ${}^B T_E = {}^0 T \dots {}^{j-1} T_j \dots {}^{m-1} T_m$, 其中 ${}^{j-1} T_j (j \geq 1)$ 表示连杆坐标系 $\{j\}$ 相对 $\{j-1\}$ 的位姿, m 为关节数量; ${}^E T_W$ 表示工件坐标系位姿, 由于工件存在装夹误差, 每次装夹时需辨识工件位姿 ${}^E T_W$ 。定义单个测点在 $\{S\}$ 下观测的位置 ${}^S p_i \in \mathbb{R}^3$, 通过空间运动链可得测点在 $\{E\}$ 下的坐标 ${}^E p_i = ({}^B T)^{-1} {}^B T_S {}^S p_i$, 其中手眼参数 ${}^B T_S$ 表示传感器坐标系 $\{S\}$ 相对基坐标系 $\{B\}$ 的位姿。通过测点 ${}^E P = \{{}^E p_1, \dots, {}^E p_i, \dots, {}^E p_n\}$ 与设计模型 Q 的三维匹配计算工件位姿 ${}^E T_W$, 定义 ${}^E P$ 在 Q 中的对应点集 ${}^W P$, 则匹配变换方程 ${}^E P = {}^E T_W {}^W P$; ${}^W T_{P_i}$ 表示按设计模型加工路径生成的目标点位姿, 与运动单元位姿 ${}^B T_E$ 和工件位姿 ${}^E T_W$ 无关。

图3所示为工件型机器人加工系统的封闭运动

链,该链由三条从运动单元出发的开环运动子链组成:①运动单元位姿 ${}^B_E T \rightarrow$ 视觉传感器位姿 ${}^B_S T \rightarrow$ 目标点 ${}^S p_i$;②运动单元位姿 ${}^B_E T \rightarrow$ 工件位姿 ${}^E_W T \rightarrow$ 目标点位姿 ${}^W p_i$;③运动单元位姿 ${}^B_E T \rightarrow$ 工具位姿 ${}^B_T T$ 。根据上述运动链可得影响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 ${}^T D$ 。在几何上,目标点 p_i 的加工误差取决于坐标系 $\{P_i\}$ 与 $\{T\}$ 的重合程度,对应位姿误差矩阵

$$\Delta {}^B_{P_i} T = {}^B_{P_i} T - {}^B_T T \quad (2)$$

对于任意刚体变换矩阵 ${}^M_N T$ 的误差 $\Delta {}^M_N T$ 在坐标系 $\{M\}$ 和 $\{N\}$ 下的微分算子满足

$${}^M \Delta = (\Delta {}^M_N T) {}^N_M T, {}^N \Delta = {}^N_M T (\Delta {}^M_N T) \quad (3)$$

因此位姿误差矩阵 $\Delta {}^B_{P_i} T$ 转换到坐标系 $\{P_i\}$ 下的微分算子为

$$\begin{aligned} {}^P \Delta &= {}^P_B T (\Delta {}^B_{P_i} T) = {}^P_B T ({}^B_E T {}^E_W T {}^W_{P_i} T - {}^B_T T) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -{}^P \delta_z & {}^P \delta_y & {}^P d_x \\ {}^P \delta_z & 0 & -{}^P \delta_x & {}^P d_y \\ -{}^P \delta_y & {}^P \delta_x & 0 & {}^P d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

对应微分运动矢量

$$\begin{aligned} {}^P D &= ({}^P \Delta)^\vee = ({}^P_B T ({}^B_E T {}^E_W T {}^W_{P_i} T - {}^B_T T))^\vee \\ &= [{}^P d_x, {}^P d_y, {}^P d_z, {}^P \delta_x, {}^P \delta_y, {}^P \delta_z]^\top \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ${}^P D \in \mathfrak{R}^6$ 表示 $\{P_i\}$ 相对自身的位姿误差矢量,包括位置误差 ${}^P d = [{}^P d_x, {}^P d_y, {}^P d_z]^\top$ 和姿态误差 ${}^P \delta = [{}^P \delta_x, {}^P \delta_y, {}^P \delta_z]^\top$, $\vee$ 表示将微分算子转换为微分运动矢量的算子, $\wedge$ 是其逆算子,逆算子也可以表示为符号 $[\]$ 的形式。式(5)中矩阵 ${}^W_{P_i} T$ 与模型中加工路径点的分布有关,不存在位姿误差,因此 ${}^P D$ 主要受工件位姿 ${}^E_W T$ 、工具位姿 ${}^B_T T$ 与运动单元位姿 ${}^B_E T$ 的影响。工件/工具位姿误差对加工误差的传递模型将在第4节介绍,运动单元位姿误差对加工误差的传递模型将在第5节介绍。

图3中运动单元位姿误差 $\Delta {}^B_E T (\Delta q, k)$ 反映了机器人的定位精度,主要受运动学误差 Δq 与关节刚度 k 影响,这也是机器人加工精度低于机床的重要原因。一方面,手眼位姿 ${}^S T$ 、工件位姿 ${}^E_W T$ 等参数辨识都需要通过机器人的多次运动来实现,此时机器

人处于轻负载,运动学误差 Δq 是主要误差源。另一方面,金属类大型复杂零件加工过程切削力比较大,机器人的弱刚性不能忽略,此时关节运动学误差 Δq 与关节刚度 k 是主要误差源。

图3 机器人加工空间运动链与误差传递关系

3 几何误差检测方法

根据式(5),当 $\{P_i\}$ 存在位姿误差 ${}^P D$ 时,目标点 p_i 的实际位置为

$$q_i = p_i + {}^P d = p_i + {}^P d_x \tau_1 + {}^P d_y \tau_2 + {}^P d_z n_i \quad (6)$$

通过点-切面距离表示点 p_i 的法向加工误差

$$\varepsilon_T(p_i) = (q_i - p_i)^\top n_i = {}^P d_z \quad (7)$$

通过点-点距离表示点 p_i 的加工误差

$$\varepsilon_I(p_i) = \|q_i - p_i\| = \sqrt{{}^P d_x^2 + {}^P d_y^2 + {}^P d_z^2} \quad (8)$$

上述两种表达式并未考虑由切向位置误差 $({}^P d_x, {}^P d_y)$ 引起理论点的变化,点 q_i 对应的理论加工点并非还是点 p_i 。如图4a所示, S 为设计曲面。假定点 p_i 位于凸形曲面上,曲率半径为 ρ_i ,曲率中心为 O ,则点 p_i 的邻域可近似为由中心 O 与半径 ρ_i 构成的球面。由于点 q_i 应位于对应点的法矢方向,过点 q_i 作球面的垂线,则垂足 p_{i+} 为 q_i 对应的理论点。很明显点 q_i 、点 p_{i+} 与中心 O 共线,则点 p_{i+} 的加工误差

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho(p_{i+}) &= |q_i O| - |p_{i+} O| = \\ &= \sqrt{(\rho_i + {}^P d_z)^2 + {}^P d_x^2 + {}^P d_y^2} - \rho_i \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)表示点 p_{i+} 的加工误差,由于点 p_i 与 p_{i+} 处于同一邻域,它们的位置误差存在关系 ${}^{P_{i+}} d \approx {}^P d + o({}^P d)$,且它们具有相同的曲率半径($\rho_{i+} = \rho_i$)与中心($O_{i+} = O_i$),则上式可写为

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho(p_{i+}, \rho_{i+}, {}^{P_{i+}} d) &= \sqrt{(\rho_{i+} + {}^{P_{i+}} d_z - o({}^P d_z))^2 + ({}^{P_{i+}} d_x - o({}^P d_x))^2 + ({}^{P_{i+}} d_y - o({}^P d_y))^2} - \rho_{i+} = \\ &= \sqrt{(\rho_i + {}^P d_z)^2 + {}^P d_x^2 + {}^P d_y^2} - \rho_i \end{aligned} \quad (10)$$

图 4 不同曲面的加工误差计算示意图

因此点 p_{i+} 的加工误差由自身曲率半径 ρ_{i+} 与位置误差 ${}^R d$ 共同决定, 由于点 p_i 与 p_{i+} 位于曲面 S 的共同邻域, 其加工误差也满足式(10), 将该式中点 p_{i+} 的参数信息 $(p_{i+}, \rho_{i+}, {}^R d)$ 替换为参数 $(p_i, \rho_i, {}^R d)$, 可得到点 p_i 的加工误差

$$\varepsilon_\rho(p_i, \rho_i, {}^R d) = \sqrt{(\rho_i + {}^R d_z)^2 + {}^R d_x^2 + {}^R d_y^2} - \rho_i \quad (11)$$

上式即考虑了位置误差 $({}^R d_x, {}^R d_y)$ 的加工误差计算公式, 也可以表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho(p_i) &= \sqrt{(\rho_i + (q_i - p_i)^T n_i)^2 + ((q_i - p_i)^T \tau_1)^2 + ((q_i - p_i)^T \tau_2)^2} - \\ &\quad \rho_i = \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i(q_i - p_i)^T n_i + \|q_i - p_i\|^2} - \rho_i = \\ &\quad \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i \varepsilon_T + \varepsilon_l^2} - \rho_i \end{aligned} \quad (12)$$

式中, ε_T 表示点-切面距离误差; ε_l 表示点-点距离误差, 上式是针对凸形曲面, 同理可得凹形曲面的加工误差。故曲面加工误差可统一表示为

$$\varepsilon_\rho = \begin{cases} \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i \varepsilon_T + \varepsilon_l^2} - \rho_i & \text{凸面} \\ \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i \varepsilon_T + \varepsilon_l^2} & \text{凹面} \end{cases} \quad (13)$$

可见当点 p_i 位于高曲率区域时, 半径 ρ 很小

($\rho \rightarrow 0$), 加工误差 ε_ρ 等价于点-点距离误差 ε_l ($\varepsilon_\rho = \varepsilon_l$); 如图 3c 所示, 当点 p_i 位于平坦区域时, 半径 ρ 很大 ($\rho \rightarrow \infty$), $\rho_i^2 + 2\rho_i \varepsilon_T + \varepsilon_l^2 \approx \rho_i^2 + 2\rho_i \varepsilon_T + \varepsilon_T^2$, 加工误差 ε_ρ 等价于点-切面距离误差 ($\varepsilon_\rho = \varepsilon_T$)。即

$$\varepsilon_\rho = \begin{cases} \varepsilon_l = \|q_i - p_i\| & \rho_i \rightarrow 0 \\ \varepsilon_T = (q_i - p_i)^T n_i & \rho_i \rightarrow \infty \end{cases} \quad (14)$$

式(11)~(13)加工误差计算模型假设工件与工具之间为点接触, 计算的是目标点 p_i 在切削深度上的误差, 可作为型面加工误差的度量指标。

4 静态误差定量传递模型

图 3 中第一条运动链将视觉传感器上获得的工件测点转移到机器人末端坐标系表示, 并通过测点与工件设计模型匹配完成工件定位, 手眼位姿误差实质上是影响工件位姿误差而影响加工误差的, 故下面重点分析由工件/工具位姿误差导致的加工误差传递问题。设工件坐标系 $\{W\}$ 相对自身的位姿误差矢量为 ${}^W D \in \mathbb{R}^6$, 对应微分运动矢量 ${}^W D$ 与运动算子 ${}^W A$, 与所引起目标点坐标系 $\{P_i\}$ 的位姿误差矢量满足速度伴随变换^[104]

$${}^P_i D = \text{Ad}_V({}^W T^{-1}) {}^W D = \begin{bmatrix} {}^W R^T & -{}^W R^T [{}^W t_{P_i}] \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^W R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^W d \\ {}^W \delta \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(15)展开可得位置误差

$${}^P_i d = {}^W R^T {}^W d - {}^W R^T [{}^W t_{P_i}] {}^W \delta \quad (16)$$

将曲率半径 ρ_i 与位置误差 ${}^P_i d$ 代入式(11), 可得点 p_i 的加工误差

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i {}^P_i d^T n_i + {}^P_i d^T {}^P_i d} - \rho_i \quad (17)$$

若通过式(7)中点-切面距离简化加工误差, 则加工误差为法向误差 ${}^P_i d_z$, 由式(16)得

$${}^P_i d_z = n_i \cdot {}^W d - n_i \cdot ({}^W t_{P_i} \times {}^W \delta) \quad (18)$$

式中, n_i 为矩阵 ${}^W R$ 的第三列, 表示 $\{P_i\}$ 的 z 轴在工件坐标系 $\{W\}$ 的方向矢量。误差 ${}^P_i d_z$ 包括两部分: (1) 工件位置误差 ${}^W d$ 在加工深度方向 n_i 上的投影; (2) 工件姿态误差 ${}^W \delta$ 引起点 p_i 的位置变化量在加工深度方向 n_i 上的投影。式(18)定量描述了工件存在工件位姿误差矢量 ${}^W D$ 时, 机器人点接触加工产生的法向加工误差 ${}^P_i d_z$ 。

设工具坐标系 $\{T\}$ 相对自身的位姿误差矢量为 ${}^T D \in \mathbb{R}^6$, 对应微分运动矢量 ${}^T D$ 与运动算子 ${}^T A$, 根据式(3)计算目标点坐标系 $\{P_i\}$ 与工具坐标系 $\{T\}$ 之间的位姿误差

$$\Delta_{P_i}^T T = ({}^T \Delta) {}_{P_i}^T T = {}^T \Delta \quad (19)$$

其中理论位姿 ${}_{P_i}^T T = I_{4 \times 4}$, 将位姿误差 $\Delta_{P_i}^T T$ 转换到坐标系 $\{P_i\}$ 下表示

$${}_{P_i} \Delta = {}_{P_i}^T T^{-1} (\Delta_{P_i}^T T) = {}^T \Delta \quad (20)$$

故对应坐标系 $\{P_i\}$ 下表示的微分运动矢量

$${}_{P_i} D = ({}_{P_i} \Delta)^\vee = {}^T D \quad (21)$$

将上式中的位置误差代入式(17), 并采用点-切面距离表示为法向加工误差, 得

$${}_{P_i} d_z = ({}_{P_i} D)^T D_z = {}^T d_z \quad (22)$$

式中, 系数 $D_z = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$ 。式(22)定量描述了工具存在位姿误差矢量 ${}^T D$ 时, 机器人点接触加工产生的法向加工误差 ${}_{P_i} d_z$ 。

对比式(18)和(22)可知, 计算工件/工具位姿误差矢量 (${}^W D, {}^T D$) 引起目标点 p_i 的加工误差时, 需要将其转换为坐标系 $\{P_i\}$ 下表示的位置误差 ${}_{P_i} d$ 。上述公式未考虑姿态误差 ${}_{P_i} \delta$ 对加工误差的影响, 这是因为假定工具与工件表面为点接触状态, 若考虑工具轴线的接触长度, 则工具与工件表面为线接触。如图5所示, 对于不同切削方式下的机器人加工, 统一定义点 p_i 法向(加工深度方向)作为坐标系 $\{P_i\}$ 的 z 轴, 任一切向作为坐标系 $\{P_i\}$ 的 y 轴(通常可选择进给方向作为 y 轴), 则由工件/工具位姿误差引起的法向加工误差可统一表示为

图5 不同切削方式下坐标系 $\{P_i\}$ 的定义

$${}_{P_i} d_\gamma = ({}_{P_i} D)^T D_\gamma \quad (23)$$

式中, 系数 D_γ 的选取如表1所示。磨削/侧铣型面误差、端铣型面误差、制孔孔深误差描述的是在加工深度方向的加工误差, 磨削/侧铣方向误差描述的是

在进给方向的加工误差, 制孔位置误差描述的是刀具中心偏置引起的加工误差, 制孔方向误差描述的是刀具轴线偏转引起的加工误差。

表1 不同加工方向上的 D_γ 值

磨削/侧铣		端铣
型面误差	方向误差	型面误差

$D_\gamma = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$	$D_\gamma = [0, 0, 0, 0, 1, 0]^T$	$D_\gamma = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$
制孔		
孔深误差	位置误差	方向误差

$D_\gamma = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$	$D_\gamma = [1, 1, 0, 0, 0, 0]^T$	$D_\gamma = [0, 0, 0, 1, 1, 0]^T$

5 动态误差定量传递模型

下面分析由关节运动学误差/关节弱刚度导致的加工误差问题。定义关节向量参数 q , 由运动学误差 Δq 导致的机器人位姿误差

$$\Delta_E^B T_q = {}_E^B T(q + \Delta q) - {}_E^B T(q) \quad (24)$$

根据式(3), 将位姿误差 $\Delta_E^B T_q$ 转换在坐标系 $\{E\}$ 下, 可表示为微分算子

$${}^E \Delta_q = {}_E^B T^{-1}(q) \Delta_E^B T_q \quad (25)$$

当位姿误差很小时, ${}^E \Delta_q$ 对应微分运动矢量

$${}^E D_q = ({}^E \Delta_q)^\vee = ({}_E^B T^{-1}(q) \Delta_E^B T_q)^\vee \quad (26)$$

式中, ${}^E D_q \in \mathbb{R}^6$ 表示由运动学误差 Δq 引起末端坐标系 $\{E\}$ 的位姿误差矢量。末端坐标系 $\{E\}$ 与目标点坐标系 $\{P_i\}$ 的位姿误差矢量满足速度伴随变换

$${}_{P_i} D_q = \begin{bmatrix} {}_{P_i}^E d_q \\ {}_{P_i}^E \delta_q \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} {}_{P_i}^E R & [{}_{P_i}^E t_{E0}]_E^T \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}_{P_i}^E R \end{bmatrix} {}^E D_q = \text{Ad}_V({}_{P_i}^E T) {}^E D_q = \text{Ad}_V({}_{P_i}^E T) ({}_E^B T^{-1}(q) ({}_E^B T(q + \Delta q) - {}_E^B T(q)))^\vee \quad (27)$$

式中, ${}_{P_i}^E d_q$ 和 ${}_{P_i}^E \delta_q$ 分别表示由运动学误差导致 $\{P_i\}$ 的位置误差矢量和姿态误差矢量, 将位置误差 ${}_{P_i}^E d_q$ 和曲率半径 ρ_i 代入式(11), 得加工误差

$$\varepsilon_q(p_i) = \sqrt{\rho_i^2 + 2\rho_i {}_{P_i}^E d_q^T n_i + \|{}_{P_i}^E d_q\|^2} - \rho_i \quad (28)$$

采用点-切面距离表示的法向加工误差

$$\varepsilon_q(p_i) = {}^P d_z = ({}^P \mathbf{D}_q)^T \mathbf{D}_z \quad (29)$$

加工误差 ε_q 的计算步骤: ① 对于给定目标点 p_i , 由空间运动链方程式(1)计算机器人名义位姿 ${}^B \mathbf{T}(q)$; ② 根据逆运动学求解关节变量 θ , 并通过参数辨识的方法(将在第 II 部分介绍)计算 Δq ; ③ 计算真实位姿 ${}^B \mathbf{T}(q+\Delta q)$, 根据式(24)计算机器人位姿误差 $\Delta {}^B \mathbf{T}_q$; (4) 根据式(27)计算位姿误差矢量 ${}^P \mathbf{D}_q$, 最后根据式(28)或(29)计算加工误差 ε_q 。

假设机器人本体各部件自重相对切削力可忽略不计, 只考虑加工点处切削力对加工误差影响。设点 p_i 所受的广义力旋量

$${}^P \mathbf{F} = [{}^P \mathbf{f}, {}^P \mathbf{m}]^T$$

式中, ${}^P \mathbf{f} \in \mathfrak{R}^3$ 和 ${}^P \mathbf{m} \in \mathfrak{R}^3$ 分别表示纯力和力矩。机器人末端受力 ${}^E \mathbf{F}$ 与 ${}^P \mathbf{F}$ 满足力伴随变换

$${}^E \mathbf{F} = \begin{bmatrix} {}^E \mathbf{R} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ [{}^E \mathbf{t}_{P_{io}}]_{}^E \mathbf{R} & {}^E \mathbf{R} \end{bmatrix} {}^P \mathbf{F} = \text{Ad}_F({}^E \mathbf{T}) {}^P \mathbf{F} \quad (30)$$

式中, Ad_F 为力伴随变换符号, 与速度伴随变换满足对偶关系 $\text{Ad}_V^T({}^M \mathbf{T}) = \text{Ad}_F^{-1}({}^M \mathbf{T})$ 。在基坐标系 $\{B\}$ 下的末端受力 ${}^E \mathbf{F}$ 可表示为

$${}^B \mathbf{F}_E = \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{R} & {}^E \mathbf{f}_E \\ {}^B \mathbf{R} & {}^E \mathbf{m}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{R} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^B \mathbf{R} \end{bmatrix} {}^E \mathbf{F} = \text{Sr}({}^B \mathbf{R}) {}^E \mathbf{F} \quad (31)$$

式中, Sr 为自定义的空间旋转变换符号。根据机器人刚度模型^[104], 由关节弱刚度引起的机器人末端相对机器人基坐标系的位姿误差矢量

$${}^B \mathbf{D}_{Ek} = (\mathbf{J} \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}^T) {}^B \mathbf{F}_E \quad (32)$$

其中空间雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 与机器人位姿有关, $\mathbf{K}_\theta = \text{diag}(k_1, \dots, k_6)$ 为关节刚度矩阵, k_j 是第 j 个关节的刚度值。位姿误差矢量 ${}^B \mathbf{D}_{Ek}$ 在 $\{E\}$ 下可表示为

$${}^E \mathbf{D}_k = \text{Sr}({}^E \mathbf{R}) {}^B \mathbf{D}_{Ek} \quad (33)$$

位姿误差 ${}^E \mathbf{D}_k$ 引起目标点 p_i 的位姿误差矢量

$$\begin{aligned} {}^P \mathbf{D}_k &= \text{Ad}_V({}^P \mathbf{T}) {}^E \mathbf{D}_k = \\ &= \text{Ad}_V({}^P \mathbf{T}) \text{Sr}({}^E \mathbf{R}) \mathbf{J} \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}^T \text{Sr}({}^B \mathbf{R}) \text{Ad}_F({}^E \mathbf{T}) {}^P \mathbf{F} = \\ &= \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\mathbf{X}_F = \text{Ad}_V({}^P \mathbf{T}) \text{Sr}({}^E \mathbf{R}) \mathbf{J} \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}^T \text{Sr}({}^B \mathbf{R}) \text{Ad}_F({}^E \mathbf{T})$$

式中, $\mathbf{X}_F$ 为 6×6 的系数矩阵。因此由关节弱刚度引起目标点 p_i 的法向加工误差可表示为

$$\varepsilon_k = {}^P d_z = ({}^P \mathbf{D}_k)^T \mathbf{D}_z = (\mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F})^T \mathbf{D}_z \quad (35)$$

误差 ε_k 的计算步骤: ① 对于给定目标点 p_i , 根

据运动链方程(1)计算机器人位姿 ${}^B \mathbf{T}(q)$; ② 采用矢量积方法^[102] 计算空间雅可比矩阵 $\mathbf{J}$; ③ 根据式(34) 计算位姿误差矢量 ${}^P \mathbf{D}_k$, 并根据式(35)计算加工误差 ε_k 。

上述计算过程基于以下假设: ① 忽略工件重量对机器人受力的影响; ② 工件和工具均为刚体; ③ 加工时外力恒定并不受加工余量的影响。若考虑加工余量对外力的影响, 定义设计余量 a_d , 加工误差 ε_k , 则实际加工余量 $(a_d - \varepsilon_k)$, 此时外力 ${}^P \mathbf{F}$ 与实际加工余量 $(a_d - \varepsilon_k)$ 正相关, 法向加工误差可重新表示为

$$\varepsilon_k = (\mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}_i(a_d - \varepsilon_k))^T \mathbf{D}_z = \mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}_i(a_d - \varepsilon_k) \quad (36)$$

对 ${}^P \mathbf{F}(a_d - \varepsilon_k)$ 在余量 a_d 处一阶泰勒展开

$$\varepsilon_k = \mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}(a_d - \varepsilon_k) \approx \mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F ({}^P \mathbf{F}(a_d) - \varepsilon_k {}^P \mathbf{F}'(a_d)) \quad (37)$$

式中, ${}^P \mathbf{F}'(a_d)$ 表示 ${}^P \mathbf{F}$ 对余量 a_d 的导数, 根据上式可进一步计算加工误差

$$\varepsilon_k = \frac{\mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}(a_d)}{1 + \mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}'(a_d)} \quad (38)$$

式中, 导数 ${}^P \mathbf{F}'(a_d)$ 反映了切削力旋量 ${}^P \mathbf{F}$ 对工件余量的灵敏程度。当工件为高硬度难切削材料时, 微小余量会产生很大切削力, 此时导数 ${}^P \mathbf{F}'(a_d)$ 较大。极端情况下, 式(38)分母中 1 忽略不计, 则

$$\varepsilon_k \approx \frac{\mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}(a_d)}{\mathbf{D}_z^T \mathbf{X}_F {}^P \mathbf{F}'(a_d)} = a_d \quad (39)$$

这说明当材料硬度远超于机器人关节刚度可承受范围时, 加工误差等于设计余量, 即不产生实际切削, 可见关节刚度对加工误差影响很大。

6 结论

(1) 研究了工件型机器人加工空间运动链, 得到影响机器人加工几何误差的主要因素, 包括关节运动学误差 Δq 、关节刚度 $\mathbf{k}$ 、手眼位姿误差 ${}^S \mathbf{D}$ 、工件位姿误差 ${}^W \mathbf{D}$ 与工具位姿误差 ${}^T \mathbf{D}$ 。

(2) 研究了考虑曲面曲率特征的加工误差几何度量指标与数学表达式, 为机器人加工位姿参数辨识与整体误差控制提供了理论基础。

(3) 推导了工件/工具位姿误差与机器人加工误差定量传递模型, 以及关节运动学误差/关节弱刚度变形与机器人加工误差定量传递模型。

空间运动链与几何误差传递涉及机器人基/末

端坐标系、工件坐标系、视觉传感器坐标系、工具坐标系等多个单元, 现有研究大多局限于有限坐标系的运动学建模与位姿参数标定。双/多机器人测量-加工一体化智能操作系统是机器人加工的重要发展方向, 相比单机器人系统增加了机器人、跟踪仪、运动导轨等单元, 如何建立机器人集群的空间运动链与几何误差传递模型, 是实现双/多机器人智能加工系统整体误差控制的关键。

参 考 文 献

- [1] 陶波, 赵兴炜, 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]. Science in China: Technological Sciences, 2018, 48(12): 1302-1312.
- [2] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 1-17.
HAO Daxian, WANG Wei, WANG Qilong, et al. Applications and development trend of robotics in composite material process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 1-17.
- [3] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. International Journal of Aerospace, 2011, 4(1): 1373-1379.
- [4] TUNC L, SHAW J. Investigation of the effects of stewart platform-type industrial robot on stability of robotic milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(4): 189-199.
- [5] WAN A, XU J, CHEN H P, ZHANG S, et al. Optimal path planning and control of assembly robots for hard-measuring easy-deformation assemblies[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1600-1609.
- [6] SCHRECK G, SURDILOVIC D, KRUGER J. HEPHESTOS: Hard material small-batch industrial machining robot[C]// International Symposium on Robotics and Robotik, Germany, 2014: 239-244.
- [7] BRUNETE A, GAMBAO E, KOSKINEN J, HEIKKILÄ T, et al. Hard material small-batch industrial machining robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 54: 185-199.
- [8] LEHMANN C, PELLICCIARI M, DRUST M, et al. Machining with industrial robots: The COMET project approach[C]// International Workshop on Robotics in Smart Manufacturing, Portugal, 2013: 27-36.
- [9] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (One-Sided Cell End Effector) robotic drilling system[C]// International SAE Aerospace Automated Fastening Conference and Exhibition, United Kingdom, 2002: 2626-2634.
- [10] 曲巍巍, 董辉跃, 柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1959.
QU Weiwei, DONG Huiyao, KE Yinglin. Pose accuracy compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1951-1959.
- [11] ZHU W D, MEI B, YAN G R, KE Y L. Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(2): 160-171.
- [12] PENG J F, DING Y, ZHANG G, DING H. An enhanced kinematic model for calibration of robotic machining systems with parallelogram mechanisms[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59: 92-102.
- [13] XIONG G, DING Y, ZHU L M. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 53: 19-28.
- [14] LI W L, XIE H, ZHANG Gang, YAN S J, et al. Hand-eye calibration in visually-guided robot grinding[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(11): 2634-2642.
- [15] LIN Y, ZHAO H, DING H. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 59-72.
- [16] REN, Y J, YIN S B, ZHU J G. Calibration technology in application of robot-laser scanning system[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 1-7.
- [17] SONY Y X, LV H B, YANG Z H. An adaptive modeling method for a robot belt grinding process[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(2): 309-317.
- [18] 公茂震, 袁培江, 王田苗, 等. 航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1400-1404.
GONG Maozhen, YUAN Peijiang, WANG Tianmiao, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1400-1404.
- [19] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术, 2010, (2): 47-50.
DU Baorui, FENG Ziming, YAO Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft

- component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, (2): 47-50.
- [20] BROGARDH T. Present and future robot control development—an industrial perspective[J]. *Annual Reviews in Control*, 2007, 31(1): 69-79.
- [21] MOUSAVI S, GAGNOL V, BOUZGARROU B, et al. Dynamic modeling and stability prediction in robotic machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9-12): 3053-3065.
- [22] JAYAWEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(2): 180-194.
- [23] ZHAO Y M, LIN Y, XI F F, et al. Switch-based sliding mode control for position-based visual servoing of robotic riveting system[J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(4): 041010-11.
- [24] LEALI F, VERGNANO A, PINI F, et al. A workcell calibration method for enhancing accuracy in robot machining of aerospace parts[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1-4): 47-55.
- [25] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. *航空学报*, 2019, 40(3): 53-72.
- HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of robot precise belt grinding for aero-engine blade[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(3): 53-72.
- [26] 赵建国, 于思阳, 黄宁. 数字化协同测量在飞机弱刚性零件加工中的应用[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(5): 46-50.
- ZHAO Jianguo, YU Siyang, HUANG Ning. Digital collaborative measurement used to processing weak rigid parts on aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(5): 46-50.
- [27] MOELLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. *International Journal of Aerospace*, 2017, 10(2): 100-108.
- [28] SCHNEIDER U, DRUST M, ANSALONI M, et al. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1-4): 3-15.
- [29] KLIMCHIK A, AMBIEHL A, GARNIER S, et al. Experimental study of robotic-based machining[J]. *International Federation of Automatic Control*, 2016, 49(12): 174-179.
- [30] MUSTAFA S K, TAO P Y, YANG G L, et al. A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulators[C]// *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Canada, 2019: 738-743.
- [31] SCHNEIDER U, ANSALONI M, DRUST M, et al. Experimental investigation of sources of error in robot machining[J]. *Robotics in Smart Manufacturing*, 2013, 371: 14-26.
- [32] 杨桂林. 工业机器人运用技术[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 785-792.
- YANG Guilin. Applied industrial robotics[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 785-792.
- [33] LIENENLUKE L, GRANDEL L, STORMS S, et al. Model-based process planning for milling operations using industrial robots[C]// *International Conference on Control and Robotics Engineering*, Japan, 2018: 37-44.
- [34] ZHANG H, PAN Z X, ZHU Z Q, et al. Chatter analysis of robotic machining process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(3): 301-309.
- [35] GUO Y J, DONG H Y, WANG G F, et al. Vibration analysis and suppression in robotic boring process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 101: 102-110.
- [36] 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.
- [37] Chen Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, 1991: 2724-2729.
- [38] MATABOSCH C, FOFI D, SALVI J, et al. Registration of surfaces minimizing error propagation for a one-shot multi-slit hand-held scanner[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(6): 2055-2067.
- [39] ZHU L M, ZHANG X M, DING H, et al. Geometry of signed point-to-surface distance function and its application to surface approximation[J]. *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2010, 10(4): 041003.
- [40] HE G Y, ZHANG M, SONG Z J. Error evaluation of free-form surface based on distance function of measured point to surface[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 65: 11-17.
- [41] 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.
- [42] POTTSMANN 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.
- [43] WANG W P, POTTMANN H, LIU Y. Fitting B-spline curves to point clouds by curvature-based squared distance minimization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(2): 214-238.
- [44] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [45] CHEN G L, WANG H, LIN Z Q. Determination of the identifiable parameters in robot calibration based on the POE formula[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(5): 1066-1077.
- [46] WU L, YANG X D, CHEN K, et al. A minimal POE-based model for robotic kinematic calibration with only position measurements[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, 12(2): 758-763.
- [47] HE R B, ZHAO Y J, YANG S N, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(3): 411-423.
- [48] LIN Y, ZHAO H, DING H. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 59-72.
- [49] BU Y, LIAO W H, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 388-400.
- [50] WANG C C. Extrinsic calibration of a vision sensor mounted on a robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(2): 161-175.
- [51] LI A G, WANG L, WU D F. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration using dual-quaternions and Kronecker product[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2010, 5(10): 1530-1536.
- [52] WU L, WANG J L, QI L, et al. Simultaneous hand-eye, tool-flange, and robot-robot calibration for comanipulation by solving the $AXB=YCZ$ problem[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(2): 413-428.
- [53] FASSI I, LEGNANI G. Hand to sensor calibration: A geometrical interpretation of the matrix equation[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 22(9): 497-506.
- [54] ANDREFF N, HORAUD R, ESPIAU B. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(3): 228-248.
- [55] HORAUD R, DORNAIKA F. Hand-eye calibration[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2011, 14(3): 195-210.
- [56] ERNST F, RICHTER L, MATTHAUS L, et al. Non-orthogonal tool/flange and robot/world calibration[J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2012, 8(4): 407-420.
- [57] SHAH M. Solving the robot-world/hand-eye calibration problem using the Kronecker product[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2013, 5(3): 1-7.
- [58] MALTI A, BARRETO J P. Robust hand-eye calibration for computer aided medical endoscopy[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, 2010: 5543-5549.
- [59] BRIESE D, NIEBLER C, ROSE G. Hand-eye calibration using dual quaternions in medical environment[J]. *Medical Imaging*, 2014, 90361U(6 pp).
- [60] XU X H, ZHU D H, ZHANG H Y, et al. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(1-4): 635-647.
- [61] HA J, KANG D, PARK F C. A stochastic global optimization algorithm for the two-frame sensor calibration problem[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2434-2446.
- [62] ACKERMAN M K, SHIFFMAN B, BOCTOR E, et al. Sensor calibration with unknown correspondence: Solving $AX=XB$ using Euclidean-group invariants[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Japan, 2014: 1308-1313.
- [63] WU L, REN H L. Finding the kinematic base frame of a robot by hand-eye calibration using 3D position data[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(1): 314-324.
- [64] 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.
- [65] CHANG W C, WU C H. Eye-in-hand vision-based robotic bin-picking with active laser projection[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(9-12): 2873-2885.
- [66] CHEN W Y, DU J, XIONG W, et al. A noise-tolerant algorithm for robot-sensor calibration using a planar disk of arbitrary 3-D orientation[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 251-263.
- [67] REN H, KAZANZIDES P. A paired-orientation alignment problem in a hybrid tracking system for computer assisted

- surgery[J]. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2011, 63(2): 151-161.
- [68] ZHAO Z J. Hand-eye calibration using convex optimization(C)// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, China, 2011: 2947-2952.
- [69] ZHAO Z, WENG Y. A flexible method combining camera calibration and hand-eye calibration[J]. *Robotica*, 2013, 31(5): 747-756.
- [70] LISKA J, VANICEK O, CHALUS M. Hand-eye calibration of a laser profile scanner in robotic welding(C)// *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, USA, 2018: 316-321.
- [71] LEMBONO T S, SUAREZ-RUIZ F, PHAM Q C. SCALAR: Simultaneous calibration of 2-D Laser and robot kinematic parameters using planarity and distance constraints[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(4): 1971-1979.
- [72] HE L Y, LI Q C, ZHU X B, et al. Kinematic calibration of a three degrees-of-freedom parallel manipulator with a laser tracker[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2019, 141(3): 1-10.
- [73] 李文龙, 李中伟, 毛金城. iPoint3D 曲面检测软件研发与工程应用综述[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(7): 127-150.
- LI Wenlong, LI Zhongwei, MAO Jincheng. The development and application review of iPoint3D software for surface inspection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(7): 127-150.
- [74] LI Z X, GOU J B, CHU Y X. Geometric algorithms for workpiece localization[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 864-878.
- [75] WANG Y P, MORENO-CENTENO E, DING Y. Matching misaligned two-resolution metrology data[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 14(1): 222-237.
- [76] XU Y, JIANG J, LI Z X. Cyclic optimisation for localisation in freeform surface inspection[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(2): 361-374.
- [77] LIU Y H. Eliminating false matches for the projective registration of free-form surfaces with small translational motions[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B*, 2005, 35(3): 607-624.
- [78] LIU Y H. Free form shape registration using the barrier method[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(9): 1004-1016.
- [79] YING S H, PENG J G, DU S Y, et al. A scale stretch method based on ICP for 3D data registration[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(3): 559-565.
- [80] BEAREE R, DIEULOT J, RABATE P. An innovative subdivision-ICP registration method for tool-path correction applied to deformed aircraft parts machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(5): 463-471.
- [81] WACHOWIAK M, SMOLIKOVA R, ZHENG Y F, et al. An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 289-301.
- [82] YANG J L, LI H D, JIA Y D. Go-ICP: Solving 3D registration efficiently and globally optimally[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision*, Australia, 2013: 1457-1464.
- [83] HUANG X S, ZHANG J, FAN L, et al. A systematic approach for cross-source point cloud registration by preserving macro and micro structures[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 26(7): 3261-3276.
- [84] QUAN S W, MA J, HU F Y, et al. Local voxelized structure for 3D binary feature representation and robust registration of point clouds from low-cost sensors[J]. *Information Sciences*, 2018, 444: 153-171.
- [85] GUO Y L, SOHEL F, BENNAMOUN M, et al. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 105(1): 63-86.
- [86] BING J, VEMURI B. Robust point set registration using gaussian mixture models[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(8): 1633-1645.
- [87] CAI Y Y, GU H, LI C, et al. Easy industrial robot cell coordinates calibration with touch panel[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50: 276-285.
- [88] GUO C Z, XU C G, XIAO D G, et al. A tool centre point calibration method of a dual-robot NDT system for semi-enclosed workpiece testing[J]. *Industrial Robot*, 2019, 46(2): 202-210.
- [89] 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.
- [90] 周星, 黄石峰, 朱志红. 六关节工业机器人 TCP 标定模型研究与算法改进[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 186-196.
- ZHOU Xing, HUANG Shifeng, ZHU Zhihong. TCP calibration model research and algorithm improvement of

- six joint industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 186-196.
- [91] WANG W, YUN C, SUN K. An experimental method to calibrate the robotic grinding tool[C]// IEEE International Conference on Automation and Logistics, China, 2008: 2460-2465.
- [92] SCHNEIDER U, DIAZ POSADA J R, VERL A. Automatic pose optimization for robotic processes[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 2015: 2054-2059.
- [93] LI J, LI B, SHEN N Y, et al. Effect of the cutter path and the workpiece clamping position on the stability of the robotic milling system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 2919-2933.
- [94] KIANMAJD B, SOSHI M. A new methodology of finding optimal toolpath and tooling strategies for robotic-assisted arthroplasty[J]. Journal of Medical Devices, 2017, 11(1): 1-7.
- [95] DA SILVA L B, YOSHIOKA H, SHINNO H, et al. Tool orientation angle optimization for a multi-axis robotic milling system[J]. International Journal of Automation Technology, 2019, 13(5): 574-582.
- [96] ZHAO Y M, LIN Y, XI F F, et al. Calibration-based iterative learning control for path tracking of industrial robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2921-2929.
- [97] DOLINSKY J, JENKINSON I, COLQUHOUN G. Application of genetic programming to the calibration of industrial robots[J]. Computers in Industry, 2007, 58(3): 255-264.
- [98] ZHANG Y Y, LI S, KADRY S, et al. Recurrent neural network for kinematic control of redundant manipulators with periodic input disturbance and physical constraints[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 99(1): 1-12.
- [99] MITSU S, BOUZAKIS K D, SAGRIS D, et al. Determination of optimum robot base location considering discrete end-effector positions by means of hybrid genetic algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(1): 50-59.
- [100] WANG J J, ZHANG H, FUHLBRIGGE T. Improving machining accuracy with robot deformation compensation [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, USA, 2009: 3826-3831.
- [101] DE BACKER J, BOLMSJO G. Deflection model for robotic friction stir welding[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(4): 365-372.
- [102] SCHNEIDER U, MOMENI K, M, ANSALONI M, et al. Stiffness modeling of industrial robots for deformation compensation in machining[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, USA, 2014: 4464-4469.
- [103] 刘睿智. 面向切向性能增强的机器人制孔加工姿态优化与平滑算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIU Ruizhi. Facing the robot with the tangential performance enhancement research on machining posture optimization and smoothing algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [104] 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.
-
- 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