

## 基于垂直双相机的微动平台位姿修正方法研究

陈文均<sup>1,2</sup>, 尹义贺<sup>1,2</sup>, 张跃强<sup>1,2\*</sup>, 刘肖琳<sup>1,2</sup>, 于起峰<sup>1,2</sup><sup>1</sup>深圳大学智能光测研究院, 广东 深圳 518000;<sup>2</sup>深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518000

**摘要** 基于视觉的监测系统在野外进行长期工作时, 安装了监测系统的平台自身会发生 6-自由度(6-DOF)的微小晃动, 从而给测量结果带来较大的误差。提出了一种线性求解相机微小位姿变化的方法: 通过构造垂直双相机模型, 引入垂直固连约束关系, 可线性解算出相机 6-DOF 的微小变化。仿真验证表明: 当相机发生三个欧拉角不超过  $30'$ , 三个平移向量不超过 10 mm 的微小位姿变化时, 与典型的基于单目透视  $n$  点(PnP)的位姿估计算法相比, 所提算法在解算精度、鲁棒性以及运行效率上都具有较大优势; 室外实验表明: 所提方法与单目 PnP 算法对比能更优地补偿观测平台自身微小运动引起的测量误差, 在 6 个控制点下测量 44 m 处目标点的沉降量, 利用所提方法修正平台位姿变化后绝对测量误差的平均值降至 0.2 mm, 验证了所提方法的有效性和实用性。

**关键词** 机器视觉; 摄像测量; 位姿估计; 微动平台; 垂直双相机

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2315001

## Pose Correction Method for Micro-Motion Stages Based on Dual-Orthogonal-Camera

Chen Wenjun<sup>1,2</sup>, Yin Yihe<sup>1,2</sup>, Zhang Yueqiang<sup>1,2\*</sup>, Liu Xiaolin<sup>1,2</sup>, Yu Qifeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518000, China;*

<sup>2</sup>*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518000, China*

**Abstract** The observation stage, on which the vision-based monitoring system is installed, experiences slight 6-degree-of-freedom (6-DOF) shaking when working for a long time. As a result, it brings great errors to the measurement results. Therefore, a linear solution method for micro-motion variations of the cameras was proposed. Micro 6-DOF pose variations of the cameras were then linearly calculated with a newly constructed model of two orthogonal cameras in fixed connection. Simulation verification shows that when the three Euler angles of the cameras are less than  $30'$  and the three translation vectors are less than 10 mm, the proposed method delivers better solution accuracy, robustness, and computational efficiency than the typical monocular perspective- $n$ -point (PnP) pose estimation algorithm. Meanwhile, outdoor experiments show that the proposed method better calibrates the measurement error caused by the micro-motion of the observation stage. The subsidence of the target point 44 m away from the observation stage was measured and the result shows that in the case of 6 control points, the average absolute measurement error after the pose variation of the stage is calibrated decreases to 0.2 mm, which verifies the effectiveness and practicability of the proposed method.

**Key words** machine vision; videometrics; pose estimation; micro-motion stage; dual-orthogonal-camera

**OCIS codes** 150.1488; 150.1135; 110.5200

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511102)、国家自然科学基金(12002215)

通信作者: \*yueqiang, zhang@szu.edu.cn

# 1 引言

基于视觉的位移测量方法通常需要假定相机基座静止不动,但在野外复杂测量任务中,由于外界环境因素的影响,观测平台固定不动的假设并不成立,导致测量结果不能满足高精度要求<sup>[1-2]</sup>。尤其当待测目标与观测平台相距较远时,即使平台仅发生微小晃动也会给测量结果引入较大误差,因此有必要对平台自身的 6-自由度(6-DOF)微小变化进行完整的高精度解算并消除平台晃动造成的影响,才能保证位移测量结果的有效性和准确性。

基于视觉方法解算观测平台 6-DOF 微小变化问题属于相机位姿估计问题的一类,这一经典问题也受到了国内外学者的广泛关注,最常用的是基于 2D/3D 点对应的位姿估计方法,即透视  $n$  点( $PnP$ )位姿求解算法。基于单目相机的  $PnP$  求解方法可分为非迭代方法和迭代方法。典型的非迭代求解方法包括  $EPnP$  算法<sup>[3]</sup>、直接最小二乘(DLS)算法<sup>[4]</sup>、 $RPnP$  算法<sup>[5]</sup>、 $OPnP$  算法<sup>[6]</sup>、 $ASPnP$  算法<sup>[7]</sup>等,近期研究人员提出了改进版  $SRPnP$  算法<sup>[8]</sup>、 $EOPnP$  算法<sup>[9]</sup>,以及文献<sup>[10]</sup>提出的非迭代  $PnP$  算法。迭代求解方法有正交迭代(OI)算法<sup>[11]</sup>、 $REPPnP$  算法<sup>[12]</sup>、S-OI 算法<sup>[13]</sup>、 $EPnP$ -WOIGN 算法<sup>[14]</sup>、自适应重投影误差的优化迭代方法<sup>[15]</sup>等。目前已有基于单目位姿估计算法修正不稳定平台晃动的先例<sup>[16-18]</sup>。其中于起峰等<sup>[16]</sup>采用一种基于单目传递相机的不稳定平台静态基准转换方法,利用正交迭代算法求解平台 6-DOF 运动变化,实现不稳定平台上的动态测量。Lee 等<sup>[17]</sup>利用双头相机模型,基于张氏标定法求解相机的六个位姿量并校正主相机自身的运动,再对桥梁位移实施测量。Yoon 等<sup>[18]</sup>通过单个相机观测地面静态物体修正无人机平台的运动变化,用于长期监测桥梁结构挠度。但就单目  $PnP$  算法而言,非迭代  $PnP$  算法精度和稳定性一般较差,迭代  $PnP$  算法解算时间较长且有陷入局部最优的可能;就传统图像传感器而言,单目相机在测量时沿光轴方向上的离面位移解算精度一般远低于垂直于光轴方向上的面内位移解算精度<sup>[19]</sup>,因此仅利用单目相机难以达到高精度,而且当控制点与相机距离越远时,相机位姿估计误差越大<sup>[20]</sup>,所以实际应用中往往结合其他传感器辅助测量的方法,晁志超等<sup>[19]</sup>采用单目相机结合激光测距传感器的方法,提高了系统在沿相机光轴方向上的位移测量精度。张昭等<sup>[21]</sup>利用空间正交布置的三台双光束激光干

涉仪,计算出微动平台的六维位姿并实现高精度测量,但该系统成本较高且主要适用于室内场景;Gan 等<sup>[22]</sup>采用具有公共视场的双目相机系统,基于  $RPnP$  算法并在选择旋转轴时采用鸽群优化算法求解各个相机的位姿,但该算法未充分利用两个相机间的固连约束关系。

为了解决观测平台微小位姿晃动修正问题,针对远距离下单目相机对沿光轴方向位移和滚转角的测量精度不高的缺陷,本文提出了一种垂直双相机模型,利用两个相机垂直安装构造出的固连约束,能够给求解相机位姿变化带来极大好处:假设两个垂直相机光心重合,那么任一相机的俯仰角等于另一台相机的滚转角,同时任一相机沿光轴方向的位移等于另一台相机沿水平方向的位移。借助相机对俯仰角和水平位移的灵敏度提高沿光轴方向位移及滚转角的测量精度,从而提高相机微小位姿变化的整体解算精度。

# 2 求解相机位姿变化问题

假定  $T_0$  时刻的相机坐标系为世界坐标系(见图 1),相机晃动前后的成像过程可表示为

$$\lambda_i \tilde{\mathbf{u}}_i^{t_1} = \mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{P}_i^{t_0} + \mathbf{t}), \quad (1)$$

式中: $\lambda_i$  为深度因子; $\mathbf{P}_i^{t_0}$  是控制点在  $T_0$  时刻的相机坐标系下的三维坐标; $\tilde{\mathbf{u}}_i^{t_1}$  是  $T_1$  时刻控制点所对应的齐次像素坐标; $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  分别是相机从  $T_0$  时刻到  $T_1$  时刻发生的旋转变化和平移变化, $\mathbf{R} \in SO(3)$ ,  $\mathbf{t} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ ;矩阵  $\mathbf{K}$  是相机内参矩阵,有

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $f_x$  和  $f_y$  是等效焦距,  $(u_0, v_0)$  是相机的主点坐标。用欧拉角表示旋转,对应的旋转角分别是俯

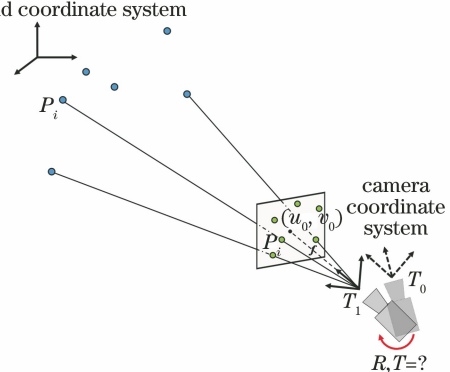


图 1 基于  $PnP$  的相机位姿变化示意图

Fig. 1 Schematic of camera pose variation based on  $PnP$

仰角  $\alpha$ , 偏航角  $\beta$ , 以及滚转角  $\gamma$ , 则相应的旋转矩阵 和 平移矢量分别为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T. \quad (4)$$

所谓相机位姿变化求解问题就是已知相机内参矩阵, 利用控制点在  $T_0$  时刻相机坐标系下的坐标  $\mathbf{P}_i^{t_0} = [x_i^{t_0}, y_i^{t_0}, z_i^{t_0}]^T$  和  $T_1$  时刻所对应的图像坐标点  $\mathbf{u}_i^{t_1} = [u_i^{t_1}, v_i^{t_1}]^T, i=1, 2, 3, \dots, n$ , 计算出相机的相对位姿变化量  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$ 。

### 3 基于双正交相机的微动平台位姿修正方法与原理

垂直双相机模型如图 2 所示, 本文将基于该模型求解相机微小位姿变化的算法称为双正交相机 (DOC) 算法。首先对单相机模型进行分析, 再说明垂直双相机求解微小位姿变化的原理。假定世界坐标系为  $W-X_w Y_w Z_w$ , 不稳定平台坐标系表示为  $U-X_u Y_u Z_u$ , 这两个相机为校准相机  $C_k, k=1, 2$ , 相机坐标系分别为  $O_k-X_k Y_k Z_k, O_k (k=1, 2)$  为相机  $C_k$  的光心。

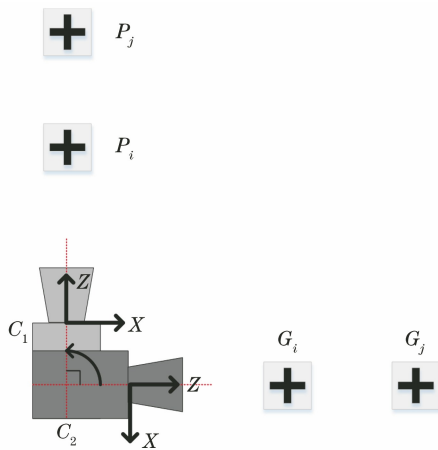


图 2 垂直双相机模型

Fig. 2 Dual-orthogonal-camera model

校准相机  $C_1$  的位姿变化由  $(\Delta X^{C_1}, \Delta Y^{C_1}, \Delta Z^{C_1}, \alpha^{C_1}, \beta^{C_1}, \gamma^{C_1})$  6 个自由度表示; 其中  $(\alpha^{C_1}, \beta^{C_1}, \gamma^{C_1})$  依次是相机  $C_1$  绕  $X, Y, Z$  轴的旋转角;  $(\Delta X^{C_1}, \Delta Y^{C_1}, \Delta Z^{C_1})$  依次是相机  $C_1$  沿  $X, Y, Z$  轴的平移量。

设  $\mathbf{P}_i$  为相机  $C_1$  视场内的控制点,  $\mathbf{p}_i$  为控制点  $\mathbf{P}_i$  在图像中的成像点, 其中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。当相

机  $C_1$  发生位姿变化后, 控制点  $\mathbf{P}_i$  在像素坐标系中的投影点坐标也发生变化。

在像素坐标系中,  $\mathbf{p}_i$  在  $u$  轴方向上的变化量  $\Delta p_{ix}$  由以下三种因素造成: 1、相机  $C_1$  沿  $X$  轴的平移量  $\Delta X^{C_1}$ ; 2、相机  $C_1$  绕  $Y$  轴的偏航角  $\beta^{C_1}$ ; 3、相机  $C_1$  绕  $Z$  轴的滚转角  $\gamma^{C_1}$ 。  $\mathbf{p}_i$  在  $v$  轴方向上的变化量  $\Delta p_{iy}$  由以下三种因素造成: 1、相机  $C_1$  沿  $Y$  轴的平移量  $\Delta Y^{C_1}$ ; 2、相机  $C_1$  绕  $X$  轴的俯仰角  $\alpha^{C_1}$ ; 3、相机  $C_1$  绕  $Z$  轴的滚转角  $\gamma^{C_1}$ 。下面以控制点  $\mathbf{P}_i$  为例建立测量方程。

假定  $T_0$  时刻到  $T_1$  时刻相机  $C_1$  发生微小晃动, 用欧拉角来表示旋转矩阵, 将三个欧拉角代入 (3) 式可得  $\mathbf{R}_{t_0, t_1}^{C_1}$ , 而平移向量  $\mathbf{T}_{t_0, t_1}^{C_1} = (\Delta X^{C_1}, \Delta Y^{C_1}, \Delta Z^{C_1})^T$ 。

$T_0$  时刻控制点  $\mathbf{P}_i$  在相机  $C_1$  坐标系中的坐标为  $\mathbf{P}_i^{t_0} = (P_x, P_y, P_z)^T$ , 投影得到的像点  $\mathbf{p}_i$  在  $T_0$  时刻的像素坐标为  $\mathbf{p}_i^{t_0} = (u_i^{t_0}, v_i^{t_0})$ , 在  $T_1$  时刻的图像坐标为  $\mathbf{p}_i^{t_1} = (u_i^{t_1}, v_i^{t_1})$ , 相机主点坐标为  $(u_c, v_c)$ , 相机的等效焦距为  $F$ , 控制点  $\mathbf{P}_i$  与光心连线的长度设为  $D_i$ , 则  $\mathbf{P}_i$  点在相机  $C_1$  坐标系中的坐标  $\mathbf{P}_i$  可表示为

$$\mathbf{P}_i^{t_0} = (P_x, P_y, P_z)^T = D_i \cdot \frac{(u_i^{t_0}, v_i^{t_0}, F)^T}{\sqrt{(u_i^{t_0} - u_c)^2 + (v_i^{t_0} - v_c)^2 + F^2}}. \quad (5)$$

引起控制点像点  $\mathbf{p}_i$  在像素坐标系  $u$  轴方向变化的主要来自于相机的偏航角和滚转角  $e_1 = (\beta^{C_1}, \gamma^{C_1})$ , 令  $\mathbf{R}_{t_0, t_1}^{C_1}$  中俯仰角  $\alpha^{C_1}$  为 0 得到  $\mathbf{R}_{e_1}$ , 控制点  $\mathbf{P}_i$  在  $T_1$  时刻的校准相机坐标系中的坐标变为  $\mathbf{P}'_i = \mathbf{R}_{e_1} \mathbf{P}_i + \mathbf{T}_{t_0, t_1}^{C_1}$ 。可得  $T_1$  时刻  $\mathbf{P}'_i$  在  $X$  轴方向的分量  $P'_x$  为

$$P'_x = P_x \cos \beta^{C_1} \cos \gamma^{C_1} + P_y \sin \gamma^{C_1} - P_z \sin \beta^{C_1} \cos \gamma^{C_1} + \Delta X^{C_1}, \quad (6)$$

同理, 可得  $T_1$  时刻  $\mathbf{P}'_i$  在  $Y$  轴方向的分量  $P'_y$  为

$$P'_y = -P_x \sin \gamma^{C_1} + P_y \cos \alpha^{C_1} \cos \gamma^{C_1} +$$

$$P_z \sin \alpha^{C_1} \cos \gamma^{C_1} + \Delta Y^{C_1}, \quad (7)$$

根据运动的相对性,由相机  $C_1$  发生偏航和滚转引起的控制点水平位移变化量  $l_{\beta,\gamma}^{C_1}$  为

$$l_{\beta,\gamma}^{C_1} = P'_x - P_x = P_x (\cos \beta^{C_1} \cos \gamma^{C_1} - 1) + P_y \sin \gamma^{C_1} - P_z \sin \beta^{C_1} \cos \gamma^{C_1} + \Delta X^{C_1}, \quad (8)$$

由相机  $C_1$  发生俯仰和滚转引起的控制点竖向沉降变化量  $h_{\alpha,\gamma}^{C_1}$  为

$$h_{\alpha,\gamma}^{C_1} = P'_y - P_y = -P_x \sin \gamma^{C_1} + P_y (\cos \alpha^{C_1} \cos \gamma^{C_1} - 1) + P_z \sin \alpha^{C_1} \cdot \cos \gamma^{C_1} + \Delta Y^{C_1}, \quad (9)$$

联立(8)式和(9)式可得到相机  $C_1$  在水平方向和竖直方向的测量方程:

$$\Delta p_{ix} = u_i^{t_1} - u_i^{t_0} = k_{P_i} l_{\beta,\gamma}^{C_1}, \quad (10)$$

$$\Delta p_{iy} = v_i^{t_1} - v_i^{t_0} = k_{P_i} h_{\alpha,\gamma}^{C_1}, \quad (11)$$

式中  $k_{P_i}$  为对应控制点在相机  $C_1$  视场中的放大倍数,根据几何关系可得

$$k_{P_i} = \frac{\sqrt{[(u_i^{t_0} - u_0)^2 + (v_i^{t_0} - v_0)^2 + F^2]}}{D_i}, \quad (12)$$

由于相机只发生微小晃动,并且焦距固定不变,因此可假定放大倍数为定值。

每一个控制点  $P_i$  在  $C_1$  相机坐标系中都可建立(10)式和(11)式两个独立的测量方程。由于测量平台仅仅发生了微小晃动,故三个欧拉角的数值均较小,利用  $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1$  化简测量方程,其中  $\theta$  指的是  $\alpha, \beta, \gamma$  中的任意一个。将(10)式和(11)式改写成

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{ix} \\ \Delta p_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{P_i} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{P_i} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X^{C_1} \\ \Delta Y^{C_1} \\ \Delta Z^{C_1} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -k_{P_i} P_z & k_{P_i} P_y \\ k_{P_i} P_z & 0 & -k_{P_i} P_x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{C_1} \\ \beta_{C_1} \\ \gamma_{C_1} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

在单相机求解位姿变化的基础上,结合两个垂直安装的相机之间的固连约束,即得到基于垂直双相机模型求解微小位姿变化的 DOC 算法。

假定校准相机  $C_1$  和校准相机  $C_2$  固连关系为

$$P^{C_2} = R^{C_1,C_2} P^{C_1} + T^{C_1,C_2}, \quad (14)$$

由于两个相机垂直安装,并且校准相机  $C_1$  按照右手定则旋转  $90^\circ$  到相机  $C_2$ ,有

$$R^{C_1,C_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, T^{C_1,C_2} = \begin{bmatrix} \Delta \mu_x \\ 0 \\ \Delta \mu_z \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中,  $[\Delta \mu_x \quad 0 \quad \Delta \mu_z]$  为  $C_1$  相机光心在  $C_2$  相机坐标系中的坐标。

当相机  $C_1$  先发生旋转  $R_{t_0,t_1}^{C_1}$ ,再发生平移  $T_{t_0,t_1}^{C_1}$  后,相机  $C_2$  发生的旋转平移分别为

$$R_{t_0,t_1}^{C_2} = R^{C_1,C_2} R_{t_0,t_1}^{C_1} (R^{C_1,C_2})^T, \quad (16)$$

$$T_{t_0,t_1}^{C_2} = -R_{t_0,t_1}^{C_2} T^{C_1,C_2} + R^{C_1,C_2} T_{t_0,t_1}^{C_1} + T^{C_1,C_2}, \quad (17)$$

设  $G_i$  为相机  $C_2$  视场内的控制点,  $g_i$  为控制点  $G_i$  在图像中的成像点,  $i=1,2,3,\dots,n$ 。根据(5)式可得  $T_0$  时刻  $G_i$  点在校准相机  $C_2$  坐标系中的坐标  $G_i^{t_0} = (G_x, G_y, G_z)^T$ 。

控制点  $G_i$  在  $T_1$  时刻的  $C_2$  相机坐标系中的坐标变为  $G'_i = R_{t_0,t_1}^{C_2} G_i^{t_0} + T_{t_0,t_1}^{C_2}$ 。得到  $T_1$  时刻  $G'_i$  在  $X$  轴方向的分量  $G'_x$  和  $Y$  轴方向的分量  $G'_y$ 。

类似地,根据(8)式和(9)式,可得由相机  $C_2$  发生偏航和俯仰引起的成像点水平位移变化量  $l_{\beta,\gamma}^{C_2}$  和由相机  $C_2$  发生俯仰和滚转引起的成像点竖向沉降变化量  $h_{\alpha,\gamma}^{C_2}$ ;根据(10)式和(11)式,可得到相机  $C_2$  在水平方向和竖直方向的测量方程,每一个控制点  $G_i$  在  $C_2$  相机坐标系中都可建立方程两个独立的测量方程。利用微小量化简测量方程得到矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \Delta g_{ix} \\ \Delta g_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -k_{G_i} \\ 0 & k_{G_i} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X^{C_1} \\ \Delta Y^{C_1} \\ \Delta Z^{C_1} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_{G_i} G_y & k_{G_i} (\Delta \mu_z - G_z) & 0 \\ k_{G_i} (\Delta \mu_z - G_x) & 0 & k_{G_i} (\Delta \mu_z - G_x) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{C_1} \\ \beta_{C_1} \\ \gamma_{C_1} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

式中  $k_{G_i}$  为对应控制点在相机  $C_2$  视场中的放大倍数。由(13)式和(18)式可知,将多个控制点约束方

程联立可以线性解算出校准相机  $C_1$  的微小位姿变化。方程中含有 6 个未知量  $(\Delta X^{C_1}, \Delta Y^{C_1}, \Delta Z^{C_1},$

$\alpha^{C_1}, \beta^{C_1}, \gamma^{C_1}$ ), 每个控制点可建立两个独立的测量方程, 具有三个及以上控制点即可求解上述 6 个未知量, 即相机  $C_1$  的位姿变化。

用  $\mathbf{X}_{C_i}$ 、 $\mathbf{X}_U$  分别表示某空间点  $X$  在相机  $C_i$  坐标系和不稳定平台坐标系下的坐标, 利用(16)式和(17)式, 代入相机  $C_i$  和平台坐标系之间的固连关系, 可得平台坐标系的位姿变化量  $\mathbf{R}_{t_0, t_1}^U$  和  $\mathbf{T}_{t_0, t_1}^U$ , 用欧拉角和平移向量表示为

$$\Delta \mathbf{U} = (\Delta X^U, \Delta Y^U, \Delta Z^U, \alpha^U, \beta^U, \gamma^U)^T. \quad (19)$$

## 4 数值仿真与实验验证

### 4.1 微小位姿估计算法仿真对比

此部分通过仿真实验来测试本文提出的 DOC 算法求解相机微小位姿变化的解算能力。仿真过程中, 通过与典型的 PnP 算法进行比较, 来综合评价所提算法的性能。

设定虚拟相机的 CCD 尺寸为  $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ , 等效焦距  $F = 40000 \text{ pixel}$ 。相机发生位姿变化由旋转矩阵和平移向量组成。以  $T_0$  时刻的相机坐标系作为世界坐标系, 求解  $T_1$  时刻发生位姿变化后相机坐标系与  $T_0$  时刻的相机坐标系的相对位姿变化。

模拟使用长焦镜头观察远距离处控制点的情形, 此时相机视场相对较小, 将控制点随机分布在  $[-0.4, 0.4] \text{ m} \times [-0.3, 0.3] \text{ m} \times [20, 24] \text{ m}$  范围内。相机的旋转矩阵用欧拉角表示, 设置俯仰角、滚转角、偏航角随机分布在  $[-30, 30]^\circ$  范围内; 相机的平移向量的三个分量随机分布在  $[-10, 10] \text{ mm}$  范围内。

由于 DOC 算法是基于垂直构型相机来解算相机相对位姿变化的, 仿真过程中假定两个相机垂直安装且光心重合, 内参矩阵一致。并且保持两个相机视场内的控制点数量之和与单目 PnP 算法中的控制点数量相同。

根据小孔成像模型, 将控制点投影到成像平面上, 加不同等级的高斯噪声来模拟成像过程中的误差。由控制点在  $T_0$  时刻相机坐标系下的三维坐标以及发生微小晃动后  $T_1$  时刻的图像坐标作为输入, 即可通过各种算法得到解算的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{\text{estimation}}$  和平移向量  $\mathbf{t}_{\text{estimation}}$ , 采用以下误差标准来衡量解算值跟真实值的整体误差:

$$e_{\text{rot}} = \max_{k \in \{1, 2, 3\}} \arccos(\mathbf{r}_{k, \text{true}}^T \mathbf{r}_{k, \text{estimation}}) \times \frac{180 \times 60}{\pi}, \quad (20)$$

$$e_{\text{trans}} = || \mathbf{t}_{\text{estimation}} - \mathbf{t}_{\text{true}} || \times 1000, \quad (21)$$

式中,  $\mathbf{r}_{k, \text{true}}$  和  $\mathbf{r}_{k, \text{estimation}}$  分别表示  $\mathbf{R}_{\text{true}}$  和  $\mathbf{R}_{\text{estimation}}$  的第  $k$  个列向量。

#### 4.1.1 点数目对位姿估计算法精度的影响

设置在固定控制点数量下计算 500 次, 将图像提取误差的方差设定为  $0.5 \text{ pixel}$ , 控制点随机分布在相机整个视场内, 将点数目从 4 变化至 20 来对比各种 PnP 算法的解算精度, 得到的结果如图 3 所示。

总体上随着控制点数量的增加, DOC 算法的解算精度和单目 PnP 算法解算精度都有所提高, 并且基于单目的 PnP 算法的求解精度相差不大, 除 EPnP+GN 算法和 LHM 算法在个别控制点数量少的情况下解算值发散, 以及 OPnP 算法在个别点不太稳定以外, 其他的位姿估计算法在角度求解上整体精度均能达到  $3 \text{ arcmin}$  以下, 在平移量求解精度上整体精度能达到  $15 \text{ mm}$  以下。DOC 算法在旋转误差和平移误差的均值、中值和标准差三个指标上都要优于单目 PnP 算法。

#### 4.1.2 图像提取误差对位姿算法精度的影响

设置在固定图像提取误差下计算 500 次, 控制点随机分布在相机整个视场内, 点数量设定为 10, 图像提取误差的方差选择从  $0.2$  变化至  $2$ , 步长为  $0.2 \text{ pixel}$ , 来对比各种 PnP 算法的解算精度, 得到的结果如图 4 所示。

从图 4 中可看出, OPnP 算法受噪声因素影响, 导致利用消去矩阵模板求解变量时得到不稳定的解, 从而使得个别点估计值严重偏离真值的情况; 同时 LHM 算法也有陷入局部最小值的风险。其他 PnP 算法的解算精度在位姿测量误差的均值和中值上都相差不大。总体上 DOC 算法的抗噪声能力比所对比的单目 PnP 算法更强一些, 解算误差上升得更加缓慢, 体现了 DOC 算法在数值上的稳定性。

#### 4.1.3 算法的运行效率

控制点的数量从 4 上升到 100, 各种算法在固定控制点数量下运行 1000 次, 计算各种算法的平均计算时间, 得到的统计结果如图 5 所示, 其中图 5 (b) 是图 5(a) 的局部放大版本。可以看到基于迭代求解的 LHM 算法和采用矩阵合成技术解算位姿的 DLS 算法运行时间随点数增加, 其运行效率显著降低, 而 OPnP 算法基本保持相对固定的运行效率, EPnP+GN 算法采用了线性化的方式, 跟 RPnP 算法和 ASPnP 算法类似, 在点数为 100 以内效率较高且都相对稳定, DOC 算法采用线性的求解方法,

整体上看 DOC 算法耗时最少,因此能应用于实时性要求较高的任务当中。

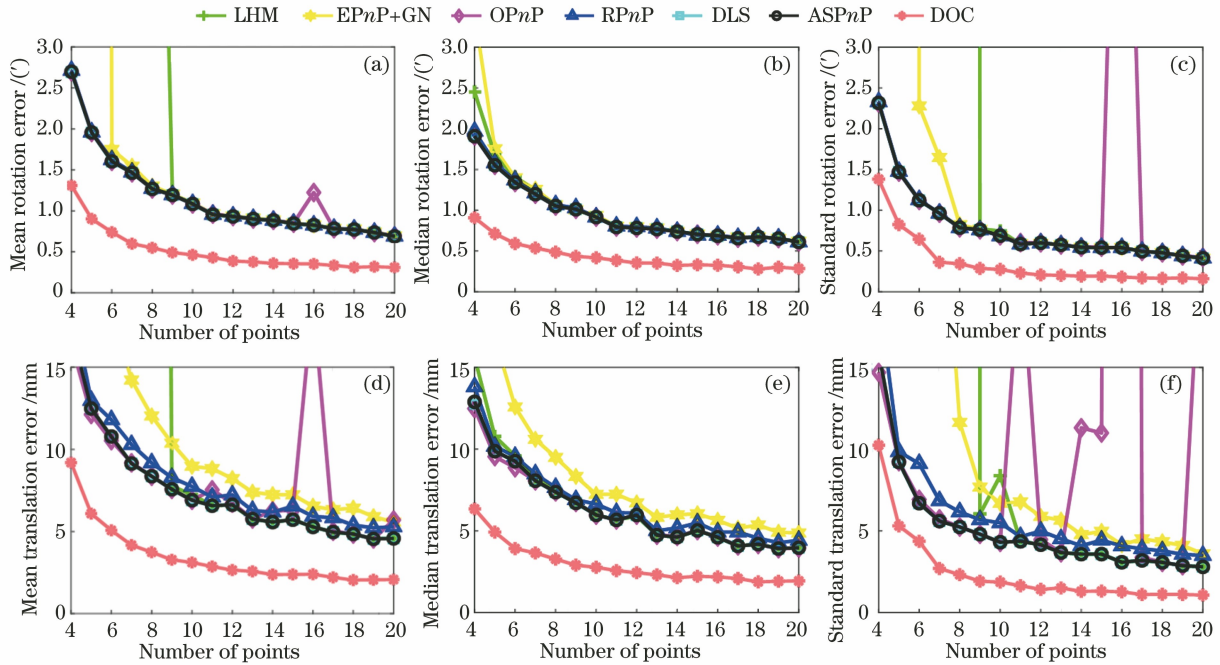


图 3 随控制点数量变化的实验结果。(a)旋转误差均值;(b)旋转误差中值;(c)旋转误差标准差;  
(d)平移误差均值;(e)平移误差中值;(f)平移误差标准差

Fig. 3 Experimental results with varying number of control points. (a) Mean rotation error; (b) median rotation error; (c) standard rotation error; (d) mean translation error; (e) median translation error; (f) standard translation error

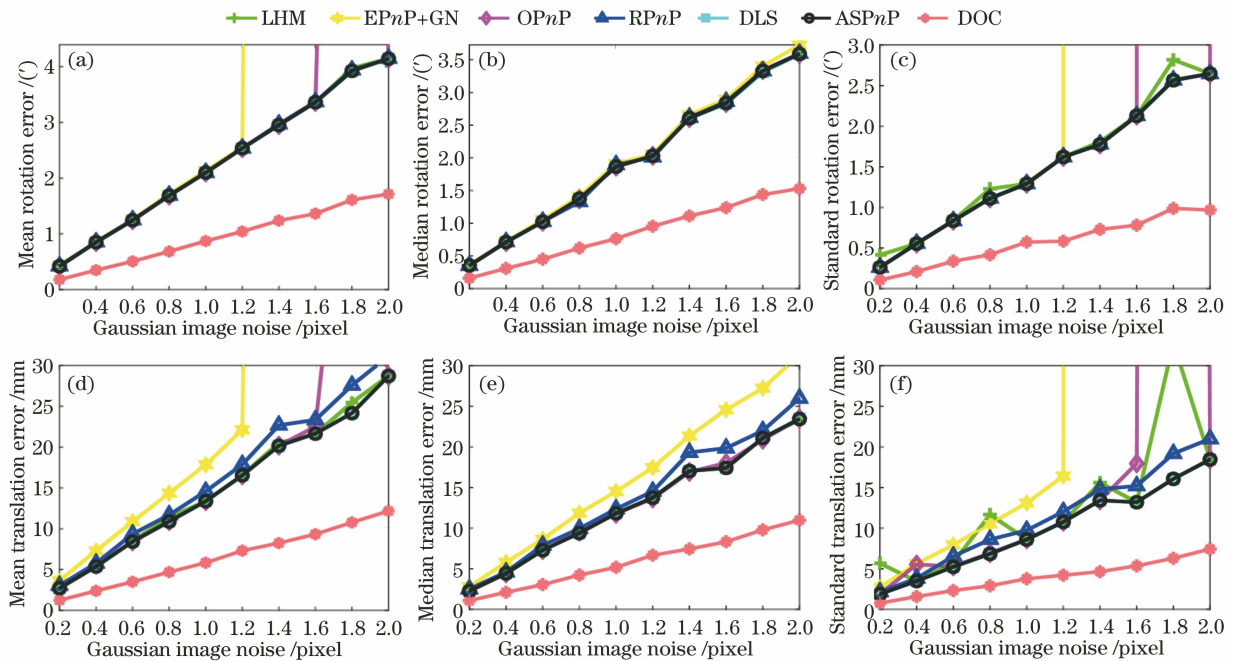


图 4 随图像提取误差变化的实验结果。(a)旋转误差均值;(b)旋转误差中值;(c)旋转误差标准差;  
(d)平移误差均值;(e)平移误差中值;(f)平移误差标准差

Fig. 4 Experimental results with increasing level of Gaussian noise. (a) Mean rotation error; (b) median rotation error; (c) standard rotation error; (d) mean translation error; (e) median translation error; (f) standard translation error

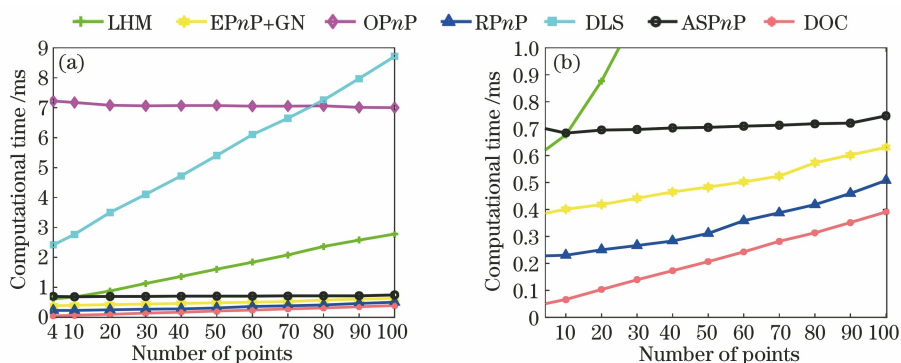


图 5 算法的平均运行时间。(a)控制点由 4 变化至 100 的结果;(b)图 5(a)局部放大版本

Fig. 5 Computational time of all the methods. (a) Result with control points changing from 4 to 100;

(b) zoomed-in version of fig. 5 (a)

#### 4.1.4 两个相机夹角对位姿估计算法精度的影响

理想的垂直构型相机要求两个相机垂直固连,但实际上可能因制作工艺等而存在一定的安装误差,因此有必要探讨下两个相机之间非严格垂直安装对位姿算法精度的影响。仿真实验中,控制点随机分布在相机的整个视场内,点数量为 10,加入方差为 0.5 的图像提取误差,三个方向夹角随机加入安装误差,各个方向夹角误差的绝对值之和定义为总安装误差,由 12°变化至 0°,步长为 1°,在固定总

安装误差下计算 500 次并统计位姿解算误差,得到的结果如图 6 所示。可以看出,单目 PnP 算法基本保持稳定,因为单目相机不需要考虑安装误差;对 DOC 算法而言,旋转矩阵和平移向量的解算误差随总安装误差的减小呈下降趋势,在总安装误差在 4°以内,DOC 算法的位姿解算精度总体上会大于比其他所比较的单目 PnP 算法,即实际中允许有小角度的安装误差。但要想保证足够精度,两个相机间的安装误差应该尽可能地小。

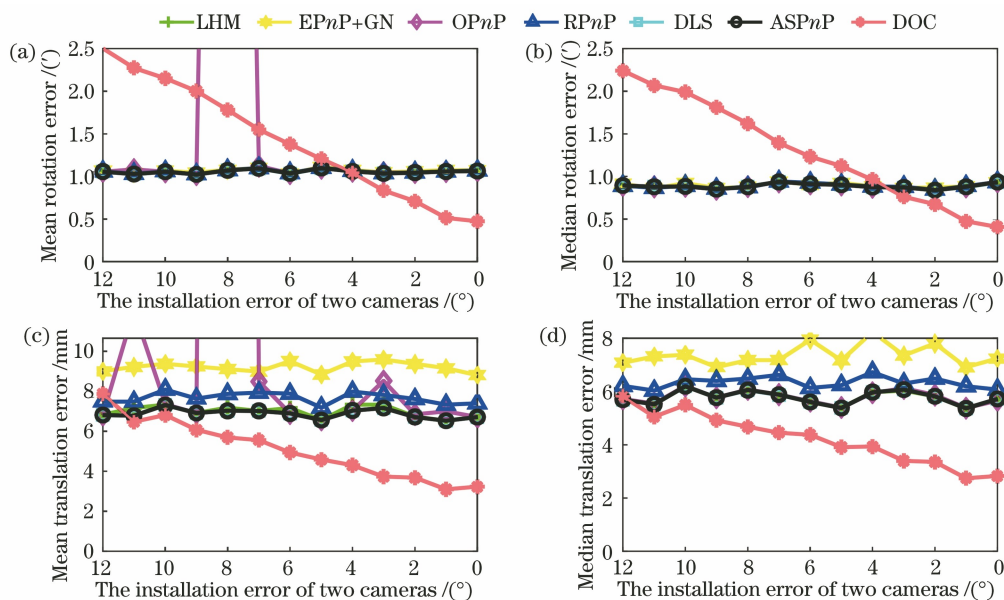


图 6 两个像机夹角对六自由度解算精度的影响。(a)旋转误差均值;(b)旋转误差中值;(c)平移误差均值;(d)平移误差中值

Fig. 6 Influence of installation error between two cameras on the accuracy of 6-DOF estimation.

(a) Mean rotation error; (b) median rotation error; (c) mean translation error; (d) median translation error

## 4.2 真实沉降实验验证

### 4.2.1 实验装置搭建

为了验证垂直构型相机校正微小位姿变化的求解精度,本文进行了室外真实沉降试验,模拟在不稳定平台上测量物体位移的场景。实验布置如图 7 所

示,共有三部分组成,包括不稳定观测平台、图像采集系统以及全站仪。

其中,不稳定观测平台由一个金属支架、三个升降台以及三个相机组成。金属支架和三个升降台组成微动平台,通过调节三个升降台的升降模

拟平台晃动;三个相机固连在金属板上,距离各个相机 30~50 m 的范围内布设一定数量标志点,用于相机内外参数的标定。其中 0 号相机和 1 号相机组成校准平台位姿变化的垂直双相机模型,两个校准相机视场内的控制点同时也作为平台位姿解算的备选控制点;另外一个相机用来测量距离

44 m 处的位移台上目标点的沉降量,根据测量结果与位移台提供的真值对比,来验证所提位姿估计算法的有效性和准确性。图像采集系统主要由计算机及同步采图软件构成。全站仪用于提供三维坐标点,利用全站仪辅助打点的方式对相机内外参进行标定。

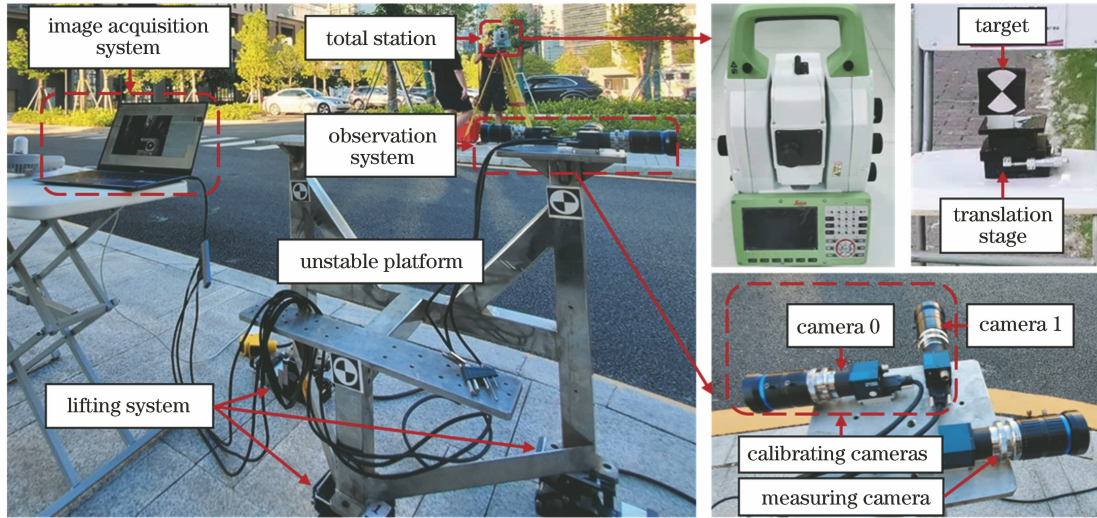


图 7 实验布置图

Fig. 7 Experimental layout

4.2.2 实验过程

1) 相机内外参标定

利用全站仪获取各个视场的控制点的三维坐标,相机同步采图,对应视场下的图像如图 8 所示。根据标志点在全站仪坐标系中的空间坐标和对应像点的图像坐标标定得到三个相机的内外参数,0 号、

1 号校准相机以及测量相机的标定重投影误差分别是 2.80、3.23 和 1.58 pixel,各个相机的物面分辨率约为 3 pixel/mm,标定误差在合理范围内。标定所得相机间相对位姿示意图如图 9 所示,三个相机内参如表 1 所示。

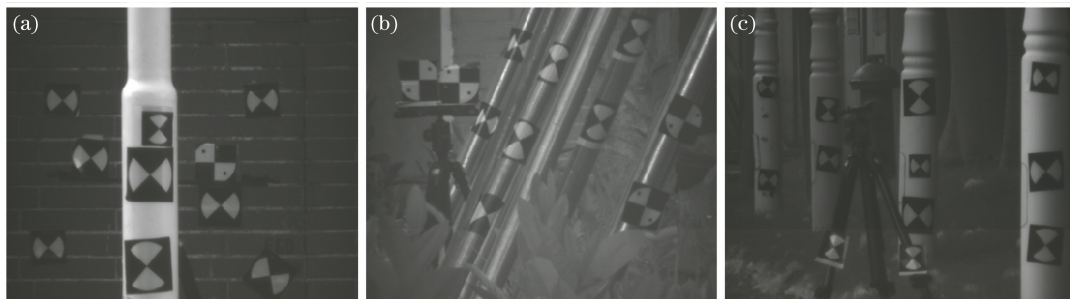


图 8 不同视场下的标定图像。(a) 0 号相机视场;(b) 1 号相机视场;(c) 测量相机视场

Fig. 8 Calibration images in different fields of view. (a) Field of camera 0; (b) field of camera 1; (c) field of measuring camera

表 1 三个相机的内参

Table 1 Intrinsic parameters of three cameras

Camera	$F_x$ /pixel	$F_y$ /pixel	$C_x$ /pixel	$C_y$ /pixel
Camera 0	119114.94531	119114.94531	1224.5	1024.5
Camera 1	119791.51562	119791.51562	1224.5	1024.5
Measuring camera	120585.68750	120585.68750	1224.5	1024.5



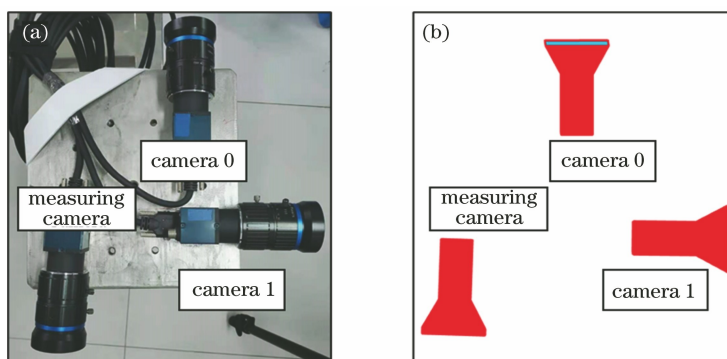


图 9 三个相机相对位姿。(a)实际中的相对位姿;(b)标定所得相对位姿

Fig. 9 Relative pose of three cameras. (a) Actual relative pose; (b) calibrated relative pose

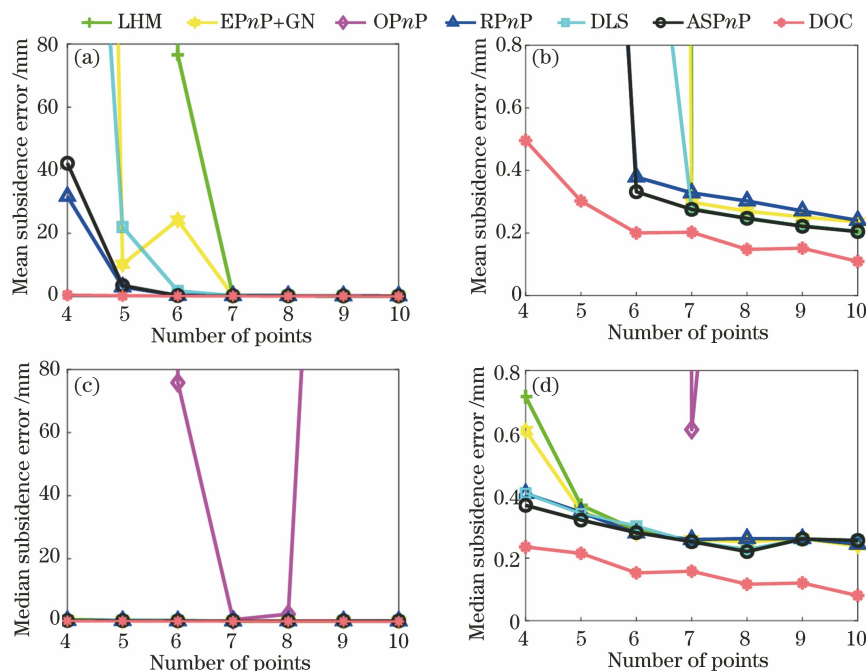


图 10 随控制点数量变化的沉降解算误差均值和中值。(a)沉降解算误差均值;(b)图 10(a)的局部放大版本;  
(c)沉降解算误差中值;(d)图 10(c)的局部放大版本

Fig. 10 Mean and median errors of subsidence with regard to varying number of control points. (a) Mean error of subsidence; (b) zoomed-in version of fig. 10(a); (c) median error of subsidence; (d) zoomed-in version of fig. 10(c)

2) 采集 7 个工况对应的图像数据

校准相机视场内的控制点保持不动,  $T_0$  时刻相机、靶标和待测标志点均保持不动,  $T_1 \sim T_3$  时刻平台保持不动, 位移台上的目标点发生 1~2 mm 的竖直位移;  $T_4 \sim T_7$  时刻既微调平台, 同时又让目标点发生 1~2 mm 竖直位移, 采集每个工况下各个相机的图像数据。

3) 根据上述实验数据, 计算每个工况下待测点的沉降值

随机选取不同数量的角点作为控制点, 根据各种位姿解算算法求解校准相机的位姿变化, 再根据相机之间的安装关系转成测量相机的位姿变化, 计

算得到修正位姿变化后目标点的沉降值, 实验中统计测量端的绝对沉降解算误差的中值和平均值来衡量各种位姿算法的解算精度。

0 号校准相机视场设定 10 个控制点, 1 号校准相机视场设定 8 个控制点。由于垂直构型相机中需要两个相机视场的控制点, 而单目 PnP 算法只需要一个相机, 因此 0 号相机随机选择 4 至 10 控制点作为单目 PnP 算法的控制点; 在 0 号相机和 1 号相机两个视场内各选 2 至 5 个控制点作为 DOC 算法的控制点, 以保证控制点数量的一致性。

在视场内随机选取指定数量的控制点, 不同控制点配置下对每个工况分别计算 500 次, 计算 7 个

平行工况的绝对沉降解算误差的中值和平均值,作为该算法在指定控制点数量下的解算误差,统计结果如图 10 所示。

其中,图 10(b)是图 10(a)的局部放大版本,图 10(d)是图 10(c)的局部放大版本。统计结果表明,除了 OP<sub>n</sub>P 算法之外,各种算法的解算误差都随着控制点数量的增多而呈现下降的趋势,这是因为在室外采集的图像中可能存在不稳定的噪声因素,导致 OP<sub>n</sub>P 算法解算使用消去模版时得到不稳定的解;在数量点相同的情况下,对比单目 P<sub>n</sub>P 估计算法,DOC 算法具有更高的解算精度;当控制点数量为 4 和 5 时,基于单目 P<sub>n</sub>P 算法计算位姿变化所得沉降解算结果不可用,而基于 DOC 算法得到的沉降解算误差仍能达到亚毫米级,在控制点弱冗余的

情况下仍能保证位姿解算精度以及数值稳定性;在控制点较多时,大部分单目 P<sub>n</sub>P 算法的精度也能达到亚毫米级,这是因为实验中利用三个升降台给平台提供微小运动,主要提供俯仰角和沉降量的变化,对相机施加面内滚转角以及沿光轴方向的运动较小,所以不能完全体现 DOC 算法针解算这两个量的优势,而在后视点布设合理的情况下,单目 P<sub>n</sub>P 也能较好地解算出位姿变化。表 2 统计的是每种位姿解算算法在 6 个控制点时的沉降解算误差的均值和中值,可以看出在所比较的几种位姿解算算法中,即使 DOC 算法是线性求解方法,解算精度明显优于单目 P<sub>n</sub>P 方法,修正平台晃动后的绝对沉降解算误差的均值达到了 0.2 mm,可应用在实际监测任务中。

表 2 在 6 个控制点下各种位姿解算算法的沉降解算误差

Table 2 Subsidence errors of different pose estimation methods in the case of 6 control points

Method	LHM	EP <sub>n</sub> P+GN	OP <sub>n</sub> P	RP <sub>n</sub> P	DLS	ASP <sub>n</sub> P	DOC
Mean subsidence error /mm	76.52	24.26	66360	0.38	1.77	0.33	0.20
Median subsidence error /mm	0.29	0.28	75.81	0.28	0.30	0.28	0.15

## 5 结 论

针对基于摄像测量的大型结构长期监测任务中常见的不稳定平台微小晃动修正问题,本文提出了基于垂直构型相机的 DOC 位姿估计算法,并推导了 DOC 算法解算位姿变化的测量方程。仿真实验和实际实验表明,利用相机相互垂直的固连约束关系有效克服了单目位姿估计中对滚转角和沿光轴位姿量解算精度不高的困难,因此所提算法具有较高的求解精度和对噪声的容忍度,由于采用完全线性求解相机位姿变化的方法,因此具有较快的运行效率,能有效且实时地对微动平台进行位姿修正,从而保证了测量端所得测量结果的有效性和准确性,在理论研究上具有重要意义,在实际应用前景上也有较高的价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X H, Liu J B, Liu T J, et al. Measuring and correcting method for shaking platform of vehicle-mounted theodolite [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015, 45(5): 471-475.  
张小虎, 刘进博, 刘铁军, 等. 不稳定平台晃动测量与修正方法研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(5): 471-475.
- [2] Yu Q F, Shang Y, Guan B L, et al. Camera series and parallel networks for deformation measurements

of large scale structures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9530: 953002.

- [3] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EP<sub>n</sub>P: an accurate O(n) solution to the P<sub>n</sub>P problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 81(2): 155-166.
- [4] Hesch J A, Roumeliotis S I. A direct least-squares (DLS) method for P<sub>n</sub>P [C] // 2011 International Conference on Computer Vision, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 383-390.
- [5] Li S Q, Xu C, Xie M. A robust O(n) solution to the perspective-n-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7): 1444-1450.
- [6] Zheng Y Q, Kuang Y B, Sugimoto S, et al. Revisiting the P<sub>n</sub>P problem: a fast, general and optimal solution [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 2344-2351.
- [7] Zheng Y Q, Sugimoto S, Okutomi M. ASP<sub>n</sub>P: an accurate and scalable solution to the perspective-n-point problem [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2013, E96.D(7): 1525-1535.
- [8] Wang P, Xu G L, Cheng Y H, et al. A simple, robust and fast method for the perspective-n-point problem [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2018,

- 108: 31-37.
- [9] Zhou L P, Kaess M. An efficient and accurate algorithm for the perspective- $n$ -point problem [C] // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), November 3-8, 2019, Macao, China. New York: IEEE Press, 2019: 6245-6252.
- [10] Yu Q D, Xu G L, Zhang L M, et al. A consistently fast and accurate algorithm for estimating camera pose from point correspondences [J]. *Measurement*, 2021, 172: 108914.
- [11] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(6): 610-622.
- [12] Ferraz L, Binefa X, Moreno-Noguer F. Very fast solution to the PnP problem with algebraic outlier rejection [C] // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 501-508.
- [13] Zhang X F, Liu H B, Shang Y. Robust orthogonal iteration algorithm for single camera pose estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0915004.  
张雄锋, 刘海波, 尚洋. 单目相机位姿估计的稳健正交迭代方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0915004.
- [14] Ling H Y, Wang P Y. Method for camera pose estimation based on weighted optimization of objective functions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041503.  
凌寒羽, 王培元. 基于目标函数加权优化的相机位姿估计算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041503.
- [15] Zhou D, Dong X C, Zhang F, et al. Monocular pose optimization algorithm based on adaptive reprojection error [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021204.  
周单, 董秀成, 张帆, 等. 基于自适应重投影误差单目位姿优化算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 021204.
- [16] Yu Q F, Sun X Y, Jiang G W, et al. Ralay camera videometrics based conversion method for unstable platform to static reference [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2011, 41(5): 681-686.  
于起峰, 孙祥一, 姜广文, 等. 基于传递像机摄像测量的不稳定平台的静态基准转换方法 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(5): 681-686.
- [17] Lee J, Lee K C, Jeong S, et al. Long-term displacement measurement of full-scale bridges using camera ego-motion compensation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106651.
- [18] Yoon H, Shin J, Spencer B F, Jr. Structural displacement measurement using an unmanned aerial system [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(3): 183-192.
- [19] Chao Z C, Fu S H, Jiang G W, et al. Mono camera and laser range finding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312001.  
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312001.
- [20] Li L Y, Li W T, Xu H Y, et al. Camera pose estimation with uncertain reference point based on orthogonal iterative [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011503.  
李丽媛, 李文韬, 许海燕, 等. 基于正交迭代的参考点不确定相机位姿估计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011503.
- [21] Zhang Z, Qi C K, Lin J F, et al. Six-dimensional pose measurement modeling and error analysis of micro-motion platform based on laser interferometer [J]. *Machine Design & Research*, 2020, 36(4): 23-27, 32.  
张昭, 齐臣坤, 林剑锋, 等. 基于双光束激光干涉仪的微动平台六维位姿测量建模与误差分析 [J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(4): 23-27, 32.
- [22] Gan L, Duan H B. Robust binocular pose estimation based on pigeon-inspired optimization [C] // 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), June 15-17, 2015, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2015: 1043-1048.