

文章编号 1004-924X(2024)17-2698-10

接触式与白光干涉测头复合测量坐标统一与 数据融合

程真英, 徐东见, 张成瑶, 刘云龙, 李瑞君*

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室,
安徽 合肥 230009)

摘要:针对复合测量中两测头空间坐标系不统一的问题,提出了基于标定器提供基准点结合单位四元数法求解空间变换矩阵的坐标统一方法,并以均方根误差(RMSE)来评估坐标统一的效果。设计并制作了一种新型标定器,为坐标统一提供稳定可靠的基准点,并建立了基准点精度与坐标统一精度的关系模型。针对两测头测量数据,提出了空间误差椭球搜索策略结合加权最小二乘法的数据融合方法。实验结果表明,复合测量的坐标统一化配准精度可达 $1.889\text{ }\mu\text{m}$,所提出的数据融合方法相较传统加权最小二乘法的相对误差减小了 16%,重复性精度提高了 38%,实现了复合测量的高精度坐标统一与稳定精确的数据融合,提升了对器件的测量能力。

关键词:接触式测头;白光干涉测头;复合测量;坐标统一;数据融合

中图分类号:TH72 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243217.2698

Coordinate unification and data fusion for composite measurement with contact and white light interferometric probes

CHENG Zhenying, XU Dongjian, ZHANG Chengyao, LIU Yunlong, LI Ruijun*

(Anhui Provincial Key Laboratory of Measurement Theory and Precision Instruments,
School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: rj-li@hfut.edu.cn

Abstract: To achieve high-precision measurements of these components, micro/nano contact probes and white light interferometric probes must be combined for composite measurement. This paper presents a method to unify the spatial coordinate systems of the two probes using calibration points from a custom calibrator and the unit quaternion method to derive the spatial transformation matrix, evaluated by root mean square error (RMSE). A novel calibrator was designed to offer stable reference points, with a model linking their accuracy to coordinate unification precision. Additionally, a data fusion method blending spatial error ellipsoid search with weighted least squares was proposed, demonstrating a registration accuracy of $1.889\text{ }\mu\text{m}$. This method decreased the relative error by 16% and improved repeatability precision by 38%.

收稿日期:2024-05-10;修订日期:2024-06-09.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2004902);国家自然科学基金资助项目(No. 52175506)

compared to traditional least squares. The research enhanced the measurement precision and data fusion stability of composite measurement systems.

Key words: contact probe; white-light interference probe; composite measurement; coordinate unification; data fusion

1 引言

随着精密制造和先进表面工程技术的发展,各行业设计和生产的零件精密度与复杂性日益增加^[1]。使用单一类型的传感器已无法满足此类零件的高精度测量需求,因此,融合多种传感器优势的复合测量变得至关重要^[2-3]。

在航空航天、高端装备制造和国防工业等领域中,存在诸多尺寸微小且特征复杂的精密器件,而现有的复合测量系统难以满足这些器件多特征、高精度的测量需求^[4-7]。微纳米接触式测头和白光干涉测头是测量精密微型零件的关键设备^[8-10]。结合微纳米接触式测头与白光干涉测头进行复合测量,可以实现复杂特征微型零件的尺寸以及表面形貌的高精度测量。利用接触式测头测量深孔、沟槽等光学盲区,利用白光干涉测头对工件表面进行全息、无损地快速扫描,从而获得更为全面的几何度量信息和更高可靠性的测量数据^[2,11]。然而,复合测量中两传感器测头存在测量坐标系不统一的问题,同时两测头的测量数据在测量精度上存在差异性,为解决这些问题,需要对接触式与白光干涉测头的复合测量进行坐标统一与数据融合^[12-13]。

坐标统一即确定不同测头坐标系之间的变换关系,如旋转、平移和缩放,并将多源数据统一到同一坐标系中。数据融合则是在坐标统一后,通过数学方法处理数据确定系统最终输出的过程。坐标统一通常以具有特定几何特征的标定器来实现^[14]。最常用的标定器有球类结构,例如,将球型标定器固定在标定板上,通过测量球心作为基准点来实现接触式测头与结构光扫描仪的坐标统一;在碳纤维板上设置多个靶球座,并按阵列排布放置标准球,来统一激光扫描与接触式测头的坐标系^[15]。然而,球型标定器并不适用于所有传感器,如共焦传感器或白光干涉仪(WLI)等。由于球是一个渐变曲面,靠近球的

赤道圆附近区域因其斜率变化导致仪器测量不准确或无法测量,测量拟合出的球心与实际球心产生较大偏差。为实现高精度复合测量的坐标统一,有学者对几何体组合的标定器展开研究^[16]。他们设计中心轴线重合的圆柱和圆台组成的组合体标准器,用于实现影像、接触式和激光传感器的高精度坐标统一^[17];通过在矩形微晶玻璃基板的对角加工一对标准球光刻掩膜版作为标定器,实现接触式测头和影像测头坐标系的统一^[18];还有利用如角度量块、薄环规等单个特征的标定器进行坐标统一^[19],但这类标定器不适合用于接触式与白光干涉测头的坐标统一。

在数据融合方面,研究人员利用不同传感器测量工件的不同区域,并将各传感器的测量数据整合到同一坐标系中,拼接得到被测件的完整模型,还有针对不同测头对相同区域的测量数据进行融合。例如,使用贝叶斯方法向每个数据引入权重来平衡噪声参数,并结合加权最小二乘法进行多传感器数据融合^[20];将数据集分解为不同尺度的子数据集,并借助高斯模型基于加权平均法进行数据融合^[21];以及使用高斯过程建模的数据融合方法^[22-23]。然而,上述方法计算的复杂度较高,当涉及大量数据时,处理时间极为漫长。综上,现有的数据融合方法均未针对坐标统一误差对数据融合精度的影响展开研究。

针对现有标定器无法满足接触式与白光干涉测头坐标统一的问题,本文设计并制作了一种新型标定器,利用该标定器提供的基准点结合单位四元数法求解空间变换矩阵进行坐标统一,以均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来评估坐标统一的效果。同时,建立了基准点精度与坐标统一精度的关系模型。最后,针对两种测头的测量数据,提出了空间误差椭球搜索策略结合加权最小二乘法的数据融合方法。实验表明,该方法可实现高精度的坐标统一与精确稳定的数据融合。

2 原理

2.1 单位四元数法的坐标统一

如图 1 所示,接触式与白光干涉测头的坐标系分别为 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 和 $O_Q-X_Q Y_Q Z_Q$ 。将两个测头的坐标统一化,是数据融合的先决条件。

坐标统一的过程主要是确定两个坐标系之间的最优旋转矩阵 R 与平移向量 T ,其坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_Q \\ Y_Q \\ Z_Q \end{bmatrix}_{O_Q} = SR \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_{O_P} + T + E, \quad (1)$$

其中 E 为坐标统一化配准的误差矩阵。通过标定和校准接触式测头和白光干涉测头,使得缩放系数 $S=1$ 。

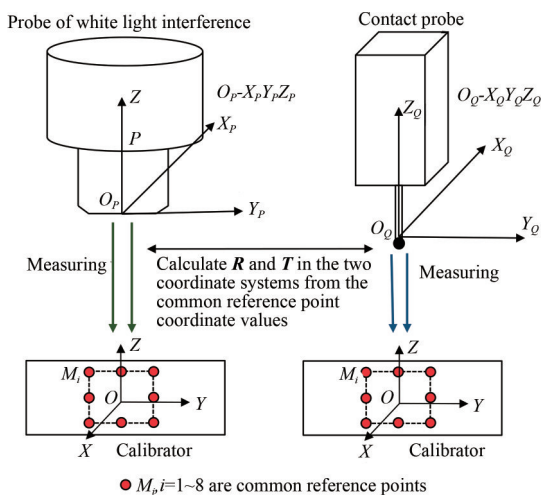


图 1 接触式与白光干涉测头坐标统一示意图

Fig. 1 Schematic diagram for coordinate unification of contact and white light interferometric probes

图 2 为标定器结构参数示意图。标定器是在量块的基础上,在中央测量表面上加工 8 个特征孔,作为接触式与白光干涉测头的测量特征,然后以特征孔的上端面圆心作为坐标统一基准点。

图 3 为基于标定器的坐标统一流程。通过两个测头分别对标定器的特征孔进行 n 组测量,利用最小二乘法拟合点云圆心得到上端面的孔心坐标作为基准点,然后取均值得到各自坐标系下的基准点集 $\{P_i\}_{i=1}^8$ 和 $\{Q_i\}_{i=1}^8$,运用单位四元数法完成坐标统一。

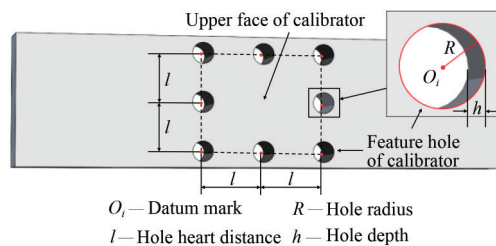


图 2 标定器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibrator

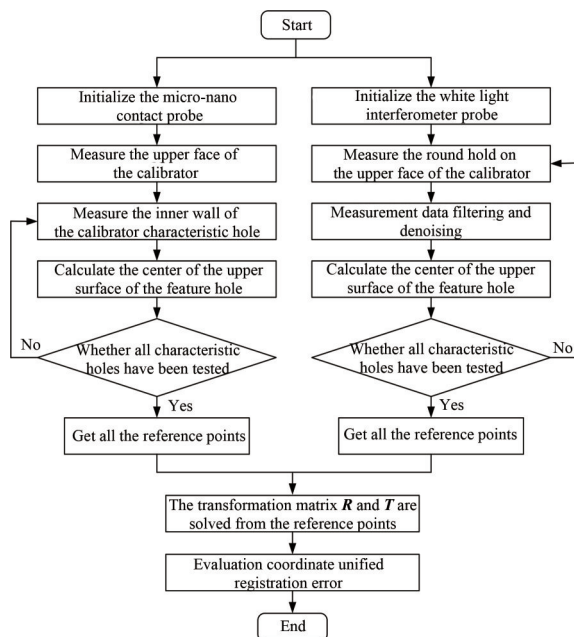


图 3 坐标统一流程

Fig. 3 Flowchart for coordinate unification

单位四元数法使用 4 个参数(1 个实部和 3 个虚部)描述旋转,在运算时不会产生万向锁问题。可利用四元数法计算基准点,解算旋转矩阵 R 和平移向量 T ,以精确获得坐标系的变换位姿参数,具体过程如下:

步骤一:将各自基准点集中的每个点减去其质心进行去中心化,得到去中心化后的点集 P'_i 和 Q'_i ,并构建 3×3 矩阵,得到:

$$M = \sum_{i=1}^n P'_i Q_i'^T, \quad (2)$$

其中: $n=8$, P'_i 和 Q'_i 都是 3×1 的向量, $P'_i Q_i'^T$ 为外积矩阵。

步骤二:构建四元数相关的 4×4 矩阵 K :

$$K = \begin{pmatrix} \text{tr}(M) & \Delta^T \\ \Delta & M + M^T - \text{tr}(M) I_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中: $\text{tr}(\mathbf{M})$ 为矩阵 $\mathbf{M}$ 的迹, $\mathbf{I}_3$ 为 3×3 的单位矩阵, $\mathbf{\Delta}$ 为 $\mathbf{M}$ 的反对角元素构成的向量, $\mathbf{\Delta}$ 为:

$$\mathbf{\Delta} = \begin{pmatrix} M_{23} - M_{32} \\ M_{31} - M_{13} \\ M_{12} - M_{21} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

步骤三: 求解旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 。计算矩阵 $\mathbf{K}$ 的最大特征值所对应的单位特征向量, 作为最优的单位四元数 $\mathbf{q} = [q_w, q_x, q_y, q_z]$, 则 $\mathbf{R}$ 为:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_y^2 + q_z^2) & 2(q_x q_y - q_w q_z) & 2(q_x q_y + q_w q_z) \\ 2(q_x q_y + q_w q_z) & 1 - 2(q_x^2 + q_z^2) & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z - q_w q_y) & 2(q_y q_z + q_w q_x) & 1 - 2(q_x^2 + q_y^2) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

步骤四: 求解平移向量 $\mathbf{T}$, 得到:

$$\mathbf{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{Q}_i - \mathbf{R} \mathbf{P}_i). \quad (6)$$

得到 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 后, 根据式(1)将接触式测头坐标系下的测量值转换到白光干涉测头坐标系下, 坐标统一变换关系如图 4 所示。

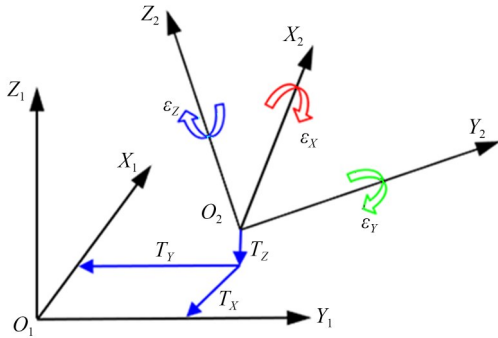


图 4 坐标系变换示意图

Fig. 4 Scheme of coordinate system transformation

最后, 根据转换后的接触式测头所测基准点的坐标值, 与白光干涉测头所测基准点的坐标值, 用 RMSE 来评价坐标统一化配准精度, 即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (r_{ix}^2 + r_{iy}^2 + r_{iz}^2)}{3n}}, \quad (7)$$

其中: r_{ix} , r_{iy} 和 r_{iz} 分别表示第 i ($i=1 \sim 8$) 个基准点在 X , Y 和 Z 方向上的误差。在坐标转换时最少需要空间中 3 个不共线的基准点才可以完成坐标统一, 本文设计标定器提供 8 个基准点以对测量误差进行平均, 提高坐标统一的精度。RMSE 越小, 表示转换后的坐标与真实坐标的差异越小,

坐标统一的精度越高, 反之则越低。

2.2 改进的加权最小二乘法数据融合

数据融合的核心目标不仅是统一两组数据的坐标, 而且要保持被测物体的几何特征, 通过将不同来源的多组数据结合生成光滑无噪点的几何模型, 并构成一组作为最终测量输出的数据。融合时首先要选取融合对象, 确定需融合测量数据中的对应点。当坐标统一将两个测头的测量数据对齐后, 理论上, 接触式测头的每个测量点 P_i 的最近邻点即为白光干涉仪数据集 Q 中的对应点 Q_i 。但由于坐标转换的误差, 两测头数据的对应点并非真实形貌的对应区域。在点 P_i 附近的坐标统一误差 RMSE 范围内形成一个空间误差椭球, 如图 5 所示。

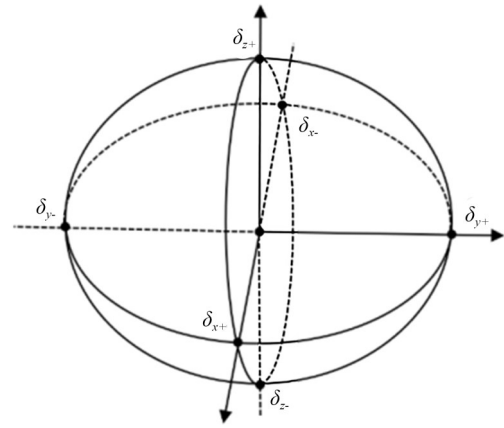


图 5 空间误差椭球示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spatial error ellipsoid

传统的数据融合方法首先检索 P_i 在目标点云 Q 中的最近邻点作为对应点进行数据融合, 但由于 P_i 的真实位置在三维空间中是以误差椭球为范围波动的, 这一误差域会导致检索的对应点结果不准确。为解决这一问题, 本文以坐标转换的误差 RMSE 作为点 P_i 在目标点云 Q 中搜索对应点的范围, 使用 KD 树算法搜寻 P_i 在 Q 的误差空间椭球范围内的所有点作为 P_i 的对应点集, 并取对应点集的质心作为 P_i 在目标点云中的对应点进行数据融合, 以减小坐标统一误差对数据融合对应点索引的影响。

质心 Q'_i 为:

$$Q'_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Q_k, \quad (8)$$

其中: m 为索引点的数量, m 的大小与对应点搜寻

的空间范围和目标点云 Q 的点云密度有关。

在数据融合时,首先要确定权重关系。对接触式测头数据集 P 中每个点为 $P_i(x_p, y_p, z_p)$,其 x, y, z 向的标准差分别为 $\sigma_{x_p}, \sigma_{y_p}, \sigma_{z_p}$; P_i 在白光干涉测头数据集 Q 中的对应点为 $Q'_i(x_q, y_q, z_q)$,其 x, y, z 向的标准差分别为 $\sigma_{x_q}, \sigma_{y_q}, \sigma_{z_q}$ 。设点 P_i 与点 Q'_i 的精度权重分别为 W_1 和 W_2 ,则:

$$W_1 = \text{diag}\left(\left[\frac{1}{\sigma_{x_p}^2}, \frac{1}{\sigma_{y_p}^2}, \frac{1}{\sigma_{z_p}^2}\right]\right), \quad (9)$$

$$W_2 = \text{diag}\left(\left[\frac{1}{\sigma_{x_q}^2}, \frac{1}{\sigma_{y_q}^2}, \frac{1}{\sigma_{z_q}^2}\right]\right). \quad (10)$$

然后,构建最小二乘目标函数。设 P_i 与 Q'_i 融合后得到的点为 $R_i(x_R, y_R, z_R)$,则可根据 P_i 和 Q_i 分别与 R_i 的残差加权平方和来构建最小二乘目标函数 E :

$$E = (P_i - R_i)W_1(P_i - R_i)^T + (Q_i - R_i)W_2(Q_i - R_i)^T. \quad (11)$$

令目标函数对 R_i 的偏导为零使 E 最小,即可求解出融合后 R_i 的最优加权最小二乘解,即:

$$\frac{\partial E}{\partial R_i} = -2[(P_i - R_i)W_1 + (Q_i - R_i)W_2] = 0. \quad (12)$$

可计算出融合点 $R_i(x_R, y_R, z_R)$ 坐标的最小二乘估计值为:

$$\begin{cases} x_R = \frac{\sigma_{x_q}^2 x_p + \sigma_{x_p}^2 x_q}{\sigma_{x_p}^2 + \sigma_{x_q}^2} \\ y_R = \frac{\sigma_{y_q}^2 y_p + \sigma_{y_p}^2 y_q}{\sigma_{y_p}^2 + \sigma_{y_q}^2} \\ z_R = \frac{\sigma_{z_q}^2 z_p + \sigma_{z_p}^2 z_q}{\sigma_{z_p}^2 + \sigma_{z_q}^2} \end{cases}. \quad (13)$$

3 标定器设计

3.1 标定器结构与尺寸参数设计

图 6 所示为标定器加工实物。 O_i 为标定器特征孔与上端面相交圆的圆心,作为标定器所提供的坐标统一基准点。 R 为加工的特征孔的半径,考虑到白光干涉测头在 20 倍物镜下单次扫描面积为 $0.83 \text{ mm} \times 0.83 \text{ mm}$,需要一帧的扫描面积完整地包含孔上表面的形貌区域,同时更大的孔的半径可使加工难度与成本更低。在保证孔在

白光测头扫描范围内的前提下,标定孔设计为直通孔,孔径为 $650 \mu\text{m}$,即半径 R 为 $325 \mu\text{m}$,可兼顾白光测头扫描面积与接触式测头的测量便利性。 $l=2.5 \text{ mm}$ 为特征孔的孔心间距,特征孔等距离排列。 $h=3 \text{ mm}$ 为标定器高度,提供一定的质量与体积,便于测量时的装夹。标定孔的加工采用打孔后研磨、抛光等处理方式,孔口无倒角且去除毛刺,标定器表面质量达到 00 级量块的标准,孔口的圆度误差要求小于 $1 \mu\text{m}$ 。

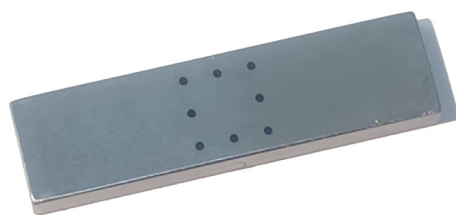


图 6 标定器实物

Fig. 6 Physical photograph of calibrator

3.2 基准点精度对坐标统一精度的影响

接触式与白光干涉测头的坐标统一基准点集分别为 $\{M_i\}$ 和 $\{N_i\}$,旋转矩阵和平移向量分别为 R 和 T 。对于任何给定的对应点 M_i 和 N_i ,变换后的点 M_i'' 为: $M_i'' = RM_i + T$ 。

由式(7)可知 RMSE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|(RM_i + T) - N_i\|_2^2}. \quad (14)$$

两组基准点会因误差产生的变动而偏离真实点,设点集 $\{M_i\}$ 和 $\{N_i\}$ 的标准差分别为 σ_{M_i} 和 σ_{N_i} 。在两者均含有误差的情况下,根据戴明回归的思想,将 $\{N_i\}$ 的误差合成到 $\{M_i\}$ 上,此时可视 $\{N_i\}$ 为理想点,分析基准点集 $\{M_i\}$ 的变动对坐标统一精度的影响。传递后 $\{M_i\}$ 的方差 $\sigma_{M_i'}^2$ 为:

$$\sigma_{M_i'}^2 = \frac{\sigma_{M_i}^2 \sigma_{N_i}^2}{\sigma_{M_i}^2 + \sigma_{N_i}^2}. \quad (15)$$

当一组对应点中的某点 M_k 发生变化,变为 $M_k + \Delta M_k$,其中 $\Delta M_k = (\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k)$,则变换后的点为:

$$M_k'' = R(M_k + \Delta M_k) + T. \quad (16)$$

这会改变原始对应点间的欧氏距离 d_k ,因而也会影响坐标统一精度 RMSE。新对应点间的

欧氏距离平方 $d_k'^2$ 为:

$$d_k'^2 = \|R(M_k + \Delta M_k) + T - N_k\|_2^2. \quad (17)$$

即:

$$d_k'^2 = d_k^2 + 2(M_k'' - N_k) \cdot (R\Delta M_k) + \|R\Delta M_k\|_2^2. \quad (18)$$

旋转矩阵 R 不改变向量的长度,因此 $\|R\Delta M_k\|_2 = \|\Delta M_k\|_2$, 新的 RMS 为:

$$RMSE' = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i'^2 + 2(M_k'' - N_k) \cdot (R\Delta M_k) + \|\Delta N_k\|_2^2)}. \quad (19)$$

由此可知,均方根误差 $RMSE'$ 和 $RMSE$ 的差值取决于 $(M_k'' - N_k) \cdot (R\Delta M_k)$, 以及 $\|\Delta M_k\|_2$ 。如果 ΔM_k 沿 $(M_k'' - N_k)$ 的方向,会最大化点积以增加 $d_k'^2$, 此时基准点的变动对坐标统一精度的影响最大。如果 ΔM_k 垂直于 $(M_k'' - N_k)$ 的方向,则 $(M_k'' - N_k) \cdot (R\Delta M_k)$ 的影响为零,影响只来自 $\|\Delta M_k\|_2$ 的平方。因此,基准点精度对坐标统一精度的影响取决于 ΔM_k 的变化, ΔM_k 的变化量较大会导致 $RMSE'$ 显著增大。

使用解析法无法得出基准点精度对坐标统一精度的具体影响。在分析其影响因素后,使用蒙特卡洛仿真法,通过大规模的仿真数据模拟采样测量,估计基准点精度对坐标统一的误差 $RMSE$ 的影响。基准点的理论位置是已知的,但是由于测量误差、加工误差等因素的影响,实际坐标可能会偏离理论值。确定所有不确定来源对基准点坐标影响遵循的概率分布,使用伪随机数生成器产生代表不确定性的随机数作为测量误差。每一组随机数代表一个可能的状态,用来模拟基准点的实际坐标,并多次抽取样本,通过大量模拟进行结果分析。

将设计的标定器 CAD 模型转换为点云格式并提取其特征孔的上表面圆心模拟接触式测头坐标系下的基准点集 M 。将点集 M 绕 X, Y 和 Z 轴各旋转 30° 施加旋转变换,并沿 X, Y 和 Z 轴正向施加 $100 \mu\text{m}$ 的平移变换,以模拟白光干涉测头坐标系的基准点 N 。对于基准点集 M 和 N , 有已知的旋转矩阵 R 和平移向量 T , 对初始基准点集 M 中各点的单向坐标分别引入标准差为 $0.5, 1.0, 1.5$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 的噪声,得到合成点标准差为 $0.87, 1.73, 2.60$ 和 $3.46 \mu\text{m}$ 的数据集。对每组误差进行 20 次重复采样实验,并分析基准点坐标值的变动 $\Delta X, \Delta Y$ 与 ΔZ 对 $RMSE$ 计算结果的影响,仿真结果如表 1 所示。 $RMSE$ 随着基准点坐标值的测量误差增大,当误差符合高斯分布时, $RMSE$ 的值总体上为基准点合成标准差的 35%。

表 1 坐标统一误差的仿真结果

Tab. 1 Simulation results for coordinate unification error (μm)

Reference point error	RMSE	
	Mean value	Standard deviation
0.87	0.30	0.03
1.73	0.62	0.04
2.60	0.94	0.07
3.46	1.19	0.09

4 实验测试与结果分析

使用自主研发的微纳米三坐标测量机和 Talysurf CCI 9000 白光干涉仪,对上述复合测量的坐标统一与数据融合方法进行实验测试。仪器的参数指标如表 2 所示。

表 2 测量仪器的参数指标

Tab. 2 Parameter indicators of measuring instrument

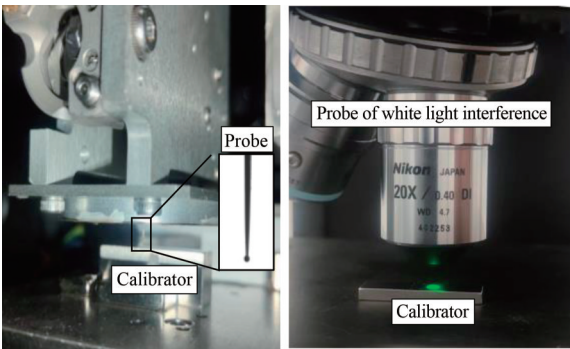
Measuring equipment	Measuring range	Lateral resolution	Axial resolution	Repetition
Micro-nanometric CMM	20 mm × 20 mm × 10 mm	1 nm	1 nm	20 nm
White-light interferometer	0.83 mm × 0.83 mm × 100 μm	0.35 μm	0.01 nm	0.03 nm

图 7 为实验测试装置。使用接触式测头分别测量标定器的上端面(测量范围为 $8 \text{ mm} \times 8$

mm)与所有特征孔,对每个孔以 $100 \mu\text{m}$ 的高度差测量 4 圈,每圈 8 个点,位置呈 45° 圆周分布。

拟合每圈测量数据的空间圆心,通过圆心拟合孔的轴线,计算轴线与上端面的交点为一个基准点,对所有孔执行相同操作得到接触式测头坐标系下的一组基准点集。为保证精确度,共进行 6 组重复测量,并取 6 组基准点坐标的平均值作为最终接触式测头的基准点集,其坐标值与标准差见表 3。

使用白光干涉测头对标定器上端面的所有特征孔逐一扫描测量,并拟合测量数据得到特征孔在上端面圆的圆心坐标,作为白光干涉测头坐标系下的一组基准点集,共进行 6 组重复测量,并取 6 组基准点坐标的平均值作为最终白光干涉测头的基准点集,其坐标值与标准差见表 4。由于白光干涉测量数据含有较多的离群噪声点,这会对拟合结果产生较大影响,故需要进行滤波处



(a) 接触式测头
(a) Contact probe

(b) 白光干涉测头
(b) White light interferometer probe

图 7 接触式测头测量与白光干涉测头测量装置
Fig. 7 Experimental setup for contact probe measurement and WLI probe measurement

理,图 8 所示为滤波前后的标定孔点云,经滤波后离群噪声点明显减少。

表 3 接触式测头基准点的坐标及标准差

Tab. 3 Reference point coordinate values and their standard deviations for contact probe (μm)

Serial number	Reference point coordinates			Coordinate fit standard deviation		
	X	Y	Z	σ_x	σ_y	σ_z
1	-12.496	0.674	-304.783	0.036	0.045	0.081
2	-2 516.442	-15.390	-304.232	0.029	0.031	0.086
3	-5 019.180	-25.701	-303.896	0.046	0.058	0.096
4	-5 037.824	2 483.494	-301.455	0.078	0.069	0.116
5	-40.856	2 515.145	-302.141	0.054	0.044	0.101
6	-60.129	5 007.533	-299.679	0.047	0.032	0.097
7	-2 563.800	4 990.515	-298.652	0.053	0.051	0.088
8	-5 063.001	4 979.432	-297.724	0.064	0.057	0.093
Mean of standard deviation				0.051	0.048	0.095

表 4 白光干涉测头基准点的坐标及标准差

Tab. 4 Reference point coordinate values and their standard deviations for white light interferometric probe (μm)

Serial number	Reference point coordinates			Coordinate fit standard deviation		
	X	Y	Z	σ_x	σ_y	σ_z
1	56 887.944	22 364.079	4 630.804	0.516	0.617	0.070
2	54 385.116	22 389.236	4 631.281	0.515	0.550	0.076
3	51 883.093	22 413.602	4 631.839	0.308	0.616	0.105
4	51 901.004	24 923.604	4 634.023	0.586	0.455	0.104
5	56 902.172	24 877.844	4 633.327	0.335	0.471	0.095
6	56 919.842	27 369.445	4 635.912	0.291	0.487	0.062
7	54 416.628	27 394.744	4 636.862	0.202	0.360	0.065
8	51 917.543	27 420.477	4 637.753	0.317	0.296	0.031
Mean of standard deviation				0.384	0.482	0.076

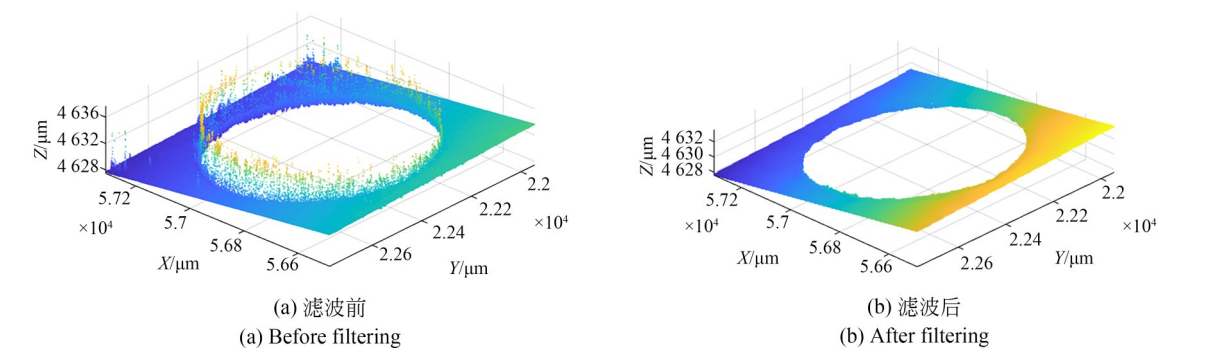


图 8 滤波前后白光干涉扫描的标定孔数据

Fig. 8 WLI scanning calibration hole data before and after filtering

将接触式与白光干涉测头各自坐标系下的基准点坐标代入单位四元数法,计算出两个坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T 分别为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9998779 & -0.0156231 & -2.98104e^{-6} \\ 0.0156231 & 0.9998753 & -0.0023036 \\ 3.24436e^{-6} & 1.68293e^{-5} & 0.9999873 \end{bmatrix},$$
$$T = [56910.643 \quad 22362.805 \quad 4935.579]^T.$$

通过式(9)来评估两坐标系的坐标统一精度,计算结果如表 5 所示。坐标统一配准精度的 RMSE 为 1.889 μm ,它在 X 方向的分量为 1.199 μm , Y 方向的分量为 1.457 μm , Z 方向的分量为 0.076 μm 。

最后,进行数据融合实验。利用上述实验计算出的旋转矩阵 R 和平移向量 T 将两测头的坐标系统一后,通过数据融合实现两测头测量精度的优势互补,发挥白光干涉测头 Z 向的高精度,并以接触式测头 X,Y 向的精度来弥补白光测头横向精度较低的劣势。

标定器的端面为零级量块的表面质量,出厂标称平面度误差为 200 nm,以标定器端面为被测特征来验证改进的加权最小二乘数据融合方法。使用白光干涉测头对标定器上端面尺寸为 4.15 mm $\times$ 4.15 mm 的区域进行连续扫描得到其三维形貌。再使用接触式测头对此平面区域进行

取点测量,取点方式为 9 $\times$ 9 的网格布点。共进行 6 组重复测量,测量方式与布点符合 GB/T 11337-2004 规定^[24]。对每个接触式测量数据点以坐标统一 RMSE 值为半径索引白光扫描平面中的对应点,并求解索引范围内所有点的质心作为对应点。对每组对应点分别用传统的加权最小二乘法数据融合与本文提出的改进加权最小二乘法数据融合方法进行处理。最后,对两种方法处理的融合数据进行平面度拟合,计算得到的平面度误差如表 6 所示。实验结果表明,改进的数据融合方法相比于传统方法的数据相对误差减小了 16%,重复性精度提高了 38%。

表 6 使用传统和改进的加权最小二乘法得到的平面度

Tab. 6 Flatness obtained using traditional and improved weighted least squares methods (nm)

组	传统方法	改进方法
1	246	188
2	171	151
3	317	263
4	295	249
5	156	212
6	335	271
Relative error	27%	11%
Standard deviation	69	43

表 5 坐标统一配准精度

Tab. 5 Accuracy of system scale calibration (μm)

Precision	RMSE	X-compo- nent	Y-compo- nent	Z-compo- nent
Value	1.889	1.199	1.457	0.076

5 结 论

本文针对微纳米接触式测头与白光干涉测头复合测量过程中坐标统一与数据融合的问题,

提出了基于标定器提供基准点并结合单位四元数法的坐标统一方法。设计并制作了可用于复合测量坐标统一的孔板标定器,分析了基准点精度对坐标统一精度的影响。提出了空间误差椭圆搜索策略结合的改进加权最小二乘数据融合方法。采用微纳米三坐标测量机与白光干涉仪进行了测头坐标系统一化与数据融合实验,坐标

统一化配准精度为 $1.889\ \mu\text{m}$,改进的数据融合方法相较传统加权最小二乘法的相对误差减小了 16%,重复性精度提高了 38%。本文方法实现了微纳米接触式测头与白光干涉测头复合测量过程中高精度坐标统一与稳定精确的数据融合,未来将对有这两种测头复合测量需求的零件进行具体的应用与数据融合。

参考文献:

- [1] 谭久彬. 超精密测量与高端装备制造质量[J]. 中国工业和信息化, 2020(6): 18-23.
TAN J B. Ultra-precision measurement and manufacturing quality of high-end equipment[J]. *China Industry & Information Technology*, 2020(6): 18-23. (in Chinese)
- [2] WAURZYNIAK P. Multisensor systems ramp up—Faster processors, improved accuracyspur multisensor adoption [J]. *Manufacturing Engineering*, 2003, 130(6): 2-7.
- [3] SINGH P, WU Y Y, KAUCIC R, *et al.* Multimodal industrial inspection and analysis[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2007, 7(1): 102-107.
- [4] 余俊, 王占山, 黄秋实, 等. 极紫外及 X 射线波段超光滑反射镜的超精密加工与检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2688-2697.
YU J, WANG ZH SH, HUANG Q S, *et al.* Ultra-precision machining and testing of reflector mirrors for extreme ultraviolet and X-ray[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(21): 2688-2697. (in Chinese)
- [5] ZHANG F M, QU X H, YE S G. Multiple sensor fusion in large scale measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008; 16(7): 1236-1240.
- [6] YU Z Q, WANG T Y, WANG P, *et al.* Rapid and precise reverse engineering of complex geometry through multi-sensor data fusion[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 165793-165813.
- [7] FANG C, SHAO W F, YONG S L. Research on optical measurement for additive manufacturing surfaces[C]. *Chengdu, China*, 2017.
- [8] DONG Y C, LI Z X, ZHU L L, *et al.* Topography measurement and reconstruction of inner surfaces based on white light interference[J]. *Measurement*, 2021, 186: 110199.
- [9] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machines* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [10] FAN K CH, LI R J, XU P, *et al.* Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machines[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2(1): 1-15.
- [11] 王祎雯. 多测头数据融合与协作测量中的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
WANG Y W. *Research on Key Technologies in Multi-probe Data Fusion and Collaborative Measurement* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [12] WANG J, LEACH R K, JIANG X. Review of the mathematical foundations of data fusion techniques in surface metrology[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2015, 3(2): 023001.
- [13] SADAoui S E, MEHDI-SOUZANI C, LAR-TIGUE C. Multisensor data processing in dimensional metrology for collaborative measurement of a laser plane sensor combined to a touch probe[J]. *Measurement*, 2022, 188: 110395.
- [14] 王德元, 唐文彦, 张晓琳, 等. 基于标准器的大尺寸测量系统坐标统一化方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1845-1852.
WANG D Y, TANG W Y, ZHANG X L, *et al.* Coordinate unification method in large scale metrology system based on standard artifact[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(8): 1845-1852. (in Chinese)
- [15] DE CHIFFRE L, HANSEN H N, MORACE R E. Comparison of coordinate measuring machines using an optomechanical hole plate[J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 479-482.
- [16] 赵炎. 坐标测量机的多传感器高精度测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.

- ZHAO Y. *Research on Key Technology of Multi-sensor High-precision Measurement of Coordinate Measuring Machine*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [17] SŁADEK J, BŁASZCZYK P M, KUPIEC M, *et al.* The hybrid contact-optical coordinate measuring system [J]. *Measurement*, 2011, 44 (3) : 503-510.
- [18] ZHANG F M, GE R Y, ZHAO Y, *et al.* Multi-sensor registration method based on a composite standard artefact [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106205.
- [19] 位恒政, 王为农, 裴丽梅, 等. 用于多传感器坐标测量机探测误差评价的薄环规标准器[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 521-525.
- WEI H ZH, WANG W N, PEI L M, *et al.* Thin ring gauge artifact for probing error evaluation of multi-sensor coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3) : 521-525. (in Chinese)
- [20] FORBES A B. Weighting observations from multi-sensor coordinate measuring systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23 (2) : 025004.
- [21] REN M J, SUN L J, LIU M Y, *et al.* A reconstruction - registration integrated data fusion method for measurement of multiscaled complex surfaces [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(3) : 414-423.
- [22] WANG S X, CHEUNG C F, LIU M Y. A fiducial-aided data fusion method for the measurement of multiscale complex surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(1): 1381-1389.
- [23] DING J, LIU Q, BAI M X, *et al.* A multisensor data fusion method based on Gaussian process model for precision measurement of complex surfaces [J]. *Sensors*, 2020, 20(1): 278.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 平面度误差检测: GB/T 11337—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Measurement of departures from flatness: GB/T 11337—2004* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)

作者简介:



程真英(1980—),女,江苏人,副教授,硕士生导师,主要从事误差理论和不确定评定的研究。E-mail: chengzhenying01@hfut.edu.cn

通讯作者:



李瑞君(1976—),男,内蒙古人,教授,博士生导师,主要从事微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统及精密控制技术与系统的研究。E-mail: rj-li@hfut.edu.cn



徐东见(1997—),男,安徽人,硕士研究生,2021年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事多传感器数据融合的研究。E-mail: 2021110034@mail.hfut.edu.cn