

文章编号 1004-924X(2026)14-2136-15

## 大型结构应变片多源测量融合定位映射

蔡志为<sup>1\*</sup>, 刘雨欣<sup>1</sup>, 于望竹<sup>2</sup>, 孙晓云<sup>3</sup>, 蔡子慧<sup>2</sup>, 孔鑫杰<sup>1</sup>

(1. 北华航天工业学院航空宇航学院, 河北 廊坊 065000;

2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100000;

3. 北华航天工业学院 电子与控制工程学院, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**针对大型结构静力试验中关键位置定位效率低、精度易受制造偏差及多源测量不确定度影响的问题,提出多源异构测量融合定位与映射方法。在统一空间测量框架下,引入多设备协同机制与不确定度加权融合策略,实现激光跟踪仪、三维扫描仪及激光投影仪的协同测量;结合多站位点云拼接技术构建高精度实体模型,改进基于面片密度的动态邻域搜索算法并开发位置修正软件,实现制造偏差的自动补偿;构建端到端不确定度传递模型,通过蒙特卡洛方法对误差传播过程进行验证。在面片数量为 66 613 的模型测试中,改进算法使邻域面片检索量减少 38%~45%,计算时间缩短至 18.2~20.5 s,效率提升 17%~26%;基于 200 个测量点的高密度试验结果表明,定位最大误差为 0.454 mm,平均误差为 0.400 mm,较传统人工定位方法显著降低;重复性试验合并标准差为 0.178 mm;在 3~10 m 测量范围内定位误差保持在 1 mm 以内;不确定度分析结果显示系统合成标准不确定度约为 0.42 mm,与试验结果基本一致;200 点定位场景下总定位时间由 1 277 min 降至 95 min,效率提升超过 100%。该方法在保证高精度的同时显著提升定位效率,并通过不确定度建模实现了测量结果的可解释性与可溯源性,在不同材料、结构及测量距离条件下均表现出良好的稳定性、适应性与工程应用潜力,可为大型复杂结构试验中的高精度快速定位提供有效技术支撑。

**关键词:**多源异构测量;融合定位;不确定度传递;位置修正;大型结构;应变片定位

中图分类号:V214.3;TP391 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263414.2136 CSTR:32169.14.OPE.20263414.2136

## Multi-source measurement fusion positioning and mapping for large structure strain gauge installation

CAI Zhiwei<sup>1\*</sup>, LIU Yuxin<sup>1</sup>, YU Wangzhu<sup>2</sup>, SUN Xiaoyun<sup>3</sup>, CAI Zihui<sup>2</sup>, KONG Xinjie<sup>1</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;

2. Beijing Satellite Manufacturing Factory Co., Ltd., Beijing 100000, China;

3. School of Electronics and Control Engineering, Beihua Aerospace Industry Institute, Langfang 065000, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhiwei\_cai@126.com

**Abstract:** For low efficiency and error-sensitive positioning in large structural static testing, a multi-source heterogeneous measurement fusion positioning and mapping method was proposed. Under a unified spatial measurement framework, multi-device collaboration and uncertainty-weighted fusion coordinated la-

收稿日期:2026-04-30;修订日期:2026-06-04.

基金项目:河北省跨气水介质飞行器重点实验室;北华航天工业学院国防创新基金项目(No. GFCXJJ202201)

ser tracker, 3D scanner, and laser projector measurement. High-precision entity models were constructed using multi-station point cloud splicing technology, and the density-based dynamic neighborhood search algorithm and position correction software automatically compensated for manufacturing deviations. An end-to-end uncertainty transfer model was constructed and verified through Monte Carlo methods. For a model with 66 613 facets, the improved algorithm reduced neighborhood facet retrieval by 38%~45%, shortened calculation time to 18.2-20.5 s, and improved efficiency by 17%-26%. High-density tests based on 200 points showed max 0.454 mm and mean 0.400 mm errors, significantly lower than traditional manual methods. The repeatability test pooled standard deviation was 0.178 mm. Within the 3~10 m measurement range, positioning error remained within 1 mm. Uncertainty analysis showed a combined standard uncertainty of approximately 0.42 mm, consistent with experimental results. For 200-points positioning scenarios, total time decreased from 1 277 min to 95 min, representing efficiency improvement exceeding 100%. This method significantly improves positioning efficiency while maintaining high precision, and achieves interpretability and traceability of measurement results through uncertainty modeling. It demonstrates good stability, adaptability, and engineering application potential under different materials, structures, and measurement distance conditions, providing effective technical support for high-precision rapid positioning in large complex structural testing.

**Key words:** multi-source heterogeneous measurement; fusion positioning; uncertainty propagation; position correction; large-scale structure; strain gauge positioning

## 1 引 言

对测试结构关键位置应变片的精准安装与定位是大型结构静力试验中的关键环节。应变片作为结构应变测量的核心传感元件,其安装位置的准确性直接影响试验数据的可信度与结构安全评估的可靠性。目前的定位方法以传统人工安装为主,操作人员需依据设计图纸手动识读坐标、标记点位并粘贴应变片。然而,随着工程结构向大型化、复杂化方向发展,单次试验所需应变片数量呈指数级增长(典型大型航天器结构可达数百至上千片),传统人工安装方式暴露出流程繁琐、效率低下、人为误差大等突出问题,已成为制约大型结构静力试验监测技术发展的关键瓶颈。

为解决大尺寸结构精密测量难题,国内外学者围绕多源测量融合与三维重建技术开展了大量研究。Xiao等<sup>[1]</sup>结合三维机器视觉与精密运动控制技术开发了平面度测量系统,利用配备3-D视觉传感器的旋转臂获取环形组件数据并通过点云坐标变换算法得到精确的点云数据;Zhi-liang Chen等<sup>[2]</sup>研究了基于线激光器的激光跟踪仪新型测量系统,通过刚体变换将测量单元坐标系中的截面点云转换为激光跟踪仪固定坐标系;

Yao Wang等<sup>[3]</sup>提出了基于全景环形透镜和结构光相机的全景立体扫描测量系统,实现了360度全景扫描测量。上述研究在数据精度、测量效率及适用场景拓展方面取得了关键突破。在多源数据融合方面,于阔泳等<sup>[4]</sup>研究了基于多源异构传感器数据融合的三维目标测量技术;韩东升等<sup>[5]</sup>对多源异构点云配准数据进行了滤波及精度分析;孟明等<sup>[6]</sup>提出了基于关键点特征约束与重叠优化的多源点云配准方法。这些成果为多源测量数据融合提供了重要技术参考。在测量不确定度评定方面,Perez等<sup>[7]</sup>采用蒙特卡洛方法分析了激光跟踪仪噪声对机床体积误差验证不确定度的影响;任瑜等<sup>[8]</sup>系统评定了激光跟踪仪多边测量的不确定度;Gai等<sup>[9]</sup>构建了面向飞机装配的激光跟踪仪大尺寸测量系统并进行了不确定度评估,为光学精密测量系统的误差分析与不确定度评定奠定了理论基础。

而针对结构静力试验监测所需的关键点定位映射问题,需要将三维扫描重建技术与模型比对、空间定位等方法深度融合,实现精准快速的关键点位定位。目前该方向研究较少,尚未形成成熟高效的技术方案,导致大型结构应变片安装定位仍无法实现自动化,精准性与高效性问题未

能得到根本解决。

综合分析现有研究成果可以发现,当前多源测量与三维重建技术主要面向通用测量场景<sup>[10-12]</sup>,在面向大型结构静力试验应变片安装定位这一特定工程应用时,仍存在以下关键局限:

(1) 现有飞机装配激光投影定位技术<sup>[13-14]</sup>主要依赖 CAD 理论模型进行投影引导,未考虑实际制造偏差引起的几何形变,导致在非标结构或存在加工误差的场景中投影位置偏离真实应变敏感区;且其定位流程为开环模式,缺乏实测数据反馈修正机制,难以适应大型试验结构的原位快速定位需求。

(2) 现有全站仪与扫描仪组合测量方法<sup>[15]</sup>侧重于静态几何量测与离线数据处理,测量完成后需人工提取坐标并转换至施工作业坐标系,数据流断裂导致无法实现“测量—修正—投影”的闭环自动化;此外,该类方法通常未建立系统级不确定度传递模型,难以评定最终定位结果的置信水平。

(3) 现有基于点云配准的三维重建方法<sup>[5-6]</sup>在模型拼接精度方面取得显著进展,但主要用于逆向建模与质量检测,未与现场定位作业设备(如激光投影仪)形成协同工作机制;且其配准结果以整体对齐误差评价,未深入分析局部特征区域(如焊缝、R角)的拟合不确定度对关键测点定位的影响。

针对上述局限,本文提出一种面向大型结构静力试验的多源异构测量融合定位与映射方法。该方法的核心独特性在于:首次将“激光跟踪—三维扫描—激光投影”三类异构设备纳入统一不确定度加权框架,构建从物理测量、数字建模到物理投影映射的闭环定位链路;引入基于面片密度的动态邻域搜索改进策略,解决海量三角面片模型中最近邻检索的计算瓶颈;建立覆盖 8 类误差源的端到端不确定度传递模型,实现定位结果的可溯源性评定。上述特色使本文方法在保持亚毫米级定位精度的同时,将 200 点定位作业效率提升超过 100%,为大型复杂结构试验中的高精度快速定位提供了有效技术支撑。

## 2 全域高精度空间定位场构建

针对尺寸轮廓可达 6 m×2.5 m×2 m 的大型结构全域测量场景,本文构建多源异构测量融

合定位框架。该框架由多站位测量网络、高精度坐标测量设备、功能互补设备及试验对象构成,用于大尺寸结构关键位置统一定位与映射。在大型结构测量中,不同设备在测量原理等方面差异明显,多站位下各设备坐标系不统一,直接联合测量易引发不确定度传播和累积。针对此问题,本文提出统一空间坐标约束与多设备协同融合的方法,通过不确定度统筹与权重优化抑制系统误差传播,构建高精度空间定位场。该方法以统一空间测量网络为底层支撑,实现多测站、多设备空间对齐与全局坐标统一。

多源异构测量融合定位场的建立过程如下:

### 2.1 测站坐标优化与基准点解算

激光跟踪仪测量结果包含距离、水平角和垂直角分量。通过这三个分量可以将单站测量得到的坐标换算成直角坐标系(X, Y, Z)下的坐标。对于被多次测量的基准点,采用最小二乘法进行平差优化,通过将残差平方和最小化求解其最优坐标值,实现点位精度提升。

### 2.2 坐标系转换与全局统一

为将各测站数据整合至全局坐标系,需进行坐标系转换。各测站转换参数包括旋转矩阵与平移向量,由于测量误差和转换参数误差,各测站的转换参数会不一致。测点转换到全局坐标后的值与该点的全局坐标最优值之间的差值就是残差,通过最小化所有残差的和,求解最优转换矩阵,实现多站数据在统一基准下的融合。

### 2.3 优化后测量不确定度提取

基于以上计算过程,把所有残差按坐标分量或测量分量分类,对每个分量*i*的残差集合*r<sub>i</sub>*,计算其标准差作为该分量的测量不确定度:

$$U_i = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum r_i^2}, \quad (1)$$

其中:*J*为该分量对应的残差个数,即点数×测站数,*U<sub>i</sub>*就是该分量在一个标准差置信水平下的不确定度。

### 2.4 多仪器权重分配与融合测量

针对激光跟踪仪、三维扫描仪与激光投影仪等多源测量设备,需进行差异化的精度定权。对于以上三种设备,其测量不确定度*U*的表达式可统一描述为:

$$U = A + \frac{B \cdot L}{1000}, \quad (2)$$

其中: $L$ 为测量设备到测量目标的距离; $A$ 由仪器自身属性决定的系统误差; $B$ 为反映测量距离与不确定度之间变化关系的线性系数。 $A,B$ 取值是由厂家根据不同型号产品提供的参数。本文用到的仪器设备型号及其对应的不确定度表达式如表 1 所示。

表 1 仪器型号及其不确定度  
Tab. 1 Instrument models and their uncertainties

| Instrument model             | Expression of uncertainty                                       |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Laser tracker (Leica AT960)  | $U_{\text{tracker}} = 10 + 5 \cdot L / 1\,000 [\mu\text{m}]$    |
| Laser scanner (Leica T-Scan) | $U_{\text{scan}} = 30 + 40 \cdot L / 1\,000 [\mu\text{m}]$      |
| Laser projector (Boeing)     | $U_{\text{projector}} = 0.1 + 0.2 \cdot L / 1\,000 [\text{mm}]$ |

设计权重分配公式,各测量仪器的不确定度权重  $W$  为:

$$W_i = \frac{1/U_i}{\sum (1/U_j)}, \tag{3}$$

其中, $U_i$ 为仪器本身的测量不确定度。  
故该定位场中使用不同仪器对同一点进行测量后,该点的最终不确定度为:

$$U_{\text{final}} = \frac{1}{\sum (W_i/U_i)}, \tag{4}$$

其中, $U_{\text{tracker}}, U_{\text{scan}}, U_{\text{projector}}$  分别为三种测量设备对该点测量所得不确定度。

图 1 为传统定位场与融合定位场对同一点测量后不确定度的传播对比。对于可被多个测站观测到的测量点而言,测量点的不确定度传播明显降低。

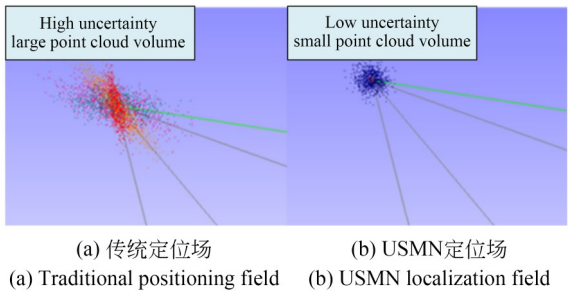


图 1 同一比例尺下相同测量点不确定度图像  
Fig. 1 Uncertainty image of the same measurement point at the same scale

3 考虑制造偏差的实体模型建立

在定位映射过程中,由于实际结构在制造过程中不可避免地存在加工误差,需对关键位置的定位结果进行修正。修正所需的偏差值

通过理论模型与实测模型的拟合获得,因此需要构建能够真实反映结构几何特征的实体数值模型。三维扫描技术作为获取高精度几何模型的有效手段,可在非接触条件下快速、准确地获取结构表面点云数据并重建完整三维模型。

对于大型复杂结构,由于存在遮挡及测量范围限制,难以通过单一测站完成整体扫描,需采用多站位扫描策略获取完整数据。本文在多源异构测量融合定位框架下,将不同站位获取的点云数据统一至同一全局定位场中,实现多源扫描数据的一致表达与精确拼接,从而构建与实体结构高度一致的三维数字化模型。具体流程包括:试验结构多站位标定扫描、仪器坐标系转换(通过标定靶标点将扫描仪内部坐标系标定至全局坐标系),以及拼接扫描数据形成整体模型。

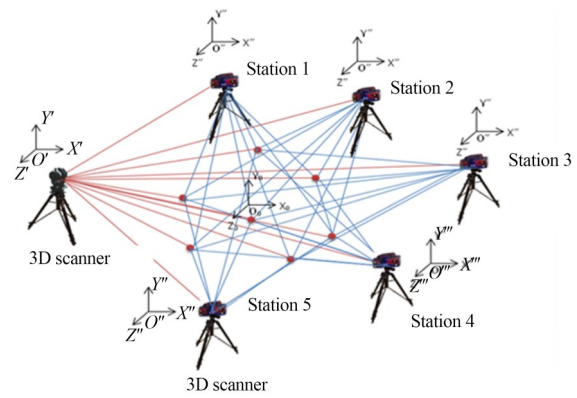


图 2 多站位扫描示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of multi-station scanning



### 3.1 仪器坐标系转换

假设共有  $M$  个测站,共测量了  $n$  个测量点,将测站  $m$  转换到全局坐标系下的坐标转换矩阵  $T_m$  以公式(5)表示:

$$T_m = \begin{bmatrix} R(\gamma, \beta, \alpha) & S_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$S_m = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中:  $R(\gamma, \beta, \alpha)$  为角度旋转矩阵,  $S_m$  为平移参数。

令  $t_m = [S_x, S_y, S_z, R_\gamma, R_\beta, R_\alpha]^T$ , 对于整个控制网来说一共有  $6 \times M$  个变量, 减去一个固定测站, 应为  $6 \times (M-1)$  个变量。故, 除去固定测站, 其余测站的向量以公式(7)表示:

$$T = [[t_1][t_2] \cdots [t_{M-1}]]^T. \quad (7)$$

各测站残差可以公式(8)表述为:

$$E = [[\epsilon_1][\epsilon_2] \cdots [\epsilon_M]]^T, \quad (8)$$

其中:  $E$  为残差集合,  $\epsilon_i$  是第  $i$  点的残差。

则仪器的转换问题等价为: 在  $\sum_{m=1}^M E_m^2$  最小的情况下, 找到  $T$ 。

根据以上理论通过自带软件 SA 进行数据处理, 得到转换矩阵  $T$  为:

$$T = \begin{bmatrix} & & & -45.56 \\ 110 & 16.97 & 76.21 & 21.38 \\ & & & 18.82 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

### 3.2 拼接扫描数据形成整体模型

在上文构建的全局定位场内, 各测量设备均已统一到全局坐标系下。将三维扫描仪第  $j$  站扫描获取的产品点云数据记为  $C_j$ 。通过转换矩阵  $T$  对  $C_j$  进行转换, 即可将各站位下三维扫描仪的产品点云数据统一到全局定位场下, 实现各站位的产品点云数据拼接。

对该方法构建的几何模型与理论模型在 Geomagic 软件中进行拟合, 拟合结果如图 3 所示。

Geomagic 软件计算得到的偏差数据, 将成为位置修正算法进行自动运算的核心数据依据。在后续的自动化修正过程中, 软件将依据这些预设的偏差数据, 对初步的定位映射坐标执行针对

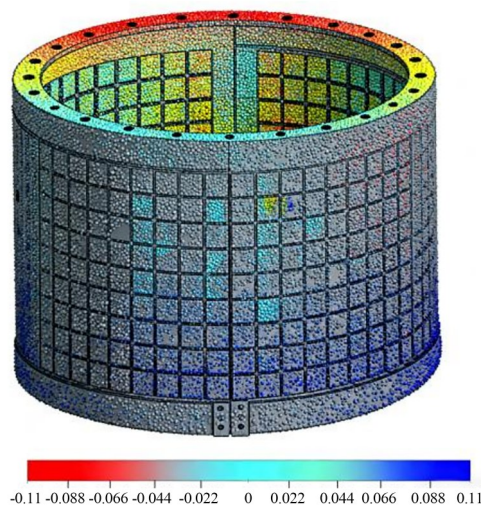


图 3 拟合后点云偏差图

Fig. 3 Post-fitting point cloud deviation map

性的、数字化的空间变换与补偿。

## 4 位置修正软件开发及实体定位映射

### 4.1 位置修正方法改进

为实现快速的空间位置修正, 本文基于 STL 空间搜索理论[16]改进位置修正方法, 并开发位置修正软件。该理论的核心在于在海量的三角面片中, 快速找到最靠近理论点的某个(或某几个)面片, 并计算出精确的投影点和距离。在对最近面片进行快速定位后, 继续对其邻域位置的面片进行搜索。根据线性八叉树方法, 任一节点(除了靠近边界处的节点)都有 26 个邻域。对于任一节点  $A = q_0 q_1 \cdots q_n$ , 可通过下面规则得到该节点各邻域:

当  $q_n = 0$  时, 东部、北部、上部分别为  $A+1, A+2, A+4$ 。对于西部邻域, 从右至左扫描编码, 找到第一个不属于西部集合的  $q_i (0 \leq i \leq n)$ , 将其减 1, 右侧  $q_j (j = i+1 \sim n)$  加 1; 若无则无西部邻域。南部邻域同理, 找到第一个不属于南部集合的  $q_i$  后将其减 2, 右侧  $q_j$  加 2; 若无则无南部邻域。下部邻域类似, 找到第一个不属于下部集合的  $q_i$  后将其减 4, 右侧  $q_j$  加 4; 若无则无下部邻域。对  $q_n = 1, 2, 7$  时的情况, 与上面类似。表 2 给出了  $q_n$  取不同值时所得到的邻域。此种求邻域的方法非常简单, 根据节点编码的末位, 按表 2 求出东

部邻域、南部邻域、西部邻域、北部邻域、上部邻域以及下部邻域,再通过求出的邻域进一步求出

想要的邻域,即可快速将该节点的 26 个邻域求出。

表 2 线性八叉树节点的邻域表  
Tab. 2 Neighborhood table of linear octree nodes

| qn | Eastern    | Southern    | Western     | Northern    | Upper       | Lower       |
|----|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0  | A+1        | Formula(10) | Formula(11) | A+2         | A+4         | Formula(14) |
| 1  | Formula(9) | Formula(10) | A-1         | A+2         | A+4         | Formula(14) |
| 2  | A+1        | A-2         | Formula(11) | Formula(12) | A+4         | Formula(14) |
| 3  | Formula(9) | A-2         | Formula(11) | Formula(12) | A+4         | Formula(14) |
| 4  | A+1        | Formula(10) | Formula(11) | A+2         | Formula(13) | A-4         |
| 5  | Formula(9) | Formula(10) | A-1         | A+2         | Formula(13) | A-4         |
| 6  | A+1        | A-2         | Formula(11) | Formula(12) | Formula(13) | A-4         |
| 7  | Formula(9) | A-2         | A-1         | Formula(12) | Formula(13) | A-4         |

$$A + 8^{n-1} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 8^t, \tag{9}$$

$$A - \left( 2 \times 8^{n-i} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 2 \times 8^t \right), \tag{10}$$

$$A - \left( 8^{n-i} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 8^t \right), \tag{11}$$

$$A + 2 \times 8^{n-i} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 2 \times 8^t, \tag{12}$$

$$A + 4 \times 8^{n-i} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 4 \times 8^t, \tag{13}$$

$$A - \left( 4 \times 8^{n-i} - \sum_{t=0}^{n-i-1} 4 \times 8^t \right). \tag{14}$$

然而该过程容易纳入大量无关联面片,增加无效计算。为此,本文在该理论的基础上,对线性八叉树动态邻域筛选机制进行改进,减少无效计算,提高运行效率。改进方法如下:

(1)构建“面片密度-邻域层级”映射模型:设节点内三角面片密度 $\rho$ =面片数/节点体积,若 $\rho \leq 0.5$ 面片,仅检索 6 个正交邻域;若 $0.5 < \rho \leq 1.5$ ,检索 18 个邻域;若 $\rho > 1.5$ ,检索 26 个邻域。

上述阈值通过系统性的参数敏感性试验确定,在固定测试环境与固定测试模型条件下,对 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 在工程经验区间[0.2,2.0]内进行网格化组合测试。每种参数组合独立运行 30 次取平均值,以综合评估参数对计算效率与定位精度的影响。不同 $\rho$ 阈值组合的算法性能对比如表 3 所示。

由表 4 可知,随着 $\rho_1, \rho_2$ 增大,检索量与查询时间持续下降,但定位偏差先减后增。 $\rho_1=0.5$ , $\rho_2=1.5$ 时达到最优平衡,该组合即为本文最终选用的阈值参数。

(2)同时引入邻域面片预筛选公式:对邻域节点内任意面片  $T$ ,计算其包围盒中心到目标点

表 3 不同 $\rho$ 阈值组合下的算法性能对比

Tab. 3 Algorithm performance comparison under different  $\rho$  threshold combinations

| $\rho_1$ | $\rho_2$ | Neighbor-hood             | Average         | Average posi-           |
|----------|----------|---------------------------|-----------------|-------------------------|
|          |          | patch<br>retrieval volume | query<br>time/s | tioning<br>deviation/mm |
| 0.3      | 1.3      | 42 500                    | 22.6            | 0.408                   |
| 0.3      | 1.5      | 41 800                    | 22.1            | 0.405                   |
| 0.3      | 1.7      | 41 200                    | 21.8            | 0.406                   |
| 0.5      | 1.3      | 39 800                    | 19.8            | 0.403                   |
| 0.5      | 1.5      | 38 500                    | 18.5            | 0.400                   |
| 0.5      | 1.7      | 37 800                    | 18.2            | 0.404                   |
| 0.7      | 1.3      | 37 200                    | 17.9            | 0.412                   |
| 0.7      | 1.5      | 36 500                    | 17.5            | 0.415                   |
| 0.7      | 1.7      | 35 800                    | 17.1            | 0.418                   |

$P$  的距离,若 $> r + \Delta r$ ( $r$ 为参考球初始半径, $\Delta r=0.1r$ ),直接剔除该面片。

使用以上改进方法对面片数 66 613 的加筋筒模型进行测试,其邻域面片检索量减少 38%~45%,单次距离计算时间缩短至 18.2~20.5 s,相比于改进前效率提升了 17%~26%。同时随机选取 100 个理论投影点,分别采用标准线性八叉树(遍历全部面片)法和改进算法,计算最近邻投影点坐标,以标准线性八叉树的定位结果为精度基准,验证改进算法的精度保持性。结果统计本文改进算法的平均定位偏差为 0.003 8 mm,最大偏差为 0.012 mm,94% 的测点偏差在 0.01 mm 以内。该量级远小于激光投影仪自身的投射精

表 4 不同空间搜索算法性能对比表

Tab. 4 Performance comparison of different spatial search algorithms

| Algorithm type             | Neighborhood patch<br>retrieval volume | Proportion of<br>effective areas | Average query<br>time/s | Memory usage/<br>MB |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Standard linear octree     | 66 613                                 | 0.15%                            | 24.8                    | 142                 |
| KD-tree                    | 66 613                                 | 0.15%                            | 22.3                    | 118                 |
| BVH                        | 66 613                                 | 0.15%                            | 21.6                    | 125                 |
| The method in this article | 37 000~41 000                          | 0.27%                            | 18.2~20.5               | 98                  |

度及应变片粘贴工艺误差,对最终定位结果的影响可忽略不计。证明改进算法在显著提升效率的同时,完全保持了与全量检索基准相当的精度水平,这证明了该算法改进的可行性。

为客观评价本文改进算法的性能优势,选取空间数据检索领域中应用广泛的三种主流算法作为对比基准:标准线性八叉树(Linear Octree)、KD-tree(K-Dimensional Tree)以及包围体层次结构(Bounding Volume Hierarchy, BVH)。在相同的测试环境(Intel Core i7-12700H, 32 GB RAM, Windows 11)与相同测试模型(面片数 66 613 的加筋筒壳 STL 模型)下,对四种算法的邻域面片检索量、平均查询时间、内存占用及有效面片占比进行对比测试。各算法参数设置如下:标准线性八叉树按本文 3.2 节所述编码规则构建,树深设为 6 层;KD-tree 按面片重心坐标构建平衡二叉树,邻域搜索半径与本文参考球半径一致;BVH 采用 SAH(Surface Area Heuristic)策略构建 AABB 包围体层次,遍历深度不限;本文方法采用 4.1 节所述的密度自适应层级映射与包围盒预筛选策略。每种算法独立运行 50 次取平均值,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在相同邻域查询任务下,标准线性八叉树、KD-tree 与 BVH 均需遍历全部 66 613 个面片以确定最近邻,其有效面片占比仅为 0.15%,表明超过 99% 的面片检索为无效计算。本文方法通过“面片密度-邻域层级”映射模型将检索量削减至 37 000~41 000 个,减少 38%~45%;结合包围盒预筛选机制后,有效面片占比提升至 0.27%,查询时间较 KD-tree 降低 18.4%~26.2%,较标准线性八叉树降低 26.6%~41.1%。内存占用方面,本文方法仅需 98 MB,较标准线性八叉树降低 31.0%,较 BVH 降低 21.6%。上述结果表明,本文改进策略在保

持查询精度的前提下,同时实现了检索量削减、效率提升与内存优化的多重增益,具有良好的工程实用性。

#### 4.2 位置修正软件设计与实现

根据以上理论框架,本文基于 MFC 架构,使用 VC++ 语言开发了位置修正解算工具软件,实现了模型及应变片坐标数据导入、坐标系统一、传感器点位修正与导出的基本功能,并可直观观测修正效果。软件的核心执行流程为将拟合后的模型和理论坐标导入,然后进行坐标系配准,配准完成后进行投影点位置解算,最终将修正后的坐标数据导出。该流程实现了从数据输入到精准配准、再到结果输出的全流程自动化处理,保障了理论模型与实测数据的高效融合。

该解算工具软件菜单栏各按键对应不同的子窗体,其对应的功能示意如图 4 所示。

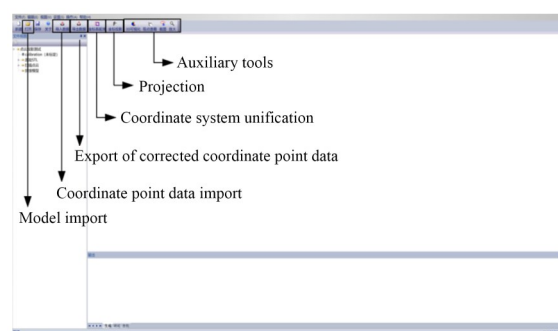


图 4 解算工具软件界面功能按键示意图

Fig. 4 Schematic diagram of software interface function buttons

基于位置修正解算工具对薄壁筒壳结构进行应变片位置修正,其修正效果整体图与细节图分别如图 5 所示。

上述结果证明该软件可以实现对应变片位置进行修正,具有实际应用价值。



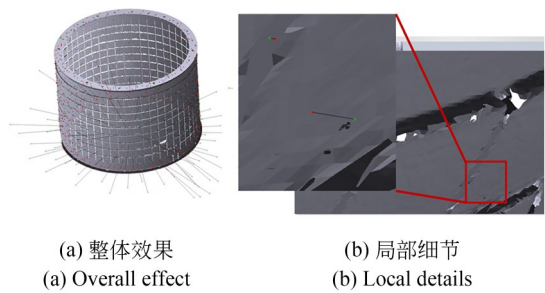


图 5 位置修正效果图  
Fig. 5 Position correction render

4.3 关键位置的实体映射

激光投影技术可用于实现修正后传感器位置的空间实体映射。在大型结构的定位映射过程中,常需变换结构姿态以实现全域操作。激光投影仪所具备的动态跟踪定位功能,能够实时跟踪目标并保持精准投影。此外,基于已建立的融合全域定位场,激光投影仪的坐标系已统一至全局坐标系下。因此,将位置修正软件输出的修正坐标数据直接导入激光投影系统,即可将理论修正位置精确映射至实体结构表面,指导实际贴装作业。

选取部分点进行映射试验,映射后的内、外壁效果分别如图 6 所示。

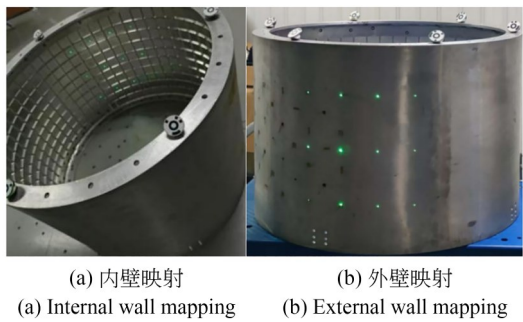


图 6 部分点最终映射效果图  
Fig. 6 Partial point final mapping rendering

选取部分映射点进行应变片的实际粘贴,使用激光跟踪仪对其中心点坐标及敏感栅轴线方向向量进行测量,并与修正后的理论数据进行对比分析,其偏差统计结果如表 5 所示。

结果表明,实际粘贴应变片的方向角偏差最大为 0.72°,所有测点的方向偏差均控制在 1°以内。中心点位置最大偏差为 0.41 mm,控制在 0.5 mm 以内。综上,本文提出的方法满足大型结构静力试验对应变片安装中心点位置及方向

表 5 应变片粘贴方向偏差与中心点位置偏差统计  
Tab. 5 Statistics of strain gauge orientation deviation and center point position deviation

| Point | Direction deviation<br>angle/(°) | Center point position<br>deviation/mm |
|-------|----------------------------------|---------------------------------------|
| P1    | 0.52                             | 0.38                                  |
| P2    | 0.68                             | 0.41                                  |
| P3    | 0.45                             | 0.36                                  |
| P4    | 0.61                             | 0.39                                  |
| P5    | 0.58                             | 0.40                                  |
| P6    | 0.49                             | 0.37                                  |
| P7    | 0.55                             | 0.38                                  |
| P8    | 0.48                             | 0.36                                  |
| P9    | 0.72                             | 0.41                                  |
| P10   | 0.56                             | 0.38                                  |

一致性的工程要求。

5 试验验证与结果分析

为验证本文提出的定位映射方法在精度与效率方面的性能,选取薄壁加筋筒壳结构作为主要试验对象,并扩展至不同材料进行对比分析。试验系统由激光跟踪仪、三维扫描仪及激光投影仪构成,通过构建多站位全局定位场,实现测量设备的统一坐标基准。各测量设备的站位如图 7 所示。

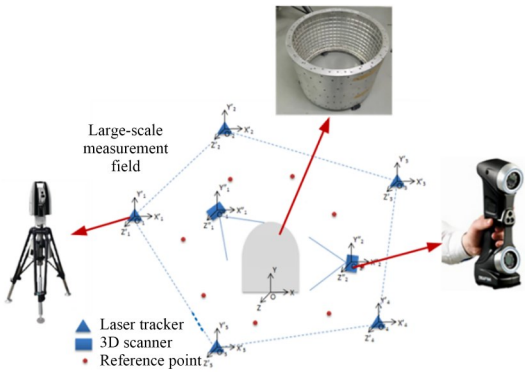


图 7 多站位融合定位网  
Fig. 7 Multi-station fusion positioning network

5.1 高密度测量点精度分析

为全面评估定位精度,本文构建了内壁 100 个、外壁 100 个,共计 200 个测量点的高密度测试数据集。通过试验流程,在 5 m 的测量距离下进行试验。采用空间点偏差  $\Delta d$  作为评价指标,其计算方法如公式(15)所示。基于 200 个测量点的



理论值与实际映射测量值,统计分析其误差分布特征:

$$\Delta d = \sqrt{(P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2 + (P_z - Q_z)^2}, \quad (15)$$

其中:  $P_x, P_y, P_z$  为投影点坐标,  $Q_x, Q_y, Q_z$  为理论应变片安装位置。

对 200 个测量点坐标数据进行整理分析,其误差结果如表 6 所示。

表 6 200 点误差统计

Tab. 6 Statistics of 200-point errors

| Inner wall points | Outer wall points | Total points | Maximum inner wall error/mm | Maximum error of the outer wall/mm | Overall maximum error/mm | Average inner wall error/mm | Average error of the outer wall/mm | Overall average error/mm |
|-------------------|-------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 100               | 100               | 200          | 0.440                       | 0.454                              | 0.454                    | 0.400                       | 0.400                              | 0.400                    |

结果表明,所有测量点的空间偏差均在 0.5 mm 以内,最大误差不超过 0.5 mm,整体平均误差为 0.4 mm。且从测量点坐标值的误差分布来看,内壁与外壁测量点误差均呈现随机分布特性,无明显系统性偏差,说明本文方法在高密度测量场景下具有良好的稳定性与一致性。此外,高密度测量点的引入有效降低了单点误差对整体评估结果的影响,提高了精度评定的统计可靠性。

## 5.2 重复性验证试验

为进一步验证所提出定位映射方法的稳定性与测量结果的一致性,依据计量学中对测量系统重复性的基本要求,开展重复性验证试验。该试验用于评估在相同测量条件下,多次独立测量结果的一致程度,从而判断系统是否具备稳定可靠的测量能力。

### 5.2.1 试验设计

在已构建的 200 个测量点数据集中,按照均匀分布原则选取 20 个典型测点,其中内壁测点 10 个、外壁测点 10 个,覆盖不同空间位置与结构区域,以保证结果的代表性。

对每个测点进行 10 次重复测量,每次测量间隔时间不少于 30 分钟,且每次测量前重新进行设备架设与系统初始化,并保持测量环境与操作流程一致。通过上述方式,确保各次测量之间相互独立,从而真实反映系统重复性性能。

### 5.2.2 数据处理方法

对每个测点的 10 次测量结果进行统计分析,计算其平均值与重复性标准差。设第  $i$  个测点的 10 次测量结果为  $x_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, 10$ ), 则有: 测点均值见公式(16):

$$\bar{x}_i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{ij}, \quad (16)$$

重复性标准差见公式(17):

$$s_i = \sqrt{\left( \frac{1}{9} \sum_{j=1}^{10} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right)}. \quad (17)$$

为综合评估整体重复性水平,计算所有测点的合并样本标准差见公式(18):

$$s_p = \sqrt{\sum (s_i)^2 / m}, \quad (18)$$

其中,  $m=20$  为测点数量。

### 5.2.3 试验结果

重复性测试结果统计如表 7 所示。

表 7 重复性测试结果统计

Tab. 7 Repetitive test results statistics

| Measurement point number | Average/mm | Standard deviation ( $s_i$ )/mm |
|--------------------------|------------|---------------------------------|
| N-01                     | 0.402      | 0.162                           |
| N-02                     | 0.395      | 0.174                           |
| N-03                     | 0.408      | 0.181                           |
| N-04                     | 0.399      | 0.169                           |
| N-05                     | 0.401      | 0.176                           |
| N-06                     | 0.397      | 0.185                           |
| N-07                     | 0.404      | 0.172                           |
| N-08                     | 0.398      | 0.179                           |
| N-09                     | 0.406      | 0.183                           |
| N-10                     | 0.400      | 0.168                           |
| N-11                     | 0.403      | 0.177                           |
| N-12                     | 0.396      | 0.182                           |
| N-13                     | 0.405      | 0.171                           |
| N-14                     | 0.399      | 0.180                           |
| N-15                     | 0.402      | 0.175                           |
| N-16                     | 0.398      | 0.184                           |
| N-17                     | 0.407      | 0.178                           |
| N-18                     | 0.401      | 0.173                           |
| N-19                     | 0.396      | 0.181                           |
| N-20                     | 0.404      | 0.176                           |

计算得出合并样本标准差  $s_p=0.178\text{ mm}$ 。

重复性测试结果表明,20个测点的标准差均控制在  $0.2\text{ mm}$  以内,合并样本标准差为  $0.178\text{ mm}$ ,说明系统在重复测量条件下具有良好的稳定性与一致性,满足高精度工程测量的重复性要求。

5.3 不同测量距离精度衰减分析

为进一步评估本文所提出定位映射方法在不同测量距离条件下的适用性,开展不同测量距离下的精度衰减试验。由于实际工程应用中测量距离存在较大变化,仅在单一距离条件下验证难以全面反映方法性能,因此有必要分析测量距离对定位精度的影响规律。

在统一测量环境与设备配置条件下,选取典型测量距离  $3\text{ m}$ ,  $5\text{ m}$ ,  $8\text{ m}$  及  $10\text{ m}$  分别选取 20 个均匀分布测点进行对比试验。各测量距离对应的误差结果如表 8 所示。

表 8 不同测量距离对应误差

Tab.8 Errors corresponding to different measurement distances

| Measure distance/m | Number of measurement points | Average error/mm | Maximum error/mm |
|--------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| 3                  | 20                           | 0.28             | 0.36             |
| 5                  | 20                           | 0.38             | 0.40             |
| 8                  | 20                           | 0.55             | 0.72             |
| 10                 | 20                           | 0.76             | 0.94             |

由表 8 可知,随着测量距离的增加,定位误差呈现逐渐增大的趋势,但整体增长平缓,未出现突变或精度失控现象。

为直观反映测量距离与定位精度之间的关系,绘制距离-误差变化曲线,如图 8 所示。

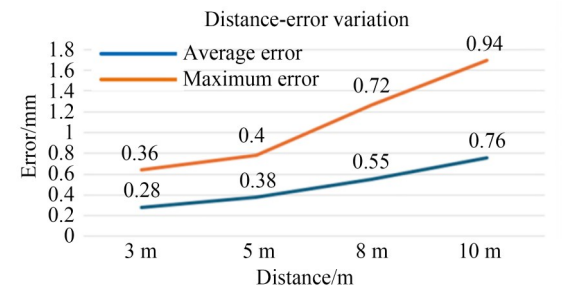


图 8 距离-误差变化

Fig. 8 Distance-error variation

分析可知:定位误差随测量距离增加呈近似线性增长趋势,但增长速率较缓,说明系统误差传播得到有效抑制。

试验结果表明,在  $3\sim10\text{ m}$  范围内,定位精度始终保持在  $1\text{ mm}$  以内。精度随距离增加呈平缓增长趋势,说明该方法在中远距离条件下仍具有良好的稳定性与适用性。

5.4 不确定度传递分析

本文开展端到端不确定度传递分析试验,对“激光跟踪测量-坐标转换-多站点点云拼接-模型拟合-位置修正-激光映射”完整流程的主要误差分量进行标定、合成与验证。将影响最终定位结果的主要误差来源划分为 8 类:激光跟踪仪仪器误差( $\sim10\text{ }\mu\text{m}$ )、坐标转换误差( $\sim38\text{ }\mu\text{m}$ )、扫描仪仪器误差( $\sim10\text{ }\mu\text{m}$ )、点云拼接误差( $\sim50\text{ }\mu\text{m}$ )、模型拟合误差( $\sim0.11\text{ mm}$ )、位置修正算法误差( $\sim0.05\text{ mm}$ )、投影仪投射误差( $\sim15\text{ }\mu\text{m}$ )及环境因素误差( $\sim0.02\text{ mm}$ )。

采用均方根合成方法建立合成标准不确定度模型,并通过蒙特卡洛方法(10 000 次随机采样)对误差传递过程进行数值仿真。计算得到系统合成标准不确定度约为  $0.42\text{ mm}$ ,与解析计算结果基本一致。各误差分量中,模型拟合误差贡献率最高( $62.48\%$ ),点云拼接误差次之( $12.93\%$ ),坐标转换误差与位置修正算法误差并列第三(各  $12.93\%$ )。蒙特卡洛模拟结果与 5.2 节 200 点试验得到的平均误差  $0.400\text{ mm}$  具有较好的一致性,验证了所建立误差模型的合理性与定位结果的可溯源性。

为验证 GUM 不确定度传播律(基于泰勒级数一阶近似)在非线性位姿拟合过程中的适用性,本文同步采用蒙特卡洛法(Monte Carlo Method, MCM)进行不确定度评定对比。MCM 通过直接采样输入量的概率分布并数值传播至输出量,可避免 GUM 法线性近似带来的截断误差。具体实施中,对 8 类误差源分别设定其概率分布类型与参数:激光跟踪仪仪器误差、坐标转换误差、扫描仪仪器误差、点云拼接误差及投影仪投射误差服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ,其中  $\mu$  为表 7 所列标定值,  $\sigma$  为对应不确定度;模型拟合误差与位置修正算法误差服从均匀分布  $U(a, b)$ ,区间端点由 Geomagic 拟合报告与修正前后偏差确

表 9 误差分量的标定方法及预期量级

Tab. 9 Calibration method and expected magnitude of error components

| Source of error                           | Calibration method                                             | Expected magnitude           |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Laser tracker instrument error $u_1$      | Measurement standard sphere, 10 repetitions                    | $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ |
| Coordinate transformation error $u_2$     | Residual extraction optimized by USMN                          | $\sim 38\text{ }\mu\text{m}$ |
| Scanner instrument error $u_3$            | Measurement standard sphere, 10 repetitions                    | $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ |
| Point cloud stitching error $u_4$         | Multi-station public point residual statistics                 | $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ |
| Model fitting error $u_5$                 | Geomagic fitting report extraction                             | $\sim 0.11\text{ mm}$        |
| Position correction algorithm error $u_6$ | Comparison of deviations before and after correction           | $\sim 0.05\text{ mm}$        |
| Projector projection error $u_7$          | Projection standard target measurement                         | $\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ |
| Environmental factor error $u_8$          | Comparative measurement under different temperature conditions | $\sim 0.02\text{ mm}$        |

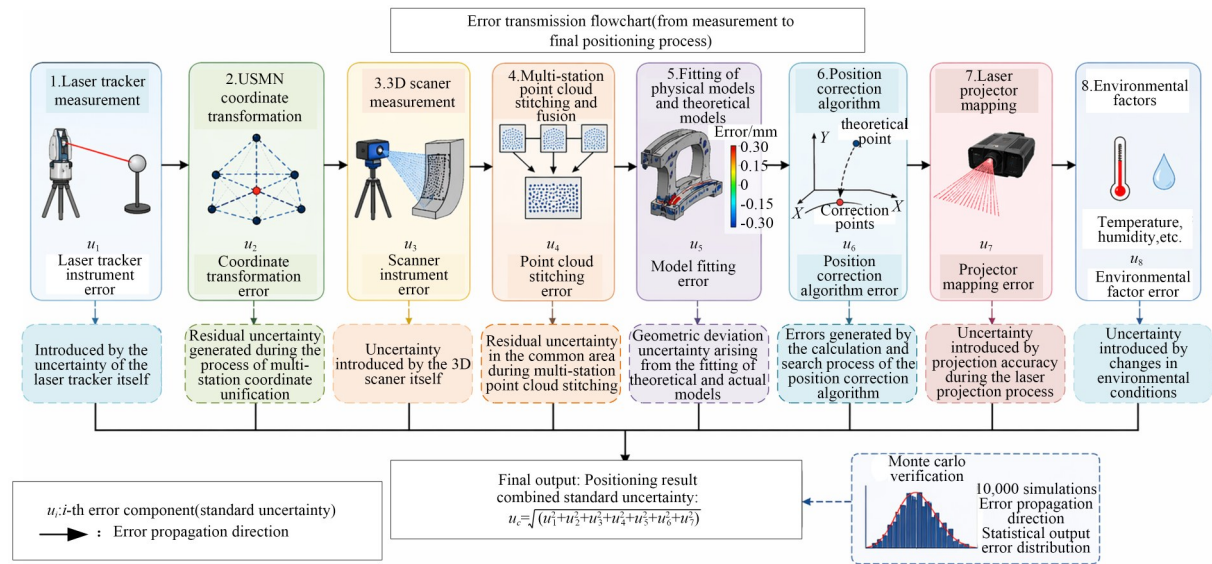


图 9 误差传递流程图

Fig. 9 Error propagation

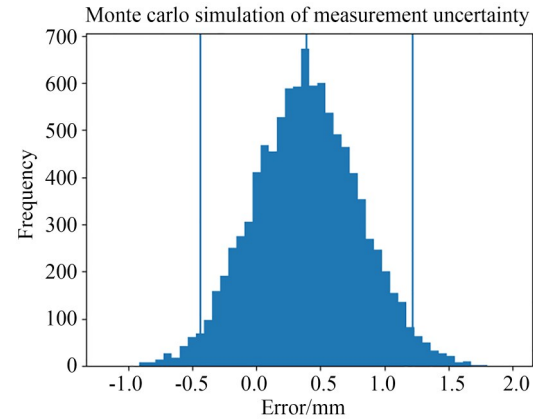


图 10 蒙特卡洛误差分布直方图

Fig. 10 Monte carlo error distribution histogram

定;环境因素误差服从三角分布  $T(a,b,c)$ ,覆盖温度漂移的极值与最可能值。

在 MATLAB 平台执行  $10^6$  次随机采样,每次采样按图 9 所示误差传递流程计算最终定位误差。MCM 评定结果为:合成标准不确定度  $u_c(MCM)=0.44\text{ mm}$ ,扩展不确定度  $U(MCM)=0.88\text{ mm}(k=2, \text{置信概率 } 95\%)$ 。与 GUM 法评定结果  $u_c(GUM)=0.42\text{ mm}$  相比,两者相对偏差为 4.5%,小于工程测量领域通常认可的 5% 阈值,验证了 GUM 法一阶近似在本模型中的有效性。两种方法的误差分量贡献率排序完全一致:模型拟合误差 (MCM: 61.82%, GUM: 62.48%) > 点云拼接误差 (MCM: 13.15%,

GUM: 12.93%) > 坐标转换误差 (MCM: 12.71%, GUM: 12.93%), 进一步说明 GUM 法对本系统误差传递规律的描述具有可靠性。

5.5 与其他方法对比分析

为全面评估本文所提出多源异构测量融合定位映射方法的性能优势,从定位精度与作业效

率两个方面,将本文方法与其他两种代表性方法进行系统性对比,三种方法在同一试验环境、相同 200 个高密度测点条件下进行对比测试。定位精度评价指标为空间定位偏差  $\Delta d$ ,效率评价指标为完成 200 个测点定位的总用时及单点平均用时。对比结果如表 10 所示。

表 10 不同定位方法精度与效率对比  
Tab. 10 Comparison of accuracy and efficiency among different positioning methods

| Comparison indicators                              | Positioning principle                                          | Whether to consider manufacturing deviation | Average positioning error/mm | Maximum positioning error/mm | Total time for 200 points/min | Average time per point (min/point) |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Traditional manual positioning                     | Manual image recognition and hand labeling                     | No                                          | 1.23                         | 3.00                         | 1 277                         | 6.39                               |
| CAD theoretical model projection only (unmodified) | Direct projection of CAD model                                 | No                                          | 1.15                         | 2.80                         | 112                           | 0.56                               |
| The method in this article                         | Multi-source fusion measurement position correction projection | Yes                                         | 0.400                        | 0.454                        | 95                            | 0.475                              |

从表可以得出,在精度方面,传统人工与仅 CAD 投影方法的平均误差均超过 1.1 mm,最大误差接近 3 mm;而本文方法平均误差仅 0.400 mm,最大误差 0.454 mm,所有测点误差控制在 0.5 mm 以内,相比仅 CAD 投影方法平均误差降低约 65.2%。在效率方面,本文方法总用时 95 分钟,较传统人工(1 277 min)提升超 1 200%,较未修正投影方法也略有提升。综上,本文方法实现了高精度与高效率的协同优化,综合优势显著。

5.6 适应性分析

在多材料条件下验证本文方法的工程适用性。选取铝合金、复合材料、钢结构三种典型材料结构,在相同试验条件下各选取 100 点进行定位测量。结果表明:铝合金结构平均误差 0.4 mm、最大误差 0.45 mm;复合材料结构平均误差 0.34 mm、最大误差 0.50 mm;钢结构平均误差 0.36 mm、最大误差 0.50 mm。三种材料条件下定位误差均控制在 0.5 mm 以内,说明本文方法对不同表面特性与制造精度的材料具有良好的适应性。

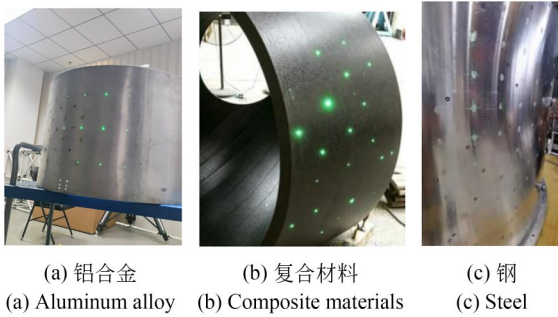


图 11 三种材料结构映射过程  
Fig. 11 Mapping process of three material structures

进一步选取光滑结构、加筋结构以及焊缝连接结构三类典型结构进行验证,各选取 100 个测量点。结果表明:光滑结构平均误差 0.38 mm、最大误差 0.42 mm;加筋结构平均误差 0.40 mm、最大误差 0.45 mm;焊缝结构平均误差 0.43 mm、最大误差 0.48 mm。三类结构的最大误差均控制在 0.5 mm 以内,说明本文方法在不同几何复杂程度条件下均具有良好的稳定性与鲁棒性。



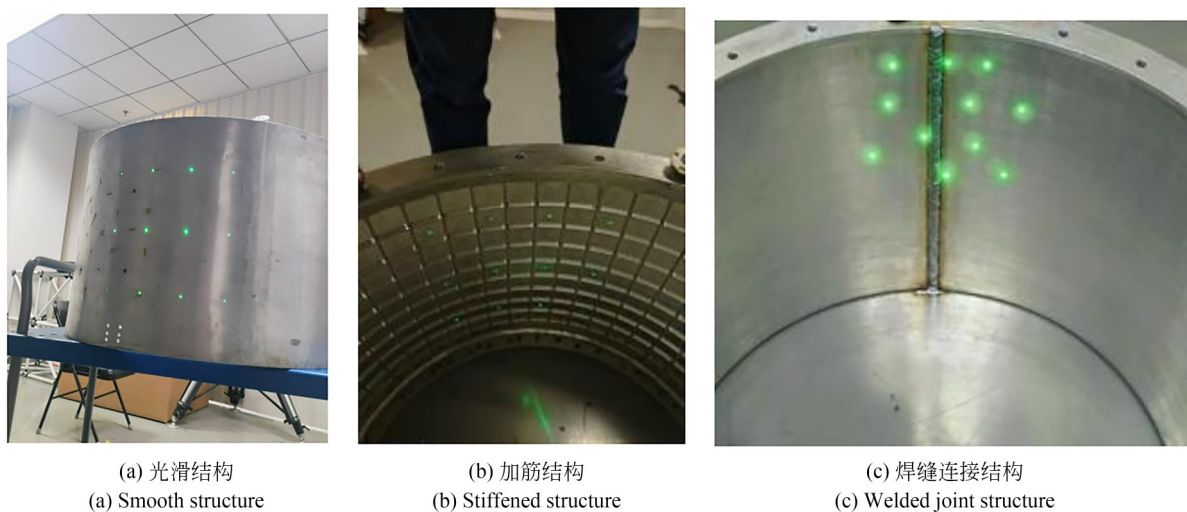


图 12 三类典型结构映射过程

Fig. 12 Three types of typical structural mapping processes

## 6 结 论

本文针对大型结构静力试验中关键位置定位精度受制造偏差影响大、人工定位效率低以及多源测量不确定度难以有效控制的问题,提出了多源异构测量融合定位与映射方法。通过构建统一空间坐标约束下的多设备协同测量框架,引入不确定度加权融合策略,实现了激光跟踪仪、三维扫描仪及激光投影仪的协同工作,有效抑制了多源测量数据融合过程中的误差传播。结合多站点云拼接技术构建高精度实体模型,通过改进的空间搜索算法实现关键位置的自动修正,建立了从数据采集到定位映射的完整技术链路。

试验结果表明:在 200 个测量点的高密度测试条件下,定位最大误差为 0.454 mm,平均误差为 0.400 mm,较传统人工定位方法显著降低,实现了由毫米级向亚毫米级精度的提升;重复性试验合并标准差为 0.178 mm,验证了系统的稳定性与一致性;在 3~10 m 测量范围内定位精度始终保持在 1 mm 以内,表现出良好的距离适应性;通过不确定度传递分析与蒙特卡洛仿真验证,系统集成标准不确定度约为 0.42 mm,与实测误差结果基本一致,说明所建立的误差模型能够有效反映实际误差传播规律。

在效率方面,200 点定位场景下总用时由 1 277 min 降低至 95 min,效率提升超过 100%,且

随着测点数量增加方法的规模化优势更加显著。在不同材料与结构条件下的试验表明,该方法均能够将定位误差稳定控制在 0.5 mm 以内,具有良好的鲁棒性与工程适应性。

需要指出的是,本文方法当前主要针对静态、可控环境下的大型结构开展验证,尚未涵盖动态工况条件下的实时定位场景。对于尺度超过 10 m 的超大结构以及复杂双曲率曲面等极端几何形态,方法的适用性仍需进一步验证。未来工作将聚焦于以下方向:(1)引入深度学习技术优化点云配准与自适应邻域搜索策略,进一步提升算法的智能化水平;(2)开展动态工况下的实时定位映射试验,拓展方法的适用范围;(3)探索该方法在航天、船舶等更大尺度结构制造与装配过程中的工程应用。

### 作者贡献声明:

蔡志为:技术方案、算法分析,论文构思、审核与编辑写作;

刘雨欣:数据管理、形式分析、研究、软件编程及初稿写作;

于望竹:方法论、项目管理及提供资源;

孙晓云:指导监督和领导研究活动策划执行;

蔡子慧:项目管理、提供资源及审核编辑写作;

孔鑫杰:数据管理及形式分析。

## 参考文献:

- [1] 于成浩,董岚,柯明,等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究[J]. 测绘科学,2008(2):42-44.  
YU C H, DONG L, KE M, *et al.* Study on plane accuracy of 3D control network for large-scale laser tracker [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008(2): 42-44. (in Chinese).
- [2] 杨凡,范百兴,李广云,等. 大尺寸高精度三维控制网技术探讨[J]. 测绘科学技术学报,2015,32(2): 120-124.  
YANG F, FAN B X, LI G Y, *et al.* Discussion on large-scale high-precision 3D control network technology [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(2): 120-124. (in Chinese).
- [3] 徐亚明,郑琪,管啸. Leica AT960激光跟踪仪测量精度分析[J]. 测绘地理信息,2020,45(1):8-12.  
XU Y M, ZHENG Q, GUAN X. Measurement accuracy analysis of leica AT960 laser tracker [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2020, 45(1): 8-12. (in Chinese)
- [4] 于阔泳,明禹,卢影. 基于多源异构传感器数据融合的三维目标测量技术研究[J]. 机电产品开发与创新,2025,38(6):112-116.  
YU K Y, MING Y, LU Y. Research on 3D target measurement technology based on multi-source heterogeneous sensor data fusion [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2025, 38(6): 112-116. (in Chinese)
- [5] 韩东升,徐茂林,金远航. 多源异构点云配准数据的滤波及精度分析[J]. 测绘科学技术学报,2020,37(5):503-508.  
HAN D S, XU M L, JIN Y H. Filtering and accuracy analysis of multi-source heterogeneous point cloud registration data [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(5): 503-508. (in Chinese)
- [6] 孟明,张利萍,王浩维,等. 基于关键点特征约束与重叠优化的多源点云配准方法[J/OL]. 应用激光, 1-12[2026-04-29].  
MENG M, ZHANG L P, WANG H W, *et al.* Multi-Source Point Cloud Registration Method Based on Keypoint Feature Constraints and Overlap Optimization [J/OL]. *Applied Laser*, 1-12 [2026-04-29]. (in Chinese)
- [7] PEREZ P, AGUADO S, ALBAJEZ J A, *et al.* Influence of laser tracker noise on the uncertainty of machine tool volumetric verification using the monte carlo method [J]. *Measurement*, 2019, 128: 386-394.
- [8] 任瑜,刘芳芳,张丰,等. 激光跟踪仪多边测量的不确定度评定[J]. 光学精密工程,2018,26(10): 2415-2422.  
REN Y, LIU F F, ZHANG F, *et al.* Uncertainty evaluation of multi-lateral measurement for laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2415-2422. (in Chinese)
- [9] GAI Y, ZHANG J, GUO J, *et al.* Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly [J]. *Measurement*, 2020, 165.
- [10] 宋永存. 多视激光点云数据融合与三维建模方法研究[J]. 测绘通报,2017(5):79-81+94.  
SONG Y C. Research on multi-view laser point cloud data fusion and 3D modeling method [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(5): 79-81+94. (in Chinese)
- [11] 李松,吴楠,靳海鹏,等. 三维激光点云数据索引和近邻查询方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2295-2302.  
LI S, WU N, JIN H P, *et al.* Research on 3D laser point cloud data indexing and nearest neighbor query method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2295-2302. (in Chinese)
- [12] 杨振,范百兴,李广云,等. 激光跟踪仪精密测边网的建立与解算[J]. 测绘通报,2018(S1):184-188.  
YANG Z, FAN B X, LI G Y, *et al.* Establishment and solution of laser tracker precision distance measurement network [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(S1): 184-188. (in Chinese)
- [13] 王声,吴军豪,牛润军,等. 激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J]. 导航与控制, 2018,17(3):48-54.  
WANG S, WU J H, NIU R J, *et al.* Research and application of laser projection technology in aircraft tube bracket installation [J]. *Navigation and Control*, 2018, 17(3): 48-54. (in Chinese)
- [14] 徐麒,黎东,杜蒙,等. 通信塔地面激光扫描数据的多视角配准研究[J]. 遥感技术与应用,2026,41(1):235-241.  
XU Q, LI D, DU M, *et al.* Research on multi-view registration of ground laser scanning data for communication towers [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2026, 41(1): 235-241.

- (in Chinese)
- [15] 李冬,李保罗,杨先志,等. 基于非刚性配准的大跨空间结构施工位形偏差检测研究[J]. 测绘通报, 2026(3):80-85.  
LI D, LI B L, YANG X Z, *et al.* Study on construction shape deviation detection of large-span spatial structure based on non-rigid registration [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2026 (3): 80-85. (in Chinese)
- [16] 杜晓艳,朱勇,黄瑞. 基于多源数据融合的古建筑精细化建模[J]. 测绘与空间地理信息, 2026, 49(1):20-23.  
DU X Y, ZHU Y, HUANG R. Fine modeling of ancient buildings based on multi-source data fusion [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2026, 49(1): 20-23. (in Chinese)
- [17] 黄述齐,周志峰,任朴林,等. 基于八叉树与 3D-SIFT 特征提取的点云配准算法[J]. 应用光学, 2026, 47(1):147-155.  
HUANG S Q, ZHOU Z F, REN P L, *et al.* Point cloud registration algorithm based on octree and 3D-SIFT feature extraction [J]. *Applied Optics*, 2026, 47(1): 147-155. (in Chinese)
- [18] 张新行,张培,齐亮,等. 多源数据融合在广府古城三维重建中的应用[J]. 测绘通报, 2023(11): 112-115.  
ZHANG X X, ZHANG P, QI L, *et al.* Application of multi-source data fusion in 3d reconstruction of guangfu ancient city [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(11): 112-115. (in Chinese)
- [19] YUKI K, DAISUKE I, KOSUKE S. Simultaneous projection and positioning of laser projector pixels [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 23(11): 2419-2429.
- [20] 王梅宝,张晓琳,唐文彦,等. 柔性质心测量方法及不确定度评定[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1500-1507.  
WANG M B, ZHANG X L, TANG W Y, *et al.* Flexible centroid measurement method and uncertainty evaluation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1500-1507. (in Chinese)
- [21] OCTAVIO H I, ALDO D B, H L V B, *et al.* Validation of the network method for evaluating uncertainty and improvement of geometry error parameters of a laser tracker [J]. *Precision Engineering*, 2021.

#### 通讯作者:



蔡志为(1987—),男,河北廊坊人,副教授,2009年获得北京交通大学机械工程及自动化专业工学学士学位,2012年获得北京航空航天大学机械工程及自动化专业工学硕士学位,目前正在石家庄铁道大学攻读机械工程专业博士学位。目前担任北华航天工业学院无人机教研室主任。主要研究方向集中在飞行器测试相关领域的研究与应用,包括测试环境的建立与仿真分析,以及视觉测量方法的研究。E-mail:zhiwei\_cai@126.com

#### 作者简介:



刘雨欣(2000—),女,河北沧州人,2022年获得北华航天工业学院机电工程学院工程学士学位,目前正在该校航空航天学院攻读工程硕士学位。2024年在北京卫星制造厂实习,获得了与航空航天制造相关的工程应用实践经验。主要研究方向为机器视觉检测技术。E-mail:yxin\_liu@126.com