

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615049

基于多分辨率结构光的航空复杂构件测量方法*

夏增龙,樊宇杰,张海钰,鹿星航,梅雪松

(西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘 要:航空发动机制造中,通过先进的测量手段获取精准的航空复杂构件轮廓,保证加工引导的准确性,进而确保工件的加工质量。为提升结构光测量对复杂结构表面的测量性能,提出一种多分辨率结构光测量方法,采用高分辨率主相机与低分辨率从相机组建双目结构光测量系统,并对相位匹配策略进行优化,以提升复杂构件表面的测量质量。首先,通过提高主相机分辨率,保证捕获表面的细致特征,进而基于摄影测量原理,实现了采用不同分辨率相机所组建立体视觉系统的高精度视觉标定;然后,采用了一种极线约束的相位匹配方法,并通过预先计算测量视场内左右视图的视差范围,对极线上搜索相位对应点的搜索范围进行约束,提高立体视图的相位匹配速度,减少了无效计算量;最后,通过计算相位对应点初值的邻域梯度检测相位对应点边缘类型,优化边缘插值,提高边缘测量的完整性。实验表明,所提方法的标定重投影误差小于 0.15 pixels,对航空复杂构件的曲面测量精度可达 5 μm ,边缘特征测量精度可达 12.1 μm ,视差约束下极线搜索相位对应点可提速 88.1%,测量效果优于传统双低分辨率结构光测量方案,接近双高分辨率结构光测量,并解决了不同分辨率相机对立体视觉系统组建的限制。

关键词: 三维重建;多分辨率结构光;立体标定;相位匹配;航空复杂构件

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.10

Aerospace complex component measurement method based on multi-resolution structured light

Xia Zenglong, Fan Yujie, Zhang Haizheng, Lu Xinghang, Mei Xuesong

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In aero-engine manufacturing, accurately acquiring the profiles of complex aviation components using advanced measurement techniques is essential for machining guidance and quality assurance. To improve the measurement performance of structured-light systems on complex structural surfaces, this article proposes a multi-resolution structured-light measurement method. A high-resolution main camera and a low-resolution auxiliary camera are used in a binocular structured-light system, and the phase-matching strategy is optimized to enhance measurement quality. First, the resolution of the main camera is increased to capture fine surface features, and high-precision calibration of the stereo vision system with cameras of different resolutions is achieved based on photogrammetry. Then, an epipolar-constrained phase-matching method is adopted. By precomputing the disparity range between the left and right views within the measurement field, the search range for phase-corresponding points along the epipolar line is constrained, thereby improving matching efficiency and reducing redundant computation. Finally, the edge type of each phase-corresponding point is identified by calculating the neighborhood gradient of its initial value, and edge interpolation is optimized to improve edge-measurement completeness. Experiments show that the calibration reprojection error is less than 0.15 pixels, the surface measurement accuracy for complex aero-engine components reaches 5 μm , and the edge-feature measurement accuracy reaches 12.1 μm . The disparity-constrained epipolar search improves the search speed of phase-corresponding points by 88.1%. Compared with the dual-low-resolution structured-light scheme, the proposed method achieves better measurement performance, approaches the dual-high-resolution system, and overcomes the limitation of constructing stereo vision systems with cameras of different resolutions.

Keywords: 3D reconstruction; multi-resolution structured light; stereo calibration; phase matching; complex aerospace components

收稿日期: 2026-03-20 Received Date: 2026-03-20

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4605900, 2023YFB4605100)、国家自然科学基金(52575531)项目资助

0 引 言

结构光三维测量技术凭借其非接触与全视场的高精度特性,已逐步替代传统机械测量成为航空航天制造质量控制的关键手段。相较于接触式测量,结构光具有测量效率高、完整性好、易集成等优势^[1-2]。近年来的研究表明,结构光三维成像凭借精度与适应性优势,在复杂航空构件加工在线定位与质量分析中具备显著应用前景^[3-5]。

新一代航空飞行器正朝大型化、复杂化方向演进,制造与装配环节中零件几何精度的一致性与可追溯质量控制,直接影响整机结构性能与安全寿命。因此,在制造和装配流程中引入高精度的三维测量手段,成为支撑复杂构件质量控制与精度评估的重要基础^[6-7]。航空发动机涡轮叶片表面曲率变化较大且拓扑关系复杂,使得测量过程中难以平衡全局精度与局部特征的完整性,给叶片三维测量带来挑战。传统接触式坐标测量仪测量速度慢且可能存在探针干涉风险;因此,近年来的研究多致力于非接触光学三维视觉测量技术,以满足叶片检测的高效率和高精度需求^[8-10]。Cheng 等^[11]基于立体视觉与交比不变性原理实现了气膜孔的快速参数化提取。然而,其高度依赖图像边缘质量,在处理倒角过渡或低对比度表面时易失效,且缺乏对叶片全局几何精度的约束。He 等^[12]提出了一种结合条纹投影轮廓术和锥光全息技术的组合测量系统及其高精度标定方法,利用平面标定板在多位置下的几何约束,实现了对叶片高反光及复杂区域的完整测量。但该方法硬件集成复杂且成本较高,而锥光全息的点扫描机制则限制了整体测量效率。

为了兼顾全局精度与局部细节,多传感器测量方法成为近年来的研究热点^[13]。汪千金等^[14]使用不同测量范围和精度的两套结构光系统对航空叶片进行扫描,但这种跨尺度测量产生的点云数据存在分辨率和精度差异以及重叠区域小的问题,而为解决该问题引入的深度学习模型增加了算法复杂度和计算量。Sun 等^[15]结合了单线与三线激光,利用三线激光作为固定参考实现单线扫描的动态自标定,打破了对精密导轨的依赖,解决了现场测量的灵活性问题,但其测量精度受限于激光线条交点的提取质量。Jia 等^[16]将多分辨率思想应用于显微测量,提出了级联结构光网络(cascade structured light network, CasSLNet),通过结合部分优化编码方案与由粗到细的级联代价策略,解决了结构光成像在低反射率及复杂表面测量时精度下降的问题,但计算效率较低。Wang 等^[17]针对手持扫描提出了正弦条纹与随机散斑的复合编码,利用散斑进行粗配准,解决了无标记点下的帧间跟踪问题,但复合编码降低了条纹对比度,影响了暗色

表面的测量精度。Jiang 等^[18]通过构建包含平行单像素成像与高动态范围 N 步条纹投影的复合传感器系统,对航空发动机叶片进行测量,解决了强反光金属表面下大范围光滑区域与精细结构无法兼顾高精度测量的难题,并通过相位匹配实现亚像素级数据对齐,这种逐像素相位匹配技术对跨视场数据对齐提供了新的解决思路。

高质量的测量不仅追求高精度,更需兼顾速度与数据的完整性。为提升匹配效率,当前主流的相位匹配方法通常引入对极几何约束缩小搜索范围,并结合亚像素插值以获取更精细的匹配结果。然而,该类方法仍面临两大挑战:1) 匹配精度与系统标定参数深度耦合,微小的标定残差会导致极线偏差,进而引发匹配错位。2) 立体校正引入了额外的计算开销,单纯依赖硬件层面的并行计算难以根本性突破效率瓶颈,且在物体曲率较大区域,立体校正容易引发插值畸变,从而影响最终的测量精度^[19]。Li 等^[20]利用被测物体的物理体积信息构建了严格的视差约束,实现了在无需辅助相位展开图像的情况下,直接于折叠相位域剔除误匹配,从而显著降低了计算开销。然而,该方法的有效性高度依赖于测量景深,仅在深度变化微小($1 \sim 2$ mm)时能有效收缩搜索区间,而在面对大景深物体测量时,其鲁棒性会显著下降。Feng 等^[21]提出了加速立体视觉系统,通过融合时序不变性立体匹配算法与反卷积软件优化,在极小的硬件开销下解决了现有立体视觉系统在精度与计算效率之间难以兼顾的问题,但其在非关键帧的对应关系传播依赖于运动估计,在遮挡或快速运动等视觉伪影场景下可能导致初始估计不准确。

航空复杂构件通常包含高曲率锐边特征,受限于结构光成像机理,投影光栅在锐边处常伴随投影阴影与相位跳变,导致边缘点云的断裂与残缺,降低了该区域的测量完整性,难以满足航空级零部件的完整性检测要求。针对该问题,Li 等^[22]利用非均匀有理 B 样条曲面和圆弧,结合实际测量曲线趋势和叶片设计几何约束,对缺失的边缘进行补全,实现了更高的补全成功率和精度。然而这种刚性的几何约束在处理非理想工件时,极易引入难以消除的系统性误差。Cao 等^[23]提出了自适应相位分割与校正策略,通过相位掩模保护了叶片边缘的几何真实度,避免了全局滤波造成的边缘塌陷,但修复过程依赖邻域假设,在断裂边缘处可能产生虚假连接。

本文针对航空复杂构件的高精度、高质量测量技术需求,提出了一种基于多分辨率结构光的测量方法。基于摄影测量原理,提出了一种高精度标定方法,实现了多分辨率立体视觉标定;基于视差约束原理,改进了极线搜索相位匹配策略,实现相位立体匹配加速;通过判断匹配边缘邻域的相位梯度,检测边缘类型并进行半边插值,实现复杂构件边缘增强。

1 多分辨率结构光系统配置

在陶瓷型芯修型的边缘检测问题中,对于 200 mm 测量视场,采用 500 万像素相机(2 448×2 048 pixels),重建点间距约为 0.082 mm;采用 2 000 万像素相机(4 504×4 504 pixels),重建点间距约为 0.044 mm。若 2 000 万成像系统缺失一层边缘点,其边缘测量误差可达 40 μm,限制了三维视觉在高精度复杂特征测量中的应用。

为满足航空复杂构件的高精度、高质量测量的严苛需求,本研究采用一种非对称双目系统与主动结构光结合的架构,组建了多分辨率结构光系统,可实现航空复杂构件特征准确、细致的获取,为后续加工提供准确、可靠的数据支撑,且降低了硬件对结构光系统组建的限制。

本研究的硬件平台由两台不同分辨率的摄像机和一台投影仪(DLP Lightcrafter 4500,分辨率 1 280×800 pixels)组成;采用的高分辨率相机传感器的型号为 ME2S-2020-19U3M、分辨率 4 504×4 504 pixels(2 000 万)、像元尺寸 2.74 μm;采用的低分辨率相机传感器的型号为 MER2-507-23GM、分辨率 2 448×2 048 pixels(500 万)、像元尺寸 3.45 μm。结构光系统的测量视场约为 200 mm,测量距离约 600 mm,两相机的基线约 200 mm。相应地,高分辨率相机镜头是 HN-P-3524-25M(焦距为 35 mm)、低分辨率相机镜头是 M1620-MPW2(焦距为 16 mm),投影仪镜头的投射比(throw ratio)为 1.85。如图 1 所示,采用高分辨率相机作主相机、低分辨率相机作从相机,以主视图中的相位信息为参考在右视图中进行相位相关点检索。

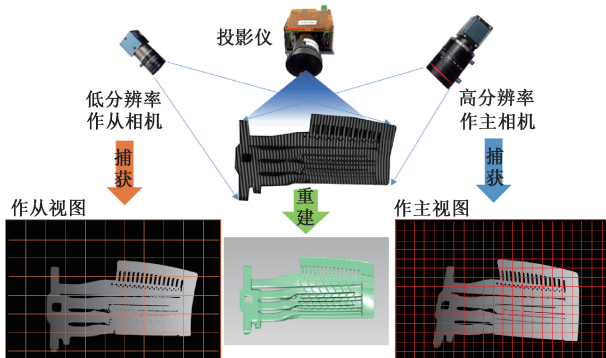


图1 多分辨率结构光系统示意图

Fig.1 Schematic of a multi-resolution structured light system

为获得更好的测量效果,投影仪采用适当离焦^[24]的投影策略:在保持图像可辨识的前提下,通过调整投影镜头适当模糊投影条纹,使正弦条纹成像达到更连续的效果,

以补偿低分辨率投影带来的离散误差,实现较低分辨率的投影仪匹配较高分辨率的相机。

多分辨率结构光系统是在 Windows 10 环境下使用 VS2019 C++ 编程语言开发的。使用的开源库包括 OpenCV4.6.0、Ceres1.12.0 和 Eigen3.3.8。该方法在 Intel Xeon E5-1660 v4 CPU、DDR4 32 GB 的硬件平台上测试运行。

2 多分辨率结构光测量方法

结构光测量的关键技术主要包括视觉标定、编码调制、立体匹配与三维重建,本研究中采用了结构光中精度较高的条纹投影轮廓术,其编码调制采用了外差式多频相移法^[25],旨在获得更完整、更精确的测量结果。本研究中的多分辨率结构光测量的主要技术难点在于实现多分辨率立体成像的高精度标定以及复杂构件表面特征的快速、完整的获取。

2.1 多分辨率视觉系统标定

单个相机成像可以用几何光学中的小孔成像模型近似表达,如图 2 所示,空间物体点的光线经过相机镜头聚焦后成像到像平面上。

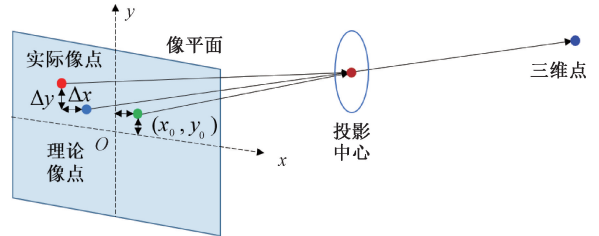


图2 相机成像模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the camera imaging model

然而理想的相机是不存在的,由于各种因素的干扰,使得像点在成像平面上和理论位置存在偏差,主点在像平面上的坐标也与理想位置存在偏差,考虑到这些因素影响,得到的共线方程式:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = \\ -f \frac{a_1(X - X_w) + b_1(Y - Y_w) + c_1(Z - Z_w)}{a_3(X - X_w) + b_3(Y - Y_w) + c_3(Z - Z_w)} \\ y - y_0 + \Delta y = \\ -f \frac{a_2(X - X_w) + b_2(Y - Y_w) + c_2(Z - Z_w)}{a_3(X - X_w) + b_3(Y - Y_w) + c_3(Z - Z_w)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, (X, Y, Z) 是世界系中目标的坐标(单位为 mm); (X_w, Y_w, Z_w) 是投影中心坐标(单位为 mm); (x, y) 是图像点的坐标(单位为 pixel); (x_0, y_0) 是主点坐标(单位为 pixel); f 是焦距(单位为 mm); $(\Delta x, \Delta y)$ 是畸变量(单位为 pixel)。

R 和 T 是摄像机的外方位参数, $R = [(a_1 \ b_1 \ c_1), (a_2 \ b_2 \ c_2), (a_3 \ b_3 \ c_3)]$, 由 3 个角变量 $(\varphi, \omega, \theta)$ 所定义, $T = [X_w, Y_w, Z_w]^T$, 外方位参数描述摄像机在世界坐标系中的位置和朝向。主点坐标、焦距与畸变量是摄像机的内方位参数, 其中镜头畸变采用了常用的三阶径向畸变 (K_1, K_2, K_3) 与二阶切向畸变 (P_1, P_2) , 表达式为:

$$\begin{cases} \Delta x = K_1 \bar{x}^2 + K_2 \bar{x}^4 + K_3 \bar{x}^6 + 2P_1 \bar{x}\bar{y} + P_2(r^2 + 2\bar{x}^2) \\ \Delta y = K_1 \bar{y}^2 + K_2 \bar{y}^4 + K_3 \bar{y}^6 + P_1(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} \end{cases} \quad (2)$$

合适的畸变模型是构建立体视觉系统的基础。为了获得更为精准的三维点并且能够适应本研究的多分辨率视觉系统, 本研究采用了一种基于摄影测量原理的高精度的立体标定策略, 在系统模型构建上保证了三维重建的准确性。基于摄影测量原理的多分辨率立体视觉标定方法, 主要用于两摄像机相对位姿矩阵求解后的非线性优化, 实现高精度摄像机内外方位参数的求解。该方法采用光束平差^[26-27]同时计算摄像机的内部参数和外部参数。

通过泰勒展开将共线方程式(1)线性化, 得到式(3)中所示的观测方程:

$$V = AX_1 + BX_2 - L \quad (3)$$

式中: $X_1 = (\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3, \Delta P_1, \Delta P_2)$ 为内方位参数的修正值; $X_2 = (\Delta X_w, \Delta Y_w, \Delta Z_w, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \theta)$ 为外方位参数的修正值; A 、 B 分别为对应的导数矩阵; L 是观测向量, 即图像点坐标; $V = (v_x, v_y)$ 为重投影残差。

然后通过最小化重投影误差来确定每个摄像机的内、外方位参数。分别完成两个相机的内、外方位参数的计算后, 相机的投影关系可以表示为:

$$p = A[R|T]W \quad (4)$$

其中, W 为世界坐标系中的三维点; p 为世界坐标系中三维点投影在图像上的坐标。

令 $M = A[R|T]$, 则有 $p = MW$, 对于标定板中的三维点向立体系统中两相机图像中的投影:

$$W = M_1^{-1}p_1 = M_2^{-1}p_2 \quad (5)$$

其中, M_1 、 M_2 分别为两台摄像机的投影矩阵; p_1 、 p_2 分别为同一个目标点在左右两相机图像中的图像点坐标。两相机的相对 RT 初值:

$$[R|T]_{12} = [R|T]_1 [R|T]_2^{-1} \quad (6)$$

其中, $[R|T]_{12}$ 为右相机向左相机的变换矩阵。立体视觉代价函数在捆绑调整时形式为:

$$\min((p'_1, p'_2) - (D_1, D_2, [R|T]_{12}, M_1, M_2, W)) \quad (7)$$

其中, p'_1 、 p'_2 为实际图像中标志点检测的坐标; D_2 、 D_2 为两成像单元的畸变系数向量。

再次通过最小化投影误差同时计算立体视觉系统中不同分辨率摄像机的所有参数。

2.2 外差式多频相移

结构光中的相移轮廓术对环境噪声干扰具有一定的抑制作用, 并且得益于时域编码特性, 可以提供更高的分辨率和精度, 在结构光高精度测量场景中应用较为广泛; 为了实现高精度立体重建, 采用了外差式多频相移结构光编码调制。

如图 3 所示, 本研究中通过四步相移法对正弦条纹进行解调, 获得包裹相位值; 进一步采用三频外差进行解包裹, 获得单调一致性相位。

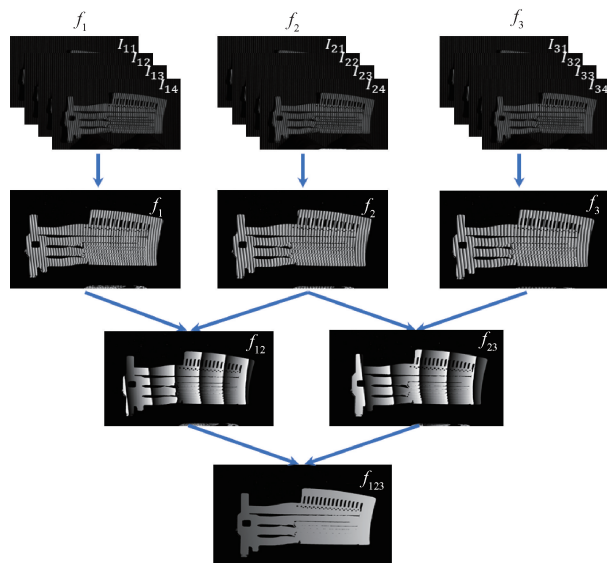


图 3 外差式多频相移解算流程

Fig. 3 Flowchart of the heterodyne multi-frequency phase-shifting algorithm

条纹图案的强度在数学上可以描述为:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{n}{4} \cdot 2\pi \right], \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (8)$$

其中, (x, y) 为像素坐标; $A(x, y)$ 为背景强度; $B(x, y)$ 为调制强度; n 代表第 n 次相移。当前阶段的计算暂不考虑光学设备的非线性相应误差。

包裹相位的解算可以使用移相算法, $\phi_w(x, y)$ 为包裹相位值:

$$\phi_w(x, y) = \arctan \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \quad (9)$$

解算后的相位的值被包裹在 $[-\pi, \pi]$, 直接匹配将导致相位对应点存在多个解; 为了使得图像所有点能够依靠相位来唯一标识, 需要将包裹的相位信息转换成连续的相位信息。

在众多相位展开算法中, 多频外差相位展开是最可靠的方法之一^[28]; 通常使用 3 种频率的相位函数进行外差合成, 使最终的相位周期为 1。以 f_1 、 f_2 合成 f_{12} , 并进

行相位展开为例,相位展开表达式为:

$$\phi_1^{uw}(x, y) = \phi_1^w(x, y) + \text{round}\left(\frac{\phi_{12}^{uw} \frac{f_1}{f_{12}} - \phi_1^w}{2\pi}\right) \cdot 2\pi \quad (10)$$

其中, ϕ_1^{uw} 与 ϕ_1^w 分别为包裹相位和未包裹相位; $\text{round}()$ 是四舍五入取整函数。

2.3 基于视差约束的相位极线搜索加速

常用的相位匹配方法是对相位图进行立体校正,在同一行像素上进行相位检索,结合亚像素差值获得较为准确的相位匹配值。立体校正实质上是利用立体标定结构将像平面通过透视投影变换转换到新像平面,这一过程不可避免地引入图像插值误差^[19],使相位图的准确性受到影响,尤其在复杂曲面测量中,该影响将更为显著。

为了降低不同分辨率图像受图像校正与插值失真的影响,本研究采用在原始相位图上沿极线搜索的方法进行相位匹配。对于含有公共视区的两视图,其公共视区内任一点必然满足极几何约束^[29],即左视图上的一个点必然在右视图的一条线上,利用极线约束条件与相位一致性原理可以实现准确的相位立体匹配。

对于无镜头畸变的相机成像模型,左相机中任意一个像素,理论上都能在右相机找出一条投影直线,其对应点必然在这条线之上,因此相位对应点都应同时满足关系如式(11)所示。

$$\begin{cases} (u_r, v_r, 1) \cdot \mathbf{F} \cdot (u_l, v_l, 1)^T = 0 \\ \text{phase}(x_r, y_r) = \text{phase}(x_l, y_l) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{F}$ 是基本矩阵,表示从左相机成像平面中的像素到右相机成像平面中的极线的映射。

在前期研究中,为了降低极线校正中对相位图失真的影响,采用了一种改进的极线约束相位匹配方法^[10],考虑到镜头存在畸变,采用极线约束首先要对图像去畸变,然后进行极线搜索。对于左图像去畸变后的任一点,均可得到极线表达式:

$$\mathbf{F} \cdot (u_l, v_l, 1)^T = (a, b, c)^T \quad (12)$$

则有:

$$(u_r, v_r, 1) \cdot (a, b, c)^T = 0 \quad (13)$$

通过给定的右图像水平坐标 u_r , 通过计算可以得到竖直坐标 v_r :

$$v_r = (-a \cdot u_r - c) / b \quad (14)$$

以左相位值作搜索基准,对未去畸变右相位图而言,搜索极线不再是一条直线,因此,相位匹配时要对式(14)的解算值加畸变后再进行相位匹配,随后再进行相位插值与去畸变。虽然实验证明,该方法在重建精度及所需条纹图数量上取得了较好的效益,但带来了较大的计算量,因此在前期研究基础之上,引入视差约束,减

少相位搜索中无效值的运算量。

如图4所示,将左相机视图作主视图,右相机视图作从视图,左视图中的任一点都可在右视图中检索。根据式(14)可知,采用极线搜索相位时,将目标相位的搜索量由全图像检索减少到极线中,将大大降低计算量;进一步地,若能获取从视图中目标点 u_r 的范围,将再次提高相位匹配速度。

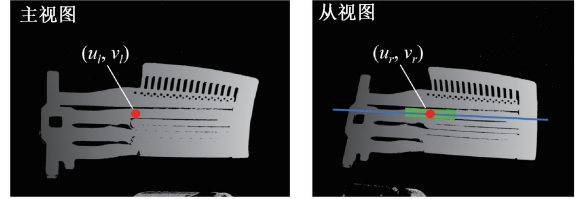


图4 极线搜索示意图

Fig. 4 Schematic diagram of epipolar line search

由式(4)、(5)可知,在有效测量范围内,世界系中三维点可同时投影至立体系统中的两个视图中:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_l [\mathbf{R} | \mathbf{T}]_l \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_r [\mathbf{R} | \mathbf{T}]_r \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

将有效测量范围内的三维点依次投影,可获得左、右视图间对应点的坐标,在极线搜索中竖坐标通过极线解算,因此只需考虑对应点水平方向的最大像素差:

$$\begin{aligned} u_r &\in [(u_l - d_s), (u_l + d_e)], \\ \begin{cases} d_s = \max(\{u_l - u_r\}_i) \\ d_e = \max(\{u_r - u_l\}_i) \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

对于不同分辨率的两个视图,无法直接采用实际像素坐标计算像素差,需要归一化转换,统一尺度:

$$u'_1 = u_1 \cdot \frac{\text{width}_2}{\text{width}_1} \quad (17)$$

由此,可得不同分辨率视觉系统中最大视差约束量为:

$$\Delta u = |u_2 - u'_1| \quad (18)$$

2.4 相位匹配边缘增强

航空复杂构件检测对精度和完整性均有较高的需求,局部特征的准确、完整获取直接影响后续处理的正确性^[30]。双目系统因边缘问题,导致相位跳变,直接进行相位邻域插值将会导致偏差,进而影响相位匹配与三维重建的准确性。

如图5所示,对于左右相机而言,左相机可以更完整地捕获左边缘,右相机可以更完整地捕获右边缘,实际重建点必然是左右相机视图中的公共点。

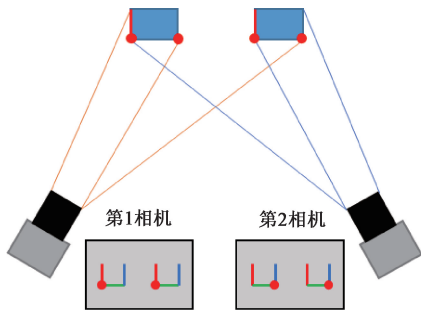


图5 双目系统边缘盲区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the edge blind zone of the binocular system

在左相机作主视图的系统配置中,左视图中的有效相位逐一在右视图中查找对应点,右视图中的对应点在亚像素插值时准确性会受到邻域的影响;在需要准确描述小尺度局部特征的场景下,应充分考虑边缘类型再进行插值,以获得更好的完整性和准确性;如图6所示。

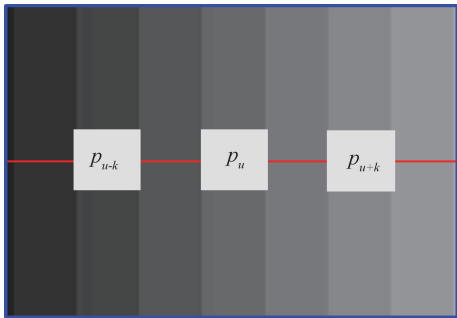


图6 相位梯度计算示意图

Fig. 6 Phase gradient calculation schematic diagram

通过相位邻域信息计算右视图中的对应点的邻域相位梯度,根据梯度值判断对应点插值类型:

$$\begin{cases} G_l = \frac{|p_u - p_{u-k}|}{k} \\ G_r = \frac{|p_u - p_{u+k}|}{k} \end{cases} \quad (19)$$

其中, G_l 与 G_r 分别对应点的左、右侧相位梯度; p_u 为对应点的相位值; k 为相位相邻点的步长。

根据式(20)中的判定准则,利用相位单调性与连续性特征,判断相位点邻域的类型,分别进行不同类型的相位插值,提升边缘特征处相位插值的准确性,进而改善边缘特征的重建效果。

$$\begin{cases} G_l < \varepsilon_g \text{ 且 } G_r < \varepsilon_g, \text{ 两侧插值} \\ G_l > \varepsilon_g \text{ 且 } G_r > \varepsilon_g, \text{ 孤点舍去} \\ G_l < \varepsilon_g \text{ 且 } G_r > \varepsilon_g, \text{ 左侧插值} \\ G_r < \varepsilon_g \text{ 且 } G_l > \varepsilon_g, \text{ 右侧插值} \end{cases} \quad (20)$$

其中, ε_g 为给定相位梯度阈值,可通过测量视场内的有效相位差与所占图像宽度的比值估计。

2.5 三维重建

获得左右视图的相位对应点坐标后,结合相机校准结果,采用最小二乘法进行三维重建。双目系统中左相机和右相机的投影矩阵分别为 $M_L = A_L [T | 0]$ 和 $M_R = A_R [R | T]$, (u_L, v_L) 和 (u_R, v_R) 点对在两个图像中的坐标,所以物体的三维坐标点 W 为:

$$W = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (21)$$

其中:

$$A = \begin{pmatrix} M_{L0,0} & -M_{L2,0}u_L & M_{L0,1} & -M_{L2,1}u_L & M_{L0,2} & -M_{L2,2}u_L \\ M_{L1,0} & -M_{L2,0}v_L & M_{L1,1} & -M_{L2,1}v_L & M_{L1,2} & -M_{L2,2}v_L \\ M_{R0,0} & -M_{R2,0}u_R & M_{R0,1} & -M_{R2,1}u_R & M_{R0,2} & -M_{R2,2}u_R \\ M_{R1,0} & -M_{R2,0}v_R & M_{R1,1} & -M_{R2,1}v_R & M_{R1,2} & -M_{R2,2}v_R \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} u_L M_{L2,3} - M_{L0,3} \\ v_L M_{L2,3} - M_{L1,3} \\ u_R M_{R2,3} - M_{R0,3} \\ v_R M_{R2,3} - M_{R1,3} \end{pmatrix}, \text{ 对所有匹配相位点对进行重构,得}$$

到三维点云。

3 实验验证

3.1 系统标定

视觉成像系统的标定结果对三维测量精度影响较大,通过采用高精度立体标定策略可实现多分辨率立体视觉系统的准确标定。为了验证本文的立体视觉标定方法的有效性和准确性,通过计算标志点重投影误差来评价系统的标定结果;本方法中,主相机作参照基准,则 $[R | T]_{12}$ 为从相机外参矩阵。

本文标定策略获取的内外参数如表1和2所示。

为了评估标定结果,通过计算每一帧状态下标定图像三维点的重投影误差,评估标定精度,实验结果如图7所示。

结果表明,采用本文提出的系统标定方法,主相机的重投影误差最大为 0.15 pixels,平均误差 0.05 pixels;从相机的重投影误差最大为 0.13 pixels,平均误差 0.03 pixels,说明该标定方法较高。需要说明的是,影响标定重投影误差的因素还包括标定板规格、标定姿态、标志点检测以及环境干扰等。

表 1 本文标定策略所得相机内参

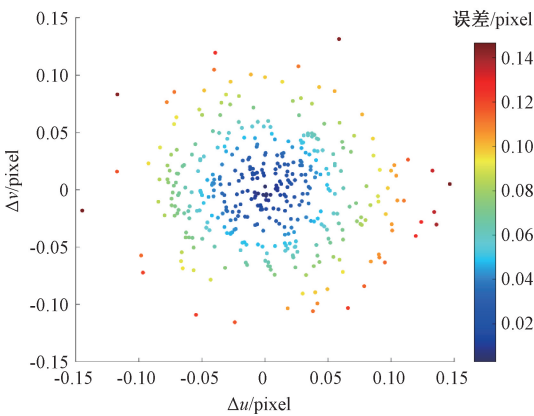
Table 1 Camera intrinsic parameters obtained using the proposed calibration strategy

参数	主相机	从相机
f_x/pixel	13 358.801 9	7 393.455 1
f_y/pixel	13 357.704 9	7 392.312 7
x_0/pixel	-133.635 9	37.819 3
y_0/pixel	-27.933 1	-29.499 7
K_1	2.19×10^{-10}	-2.26×10^{-10}
K_2	1.31×10^{-17}	1.63×10^{-16}
K_3	6.46×10^{-24}	-3.31×10^{-22}
P_1	-2.01×10^{-7}	-3.83×10^{-7}
P_2	-2.97×10^{-7}	-8.64×10^{-8}

表 2 本文标定策略所得相机的相对外参

Table 2 Relative extrinsic parameters obtained using the proposed calibration strategy

相机	R	T
主相机	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
从相机	$\begin{bmatrix} 0.952\ 5 & 0.010\ 5 & -0.304\ 3 \\ -0.007\ 2 & 0.999\ 9 & 0.012\ 1 \\ 0.304\ 4 & -0.009\ 4 & 0.952\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 208.724\ 6 \\ 2.455\ 7 \\ 10.231\ 2 \end{bmatrix}$



(b) 从相机重投影误差
(b) Reprojection error of the secondary camera

图 7 系统标定结果

Fig. 7 System calibration results

3.2 系统测量精度

为了准确评估三维测量的精度,常用的方法是在视场中测量不同位置下的标准球对,根据球径拟合与球心距评估立体视觉的测量精度。采用本文的多分辨率结构光系统测量标准球对,以评估系统测量精度。

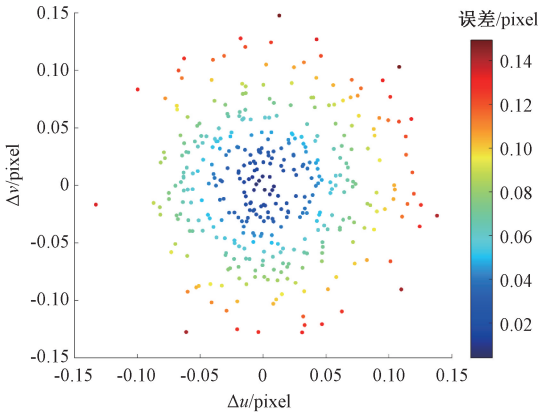
为验证所提出方法在测量视场内的精度,在约 200 mm 测量视场内的不同空间位置,采用本文方法对已知参考值的标准球体进行了三维测量。然后对两个球体的直径与实测值之间的距离进行拟合,并与标准值进行偏差比较,对直径的拟合与中心距离的测量偏差进行评价和分析,验证本文的多分辨率结构光系统的测量精度与有效性。其中标准球对使用坐标测量机测量球体尺寸与球心间距。如图 8 所示,本研究使用的标准球对为标准球的左右球径分别为 25.395 6 和 25.396 4 mm,中心距为 100.042 mm。标准球对多次测量效果如图 9 所示,球对参数拟合结果如图 10 所示。



图 8 标准球对

Fig. 8 Standard ball pairs

采用本文方法在 7 个不同位置测量标准球对,然后将测量的点云在 Geomagic Studio 中进行球拟合,并将直径和中心距离与标准值进行比较。实验结果如图 10 和表 3 所示,标准球对测量的平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 为 4.4 μm,最大绝对误差 (max absolute error,



(a) 主相机重投影误差
(a) Reprojection error of the main camera

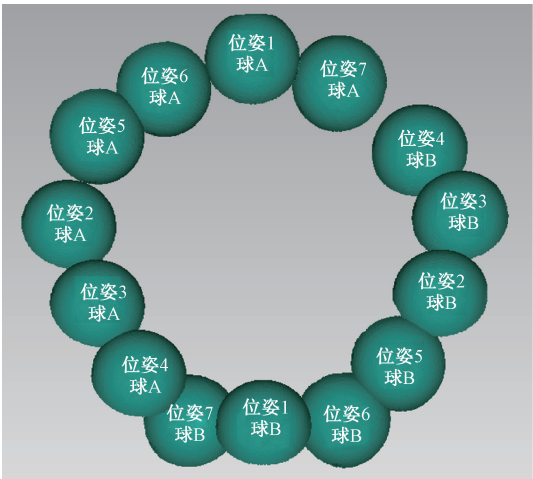


图 9 标准球对测量位姿

Fig. 9 Measurement pose of standard ball pairs

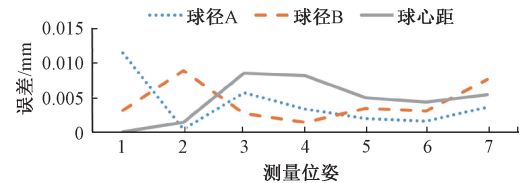


图 10 标准球对测量结果

Fig. 10 Measurement results of standard ball pairs

表 3 测量精度结果

Table 3 Measurement accuracy results

测量项目	方法	数值/ μm
球径 A	MAE	4.1
	MaxAE	11.7
	RMSE	5.4
	STD	4.1
球径 B	MAE	4.4
	MaxAE	9.1
	RMSE	5.1
	STD	2.7
球心距	MAE	4.8
	MaxAE	8.7
	RMSE	5.6
	STD	5.2
平均值	MAE	4.4
	RMSE	5.4
	STD	3.8

MaxAE) 为 $11.7\text{ }\mu\text{m}$, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 $5.4\text{ }\mu\text{m}$, 标准差 (standard deviation, STD) 为 $3.8\text{ }\mu\text{m}$, 证明该方法在当前测量视场精度可达 $12\text{ }\mu\text{m}$, 重建精度较高。

3.3 匹配加速效果对比

本文中采用极线搜索相位相关点方法,需逐点加畸变与去畸变处理,其计算量高于传统立体校正法;因此,本文通过约束左右视图的有效视差范围,降低无效相位的检索,提高匹配速度。为了评价本文的相位匹配加速效果,在测量视场内测量特征复杂的雕像模型,对比极线搜索相位法和本文加速策略下的匹配与重建耗时,实验结果如图 11 和表 4 所示。

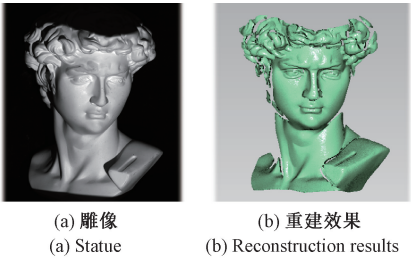


图 11 雕像重建结果

Fig. 11 Reconstruction results of the statue

表 4 采用视差约束的匹配加速效果

Table 4 Matching acceleration using disparity constraints

方法	点云量	耗时/s
极线搜索法	2.96×10^6	10.31
本文方法	2.95×10^6	5.48

在本文实验条件下,结合处理器多线程计算,采用基于视差约束的极线搜索加速方法,相比于直接采用极线搜索相位相关点,计算速度提高达 88.1%。

3.4 匹配边缘增强效果

为了评估本文提出的匹配边缘增强方法的有效性与准确性,对比验证了某叶片型芯的飞边特征和孔洞边缘特征的重建效果。如图 12 所示,通过对比是否采用匹配边缘增强方法对测量型芯飞边特征点云量的影响,验证本文方法有效性。

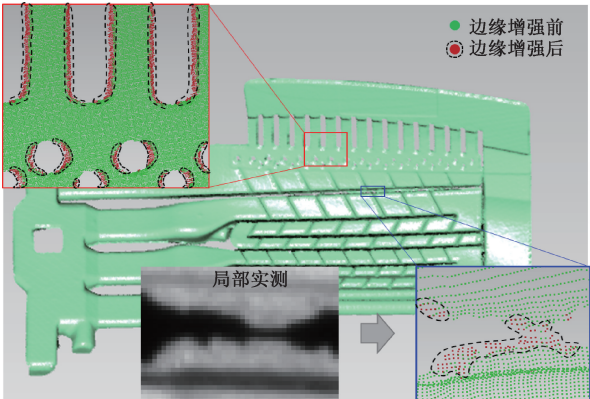


图 12 型芯的边缘特征重建效果

Fig. 12 Reconstruction results of the ceramic core edge features

如图 13 所示,通过对比孔结构边缘拟合直径评估边缘测量的准确性。

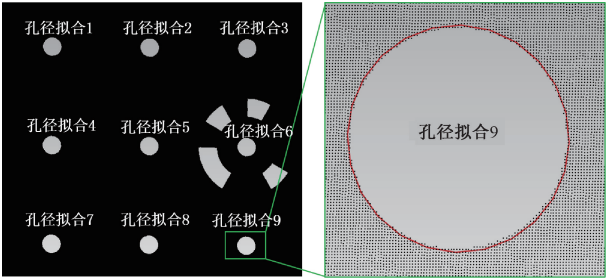


图 13 标志点直径拟合结果

Fig. 13 Results of the diameter fitting of the marked points

实验中的点云显示与参数拟合均是在 Geomagic Studio 中进行。如图 12 所示,局部放大图是边缘增强前后的点云对比结果,虚线框内的点云是采用边缘增强后的补充数据。

从实验结果可知,采用本文的边缘增强后,边缘处点云完整性得到较好的改善,受限于型芯飞边结构复杂的特性与实验条件,暂时无法定量评估。

因此,考虑到型芯边缘轮廓随机、结构复杂,为进一步定量评估在边缘处的准确性,通过重建高精度标志点的轮廓并拟合直径,定量评估边缘特征的重建精度。拟合效果如图 13 所示,在视场中选择 9 个标志点的边缘点云进行特征拟合,并对比双高分辨率和双低分辨率的拟合结果,每个点的直径参考值是 4 mm,实验结果如图 14 所示。

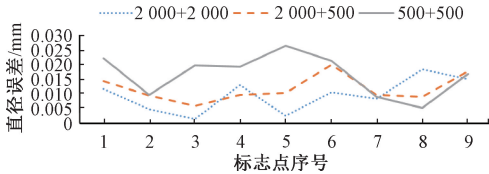


图 14 不同分辨率系统直径拟合误差

Fig. 14 Fitting deviation of system diameters at different resolutions

根据实验结果可知,采用双高分辨率系统,圆孔直径拟合的平均绝对误差为 $9.7\text{ }\mu\text{m}$,最大误差为 $18.6\text{ }\mu\text{m}$;采用双低分辨率系统,平均绝对误差为 $16.9\text{ }\mu\text{m}$,最大误差为 $26.7\text{ }\mu\text{m}$;采用本文方法,圆孔直径拟合的平均绝对误差为 $12.1\text{ }\mu\text{m}$,最大误差为 $20.3\text{ }\mu\text{m}$,接近双高分辨率系统的测量结果,具有较高的精度。因此,采用本文边缘增强方法,可实现更好的边缘测量完整性,并且边缘特征的测量精度较高。其价值在于在保证数据完整性的前提下,仍可获得更好的测量精度。

3.5 应用验证

实际应用中,结构光扫描效果可能受表面拓扑结构、特征尺度的影响,这些因素通过影响相位搜索的准确性,限制结构特征的重建效果。为了验证本文所提方法的适用性,本节通过对具有复杂表面结构的复杂雕像、涡轮叶片陶瓷型芯以及叶片的叶背型面进行三维测量,对比分析其细节特征,由此验证本文方法的适用性。

为了评估本文方法的重建效果,对比了双高分辨率与双低分辨率系统评估本文中多分辨率系统的重建效果。实验中,使用 3 种不同配置的测量系统分别扫描雕像模型与型芯轮廓,双高分辨率与双低分辨率系统分别采用两个 2 000 万像素与两个 500 万像素相机组建测量系统。选取雕像中细节特征较丰富的头发区域与型芯局部飞边特征作为对比对象,分别对比了不同系统配置下测量雕像模型和陶瓷型芯的局部特征重建效果。实验结果如图 15 和 16 所示。

选取图 15(a) 方框中所示的局部特征进行对比,图 15(b)、(c) 和 (d) 分别为采用多分辨率系统、双高分辨率系统和双低分辨率系统的局部重建结果,可以看出采用双高分辨率系统与多分辨率结构光测量均可以获得更细致的局部特征。

实际工程中飞边将作为缺陷被去除,准确的检测对修型至关重要,传统的飞边测量方法会因分辨率有限或边缘相位失真导致重建缺失。选取图 16(a) 中型芯深槽

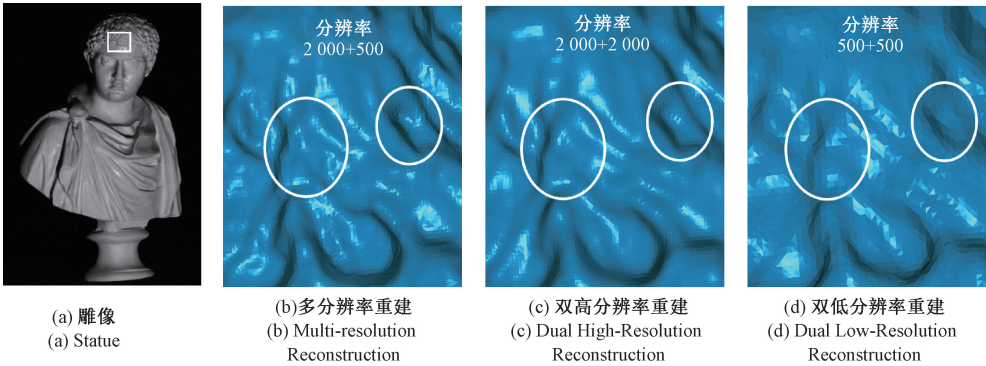


图 15 不同系统的雕像重建结果对比

Fig. 15 Comparison of statue reconstruction results from different systems

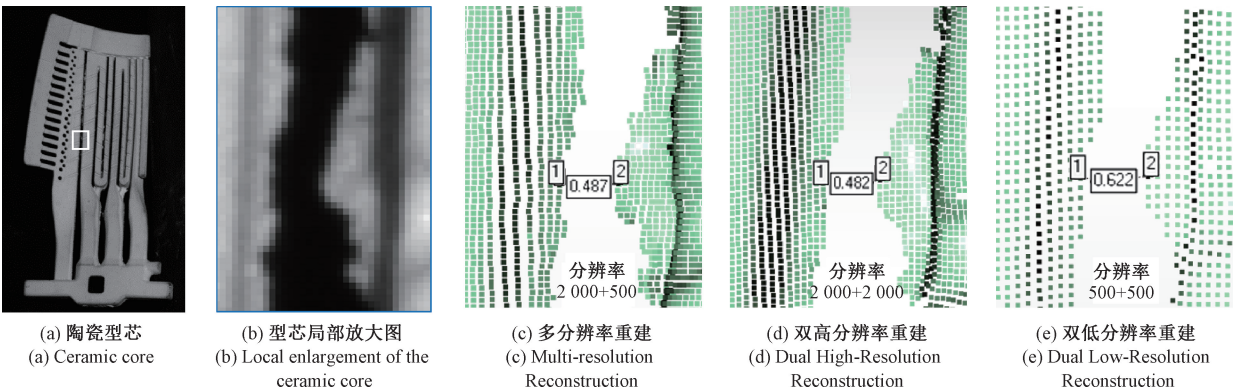


图 16 不同系统的陶瓷型芯重建结果对比

Fig. 16 Comparison of ceramic core reconstruction results from different systems

内的飞边特征进行测量对比;图 16(b)为飞边特征的局部放大图,使用 3 种系统配置分别进行扫描,深槽区域测量效果如图 16(c)、(d)和(e)所示;根据实验可知,相较于双低分辨率系统,双高分辨率与多分辨率系统测量保留了型芯分型面更多的飞边特征,可实现对更窄狭缝特征的有效测量。

由于本研究中陶瓷型芯是一种薄壁结构、硬脆材料,不方便与高精度接触式测量机对比,因此,采用具有复杂曲率的涡轮叶片的叶背型面进行精度评估。采用高精度坐标测量机获取叶片型面轮廓点集,并与本文方法获得的叶片点云在 Geomagic ControlX 中拟合型面偏差,验证型面数据的测量精度。

如表 5 所示,为单次测量叶片型面数据与坐标测量

点集的拟合偏差结果。

表 5 对比坐标测量机测量叶片型面拟合偏差
Table 5 Comparison of blade surface fitting deviations with coordinate measuring machine measurements

实验	RMSE/ μm	标准偏差/ μm	0.01 mm 公差内/%
1	4.7	4.7	96.35
2	5.1	5.1	94.82
3	4.4	4.4	97.26
平均值	4.73	4.73	96.14

如图 17 所示,为型面数据偏差拟合云图。

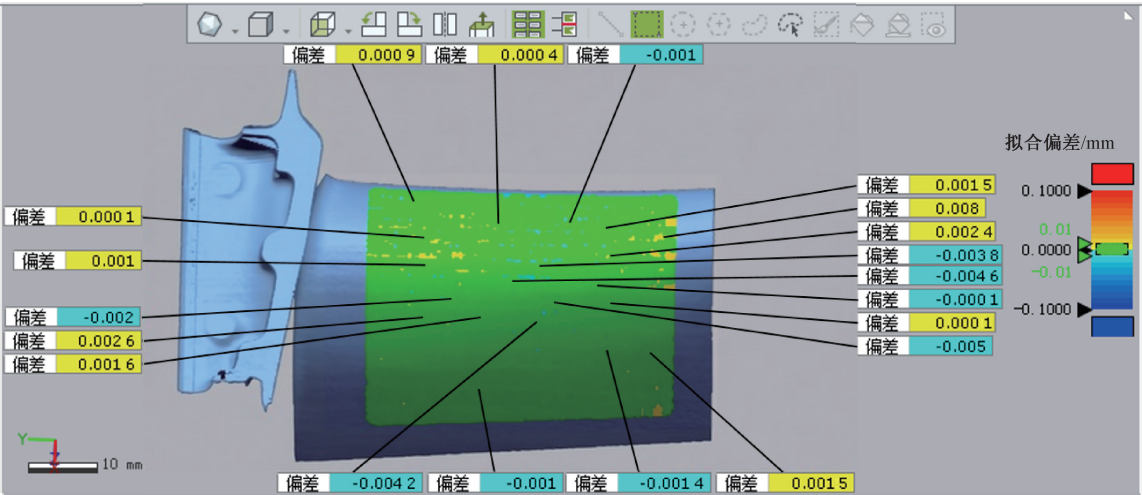


图 17 叶片型面偏差云图

Fig. 17 Blade surface deviation map

共进行了 3 次对比实验,对于涡轮叶片的叶背型面,拟合的 RMSE 的平均值为 $4.73\ \mu\text{m}$,平均标准偏差 $4.73\ \mu\text{m}$,0.01 mm 公差内平均占比 96.14%。因此,本文

方法对涡轮叶片型面的测量精度可达 $5\ \mu\text{m}$,说明本文方法与坐标测量型面具有较高的一致性。

通过上述多个对比实验,验证了多分辨率系统在应

对复杂表面测量中具有一定的适用性和准确性;同时展示了所提出方法的3个优点:1)本文基于摄影测量原理,实现了多分辨率立体视觉系统的高精度校准,重投影误差小于0.15 pixels,标准球对测量误差不大于11.7 μm ;2)本文提出了一种基于视差约束的极线搜索相位匹配加速方法,通过限定测量视场内左右视差范围,使相位匹配与三维重建整体计算速度提高88.1%;3)本文提出了一种匹配边缘增强策略,通过提高主相机的分辨率并判断相位对应点边缘类型,边缘匹配准确性,实现圆孔直径拟合特征误差不大于20.3 μm 。

尽管有这些优势,所提出的方法也存在以下局限性:

1) 研究中为了实现较低分辨率的投影仪匹配较高分辨率的相机采用了硬件调整的离焦投影策略,这将导致投影有效景深减小,限制了测量范围;2) 研究中型芯及其飞边特征是一种结构复杂、薄脆的三维结构,受限于当前的实验条件,未能进行定量评估。

4 结 论

针对航空复杂构件的高质量测量问题,本研究提出了一种基于多分辨率结构光测量方法,通过提高主相机的分辨率,并优化相位匹配的速度和准确性,提高了航空复杂构件的完整性与局部特征的准确性。

在多分辨率视觉系统构建问题中,开发了一种高精度视觉标定方法,基于摄影测量原理,实现了多分辨率立体视觉系统的高精度标定;在极线搜索相位匹配方法问题中,提出了一种基于视差约束的极线搜索匹配加速策略,根据预定测量范围内的三维点投影至两个像平面内,计算相位视差有效范围;针对航空构件结构复杂、测量要求高的需求,提出了一种匹配边缘增强策略,通过计算匹配边缘邻域的相位梯度,判断对应点边缘类型并进行半边缘插值。通过多个对比实验,验证了本文方法在多分辨率重建中的准确性与有效性。

本文方法在保证测量精度的前提下,降低了双目结构光系统的硬件限制,提升了双目结构光系统的重建质量以及系统组建灵活性,同时提高了采用极线搜索法查找相位对应点的速度,改善了复杂构件边缘特征的重建准确性,拓展了结构光系统在复杂场景下的应用,为后续航空复杂构件视觉引导加工研究提供可靠数据支撑。

参考文献

- [1] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 9-27.
- GUO W B, ZHANG Q C, WU ZH J. Real-time three-

dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: A review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 9-27.

- [2] 吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 11-41.
- WU ZH J, ZHANG Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: A Review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 11-41.
- [3] JUAREZ-SALAZAR R, ESQUIVEL-HERNANDEZ S, DIAZ-RAMIREZ V H. Optical fringe projection: A straightforward approach to 3D metrology [J]. Metrology, 2025, 5(3): 47.
- [4] BARDIS K, AVDELIDIS N P, IBARRA-CASTANEDO C, et al. Advanced diagnostics of aircraft structures using automated non-invasive imaging techniques: A comprehensive review [J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3584.
- [5] ZHANG G F, LIU Y, YAO Q, et al. Multi-view fringe projection profilometry for surfaces with intricate structures and high dynamic range [J]. Optics Express, 2024, 32(11): 19146-19162.
- [6] 张开富, 史越, 骆彬, 等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 52-69.
- ZHANG K F, SHI Y, LUO B, et al. Research progress of high precision measurement technology in large aircraft assembly [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 52-69.
- [7] 李茂月, 蔡东辰, 赵伟翔, 等. 航空叶片形貌高精度结构光扫描视点规划[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(4): 802-815.
- LI M Y, CAI D CH, ZHAO W X, et al. High precision structural light scanning viewpoint planning for aircraft blade morphology [J]. Chinese Optics, 2023, 16(4): 802-815.
- [8] CHEN Z, JU Y H, SUN CH ZH, et al. 3D shape measurement of aeroengine blade based on fringe projection profilometer improved by multi-layer concentric ring calibration [J]. Sensors, 2024, 24(9): 2810.
- [9] LI M Y, SHA B Y, LIU Z L, et al. Automatic precision matching method of optical measurement data for blade profile quality detection [J]. Precision Engineering,

- 2025; 94: 204-217.
- [10] XIA Z L, FAN ZH J, MEI X S, et al. Accurate reconstruction of turbine blade point cloud and multiple point cloud registration based on structured light[J]. Measurement, 2025, 242: 115897.
- [11] CHENG Y Q, LI W L, JIANG CH, et al. A novel cooling hole inspection method for turbine blade using 3D reconstruction of stereo vision[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 33(1): 015018.
- [12] HE W T, ZHONG K, LI ZH W, et al. Accurate calibration method for blade 3D shape metrology system integrated by fringe projection profilometry and conoscopic holography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 253-261.
- [13] KONG L B, PENG X, CHEN Y, et al. Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: A literature review[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 022001.
- [14] 汪千金, 崔海华, 张益华, 等. 面向光学测量跨源点云的多尺度采样配准方法[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 139-148.
- WANG Q J, CUI H H, ZHANG Y H, et al. Multi-scale sampling registration method for optical measurement of cross-source point clouds[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 139-148.
- [15] SUN Q CH, REN Z M, ZHU J L, et al. A three-dimensional structured light vision system by using a combination of single-line and three-line lasers[J]. Sensors, 2022, 23(1): 13.
- [16] JIA ZH X, YU J Y, SUN H, et al. Learning deep feature correlation for microscopic structured light imaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(9): 7266-7275.
- [17] WANG M, YANG Y, CHEN H L, et al. Optimizing handheld 3D scanning based on fringe projection profilometry: Real-time registration and performance enhancement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 5037917.
- [18] JIANG H ZH, WANG Q, ZHAO H J, et al. High-precision composite 3D shape measurement of aeroengine blade based on parallel single-pixel imaging and high-dynamic range N-step fringe projection profilometry[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110085.
- [19] 郑好, 段发阶, 白子博, 等. 一种基于重投影和 3D-DIC 的曲面变形测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 268-285.
- ZHENG H, DUAN F J, BAI Z B, et al. A surface deformation measurement method based on reprojection and 3D-DIC[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 268-285.
- [20] LI ZH W, LIU X J, WEN SH F, et al. In situ 3D monitoring of geometric signatures in the powder-bed-fusion additive manufacturing process via vision sensing methods[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1180.
- [21] FENG Y, WHATMOUGH P, ZHU Y H. Asv: Accelerated stereo vision system[C]. Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2019: 643-656.
- [22] LI Z J, WANG ZH, HUANG J H, et al. Blade profile extraction and edge completion method based on structured light measurement point cloud[J]. Precision Engineering, 2024, 86: 225-238.
- [23] CAO H Y, QIAO D Y, YANG D. Phase correction strategy based on structured light fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2024, 32(3): 4137-4157.
- [24] LI B W, WANG Y J, DAI J F, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 236-246.
- [25] LOU X P, LYU N G, SUN P, et al. Heterodyne multi-frequency method for 3D profile measurement[C]. Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering, 2011, 7997: 489-495.
- [26] PAI W Y, LIANG J, ZHANG M K, et al. An advanced multi-camera system for automatic, high-precision and efficient tube profile measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 106890.
- [27] HU H, WEI B, MEI SH, et al. A two-step calibration method for vision measurement with large field of view[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5006910.
- [28] 刘勇, 张国锋, 胡鹏宇, 等. 多视角沙姆成像的高精度结构光三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 33-40.

LIU Y, ZHANG G F, HU P Y, et al. High-precision structured-light 3D measurement method based on multi-view Scheimpflug imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3):33-40.

- [29] ZHANG ZH Y. On the epipolar geometry between two images with lens distortion [C]. Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996, 1: 407-411.
- [30] HUANG W W, MEI X S, JIANG G D. et al. An on-machine tool path generation method based on hybrid and local point cloud registration for laser deburring of ceramic cores [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022; 33(8): 2223-2238.

作者简介



夏增龙,2021 年于新疆大学获得学士学位,现为西安交通大学博士研究生,主要研究方向为视觉测量与激光精密制造。

E-mail:zlxiaemail@ 163. com

Xia Zenglong received his B. Sc. degree from Xinjiang University in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include three-dimensional vision measurement and precision laser manu-facturing.



樊宇杰,2016 年于西北工业大学获得学士学位,2020 年于锡拉丘兹大学获硕士学位,现为西安交通大学博士研究生,主要研究方向为视觉引导激光加工。

E-mail:micjay@ stu. xjtu. edu. cn

Fan Yujie received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2016, and his M. Sc. degree from Syracuse University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include vision-guided laser processing.



梅雪松(通信作者),1982 年于天津轻工业学院获学士学位,1985 年于武汉工学院获硕士学位,1991 年于西安交通大学获博士学位。现为西安交通大学教授,陕西省智能机器人重点实验室主任。主要研究方向为智能制造与精密激光加工理论与方法。

E-mail:xsmei@ xjtu. edu. cn

Mei Xuesong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin Institute of Light Industry in 1982, his M. Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 1985, and his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1991. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University and director of the Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots. His main research interests include theories and methods of intelligent manufacturing and precision laser processing.