

基于激光扫描技术的打磨工具精准对位

槐创锋*, 黄升, 黄涛, 尚鲁强

华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 针对机车自动化打磨系统对位不精准、打磨厚度不均匀的问题,提出了一种基于激光扫描技术的打磨工具中轴线对位打磨点法线方向的算法。首先,计算线激光传感器扫描获取的待打磨件三维模型法向量,并将 6 种获取法线的算法进行对比,用效果最优的算法计算模型上各点的法线坐标;然后,通过手眼标定使法线坐标与打磨工具中轴线坐标可相互转换,并利用离线编程使两者实现精准对位;最后,建立打磨模型,计算理想的打磨厚度,测量精准对位和未精准对位的打磨厚度。实验结果表明,与未精准对位的算法相比,本算法能很好地解决打磨厚度不均匀的问题,且打磨结果与理想效果接近。

关键词 激光技术; 自动化打磨; 精准对位; 法线识别; 打磨厚度

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.232202

Precise Alignment of Grinding Tool Based on Laser Scanning Technology

Huai Chuangfeng*, Huang Sheng, Huang Tao, Shang Luqiang

College of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract In order to solve the problem imprecise alignment and uneven grinding thickness in the automatic grinding system of the locomotive, a algorithm based on the laser scanning technology for the center axis of the grinding tool in the normal direction of the grinding point is proposed in this paper. First, the normal vector of the three-dimensional model of the workpiece to be polished obtained by scanning by the line laser sensor is calculated, and the 6 methods of obtaining normal is compared to obtain the optimal algorithm to calculate the normal coordinates of each point on the model. Then, through hand-eye calibration, the normal coordinates and the center axis coordinates of the grinding tool can be converted to each other, and the two can achieve precise alignment by using offline programming. Finally, a grinding model is established to obtain the ideal grinding thickness by calculation, and the grinding thickness values of the precise and imprecise alignment are measured. Experimental results show that, compared with imprecise alignment algorithm, the algorithm can well solve the problem of uneven grinding thickness and achieve the grinding effect consistent with the ideal grinding.

Key words laser technique; automatic grinding; precise alignment; normal recognition; grinding thickness

OCIS codes 220.4610; 150.5758; 150.691

1 引言

随着高铁技术的不断发展,我国的高铁动车组在全世界取得了举世瞩目的成就,以“复兴号”为代表的标准动车组作为亮丽的国家名片影响着全世界。为了保证机车车辆的良好运行,对车辆的制造加工有着严格的要求。在车身加工过程中,对机身

的打磨一直是重点关注问题^[1]。目前,对机车车身的腻子层打磨,依旧停留在手工打磨的流水线模式上,打磨效率受到限制,打磨后的墙面也存在较多缺陷,且打磨的厚度和墙体的均匀性很难保持一致^[2-3]。自动化打磨一般使用机械臂打磨,虽然效率较高,但打磨工具的对位不精准^[4],仅对位打磨点位置,容易出现过打磨或欠打磨现象,从而影响打磨精

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-24; 录用日期: 2020-05-06

* E-mail: 983702099@qq.com

度^[5-6]。打磨工具的精准定位能保证打磨厚度的一致性,是保证打磨精度的重要条件。机车外墙的打磨厚度范围为 0.5~1.5 mm,因此,对打磨工具精准定位的要求较高^[7]。

针对上述问题,本文提出了一种在不同曲率下,使打磨工具的中轴线与打磨点的法线始终重合的精准定位算法。首先,利用线激光传感器快速获取待打磨件的完整三维模型^[8],求取各点法线坐标。然后,通过手眼标定将法线坐标与打磨工具中轴线坐标相互转换,利用离线编程控制机械臂,以实现精准对位。实验结果表明,本算法的对位方式能较好地保证打磨厚度的一致性,提高打磨精度。

2 曲面法向量计算

2.1 点法线算法

用线激光传感器扫描待打磨件,获取待打磨件的曲面模型以及模型上各点的坐标,然后利用基于三角网格的 B 样条曲面拟合法描绘曲面特征形状。该方法的重建效率高、效果好,重构的机车真实三维模型如图 1 所示。



图 1 重构的机车曲面三维模型

Fig. 1 Reconstructed three-dimensional model of locomotive surface

为获取各点的精准法线坐标,实验研究的曲面法线是由 K 个三角形面元组成的局部网格曲面的法线,这类曲面上给定点的法向量 \mathbf{N} 可表示为

$$\mathbf{N} = \frac{\sum_{i=1}^K \omega_i \mathbf{n}_i}{\sum_{i=1}^K \omega_i}, \quad (1)$$

式中, \mathbf{n}_i 为法线向量, ω_i 为第 i 个小平面的权值,可由当前邻域信息通过不同的算法计算得到^[9]。

1) 平均值(MWE)算法

MWE 算法基于均等权面的均值确定表面法线^[10],即将给定点的相关邻域小平面法线的平均值作为该点的表面法线,对应邻域小平面的权值可表示为

$$W_{\text{MWE}} = 1. \quad (2)$$

2) 夹角余弦平均值(MWA)算法

MWE 算法得到的法线向量取决于表面网格的

划分,原因是 MWE 算法会平均考虑到每个人射面法线,计算出的法线会随曲面的变化而变化^[11]。为了解决该问题,用给定点相关邻域小平面相邻边的夹角余弦作为权值,可表示为

$$W_{\text{MWA}} = \alpha_i, \quad (3)$$

式中, α_i 为在给定点入射的第 i 个小平面相邻边的夹角, $\cos \alpha_i$ 可表示为

$$\cos \alpha_i = \frac{\mathbf{L}_i \cdot \mathbf{L}_{i+1}}{|\mathbf{L}_i| |\mathbf{L}_{i+1}|}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{L}_i 和 \mathbf{L}_{i+1} 分别为给定点入射的第 i 个小平面相邻边的向量, $|\mathbf{L}_i|$ 和 $|\mathbf{L}_{i+1}|$ 为两相邻边的长度。

3) 正弦和边长倒数平均权值(MWSELR)算法

Max^[12]针对曲面网格模型提出了有关入射面相关信息的 MWSELR 算法,以两相邻边长度的倒数和入射角的组合为权值,可表示为

$$W_{\text{MWSELR}} = \frac{\sin \alpha_i}{|\mathbf{L}_i| |\mathbf{L}_{i+1}|}. \quad (5)$$

4) 邻接三角形面积平均权值(MWAAT)算法

MWAAT 算法的权值为两个相邻边向量的叉乘,可表示为

$$W_{\text{MWAAT}} = |\mathbf{L}_i| |\mathbf{L}_{i+1}| \sin \alpha_i = |\mathbf{L}_i \times \mathbf{L}_{i+1}|. \quad (6)$$

5) 边长倒数平均权值(MWELR)算法

MWELR 算法的权值为两相邻边长度的倒数,可表示为

$$W_{\text{MWELR}} = \frac{1}{|\mathbf{L}_i| |\mathbf{L}_{i+1}|}. \quad (7)$$

6) 边长倒数平方根平均权值(MWRELRL)算法

MWRELRL 算法的权值为两相邻边长度倒数的平方根,可表示为

$$W_{\text{MWRELRL}} = \frac{1}{\sqrt{|\mathbf{L}_i| |\mathbf{L}_{i+1}|}}. \quad (8)$$

为了获得更精准的法线坐标,需对上述 6 种算法进行对比,选择效果最优的算法。

2.2 最近邻点搜索

确定表面法向量时,搜索适当的最近邻点集非常重要。设所有点云数据为一个集合 \mathbf{P} , k -邻域可表示为集合 \mathbf{P} 中距离给定点 p 最近的 k 个点云。计算 k -邻域的算法较多^[13],一般先求取给定点云到其余 $n-1$ 个点云的欧氏距离,然后根据距离的远近进行排列,选取距离最近的前 k 个点作为给定点的 k -邻域。虽然这类算法的效果较好,但需要计算的点云数据较大,大大增加了算法的运算量和运算时间。为了解决该问题,人们提出了一系列的快速

算法,可分为以下三种。

1) 基于点云数据 Voronoi 图的 k -邻域快速搜索算法^[14]。Voronoi 图又被称为 Voronoi 单元,可将一个区域空间分割成为无数个凸多面体单元。对于点云 $p \in P$,Voronoi 单元可理解为点集 $x \in R^3$,且任意一点 x 到给定点云 p 的欧氏距离都小于等于点 x 到点集 P 中其他点云 q 的欧氏距离。设 Voronoi 单元为 $V(p)$,则

$$V(p) = \{x \in R^3 \mid \forall q \in P, |p - x| \leq |q - x|\} \quad (9)$$

分割出来的每个凸多面体就是一个 Voronoi 单元,求出点集 P 中所有点的 Voronoi 单元,便可构造一个 Voronoi 图,如图 2 所示,其中, p 和 q_i 组成的三角形为 Delaunary 三角形。在二维空间中,该算法计算速度较快,但在三维空间中,其计算复杂度呈指数增长,算法计算量巨大,耗时较长。

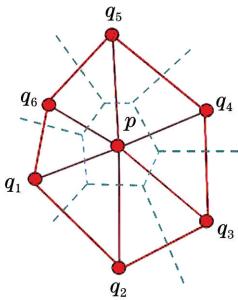


图 2 二维 Voronoi 图和 Delaunary 三角形

Fig. 2 Two-dimensional Voronoi diagram and Delaunary triangle

2) 基于空间分块的 k -邻域快速搜索算法^[15]。首先计算出一个包含整个点云数据的包围盒,然后利用空间分块法,将该包围盒分割成任意个分块栅格,图 3 为包围盒中的一个分块栅格(实线方块)以及与其相邻的 26 个栅格(虚线方块)。要计算中心分块栅格内任意一点的 k -邻域,需在中心栅格及其相邻 26 个栅格范围内进行搜索。可以看出,位于中

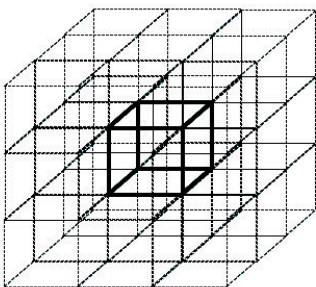


图 3 一个分块与 26 个相邻栅格

Fig. 3 One block and 26 adjacent grids

心栅格边上和顶点附近点的 k -邻域点,落在与其相邻的 26 个栅格内,如果仅在中心栅格内进行搜索,这些点将会被遗漏。对于位于中心栅格几何中心附近的点,如果需要搜索的 k -邻域点不多,当中心栅格中的点满足邻域搜索要求,会大大增加搜索时间,且点云数据越多,效率越低。该算法的搜索速度与效率取决于 k 和栅格的大小。当 k 较大、栅格较小时,在 27 个栅格内难以搜索到全部的 k 个邻域点;当 k 较小、栅格较大时,在 27 个栅格范围内搜索会浪费较多的时间。

3) Lefloch 等^[16]提出的径向有界最近邻域(RBNN)图如图 4 所示,其中,每个节点都连接到定义半径 r 内的所有邻点,RBNN 图中的一组边可表示为

$$E_{(RBNN)} = \{\{u_i, u_j, u_{i,j}\} \mid d_{i,j} \leq r\}, \quad \forall u_i, u_j \in U, i \neq j, \quad (10)$$

式中, U 为整个点云数据集, u_i, u_j 为 U 中的两个任意数据点, $u_{i,j}$ 为连接 u_i, u_j 的点云数据点,该数据点也属于 $U, d_{i,j}$ 为 u_i, u_j 两点间的距离。

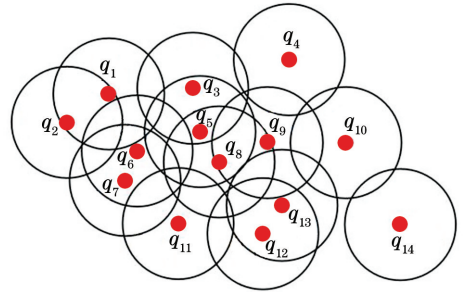


图 4 RBNN 图

Fig. 4 RBNN diagram

RBNN 图的优点是不需要搜索每个节点的最近邻点,不涉及对图结构的划分和重新排列。如果最小化边界获得最佳半径 r 的概率为 $1 - \epsilon$,则三维情况下的 r 可表示为

$$r = \left[\frac{1}{k} \left(c_1 \frac{\sigma_n}{\sqrt{\epsilon\rho}} + c_2 \sigma_n^2 \right) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

式中, ρ 为局部曲面的采样分辨率, k 为局部曲面的曲率, c_1, c_2 为两个常数, σ_n 为用户自定义的样本。实际应用中,可将 σ_n 作为用户输入,以迭代方式评估 r 。

2.3 算法的对比分析

分别用 6 种算法获取机车模型上的点法线,并在满足精度的前提下,提出了三种评价指标。1) 上采样次数 O ,可以表征算法对模型和错误的敏感程度。由于点云数据的总数和几何特征都相同,为了

达到所需的精度,算法的上采样次数是不相同的。
 2)算法的计算时间 T ,计算时间越短,成本越低。
 3)错误次数 R ,每种算法在不同模型下的适应性不同,不可预测的误差会导致实验失败,因此需要估计算法对实验模型的适应性。

表 1 为 6 种算法对机车车辆模型的评价指标,可以看出,在点云总数相同的情况下,MWE 算法的性能最差,所需的上次采样次数最多,平均计算时间

表 1 6 种算法的评价指标

Table 1 Evaluation indicators of 6 algorithms

Algorithm	MWE	MWA	MWSELR	MWAAT	MWELR	MWRELRL
O	1161901	1161900	1161900	1161900	1161900	1161900
T/s	0.72	0.21	0.43	0.70	0.32	0.41
R	1	0	0	1	0	0

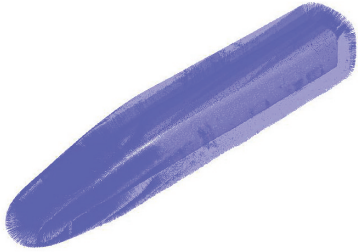


图 5 机车表面的法线分布

Fig. 5 Normal distribution of the locomotive surface

3 手眼标定与打磨系统模型建立

3.1 机器人手眼标定

用线激光扫描得到的三维模型是以点坐标形式存储的,计算得到的法线信息也是用点坐标存储的。因此,获取法线信息后,可通过机器人手眼标定,将相机坐标系下的三维坐标转换为机器人工具坐标系下的三维坐标。打磨工具连接在机械臂的末端,工具中心点(TCP)为打磨工具的起始点坐标,工具坐标系的 Z 轴方向与打磨工具中轴线一致,可通过离线编程控制机械臂,使工具坐标系的 Z 轴方向与指定打磨点法线方向在打磨过程中保持重合,达到精准对位的要求。

实验使用的线激光传感器连接在机器臂上,用眼在手上进行标定。机器人的工具坐标系和相机坐标系相互连接,机器人的标定板坐标系与基坐标系固定不变,四个坐标系可以通过 4×4 齐次转换矩阵 M 相互转换,可表示为

$$M_{\text{tool-camera}} = M_{\text{tool-base}} M_{\text{calibration-base}}^{-1} M_{\text{calibration-camera}}, \quad (12)$$

也最长,且在测试过程中出现了 1 次失败。其余 5 种算法中,除了 MWAAT 算法的平均计算时间稍长,其他算法的计算时间几乎相同,且 MWAAT 算法在测试过程中也出现过 1 次失败,没有达到预期效果;在大多数情况下,MWA 算法的性能优于其他算法,因此选择 MWA 算法确定模型表面的法线。图 5 为 MWA 算法获取的机车车辆表面各点的法线分布。

式中, $M_{\text{tool-camera}}$ 为机器人工具坐标系相对于相机坐标系的齐次转换矩阵,也是实验所求的目标转换矩阵; $M_{\text{tool-base}}$ 为机器人工具坐标系相对于基坐标系的齐次转换矩阵,可直接由示教器读出; $M_{\text{calibration-base}}$ 为标定板坐标系相对于机器人基坐标系的齐次转换矩阵,是关系不变的未知矩阵, $M_{\text{calibration-camera}}$ 为标定板相对于相机坐标系的齐次转换矩阵,可由相机拍摄的照片计算得出。根据 $M_{\text{calibration-base}}$,可用多组坐标数据计算出目标转换矩阵 $M_{\text{tool-camera}}$,从而得到目标齐次转换矩阵 $M_{\text{tool-camera}}$,将获取的曲面法线坐标信息转化为机器人工具坐标系下的三维坐标。四个坐标系之间的关系如图 6 所示。

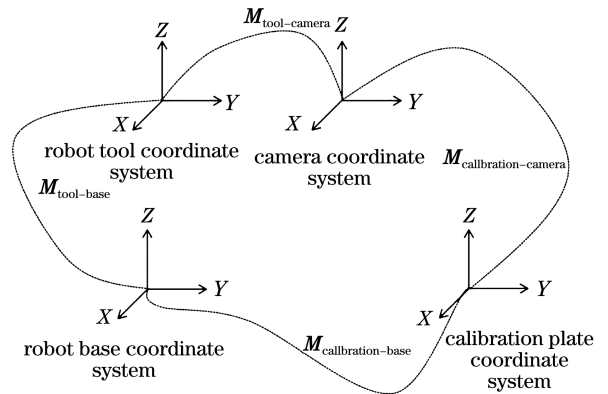


图 6 四个坐标系之间的关系

Fig. 6 Relationship between the four coordinate systems

为了达到打磨工具的中轴线与打磨点法线始终相重合的要求,手眼标定需要达到足够高的精度。影响手眼标定精度的因素主要包括传感器的精度、机器人的定位精度、标定板的精度以及整个标定过

程中的误差。但传感器的精度、机器人的定位精度以及标定板的精度都是固定不变的,因此,要提高标定精度,需要分析整个标定过程,找出能改善误差、提高精度的措施。实验发现,采取的样本点与实际坐标存在误差,误差较大的样本点,对标定结果的影响也较大。因此,采用抗干扰能力较强的算法处理采样点,删除误差较大的样本点,能提高标定精度。在手眼标定过程中,三维扫描传感器发射的激光本身具有发散性,导致采样点的精度降低。可通过调整传感器对标定物的扫描位置和扫描距离降低发散程度,进而提高标定精度。传感器对标定物的几何中心及附近进行扫描,此时,激光束的发散程度较低,从而提高标定精度。用激光测距^[17]、平面靶标测头中心^[18]、球心定位^[19]等标定方法也可以提高标定精度。

在手眼标定实验中,为直观表达标定精度,将标定物的平均测量误差作为标定精度的评价标准,控制平均测量误差达到 μm 级,其均方根误差也较小。在后续的打磨实验中发现,平均测量误差达到 μm 级能很好地实现精准定位。

3.2 打磨系统模型建立

在机车打磨系统进行打磨作业时,打磨机器人执行末端的打磨工具沿规划好的打磨路径进行工作,该过程中,机车外墙是固定的。按照打磨的难易程度,可将机车外墙分为平面、小曲率曲面和复杂曲率曲面三个区域。椭球的表面曲率分布复杂且大小不一,是典型的复杂曲率曲面,以椭球体为待打磨曲面建立的打磨系统模型如图 7 所示。该模型已知椭球体精准的真实三维模型和曲面几何信息,在打磨过程中打磨工具中轴线与打磨点法线一致,打磨工具已精准对位,是理想的打磨系统。根据该打磨系统模型,可求出理想状态下的打磨厚度,得到理想的打磨效果。

取样点, (x_g, z_g) 为点 g 在平面 $X-Z$ 上的坐标, T 为打磨工具轴线和打磨点法线, M 为打磨接触区域, θ 为打磨工具轴线与待打磨椭球体中心轴的夹角, d 为打磨厚度。由于椭球面计算方程过于复杂,在不影响计算结果的前提下,假设椭球面的两个短轴是相同的,可表示为

$$F(x, y, z) = \frac{x^2}{100^2} + \frac{y^2 + z^2}{50^2} - 1 = 0 \quad (0 \leq z \leq 50 \text{ mm}), \quad (13)$$

式中, x, y, z 为三维坐标点,其截面的截线方程可表示为

$$z = -\frac{x_g}{k\sqrt{a^2 - x_g^2}} \left[x - \left(x_g - \frac{x_g d}{\sqrt{x_g^2 + k^4 z_g^2}} \right) \right] + \left(z_g - \frac{k^2 z_g d}{\sqrt{x_g^2 + k^4 z_g^2}} \right), \quad (14)$$

式中, a 为常数。

图 8 为椭球面的截面,截面曲线方程可表示为

$$z = \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{k}. \quad (15)$$

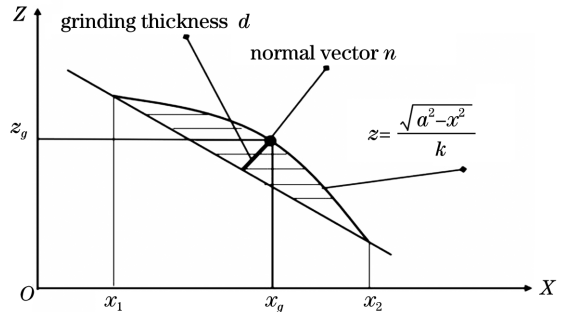


图 8 椭球的截面图

Fig. 8 Sectional view of ellipsoid

联立(14)式和(15)式,得到截面弦长为

$$l = \frac{|x_2 - x_1|}{\cos \theta} =$$

$$\frac{\left| 2\sqrt{a^4 - [a^2 - d\sqrt{(1-k^2)x_g^2 + a^2k^2}]^2} \sqrt{a^2 - x_g^2} \right|}{a^2 \cos \left(\arctan \frac{-x_g}{k\sqrt{a^2 - x_g^2}} \right)}, \quad (16)$$

打磨工具对椭球进行打磨作业时的打磨面面积为

$$A = \frac{\pi d^2}{8} = F(d, x_g) = \frac{\pi(a^2 - x_g^2) \{ a^4 - [a^2 - d\sqrt{(1-k^2)x_g^2 + a^2k^2}]^2 \}}{2 \left[a^2 \cos \left(\arctan \frac{-x_g}{k\sqrt{a^2 - x_g^2}} \right) \right]^2}. \quad (17)$$

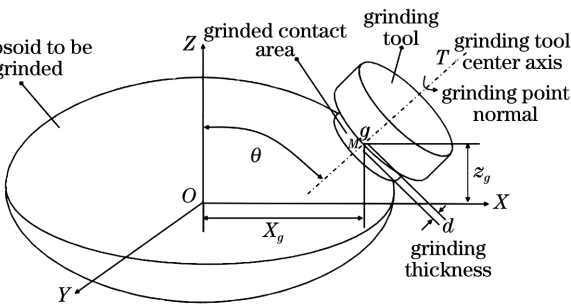


图 7 基于椭球建立的打磨系统模型

Fig. 7 Polishing system model based on ellipsoid

图 7 中, g 为待打磨椭球体打磨路径上的一个

打磨工具对椭球表面进行打磨作业形成的打磨面近似为椭圆,且打磨面积随曲率的变化而变化。 g 点所在曲线的曲率方程可表示为

$$k' = \left| \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \right|, \quad (18)$$

$$y' = \frac{-x}{k\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad (19)$$

$$y'' = -\frac{a^2}{k(\sqrt{a^2 - x^2})^3}. \quad (20)$$

打磨厚度 d 为

$$d = F^{-1}(A, x_g) = \frac{a^2 - \sqrt{a^4 - \frac{2A \left[a^2 \cos\left(\arctan \frac{-x_g}{k\sqrt{a^2 - x_g^2}}\right) \right]^2}{\pi(a^2 - x_g^2)}}}{\sqrt{(1 - k^2)x_g^2 + a^2k^2}}, \quad (21)$$

式中, $F^{-1}(A, x_g)$ 为以 A 和 x_g 为变量的函数。

3 实验测试

基于现有的实验基础,搭建打磨机器人实验平台,对平面、小曲率曲面和复杂曲率曲面三种区域进行打磨实验,同时采集打磨厚度。图 9 为机器人打磨系统。

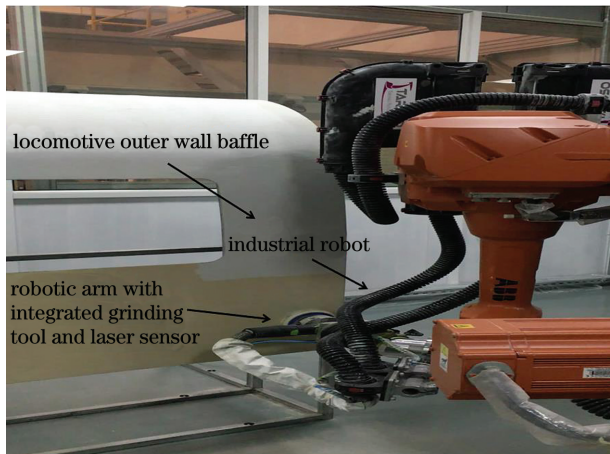


图 9 实验设计的机器人打磨系统

Fig. 9 Robot polishing system designed through experiment

用图 9 中的打磨系统分别对外墙挡板的平面、小曲率曲面以及复杂曲率曲面三种区域进行打磨测试工作。其中,外墙挡板放置在固定位置进行测试,不需要对位姿进行调整,线激光传感器集成于打磨机器人机械臂上。在打磨工作前进行手眼标定,对测试件进行轮廓扫描,并进行逆向三维建模,获取精

准的 CAD 模型和曲面几何信息。根据获取的 CAD 模型进行路径规划,提取打磨路径上每个打磨点的法线,编程调整机器人的位姿,对打磨工具进行精准对位,使打磨工具的中轴线在打磨过程中始终与打磨路径上每个打磨点的法线方向重合,最大程度上实现图 7 中的理想情况。同时对相同的工件使用未精准对位方法(传统机器打磨方法)进行打磨测试工作,并对比两种方法获得的打磨厚度与理想打磨厚度。对机车外墙挡板不同曲率大小区域的打磨测试实验结果如图 10 所示,可以发现,对不同曲率大小区域进行打磨工作的过程中,受打磨头与外墙挡板之间的振动影响,打磨工具对采样点的对准有轻微误差,导致打磨厚度在精度上也存在一定的误差,但不影响不同曲率大小区域打磨效果的总体变化趋势。

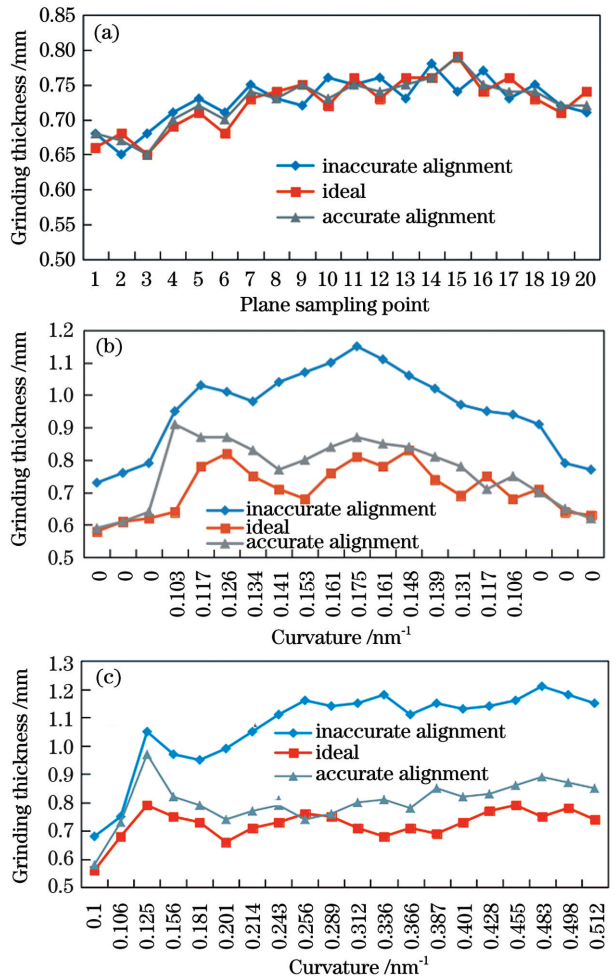


图 10 不同曲率区域的实验结果。(a) 平面区域; (b) 小曲率曲面区域; (c) 复杂曲率曲面区域

Fig. 10 Experimental results of different curvature regions. (a) Flat area; (b) small curvature surface area; (c) complex curvature surface area

从图 10(a)可以看出,在平面区域(共 20 个取样点,每个取样点的曲率为零)的打磨工作过程中,与理想打磨厚度相比,未精准对位的实际打磨厚度未出现较大偏差,没有漂移点,与理想效果基本保持一致;精准对位的实际打磨厚度与理想打磨厚度之间的差异较小,几乎与理想效果相同。从图 10(b)可以看出,在小曲率曲面区域,未精准对位的实际打磨厚度与理想打磨厚度相差较大,打磨厚度误差随曲率的增大而增大;且在曲率突变的情况下,偏离程度更大,整体打磨厚度不均匀。精准对位的实际打磨效果与理想打磨效果的总体趋势大致相同,在平面区域两者的打磨厚度几乎一致,但在平面转向曲面的过渡区域,偏离了理想打磨厚度曲线,原因是该区域存在较大的集中力;在曲面转向平面的过渡区域也存在相同的问题,但与平面转向曲面的区域相比,其偏离程度较小;在曲率变化区域,也存在打磨厚度随曲率的增大而增加现象,但整体打磨厚度比较均匀。从图 10(c)可以看出,在复杂曲率的区域,未精准对位的打磨厚度与理想打磨厚度在小曲率阶段比较接近,随着曲率的增加,偏离程度也越来越大,整体差异较大。相比小曲率曲面,精准对位的实际打磨厚度与理想打磨厚度的差异更大,且随曲率的增加,打磨厚度增加的更明显,但总体上能接近理想打磨的趋势,保持打磨厚度的一致性。

从图 10 可以看出,精准对位与未精准对位的打磨厚度都符合机车规定打磨厚度的要求(0.5~1.5 mm),未出现欠打磨或过打磨现象,满足打磨厚度的要求,但在打磨厚度一致性上两者的差异较大。精准对位的实际打磨厚度与理想打磨厚度在总体上是保持一致的,打磨效果更好。在平面区域、小曲率曲面区域以及复杂曲率曲面区域三种情况下,未精准对位的实际打磨厚度曲线与理想打磨厚度的曲线只在平面区域非常接近,另外两个区域偏差较大,尤其是在复杂曲率曲面上。而精准对位实际打磨厚度的曲线与理想打磨厚度的曲线除了在复杂曲率曲面上不太接近外,在其他两个区域都非常接近,在平面区域几乎相同,能较好地实现工件打磨效果的一致性。

综上所述,在打磨作业过程中,打磨厚度会随采样点处曲率的增大而增加,导致打磨厚度与理想结果不一致,还可能造成工件的过度打磨,影响整体打磨效果。为了保证打磨系统进行打磨作业时打磨厚度的一致性,根据曲率变化,调整了打磨时的速度和打磨力,对复杂曲率曲面再次进行打磨测试,结果如

图 11 所示。可以看出,相比第一次测试,此次测试的效果更好,实际打磨厚度与理想打磨厚度的偏差更小,工件打磨厚度的一致性也更好。但在曲率开始增加和打磨即将结束时依然存在不稳定点,偏离了整体趋势。原因是未对打磨速度与打磨力等参数进行细致研究,参数的调整较为粗糙。因此,后续还需继续研究和改善。

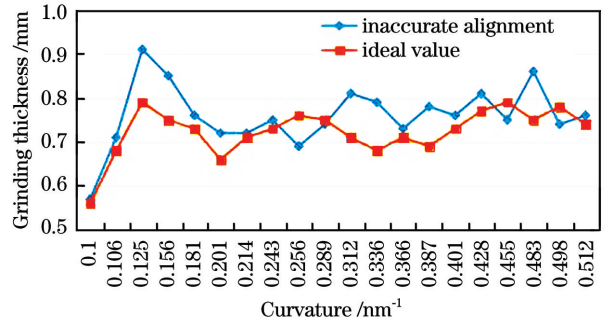


图 11 复杂曲率曲面区域的二次打磨结果
Fig. 11 Result of secondary polishing of complex curvature surface area

4 结 论

为了解决打磨系统定位不精准导致打磨厚度不均匀的问题,提出了一种基于激光扫描技术的精准定位算法,可在打磨作业过程中使打磨工具中轴线与打磨点法线方向始终重合。打磨测试实验结果表明,本算法可克服一般定位方法存在的弊端,实现与理想打磨结果相近的打磨效果,大大提高现有打磨厚度的一致性标准和打磨精度,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shi J, Wang Y L, Zhu A. Analysis of locomotive painting technology[J]. Modern Paint and Finishing, 2015, 18(5): 9-11.
史军,王玉磊,朱爱. 机车涂装工艺技术浅析[J]. 现代涂料与涂装, 2015, 18(5): 9-11.
- [2] Huai C H, Shi G Y, Ge X G et al. An automatic polishing system for rail vehicle side wall coating: 206436084U[P]. 2017-01-11.
槐创锋,石刚意,葛旭刚,等. 一种轨道车辆侧墙涂装自动打磨系统: 206436084U [P], 2017-01-11.
- [3] Yu J. Current status and suggestions of railway passenger train coating[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2012(3): 14-15, 37.
余俊. 铁路旅客列车涂装现状及建议[J]. 机车车辆

- 工艺, 2012(3): 14-15, 37.
- [4] Zhu J F. Research on positioning of industrial robot based on laser measurement [J]. Laser Journal, 2018, 39(10): 143-146.
朱剑芳. 基于激光测量的工业机器人定位研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(10): 143-146.
- [5] Yan B C. Coating technics of bus body[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(2): 52-54, 71.
严伯昌. 客车车身的涂装工艺[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(2): 52-54, 71.
- [6] Su Q. A brief analysis of the scraping technique of putty for electric locomotive in South Africa [J]. Modern Paint & Finishing, 2014, 17(5): 68.
苏权. 浅析南非电力机车腻子涂刮技艺[J]. 现代涂料与涂装, 2014, 17(5): 68.
- [7] Shi G Y. Research on the key technology of dust-free automatic grinding system for locomotive outer wall [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018: 1-8.
石刚意. 机车外墙自动打磨系统关键技术研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018: 1-8.
- [8] Chen H, Zhang S J, Gao J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704006.
陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704006.
- [9] Li Z S. Studies on key technology of data processing and feature recognition in point clouds[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 5-8.
李自胜. 点云数据处理与特征识别关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 5-8.
- [10] Gouraud H. Continuous shading of curved surfaces [J]. IEEE Transactions on Computers, 1971, C-20(6): 623-629.
- [11] Thürrner G, Wüthrich C A. Computing vertex normals from polygonal facets[J]. Journal of Graphics Tools, 1998, 3(1): 43-46.
- [12] Max N. Weights for computing vertex normals from facet normals[J]. Journal of Graphics Tools, 1999, 4(2): 1-6.
- [13] Han L Y, Cheng X, Li Z W, et al. A robot-driven 3D shape measurement system for automatic quality inspection of thermal objects on a forging production line[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4368.
- [14] Cao Y P, Kobbelt L, Hu S M. Real-time high-accuracy three-dimensional reconstruction with consumer RGB-D cameras[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(5): 1-16.
- [15] Cheng X, Liu X, Li Z, et al. High-accuracy globally consistent surface reconstruction using fringe projection profilometry[J]. Sensors, 2019, 19(3): 668.
- [16] Lefloch D, Kluge M, Sarbolandi H, et al. Comprehensive use of curvature for robust and accurate online surface reconstruction [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(12): 2349-2365.
- [17] Hou M S, Liu J Q, Liu D L, et al. Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004002.
侯茂盛, 刘继强, 刘大礼, 等. 基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004002.
- [18] Geng H H, Zhao H, Bu P H, et al. High accuracy positioning method based on 2D imaging for the coordinates of the center of a sphere [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021501.
耿贺辉, 赵宏, 卜鹏辉, 等. 基于二维成像的球心坐标高精度定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021501.
- [19] Zheng X C, Zhao M, Feng S H. Two-step calibration of probe tip center of planar target [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011201.
郑兴纯, 赵敏, 冯少华. 平面靶标测头中心的两步法标定[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011201.