

引文格式: 范云龙, 王海亮, 毛定群, 等. 航空制造中空间分布圆孔三维定位技术研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(5): 84–92, 113.

FAN Yunlong, WANG Hailiang, MAO Dingqun, et al. Research on three-dimensional localization technology of spatially distributed circular holes in aerospace manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(5): 84–92, 113.

航空制造中空间分布圆孔三维定位技术研究*

范云龙, 王海亮, 毛定群, 叶 南

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 针对航空制造中对空间分布圆孔的三维数字化质量检测的需求, 本文基于视觉测量技术, 系统探讨了机加圆孔的空间定位与三维重建方法。为消除机加圆孔加工表面质量和表面纹理等因素影响, 采用了一种基于弧段分组技术的圆孔图像提取方法, 并提出一种有效的筛选机制。引入两视锥重建与求交算法对圆孔进行空间初定位, 以此作为空间圆位姿初值, 并建立了空间圆位姿优化误差方程, 结合多视图几何获得的相机内外参数, 采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法对空间圆姿态进行优化求解。在 3 个空间分布的样件上加工出孔径为 2–8 mm, 呈空间分布的圆孔阵列, 本文方法能够实现对圆孔边缘和位置的精准识别与重建, 重建圆孔与数模对比的平均偏差不大于 0.112/–0.100 mm, 最大上下偏差不超过 0.200/–0.200 mm。

关键词: 机加圆孔; 视觉测量; 椭圆提取; 三维重建; 多视图几何

Research on Three-Dimensional Localization Technology of Spatially Distributed Circular Holes in Aerospace Manufacturing

FAN Yunlong, WANG Hailiang, MAO Dingqun, YE Nan

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] To address the need for 3D digital quality inspection of spatially distributed circular holes in aerospace manufacturing, this paper systematically investigates methods for spatial positioning and 3D reconstruction of machined circular holes based on vision measurement technology. To mitigate the influence of surface quality and texture of machined circular holes, an image extraction method for circular holes based on arc-segment grouping technology is adopted, along with a proposed effective screening mechanism. A dual-cone reconstruction and intersection algorithm is introduced to preliminarily position the circular holes in space, providing initial values for the spatial circle pose. An error equation for optimizing the spatial circle pose is established, and the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm is used to refine the pose solution, leveraging intrinsic and extrinsic camera parameters obtained through multi-view geometry. Circular hole arrays with diameters ranging 2–8 mm were machined on three samples in spatial distributions. The proposed method achieved precise identification and reconstruction of circular hole edges and positions, with an average deviation of reconstructed circles from CAD models within 0.112/–0.100 mm and a maximum deviation not exceeding 0.200/–0.200 mm.

Keywords: Machined circular holes; Vision measurement; Ellipse extraction; 3D reconstruction; Multi-view geometry

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.05.084

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52075260)。

航空制造中主要的连接方式为铆接和螺栓连接,因此航空零件上存在大量孔径不一且呈空间分布的机加圆孔。目前对圆孔的数字化检测手段主要包括使用三坐标测量机^[1]或点云扫描仪^[2]等,然而,这些方法存在明显的局限性。例如,三坐标测量机难以测量直径较小的圆孔,而点云扫描得到的数据由于圆孔边缘的非连续性,很难在点云处理阶段快速有效分离出圆孔的真实边缘信息。随着工业环境对圆孔检测设备的通用性、快速性和高精度要求的提高,现有的圆孔高精度测量设备无法满足上述需求,而基于圆孔图像的定位和检测系统为机加圆孔的测量提供了创新的解决思路^[3]。

机加圆孔的三维定位技术涉及相应圆孔图像的识别、椭圆提取技术和空间圆重建及优化技术等。由于加工质量和表面纹理等因素影响,圆孔图像边缘呈现出多条轮廓,因此通过 Canny 算子提取轮廓后,直接拟合椭圆的方法往往失效。对这类图像椭圆提取算法的研究集中在弧链方面。这类图像椭圆提取算法包含了弧线段分割、弧线段匹配和弧线段聚合 3 个步骤。Prasad 等^[4]研究了椭圆弧段和直线段检测算法(ELSD)以实现高噪声和多种假象中图像椭圆的精确识别和提取。Meng 等^[5]提出了基于相邻弧线段及邻接矩阵的快速椭圆识别优化算法(Arc adjacency matrix-based fast ellipse detection, AAMED),用于椭圆边缘检测。然而,现有的算法对边缘不连续的加工圆孔存在识别率不高等情况,因此需要一种自适应的椭圆提取算法以应对这类缺陷椭圆的图像。

对于两视图空间圆的重建算法,已有单视锥法以及两视锥求交法等算法。在此前的研究中,Safae-Rad 等^[6]在已知空间圆真实半径的情况下,提出单目单视锥求解空间圆中心点和法向量信息,然而计算的空间圆存在双解;Chen 等^[7]通过基于圆心图像投影弦的几何方法找到图像上的点与实际圆上点的对应关系;Zheng 等^[8]基于此形成了一个圆的投影方程,进而提出一个闭合形式的解决方案来估计圆的姿态。然而这些空间圆位姿估计的算法并未考虑到空间圆重建的二元性,魏振忠等^[9]使用两条与空间圆共面的线之间的角度约束来消除歧义;Miao 等^[10]使用从参考点到圆心的距离的欧几里得不变性作为约束来解决姿态歧义。然而上述方法存在问题,需要提前通过高精度的测量获得机加圆孔的半径信息,而 Quan^[11]在两个视角相对位置已知的情况下,重建对应的圆锥体并进行两视锥求交,就能解算空间圆的位姿信息的算法,无需圆孔的半径信息,但该方法仅仅依靠两视图解算圆的空间信息,受噪声干扰较大,因此需要进一步优化空间圆的位姿参数。

基于多视图几何的三维重建技术是一种通过增加

图像提高重建精度的有效方法,可从不同角度拍摄到的多幅二维图像中恢复出三维结构。根据图像添加顺序的拓扑结构可分为增量式三维重建^[12]、全局式三维重建^[13]和混合式三维重建^[14]3种。其中增量式三维重建能有效剔除外点且具有鲁棒性较强的特点,在工业摄影测量技术中被广泛使用。

本文针对航空制造中对空间分布圆孔的三维数字化质量检测的需求,基于视觉测量技术,系统探讨了机加圆孔的空间定位与三维重建方法。针对机加圆孔对应图像椭圆,采用了一种基于弧段分组技术的圆孔图像提取方法,并提出一种有效的筛选机制,利用该筛选机制,可以显著提升图像椭圆的准确识别率,为后续机加圆孔对应空间圆的重建提供了可靠的基础。利用两视锥的重建与交集,采用两椭圆锥求交法对空间圆的位姿进行粗估计,提出基于多视图几何的空间圆位姿优化的算法,并通过试验验证了本文方法的有效性和精确性。

1 方法概述

如图 1 所示,机加圆孔定位及重建的技术路线包括(1)对图像的预处理;(2)基于弧链级图像椭圆提取算法的轮廓识别;(3)通过椭圆锥求交法对空间圆的位姿进行粗估计;(4)确定最佳视角图像作为多视图空间圆位姿优化的根据,利用本文提出的多视图下空间圆位姿优化算法对空间圆位姿进行精确估计。

预处理包括图像降噪和边缘提取的过程,图像降噪采用高斯滤波、均值滤波、Canny 边缘提取等技术,而椭圆轮廓提取则采用基于相邻弧线段及邻接矩阵的快速椭圆识别优化算法(AAMED)算法对椭圆轮廓进行提取并筛选。椭圆锥求交需要预先获取各图像对应相机的投影矩阵与对应图像椭圆,用于两视锥重建与求交;然后,利用多视角图像对空间圆的位姿进行优化,可以更准确地估计机加圆孔在空间中的位置和法向量方向。

2 椭圆轮廓提取技术研究

在复杂工业场景下,由于传统的 Canny 边缘检测算法对噪声敏感,以及难以处理不连续边缘的问题,不能直接有效地应用于椭圆轮廓的提取。因此,本研究首先对图像进行预处理,然后采用 AAMED 算法来实现更精确的椭圆轮廓提取。AAMED 算法通过分割、匹配和聚

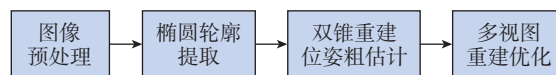


图 1 机加圆孔定位及重建总体技术路线

Fig.1 Overall technical route for machining circular hole localization and reconstruction

合弧线段,能够较好地识别出图像中的椭圆轮廓。然而,在实际应用中,由于机加圆孔边缘的非连续性和噪声干扰,该算法仍然会产生一些错误的椭圆识别结果。为此,本文提出了一种有效的筛选机制,以进一步提高椭圆轮廓提取的准确性,为后续的空间圆重建提供更加可靠的数据基础。

2.1 图像预处理

图像预处理用来识别椭圆图像边缘的同时降低所在图像的噪声。传统的图像边缘轮廓提取方法可以采用 Sobel 算子, Canny 算子等。常规椭圆图像的提取步骤通常包括高斯滤波、各向异性扩散滤波、自适应二值化、形态学开闭运算、Canny 边缘检测,如图 2 所示。通过以上步骤可以有效提取椭圆图像的边缘并能够进行鲁棒性拟合。图像预处理后,需要对 Canny 算子检测到的轮廓进一步处理,包括弧段的分割、弧段的组合和弧段的聚合等操作。

2.2 AAMED 算法

由于噪声干扰,工业圆孔轮廓被分成很多小段,凭借传统 Canny 算子提取的图像轮廓非连续性较强,且存在不规则特征,这使得直接采用最小二乘法拟合图像椭圆存在困难且识别准确率较低。采用弧段级图像椭圆算法,例如 AAMED 算法,却能达到识别的精度要求。本文采用 AAMED 算法提取椭圆轮廓的过程如图 3 所示。本研究机加螺纹圆孔原图由于倒角等边缘的干扰,无法直接提取真实螺纹孔椭圆,通过调整 AAMED 算法的参数,剔除干扰弧段,最终成功提取螺纹孔真实椭圆

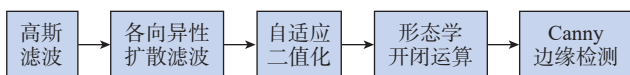


图 2 图像预处理流程图

Fig.2 Flowchart of image preprocessing

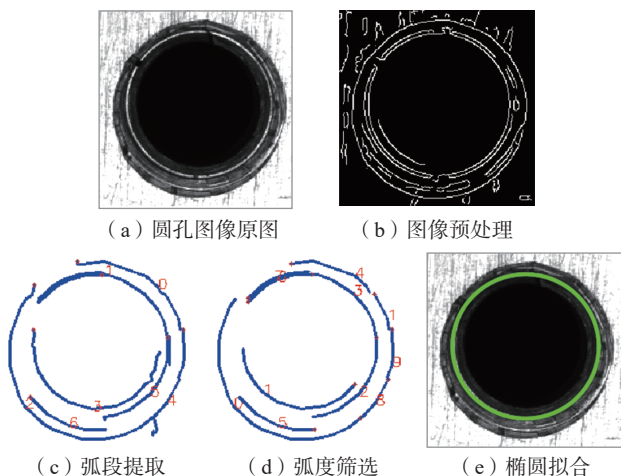


图 3 AAMED 算法提取椭圆轮廓的过程

Fig.3 Process of extracting ellipse contour by AAMED algorithm

轮廓。

基于 AAMED 的算法主要包括以下步骤。(1)通过图像边缘加粗查找边缘轮廓的首末点和弧段分割;(2)采用 Douglas-Poike 算法^[15]进行弧段分割和弧段索引的存储;(3)确定弧段的搜索范围并建立邻接矩阵,以便进行弧段聚类和弧段组合;(4)完成弧段组合和椭圆拟合后,采用综合评价指标 P_{score} 进行椭圆验证。具体流程如图 4 所示。

2.3 筛选机制

直接使用 AAMED 算法对机加圆孔对应图像进行椭圆提取时,容易存在同一区域内有多个椭圆解释,使椭圆图像识别的准确性难以保证,即椭圆图像的二义性问题,见图 5 (a)。同时, AAMED 算法中对于不满足弧链提取的边缘轮廓,直接进行最小二乘法拟合容易增加虚假椭圆提取的数量,见图 5 (b)。因此,需要一定的筛选机制剔除这些错误提取结果。

设定经过综合评价指标 P_{score} 验证的椭圆图像集,

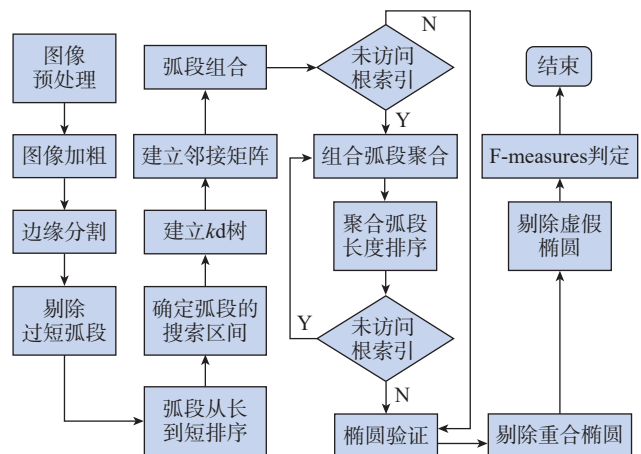


图 4 AAMED 算法流程图

Fig.4 Flowchart of the AAMED algorithm

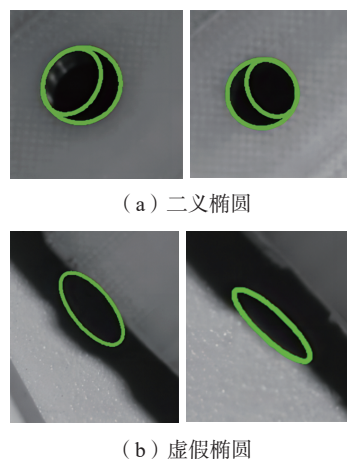


图 5 AAMED 算法的缺陷

Fig.5 Defects of the AAMED algorithm

表示为 $A=\{e_i|i=1,2,\dots,N_d\}$, 其中 e_i 表示椭圆图像集中第 i 个椭圆图像, N_d 为经过验证的椭圆图像的数量。对于第 i 个椭圆 e_i , 判断是否存在重叠的椭圆 e_j , 其中 $j=1, 2, \dots, N_d$ 且 $j \neq i$ 。假设, e_i 的长半轴为 a_i , 短半轴为 b_i , 圆心为 c_i ; e_j 的长轴为 a_j , 短半轴为 b_j , 圆心为 c_j , 则有

$$\begin{cases} \text{dis}(c_i, c_j) < \delta \times (\max(a_i, a_j) + \max(b_i, b_j)) \\ \delta_1 \leq \max(a_i, b_i) / \max(a_j, b_j) \leq \delta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\text{dis}(\cdot)$ 为两点之间的距离; $\max(\cdot)$ 为两值中的较大值; δ 为控制阈值, 用以消除重叠椭圆的影响; δ_1 和 δ_2 也为控制阈值, 用以消除其他圆形外轮廓的影响。

查找所有重叠椭圆集的集合 C 。对于第 s 个重叠椭圆集 $C_s = \{E_k | k=1, 2, \dots, \tau\}$, 其中 E_k 为 C_s 中的重叠椭圆, τ 为 C_s 中重叠椭圆的数目。查找重叠椭圆集 C_s 中的最大面积图像椭圆 E_{m_k} , 其中 $m_k=1, 2, \dots, \tau$ 。假设椭圆 E_{m_k} 长半轴与短半轴的比值在给定范围内, 则将 C_s 改为 $\{E_{m_k}\}$, 否则将 C_s 设置为 \emptyset 。

同时采用 F-measures^[16] 来评估衡量图像椭圆识别的准确程度。通过使用 F-measures 对筛选后椭圆图像进行评估, 即

$$\text{F-measures} = \frac{\sum_{k=1}^n d(e_i[h], \text{ellipse})}{n} \quad (2)$$

式中, $e_i[h]$ 为边缘提取得到的第 i 个轮廓 e_i 的第 h 个边缘像素点; ellipse 是通过对轮廓 e_i 进行子弧段拟合后得到的边缘点的集合; n 为 e_i 轮廓上边缘像素点的数量; $d(\cdot)$ 决定 Canny 算法提取的图像轮廓 e_i 上的点 h 是否靠近最后拟合出的轮廓 ellipse。如果点 k 到椭圆 ellipse 上点的距离小于 $\text{TH}_{\text{len}3}$, 则 $d(e_i[h], \text{ellipse})$ 取 1, 反之则取 0。 $\text{TH}_{\text{len}3}$ 为控制阈值, 与椭圆图像的短轴 b 像素长度有关。统计轮廓 e_i 上符合上述条件的点的数量, 将满足条件的轮廓点的数量除以 e_i 轮廓边缘点的总数量 n , 即为 F-measures 的值。对 AAMED 算法的提取结果采用筛选机制后, 其效果如图 6 和 7 所示。

3 空间圆位姿粗 - 精估计

在空间圆位姿的初步估计过程中, 本研究采用了基于对极几何约束的两视图椭圆匹配方法结合两视图锥求交法。首先, 通过分析两幅图像中椭圆的对应关系, 利用对极几何约束筛选和匹配这些椭圆, 确定可能的空间圆位置; 接着, 基于匹配的椭圆信息构建两个椭圆锥, 并通过求解两椭圆锥的交集来获得空间圆的中心点和法矢量方向, 从而实现对空间圆位姿的粗略估计。这种方法操作简便, 且无需预先测量机加圆孔的实际半径信息, 为进一步的优化奠定了基础; 随后, 通过基于多视图几何的增量式三维重建方法, 对粗估计结果进行精确优

化。多视图重建技术利用多个视角的图像数据, 进一步优化空间圆的位姿参数, 提高了空间圆位置与法矢量方向的估计精度, 从而满足高精度测量的要求。图 8 展示了空间圆重建的流程图。

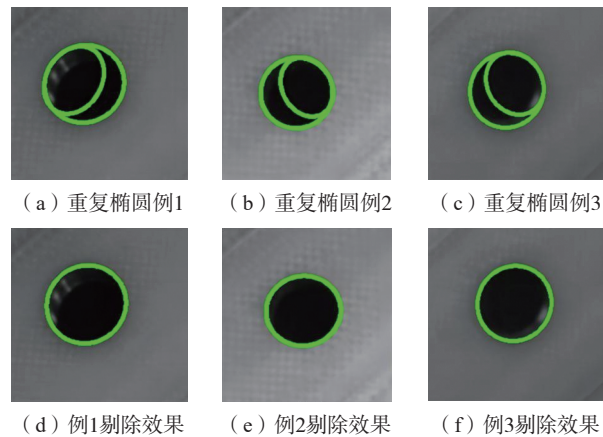


图 6 剔除重叠椭圆效果
Fig.6 Effect of removing overlapping ellipses

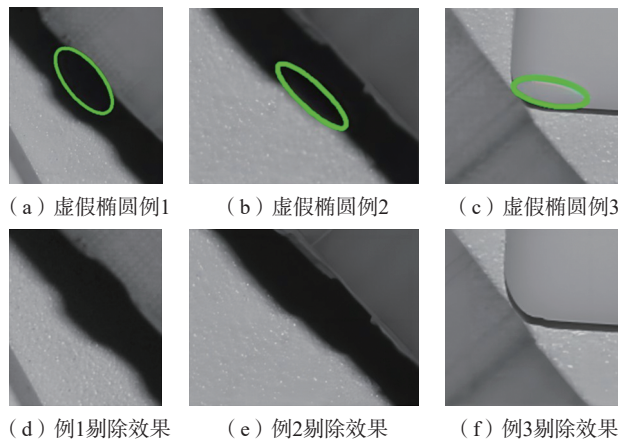


图 7 剔除虚假椭圆效果
Fig.7 Effect of eliminating false ellipses

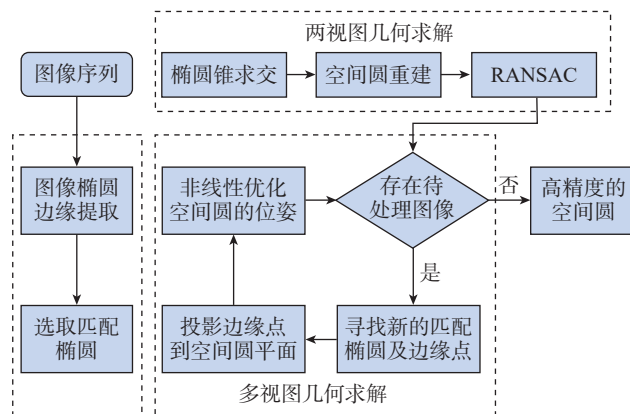


图 8 空间圆重建流程图
Fig.8 Flowchart of spatial circle reconstruction

3.1 椭圆对的匹配

在进行双锥椭圆求交前,需要先在两视图中获得同名椭圆对。

本文采用对极几何约束的原理来进行同名椭圆对匹配^[17],假设视图 I_1 中椭圆图像 e_i 的中心点坐标表示为 $\mathbf{P}_i=[x_i, y_i]^T$,对应视图 I_2 上的对极线 l_i^2 为

$$l_i^2 = \mathbf{F} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, \mathbf{F} 为两视图间的基础矩阵。根据对极几何原理,视图 I_2 上同名椭圆的中心将落在对极线上,如果视图 I_2 存在图像椭圆的中心与对极线距离小于阈值 δ ,则添加进入对应候选椭圆的集合 V_i ,其中 i 为对应候选椭圆的数量。

随后,如图9所示,在椭圆图像 e_i 边缘任取 N 个边缘点 P_i^q ,其中 $q=1,2,\dots,N$,查找在集合 V_i 中与对极线交点最多的图像椭圆,将其定义为匹配椭圆 e_n 。

3.2 基于双锥椭圆求交法的粗估计

假设已知各视图下相机的内参矩阵 \mathbf{K} 和外参矩阵 $\mathbf{T}=[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$,存在两视图 I_1 和 I_2 对应椭圆边缘轮廓集合 Φ_1 和 Φ_2 , $\Phi_1=\{e_r^1|r=1,2,\dots,N_1\}$, $\Phi_2=\{e_s^2|s=1,2,\dots,N_2\}$, e_r^1 和 e_s^2 表示视图 I_1 和 I_2 中的第 r 个和第 s 个图像椭圆,且 N_1 和 N_2 分别为图像 I_1 和 I_2 中的图像椭圆的总数。

进一步,假设能够找到一对匹配的图像椭圆 e_u^1 和 e_v^2 , $u \in r$ 且有 $v \in s$ 。 e_u^1 与 e_v^2 对应真实三维空间中的同一个圆 E_m 。椭圆图像 e_u^1 的一般式方程可以表示为

$$ax^2+bx+cy^2+dx+ey+1=0 \quad (4)$$

基于椭圆图像的一般式及视图 I_1 和 I_2 下相机的投影矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{P}' ,Quan^[11]详细阐述了椭圆锥求交的基本原理。根据该研究,两椭圆锥体在理论上通过其求交的平面会产生双解^[9],如图10所示,即可以推导出两个不同的平面为 $\mathbf{p}_i^T \mathbf{x}=0, i=1,2$,表示为^[9]

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{x} = (\sqrt{\mu_1} \mathbf{v}_1 \pm \sqrt{-\mu_2} \mathbf{v}_2)^T \mathbf{x} = 0 \quad (5)$$

式中, $\mu_1>0, \mu_2<0, \mathbf{v}_1$ 和 \mathbf{v}_2 均为 4×1 的向量,且 $\mu_1, \mu_2, \mathbf{v}_1$ 和 \mathbf{v}_2 均与两视图下对应图像椭圆的一般式以及相机的投影矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{P}' 相关。

假定视图 I_1 和 I_2 下两相机的光心为 O_j ,其中 $j=1,2$,

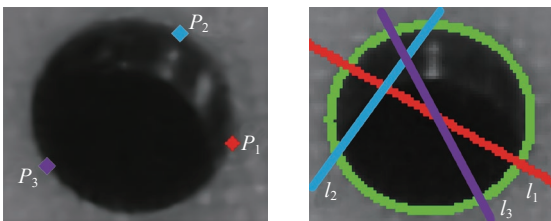


图9 匹配椭圆对的选取

Fig.9 Selection of matching ellipse pairs

构建经过两相机 O_1 和 O_2 的椭圆锥,椭圆锥的交集为平面 \mathbf{p}_1 和 \mathbf{p}_2 ,具体详见图10。光心 O_j 与平面 $\mathbf{p}_i^T \mathbf{x}=0$ 的距离为 d_{ij} 。如果 $d_{21}d_{22} \geq 0$,且有 $d_{11}d_{12} < 0$ 则平面 $\mathbf{p}_2^T \mathbf{x}=0$ 可视为空间圆所在的平面,反之则保留平面 $\mathbf{p}_1^T \mathbf{x}=0$ 。

3.3 基于多视图的空间圆位姿优化

在增量式运动恢复结构(Structure from motion, SFM)方法中,可以采用OpenMVG框架获得准确的三维重建框架^[18]。该框架可以提供多视图几何输出、内参优化结果、两两匹配及对极几何。环形编码点被用作特征点,通过跟踪环形编码点在视图中位置以及多视图下环形编码点的位置优化技术,估计相机的内参矩阵 \mathbf{K} 和外参矩阵 $\mathbf{T}=[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ 。而标尺提供了一个已知尺度的参考,从而计算出尺度因子以恢复场景的绝对尺度。

已知通过椭圆锥求交法获得两视图 I_1 和 I_2 下重建的机加圆孔对应空间圆 E_i ,视图 I_1 和 I_2 为最佳视角图片,空间圆的圆心坐标表示为 $\mathbf{X}_i=[x_i, y_i, z_i]^T$,半径 R_i 和归一化且 z 轴为正值法向量 \mathbf{n}_i 表示为 $[n_x^i, n_y^i, n_z^i]^T$, n_x^i 为法向量 \mathbf{n}_i 的 x 坐标, n_y^i 为 \mathbf{n}_i 的 y 坐标。如果在视图 I_j 上存在椭圆图像 e_{ij} 与 E_i 对应,即拟合圆 E_i 在视图 I_j 上的投影为椭圆图像 e_{ij} ,利用椭圆图像 e_{ij} 边缘上的点集 $H=\{\mathbf{P}_{ij}^l|l=1,2,\dots,\delta\}$ 来优化拟合椭圆位姿信息, δ 为选取的椭圆图像 e_{ij} 边缘点的数量,默认取为20。边缘点 \mathbf{P}_{ij}^l 的坐标表示为 $[x_{ij}^l, y_{ij}^l]^T$ 。视图 I_j 下相机的投影矩阵为 $\mathbf{M}_j=\mathbf{K}[\mathbf{R}_j^C|\mathbf{t}_j^C]$,其中 \mathbf{R}_j^C 为视图 I_j 下相机坐标系 C_j 在世界坐标系下的旋转矩阵, \mathbf{t}_j^C 表示视图 I_j 下相机坐标系 C_j 在世界坐标系下的平移矩阵。

通过前文提到的环形编码点,可以求得相机内参矩阵 \mathbf{K} 和外参矩阵 $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ ^[19]。 e_{ij} 边缘点 \mathbf{P}_{ij}^l 在拟合椭圆 E_i 平面 \mathbf{p}_i 投影点 \mathbf{X}_{ij}^l 为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_{ij}^l \\ y_{ij}^l \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_j \mathbf{X}_{ij}^l \\ \mathbf{p}_i^T \mathbf{X}_{ij}^l = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, Z_{ij}^l 为像素点 \mathbf{P}_{ij}^l 对应空间点的深度。

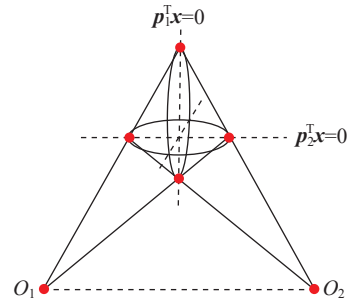


图10 两视图下相机光心 O_1 和 O_2 之间的平面对 \mathbf{p}_i

Fig.10 Plane pairs \mathbf{p}_i between camera optical centers O_1 and O_2 under both views

拟合椭圆 E_i 平面 p_i 为 $A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0$, A_i, B_i, C_i, D_i 的值为

$$\begin{cases} A_i = n_x^i \\ B_i = n_y^i \\ C_i = \sqrt{1 - A_i^2 - B_i^2} \\ D_i = -A_i x_i - B_i y_i - C_i z_i \end{cases} \quad (7)$$

式中, x_i, y_i 和 z_i 分别为空间圆 E_i 圆心 X_i 的 x 坐标、 y 坐标和 z 坐标; n_x^i 和 n_y^i 分别为法向量 \mathbf{n}_i 的 x 坐标和 y 坐标。

分别计算所有图像边缘点 P_{ij}^l 在平面 p_i 的投影点 X_{ij}^l 与圆心 X_i 的距离 d_{ij}^l , d_{ij}^l 可以表示为 $h(P_{ij}^l, M_j, \mathbf{n}_i, X_i)$, 将所有 d_{ij}^l 与半径 R_i 偏差累加, 作为其中一个残差块, 其误差方程 e_1 为

$$e_1 = \sum_{i=1}^{\delta} \|h(P_{ij}^l, M_j, \mathbf{n}_i, X_i) - R_i\|^2 \quad (8)$$

式中, P_{ij}^l 是空间圆 E_i 在视图 I_j 的匹配椭圆 e_{ij} 边缘按预定间隔选取第 l 个边缘采样点, 通常 $l \leq 20$, 即常规方法是将匹配椭圆 e_{ij} 的周长分为 19 等份, 从而定义了 20 个独特的边界采样位置, 以获取一组均匀分布的边界采样点。

在本研究中, 将匹配椭圆 e_{ij} 与前一视图的对应图像椭圆也进行椭圆锥求交, 进而得到空间圆的法向量 \mathbf{n}_{ij}^l 。然后作平面 p_i 上的投影点 X_{ij}^l 与圆心点 X_i 的向量 V_{ij}^l 。 V_{ij}^l 与法向量 \mathbf{n}_{ij}^l 的弧度夹角定义为 θ_{ij}^l , θ_{ij}^l 可由图像边缘点 P_{ij}^l 、投影矩阵 M_j 、法向量 \mathbf{n}_{ij}^l 、空间圆圆心 X_i 推导得到, 表示为 $r(P_{ij}^l, \mathbf{n}_{ij}^l, X_i)$ 的函数形式, 将所有 θ_{ij}^l 与理论夹角 $\pi/2$ 偏差累加, 作为另一个残差块, 其误差方程 e_2 为

$$e_2 = \left\| r(P_{ij}^l, \mathbf{n}_{ij}^l, X_i) - \frac{\pi}{2} \right\|^2 \quad (9)$$

假设有 m 张图像 ($m \geq 2$), 除去 I_1, I_2 剩余 $(m-2)$ 张图像。对于这 $(m-2)$ 张图像, 选择将与空间圆拟合圆对应的边缘点全部加进来, 那么整体代价函数 e_3 变为

$$e_3 = \sum_{j=1}^{m-2} \sum_{i=1}^n \left(\lambda_1 \sum_{l=1}^{\delta} \|h(P_{ij}^l, M_j, \mathbf{n}_i, X_i) - R_i\|^2 + \lambda_2 \sum_{l=1}^{\delta} \left\| r(P_{ij}^l, \mathbf{n}_{ij}^l, X_i) - \frac{\pi}{2} \right\|^2 \right) \quad (10)$$

式中, \mathbf{n}^l 为视图 I_1 和 I_2 通过三角化重建所得到的空间圆的数量; λ_1 和 λ_2 为拉格朗日乘子, 正则化参数 $\lambda_1 \leq \lambda_2$ 时, 误差方程 $\lambda_2 e_2$ 起主要作用, 正则化参数 λ_1 较大时 $\lambda_1 e_1$ 起主要作用, 在这两种情况下, Levenberg-Marquardt (LM) 算法均接近于高斯牛顿法。

通常, 基于 LM 空间圆位姿优化可以转换为对两个参数块的优化。第一个参数块用于存储拟合圆 E_i 的半径信息 R_i , 法向量 \mathbf{n}_i 的 x 坐标 n_x^i 和 y 坐标 n_y^i , 另一法矢

量 \mathbf{n}_i 的 x 坐标 n_x^i 和 y 坐标 n_y^i 。

4 试验结果及分析

本文试验主要将圆形目标的识别、提取和重建技术应用于评估机加圆孔的加工精度, 如零件中的圆孔、飞机蒙皮上的铆钉孔。这种方法不仅可以用于加工精度评价, 还可以在机器人定位、装配关系建立等领域发挥作用。通过对圆形目标的重建和分析, 可以更准确地评估机加圆孔的几何特征和精度, 为生产过程的优化提供重要的数据支持。

4.1 试验设置

试验中, 采用 Nikon D7200 相机 (焦距为 24 mm, 其影像传感器的尺寸为 23.5 mm × 15.6 mm, 图像尺寸为 6000 px × 4000 px) 拍摄多个带有圆孔的样件并构建包含 500 张图像的数据集, 其中每张均有机加圆孔对应的椭圆图像。图 11 展示了这些图像中的 3 组, 定义为工件 1、工件 2 与工件 3, 详见图 6 (a)~(c)。样件上各类圆孔均来源于实际加工现场, 通过高精度机床加工以确保本文方法精度验证试验的有效性, 且样件上可以集中体现出不同孔径 (2~8 mm) 和空间分布。

4.2 有效椭圆轮廓提取及筛选试验

采用本文方法对工业现场机加圆孔进行提取, 效果如图 12 所示。图 12 (a) 为金属标定板通孔的椭圆提取效果, 用于后续工业机器人的高精度手眼标定, 图 12 (b) 为航空制造装配现场螺纹孔提取效果。由于螺纹孔受倒角和螺牙等干扰因素的影响, 一般提取方法很难

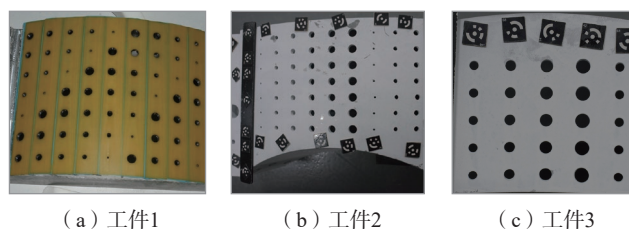


图 11 3 个包含机加圆孔的工件

Fig.11 Three workpieces containing machined round holes

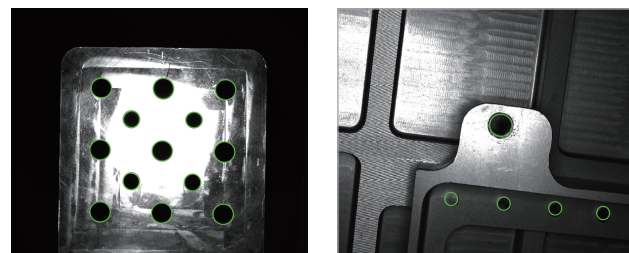


图 12 标定板通孔和装配现场螺纹孔的提取

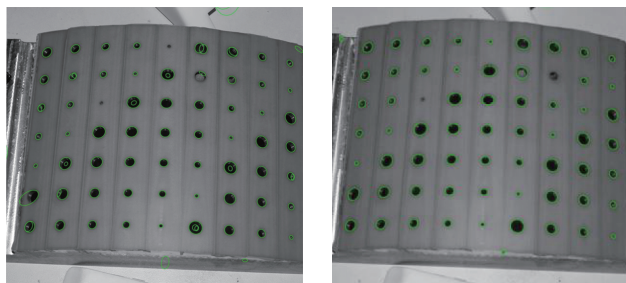
Fig.12 Extraction of calibration plate through-hole and assembly site threaded hole

准确识别真实的螺纹孔边缘,而本文方法可以有效提取真实的螺纹孔边缘。

采用筛选机制前后识别的机加圆孔对应图像椭圆边缘的结果见图 13。图 13 (a)中仅采用 AAMED 算法,对机加圆孔对应图像椭圆边缘的准确识别率仅为 76.2%,而图 13 (b)采用筛选机制,对机加圆孔对应图像椭圆边缘的准确识别率则为 96.8%,证明了本文提出的筛选机制的有效性。

4.3 多视图重建优化试验

完成图像椭圆的边缘提取后,利用两视图两椭圆锥求交算法获得空间圆位姿的初始估计。然后利用多视图重建的方法,对机加圆孔对应空间圆的位姿进行精优化。工件 1 对应机加圆孔的试验,共计 7×9 个机加圆孔。选取机加圆孔对应空间圆 X_{uv} ,其中 u 表示空间圆的排数, v 表示空间圆的列数,测试两视锥重建粗估计和多视图重建优化后的半径误差,如图 14 所示。试验结果显示,在工件 1 的 9 个机加圆孔中,经过多视图重建优化的空间圆半径精度均优于双锥重建粗估计的结果。



(a) AAMED算法直接提取结果 (b) 筛选错误椭圆结果

图 13 AAMED 算法直接提取结果和筛选错误椭圆结果
Fig.13 Direct extraction results of AAMED algorithm and results of screening error ellipse

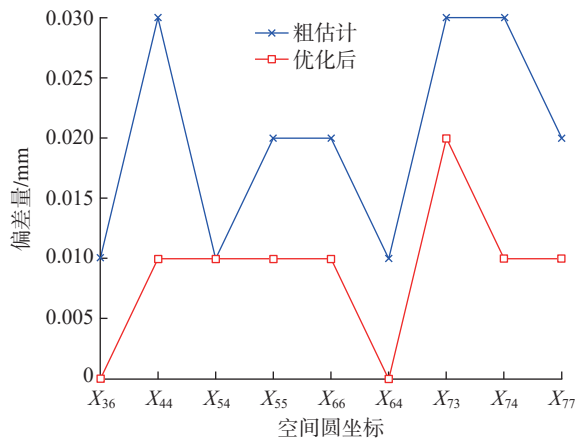


图 14 优化前后试验结果对比

Fig.14 Comparison of experimental results before and after optimization

4.4 空间圆重建结果的综合试验验证

运用本文提出的多视图下空间圆位姿优化的算法,对 3 个工件空间圆的位姿进行精确估计。图 15 展示了工件 1 对应的空间圆位姿精确估计后边缘离散点的信息。图 16 为工件 1 对应数模,用来对空间圆边缘离散点进行误差分析。通过在 Geomagic Qualify 软件^[20]中将数模与重建空间圆对齐,然后任意选取重建空间圆边缘上 3 个点(3 个点可以确定一个空间圆)与数模进行对比来评估重建的位置精度。

图 17 为空间圆离散点与工件 1 部分圆孔重建的误差分析,结果显示最大偏差不超过 $0.200/-0.199$ mm,平均偏差为 $0.112/-0.100$ mm,标准差为 0.119 mm。工件 1 对应空间圆边缘点的误差分析的统计结果如图 18 所示,工件 1 重建的空间圆离散点与对应数模的误差分布总体呈正态分布。在工件 1 重建的空间圆离散点中,有 72 个点与该数模的误差在 $[-0.040, 0.040]$ 范围内,占有点数 16.744%,且占比最大。

工件 2 对应重建空间圆的离散点三维显示(图 19)和对应数模的三维模型(图 20)具有一致性。图 21 为

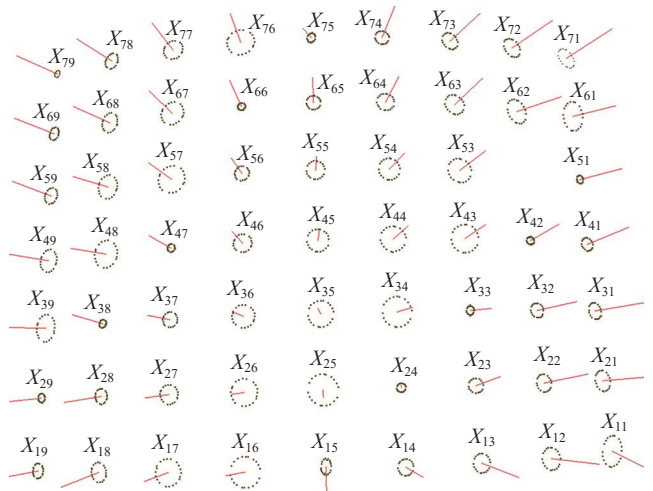


图 15 工件 1 对应的空间圆离散点三维显示

Fig.15 3D display of discrete points of spatial circle corresponding to workpiece 1

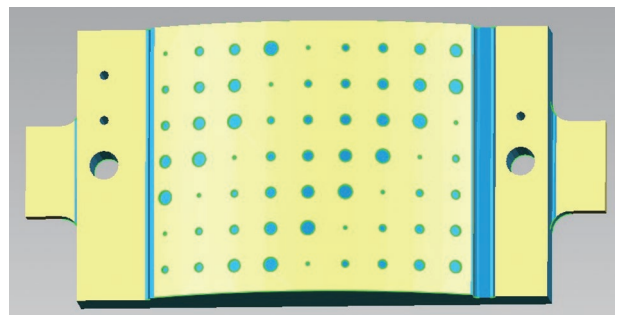


图 16 工件 1 对应数模三维模型

Fig.16 3D model of corresponding numerical mold for workpiece 1

空间圆离散点与工件 2 部分圆孔的误差分析,最大偏差不超过 0.198/-0.200 mm,平均偏差为 0.089/-0.098 mm,标准差为 0.108 mm。图 22 中统计结果显示,工件 2 重建的空间圆离散点中,72 个点与该数模的误差在

$[-0.036, 0.036]$ 范围内,占所有点数的 21.597% 且占比最大。

工件 3 对应空间圆的离散点三维显示(图 23)和对应数模的三维模型(图 24),两者也具有 consistency。图 25

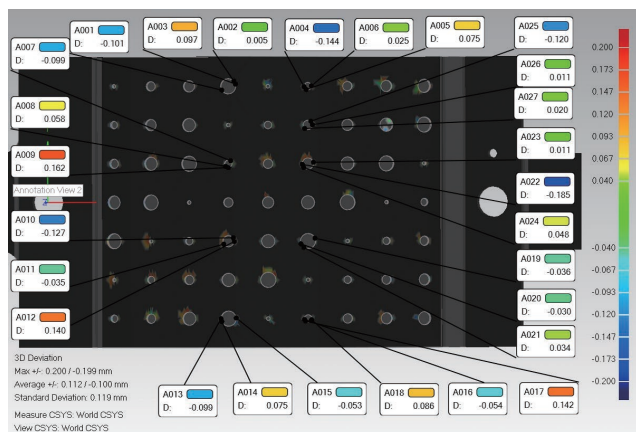


图 17 工件 1 部分圆孔的误差分析

Fig.17 Error analysis of partial holes in workpiece 1

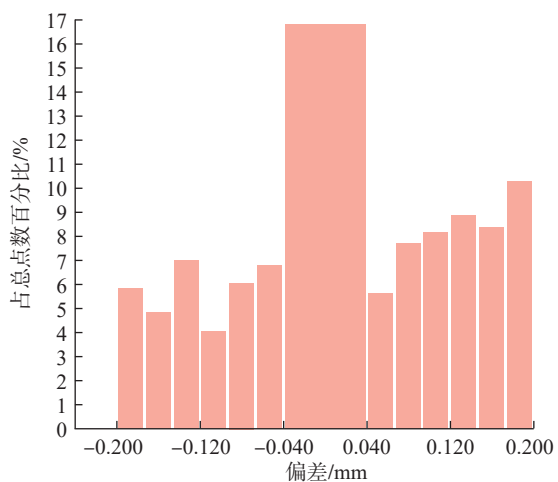


图 18 工件 1 空间圆的三维误差分布

Fig.18 3D error distribution of spatial circle of workpiece 1

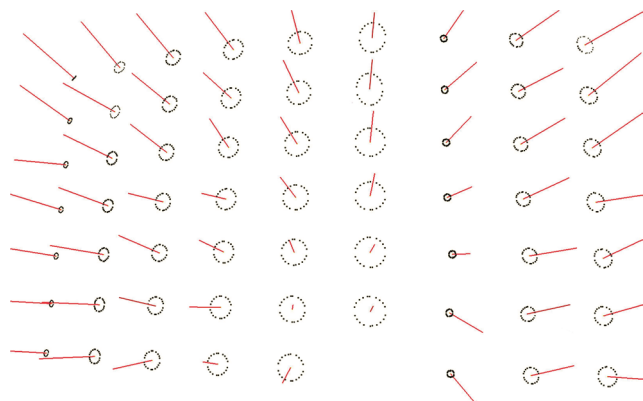


图 19 工件 2 对应空间圆的离散点三维显示

Fig.19 3D display of discrete points of space circle corresponding to workpiece 2

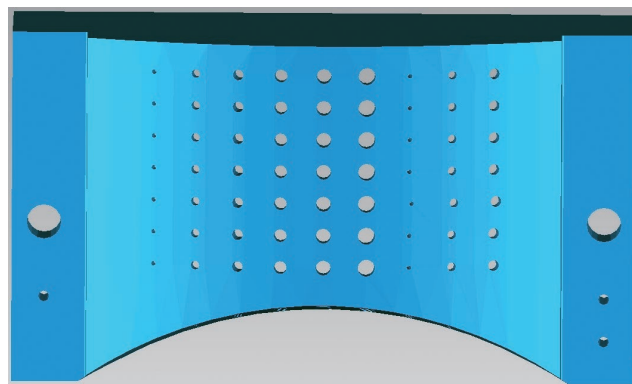


图 20 工件 2 对应数模三维模型

Fig.20 3D model of corresponding numerical mold for workpiece 2

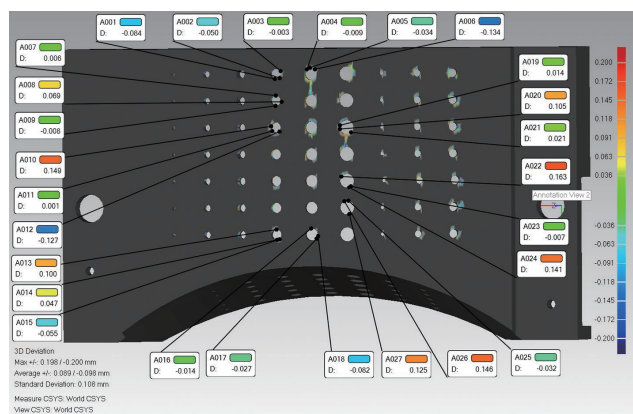


图 21 工件 2 部分圆孔的误差分析

Fig.21 Error analysis of partial holes in workpiece 2

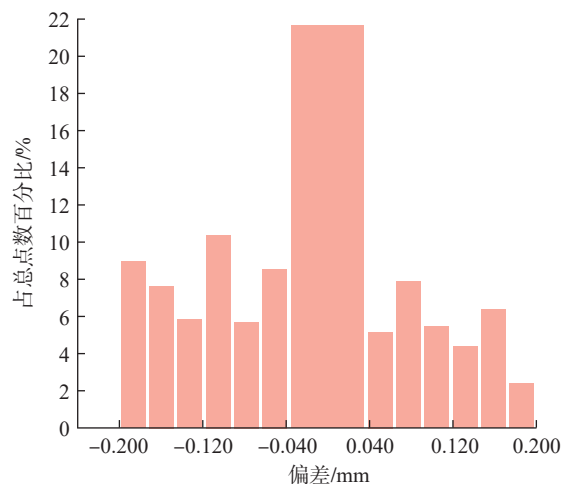


图 22 工件 2 空间圆的三维误差分布

Fig.22 3D error distribution of spatial circle of workpiece 2

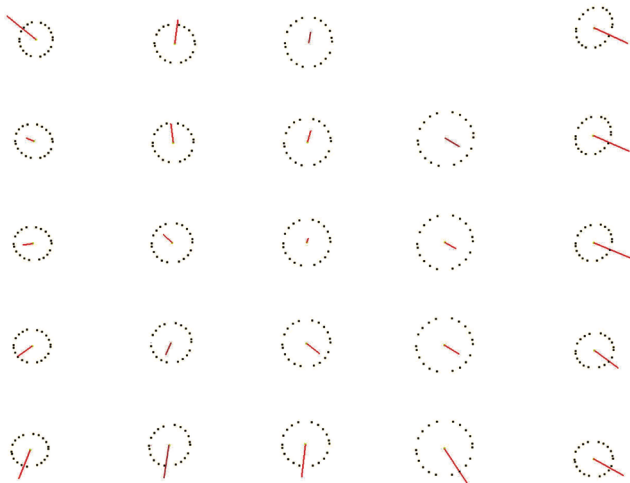


图 23 工件 3 对应空间圆的离散点三维显示

Fig.23 3D display of discrete points of space circle corresponding to workpiece 3

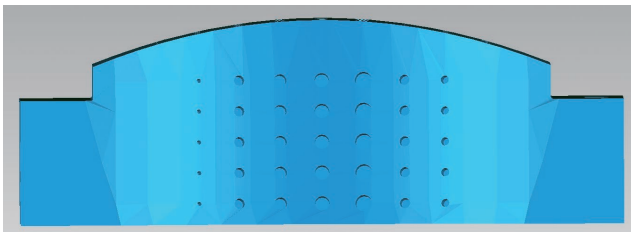


图 24 工件 3 对应数模三维模型

Fig.24 3D model of corresponding numerical mold for workpiece 3

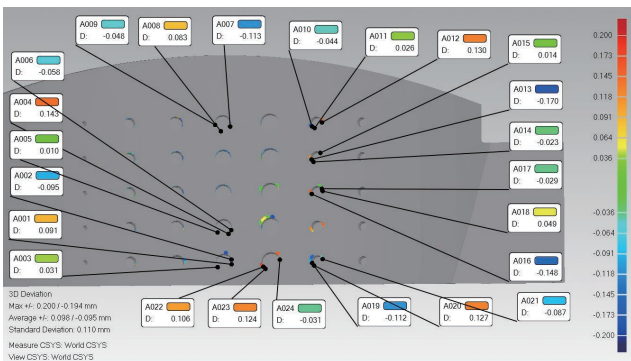


图 25 工件 3 部分圆孔的误差分析

Fig.25 Error analysis of partial holes in workpiece 3

为空间圆离散点与工件 3 部分圆孔的误差分析,最大偏差不超过 0.200/-0.194 mm,平均偏差为 0.098/-0.095 mm,标准差为 0.110 mm。图 26 显示,空间圆的离散点有 54 个点与该数模误差在 [-0.036,0.036] 范围内,占所有点数的 18.947%,且占比最大。

5 结论

本文提出了一套完整的机加圆孔空间定位及三维重建技术路线,主要贡献在于:(1)提出一种改进的

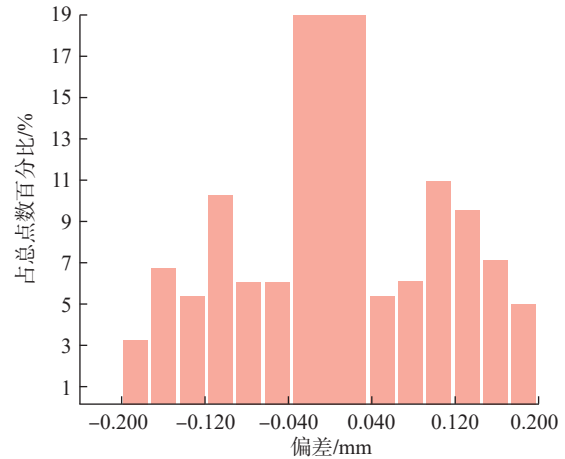


图 26 工件 3 空间圆的三维误差分布

Fig.26 3D error distribution of spatial circle of workpiece 3

椭圆提取与筛选机制,显著提升了椭圆图像的认识精度;(2)利用两视锥求交法对空间圆的位姿进行初步估计,并通过多视图几何优化进一步提高定位精度;(3)试验证明,该方法能够在复杂工业环境下实现高精度的机加圆孔三维重建,对多个含有机加圆孔的工件试验测量时,重建空间圆与数模的最大上下偏差均不超过 0.200/-0.200 mm,其中 3 个样件的平均偏差分别为 0.112/-0.100 mm、0.089/-0.098 mm、0.098/-0.095 mm,为航空制造等高精度要求的测量任务提供了有效的技术支持。

参考文献

- [1] CAPPETTI N, NADDEO A, VILLECCO F. Fuzzy approach to measures correction on coordinate measuring machines: The case of hole-diameter verification[J]. Measurement, 2016, 93: 41-47.
- [2] TABIB R A, JADHAV Y V, TEGGINKERI S, et al. Learning-based hole detection in 3D point cloud towards hole filling[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 475-482.
- [3] 勾江洋,陈雪梅,叶南,等.飞机零部件连接孔在机视觉检测系统开发[J].航空制造技术,2018,61(5):37-43,50.
- [4] GOU Jiangyang, CHEN Xuemei, YE Nan, et al. Development of on-machine vision inspection system for connection holes on aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 37-43, 50.
- [5] PRASAD D K, LEUNG M K H, CHO S Y. Edge curvature and convexity based ellipse detection method[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(9): 3204-3221.
- [6] MENG C, LI Z X, BAI X Z, et al. Arc adjacency matrix-based fast ellipse detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4406-4420.
- [7] SAFAEE-RAD R, TCHOUKANOV I, SMITH K C, et al. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 624-640.

(下转第 113 页)

pitch error compensation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(11): 115003.

[6] LI Z L, DAI Y F, GUAN C L, et al. High-precision machining method of weak-stiffness mirror based on fast tool servo error compensation strategy[J]. *Micromachines*, 2021, 12(6): 607.

[7] 冯文龙, 黄奕乔, 拓占宇, 等. 基于温度积分方法的大型数控机床光栅定位热误差建模及实时补偿[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(5): 710–715.

FENG Wenlong, HUANG Yiqiao, TUO Zhanyu, et al. Modeling of thermally induced grating positioning error of large machine tools based on temperature integral method and real-time compensation[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(5): 710–715.

[8] SHEN H Y, FUN J Z, HE Y, et al. On-line asynchronous compensation methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 60: 14–26.

[9] LYU D, LIU Q, LUO S Y, et al. The influence of dynamic error outside servo-loop on the trajectory error[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(5): 1517–1525.

[10] KATO N, TSUISUMI M, SATO R. Analysis of circular trajectory equivalent to cone-frustum milling in five-axis machining centers using motion simulator[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 1–11.

[11] 李杰, 刘辛军, 谢福贵, 等. 基于时变特性的数控机床综合误差建模方法[J]. *科技导报*, 2016, 34(2): 65–70.

LI Jie, LIU Xinjun, XIE Fugui, et al. A comprehensive error modeling method for numerical control machine tools based on time-varying characteristics[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(2): 65–70.

[12] 吕盾, 张佳辉, 王大伟, 等. 国产数控机床动态精度技术现状与对策[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(6): 22–33.

LÜ Dun, ZHANG Jiahui, WANG Dawei, et al. Technical status and countermeasures of dynamic accuracy of domestic CNC machine tools[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(6): 22–33.

[13] 杨泽青, 李增强, 刘奇, 等. 立式加工中心综合误差建模及实验分析[J]. *现代制造工程*, 2019(10): 6–13.

YANG Zeqing, LI Zengqiang, LIU Qi, et al. Comprehensive error modeling and experimental analysis of vertical machining center[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(10): 6–13.

[14] 孙惠娟, 殷国富, 方辉, 等. 五轴数控机床综合误差建模评价方法研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(6): 197–202.

SUN Huijuan, YIN Guofu, FANG Hui, et al. Research on integrated error modeling and evaluation method of five-axis machine tools[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(6): 197–202.

[15] SCHMITZ T L, ZIEGERT J C, CANNING J S, et al. Case study: A comparison of error sources in high-speed milling[J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(2): 126–133.

[16] 孙兴伟, 董蔚, 王可, 等. 数控机床伺服系统跟随误差对加工轮廓的影响[J]. *制造技术与机床*, 2010(6): 76–78.

SUN Xingwei, DONG Wei, WANG Ke, et al. Influence of follow error of servo system of CNC machine tool on processing contour[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010(6): 76–78.

(上接第 92 页)

[7] CHEN Z, HUANG J B. A vision-based method for the circle pose determination with a direct geometric interpretation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, 15(6): 1135–1140.

[8] ZHENG Y Q, MA W J, LIU Y C. Another way of looking at monocular circle pose estimation[C]//2008 15th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 861–864.

[9] 魏振忠, 赵征, 张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 685–691.

WEI Zhenzhong, ZHAO Zheng, ZHANG Guangjun. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 685–691.

[10] MIAO X K, ZHU F, DING Q H, et al. Monocular vision pose measurement based on docking ring component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412006.

[11] QUAN L. Conic reconstruction and correspondence from two views[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(2): 151–160.

[12] MOULON P, MONASSE P, MARLET R. Adaptive structure from motion with a contrario model estimation[M]//Computer Vision—ACCV 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 257–270.

[13] MOULON P, MONASSE P, MARLET R. Global fusion of relative motions for robust, accurate and scalable structure from motion[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 3248–3255.

[14] HUTTON B F, KYME A, LAU Y H, et al. A hybrid 3D reconstruction/registration algorithm for correction of head motion in emission tomography[C]//2000 IEEE Nuclear Science Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 15/36–15/40.

[15] RADOUX J, DEFOURNY P. Accuracy assessment of forest stand delineation using very high spatial resolution satellite images[J]. *ForestSat 2005*, 2005: 84.

[16] MAALEK R, LICHTI D D. Robust detection of non-overlapping ellipses from points with applications to circular target extraction in images and cylinder detection in point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 176: 83–108.

[17] LONGUET-HIGGINS H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. *Nature*, 1981, 293: 133–135.

[18] MOULON P, MONASSE P, PERROT R, et al. OpenMVG: open multiple view geometry[M]//Reproducible Research in Pattern Recognition. Cham: Springer International Publishing, 2017: 60–74.

[19] 史传飞, 张丽艳, 严俊, 等. 面向大型装备的工业摄影测量技术及实现[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(19): 24–30.

SHI Chuanfei, ZHANG Liyan, YAN Jun, et al. Industrial photogrammetry technology and its implementation for large-scale equipment[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(19): 24–30.

[20] GAO D Q, MA J F, LIN H, et al. Precision analysis of the surface model based on geomagic qualify[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 490–491: 649–653.

通信作者: 刘焕牢, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数控装备及其动力学。

(责编 晓月)

通信作者: 叶南, 副教授, 博士, 主要从事机器视觉、图像处理、视觉测量等方面的研究。

(责编 阳光)