

文章编号 1004-924X(2025)09-1396-11

基于改进 ICP 算法的大尺寸焊接构件 三维形貌测量

蔡引娣*, 王宇轩, 牛超, 朱祥龙, 康仁科

(大连理工大学 机械工程学院 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116081)

摘要: 为了实现大尺寸构件三维形貌的高精度、高效率测量, 提出基于改进迭代最近点算法的大尺寸构件三维形貌测量方法。针对双目结构光系统在实际测量中易受系统误差影响、相位展开不准确等问题, 提出互补正反格雷相移结构光编码方法。该方法采用鲁棒像素分类法对正反格雷码进行二值化, 采用改进的高斯滤波算法对相移码图像进行滤波处理。为了提高点云拼接算法的精度, 提出改进迭代最近点云拼接算法。该算法对相邻视角公共区域点云进行提取和法向量筛选, 避免非公共区域点云对拼接效果的影响, 并将列文伯格优化算法引入迭代最近点云拼接算法中, 解决大尺寸构件三维形貌测量点云拼接算法对点云初始位置敏感、容易受到噪声干扰等问题。改进迭代最近点云拼接算法相较传统迭代最近点云拼接算法精度提升 55%, 拼接效率提升数倍, 迭代次数减少 61%。实验结果表明, 在被测物体距离相机镜头测量距离 700 mm, 相机夹角为 65° 的条件下, 大尺寸构件三维形貌测量系统的长度测量精度优于 450 $\mu\text{m}/\text{m}$, 相邻视角点云拼接计算用时约 25 ms, 满足大尺寸焊接构件三维形貌测量的精度和效率要求。

关键词: 三维形貌测量; 双目结构光; 鲁棒像素分类法; 改进迭代最近点; 正反互补格雷码

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253309.1396 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253309.1396

Improved ICP algorithm-based 3D morphology measurement of large-size welded components

CAI Yindi*, WANG Yuxuan, NIU Chao, ZHU Xianglong, KANG Renke

(National Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing,
College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)

* Corresponding author, E-mail: caiyd@dlut.edu.cn

Abstract: A three-dimensional topography measurement method for large-scale components is proposed to achieve high-precision and high-efficiency measurement. To address the issues of low accuracy and poor stability inherent in binocular structured light measurements, a complementary positive and negative Gray phase-shifted structured light coding technique is developed. This approach mitigates the susceptibility of binocular structured light systems to systematic errors and inaccurate phase unwrapping during actual measurement. The method employs a robust pixel classification technique for binarizing the positive and nega-

收稿日期: 2025-02-17; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB4600900); 国家自然科学基金联合基金集成项目 (No. U23B6005); 中央高校基本科研业务费 (No. DUT24MS005); 高性能精密制造全国重点实验室开放课题资助 (No. ZY202408)

tive Gray codes, alongside an improved Gaussian filtering algorithm applied to the phase-shift code images. To improve the measurement accuracy of existing point cloud, an improved iterative nearest point cloud stitching algorithm is introduced. This algorithm extracts and filters point clouds from overlapping regions of adjacent perspectives to eliminate interference from non-overlapping areas and integrates the Levenberg-Marquardt optimization algorithm into the iterative process to enhance robustness against initial position sensitivity and noise interference. Compared to traditional iterative nearest point stitching methods, the proposed algorithm increases accuracy by 55%, accelerates stitching efficiency by several times, and reduces iteration count by 61%. Experimental results demonstrate that the developed system achieves length measurement accuracy better than 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ at a measurement distance of 700 mm and a camera angle of 65° , with point cloud stitching computation times of approximately 25 ms between adjacent views. These findings confirm that the method satisfies the accuracy and efficiency requirements for three-dimensional topography measurement of large-scale welded components.

Key words: three-dimensional morphorogy measurement; binocular structured light; robust pixel classification; improved ICP algorithm; positive-negative gray phase shift

1 引言

焊接工艺作为一种通过加热或加压、使用填充材料使被焊接构件达到原子间结合的机械加工方式,广泛应用于航空航天、汽车制造和桥梁建设等大尺寸机械制造领域^[1]。然而,在焊接过程中,快速的加热和冷却会使被焊接构件产生膨胀和收缩,进而引发不同形式的变形。焊接变形会影响焊接构件的尺寸精度和承载能力。因此,利用快速、精确的三维测量与重建技术获取大尺寸焊接构件的三维形貌数据,对准确计算焊接变形量极为关键。精确的三维形貌测量,不仅为焊接质量评估、焊接缺陷发现提供关键依据,还为后续工艺优化与变形校正提供有力的数据支撑^[2]。

常用的三维形貌测量方法有三坐标测量仪测量法^[3]、激光三角测量法^[4]以及飞行时间测量法^[5]等。这些方法在大尺寸测量场景下存在测量范围受限、测量效率低下以及测量精度不高等问题。近年来,基于结构光测量法的三维形貌测量方法发展迅速,已成为大尺寸测量场景下最常用的测量方法之一。Wang^[6]等提出了一种针对大型复杂曲面的自动化移动机器人轮廓测量方法,对大型风电叶片测试区域的平均误差为0.333 mm。武琼^[7]等针对大型航天器舱体提出了一种基于激光器跟踪仪远距离全局控制与结构光扫描仪近距离表面扫描的组合式测量方法,在300 mm的测量范围内系统测量精度优于

35 μm 。Hu^[8]等提出了一种基于散斑辅助条纹投影和全局标记定位的大规模三维形貌测量方法,其测量误差低于710 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。刘洋^[9]等针对大尺寸低纹理光滑曲面,提出了一种基于纹理信息的图像边缘保留滤波方法并应用于匹配代价聚合中,对大尺寸低纹理光滑曲面三维形貌测量误差低于1 mm。吴军^[10]等针对飞机蒙皮提出了一种基于后方定位的三维形貌测量方法,对飞机蒙皮进行非接触式三维测量,平均拼接精度为0.995 mm。

上述基于结构光的大尺寸构件三维形貌测量方法均采用单一编码模式进行投影,易于实现,实时性较好。但是在实际焊接工况下,焊接构件表面具有复杂的曲面、棱角和空洞等几何形状,可能会产生阴影、遮挡和光散射现象,使得单一编码模式下部分区域结构光的解码精度受到影响。对于多视角点云拼接,目前应用最广泛的是迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法。Zhang^[11]等提出了一种能够快速收敛的改进ICP点云拼接方法,将经典点到点ICP算法视为一种极大化-极小化算法,引入基于韦尔斯函数的鲁棒误差度量方法,并通过安德森加速算法加快其收敛速度。Marani^[12]等提出了一种删除掩码来提升ICP算法的精度,通过该方法自动找到模糊空间区域,降低ICP及其变体算法误差。万舒彪等针对低重叠率多视角三维点云ICP算法无法收敛的问题,提出了一种基于最近点点云提取的改进ICP点云拼接方

法,提高点云的精拼接精度。不过,上述ICP算法的点云拼接效果仍然很大程度上依赖源点云和目标点云初始位置,而且可能导致点云拼接结果陷入局部最优解而非全局最优,拼接精度和效率有待提升。

针对上述问题,本文提出了一种基于改进ICP算法的大尺寸构件三维形貌测量方法。该方法采用正反互补格雷相移结构光编码方法,提高了单角度三维形貌测量的精度和稳定性;通过改进ICP点云精拼接算法,利用被焊接构件结构信息对相邻视角的目标点云和源点云进行匹配,降低点云拼接性能对点云初始位置的敏感程度,避免环境和系统噪声对拼接精度的影响,提升了点云拼接的效率和精度。

2 原 理

图1为双目结构光三维测量系统示意图,系统由双目相机和投影仪组成。投影仪向被测物体投射格雷码和相移码,投射条纹经被测物体表面调制后形成反射条纹被双目相机采集,通过双目图像条纹分析得到被测物体表面的三维点云数据。

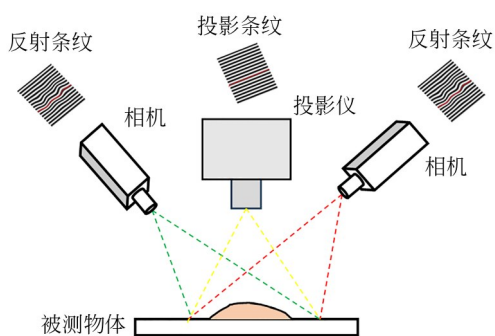


图1 双目结构光三维测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of binocular structured light 3D measurement system

为了实现大尺寸焊接构件的高精度三维形貌测量,本文设计实现了基于改进ICP算法的大尺寸构件三维形貌测量流程,如图2所示。在测量模块采集各角度结构光的变形条纹图像后,通过变形条纹图像进行单角度三维重建。首先,采用改进高斯滤波方法去除相移码条纹图像中的随机噪声,以提高图像质量。接着,

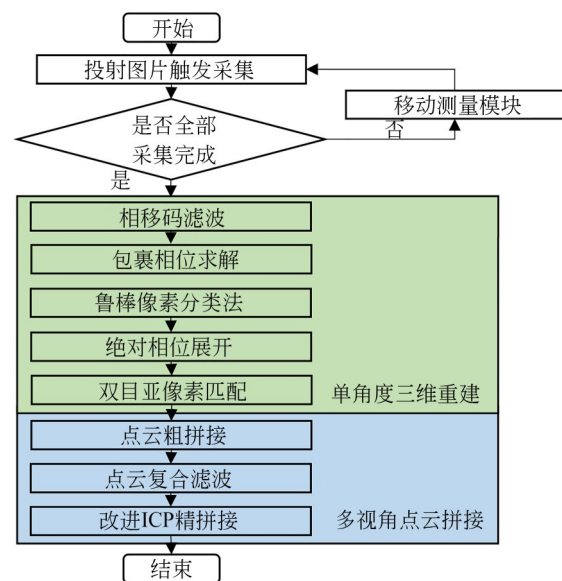


图2 大尺寸构件三维重建的总体流程

Fig.2 Overall process of 3D reconstruction of large-scale components

利用包裹相位求解公式对滤波后的相移条纹图像进行包裹相位求解。同时,通过鲁棒像素分类法对正反格雷码进行二值化以保证稳定、准确的格雷码解码结果。在此基础上,使用格雷码二值化解码结果对包裹相位进行相位展开得到单调递增的绝对相位图像。随后,针对左右相机的绝对相位图像,以相位值为基元通过亚像素双目匹配方法和双目重建原理得到单角度大尺寸构件的三维点云信息。在获得各单角度的三维点云信息后,通过多视角点云拼接方法进行点云数据对齐。首先,采用奇异值分解算法,通过棋盘格拼接板的角点三维坐标计算相邻视角点云的刚体变换矩阵,使相邻视角的点云数据基本对齐,实现点云粗拼接。随后,对点云数据进行点云滤波操作,去除无关点云。最后,采用改进ICP精拼接算法对相邻视角点云提取公共区域,计算对应点的法向量夹角,并与给定阈值进行比较来筛选不同视角的点云数据,对筛选后点云数据根据对应点位置关系迭代计算刚体变换矩阵,保证相邻视角的点云数据严格对齐,从而实现点云精拼接,得到完整、准确的被测物体表面的点云信息。最后,通过模型拟合计算大尺寸构件的三维点云尺寸参数。

3 单角度三维重建

3.1 绝对相位展开

针对基于格雷相移法的结构光编码技术存在解码定位不准确、结果不稳定等问题,本

文提出了互补正反格雷相移结构光编码方法,提高了绝对相位的展开精度和稳定性。结构光编码流程如图3所示,包括鲁棒像素法二值化、求解包裹相位以及绝对相位展开3个步骤。

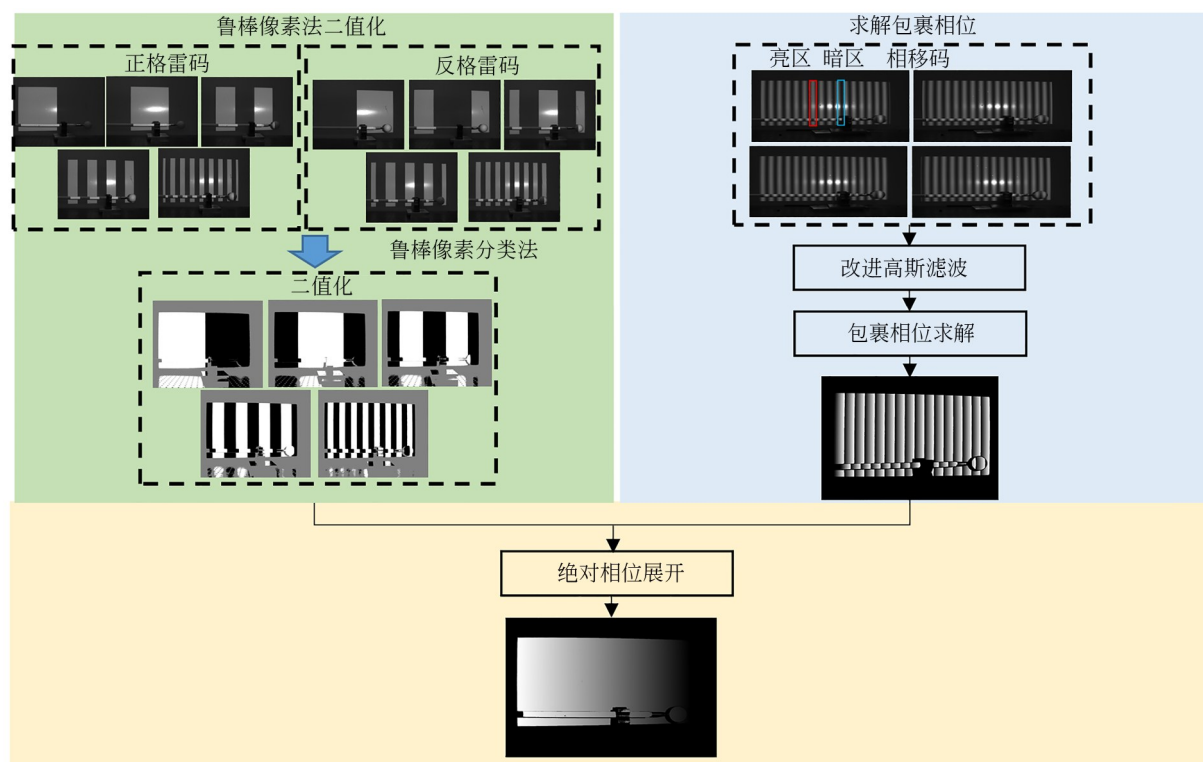


图3 绝对相位展开流程

Fig. 3 Flowchart of absolute phase expansion

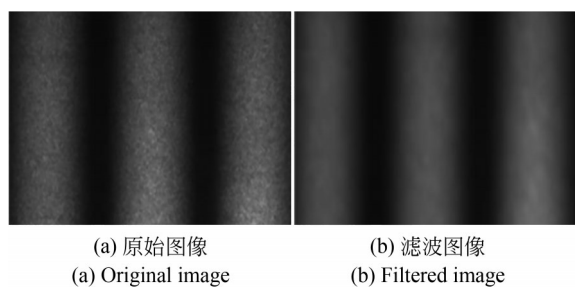
3.1.1 鲁棒像素法二值化

使用格雷相移法进行相位展开具有较高的测量精度和编码效率。互补正反格雷相移结构光编码方法采用鲁棒像素分类法对正反格雷码图像进行二值化。首先,通过正反格雷码计算来自投影仪的直接光强灰度值以及来自物体漫反射和环境光的间接光强灰度值,并基于直接光强与间接光强相应判断公式对格雷码进行二值化。该方法不仅将噪声影响最小化,还可以有效分离背景和非投影区域,进一步提升算法效率。

3.1.2 求解包裹相位

为了显著提升结构光解码的精度和稳定性,互补正反格雷相移结构光编码方法采用四步相移法求解包裹相位。图像滤波处理算法采

用高斯滤波算法^[13]进一步提升图像质量。首先,通过投影仪向被测构件依次投影4张相移码图片。由于一般高斯滤波算法会使采集反射条纹图像模糊,进而丢失原始细节信息,图像滤波算法使用改进高斯滤波算法处理反射条纹图像中的散斑噪声,提高了图像质量。对于光栅图像中受散斑噪声影响较大的亮部区域,采用窗口较大的高斯滤波核进行滤波;而对于受散斑噪声影响较小的暗部区域,则采用窗口较小的高斯滤波核进行滤波。图4为采集得到的标准平面光栅图像经过改进高斯滤波前后的细节放大图像。从图4(a)中可以明显观察到颗粒状的散斑噪声,亮部区域则更加明显;图4(b)中噪声情况则明显缓解,图像更加平滑。图5为改进高斯滤波前后的灰度值变化情况,可以发现噪声

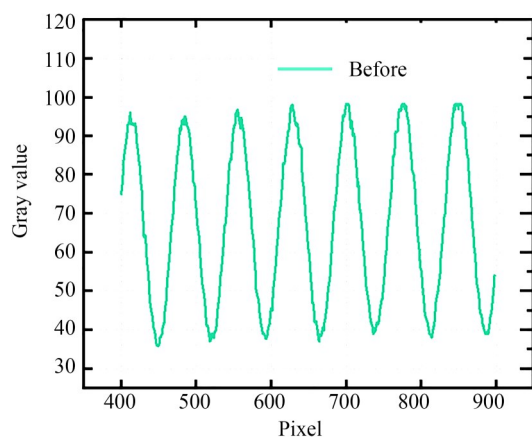


(a) 原始图像 (b) 滤波图像
(a) Original image (b) Filtered image

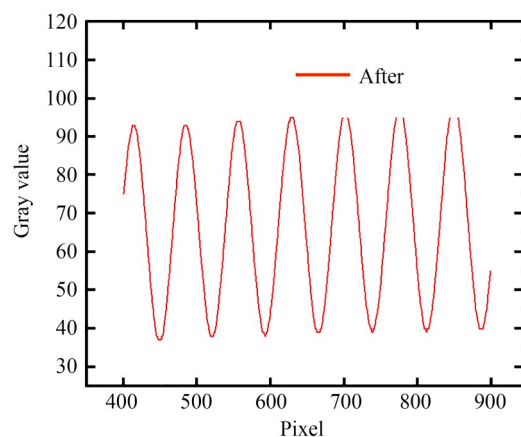
图 4 改进高斯滤波前后的平面光栅图像

Fig. 4 Improved planar raster images before and after Gaussian filtering

主要集中在灰度值波动的顶部和底部。经过滤波后,原本曲折跃变的灰度值变化更接近正弦



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 滤波图像
(b) Filtered image

图 5 改进高斯滤波前后的灰度值分布情况

Fig. 5 Gray value distribution before and after improved Gaussian filtering

3.1.3 绝对相位展开

由于包裹相位值是利用反正切函数求得的,因此,包裹相位的解得区间为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。为了使最终进行双目匹配的相位值具有单行唯一性,需要对包裹相位进行绝对相位展开,将其延伸到 $(0, k\pi)$ 区间。互补正反格雷码移结构光编码方法采用互补格雷码结合相移码的绝对相位展开方法,在分别得到互补格雷码二值化结果和相移码包裹相位后,通过格雷码二值化解码结果计算展开阶次对包裹相位进行展开,其流程如图 6 所示。记前 4 张格雷码展开阶次为 k_1 ,全部 5 张互补格雷码展开阶次为 k_2 。通过 k_1 和 k_2 根据式(2)对包裹相位 $\phi(x, y)$ 的不同位置进行展开求

分布。由此表明,改进高斯滤波可以有效恢复光栅结构光图像的相位信息,提高相位解调的准确性。根据滤波后 4 张光栅图像相同位置像素点的光强值 $I_1 \sim I_4$,求得该点的包裹相位值为:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y)$ 表示第 i 幅图像像素 (x, y) 坐标上的光强值; $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$, $I_4(x, y)$ 的初相位分别为 $0, \pi/2, \pi$ 以及 $3\pi/2$; $\phi(x, y)$ 表示图像像素 (x, y) 坐标位置上的包裹相位值。

和,得到单调递增具有单行唯一性的绝对相位值 $\Phi(x, y)$ 。

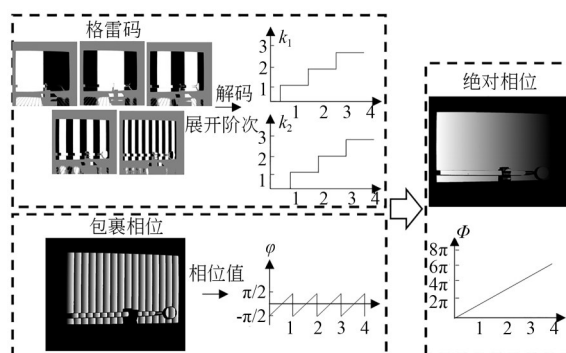


图 6 绝对相位展开原理

Fig. 6 Schematic diagram of absolute phase unwrapping

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \phi(x, y) + 2\pi k_2(x, y), & \phi(x, y) \leq -\pi/2 \\ \phi(x, y) + 2\pi k_1(x, y), & -\pi/2 < \phi(x, y) < \pi/2, \\ \phi(x, y) + 2\pi k_2(x, y) - 2\pi, & \phi(x, y) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\phi(x, y)$ 表示相移码求解包裹相位, k_1 表示前4张格雷码计算得到的展开阶次, k_2 表示全部5张格雷码的展开阶次。

3.2 亚像素匹配及双目重建原理

本文以绝对相位值作为匹配依据,通过左右相机的绝对相位图像进行亚像素双目匹配,并基于双目重建原理,使用亚像素匹配点对计算单角度三维重建点云坐标。首先,通过双目立体校正参数使左右相机的绝对相位图像对应的像点横坐标相同,成像平面相互平行。为了提升双目匹配的精度和稳定性,双目特征点匹配使用双目粗匹配与精匹配相结合的方法得到亚像素级双目匹配点。通过绝对差值和(Sum of Absolute Differences, SAD)局部匹配算法^[14]进行双目匹配,在左图像中取 3×3 大小的窗口,并在右图像同一行进行相位搜索,寻找最佳像素级双目匹配点。随后,对匹配点及单行前后相位值进行三次样条曲线拟合,得到亚像素精度的双目匹配坐标,并计算亚像素视差值 $dis(u_l, v_l)$ 。立体校正后的理想双目模型如图7所示,世界坐标系(与左相机坐标系重合)中的三维坐标点 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 在左相机图像坐标系中的二维成像点坐标为 $P_l(u_l, v_l)$,在右图像中的成像点坐标为 $P_r(u_r, v_r)$,此时的视差为 $dis = u_l - u_r$ 。基于空间三角变换原理^[15],将视差值和二维坐标点坐标转化为三维坐

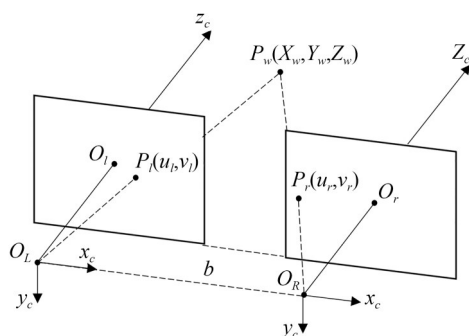


图7 立体校正后的双目模型

Fig. 7 Stereo corrected post-binocular model

标,具体如下:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & W \end{bmatrix}^T = \mathbf{Q}^* \begin{bmatrix} u_l & v_l & dis(u_l, v_l) & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Q}^*[\]$ 表示重投影矩阵,由相机标定得到; W 表示尺度因子;实际的三维坐标为 $(X/W, Y/W, Z/W)$; u_l, v_l 分别表示左相机图像坐标系下亚像素匹配点的横纵坐标值。

通过不同工位下左右相机采集的绝对相位图像计算得到各角度三维点云的坐标数据,用于后续多视角点云拼接得到完整的大尺寸构件点云信息。

4 多视角点云拼接

在对大尺寸构件进行实际三维形貌测量时,由于相机和投影仪的视野有限,构件表面存在相互遮挡等原因,单次测量无法获得完整构件的点云数据。因此,需要从不同视角对大尺寸构件表面的三维形貌进行多次扫描测量。不同视角下获得的点云数据需要通过计算转换到同一坐标系下,即点云拼接。点云拼接分为粗拼接和精拼接。针对一般点云拼接步骤中人工标志点粘贴费时费力、精拼接ICP算法计算效率低以及拼接精度差等问题,本文提出了多角度点云拼接方法,其流程如图8所示。首先,通过高精度拼接板的角点三维坐标进行奇异值分

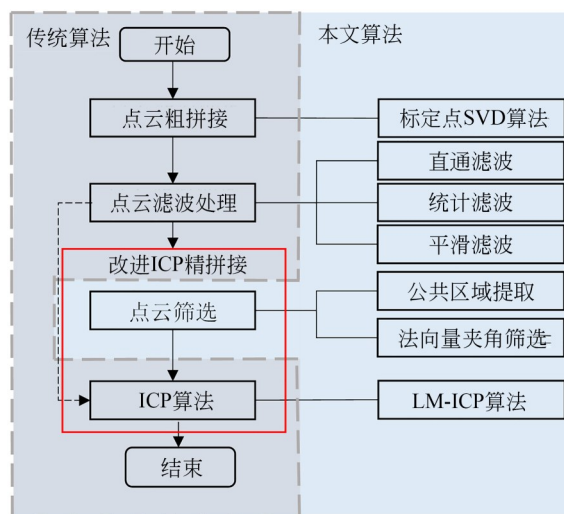


图8 多角度点云拼接算法流程

Fig. 8 Flowchart of multi-angle point cloud splicing algorithm

解^[15]得到刚体变换矩阵,实现点云粗拼接。接着,通过直通滤波、统计滤波以及平滑滤波操作对点云信息进行滤波处理。随后,对相邻视角的点云数据提取公共区域,再将公共区域点云进行法向量夹角筛选,去除质量较差的匹配点云。最后,通过列文伯格-马夸尔特迭代最近点^[16] (Levenberg-Marquardt Iterative Closest Point, LM-ICP)算法对筛选后相邻视角的点云数据进行精拼接,统一大尺寸构件多视角点云的坐标系。

4.1 点云粗拼接

首先,标定双目相机,并将拼接板固定在相邻视角可视范围的公共区域内,保证在相邻两视角状态下双目相机均能采集得到拼接板图像。接着,分别使用双目相机在相邻两视角位置处采集拼接板图像,得到移动前后的两组图像。在此基础上,对两组棋盘格拼接板图像进行角点识别得到角点像素坐标,并对像素坐标进行从上到下,从左到右的排序。随后,根据理想双目模型将角点像素坐标转换到双目立体校正后左相机坐标系下,计算得到拼接板角点的三维点云坐标。最后,将移动前后的拼接板角点三维点云分别作为源点云和目标点云,计算两组点云的去质心坐标,再通过奇异值分解算法计算粗拼接的刚体变换矩阵,并对源点云进行相应的刚体变换,使源点云和目标点云的世界坐标系基本对齐,将变换结果作为后续精拼接步骤的初值。

4.2 点云滤波

经过粗拼接后的多视角点云虽然可以得到被测构件的整体结构,但是,仍然存在包括背景板和系统噪声在内的无关点云信息。因此,需要进行点云滤波。首先,通过限制相机光轴方向的坐标值来去除背景板等无关点云信息。接着,采用统计滤波方法去除点云数据中的系统噪声。最后,根据点云自身结构信息,采用平滑滤波法滤除质量较差的点。点云滤波效果如图9所示,可以发现大部分单角度三维重建点云中的无关点云信息都得到了滤除,为后续点云精确拼接提供了先决条件。

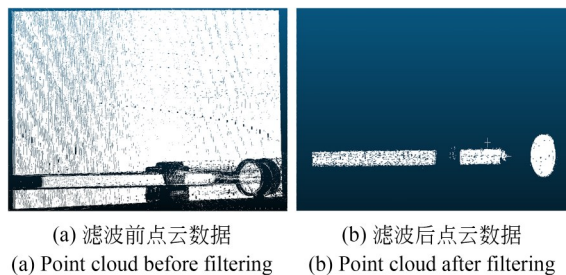


图9 点云滤波效果

Fig. 9 Point cloud filtering rendering

4.3 改进 ICP 精拼接

相邻视角点云经过点云粗拼接和点云滤波处理后,所有测量视角的点云数据被转换到世界坐标系下。然而,此方法是一种粗精度的拼接,在点集边缘处仍然存在较大的拼接误差。为了提升最终拟合的特征精度,提出了改进 ICP 算法进一步处理粗拼接后的点云数据。首先,确定两组点云公共区域。依次遍历两组点云寻找最近邻点,计算对应最近邻点对距离,并与预设阈值进行比较,确定是否保留。然后,通过法向量夹角进一步筛选公共区域点云。通过主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA) 法确立局部邻域区域,基于邻域区域拟合最小二乘平面,并以该平面法向量作为三维点法向量。计算源点云和目标点云对应点的法向量夹角 θ , 并与设定夹角阈值 $\theta_{\text{threshold}}$ 进行比较。对源点云和目标点云进行点云筛选,去除噪声和点群点,减少因噪声和离群点造成的误匹配现象,有利于筛选出描述点云几何特征的关键特征点,更准确地确定点云间的相对位置关系,减少初始位置偏差对拼接结果的影响,同时减少点云数据量,降低算法计算负担。最后,在传统 ICP 算法的基础上引入列文伯格优化算法,使之具有局部收敛性和全局搜索特性。通过该 ICP 算法对保留的公共区域目标点云和源点云进行迭代计算,得到最终精确的刚体变换矩阵,对源点云进一步进行刚体变换。拼接结果以柱状点云为例,展示了多视角点云精的拼接过程,点云拼接效果如图10所示。经过改进 ICP 精拼接后的相邻视角点云可以有效对齐,从而减少后续尺寸测量误差,提高大尺寸构件的三维形貌测量精度。

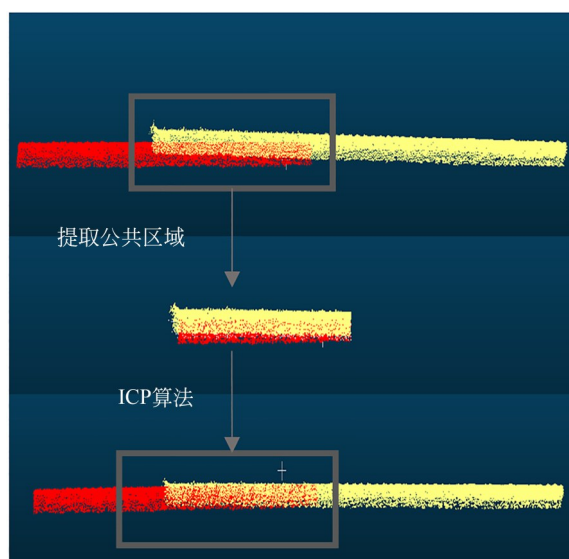


图10 相邻角度的点云拼接效果

Fig. 10 Point cloud stitching effect at adjacent angles

5 测量实验与结果分析

基于测量原理搭建大尺寸构件三维形貌测量实验台,如图11所示。该测量实验台主要由双目结构光三维测量模块、高精度直线运动机构、双V型块组成以及背景板组成。其中,双目结构光三维测量模块由一台投影仪(型号为PRO4710、分辨率为 $1\,920\text{ pixel}\times 1\,080\text{ pixel}$)和两台搭配6 mm定焦镜头的工业相机(型号为MER2-160-227U3M,分辨率为 $1\,440\text{ pixel}\times 1\,080\text{ pixel}$)组成。高精度直线运动机构由线性

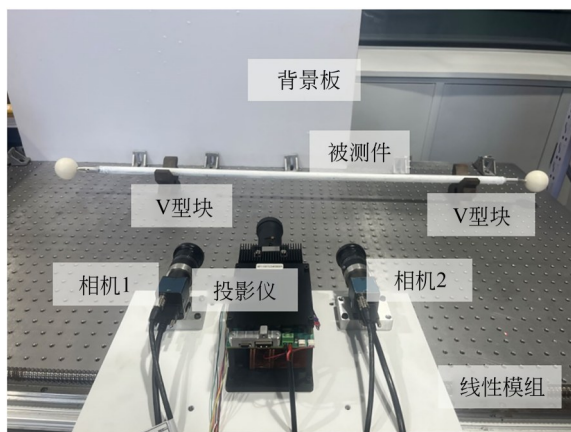


图11 大尺寸构件三维形貌测量系统实验台

Fig. 11 Experimental platform of large-scale 3D topography measurement system

模组和运动控制器组成。双V型块用于定位被测件,以提高待测件在视觉测量过程中的稳定性。背景板用于遮挡环境信息,避免其对实验结果造成影响。

为了验证大尺寸三维形貌测量系统的精度,使用该测量平台对大尺寸双球棒标准件进行多次重复测量实验。大尺寸双球棒标准件由两个哑光陶瓷标准球(圆度精度在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内)和中间碳纤维连接棒构成。实验分别采用三坐标测量机和大尺寸三维形貌测量平台对双球棒标准件进行三维形貌和球心距测量。经三坐标测量机(ZEISS蔡司PRISMO)多次接触式测量,得到两陶瓷标准球的球心距 $d=1\,117.232\text{ mm}$,标准球直径分别为 50.807 mm 和 50.804 mm ,将其视为标准值。

将双球棒标准件固定在V型块上,平行放置于距离相机镜头700 mm左右的测量位置处。使用大尺寸三维形貌测量平台投影结构光图片至标准球棒表面,同时控制双目相机同步采集变形条纹图像,对标准球棒进行三维形貌测量。将双球棒标准件均匀分成3个部分,使用高精度直线运动机构等距移动双目结构光三维测量模块,从而得到3个视角位置处的标准件三维点云数据。然后,通过高精度棋盘格拼接板角点的三维坐标,通过奇异值分解点云粗拼接算法计算相邻视角点云的刚体变换矩阵,将点云进行相应刚体变换得到完整粗配准后双球棒标准件的表面点云,让各视角的点云数据基本对齐,完成坐标系的统一。随后,对各视角点云数据进行点云滤波,以去除噪声点云。最后,改进ICP精配准算法通过公共区域高质量点云的对应关系计算精拼接的刚体变换矩阵,对粗拼接后的各视角点云数据进行更高精度的对齐,进一步提升测量结果精度,得到完整、精确的双球棒标准件点云。图12为最终得到的双球棒标准件的三维形貌测量结果。双标准球棒完整点云数据



图12 双球棒标准件的三维形貌测量结果

Fig. 12 Three-dimensional topography results of standard part of double bat

可以反映被测件的基本形状,测量被测构件的实际三维尺寸。

在相同条件下,分别使用传统格雷相移法编码方式和正反互补格雷相移法编码方式对两标准球进行多次测量,通过球体拟合得到标准球的半径数据。再分别使用传统 ICP 和改进 ICP 算法对改进双球棒标准件点云进行拼接实验,得到双球棒标准件的球心距数据。最后,将

测得数据与三坐标测量机测得的标准值进行比较,误差如表 1 所示。由表 1 可知,大尺寸三维形貌测量系统测量点云的最大绝对误差为 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

表 2 为不同点云精拼接算法对相邻视角点云进行拼接的实验参数对比,通过时间、均方根误差以及迭代次数验证了改进拼接算法的优越性。

表 1 双球棒标准件重建参数对比

Tab. 1 Comparison of reconstruction parameters of standard parts of double bats (mm)

测量次数	1 球半径误差		2 球半径误差		双球球心距误差	
	传统编码	改进算法	传统编码	改进算法	传统 ICP	改进算法
1	0.037	0.023	0.035	0.025	0.630	0.444
2	0.039	0.026	0.040	0.030	0.613	0.420
3	0.042	0.031	0.032	0.023	0.621	0.449

表 2 点云拼接效果参数对比

Tab. 2 Comparison of point cloud splicing effect parameters

算法	均方根误差	时间/s	迭代次数
ICP	3.544×10^{-5}	3.245	51
GICP	1.953×10^{-5}	0.457	30
本文算法	1.614×10^{-5}	0.023	21

由表 2 可知,与传统 ICP 算法相比,本文算法的拼接精度提高了 55%,迭代次数下降 61%。与广义迭代最近点 (Generalized Iterative Closest Point, GICP)^[17]相比,本文算法的拼接精度提高了 19%,迭代次数下降 33%。

6 结 论

本文提出了一种基于改进 ICP 算法的大尺寸构件三维形貌测量方法,解决了一般三维测量方法中存在的测量精度和测量效率低、对相邻视

角点云初始位置依赖程度高的问题。针对结构光重建过程格雷码二值化解码不稳定,提出了一种正反互补格雷码结合相移码的编解码方法。同时,针对一般 ICP 算法未充分利用点云结构特征信息,点云拼接精度和效率较低的问题,提出了一种改进 ICP 点云精确拼接方法。基于大尺寸构件三维形貌测量原理设计了大尺寸工件三维形貌测量系统,实现了大尺寸构件的高精度、高效测量。实验结果表明,大尺寸工件三维形貌测量系统的长度测量精度优于 450 $\mu\text{m}/\text{m}$,相邻角度的点云拼接时间仅为 25 ms,满足大尺寸工件三维形貌测量的高精度、高效率要求。

作者贡献声明:

蔡引娣:论文审核与编辑写作;

王宇轩:测量方法的提出,实验设计,论文构思和撰写;

牛超:实验设计及数据整理和分析;

朱祥龙、康仁科:测量方法的指导和待测件的提供。

参考文献:

- [1] 薛松柏, 王博, 张亮, 等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2813-2830.
XUE S B, WANG B, ZHANG L, *et al.* Development of green welding technology in China during the past decade[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(17): 2813-2830. (in Chinese)
- [2] 梁伟, 夏洋, 冯伟, 等. 焊接变形的高精度测量方法及预测方法研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 65-70.
LIANG W, XIA Y, FENG W, *et al.* Investigations on high-precision methods to measure and predict welding deformation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(16): 65-70. (in Chinese)
- [3] LIU K J, LIANG Y R, TANG M M. Calibration method for structural parameters of the articulated arm coordinate measuring machine utilizing a modified hybrid algorithm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 055008.
- [4] MEI L F, LIU Y, YAN D B, *et al.* Experimental study on magnetic field-assisted laser scanning welding of T2 copper[J]. *Journal of Laser Applications*, 2024, 36(1): 012021.
- [5] LIENHART W, EHRHART M, GRICK M. High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2017, 11(1): 1-8.
- [6] WANG J S, TAO B, GONG Z Y, *et al.* A mobile robotic 3-D measurement method based on point clouds alignment for large-scale complex surfaces[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-11.
- [7] 武琼. 基于激光跟踪仪与结构光扫描仪的高效组合式测量方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WU Q. *Research on Efficient Combined Measurement Method Based on Laser Tracker and Structured Light Scanner* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] HU P Y, YANG S M, DENG H W, *et al.* Accurate 3-D shape measurement for large objects using speckle-assisted fringe projection and global markers localization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2022, 71: 3181931.
- [9] 刘洋. 大尺寸低纹理零构件的三维测量关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LIU Y. *Research on Key Technology of Three-dimensional Measurement of Large-size and Low-texture Components* [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [10] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.
WU J, LI X, LIU SH Y, *et al.* Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1115002. (in Chinese)
- [11] ZHANG J, YAO Y, DENG B. Fast and robust iterative closest point[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2022, 44(7): 3450-3466.
- [12] MARANI R, RENÒ V, NITTIM, *et al.* A modified iterative closest point algorithm for 3D point cloud registration[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2016, 31(7): 515-534.
- [13] 刘嘉豪. 面向三维测量的光栅结构光图像去噪算法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
LIU J H. *Research on Grating Structured Light Image Denoising Algorithm for 3D Measurement* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [14] 夏永泉. 计算机视觉中双目匹配相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
XIA Y Q. *Research on Binocular Matching Related Technologies in Computer Vision* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] JIANG Z L, LIN Z, DAVIS L S. Learning a discriminative dictionary for sparse coding via label consistent K-SVD[C]. *CVPR 2011. June 20-25, 2011. SpringsColorado, CO, USA. IEEE*, 2011: 1697-1704.
- [16] 曾俊飞, 杨海清, 吴浩. 面向三维重建的自适应列文伯格-马夸尔特点配准方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(3): 137-142.
ZENG J F, YANG H Q, WU H. Adaptive levenberg-marquardt cloud registration method for 3D reconstruction[J]. *Computer Science*, 2020, 47(3):

137-142. (in Chinese)

- [17] ZHAO W D, ZHANG D D, LI D, *et al.* Optimized GICP registration algorithm based on princi-

pal component analysis for point cloud edge extraction[J]. *Measurement and Control*, 2024, 57(1): 77-89.

作者简介:



蔡引娣(1988—),女,甘肃武威人,博士,副教授,2012年于重庆大学获得硕士学位,2017年于日本东北大学获得博士学位,主要从事精密/先进测量技术、装备精度提升技术等研究。E-mail: caiyd@dlut.edu.cn



王宇轩(1999—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,2022年于中国矿业大学获得学士学位,主要从视觉精密测量方面的研究。E-mail: 32204273@mail.dlut.edu.cn