

光学学报

旋转视觉测量系统相机光心与转轴距离的 标定方法

侯艳丽, 苏显渝, 陈文静*

四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065

摘要 在应用旋转台与相机组成的旋转视觉测量系统时, 为了方便后续的数据拼接, 标定出相机光心与旋转轴之间的距离至关重要。提出了一种基于双目视觉原理的相机光心与转轴距离的标定方法, 建立了相应的数学模型并推导出了解析表达式。利用转台带动已知内参数的相机旋转一次, 拍摄两幅标靶图片, 即可利用标靶图像上特征点的物理图像坐标、对应的空间距离、旋转角和相机内参数, 计算出相机光心与旋转轴之间的距离。计算机模拟和实验验证了所提方法的可行性。计算结果可用于旋转视觉测量系统的相机光心与转轴的对位, 对位精度可达到 0.16 mm。

关键词 测量; 旋转视觉测量系统; 相机标定; 双目视觉; 光心与转轴对准

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2112001

Calibration Method of Distance Between Optical Center of Camera and Rotation Axis in Rotating Vision Measurement System

Hou Yanli, Su Xianyu, Chen Wenjing*

*Department of Optic-Electronic, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University,
Chengdu 610065, Sichuan, China*

Abstract In the application of a rotating vision measurement system composed of a turntable and a camera, it is important to accurately calibrate the distance between the optical center of camera and the rotation axis, so as to facilitate subsequent data splicing. Therefore, a method for calibrating the distance between the optical center of camera and the rotation axis based on the principle of binocular vision is proposed, and the corresponding mathematical model is established, with the analytical expression deduced. The turntable drives the camera with known internal parameters to rotate once, and two target images are shot. Then, the distance between the optical center of camera and the rotation axis can be calculated according to the image coordinates of the feature points on the target images, their corresponding spatial distance, the rotation angle, and the internal parameters of the camera. As a result, computer simulations and experiments verify the effectiveness of the proposed method, and the calculation results can be used to align the optical center of camera with the rotation axis in the rotating vision measurement system, with an alignment accuracy of 0.16 mm.

Key words measurement; rotating vision measurement system; camera calibration; binocular vision; alignment of optical center and rotation axis

1 引言

基于摄影测量原理^[1-3]的光学测量在机器视觉、全景图像拼接、航空航天、国防建设、工业制造和逆向工程^[4-9]等领域中具有重要的意义和广泛的应用前景。在近景摄影测量领域中, 旋转摄影测量方法因其非接触、精度高、灵活性好和实时性强等优点得到了迅速的

发展。常见的旋转摄影测量将相机固定在旋转机构(经纬仪、全站仪和普通旋转台等)上来对目标进行扫描和测量^[10-12]。为了方便计算和后期的数据融合, 通常需要保证测量系统中相机光心与旋转机构的旋转轴重合。然而, 在实际安装过程中, 相机光心的实际位置不易确定, 故难以实现相机光心与旋转机构旋转轴的精确对位。若系统中相机光心与转轴偏离, 则会影响

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-04-02; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ490879)

通信作者: *chenwj0409@scu.edu.cn

系统的测量精度和后期的拼接效果。特别是,在近距离测量中,相机光心与转轴偏离会对测量精度和拼接效果造成较大的影响。因此,精确标定出相机光心与旋转轴之间的距离来指导系统的安装和调整过程,从而消除相机光心与旋转轴不重合所带来的误差在近距离测量中至关重要。

如何准确标定旋转视觉测量系统中相机光心与旋转轴之间的位置关系引起了学者们广泛的研究兴趣。周满平和谭月胜^[13]提出了一种结合电荷耦合器件(CCD)相机的摄像功能和经纬仪高精度测角功能的视觉测量系统,利用旋转的单 CCD 相机实现了双目立体视觉测量,并获得了相机投影中心与旋转中心的距离和相机焦距,但采用的是平视双目成像模型。李建荣等^[14]分析了光学镜头主点随旋转系统转动的轨迹模型,提出了一种对主点与旋转中心之间距离进行标定的方法,该方法仅适用于相机光轴与旋转轴共面的情况。Kukko^[15]设计了特殊的校准目标(圆锥体)用于相机光心与旋转中心的对齐,以解决投影中心和球形全景摄像头旋转轴之间的对准问题,该方法实现的投影中心对准的不确定度约为 1 mm。顾国华等^[16]提出了一种基于二维旋转平台的相机成像模型,通过系统中坐标系的变换,将相机的运动转换为连接相机的旋转平台的纯旋转运动,实现了相机的精确标定并获得了相机与旋转平台间的变换参数。然而,在精度较低的转台的情况下应用该方法,需事先对转台的轴系误差进行标定。

为了消除近距离测量中相机光心与转台旋转中心距离偏差带来的测量误差,本文提出了一种基于一般的双目立体视觉原理^[17-19]的相机光心与旋转轴距离的标定方法。建立了相机光心与旋转轴距离的数学模型,并推导出了光心和转轴的距离与特征点空间距离的几何关系。在利用转台带动已知内参数的相机旋转一次,并拍摄两幅标靶图片后,即可利用特征点对的物理图像坐标、空间距离、旋转角和相机内参数计算出相机光心与旋转轴之间的距离。所提方法仅利用一组旋转前后图像提供的多组特征点对就计算出了多个相机光心与旋转中心的距离值,对这些距离值求平均后可有效地抑制计算随机误差,结果更为可靠。结合相机标定外参数计算的方位角,所提方法能用于指导相机光心与转台转轴的对准。此外,利用计算机模拟和实验验证了所提方法的有效性。

2 原理

2.1 旋转视觉测量系统的构成

本文建立的旋转视觉测量系统及其标定组件主要包含旋转平台、二维平移台、相机和棋盘格标靶等,如图 1 所示。将相机放置在二维平移台上,便于对相机位置进行调整,并将平移台固定在旋转平台上。旋转平台带动相机旋转,相机可在每个位置处采集用于系统标定的棋盘格标靶图。图 1 中 O_r 为转台的旋转轴, O_c 为相机光心(相机坐标系的原点), $O_c-X_c Y_c Z_c$ 为相机

坐标系, $O_w-X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系。为不失一般性,设定 O_c 不在 O_r 上。

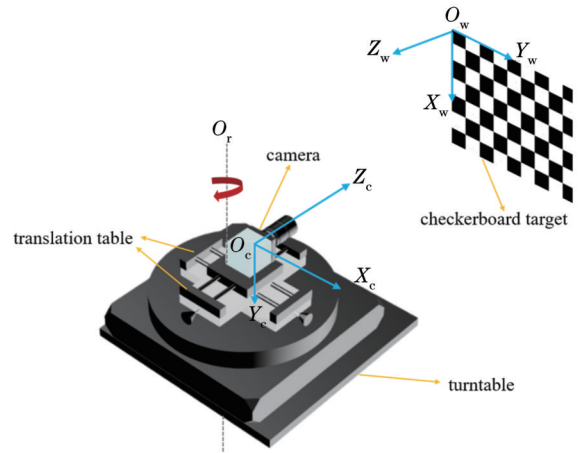


图 1 旋转视觉测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotating vision measurement system

2.2 相机光心与旋转轴距离的数学模型

本文建立的旋转视觉测量系统的成像模型如图 2 (a) 所示(Y 轴垂直纸面向内)。其中, $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 为旋转前相机的坐标系, $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 为旋转后相机的坐标系, O_r-XYZ 和 $O_r-X'Y'Z'$ 分别为转台旋转前后的坐标系,作为参照坐标系。假定空间一点 P 在相机旋转前后以物理单位表示的图像坐标系中的坐标(简称物理图像坐标)分别为 $P_1(X_1, Y_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2)$, 将其在摄像机坐标系 $O_{c1}-X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 和 $O_{c2}-X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 中的坐标分别记为 (x_c, y_c, z_c) 和 (x'_c, y'_c, z'_c) , 将其在参照坐标系 O_r-XYZ 和 $O_r-X'Y'Z'$ 中的坐标分别记为 (x, y, z) 和 (x', y', z') 。图 2(a) 中 α 是 $O_r P$ 与 X 轴的夹角, β 是 $O_r P$ 与 Z' 轴的夹角, θ 是转台旋转角度, f 是相机的焦距, l 是相机光心与旋转轴之间的距离。

在系统实际安装过程中,可能会存在旋转轴 Y 轴与相机坐标系 Y_c 轴不平行的情况,如图 2(b) 所示。当旋转轴 Y 轴与 Y_c 轴存在夹角 γ 时,物点 P 成像在相机坐标系下的坐标 (x_c, y_c, z_c) 与参照坐标系 O_r-XYZ 中的坐标 (x, y, z) 之间的转换关系为

$$\begin{cases} x_c = x \cos \gamma - y \sin \gamma \\ y_c = x \sin \gamma + y \cos \gamma \end{cases} \quad (1)$$

当夹角 $\gamma \rightarrow 0$ 时, $\sin \gamma \rightarrow 0$, $\cos \gamma \rightarrow 1$, 此时式(1)可以简化为 $\begin{cases} x_c = x \\ y_c = y \end{cases}$ 。因此,在实际应用中,应尽量保证旋转轴与相机坐标系 Y_c 轴平行,以简化计算流程。

结合图 2(a), 利用相似三角形原理可以得到的表达式^[16]为

$$\begin{cases} \frac{X_1}{f} = \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{X_2}{f} = \frac{x'_c}{z'_c} \end{cases}, \quad (2)$$

其中

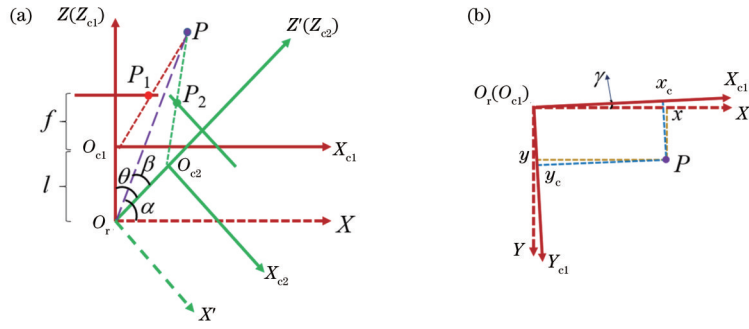


图 2 成像模型。(a)坐标系在 XOZ 平面的投影；(b)坐标系在 XOY 平面的投影

Fig. 2 Imaging model. (a) Projection of coordinate system on XOZ plane; (b) projection of coordinate system on XOY plane

$$\begin{cases} x_c = x \\ z_c = z - l \\ x'_c = x' \\ z'_c = z' - l \end{cases} \quad (3)$$

另外，由图 2 (a) 可知 $\begin{cases} x = R \cos \alpha \\ z = R \sin \alpha \end{cases}$ 和 $\begin{cases} x' = -R \sin \beta \\ z' = R \cos \beta \end{cases}$ ，其中 R 为 O_r 点与 P 点之间的距离。根据 $\beta = \theta + \alpha - 90^\circ$ ，整理可得

$$\begin{cases} x' = -R \sin(\alpha + \theta - 90^\circ) = x \cos \theta - z \sin \theta \\ z' = R \cos(\alpha + \theta - 90^\circ) = x \sin \theta + z \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中，整理得

$$\begin{cases} x'_c = x_c \cos \theta - (z_c + l) \sin \theta \\ z'_c = z' - l = x_c \sin \theta + (z_c + l) \cos \theta - l \end{cases} \quad (5)$$

由式(1)和式(5)可知

$$\begin{cases} x'_c = \frac{X_1 z_c}{f} \cos \theta - (z_c + l) \sin \theta = \frac{X_2 z'_c}{f} \\ z'_c = \frac{X_1 z_c}{f} \sin \theta + (z_c + l) \cos \theta - l \end{cases}, \quad (6)$$

化简可得

$$z_c = \frac{X_2 f l (\cos \theta - 1) + f^2 l \sin \theta}{f \cos \theta (X_1 - X_2) - \sin \theta (X_1 X_2 + f^2)} \quad (7)$$

因此，空间点 P 在参照坐标系 O_r -XYZ 中的坐标可以表示为

$$\begin{cases} x = \frac{z_c X_1}{f} \\ y = \frac{z_c Y_1}{f} \\ z = z_c + l = \frac{l (f X_1 \cos \theta - f X_2 - X_1 X_2 \sin \theta)}{f \cos \theta (X_1 - X_2) - \sin \theta (X_1 X_2 + f^2)} \end{cases} \quad (8)$$

假设空间中存在两点 N_1 和 N_2 ： N_1 点在参照坐标系 O_r -XYZ 中的坐标为 (x_1, y_1, z_1) ，相机旋转前后， N_1 点在相机图像坐标系中的物理图像坐标分别为 (X_{11}, Y_{11}) 和 (X_{12}, Y_{12}) ； N_2 点在参照坐标系 O_r -XYZ 中的坐标为 (x_2, y_2, z_2) ，相机旋转前后， N_2 点在相机图像坐标系中的物理图像坐标分别为 (X_{21}, Y_{21}) 和 (X_{22}, Y_{22}) 。 N_1 和 N_2 两点的空间距离为 D ，则

$$D^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \quad (9)$$

将式(8)代入到式(9)中可以得到

$$\begin{aligned} D^2 &= (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 = \\ &= \left[\frac{X_{11}(z_1 - l)}{f} - \frac{X_{21}(z_2 - l)}{f} \right]^2 + \left[\frac{Y_{11}(z_1 - l)}{f} - \frac{Y_{21}(z_2 - l)}{f} \right]^2 + \\ &= \left[\frac{X_{12} f l (\cos \theta - 1) + f^2 l \sin \theta}{f \cos \theta (X_{11} - X_{12}) - \sin \theta (X_{11} X_{12} + f^2)} - \frac{X_{22} f l (\cos \theta - 1) + f^2 l \sin \theta}{f \cos \theta (X_{21} - X_{22}) - \sin \theta (X_{21} X_{22} + f^2)} \right]^2 = \\ &= l^2 \left\{ \left[\frac{X_{11}}{f} \frac{X_{12} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{11} - X_{12}) - \sin \theta (X_{11} X_{12} + f^2)} - \frac{X_{21}}{f} \frac{X_{22} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{21} - X_{22}) - \sin \theta (X_{21} X_{22} + f^2)} \right]^2 + \right. \\ &+ \left[\frac{Y_{11}}{f} \frac{X_{12} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{11} - X_{12}) - \sin \theta (X_{11} X_{12} + f^2)} - \frac{Y_{21}}{f} \frac{X_{22} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{21} - X_{22}) - \sin \theta (X_{21} X_{22} + f^2)} \right]^2 + \\ &\left. \left[\frac{X_{12} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{11} - X_{12}) - \sin \theta (X_{11} X_{12} + f^2)} - \frac{X_{22} f (\cos \theta - 1) + f^2 \sin \theta}{f \cos \theta (X_{21} - X_{22}) - \sin \theta (X_{21} X_{22} + f^2)} \right]^2 \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

令

$$M = \left[\frac{X_{11}}{f} \frac{X_{12}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{11} - X_{12}) - \sin\theta(X_{11}X_{12} + f^2)} - \frac{X_{21}}{f} \frac{X_{22}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{21} - X_{22}) - \sin\theta(X_{21}X_{22} + f^2)} \right]^2 + \left[\frac{Y_{11}}{f} \frac{X_{12}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{11} - X_{12}) - \sin\theta(X_{11}X_{12} + f^2)} - \frac{Y_{21}}{f} \frac{X_{22}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{21} - X_{22}) - \sin\theta(X_{21}X_{22} + f^2)} \right]^2 + \left[\frac{X_{12}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{11} - X_{12}) - \sin\theta(X_{11}X_{12} + f^2)} - \frac{X_{22}f(\cos\theta - 1) + f^2 \sin\theta}{f \cos\theta(X_{21} - X_{22}) - \sin\theta(X_{21}X_{22} + f^2)} \right]^2, \quad (11)$$

则相机光心与旋转中心之间的距离 l 可以表示为

$$l = \sqrt{\frac{D^2}{M}}. \quad (12)$$

理论上,若已知两空间点的物理图像坐标、空间距离、相机焦距和相机旋转角度,就可以求解出相机光心与旋转中心之间的距离 l 。结合相机标定外参数计算的方位角 $\omega^{[20]}$,就可以求出系统中调整相机位置的移动量,进而指导相机光心与旋转中心的对位。相机位置的移动量为

$$\begin{cases} \Delta Y_w = \text{abs}(l \cdot \sin \omega) \\ \Delta Z_w = \text{abs}(l \cdot \cos \omega) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: ΔY_w 和 ΔZ_w 分别为相机在世界坐标系 Y_w 和 Z_w 方向上的移动量; $\text{abs}(\cdot)$ 为取绝对值函数。

式(10)中 X_{ij} 、 Y_{ij} ($i=1, 2, j=1, 2$) 为空间点在相机图像坐标系下的物理图像坐标,而从采集图像中直接获取的是图像点的像素坐标。相机图像坐标系的物理图像坐标与像素坐标之间存在的关系为

$$\begin{cases} u = \frac{X}{d_x} + u_0 \\ v = \frac{Y}{d_y} + v_0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: (u_0, v_0) 为相机主点坐标; (u, v) 为图像上某一点的像素坐标; (X, Y) 为该点的物理图像坐标; d_x 和 d_y 分别为每个像素在横轴方向和纵轴方向的物理尺寸,单位为 mm。由此可见,已知空间点在相机图像坐标系中的像素坐标为 (u, v) ,利用相机的主点和像素物理尺寸就可以求出其在图像坐标系下对应的物理图像坐标 (X, Y) ,即

$$\begin{cases} X = (u - u_0)d_x \\ Y = (v - v_0)d_y \end{cases}. \quad (15)$$

3 计算机模拟

为了验证所提方法的有效性,进行了计算机模拟。模拟的相机主点 (u_0, v_0) 为 $(600 \text{ pixel}, 500 \text{ pixel})$,归一化焦距设为 $f_x = f_y = 1700 \text{ pixel}$,模拟棋盘格方格尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。在世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中,将转台中心 O_c 的坐标设为 $(-80 \text{ mm}, -50 \text{ mm}, 900 \text{ mm})$,将相机光心与转轴中心的距离设为 $r = 50 \text{ mm}$,初始位置相机光轴与棋盘格标靶所在平面垂直,将初始位置相机光心 O_c 的坐标设为 $(-80 \text{ mm}, -50 \text{ mm}, 850 \text{ mm})$ 。模拟了相机绕转台旋转轴转动三次的情况,旋转角度

θ 分别设为 $0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ$,并用每个相机视角拍摄图像中选取的两组特征点来计算距离值。相机光心分布在以旋转中心为圆心的圆弧上,由初始位置相机光心坐标和旋转角度可计算出不同角度旋转后的相机光心坐标 $(O_{c,x}, O_{c,y}, O_{c,z})$,如表 1 所示。相机光心坐标的表达式为

$$\begin{cases} O_{c,x} = -80 \\ O_{c,y} = -50 + r \sin \theta \\ O_{c,z} = 850 + r \cos \theta \end{cases}. \quad (16)$$

表 1 模拟相机光心坐标

Table 1 Coordinates of optical center of simulated camera

Rotation angle / ($^\circ$)	Coordinates of optical center / mm
0	$(-80, -50, 850)$
6	$(-80, -44.7736, 850.2739)$
12	$(-80, -39.6044, 851.0926)$
18	$(-80, -34.5492, 852.4472)$

根据模拟设置的参数,在世界坐标系的 $Y_w O_w Z_w$ 平面中模拟相机光心与旋转中心的位置关系,如图 3 所示。在图 3 中,五角星表示旋转中心,圆点表示相机运动的圆轨迹,圆圈表示模拟相机的光心位置。

首先,在线性相机模型下,用模拟相机对模拟棋盘格进行拍摄。4 个旋转角度下采集的棋盘格角点图像如图 4 所示(4 组相机视角显示在统一的参考系中),从右至左每个方框对应的旋转角度分别为 $0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ$ (相机绕转轴顺时针转动),其中“+”表示的区域对应 0° 位置。对应相机视场下的棋盘格角点网格图如图 5 所示。网格从右至左分别对应 0° 位置与旋转一次后相机视场内的棋盘格。

提取特征点对的像素坐标,计算每对特征点的空间距离,利用式(12)求解模拟相机光心与旋转中心的距离 l 。在不同的旋转角度下,选取的特征点对的像素坐标、对应的空间距离和相机光心与旋转中心距离的计算结果如表 2 所示。可以看出,不同角度下不同特征点对计算的距离 l 均与模拟设置的距离 50 mm 保持一致。

为了使模拟结果更接近真实的实验情况,对模拟相机添加了镜头畸变参数的影响,畸变系数设为 $k_c = [-0.04608 \ 0.26353 \ -0.00140 \ 0.00187 \ 0.00000]$ 。利用模拟相机对模拟棋盘格进行拍摄,并选取与线性模型下相同的特征点对计算模拟相机光心与旋转中心

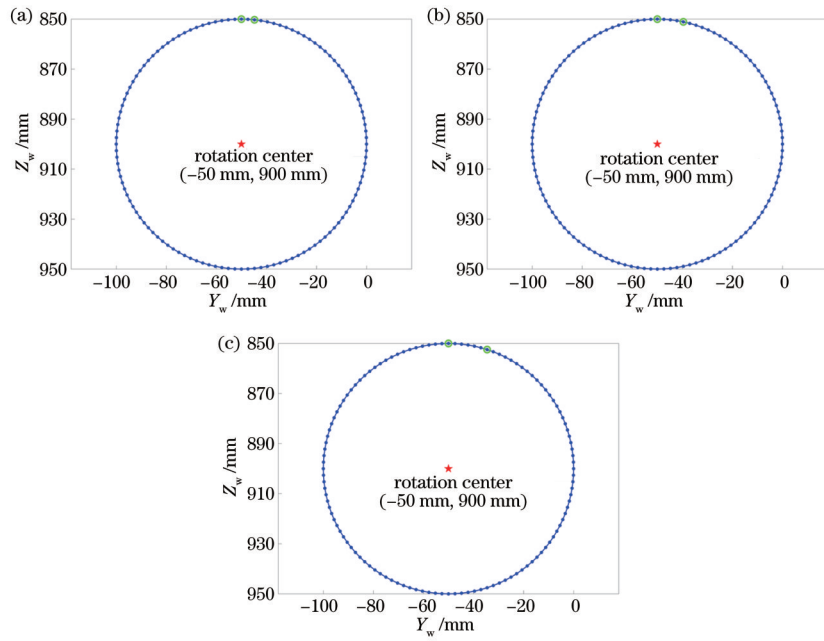


图 3 不同旋转角度下模拟相机光心与转台中心的位置关系。(a) 6°; (b) 12°; (c) 18°

Fig. 3 Position relationship between optical center of simulated camera and rotation center under different rotation angles. (a) 6°; (b) 12°; (c) 18°

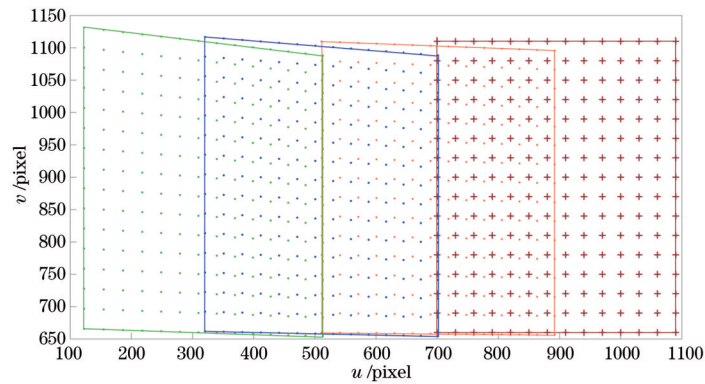


图 4 不同旋转角度下模拟相机采集的棋盘格图像

Fig. 4 Checkerboard images collected by simulated camera under different rotation angles

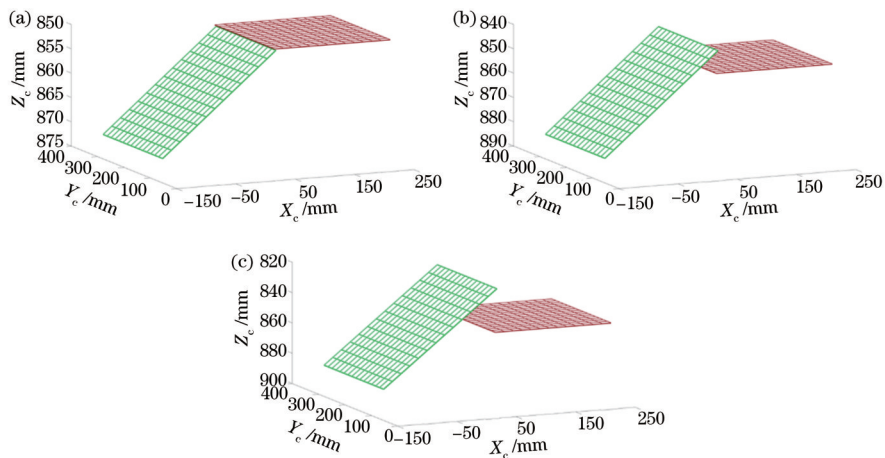


图 5 不同旋转角度下, 模拟相机视场内的棋盘格。(a) 6°; (b) 12°; (c) 18°

Fig. 5 Checkerboards in field of view of simulated camera under different rotation angles. (a) 6°; (b) 12°; (c) 18°

表 2 线性模型下特征点对的像素坐标、对应的空间距离和相机光心与旋转中心的距离

Table 2 Pixel coordinates of feature point pairs, corresponding spatial distance and distance between optical center of camera and rotation center under linear model

Rotation angle / (°)	Coordinates of feature pairs before rotation /pixel	Coordinates of feature pairs after rotation /pixel	Spatial distance /mm	Distance l /mm
6	(1000, 810), (730, 810)	(805.79, 804.28), (541.27, 809.32)	135	50
	(1030, 720), (790, 720)	(834.65, 715.55), (600.80, 718.71)	120	50
12	(1000, 810), (730, 810)	(616.59, 802.21), (351.12, 812.26)	135	50
	(1030, 720), (790, 720)	(645.04, 713.71), (411.63, 719.98)	120	50
18	(1000, 810), (730, 810)	(427.79, 803.66), (154.86, 818.99)	135	50
	(1030, 720), (790, 720)	(456.50, 714.35), (217.86, 723.87)	120	50

的距离。在不同的旋转角度下,选取的特征点对的像素坐标、对应的空间距离和相机光心与旋转中心距离的计算结果如表 3 所示(记三个旋转角度下的情况为

Case 1~Case 6)。线性模型与畸变模型下模拟相机光心与旋转轴距离的变化曲线如图 6 所示。

表 3 畸变模型下特征点对的像素坐标、对应的空间距离和相机光心与旋转中心的距离

Table 3 Pixel coordinates of feature point pairs, corresponding spatial distance and distance between optical center of camera and rotation center under distortion model

Rotation angle / (°)	Coordinates of feature pairs before rotation /pixel	Coordinates of feature pairs after rotation / pixel	Spatial distance / mm	Distance l / mm
6	(999.62, 809.28), (729.91, 809.40)	(805.60, 803.68), (541.49, 808.65)	135	49.33
	(1029.64, 719.50), (789.89, 719.70)	(834.50, 715.22), (600.86, 718.44)	120	49.02
12	(999.62, 809.28), (729.91, 809.40)	(616.66, 801.63), (351.99, 811.25)	135	48.94
	(1029.64, 719.50), (789.89, 719.70)	(645.05, 713.47), (412.07, 719.49)	120	49.46
18	(999.62, 809.28), (729.91, 809.40)	(428.33, 802.84), (156.72, 817.65)	135	48.32
	(1029.64, 719.50), (789.89, 719.70)	(456.80, 713.96), (219.27, 723.01)	120	49.12

从表 3 中的数据 and 图 6 中两曲线的变化趋势可以看出,由于镜头的畸变影响了特征点的成像位置,故畸变模型中不同角度下不同特征点对计算的距离与模拟设置的距离值均有差异。因此,在实际的实验操作中,先要对获取的标靶图像进行去畸变处理,确保计算过程在线性模型下进行,进而保证相机光心与旋转中心距离计算的准确性。

随后,分别模拟了图像点提取误差、旋转角度误差和相机焦距标定误差对相机光心与旋转中心距离的计算结果的影响。

1) 图像点提取误差

对三个旋转角度下提取的每个特征点坐标分别添加 10 组数值为 0~1 的随机噪声,并在线性模型下计算相机光心与旋转中心的距离。每个旋转角度下 10 组数据计算的距离平均值和标准偏差如表 4 所示。可以看出,当提取图像点的像素误差在 0~1 pixel 之间时,其对计算结果的影响较小,三个旋转角度下计算的距离值基本与设置值(50 mm)吻合。

表 4 不同旋转角度下的平均值和标准偏差

Table 4 Average and standard deviation under different rotation angles unit: mm

Index	angles		
	6°	12°	18°
Average	49.84	50.09	50.12
Standard deviation	0.64	0.44	0.41

2) 旋转角度误差

由于实验采用的旋转平台的复位精度小于 0.005°,故在模拟旋转角度时选用±0.005°来计算其对距离计算带来的误差,不同旋转角度下计算的结果如表 5 所示。可以看出,旋转角度误差带来的计算误差

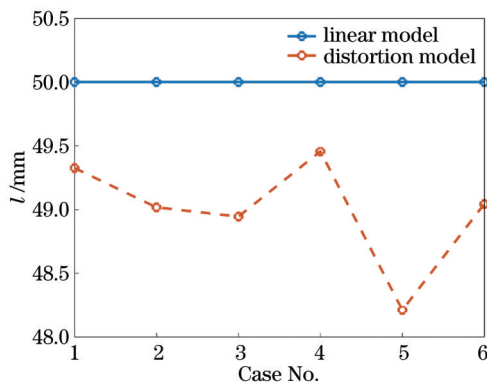


图 6 线性模型与畸变模型下模拟相机光心与旋转中心距离的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of distance between optical center of simulated camera and rotation center under linear model and distortion model

较小,计算结果基本与设置值(50 mm)吻合。

表 5 模拟旋转角度误差对相机光心与旋转中心距离计算结果的影响

Table 5 Influence of simulated rotation angle error on calculation result of distance between optical center of camera and rotation center unit: mm

Simulated rotation angle error / (°)	6°	12°	18°
0.005	49.19	49.60	49.74
-0.005	50.76	50.39	50.26

3) 相机焦距标定误差

设置等效焦距为 (1700 ± 5) pixel,并以 0.5 pixel 为间隔,分别计算其对应的相机光心与转轴中心的距离值,得到的三个旋转角度下的距离变化曲线如图 7 所示。可以看出,当焦距标定误差较大时,对距离计算结果的影响也会相应增大,如当旋转角度为 18° 、焦距为 1695 pixel 时,引起的计算误差约为 5.1%。

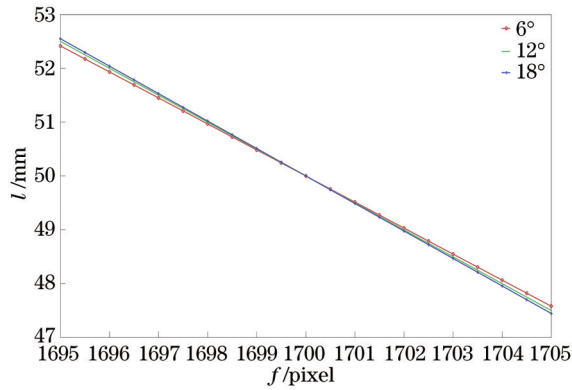


图 7 距离变化曲线

Fig. 7 Distance variation curve

4 实验与结果

为了验证所提标定方法的有效性,设计了图 8 所示的实验系统。系统由一台 CCD 相机(型号为 Bammer camera TXG50,分辨率为 $1224 \text{ pixel} \times 1025 \text{ pixel}$)、一个焦距为 12 mm 的成像镜头(型号为 M1224-MPW2, F 数为 2.4)、两个平移台(型号为 Zolix TSA50-C 的电动平移平台,重复定位精度小于 $5 \mu\text{m}$;型号为 PI-M406 的电动移动平台,重复定位精度为 $0.078 \mu\text{m}$)和一个旋转平台(型号为 Zolix RAP200 的电动旋转平台,复位精度小于 0.005°)构成。在校准过程中,利用液晶显示屏(LCD,型号为飞利浦 190V,分辨率为 $1440 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$,点距为 0.2835 mm/pixel)

显示预先设计的棋盘格图案(方格尺寸为 $14.175 \text{ mm} \times 14.175 \text{ mm}$),且实验过程中显示屏保持静止不动。

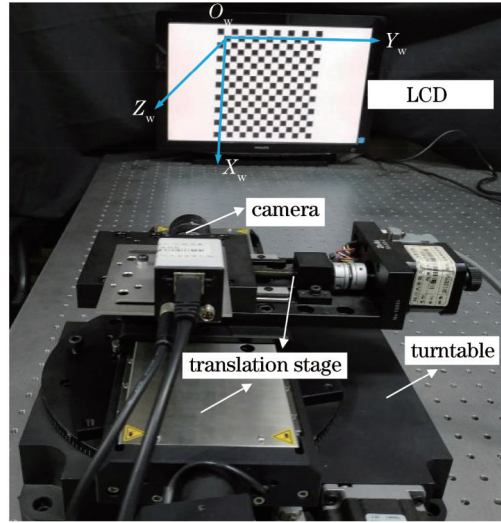


图 8 实验系统

Fig. 8 Experimental system

在实验前,首先调整初始位置的相机光轴与屏幕的 Z_w 轴平行。预先动态地记录棋盘格标靶的特征点,并计算 Z_w 轴与 Z_c 轴的夹角来调整屏幕的姿态。当两轴之间的夹角非常接近零(理论值)时,相机光轴平行于屏幕的 Z_w 轴。在调整系统后,首先拍摄一幅标靶图像,作为 0° 参考图像,再让相机围绕转台中心旋转并采集棋盘格图像,为了与文献[20]中所提方法的结果进行对比,实验中相机共旋转 10 次,旋转间隔为 1.5° ,采集的标靶图像如图 9 所示。利用张正友的平面标定法^[21]计算相机的内外参数,标定的相机内参数与畸变参数如表 6 所示,其中 k_1, k_2 为径向畸变系数, p_1, p_2 为切向畸变系数,外参数可用于后续计算相机光心相对于旋转中心的方位角 ω 。

提取棋盘格图像的角点作为特征点,利用式(15)将特征点在图像坐标系下的像素坐标转化为对应的物理尺寸坐标,再利用式(12)计算相机光心与旋转中心的距离 l 。为了保证距离的计算精度,先利用相机标定结果对采集的标靶图像进行去畸变处理,以提取准确的特征点坐标。选取一次旋转前后的标靶图像(如 $0^\circ, 12^\circ$ 对应的图像)提取 10 组特征点对来计算相机光心与旋转中心的距离,提取特征点对的位置如图 10 所示,图中用不同的符号标识不同的特征点对。

利用 10 组特征点对计算得到的相机光心与旋转中心的距离如表 7 所示。第一列为 0° 标靶图像中提取的特征点对的像素坐标,第二列为 12° 标靶图像中提取

表 6 相机标定结果

Table 6 Camera calibration results

Focal length /pixel	Principal point /pixel	Distortion coefficient	Pixel error /pixel
$f_x=1763.25, f_y=1764.13$	$u_0=629.74, v_0=489.04$	$k_1=-0.0476, k_2=0.2805, p_1=-0.0015, p_2=0.0016$	0.0461, 0.0462

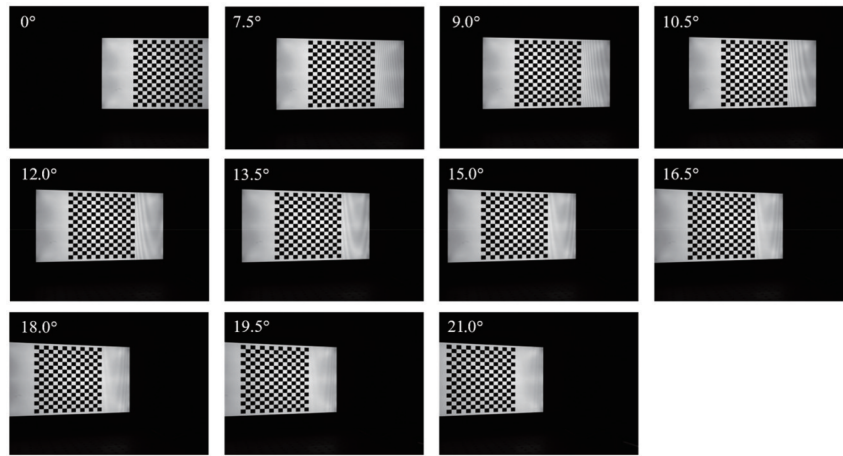


图 9 采集的标靶图像

Fig. 9 Collected target images

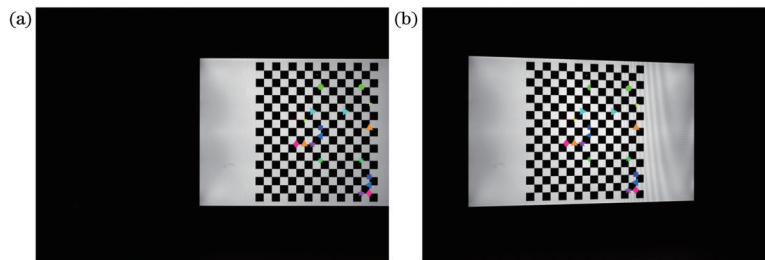


图 10 提取特征点的位置。(a) 0°初始位置;(b)旋转角度为 12°

Fig. 10 Positions of extracted feature points. (a) 0° initial position; (b) rotation angle of 12°

表 7 相机光心与旋转中心的距离

Table 7 Distance between optical center of camera and rotation center

Coordinates of feature point pairs before rotation /pixel	Coordinates of feature point pairs after rotation /pixel	Spatial distance / mm	Distance l /mm
(1157.1, 443.1), (903.4, 442.5)	(741.1, 443.4), (499.9, 441.4)	127.58	81.79
(1157.0, 471.4), (931.4, 527.4)	(741.0, 470.4), (527.3, 524.9)	116.89	81.72
(1157.4, 386.5), (931.6, 442.5)	(741.2, 389.3), (527.4, 441.5)	116.89	81.81
(1129.4, 330.0), (988.4, 329.5)	(715.3, 334.5), (582.2, 331.6)	70.88	82.34
(1128.4, 584.2), (987.5, 584.0)	(714.6, 578.7), (581.6, 579.9)	70.88	81.99
(1072.6, 414.6), (959.9, 414.3)	(662.4, 415.4), (554.8, 414.1)	56.70	81.83
(1156.4, 668.9), (987.8, 499.2)	(740.5, 659.5), (581.7, 497.2)	120.28	82.53
(1156.5, 640.7), (987.8, 470.9)	(740.6, 632.4), (581.8, 469.6)	120.28	82.32
(1128.0, 697.1), (959.5, 527.4)	(714.5, 687.1), (554.5, 524.8)	120.28	81.77
(1156.3, 697.3), (903.2, 527.3)	(740.5, 686.5), (499.7, 524.9)	153.33	82.06

的对应特征点对的像素坐标,第三列为特征点对对应的空间距离,第四列为计算得到的相机光心与旋转中心的距离值。

同时,使用文献[20]中提出的基于坐标变换的轴

对准方法,利用实验拍摄的 11 幅标靶图像计算出 10 组相机光心与旋转中心的距离 $l_i(i=1,2,\dots,10)$,其数值如表 8 所示,并将其与所提方法计算的距离值绘制成曲线,如图 11 所示。

表 8 文献[20]中方法计算的相机光心与旋转中心的距离

Table 8 Distance between optical center of camera and rotation center calculated by method in Ref. [20]

Rotation angle / (°)	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
l_i /mm	82.14	82.01	81.79	81.98	82.39	82.27	82.02	82.09	82.45	82.42

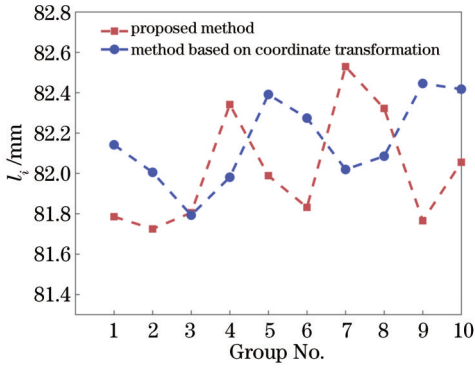


图 11 两种方法计算得到的相机光心与旋转中心距离的曲线
Fig. 11 Curves of distance between optical center of camera and rotation center calculated by two methods

利用本文所提方法计算得到的 10 组距离的平均值为 82.02 mm, 基于坐标变换方法计算得到的 10 组距离的平均值为 82.16 mm。对比表 7、表 8 和图 11 可

表 9 方位角 ω 计算结果

Table 9 Calculated results of azimuth ω

unit: ($^{\circ}$)

Rotation angle	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
ω	18.91	18.79	18.86	18.72	19.00	18.99	18.78	18.72	19.11	19.00

根据式 (13), 分别利用文献 [20] 所述方法与本文所提方法计算相机在 Y_w 和 Z_w 方向上的移动量 ΔY_w 和 ΔZ_w , 如表 10 所示。可以发现, 两种方法计算的移动量数值接近, 表明本文所提的计算相机光心与旋转中心距离的方法是有效的。

在利用本文所提方法计算移动量时, 通过平移装

表 10 Y_w 和 Z_w 方向上的移动量 ΔY_w 和 ΔZ_w

Table 10 Translation values ΔY_w and ΔZ_w in Y_w and Z_w

Method	directions		unit: mm
	ΔY_w	ΔZ_w	
Proposed method	26.56	77.60	
Method based on coordinate transformation	26.60	77.73	

以发现, 两种方法计算得到的相机光心与旋转中心的距离在数值上大致在同一范围内变化。值得注意的是, 文献 [20] 中所提方法利用一组旋转前后的标靶图像仅能得到一个距离值, 而本文所提方法使用一组标靶图像可以获得多组距离值, 故在使用相同数量的标靶图像进行计算时, 本文所提方法计算得到的距离值更为可靠。

为了实现系统中相机光心与旋转中心的对位, 根据文献 [20] 所提的计算方位角的原理, 利用相机标定获得的旋转矩阵和平移向量获得旋转前后相机坐标系之间的平移向量, 并通过解方程组的形式求解初始位置相机光心相对于旋转中心的方位角 ω 。理论上, 利用一组旋转前后标靶图像计算得到的外参数可以获得一个方位角。为了抑制随机误差, 对每个旋转角度计算了方位角以求取平均值, 方位角的计算结果如表 9 所示, 其平均值为 18.89° , 变化的标准偏差为 0.13° 。

置将相机移动相应的距离, 实现测量系统中相机光心与旋转中心的对位。在对准后, 令相机随转台以 1° 为间隔旋转 12 次, 且每次旋转采集一帧棋盘格图像, 共拍摄 13 帧标靶图像。计算每个位置对应的旋转矩阵和平移向量, 以求解每个位置处相机光心的坐标。图 12(a) 展示了世界坐标系中相机光心在 X_w 、 Y_w 和 Z_w 三个方向上的坐标值曲线, 图 12(b) 展示了相机光心的三维 (3D) 空间分布, 其中五角星表示这些点的质心。表 11 列出了 X_w 、 Y_w 和 Z_w 三个方向上相机光心与质心之间的标准偏差。由图 12 和表 11 可以看出, 在三个方向上相机光心与质心的标准偏差均不大于 0.16 mm。实验结果表明, 本文所提方法的安装对位精度优于文献 [20] 中的基于坐标变换的轴对准方法。

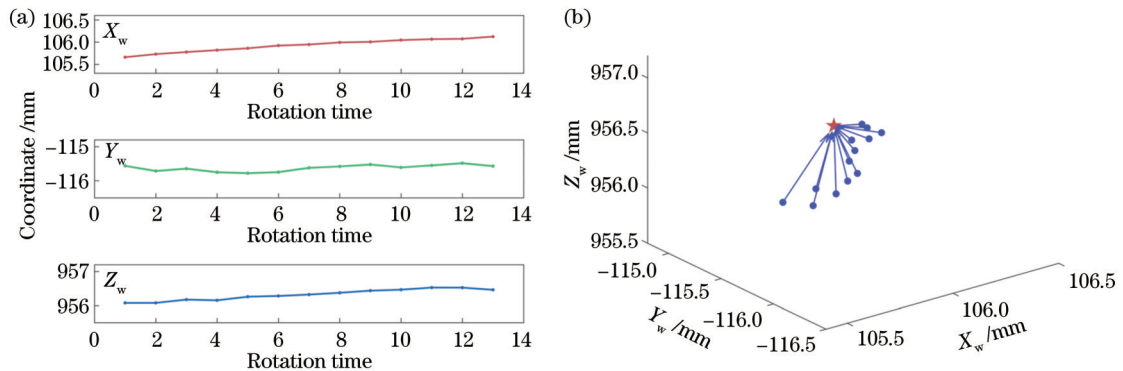


图 12 相机光心的坐标值和三维分布图。(a) X_w 、 Y_w 和 Z_w 三个方向上相机光心的坐标值; (b) 相机光心的三维分布图
Fig. 12 Coordinate values and 3D distribution map of optical center of camera. (a) Coordinate values of optical center of camera in three directions; (b) 3D distribution map of optical center of camera

表 11 相机光心与质心之间的标准偏差

Table 11 Standard deviation between optical center of camera and mass center

Direction	X_w	Y_w	Z_w
Standard deviation /mm	0.15	0.09	0.16

5 结 论

提出了一种基于双目视觉原理的旋转视觉测量系统相机光心与旋转轴距离的标定方法。通过建立相机光心与旋转中心距离的数学模型,推导出相机光心-转轴偏移量与特征点空间距离的几何关系。理论上,利用转台带动已知内参数的相机旋转一次,拍摄旋转前后两幅标靶图片,即可利用特征点对的物理图像坐标、空间距离、旋转角和相机内参数,计算出相机光心与旋转轴的距离。计算机仿真和实验均表明,所提方法能够准确地计算旋转视觉测量系统中相机光心与旋转轴的距离。结合相机标定外参数获得的方位角,可以计算调整相机光心到旋转中心的移动量,实现相机光心与旋转轴的对准。所提方法的安装对位精度可达到 0.16 mm。所提方法仅利用一组旋转前后图像提供的多组特征点对,就能计算多个相机光心与旋转中心的距离值,且通过求平均值的方式可有效地抑制随机误差的影响。因此,在使用相同数量的标靶图片进行距离计算时,所提方法的计算结果更为可靠。

参 考 文 献

- [1] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
Zhang J Q, Pan L, Wang S G. Photogrammetry[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [2] 王之卓. 摄影测量原理: 续编[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
Wang Z Z. Principle of photogrammetry: continued[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007.
- [3] Ahmadi F F, Layegh N F. Integration of close range photogrammetry and expert system capabilities in order to design and implement optical image based measurement systems for intelligent diagnosing disease[J]. Measurement, 2014, 51: 9-17.
- [4] Ergün B. An expert measurement system for photogrammetric industrial application[J]. Measurement, 2006, 39(5): 415-419.
- [5] 陈继华, 郭文松. 基于摄影经纬仪的全景图像拼接方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051001.
Chen J H, Guo W S. Method of panoramic image stitching for theodolite-camera system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051001.
- [6] Zhang Z X, Zheng S Y, Zhan Z Q. Digital terrestrial photogrammetry with photo total station[EB/OL]. [2021-04-08]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=18CCD47FA9384DB0372A7A74D6F3E4B2?doi=10.1.1.58.7457&rep=rep1&type=pdf>.

- [7] Zhang X J, Zhao P C, Hu Q W, et al. A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159: 198-219.
- [8] 杨谢柳, 尹晨宇, 方素平, 等. 基于全站仪的大型三维形貌摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101505.
Yang X L, Yin C Y, Fang S P, et al. Three-dimensional measurement of large-scale objects using photogrammetry based on total station[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101505.
- [9] 石雪冬, 陈天恩, 陆宇红, 等. 车载全景影像的严密拼接方法研究与实验[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(9): 164-167.
Shi X D, Chen T E, Lu Y H, et al. Tight stitching method research and test of vehicle panoramic images[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(9): 164-167.
- [10] 苑云, 朱肇昆, 张小虎, 等. 准同心广义经纬相机的成像模型及高精度标定[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715003.
Yuan Y, Zhu Z K, Zhang X H, et al. Imaging model and high-precision calibration of quasi-concentric general theodolite-camera[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715003.
- [11] Zhang X H, Zhu Z K, Yuan Y, et al. A universal and flexible theodolite-camera system for making accurate measurements over large volumes[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1611-1620.
- [12] 孙芳方, 乔彦峰, 陈宁. 光学测量系统的现状与发展[EB/OL]. (2016-01-01) [2021-04-08]. <https://max.book118.com/html/2017/1219/145021889.shtm>.
Sun F F, Qiao Y F, Chen N. Current status and development of optical measure system[EB/OL]. (2016-01-01) [2021-04-08]. <https://max.book118.com/html/2017/1219/145021889.shtm>.
- [13] 周满平, 谭月胜. 基于单 CCD 相机和经纬仪的几何测量方法研究[J]. 测绘工程, 2013, 22(5): 34-37.
Zhou M P, Tan Y S. On the geometric methods of measurements based on single-CCD camera and theodolite[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(5): 34-37.
- [14] 李建荣, 王志乾, 王春霞, 等. 主点与旋转中心距离的标定方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 61-64.
Li J R, Wang Z Q, Wang C X, et al. Demarcate method for the distance between optical lens note and rotating center[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1): 61-64.
- [15] Kukko A. A new method for perspective centre alignment for spherical panoramic imaging[J]. Photogrammetric Journal of Finland, 2004, 19(1): 37-46.
- [16] 顾国华, 王佳节, 陈钱, 等. 二维旋转平台下的相机参数标定[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1890-1899.
Gu G H, Wang J J, Chen Q, et al. Camera parameter calibration based on two-dimensional rotating platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1890-1899.

- [17] 刘胜道, 邢成聪, 周国华. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统的测量精度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1415007.
Liu S D, Xing C C, Zhou G H. Measuring precision analysis of binocular vision system in remote three-dimensional coordinate measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1415007.
- [18] 刘诗婷, 金伟其, 李力, 等. 基于双目变焦超分辨率成像的测距方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411004.
Liu S T, Jin W Q, Li L, et al. Ranging method based on binocular zoom super-resolution imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411004.
- [19] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zhang G J. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [20] Hou Y L, Su X Y, Chen W J. Axis alignment method in the rotating photogrammetric system[J]. Optical Engineering, 2021, 60(6): 064105.
- [21] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.