

基于平面法线向量的三自由度测量方法

方国明^{1,2,3**}, 彭起^{1,2*}, 马浩统^{1,2}, 乔山^{1,2,3},
边疆², 陈丰^{1,2,3}, 刘欣城^{1,2,3}, 谭玉凤^{1,2,3}, 贺壁^{1,2,3}, 董理^{1,2,3}

¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 相位调制器是相干合成孔径望远镜中光束合成机构的关键部件, 精确测量相位调制器的运动信息是相位调制器控制的核心技术之一。提出了基于平面法线向量的三自由度(俯仰角、方位角和轴向位移)测量方法, 基于法线向量的变化解算角度和位移信息, 并对所提方法进行详细描述, 分析了影响测量精度的因素。实验结果表明: 旋转角 α 和 γ 的转动范围分别为 $0\sim 0.44$ mrad 和 $0\sim 0.28$ mrad, 位移移动范围为 $0\sim 3$ μm ; 在测量范围内, 角度误差小于 3.3 μrad , 位移误差小于 50 nm。所提方法具有结构简单、测量精度高优势, 可广泛应用于相位调制器等的三自由度测量中。

关键词 测量; 精密测量; 三自由度; 法线向量; 误差分析; 数值仿真

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111201

Three-Degree-of-Freedom Measurement Method Based on Plane Normal Vector

Fang Guoming^{1,2,3**}, Peng Qi^{1,2*}, Ma Haotong^{1,2}, Qiao Shan^{1,2,3},
Bian Jiang², Chen Feng^{1,2,3}, Liu Xincheng^{1,2,3}, Tan Yufeng^{1,2,3}, He Bi^{1,2,3}, Dong Li^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The phase modulator is a key component of the beam synthesis unit in the coherent synthetic aperture telescope, and the accurate measurement of the motion information of the phase modulator is one of the key technologies for phase modulator control. The three-degree-of-freedom (pitch, azimuth, and piston displacement) measurement method based on the plane normal vector is proposed. The angle and displacement information are solved according to the change of the normal vector. The proposed method is described in detail and all the factors influencing measurement accuracy are analyzed. The experimental results show that the displacement range is $0\sim 3$ μm when the rotation ranges of the rotation angles α and γ are $0\sim 0.44$ mrad and $0\sim 0.28$ mrad, respectively. Within the measurement range, the angle error is less than 3.3 μrad and the displacement error is less than 50 nm. The proposed method has the advantages of simple structure, high measurement accuracy, and so on, which can be widely applied in the three-degree-of-freedom measurement of phase modulators and others.

Key words measurement; precision measurement; three-degree-of-freedom; normal vector; error analysis; numerical simulation

OCIS codes 120.4640; 120.1880; 080.2720; 000.4430

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(501100001809)

* E-mail: phiqi@163.com; ** E-mail: fanguoming15@mails.ucas.ac.cn

1 引言

增大天文观测望远镜的口径是提高其分辨率的有效途径,但大口径望远镜的制造难度较大。现代大型望远镜多采用相干合成孔径技术,如甚大望远镜。相位调制器是相干合成孔径望远镜中光束合成机构的关键部件。相位调制器运动信息的检测精度和速度决定了相位调制器的调制精度和控制带宽,提高相位调制器的调制精度和控制带宽有助于提高合成孔径望远镜的成像分辨率。相位调制器运动信息包括俯仰角、方位角和轴向位移 3 个自由度。而 3 个或者多个自由度的实时测量方法还处于发展阶段,单个系统实现多自由度测量的方法极少。传统的多自由度测量方法是结合多套测量设备或传感器同时对待测物进行测量的,不仅结构复杂难以装调,而且设备之间的相互影响也会引入更多误差项,不利于实际应用^[1-4]。国内外的研究机构和仪器生产厂商对多自由度测量开展了相关研究,比如基于干涉技术的多自由度测量方法^[5-8]、基于衍射技术的多自由度测量方法^[9-11]、视觉测量技术^[12-13]等。对于多自由度测量,仅采用单一技术不易实现,通常结合两种或者多种技术于一体,如基于激光干涉方法再结合图像处理技术、自准直技术和衍射技术等。近几年来,将多种方法结合起来实现多自由度测量成为了研究热点,例如:将电子散斑干涉和图像处理技术相结合实现多自由度非接触式测量^[8, 11],但该方法需要多束光从不同的方向照射被测目标,增加了系统的复杂度;将激光干涉和光栅衍射技术相结合实现多自由度测量^[9, 14],该方法能实现高精度测量,但系统结构复杂,并且需要将相应的光栅固定在被测物体上,系统安装难度比较大;将激光干涉和自准

直技术相结合实现多自由度测量,该方法不仅能实现高精度测量^[1, 15-16],而且系统的复杂度相对较小,比其他方法更具优势。但 Butler 等^[16]设计的方法需要对运动物体进行实时对焦测量,这增加了操作难度。

本文采用 3 个位移测量传感器获取待测目标平面内 3 个不共线点的位移量,而 3 个不共线的点可确定平面的法线,基于平面法线的唯一性可解算出目标的 3 个自由度运动信息,包括方位角、俯仰角和轴向位移。本文对所提方法进行了理论分析和实验研究,结果验证了所提方法的正确性和实用性。

2 原理分析

在运动机构的相关研究中,一般是研究物体在三维空间中的位置和姿态。为了确定物体在三维空间中的位置和姿态,需要建立固定的参考坐标系。刚体在三维空间中有 6 个运动自由度,实际的物体因被限制而只能在某个方向或几个方向上自由运动。本文的研究在物体仅有 3 个自由度的背景下进行,待测物体以参考坐标系 Y 轴与其相交的点作为参考点,并可绕 X 和 Z 轴旋转,以及沿着 Y 轴平移。

2.1 角度测量原理

所提方法采用 3 个高精度位移测量传感器测量被测物体反射面上 3 个非共线点的位移信息,以确定反射面法线向量的变化。根据平面法线的唯一性,由反射面法线向量的变化解算出角度和位移信息。三自由度(3-DOF)测量原理示意图如图 1 所示,图中 A、B、C 是激光干涉位移测量探头的位置。为方便描述,将 3 个激光干涉位移测量探头布置在 O-XZ 面内,物体反光面的初始位置与之平行。

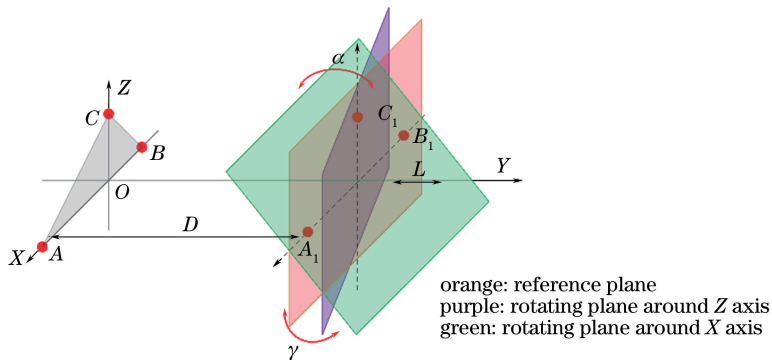


图 1 三自由度测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of 3-DOF measurement principle

在初始状态下, A 、 B 和 C 点的坐标向量分别为 $\mathbf{A}=[x_{10}, 0, 0]$ 、 $\mathbf{B}=[x_{20}, 0, 0]$ 和 $\mathbf{C}=[0, 0, z_{30}]$, 物体反光面上与之对应点的坐标向量分别为 $\mathbf{A}_1=[x_{11}, y_{11}, 0]$ 、 $\mathbf{B}_1=[x_{21}, y_{21}, 0]$ 和 $\mathbf{C}_1=[0, y_{31}, z_{31}]$, 在反光面上确定两个非共线的向量 $\mathbf{n}_1=\mathbf{C}_1-\mathbf{A}_1$ 和 $\mathbf{n}_2=\mathbf{B}_1-\mathbf{A}_1$, 反光面的归一化法线向量表示为

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2|}. \quad (1)$$

反光面绕着 X 轴和 Z 轴的旋转矩阵 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_z 表示为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (2)$$

设反光面运动前后的法向量分别为 $\mathbf{n}_0=[a_0, b_0, c_0]$ 和 $\mathbf{n}=[a, b, c]$, 利用矩阵相乘可得 \mathbf{n} , 即

$$\mathbf{n}^T = \mathbf{R}_x(\alpha)\mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{n}_0^T \Rightarrow$$

$$\begin{cases} a_0 \cos \gamma - b_0 \cos \gamma = a \\ a_0 \cos \alpha \sin \gamma + b_0 \cos \alpha \cos \gamma - c_0 \sin \alpha = b \\ a_0 \sin \alpha \sin \gamma + b_0 \sin \alpha \cos \gamma + c_0 \cos \alpha = c \end{cases}. \quad (3)$$

式中: \mathbf{n}^T 为向量 \mathbf{n} 的转置。(3)式可化简为

$$\begin{cases} c \cos \alpha - b \sin \alpha = c_0 \\ a_0 \cos \gamma - b_0 \sin \gamma = a \end{cases}, \quad (4)$$

求解(4)式即可求出 α 和 γ 。以(4)式中的第 1 个式子为例, 将其两边同除以 $\sqrt{(-b)^2 + c^2}$ 就可以将其化简为正弦和角公式, 即

$$\frac{c}{\sqrt{(-b)^2 + c^2}} \cos \theta + \frac{-b}{\sqrt{(-b)^2 + c^2}} \sin \theta = \frac{c_0}{\sqrt{(-b)^2 + c^2}}. \quad (5)$$

令 $c/\sqrt{(-b)^2 + c^2} = \sin \alpha_0$ 、 $-b/\sqrt{(-b)^2 + c^2} = \cos \alpha_0$ 和 $c_0/\sqrt{(-b)^2 + c^2} = g$, 其中 α_0 和 g 为常数, 则(5)式就可以化简合并为正弦和角 $\sin(\alpha_0 + \alpha) = g$, 求反三角即可得角度变量 α 。

根据三角函数的性质, 表达式 $c \cos \alpha - b \sin \alpha = c_0$ 中的 c 和 $-b$ 的正负值决定着 α_0 的值, 分析讨论结果如表 1 所示, 表中 $s = c/\sqrt{(-b)^2 + c^2}$ 。

由上述可得 $\alpha = \arcsin g - \alpha_0$, 实际值的范围是 $-\pi \sim \pi$, 而 $\arcsin g$ 的取值是 $-\pi/2 \sim \pi/2$, 最终以 π 的整数倍出现在结果中。测量小于 1 rad 的小角度

时, 以 1 作为判断即可, 处理数据时用表 2 的数据进行修正。同理, 根据上述求解 α 的思路可以求出 γ 。

表 1 角 α_0 的分析结果

Table 1 Analysis results of angle α_0

Variable	$-b$	c	α
	>0	>0	$\arcsin(s)$
	<0	>0	$\pi - \arcsin(s)$
	<0	<0	$\pi + \arcsin(s)$
Ranges	>0	<0	$-\arcsin(s)$
	>0	$=0$	0
	<0	$=0$	π
	$=0$	>0	$\pi/2$
	$=0$	<0	$-\pi/2$

表 2 角 α 的固定差值去除

Table 2 Fixed difference value removal of angle α

Variable	α	$ \alpha $	Results of angle α
Determination condition	<0	>1	$\alpha + \pi$
	>0	>1	$\alpha - \pi$
	Others		α

2.2 轴向位移测量

根据图 1 所示, 当物体反光面仅沿 Y 轴移动时, 3 个测量点坐标的 Y 分量变化相同。当旋转和轴向位移同时存在时, 三个测量点的位移包含了两部分运动产生的位移, 采用两步对其进行分离处理。在已知旋转角 α 和 γ 的情况下, 旋转矩阵已知, 根据初等几何学原理, 三点可唯一确定一个平面 $ax + by + cz + D = 0$ 。其中 a 、 b 、 c 和 D 分别是平面法线的三个分量和常数项, 平行平面的法向量相等, 平面方程中仅常数项不同。

在本研究中, 3 个测量点的坐标只有 Y 轴分量在变化, 因此 D 的变化仅由 Y 轴分量的变化引起。设有位移和无位移的反光面的方程分别为

$$ax + by + cz + D_1 = 0, \quad (6)$$

$$ax + b(y + \Delta y) + cz + D_2 = 0, \quad (7)$$

式中: D_1 和 D_2 分别为 Δy 引起的不相等常数项。将设定的初始坐标中任意一个点的坐标旋转到无位移运动的面上即可得到 D_2 。如, 把点 A_1 的坐标向量 $\mathbf{A}_1=[x_{11}, y_{11}, 0]$ 旋转到 \mathbf{A}'_1 , $\mathbf{A}'_1 = \mathbf{T}_r \times \mathbf{A}_1^T = [x'_{11}, y'_{11}, z'_{11}]^T$, $D_2 = -(ax'_{11} + by'_{11} + cz'_{11})$, 得到 Δy 为

$$\Delta y = \frac{D_2 - D_1}{b} =$$

$$\frac{ax + by + cz - (ax'_{11} + by'_{11} + cz'_{11})}{b}. \quad (8)$$

结合 2.1 节所示的角度测量原理可知, 基于平面法

线的测量系统能实现俯仰角、方位角和轴向位移的测量。

3 测量误差分析

所提方法需要对几个测量探测器进行安装固定,安装好的实际位置和设计位置会存在差异,这将导致多方面的误差。本方法在对位移测量探头

进行安装固定的过程中,需要考虑以下误差:1)系统误差,包括探头在 $O-XZ$ 面内的位置偏差、探头安装的轴向偏差和多个探头安装的平行度误差;2)随机误差,包括探头的测量误差、实验环境中的振动和温度等。其中,位置偏差和多个探头安装的平行度误差分别如图 2 所示,接下来分别对其进行讨论。

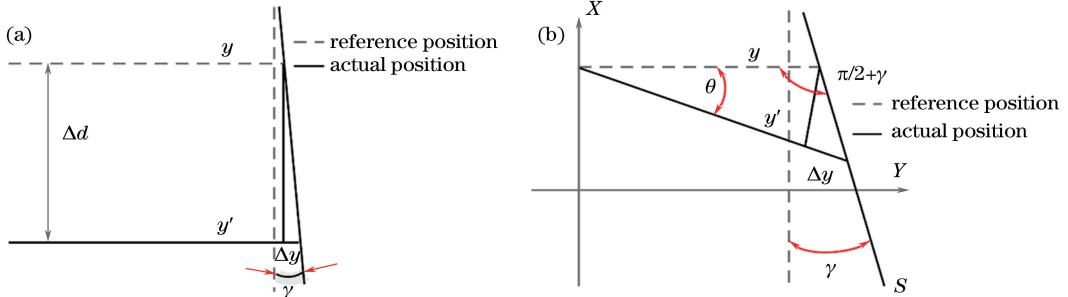


图 2 误差分析。(a)位置误差;(b)平行度误差

Fig. 2 Error analysis. (a) Position error; (b) parallelism error

3.1 测量探头的位置偏差

测量探头的位置偏差是指测量点探头位置和设计位置之间的偏差。根据测量原理,测量探头的位置偏差放大示意图如 2(a)所示。虚线 y 为没有位置偏差时探头测量的距离,实线 y' 为有位置偏差时实际测量的距离。图中的角度为物体反光面绕 X 轴的转动角,由几何关系可得位置偏差与位移测量

偏差之间的关系 $\Delta y = \Delta d \tan(\Delta\gamma)$,在小角度测量中 $\tan(\Delta\gamma) \approx 1$,从而 $\Delta y \approx \Delta d \Delta\gamma$ 。设图中的 3 个点在 Z 轴方向上有偏差, $\mathbf{A}' = [x_1, 0, \Delta z_1]$ 、 $\mathbf{B}' = [x_2, 0, \Delta z_2]$ 和 $\mathbf{C}' = [0, 0, z_3 + \Delta z_3]$,与之对应的测量面上点的坐标向量为 $\mathbf{A}_1' = [x_1, y_1, \Delta z_1]$ 、 $\mathbf{B}_1' = [x_2, y_2, \Delta z_2]$ 和 $\mathbf{C}_1' = [0, y_3, z_3 + \Delta z_3]$,由(1)式可得 \mathbf{n}_1 ,即

$$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} \Delta z_1(y_2 - y_3) + \Delta z_2(y_3 - y_1) + \Delta z_3(y_1 - y_2) + z_3(y_1 - y_2) \\ \Delta z_2 x_1 - \Delta z_1 x_2 + \Delta z_3(x_2 - x_1) - x_1 z_3 + x_2 z_3 \\ (x_2 - x_1)(y_2 - y_3) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

位置偏差对初始法向量 $\mathbf{n}_0 = [0, -1, 0]$ 不产生影响,测量物体反光面上的法线受距离值 y 和位置误差的影响。假设测量角度都处于 1 mrad 位置,工作距离为 $3 \times 10^4 \mu\text{m}$,为使偏差影响尽可能大,设 A 、 B 和 C 点在 Z 方向上的偏差分别为 $-\Delta z$ 、 0 和 Δz ,可得 \mathbf{n}_1 为

$$\mathbf{n}_1 = [0.21 + 0.016\Delta z, -209.00 + 26.50\Delta z, -0.21] / \sqrt{43681087.36 - 11076993.52\Delta z + 702250.24\Delta z^2}. \quad (10)$$

由 2.1 节中角度测量原理及对 α 和 γ 的分析可知,当 Δz 的取值在 $0 \sim 1$ mm 范围内时,传感器的位置误差与其引起的角度偏差近似呈线性关系。

3.2 多探头间的平行度误差

测量点探头的平行度是指各探头相对于参考线的偏角大小。测量探头平行度偏差引起的位移测量偏差与传感器位置偏差类似,几何关系如图 2(b)所示。

根据测量原理可知,平行度偏差同样只引入位移测量误差,因此只考虑因平行度误差引入的测量

位移误差与转动角度之间的关系即可。当物体的反光面仅沿一个方向旋转时,设反光面 S 绕 Z 轴转动的角度为 γ ,探头方向与 Y 轴正方向的夹角为 θ , θ 以 Y 轴为参考且逆时针旋转为正方向。对图 2(b)中的虚线 y 、实线 y' 和面 S 组成的三角形使用正弦定律,可得面 S 绕 Z 轴旋转时的实际测量值 y'_z 和设计位置测量值 y_z 之间的关系为 $y'_z = \frac{y_z \cos \gamma}{\cos(\theta + \gamma)}$,位移测量误差差值 $\Delta y_z = \left[1 - \frac{\cos \gamma}{\cos(\theta + \gamma)} \right] y_z$ 。同理,

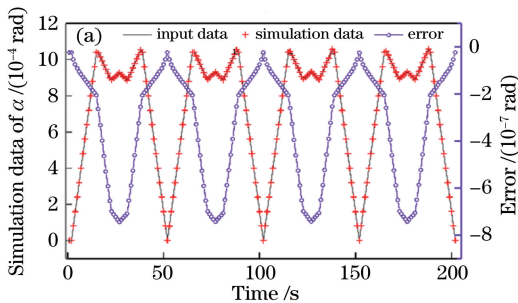
测量点在 O - YZ 面内的实际测量值 y'_x 与设计位置测量值 y_x 之间的关系为 $y'_x = \frac{y_x \cos \alpha}{\cos(\theta + \alpha)}$, 位移测量误差差值 $\Delta y_x = \left[1 - \frac{\cos \alpha}{\cos(\theta + \alpha)} \right] y_x$, 两个分量的偏差的合成即是总的 y 值之差 $\Delta y = \sqrt{\Delta y_x^2 + \Delta y_z^2}$ 。

3.3 其他误差源

其他误差源包括测量探头安装的轴向位置偏差、测量仪器的误差、实验环境中的振动、温度漂移产生的偏差及测量人员操作产生的误差。测量探头安装的轴向位置偏差属于恒定系统误差, 标定后对测量结果进行修正即可。测量仪器精度会限制所提方法的测量精度, 选用高精度的位移测量仪器可有效降低误差。实验环境中的振动误差主要来源于仪器的散热等, 实验时可将测量仪器控制器等会发生振动的设备与测量探头隔离开, 这样可大大降低可控振源对测量的影响。温度漂移会对被测件和测量仪器产生影响, 可通过测量环境的湿度、压强和温度来修正折射率, 以降低折射率变化带来的影响。本方法中的所有测量工作及数据处理都是计算机自动处理, 不需要更多的人为参与, 因此测量人员操作的影响可以忽略不计。

4 仿真分析

为了展现所提方法的实际效果, 根据图 1 所示



的结构进行仿真计算, 测量点的坐标向量分别为 $\mathbf{A} = [11.5, 0, 0]$ 、 $\mathbf{B} = [-7.5, 0, 0]$ 和 $\mathbf{C} = [0, 0, 11.0]$, 待测面上与之对应的坐标向量分别为 $\mathbf{A}_1 = [11.5, y_{11}, 0]$ 、 $\mathbf{B}_1 = [-7.5, y_{21}, 0]$ 和 $\mathbf{C}_1 = [0, y_{31}, 11.0]$, 坐标单位为 mm。假设待测面处于初始位置时 $y_{11} = y_{21} = y_{31} = D$, 工作距离 D 设为 30 mm。在仿真中, 测量点的位置偏差设置如表 3 所示。

表 3 仿真过程中测量点的位置偏差

Table 3 Positional deviations of measuring points in simulation process

Point	Positional deviation / μm		Parallelism / ($''$)	
	X	Z	Vertical	Horizontal
A	1.00	3.00	71.28	77.76
B	4.00	1.50	-71.28	58.32
C	2.20	1.80	84.24	-51.84

仿真结果如图 3 和图 4 所示, 图 3 展示了转动和位移同时存在时的角度仿真结果, 角 α 和 γ 的输入变化范围分别为 $0 \sim 1.05$ mrad 和 $0 \sim 1.40$ mrad, 误差分别为 $0.74 \mu\text{rad}$ 和 $0.70 \mu\text{rad}$; 图 4 为位移结果, 位移输入范围为 $0 \sim 16.72 \mu\text{m}$, 误差为 14 nm。图 4 中的误差随测量角度的增大而增大, 根据误差分析可知, 在小角度条件下, 位移测量误差与测量点探测器的位置误差、旋转角度近似呈线性关系。从仿真结果可以看出上述分析的合理性。

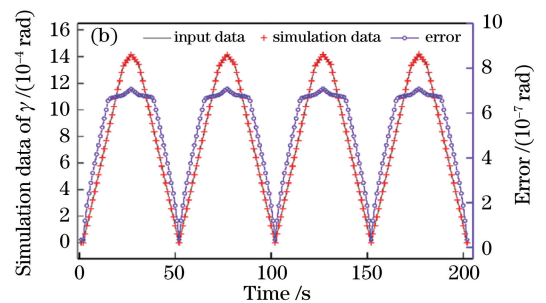


图 3 三自由度仿真的角度值。(a) 角 α ; (b) 角 γ

Fig. 3 Angle values after 3-DOF simulation. (a) Angle α ; (b) angle γ

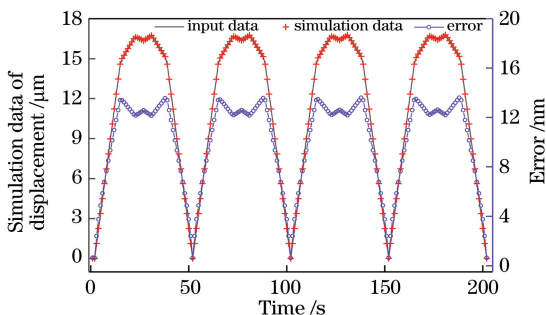


图 4 三自由度仿真的位移值

Fig. 4 Displacement values after 3-DOF simulation

5 实验研究

根据测量原理搭建了实验平台, 实验原理如图 5(a) 所示。实验用干涉仪是 attocube 公司的 IDS3010, 其分辨率为 1 pm, 重复精度为 2 nm, 该干涉仪具有三个测量通道, 可实现三点同时测量。反射镜镜架驱动器是 First Sensor 公司的 DL400-7-PCBA。轴向位移驱动器是 PI 公司的位移台 P-622.1CD, 其分辨率为 0.4 nm, 闭环线性误差为 20 nm。参考角度测量采用 MOLLER-WEDEL

OPTICAL 公司的电子自准直仪 ELCOMAT HR, 其分辨率为 $0.005''$, 精度为 $0.03''$, 其测量结果作为角度测量值的参考值。分别进行了两自由度(2-DOF)和三自由度测量实验, 角度测量范围分别为 $0 \sim 0.44$ mrad 和 $0 \sim 0.28$ mrad, 实验中位移测量范围为 $0 \sim 3$ μm 。实验现场如图 5(b) 所示, 将自准直仪测量结果作为角度对比实验的参考值, 精密位移台的输出值作为位移对比实验的参考值。

角度和位移的两自由度、三自由度实验结果如图 6 和图 7 所示。图 6 是角度测量的实验结果, 其中: 图 6(a)、(b) 分别为两自由度(转动和位移 L) 实验测量的 α 角和未转动的 γ 角的实时测量结果; 图 6(c)、(d) 分别为三自由度实验的 α 角和 γ 角的实验

结果。根据实验结果可知: 在两自由度测量实验中, 角度误差在 1.2 μrad 内, 图 6(b) 中波形的边沿出现的剧烈变化是由驱动器抖动导致的; 在三自由度测量实验中, α 角和 γ 角的误差均在 3.3 μrad 内。图 7 是位移测量实验结果, 图 7(a)、(b) 分别为两自由度和三自由度测量实验位移 L 的实验结果, 两自由度位移测量误差在 42 nm 以内, 三自由度位移测量误差在 90 nm 以内, 位移误差中包括位移台的线性误差 20 nm 和偏摆角引起的误差。综上所述, 实际测量误差在 50 nm 以内。根据实验和分析可知, 由于存在测量探头安装位置偏差和平行度误差, 随着角度偏大误差增加, 角度误差和位移误差随之增大。

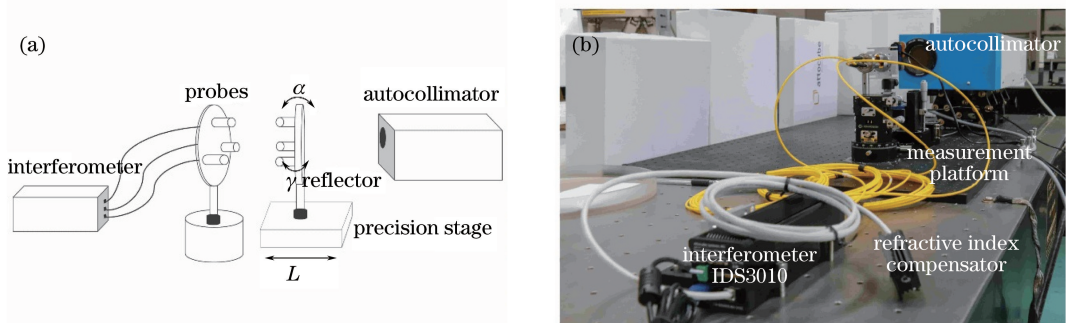


图 5 实验装置。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 5 Experimental device. (a) Schematic; (b) physical map

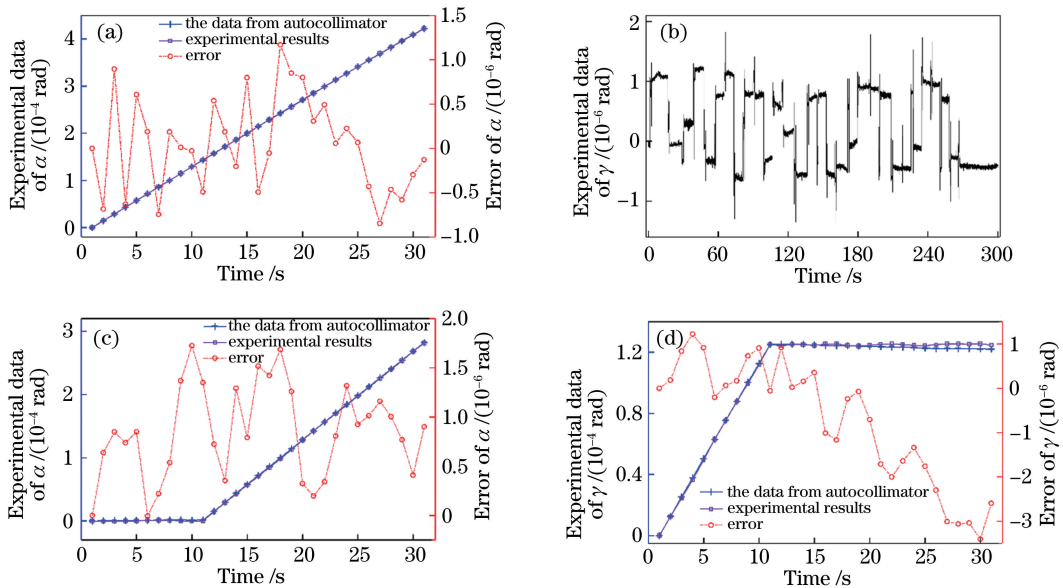


图 6 角度实验结果。(a)两自由度实验, α 角;(b)两自由度实验, γ 实时波形;

(c)三自由度实验, α 角;(d)三自由度实验, γ 角

Fig. 6 Experimental results of angle. (a) Angle α in 2-DOF experiment; (b) real-time waveform of γ in 2-DOF experiment; (c) angle α in 3-DOF experiment; (d) angle γ in 3-DOF experiment

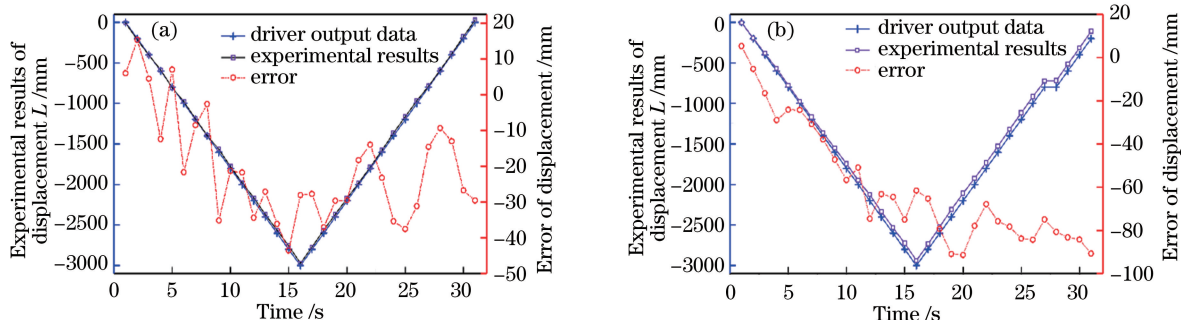


图7 位移实验结果。(a)两自由度实验;(b)三自由度实验

Fig. 7 Experimental results of displacement. (a) 2-DOF experiment; (b) 3-DOF experiment

6 结 论

本课题组提出了基于平面法线向量的三自由度运动信息测量方法,建立了测量模型和误差模型。分析了影响测量精度的因素,认为测量传感器的安装位置误差、平行度误差和环境误差是主要误差源。之后进行数值仿真和实验研究,在实验中, α 和 γ 的转动范围分别为 $0\sim 0.44$ mrad和 $0\sim 0.28$ mrad,位移移动范围为 $0\sim 3$ μm 。在测量范围内,角度误差在 3.3 μrad 以内,位移误差在 50 nm以内。基于误差源的分析可知,控制测量点探头的安装偏差和实验环境,可有效控制误差,从而达到较理想的测量精度。通过标定补偿进一步提高测量探头的安装精度和平行度,可提高位移和角度的测量精度。所提方法采用已有商用测量仪器即可实现,具有结构简单、测量精度高等优势,在三自由度测量中具有一定的实际应用意义。

参 考 文 献

- [1] Zhai Y S, Zhang Z F, Su Y L, *et al.* A multi-degree-of-freedom geometric errors measurement method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 081203.
翟玉生, 张志峰, 苏玉玲, 等. 一种多自由度误差同时测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 081203.
- [2] Lü Y, Feng Q B, Liu L S, *et al.* Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3597-3602.
吕勇, 冯其波, 刘立双, 等. 基于多准直光的六自由度测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3597-3602.
- [3] Chen Q H, Wu J, Yin C Y. Long range straightness/coaxiality measurement system using dual-frequency laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(7): 625-630.
陈强华, 吴健, 殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统 [J]. *中国激光*, 2002, 29(7): 625-630.
- [4] Yang J, Feng Q B, Li J K. Review on multi-degree-of-freedom motion error measurement methods for rotary-axis laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090003.
杨婧, 冯其波, 李家琨. 转轴激光多自由度运动误差测量综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 090003.
- [5] Zhang J H, Menq C H. A linear/angular interferometer capable of measuring large angular motion [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(12): 1247-1253.
- [6] Menq C H, Zhang J H, Shi J. Design and development of an interferometer with improved angular tolerance and its application to x - y theta measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(12): 4633-4638.
- [7] Garcia A M, Cordero R, Rayas J A. Two-wavelength electronic speckle-pattern interferometry for simultaneous measurement of two in-plane displacement fields [C]. *Latin America Optics and Photonics Conference*, 2014: LM1A.3.
- [8] Takatsuji T, Oreb B F, Farrant D I, *et al.* Simultaneous measurement of three orthogonal components of displacement by electronic speckle-pattern interferometry and the Fourier transform method [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1438-1445.
- [9] Liu C H, Jywe W Y, Chen C K. Development of a simple system for the simultaneous measurement of pitch, yaw and roll angular errors of a linear stage [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26(7/8): 808-813.

- [10] Zheng S C, Zhou S M, Huang G K, *et al.* Micro-angle measurement based on two-dimensional moire fringes generated by square aperture micro-lens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0205002.
郑三超, 周素梅, 黄高坤, 等. 基于方形孔径微透镜阵列二维叠栅条纹的微小角度测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0205002.
- [11] Khodadad D, Singh A K, Pedrini G, *et al.* Full-field 3D deformation measurement: comparison between speckle phase and displacement evaluation [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7735-7743.
- [12] Ruan X D, Li S L, Zhuge L, *et al.* Study on the pose measurement of multi-degree freedom mechanisms with stereovision[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(5): 571-573.
阮晓东, 李世伦, 诸葛良, 等. 用立体视觉测量多自由度机械装置姿态的研究[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(5): 571-573.
- [13] Wu H, Zhang X M, Gan J Q, *et al.* High-precision displacement measurement method for three degrees of freedom-compliant mechanisms based on computer micro-vision[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2594-2600.
- [14] Hsieh H L, Pan S W. Three-degree-of-freedom displacement measurement using grating-based heterodyne interferometry[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6840-6848.
- [15] Kim J W, Kang C S, Kim J A, *et al.* A compact system for simultaneous measurement of linear and angular displacements of nano-stages [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15759-15766.
- [16] Butler S C, Ricci M A, Wang C, *et al.* Homodyne displacement measuring interferometer probe for optical coordinate measuring machine with tip and tilt sensitivity[C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9633: 96332E.