

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312197

基于准直激光的跟踪合作目标小范围 二维姿态测量方法研究

邱启帆^{1,2}, 程智^{2,3}, 高豆豆^{2,3}, 董登峰^{2,3}, 周维虎^{1,2,3}

(1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106; 2. 中国科学院微电子研究所 北京 100029;
3. 中国科学院大学 北京 101408)

摘要:为了解决远距离激光跟踪合作目标的高精度二维姿态测量问题,提出了一种基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态高精度测量方法。首先,详细阐述了角锥棱镜的光学特性与基于角锥棱镜的激光跟踪原理;其次提出了一种利用开孔角锥棱镜和光电探测器的二维姿态测量方法,并分析了激光光束向量、开孔角锥棱镜、光电探测器与合作目标的数学关系,建立了姿态解算模型,并设计了一款合作目标靶标;最后构建了高精度姿态测量系统,进行了实验数据采集与参数模型标定,并通过验证实验进行了精度分析与评价。实验结果表明,本文所提出的测量装置精巧实用,在 $\pm 5^\circ$ 的工作范围内测角误差不超过 0.011° ,满足高精度的工程应用需求。

关键词: 姿态测量; 准直激光束; 激光跟踪

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Research on the small-range two-dimensional attitude measurement method of tracked cooperative target based on collimating laser

Qiu Qifan^{1,2}, Cheng Zhi^{2,3}, Gao Doudou^{2,3}, Dong Dengfeng^{2,3}, Zhou Weihu^{1,2,3}

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Institute of Microelectronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: To solve the problem of high-precision two-dimensional attitude measurement for long-distance laser tracking cooperative targets, a small-range two-dimensional attitude measurement method based on the collimated laser is proposed in this article. Firstly, the optical characteristics of the angular prism and the principle of laser tracking based on the angular prism are described in detail. Secondly, a two-dimensional attitude measurement method using a cube-corner prism with incision and photodetector is proposed, and the mathematical relationship among laser beam vector, cube-corner prism with incision, photodetector, and the cooperative target is analyzed, the attitude solution model is established, and a cooperative target is designed. Finally, a high-precision attitude measurement system is established. Experimental data acquisition and parameter model calibration are carried out, and accuracy analysis and evaluation are implemented through verification experiments. The experimental results show that the proposed measuring device is ingenious and practical. The measuring angle error is less than 0.011° in the working range of $\pm 5^\circ$, which meets the demand of high-precision engineering applications.

Keywords: attitude measurement; collimated laser; laser tracking

0 引言

在飞机、船舶、航天器和风电等大尺寸零部件的加

工、装配和校准现场,通常使用激光跟踪仪作为外形尺寸和形位公差等空间几何数据的快速精密测量仪器^[1-2]。然而随着我国国民经济快速发展和现代制造水平的快速提升,三维坐标测量已经逐渐不能满足于现场需求,例如

大飞机翼身装配、火电机组对中找正、高铁车体焊接调平等还需要高精度的姿态测量信息,因而发展面向大型工程的6自由度测量能力日益迫切。

目前行业内常见的以激光跟踪仪为基准的姿态测量手段主要有惯性测量、机械定位测量、视觉测量和多站激光测量等。瑞士 Leica 公司推出的 T-Probe 为目前行业精度较高的测量靶标,T-Probe 上安装了三维空间分布的主动红外特征点,并通过安装在激光跟踪仪主机上的高速相机对其识别并进行姿态测量,其测角精度可以到 $\pm 0.01^\circ$,然而该产品的有效工作距离仅 15 m。美国的 API 公司推出的(STS) smart tracker sensor 通过驱动二维转台主动追踪跟踪光的方法,使用光栅盘和倾角传感器进行合作目标三维姿态测量。该方法装置复杂,不利于用户手持测量场景下使用。国内对激光跟踪姿态测量方法研究的起步较晚,与国外相比仍有一定差距。华中科技大学、天津大学和上海交通大学等高校基于盾构机的自动导向系统,设计了一套组合了全站仪、针孔棱镜、倾角传感器、相机和惯性传感器的姿态测量系统^[3-8]。该系统由全站仪发射激光并射向棱镜中心,部分激光束沿着针孔射向位于针孔后端的相机,进而获取方位角和俯仰角,滚转角由惯性传感器获得。然而该系统采用了复杂的光学设计,对测量光的能量要求较高,且引入了较多的光学器件引起的误差。湖北工业大学的张慧娟等^[9]基于视觉的方式,提出了一种单目视觉姿态自动测量方法。该方法综合利用 EPnP 算法与 SoftPOSIT 算法各自的特性进行了融合,利用 EPnP 算法给 SoftPOSIT 算法提供初值,并使用 SoftPOSIT 完成后续解算,从而完成姿态的自动测量。该方法解算精度受图像处理精度影响较大,当时仅适用于 3 m 的近距离环境下,随着距离增大,图像处理难度增加,姿态解算精度也随之降低。天津大学的郭庆尧等^[10]提出了一种基于激光靶和捷联惯导系统的组合位姿测量方法。该方法建立组合测量系统的卡尔曼滤波模型,利用卡尔曼滤波校正位姿误差和惯性传感器随机误差。在卡尔曼滤波模型中加入故障检测方法,使组合系统具有自监控功能^[11]。当激光靶姿态失效时,仅使用校正后的 SINS 数据,保证系统的可靠性。该方法能有效地解决激光靶姿态角测量失效问题,提高系统抗干扰性和动态性能,但只对所提方法进行了仿真验证。湖北工业大学的张刘港等^[12]基于张慧娟的研究基础,提出了一种基于单目视觉和 PSD 的多元信息融合姿态自动测量方法。该方法在使用 EPnP 和 SoftPOSIT 进行基于视觉的姿态解算的基础上,引入了光电位置探测器,通过两者数据融合并从而完成姿态的自动测量。该方法解算精度受图像处理精度影响有所减小,随着距离增大,靶标特征点在图像中所占像素减少的问题仍是特征点捕捉失败的主要原因。由于环境杂光和光照条件在工业现场

难以保持一致且存在环境较差的可能性,视觉的标定和图像处理依然面临较大的挑战。信息工程大学的王欣宇等^[13]提出了一种基于 3 台激光跟踪仪和 3 个靶球的多站激光跟踪仪姿态测量方法,然而该方法测量的操作复杂,在一些工业现场难以提供较好的测量环境。

本文针对远距离时视觉测姿方法失效、主动追踪靶标结构复杂的问题,研究了一种结构简单且远距离可用的基于准直激光的跟踪合作目标二维姿态测量方法。首先阐述了基于激光跟踪仪准直光束对准特性的跟踪合作目标姿态测量原理与特点。然后利用该特点提出了一种基于光电探测器和开孔角锥棱镜的姿态测量方法,并分析了光束向量、光电探测器、开孔角锥棱镜、合作目标的数学关系,建立了跟踪测量中合作目标相对光束向量的二维姿态测量模型,并设计了一款合作目标靶。最后设计了该模型的参数标定方法并搭建实验进行了验证。实验结果表明,该方法结构简单且不受视觉方法有限视场的限制,在 $\pm 5^\circ$ 的工作范围内测角误差不超过 0.011° ,满足高精度的测量需求。

1 基于准直激光的跟踪合作目标二维姿态测量原理

激光跟踪仪使用角锥棱镜作为合作目标靶标,其由 3 个相互正交的反射表面组成,具有反射光平行入射光出射的特点,如图 1 所示。在此基础上将其锥点切除,形成由两个相互平行的透射表面和 3 个相互正交的反射表面组成的开孔角锥棱镜,其实物如图 2 所示。其在保留角锥棱镜良好的后向反射特性的基础上,可将一部分光束进行透射,增加一路指向信息。

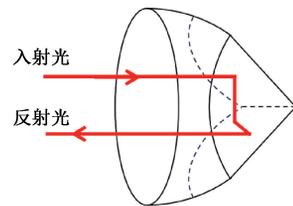


图1 角锥棱镜的特性

Fig. 1 Characteristics of the cube-corner prism

利用激光跟踪仪的准直激光对跟踪合作目标二维姿态进行测量的系统结构如图 3 所示,测距仪和脱靶量探测器固联在二轴转台内,构成激光跟踪仪;开孔角锥棱镜和光电探测器固联成合作目标。在跟踪测量状态下,激光跟踪仪使用测距仪的测量光作为跟踪光打向合作目标。经过角锥棱镜反射后的光平行入射光返回,经过分光镜后一部分作为测量臂进入测距仪;另一部分入射到脱靶量探测器并在其表面形成返回光光斑。激光跟踪仪

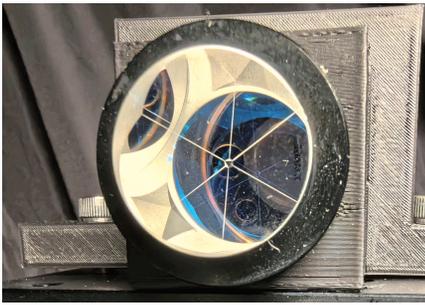


图2 开孔角锥棱镜

Fig. 2 Cube-corner prism with incision

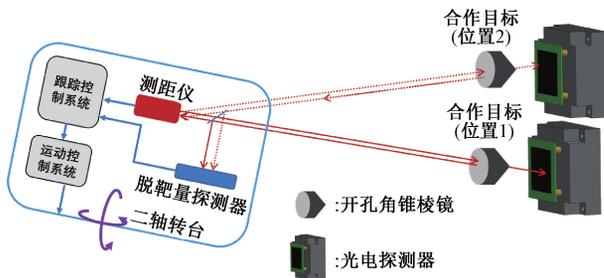


图3 跟踪合作目标二维姿态测量系统结构示意图

Fig. 3 Diagram of a two-dimensional attitude measurement system for tracking cooperative targets

的跟踪控制系统根据该光斑在脱靶量探测器上的坐标,驱动二维转台转动一定角度,使跟踪光始终指向角锥棱镜的中心点,实现激光跟踪。

在此基础上,透过开孔棱镜的指向光束与跟踪光束同向。在开孔角锥棱镜后端固联一个光电探测器,当合作目标发生姿态变化时,注意到指向光束在光电探测器的坐标亦会发生变化。基于这一现象,本文提出一种基于激光准直的合作目标二维姿态测量方法。合作目标基于角锥棱镜开孔相对光束向量的角度变化可以等效为光束向量基于角锥棱镜开孔相对合作目标的角度变化,为了便于理解,图4以侧视图的形式展示了当光束向量基于角锥棱镜开孔相对合作目标发生俯仰角变化时,跟踪光经过角锥棱镜开孔在光电探测器上的光斑坐标变化。这一过程是实现基于激光准直的合作目标二维姿态测量的关键要素之一,即通过光斑坐标的变化和合作目标靶标的系统参数即可计算姿态角。

本文基于准直激光测量跟踪合作目标二维姿态系统进行研究,在激光跟踪时,系统通过光电探测器获取指向光斑在探测器像平面的坐标数据,通过预先标定好的光电探测器坐标系与靶标坐标系的空间关系,计算其在靶标坐标系下的坐标,并据此计算其相对光束向量坐标系的转换关系,得到其关于光束向量的旋转矩阵,当滚转角为0时,即可认为旋转矩阵表征所需要的二维姿态角。

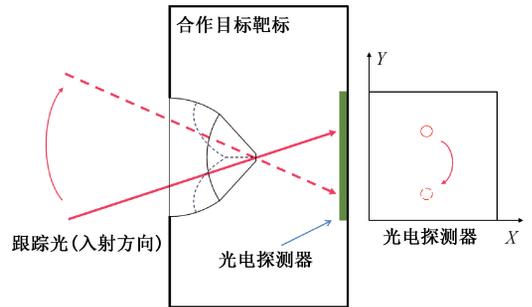


图4 入射方向的跟踪光经过角锥棱镜开孔在光电探测器上的光斑坐标变化示意图

Fig. 4 Diagram of spot coordinate change of incident direction tracking light on a photodetector through the cube-corner prism with incision

为了便于描述,后文将“合作目标靶标”简称为“靶标”。

2 跟踪测量中靶标相对光束向量的二维姿态测量模型

如图5所示,开孔角锥棱镜和光电探测器均固联在合作目标上,当合作目标相对跟踪光束的姿态发生变化,即透过开孔角锥棱镜的指向光束方向发生变化时,其在光电探测器像平面的坐标同步发生变化,如何描述这一过程是本模型需要解决的问题。由于该模型基于几何光学进行分析,光电探测器仅为二维探测器,故该模型仅能有效分析二维姿态,第三维度的姿态变化需要外部探测器获取。为了便于分析,本文仅讨论单个方向上的情形,另一方向可参考讨论。

2.1 坐标系定义

定义光束坐标系 $O^l - X^l Y^l Z^l$ 。原点 O^l 位于光束与角锥棱镜开孔截面的交点。 Z^l 与光束重合,指向跟踪仪的方向为正。 Y^l 与 Z^l 垂直,与激光跟踪仪的竖轴和光束所在平面共面,与激光跟踪仪的竖轴正方向夹角为锐角的方向为正方向。 $O^l - X^l Y^l Z^l$ 满足右手坐标系,如图5所示。定义与靶标固联的靶标坐标系 $O^t - X^t Y^t Z^t$,原点 O^t 与 O^l 重合。认为当跟踪光正入射,靶标横轴与激光跟踪仪横轴平行、靶标的竖轴与激光跟踪仪的竖轴平行时, $O^t - X^t Y^t Z^t$ 与 $O^l - X^l Y^l Z^l$ 重合,即认为此时三轴姿态均为0。定义与光电探测器固联的与光电探测器坐标系 $O^d - X^d Y^d Z^d$ 。原点 O^d 位于与光电探测器中心处, X^d 与 PSD 横轴重合且同向, Y^d 与光电探测器的竖轴重合且同向, $O^d - X^d Y^d Z^d$ 满足右手坐标系。

2.2 靶标相对光束向量的二维姿态测量模型

首先分析光电探测器坐标系和靶标坐标系的关系。

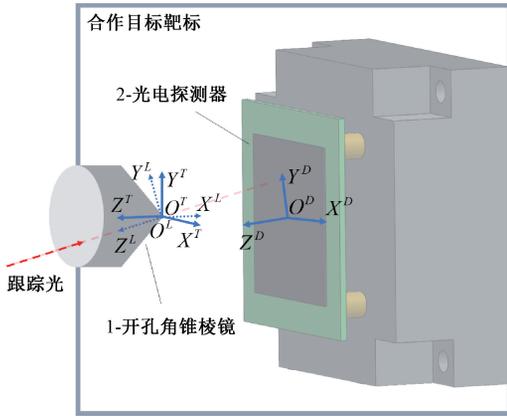


图 5 坐标系定义

Fig. 5 Definition of the coordinate system

当指向光斑在光电探测器上形成坐标 $(x^D, y^D, z^D)^T$ 时, 其在靶标坐标系下的坐标表示为 $(x^T, y^T, z^T)^T$ 。认为光电探测器坐标系绕 X^D 转动角度 θ_x 到 $O^{D'} - X^{D'} Y^{D'} Z^{D'}$, 旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

$O^{D'} - X^{D'} Y^{D'} Z^{D'}$ 绕 $Y^{D'}$ 轴转动角度 θ_y 到 $O^{D''} - X^{D''} Y^{D''} Z^{D''}$, 旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$O^{D''} - X^{D''} Y^{D''} Z^{D''}$ 绕 $Z^{D''}$ 轴转动角度 θ_z 到 $O^{D'''} - X^{D'''} Y^{D'''} Z^{D'''}$, 旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$O^{D'''} - X^{D'''} Y^{D'''} Z^{D'''}$ 经过平移得到 $O^T - X^T Y^T Z^T$, 平移向量为:

$$\mathbf{T}_D^T = (X_0, Y_0, Z_0)^T \quad (4)$$

于是:

$$\begin{pmatrix} x^T \\ y^T \\ z^T \end{pmatrix} = \mathbf{R}_z(\theta_z) \mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x) \begin{pmatrix} x^D \\ y^D \\ z^D \end{pmatrix} + \mathbf{T}_D^T = \mathbf{R}_D^T \begin{pmatrix} x^D \\ y^D \\ z^D \end{pmatrix} + \mathbf{T}_D^T \quad (5)$$

其中, $\mathbf{R}_D^T = \mathbf{R}_z(\theta_z) \mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x)$ 表示光电探测器坐标系到靶标坐标系的旋转矩阵, 进而可以认为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0$ 和 Z_0 是合作目标靶标的系统参数。由于光电探测

器是二维测量元件, 故 $z^D = 0$ 。

进一步分析靶标坐标系到光束向量坐标系的关系。定义三维姿态均为 0 时的光束为基准光束, 此时在光电探测器上形成的光斑为基准光斑, 定义其在靶标坐标系下的坐标为 $\mathbf{P}_0(x_0^T, y_0^T, z_0^T)^T$, 其单位方向向量可以表示为 $\vec{e}_0 = \left(\frac{x_0^T}{\|P_0\|}, \frac{y_0^T}{\|P_0\|}, \frac{z_0^T}{\|P_0\|} \right)^T$, 认为此时与光束向量坐标系 $O^L - X^L Y^L Z^L$ 重合, 式中 $\|P_0\|$ 表示其模长。同理, 某一姿态下光斑 $\mathbf{P}_i(x_i^T, y_i^T, z_i^T)^T$ 的单位方向向量为 $\vec{e}_i = \left(\frac{x_i^T}{\|P_i\|}, \frac{y_i^T}{\|P_i\|}, \frac{z_i^T}{\|P_i\|} \right)^T$ 。由于 $O^T - X^T Y^T Z^T$ 与 $O^L - X^L Y^L Z^L$ 原点重合, 可以进一步认为 \vec{e}_0 旋转后即与 \vec{e}_i 重合。于是:

$$\begin{pmatrix} \frac{x_i^T}{\|P_i\|} \\ \frac{y_i^T}{\|P_i\|} \\ \frac{z_i^T}{\|P_i\|} \end{pmatrix} = R(\gamma) R(\beta) R(\alpha) \begin{pmatrix} \frac{x_0^T}{\|P_0\|} \\ \frac{y_0^T}{\|P_0\|} \\ \frac{z_0^T}{\|P_0\|} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, α 表示靶标的俯仰角, β 表示靶标的方位角, γ 表示靶标的滚转角。注意到, 由于 T_D^T 的存在, 使得:

$$\vec{e}_0 = (0, 0, 1)^T \quad (7)$$

代入式(6), 可以得到输入量为光电探测器探测光斑坐标 (x_i^P, y_i^P) 的靶标姿态计算模型:

$$\begin{pmatrix} \cos\gamma_i \sin\beta_i \cos\alpha_i + \sin\gamma_i \sin\alpha_i \\ \sin\gamma_i \sin\beta_i \cos\alpha_i - \cos\gamma_i \sin\alpha_i \\ \cos\beta_i \cos\alpha_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(\cos\theta_z \cos\theta_y)x_i^P + (\cos\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x - \sin\theta_z \cos\theta_x)y_i^P + X_0}{\|P_i\|} \\ \frac{(\sin\theta_z \cos\theta_y)x_i^P + (\sin\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x + \cos\theta_z \cos\theta_x)y_i^P + Y_0}{\|P_i\|} \\ \frac{(-\sin\theta_y)x_i^P + (\cos\theta_y \sin\theta_x)y_i^P + Z_0}{\|P_i\|} \end{pmatrix} \quad (8)$$

3 合作目标靶标设计

基于本文对跟踪合作目标二维姿态测量原理的分析, 合作目标靶标主要由开孔角锥棱镜与光电探测器固联组成, 本章将对其展开设计。

3.1 开孔角锥棱镜

前文已经阐述了开孔角锥棱镜的反射特性, 本节将具体讨论其设计。由于开孔角锥棱镜存在切口的原因,

导致标准圆形光斑经其反射/透射后,其图像不再是一个规则的圆形。对于透射光,由于开孔的加工工艺为在实心角锥棱镜顶点磨削形成平行于入射面的端面,故其透射光斑理论上为正三角形,如图 6 所示。



图 6 透过开孔角锥棱镜的光斑摄影图
Fig. 6 Photograph of a spot of light through a cube-corner prism with incision

当光波沿着棱镜底面法线方向正入射时,开孔角锥棱镜的通光孔径为底面三角形的内切圆直径。然而在实际工作中,随着棱镜的姿态角增大,入射光在棱镜底面的入射点也逐渐偏离底面内切圆的圆心,趋向棱镜的边缘,从而使入射光在棱镜的投影区域逐渐变大。根据 Snell 定律^[14],即可得到入射光在棱镜底面的最小投影直径 D_{\min} ,亦即其有效通光孔径:

$$D_{\min} \geq \frac{2\omega_0}{\left(1 - \sqrt{2} \tan\left(\arcsin\left(\frac{1}{n} \sin(\theta + V)\right)\right)\right)} \quad (9)$$

其中, n 表示开孔角锥棱镜的折射率, θ 表示开孔角锥棱镜绕其顶点旋转角度 V 时的入射光束与垂直于棱镜底面正入射的光束所形成的夹角, $2\omega_0$ 表示入射光直径。当棱镜的折射率 $n = 1.515 1$, 入射光直径 $2\omega_0 = 10.56 \text{ mm}$ 时,根据式(9)即可计算得到开孔角锥棱镜的通光孔径 D 随 V 和 θ 的关系曲线,如图 7 所示。

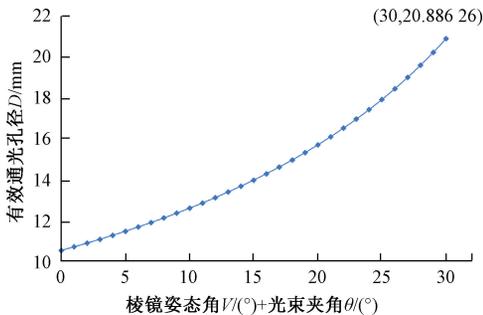


图 7 通光孔径随棱镜姿态角和光束夹角变化的曲线
Fig. 7 The curve of aperture with prism attitude angle and beam angle

由仿真结果可知,当光束与开孔角锥棱镜底面垂直方向夹角 30° 时,棱镜的最小通光孔径为 20.9 mm 。考虑到激光跟踪仪所需的脱靶量和机械安装需要预留一些空间,设计其外径尺寸为 25.4 mm ,开孔边长 1 mm ,同时为了提高透射率和反射率,分别在其透射面和反射面镀增透膜和金属膜。其加工零件主视图和侧视图分别如图 8(a)和(b)所示,实物图如图 2 所示。

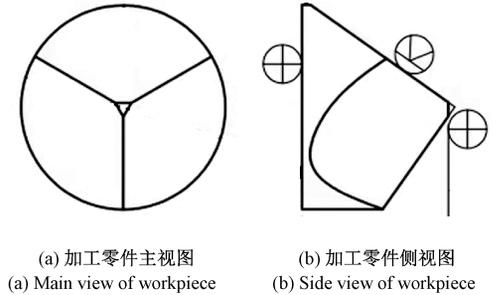


图 8 开孔角锥棱镜加工零件图
Fig. 8 Machining parts drawing of cube-corner prism with incision

3.2 光电探测器

图 9 展示了入射光非正入射棱镜时的透射光板摄影图,由于光束能量会随着光路中光学元件的增加而减小,故本文不对光斑进行二次整形。由图 9 与图 6 对比可知,由于衍射现象的存在^[3],在入射角发生变化时,光斑能量重分布会对光斑位置的计算有较大影响。为了更准确地辨识光斑位置,本系统使用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)作为光电探测器,并提出了一种用于提取三角形心的算法。



图 9 非正入射时透过开孔角锥棱镜的光斑摄影图
Fig. 9 Photograph of a spot of light through a cube-corner prism with incision at non-normal incidence

综合考虑靶面尺寸、像元大小与帧率等参数,选择大恒 HD-R1201C-U3 作为光电探测器,其参数如表 1 所示。

表 1 所用相机的参数

Table 1 The parameters of the camera used

型号	HD-R1201C-U3
分辨率	4 000×3 000
靶面	1/1.7"
像元尺寸	1.85 μm
最大帧率	35.9 fps
感光区域面积	7.40 mm×5.55 mm

受机械设计与加工工艺以及姿态测量分辨率的约束,设计开孔角锥棱镜开孔与光电探测器的距离为 20 mm,进一步考虑光电探测器感光面积的约束,靶标的单个姿态测角范围不超过±7.89°,考虑到安装误差的存在,本文将仅研究可用于机床构件姿态测量等场合的±5°的小测角范围。

进一步设计光斑形心提取算法,对于本文而言,图像处理的核心目的是找到透射三角光斑的形心。由于干扰像与需要提取的像亮度差异较大,可以通过大阈值的二值化方法过滤干扰像。对于三角边缘因切口工艺等原因产生的不规则锯齿,通过闭运算的方法进行处理,以提高连通域的质量。进而通过连通域点集最小外包三角形拟合的方式找到目标三角型及其形心坐标。

基于上述开孔角锥棱镜和所选的光电探测器,制作了如图 10 所示的合作目标靶标。



图 10 合作目标靶标实物图

Fig. 10 The physical object of the target for the cooperative objective

4 参数标定实验与测量精度评价实验

本章将基于式(8),设计实验对图 10 所示的靶标展开系统参数的标定,并进行姿态测量精度评价。

4.1 实验装置

在参数标定时,由于将系统参数视作未知量,且参数会参与到全部维度的姿态计算,则可以使用单轴角度发

生装置将其中一维的姿态变化量视作已知量,通过拟合的方式解算系统参数。同理,在精度评价时,系统参数已知,亦通过单轴角度发生装置对某一维产生标准角度,并据此评价姿态测量精度。实验装置示意图如图 11 所示, L 表示跟踪部件与合作目标靶标的距离。实验装置实物图如图 12 所示。

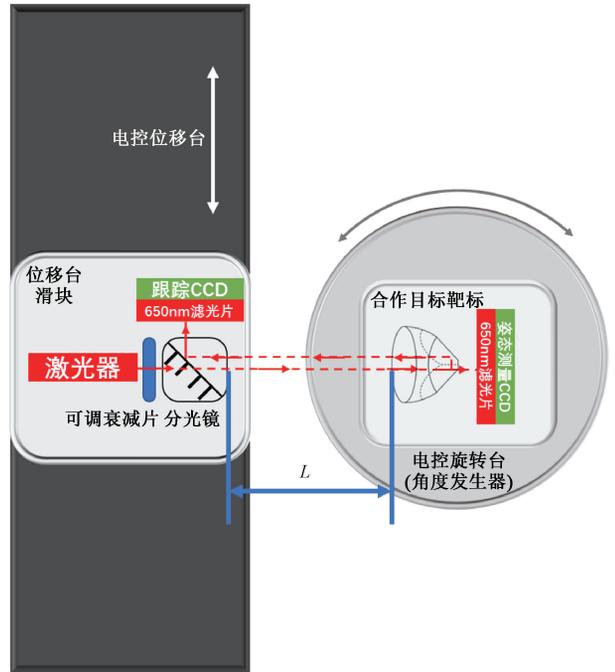


图 11 姿态测量靶标参数标定及精度评价实验装置示意图

Fig. 11 Diagram of an experimental device for parameter calibration and accuracy evaluation of an attitude measurement target

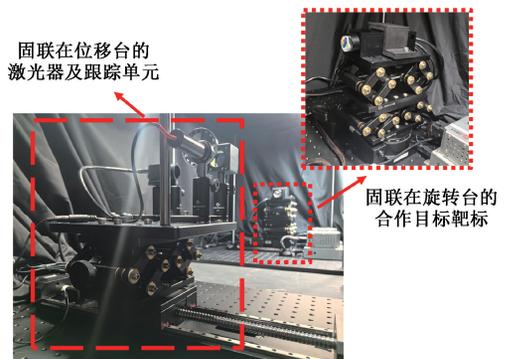


图 12 姿态测量靶标参数标定及精度评价实验装置

Fig. 12 Experimental device for parameter calibration and accuracy evaluation of an attitude measurement target

实验使用电控旋转台作为标准单轴角度发生装置,将合作目标靶标固联在电控旋转台上,进而认为靶标所测得的姿态角为角度发生装置和跟踪光之间的角度。

由于姿态测量仅关心坐标系间的旋转,为了减少在数据采集过程中因跟踪光发生姿态变化而引入的姿态测量误差,该装置跟踪部分的元件仅作一维平移运动,即认为电控位移台所产生的位移方向为激光跟踪仪的横轴方向,用于约束激光光束向量坐标系。采用 CCD 作为跟踪脱靶量探测器,当返回光在跟踪 CCD 上的光斑位置保持一致时,即认为完成了一次跟踪^[15]。

实验所用激光器为 650 nm 红外激光器,为了提高 CCD 成像质量,在跟踪 CCD 和姿态测量 CCD 前均布设了 650 nm 滤光片。

4.2 参数标定实验

以电控旋转台带动靶标产生方位角变化,进行系统

$$\begin{cases} \frac{(\cos\theta_z \cos\theta_y)x_i^p + (\cos\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x - \sin\theta_z \cos\theta_x)y_i^p + X_0}{\|P_i\|} - \cos\gamma_i \sin(A_i - A_0 + \beta_{base}) \cos\alpha_i + \sin\gamma_i \sin\alpha_i = 0 \\ \frac{(\sin\theta_z \cos\theta_y)x_i^p + (\sin\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x + \cos\theta_z \cos\theta_x)y_i^p + Y_0}{\|P_i\|} - \sin\gamma_i \sin(A_i - A_0 + \beta_{base}) \cos\alpha_i - \cos\gamma_i \sin\alpha_i = 0 \\ \frac{(-\sin\theta_y)x_i^p + (\cos\theta_y \sin\theta_x)y_i^p + Z_0}{\|P_i\|} - \cos(A_i - A_0 + \beta_{base}) \cos\alpha_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, x_i^p, y_i^p 和 A_i 均为输入量, α_i, γ_i 和 β_{base} 均为未知不变量,进而通过拟合的方法求解 $\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0$ 和 Z_0 等 6 个系统参数。

实验在 $L=0.5$ m 处共采集 5 个标准角度 $A_i - A_0$ 下所对应的 5 组光斑坐标 (x_i^p, y_i^p) , 每组数据采集不少于 10 个点参与拟合。实验数据的统计特性如表 2 所示,其中 u_i^p 与 v_i^p 用于表征光斑在姿态测量 CCD 上的像素坐标,根据表 1 给出的像元尺寸,可知其与 x_i^p 和 y_i^p 的关系为:

$$\begin{cases} x_i^p (\mu\text{m}) = 1.85u_i^p (\text{pixel}) \\ y_i^p (\mu\text{m}) = 1.85v_i^p (\text{pixel}) \end{cases} \quad (11)$$

表 2 用于拟合系统参数的实验数据的统计特性

Table 2 Statistical properties of experimental data used to fit system parameters

$A_i - A_0$ /(°)	u_i^p 平均值 /pixel	v_i^p 平均值 /pixel	u_i^p 标准差 /pixel	v_i^p 标准差 /pixel
-5	621.793	1 438.776	0.008 528	0.004 408
-2	1 338.965	1 430.099	0.007 862	0.004 173
0	1 818.000	1 424.303	0.008 944	0.005 390
2	2 298.222	1 418.489	0.005 164	0.003 723
5	3 022.967	1 409.723	0.008 277	0.003 666

据其拟合系统参数的结果如表 3 所示。

4.3 精度评价实验

以电控旋转台带动靶标产生方位角变化,进行精度评价实验为例,结合图 11 和 12,设计实验步骤如下。

参数拟合为例,结合图 11 和 12,设计实验步骤如下。

1) 调整电控位移台和电控旋转台的位置,使激光大致正入射角锥棱镜,记录电控旋转台角度 A_0 、姿态测量光斑形心坐标 (x_0^p, y_0^p) 以及跟踪光斑形心坐标 (x^f, y^f) 。

2) 驱动电控位移台转动角度 ΔA_i , 记录电控旋转台角度 A_i 。

3) 驱动电控位移台,使跟踪光斑坐标形心坐标回到 (x^f, y^f) , 记录此时姿态测量光斑形心坐标 (x_i^p, y_i^p) 。

由于电控旋转台角度为 A_0 时,方位姿态角真值未知,定义其为 β_{base} 参与运算。由于标定过程为单轴姿态变化,故俯仰姿态角和滚动姿态角均认为不变。结合式(8),得到下列方程组:

表 3 参数拟合结果

Table 3 The results of parameter fitting

被拟合量	拟合结果
θ_z /(°)	0.658 105
θ_y /(°)	-0.852 367
θ_x /(°)	2.850 873
X_0 /mm	-2.892 765
Y_0 /mm	-2.784 796
Z_0 /mm	25.218 919

1) 代入表 3 的系统参数,调整电控位移台和电控旋转台的位置,使经过测量模型计算后的方位角 β_0 尽可能接近 0,且电控位移台运动过程中靶标坐标系下的光斑坐标的 y_i^T 值保持不变,记录跟踪光斑的形心坐标 (x^f, y^f) , 转台位置 A_0 归 0。

2) 驱动电控位移台转动到角度 A_i 。

3) 驱动电控位移台,使跟踪光斑坐标形心坐标回到 (x^f, y^f) , 记录此时经过测量模型计算后的方位角 β_i 。

4) 比对 $A_i - A_0$ 与 $\beta_i - \beta_0$ 。

表 4 所示为以 1° 为步长采集了标准角度 $A_i - A_0$ 从 -5° 变化到 5° 的 11 组方位角测量结果。为了验证参数普适性,在超出视觉方法工作距离的 $L=20$ m 处展开实验。

由表 4 可知 $\beta_0 = 0.987 5$, 进一步比较 $A_i - A_0$ 与 $\beta_i - \beta_0$ 的差值,表征测量误差,结果如图 13 所示。

表4 测量结果

Table 4 Measurement results (°)

标准角度 $A_i - A_0$	测量结果 β_i
-5.0	-4.002 6
-4.0	-3.023 0
-3.0	-2.009 3
-2.0	-1.011 9
-1.0	-0.005 1
0.0	0.987 5
1.0	1.985 9
2.0	2.987 4
3.0	3.990 4
4.0	4.994 0
5.0	5.986 5

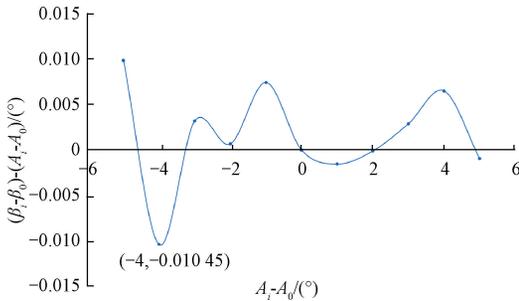


图13 姿态测量误差曲线

Fig. 13 Error curve of attitude measurement

由图13可知,在实验数据所覆盖的 $\pm 5^\circ$ 有效工作范围内,标准角度变化 -4° 时,有误差最大值为 0.01045° ,满足高精度的测量需求。

5 结 论

本文面向使用简单结构进行远距离高精度激光跟踪合作目标姿态测量的需求,研究了一种基于光电探测器和开孔角锥棱镜的姿态测量方法,并建立了激光光束向量、开孔角锥棱镜、光电探测器与合作目标的关系模型,设计制作了一款合作目标靶标,并以合作目标方位姿态角为例,完成了实验数据采集与参数模型标定,并开展验证实验进行了精度评价。

实验结果表明,本文研究的二维姿态测量方法结构精巧、工作距离远、精度高,在20 m处单次计算的合作目标方位姿态角误差小于 0.011° ,满足高精度测量需求。此外本文设计的参数标定方法工作量小,应用价值高,可用于实现远距离高精度的跟踪合作目标小范围二维姿态测量。

参考文献

[1] 刘娇月,杨聚庆,董登峰,等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, et al. Optoelectronic aiming and positioning system for laser trackers [J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23(6): 1558-1564.

[2] 侯宝芬. 6D精密激光跟踪测量技术的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.
HOU B F. 6D research on precision laser tracking measurement technology [D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery), 2012.

[3] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
GAO Y. Research on 6-DOF measurement in large-scale precision engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

[4] 杨文辉,林嘉睿,高扬,等. 激光靶位姿测量系统的建模与误差分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(4): 293-298.
YANG W H, LIN J R, GAO Y, et al. Modeling and error analysis of laser target pose measurement system [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(4): 293-298.

[5] 陈洋,林嘉睿,高扬,等. 视觉与倾角传感器组合相对位姿测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 173-181.
CHEN Y, LIN J R, GAO Y, et al. Method of relative pose measurement with combination of vision and inclination sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 173-181.

[6] 邵涛. 用于盾构姿态测量的激光靶关键技术[D]. 华中科技大学, 2012.
SHAO T. Key technologies of laser target for shield attitude measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[7] 朱国力,陈沛东. 盾构姿态测量中基于边缘检测的中心定位算法[J]. 机械工程与自动化, 2014(5): 39-41.
ZHU G L, CHEN P D. Center positioning algorithm based on edge detection in shield attitude measurement [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(5): 39-41.

[8] 何斐彦,林嘉睿,高扬,等. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 190-197.
HE F Y, LIN J R, GAO Y, et al. Pose measurement system optimized by combination of monocular vision and

- inclinometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 190-197.
- [9] 张慧娟,熊芝,劳达宝,等. 基于EPnP算法的单目视觉测量系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 190-195.
- ZHANG H J, XIONG ZH, LUO D B, et al. Research on monocular vision measurement system based on EPnP algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5):190-195.
- [10] 郭庆尧,林嘉睿,任永杰,等. 基于激光标靶和捷联惯导系统组合位姿测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1):322-329.
- GUO Q Y, LIN J R, REN Y J, et al. Orientation measurement method based on laser target and strapdown inertial navigation System [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2018, 55(1):322-329.
- [11] 王姣,杨凌辉,黄喆,等. 基于光电扫描/捷联惯导系统的室内组合导航算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10):109-118.
- WANG J, YANG L H, HUANG ZH, et al. Research on indoor integrated navigation algorithm based on optoelectronic scanning/strapdown inertial navigation system [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2016, 53(10):109-118.
- [12] 张刘港,熊芝,冯维,等. 基于视觉与激光准直的激光跟踪姿态角测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8):30-36.
- ZHANG L G, XIONG ZH, FENG W, et al. Laser tracking attitude angle measurement method based on vision and laser collimation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8):30-36.
- [13] 王欣宇,范百兴,潘廷耀,等. 目标动态位姿激光跟踪测量方法研究[J]. *测绘通报*, 2016(S2):207-210, 221.
- WANG X Y, FAN B X, PAN T Y, et al. Research on

laser tracking and measurement method of target dynamic pose [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(S2):207-210,221.

- [14] 张以谟. *应用光学*[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
- ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [15] 董登峰,周维虎,纪荣祎,等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2):309-318.
- DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, et al. Design of precision tracking system of laser tracker [J]. *Optics Precision Engineering*, 2016, 24(2):309-318.

作者简介



邱启帆(通信作者),2020年于南京航空航天大学获得学士学位,现为南京航空航天大学博士研究生在读,主要研究方向为光电精密测量及自动控制。

E-mail: qiuqifan@nuaa.edu.cn

Qiu Qifan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2020. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include optoelectronic precision measurement and automatic control.



周维虎,1983年于合肥工业大学获得学士学位,2000年于合肥工业大学获得博士学位。现为中国科学院微电子研究所研究员,主要研究方向为光电精密测量。

E-mail: zhouweihu@ime.ac.cn

Zhou Weihu received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1983, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2000. He is currently a research fellow at the Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest includes optoelectronic precision measurement.