

文章编号 1004-924X(2016)05-0963-08

三维姿态角高精度测量装置

孙国燕^{1,2*}, 高立民¹, 白建明¹, 杨东来¹, 潘亮¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于二维自准直仪和坐标系旋转变换矩阵, 提出一种高精度、高稳定性三维姿态角(偏摆角、俯仰角和滚转角)测量方法, 并设计了一种三维测角装置。介绍了该装置的工作原理和结构组成。建立了三维测角模型, 根据自准直测角原理和坐标旋转矩阵推导了理论算法。基于测量要求设计了光学系统, 采用现场可编程门阵列(FPGA)单芯片实现了实时双 CMOS 图像传感器的驱动成像、像点识别与细分定位、三维转角计算及与 USB 的快速通信。提出了三维测角装置的标定方法, 保证了实际设备参数与理论设计数据的统一。最后对提出的滚转角测量算法进行了实验验证, 并分析了影响测角精度的因素及其影响程度。标定和试验结果表明: 在 $\pm 20'$ 的视场范围内, 三维测角装置的偏摆角、俯仰角和滚转角的测量精度分别达到了 $2.2''$, $2.5''$ 和 $8.7''$ 。该结果验证了设计的装置结构简单、稳定可靠、精度高, 且易工程实现三维姿态角的测量。

关键词: 三维姿态角测量; 角度测量装置; 二维自准直仪; 滚转角; 俯仰角; 偏摆角; 标定

中图分类号: TB922; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.0963

High accuracy three-dimensional attitude angle measuring device

SUN Guo-yan^{1,2*}, GAO Li-min¹, BAI Jian-ming¹, YANG Dong-lai¹, PAN Liang¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: sunguoyan@opt.ac.cn

Abstract: A high accuracy measuring device and corresponding measuring method for three-dimensional attitude angles (yaw, pitch and roll) were designed based on an autocollimator and a coordinate rotary transfer matrix. The working principle and structural composition were introduced. A three-dimensional attitude angle measuring model was established and the theory algorithm by coordinate rotation matrix was derived based on the principle of autocollimation angle measurement. Then, the optical system was designed according to the demand of the measurement system. A single Field Programming Gate Array(FPGA) was used to implement double CMOS image sensor imaging, spot identifying, subdivision positioning, three-dimensional attitude angle calculation and rapid communication with a USB. To ensure the unity of the actual equipment parameter and design data, a high precision calibration method was researched for the three-dimensional attitude angle measuring device. Finally, three-dimensional attitude angles were tested to verify this measuring device, and the

收稿日期: 2016-01-19; 修订日期: 2016-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11404387); 中国科学院“西部之光”计划资助项目(No. Y329451213)

degrees and the factors affecting the angle measuring accuracy were analyzed as well. Calibration and experiment measurement results indicate that the measuring precisions of the yaw, pitch and roll angles for the measuring device are $2.2''$, $2.5''$ and $7.8''$ respectively in view field of $\pm 20'$. It shows that the three-dimensional attitude angle measuring device has higher precision, simpler structure as well as stronger stabilization, and can be widely applied to engineering practices.

Key words: three-dimensional attitude angle measurement; angle measuring device; two-axis autocollimator; roll angle; pitch angle; yaw angle; calibration

1 引言

在精密制造业、航空、航天和武器装备等领域,设备间的相对三维姿态角(偏摆角、俯仰角和滚转角)是影响加工精度或系统传递性能的关键参数,需要对它们进行高精度测量。对于俯仰角和偏摆角,可以采用常规光电测量方法获取;而滚转角的高精度测量则一直是精密测量技术领域的一个难题。

目前,滚转角测量主要有激光干涉法、偏振光测量法和二维自准直仪测角法等,不过这些方法大都处于原理和试验阶段,距离实际工程应用还有一定距离^[1-3]。其中,激光干涉法的测量精度高,但是测量过程中对环境的要求苛刻,滚转角测量受偏摆角、俯仰角的影响较大,测量精度稳定性差,很少用于现场测量中^[4-9]。偏振光测量法基于磁光调制原理,对光源稳定性和杂散光的抑制要求很高,且偏振光测量系统设计复杂、测量灵敏度不高,存在一定的应用局限性^[1,10]。自准直仪测角具有精度高、结构简单和稳定性高等优点,但其测量范围较小,

因此广泛应用于小角度测量领域^[3,11]。

本文基于二维自准直仪和坐标系旋转变换矩阵,提出了一种适用于复杂环境、结构简单且精度高的三维姿态角测量方法。设计了三维测角装置,并进行了标定和试验验证,实现了三维姿态角高精度、高稳定性的实时测量。该方法可广泛应用于工程实践中。

2 三维姿态角测量原理及数学建模

2.1 测量原理

三维姿态角测量系统主要由两个相同的二维自准直仪和一个反射部件组成,其原理如图 1 所示。两个二维自准直仪的光轴夹角和反射部件的正斜反射面的夹角均为 θ ,反射部件固定到被测物体上。当被测物体发生三维转动时,自准直仪 1 瞄准反射部件正反射面,通过光学自准直测量原理测量出正反射面的二维角度变化量,同时自准直仪 2 测量出反射部件斜反射面的二维角度变化量。对两个二维自准直仪测量出的角度信息进行数据处理,即可解算出被测物体的三维姿态角。

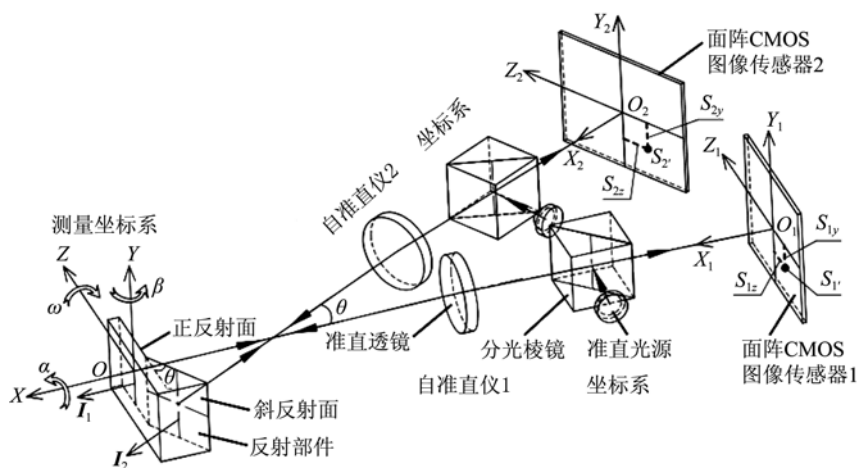


图 1 三维姿态角测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed three-dimensional attitude angle measurement

2.2 数学建模

测角设备的测量坐标系 OXYZ 与自准直仪 1 的坐标系一致,定义为 $OX_1Y_1Z_1$,如图 1 所示。自准直仪 2 的坐标系 $OX_2Y_2Z_2$ 为自准直仪 1 坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 中 XOZ 平面绕 OY_1 轴逆时针旋转 θ 所得到的坐标系,二者在同一水平面内。单位向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 分别对应反射部件正、斜反射面的法线矢量,夹角为 θ 。在测量坐标系中,设向量 \mathbf{I}_1 的坐标为 $(1,0,0)^T$,则向量 \mathbf{I}_2 的坐标为 $(\cos \theta, 0, -\sin \theta)^T$,向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 的变化对应着反射部件的正、斜反射面的三维转角的变化。

被测物体依次绕 OX 轴、OZ 轴、OY 轴分别旋转 α, ω, β 角后,向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 变为 $\mathbf{I}'_1, \mathbf{I}'_2$ (在测量

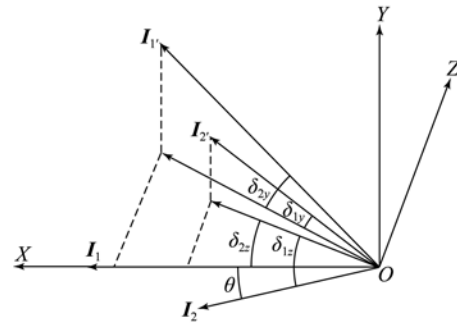


图 2 三维旋转后的向量 $\mathbf{I}'_1, \mathbf{I}'_2$

Fig. 2 Vectors $\mathbf{I}'_1, \mathbf{I}'_2$ after target rotated in three-dimension

坐标系 OXYZ 中),如图 2 所示。

$$\mathbf{I}'_1 = \text{Rot}_{y=\beta} \times \text{Rot}_{z=\omega} \times \text{Rot}_{x=\alpha} \times \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \beta \\ \sin \omega \\ -\cos \omega \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{I}'_2 = \text{Rot}_{y=\beta} \times \text{Rot}_{z=\omega} \times \text{Rot}_{x=\alpha} \times \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \beta \cos \theta - \sin \theta \sin \beta \cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta \sin \omega \\ \sin \omega \cos \theta + \sin \theta \sin \alpha \cos \omega \\ -\cos \omega \sin \beta \cos \theta - \sin \theta \cos \beta \cos \alpha - \sin \alpha \sin \beta \sin \omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\text{Rot}_{x=\alpha}, \text{Rot}_{y=\beta}, \text{Rot}_{z=\omega}$ 分别为绕 OX 轴、OY 轴、OZ 轴旋转 α, β, ω 角的坐标变换矩阵^[12-14]。

定义旋转后的向量 $\mathbf{I}'_1, \mathbf{I}'_2$ 与平面 XOZ 的夹角变化量分别为 δ_{1y}, δ_{2y} ,与平面 XOY 的夹角变化量分别为 δ_{1z}, δ_{2z} 。由 \mathbf{I}'_1 坐标可得:

$$\delta_{1y} = \arcsin \left[\frac{\sin \omega}{1} \right] = \omega, \quad (3)$$

$$\delta_{1z} = \arctan \left[\frac{-\cos \omega \sin \beta}{\cos \omega \cos \beta} \right] = -\beta \quad (4)$$

自准直仪 1 发射出的光束入射到反射部件正反射面上,反射回的光线被自准直仪 1 的 CMOS 图像传感器 1 接收,其像点 S'_1 的水平、竖直方向的位移量 S_{1z}, S_{1y} 可以通过测量得到。设自准直仪 1 的接收系统焦距为 f ,由自准直测量原理可得像点 S'_1 的位移量与正反射面偏摆角 δ_{1z} 和俯仰角 δ_{1y} 的关系如下:

$$S_{1z} = f \tan(2\delta_{1z}), \quad (5)$$

$$S_{1y} = f \tan(2\delta_{1y}). \quad (6)$$

同理,根据向量 \mathbf{I}'_2 的坐标可计算 \mathbf{I}_2 与平面 XOZ 的夹角变化量 δ_{2y} ,自准直仪 2 测得位移量 S_{2y} 与 δ_{2y} 的关系如下:

$$\delta_{2y} = \arcsin(\sin \omega \cos \theta + \sin \theta \cos \omega \sin \alpha), \quad (7)$$

$$S_{2y} = f \tan(2\delta_{2y}). \quad (8)$$

当 α, β, ω 为小角度时,可近似得到: $\sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta, \sin \omega \approx \omega, \cos \alpha \approx \cos \beta \approx \cos \omega \approx 1$,结合式(3)~式(8),推导得出被测物体的偏摆角 β 、俯

仰角 ω 和滚转角 α 的计算式公分别为:

$$\omega = \frac{\arctan \left[\frac{S_{1y}}{f} \right]}{2}, \quad (9)$$

$$\beta = -\frac{\arctan \left[\frac{S_{1z}}{f} \right]}{2}, \quad (10)$$

$$\alpha = \omega \beta + \frac{\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{f}{2\sqrt{f^2 + S_{2y}^2}} - \omega \cos \theta}}{\sin \theta}. \quad (11)$$

3 三维测角系统设计

根据实际工程需要,设定两个二维自准直仪夹角和反射部件正斜反射面的夹角均为 10° ,测量范围为 $\pm 20'$,工作距离为 1.2 m。

3.1 二维自准直仪光学系统

根据三维测角范围为 $\pm 20'$,工作距离为 1.2 m,视场角最小为 2.2° ,设计二维自准直仪的有效口径为 60 mm 以满足视场要求。二维自准直仪的光学系统焦距 f 取 240 mm,相对孔径 F 为 4。选用像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ 、像元数为 2048×2048 的 CMOS 图像传感器 CMV4000,保证十细分后自准直测角的最小分辨角为 $0.3''$ 。选择峰值响应波长为 625 nm 的高性能 LED 作为准直光源,以匹配 CMV4000 的光谱响应,从而保证长时间工作的稳定性。

3.2 三维测角电控系统

三维测角电控系统主要由 DC/DC 电源变换电路、准直光源驱动电路、CMOS 二维失准角测量电路及数据传输接口电路组成,功能框图如图 3 所示。

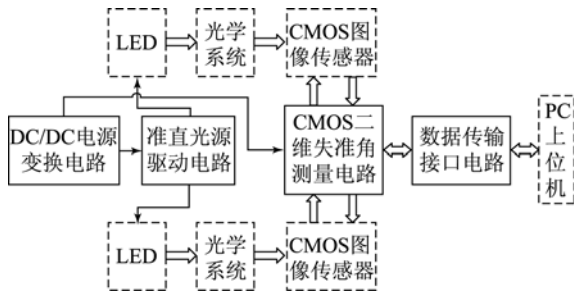


图 3 三维测角硬件系统功能框图

Fig. 3 Function diagram of hardware system for attitude angle measurement

系统选用单片 FPGA 同时驱动控制两片 CMOS 图像传感器。FPGA 采用低电压差分信号(LVDS)接口方式接收 CMOS 图像传感器输出的图像数据,并对原始图像进行数字滤波和星点图像捕捉。对捕捉到的星点进行亚像素细分操作后,计算两套自准直仪同时测量的失准角,从而进一步解算出滚转角、偏摆角、俯仰角的变化量,并将这些角度信息通过 RS422 串口传送至上位机。FPGA 硬件逻辑示意图如图 4 所示。

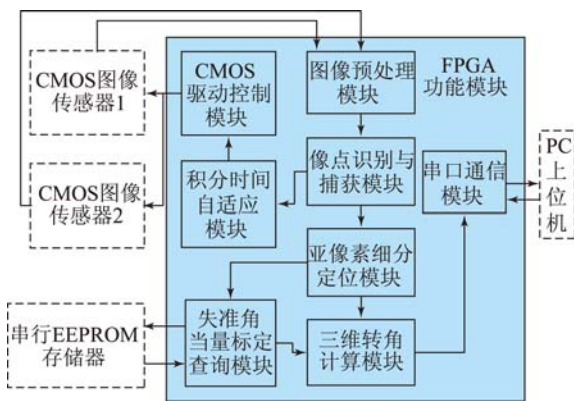


图 4 FPGA 硬件逻辑示意图

Fig. 4 Schematic diagram of FPGA hardware logic circuit

4 三维测角标定与试验

4.1 三维测角系统标定

三维测角系统在实际应用前,需要校准和测试内部光学系统和外部结构的几何参数,方能保证高

的测量精度。首先需要标定二维自准直仪,建立其 CMOS 图像传感器上的图像像素与测量得到的偏摆角、俯仰角间的真实对应关系,用以消除二维自准直仪实际装配后光学成像性能与理论计算参数的差异。然后,对反射部件两个反射面夹角、两个二维自准直仪光轴之间的夹角进行测量,并根据测量结果修正角度计算公式。由于二维自准直仪测角精度标定、两个二维自准直仪间光轴夹角和反射部件参数测定是分开进行的,因此各部分的安装误差对标定精度影响不大。



图 5 二维自准直仪标定

Fig. 5 Calibration of two-axis autocollimator

如图 5 所示,这里通过经纬仪、二维电控转台、双面反射镜和 PC 机完成对二维自准直仪的标定。为了保证标定精度,经纬仪选用徕卡公司的 TM5100 高精度经纬仪,测角精度为 0.5"。首先,调节经纬仪、二维自准直仪和双面反射镜光轴高度一致且中心对准,二维自准直仪距双面反射镜反射面的工作距离为 1.2 m。通过二维电控转台控制双面反射镜的偏摆、俯仰转动,一面供经纬仪测量其偏摆角、俯仰角的变化值,一面通过二维自准直仪自准,并在 PC 机上显示其水平和垂直方向的像元数。

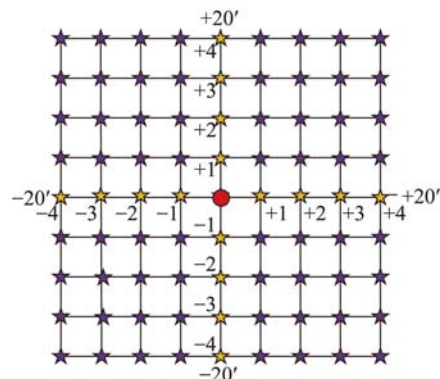


图 6 网格标定法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of grid calibration method

网格标定法原理如图 6 所示,对应于 $-20' \sim +20'$ 测角视场的 CMOS 像面通过 81 个点均匀

分割,由每个像点质心细分后的水平、垂直方向的像元位置坐标确定,其零位为中间圆点所示的位置。通过二维电控转台调节,以 5' 为步长,对方位和俯仰方向 81 个点取样,记录二维自准直仪水平像元数 z_i 、垂直像元数 y_i 及对应的偏摆角 h_i 和俯仰角数值 v_i 。采用三次曲面拟合公式(12)和式(13)处理 81 组数据,建立二维自准直仪的偏摆角和俯仰角与其像点质心在 CMOS 像面的水平像元数 x_i 和垂直像元数 y_i 的对应关系:

$$h = k_{0h} + k_{1h}z_i + k_{2h}y_i + k_{3h}z_i^2 + k_{4h}y_i^2 + k_{5h}z_i y_i + k_{6h}z_i^3 + k_{7h}y_i^3 + k_{8h}z_i y_i^2 + k_{9h}z_i^2 y_i, \quad (12)$$

$$v = k_{0v} + k_{1v}z_i + k_{2v}y_i + k_{3v}z_i^2 + k_{4v}y_i^2 + k_{5v}z_i y_i + k_{6v}z_i^3 + k_{7v}y_i^3 + k_{8v}z_i y_i^2 + k_{9v}z_i^2 y_i. \quad (13)$$

对两台二维自准直仪标定完成后,按照标定方法分别进行二维角度测量。二维自准直仪 1 在 $-20' \sim +20'$ 测角视场内,偏摆角的最大测角误差为 $2.2''$,出现在 (β, ω) 为 $(5', -20')$ 和 $(10', -10')$ 两个位置;俯仰角的最大测角误差为 $2.5''$,出现在 $(10', 0)$ 和 $(10', -10')$ 两个位置,如图 7 所示。图 7 中标定值为黑色圆点,误差棒代表测量值与标定值的误差大小和方向。为使误差表达更加直观,将图中所示误差取为实际误差的 50 倍。二维自准直仪 2 在 $-20' \sim +20'$ 测角视场内偏摆角、俯仰角的最大测角误差分别为 $2.5'', 2.5''$ 。

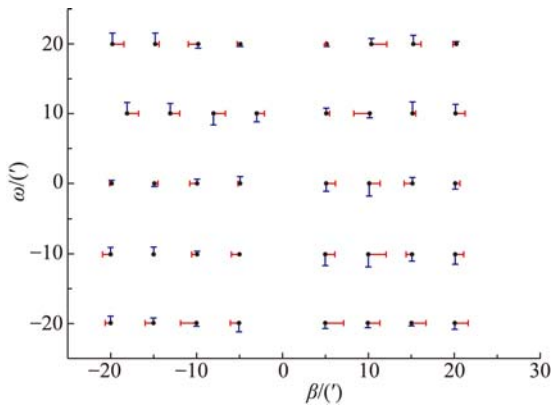


图 7 二维自准直仪 1 测角值与标定值的误差图

Fig. 7 Errors between measurement and calibration values of two-axis autocollimator 1

4.2 滚转角测角试验

将三维测角系统模拟实际使用状态进行试验验证,各组件的架设如图 8 所示。反射部件固定到三维电动旋转台上,三维电动旋转台和三维测角装置分别固定到三脚调平工装上。反射部件具有正斜两个反射面和侧面小平面镜,小平面镜与

正反射面的法线夹角为 90° 。经纬仪用于瞄准反射部件侧面的小平面镜,二维自准直仪 1、二维自准直仪 2 的光轴中心分别与反射部件的正、斜反射面的中心法线对准,工作距离为 1.2 m。通过三维电动旋转台调节反射部件的三维角度变化,经纬仪测量反射部件上小平面镜的俯仰角度,同时 PC 机显示出三维测角装置测量的偏摆角、俯仰角和滚转角数值。三维角度测量时,在偏摆角、俯仰角分别旋转 $\pm 10'$ 和 $\pm 20'$ 的 8 个位置上,滚转角分别旋转 $\pm 5', \pm 10', \pm 15', \pm 20'$,共产生 64 组数据。经纬仪测得的反射部件小平面镜的俯仰角与三维测角装置测得的滚转角之间的差值即为滚转角的测角误差。三维测角装置的滚转角测量误差如图 9 所示,最大测角误差为 $8.7''$,出现在偏摆角、俯仰角和滚转角分别为 $+20', -20'$ 和 $-20'$ 的位置。

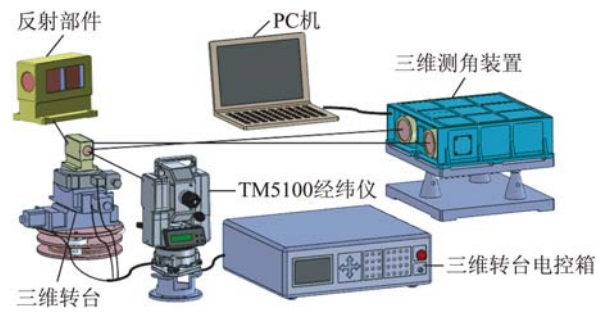


图 8 滚转角测量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of roll angle measuring system

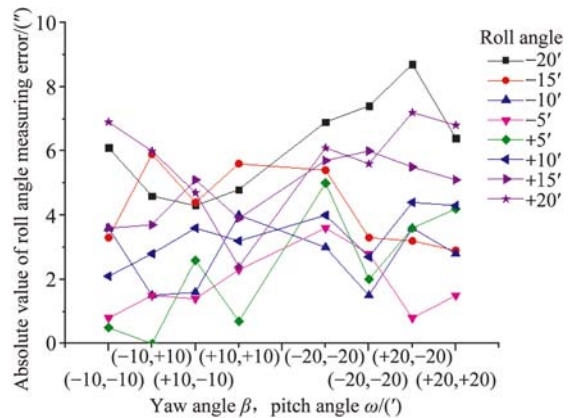


图 9 滚转角测量误差图

Fig. 9 Diagram of roll angle measuring errors

5 精度影响因素分析

三维测角装置测量精度的影响因素主要包括原理算法误差、自准直仪测量误差和安装误差。

5.1 原理算法误差

根据式(3)、式(4)和式(7)可知,原理算法对偏摆角 β 和俯仰角 ω 的测量不引入误差,仅对滚转角 α 产生影响。

设正斜反射面的法线向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 在测量坐标系 $OXYZ$ 中,依次绕 OX 轴、 OZ 轴、 OY 轴分别旋转 $20'$ 角度,根据式(2)~式(5)计算得:

$$\alpha \approx 1\ 206.92''.$$

则算法引起的滚转角的最大测量误差为:

$$\Delta\alpha = \alpha - 1\ 200'' = 6.92''.$$

由于正斜反射面法线向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 在测量坐标系 $OXYZ$ 中绕 OX 轴、 OZ 轴、 OY 轴三维旋转的顺序有 6 种,分别推导每种旋转顺序的测角公式,并计算测量误差,由结果可知依次绕 OX 轴、 OZ 轴、 OY 轴旋转次序推导的测角算法引入的三维测角误差最小。

5.2 二维自准直仪测量误差

在 $\pm 20'$ 的测量范围内,计算得出焦距为 240 mm, CMOS 图像传感器像元尺寸为 $5.5\ \mu\text{m}$ 的二维自准直仪的线性化误差为 $0.9''$ 、测角量化误差为 $0.24''$,外界环境和光照变化引起的误差均约为 $1''$,则总测量误差约为 $2.5''$ 。

5.3 安装误差

反射部件安装到被测物体上作为三维测角装置的测角合作目标。通过装配调节自准直仪 1、2 的光轴位置,保证其中心和反射部件正斜反射面的法线对准。由于存在安装误差,所以对准也存在一定偏差。以三维测角装置为基准,将安装误差全部折算到反射部件上,分析安装误差对三维姿态角测量精度的影响。

5.3.1 反射部件与被测物体间的安装误差

假设反射部件正斜反射面的法线向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 的夹角保持 10° ,反射部件与被测物体间存在安装误差,则初始测量状态下的 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 如图 10 所示。向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 与平面 X_1OZ_1 的夹角分别为 a_1, a_2 ,在平面 X_1OZ_1 上的投影与 OX_1 轴的夹角分别为 b_1, b_2 ,可以得到:

$$\mathbf{I}_1 = [\cos b_1 \cos a_1, \sin a_1, \sin b_1 \cos a_1]^T, \tag{14}$$

$$\mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} \cos b_1 (\cos a_1 \cos 10^\circ) + \sin b_1 \sin 10^\circ \\ \sin a_1 \cos 10^\circ \\ \sin b_1 \cos a_1 \cos 10^\circ - \cos b_1 \sin 10^\circ \end{bmatrix}. \tag{15}$$

设反射部件绕 OX_1 轴旋转角度 α_1 ,根据三维测角算法解算出的偏摆角 β 、俯仰角 ω 和滚转角 α 分别为:

$$\beta = \arcsin(\cos \alpha_1 \sin a_1 - \sin \alpha_1 \sin b_1 \cos a_1), \tag{16}$$

$$\omega = \arctan \left(\frac{\sin \alpha_1 \sin a_1 + \cos \alpha_1 \sin b_1 \cos a_1}{\cos b_1 \cos a_1} \right), \tag{17}$$

$$\alpha = b_1 + \frac{H - b_1 \cos 10^\circ}{\sin 10^\circ}, \tag{18}$$

其中: $H = \cos \alpha_1 \sin b_1 \cos 10^\circ - \sin \alpha_1 (\sin a_1 \cos b_1 \cos 10^\circ - \cos a_1 \sin 10^\circ)$.

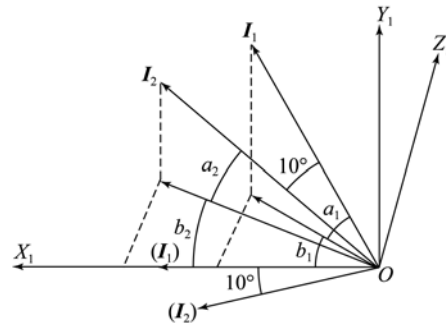


图 10 存在安装误差时的测量坐标系

Fig. 10 Measuring coordinate of system with installation errors

设初始安装误差 b_1, a_1 为 $5'$,绕 OX_1 轴旋转角度 c 为 $20'$,根据三维测角算法解算出的三维角度误差分别为:

$$\Delta\beta_2 = \beta - b_1 = 1.74'',$$

$$\Delta\omega_2 = \omega - a_1 = -1.75'',$$

$$\Delta\alpha_2 = \alpha - \alpha_1 = -0.44''.$$

经多次赋值计算,得出向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 不在平面 X_1OZ_1 内时的安装误差对偏摆角 β 和俯仰角 ω 的测量精度影响较大,且与安装误差大致呈线性关系;而对滚转角 α 的测量精度影响较小,但线性敏感性略大于偏摆角和俯仰角。

5.3.2 法线向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 不同在平面 XOZ 内

若反射部件正斜反射面的法线向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 的夹角为 10° ,但不在一个平面 XOZ 内,如图 11 所示,此时向量 \mathbf{I}_2 与平面 XOZ 的夹角为 a 。假设角度 a 为 $20'$,反射部件绕 OX 轴、 OY 轴、 OZ 轴的旋转角度均为 $20'$,此时三维测角算法解算出的三维角度误差分别为:

$$\Delta\beta_3 = \beta' - \beta = 0,$$

$$\Delta\omega_3 = \omega' - \omega = 0,$$

$$\Delta\alpha_3 = \alpha' - \alpha = 0.30''.$$

由此可知,安装时法线向量 I_1, I_2 不同在 XOZ 平面内,对偏摆角 β 和俯仰角 ω 的测量结果无影响,对滚转角 α 的测角精度影响也较小。

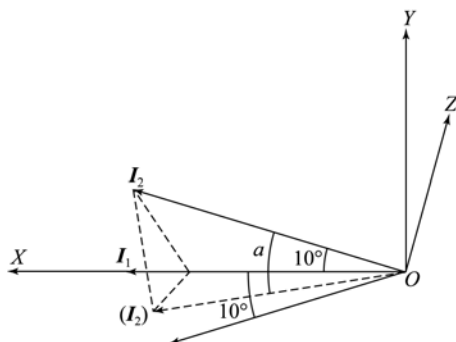


图 11 向量 I_2 不在平面 XOZ 时的测量坐标系

Fig. 11 Measuring coordinate of system when I_2 is out of flat XOZ

6 结 论

本文基于二维自准直仪的成熟测量技术,提出了一种适用于复杂环境、结构简单且精度高的

三维姿态角测量方法,介绍了三维测角设备的工作原理,利用坐标系旋转变换矩阵完成了三维测角理论的算法推导。根据实际项目要求对三维测角设备的光机系统参数和电路控制系统进行了设计。然后,利用经纬仪对二维自准直仪进行了高精度标定,通过网格划分法选取标定点,运用三次曲面拟合公式得出三维角度和 CMOS 像面的像点质心位置的对应关系,完成了对偏摆角、俯仰角的高精度测量。最后,通过三维测角试验验证了滚转角的测量精度。标定和试验结果表明,三维测角装置在 $\pm 20'$ 的视场范围内偏摆角、俯仰角和滚转角的测量精度达到 $2.2''$, $2.5''$ 和 $8.7''$ 。该装置结构简单、性能稳定、测量精度较高,可以广泛应用于工程实践中的三维姿态角测量。

下一步工作将从两方面对三维测角装置进行研究和改进:一是研究三维测角视场范围和测量精度与两个二维自准直仪间的夹角 θ 、自准直测量距离的关系,在满足工程需要的情况下对测角系统进行最优设计;二是设计专用工装,用以完成三维测角系统的标定,并提高测量精度。

参考文献:

- [1] 任成,谈宜东,张书练. 正交偏振激光角度测量技术综述[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 193-199.
REN CH, TAN Y D, ZHANG SH L. Angle measurement based on orthogonally polarized lasers [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument Optical Technique*, 2010, 36(2): 193-199. (in Chinese)
- [2] 江浩,王英雷,王昊予. 大量程高精度三维姿态角测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1247-1252.
JIANG J, WANG Y L, WANG H Y. Design of large FOV high precision three-dimensional attitude angle measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6): 1247-1252. (in Chinese)
- [3] 吕勇,孙鹏,刘力双,等. 基于双 CCD 的滚转角测量方法研究[J]. 光学技术, 2013, 39(5): 477-480.
LÜ Y, SUN P, LIU L SH, et al.. A roll angle measurement method based on dual CCDs [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument Optical Technique*, 2013, 39(5): 477-480. (in Chinese)
- [4] LIU Z Y. Roll angle interferometer by means of wave plates [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 104(2): 127-131.
- [5] CORONKEVICH V P, TARASOV G G, HANOV B A. Roll angle measurement with dual-frequency laser [J]. *Automeasurement*, 1974(1): 68-71.
- [6] WU CH M, CHUANG Y T. Roll angular displacement measurement system with microradian accuracy [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 116(1): 145-149.
- [7] 刘进博. 基于摄像测量的平台绝对晃动量测量及修正方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院, 2012.
LIU J B. *Absolute Measurement and Modification for Platform-disturbance Based on Videometrics* [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 句爱松,侯文玫,杨卫,等. 改进型的滚转角测量干涉仪[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 188-193.
JU A S, HOU W M, YANG W, et al.. Enhanced roll-angle measurement interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 188-193. (in Chinese)
- [9] 侯文玫,钟朝阳,乐燕芬,等. 高精滚转角测量干涉仪[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 22-27.
HOU W M, ZHONG CH Y, LE Y F, et al.. High

- precision roll angle interferometer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (22): 22-27. (in Chinese)
- [10] LI S G, YANG C X, ZHANG E B. Compact optical roll-angle sensor with large measurement range and high sensitivity [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(3): 242-244.
- [11] 史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16 (4): 726-732.
- SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)
- [12] 范大鹏, 张智永, 范世琦, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14 (4): 673-680.
- FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 673-680. (in Chinese)
- [13] 金光, 王家骥, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差 [J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 89-94.
- JIN G, WANG J Q, NI W. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7 (5): 89-94. (in Chinese)
- [14] 孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 912-918.
- SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)

作者简介:



孙国燕(1987—),女,山东德州人,助理研究员,博士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事瞄准测量及复杂环境下光机结构设计的研究。E-mail: sunguoyan@opt. ac. cn

导师简介:



高立民(1965—),男,陕西韩城人,研究员,博士生导师,2004年于中国科学院西安光机所获得博士学位,现为中国科学院西安光机所副所长,主要从事光电测量与跟踪设备的研究。E-mail: glm@opt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)