

文章编号 1004-924X(2026)15-2398-12

厚壁圆孔单目背光精密位姿测量的 灰度积分投影双模态

廖晓波¹, 李 武¹, 程 磊³, 陈苏宇^{2*}

- (1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
2. 中国空气动力研究与发展中心 飞行器流体物理重点实验室, 四川 绵阳 621000;
3. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

摘要:在微型热电偶等精密部件的圆柱孔-轴装配过程中,圆孔位姿的高精度测量是保证装配同轴度的关键环节。然而,针对具有一定厚度的微小圆孔(孔径大小为0.03~3.7 mm,结构常数 $k>2.5$)结构测量,传统三维视觉方法系统复杂、建模困难,且单目背光视觉在倾斜条件下孔壁遮挡,从而导致光斑边缘模糊,降低了测量精度与稳定性。为此,提出一种基于灰度积分投影的双模态厚壁圆孔单目背光精密位姿测量方法。通过建立厚壁圆孔的背光成像几何模型,获得了光斑形态与圆孔倾斜角度关系。在此基础上,提出了粗调线性逆解与精调极值搜索的双模态位姿测量方法。在粗调阶段,通过全局能量统计的灰度积分投影,将二维图像降维为一维光通量分布曲线,从而规避局部边缘模糊的干扰,提取光斑形态的水平特征宽度,利用其在大倾角(超过70%理论截止角)下呈现的线性映射特征,构建姿态逆解模型,实现圆孔大偏差的快速修正;在精调阶段,切换至基于透射光通量的搜索方法,利用光通量在零位姿态处取得全局极大值的物理特性,通过闭环迭代寻优,实现对圆孔位姿的高精度定位。实验结果表明,在大倾角且伴随毛刺干扰的复杂工况下,该方法展现出极强的抗扰动稳定性,检测成功率在91%以上,有效提升了精密装配的精度与效率,为实际工程应用提供了一种低成本解决方案。

关键词:单目视觉;位姿检测;厚壁圆孔;灰度积分投影;精密装配;双模态方法

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263415.2398 **CSTR:**32169.14.OPE.20263415.2398

Dual-modal precision pose measurement for thick-walled cylindrical holes under monocular backlight vision based on grayscale integral projection

LIAO Xiaobo¹, LI Wu¹, CHENG Lei³, CHEN Suyu^{2*}

- (1. Key Laboratory of Manufacturing Process Testing Technology of the Ministry of Education,
Southwest University of Science and Technology, Sichuan 621010, China;
2. Aircraft Fluid Physics Key Laboratory, China Aerodynamics Research and Development Center,
Sichuan 621000, China;
3. College of Engineering Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

* Corresponding author, E-mail: chensy_hh@163.com

收稿日期:2026-04-03;修订日期:2026-04-21.

基金项目:四川省科技厅中央引导地方科技发展专项项目(No. 2023ZYD0132)

Abstract: High-precision pose measurement of circular holes is essential for ensuring coaxiality during hole-shaft assembly of precision components, including micro-thermocouples. For micro thick-walled holes with diameters of 0.03-3.7 mm and a structural constant $k > 2.5$, conventional three-dimensional vision systems are difficult to implement because of their complex hardware and imaging models. Moreover, in monocular backlight imaging, wall occlusion produces blurred light-spot edges at tilted poses, thereby reducing measurement robustness. A dual-mode pose-measurement method based on grayscale integral projection is proposed for monocular backlight imaging of thick-walled circular holes. A geometric backlight-imaging model establishes the relationship between light-spot morphology and hole inclination. For coarse alignment, grayscale integral projection converts the two-dimensional image into a one-dimensional transmitted-flux distribution, suppressing interference from locally blurred edges. A linear inverse model is applied at inclination angles exceeding 70% of the theoretical cutoff angle to rapidly correct large angular deviations. For fine alignment, a closed-loop extremum-search algorithm exploits the maximum transmitted flux at the zero-pose condition to achieve sub-degree pose positioning. Experiments conducted under large-inclination and burr-interference conditions achieved a detection success rate exceeding 91%. The proposed method provides a low-cost and robust solution for circular-hole pose alignment in precision assembly systems.

Key words: monocular vision; pose detection; thick-walled circular holes; grayscale integral projection; precision assembly; dual-modal method

1 引言

在航空航天、微电子制造以及精密光学仪器等高端制造领域,孔-轴装配是核心工艺环节之一^[1]。随着产品向小型化、精密化发展,装配公差往往被控制至微米级别,这对自动化设备的感知精度与控制柔顺性提出了严峻挑战^[2]。现有研究^[3]指出,虽然传统的接触式力控装配技术在一定程度上解决了柔顺性问题,但在面对微小零部件或易损表面时,非接触式的机器视觉引导技术凭借其全局感知、无损伤等优势,正逐渐成为零缺陷智能装配的首选方案。特别是在空间严重受限的装配场景中,单目视觉系统因结构紧凑、易于末端集成而备受关注。在面向高端制造的视觉对准与位姿解算方面,研究人员深入探索了基于手眼关系的工业机器人单目视觉快速对准技术^[4]。为了应对复杂平面目标的空间定位需求,基于二维合作目标的单相机高精度空间位姿测量方法也日益成熟,显著提升了目标的空间捕获精度,为自动化精密装配奠定了坚实的理论基础^[5]。

目前,针对空间位姿的视觉检测主要依赖三维视觉与二维视觉两种路径。其中,三维视觉

(如双目立体视觉、结构光)虽然能获取丰富的深度信息,但在面对微小尺寸及深孔结构时,常面临视野受限、建模困难且硬件成本高昂的问题;而基于单相机的二维视觉方案结构紧凑、实时性强,但在处理具有厚度的深孔零件时,缺乏深度信息且易受成像阴影干扰,难以直接满足高精度的姿态调节需求。因此,研究一种低成本且能克服厚壁圆孔成像弊端的单目视觉检测方法具有重要的工程应用价值。

在精密微装配与单目视觉位姿解算方面,研究人员深入探索了视觉复合定位以及结合并联理论的位姿估计方法^[6-7]。在单目视觉引导中,核心难点在于如何从受干扰图像中提取高精度的几何特征。实际生产中,工件边缘往往存在加工毛刺、切削液残留或不均匀反光,导致传统的边缘检测算法失效。针对这一问题,近年来基于亚像素和统计学的抗噪算法受到关注。Wang等^[8]提出了一种改进的亚像素边缘拟合方法,虽提升了定位精度,但在高噪声环境下计算复杂度显著增加,难以满足工业现场的高实时性要求。Qiu等^[9]提出一种基于双重约束的瞳孔定位算法,有效解决了模糊图像中的圆形特征提取难题,为解决毛刺干扰下的孔-轴定位提供了新思路。

Markus等^[10]提出了一种基于CAD模型匹配的方法,通过生成多视角虚拟图像库与实际轮廓匹配来估计位姿,虽然在通用零件识别上表现良好,但在微小孔径成像模糊时,轮廓提取的误差会显著降低匹配精度。Zhou等^[11]提出了一种从CAD模型中提取装配关系的算法,该算法的核心在于将模型中多样的装配关系抽象为共线与共面两种基本几何关系,采用似然最大化估计方法精确推断物体姿态,证实了该方法的可行性。Shiu等^[12]研究了基于圆特征的位姿求解,利用投影椭圆参数推导空间圆姿态,但指出该方法存在二义性问题,且依赖椭圆边缘提取的准确性。

针对实际工件边缘常存在的加工毛刺或反光导致Canny等梯度算子提取出虚假边缘的问题,He等^[13]分别在复杂背景及鲁棒椭圆检测方面进行了深入研究。尽管Huang等^[14]提出了基于Canny-Zernike矩的亚像素边缘检测算法提升了抗噪性,但在面对具有厚度的深孔时,成像光斑并非标准椭圆,而是复杂的类椭圆交集域。由于孔壁遮挡导致的类椭圆交集域不满足光滑边缘假设,椭圆拟合会引入系统性模型偏差^[15]。

基于深度学习的单目视觉位姿估计方法虽展现出对复杂环境的适应性,但在面向微米级精密装配任务时,仍暴露出固有的精度局限。蒋昭阳^[16]提出一种结合目标检测与关键点回归的深层网络架构,但由于卷积神经网络在特征提取过程中的信息压缩,端到端回归方法在极高精度的连续位姿解算中存在瓶颈。郭凌等^[17]提出的类别位姿估计方法依赖特征点匹配或局部特征投票模型,然而,在处理厚壁小孔背光图像时面临标注误差传递问题。王康等^[18]系统地综述了基于RGB图像的三维位姿估计方法,但其对大规模标注数据集的依赖以及在超精密测量场景下的泛化能力仍是待解决的挑战。微小孔径的位姿通常依赖外部高精度设备进行半自动标定,该过程易引入亚像素级的系统误差,从而限制了网络模型学习的精度上限。因此,在微米级精密装配任务中,端到端的深度学习模型在精度收敛的稳定性上,往往不及基于严密光学几何演化的物理模型。针对几何特征的利用,经典的PnP算法^[19-20]通过点线特征求解位姿,但在本文研究的圆孔场景中,缺乏明显的角点特征。

综上所述,在特定的厚壁圆孔-轴装配场景中,现有技术面临两方面主要挑战:一方面,三维视觉方法系统庞大、成本高昂,且难以对微小孔径的内部深度信息进行有效建模;另一方面,传统的二维单目测量方法主要依赖椭圆拟合算法,当工件倾斜时,受限于厚壁遮挡,成像光斑会由圆形退化为具有尖锐顶点的类椭圆交集域,且伴随严重的边缘衍射模糊。此时进行椭圆拟合会产生系统性偏差,难以兼顾“大范围引导”与“高精度定位”。

针对上述问题,本文聚焦于背光成像环境,提出一种针对厚壁圆孔结构的单目视觉精密位姿测量方法。通过理论分析建立了厚壁小孔背光成像的几何遮挡模型,系统揭示了光斑形态及有效宽度随孔轴倾斜角度变化的演化规律。在此基础上,采用“粗调线性逆解+精调极值搜索”的双模态位姿测量方法,在粗调阶段利用积分投影的线性特征实现大偏差快速修正,在精调阶段利用光通量物理极值原理消除系统静差。通过搭建高精度五轴运动平台进行实验验证,实现对圆孔位姿的高精度定位。该方案显著提升了孔-轴装配的同轴度精度,为精密装配场景提供了一种低成本、高精度的单目视觉解决方案,具有广阔的工程应用前景。

2 原 理

2.1 背光成像几何遮挡模型与特征映射

传统的二维视觉位姿测量通常依赖于对光斑图像进行边缘提取与椭圆拟合,进而通过计算椭圆长短轴比率来反演空间旋转角度。但在深孔小角度测量场景下,该方法存在显著的物理缺陷。厚孔在旋转时,传统方法采用光滑椭圆模型拟合由孔壁遮挡形成的具有非连续边界的类椭圆交集域,存在本质的几何失配,导致位姿解算出现系统性偏差。尤其是在旋转角度较大、光斑变窄时,拟合误差明显增大。受背光衍射效应及孔内壁反射影响,成像光斑边缘呈现显著的弥散现象,单个边缘像素的噪点抖动,会通过最小二乘法放大,导致椭圆参数解算结果出现高频震荡,显著降低了测量数据的信噪比。

如图 1 所示,根据投影几何原理,圆柱孔(孔径 d ,壁厚 h)的上、下底面圆在成像平面上的投影均为椭圆。但在背光成像中,由于工件存在壁厚,倾斜时孔壁会阻挡光路,导致实际成像光斑并非单一椭圆,而是上、下底面投影椭圆的几何交集区域(即具有尖锐顶点的类椭圆交集域),且伴随非中心对称的畸变。因此,本文不再赘述单一平面的椭圆投影推导,而是重点分析该交集区域的几何特征演化规律。

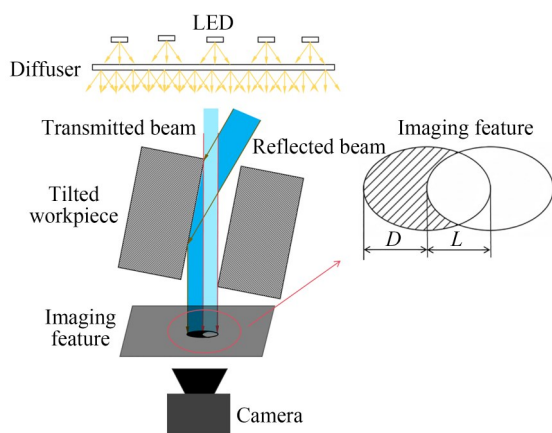


图 1 圆柱孔成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical hole imaging

根据几何投影原理,该交集区域在倾斜方向上的中心偏移量 D 与倾角 θ 满足以下几何投影关系:

$$D = h \times \sin \theta. \quad (1)$$

定义光斑在倾斜方向上的水平有效宽度 $L(\theta)$ 为反映遮挡程度的核心几何特征,其表达为:

$$L(\theta) = d \times \cos \theta - D. \quad (2)$$

为消除拍摄距离波动或镜头缩放因子对绝对尺寸测量的干扰,本文引入无量纲特征参数——归一化光通量特征,即水平有效宽度 L 与投影椭圆长轴。结合式(1)可得位姿映射函数:

$$\eta(\theta) = \frac{L}{d \times \cos \theta} = 1 - \frac{h}{d} \times \tan \theta. \quad (3)$$

在小角度倾斜的工况下,引入弧度制近似条件,上述非线性关系可近似简化为线性模型:

$$\eta(\theta) = 1 - k \times \theta, \quad (4)$$

其中: k 为由工件结构决定的结构常数。该式表明,在有效视场内,归一化光通量特征 $\eta(\theta)$ 与倾

斜角度 θ 呈负相关线性关系。为评估上述线性简化模型的适用范围,根据泰勒级数展开定理 ($\tan \theta \approx \theta + \theta^3/3$) 可推导得出,由该简化引起的姿态角理论估计残差主导项为 $\Delta \theta_{\text{error}} \approx \theta^3/3$ (θ 为弧度值)。当系统处于 10° (约 0.175 rad) 的极限倾角工况时,该简化带来的理论计算偏差仅约为 0.1° 。在本文界定的大倾角工况下,此精度足以满足粗调阶段的导引需求。

基于上述建立的线性映射模型,系统对姿态变化的检测灵敏度 S 可定义为归一化光通量特征对角度的变化比率:

$$|S| = \left| \frac{d\eta}{d\theta} \right|, k = \frac{h}{d}. \quad (5)$$

式(5)表明,检测灵敏度仅取决于工件的长径比,且在有效视场内为常数。长径比越大,内壁遮挡效应越显著,单位角度变化引起的光斑宽度收缩越剧烈,系统的角度分辨能力也越高。以孔径 $d=0.3 \text{ mm}$,壁厚 $h=1.5 \text{ mm}$ 为例,其结构常数 $k=5$,意味着角度每偏转 1° ,光斑归一化光通量特征将锐减约 8.7%,显示出极高的对准灵敏度。当倾斜角度增大至光线被孔壁完全阻断时,系统达到物理检测极限。定义此时的角度为理论截止角 θ_{cut} :

$$\theta_{\text{cut}} = \arctan \frac{d}{h}. \quad (6)$$

对于该规格工件,理论截止角为 11.3° ,该数值界定了视觉系统的最大有效测量量程,超过此范围成像将变为全黑,无法提取有效位姿信息。

2.2 双模态位姿测量策略

为了克服几何拟合的不稳定性,本文提出了一种基于统计学的优化算法——“由粗至精”的位姿测量方法。该策略将位姿调整过程划分为两个阶段,分别采用不同的算法模型,以兼顾检测的稳定性与灵敏度。

在工件倾斜角度较大的初始调整阶段,传统的几何拟合方法受光斑边缘模糊和形状畸变的影响,极易产生拟合误差。为此,引入一种基于灰度积分投影与线性逆解相结合的粗调策略。该算法不再依赖局部边缘梯度,而是利用图像的全局灰度统计信息。将预处理后的二维图像 $I(x, y)$ 沿垂直方向 Y 轴进行累加积分,将二维光

斑压缩为一维能量分布曲线 $P(x)$:

$$P(x) = \sum_{y=0}^{H-1} I(x, y). \quad (7)$$

曲线 $P(x)$ 的形态直接反映了光斑的物理通光能力:峰值高度对应垂直截面的累积光强;水平跨度对应光斑的水平有效宽度,反映几何遮挡的核心特征。

在获得实测有效宽度及理论投影直径后,计算归一化光通量特征 $\eta(\theta)$ 。基于前文建立的线性近似模型,系统执行位姿偏差的快速逆向求解:

$$\theta_{\text{est}} = \frac{1 - \eta}{k} \times \frac{180}{\pi}. \quad (8)$$

运动控制器根据估算角度 θ_{est} 生成反向补偿指令,驱动精密旋转平台快速归位。这种基于物理模型的引导方式实现大跨度姿态偏差的单次闭环补偿,使系统状态快速收敛至精调算法的线性捕获域内,极大地提升了系统的动态响应速度。系统首先进行开环粗调以实现大跨度的快速补偿。然而,受限于线性近似固有的截断误差以及硬件分辨率,在接近零位时存在约 0.3° 的分辨盲区(即当实际物理偏差为 $0.1^\circ \sim 0.3^\circ$ 时,系统读数可能呈现为 0°)。为有效消除这一死区残留误差,系统将精调触发阈值设定为 0.3° 。一旦粗调反馈的观测值进入 0.3° 及以内,系统即判定粗调机构已达到其硬件精度极限,随即自动切换至闭环精调模式。

采用基于“透射光通量”的搜索法进行闭环精调。该方法基于小孔背光成像的物理极值原理:仅当圆柱孔轴线与相机光轴绝对平行时,孔壁对光线的几何遮挡最小,穿过孔洞的总光通量(积分能量)达到全局极大值。任何方向的微小倾斜均会导致该光通量发生衰减。沿用粗调阶段的高鲁棒性算法——灰度积分投影法,将二维图像的全局灰度累加总值(即透射光通量,记为 $\Phi(\theta)$)定义为优化目标函数。此时的控制目标转化为寻找使 $\Phi(\theta)$ 最大化的最佳角度 θ_{opt} :

$$\theta_{\text{opt}} = \operatorname{argmax} \Phi(\theta). \quad (9)$$

系统记录当前位姿下的光通量 Φ_{curr} ,控制运动平台向指定方向旋转一个微小步长 $\Delta\theta$,采集图像并计算新的光通量 Φ_{new} 。若 $\Phi_{\text{new}} > \Phi_{\text{curr}}$:表明调整方向正确,系统更新 $\Phi_{\text{curr}} = \Phi_{\text{new}}$,并保

持该方向继续步进;若 $\Phi_{\text{new}} < \Phi_{\text{curr}}$,表明调整方向错误,系统立即反向旋转,并更新步长进行反向寻优。当系统在当前位置无论向正向还是负向微动,检测到的光通量均不再增加时,判定已逼近物理极值点。此时停止搜索,定位最终位姿。

通过结合粗调阶段大跨度线性逆解的高效性与精调阶段光通量极值搜索的亚像素级高灵敏度,彻底消除了单纯依赖几何宽度的分辨盲区,实现了对圆柱孔位姿从大倾角偏离到精密零位的全量程高精度检测。

3 测量实验与结果

3.1 实验系统搭建

通过视觉测量的方式实现对小孔法向量方向的定位。在进行小孔法向量方向定位时,需要设计基于高精度的五维运动平台,平台需要实现待定位工件的装夹,实现零件的 XYZ 方向的三维运动,绕 Z 轴方向 180° 旋转和绕 X 轴方向 180° 的俯仰运动。为了确保装配孔的定位精度,考虑到装配孔尺寸相对于其分布范围较小,选用的工业相机的视野范围应与装配孔尺寸相匹配。由于相机每次成像的范围无法完全覆盖所有孔位,因此需要通过控制相机对工件表面进行细致扫描。如图 2 所示,工业相机位置固定,工件则固定在五轴运动平台上。

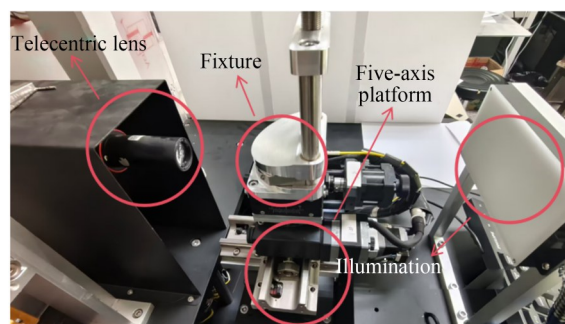


图 2 扫描成像视觉实物图

Fig. 2 Scanned imaging visual physical image

实验系统采用 1 200 万像素海康威视 MV-CE120-10UC 工业相机(像元尺寸为 $1.85 \mu\text{m}$)与 $2.0\times$ 远心光学镜头。所有对比实验均在完全相

同的背光强度、相机曝光时间及运动平台定位精度条件下进行。所有算法的对比测试均在同一台工控上位机上独立运行,该上位机软件采用 C++ 语言在 Microsoft Visual Studio 2022 环境下开发,图像处理基于 OpenCV3.4.8 库实现。工控机处理器为 Intel Core i7-7700(主频 3.6 GHz),内存容量为 16.0 GB,操作系统为 Windows10。

基于上述硬件配置与本文建立的理论模型,为确保测量的严谨性,该系统对所提双模态算法的适用边界进行了明确界定:一方面,受限于物面分辨率(为保证能量统计的稳健性,需满足特征像素跨度 ≥ 30 pixel)与相机有效成像靶面尺寸,系统绝对可测物理孔径介于 0.03 mm 至 3.7 mm 之间;另一方面,依据线性近似残差要求(理论误差 $< 5\%$),本算法还受到工件几何比例的动态约束,即要求结构常数满足 $k > 2.5$ 。因此,本方法的有效测量域被严格限定为 $0.03 \text{ mm} \leq d \leq 3.7 \text{ mm}$ 且 $k > 2.5$ 。

实验设计了 6 组具有不同几何特征与表面质量的不锈钢微孔工件,具体参数如表 1 所示。

3.2 光照扰动下系统的稳定性分析

为应对工业现场常见的光照衰减及杂散光干扰,本文算法在设计时避免了对绝对光强的依赖。在提取光斑水平有效宽度时,算法引入了自适应相对阈值机制,即提取图像局部最大灰度值的 40% 作为截取阈值。当环境光源发生波动或整体衰减时,灰度积分投影曲线的绝对幅值虽随之改变,但该动

表 1 实验工件规格参数

Tab. 1 Specification parameters of experimental workpiece

工件编号	孔径 d/mm	壁厚 h/mm	结构常数 k
A	0.2	2.0	10.0
B	0.3	2.0	6.7
C	0.3	1.5	5.0
D	0.3	1.0	3.3
E(毛刺)	0.2	2.0	10.0
F(毛刺)	0.3	1.5	5.0

态阈值亦会随曲线峰值按同等比例下降。

为进一步验证该机制的抗光扰效果,本文开展了不同照度条件下的对比实验,提取结果如图 3 所示。图 3(a)为系统照度控制在 2 500~2 700 lux 时的标准工况,此时孔内通光量充足,光斑图像对比度高;作为对照,图 3(b)展示了环境光源急剧衰减至 600~800 lux 时的低照度工况。由图可知,此时光斑整体暗淡,投影曲线的绝对幅值跌落至 50 以下。然而,本文设计的自适应机制,截断基准线随着峰值的降低进行了同比例下调。当环境照度降至低水平时,图像的信噪比显著下降,背景暗噪声易对局部极值的搜索造成误导,边缘过渡区的物理清晰度也会受损。因此,为方便清晰观测孔中真实的通光量细节,并确保工业应用场景中系统的高精度与极高稳定性,本文通过实验明确了硬件光照约束,在后续的测量实验中,均维持 2 500~2 700 lux 的光照强度作为标准工况。

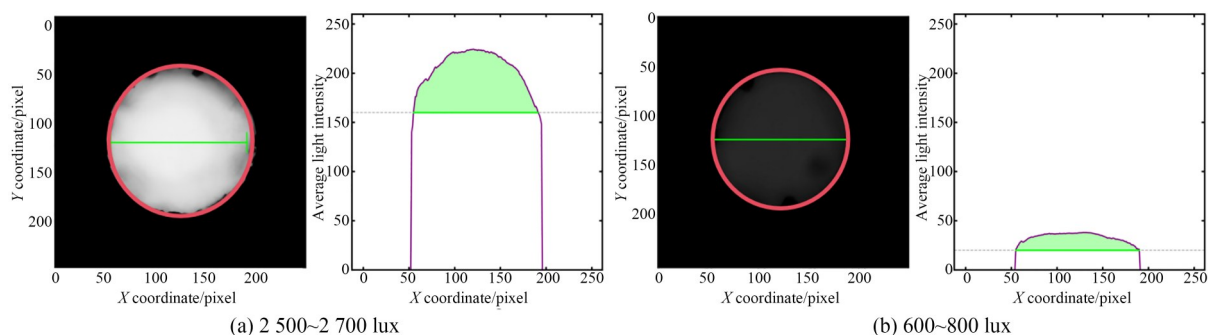


图 3 不同光照强度下灰度积分投影特征的对比

Fig. 3 Comparison of gray-level integral projection features under different illumination intensities

3.3 灰度积分投影姿态映射模型的实验验证

本实验旨在验证本文建立的灰度积分投影特征与孔轴倾斜角度之间线性映射模型的有效

性,重点考察在不同倾角和表面质量(光滑件与含毛刺瑕疵件)工况下,该算法在特征提取稳定性和抗噪方面的表现,如图 4 所示。

首先,选取表面质量良好的标准微孔工件(A组),考察在不同倾斜状态下算法对成像光斑特征的解析能力。在初始时刻,成像光路未受孔壁遮挡,光斑呈现理想圆形,灰度积分投影能够精确提取全通光量对应的水平有效宽度。随后,孔壁几何遮挡效应显现,光斑发生退化,但本文算法通过对

二维光场沿特定轴进行全局能量积分,准确表征了光斑水平有效宽度的物理收缩现象。接着,遮挡效应占据主导,光斑发生显著非中心对称畸变且伴随严重边缘衍射模糊。在此工况下,本算法有效规避了局部边界退化的干扰,特征参数随角度变化依然保持了严格的单调性与良好的线性度。

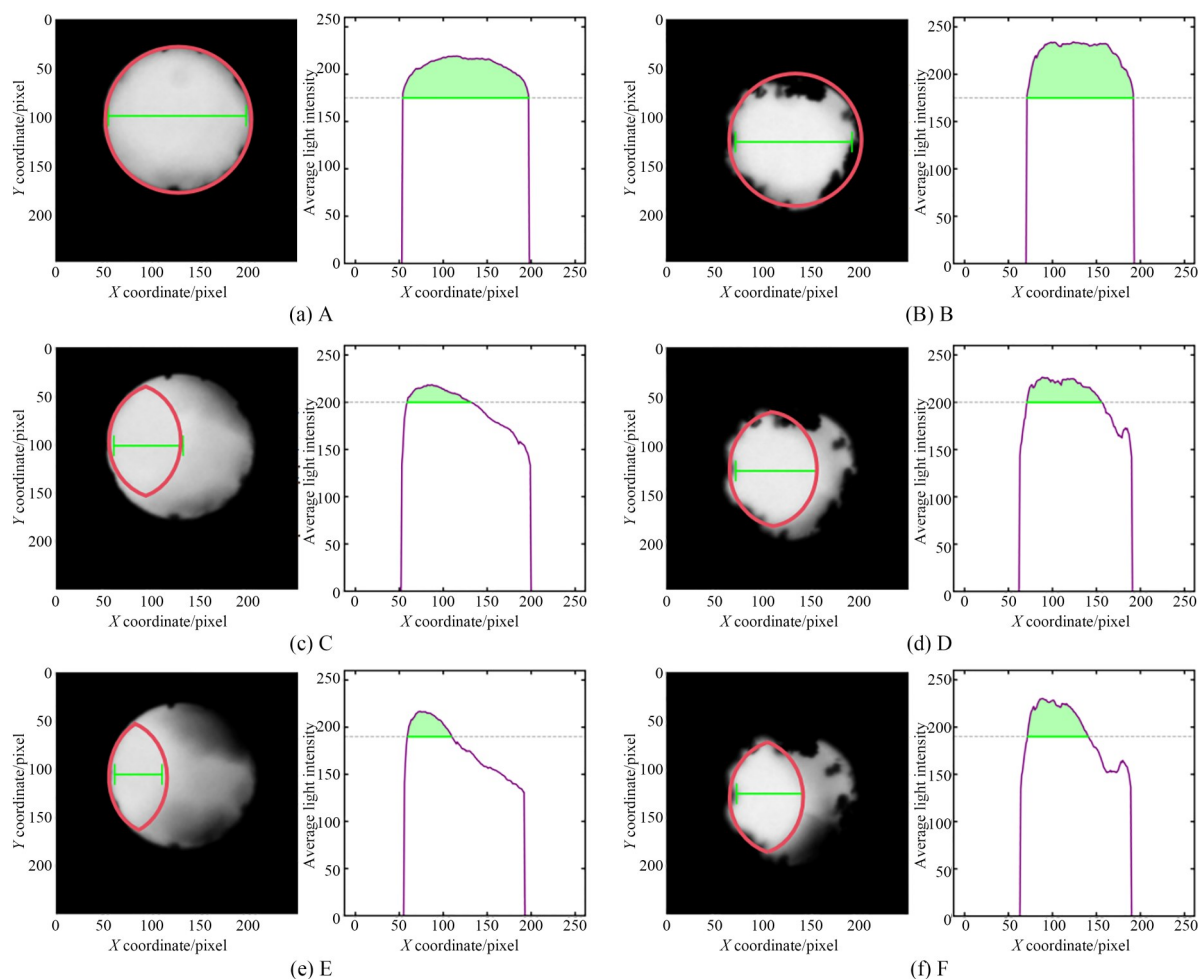


图4 光滑件和毛刺件下的灰度积分投影特征的对比

Fig. 4 Comparison of gray-level integral projection features between smooth and burred workpieces

针对工业现场常见的加工缺陷干扰,引入孔口带有微小毛刺的瑕疵工件(E组)进行对照实验。局部毛刺会导致图像边缘梯度发生突变,产生大量高频噪声点。灰度积分投影本质上是一种基于全局能量统计的降维降噪策略。根据积分变换原理,图像中的局部毛刺仅表现为极少数像素点的灰度奇异值。当执行累积操作时,这些高频噪声被背景能量分布有效平滑与稀释。实验表明,即便在边缘粗糙度极高的工况下,提取

的能量分布曲线依然保持平滑,展现出优异的抗噪稳定性。

基于上述机理分析,进一步扩大样本范围,对6组具有不同几何规格(A~F)的工件进行全量程测试。为保证对比实验的可靠性,本文对不同算法的关键参数进行了统一设定。传统椭圆拟合方法采用标准Canny算子结合最小二乘法进行拟合,其高、低阈值分别设为120与50。亚像素椭圆检测方法在Canny边缘检测的基础

上,采用 Zernike 矩亚像素边缘定位算法,再通过最小二乘法完成椭圆拟合,其边缘检测阈值与传统方法保持一致。如图 5 所示,以决定系数 (R^2) 作为核心评价指标,对比三种算法的线性映射能力。综合分析组 A~D 的测试结果,可以清晰地观察到算法性能随工件长径比变化的演进规律。在大视场、弱遮挡的低长径比工况下(组 C, D),孔内光斑边缘畸变较小、特征保留相对完整。在此相对理想的边界条件下,传统基于边缘的常规椭圆拟合与亚像素椭圆拟合算法均能建立有效的线性映射,本文算法虽保持领

先,但三者整体均展现出良好的可用性。当测量对象拓展至高长径比的精密深孔工况时(组 A, B),孔壁对背光的物理遮挡效应呈现非线性加剧,成为视觉测量的核心难点。实验数据表明,在此复杂工况下,传统依赖局部边缘轮廓的算法极易受到模糊与畸变干扰,导致测量散点出现显著波动;相比之下,本文提出的灰度积分算法凭借对深孔遮挡机理的精确物理表征与全局能量提取特性,有效规避了局部特征退化的影响,在全视场范围内稳定维持了 $R^2 > 0.98$ 的线性跟随。

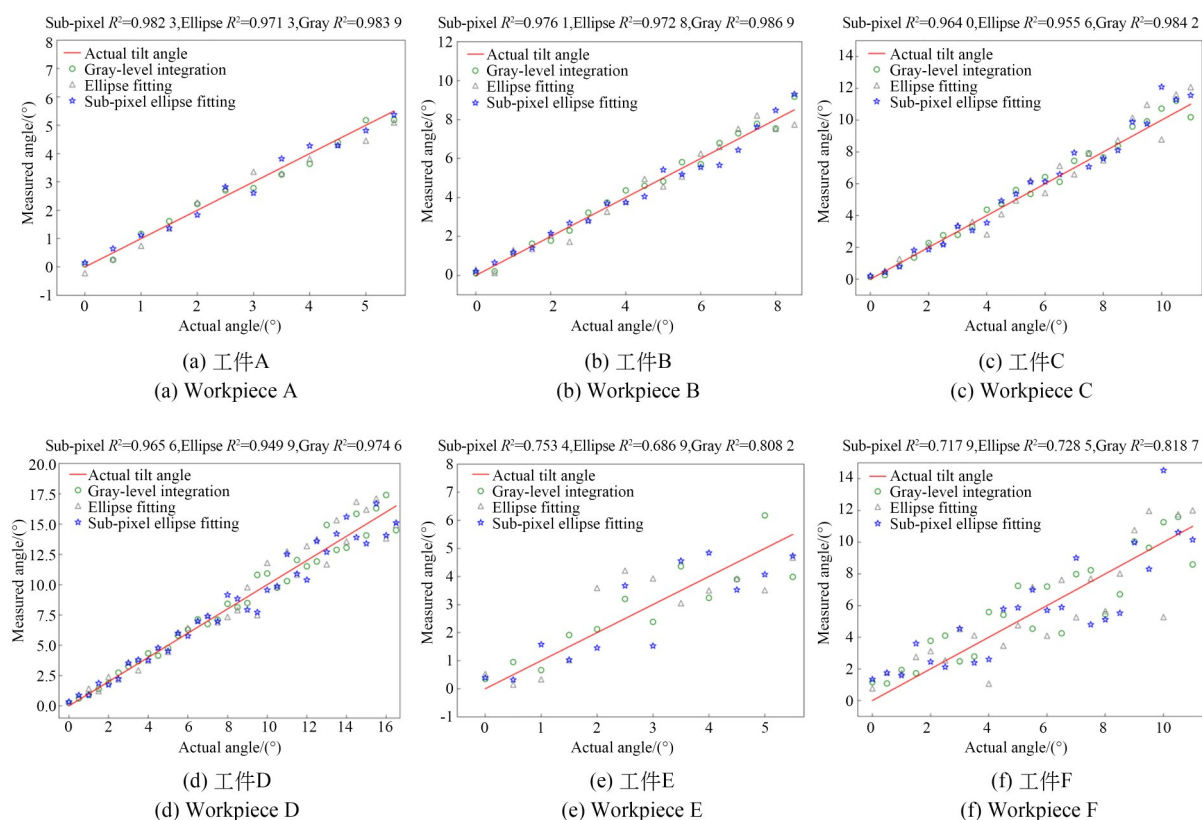


图 5 不同工况下三种算法的特征线性度对比

Fig. 5 Comparison of characteristic linearity of three algorithms under different working conditions

在受到毛刺干扰下,成像条件趋于不稳定。从组 E 与组 F 的散点分布可知,传统椭圆与亚像素拟合算法因边缘提取大量失效而濒临崩溃(如组 E 中亚像素椭圆 R^2 跌至 0.753 4,组 F 中低至 0.717 9)。相比之下,本文算法虽然在极端干扰下也受到物理光学衍射极限的制约(组 E 中 $R^2=0.808 2$,组 F 中 $R^2=0.818 7$),但仍能从退化的

模糊图像中提取出线性趋势,验证了它在极端恶劣工况下的强抗扰动能力。

3.4 双模态测量方法精度分析

在前述粗调阶段,系统依赖灰度积分投影特征与倾斜角度之间的线性模型进行快速引导。然而,该过程面临理论与硬件的限制:一方面,该线性模型基于小角度近似推导而来,且结构常数

k 易受工件加工公差影响,会引入理论截断误差;另一方面,受限于硬件分辨率,系统在接近零位时存在“观测盲区”。因此,单纯依赖开环的线性逆解难以消除这种叠加的系统性残留误差。为了量化“最大有效宽度搜索”这一精调方法对最终装配精度的影响,设计了两种策略对比实验。选取标准工件(A组),设定初始倾斜角度为 2.0° ,分别执行以下两种控制方法,并记录最终的姿态残留误差:方法 I (仅粗调);方法 II (双模态位姿测量方法)。

对上述两种策略分别进行 50 次重复定位实验。为了直观展示调节过程中的精度演变,图 6 记录了单次典型实验中“检测角度误差”随“调节步数”的收敛曲线。阶段 A(粗调响应):在第 1 步,两种方法均利用积分投影特征计算出约 1.7° 的补偿量,驱动转台快速运动。此时,误差从 2.0° 迅速收敛至 0.3° 左右。阶段 B(策略分化):方法 I (虚线)由于缺乏后续反馈,系统停留在粗调结束位置,受限于线性模型的近似误差及电机运动间隙,转台最终停留角度在 $0.25^\circ \sim 0.35^\circ$ 之间波动,无法进一步下降;方法 II (实线)系统检测到粗调完成,自动切换至精调模式,算法以微小步长 0.05° 驱动转台进行爬山搜索,随着光斑有效宽度逐渐逼近最大值,角度误差呈现阶梯状下降,最终在第 4 步左右锁定 0.1° 。

3.5 实际装配应用中的综合性能对比

前述实验分别验证了积分投影特征的线性度(实验一)及双模态测量方法的收敛精度(实验

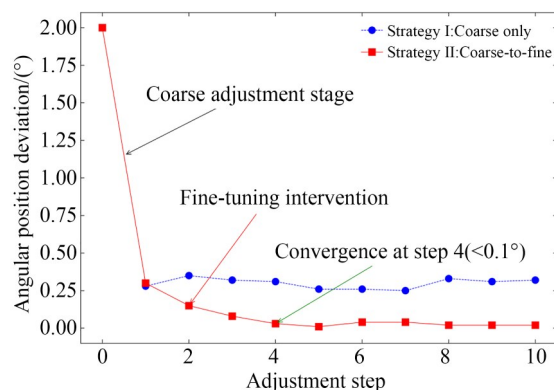
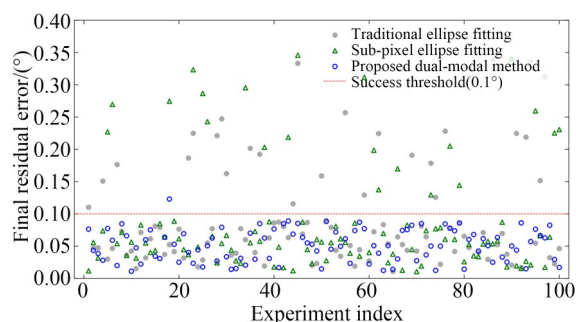
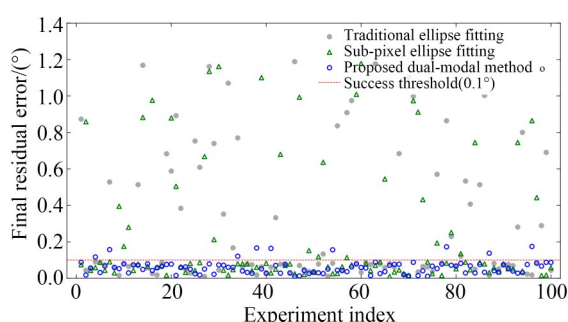


图 6 粗精双模态策略对角度误差的收敛过程对比实验
Fig. 6 Comparative experiment on convergence process of angle error for coarse-fine dual-modal strategy

二)。这里旨在模拟真实的工业自动化孔-轴装配流程,综合评估该方法在成功率及调节效率方面的整体性能。实验设定两种典型的装配场景进行对比测试,每种场景均执行 100 次随机初始角度的自动调平任务。场景 I(理想工况):使用表面光滑的工件(组 A~D),初始倾斜角度在大倾角以下范围内随机生成。场景 II(复杂工况):使用孔口存在微小毛刺的瑕疵工件(组 E~F),初始倾斜角度在大倾角以上范围内随机生成(模拟上料偏差较大的情况)。若系统在 5 次迭代内将孔轴角度误差收敛至 0.1° 以内,记为一次“成功”;否则,记为“失败”。统计 100 次实验的成功率、平均残留误差、标准差(仅统计成功样本)及平均耗时,结果如图 7 所示。



(a) 场景 I (理想工况)
(a) Scenario I (ideal conditions)



(b) 场景 II (理想工况)
(b) Scenario II (ideal conditions)

图 7 不同工况下 100 次装配实验的误差分布

Fig. 7 Error distribution of 100 assembly experiments under different working conditions

表 2 不同工况下的综合性能对比
Tab. 2 Comparison of comprehensive performance under various operating conditions

测试场景	算 法	成功率/%	平均残留误差/(°)	标准差/(°)	平均耗时/ms
场景 I	椭圆拟合	73	0.07	0.03	180
	亚像素椭圆拟合	79	0.06	0.02	285
	灰度积分	99	0.04	0.02	210
场景 II	椭圆拟合	62	0.07	0.02	>400
	亚像素椭圆拟合	67	0.07	0.02	>400
	灰度积分	91	0.05	0.03	245

注:平均残留误差与标准差仅基于成功样本(误差<0.1°)计算。

实验结果表明,本文方法与传统基于边缘的椭圆拟合类算法在不同工况下表现出显著的性能分化,如表 2 所示。在包含毛刺噪声与大倾角的复杂工况(场景 II)中,传统椭圆拟合法呈现出对局部特征干扰的高度敏感性,其 38% 的测试样本因参数漂移而失效,且平均耗时急剧增加至 400 ms,无法满足实际工序要求。相比之下,本文提出的双模态测量方法有效抑制了高频噪声干扰。该方法不仅将检测成功率由 62% 显著提升至 91%,并将平均耗时稳定控制在 245 ms,同时还在成功样本集内维持了 0.05° 的高精度均值与 0.03° 的低标准差,能够更好地满足复杂工业现场对测量稳定性、精度及实时性的综合要求。

4 结 论

针对具有一定厚度的微小圆孔(孔径为 0.03~3.7 mm,结构常数 $k>2.5$)结构在精密装配领域中位姿检测的难题,本文提出一种基于灰度积分投影的双模态厚壁圆孔背光单目精密位姿测量方法。首先,通过引入灰度积分投影算法处理图像,利用其全局能量统计特性,有效克服了局部毛刺等恶劣干扰,提取出稳定的光斑线性特征;在此基础上,构建了“粗调线性逆解结合精调极值搜索”的双模态位姿测量策略。实验表明,在包含大倾角(初始倾角超过理论截止角的 70%)与孔口毛刺干扰的复杂工况下,该

方法提供的精准位姿检测将装配成功率由传统方法的 62% 显著提升至 91% 以上。这充分证明了该方案兼具高精度与强抗干扰性,为精密装配提供了一种低成本且高效的实用解决方案。

在未来的全自动工程应用中,若工件初始位姿极度恶劣(即初始倾角超过理论截止角),系统将面临因光路被孔壁完全阻断而导致的视觉检测盲区。为规避该物理限制,后续工作将考虑构建多级协同的“宏-微”复合对准架构。一方面,可通过引入带有高容差自定心倒角的专用夹具进行机械预定位,在物理层面将工件的初始姿态强制收敛至本算法的有效捕获域内;另一方面,可引入大视场全局相机或激光位移传感器作为辅助感知,为高倍率精密视觉单元提供粗略的位姿先验信息。通过上述系统级的前置干预策略,可进一步拓展本方法在复杂工业装配流水线中的适用边界与实用价值。

作者贡献声明:

廖晓波:研究策划与执行,论文审核与修改;
李 武:研究现状调研,方法提出,算法开发,论文构思与撰写,实验设计及数据整理和分析;
程 磊:实验平台搭建,论文构思与修改,程序编写;
陈苏宇:论文审核与修改。

参考文献:

[1] LI S L, GONG H, LIU J H, *et al.* Advances in robotic peg-in-hole assembly: a comprehensive review

[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 38(1): 196.

[2] TIAN W, DING Y F, DU X D, *et al.* A review of intelligent assembly technology of small electronic

- equipment [J]. *Micromachines*, 2023, 14 (6): 1126.
- [3] AHN K H, NA M, SONG J B. Robotic assembly strategy *via* reinforcement learning based on force and visual information [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 164: 104399.
- [4] 雷金周, 曾令斌, 叶南. 工业机器人单目视觉对准技术研究 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26 (3): 733-741.
LEI J ZH, ZENG L B, YE N. Research on industrial robot alignment technique with monocular vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26 (3): 733-741. (in Chinese)
- [5] 王向军, 曹雨, 周凯. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25 (1): 274-280.
WANG X J, CAO Y, ZHOU K. Methods of monocular pose measurement based on planar objects [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (1): 274-280. (in Chinese)
- [6] 王晓东, 崔世鹏, 徐征, 等. 面向精密微装配的视觉复合定位 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31 (19): 2857-2866.
WANG X D, CUI SH P, XU ZH, *et al.* Visual composite positioning for precision microassembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31 (19): 2857-2866. (in Chinese)
- [7] 耿明超, 赵铁石, 边辉, 等. 基于并联理论的单目视觉位姿估计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (10): 2617-2626.
GENG M CH, ZHAO T SH, BIAN H, *et al.* Pose estimation of monocular vision based on parallel theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (10): 2617-2626. (in Chinese)
- [8] WANG Y J, LIANG J Y, XIAO Y T, *et al.* Placido sub-pixel edge detection algorithm based on enhanced Mexican hat wavelet transform and improved zernike moments [J]. *Journal of Imaging*, 2025, 11 (8): 267.
- [9] QIU S F, WANG Y, LIU Z Y, *et al.* Real-time pupil localization algorithm for blurred images based on double constraints [J]. *Sensors*, 2025, 25 (6): 1749.
- [10] ULRICH M, WIEDEMANN C, STEGER C. Combining scale-space and similarity-based aspect graphs for fast 3D object recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34 (10): 1902-1914.
- [11] ZHOU Z X, JI L, XIONG R, *et al.* A spatial information inference method for programming by demonstration of assembly tasks by integrating visual observation with CAD model [J]. *Assembly Automation*, 2020, 40 (5): 689-701.
- [12] SHIU Y C, AHMAD S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision [C]. *Conference Proceedings, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. November 14-17, 1989, Cambridge, MA, USA. IEEE*, 2002: 576-581.
- [13] HE W S, WU G P, FAN F, *et al.* A robust real-time ellipse detection method for robot applications [J]. *Drones*, 2023, 7 (3): 209.
- [14] HUANG C, JIN W, XU Q, *et al.* Sub-pixel edge detection algorithm based on canny - zernike moment method [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020, 29 (15): 2050238.
- [15] 石照耀, 方一鸣, 王笑一. 齿轮视觉检测仪器与技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59 (14): 1415006.
SHI ZH Y, FANG Y M, WANG X Y. Research progress in gear machine vision inspection instrument and technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59 (14): 1415006. (in Chinese)
- [16] 蒋昭阳. 基于深度学习的非合作航天器单目视觉位姿测量方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
JIANG ZH Y. *Monocular-Based Pose Estimation for Non-Cooperative Space Targets Based on Deep Learning* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] 郭凌, 史金龙, 茅凌波. 基于单目视觉的类别级六自由度位姿估计方法 [J]. *计算机与数字工程*, 2023, 51 (8): 1787-1791, 1810.
GUO L, SHI J L, MAO L B. Method for category-level 6DOF pose estimation based on monocular vision [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2023, 51 (8): 1787-1791, 1810. (in Chinese)
- [18] 王康, 尚丽辉, 付东翔. 基于RGB图像的三维位姿估计方法 [J]. *电子科技*, 2026, 39 (5): 80-87.
WANG K, SHANG L H, FU D X. Research on 3D pose estimation method based on RGB image [J]. *Electronic Science and Technology*, 2026, 39 (5): 80-87. (in Chinese)
- [19] 吴福朝, 胡占义. PnP问题的线性求解算法 [J]. *软件学报*, 2003, 14 (3): 682-688.

- WU F ZH, HU ZH Y. A linear method for the PnP problem[J]. *Journal of Software*, 2003, 14 (3): 682-688. (in Chinese)
- [20] 杜荣华, 张翔, 缪君, 等. 基于 PnP 特征点提取的空间目标单目位姿估计方法[J/OL]. 现代雷达, 2025: 1-12. <https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025180>. (in Chinese)
- DU R H, ZHANG X, MIAO J, *et al.* Monocular pose estimation method for spatial targets based on PnP feature point extraction [J]. *Modern Radar*, 2025: 1-12. <https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025180>. (in Chinese)

作者简介:



廖晓波(1982—),男,湖北天门人,博士,副教授,硕士生导师,2005年、2008年于西南科技大学分别获得学士和硕士学位,2021年于西安交通大学获得博士学位,主要从事扫描探针微纳检测与制造,机器视觉伺服控制技术等方面的研究。E-mail: liaoxiaobo@swust.edu.cn

通讯作者:



陈苏宇(1990—),男,湖北荆门人,助理研究员,2011年于清华大学获得学士学位,2014年于中国空气动力研究与发展中心获得硕士学位,主要从事气动热测试技术及试验应用、热流传感技术等方面的研究。E-mail: chen-sy_hh@163.com