

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615314

面向大型孔轴装配的多相机视觉位姿测量方法*

赵 鹏, 黄 翔, 丁力平

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘 要:大型孔轴结构是直升机升力系统中的关键零部件,其装配质量直接影响整机性能与服役安全。在其视觉位姿测量过程中,单目视觉因视野受限难以在完整获取孔轴端面图像的同时保证测量精度,而增大工作距离又会导致成像比例下降,进一步降低局部测量精度。针对上述问题,提出一种基于多相机视觉的孔轴装配位姿测量方法。首先,引入目标共平面约束构建多相机图像平面到主相机像平面的统一映射模型,通过单应性变换实现多源图像特征的几何一致性表达;其次,提出基于关键点搜索的离散弧段椭圆拟合方法,利用像素级跳变检测确定弧段关键点对并以重心坐标平滑处理,结合超最小二乘方法提升非完整边缘条件下椭圆参数估计的精度与鲁棒性;最后,结合孔轴结构几何先验约束消除空间圆位姿计算的二义性,并采用基于正向投影几何距离的加权优化方法实现位姿参数的迭代求解。搭建了由 4 台工业相机组成的多相机视觉测量系统并开展实验验证,结果表明所提方法圆心测量精度为 0.037 mm,法向量测量精度为 0.053°,满足大型孔轴结构高精度装配的工程需求。该方法为大型构件视觉测量提供了一种兼顾全局覆盖与局部精度的有效技术方案。

关键词:多相机视觉;位姿测量;椭圆拟合;孔轴装配

中图分类号: TH161

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40

Multi-camera visual pose measurement method for large hole-axis assembly

Zhao Peng, Huang Xiang, Ding Liping

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Large-scale hole-axis assembly structures are critical components in helicopter lift systems, and their assembly quality directly affects overall performance and service safety. During visual pose measurement, monocular vision suffers from a limited field of view, complicating acquisition of complete end-face images while maintaining high measurement accuracy, and extending the working distance further degrades local precision. A multi-camera vision-based pose measurement method is proposed. First, a target coplanarity constraint establishes a unified mapping model from multiple camera image planes to the primary camera image plane, achieving geometrically consistent multi-source image representation via plane-induced homography. Second, a discrete arc-segment ellipse fitting method using keypoint search detects arc keypoint pairs through pixel-level jump detection and smooths them with centroid coordinates, incorporating the hyper least squares method to improve the accuracy and robustness of ellipse parameter estimation under incomplete edge conditions. Finally, geometric prior constraints of hole-axis assembly eliminate ambiguity in spatial circle pose estimation, while a weighted optimization method based on forward projection geometric distance iteratively refines the pose parameters. Experiments on a four-camera industrial vision system demonstrate a circle center accuracy of 0.037 mm and a normal vector accuracy of 0.053°, meeting engineering requirements for high-precision assembly of large-scale hole-axis structures. The proposed method provides an effective solution for vision measurement of large-scale components, balancing global coverage with local precision.

Keywords: multi-camera vision; pose measurement; ellipse fitting; hole-axis assembly

0 引 言

大型孔轴连接是航空航天分离部件之间的关键装配结构,其装配质量直接决定系统性能与服役可靠性^[1-2]。在实际装配过程中,该类结构通常采用人工吊装辅助方式完成对接。然而,大尺寸构件重量大、装配间隙小,部件相对位姿对微小扰动高度敏感,位姿偏差易在接触阶段被放大,进而引发局部干涉与接触力突变,最终导致卡阻,影响装配效率与质量^[3-4]。

为提升对接装配过程的可控性,其关键在于实现装配位姿的高精度与稳定测量反馈能力。数字化测量辅助装配技术通过引入外部测量手段提升系统状态可观测性,为后续闭环调姿与精确对接提供基础支撑。在多种测量手段中,视觉测量因其非接触性及良好的可拓展性,适用于孔轴结构的装配测量任务^[5-7]。

围绕孔轴结构视觉位姿测量,国内外学者已开展了较为广泛的研究。张辉等^[8]基于单目视觉技术,实现了叉耳孔轴线间隙距离 0.03 mm、轴线角度 0.025° 的高精度测量。李航宇等^[9]针对同轴内啮合大尺寸齿形结构孔轴装配的测量难题,提出了一种基于单目视觉的齿形结构装配测量方法。Jiang 等^[10]通过组合两级视觉系统实现机器人钉孔预对准, Ma 等^[11]采用单目相机主动运动策略,提高了空间圆位姿估计精度。

在大型构件及航天器对接环测量方面, Sun 等^[12]基于同轴对中原理提出大型法兰零件对位方法,并构建平移与旋转调整的优化模型。Yu 等^[13]利用圆柱面上的单个透视圆,实现圆柱形物体六自由度姿态估计。翟坤等^[14]融合单目视觉与激光测距信息,实现了 0.5 m 尺寸非合作航天器对接环的位姿测量,测量精度达到毫米级。张铁毅等^[15]在已知对接环半径条件下,实现其实时姿态求解。于鲲等^[16]提出类圆轮廓提取方法,使星箭对接环空间位置测量误差小于 1 mm、角度误差小于 0.5°。上述研究成功将视觉测量尺度推至米级,但测量精度普遍处于毫米至厘米量级,无法满足高精度装配对亚毫米级圆心偏差及 0.1° 以内角度偏差要求。

综上,现有研究在小尺寸孔轴位姿测量方面已较为成熟,但在大型孔轴结构场景中,相关研究主要集中于航天器对接环等应用,其测量精度多为毫米级甚至厘米级,难以满足高精度装配需求^[17-18]。从工程应用角度看,该类问题本质上受制于成像约束:一方面,孔轴结构尺寸较大导致单目相机难以覆盖全部关键特征区域,形成视野覆盖约束;另一方面,为扩展观测范围而增大工作距离时,会引起成像比例下降并导致测量精度降低。

因此,为满足大尺寸孔轴结构在全局覆盖与局部精

度之间的协同需求,有必要引入多视角协同观测机制,实现跨视角信息的统一表达与高精度位姿稳定求解。本文方法围绕上述目标展开,在跨视角一致性表达、复杂特征提取稳定性以及位姿优化鲁棒性方面具有优势,贡献可概括为 3 个方面:

1) 提出一种基于目标共平面约束的多相机统一成像建模方法,通过引入跨视角几何约束,将多相机观测在主相机像平面中进行一致性表达;

2) 提出一种面向非完整边缘观测条件的离散弧段关键点驱动椭圆鲁棒拟合方法,通过构建具有几何稳定性的弧段关键约束点集,增强椭圆参数的几何约束能力,从而提升边缘缺失参数估计的稳定性与精度;

3) 提出一种融合孔轴结构几何先验与正向投影误差约束的加权位姿优化方法,通过引入结构先验消除空间圆位姿求解二义性,在统一框架下进行位姿优化。

1 测量原理

1.1 系统构建

本文方法基于构建的多相机视觉测量系统实现,系统组成如图 1 所示。主要由 4 台工业相机及配套镜头、工业机器人、环形试验件和柔性加持工具组成。4 台相机环绕布设于环形试验件周围,从不同视角同步采集端面图像;工业机器人抓取环形试验件并调整其空间位姿;柔性气柱承载模块用于支撑环形试验件以配合完成装配过程。该系统通过多视角协同观测,克服单目视觉的视野局限,为后续跨视角特征融合与位姿解算提供统一的数据基础。基于上述系统,首先利用多相机标定参数结合目标共平面约束,将各相机采集的图像统一映射至主相机像平面坐标系;其次,提出基于关键点搜索的方法,从离散弧段中提取能够表征椭圆整体几何特性的关键点,并结合超最小二乘方法实现椭圆拟合;最后,结合孔轴结构几何先验约束,消除位姿估计中的二义性并进行优化。

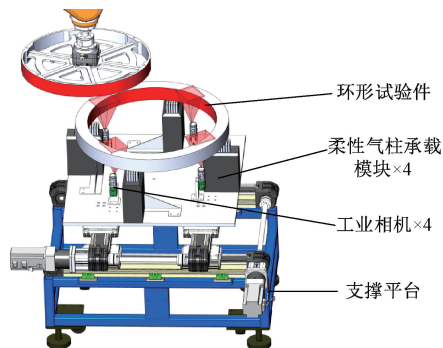


图1 孔轴位姿视觉测量系统

Fig. 1 Hole-axis pose vision measurement system

1.2 多视角图像对齐

使用多相机进行测量时,需要将各相机采集的目标图像统一到主相机像平面坐标系中,以支持后续特征融合与位姿解算。然而,由于不同相机具有独立的投影中心与成像几何结构,仅依赖相机外参难以直接建立像素级对应关系,其本质原因在于像平面属于二维投影结果,不同视角之间存在不可逆投影关系。

在存在额外几何约束的情况下,该问题可转化为跨视角几何一致性表达问题。针对平面约束场景,其等价形式可由单应性描述,即通过平面诱导的像平面间映射关系实现跨视角像素坐标变换;在一般三维几何表述中,则可统一为像素射线与空间约束以及像平面重投影的几何一致性表达过程,其中通过相机成像模型将像素反投影为空间射线,并与目标平面求交后再投影至主相机像平面,从而实现统一像平面映射。

在孔轴装配位姿测量任务中,孔轴内端面和外端面作为被测目标,其特征点分布于同一平面。因此,本文采用基于共平面约束的跨视角像平面统一映射方法。图 2 为基于平面约束的图像坐标对齐模型示意图。

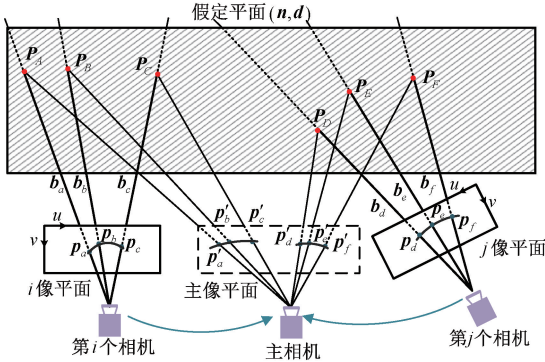


图 2 基于平面约束的图像坐标对齐模型

Fig. 2 Image coordinate alignment model based on planar constraints

设第 i 个相机的内参矩阵为 K_i , 主相机的内参矩阵为 K_m 。第 i 个相机相对于主相机坐标系的外参由旋转矩阵 R_i 和平移向量 t_i 描述。以第 i 个相机像平面上的特征点 p_a 为例,其齐次像素坐标记为:

$$p_a = [u_a, v_a, 1]^T \quad (1)$$

该像素点对应的归一化成像射线方向向量为:

$$b_a = K_i^{-1} p_a \quad (2)$$

该像素对应的空间射线在第 i 个相机坐标系为:

$$P_a = \lambda_a b_a \quad (3)$$

其中, λ_a 为射线尺度参数, P_a 该空间点在第 i 个相机坐标系下的坐标。利用相机外参关系,可通过式(4)将该空间点转换至主相机坐标系下:

$$P_A = R_i P_a + t_i = \lambda_a R_i b_a + t_i \quad (4)$$

由于单目成像过程中缺乏深度信息,上述关系无法直接建立像平面之间的确定映射。为此,引入目标共平面约束。设目标平面在主相机坐标系下满足:

$$n^T P_A + d = 0 \quad (5)$$

其中, n 为平面单位法向量, d 为平面到主相机坐标系原点的有符号距离。由射线与平面约束联立,可通过式(6)求得唯一交点对应的尺度参数:

$$\lambda_a = -\frac{n^T t_i + d}{n^T R_i b_a} \quad (6)$$

进而得到目标平面上的三维点 P_A 。在主相机成像模型下,该三维点投影至主相机像平面,齐次坐标为:

$$\tilde{p}'_a = K_m P_A = [\tilde{u}'_a, \tilde{v}'_a, \tilde{w}'_a]^T \quad (7)$$

归一化后得到主相机像平面坐标:

$$p'_a = K_m P_A = [u'_a/w'_a, v'_a/w'_a]^T \quad (8)$$

按照相同方式,对其余特征点执行同样的映射操作,即可将各相机采集的全部特征点统一转换至主相机像平面坐标系,从而完成多源图像特征的统一表达。至此,不同相机采集到的目标特征便完成了向主相机像平面坐标系的统一映射。

1.3 离散弧段椭圆拟合

多相机观测条件下,椭圆轮廓通常以若干不连续离散弧段的形式获取。弧段之间存在间断,各弧段受边缘缺失及整体偏移影响,导致基于全局点集的椭圆拟合方法在该条件下参数估计稳定性下降。

针对此问题,本文提出一种基于关键点搜索的离散弧段椭圆拟合方法。该方法通过对离散轮廓点的像素分布进行结构性分析,在每条弧段中提取具有代表性的关键点,并以关键点的重心坐标替代原始离散采样点参与全局拟合,削弱局部异常点、弧段整体偏移对拟合结果的影响,提高椭圆估计的稳定性与精度。

为说明关键点搜索过程,先考虑单个弧段轮廓。设连续椭圆曲线 Q 上的离散采样点为 (x_i, y_i) 其中 $x_i = i, i = 1, 2, \dots, n$ 。在像素坐标系中沿某一方向进行整数化映射,记 $\bar{y}_i$ 表示与 y_i 最接近的整数索引,则可获得对应的离散采样点 $\bar{P}(x_i, \bar{y}_i), i = 1, 2, \dots, n$,用于后续关键点搜索与拟合处理,如图 3 所示,其中三角形标记的点即为由连续椭圆曲线映射得到的采样像素点。

当相邻离散采样点对 $\{\bar{P}_i, \bar{P}_{i+1}\}$ 在某一坐标方向上满足单位级跳变关系时,即出现阶梯式变化,则将该点对定义为一个关键点对 $\{\hat{P}_i(x_i, \bar{y}_i), \hat{P}_{i+1}(x_{i+1}, \bar{y}_{i+1})\}$ 。从几何位置上看,关键点对中的两个点分别位于连续椭圆的内侧与外侧,因此也可称为内部关键点与外部关键点。采用关键点对作为拟合约束时,内部与外部关键点在数量与空间分布上能够保持较好的平衡,有利于椭圆参数的稳定估计。

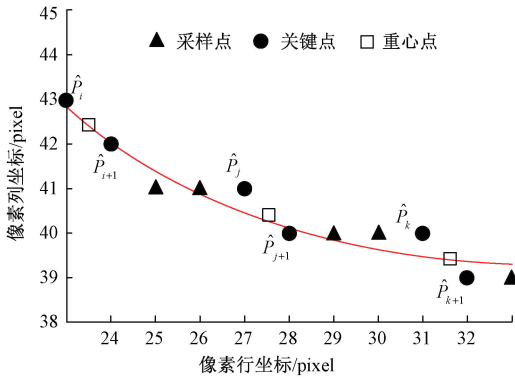


图3 关键点搜索示意图

Fig. 3 Schematic diagram of key point search

进一步从误差分布角度分析关键点的几何意义。设 $\bar{P}_1(x_1, \bar{y}_1)$ 是椭圆内部采样点,可验证 $f(x_1 + t, \bar{y}_1)$ 在 $t \in [0, +\infty)$ 上呈单调变化,在区间 $t \in [0, t_0]$ 内递减,而在 $t \in [t_0, +\infty)$ 内递增,且满足 $f(x_1 + t_0, \bar{y}_1) = 0$ 。当离散轮廓在 y 方向发生阶梯式跳跃时,对应关键点刻画了离散采样点相对于连续椭圆的局部最大近似误差。由此可知,拟合椭圆 Q 在几何意义上受到每个弧段端点以及所有关键点的共同约束;同样,关键点与椭圆 Q 之间的近似误差 e_1 可以限制采样点与 Q 之间的最终近似误差 e_2 。本文选择关键点作为拟合数据,并最小化相应的近似误差 e_1 ,从而也减小了近似误差 e_2 。

为进一步平衡内部与外部关键点在拟合过程中的影响,并增强方法的鲁棒性,对关键点对进行平滑,将其重心点为拟合点。设 $\hat{P}_1(x_1, \bar{y}_1)$ 和 $\hat{P}_2(x_1 + t, \bar{y}_1 + kt)$ 是确定的椭圆的两个关键点,其重心坐标为 $\bar{P}(x_1 + t/2, \bar{y}_1 + kt/2)$ 。3 个点拟合误差为 $e_1 = f(x_1, \bar{y}_1)$ 、 $e_2 = f(x_1 + t, \bar{y}_1 + kt)$ 和 $e_g = f(x_1 + t/2, \bar{y}_1 + kt/2)$,表示 3 个点处的相应拟合误差。如果 $e_g \geq 0$, 则有:

$$e_1 + e_2 = 2e_g + \frac{t^2(a^2k^2 + b^2)}{2a^2b^2} > 2e_g \geq 0 \quad (9)$$

那么可以推导:

$$e_1^2 + e_2^2 \geq \frac{(e_1 + e_2)^2}{2} \geq 2e_g^2 \quad (10)$$

在搜寻到关键点数据集后,采用超最小二乘(hyper least squares, HLS)方法^[19]进行椭圆估计,其以代数距离为最小化目标,引入尺度归一化抑制代数拟合对尺度与噪声的敏感性。相较于常规最小二乘拟合,HLS 在仅能获得椭圆局部弧段的情况下通常具有更好的拟合精度与鲁棒性。定义一般椭圆参数方程为:

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2f_0(Dx + Ey) + f_0^2F = 0 \quad (11)$$

其中, f_0 是尺度常数,其阶数与数据的 x 和 y 坐标相同。椭圆拟合的目标是计算系数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 使椭圆尽可能接近给定的点集 (x_i, y_i) 。通过尺度归一化的差异可以度量拟合效果,因此定义:

圆尽可能接近给定的点集 (x_i, y_i) 。通过尺度归一化的差异可以度量拟合效果,因此定义:

$$\begin{cases} \xi = [x^2, 2xy, y^2, 2f_0x, 2f_0y, f_0^2]^T \\ \theta = [A, B, C, D, E, F]^T \end{cases} \quad (12)$$

则椭圆参数方程可表示为:

$$(\xi, \theta) = 0 \quad (13)$$

定义 ξ 在某点 (x_i, y_i) 的矩阵 ξ , 代数距离表达为:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta, \xi_i)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta^T \xi_i \xi_i^T \theta = (\theta, M\theta) \quad (14)$$

其中,矩阵 M 定义为:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i \xi_i^T \quad (15)$$

构造针对拟合椭圆的约束条件:

$$(\theta, \tilde{M}\theta) = a \quad (16)$$

其中, a 是某一非零常数。在这里,矩阵 $\tilde{M}$ 是一个与矩阵 M 有关的对称矩阵,但其形式待定。在这种情况下,椭圆拟合问题被转换为约束最优化问题:

$$\begin{cases} \min J = (\theta, M\theta) \\ \text{s. t. } (\theta, \tilde{M}\theta) = a \end{cases} \quad (17)$$

该问题可等价转化为广义特征值问题:

$$M\theta = \lambda \tilde{M}\theta \quad (18)$$

当离散数据点全部恰好落在某椭圆曲线上,对于任意给定点,有 $(\theta, \xi_i) = 0$,意味着 $M\theta = 0$,此时特征问题的解对应特征值 $\lambda = 0$ 。然而,当离散数据点存在噪声时,可以构造矩阵 $\tilde{M}$ 为正定或者半正定矩阵,使得所有特征值都大于 0。此时,通过求得最小的特征值,可以找到其对应的最优解。假设离散数据点在某椭圆曲线附近遵循高斯分布噪声,利用微扰分析,令 $x_c = \sum_{i=1}^N x_i/N$, $y_c = \sum_{i=1}^N y_i/N$, $s_x^2 = \sum_{i=1}^N x_i^2/N$, $s_y^2 = \sum_{i=1}^N y_i^2/N$, $\gamma_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i/N$ 。则可找出使偏差和协方差最小的矩阵 $\tilde{M}$:

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 6s_x^2 & 6\gamma_{xy} & s_x^2 + s_y^2 & 6f_0x_c & 2f_0y_c & f_0^2 \\ 6\gamma_{xy} & 4(s_x^2 + s_y^2) & 6\gamma_{xy} & 4f_0y_c & 4f_0x_c & 0 \\ s_x^2 + s_y^2 & 6\gamma_{xy} & 6s_y^2 & 2f_0x_c & 6f_0y_c & f_0^2 \\ 6f_0x_c & 4f_0y_c & 2f_0x_c & 4f_0^2 & 0 & 0 \\ 2f_0y_c & 4f_0x_c & 6f_0y_c & 0 & 4f_0^2 & 0 \\ f_0^2 & 0 & f_0^2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

归纳而言,本文所提出的离散弧段椭圆拟合方法,其核心创新在于“关键点检测-重心平滑-HLS 拟合”的三阶段策略:首先利用像素级跳变检测确定弧段关键点,再通过重心坐标实现内外侧点的均衡化处理,最后以 HLS 方法完成高鲁棒性椭圆参数估计。

1.4 孔轴位姿估计与优化

空间圆经透视投影后,其像平面轮廓为椭圆,但由椭圆反演空间圆参数存在二义性^[20]:同一椭圆可由两个关于视锥对称的空间圆投影形成。为消除上述二义性,引入孔轴结构的几何先验约束。如图4所示,由投影椭圆可分别求得近端圆的两组候选解 $C_1^p(\mathbf{O}_1^p, \mathbf{n}_1^p)$ 、 $C_2^p(\mathbf{O}_2^p, \mathbf{n}_2^p)$, 以及远端空间圆的两组候选解 $C_1^d(\mathbf{O}_1^d, \mathbf{n}_1^d)$ 和 $C_2^d(\mathbf{O}_2^d, \mathbf{n}_2^d)$ 。其近、远端空间圆两两组合后,形成 $\{C_1^p, C_1^d\}$ 、 $\{C_1^p, C_2^d\}$ 、 $\{C_2^p, C_1^d\}$ 以及 $\{C_2^p, C_2^d\}$ 共4种空间圆组合。

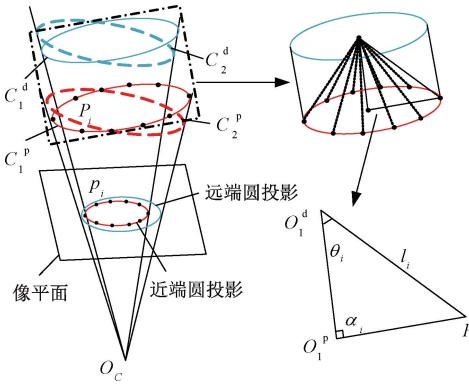


图4 孔轴视觉位姿估计原理

Fig. 4 Schematic diagram of visual pose estimation for hole and shaft

以其中一组候选组合 $\{C_1^p, C_1^d\}$ 为例,在近端投影椭圆图像上均匀选取采样点 $\mathbf{p}_i = [u_i, v_i]^T$, 其对应点为 $\mathbf{P}_i = [x_i^c, y_i^c, z_i^c]^T$ 位于 C_1^p 上。由于缺乏深度信息,无法直接获得采样点在相机坐标系下的三维坐标 $\mathbf{P}_i$ 。设相机的光心为 $\mathbf{O}_c$, 则像素点 $\mathbf{p}_i$ 与光心 $\mathbf{O}_c$ 确定一条空间射线,则点 $\mathbf{p}_i$ 与 $\mathbf{O}_c$ 构成的射线与近端圆所在平面相交于点 $\mathbf{P}_i$, 其可通过透视投影方程与圆平面方程联立求解:

$$\mathbf{P}_i = z_i^c \mathbf{K}^{-1} [u_i, v_i, 1]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{n}_f \cdot (\mathbf{P}_i - \mathbf{O}_1^p) = 0 \quad (21)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为相机内参矩阵; $\mathbf{n}_f$ 表示近端圆在在相机坐标系中的法向量; $\mathbf{O}_1^p$ 表示近端圆在在相机坐标系中的圆心坐标。同理可得远端圆圆心坐标 $\mathbf{O}_1^d$ 。

在几何约束下,由采样点 $\mathbf{P}_i$ 、近端空间圆圆心 $\mathbf{O}_1^p$ 、远端空间圆圆心 $\mathbf{O}_1^d$ 构成的三角形应近似直角三角形,且其边长 l_i 和夹角 θ_i 应接近结构先验确定的值。

基于上述约束关系,定义如下组合误差评价函数,以量化各候选组合与先验几何模型的偏离程度:

$$E_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\omega_l (l_i - l)^2 + \omega_\theta (\theta_i - \theta)^2 + \omega_\alpha \left(\alpha_i - \frac{\pi}{2} \right)^2 \right] \quad (22)$$

其中, l 和 θ 由孔轴结构确定的理论值, ω_l 、 ω_θ 、 ω_α 为各误差项的权重。受噪声与成像误差影响,4种候选组合的偏离程度差异显著,正确解的误差远小于错误解。据此,遍历全部候选组合并计算偏离程度,选取误差最小者作为真实位姿解。

上述步骤可有效消除空间圆位姿的二义性,得到孔轴位姿的初始估计。然而,该初值仍受图像噪声与边缘提取误差的影响,为此,本文提出一种基于正向投影几何距离的加权位姿优化算法。该方法以初步求得的空间圆位姿参数作为初值,通过最小化观测点与模型投影之间的正向投影几何误差实现迭代优化。

具体而言,将近端圆心 $\mathbf{O}_1^c$ 、远端圆心 $\mathbf{O}_2^c$ 与轴线方向向量 $\mathbf{n}$, 及已知结构参数,即近、远端圆的半径为 r , 圆心间距为 h 作为初始值,构建加权目标函数,通过最小化图像域的正向投影误差迭代求解最优位姿。其原理如图5所示。

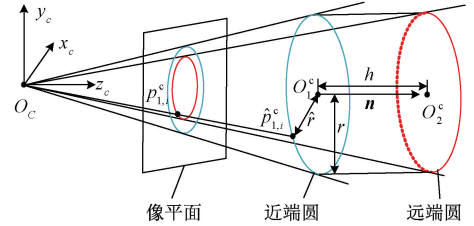


图5 基于正向投影距离的位姿优化模型

Fig. 5 Pose optimization model based on forward projection distance

对于图像上提取的近端椭圆边界点 (u_{li}, v_{li}) , 其对应的空间点 $\mathbf{p}_{1,i}^c$ 位于从光心出发的射线上,且该射线与当前计算的近端圆平面相交于 $\hat{\mathbf{p}}_{1,i}^c$ 。该交点同时满足法向量为 $\mathbf{n}$ 且过圆心 $\mathbf{O}_1^c$ 的圆平面上。因此,存在深度标量 λ 使得:

$$\hat{\mathbf{p}}_{1,i}^c = \lambda \mathbf{p}_{1,i}^c \quad (23)$$

且满足平面方程:

$$\mathbf{n}^T (\hat{\mathbf{p}}_{1,i}^c - \mathbf{O}_1^c) = 0 \quad (24)$$

将射线方程代入平面方程,可解得:

$$\hat{\mathbf{p}}_{1,i}^c = \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{O}_1^c}{\mathbf{n}^T \mathbf{p}_{1,i}^c} \mathbf{p}_{1,i}^c \quad (25)$$

理想情况下,交点 $\hat{\mathbf{p}}_{1,i}^c$ 应落在以 $\mathbf{O}_1^c$ 为圆心、 r 为半径的圆周上。受噪声与误差影响,其距离圆心存在偏差,据此定义近端圆的边缘点距离误差函数:

$$e_{1,i} = \left\| \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{O}_2^c - h}{\mathbf{n}^T \mathbf{p}_{1,i}^c} \mathbf{p}_{1,i}^c - \mathbf{O}_2^c + h \cdot \mathbf{n} \right\| - r \quad (26)$$

其中, $\mathbf{O}_1^c = \mathbf{O}_2^c - h\mathbf{n}$ 。由于 $\mathbf{p}_{1,i}^c$ 、 r 和 h 均为已知,因此 $e_{1,i}$ 实际上是以孔方向向量 $\mathbf{n}$ 及远端圆的中心坐标 $\mathbf{O}_2^c$ 为变量的函数。其中, $\mathbf{n}$ 可视作该孔相对于相机坐标系的

旋转矩阵 $\mathbf{R}$, 而 $\mathbf{O}_2^c$ 则对应孔位姿的平移向量 $\mathbf{t}$ 。

同理可定义远端圆的误差函数 $e_{2,j}$:

$$e_{2,j} = \left\| \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{O}_2^c - h}{\mathbf{n}^T \mathbf{p}_{2,j}^c} \mathbf{p}_{2,j}^c - \mathbf{O}_2^c \right\| - r \quad (27)$$

其中, $\mathbf{p}_{2,j}^c$ 为远端圆成像点在相机坐标系的三维坐标。基于上述定义, 近端圆选取 N 个参考点, 远端圆选取 M 个参考点构建孔轴结构的位姿优化目标函数:

$$\min_{\mathbf{O}_2^c, \mathbf{n}} E(\mathbf{O}_2^c, \mathbf{n}) = \sum_{i=1}^N \omega_{1,i} (e_{1,i})^2 + \sum_{j=1}^M \omega_{2,j} (e_{2,j})^2 \quad (28)$$

其中, N 为选取的参考点数量; $\omega_{1,i}$ 和 $\omega_{2,j}$ 为基于正向投影几何距离自适应调整的加权系数, 根据各点的残差自适应调整, 以增强算法对噪声和离群点的鲁棒性。通过最小化该目标函数, 可同时计算出孔轴的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 与平移向量 $\mathbf{t}$, 从而完成位姿参数的优化。

在优化过程中, 各参考点的权重由其残差自适应确定。首先计算当前位姿估计下各点的误差, 再利用改进 Huber 函数更新权重。以近端圆为例, 初始时各参考点的权值均设为均等值 $1/n$, 设第 k 次迭代第 i 个参考点的权值为 $\omega_{1,i}^k$, 误差为 $e_{1,i}^k$ 。每次迭代中, 权重按式 (29) 更新:

$$\omega_{1,i}^{k+1} = \begin{cases} \left(\frac{\bar{e}^2}{(e_{1,i}^k)^2} \right) \omega_{1,i}^k, & e_{1,i}^k > \bar{e} \\ \omega_{1,i}^k, & e_{1,i}^k \leq \bar{e} \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\bar{e} = \sum_{i=1}^N e_{1,i}^k / N$ 为第 k 次迭代中近端圆所有参考点误差的均值, 仿真实验表明^[21], 权重经若干次迭代后趋于稳定。据此, 优化过程分两阶段进行: 首先权重与参数交替更新, 至权重变化可忽略; 随后固定权重, 快速优化位姿至收敛。至此, 完成基于空间圆投影模型的孔轴位姿估计与优化。

2 实验验证

2.1 实验系统搭建

为验证本文所提出孔轴结构椭圆检测方法的有效性, 搭建实验平台并开展对比试验, 实验现场布置如图6所示。孔轴模拟件上端面加工有3个激光靶球安装孔位, 用于构建外部几何基准。多相机系统由4台 MER2-507-23GM/C 相机搭配 HN-0816-5M-C2/3X 镜头组成, 分辨率为 2592×1944 、像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$, 最高帧率可达 60 fps; 其配套镜头的焦距为 8 mm。

ESTUN ER35B-1810 工业机器人作为执行机构抓取孔轴模拟件, 通过调整末端位姿获取不同姿态以进行验证, 并完成姿态调整与装配过程, 其具备6个关节轴, 最大臂展为 1813 mm, 额定负载达 30 kg, 重复定位精度为

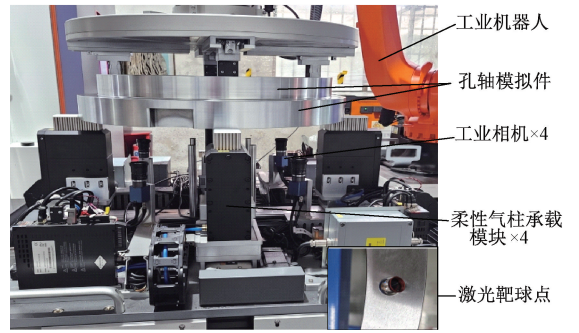


图6 实验现场

Fig. 6 Experimental site photo

$\pm 0.04 \text{ mm}$ 。同时, 采用柔性气柱承载模块用于承接孔轴模拟件, 从而配合实现完整的装配过程。

2.2 测量精度验证

算法精度验证在统一坐标系下进行。将本文方法提取的椭圆中心坐标转换至激光跟踪仪坐标系, 与激光跟踪仪测量结果对比, 获得圆心位置偏差; 同时根据椭圆拟合结果计算端面圆的空间法向量, 与激光跟踪仪测量值比较, 获得姿态角偏差。为验证算法在不同观测姿态下的稳定性, 开展多姿态重复测量实验, 具体步骤如下:

1) 提取3个激光靶球的像素坐标 $(x_i, y_i)^T$, 同时由激光跟踪仪获取对应靶球的空间三维坐标 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$ 。建立两组点集刚体变换关系, 从而得到相机像素坐标系至激光跟踪仪坐标系的变换矩阵 $\mathbf{T}$ 。

2) 对输入图像执行椭圆特征检测算法, 提取端面圆心像素坐标。结合标定矩阵 $\mathbf{T}$, 将其映射至激光跟踪仪坐标系, 得到空间坐标 $(C_x, C_y, C_z)^T$ 。

3) 求解端面圆对应的空间法向量 $(n_x, n_y, n_z)^T$ 。由于真实圆心与法向量在实验中无法直接获取, 因此在试验件设计中采用三靶球构成的几何平面等效替代, 并认为该结构满足刚体约束条件。试验件加工精度达到 0.005 mm , 加工误差在本实验尺度下可忽略不计。激光跟踪仪测量获取该等效圆心坐标 $(D_x, D_y, D_z)^T$ 与法向量 $(N_x, N_y, N_z)^T$ 。计算圆心距离欧氏偏差 Δd :

$$\Delta d = \sqrt{(C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 + (C_z - D_z)^2} \quad (30)$$

计算法向量的空间夹角偏差 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \arccos(n_x N_x + n_y N_y + n_z N_z) \quad (31)$$

4) 通过改变试验件空间位姿, 重复执行步骤2)~3), 共获取30组不同姿态下的测量数据, 用于评估算法在姿态变化条件下的稳定性与一致性。

5) 同一试验件在30组不同位姿条件下, 分别采用本文方法与激光跟踪仪进行测量, 获取激光跟踪仪坐标系下的圆心位置及法向量, 测量结果如表1和2所示, 由于篇幅限制只显示10组数据。

表 1 圆心坐标测量数据

Table 1 Circle center coordinate measurement data (mm)

组别	激光跟踪仪圆心坐标	本文方法圆心坐标	距离偏差 Δd
1	(671.706 6, 1 341.218 0, -47.887 6)	(671.706 6, 1341.220 6, -47.846 0)	0.041 7
2	(672.520 8, 1 342.373 9, -45.827 6)	(672.507 2, 1 342.350 0, -45.812 9)	0.031 2
3	(671.594 3, 1 340.580 4, -61.7542)	(671.559 5, 1 340.558 5, -61.762 1)	0.041 9
4	(668.575 2, 1 340.601 3, -59.457 5)	(668.594 9, 1 340.569 8, -59.428 2)	0.047 4
5	(668.960 4, 1 341.977 1, -51.325 6)	(668.983 0, 1 341.954 2, -51.351 8)	0.041 5
6	(670.818 7, 1 341.343 9, -50.556 2)	(670.804 4, 1 341.314 6, -50.559 8)	0.032 7
7	(671.707 0, 1 342.615 8, -57.549 9)	(671.682 5, 1 342.632 2, -57.556 6)	0.030 2
8	(670.518 3, 1 343.058 4, -57.843 3)	(670.506 4, 1 343.032 6, -57.829 8)	0.031 4
9	(671.203 6, 1 340.737 1, -52.571 6)	(671.185 6, 1 340.718 1, -52.580 6)	0.027 7
10	(670.599 2, 1 341.902 0, -53.846 0)	(670.572 1, 1 341.886 4, -53.812 1)	0.046 1

表 2 法向量测量数据

Table 2 Normal vector measurement data

组别	激光跟踪仪法向量/mm	本文方法法向量/mm	夹角偏差 $\Delta\theta/(^{\circ})$
1	(0.354 72, -0.706 94, 0.611 89)	(0.355 51, -0.706 73, 0.611 68)	0.048 77
2	(0.366 87, -0.705 19, 0.606 72)	(0.366 84, -0.704 82, 0.607 17)	0.033 78
3	(0.354 77, -0.706 99, 0.611 81)	(0.355 81, -0.706 36, 0.611 93)	0.069 71
4	(0.366 23, -0.705 80, 0.606 40)	(0.365 36, -0.705 63, 0.607 13)	0.065 23
5	(0.365 99, -0.696 75, 0.616 93)	(0.366 33, -0.697 28, 0.616 12)	0.058 75
6	(0.363 97, -0.698 44, 0.616 20)	(0.364 28, -0.698 98, 0.615 41)	0.057 54
7	(0.366 86, -0.706 81, 0.604 84)	(0.366 97, -0.705 98, 0.605 74)	0.070 68
8	(0.364 62, -0.700 23, 0.613 78)	(0.364 76, -0.700 54, 0.613 35)	0.031 48
9	(0.361 94, -0.701 91, 0.613 45)	(0.362 51, -0.701 66, 0.613 40)	0.036 15
10	(0.364 66, -0.700 14, 0.613 87)	(0.364 92, -0.700 78, 0.612 98)	0.064 46

装配系统要求圆心误差小于 0.050 mm,法向量夹角误差小于 0.10°,重复测量标准差小于 0.015 mm。由表 1 和 2 可知,本文方法测得圆心偏差范围为 0.028~0.046 mm,法向量夹角偏差范围为 0.031°~0.070°。为验证重复测量精度,在相同位姿下对孔轴模拟件进行 10 次重复测量,计算圆心距离和法向量夹角的测量重复性。误差分布如图 7 所示,圆心距离重复测量平均误差为 0.037 mm,标准差为 0.008 mm;法向量夹角重复测量平均误差为 0.053°,标准差为 0.007°。实验结果表明,本文方法能够实现大型孔轴结构的高精度位姿测量,具有良好的精度和鲁棒性。

2.3 方法对比实验

为进一步验证本文方法的综合性能优势,选取近年来具有代表性的孔轴结构视觉位姿测量方法进行对比实验:1) 基于 Canny 边缘提取与随机样本一致算法

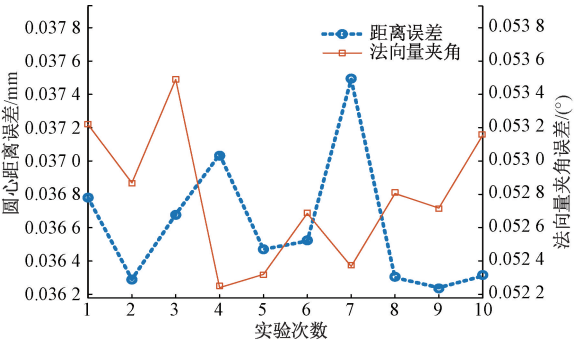


图 7 圆心距离和法向量夹角重复测量误差分布

Fig. 7 Distribution of repeated measurement errors of center distance and normal vector angle

(random sample consensus, RANSAC) 全局椭圆拟合的方法^[16],使用本文的多相机模型,采用边缘检测与随机

采样一致性算法进行椭圆拟合后再解算位姿;2)单目视觉方法^[22],使用单台相机在能够覆盖完整端面的工作距离下采集图像,按文献方法进行位姿解算;3)本文方法。所有对比方法均在与本文方法相同的图像数据上运行。表 3 给出了 3 种方法在 10 组不同姿态下的圆心距离误差、法向量夹角误差及平均总运行时间的综合对比。

表 3 不同方法的测量精度与运行时间综合对比

Table 3 Comparison of center distance and normal vector angle errors of different methods

方法	圆心距离/mm		法向量夹角/(°)		平均耗时/ms
	均值	标准差	均值	标准差	
1	0.054	0.015	0.077	0.019	156
2	0.182	0.065	0.357	0.142	52
3	0.039	0.008	0.053	0.007	142

由表 3 可见,在精度方面,本文方法的圆心距离和法向量夹角精度均为最优,圆心距离均值 0.039 mm,法向量夹角均值 0.053°,标准差分别仅为 0.008 mm 和 0.007°,体现了良好的鲁棒性和重复性。RANSAC 全局拟合方法在椭圆弧段不完整时,随机采样策略易受局部外点干扰,拟合稳定性下降,圆心距离均值 0.054 mm,法向量夹角均值 0.077°,误差较本文方法增大约 40%。单目视觉方法受限于工作距离增大导致的成像比例下降,各项误差均为最大,圆心距离均值达 0.182 mm,法向量夹角均值达 0.357°,标准差达到 0.142°,稳定性明显不足。

在运行时间方面,单目方法因处理流程简单,耗时最短为 52 ms,但精度远低于其他两种方法。本文方法总耗时为 142 ms,其中图像对齐耗时约 12 ms,椭圆拟合耗时约 25 ms,位姿优化耗时约 25 ms,多相机协同处理增加了部分计算开销,但换取了显著更高的测量精度。RANSAC 全局拟合方法由于需要多次随机采样与模型验证,椭圆拟合环节耗时较长,总耗时最长为 156 ms。本文方法 142 ms 的总耗时完全满足大型孔轴装配过程中对实时测量的工程需求,在精度与效率之间取得了良好平衡。

2.4 关键影响因素分析

为揭示实际应用中可能对本文方法性能产生显著影响的关键因素,开展了以下两方面的定量分析实验:

1) 椭圆弧段完整度的影响

通过调整相机的工作距离和人为遮盖的方式使椭圆轮廓弧段完整度从 100% 逐步递减至 20%,以 10% 为间隔,测试方法在各完整度水平下的测量精度。

结果如图 8 所示,当弧段占比高于 40% 时,圆心误差

和法向量误差保持稳定,圆心误差小于 0.05 mm,法向量角度误差小于 0.07°。当弧段占比降至 30% 时,圆心误差增大至 0.07 mm;降至 25% 时,误差增至 0.09 mm;低于 20% 后,拟合失败率急剧上升。上述结果表明,本文方法在弧段缺失不超过 60%,即保留 40% 以上弧段的条件下能可靠工作,对部分遮挡或边缘提取不完整具有较强的适应性。

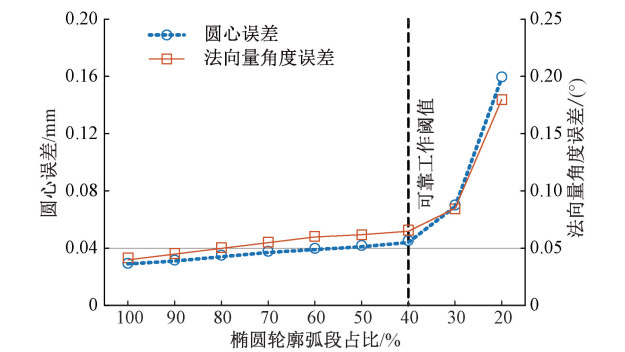


图 8 椭圆弧段完整度对测量精度的影响

Fig. 8 Influence of elliptical arc segment integrity on measurement accuracy

2) 相机标定误差的影响

为评估相机标定精度对最终测量结果的影响,以重投影误差作为衡量指标,向各相机图像点的重投影坐标分别添加不同程度的零均值高斯噪声,使重投影误差从 0.1 pixel 逐步增大至 1.0 pixel,模拟不同标定质量水平,测试本文方法的位姿测量精度。

结果如图 9 所示,重投影误差为 0.1 pixels 时,圆心误差约 0.012 mm,法向量误差约 0.018°,标定引入的误差极小。重投影误差增至 0.3 pixels 时,圆心误差升至 0.025 mm,法向量误差升至 0.038°,标定误差已成为总误差的重要来源。增至 0.5 pixels 时,圆心误差达 0.052 mm,法向量误差超 0.078°,精度已低于实验总体水平。增至 1.0 pixel 时,圆心误差超 0.135 mm,法向量

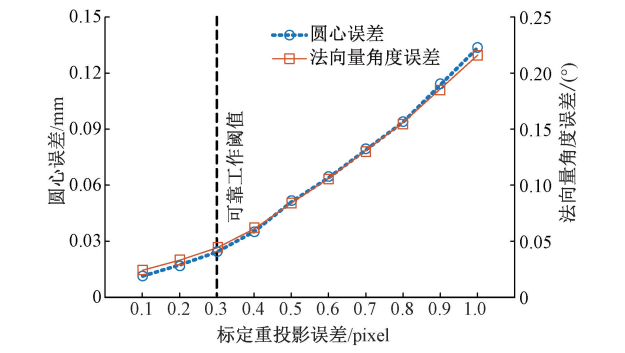


图 9 标定误差对测量的影响

Fig. 9 Influence of calibration error on measurement

误差超 0.210° , 精度严重恶化。这表明高精度标定是保证测量精度的必要条件, 实际应用中重投影误差应控制在 0.3 pixels 以内。

综合上述分析, 椭圆弧段完整度和相机标定精度是影响本文方法性能的两个主要因素。本文方法在中等弧段缺失及适度标定偏差条件下均能保持较好的测量性能, 上述结论为工程实践中的视场规划和标定精度控制提供了定量参考。

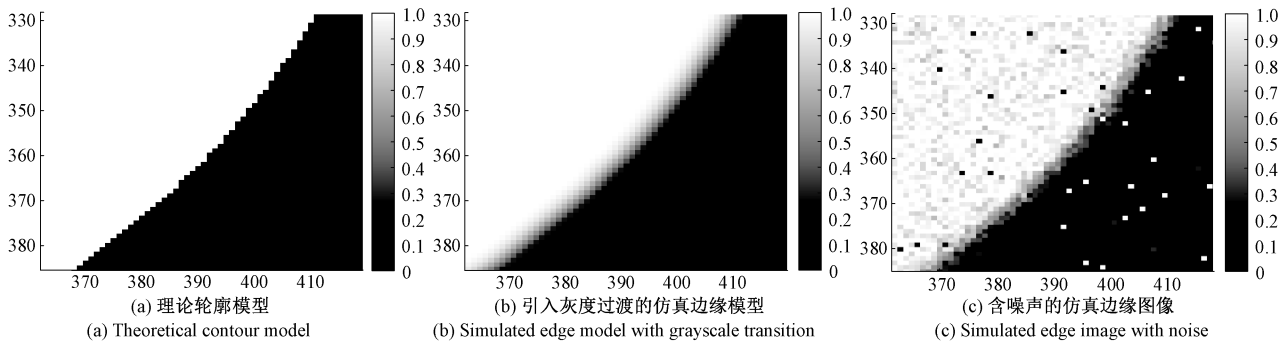


图 10 仿真椭圆轮廓生成
Fig. 10 Simulation of Elliptic Contour Generation

将原有单一目标轮廓进一步扩展为多段离散弧段结构, 以更加符合实际装配与视觉测量中常见的不完整、离散轮廓获取场景。并且为进一步考察拟合方法对轮廓整体性偏差的鲁棒性, 在椭圆拟合之前对 4 段弧段整体施加随机微小位移。

在此条件下, 分别采用传统最小二乘椭圆拟合方法^[23]、基于弧邻接矩阵的椭圆拟合方法^[24]与本文提出的方法进行椭圆参数计算, 并以拟合椭圆中心坐标与理想椭圆中心之间的位置误差作为评价指标, 分析两种方法的拟合结果。椭圆拟合结果如图 11 所示。可以直观观

2.5 关键步骤验证

1) 基于关键点搜索椭圆拟合方法效果

为验证本文椭圆拟合方法的有效性, 采用仿真实验进行对比分析。首先基于椭圆标准方程生成完整椭圆模型, 截取部分弧段作为目标轮廓; 随后引入灰度过渡模型模拟真实成像中的边缘扩散特性; 最后叠加随机噪声模拟实际成像干扰, 得到单段弧段的仿真边缘图像, 如图 10 所示。

察到, 在离散弧段存在整体偏移的情况下, 传统最小二乘拟合方法对局部轮廓分布较为敏感, 其拟合椭圆在中心位置参数上均出现明显偏差, 拟合结果稳定性较差。相比之下, 本文方法拟合椭圆在整体形态及关键参数上均与理想椭圆保持较高一致性。

2) 孔轴位姿优化效果

为评估孔轴位姿优化效果, 实验共采集 20 组不同姿态下的图像数据, 并分别计算优化前后的圆位姿参数。测量误差可分别用圆心位置误差和法向量方向误差进行量化。实验结果如图 12 所示, 可清晰反映优化方法在提高位姿精度方面的效果。

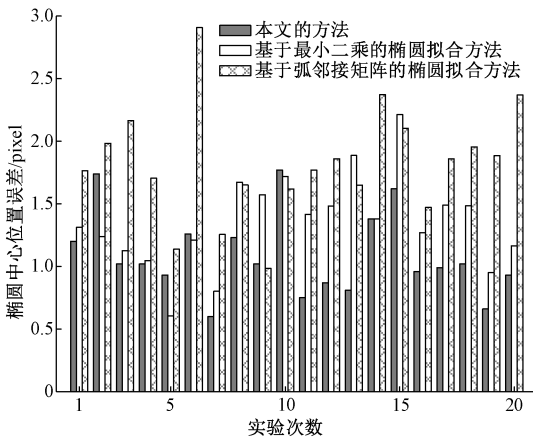
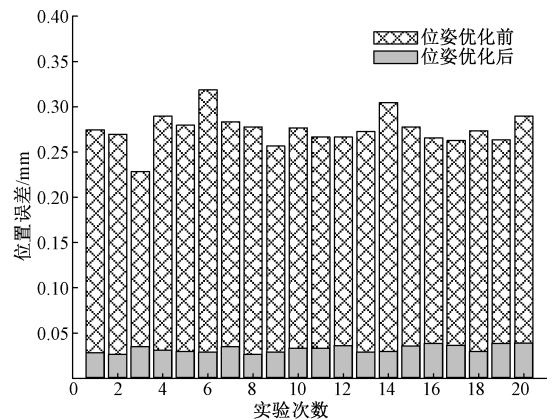


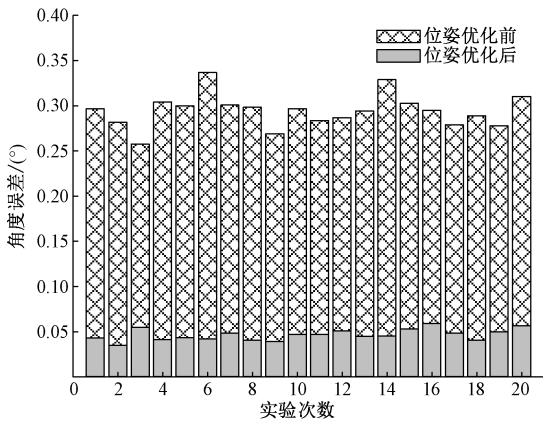
图 11 椭圆拟合结果对比

Fig. 11 Comparison of ellipse fitting results



(a) 位姿优化前后位置误差对比

(a) Comparison of position errors before and after optimization



(b) 位姿优化前后角度误差对比

(b) Comparison of angle errors before and after optimization

图 12 位姿优化前后效果对比

Fig. 12 Comparison of effects before and after optimization

3 结 论

本文针对大型孔轴结构视觉位姿测量中单目视场与局部高分辨率难以兼得的瓶颈问题,提出了一种基于多相机协同的孔轴装配位姿测量方法。首先,引入目标共平面约束,建立跨视角向主相机像平面的统一映射模型,实现多相机观测的全局一致表达;其次,基于关键点搜索提出离散弧段椭圆拟合方法,提高非完整边缘条件下椭圆特征提取鲁棒性;随后,结合孔轴几何先验消除位姿求解二义性,并构建基于正向投影几何距离的加权优化模型进行迭代求解。实验结果表明,本文方法圆心距离平均误差为 0.037 mm,法向量夹角平均误差为 0.053°,综合性能显著优于单目视觉及传统椭圆拟合等代表性方法。关键影响因素定量分析进一步揭示了方法在弧段完整度和标定精度两个维度上的性能边界,为工程化应用提供了参考依据。

参考文献

[1] Chu W M, Huang J, Yan H S, et al. Optimization of pose samples for calibration of large component docking mechanisms [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2025, 38(4/6): 536-554.

[2] Li S G, Chu W M, Huang X, et al. Trajectory planning method for docking of large aircraft components [J]. Robotic Intelligence and Automation, 2023, 43 (3): 235-253.

[3] 褚文敏, 周蒯, 滕利臣. 大型结构调姿机构末端重心

校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 367-381.

Chu Wenmin, Zhou Kuai, Teng Lichen. Terminal centroid calibration method for large component adjustment mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 367-381.

[4] 李笑宇, 林虎, 薛梓, 等. 激光跟踪多边测量自标定优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 10-17.

Li Xiaoyu, Lin Hu, Xue Zi, et al. Self-calibration optimization method for laser tracking multilateral measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 10-17.

[5] 庄苏锋, 屠大维, 张旭, 等. 水下双目立体视觉对应点匹配与三维重建方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 147-154.

Zhuang Sufeng, Tu Dawei, Zhang Xu, et al. Research on corresponding point matching and 3D reconstruction of underwater binocular stereo vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 147-154.

[6] Li S G, Deng Z P, Zeng Q, et al. A coaxial alignment method for large aircraft component assembly using distributed monocular vision[J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 437-449.

[7] Zhao P, Huang X, Li S G, et al. A convolutional neural network based method for fork type wing fuselage docking[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2025, 239(11): 1592-1606.

[8] 张辉, 李泂杲, 徐岩, 等. 一种面向叉耳式翼身对接的视觉测量方法[J]. 航空制造技术, 2017(21): 56-61.

Zhang Hui, Li Shuanggao, Xu Yan, et al. A vision measuring method for fork type wing-fuselage docking [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(21): 56-61.

[9] 李航宇, 黄翔, 褚文敏, 等. 一种面向齿形结构装配的视觉测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (16): 180-189.

Li Hangyu, Huang Xiang, Chu Wenmin, et al. A vision measurement method for gear structure assembly [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 180-189.

- [10] Jiang T, Cui H H, Cheng X S, et al. A measurement method for robot peg-in-hole prealignment based on combined two-level visual sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-12.
- [11] Ma X, Feng J B, Li Y B, et al. Active 6-D position-pose estimation of a spatial circle using monocular eye-in-hand system[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(1): 1729881417753692.
- [12] Sun W C, Zhang Z J, Zhang W M. A coaxial alignment method for large flange parts assembly using multiple local images[J]. IEEE Access, 2021, 9: 16716-16727.
- [13] Yu A D, Wang Y J, Guo B, et al. Cylinder object 6-DOF pose estimation via single perspective circle on cylindrical surface [J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(1): 015205.
- [14] 翟坤, 李志, 陈新龙, 等. 非合作航天器对接环识别算法研究[J]. 航天控制, 2013, 31(5): 76-82.
Zhai Kun, Li Zhi, Chen Xinlong, et al. Study on recognition method for non-cooperative spacecraft docking ring[J]. Aerospace Control, 2013, 31(5): 76-82.
- [15] 张铁毅, 薛建平, 孙超姣, 等. 航天器空间对接位置视觉测量方法[J]. 飞行力学, 2016, 34(1): 68-71.
Zhang Tieyi, Xue Jianping, Sun Chaojiao, et al. A vision-based location method for spacecraft docking[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(1): 68-71.
- [16] 于鲲, 丛明煜 段佳佳, 等. 星箭对接环抓捕点单目视觉导航方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 228-236.
Yu Kun, Cong Mingyu, Duan Jiajia, et al. Monocular visual navigation method for capture point of docking ring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 228-236.
- [17] 张旭辉, 杨红强, 白琳娜, 等. 基于改进 RANSAC 特征提取的掘进装备视觉定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 168-177.
Zhang Xuhui, Yang Hongqiang, Bai Linna, et al. Research on the visual positioning method of tunneling equipment based on the improved RANSAC feature extraction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 168-177.
- [18] 樊启高, 朱高文, 黄文涛, 等. 基于图像分割模型的执行末端视觉跟踪策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 62-70.
Fan Qigao, Zhu Gaowen, Huang Wentao, et al. Research on vision tracking strategy of execution end based on image segmentation model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 62-70.
- [19] Kanatani K, Rangarajan P. Hyper least squares fitting of circles and ellipses[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2011, 55(6): 2197-2208.
- [20] 屈也频, 侯旺. 基于误差传播理论的 PnP 问题姿态精度分析[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(2): 479-487.
Qu Yepin, Hou Wang. Attitude accuracy analysis of PnP based on error propagation theory [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 479-487.
- [21] Zhang X F, Liu H B, Shang Y. Robust orthogonal iteration algorithm for single camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0915004.
- [22] Zhou K, Huang X, Li S G, et al. 6-D pose estimation method for large gear structure assembly using monocular vision[J]. Measurement, 2021, 183: 109854.
- [23] Jia Q, Liu Z Z, Liu Y, et al. Model-aware ellipse detection via parametric correlation learning[J]. Signal Processing, 2026, 238: 110142.
- [24] 杜斌斌, 刘常杰. 局部高光法兰内径椭圆鲁棒性精确提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(6): 74-81.
Du Binbin, Liu Changjie. Accurate robust extraction method for elliptical inner diameter of local highlight flange [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(6): 74-81.

作者简介



赵鹏, 2023 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 现为南京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为飞机数字化装配、视觉测量。

E-mail: zhaopeng@nuaa.edu.cn

Zhao Peng received his M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2023. He is currently a doctoral candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include digital aircraft assembly and visual measurement.



黄翔(通信作者),1987 年于南京航空航天大学获得学士学位,1990 年于南京航空航天大学获得硕士学位,1996 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学教授、博士生导师,主要研究方向为飞机装配和数字化测量。

E-mail:xhuang@nuaa.edu.cn

Huang Xiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1987, received his M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990, received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1996. He is currently a professor and doctoral supervisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include aircraft assembly and digital measurement.



丁力平,2006 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2010 年于浙江大学获得博士学位,现为南京航空航天大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为飞机数字化装配技术和智能优化设计技术航空航天装备制造技术、飞机数字化装配技术和智能优化设计技术。

E-mail:lpding@nuaa.edu.cn

Ding Liping received his M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2006, received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2010. He is currently an associate professor and master supervisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include design and manufacturing technology of aerospace equipment, digital aircraft assembly technology and intelligent optimization design technology.