

二维主动位姿引导的单目空间姿态测量方法

刘 峰¹, 郭英华¹, 王 霖^{1*}, 高裴裴², 张月桐¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 南开大学 计算机学院, 天津 300071)

摘 要: 针对空间物体姿态快速测量问题, 以构建视觉最小系统需求为依据, 研究了一种基于二维主动位姿引导的单目视觉空间姿态测量方法, 建立了单目相机、二维载台与倾角仪之间的姿态测量模型, 实现了空间物体的姿态角的测量。该方法以大地倾角仪坐标系统一测量系统的测量基准, 由精密二维载台引导单目相机覆盖地空大视野三维空间, 通过前期标定设计完成了单目相机与二维载台之间的工装校准; 建立了载台坐标系、摄像机坐标系以及大地倾角仪坐标系之间的姿态测量传递模型, 实现了定轴旋转双视角拍照下的空间物体的姿态解算和角度测量。构建了实验验证环境, 测角实验结果表明: 在系统测量基准坐标系下, 其俯仰角的测量误差 $\leq 0.82^\circ$, 测量相对误差 $\leq 6.1\%$; 其横滚角的测量误差 $\leq 0.43^\circ$, 测量相对误差 $\leq 3.4\%$ 。

关键词: 视觉测量; 姿态测量; 单目视觉; 二维载台

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211026

0 引 言

单目视觉测量技术相较于双目/多目视觉而言, 具有结构简单、成本低、操作方便灵活等优点^[1-8]。近年来, 单目视觉测量技术在位姿测量领域的研究取得了较大进展。文献 [9] 研究了结合车辆三维模型的单目车辆位姿估计算法, 方法基于单目相机结合已知的车辆三维模型, 实现了对车辆的位姿估计, 但该方法需要已知车辆的三维模型, 在实际应用场景中具有局限性。文献 [10] 提出了一种基于单目视觉的气浮台姿态测量方法, 采用了 5 个不共面靶标作为特征点, 利用迭代最小二乘的姿态估计算法解算出气浮台的姿态信息, 方法需要根据气浮台的形状来设计相应的靶标的形状和布局, 过程较为复杂, 应用场景较为单一。文献 [11] 以在轨服务任务中非合作目标的测量需求为导向, 提出了一种基于 1D 激光测距与单目视觉融合的非合作目标测量方法, 实现了对非合作目标的位姿测量与重建, 方法借助 1D 激光测距提供预先解算的深度信息, 但无法通过单目相机传递的信息进行相对位姿的测量。文献 [12] 研究了一种基于三线

结构光和单目相机的视觉位姿测量系统, 激光器向圆形对接环投射并形成 6 个断点, 利用最小二乘法估计非合作卫星的相对位姿, 方法的应用场景较广, 但相机与主动式传感器间的位姿关系的调校或标定步骤较为繁琐, 且测量精度会受主动式传感器的影响。文献 [13] 提出了一种基于单目视觉的航天器实时位姿测量方法, 利用单轴高精度旋转平台结合摄像机的方法进行航天器的位姿测量, 但由于采用单自由度旋转平台和粘贴靶标方式, 致使其在测量范围和非合作测量方面有局限性。

为扩大测量视野范围、建立倾角仪坐标系基准关联以及后续实现非粘贴标志点自主姿态测量, 文中拓展研究了一种基于二维主动位姿引导的单目视觉空间位姿测量方法, 该方法仅需一台相机结合精密二维载台, 在载台转动前后各采集一幅图像, 即可完成空间物体姿态的快速测量。具体包括: 研究了一种相机与二维载台的视觉关联标定方法, 得到单目相机与二维载台的工装位置关系, 省去了相机与载台繁琐的机械对准过程, 应用更加灵活。以大地倾角仪坐标系统

收稿日期: 2021-12-23; 修订日期: 2022-02-20

作者简介: 刘峰, 男, 博士, 主要研究方向为图像分析与计算机视觉、光电传感与探测技术。

通讯作者: 王霖, 男, 博士生, 主要研究方向为视觉检测技术。

一的测量基准,研究了单目相机、二维载台与倾角仪间的姿态测量传递模型,实现倾角仪与测量系统间的标定。该姿态测量方法整体上对设备依赖程度较小,具有操作简单且测量范围较大的优点。

1 单目姿态测量原理

文中姿态测量系统由单目相机、精密二维载台和被测物体组成。单目相机固定在精密二维载台上,可随着二维载台在俯仰和方位两个方向自由旋转。相机理论上是绕光心旋转,不存在平移向量;但由于相机和载台的中心不重合,存在安装误差,因此相机在旋转前后存在安装误差矢量 δt 。首先,在旋转前后相机分别采集一幅被测物体的图像,并对采集的图像的特征点进行识别;然后,结合提前标定好的系统参数计算出特征点对应相机坐标系下的三维坐标信息;最后,结合特征点与被测物体的几何约束关系,解算出被测物体在相机坐标系下的姿态信息。

如图 1 所示,相机在二维载台的旋转带动下,旋转前的相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 变为旋转后的相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$,空间点 P 在两个像面坐标系下的像素坐标分别为 $p_1(u_1, v_1)$ 、 $p_2(u_2, v_2)$;在两个相机坐标系下的坐标分别为 $P_1(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ 、 $P_2(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ 。

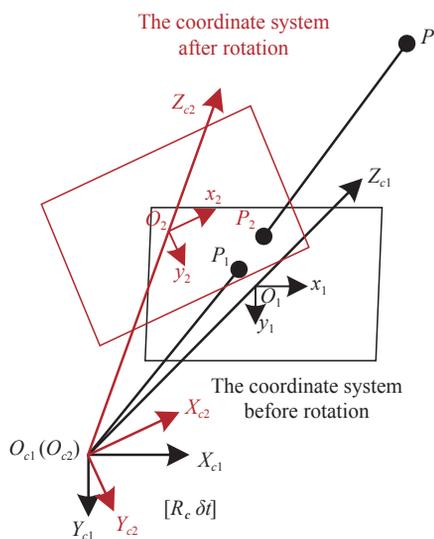


图 1 单目姿态测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of monocular attitude measurement

由相机的针孔成像模型得:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中: s_1 、 s_2 为比例因子; M_1 为相机的内参矩阵,可由相机标定得到。

经过一次相机旋转, P 点在两个相机坐标系下的坐标间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = R_c \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} + \delta t \quad (2)$$

式中: R_c 为旋转前的相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 到旋转后相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 的旋转矩阵; δt 为相机旋转前后坐标系由于安装非同轴引起的误差平移矢量。旋转前后的旋转矩阵 R_c 和误差平移矢量 δt 可根据载台的旋转角度结合载台与相机间的转换矩阵进行解算得到。

联立公式 (1) 和 (2) 得到关于含有两个未知数 s_1 和 s_2 的线性方程组:

$$s_1 M_1^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} - s_2 R_c M_1^{-1} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \delta t \quad (3)$$

式中: R_c 、 δt 、 M_1 、 $p_1(u_1, v_1)$ 、 $p_2(u_2, v_2)$ 均已知,为减少测量误差,采用最小二乘法解出比例因子 s_1 和 s_2 。通过将求解出的比例因子 s_1 、 s_2 代入公式 (1),可求解出点 P 在两个相机坐标系下的三维坐标。

用世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 表征被测物体的位置, P 点在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下的坐标与在相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 下的坐标满足:

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (4)$$

式中: R 和 T 分别为世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 到相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 的旋转矩阵和平移矩阵。用旋转矩阵 R 的三向欧拉角表示被测物体在相机坐标系下的相对姿态角。若 P 点在世界坐标系下的坐标已知,则可求出被测物体相对相机坐标系下的姿态角。

2 姿态测量方法建模

以大地倾角仪坐标系进行测量基准的统一,需要标定出倾角仪和姿态测量系统的位姿变换关系,从而求出在大地倾角仪坐标系下的系统姿态测量结果。

2.1 相机与二维载台的视觉关联标定

单目相机和二维载台的工装校准方面,文中通过视觉关联标定建立眼台校准模型。二维载台的初始坐标系 $O_I-X_I Y_I Z_I$ 以二维载台的水平转轴为 X_I 轴,以其竖直转轴为 Z_I 轴, Y_I 轴由右手法则确定。姿态测量系统涉及的坐标系定义如图 2 所示,相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 、载台坐标系 $O_I-X_I Y_I Z_I$ 和棋盘格坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 。相机和载台在初始位置处的坐标系为 $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 、 $O_{i1}-X_{i1} Y_{i1} Z_{i1}$, 随着二维载台在俯仰方向上绕 $O_I X_I$ 轴旋转 α 、在方位方向上绕 $O_I Z_I$ 轴旋转 γ 后,相机和载台的坐标系分别变为 $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 、 $O_{i2}-X_{i2} Y_{i2} Z_{i2}$ 。通过相机与二维载台的视觉关联标定,即可标定出载台坐标系到相机坐标系的旋转平移矩阵 R_{cI} 、 T_{cI} 。

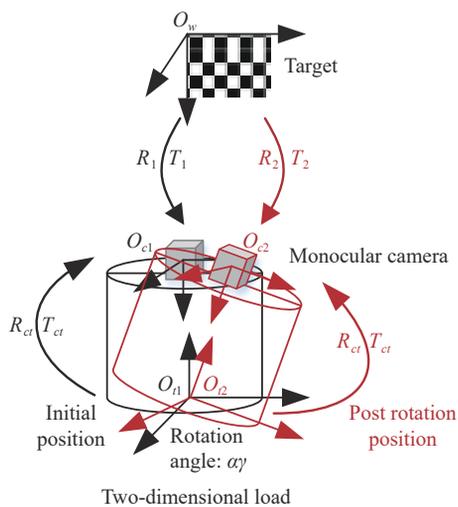


图 2 眼台校准模型

Fig.2 Eye calibration model

设棋盘格坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 到初始位置下相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 的旋转平移矩阵为 R_1 、 T_1 , 棋盘格坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 到旋转后相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 的旋转平移矩阵为 R_2 、 T_2 , 初始位置的相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 到旋转后相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 的旋转矩阵为 R_c 和安装误差矢量 δt_c 。

旋转前后的相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 和棋盘格坐标

系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 间的坐标转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} = R_i \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T_i (i = 1, 2) \quad (5)$$

在相机和载台视觉关联标定时,保持棋盘格坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 不变,则初始位置相机坐标系 $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 到旋转后的相机坐标系 $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 间的坐标关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = R_2 R_1^{-1} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} - R_2 R_1^{-1} T_1 + T_2 \quad (6)$$

由公式 (2) 和 (6) 可推导出:

$$\begin{aligned} R_c &= R_2 R_1^{-1} \\ \delta t &= T_2 - R_c T_1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中:棋盘格坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 到相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 的旋转平移矩阵 R_1 、 T_1 、 R_2 、 T_2 利用单目 PNP 算法迭代^[4] 计算得到,据公式 (7) 可计算出 R_c 、 δt_c 。

由于相机与二维载台是固连的,故载台坐标系到相机坐标系的旋转平移矩阵 R_{cI} 、 T_{cI} 是固定不变的。二维载台旋转前后载台坐标系 $O_I-X_I Y_I Z_I$ 到相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 坐标间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} = R_{cI} \begin{bmatrix} x_{ii} \\ y_{ii} \\ z_{ii} \end{bmatrix} + T_{cI} (i = 1, 2) \quad (8)$$

二维载台在方位方向上绕载台坐标系 $O_{i1}-X_{i1} Y_{i1} Z_{i1}$ 的 $O_I Z_I$ 轴旋转 γ 角,在俯仰方向上绕转动后的 $O_I X_I$ 轴旋转 α 角,载台坐标系变为 $O_{i2}-X_{i2} Y_{i2} Z_{i2}$ 。载台坐标系的中心在旋转前后默认保持不变,故旋转前后载台坐标系间不存在平移矩阵。旋转前后的载台坐标系下的坐标满足:

$$\begin{bmatrix} x_{i2} \\ y_{i2} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = R(\alpha, \gamma) \begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ z_{i1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,旋转前后的载台坐标系间的旋转矩阵 $R(\alpha, \gamma)$ 为:

$$R(\alpha, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： α 、 γ 可从二维载台的主控显示终端界面中读出。

根据相机、载台间的位姿闭环关系，由公式 (2)、(8) 和 (9) 推导出：

$$\begin{bmatrix} m_1 - n_1 & m_4 & m_7 & -n_2 & 0 & 0 & -n_3 & 0 & 0 \\ m_2 & m_5 - n_1 & m_8 & 0 & -n_2 & 0 & 0 & -n_3 & 0 \\ m_3 & m_6 & m_9 - n_1 & 0 & 0 & -n_2 & 0 & 0 & -n_3 \\ -n_4 & 0 & 0 & m_1 - n_5 & m_4 & m_7 & n_6 & 0 & 0 \\ 0 & -n_4 & 0 & m_2 & m_5 - n_5 & m_8 & 0 & n_6 & 0 \\ 0 & 0 & -n_4 & m_3 & m_6 & m_9 - n_5 & 0 & 0 & n_6 \\ -n_7 & 0 & 0 & -n_8 & 0 & 0 & m_1 - n_9 & m_4 & m_7 \\ 0 & -n_7 & 0 & 0 & -n_8 & 0 & m_2 & m_5 - n_9 & m_8 \\ 0 & 0 & -n_7 & 0 & 0 & -n_8 & m_3 & m_6 & m_9 - n_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

在对相机和载台联合标定时，采集 88 组棋盘格图像并记录对应的二维载台旋转的两个角度，可由公式 (7) 和 (10) 计算出对应的旋转矩阵 R_c 、 $R(\alpha, \gamma)$ 。将所有的旋转矩阵整理合并为公式 (13) 的形式，形成如 $Ax=0$ 的超定线性方程组。其中 $x=[s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5 \ s_6 \ s_7 \ s_8 \ s_9]^T$ ，其为旋转矩阵 R_{ct} 的 9 个元素。 A 为由旋转矩阵 R_c 、 $R(\alpha, \gamma)$ 中的元素组成的 9×88 行 9 列的矩阵，利用最小二乘法可得到载台坐标系到相机坐标系下的旋转矩阵 R_{ct} ，需采用奇异值分解使其强制正交，使 R_{ct} 具有旋转矩阵的正交性。

设载台坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 相对于相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 的平移矩阵 $T_{ct} = [c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ ，将公式 (12) 整理为线性方程组：

$$B \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $B = E - R_c$ 、 $\delta t = [t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ ，棋盘格在任意两个相机姿态下，都可由公式 (7) 计算出一组 B 、 δt ，将其整理为如公式 (14) 的方程。将多个方程合并为形如 $Bx=b$ 的超定线性方程组。其中 x 为载台坐标系到相机坐标系的平移向量， b 为多组 δt 组成的平移向

$$R_{ct}R(\alpha, \gamma) - R_c R_{ct} = 0 \quad (11)$$

$$(E - R_c)T_{ct} = \delta t \quad (12)$$

$$\text{令 } R_{ct} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ s_4 & s_5 & s_6 \\ s_7 & s_8 & s_9 \end{bmatrix}, R(\alpha, \gamma) = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & m_9 \end{bmatrix},$$

$$R_c = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \\ n_4 & n_5 & n_6 \\ n_7 & n_8 & n_9 \end{bmatrix}, \text{ 将公式 (11) 整理为线性方程组:}$$

量。利用最小二乘法 $x = (B^T B)^{-1} B^T b$ 求解得到平移向量 T_{ct} ，该向量由相机在不同位姿下的平移矩阵共同解算得到，可有效抑制误差的逐级传递。

2.2 倾角仪标定

在倾角仪和姿态测量系统的位姿变换关系标定方面，由于倾角仪输出的姿态角定义和旋转矩阵对应的欧拉角的定义不同，故先要对倾角仪输出角度与欧拉角间进行转换。双轴倾角仪输出的角度为俯仰角 a 和横滚角 b ，分别为传感器 X 、 Y 轴与水平面间的夹角。倾角仪本体坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 相对于倾角仪零点坐标系 $O_{T0}-X_{T0} Y_{T0} Z_{T0}$ 旋转矩阵对应的欧拉角的旋转顺序定义为：先绕 Z 轴旋转 γ ，再绕 Y 轴旋转 β ，最后绕 X 轴旋转 α 。

图 3 描述了倾角仪输出角度与欧拉角间的关系。图中 $O_T-X_T Y_T$ 表示倾角仪本体坐标系， Z 轴方向的旋转不影响 XOY 平面，绕 Y 轴旋转的欧拉角 β 等于倾角仪 X_T 轴方向与水平面间的夹角即俯仰角 a 。图中直线 AC 、 BD 垂直于水平参考平面，故直线 $O_T E$ 垂直于平面 BED 和平面 $O_T AC$ ，所以平面 BED 和平面 $O_T AC$ 平行。延长 ED 到 F 使 BF 平行于 $O_T A$ ，且直线 $O_T A$ 垂直于平面 $O_T BE$ ，可知 $\angle BFE = \angle AO_T C = a$ ， $BF \perp BE$ ，由此可得 $\angle DBE = a$ ，根据几何关系得：

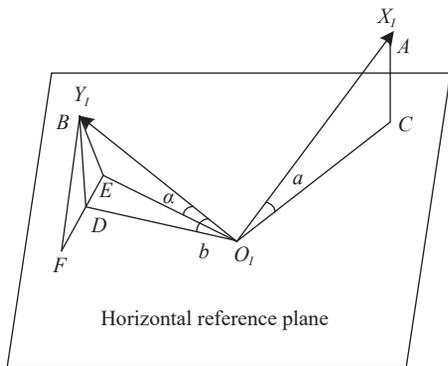


图 3 倾角仪输出角度与欧拉角关系

Fig.3 Relationship between output angle of inclinometer and euler angle

$$\sin b = \frac{BD}{O_iB} = \frac{BD}{BE} \times \frac{BE}{O_iB} = \cos a \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

得姿态传感器的输出角度 a 、 b 与相应的欧拉角 α 、 β 间的关系:

$$\begin{cases} \beta = a \\ \alpha = \arcsin\left(\frac{\sin b}{\cos a}\right) \end{cases} \quad (16)$$

如图 4 所示, 倾角仪在使用前先进行调零校准, 调零后倾角仪零点位置坐标系 $O_{i0}-X_{i0}Y_{i0}Z_{i0}$ 相对于相机初始位置坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 的旋转矩阵 R_m 保持不变。由于倾角仪固定在棋盘格靶标上, 故倾角仪本体坐标系 $O_I-X_IY_IZ_I$ 到棋盘格坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的旋转矩阵 R_g 也固定不变。倾角仪零点位置坐标系 $O_{i0}-X_{i0}Y_{i0}Z_{i0}$ 到倾角仪本体坐标系 $O_I-X_IY_IZ_I$ 的旋转矩阵 R_3 可由倾角仪示数计算得到, 棋盘格坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 到相机初始位置坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 的旋转

$$R = R_X(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: γ 、 β 、 α 分别为依次绕 Z 、 Y 、 X 轴旋转的三向欧拉角。

3 实验结果与分析

3.1 实验验证

为验证文中方法的有效性, 构建了单目位姿测量实验环境, 实验场景如图 5 所示。测量系统由单目相机、精密二维载台和靶标组成。测量相机采用 Basler

矩阵 R_1 可 PNP 单目算法求解。在载台的两个旋转角为 0° 的状态下, 拍摄 39 组不同姿态下的棋盘格图像, 并采集倾角仪的示数, 得到 R_g 、 R_m 的最小二乘解。

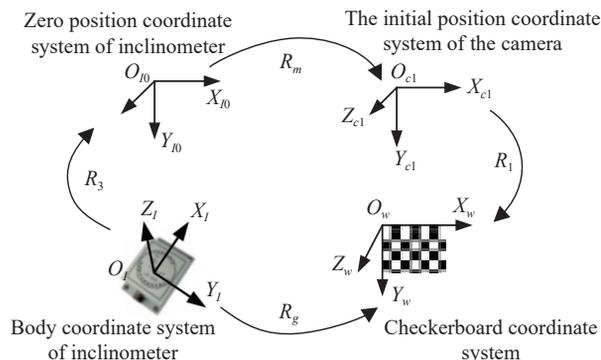


图 4 倾角仪相关坐标系关系

Fig.4 Correlation coordinate system relationship of inclinometer

标定 R_g 、 R_m 后, 根据公式 (18) 将不同姿态下的棋盘格到相机初始位置坐标系的旋转矩阵 R_1 的测量结果变换到倾角仪坐标系下, 并将 R_3 按照公式 (19) 进行三向欧拉角的分解, 得到倾角仪本体坐标系 $O_I-X_IY_IZ_I$ 相对于倾角仪零点坐标系 $O_{i0}-X_{i0}Y_{i0}Z_{i0}$ 旋转矩阵对应的绕 Z 、 Y 、 X 轴的欧拉角为 γ 、 β 、 α , 将 α 、 β 代入公式 (16) 解算出物体姿态测量值在倾角仪坐标系下的倾角值 a 、 b , 与物体位姿真值——倾角仪读数进行比较, 用于物体姿态测量值两轴方向的精度评价。

$$R_{3_cal} = (R_1R_g)^T R_m \quad (17)$$

scA1600-14 gm 相机, 1/1.8 in(1 in=2.54 cm)CCD, 2 MP 分辨率, 像元大小 $4.4 \mu\text{m}$; 镜头为 25 mm 定焦镜头; 采用 LE-30 双轴倾角仪测量值作为姿态角真值, 倾角仪双轴的测量范围为 $\pm 30^\circ$, 测量精度为 $\pm 0.01^\circ$; 精密二维载台可以绕俯仰轴和方位轴转动, 两轴的旋转角范围为 $\pm 45^\circ$, 转角精度为 $\pm 0.04^\circ$, 可在主控终端界面数值显示。被测棋盘格为 12×9 视觉靶标, 每个方格的边长为 20 mm。

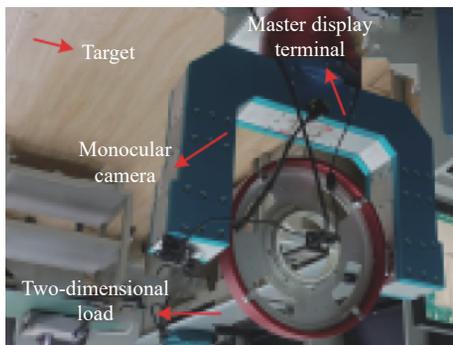


图 5 实验装置图

Fig.5 Experimental device diagram

3.2 标定过程与结果

标定包括相机标定、相机与二维载台的视觉关联标定和倾角仪标定, 标定得到的参数如表 1 所示。其中, f_u 、 f_v 为相机焦距信息, u_0 、 v_0 为主点位置信息, k_c 为镜头畸变系数, R_{ct_eul} 为相机坐标系与载台坐标系的旋转矩阵 R_{ct} 对应的三向欧拉角, T_{ct} 为相机坐标系与载台坐标系的平移向量, R_{g_eul} 为倾角仪本体坐标系到棋盘格坐标系的旋转矩阵 R_g 对应的三向欧拉角, R_{m_eul} 为倾角仪零点位置坐标系相对于相机初始位置坐标系的旋转矩阵 R_m 对应的三向欧拉角。

1) 相机标定

相机标定采用张氏标定法^[15], 标定出的主要参数见表 1, 得到相机焦距 f_u 、 f_v 分别为 5 764.37、5 766.97 pixel, 主点位置 u_0 、 v_0 分别为 840.86、609.35 pixel, 径向畸变系数 k_1 、 k_2 分别为 -0.14、1.77, 切向畸变系数 p_1 、 p_2 分别为 -0.0003、0.0021, 且标定重投影误差为 0.08 pixel。

2) 相机与二维载台的视觉关联标定

相机与二维载台视觉关联标定的具体流程为: 保持棋盘格位置不动, 相机在载台的转动下分别采集棋盘格图像, 记录载台在俯仰和方位两个方向的转动角。二维载台在未转动时, 其俯仰角和方位角均为 0°。标定时, 精密二维载台的俯仰角取值范围为 -3°~4°、方位角取值范围为 -5°~5°, 均以 1° 为采样间隔, 最终, 共采集了 88 组不同相机姿态下对应的棋盘格图像, 其中的 24 幅棋盘格图像如图 6 所示。标定出的 R_{ct} 对应的角度信息和平移向量 T_{ct} 见表 1。

相机与二维载台视觉关联标定的计算步骤如下:

步骤一: 取任意一个载台角度在非 0° 位置和

表 1 系统标定参数

Tab.1 System calibration parameter

	$f_u f_v / \text{pixel}$	$u_0, v_0 / \text{pixel}$	k_c
Camera	5 764.37, 5 766.97	840.86, 609.35	$[-0.14, 1.77, -0.0003,$ $0.0021, 0.00]$
R_{ct_eul} / rad	$[1.5857, 0.0174, 0.0032]$		
T_{ct} / mm	$[9.6939, -6.5506, -103.1031]$		
R_{g_eul} / rad	$[-1.5001, -0.0071, 3.1308]$		
R_{m_eul} / rad	$[-1.4822, -0.0398, 1.2351]$		

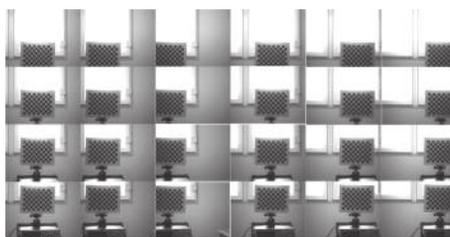


图 6 采集的部分棋盘格图像

Fig.6 A partial checkerboard image collected

0° 位置处的两个棋盘格图像, 根据公式 (7) 可以计算出相机在这两个位置处的旋转矩阵 R_c 和误差矢量 δt ;

步骤二: 根据二维载台在旋转前后的位置关系, 由载台对应位置的俯仰角和方位角的变化量代入公式 (10), 可计算出旋转前后载台坐标系间的旋转矩阵 $R(\alpha, \gamma)$;

步骤三: 重复步骤一和步骤二, 直至完成 88 组图像和对应的载台角度的采集, 并计算出对应的 R_c 、 δt 和 $R(\alpha, \gamma)$;

步骤四: 将步骤三计算出的 88 组数据整理为如公式 (13) 和 (14) 形式的矩阵, 利用最小二乘法计算出载台坐标系相对于相机坐标系的旋转和平移矩阵 R_{ct} 、 T_{ct} , 完成相机与二维载台的视觉关联标定。

3) 倾角仪标定

倾角仪与测量系统的标定流程为: 保持二维载台的俯仰角和方位角均为 0°, 采集 39 组不同姿态下的棋盘格图像, 并记录对应棋盘格位置的倾角仪的读数, 保持倾角仪的两个倾角均匀分布在 $\pm 15^\circ$ 以内。根据公式 (17) 计算出 R_g 、 R_m 。标定出的 R_g 、 R_m 对应的角度信息如表 1 所示。

倾角仪与测量系统标定的标定误差图如图 7 所

示。图中展示了 39 组不同姿态下的棋盘格的倾角标定误差, 将标定出的两个矩阵 R_g 、 R_m 代入公式 (18) 并转换成倾角, 与倾角仪上的示数作比较, 得到倾角仪与测量系统的标定误差。从图 7 可以看出, 俯仰角和横滚角的标定误差均 $< 0.31^\circ$ 。

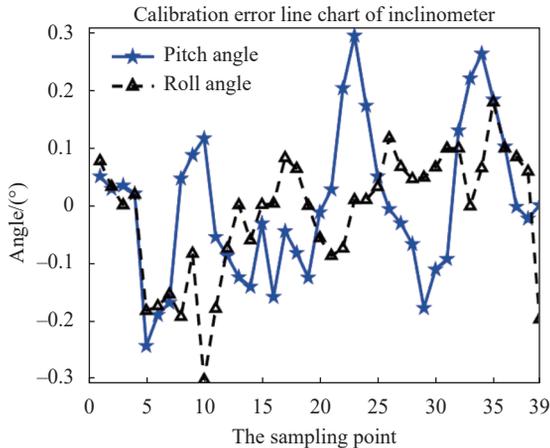


图 7 俯仰角和横滚角的标定误差折线图

Fig.7 Calibration error line chart of pitch angle and roll angle

3.3 测量过程与结果

具体实验过程如下:

- 1) 固定棋盘格位置, 并记录下倾角仪的示数;
- 2) 调节载台的俯仰角和方位角, 使棋盘格在相机的视场范围内, 采集棋盘格图像并记录下载台的俯仰角和方位角;
- 3) 调节载台的两个角度, 重复 2), 直至得到 9 组棋盘格图像及对应的载台角度;
- 4) 改变棋盘格位置, 使棋盘格的姿态控制在 $\pm 15^\circ$ 范围内, 在棋盘格的俯仰角和横滚角均在 $+15^\circ$ 、 $+10^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 -5° 、 -10° 、 -15° 附近时重复步骤 1)~步骤 3), 得到 6 个不同棋盘格位置的图像和载台角度。

其中 3 个棋盘格位置下的两个不同载台视角的图像如图 8 所示, 图中横轴的数字表示载台的俯仰角和方位角。

实验采集了 6 个棋盘格位置, 每个棋盘格位置采集 9 组棋盘格图像及对应的载台角度, 共采集了 54 组棋盘格图像和对应的载台角度。取棋盘格的俯仰角和横滚角均在 -10° 附近的实验数据为例, 表 2 为其对应不同载台角度测量的姿态测量数据。

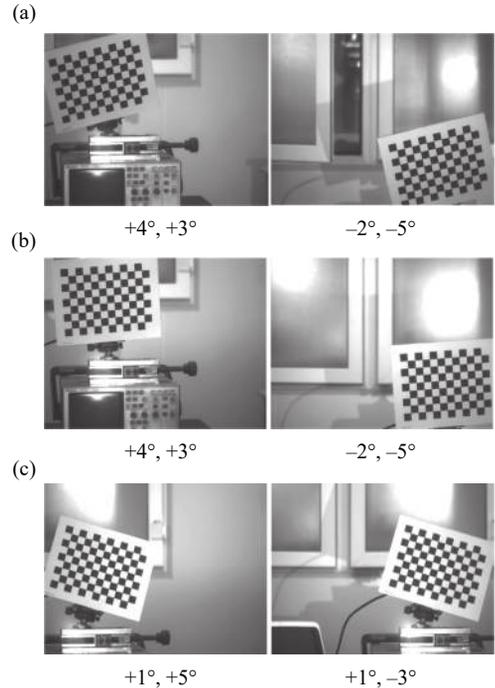


图 8 (a) $+15^\circ$ 附近棋盘格位置采集的两幅图像; (b) $+5^\circ$ 附近棋盘格位置采集的两幅图像; (c) -15° 附近棋盘格位置采集的两幅图像

Fig.8 (a) Two images from the checkerboard position near $+15^\circ$; (b) Two images from the checkerboard position near $+5^\circ$; (c) Two images from the checkerboard position near -15°

棋盘格 6 个不同位置处俯仰角和横滚角的测量值与真值如图 9 所示, 图 (a)、(b) 分别为棋盘格 6 个位置的俯仰角和横滚角的测量值与真值, 两个角度均分布在 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 附近。从图 9 可以看出, 俯仰角在真值为 $+15^\circ$ 、 $+10^\circ$ 、 $+5^\circ$ 附近时相比真值为 -5° 、 -10° 、 -15° 附近时的测量误差较大; 横滚角的测量误差整体上相较于俯仰角的测量误差较小。

棋盘格姿态角测量的误差和相对误差如图 10 所示。图 10(a) 和 10(b) 分别为棋盘格 6 个位置俯仰角和横滚角的测量误差折线图, 俯仰角在真值为 15° 左右时测量误差最大, 测量误差最大为 0.82° ; 而横滚角在真值为 -15° 左右时测量误差最大, 测量误差最大为 -0.43° ; 且横滚角的测量误差的变化范围相对于俯仰角的较小。图 10(c) 和 (d) 分别为棋盘格 6 个位置俯仰角和横滚角测量的相对误差折线图, 俯仰角在真值为正时比真值为负的相对误差较大, 且在真值为 5° 左右时, 相对误差最大, 相对误差最大为 6.1% ; 横滚角在真值为 -5° 左右时相对误差最大, 最大相对误差为 -3.4% , 且横滚角的相对误差相较于俯仰角整体上

表 2 在-10°附近棋盘格的姿态角测量数据

Tab.2 Checkerboard attitude angle measurements near -10°

Number	Measured value/(°)		True value/(°)		Measurement error/(°)		Relative error	
	Pitch	Roll	Pitch	Roll	Pitch	Roll	Pitch	Roll
1	-9.95	-11.34	-10.09	-11.06	0.14	-0.28	-1.39%	2.55%
2	-10.10	-11.35	-10.10	-11.06	-0.004	-0.28	0.41%	2.56%
3	-10.02	-11.32	-10.09	-11.06	0.07	-0.25	-0.69%	2.30%
4	-9.95	-11.42	-10.09	-11.06	0.14	-0.35	-1.41%	3.19%
5	-10.12	-11.28	-10.09	-11.06	-0.012	-0.22	0.14%	1.98%
6	-10.04	-11.38	-10.09	-11.06	0.05	-0.32	-0.51%	2.85%
7	-9.92	-11.31	-10.09	-11.06	0.17	-0.24	-1.68%	2.21%

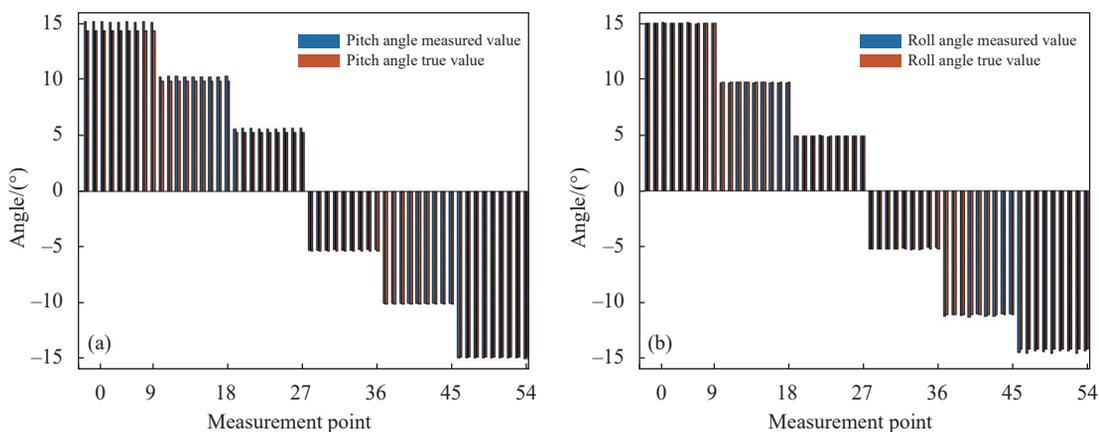


图 9 (a) 俯仰角的测量值与真值; (b) 横滚角的测量值与真值

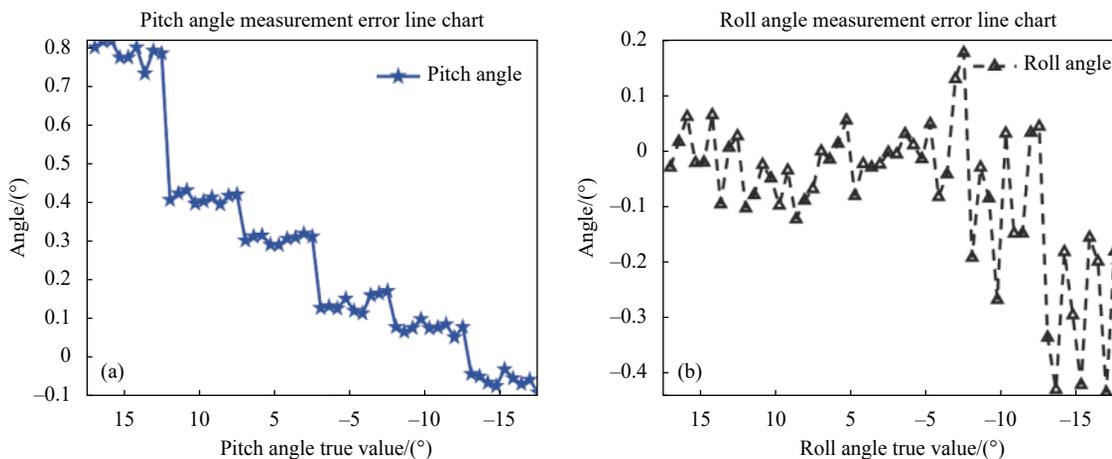
Fig.9 (a) The measured value and true value of pitch angle; (b) Measured value and true value of roll angle

较小。

实验还进行了作用距离与姿态误差的测量实验。在作用距离分别为 1.82、2.02、2.43、2.64、2.84 m 下, 所对应的两个姿态角的测量误差分布如图 11 所示。

从图 11 可以观察到, 在测量距离为 2.02 m 时测

角误差最小, 随着测量距离与 2.02 m 位置偏离程度的增大, 对应测角误差相应增大, 但均能控制在 0.6° 测量精度范围内。若进一步通过改善光学系统的视场角大小、成像质量以及进一步深入研究位姿测量模型的优化方法, 则可进一步提升该方法的测量精度。



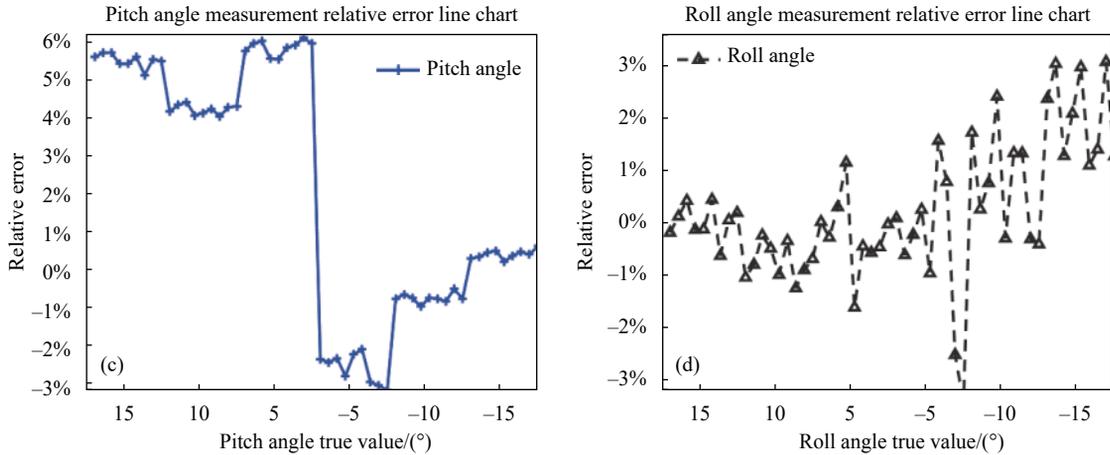


图 10 (a) 俯仰角测量误差折线图; (b) 横滚角测量误差折线图; (c) 俯仰角测量相对误差折线图; (d) 横滚角测量相对误差折线图

Fig.10 (a) Pitch angle measurement error line chart; (b) Roll angle measurement error line chart; (c) Pitch angle measurement relative error line chart; (d) Roll angle measurement relative error line chart

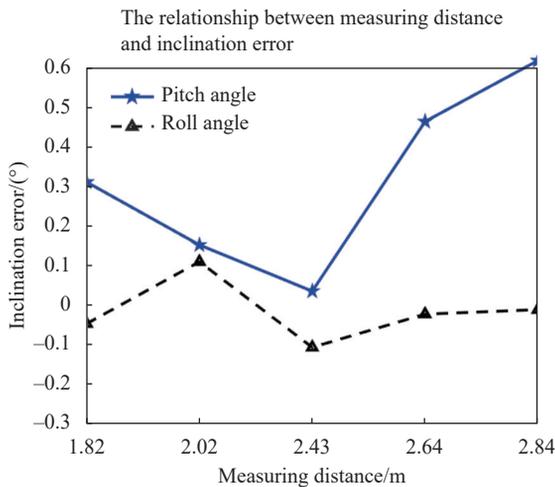


图 11 测量距离与两个倾角误差的折线图

Fig.11 The line chart of measured distance and two inclination errors

4 结 论

研究了一种基于二维主动位姿引导的单目视觉空间位姿测量方法,详细推导了单目相机、精密二维载台与倾角仪三者之间的姿态测量传递模型,有针对性的设计和完成了阶段实验验证以及完整实验验证,实验结果表明,在系统测量基准坐标系下,其俯仰角的测量误差 $\leq 0.82^\circ$,测量相对误差 $\leq 6.1\%$;其横滚角的测量误差 $\leq 0.43^\circ$,测量相对误差 $\leq 3.4\%$,初步验证了方法的有效性,后续将在优化方法和仿真分析方面开展进一步深入研究。文中可借助于载体自身的光电云台、光电载荷等设备实现对待测区域对象的位姿测量和位姿估计,特别适用于对着陆、起飞姿态等有

快速测量需求、以及对测量设备集成化、小型化、便捷化等使用要求较高的应用场合。

参考文献:

- [1] Xie Zexiao, Han Zhenhua, Gao Xiang. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 780-787. (in Chinese)
- [2] Zhang Huijuan, Xiong Zhi, Lao Dabao, et al. Monocular vision measurement system based on EPNP algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0517005. (in Chinese)
- [3] Zhang Z, Zhang Y, Cao Y. Monocular vision-based obstacle avoidance trajectory planning for unmanned aerial vehicles[C]//2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Athens, GREECE: IEEE, 2020: 627-632.
- [4] Sun Senzhen, Feng Qiqiang, Wang Li. Indoor positioning based on visible light communication and binocular vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 834-843. (in Chinese)
- [5] Chen Renhong, Liang Jin, Ye Meitu, et al. Visual method for measuring forming limit curve of pliable composite film [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 22-33. (in Chinese)
- [6] Yue Liqing, Jia Xin, Miao Yang, et al. High precision calibration for internal and external parameter of manipulator binocular vision system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200525. (in Chinese)
- [7] Qiao Yujing, Jia Baoming, Jiang Jingang, et al. Networking method of multi-view stereo-vision measurement network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190492. (in Chinese)

- [8] Li Yunlei, Zhang Xi. Probe-based multi-view field 3D vision measurement system based on three-dimensional orientation target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 34-44. (in Chinese)
- [9] Xu Lingzhi, Fu Qingwei, Tao Wei, et al. Pose estimation of monocular vehicle based on 3D model [J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1346-1355. (in Chinese)
- [10] Xue Wei, Chen Zhiming, Wu Yunhua, et al. Attitude measurement method of three-axis air floating platform based on monocular vision [J]. *Optical Technology*, 2021, 47(6): 658-665. (in Chinese)
- [11] Zhang Zhuang. Reconstruction and pose measurement of non-cooperative target based on active and passive fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [12] Liu Yang, Xie Zongwu, Liu Hong. Three-line structured light vision system for non-cooperative satellites in proximity operations [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(5): 1494-1504.
- [13] Wang Qiyue, Wang Zhongyu. Position and pose measurement of spacecraft based on monocular vision [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 250-255. (in Chinese)
- [14] Hesch J A, Roumeliotis S I. A direct least-squares (DLS) method for PnP[C]//2011 International Conference on Computer Vision, Barcelona, SPAIN: IEEE ICCV, 2011: 383-390.
- [15] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.

Monocular spatial attitude measurement method guided by two dimensional active pose

Liu Feng¹, Guo Yinghua¹, Wang Lin^{1*}, Gao Peipei², Zhang Yuetong¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Computer Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract:

Objective Monocular vision measurement technology has the advantages of simple structure, low cost, convenient and flexible operation, and there are two types of monocular vision measurement technology in general. One is the combination of monocular camera and measured object, but it needs to design a suitable cooperative target, which has certain limitations. The other is the combination of monocular camera and active sensor, but the adjustment or calibration process of the pose relationship between the camera and the active sensor is more complicated. Aiming at how to quickly measure the pose of space objects, this paper studies a monocular visual spatial pose measurement method based on two-dimensional active pose guidance. This method only requires a camera and a precision two-dimensional carrier to collect one image before and after the carrier rotates, which can complete the rapid attitude measurement of space objects. The attitude measurement method has the advantages of low cost, simple operation and large measuring range, which is less dependent on equipment.

Methods A monocular attitude measurement system composed of monocular camera, precision two-dimensional platform and measured object is established. And an attitude measurement model of monocular camera, precision two-dimensional platform and tilt meter is designed. A precision checkerboard image and two angles of the two-dimensional platform under different image positions were taken by the camera for multiple times to carry out joint visual calibration of the camera and the two-dimensional platform (Fig.2). The pose relationship between the camera and the platform was obtained, and the pose relationship between the checkerboard and the initial camera coordinate system was calculated. Based on the coordinate system of the geodetic inclinometer, the pose relationship between the inclinometer and the attitude measuring system was

calibrated according to the coordinate system relationship between the inclinometer and the checker (Fig.3), and the measured values were converted to the coordinate system of the inclinometer, realizing the rapid measurement of monocular vision.

Results and Discussions A monocular visual spatial pose measurement method based on 2D active pose guidance is studied. Through the acquisition of precision checkerboard images for many times, the pose relationship between the camera and the two-dimensional platform, the inclinometer and the measuring attitude system was obtained, and the calibration errors of pitch angle and roll angle were both $< 0.31^\circ$ (Fig.7). Taking the checkerboard as the measured object, combined with the calibrated parameters, the measurement error is the largest when the pitch angle is about 15° , and the measurement error is 0.82° . When the roll angle is about -15° , the maximum measurement error is -0.43° (Fig.10).

Conclusions In this paper, a monocular visual spatial pose measurement method based on 2D active pose guidance is studied, and the attitude measurement model of monocular camera, precision 2D pedestal and inclinometer is established. This method uses only one camera, and does not need to consider the baseline distance under binocular setting. Moreover, this method can realize the rapid measurement of the object's attitude after calibration, and realize the measurement of the object's attitude under fixed-axis dual-angle photography. The experimental results show that the proposed method can be used to measure the attitude of space objects quickly.

Key words: visual measurement; attitude measurement; monocular vision; two-dimensional load