

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905817

用于瞬态三维测量的点衍射干涉系统*

王朝¹,王道档¹,朱其幸^{1,2},许新科¹,孔明¹

(1.中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018;

2.桂林电子科技大学广西光电信息处理重点实验室 桂林 541004)

摘要:针对基于PZT移相的点衍射干涉三维测量系统中存在采样时间间隔过长和易受外界扰动影响等问题,提出了用于瞬态三维测量的点衍射干涉系统。通过对点衍射干涉三维测量系统光束偏振态调制并引入偏振相机,实现了三维空间坐标的瞬态移相干涉测量。针对偏振相机存在的视场误差及其对三维测量精度的影响,研究了基于相位插值的视场误差校正方法。为了验证系统方案的可行性,分别进行了数值仿真与三维在线测量比对实验。实验结果表明,利用本系统可实现亚微米量级的三维空间瞬态测量,且测量重复性小于5%。所提出的瞬态点衍射干涉系统具有对外界扰动不敏感、重复性测量精度高和快速测量等特点,为无导轨三维位移和尺寸等瞬态测量提供了一种可行的方法。

关键词: 三维测量;点衍射干涉;瞬态检测;偏振相移;误差校正

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

Transient point-diffraction interferometric system for three-dimensional measurement

Wang Chao¹, Wang Daodang¹, Zhu Qixing^{1,2}, Xu Xinke¹, Kong Ming¹

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

2.Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems of excessive sampling time interval and being subject to environmental disturbance existing in the point-diffraction interferometric three-dimensional measurement system based on a PZT phase shift, a point-diffraction interferometric system used in transient three-dimensional (3D) measurement is proposed. Through light beam polarization modulation and introducing polarization camera in the point-diffraction interferometric system for 3D measurement, the transient phase shift interferometric measurement of 3D space coordinate is achieved. Aiming at the field of view (FOV) error existing in polarization camera and its influence on 3D measurement accuracy, the field of view (FOV) error calibration method based on phase interpolation is studied. In order to verify the feasibility of the system scheme, both numerical simulation and 3D on-line measurement comparison experiments were carried out, respectively. The experiment results show that with the proposed system, the transient three-dimensional space measurement accuracy of the order of submicron can be achieved and the measurement repeatability is less than 5%. The proposed transient point-diffraction interferometric system has the features of being not sensitive to environmental disturbance, high repeat measurement precision and rapid measurement, which provides a feasible method for the transient measurement of three-dimensional displacement and dimension without guide rail.

Keywords: three-dimensional measurement; point-diffraction interferometry; transient measurement; polarization phase shift; error calibration

收稿日期:2019-11-15 Received Date:2019-11-15

* 基金项目:国家自然科学基金(51775528)、广西光电信息处理重点实验室(培育基地)基金(GD18205)、中国博士后科学基金(2017M621928)项目资助

0 引言

计量技术的发展是国家制造业的重要保证,测量水平高低决定了制造仪器精度大小。近些年,我国制造业的快速崛起,尤其是智能制造的普及^[1],对于高精度测量仪器的需求不断提高^[2-3]。为了满足高精度零件检测,三坐标测量机已经成为现代制造业质量保障的重要手段^[4-5]。三坐标测量机由于自身复杂、庞大的结构限制,无法满足现场快速测量的需求。而一种基于点衍射干涉技术的三维测量系统由于系统结构紧凑,制作容易以及成本较低的特点,为三维测量提供了一种可行的无导轨高精度在线测量方法^[6]。

点衍射干涉技术最早由 Smartt 等^[7]于 1972 年提出,该技术主要利用点衍射技术得到高精度球面波前作为测量基准。相对于基于实物基准的传统测量方法而言,点衍射干涉技术突破了标准元件加工误差对于测量精度的限制,并具有很高的精度再现性。基于点衍射干涉的三维测量技术主要是将两根光纤点衍射源并排放置集成于一个测量探头之中,实际测量中可将该测量探头安装于被测目标上。光纤点衍射源发出的两个高精度球面波前在空间中发生干涉,通过对点衍射干涉场的相位信息分析,可重构出被测目标的空间三维绝对位移^[8-9]。该测量方案具有易于集成和结构紧凑的特点,为现场安装测量提供了可行性。在测量范围方面,点衍射波前受传统单模光纤孔径的限制,其对应数值孔径(numerical aperture, NA)通常小于 0.20^[10-11]。随着一种出射端面为锥形结构的亚微米孔径光纤的提出,其产生的大数值孔径与高精度球面波^[12],有效地提高了测量范围与精度。

传统的点衍射干涉三维测量系统是利用两个高精度点衍射球面波可以在空间中发生干涉得到干涉场信息,再通过压电陶瓷(piezoelectric actuator, PZT)多步移相技术与解包裹算法重构得到对应的相位差矩阵^[13]。由于多步移相测量过程中需要一定的采样测量时间,并且测量系统为非共路结构,进而导致测量结果极易受外界环境扰动、激光器稳定性以及随机噪声等影响。

针对现有利用 PZT 移相技术实现点衍射干涉三维测量系统存在的稳定性不足以及易受外界扰动影响的问题,本文提出了一种可实现瞬态三维测量的点衍射干涉系统。利用偏振相机以及对测量系统光束偏振态调制,实现对点衍射干涉场的瞬态多步移相高精度重构。针对三维高精度瞬态测量需求,对系统光路进行布局设计,并对偏振相机视场误差的影响进行分析与校正。为了验证本文瞬态点衍射干涉三维测量系统的可行性,分别进行了数值仿真和实验测量,最后与三坐标测量机的测量结果进行比对。

1 瞬态点衍射干涉三维测量原理

1.1 瞬态点衍射干涉三维测量系统组成

用于瞬态三维位移测量的点衍射干涉系统布局如图 1 所示。稳频激光器产生激光束先后经过反射镜、偏振片与半波片(half wave plate, HWP)可得到某一方向的线偏振光,再射入偏振分光棱镜(polarization beam splitting, PBS)后分成两路线偏振光 p 光与 s 光。透射光 p 与反射光 s 分别经过四分之一波片(quarter wave plate, QWP) QWP₁ 和 QWP₂ 后变为旋向相反的圆偏振光,然后两圆偏振光分别经光纤耦合器耦合进入两根亚微米出光孔径单模保偏光纤(single-mode fiber, SF) SF₁ 和 SF₂,从而在探头的末端得到两束具有相反旋向圆偏振态的点衍射球面波 W_1 与 W_2 。其中,两根单模保偏光纤出射端并排平行放置并集成于测量探头之中。

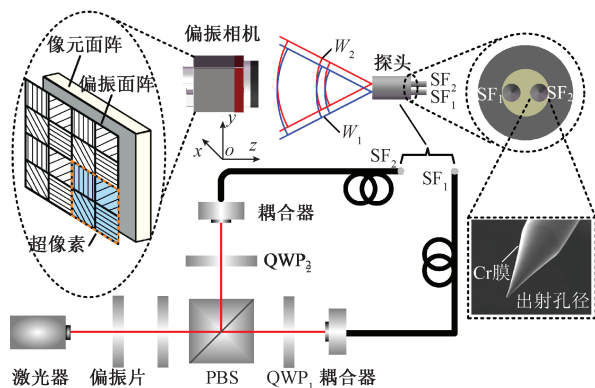


图 1 瞬态点衍射干涉系统布局

Fig.1 The layout of the transient point-diffraction interferometric system

为了实现点衍射干涉场的瞬态移相测量,系统利用偏振相机来采集点衍射干涉条纹。点衍射球面波前 W_1 与 W_2 可在偏振相机 4 个通道中分别叠加,瞬时得到相移量为 $\pi/2$ 的 4 幅移相干涉条纹,利用四步移相算法即可计算得到相对应的相位差矩阵,进而实现测量探头相对于相机探测平面三维空间位置的瞬态测量。偏振相机(polarized camera)是在传统的像元面阵前加入了由 2×2 单元微偏振器^[14](透光轴方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135°)为超像素单元所组成的偏振面阵(图 1),因而可实现一帧图像同时获取 4 个偏振方向对应 4 个通道干涉信息。利用四步移相算法即可得到与待测空间位置点相对应的瞬态波前分布,根据所建立的测量探头三维坐标与相位差分布对应关系数学模型,利用数值迭代算法得到最优的空间三维坐标值^[15],由此实现被测目标的三维绝对位移高精度瞬态测量。该系统可避免传统移相技术中

采集时间过长而引入的外界环境扰动、激光器不稳定以及随机噪声影响等问题。

1.2 瞬态点衍射干涉三维测量数学模型

以两个亚微米孔径光纤点衍射源 SF_1 、 SF_2 与偏振相机探测平面建立用于三维测量的点衍射干涉位移测量系统模型,如图2所示。图2中两个点衍射源 SF_1 、 SF_2 集成在探测探头中,并安装于测量目标之上,可根据干涉场相位分布矩阵与两个点衍射源光程差之间的对应关系,确定测量目标和电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)及探测平面之间的三维位置关系。

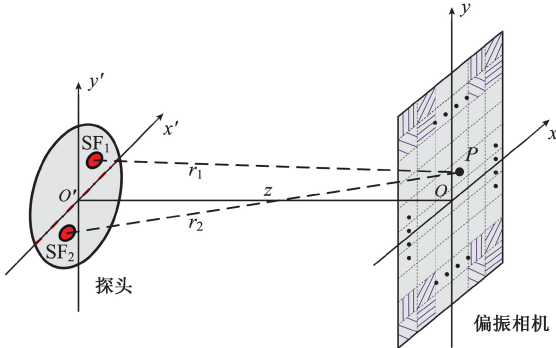


图2 瞬态点衍射干涉系统的三维测量模型

Fig.2 The three-dimensional measurement model of the transient point-diffraction interferometric system

图2中定义偏振相机探测平面为 xy 平面,中心位置点 O 是测量空间的原点, SF_1 和 SF_2 为测量探头中间距为 d 的两个点衍射光源,即两根光纤的出射端。测量探头中两个点衍射光源 SF_1 和 SF_2 的中点为 $O'(x_0, y_0, z_0)$, 两个点衍射源的空间坐标可以表示为 $SF_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 和 $SF_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ 。因此,相机探测面上任意像素点 $P(x, y, z)$ 到 SF_1 和 SF_2 的光程 r_1, r_2 可表示为:

$$\begin{cases} r_1 = [(x - x'_1)^2 + (y - y'_1)^2 + (z - z'_1)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_2 = [(x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2 + (z - z'_2)^2]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

由式(2)得到对应的 $P(x, y, z)$ 像素点处的相位差 $\varphi(x, y, z)$ 为:

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

根据点 $P(x, y, z)$ 处相位差分布 φ 与两个光纤出射端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 $f(\mathbf{\Omega})$ 。

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

式中:向量 $\mathbf{\Omega} = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ 表示点 O 与 O' 之间的位置关系; φ_0 为通过式(2)计算得到点 O 的相位差值; $\varphi_{\text{CCD}}(x, y, z)$ 和 ζ 分别为测量得到的点 P 和点 O 的相位差。在相位差矩阵中选取 $m(m \geq 6)$ 个像素点,通过

式(3)建立超定方程组 $F(\mathbf{\Omega})$ 。

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

通过最小二乘法获取空间坐标向量 $\mathbf{\Omega}$, 式可转化为方程:

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

对于两个点衍射源 SF_1 和 SF_2 的空间坐标 $\mathbf{\Omega}$, 可以通过求解方程 $\psi(\mathbf{\Omega})$ 的全局最优解获得, 利用数值迭代重构算法可对目标方程求解, 由此实现被测目标的高精度三维测量。

2 瞬态点衍射干涉三维测量误差分析

在图1所示的瞬态点衍射干涉三维测量系统中,测量精度受点衍射球面波前误差、探头结构误差、数值迭代重构算法、偏振相机误差等诸多因素的影响。其中,点衍射球面波前误差^[16]、探头结构误差、数值迭代重构算法^[17]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。偏振相机误差包括视场误差、光子响应不均匀、微偏振器消光比不均匀性和微偏振方向未对准。基于微纳加工技术可直接将微偏振片放置于探测器阵列上,目前所用的偏振相机采用了 Sony 偏振图像传感器 (Sony IMX250MYR CMOS, 分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$ pixel, 像素大小为 $3.45\,\mu\text{m} \times 3.45\,\mu\text{m}$), 其中一个微偏振器阵列由透光轴方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的4个彼此相邻线偏振器组成,使得光子响应不均匀、微偏振器消光比不均匀性和微偏振方向未对准的影响已可以忽略^[18]。本文主要针对偏振相机引入的视场误差和偏振相机视场误差所导致的测量误差进行分析。

在点衍射干涉三维测量中,三维空间坐标的测量主要是基于干涉场信息的解调实现的。偏振相机的引入为点衍射干涉场的瞬态测量提供了一个可行的方法。如图2所示,利用偏振相机单帧采集得到四通道相移量为 $\pi/2$ 的干涉条纹。设 0° 、 45° 、 90° 和 135° 透光轴方向对应的干涉图强度分布为 $I_j(j=1, \dots, 4)$, 可得测量探头对应相机探测点的相位差值分布矩阵 φ_{CCD} 为:

$$\varphi_{\text{CCD}} = \arctan \left[\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right] \quad (6)$$

在偏振相机4个偏振通道信息提取时,如果直接利用所提出的强度信息 $I_j(j=1, \dots, 4)$ 进行处理,会存在各个通道之间有像素位置偏移的问题,传统数据处理过程中通常是近似认为每一组干涉条纹位于同一超像素单元

(2×2 像素)内的相位值相等。而在点衍射干涉测量系统中偏振相机视场误差大小主要与在各个方向上的测量灵敏度有关^[19],一般情况下,各方向偏导数不为 0,即相邻像素点不相等。所以这种近似处理会对波前相位带来一定的误差,即偏振相机的视场误差。本节将针对所提出的瞬态点衍射干涉三维测量系统特有的视场误差进行讨论分析。

针对该问题,可利用重构像元周边的数据,对重构像元进行校正,常用的有线性插值 Linear、三次样条插值 Spline 和三次 Cubic 算法。图 3 所示为偏振相机重构像元,其中重构像元点可通过周边数据插值得到。

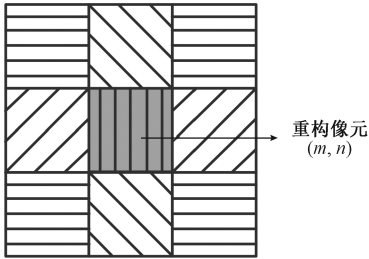


图 3 偏振相机重构像元

Fig.3 The reconstructed pixel in polarized camera

线性插值 Linear 算法如式(7)所示,插值点处函数值由连接其最邻近的两侧点的线性函数求得,各个通道的强度计算公式为:

$$\begin{cases} I_1 = I_{m,n} \\ I_2 = (I_{m-1,n} + I_{m+1,n})/2 \\ I_3 = (I_{m-1,n-1} + I_{m-1,n+1} + I_{m+1,n-1} + I_{m+1,n+1})/4 \\ I_4 = (I_{m,n-1} + I_{m,n+1})/2 \end{cases} \quad (7)$$

三次样条插值 Spline 算法如式(8)所示,其中 $0 \leq t \leq 1$, t 为通过多个邻近点的二阶导数求得,各个通道的强度计算公式为:

$$\begin{cases} I_1 = I_{m,n} \\ I_2 = I_{m,n-1} + t \times (I_{m,n+1} - I_{m,n-1}) \\ I_3 = I_{m-1,n} + t \times (I_{m+1,n} - I_{m-1,n}) \\ I_4 = I_{m-1,n-1} + t \times (I_{m+1,n+1} - I_{m-1,n-1}) \end{cases} \quad (8)$$

三次 Cubic 多项式插值与 Spline 算法类似。Linear 算法、Spline 算法与三次多项式 Cubic 算法都是为了减小视场误差带来的影响,利用多组邻近点进行插值补偿^[20]。为了比较三者对于偏振相机视场误差的校正情况,需要原始数据处理方式与三者插值算法进行比较。图 4 所示为偏振相机在不同视场误差下对应的波前相位误差大小数据图,校正后的波前相位误差较校正前有显著的降低。由图 4 可知,经 Linear、Spline 和 Cubic 插值算法校正后的相位误差虽然都达到 $10^{-3} \lambda$ 量级,但是 Spline 算法补偿后的相位误差更小,更符合球面干涉波

前的表达,所以本文选用 Spline 算法作为相位插值补偿算法。

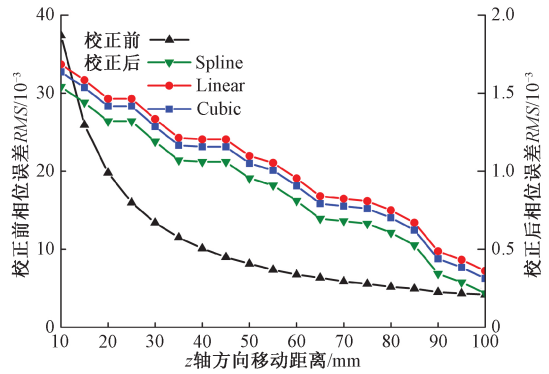


图 4 基于偏振相机不同视场误差的影响

Fig.4 Influence of different field of view errors based on polarized camera

图 5(a)和(b)所示为视场误差校正前后对应的相位误差和测量距离误差情况分布,其中测量距离表示为两点的三维坐标距离大小。在距离 z 相同情况下,相位误差越小对应的测量距离误差越小,所以一定条件下相位误差能反映测量误差的大小。

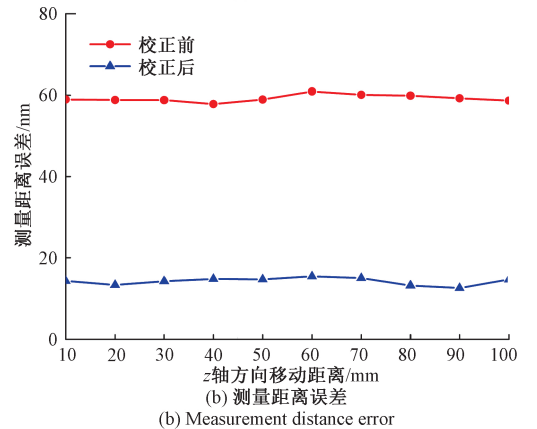
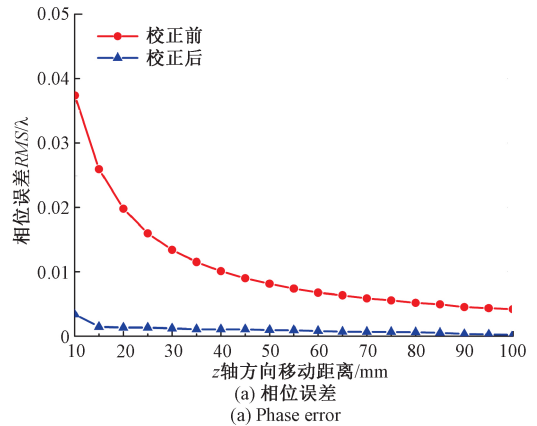


图 5 视场误差影响

Fig.5 Influence of field of view error

从图 5(a) 可知,校正前后的相位误差会随着探头距离 z 变大而减小,因为随着探头距离 z 的变大,探测面上的波前斜率随之变小,对应的视场误差大小的影响也会随之变小^[21-22]。较相位误差而言,图 5(b) 中测量距离误差随距离 z 改变而变化较为平坦,由于测量距离是式 (3) 通过数值迭代寻找全局最优解得到的坐标值。当对应 $z=20$ mm 的 z 轴移动距离,其引入相位误差的均方根与测量距离的误差值分别为 0.02λ 和 58.82 nm;利用相邻象元相位三次样条线性插值法可实现偏振相机视场误差的有效校正,校正后对应 $z=20$ mm 的 z 轴移动距离引入的波前误差的均方根与测量距离的误差值仅约为 $1.32 \times 10^{-3} \lambda$ 和 13.34 nm。测量重复性方面,基于 PZT 移相的测量距离存在残余误差,主要来自于最优解搜索算法、环境振动、空气流动以及电磁等的干扰;而引入偏振相机移相的点衍射干涉距离测量残余误差主要来于搜索算法,弥补了先前的环境干扰带来的影响。由图 5 中视场误差校正前后相位误差与测量距离误差数据对比可知,三次样条插值 Spline 算法可实现偏振相机视场误差的有效校正。

3 三维测量仿真分析

为了分析所提出的瞬态点衍射干涉三维测量系统的可行性,基于光线追迹法进行了数值仿真。仿真中将 CCD 探测器的像素大小设置为 2048×2048 ,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,测量探头的初始位置为 (10 mm, 10 mm, 10 mm),在不加入噪声的情况下,得到探头位置的测量误差约为 (0.55 pm, 0.51 pm, 8.99 fm)。

考虑到实际光学干涉检测中存在电流噪声、环境噪声等外界因素干扰会对干涉图引入随机噪声,在仿真中加入均值为 5 nm 的随机噪声。将测量探头沿 z 方向上从 (10 mm, 10 mm, 10 mm) 移动到 (10 mm, 10 mm, 100 mm) 等间距取 10 个测量位置,得到各个位置的三维测量结果如图 6 所示。图 6(a) 所示为探头在 z 方向移动时各个位置处测得视场误差校正前后 xy 坐标测量误差;图 6(b) 所示为探头在 z 方向移动时各个位置处测得视场误差校正前后 z 坐标测量误差。

图 6 中 xy 方向的测量误差相近,主要与测量灵敏度有关。图 6(a) 中视场误差补偿前 xy 方向上的平均测量误差为 37.46 nm,补偿后 xy 方向上的平均测量误差为 9.25 nm;图 6(b) 中视场误差补偿前 z 方向上的平均测量误差为 24.14 nm,补偿后 z 方向上的平均测量误差为 1.75 nm。由图 6 仿真数据可以得出,插值校正法有效地减小视场误差带来的三维测量误差,为实现 3 个方向上的高精度测量提供了一种可行的方案。

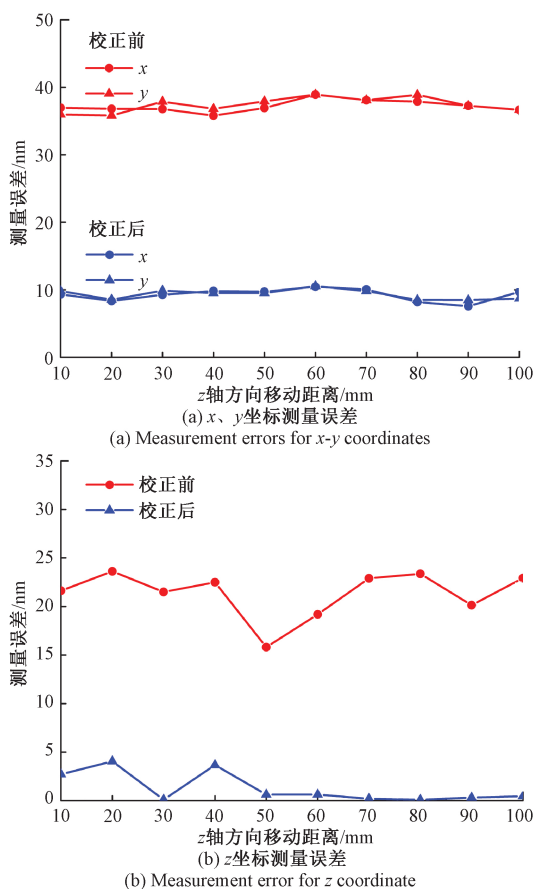


图 6 仿真中探头沿 z 方向移动时的坐标测量误差
Fig.6 The coordinate measurement errors when the probe moves in z direction in simulation

4 实验结果及分析

为了验证提出瞬态点衍射干涉三维测量系统的可行性,根据图 1 搭建了相应的三维测量实验系统,如图 7 所示。所采用的偏振相机的像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,像素数为 2048×2048 。使用海克斯康公司定位精度为 $0.35 \mu\text{m}$ 的三坐标测量机 (Leitz PMM-C) 对测量探头进行测量,进行对比实验。将探头沿 z 轴方向从位置 (10 mm, 10 mm, 10 mm) 移动到位置 (10 mm, 10 mm, 100 mm),在 10 个位置处进行等间距瞬态测量。为了验证视场误差对三维测量的有效校正,分别将采得干涉图在解调时进行有无插值校正处理,最终对比较校正前后 3 个坐标方向的测量误差。

图 8(a) 所示为探头在 z 方向移动时,各个位置处测得视场误差校正前后对应的 xy 坐标测量误差;图 8(b) 所示为探头在 z 方向移动时,各个位置处测得视场误差校正前后 z 坐标测量误差。由图 8 可知,探头 z 轴方向移动中,所提出的系统在视场误差校正前后与

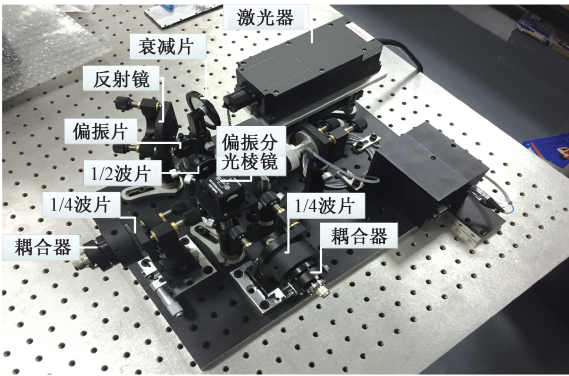


图7 点衍射干涉三维测量光路实物

Fig.7 The optical path of the point diffraction interference 3D measurement

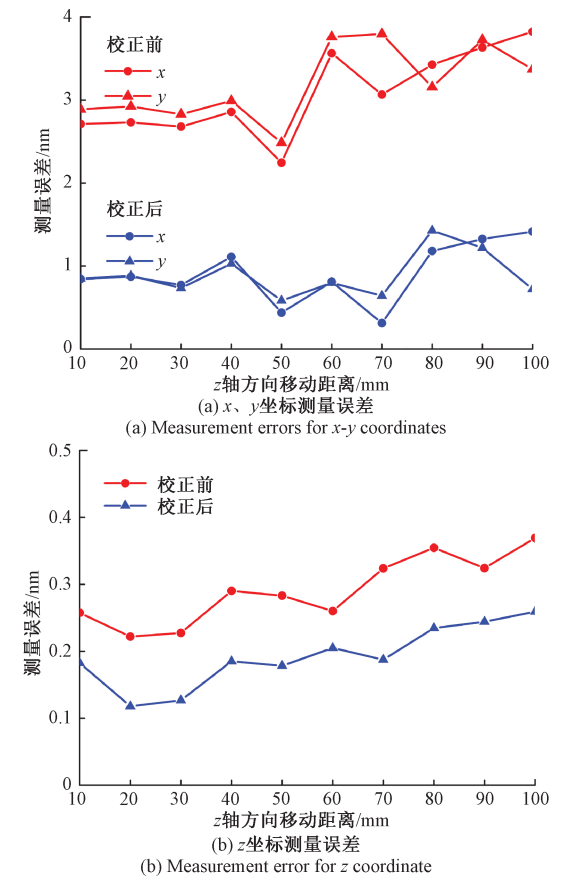


图8 实验验证中探头沿z方向移动时的坐标测量误差

Fig.8 The coordinate measurement errors when the probe moves in zdirection in experiment verification

三坐标测量机的比对偏差。校正前最大的坐标测量误差为 $3.82\text{ }\mu\text{m}$ ，校正后最大的坐标测量误差为 $1.41\text{ }\mu\text{m}$ 。

表1所示为实验中各方向测量误差的平均值。由图8和表1可知，校正前 xy 坐标平均测量误差约为

$3.12\text{ }\mu\text{m}$ ，校正后 xy 坐标平均测量误差在 $0.92\text{ }\mu\text{m}$ 以内，这是由于插值校正法有效地减小偏振相位解调时引入了视场误差。而校正前后 z 坐标平均测量误差大小较 xy 坐标平均测量误差大小并不明显，这是由于 z 坐标的测量误差较小，且误差大小更多地是由于瞬态点衍射干涉设备的测量不确定度决定。从表1可看出视场误差校正后的瞬态点衍射干涉系统能实现3个方向上位移的高精度测量。

表1 实验中的三维位移测量结果			
Table 1 Three-dimensional displacement measurement results in experiment			
视场误差	各坐标测量误差平均值		
	x	y	z
校正前	3.05	3.12	0.28
校正后	0.91	0.92	0.19

为了验证基于偏振移相的点衍射干涉三维瞬态测量系统的稳定性与抗干扰性能的提高，将其与基于PZT多步移相的实验结果进行了重复性比对。

图9所示为基于PZT移相与基于偏振相机移相的点衍射干涉三维测量系统测量重复性实验对比。由图9中基于偏振相机移相的点衍射干涉测量系统单点测量重复性误差实验可知，本文系统多次测量误差值的残差绝对值小于 $0.10\text{ }\mu\text{m}$ ，测量标准差为 4.87% ，远优于基于PZT移相的点衍射干涉系统的平均残差绝对值 $0.71\text{ }\mu\text{m}$ 和测量标准差 37.09% 。减小了原来系统在测量过程中受振动、空气流动以及电磁等环境的干扰。由此可以看出本文瞬态系统具有高精度、易于精度再现、良好的抗干扰能力等特点。

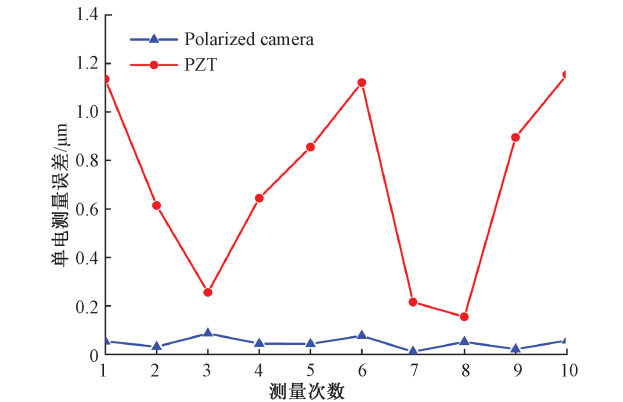


图9 不同移相方式下的测量重复性

Fig.9 Measurement repeatability in different phase shift modes

5 结 论

本文研制了一种用于瞬态三维测量的点衍射干涉系统。分析了偏振相机视场误差对三维测量精度的影响。通过引入偏振相机实现瞬态三维位移测量,可以减小激光器稳定性和环境扰动等诸多因素的影响,提高测量精度。针对偏振相位解调时存在视场误差的问题,分析了插值算法对波前相位值与测量位移值的校正。在仿真程序中分析对比了视场误差校正前后的球面波前相位误差与三维测量误差大小。实验结果表明,100 mm 测量范围内的测量标准差低于 5%,且精度达到亚微米,证明具有较好的测量精度和可靠性。该方法满足高精度瞬态检测测量精度的要求,对无导轨测量的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 马新辉,张国雄,王建利,等. 智能三坐标测量机中零件位置自动识别系统[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2): 165-170.
MA X H, ZHANG G X, WANG J L, et al. Automatic recognition for the position and orientation of parts in intelligent CMMs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2): 165-170.
- [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.
ZHOU 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] 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.
- [4] FENG D M, FENG M Q. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(5): 876-890.
- [5] HYUG-GYO RHEE, SEUNG-WOO KIM. Absolute distance measurement by two-point-diffraction interferometry [J]. Applied Optics, 2002, 41(28): 5921-5928.
- [6] 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.
- [7] SMARTT R N, STEEL W H. Theory and application of point-diffraction interferometers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14(S1): 351-356.
- [8] 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): 25550-25558.
- [9] SHARMA S, EISWIRT P, PETTER J. Electro optic sensor for high precision absolute distance measurement using multiwavelength interferometry[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3443-3449.
- [10] WANG D D, WANG F M, YANG Y Y, et al. Modified polarization point diffraction interferometer with extended measurable NA for spherical surface testing[J]. Optik, 2013, 124(22): 5481-5485.
- [11] 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.
- [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] 王道档,杨雨英,刘东,等. 压电移相器的空间旋转误差建模与实验分析[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 571-575.
WANG D D, YANG Y Y, LIU D, et al. Modeling and analysis of space-rotation error induced by phase-shifter in phase shifting interferometry [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(5): 571-575.
- [14] SARKAR S, BHATTACHARYA K. Polarization phase shifting in digital holographic microscopy [J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(1): 285-288.
- [15] 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 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.
- [16] 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.
- [17] 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): 143-150.
- [18] CHEN Z Y, WANG X, LIANG R G. Calibration method of microgrid polarimeters with image interpolation[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 995-1001.
- [19] 王道档,王志超,赵军,等. 用于三维测量的双路点衍射干涉系统[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2146-2153.
- WANG D D, WANG ZH CH, ZHAO J, et al. Dual-path point-diffraction in interference system for three-dimensional measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(9): 2146-2153.
- [20] NOVAK M, MILLER D J, BROCK N, et al. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32): 6861-6868.
- [21] WANG D D, TIAN X B, XU P, et al. Compact snapshot multiwavelength interferometer[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4463-4466.

- [22] LIU C, ZHANG F, WANG C C, et al. Wavefront reconstruction of high power laser diode array[J]. *Optical Review*, 2009, 16(5): 529-532.

作者简介



王朝,2017 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: dynasty0418@ qq.com

Wang Chao received his B. Sc. degree in 2017 from China Jiliang University. Now, he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interests include photoelectric precision detection.



王道档(通信作者),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、硕士生导师,主要研究方向为光电精密检测和点衍射干涉技术。

E-mail: wangdaodang@ sina.com

Wang Daodang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2007 from China Jiliang University, and received his Ph. D. degree in 2012 from Zhejiang University. Now, he is an associate professor and master student supervisor in China Jiliang University. His main research interests include photoelectric precision detection and point diffraction interference technology.