

文章编号: 1002-1582(2025)05-0541-08

等倾角线快速跟焦的激光差动共焦自由曲面测量方法

徐蓓, 唐颖奇*, 董航舟, 王允

(北京理工大学 光电学院 复杂环境智能感测技术工信部重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 针对逐点扫描测量自由曲面时法向倾角变化所引入的非线性误差导致精度变差的问题, 提出了一种基于等倾角线快速跟焦的差动共焦自由曲面测量方法。方法利用改进的相干点漂移 (CPD) 配准算法, 解算被测自由曲面 (FSUT) 的精确位姿, 基于FSUT的精确位姿规划多条等倾角线; 通过传感器轴向扫描获取不同等倾角线上光强与离焦量的关系, 以轴向响应光强作为反馈沿等倾角线跟踪FSUT轮廓; 利用归一化差动共焦轴向响应光强与离焦量之间的非线性误差对小角度变化不敏感的特性, 通过沿等倾角线跟焦实现自由曲面快速扫描测量。实验结果表明, 所提方法的等倾角线跟踪误差为 $\pm 70\text{nm}$, 对离焦量计算精度的影响远小于差动共焦测量分辨力, 相较于传统差动共焦测量方法效率至少提升至5倍; 与ZYGO干涉仪数据点对点做差的面形峰谷 (PV) 值为 9nm , 均方根 (RMS) 值为 1nm , 实现了自由曲面的高精度、快速测量。

关 键 词: 自由曲面测量; 等倾角线快速跟焦; 差动共焦; 改进的CPD配准算法

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Freeform surface measurement method based on laser differential confocal with isoclinic line-based rapid focus tracking

XU Bei, TANG Yingqi*, DONG Hangzhou, WANG Yun

(MIT Key Laboratory of Complex-field Intelligent Exploration, School of Optics and Photonics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the issue of measurement accuracy degradation caused by varying nonlinear errors induced by normal inclination angle changes during point-by-point scanning of freeform surfaces, an isoclinic line-based rapid focusing differential confocal method for freeform surface measurement was proposed. The method utilizes an improved Coherent Point Drift (CPD) registration algorithm to calculate the precise pose of the Freeform Surface Under Test (FSUT). Based on the precise pose of the FSUT, multiple isoclinic lines are planned. By performing axial scanning with the sensor, the relationship between light intensity and defocus amount on different isoclinic lines is obtained. The axial response light intensity is used as feedback to track the contour of the FSUT along the isoclinic lines. Leveraging the characteristic that the non-linear error between the normalized differential confocal axial response light intensity and defocus amount is insensitive to small angle changes, fast scanning measurement of freeform surfaces is realized by focusing along isoclinic lines. Experimental results show that the tracking error of the isoclinic lines in the proposed method is $\pm 70\text{ nm}$, which has a negligible impact on the calculation accuracy of defocus amount compared with the differential confocal measurement resolution. Compared with the traditional differential confocal measurement method, the efficiency is increased to at least 5 times higher; the Peak-to-Valley (PV) value of the surface profile obtained by point-to-point subtraction with ZYGO interferometer data is 9 nm , and the Root Mean Square (RMS) value is 1 nm , achieving high-precision and fast measurement of freeform surfaces.

收稿日期: 2025-04-12; 收到修改日期: 2025-05-25

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2023M740269)

作者简介: 徐蓓 (1999—), 女, 硕士研究生, 从事精密光学测量研究。1369685007@qq.com

唐颖奇 (1990—), 男, 博士后, 博士, 从事精密光电测量研究。

* 通讯作者: yingqi_t@163.com

Keywords: freeform surface measurement; isoclinic line - based rapid focusing; differential confocal method; improved CPD algorithm

0 引 言

相较于常规球面,自由曲面具有更多的设计自由度^[1],可有效校正光学系统的像差,改善光学系统的成像质量,推动光学系统向轻量化和集成化发展。目前,自由曲面已成功应用于光通讯、空间光学、紫外光刻等领域。然而,自由曲面的复杂特性也给它高精度检测带来了挑战,制约了其在高性能场景的规模化应用。

现有的自由曲面高精度测量方法主要包括干涉测量法、非干涉区域测量法和基于单点探针的轮廓测量法^[2]。干涉测量法包括零位检测法、非零位检测法和自适应零检测法。零位检测法依赖计算机生成的全息图补偿波前^[3,4],但其成本高且通用性差;非零位检测法无需零位调节,但在测量具有较大的非球面偏离度的自由曲面时误差较大^[5-7];自适应零检测法灵活性高,但可调范围有限,难以测量表面陡峭的自由曲面^[2,8]。非干涉区域测量法通过波前重建技术,无需校准波前畸变,主要包括夏克-哈特曼法^[9]和相位偏折法^[10],但前者仅适合测量表面倾角变化较小的样品,后者测量精度有限。

基于单点探针的轮廓测量法具有灵活性和高精度等特点,几乎可以测量任意类型的自由曲面。常用基于单点探针的轮廓仪包括 LUPHOScan 和 NANOMEFOS^[11]等。LUPHOScan 采用多波长干涉传感器,可倾斜跟踪表面法线^[12],但其传感器的曲面可测倾角测量范围小;NANOMEFOS 使用光谱共焦传感器,但仅在量程中点能保证分辨力,并且随着法向倾角的改变,两传感器的非线性误差都会增大。此外,Fu 等^[13]提出了一种结合激光差动共焦(Laser Differential Confocal, LDC)方法和法向轮廓自适应跟踪法的 FSUT 测量方法,实现了高精度测量。然而,该方法的测量效率受传感器轴向扫描的次数限制。此外,使用轮廓测量法测量曲面时,测量坐标系与设计坐标系的差异会产生对准误差,降低测量精度。

针对传统轮廓测量法中测量模型与设计模型存在对准误差、倾角差异会为系统引入非线性误差以及测量效率低等问题,本文提出一种基于等倾角线快速跟焦的激光差动共焦(Isoclinic Line-based Rapid Focusing Laser Differential Confocal, ILRF-LDC)自由曲面测量方法。该方法利用预扫

描配准获得 CAD 模型到被测自由曲面(Freeform Surface Under Test, FSUT)的变换矩阵,解算 FSUT 的精确位姿,显著降低对准误差;通过自由曲面的等倾角线扫描策略,有效抑制倾角不同带来的非线性误差;利用不同倾角下的归一化差动共焦轴向响应曲线动态追踪曲面不同位置的焦点,大大减少了传统 LDC 方法的传感器轴向扫描步骤,与 LDC 方法相比,测量效率提升至 5 倍。

1 基于 ILRF-LDC 的自由曲面测量原理

1.1 ILRF-LDC 自由曲面测量原理

ILRF-LDC 方法扫描测量 FSUT 的原理见图 1,扫描测量系统主要由宏位移导轨系统的 X、Y 和 Z 轴气浮导轨、微位移导轨系统的音圈电机以及差动共焦轴向响应传感器构成。测量 FSUT 表面轮廓时,宏位移导轨系统主要实现 FSUT 等倾角线轮廓的跟踪,微位移导轨系统负责轴向焦点跟踪。

ILRF-LDC 方法的测量原理如下:首先,利用差动共焦传感器协同宏微气浮导轨实现 FSUT 的预扫描,然后通过改进的相干点漂移(Coherent Point Drift, CPD)配准算法解算出 FSUT 和 CAD 模型的变换矩阵,获得精确的 FSUT 位姿;然后,基于 FSUT 的精确位姿构建等倾角线的分布模型;再通过各等倾角线起始位置的轴向扫描,获取不同倾角的归一化差动共焦轴向响应曲线;最后,利用光电探测器输出的光强信息,反演计算 FSUT 高度信息,进而驱动音圈电机执行焦点闭环追踪,完成系统沿不同等倾角线的跟焦扫描测量。

图 1 中,左侧代表整个测量系统,右侧代表音圈电机带动差动共焦传感器沿曲面等倾角线轨迹扫描的动态过程,拟合 I 表示系统沿拟合的归一化差动共焦轴向响应曲线跟焦。

1.2 预扫描配准的等倾角线规划原理

由于测量模型与设计模型通常不是一个坐标系,如图 2 所示,从而导致 FSUT 和 CAD 模型之间存在刚体变换,无法直接通过设计坐标系下的 CAD 模型规划等倾角线的扫描路径。因此,需要计算测量坐标系下的 FSUT 与设计坐标系下的 FSUT 之间的变换矩阵,即自由曲面的配准。传统迭代最近点算法^[14,15]实现简单,但配准效率低且计算量大^[16,17],故本文提出基于 3D-Harris 特征点检

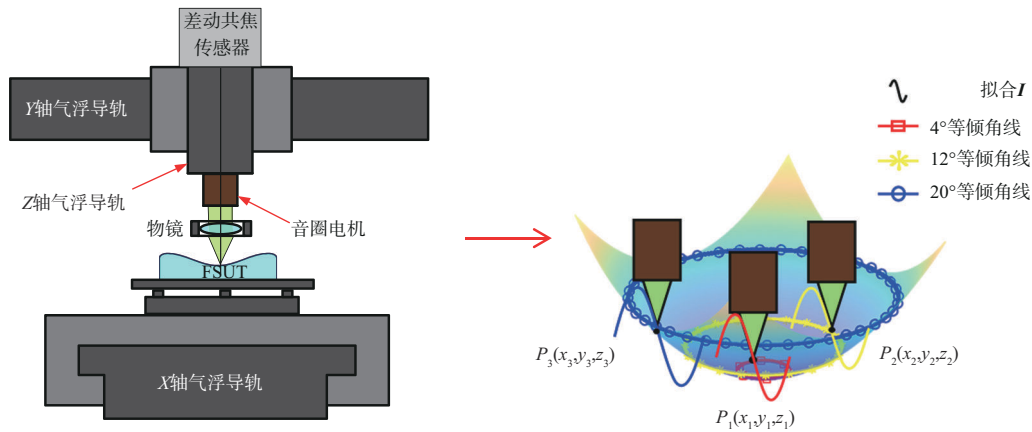


图1 ILRF-LDC方法测量原理

测^[18]的CPD配准算法,先提取特征点集降低数据规模,再通过CPD算法完成配准,显著提升计算效率。

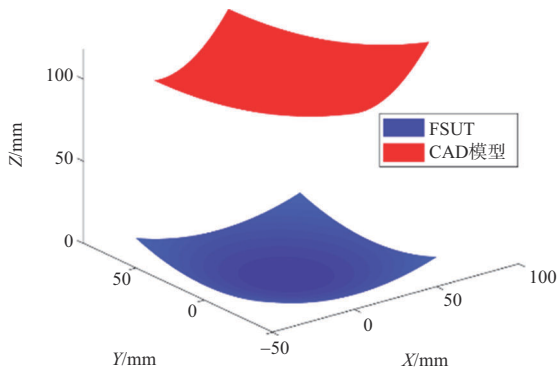


图2 FSUT和CAD模型相对位置

CPD算法是一种基于运动一致性约束,通过最大似然估计来实现最优匹配的点云配准方法。为提高配准效率,需从预扫描FSUT得到的初始点集和CAD模型点集中分别提取关键点集。具体流程如下:首先,将两个初始点集分别划分为网格,每个网格单元内包含若干点云数据。对于网格中的任意一点 x_k ,计算其在 j 邻域内点的法向量 n_j 的协方差矩阵

$$M = \frac{1}{|N(x_k)|} \sum_{n_j \in N(x_k)} n_j n_j^T \quad (1)$$

式中, $N(x_k)$ 为模型网格内的点云数量。

定义3D-Harris关键点检测函数

$$V(x_k) = \text{Det}(M) - \alpha \cdot \text{Tr}(M)^2 \quad (2)$$

式中, Det 表矩阵的行列式, Tr 表矩阵的迹, α 为特征点检测优化的超参数,常取值0.05。

然后,设置阈值 ϵ ,对满足 $V(x_k) > \epsilon$ 的点进行标记,通过迭代筛选生成最终关键点集 X, Y 。使用CPD算法进行点集配准时,将一组点集作为混合高斯模型的内核,另一组作为数据集,利用期望最大化(Expectation-Maximization, EM)算

法求解两组点集的对应关系,从而实现刚性配准。高斯混合模型的概率密度函数为

$$p(t) = \omega \frac{1}{j} + (1 - \omega) \sum_{x=1}^{i+1} \frac{1}{i} p(t|x) \quad (3)$$

$$p(t|x) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{\|t - X_x\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, t 为平移变量; ω 为溢出点的权重值,取值范围0到1; $p(t|x)$ 为高斯混合模型概率密度基函数; σ 为变换参数。

由最小负对数似然函数式得到

$$E(\theta, \sigma^2) = -\sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^{i+1} p(x) p(t|x) \quad (5)$$

使用EM算法求解 θ 和 σ^2 , θ 表示待优化的模型参数集合,包含了待配准点集的旋转矩阵 R ,平移矩阵 T 。EM算法包含两步:一是通过旧的分布模型参数计算后验概率分布

$$P^{\text{old}}(x|t_j) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \frac{t_j - T(X_x, \theta^{\text{old}})}{\sigma^{\text{old}}} \right\|^2\right) / \sum_{k=1}^i \exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \frac{t_j - T(X_x, \theta^{\text{old}})}{\sigma^{\text{old}}} \right\|^2\right) + (2\pi(\sigma^{\text{old}})^2)^{\frac{D}{2}} \frac{\omega}{1-\omega} \frac{i}{N} \quad (6)$$

二是通过极小化损失函数得到新的模型参数 θ 和 σ^2

$$\cos t(\theta, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{j=1}^N \sum_{x=1}^i P^{\text{old}}(x|t_j) \|t_j - T(X_x, \theta^{\text{old}})\|^2 + \frac{D}{2} \log \sigma^2 \sum_{j=1}^N \sum_{x=1}^i P^{\text{old}}(x|t_j) \quad (7)$$

重复上述步骤直至收敛时迭代停止,得到 θ 和 σ^2 的值,即可计算出FSUT的精确空间位姿数据。然后,基于FSUT的空间位姿数据构建等倾角线的分布模型,其原理如下

设曲面 $z=f(x, y)$ 上存在一点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$,其法向量 n_j 与 Z 轴的夹角定义为倾角 β_j , $\beta_j \in [0, \pi/2)$ 。曲面的等倾角线 $L(\beta_j)$ 表示满足倾角为 β_j 的所有

点构成的点集

$$L(\beta_j) = \{P_i(x_i, y_i, z_i) \in R^3 | \beta(P_i) = \beta_j, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

由向量夹角的公式知, 曲面在该点的倾角 β_j 可由该点的法向量 $\mathbf{n}_j = (f'_x, f'_y, -1)$ 与 Z 轴的单位向量计算得出

$$\cos \beta_j = \frac{|\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{k}|}{|\mathbf{n}_j| |\mathbf{k}|} = \frac{1}{\sqrt{(f'_x)^2 + (f'_y)^2 + 1}} \quad (9)$$

式中, $f'_x = \partial f / \partial x$, $f'_y = \partial f / \partial y$ 为曲面偏导数, $\mathbf{k} (0, 0, 1)$ 为 Z 轴的单位向量。

给定曲面的倾角参数集

$$B = \{\beta_j \in [0, \beta_{\max}] | \beta_j = j\Delta\beta, j = 1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

式中, $\Delta\beta = \beta_{\max} / M$ 为倾角采样间隔, $\beta_{\max}$ 为最大工作倾角。

对于任意倾角 β_j , 其对应的等倾角线可表示为点集

$$P_j = \{P_i^{(j)}(x_i, y_i, z_i) \in R^3 | \cos \beta_j = \frac{1}{\sqrt{(f'_x)^2 + (f'_y)^2 + 1}}, i = 1, 2, \dots, N_j\} \quad (11)$$

根据式 (9) 建立以 x 、 y 为自变量, 倾角参数 β_j 为因变量的三维曲面模型, 根据 β_j 的 M 个值提取该模型的等高线, 即为 M 条等倾角线。之后, 系统沿不同等倾角线顺序扫描, 获取 FSUT 的三维轮廓数据。

1.3 归一化差动共焦轴向响应曲线测量原理

系统沿曲面等倾角线扫描测量时, 需要根据归一化差动共焦轴向响应曲线进行跟焦, 归一化差动共焦轴向响应曲线的测量原理如图 3 所示。激光器发出的光经扩束器扩展光束直径, 再经分光镜 BS1 后等分为两路光, 一路直接进入分光镜

BS2, 另外一路进入测量物镜, 汇聚到被测曲面上, 这路携带曲面信息的光反射回分光镜 BS1, 然后经分光镜 BS2 后再等分成两路光, 两路光分别经汇聚镜再经针孔去除杂散光后分别被位于焦点前的探测器 1 和焦点后的探测器 2 捕捉。

定义焦点前、焦点后的光强分别为 I_A 和 I_B , 对于理想光学系统忽略像差的影响, 对两路轴向光强信号做差, 归一化后的光强为 I 。根据已知推论^[19], 得

$$I_A = \frac{\cos^4 \beta}{\cos^2 \beta + \frac{d_1}{d_2} \sin^2 \beta} \quad (12)$$

$$I_B = \frac{\cos^4 \beta}{\cos^2 \beta + \frac{d_1}{d_2} \sin^2 \beta} \cdot \left[\frac{\sin((u + (u + u_M) \cos \beta)/4)}{(u + (u + u_M) \cos \beta)/4} \right]^2 \quad (13)$$

式中, β 为倾角; d_1 为物镜焦距, d_2 为像镜焦距; u 为归一化后的离焦量; u_M 为归一化的针孔偏移量。那么归一化后的差动共焦光强信号为

$$I = \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \quad (14)$$

归一化离焦量与实际离焦量的关系为

$$u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f_c} \right)^2 z \quad (15)$$

式中, z 为实际离焦量; λ 为激光波长; D 为物镜的孔径; f_c 为物镜焦距。

取 $u_M = \pm 5.2$, 对式 (14) 进行仿真计算, 得到不同倾角下的归一化差动共焦轴向响应曲线, 如图 4 所示。

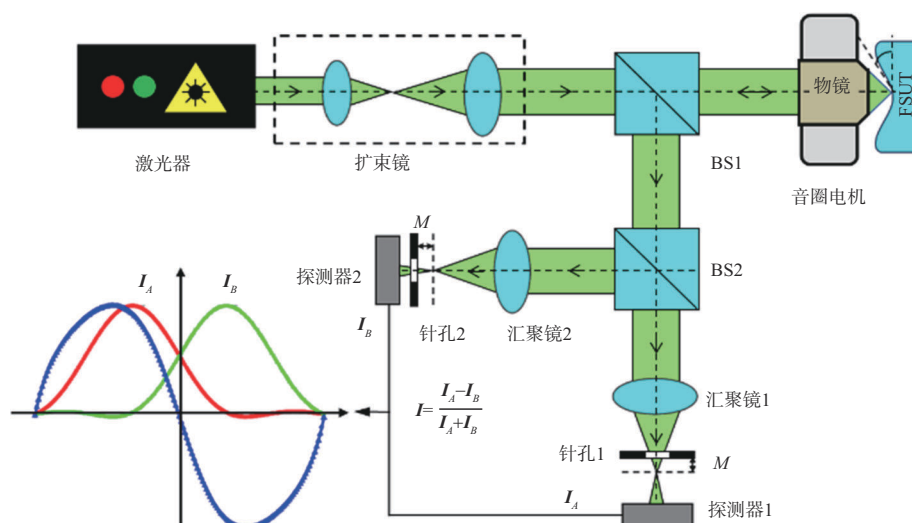


图 3 归一化差动共焦轴向响应曲线测量原理

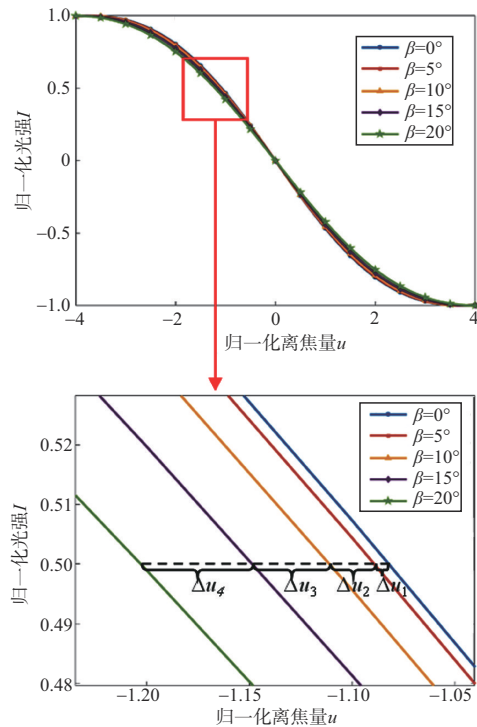


图4 归一化差动共焦轴向响应仿真曲线

由图4知，随着倾角增大，归一化离焦量非线性误差增大。当系统归一化光强为0.5且以0°等倾角线跟焦时，倾角从0°以5°的梯度增至20°，对应的归一化离焦量增量 Δu 和实际离焦量增量 Δz 的结果如表1所示。

表1 倾角变化所引入的离焦量非线性误差

倾角变化/(°)	0	5	10	15	20
Δu	0	0.007082	0.028902	0.066513	0.120711
$\Delta z/\text{nm}$	0	2.4	12.2	34.7	75.6

由表1知，倾角增大会导致离焦量的非线性误差增大。本文所提的基于等倾角线扫描的FSUT测量方法，可有效抑制因倾角变化引起的离焦量非线性误差，提高测量精度。

2 ILRF-LDC关键参数分析

2.1 等倾角线离焦量非线性误差分析

为分析ILRF-LDC方法测量曲面轮廓时，等倾角线上倾角跟踪误差对测量系统的影响，基于式(14)和(15)，建立了不同等倾角线上倾角变化量与离焦量非线性误差的关系，如图5所示。仿真结果表明：当倾角 $\beta \in [0^\circ, 20^\circ]$ 时，0.06°的倾角跟踪误差所引起的最大离焦量非线性误差为1.65nm，小于2nm的轴向分辨力，因此当倾角跟踪误差小于0.06°时，可忽略倾角扰动对系统离焦量非线性误差的影响。

在最大倾角为20.4°的二次曲面样品上，根据式(9)计算不同倾角线上倾角变化量 $\Delta\beta=0.06^\circ$ 时的理论跟踪误差的最小值。结果表明，在

$x,y \in [-50,50]\text{mm}$ 的测量范围内，系统全域跟踪误差的理论最小值约为145 μm ，本测量系统的跟踪误差能够达到理论要求。

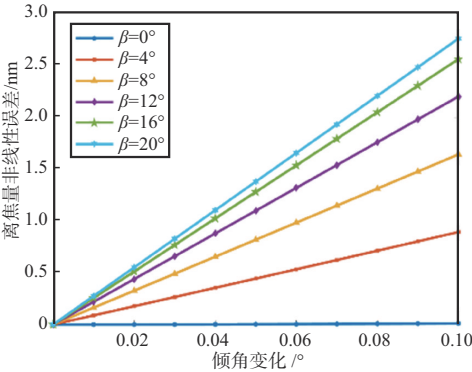


图5 不同等倾角线上倾角变化所引起的离焦量非线性误差

2.2 归一化差动共焦轴向响应曲线单调区间选择

在归一化差动共焦理论体系中，归一化差动共焦轴向响应拟合曲线的单调区间范围与系统的归一化离焦量非线性误差呈正相关关系。因此，为降低离焦量非线性误差的影响，需选择合适的单调区间范围^[20]。现对曲线进行三次多项式拟合，残差 e 作为曲线拟合的评价指标，可表示为

$$e=Y_{\text{actual}}-Y_{\text{predict}} \tag{16}$$

式中， Y_{actual} 表示观测值， Y_{predict} 表示预测值。

由图4知，当FSUT倾角 $\beta \in [0^\circ, 20^\circ]$ 时，归一化差动共焦轴向响应曲线的单调区间为 $[-3.7, 3.7]$ 。图6表示FSUT倾角为20°时，三次多项式拟合曲线在不同占比单调区间的归一化光强残差与归一化离焦量的关系图， n 表示单调区间宽度的占比。

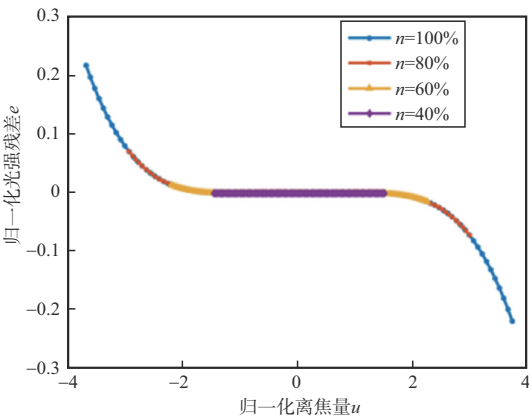


图6 不同单调区间拟合残差分布图

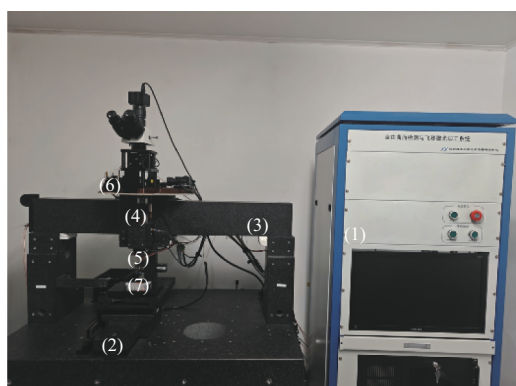
由图6知，当归一化离焦量一定时，单调区间占比越小，归一化光强的残差也越小。因此，在选择单调区间范围时，应在保证区间长度足够大的前提下，残差尽量小。综合分析后，选择单调区间总长度的60%，即 $[-2.22, 2.22]$ 作为最优工作区间，此时，最大归一化光强残差为0.014185，

根据式 (14) 和式 (15) 推出, 对应的最大离焦量变化约为 1.2nm, 其影响可忽略不计。

3 实验验证

3.1 ILRF-LDC 测量系统

基于 ILRF-LDC 原理, 在图 7 所示的 FSUT 测量系统上进行实验。测量系统包括计算机控制系统、宏微结合的精密气浮导轨系统 (包括 X 轴、Y 轴、Z 轴气浮导轨以及音圈电机)、差动共焦传感器系统等。



(1) 计算机控制系统 (2) X轴气浮导轨 (3) Y轴气浮导轨
(4) Z轴气浮导轨 (5) 气浮音圈电机 (6) 差动共焦传感器系统
(7) FSUT

图 7 ILRF-LDC 测量系统

本测量系统采用波长为 532nm 的半导体激光器, 配备数值孔径为 0.5, 焦距为 3.6mm, 放大倍数为 50× 的测量物镜。系统具备 150mm×150mm×50mm 的测量范围, 在 100μm 的行程内, 轴向测量频率可达 50Hz。

3.2 系统性能测试

3.2.1 系统轴向分辨率测试

为验证差动共焦传感器的轴向分辨率, 对系统进行轴向分辨率测试。将测量光束定焦在标准反射镜上, 使用驱动器控制音圈电机驱动物镜以 2nm 的间隔步进运动, 采集到的信号呈明显台阶状分布, 并且台阶的高度一致, 如图 8 所示。因此可认为系统的轴向分辨率为 2nm, 满足 FSUT 纳米级精度测量需求。

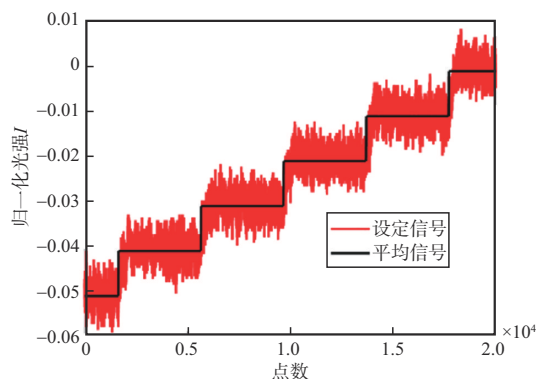


图 8 2nm 轴向分辨率测试结果

3.2.2 系统跟踪误差测试

为验证系统跟踪误差的大小, 利用气浮导轨以 4mm/s 的速度做幅值为 10mm、周期为 15.7s 的正弦运动, 系统的跟踪误差可达 ±70nm, 结果如图 9 所示。当 FSUT 为直径 $D=102\text{mm}$ 、最大倾角 20.4° 的二次曲面时, 根据式 (9) 及其数理表达式可推出, 此时 FSUT 倾角的跟踪误差小于 0.0001° , 远小于 0.06° , 因此本系统可忽略倾角扰动所引入的离焦量非线性误差。

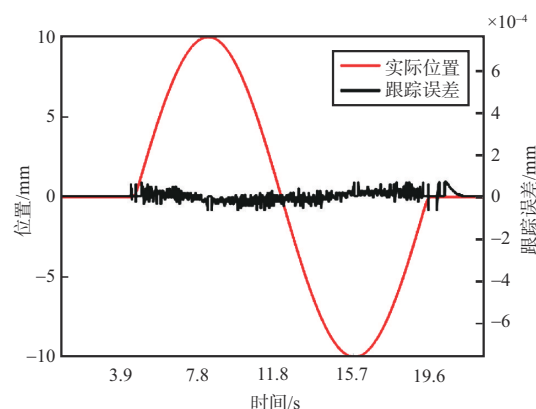


图 9 系统跟踪误差测试结果

3.2.3 归一化差动共焦轴向响应曲线测试

为验证系统在 FSUT 的不同倾角下对归一化差动共焦轴向响应曲线的测量能力, 选择样品 0° 、 5° 、 10° 、 15° 以及 20° 倾角的位置利用传感器进行轴向扫描, 分别获取不同倾角所对应的归一化差动共焦轴向响应曲线, 结果如图 10 所示。在不同倾角处重复测量 10 次, 并在最优工作区间评价其最大离焦量非线性误差、峰谷 (Peak to Valley, PV) 值以及标准差的值, 结果如表 2 所示。10 次测量结果表明, 系统在不同倾角的归一化差动共焦轴向响应曲线最大离焦量非线性误差约 13.5nm, 最大 PV 值为 7.8nm, 最大标准差为 1.6nm, 为高精度轴向跟焦提供重要保障。

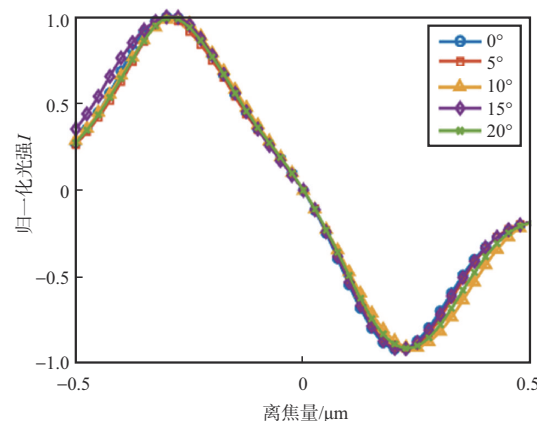


图 10 实测归一化差动共焦轴向响应曲线

表 2 不同倾角 10 次重复测量结果

倾角/(°)	离焦量非线性误差/nm	PV/nm	标准差/nm
0	13.5	6.5	1.5
5	12.7	5.5	1.2
10	8.5	6.3	1.5
15	13.5	6.9	1.4
20	10.2	7.8	1.6

3.3 FSUT 测量实验

为验证系统对 FSUT 的测量能力，选择直径 $D=102\text{mm}$ 、最大倾角 20.4° 的二次曲面样品进行测试。在样品 $0^\circ\sim20^\circ$ 的倾角范围内，以 2° 的间隔进行等倾角线扫描采样，扫描速度为 4mm/s 。为验证系统的高测量效率特性，选择 LDC 方法与本文所提方法进行对比，结果如表 3 所示。由表 3 可知，随着采样密度的增加，ILRF-LDC 方法的采样时间基本不变，而 LDC 方法明显增加，相比 LDC 方法其

测量效率的优势越来越明显。综合考虑，选择 5 点/mm 的采样密度对 1689mm 的全行程进行采样，LDC 方法全量数据采集需 2111s，ILRF-LDC 方法仅需 423s，测量效率提升至 5 倍。

表 3 两种方法测量效率对比

采样密度/(点/mm)	ILRF-LDC 方法 100mm 采样时间/s	LDC 方法 100mm 采样时间/s
1	25.1	45.1
2		65.2
5		125.3
10		225.6

为验证系统的高精度特性，选取 ZYGO 干涉仪与本系统对同一 FSUT 进行测量，ZYGO 干涉仪的面形残差结果如图 11 (a) 所示，ILRF-LDC 方法的面形残差结果如图 11 (b) 所示，两方法的点对点做差结果如图 11 (c) 所示，ILRF-LDC 方法 10 次重复测量结果如图 11 (d) 所示。

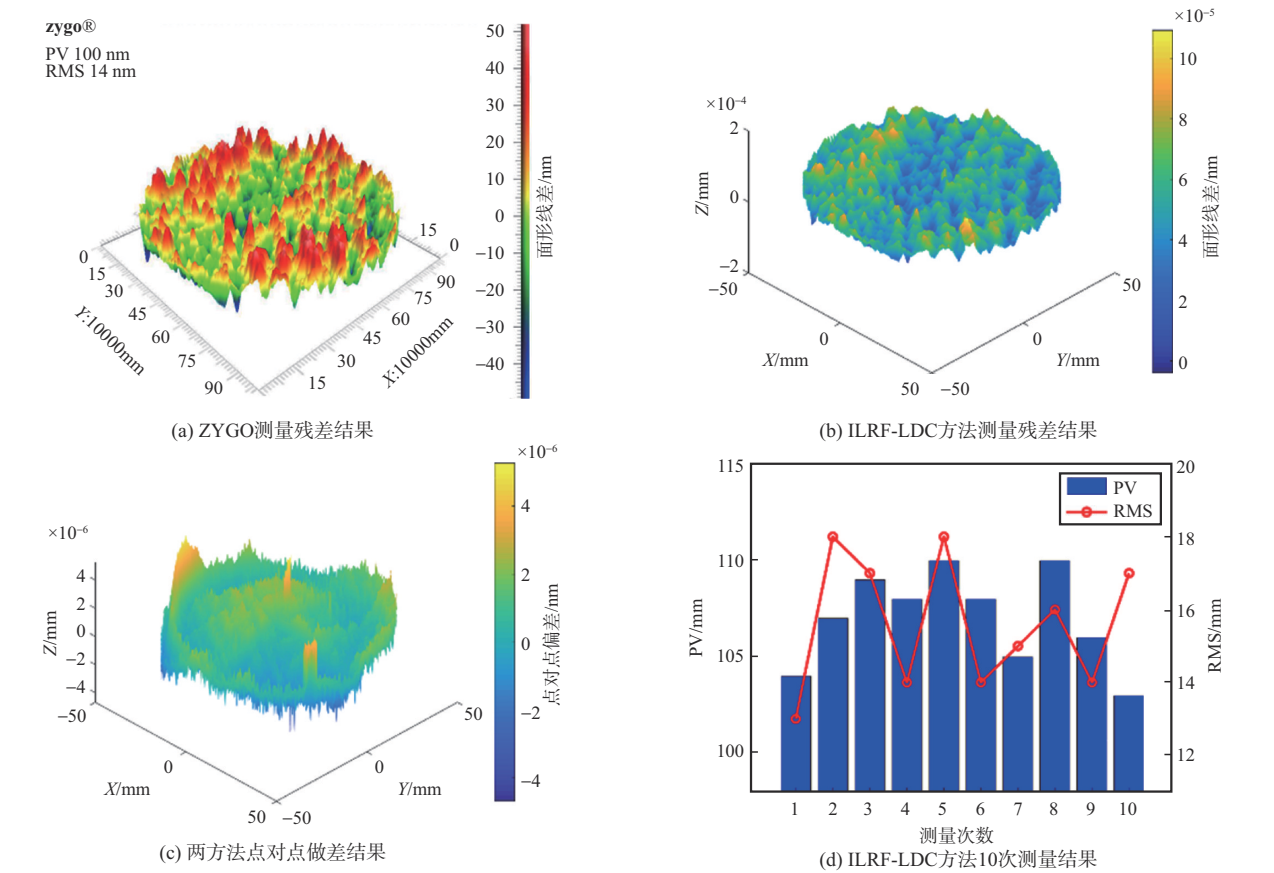


图 11 FSUT 测量结果

由图 11 知，ZYGO 干涉仪测得面形残差的 PV 值为 100nm，均方根（Root Mean Square，RMS）值为 14nm，ILRF-LDC 方法测得面形残差的 PV 值为 107nm，RMS 值为 16nm，两方法点对点做差的面形 PV 值为 9nm，RMS 值为 1nm，表明两方法的测量结果相近，验证了 ILRF-LDC 方法的高精

度特性。10 次重复测量 PV 值的平均值为 107nm，RMS 值的平均值 15.6nm，表明实验结果具备高精度特性以及良好的重复性。

4 结 论

本文提出了一种 ILRF-LDC 自由曲面轮廓测

量方法, 该方法通过改进的 CPD 预扫描配准, 精确获取 FSUT 的空间位姿; 利用差动共焦传感器沿 FSUT 等倾角线扫描, 消除法向倾角连续变化所引入的非线性误差; 采用多项式拟合的归一化差动共焦轴向响应曲线跟踪焦点位置, 确保被测点始终处于传感器工作区, 大大减少传感器轴向扫描次数, 有效提高测量效率。实验结果表明: 系统的轴向分辨力为 2nm, 跟踪误差为 $\pm 70\text{nm}$ 。与传统 LDC 测量方法相比, ILRF-LDC 方法的综合效率提升至 5 倍。面形残差数据的 PV 值为 107nm, RMS 值为 16nm, 与 ZYGO 干涉仪的数据点对点做差结果的 PV 值为 9nm, RMS 值为 1nm, 两者测量结果相近, 验证了系统的高精度特性。综上, 本文为自由曲面的高精度、快速测量提供了一种创新解决方案。

参考文献:

- [1] Tan Y, Zhu J. Spatial three-mirror off-axis freeform optical system without any symmetry[J]. *Photonics*, 2022, 9(5):326.
- [2] Chen S, Xue S, Zhai D, et al. Measurement of freeform optical surfaces: trade-off between accuracy and dynamic range[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(5):1—32.
- [3] Xu H, Lu W, Luo G, et al. Absolute testing of rotationally symmetric surfaces with computer-generated holograms[J]. *Optics Express*, 2024, 32(18):31055—31074.
- [4] Chen S, Guan C, Hu H, et al. Corrective machining of monolithic multiple freeform mirrors based on holographic null test[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 170:107789.
- [5] Alemán-Castaneda L A, Piccirillo B, Santamato E, et al. Shearing interferometry via geometric phase[J]. *Optica*, 2019, 6(4):396—399.
- [6] Supranowitz C, Lormeau J, Maloney C, et al. Freeform metrology using subaperture stitching interferometry[J]. *Optics and Measurement International Conference*, 2016, 10151:81—92.
- [7] Ghim Y, Rhee H, Davies A, et al. 3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5):5098—5105.
- [8] Huang L, Choi H, Zhao W, et al. Adaptive interferometric null testing for unknown freeform optics metrology[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23):5539—5542.
- [9] Zhao M, Zhao W, Yang K, et al. Shack - Hartmann wavefront sensing based on four-quadrant binary phase modulation[J]. *Photonics*, 2022, 9(8):575.
- [10] Xu Y J, Wang Y M, Gao F, et al. Segmentation phase measuring deflectometry for measuring structured specular surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(3-4):2271—2283.
- [11] Bos A, Henselmans R, Rosielle P, et al. Nanometre-accurate form measurement machine for E-ELT M1 segments[J]. *Precision Engineering*, 2015, 40:14—25.
- [12] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. *光学学报*, 2021, 41(1):161—178.
Zhu Rihong, Sun Yue, Shen Hua. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1):161—178.
- [13] Fu Y, Zhao W, Zhang X, et al. Laser differential confocal axicon surface profile measurement method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176:110979.
- [14] 杨宜林, 李积英, 王燕, 等. 基于 NDT 和特征点检测的点云配准算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(8):198-204.
Yang Yilin, Li Jiying, Wang Yan, et al. Point cloud registration algorithm based on NDT and feature point detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8):198—204.
- [15] Wang P, Wang P, Qu Z, et al. A refined coherent point drift (CPD) algorithm for point set registration[J]. *Science China-Information Sciences*, 2011, 54(12):2639—2646.
- [16] 刘咏璐. 基于特征点检测的 CPD 配准算法[J]. *电子技术*, 2018, 47(3):14—16.
Liu Yonglu. CPD algorithm for registration based on feature point detection[J]. *Electronic Technology*, 2018, 47(3):14—16.
- [17] 王施相, 孔令豹, 吕昊宇. 光学自由曲面测量与误差评估技术研究进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(8):243—262.
Wang Shixiang, Sun Lingbao, Lü Haoyu, et al. Advances in measurement and error evaluation technique of optical freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8):243—262.
- [18] 仲宇, 白钊, 刘勇, 等. 基于改进 3D-Harris 角点检测算法的电厂地下管廊点云拼接方法研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(1):89—97.
Zhong Yu, Bai Fan, Liu Yong, et al. Study on point cloud splicing method of underground pipe gallery in power plants based on improved 3D-Harris operator[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(1):89—97.
- [19] Tang Y Q, Wang W B, Liu C, et al. Freeform measurement method based on differential confocal and real-time comparison[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8):12732—12750.
- [20] 罗杰, 刘子豪, 刘一郡, 等. 基于卡尔曼预测的差动共焦轮廓跟踪测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3):25—32.
Luo Jie, Liu Zihao, Liu Yijun, et al. Differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3):25—32.