

磁流变抛光回转对称非球面工件精确自定位

周涛, 张云飞, 樊炜, 黄文, 张建飞

引用本文:

周涛, 张云飞, 樊炜, 等. 磁流变抛光回转对称非球面工件精确自定位[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 610–620.

ZHOU Tao, ZHANG Yun-fei, FAN Wei, et al. Precise localization of rotary symmetrical aspheric workpiece in magnetorheological polishing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 610–620.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0610>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用四轴联动磁流变机床加工曲面

Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine

光学精密工程. 2015, 23(10): 2819–2826 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152310.2819>

磁流变抛光系统去除函数的原点位置标定

Coordinate-origin calibration of removal function in Magnetorheological Finishing

光学精密工程. 2017, 25(1): 8–14 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172501.0008>

气囊抛光过程的运动精度控制

Motion-precision control in bonnet-polishing

光学精密工程. 2015, 23(8): 2220–2228 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2220>

酸碱度对磁流变抛光去除作用的调节机制

Influence of pH value on removal effect of fused silica during magnetorheological finishing

光学精密工程. 2019, 27(12): 2602–2608 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192712.2602>

磁流变抛光对熔石英激光损伤特性的影响

Effect of magnetorheological finishing on laser damage properties of fused silica

光学精密工程. 2016, 24(12): 2931–2937 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162412.2931>

文章编号 1004-924X(2020)03-0610-11

磁流变抛光回转对称非球面工件精确自定位

周 涛, 张云飞, 樊 炜*, 黄 文, 张建飞

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:为解决磁流变抛光中回转对称非球面工件的高效率精确自定位问题,提出了基于迭代最近点的改进两级定位方法。根据磁流变抛光特性和恒浸深控制要求,确定了磁流变抛光工件非调平自定位原理。针对经典迭代最近点算法应用于回转对称非球面工件定位存在解不唯一及计算效率低的问题,构建初始迭代矩阵实现了位姿唯一的指定性匹配,并提出了空间垂直映射方法,减小匹配点云的规模,提高了计算效率。以此为基础,提出了改进后的两级迭代最近点精确定位方法。最后,以 $\Phi 100$ mm 凹形抛物面熔石英工件为对象进行了抛光实验。实验结果表明:改进两级精确定位方法满足磁流变抛光的定位要求,定位精度在多次实验中均优于 $9 \mu\text{m}$,平均定位时间为 7.3 min,在保证定位精度的同时提高了工件的定位效率。

关键词:磁流变抛光;回转对称非球面;迭代最近点;指定性匹配;垂直映射

中图分类号:TH161.24 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202803.0610

Precise localization of rotary symmetrical aspheric workpiece in magnetorheological polishing

ZHOU Tao, ZHANG Yun-fei, FAN Wei*, HUANG Wen, ZHANG Jian-fei

(*Institute of Mechanical Manufacturing Technology,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: weifan1127@hust.edu.cn*

Abstract: To enhance the precise localization of rotary symmetric aspheric workpiece in magnetorheological polishing, an improved two-level positioning method (ITLICP) based on iterative closest point (ICP) was proposed in this study. The magnetorheological polishing characteristics and requirements revealed that the constant immersion depth control determines the principle of workpiece non-leveling positioning. The classical ICP algorithm was applied to overcome the drawbacks of rotationally symmetric aspheric workpiece positioning of non-uniqueness and low computational efficiency. In this study, an initial iterative matrix was constructed to realize the unique specified matching of the workpiece position and a vertical mapping method was proposed to reduce the matching point cloud size, thus improving the computational efficiency. Then, an improved two-level ICP precise positioning method was proposed. The positioning and verification experiments use a $\Phi 100$ mm concave parabolic fused silica workpiece. The results show that the precise positioning method

收稿日期:2019-06-28;修订日期:2019-08-19.

基金项目:科学挑战计划资助项目(No. TZ2016006-0504-01);国家科技重大专项(No. 2017ZX04022001);国家自然科学基金资助项目(No. 61605182);中物院超精密加工技术重点实验室资助项目

ITLICP satisfied the requirements of magnetorheological polishing positioning. The positioning error is less than $9\ \mu\text{m}$ and the average positioning time is 7.3 min. This demonstrates that both the positioning accuracy and efficiency are improved.

Key words: magnetorheological polishing; rotary symmetrical aspheric workpiece; Iterative Closest Point(ICP); specified match; vertical mapping

1 引言

在光学系统中使用非球面光学元件,可有效地消除球差、彗差、像散、场曲,减少光能损失,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学性能^[1-4]。磁流变抛光技术具有去除函数稳定、去除效率高及面形收敛性好等优点,在非球面光学工件抛光中应用广泛^[5]。利用磁流变抛光技术对光学工件进行高精密切光,需对工件进行精确定位。传统定位方式利用千分表及工装对工件进行手动调平及找正,在调平、找正的基础上利用测量系统^[6]测量工件位置信息,以建立准确的工件坐标系。当被加工件尺寸较大或被加工表面为非球面时,人工精确调平效率非常低,且当对工件进行多次迭代加工时,每次加工都需要重新手动调节工件姿态,加工精度和效率会受到影响。因此,实现非球面工件的位姿求解,解决磁流变抛光中的自定位关键问题,对提高磁流变抛光工件定位效率,提高磁流变抛光设备的智能化水平有着重要的意义。

工件自定位指利用计算机及传感器测量系统,通过位姿求解算法实现工件实际工况下的精确定位,其本质是三维点云的精确配准^[7-8]。近年来,国内外研究者围绕三维点云匹配问题展开了系统的研究^[9-13]。其中,最具代表性的是由 Besl 和 McKay 提出的迭代最近点算法^[12] (Iterative Closest Point, ICP),该算法实现简单、精度高,但对初始迭代矩阵的要求非常严格,且由于迭代计算过程中需反复求解匹配对应点,算法计算量很大。为此,许多研究者对算法进行了改进。Rusinkiewicz 等^[14]提出法向均匀布采样法,有效改善了迭代收敛速度,但方法鲁棒性未得到验证。徐金亭等^[15]为解决曲面匹配的初值敏感性问题,提出了基于曲面曲率特征的初始矩阵建立方法,

并通过仿真验证。刘胜兰等^[16]为解决零件表面精度差异性对模型配准精度的影响,提出先利用高精度特征配准约束部分配准方向,再用低精度特征完成整体配准的方法,并通过叶轮定位配准验证。张洪帆等^[17]为解决飞机蒙皮加工过程中的精确定位问题提出基于 ICP 算法的两级定位策略,通过粗、精定位方法,实现了飞机蒙皮件的精确定位。李文龙等^[18]为解决复杂曲面零件三维配准中固有测量缺陷对匹配精度的影响,提出基于方差最小化原理的匹配方法。文献^[15-18]所述方法主要聚焦于解决传统机械加工中复杂曲面的无约束匹配问题,匹配结果具有唯一性。在无约束情况下,回转对称工件的匹配结果具有非唯一性,因此上述方法均无法应用于具有回转对称特性的光学工件。为解决圆柱形平面光学工件的定位问题,王彦哲等^[19]将基于经典 ICP 算法的工件自定位方法应用到磁流变抛光定位中,通过人工标记点对匹配剩余自由度进行了约束,并进行了抛光验证实验,但通过在平面上添加标记点的方法,需通过手动方式对标记点进行测量,测量的自动化水平不高,且测量精度及定位精度受人工经验影响。

本文针对磁流变抛光回转对称非球面工件的精确定位问题,根据磁流变抛光工件的定位要求,确定了磁流变抛光工件精确自定位原理,分析了经典 ICP 定位算法直接应用于回转对称非球面工件精确定位时存在的问题,提出了通过构建特定迭代初始矩阵实现指定性匹配的方法与提高匹配效率的空间映射方法,并以此为基础提出了改进后的两级 ICP 定位方法 (Improved Two-Level Iterative Closest Point, ITLICP)。实验证明,本文提出的 ITLICP 磁流变抛光工件定位方法,在保证定位精度的同时,极大地减少了加工辅助时间,提高了磁流变抛光回转对称非球面工件的定位效率。

2 磁流变抛光工件定位需求及原理

2.1 定位要求

磁流变抛光示意图如图 1 所示,磁流变液在抛光轮带动下循环流动,在磁场作用下磁流变液变成 Bingham 介质并在工件表面与之接触的区域产生剪切力,实现材料去除^[20]。磁流变液未与工件接触时,在磁场作用下于抛光轮底部形成厚度为 H 的凸起;与工件表面接触后,缎带凸起被挤压,挤压距离称为浸入深度^[21]。浸入深度的变化会引起去除函数的变化,为实现磁流变高精度抛光,需对浸入深度进行严格控制,保持浸入深度恒定。由图 1 可知,记抛光轮最低点 O_{PW} 与工件表面抛光点 O 的距离为 h ,则浸入深度可表示为:

$$\Delta h = H - h. \quad (1)$$

文献^[19]中提出,为满足光学元件的加工需求,缎带浸入深度的误差需控制在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 内。抛光缎带的稳定性控制与工件定位无相关性,本文不进行研究, H 视为常量,则浸入深度的控制精度取决于 h 。因此,在抛光过程中需要根据光学元件抛光点的实际 Z 向位置对抛光轮进行控制,且 Z 向定位误差需控制在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 内。

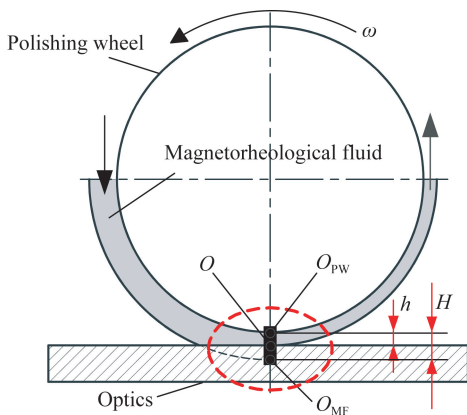


图 1 磁流变抛光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetorheological polishing

$$\mathbf{T}_{tr} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta & d_x \\ \cos \alpha \sin \gamma + \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \sin \alpha & d_y \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \alpha & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: α, β, γ 为工件实际位姿绕机床直线轴 $X, Y,$

2.2 定位原理

磁流变抛光中工件位姿精确定位由对刀工艺实现。基本对刀工艺过程包括调平、找正和位姿测量。利用高精密度位移传感器,对调平及找正后的工件位姿进行在位测量,计算工件几何特征点坐标,并以此为坐标原点建立工件坐标系。对于回转对称非球面工件,通常以加工面回转对称中心线交点(顶点)为特征点。如图 2 所示,以凹抛物面为例,所测加工面顶点为工件坐标系原点,建立了与机床坐标系 $O-XYZ$ 平行的工件坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 。进行磁流变抛光工艺规划时,为便于非球面各点位置的解析计算,通常会根据工件形状特征建立理想姿态下的工艺坐标系,且抛光过程中,将上述对刀过程所建立的工件坐标系与工艺坐标系视为重合。因此,找正与调平能够保证工件位姿与理想位姿一致。

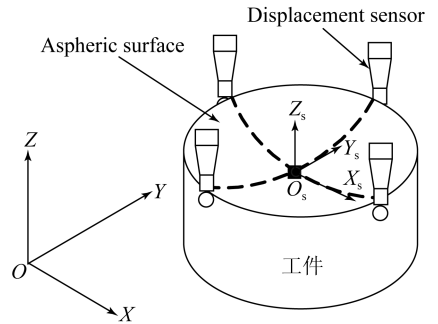


图 2 磁流变抛光中工件坐标系

Fig. 2 Workpiece coordinates in magnetorheological polishing

未进行工件找正及调平时,工件实际位姿与理想位姿存在偏差。由刚体变换理论^[23]可知,在相同的机床坐标系下,工件理想位姿可由实际位姿进行刚体变换得到。对工件表面任意点,假设理想位姿下机床坐标为 (x_{id}, y_{id}, z_{id}) ,实际位姿下机床坐标为 (x_{re}, y_{re}, z_{re}) ,则存在刚体变换矩阵 \mathbf{T}_{tr} ,使:

$$(x_{id}, y_{id}, z_{id}, 1) = \mathbf{T}_{tr} (x_{re}, y_{re}, z_{re}, 1), \quad (2)$$

其中变换矩阵 \mathbf{T}_{tr} 可表示为:

X, Y, Z 轴的平移量。

因此,工件定位问题的本质是求解相同机床坐标系下工件实际位姿与理想位姿之间的刚体变换矩阵。在未找正及调平的状态下,为描述工件的实际位姿,利用高精密度传感器对工件的实际位姿进行测量,测量点集记为点云 $\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_i | \mathbf{m}_i = (x_i, y_i, z_i)^T, i = 1, \dots, N_m\}$ 。理想位姿则通过离散化工艺坐标系下工件的 CAD 理论模型来描述,记为 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_i | \mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)^T, i = 1, \dots, N_p\}$ 。由于测量点云 \mathbf{M} 中所有点在理想位姿点云 \mathbf{P} 中的对应点均未知,引入最小二乘的思想,将位姿求解问题描述为:已知测量点云 \mathbf{M} , CAD 模型点云 \mathbf{P} , 求解刚体变换矩阵 \mathbf{T}_{tr} 及 \mathbf{M} 的对应点,使得式(4)最小。

$$f(\mathbf{T}_{tr}, \mathbf{P}) = \sum_{i=0}^{N_m} \|\mathbf{T}_{tr} \cdot \mathbf{m}_i - \mathbf{P}_i\|^2. \quad (4)$$

利用磁流变抛光技术进行修形的光学工件,其加工面的面形误差通常在几个波长内,几何精度非常高,而非加工面通常用于安装支撑,精度等级相对较低且不同工件之间具有较大的差异。为避免非加工面几何误差导致定位精度下降,且使定位方法更具通用性,本文中工件的实际位姿测量点均在加工面上。

3 回转对称工件定位

3.1 经典 ICP 点云匹配算法

经典 ICP 算法将位姿求解问题分为最近点搜索和位姿优化问题,在给定旋转矩阵初值的情况下交替进行位姿优化与最近点匹配,直到式(4)所示目标函数收敛。记第 $k-1$ 步得到的点云变换矩阵为 $\mathbf{T}_{tr}^{(k-1)}$, 迭代过程如下:

第 1 步:设 \mathbf{T}_{tr} 的初始值为 $\mathbf{T}_{tr}^{(0)}$, 收敛条件 τ_{set} , 令 $k=1$ 。

第 2 步:将点云 \mathbf{M} 进行坐标变换, $\mathbf{M}^{(k)}$ 中每个点 $\mathbf{m}_i^{(k)}$ 为:

$$\mathbf{m}_i^{(k)} = \mathbf{T}_{tr}^{(k-1)} \mathbf{m}_i. \quad (5)$$

通过遍历搜索,找到目标点云 \mathbf{P} 中与之欧式距离最近的配对点 $\mathbf{P}_i^{(k)}$ 。

第 3 步:利用 SVD 分解法^[12]求解使式(6)成立时的 $\mathbf{T}_{tr}^{(k)}$:

$$err^{(k)} = \min \left(\sum_{i=0}^{N_m} \|\mathbf{T}_{tr}^{(k)} \cdot \mathbf{m}_i - \mathbf{P}_i^{(k)}\|^2 \right). \quad (6)$$

第 4 步:由式(7)计算匹配后两点云的平均匹

配误差 τ :

$$\tau = \frac{err^{(k)}}{N_m}. \quad (7)$$

如果 $\tau < \tau_{set}$, 输出 $\mathbf{T}_{tr} = \mathbf{T}_{tr}^{(k)}$, 终止迭代;否则, $k=k+1$, 返回到第 2 步。

经典 ICP 算法具有精度高、实现简单及适应性好等优点,可实现任意形状点云的配准,但算法要求两组点云具有包含关系,且匹配结果受初始值影响较大,具有局部收敛特性。基于经典 ICP 算法的工件位姿匹配结果受初始变换矩阵及匹配过程中点对关系建立的影响,直接应用于回转对称非球面工件的位姿匹配,存在匹配结果不唯一和计算效率低的问题。

3.1.1 匹配结果不唯一

由于工件具有回转对称特性,工件表面的测点无法实现绕机床 Z 轴旋转角度 γ 的精确定位,理论上任意匹配结果绕机床 Z 轴旋转任意角度得到的变换矩阵,均能实现测量点云与理想点云的精确匹配, γ 的匹配结果取决于初始旋转矩阵的设定。图 3 所示为同组目标点云与测量点云在不同迭代初始矩阵下得到的结果。

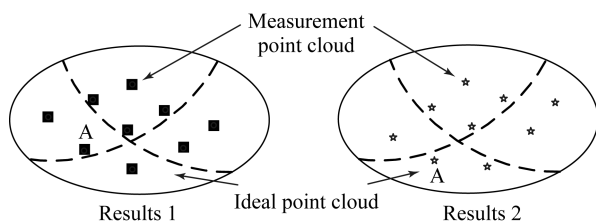


图 3 不同初始旋转矩阵迭代匹配结果

Fig. 3 Iterative matching results caused by different initial rotation matrix

3.1.2 计算效率低

为满足 CAD 模型点云 \mathbf{P} 与测量点云 \mathbf{M} 之间的包含关系,且所有测量点在 \mathbf{P} 中均能找到准确的匹配点,对 CAD 理论模型进行离散时,离散间隔应小于定位精度。磁流变抛光中工件的 Z 向定位误差需控制在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 内,考虑到实际加工过程中存在机床运动误差,定位匹配误差需控制在更小的范围内。以 $5 \mu\text{m}$ 的间隔对直径为 $\Phi 100 \text{ mm}$ 的非球面工件进行离散化,点云 \mathbf{P} 的规模为 31 415.93 万,经典 ICP 算法的时间复杂度为 $O(N_m N_p)$, 遍历搜索将耗费大量的时间。实际加工中,光学工件尺寸往往更大,经典 ICP 算法的计算效率较低。

3.2 回转对称非球面工件定位

3.2.1 局部收敛指定性匹配

针对匹配结果不唯一的问题,本文提出通过构建特定的初始迭代矩阵,实现 Z 轴旋转角度与设定值相同的匹配方法。初始迭代矩阵的构建包括确定初始旋转角 α, β, γ 及平移距离 d_x, d_y, d_z 。

首先设定初始旋转角。手动找正、调平再对刀工件定位模式下,回转对称非球面工件的找正定位依靠工件侧面的定位线,本文采用相同方式使工件侧面定位线与 X 及 Y 轴分别平行,绕机床 Z 轴旋转角度 γ 设定为 0。找正后,对工件进行目视初略调平。此时, α, β 值较小,可近似为 0。

然后设定初始平移距离。以机床坐标系为工件理想位姿 CAD 模型坐标系,两点云的平移量近似值通过五点法得到。如图 4 所示,在机床坐标系下,测量工件侧面 4 点的位置信息。1,3 测点连线与 Y 轴平行,2,4 测点连线与 X 轴平行。非球面工件曲面中心点坐标 (x_{rc}, y_{rc}) 为:

$$\begin{cases} x_{rc} = \frac{1}{2}(x_2 + x_4) \\ y_{rc} = \frac{1}{2}(y_1 + x_3) \end{cases} \quad (8)$$

测量该点的 Z 向坐标值 z_{rc} ,假设工艺坐标系下非球面工件曲面中心点坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,初始点云平移量为:

$$\begin{cases} d_x = x_c - x_{rc} = x_c - \frac{1}{2}(x_2 + x_4) \\ d_y = y_c - y_{rc} = y_c - \frac{1}{2}(y_1 + x_3) \\ d_z = z_c - z_{rc} \end{cases} \quad (9)$$

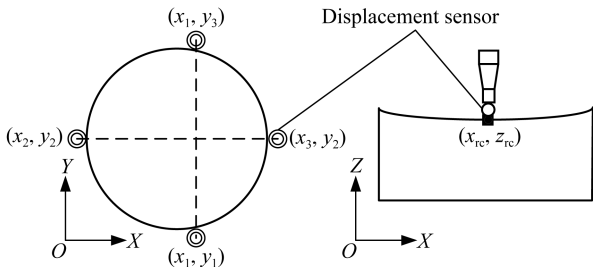


图 4 五点法原理示意图

Fig. 4 Principle diagram of five-point measurement method
初始迭代矩阵可表达为:

$$\mathbf{T}_{tr}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_c - \frac{1}{2}(x_2 + x_4) \\ 0 & 1 & 0 & y_c - \frac{1}{2}(y_1 + x_3) \\ 0 & 0 & 1 & z_c - z_{rc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2.2 两级 ICP 匹配改进方法

针对计算效率低的问题,本文提出 ITLICP。第一级匹配为粗匹配,目标点云的离散间隔较大,粗略匹配后将测量点云进行坐标变换,得到第一级匹配后的点云 \mathbf{M}_1 ,将匹配结果 \mathbf{M}_1 向 XOY 平面空间垂直映射,对目标点云进行更新,减小目标点云规模。映射原理为:求取每个 m_{li} 在机床坐标系中垂直 XOY 平面的映射点 m_{pi} ,并在 XOY 平面上以 m_{pi} 为中心,半径为 $\sqrt{2}$ 倍一级匹配离散间隔的区域 A,将 A 映射到理想位姿时的非球面上,得到区域 A_1 ,如图 5 所示。

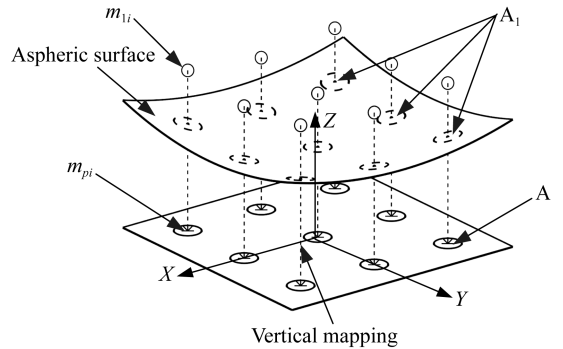


图 5 空间垂直映射原理

Fig. 5 Principle of vertical mapping

对更新后的目标点云进行重新细化离散,并将一级匹配结果作为二级匹配的初始匹配条件,通过两级 ICP 匹配方式实现定位误差小于设定值的精确定位。结合前文所述的局部收敛指定性匹配,提出 ITLICP,具体实现步骤如下:

(1) 第一级 ICP 匹配

将工件放置在工作台上,粗略调平后精确找正,使其侧面标记线分别与机床 X 及 Y 轴向平行;五点法确定工件中心 (x_{rc}, y_{rc}) ,测量该点处 Z 向坐标值 z_{rc} ,理想坐标系为机床坐标系,得到初始变换矩阵 $\mathbf{T}_{tr}^{(0)}$:

$$\mathbf{T}_{tr}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{rc} \\ 0 & 1 & 0 & y_{rc} \\ 0 & 0 & 1 & z_{rc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

测量实际工况位姿下非球面工件表面若干点坐标,得到点云 \mathbf{M} ;在机床坐标系下将非球面进

行离散化,离散间隔为 $\Delta\tau\omega$,得到点云 \mathbf{P} ;以 $\mathbf{T}_{ir}^{(0)}$ 为初始旋转矩阵进行 ICP 匹配,收敛条件为 \mathbf{M} 中任意点 m_i 以所求旋转矩阵进行坐标变换后与 \mathbf{P} 中对应点 \mathbf{P}_i 的距离小于 $\Delta\tau\omega$,即:

$$\max\{\|\mathbf{T}_{ir1} \cdot m_i - \mathbf{P}_i\|^2, i=1, \dots, N_m\} < \Delta\tau\omega, \quad (12)$$

得到一级转换矩阵 \mathbf{T}_{ir1} 。

(2) 第二级 ICP 匹配

将测量点云 \mathbf{M} 进行坐标变换,得到第一级匹配后的点云 \mathbf{M}_1 为:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{T}_{ir1} \cdot \mathbf{M}. \quad (13)$$

如图5所示,求取每个 m_{1i} 在机床坐标系中垂直 XOY 平面的映射点 m_{pi} ,并求取在 XOY 平面上以 m_{pi} 为中心,半径为 $\sqrt{2}\Delta\tau\omega$ 的区域 A ,将 A 映射到理想位姿时的非球面上,得到区域 A_1 ,将 A_1 以 $\Delta\tau\omega_1$ 为离散间隔,记离散化得到的点云为 \mathbf{P}^1 ;以 \mathbf{T}_{ir1} 为初始迭代矩阵, \mathbf{M} 为匹配源点云, \mathbf{P}^1 为目标点云进行 ICP 匹配,求取转换矩阵 \mathbf{T}_{ir} ,收敛条件为 \mathbf{M} 中任意点 m_i 以所求旋转矩阵进行坐标变换后与 \mathbf{P}^1 中对应点 \mathbf{P}_i^1 的距离小于定位精度 δ_{set} ,即:

$$\max\{\|\mathbf{T}_{ir} \cdot m_i - \mathbf{P}_i^1\|^2, i=1, \dots, N_m\} < \delta_{set}. \quad (14)$$

定位算法中,测量点数目 N_m 、第一级 ICP 匹配间隔 $\Delta\tau\omega$ 及第二级 ICP 匹配间隔 $\Delta\tau\omega_1$ 是影响计算效率和定位精度的关键因素。

ICP 算法要求测量点数目 N_m 不少于 6 个^[12],增加测量点数目可以减小偶然误差对定位精度的影响,但过多的测点数目会增加算法的时间复杂度,且耗费更多的测量时间,降低定位方法效率,因而测量点目选取需综合考虑传感器测量方式、测量精度、测量效率及定位效率。高精度机械接触式测量方法具有可靠性好及成本低的优点^[6],在工程中运用广泛,本文针对接触式测量方式,提出如图6所示的测量点分布策略。图6中, D 表示工件直径, k 为比例系数,当非球面工件边缘几何误差较大时,可设定相应的 k 将测点选取在几何精度高的区域。

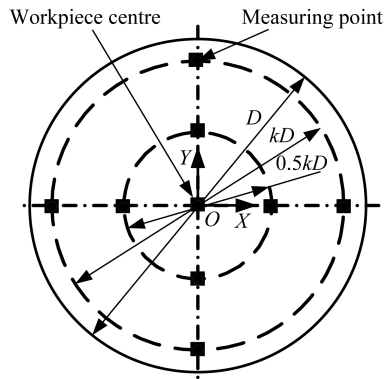


图6 测量点分布

Fig. 6 Distribution of measuring points

ICP 算法的时间复杂度为 $O(N_m, N_p)$,测量点云点数相同,通过比较目标点云点数可实现 ITLICP 与经典 ICP 算法的效率对比。记回转对称工件的直径为 D ,则第一级 ICP 匹配目标点云数可表示为:

$$N_{m1} = \frac{\pi D^2}{4(\Delta\tau\omega)^2}. \quad (15)$$

第二级 ICP 匹配目标点云数为:

$$N_{m2} = \frac{2N_m \pi (\Delta\tau\omega)^2}{(\Delta\tau\omega_1)^2}. \quad (16)$$

为实现相同的定位精度,以 $\Delta\tau\omega_1$ 为离散间隔直接对原始 CAD 模型进行离散,经典 ICP 算法定位求解的目标点云点数为:

$$N_{m3} = \frac{\pi D^2}{4(\Delta\tau\omega_1)^2}. \quad (17)$$

令 $k = \frac{\Delta\tau\omega}{\Delta\tau\omega_1}$,则 ITLICP 与经典 ICP 算法的时间复杂度比为:

$$f(k) = \frac{N_{m1} + N_{m2}}{N_{m3}} = \left(\frac{1}{k}\right)^2 + \frac{8N_m (\Delta\tau\omega_1)^2}{D^2} k^2. \quad (18)$$

当 $\Delta\tau\omega_1$ 及 N_m 确定时,式(18)在 $k = \sqrt[4]{\frac{D^2}{8N_m \cdot (\Delta\tau\omega_1)^2}}$ 时取得最小值,此时 ITLICP 方法的迭代计算效率提升最大。实际应用过程中,ITLICP 方法的整体用时为粗略调平及找正、测点测量与迭代计算用时之和,当迭代计算效率提高到一定阶段后,它对整个方法的效率提升作用变小,因而 k 的取值可根据具体应用过程及 $f(k)$ 在 $\Delta\tau\omega_1$, N_m 及 D 不同取值时的变化规律进行调整。 k 确定后, $\Delta\tau\omega$ 则通过 $\Delta\tau\omega_1 \cdot k$ 得到。

测点的实测位置精度不会超过机床运动轴的

分辨率 τ , 为满足定位精度为 δ_{set} 的精确匹配, $\Delta\omega_1$ 的取值为:

$$\tau \leq \Delta\omega_1 \leq \delta_{\text{set}}. \quad (19)$$

由于 D 的值远大于 $\Delta\omega_1$, 因此在式(19)所示的取值范围内, $\Delta\omega_1$ 对 $f(k)$ 的影响较小, 则 $\Delta\omega_1$ 的设定取决于它对定位精度的影响。由于 $\Delta\omega_1$ 取值越小, 离散点云对理论 CAD 模型的描述越准确, 定位精度也就越高, 因此 $\Delta\omega_1$ 应设定为 τ 。

3.3 定位精度分析

两级定位方法 ITLICP 的精度主要受测点测量误差、非球面几何误差及工件找正误差的影响, 这三种误差均会影响转换矩阵 T_{tr} 的计算结果。通过机床运动轴带动传感器对工件表面进行测量时, 机床定位误差 ϵ_1 及传感器误差 ϵ_2 会导致测量误差, 这两种误差均为随机误差, 可以通过多次测量的方式提高测量精度。非球面几何误差为固有误差, 可通过三坐标机、轮廓仪等高精密测量设备对工件非球面进行测量, 并对 CAD 理论模型 P 进行修正。找正误差对绕 Z 轴的旋转角 γ 产生影响, 本文采用的找正方式与传统方式相同, 因而找正精度与传统方式相当, 本文不展开讨论。

4 实验及结果

4.1 实验方案

ITLICP 可计算实际工件位姿向理想位姿变换的矩阵 T_{tr} , 通过 T_{tr} 的逆矩阵 T_{tr}^{-1} , 可实现理想姿态下工件表面点云向实际姿态转换, 进行加工工艺轨迹的修正, 记转换后的点云为 M^c , 理想姿态下工件表面点云向实际姿态转换的关系可表达为:

$$M^c = P \cdot T_{\text{tr}}^{-1}. \quad (20)$$

定位误差中, Z 向定位误差直接引起切深误差, X, Y 向误差对切深误差的影响较小, 因此本文设计实验对 Z 向定位精度进行验证。

按照 3.2.2 节所述步骤进行非球面精确定位实验, 求解得到变换矩阵 T_{tr} 。选取理想坐标系下工件 CAD 理论模型表面 K 个点 $P_i^{\text{test}} = \{P_i^{\text{test}} \mid P_i^{\text{test}} = (x_i, y_i, z_i)^T, i=1, \dots, K\}$, 按照式(20)将所选点映射到工件实际姿态 $M_i^{\text{testc}} = \{M_i^{\text{testc}} \mid M_i^{\text{testc}} = (x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i})^T, i=1, \dots, K\}$ 。在机床坐标系下, 测量对应于所有 (x_{c_i}, y_{c_i}) 处, 工件表面的 Z 向实

际位置 z_c , 对比它与理论计算值的偏差 Δz 。改变工件位姿, 重复上述对比实验, 记录各测点偏差。磁流变修形抛光, 对比抛光前后面形误差的收敛情况。

本文以一块 $\Phi 100$ mm 熔石英抛物面镜为实验对象, 在自研六轴磁流变机床 PKC-1000Q2 上进行定位及验证实验, 如图 7 所示。机床 X, Y, Z 的定位精度分别为 $6, 6, 3 \mu\text{m}$, 各轴运动分辨率均为 $1 \mu\text{m}$ 。凹形抛物面镜的顶点曲率半径为 480 mm, 面形 PV 为 0.22λ 。位姿测量传感器为雷尼绍三坐标接触式传感器, 重复定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。用于位姿求解的计算机配置为 64 位 Win7 操作系统、8 GB 内存和 i7-6700CPU。

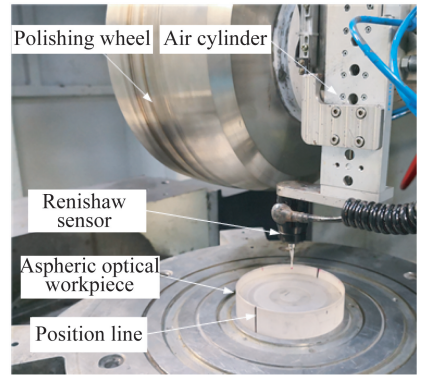


图 7 磁流变抛光回转对称工件及实验设备

Fig. 7 Experimental workpiece and equipment for magnetorheological polishing of rotary symmetrical aspherical surface

4.2 实验结果与分析

为提高测量精度, 定位实验中各测量点的测量结果为两次测量求取的平均值, 验证实验中各测量点的测量结果均为 10 次测量求取的平均值。具体实验步骤如下:

步骤 1: 利用工件侧面定位线对工件进行精确找正及粗略调平, 利用雷尼绍三坐标传感器进行 5 点测量, 得到初始迭代矩阵为:

$$T_{\text{tr}}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -499.270 \\ 0 & 1 & 0 & -474.586 \\ 0 & 0 & 1 & -284.878 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

步骤 2: 按图 6 所示, 取 $k=0.8, D=100$ mm, 测量实际工况下非球面工件表面 9 点坐标, 得到

工件实际位姿测量点云 M , 如表 1 所示。

表 1 工件位姿测量结果

Tab.1 Measurement result of workpiece pose

测点	x	y	z
1	-499.270	-474.586	-284.878
2	-539.270	-474.586	-283.073
3	-519.270	-474.586	-284.393
4	-479.270	-474.586	-284.526
5	-459.270	-474.586	-283.341
6	-499.270	-514.586	-283.176
7	-499.270	-494.586	-284.444
8	-499.270	-454.586	-284.476
9	-499.270	-434.586	-283.242

步骤 3: 以抛物面顶点为坐标原点, 对理想位姿下凹抛物面进行建模及离散, 离散间隔为 1 mm, 离散点云 P 如图 8 所示。

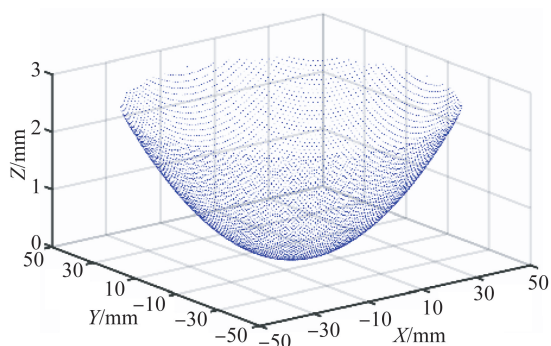


图 8 CAD 模型点云

Fig. 8 Point cloud of CAD model

步骤 4: 进行第一级 ICP 匹配计算, 迭代求解得到一级转换矩阵。投影映射, 以 $1 \mu\text{m}$ 为间隔进行模型离散, 对理想位姿点云进行更新, 更新后点云 P^1 如图 9 所示。将第一级转换矩阵作为第二级匹配初始迭代矩阵, 令定位精度 $\delta_{\text{set}} = 7 \mu\text{m}$, 求解得到转换矩阵 T_{tr} :

$$T_{\text{tr}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.003\ 8 & -499.273\ 1 \\ 0 & 1 & 0.000\ 8 & -474.586\ 8 \\ -0.003\ 3 & 0.000\ 8 & 1 & -284.875\ 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

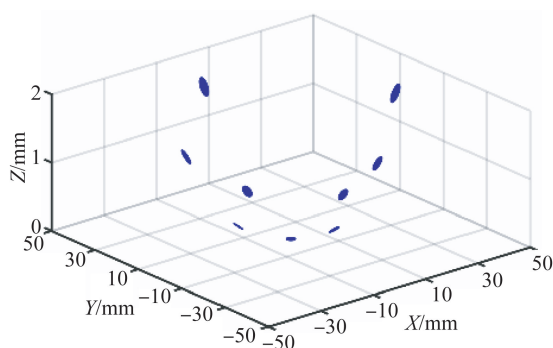


图 9 映射后理想位姿点云

Fig. 9 Ideal point cloud after mapping

测量点云与理想位姿点云的两级 ICP 匹配结果如图 10 所示。求解式 (21) 所示非线性方程组, 得到表 2 所示的刚体变换参数。

$$\begin{cases} -\cos \beta \sin \gamma = T_{\text{tr}}(1, 2) \\ \sin \beta = T_{\text{tr}}(1, 3) \\ -\cos \beta \sin \alpha = T_{\text{tr}}(2, 3) \\ d_x = T_{\text{tr}}(4, 1) \\ d_y = T_{\text{tr}}(4, 2) \\ d_z = T_{\text{tr}}(4, 3) \end{cases} \quad (21)$$

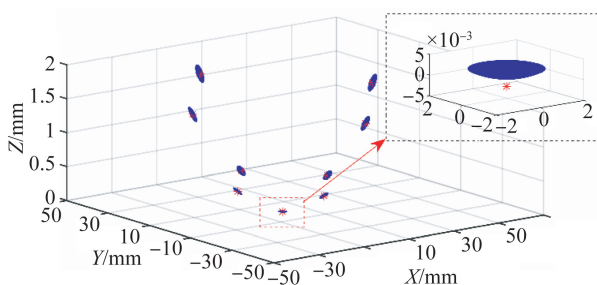


图 10 点云匹配结果

Fig. 10 Matching result of point clouds

表 2 刚体变换参数求解结果

Tab. 2 Solution result of rigid body transformation parameter

参数	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$\gamma / (^\circ)$	d_x / mm	d_y / mm	d_z / mm
值	0.047	-0.191 6	0	-499.273 1	-474.586 8	-284.875 8

实验结果表明, 刚体变换矩阵中 γ 为 0, 成功实现了工件绕机床 Z 轴旋转角度与设定值相同的匹配; 五点法测量得到的平移量与位姿求解结果基本一致; 粗略调平后, 工件实际位姿相对于理想位姿仍具有绕机床 X 及 Y 轴的旋转分量, 分别为 0.047° 及 $-0.191\ 6^\circ$ 。按图 11 所示选取抛物

面上 8 个点匹配结果进行验证,取 $k=0.8, D=100\text{ mm}$,在理想位姿下验证点的位姿信息,结果如表 3 所示。利用 T_{tr}^{-1} 将所选点映射到工件实际姿态,在机床坐标系下,利用雷尼绍三坐标传感器测量对应于所有 (x_{c_i}, y_{c_i}) 处,工件表面的 Z 向实际位置 z_c 。表 4 所示为验证点的计算值及实测值, Z 向定位误差的计算值与实测值的偏差最大为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。

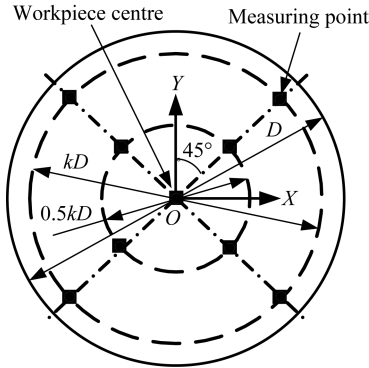


图 11 测量点分布

Fig. 11 Distribution of measuring points

表 3 验证点理想位姿

Tab. 3 Ideal pose of verification points (mm)

验证点	x	y	z
1	-28.284	-28.284	1.667
2	-28.284	28.284	1.667
3	-14.142	-14.142	0.417
4	-14.142	14.142	0.417
5	14.142	-14.142	0.417
6	14.142	14.142	0.417
7	28.284	-28.284	1.667
8	28.284	28.284	1.667

表 4 验证点实际位姿测量结果

Tab. 4 Measurement result of actual pose of verification points (mm)

验证点	x	y	z	z_c	Δc
1	-527.552	-502.870	-283.091	-283.090	-0.001
2	-527.552	-446.301	-283.135	-283.138	-0.003
3	-513.414	-488.729	-284.398	-284.400	-0.002
4	-513.414	-460.444	-284.423	-284.423	-0.000
5	-485.130	-488.729	-284.494	-284.495	-0.001
6	-485.130	-460.444	-284.517	-284.518	-0.001
7	-470.983	-502.870	-283.277	-283.281	-0.004
8	-470.983	-446.301	-283.325	-283.327	-0.002

改变工件位姿,重复上述验证实验,图 12 所示为 20 次不同位姿下验证点 Z 向计算值与测量值的最大偏差 Δz_{\max} 分布。 Δz_{\max} 包含了测量误差及 ITLICP 定位误差。记测量点的实际值为 z_r ,如式(22)所示:

$$z_r = z_c - \epsilon_1 - \epsilon_2. \quad (22)$$

则 ITLICP 方法的定位误差 ϵ 可表示为:

$$\epsilon = z_r - z_c = (z_c - z) - (\epsilon_1 + \epsilon_2). \quad (23)$$

由图 12 可知,实验中验证点 Z 向计算值与测量值的最大偏差为 $-5\text{ }\mu\text{m}$,因此定位误差 ϵ 在 $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 取最大正值时具有最大负值。多次测量求取均值后,验证点的实际定位误差 ϵ_1 小于 Z 轴定位精度 $(3\text{ }\mu\text{m})$,且 $\epsilon_2 \leq 1\text{ }\mu\text{m}$,则在验证实验中,ITLICP 方法的定位误差 ϵ 优于 $9\text{ }\mu\text{m}$,满足定位要求。

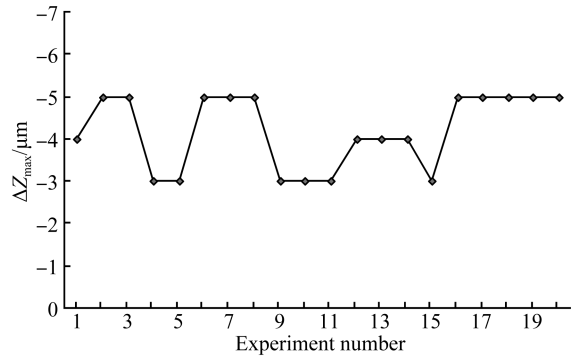


图 12 不同位姿下验证点 Z 向计算值与实测值的最大偏差
Fig. 12 Maximum deviation between calculated value and measured value of verification point Z in different poses

为验证定位方法 ITLICP 在实际磁流变抛光中应用的可行性,对定位实验中 $\Phi 100\text{ mm}$ 口径的熔石英抛物面镜进行磁流变修形抛光实验。首先,在非调平模式下对该抛物面镜进行位姿求解,然后对手动调平模式下按螺旋轨迹规划的 NC 代码进行修正,并进行抛光。图 13 所示为修形抛光前后的面形数据,工件面形误差 PV 值由 0.22λ 收敛到 0.107λ ,面形误差 RMS 值由 0.033λ 收敛到 0.009λ ,结果表明:定位方法 ITLICP 的定位精度满足磁流变抛光的定位要求,能够实现非球面抛光的有效收敛。传统方式下,完全依靠操作人员经验对 $\Phi 100\text{ mm}$ 尺寸工件进行调平找正时,整个过程耗时约 $20\sim 30\text{ min}$ 。ITLICP 定位方法在常规计算机上的平均计算时间为 1.3 min ,粗略调平及找正时间在 3 min 左右,测量点位姿的测量

时间为 3 min, 共计 7.3 min, 大幅度减少了光学工件磁流变抛光时的定位辅助时间。

表 5 为 ITLICIP 与经典 ICP 算法在相同收敛条件下的效率对比。在相同计算机配置下, 经典 ICP 算法由于目标点云数据量过大, 导致内存溢出, 无法实现 $\Phi 100$ mm 工件在设定精度下的配准。ITLICIP 方法则能实现回转对称非球面工件绕机床 Z 轴回转角度设定为 0 的精确配准, 定位精度优于 $9 \mu\text{m}$, 平均计算时间为 1.3 min, 极大地提高了计算效率。

表 5 ITLICIP 与经典 ICP 算法的匹配效率对比

Tab. 5 Comparison of matching efficiency between classical ICP and ITLICIP

匹配方法	工件尺寸/mm	收敛精度/ μm	目标点云数据量/万	测量点数目	平均匹配时间/min	定位精度/ μm
经典 ICP	$\Phi 100$	7	785 398.15	9	失败	—
ITLICIP	$\Phi 100$	7	第一级	0.78	9	1.3
			第二级	5 654.87		

5 结 论

本文根据磁流变抛光恒浸深控制要求, 提出了一种基于 ICP 的回转对称非球面工件精确定位方法。实验结果表明: 所提磁流变抛光定位方法 ITLICIP 满足磁流变抛光的定位要求, 可实现回转对称工件的有效收敛, 多次实验中定位精度

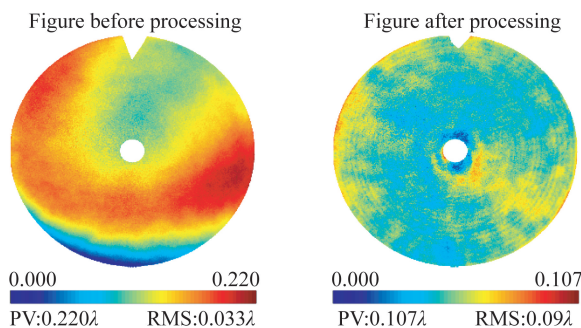


图 13 抛物面镜自定位修形实验结果

Fig. 13 Experiment results of parabolic mirror modification after self-positioning

均优于 $9 \mu\text{m}$, 平均定位时间为 7.3 min。与人工手动对刀相比, 该方法在保证定位精度的同时提高了工件的定位效率。

定位方法中, 关键参数会影响不同尺寸回转对称非球面的定位精度和效率, 在以后的工作中, 将继续完善相关参数的研究分析, 以进一步提高定位方法的适用性。

参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 李龙响, 郑立功, 邓伟杰, 等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2819-2826.
LI L X, ZHENG L G, DENG W J, et al.. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2819-2826. (in Chinese)
- [3] 孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等. $\Phi 420$ mm 高次非球面透镜的加工与检测 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3068-3075.
MENG X H, WANG Y G, LI W Q, et al.. Fabricating and testing of $\Phi 420$ mm high-order aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12):

3068-3075. (in Chinese)

- [4] 刘振宇, 李龙响, 曾雪峰, 等. 大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 813-819.
LIU ZH Y, LI L X, ZENG X F, et al.. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 813-819. (in Chinese)
- [5] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
YUAN J L, WU ZH, LÜ B H, et al.. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177. (in Chinese)
- [6] 陈华, 陈东生, 何建国, 等. 基于西门子 840D 测头对刀技术研究 [J]. 制造技术与机床, 2013(11): 17-20.
CHEN H, CHEN D SH, HE J G, et al.. Research on the tool-setting technology based on SINUMER-

- IK₈₁₀D [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2013(11): 17-20. (in Chinese)
- [7] GOU J B, CHU Y X, LI Z X. On the symmetric location problem [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(4): 533-540.
- [8] LI X, MA L M, LI Z X. A geometric algorithm for symmetric workpiece localization [C]. *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008. 6069-6074.
- [9] FAUGERAS O, HEBERT M. The representation, recognition, and locating of 3-D objects [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(3):27-52.
- [10] BROCKETT R W. Least squares matching problems [J]. *Linear Algebra Its Appl*, 1989, 122-124: 761-777.
- [11] HONG T, TAN X. Method and apparatus for determining position and orientation of mechanical objects; U. S. Patent, 5208763 [P]. 1990; 3-18.
- [12] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [13] MENQ C H, YAU H T, LAI G Y, *et al.*. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(2): 268-278.
- [14] RUSINKIEWICZ S, LEVOY M. Efficient variants of the ICP algorithm [C]. *Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001: 145-152.
- [15] 徐金亭, 孙玉文, 刘伟军. 复杂曲面加工检测中的精确定位方法 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(6): 175-179.
- XU J T, SUN Y W, LIU W J. Optimal localization of free-form shaped parts in precision inspection [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6): 175-179. (in Chinese)
- [16] 刘胜兰, 张丽艳, 王晓飞. 一种考虑区域精度差异的模型配准方法 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(13):139-144.
- LIU SH L, ZHANG L Y, WANG X F. A shape registration method considering the regional difference in precision [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(13): 139-144. (in Chinese)
- [17] 张洪帆, 李铭, 隋大山. 飞机蒙皮机加工过程中的自定位方法研究 [J]. *模具技术*, 2014(2):6-9, 22.
- ZHANG H F, LI M, SUI D SH. Research on self-positioning method for aircraft skin machining [J]. *Die and Mould Technology*, 2014(2): 6-9, 22. (in Chinese)
- [18] 李文龙, 谢铨, 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 W L, XIE H, YIN ZH P, *et al.*. Mathematical modeling and error analysis of 3D matching based on variance minimization principle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(16): 190-198. (in Chinese)
- [19] 王彦哲, 李圣怡, 胡皓. 磁流变抛光工件自动定位原理与方法研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2013, 49(5):5-8.
- WANG Y ZH, LI SH Y, HU H. Research on principle and approach of workpiece automatic localization technique in magnetorheological finishing [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2013, 49(5): 5-8. (in Chinese)
- [20] JACOBS S D, GOLINI D, HSU Y, *et al.*. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing [J]. *SPIE*, 1995, 2576: 372-382.
- [21] 李龙响. 大口径非球面磁流变加工的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- LI L X. *Study on the Key Techniques of Magnetorheological Finishing for Large Aspheric Optics* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [22] 郭聪玲. 三维点云配准技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- GUO C L. *Research on Registration Technology for 3D Point Cloud* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)

作者简介:



周涛(1991—),男,四川眉山人,工程师,2017年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事超精密抛光技术的研究。E-mail: zhou386396@163.com

通讯作者:



樊炜(1983—),男,湖南长沙人,副研究员,2007年于华中科技大学获得学士学位,2012年于中国科学院数学与系统科学研究院获得博士学位,主要从事数控加工与超精密抛光技术的研究。E-mail: weifan1127@hust.edu.cn