

文章编号: 1671-4229(2024)04-0001-08

工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法

邹涛, 黄敬然, 项超群, 张建辉

(广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 随着机器人技术的普及, 其在生活、工业和服务领域的应用广泛增加。在实际应用中, 机器人执行加工作业任务时常受外部因素或系统误差影响, 导致运动轨迹偏离预期路径, 影响任务完成效果。文章旨在研究工业打磨机器人机械臂运动过程中因误差与物理因素偏离原定轨迹的问题, 重点关注优化机械臂运动偏离距离补偿。研究包括使用局部加权法调整偏离距离, 降低测量误差影响, 同时提出物理影响函数, 考虑转动惯量、动摩擦及离心力等物理条件因子对偏离距离影响。研究结果显示, 打磨机器人机械臂加工圆角倒角时, 偏离距离预补偿算法使偏离距离误差从初始未修正的约 0.22 ~ 0.83 mm 减少至 0.02 ~ 0.34 mm, 且偏离浮动幅度减少了约 52.46%, 对提高打磨机器人工作效率和减少偏离误差具有重要意义。

关键词: 偏离距离; 局部加权法; 物理影响函数; 距离误差补偿

中图分类号: TP241.2 文献标志码: A

Industrial robot manipulator motion deviation distance pre-compensation algorithm

ZOU Tao, HUANG Jing-ran, XIANG Chao-qun, ZHANG Jian-hui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: As robot technology becomes more widespread, its applications in various fields such as daily life, industry, and services have significantly increased. In practical scenarios, robots performing machining tasks are often influenced by external factors or system errors, leading to deviations from the intended path and affecting task completion. This paper aims to investigate the problem of deviations from the intended trajectory during the motion of robot manipulators, with a focus on optimizing compensation for the deviation distance. The research involves the use of a locally weighted method to adjust the deviation distance, reducing the impact of measurement errors. Additionally, a physical impact function is proposed, considering physical factors such as moment of inertia, dynamic friction, and centrifugal force on the deviation distance. The research findings indicate that when robot manipulators are chamfering corners, the pre-compensation algorithm for deviation distance reduces the deviation distance error from an initial uncorrected range of approximately 0.22 mm to 0.83 mm to a range of 0.02 mm to 0.34 mm, with a reduction in deviation fluctuation of about 52.46%. This is significant for improving work efficiency and reducing deviation errors.

Key words: deviation distance; local weighted method; physical impact function; distance error compensation

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 广州市室校联合实验室资助项目(2023A03J0120)

作者简介: 邹涛(1975—), 男, 教授. E-mail: tzou@gzhu.edu.cn

引文格式: 邹涛, 黄敬然, 项超群, 等. 工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(4): 1-8.

随着机器人技术的不断发展和普及,机器人在日常生活、工业生产和服务领域的应用变得愈加广泛^[1]。然而,随着机器人运动复杂性的增加^[2],提高机器人在运动过程中的精确度和效率成为一个备受关注的问题^[3-4]。尤其是在实际应用中,机器人在执行任务时常常会受到各种外部因素或系统误差的影响,导致运动轨迹偏离预期路径^[5-6],从而影响任务的完成效果。因此,研究人员和工程师们迫切需要寻求新的方法和技术应对这些挑战,以提高机器人运动的可靠性和稳定性。这不仅关乎机器人自身的技术发展,也直接关系到机器人在现实世界中的应用效果和用户体验。

针对这一挑战,当前的研究开始集中在利用先进的控制算法、传感器技术和系统优化方法进行优化机器人的运动控制。通过这些方法的应用,可以更准确地感知和理解环境,从而更有效地规划和执行运动任务。例如采用基于深度学习的视觉系统,可以使机器人更精确地识别和跟踪目标^[7],减少由于视觉误差而导致的运动偏差。同时,结合惯性导航传感器和环境感知技术,可以实现对机器人姿态及位置的实时监测和调整^[8],从而提高其运动的稳定性和可控性。

张文欣等^[9]通过速度分析法,建立机器人重复定位精度数学模型,分别讨论了机器人空间姿态、关节随机运动误差、机器人 D-H 参数对重复定位精度的影响。陈家林等^[5]建立机器人运动学模型,通过控制变量法对机器人末端定位误差各参数进行讨论,得出定位误差对运动误差的影响程度。但上述两种方法均未考虑机器人机械臂在运动作业时受到的物理条件及环境因素的影响。

在工业打磨机器人的打磨作业中,经常遇到需要处理加工件圆角、凹凸面等弧形区域表面的情况^[10]。在进行这些表面处理时,磨具经过转角时,其加速度会发生变化,并且由于离心力等因素的存在^[11],磨具很容易偏离其理论上应贴合的打磨表面轨迹,从而产生偏移距离。这种偏移距离可能导致工件质量不达标,增加生产成本,甚至影响到生产线的效率和稳定性。

本研究提出了一种“工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法”,旨在研究工业打磨机

器人打磨时的运动偏离距离补偿。该算法主要对经过转换矩阵后的坐标进行距离求解,对偏离距离采用局部加权回归的方法从而减小误差,同时用影响函数表征物理条件对偏离距离影响,最终通过坐标轴的偏离分量将坐标回调,实现偏离距离调整。能够在保证系统稳定性的同时,有效地提高打磨机器人在运动过程中的定位精度和响应能力。

1 偏离距离分析

为确保工业打磨机器人生产的高效性,预先对机器人的末端执行器运动进行偏移距离进行补偿至关重要^[12]。这需要参考以往打磨机器人磨具的多次偏移距离,并通过加权的方法综合考虑物理环境因素的影响,以减小误差并得出更精确的补偿值^[13]。通过反复迭代的过程,逐步优化回调坐标,最终实现理想的补偿效果,从而达到预先补偿机器人运动的目标^[14-16]。

由于磨具装载在末端执行器上,因此,将末端执行器中心视为磨具中心点进行分析。针对磨具在打磨圆角时的运动,可以将其简化为若干个曲线运动,即理想轨迹为“*A*点”到“*B*点”。然而,由于磨具自身的转动惯量、动摩擦以及圆弧运动所产生的离心力等因素,导致实际轨迹偏离理想轨迹,即从“*A*点”到“*B*点”,从而产生偏离距离 s ,如图 1 所示。

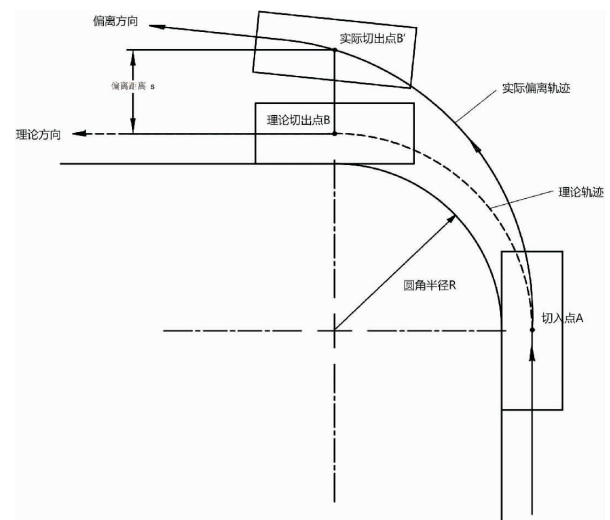


图 1 偏离距离示意图

Fig. 1 Diagram of deviation distance

当物体在做圆周运动时,其位置可以通过角度来描述。对于一个半径为 R 的圆,物体在角度 θ 处的位置用向量 r 表示,即

$$r = R \cdot \cos(\theta)i + R \cdot \sin(\theta)j, \quad (1)$$

其中, i 和 j 是单位向量,分别表示 x 和 y 轴的方向。

现考虑物体在圆周上运动的情况,其角速度为 ω 。在经过时间 t 后,物体走过的角度为 θ 。将 θ 代入上述位置向量中,计算出物体在时间 t 后的位置向量为

$$r = R \cdot \cos(\omega t)i + R \cdot \sin(\omega t)j. \quad (2)$$

当考虑机械误差、系统误差和测量误差时,实际轨迹与理论轨迹之间会存在偏离距离 Δs ^[17]。此偏离距离可以视为在理论位置向量的基础上添加一个修正向量来描述:

$$r_{\text{实际}} = r(t) + \Delta r(t), \quad (3)$$

其中, $r(t)$ 是理论位置向量; $\Delta r(t)$ 是修正向量,表示机械误差、系统误差和测量误差引起的偏离。

将修正向量分解为 x 轴和 y 轴方向的分量:

$$\Delta r(t) = \Delta x(t)i + \Delta y(t)j. \quad (4)$$

因此,实际位置向量可以写为

$$r_{\text{实际}} = [R\cos(\omega t) + \Delta x(t)]i + [R\sin(\omega t) + \Delta y(t)]j. \quad (5)$$

假设磨具为非匀质圆盘,则在自身绕中心轴高速转动时受到转动惯量影响,转动惯量导致的惯性力会影响打磨圆盘的运动状态^[18],使其偏离自身中心轴线,从而导致磨具偏离原定轨迹。

对于圆盘上的某一小质量元 dm ,其距离旋转轴的距离为 r 。在圆周运动中,该质量元受到的向心加速度为 $a_c = \omega^2 r$,其中, ω^2 是角速度。向心力(惯性力)是由圆盘的旋转引起的,可以表示为

$$F_{\text{in}} = dm \cdot \omega^2 \cdot r. \quad (6)$$

该质量元对于旋转轴产生的力矩 dM 由惯性力 F_{in} 乘以距离 r 得到,即

$$dM = F_{\text{in}} \cdot r = dm \cdot \omega^2 \cdot r^2. \quad (7)$$

对整个圆盘来说,总力矩 M_{total} 是所有质量元产生的力矩之和,通过对圆盘上的所有质量元积分得到:

$$M_{\text{total}} = \int dm \cdot \omega^2 \cdot r^2 = I \cdot \omega^2. \quad (8)$$

根据牛顿第二定律的旋转形式,由 $M_{\text{total}} = FL$ 得中心偏移距:

$$L_{\text{in}} = \frac{M_{\text{total}}}{F} = \frac{\omega^2}{\alpha}. \quad (9)$$

考虑了磨具自身旋转的转动惯量、机械臂的惯性以及拐弯时受到的离心力等因素后,对于第 i 个小段,其偏移距离公式可以表示为

$$s_i = \Delta s_i + (L_{\text{in}} + L_{\alpha} + L_{\text{rest}})_i, \quad (10)$$

其中, Δs_i 表示机械误差与系统误差等导致的误差偏距, L_{in} 表示磨具自身的转动惯量产生的偏距, L_{α} 表示打磨机器人绕圆角受离心力产生的偏距, L_{rest} 表示其他物理因素导致的偏距。

整体的平均偏移距离可以通过累加每个小段的偏移距离得到:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N [\Delta s_i + (L_{\text{in}} + L_{\alpha} + L_{\text{rest}})_i]}{N}, \quad (11)$$

其中, N 表示有限元化的小段数。

在每个小段距离趋近于极短距且经过极短时间 dt 的情况下,从时间 T_1 到 T_2 的平均偏移距离 \bar{s}_i 表示为积分形式:

$$\bar{s}_i = \frac{\int_{T_1}^{T_2} (L_{\text{in}} + L_{\alpha} + L_{\text{rest}})_i dt}{T_2 - T_1} + \overline{\Delta s}_i (T_2 - T_1), \quad (12)$$

其中, $\overline{\Delta s}_i$ 表示机械误差与系统误差等导致的误差偏距的平均值。

2 运动偏离距离补偿

该算法研究思路通过变换矩阵 T 将打磨机器人坐标 P 转换为 TP ,然后将其与理论轨迹的坐标矩阵 Q 相减,以得到数学上的偏离轨迹 s ;采用局部加权回归方法来纠正偏离距离 s 所受到的机械误差和测量误差的影响;考虑转动惯量、动摩擦和离心力等物理条件对偏离距离的影响,并用影响函数形式代入偏离距离 s 的公式;该过程经过反复迭代后,当输出结果在设定的目标阈值以下时,即可作为该机器人工作运动坐标进行使用。将更新后的偏离距离 s 离散化为 xyz 轴的偏移分量,再代入测量的打磨机器人末端执行器中心的坐标向量 $P = (x, y, z, 1)^T$,获得新的真实世界中的坐标向量 P' 。思路具体实现流程如图2所示。

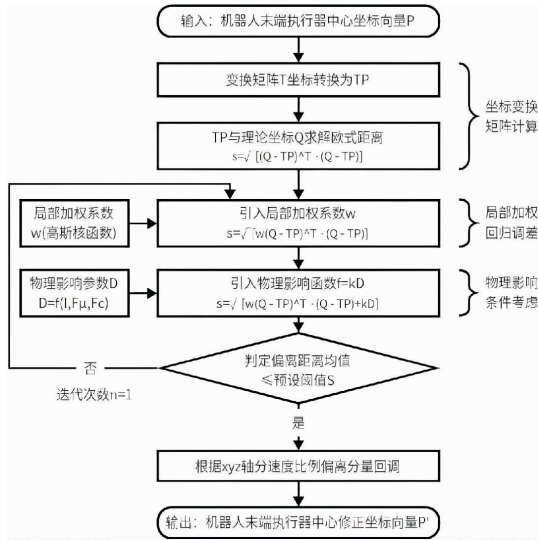


图2 算法逻辑流程图

Fig. 2 Algorithm logic flowchart

2.1 坐标变换矩阵计算

假设打磨机器人的末端执行器中心的坐标向量 $\mathbf{P} = (x, y, z, 1)^T$, 其中, x, y, z 是坐标, 1 是齐次坐标系中的缩放因子, 用于表示平移或旋转变换。指定位置的坐标向量 $\mathbf{Q} = (x_Q, y_Q, z_Q, 1)^T$ 。

打磨机器人的姿态用一个 4×4 的变换矩阵 \mathbf{T} 来表示, 其中, 包含旋转和位移信息。则机器人末端执行器中心的实际位置可以表示为 \mathbf{TP} , 指定位置仍然是 \mathbf{Q} 。

设打磨机器人临近连杆的变换矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T}_i = \text{Trs}(Z, d_i) R(Z, \theta_i) \text{Trs}(X, a_i), \quad (13)$$

其中, Trs 表示坐标转换函数, R 表示转向率函数, (Z, d_i) 、 (Z, θ_i) 和 (X, a_i) 分别表示机器人不同的运动坐标^[19]。

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_i \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i)d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & \cos(\alpha_i)d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

根据末端执行器中心的坐标向量 $\mathbf{P} = (x, y, z, 1)^T$, 两个矩阵相乘, 即 \mathbf{TP} :

$$\mathbf{T}_i \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_i \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i)d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & \cos(\alpha_i)d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

由此可得:

$$\mathbf{Q} - \mathbf{T}_i \mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_Q - x\cos(\theta_i) + y\sin(\theta_i) - a_i \\ y_Q - x\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) - y\cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) + z\sin(\alpha_i) + \sin(\alpha_i)d_i \\ z_Q - x\sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) - y\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) - z\cos(\alpha_i) + \cos(\alpha_i)d_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中, θ_i 表示旋转关节的角度, 用于描述机器人在关节处的旋转情况; α_i 表示连接杆的旋转角度, 用于描述机器人在连接杆处的旋转情况; a_i 表示机器人临近连杆的参数, 描述机器人末端执行器中心相对于旋转轴的距离; d_i 表示机器人运动的轴的偏移量, 即机器人连接杆的长度^[20]。

考虑到打磨机器人有 n 个关节^[21], 机器人从基座到末端执行器的整体变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdots \mathbf{T}_n. \quad (17)$$

偏离距离 s 可以通过欧氏距离来得到:

$$s = \sqrt{((\mathbf{Q} - \mathbf{TP})^T \cdot (\mathbf{Q} - \mathbf{TP}))} \quad (18)$$

2.2 局部加权回归调差

由于机器人的测量数据存在误差, 引入局部加权回归以抵抗粗差值带来的影响, 采用加权欧氏距离来调整偏离距离的计算, 则得到更新后的偏离距离 s 公式:

$$s = \sqrt{(w \cdot (\mathbf{Q} - \mathbf{TP})^T \cdot (\mathbf{Q} - \mathbf{TP}))}, \quad (19)$$

其中, w 是局部加权系数, 用于调整欧氏距离部分的权重, 以抵抗粗差值的影响。此处使用高斯核函数来计算每个样本点的权重:

$$w_i = e^{-\frac{-(\mathbf{Q} - \mathbf{TP})^T \cdot (\mathbf{Q} - \mathbf{TP}_i)}{2\sigma^2}}, \quad (20)$$

其中, \mathbf{TP}_i 表示第 i 个样本点通过变换矩阵 \mathbf{T} 计算

得到的末端执行器中心的坐标向量, τ 是高斯核函数的带宽参数, 控制着权重的分布范围。

2.3 物理影响条件(影响函数)

考虑到末端执行器的转动惯量、动态摩擦以及离心力等物理因素的作用, 对偏移距离 s 的表示中需要纳入一个量化指标, 以便有效地表征这些影响因素。

将末端执行器的转动惯量、动摩擦和离心力考虑进去, 更新偏离距离的计算公式为

$$s = \sqrt{(w \cdot (Q - TP)^T \cdot (Q - TP) + k \cdot D), \quad (21)$$

其中, k 是影响因子系数, 一般取值为 1, 根据物理影响程度进行调整; D 是物理影响参数。

假设末端执行器的转动惯量为 I , 动摩擦为 F_μ , 离心力为 F_c , 根据牛顿第二定律, 末端执行器所受的离心力可以表示为 $F_c = ma_c$, 其中, m 是质量, a_c 是离心加速度。

考虑到转动惯量、动摩擦和离心力对姿态控制的复杂影响, 影响函数可以在一定程度上体现这种影响:

$$f(D) = \frac{\psi I}{D^2} + \frac{\zeta F_c}{D} + \rho F_\mu + C, \quad (22)$$

其中, ψ 是转动惯量影响因子, 用来调节转动惯量的影响程度; ρ 是动摩擦影响因子, 用来调节动摩擦的影响程度; ζ 是离心力影响因子, 用来调节离心力的影响程度; C 是影响常量, 用来体现环境因素。

当末端执行器转动惯量、动摩擦及离心力稳定施加即影响函数平衡时, 可得:

$$D = \frac{-\zeta F_c \pm \sqrt{(\zeta F_c)^2 - 4\psi I(\rho F_\mu + C)}}{2\psi I}, \quad (23)$$

其中, D 取大值, 即

$$D = \frac{-\zeta F_c + \sqrt{(\zeta F_c)^2 - 4\psi I(\rho F_\mu + C)}}{2\psi I}. \quad (24)$$

在对偏离距离 s 多次实验迭代后, 取得不同的偏移距离结果, 求取平均值后与预先设定的可接受阈值比较:

$$\begin{cases} \text{if } \bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i}{N} \leq S, \\ \text{then } \bar{\bar{s}} = \bar{s} \end{cases} \quad (25)$$

确保计算结果不超出预设阈值 S 后, 即可认定该均值为偏离距离真值 $\bar{\bar{s}}$ 。

假设 s_x 、 s_y 和 s_z 分别表示在 x 、 y 和 z 方向上的偏离量, 可得偏离距离总值关系式:

$$\bar{\bar{s}} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}. \quad (26)$$

根据各轴方向的线速度比例, 假设分别为 v_x 、 v_y 和 v_z , 计算各方向上的偏移分量:

$$\begin{cases} \Delta s_x = s_x \cdot \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, \\ \Delta s_y = s_y \cdot \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, \\ \Delta s_z = s_z \cdot \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, \end{cases} \quad (27)$$

则打磨机器人的末端执行器中心的现实回调坐标向量为

$$\mathbf{P}' = [x - \Delta s_x, y - \Delta s_y, z - \Delta s_z, 1]^T. \quad (28)$$

3 实验结果分析

本次实验的实验对象采用发那科六轴工业机器人 M-20iD/25, 其实验参数设置如表 1 所示。

表 1 发那科 M-20iD/25 机器人实验参数

Table 1 Experiment parameters of FANUC M-20iD/25 robot

关节 序号	关节扭 转角/ $^\circ$	连杆长度 /mm	关节转角 / $^\circ$	偏移距 /mm
1	0	425	0	0
2	0	840	0	105
3	-40	215	0	-105
4	0	670	0	0
5	90	90	0	0
6	-180	0	0	0

参数主要包括机器人各关节的扭转角度、各连杆的长度、关节的转角以及偏移距离等, 旨在更好地模拟真实的工业环境, 确保数据的有效采集以及实验结果的适应性和实用性。

实验选用发那科六轴工业机器人 M-20iD/25 (图 3) 在于其拥有高度的灵活性和精度, 同时具有较大的工作范围和优秀的载荷能力。此外, 该型号在工业应用中表现出高可靠性和稳定性, 在一定程度上保证实验的连续性, 并减少因设备故障引起的数据偏差。

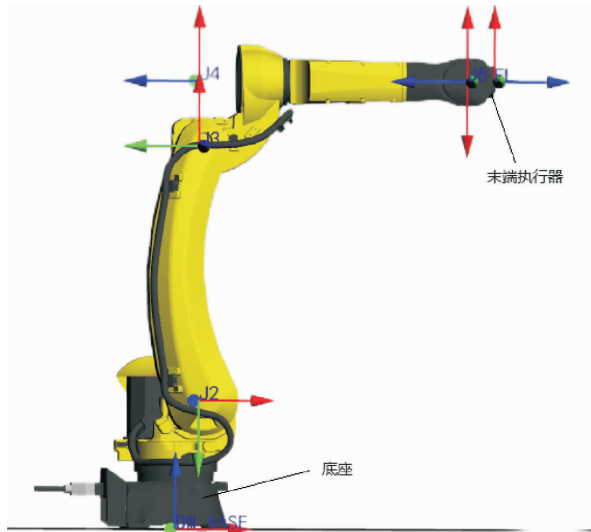


图 3 发那科 M-20iD/25 机器人模型

Fig. 3 FANUC M-20iD/25 robot model

实验采用 MATLAB R2023a 仿真软件对发那科 M-20iD/25 机器人模型进行运动轨迹点验证,在单次迭代中,收集了机器人加工目标件圆角处的运动过程中得到的 50 个样本点为一组,并统计该组 50 个样本点理论坐标,与实际位置坐标相比较,得出偏离距离补偿值。

在本研究中,为实现对打磨机器人定位坐标的精确测量,采用高精度工业扫描相机定位坐标测量法对现实末端执行器坐标点位测量。

标定过程中使用的标准尺的制造精度达到国际标准 GB/T 1184—1996 的一级精度要求,标定误差控制在 ± 0.002 mm 以内。在实验设置中,使用支撑平台和防振系统来稳固相机,以此消除任何潜在的振动干扰。相机的焦距、光圈设置和色彩平衡根据制造商提供的技术规格进行设置和校准,确保其处于最佳状态。照明系统采用均匀分布的 LED 光源,确保了图像采集过程中的光照一致性和无影响。

所获得的图像数据通过使用 MATLAB 和 OpenCV 进行图像处理,通过识别图像中的边缘、角点等特征点来定位测量区域。采用 Sobel 算子进行边缘检测,以及利用 Hough 变换方法进行特征提取,从而确定打磨机器人的准确定位坐标。

实验对单一组内 50 个样本点收集偏离位移数据,打磨机器人末端执行器经过加工件圆角倒角后消耗总时长为 3.27 s,绘制“时间 - 偏离位

移”曲线图,得到曲线如图 4 所示。

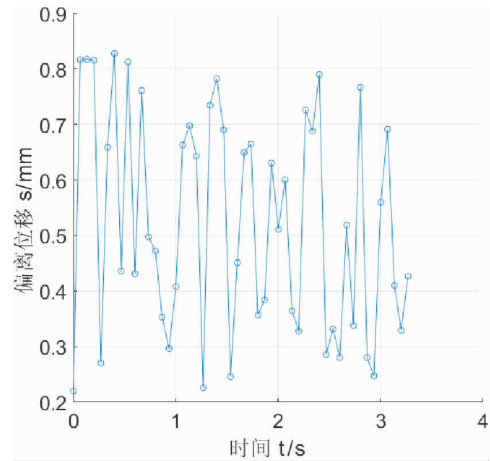


图 4 “时间 - 偏离位移”曲线图

Fig. 4 Time-displacement curve

从图 4 可见,由于打磨机器人机械定位误差与环境物理因素等影响的存在,使得末端执行器在经过加工件圆角倒角时发生运动偏移,产生幅度波动的运动偏离距离,且未修正的偏离距离范围在约 0.22 ~ 0.83 mm 之间。

为保证实验普遍性与客观性,将 50 个样本点随机打乱后重新编号 1 ~ 50,分别计算补偿后的偏离距离,并以每 5 个样本点为一小组,用粗圆点标注出(包括第一个点与最后一个点)以便观察曲线总体趋势。

在 MATLAB R2023a 上对样本点偏离距离修正仿真后,得到位移偏差曲线如图 5 所示。

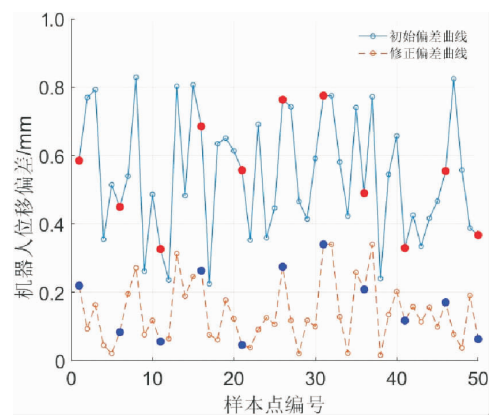


图 5 机器人位移偏差曲线图

Fig. 5 Robot displacement deviation curve graph

由图 5 对比偏离距离结果可见,偏离距离误差无法完全消除,但经过工业打磨机器人机械臂

运动偏离距离预补偿算法补偿后,偏离距离由初始偏离距离范围约 0.22 ~ 0.83 mm 内浮动,减少到修正偏离距离范围约 0.02 ~ 0.34 mm 内浮动,修正后的偏离距离总体小于初始偏离距离。同时,偏离距离的浮动幅度减少了大约 52.46%。由此证明,该算法可以修正大部分偏离距离,且一定程度使浮动范围收敛。

在打磨机器人进行移动过程中,不仅会出现位置偏差,同时也伴随着角度偏差的产生。因此,重要的是在对偏移距离进行补偿后,进一步对样本点的偏差角度进行校正。通过对这些角度偏差进行仿真修正后,得到的角度偏差曲线如图 6 所示。

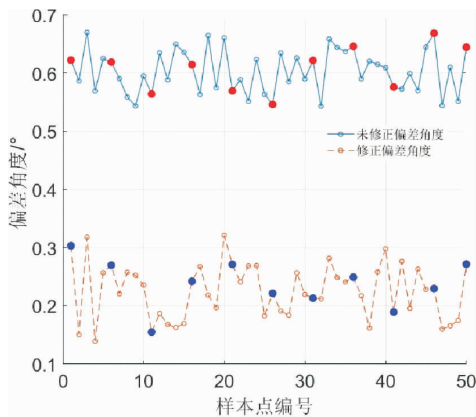


图 6 机器人偏差角度曲线图

Fig. 6 Robot deviation angle curve graph

由图 6 对比偏差角度结果可见,偏差角度由未修正的偏差角度范围约 0.54° ~ 0.66°,经过算法补偿后,修正后的偏差角度范围减少到约 0.15° ~ 0.32°,总体偏差角度小于 0.3°,说明该算法可以有效降低打磨机器人运动引起的偏差角度。

将工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法应用于打磨机器人加工轨迹后,得到的加工轨迹曲线仿真如图 7 所示。该仿真结果呈现在应用预补偿算法后,加工轨迹的变化趋势。

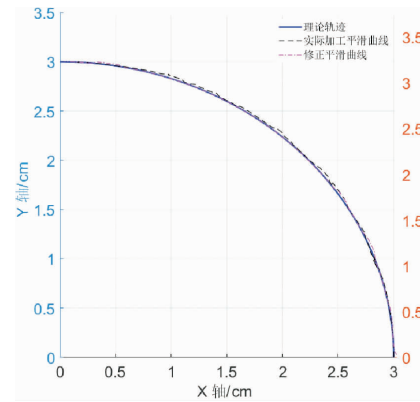


图 7 加工轨迹曲线

Fig. 7 Machining path curve

从图 7 可见,实际加工平滑曲线受到误差因素和物理因素的影响,导致存在多处较大偏离原定加工轨迹的现象。然而,在经过多次偏离距离补偿迭代后,修正平滑曲线更加贴适于原定加工轨迹,并且表现出更加平滑的特性。这一改善使得曲线几乎没有轨迹突变和偏离增幅的情况,从而表明该偏离距离预补偿算法有效地提高了加工的精度和稳定性。

4 结 论

为了提高打磨机器人在运动过程中的定位精度和响应能力,避免各种外部因素或系统误差导致沿曲线运动偏离其预定路径,本文提出了一种工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法,通过引入局部加权与物理影响函数调整偏离距离,解决了打磨机器人机械臂在加工空间内曲线/曲面时产生的偏移距离补偿问题。

实验结果表明,通过应用工业打磨机器人机械臂运动偏离距离预补偿算法,偏离距离误差从初始的约 0.22 ~ 0.83 mm 减少至 0.02 ~ 0.34 mm,且偏离浮动幅度减少了约 52.46%,修正后的平滑曲线更贴合理论轨迹,显著提升了加工的精度和稳定性。

参考文献:

- [1] 杨晓霞,冯正强. 人工智能与中国制造业全球价值链嵌入——基于工业机器人应用的证据[J]. 技术经济与管理研究, 2024(2): 153-158.
- [2] 卢凌霄,董乾鹏,张天乐,等. 机器人运动学与运动规划算法综述[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(5): 1-16.
- [3] 高建军,颜文焜. 6轴工业机器人在线误差补偿处理方法[J]. 模具制造, 2024, 24(3): 233-235.

- [4] 韩亚军, 刘家英. 基于 B 样条曲线的工业机器人运动轨迹误差优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(3): 199-204.
- [5] 陈家林, 杨红军, 戢绍庭, 等. 六自由度串联机器人的运动误差分析[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(5): 106-113.
- [6] 陈晓玄. 6R 工业机器人刚度参数辨识及误差补偿研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [7] 石雪兆, 罗先喜. 基于深度学习的协作机械臂目标定位与抓取研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(3): 153-157, 166.
- [8] 沈逸超. 机器人自适应阻抗控制的曲面恒力跟踪研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2024.
- [9] 张文欣, 余杰先, 冯晶晶, 等. 6R 机器人重复定位精度的研究及仿真[J]. 机电工程技术, 2019, 48(5): 44-47.
- [10] 张芳园, 肖牧邦, 丁焯, 等. 基于高斯混合模型的机器人曲面打磨路径规划[J]. 机械与电子, 2023, 41(7): 37-41.
- [11] 祝世静. 协作机器人动态误差建模及补偿研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [12] 林俊哲. 六轴工业机器人铣削加工的位姿优化与轮廓误差补偿[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [13] 魏志鹏. 超精密铣削自由曲面路径规划研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [14] Liang F S, Kang C W, Fang F Z. A smooth tool path planning method on NURBS surface based on the shortest boundary geodesic map[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 62: 392-405.
- [15] Dai F S, Zhang H O, Li R S. Process planning based on cylindrical or conical surfaces for five-axis wire and arc additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26(7): 1213-1226.
- [16] Rososhansky M, Xi F F. Coverage based tool-path planning for automated polishing using contact mechanics theory[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 3: 144-153.
- [17] Zou Q, Zhao J Q. Iso-parametric tool-path planning for point clouds[EB/OL](2018-11-15)[2024-05-26]. <https://arxiv.org/abs/1811.06600>.
- [18] Lai J Z, Lyu P, Zhang L. Analysis of coning motion caused by turntable's vibration in rotation inertial navigation system[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(10): 1422-1427.
- [19] 李晓梅, 黄建勇, 张泽治. 基于改进权函数距离的机器人运动偏差补偿算法设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(1): 86-92.
- [20] 王昊. 基于刚度模型的机器人加工位姿优化和路径偏差补偿研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [21] 方鹏. 工业机器人参数标定与误差补偿方法研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.

【责任编辑: 陈 钢】