

用于三维测量的双路点衍射干涉系统*

王道档^{1,2}, 王志超¹, 赵 军¹, 王 朝¹, 孔 明¹

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘要:针对在仅有一个光纤对的单路点衍射三维测量系统中,存在平行于条纹的横向方向上测量精度低的问题,提出了用于三维测量的双路点衍射干涉系统。分析了点衍射波前误差、测量探头结构布局以及三维迭代重构算法对于三维测量精度的影响,在此基础上确定点衍射源结构以及探头结构布局等最优系统参数。实验结果显示,单路点衍射干涉三维测量系统在 xy 方向的精度分别为亚微米量级和微米量级,而双路点衍射干涉仪系统可在三维方向上同时达到亚微米量级,验证了所提出的双路点衍射干涉系统方案的可行性和准确性。所提出的双路点衍射干涉系统有效的实现高精度三维测量,为无导轨三维位移和尺寸等测量提供了一种可行方法。

关键词: 三维测量; 双路点衍射干涉系统; 亚微米孔径光纤; 精度; 点衍射波前

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Dual-path point-diffraction interference system for three-dimensional measurement

Wang Daodang^{1,2}, Wang Zhichao¹, Zhao Jun¹, Wang Chao¹, Kong Ming¹

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the single-path point-diffraction three-dimensional measurement system with only one fiber pair, the measurement accuracy in the lateral direction parallel to the fringe direction is poor. To solve this problem, a dual-path point-diffraction interference system is proposed to enhance the accurate three-dimensional measurement in this study. The influence of point-diffraction wavefront error, structural layout of measuring probe and three-dimensional iterative reconstruction algorithm on the three-dimensional measurement accuracy is analyzed. Based on the analysis, the optimal system parameters (e.g., point-diffraction source structure and structural layout of probe) are determined. The experimental results show that the accuracy of the single-path point-diffraction interference system for three-dimensional measurement in the x and y directions are in the order of submicrons and microns, respectively. In comparison, the dual-path point-diffraction interference system can reach the order of submicrons at three directions. The feasibility and accuracy of the proposed system are verified. It provides a feasible method for the measurement three-dimensional displacement and size without guide rail.

Keywords: three-dimensional measurement; dual-path point-diffraction interferometer; submicron aperture fiber; precision; point-diffraction wavefront

0 引 言

随着现代制造的快速发展,各种位移测量技术被提

出,以满足高精度和快速测量的需要^[1-4]。作为一种通用和精确的测量方法,三坐标测量机已经成为现代工业制造质量保障的重要手段,被广泛应用于定位、尺寸测量和逆向工程等领域^[5-7]。然而,由于昂贵的高精度专用导轨

和巨大的大理石测量平台,使得它不能满足加工现场的实时快速测量要求。

随着点衍射干涉技术的不断发展,人们提出了利用点衍射干涉仪实现对三维位移的高精度测量,利用来自于安装在待测量目标上的两根光纤点衍射源的高精度点衍射球面波前产生干涉,通过对干涉场信息分析,重构得到被测目标的三维空间绝对位移^[8-9]。该方法避免了传统干涉仪中标准元件加工误差对于三维测量精度的影响。在点衍射干涉仪中,点衍射产生的球面波前精度直接决定了点衍射干涉仪所能达到的测量精度^[10-14]。在传统的光纤点衍射干涉仪中,点衍射波前可实现的测量范围受到数值孔径(numerical aperture, NA)的限制,其通常小于0.20^[15-16]。一种出射端为锥形结构的亚微米孔径光纤^[17]则可较好地解决该问题,它能够同时获得高数值孔径和高强度的球面波,为提高三维测量系统的测量范围和精度提供了一种可行的方法。然而,由于现有用于三维测量的点衍射干涉系统仅采用了一个光纤对,使得对于横向两个正交方向上的位移具有不同的灵敏度,进而导致在平行于条纹的横向方向上存在测量精度较低的问题。

针对现有单路点衍射干涉系统存在平行于条纹的横向方向上测量精度低的问题,本文提出了一种用于三维测量的双路点衍射干涉系统,以同时实现三维方向

的高精度测量。并针对三维高精度测量需要,对系统所涉及点衍射波前误差、系统结构布局以及三维重构算法等主要误差因素进行了分析,并在此基础上确定了最优系统参数。为了验证所提出的用于三维测量的双路点衍射干涉系统的可行性,分别进行了数值仿真和实验测量,最后同三坐标测量结果进行了比对。

1 原理

1.1 双路点衍射干涉系统

用于三维测量的双路点衍射干涉系统布局如图1所示,来自稳频激光器的激光束先后通过偏振片和半波片(HWP1)后得到某一方向的线偏振光,然后被偏振分光棱镜(PBS)分成p光与s光。其中反射光s经过1/4波片(QWP),其快轴方向与水平方向交角为45°后,被安装在压电陶瓷(PZT)上的反射镜反射回来,再次通过1/4波片(QWP)和偏振分光棱镜(PBS),经分光棱镜(BS1)后被光纤耦合器分别耦合进入亚微米孔径光纤(SF1)和亚微米孔径光纤(SF3)中,两根光纤末端产生点衍射球面波前作为检测波前;偏振分光棱镜(PBS)的透射光p经过半波片(HWP2)和分光棱镜(BS2)后,被光纤耦合器分别耦合进亚微米孔径光纤(SF2)和亚微米孔径光纤(SF4)中,两根光纤末端产生点衍射球面波前作为参考波前。

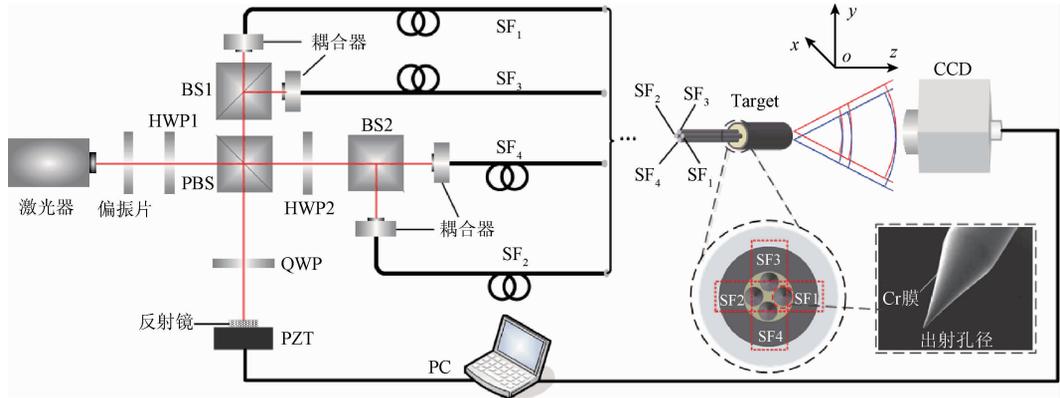


图1 双路点衍射干涉系统布局

Fig.1 System layout of dual-path point-diffraction interferometer

为了获得足够光强透过率和较大的点衍射波前孔径角,以满足大测量范围和高测量精度需要,系统中采用了具有锥形结构出射端的亚微米孔径光纤作为点衍射源,如图1所示。亚微米孔径光纤的锥形表面涂覆有Cr金属膜,抛光末端出口端的孔径大小为约0.5 μm。系统中将4根亚微米孔径光纤SF₁、SF₂、SF₃和SF₄的出射端集成于测量探头中并且使之共面,同时使得SF₁-SF₂光纤

对连线方向与SF₃-SF₄光纤对连线方向正交。通过交替打开光纤对SF₁-SF₂与光纤对SF₃-SF₄,每一对亚微米孔径光纤在出射端所产生的点衍射波前会叠加形成点衍射干涉场。处在干涉场中的CCD探测器实时采集与待测测量探头三维位置对应的两正交方向上的点衍射球面波前干涉条纹。利用计算机控制压电陶瓷对反射镜进行微位移移动,改变两点衍射球面波前之间的光程差,可通过

多步移相算法重构出电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 探测器平面上对应干涉场相位差分布矩阵。最后根据相位差分布矩阵建立数学模型,采用数值迭代重构算法对所得数学模型求解得到测量探头的三维坐标值,由此实现被测目标的三维高精度测量。

1.2 点衍射干涉系统数学模型

不失一般性,采用 x 方向存在横向偏移的两个亚微米孔径光纤点衍射源 SF_1 和 SF_2 为例,建立用于三维测量的点衍射干涉系统模型,如图2所示。图2(a)中出射端共面的两个点衍射源 SF_1 、 SF_2 集成在测量探头中,可根据干涉场相位分布矩阵与两个点衍射源之间的光程差之间的对应关系,由此确定测量目标和 CCD 平面之间的三维位移。

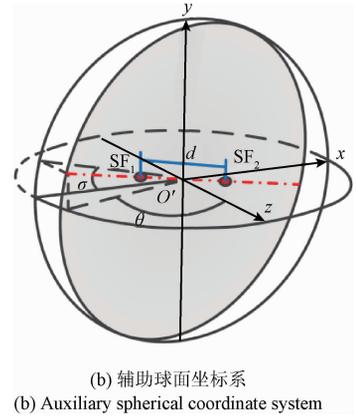
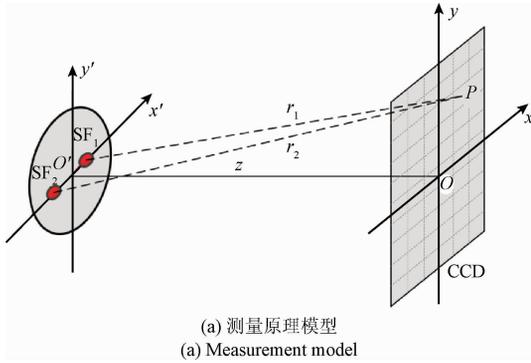


图2 点衍射干涉系统的三维测量模型

Fig.2 Mathematical model for three-dimensional measurement with point-diffraction interference system

如图2(a)所示,定义 CCD 平面为 xoy 平面,中心位置 O 是测量空间的原点, SF_1 和 SF_2 是测量探头上间距为 d 的两个点衍射源,即两根光纤的出射端。测量探头中两个点衍射源 SF_1 和 SF_2 的中点 $O'(x_0, y_0, z_0)$ 是图2(b)所示辅助球面坐标系的原点,即为测量探头的位置。在图2(b)所示的辅助球面坐标系统中, θ 和 σ 分别为方位角和极角,两个点衍射源的位移可以表示为 $(d/2, \theta, \sigma)$ 和 $(d/2, \theta + \pi, \sigma + \pi)$ 。因此,CCD 上任意像素点 $P(x, y, z)$ 到 SF_1 和 SF_2 的光程 r_1 、 r_2 可表示为式(1)。

$$\begin{cases} r_1 = [(x - x_0 + d/2 \cdot \cos\sigma \sin\theta)^2 + (y - y_0 + d/2 \cdot \sin\sigma \sin\theta)^2 + (z - z_0 + d/2 \cdot \cos\theta)^2]^{1/2} \\ r_2 = [(x - x_0 - d/2 \cdot \cos\sigma \sin\theta)^2 + (y - y_0 - d/2 \cdot \sin\sigma \sin\theta)^2 + (z - z_0 - d/2 \cdot \cos\theta)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

得到对应的 $P(x, y, z)$ 像素点处的相位差 $\varphi(x, y, z)$ 为:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \quad (2)$$

根据 $P(x, y, z)$ 点处相位差分布 φ 与两个光纤孔径的三维坐标存在的一一对应关系,可建立有关相位差的非线性方程 $f(\Omega)$:

$$f(\Omega) = [\varphi(x, y, z) - \varphi_0] - [\varphi_{\text{CCD}}(x, y, z) - \zeta] \quad (3)$$

式中:向量 $\Omega = (x_0, y_0, z_0, \theta, \sigma, d)$ 表示点 O 与 O' 之间的位移, φ_0 为通过式(2)计算出来的点 O 的相位差, $\varphi_{\text{CCD}}(a, b, c)$ 和 ζ 分别为 CCD 测量得到的点 P 和点 O' 的相位差。在 CCD 上选取 m ($m \geq 6$) 个像素点建立超定方程 $F(\Omega)$ 如下:

$$F(\Omega) = \begin{cases} [\varphi(x_1, y_1, z_1) - \varphi_0] - [\varphi_{\text{CCD}}(x_1, y_1, z_1) - \zeta] \\ [\varphi(x_2, y_2, z_2) - \varphi_0] - [\varphi_{\text{CCD}}(x_2, y_2, z_2) - \zeta] \\ \vdots \\ [\varphi(x_m, y_m, z_m) - \varphi_0] - [\varphi_{\text{CCD}}(x_m, y_m, z_m) - \zeta] \end{cases} \quad (4)$$

通过最小二乘方法获取 Ω , 式(4)可转化为:

$$\psi(\Omega) = \frac{1}{2} F^T(\Omega) \times F(\Omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(\Omega) \quad (5)$$

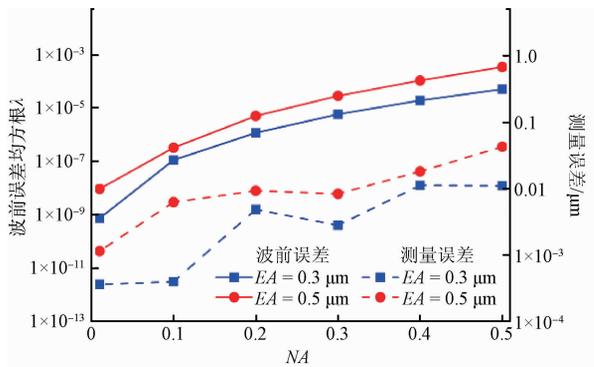
2 误差分析

在图1所示的双路点衍射干涉三维测量系统中,其测量精度受到了包括点衍射球面波前误差、探头结构误差、数值迭代重构算法、压电陶瓷移相误差、激光器不稳定性、环境温度和振动等诸多因素的影响。其中,压电陶瓷移相误差、激光器不稳定性、环境温度和振动等常见的干涉测量误差因素已在相关文献中予以详细讨论^[18]。本文将针对所提出的双路点衍射干涉三维测量系统特有的点衍射球面波前误差、探头结构误差、数值迭代重构算法等几个主要的误差因素进行讨论分析。

2.1 点衍射波前误差的影响

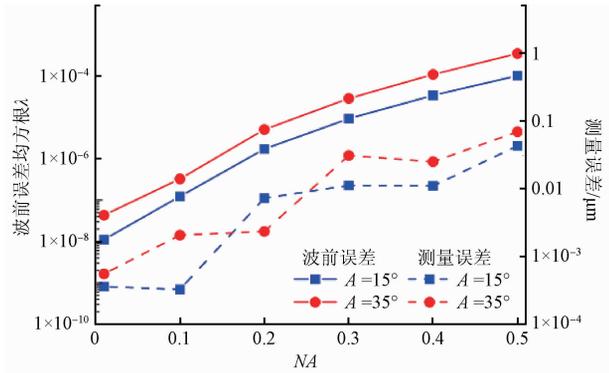
在点衍射干涉系统中,点衍射产生的高精度球面波前至关重要,它决定了系统可实现的测量精度。点衍射波前的质量主要取决于亚微米孔径光纤出射孔径、锥角和

数值孔径 NA 大小等。为了分析点衍射波前球面误差对三维测量结果的影响,可根据基于矢量衍射理论的时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 算法计算得到点衍射波前^[19],进而由光线追迹法得到对应的三维测量误差。图3所示为不同结构参数的亚微米孔径光纤在不同数值孔径范围内的点衍射波前球面误差值以及对应的位移测量误差。根据图3(a)和(b)可知,点衍射波前的球面误差和位移测量误差都会随着出射孔径(EA)、锥角(A)和 NA 的增大而增大。对于 $0.5\ \mu\text{m}$ 出射孔径尺寸、 35° 锥角大小和 $0.5NA$ 情况下的亚微米孔径光纤,得到点衍射波前误差小于 $\lambda/1000$ (波长 $\lambda = 532\ \text{nm}$),并且其对应引入的三维测量误差小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。随着点衍射波前误差的进一步降低,可以获得更好的位移测量精度。



(a) 35° 锥角情况下出射孔径(EA)对应测量误差

(a) Measurement error for different fiber exit aperture (EA) with 35° taper angle



(b) $0.5\ \mu\text{m}$ 出射孔径情况下不同锥角(A)对应测量误差

(b) Measurement error for different fiber taper angle (A) with $0.5\ \mu\text{m}$ exit aperture

图3 不同结构参数对应亚微米孔径光纤点衍射波前误差和相应位移测量误差的影响

Fig. 3 Point-diffraction wavefront error and the corresponding displacement measurement error for various fiber structural parameters

2.2 探头结构误差的影响

由于单路点衍射干涉三维测量系统中只有一个亚微米孔径光纤对,会导致其对于 x 和 y 方向上的位移变化具有不同的测量灵敏度。根据式(1)和(2),可得相位差 $\varphi(x, y, z)$ 在 x 和 y 方向的偏导数 DS_x 、 DS_y 如式(6)。

$$\begin{cases} DS_x = \frac{\partial\varphi(x, y, z)}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(x - x_0 + d/2 \cdot \cos\sigma\sin\theta)}{r_1} - \frac{(x - x_0 - d/2 \cdot \cos\sigma\sin\theta)}{r_2} \right] \\ DS_y = \frac{\partial\varphi(x, y, z)}{\partial y} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(y - y_0 + d/2 \cdot \sin\sigma\sin\theta)}{r_1} - \frac{(y - y_0 - d/2 \cdot \sin\sigma\sin\theta)}{r_2} \right] \end{cases} \quad (6)$$

当测量探头绕 z 轴各种旋转位置(极角 σ 变化)时, x 和 y 方向上测量灵敏度的变化如图4所示,其中方位角 $\theta = 90^\circ$ 。根据图4所示,当极角 $\sigma = 0^\circ$ 时, x 方向(垂直于条纹方向)的测量灵敏度 DS_x 取得最大值 $DS_{x\text{max}}$,远大于 y 方向(平行于条纹方向)的灵敏度 DS_y ,并且 DS_x 和 DS_y 随着极角 σ 的增加分别变小和变大;当极角 $\sigma = 90^\circ$ 时, y 方向的测量灵敏度 DS_y 取得最大值 $DS_{y\text{max}}$ 。 x 、 y 方向测量灵敏度的差异会导致某一方向上存在测量精度差低的问题。为了同时实现三维方向上高精度测量,可采用图1所示的双路点衍射干涉三维测量方案,即使用出射端共面的两个亚微米孔径光纤对并集成测量探头中,分别选取光纤对 SF1-SF2 测得的 x 坐标值、光纤对 SF3-SF4 测得的 y 坐标值、两光纤对测得的 z 坐标的平均值作为最终合成的三维坐标。

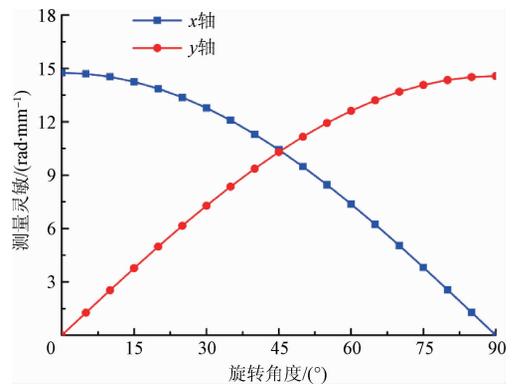


图4 测量探头在不同旋转位置对应 x 和 y 方向上的测量灵敏度

Fig. 4 Measurement sensitivity in x and y directions corresponding to various rotating positions of measuring probe

2.3 迭代重构算法影响

数值迭代算法的性能决定了点衍射干涉三维测量系统的测量速度、精度大小和收敛率。在非线性求解问题中,目前最常用的算法是牛顿迭代法,先对目标函数进行泰勒级展开,再求得方程的近似解。其中 L-M (Levenberg-Marquardt) 方法^[20]为点衍射干涉系统提供了一种可行的方法,但在数值迭代过程中该算法通常选择不超过 50 个数据点用于分析,这不仅会导致探测数据信息的大量浪费,而且受随机噪声的影响很大,抗干扰能力不高。

针对快速、可靠的高精度三维测量,测量系统采用了快速搜索粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法^[21],通过在迭代初期选取少量数据点,迭代运行过程中以非线性方式增加样本点数量的数据处理方法,在有效抑制噪声保证精度的前提下,提高了算法的效率。表 1 所示为实际测量中分别利用 L-M 算法和快速搜索 PSO 算法所得到的测量误差,收敛率与迭代时间。两种算法虽然都可以达到亚微米量级,但是 PSO 算法在保证精度和迭代速度下,受空气扰动,环境震动和其他随机噪声影响小,收敛率可以达到 90%,明显高于 L-M 算法,具有很高的稳定性。

表 1 粒子群算法与 L-M 算法比较

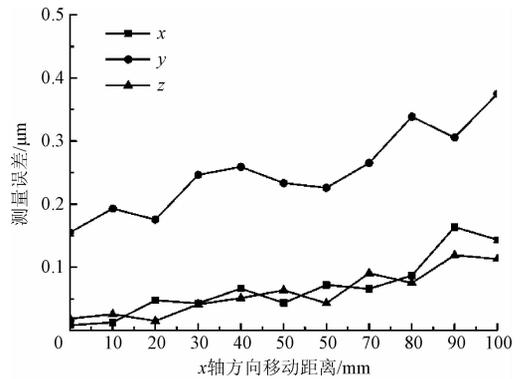
Table 1 Comparison of PSO algorithm and L-M algorithm

数值迭代算法	测量误差/ μm	收敛率/%	迭代时间/s
L-M 算法	0.87	33.3	3.66
PSO 算法	0.76	90.0	1.65

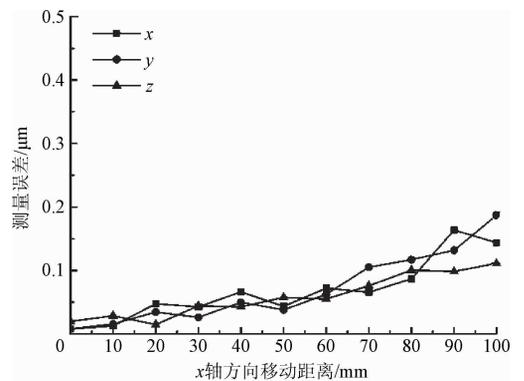
3 位移测量仿真

为了分析所提出用于三维测量的双路点衍射干涉系统的可行性,进行了基于光线追迹法的数值仿真。CCD 探测器的像素值设置为 $1\,920 \times 1\,080$,像元尺寸为 $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$,探头的初始空间位置为 (10 mm, 10 mm, 150 mm),在不加入噪声的情况下,得到探头位置的测量误差约为 (0.76 nm, 0.89 nm, 2.15 nm)。

在仿真中加入均值为 5nm 的随机噪声后,获得不同位置下的三维测量结果。图 5(a) 所示为仅使用一个光纤对 SF1-SF2 在 x 方向上移动时各种位置(测量探头沿 x 方向上从 (0 mm, 50 mm, 150 mm) 移动到 (100 mm, 50 mm, 150 mm) 的 11 个位置的三维测量结果,图 5(b) 所示为用两个光纤对 (SF1-SF2, SF3-SF4) 获得的测量结果。



(a) 单路点衍射干涉系统的三维测量误差
(a) Three dimensional measurement error of single path diffraction interference system



(b) 双路点衍射干涉系统的三维测量误差
(b) Three dimensional measurement error of dual-path diffraction interference system

图 5 仿真中的位移测量误差

Fig. 5 Displacement measurement errors in simulation

表 2 所示为仿真中测量误差平均值。如图 5 和表 2 所示, y 方向上的平均测量误差为 $0.252\ \mu\text{m}$,远大于 x 方向上的平均测量误差 $0.068\ \mu\text{m}$,这是由于与条纹方向平行的方向上存在测量灵敏度差的问题造成的,具有两个光纤对的点衍射干涉系统为解决这个问题,实现三个方向上的高精度测量提供了一种可行的方案。

表 2 仿真中的三维位移测量结果

Table 2 Three-dimensional displacement measurement results in simulation

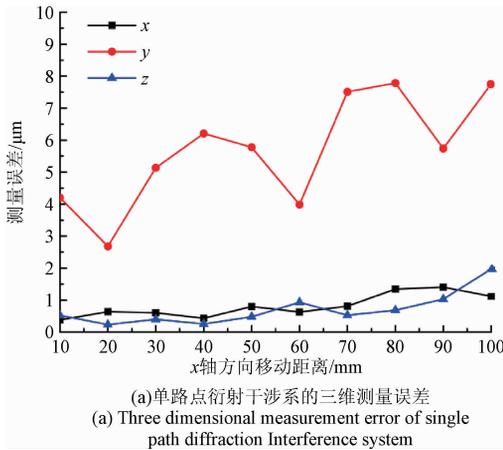
沿 x 轴方向移动	测量误差的平均值/ μm		
	x	y	z
单路点衍射干涉系统	0.068	0.252	0.060
双路点衍射干涉系统	0.068	0.071	0.061

4 实验结果及分析

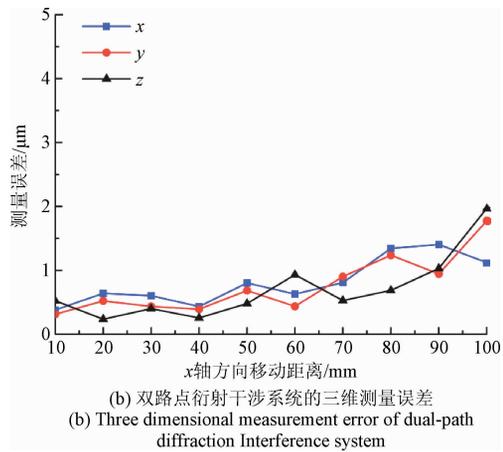
为了验证提出双路点衍射干涉三维测量系统的可行性,根据图 1 搭建了相应的实验系统,其中亚微米孔径光

纤的出射孔径尺寸和锥角分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 35° 。CCD 相机的像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$, 像素数为 $1\,920 \times 1\,080$ 。为尽量减少环境扰动的影响, 整个系统置于隔振台上, 并用隔热箱屏蔽。

使用海克斯康公司定位精度为 $1.90 \mu\text{m}$ 的三坐标测量机进行对照实验。将探头沿 x 轴从 $(10 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 150 \text{ mm})$ 移动到 $(100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 150 \text{ mm})$, 在 10 个位置处进行等间距测量。图 6(a) 所示为一个光纤对 (SF_1 和 SF_2) 时, 在 x 方向移动位置的测量结果, 其中三坐标测量机的测量位移取为标称值; 图 6(b) 所示为采用两个光纤对 ($\text{SF}_1\text{-SF}_2, \text{SF}_3\text{-SF}_4$) 时得到对应的三维测量结果。



(a) 单路点衍射干涉系统的三维测量误差
(a) Three dimensional measurement error of single path diffraction Interference system



(b) 双路点衍射干涉系统的三维测量误差
(b) Three dimensional measurement error of dual-path diffraction Interference system

图 6 实验验证中的位移测量误差

Fig. 6 Absolute displacement measurement error in experimental validation

如图 6 所示, 三坐标测量机的测量结果和所提出双路点衍射干涉系统的测量结果上存在良好的一致性。其中, 随着测量探头远离原点, 测量误差不断变大, 最大的误差为 $1.97 \mu\text{m}$, 主要由于随着探头和 CCD 检测器之间间距变大导致干涉条纹间隔变大, CCD 获得的相位差矩阵变化幅度变小, 计算过程中更加容易受到误差的干扰。

实际加工过程中, 由于探头受加工工艺的影响, 并不

能保证 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对连线方向与 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对连线方向正交, 导致其中一对光纤的测量灵敏度不是最大值, 需要后期修正补偿。图 7 所示为双路点衍射干涉系统中交替打开 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对与 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对时的干涉条纹。

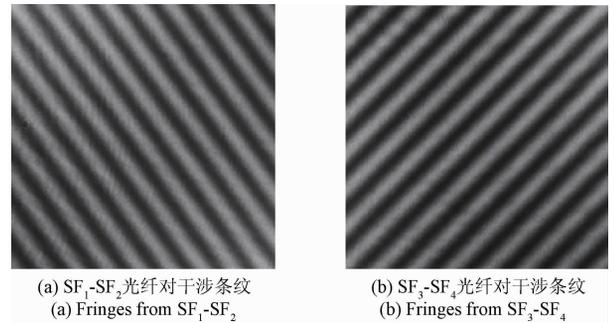


图 7 交替打开 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对与 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对的干涉条纹

Fig. 7 The Interference fringes of alternately open $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ fiber pairs and $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ fiber pairs

对两幅干涉图处理获得 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对与水平方向夹角的平均值, $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对与水平方向夹角的平均值。最后获得实际加工的测量探头中 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对连线方向与 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对连线方向夹角为 99.47° 。在保证 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 光纤对为水平方向前提下, $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对与竖直方向夹角偏差 $\delta = 9.47^\circ$ 。在合成探头的三维坐标时, 光纤对 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 测得的 y 坐标值需要补偿一个修正值 Δy :

$$\Delta y = (1 - DS'_y / DS_{y,\text{max}}) \cdot y \quad (7)$$

式中: DS'_y 为实际测量中 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对的测量灵敏度, $DS_{y,\text{max}}$ 为 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 光纤对测量灵敏度的最大值, 分别对应图 4 中极角 $\sigma = 80.53^\circ$ 时的测量灵敏度和极角 $\sigma = 90^\circ$ 取得的最大灵敏度。最终选取光纤对 $\text{SF}_1\text{-SF}_2$ 测得的 x 坐标值, 光纤对 $\text{SF}_3\text{-SF}_4$ 测得的 y 坐标值加上修正值, 两光纤对测得的 z 坐标的平均值合成探头的三维坐标。表 3 所示为实验验证的测量误差平均值。由于两个光纤对夹角的加工误差, y 方向上的测量误差平均值为 $1.49 \mu\text{m}$, 补偿修正值后实现了亚微米量级为 $0.72 \mu\text{m}$ 。从图 6 和表 3 可看出使用双路点衍射干涉仪能实现了 3 个方向上位移的高精度测量。

表 3 实验验证的三维位移测量结果

Table 3 Three-dimensional displacement measurement results in experimental validation

沿 x 轴方向移动	测量误差的平均值/ μm		
	x	y	z
单路点衍射干涉系统	0.81	5.68	0.88
双路点衍射干涉系统	0.68	1.49	0.78
补偿后的双路点衍射干涉系统	0.68	0.72	0.78

5 结 论

本文提出了用于三维测量的双路点衍射干涉系统。分析了点衍射波前误差、测量探头结构布局以及三维迭代重构算法对于三维测量精度的影响。通过应用亚微米光纤作为点衍射源,获得了高数值孔径和高亮度的点衍射波,可以极大扩展测量系统可实现的测量范围,提高测量精度。针对单路点衍射干涉系统中,平行于条纹方向的横向方向上的测量精度差的问题,提出了两个光纤对的双路点衍射干涉系统。由于加工工艺的影响,测量探头中 SF_1 - SF_2 光纤对与 SF_3 - SF_4 光纤对连线不能正交,实验分析了实际测量探头两个光纤对的夹角,得到与理想的正交情况偏差角度为 8.97° ,并在最终坐标合成过程中进行了补偿。实验结果表明,单路点衍射干涉三维测量系统在 xy 方向的精度分别为亚微米量级和微米量级,双路点衍射干涉系统实现了3个方向上亚微米量级的测量,为在没有导轨的情况下测量三维位移,提供了可行方案。

参考文献

- [1] 陈伟民,李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.
CHEN W M, LI C L. Radar-based displacement/distance measuring techniques [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [2] 周美丽,白宗文. 基于2D-PSD的激光位移测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 64-66.
ZHANG M L, BAI Z W. Design of the laser displacement measurement system based on 2D-PSD [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2): 64-66.
- [3] LIU Z, LI X, LI F, et al. Fast and flexible movable vision measurement for the surface of a large-sized object [J]. Sensors, 2015, 15(3): 4643-4657.
- [4] RANGAPPA S, TAILOR M, PETZING J, et al. The suitability of lightfield camera depth maps for coordinate measurement applications [C]. Eighth International Conference on Machine Vision, 2015: 987523.
- [5] 王晓飞,刘胜兰,张丽艳,等. 整体叶轮三坐标测量机的分步精细定位方法[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(6): 1026-1030.
WANG X F, LIU SH L, ZHANG L Y, et al. Stepwise refinement localization method for impeller inspection on coordinate measuring machine [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(6): 1026-1030.
- [6] 何雪明,孔丽娟,何俊飞,等. 基于三坐标测量机自适应测量的自由曲面逆向[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 155-159.
HE X M, KONG L J, HE J F, et al. Free-form surface reverse based on CMM self-adapting measurement [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 155-159.
- [7] 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.
- [8] RHEE H G, KIM S W. Absolute distance measurement by two-point-diffraction interferometry [J]. Applied Optics, 2002, 41(28): 5921-5928.
- [9] WANG D D, CHEN X X, XU Y B, et al. High-NA fiber point-diffraction interferometer for three-dimensional coordinate measurement [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25550.
- [10] OTA K, YAMAMOTO T, FUKUDA Y, et al. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors [C]. Association of Super-Advanced Electronics Technologies, 2001: 543-550.
- [11] JIN J, RHEE H G, KIM S W. Metrological atomic force microscopy integrated with a modified two-point diffraction interferometer [J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(10): 105302.
- [12] WANG D D, YANG Y Y, CHEN C, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [13] 邵晶,马冬梅,张海涛,等. 极小孔径衍射波前测试分析[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 639-2644.
SHAO J, MA D M, ZHANG H T, et al. Evaluation of wavefront diffracted from ultra small aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2639-2644.
- [14] 马冬梅,陈土泉. 点衍射波前位相的测评[J]. 光学精密工程, 2010(11): 2390-2397.
MA D M, CHEN T Q. Test and evaluation of wavefront phase of point diffraction [J]. Optics and Precision Engineering, 2010(11): 2390-2397.
- [15] MATSUURA T, OKAGAKI S, NAKAMURA T, et al. Measurement accuracy in phase-shifting point diffraction

- interferometer with two optical fibers [J]. *Optical Review*, 2007, 14(6): 401-405.
- [16] MATSUURA T, UDAKA K, OSHIKANE Y, et al. Spherical concave mirror measurement by phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2010, 616(2-3): 233-236.
- [17] 陈茜茜,王道档,徐杨波,等. 亚波长孔径光纤点衍射波前质量分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 167-175.
CHEN X X, WANG D D, XU Y B, et al. Analysis of point-diffraction wavefront with sub-wavelength-aperture Fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 167-175.
- [18] 魏豪明,邢廷文,李云,等. 632.8nm 高精度移相非佐干涉仪测量误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(4): 60-67.
WEI H M, XING T W, LI Y, et al. Measurement errors in 632.8nm high precision phase-shifting fizeau interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 41202.
- [19] WANG D D, WANG F M, ZOU H, et al. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7602-7608.
- [20] 王道档,王福民,陈茜茜,等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的点衍射三维坐标测量方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 143-150.
WANG D D, WANG F M, CHEN X X, et al. Three-dimensional coordinate measurement with pinot-diffraction interferometer based on levenberg-marquardt algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0812001.
- [21] 王道档,徐杨波,陈茜茜,等. 基于快速搜索粒子群算法的点衍射干涉绝对位移测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 129-136.

WANG D D, XU Y B, CHEN X, et al. Absolute displacement measurement with point-diffraction interferometer based on quick searching particle swarm optimization algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 129-136.

作者简介



王道档, 2007 年于中国计量大学获得学士学位, 2012 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为光电精密检测技术。

E-mail: wangdaodang@sina.com

Wang Daodang received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2007, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2012. Now he is an Associate Professor in China Jiliang University. His main research interests include optics-electrical precision detection technology.



王志超, 2014 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为光电精密检测。

E-mail: xzm0.618@qq.com

Wang Zhichao received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interests include Photoelectric precision detection.



赵军 (通讯作者), 1978 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为计量测试技术和精密测试仪器。

E-mail: zhaojun@cjlu.edu.cn

Zhao Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1978. Now he is a full Professor in China Jiliang University. His main research interests include measurement and testing technology and precision testing instruments.