

光学测量系统中相机主点与转台轴线的对中方法

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 建立相机镜头主点随旋转装置转动的运动轨迹模型, 提出基于 2D 平面摄像机标定原理的相机镜头主点与转台中心之间距离的测量方法。利用标定得到的相机与设定的世界坐标系之间的平移矩阵来确定相机镜头主点与转台中心的位置关系, 用于指导相机的安装。实验验证所提模型和标定方法的可行性。相机镜头的主点过转轴中心时, 转台带动相机转动引起的平移矩阵的变化量的标准差为 0.0826 mm, 这表明所提方法能够用于指导旋转测量系统的安装。

关键词 测量; 旋转测量系统; 相机坐标系; 世界坐标系; 平面标定

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1104002

Centering of Camera Principal Point and Turntable Axis in Optical Measurement Systems

Hou Yanli, Su Xianyu, Chen Wenjing*

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

Abstract We establish a motion trajectory model for the principal point of a camera when it rotates with the rotating device. We also propose a calibration method based on the two-dimensional planar calibration of the camera to determine the distance between the camera's principal point and the turntable axis; the resulting translation matrix allows the calculation of the position relation between the principal point and the rotating center, providing a guidance for the camera installation. Further, the proposed motion trajectory model and calibration method are experimentally validated. The principal point of camera lens crosses the center of the rotation axis, and the standard deviation of the measured changes in translation matrix is 0.0826 mm. The results of this study can be used to support the installation of rotating measurement systems.

Key words measurement; rotating measurement system; camera coordinate system; world coordinate system; planar calibration

OCIS codes 120.4820; 150.0155; 150.5670

1 引言

近年来, 基于摄影测量原理^[1-3]的光学测量因快速、非接触、高精度、灵活性好、实时性强等优点得到了迅速的发展, 被广泛应用在三维传感测量、全景图像拼接、航空航天、国防建设、工业制造^[4-9]等不同领域。光学测量法是进行坐标测量、轨迹测定或表面重建的有效方法之一。

光学测量系统种类繁多, 系统中相机安装方式

主要有固定式和跟踪式 2 种。最常见的方法是把相机固定在旋转机构上对目标进行扫描和测量。理论上, 为方便计算和融合后期的数据, 通常要求测量系统中相机镜头的主点与旋转机构的旋转中心重合。但在实际安装时, 相机镜头主点的实际位置不易确定, 从而影响系统测量精度和后期信息拼接效果。当旋转测量系统应用于远距离测量时, 这个误差对最终测量结果带来的影响不明显, 但是在近距离测量时, 这个误差对测量结果的影响很大。为提高旋

收稿日期: 2019-05-31; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ490879)

* E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn

转光学测量系统用于近距离测量的精度,需要精确标定出相机镜头主点与旋转机构旋转中心之间的距离,用于指导系统的安装和调整,从而消除相机镜头主点与旋转机构旋转中心不重合带来的误差。

杨振等^[10]提出固连于可控旋转平台上相机的外参标定方法,利用一维标靶进行相机参数标定,但标定精度有限,且无法标定出相机内参数。李建荣等^[11]假设相机光轴与旋转轴共面,分析了主点的运动轨迹,建立主点与旋转中心之间距离的数学模型,但该方法对于光学镜头主点与轴台的旋转轴不重合的情况,计算过程较为复杂。Zhang 等^[12]设计了由旋转平台与相机组成的,用于大视角精密测量的测量系统。其中使用全站仪或经纬仪给出控制点的空间坐标,设计几种相机外参的标定方法,但经纬仪体积大、成本高且操作复杂。苑云等^[13]提出准同心广义经纬相机模型,可用于替代光电经纬仪等设备,所提模型对外参标定进行简化,忽略了相机光心与经纬仪旋转中心的距离,属于近似模型。

在旋转测量系统中,相机镜头主点位置的测量至关重要。虽然厂商提供了相机镜头的焦距值,由于镜头由多透镜组成,相机镜头的主点位于相机内部,真实位置很难直接用高斯公式准确计算。在旋转测量系统中,相机固定安装在旋转平台上,它们之间的连接属于刚体连接,转台转动时相机与转台的相对位置关系保持不变。相机镜头光心未过转台中心时,相机光心相对于转台中心的运动轨迹为圆,而随着相机镜头光心与转台中心的相对距离缩短,圆轨迹的半径也逐渐缩小,当光心与转台轴线重合时,理论上圆的半径应缩小为 0。

本文提出一种基于平面摄像机标定原理^[14-15]的相机镜头主点的确定方法,用于指导调整相机镜头主点与转台转轴的对准。利用平面标定的方法,获取相机相对于世界坐标系的外参数矩阵,其中的平移矩阵可以代表相机镜头光心与世界坐标系的位置关系。随着转台转动,获得一组相机坐标系相对于世界坐标系的外参数矩阵,从中得到一系列相机光心的位置,继而进行最小二乘圆拟合,经过多次迭代得到圆心。为提高精度,采用多次标定的加权结果来确定旋转平台中心的位置。

2 旋转光学测量系统

2.1 旋转光学系统的构成

在大视场的三维测量中,当需要进行 360° 三维全场测量时,通常需要利用旋转光学测量系统。通

过转台带动固定安装的相机,拍摄多个视场的数据,并对数据进行拼接配准,得到测量对象的三维信息。

以往的旋转光学测量系统大多基于经纬仪与相机的组合,典型的经纬仪支架为三轴(垂直轴、水平轴、视准轴)地平装置,三轴相交且相互垂直,其交点为旋转中心^[16],但经纬仪体积大、成本高。人们也有用商用相机和旋转台组成的测量系统来完成大视场的三维测量。为确保全场数据的拼接准确性,需要保证测量系统安装过程中相机镜头光心与旋转台中心重合。为此,本文利用 2D 平面标定来指导旋转测量系统的安装,使得相机镜头光心与旋转台中心重合。旋转光学测量系统及其标定组件包括棋盘格标靶、相机、伺服控制单元、处理单元(计算机)等,测量系统如图 1 所示。

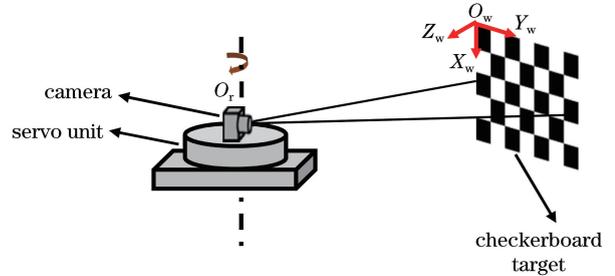


图 1 旋转光学测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of rotating optical measurement system

将相机放置在伺服控制单元(旋转台、平移台)上,伺服控制单元带动相机旋转,在每个位置上采集用于相机标定的棋盘格标靶图,并将所有图像送至计算机处理,得到相机坐标系相对于世界坐标系的平移矩阵。 O_r 为转台的旋转中心,以 O_w 为世界坐标系原点,一个固定的棋盘格平面作为 $X_wO_wY_w$ 面,在棋盘格上建立图 1 所示的世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。利用张正友的摄像机标定原理对每个位置的相机外参进行标定,计算出以 O_r 为旋转中心的相机光心在世界坐标系中的三维坐标位置^[15]。

2.2 旋转光学系统中的成像模型

由相机和旋转平台构成的旋转光学系统的成像模型如图 2 所示。由于相机固定在旋转平台上,相机与转台是刚体连接,相对位置固定不变,只需控制转台的转动,就可以从不同角度拍摄图像。不失一般性, $\Delta O_r O_{c1} O_1 \simeq \Delta O_r O_{c2} O_2$, $O_{c1} O_1 = O_{c2} O_2 = f$, 其中 f 为相机的焦距。

图 2 中 O_r 点为旋转平台的转轴中心, P 为目标点, P_1 和 P_2 分别为目标点 P 在两幅图像上的成像点。 $O_{c1} O_1$ 、 $O_{c2} O_2$ 分别为相机转到不同位置的光轴方向, $O_r O_{c1}$ 与 $O_r O_{c2}$ 之间的转角为 θ , 即

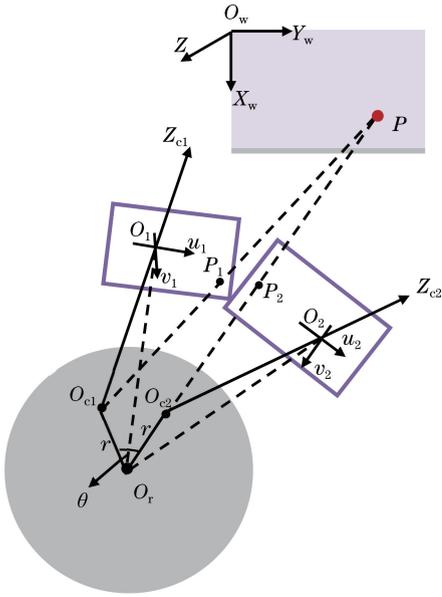


图 2 旋转光学系统的成像模型

Fig. 2 Imaging model of rotating optical measurement system

$\angle O_{c1}O_rO_{c2} = \angle O_1O_rO_2 = \theta$ 。 O_{c1} 、 O_{c2} 分别为两次拍摄的相机光心位置,如果相机的光心没有过转台的转轴中心,则 O_{c1} 、 O_{c2} 应在以转轴为中心的圆上,即 $|O_rO_{c1}| = |O_rO_{c2}| = r$, r 为圆的半径,即相机主点与旋转中心的距离;当相机的光心过转轴中心时, $r \rightarrow 0$ 。通过控制相机在旋转台上绕转轴的旋转,采用基于 2D 标靶的平面标定方法来得到相机主点在世界坐标系下的位置,通过拟合圆心的方法找到转轴的中心,用以指导旋转光学系统中相机的安装。相机主点调整到过转台转轴的中心后, r 接近于 0。

3 相机光心与转轴中心对中

3.1 基于 2D 平面标靶的相机标定方法

在传统的摄像机标定方法中,根据摄像机模型,由已知世界坐标的特征点和其对应的图像坐标可以求解出摄像机的模型参数,包括摄像机的内部参数和外部参数。摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移向量 \mathbf{T} 来描述。摄像机坐标系 (O_c - X_c - Y_c - Z_c) 的原点为摄像机的光心,以垂直于图像平面的相机光轴为 Z_c 轴, X_c 轴和 Y_c 轴分别平行于图像平面,如图 2 所示。世界坐标系 (O_w - X_w - Y_w - Z_w) 是人为选择的一个基准坐标系,在固定的空间坐标系下,相机外部参数实际上反映了相机在空间中的位置。

因此,如果空间中某一点 M 在世界坐标系与像素坐标系下的齐次坐标分别是 $\mathbf{M} = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 与 $\mathbf{m} = (u, v, 1)^T$,根据理想的小孔成像模型,

存在的关系^[17]可表示为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: s 为一任意的非零尺度比例因子; α_x 、 α_y 分别为 u 轴和 v 轴的尺度因子,或称为 u 轴和 v 轴上的归一化焦距; (u_0, v_0) 为主点坐标;旋转矩阵 \mathbf{R} 为 3×3 正交单位矩阵; \mathbf{T} 为三维平移向量。 \mathbf{A} 为摄像机内部参数矩阵,定义为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Zhang^[15]提出一种简单实用的基于 2D 标靶的平面标定方法。在张氏标定方法中,假设标靶平面位于世界坐标系的 X_wY_w 平面上,即 $Z_w = 0$,此时,标靶平面上的点 M 与对应的图像点 m 之间存在一个矩阵变换 \mathbf{H} ,即

$$sm = \mathbf{H}\mathbf{M}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{H} = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{T}]$ 为一 3×3 的矩阵, λ 为一常数因子, \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 分别为图像平面的两个坐标轴对应在世界坐标系中的方向矢量。单应性矩阵 \mathbf{H} 把标靶上的点与图像上的点联系起来,因此,通过拍摄多幅(理论上至少两幅)不同角度的标靶图像可以计算出多个单应性矩阵,再利用最小二乘原理就可计算出相机的内、外部参数。

相机的内部参数是相机的固有参数,不会随相机位置的变化而变化。而在一个固定的空间世界坐标系下,相机的外部参数反映相机在这个空间中的实际位置。基于棋盘格标靶的平面标定方法,针对相机转动到的每个位置,得到相机坐标系的原点(即相机光心)在世界坐标系中的外部参数矩阵(旋转矩阵和平移矩阵),其中平移矩阵提供该位置的相机光心在世界坐标系下的三维坐标信息 $O_{ci} (x_i, y_i, z_i)$,其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$,表示相机转动到的位置序号, N 表示相机转动到第 N 个位置的编号。

在每个位置对相机进行标定时,为将相机主点位置的变化约束在同一个世界坐标系中,需要保证用于相机标定的第一个标靶位置固定。图 3 为标靶在相机转动到不同位置的摆放示意图,图中标出了

3个相机所在位置及标靶的摆放位置, P_0 表示每次标定时, 固定不变的第一个标靶所放位置。设计一个可精确复位的标靶座, 用于定位放置在 P_0 位置处的第一个标靶。图4表示安装在 P_0 位置的标靶, 标靶摆放的其余位置可随着相机的转动任意调整。例如, 对于相机 c_1 , 用放置在 P_0 位置的标靶及 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{13} 位置的标靶进行标定; 对于相机 c_2 , 用 P_0 位置的标靶及 P_{21} 、 P_{22} 、 P_{23} 位置的标靶进行标定; 以此类推。

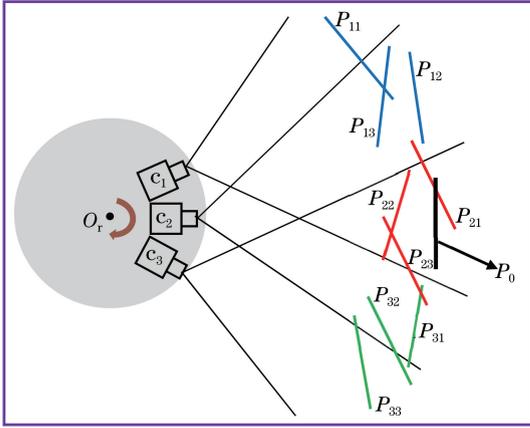


图3 标靶摆放示意图

Fig. 3 Diagram of target placement

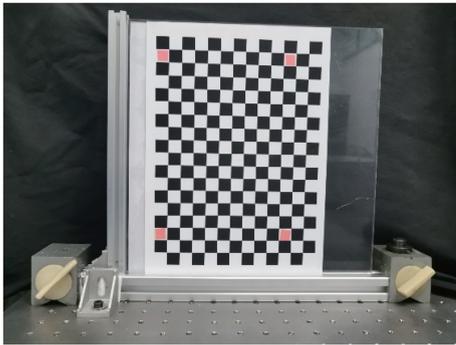


图4 安装在 P_0 位置的标靶

Fig. 4 Target installed in P_0 position

表1为在相机转动过程中, 用于每个位置的相机标定平面与标定得到的旋转矩阵、平移矩阵的对应关系。

由标定得到的每个相机位置的平移矩阵 $T_i = [T_{ix} \ T_{iy} \ T_{iz}]^T$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$, 代表相机转动到的位置, 如: T_{1x}, T_{1y}, T_{1z} 分别代表位置1处相机光心相对于世界坐标系原点的 x, y, z 方向的平移量, 也就是光心在世界坐标系下的坐标, 表示为 $O_{ci}(x_i, y_i, z_i)$ 。由于相机在转台上绕转台中心转动, 其光心沿着某一维度的移动量较大时, 在该维度上的标定精度也会较高(在本文建立的坐标系中,

Y_w 方向的移动量较大)。

表1 每个位置相机标定平面与标定得到的旋转矩阵、平移矩阵对应表

Table 1 Rotation matrix and translation matrix obtained by calibration corresponding to camera calibration plane at each position

Calibration plane	Rotation matrix and translation matrix
$P_0 \ P_{11} \ P_{12} \ \dots \ P_{1n}$	R_1, T_1
$P_0 \ P_{21} \ P_{22} \ \dots \ P_{2n}$	R_2, T_2
$P_0 \ P_{31} \ P_{32} \ \dots \ P_{3n}$	R_3, T_3
\vdots	\vdots
$P_0 \ P_{N1} \ P_{N2} \ \dots \ P_{Nn}$	R_N, T_N

3.2 相机主点与旋转轴的对中方法

相机随转台绕旋转中心转动, 属于刚体的定轴转动; 刚体内不在转轴上的点均绕转动中心作圆周运动。旋转测量系统和 P_0 处放置的标靶的位置关系如图1所示, P_0 上定义的世界坐标系的 X_w 轴与相机所在的平面(即旋转台平面)垂直, 因此可以将标定得到的相机光心位置的三维坐标投影到世界坐标系的 $Y_w O_w Z_w$ 平面上。根据刚体定轴转动的原理^[18], 可将相机光心在 $Y_w O_w Z_w$ 平面上的运动轨迹转换为以旋转中心为圆心的圆周运动。对投影在 $Y_w O_w Z_w$ 平面上的相机光心坐标进行最小二乘圆(LSC)拟合^[19], 得到的圆心坐标就是转轴中心相对于世界坐标系的位置。LSC拟合是目前应用最广泛的圆拟合算法之一, 它是求取实际轮廓上各测量点到该圆距离的平方和最小的圆。设 (y_0, z_0) 为圆心, (y_i, z_i) 为通过摄像机标定获取的相机光心的三维坐标投影到 $Y_w O_w Z_w$ 平面上的二维坐标, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。为获得圆心坐标 (y_0, z_0) , 将所有测量点到圆心距离的平方和取最小值, 其目标函数为

$$C = \min \sum_{i=1}^N [(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2] \quad (4)$$

受标靶尺寸和相机视场的限制, 获得的相机光心位置所描绘的圆弧弧长较短, 且在 Z_w 方向上的标定误差会影响拟合圆心的计算。因此, 为提高圆心位置的计算精度^[20], 将相机的 Y_w 方向固定, 在 Z_w 方向对相机位置进行调整, 通过标定得到多组相机光心数据, 每组距转轴的距离不同, 圆弧的半径也不相同。但因为是同轴转动, 理论上各组数据拟合得到的轨迹应为一组以转轴为圆心的同心圆。但实际拟合的多个圆心可能存在不重合现象, 因此通过对多个拟合圆心 O_j 进行平均来得到初始的转轴中心位置 \bar{O} ; 将相机调整到 \bar{O} 点所在的位置, 并

对相机进行标定,得到一组新的光心位置 O'_i 。将新的光心位置的平均值作为圆心,和之前得到的多个拟合圆心一起加权平均来确定最后的转轴中心 $O(O_y, O_z)$,计算公式为

$$O_y = \sum_{j=1}^{n+1} k_{yj} O_{yj}, \quad (5)$$

$$O_z = \sum_{j=1}^{n+1} k_{zj} O_{zj}, \quad (6)$$

式中: O_{yj} 和 O_{zj} 分别表示拟合圆心 O_j 在 Y_w 和 Z_w 方向上的坐标值; $j=1,2,3,\dots,n+1$,表示第 j 个拟合圆心的序号, n 是拟合圆的个数; k_{yj} 和 k_{zj} 分别表示圆心 O_j 在 Y_w 和 Z_w 方向上的权重因子,表达式为

$$k_{yj} = \frac{\sigma_{yj}}{\sum_{j=1}^{n+1} \sigma_{yj}}, \quad (7)$$

$$k_{zj} = \frac{\sigma_{zj}}{\sum_{j=1}^{n+1} \sigma_{zj}}. \quad (8)$$

4 实验与结果

为验证标定方法的可行性,设计如图5所示的实验系统。其中旋转控制系统由佳能EOS 6D相机、Zolix TSA50-C电动平移台和Zolix RAP200电动旋转台组成。平移台固定在旋转平台上,相机固定于平移台上。步进电机可以控制相机沿 Z_w 轴方向的移动及随转台的旋转。佳能EOS 6D相机的图像分辨率为 $3648 \text{ pixel} \times 2432 \text{ pixel}$,成像镜头采用佳能50 mm标准定焦镜头,实验过程中镜头的光圈值为 $f/22$,相机的曝光时间为 $1/2 \text{ s}$;Zolix RAP200电动旋转台的重复定位精度小于 0.005° ;Zolix TSA50-C电动平移台的重复定位精度小于 5×10^{-6} ,用来调整相机在转台上的位置。实验所用标靶为棋盘格,棋盘格格点间隔为 $14.6 \text{ mm} \times 14.6 \text{ mm}$ 。

实验中,为使得每次实验得到的相机主点位置都在同一个世界坐标系中,必须保证每次实验中棋盘格的初始位置相同,为此设计一个可精确复位的标靶座,并将其放置在基准平面,保持标定过程中世界坐标系位置不变。在张正友的摄像机标定法中,至少需要3张摄像机与标定靶间的相对位置不同的图片才能够得到3个不同的单应性矩阵 H ,本文使用4幅不同角度的图片来对相机进行标定。

标定时,先将棋盘格固定在标靶座上,相机在每个位置拍摄相同的标靶图。标定过程中相机的初始

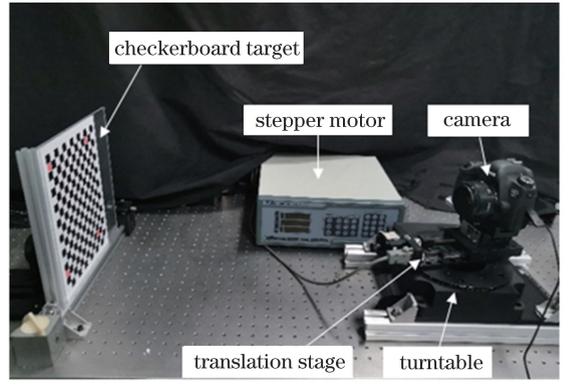


图5 实验系统图

Fig. 5 Diagram of experimental system

位置和转动示意如图6所示,相机从不同初始 Z_w 位置开始转动,拍摄三组标定图像, Z_w 轴方向相机位置间隔为5 mm。每个 Z_w 位置,旋转台控制相机以 1.5° 为间隔旋转,一共旋转 18° ,在每个转动位置拍摄4幅标靶图像,用张正友的标定方法进行标定。得到的3组相机光心坐标投影到 $Y_w O_w Z_w$ 平面上的轨迹如图7所示,图中星号表示相机远离圆心放

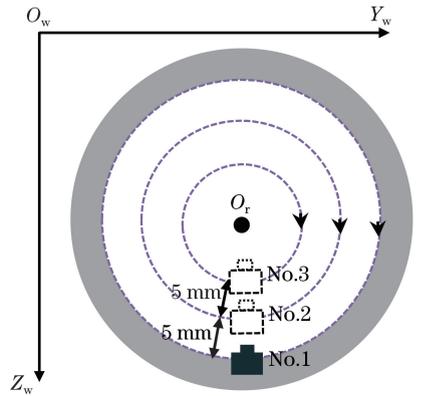


图6 相机初始位置和转动示意图

Fig. 6 Diagram of camera initial position and rotation

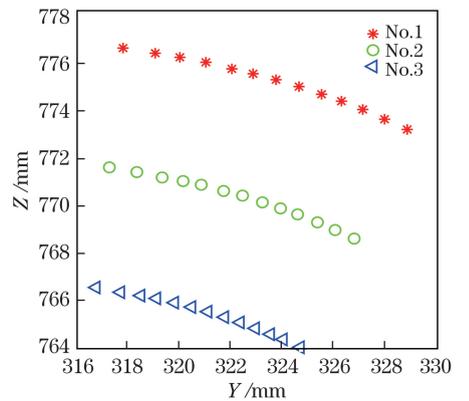


图7 相机光心坐标在 $Y_w O_w Z_w$ 平面上的投影

Fig. 7 Projection of camera photocentric coordinates on $Y_w O_w Z_w$ plane

置,三角表示相机靠近圆心放置,圆圈表示相机在前两者的中间位置放置。对三组光心坐标数据进行LSC拟合,表2为拟合得到的圆心和半径,拟合圆曲线如图8所示,求得三个圆心的平均值为 $\bar{O}(313.2651\text{ mm}, 741.4978\text{ mm})$ 。

表2 拟合圆心与半径对应表

Table 2 Correspondence table of fitting circular center and radius

Number	Fitting center	Fitting radius /mm
1	$O_1(313.3486\text{ mm}, 741.8838\text{ mm})$	$r_1=34.8491$
2	$O_2(313.1452\text{ mm}, 741.1891\text{ mm})$	$r_2=30.5890$
3	$O_3(313.3016\text{ mm}, 741.4205\text{ mm})$	$r_3=25.3407$

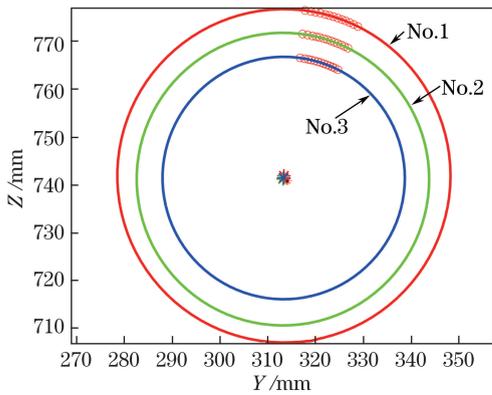


图8 拟合圆曲线

Fig. 8 Fitted circular curve

然后分别在 Y_w 和 Z_w 方向上将相机调整到 \bar{O} 点的位置,再对相机进行标定,得到13个相机光心坐标 $O'_i, i=1, 2, 3, \dots, 13$,光心坐标分布如图9所示,计算测得平移矩阵的变化量的标准差为0.0826 mm。对13个相机光心坐标求平均值得到 $O_4(314.0571\text{ mm}, 740.8292\text{ mm})$,将 O_4 与 O_1, O_2, O_3 分别在 Y_w 和 Z_w 方向上进行加权平均,求得旋转中心的坐标 $O(314.0563\text{ mm}, 741.2014\text{ mm})$ 。

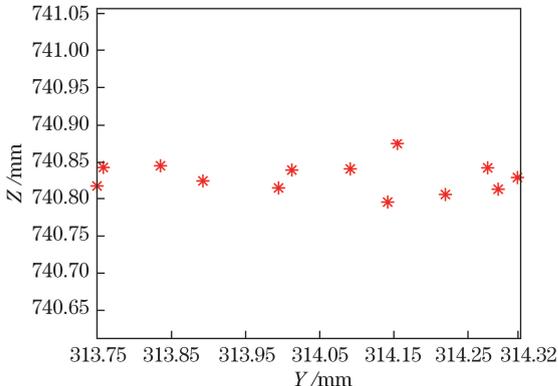


图9 光心坐标分布图

Fig. 9 Photocentric coordinate distribution

5 结 论

提出采用平面标定的方式来解决相机和旋转台构成的旋转测量系统中相机镜头光心和转轴中心的对中问题。建立相机镜头主点随旋转装置转动的运动轨迹模型,对相机镜头主点的运动轨迹进行分析。该方法利用张正友的摄像机标定原理求出相机相对于设定的世界坐标系的外部参数矩阵,利用其平移矩阵来描述相机镜头主点在世界坐标系中的位置,最终拟合出旋转测量系统中旋转中心的位置。实验验证了所提标定方法的有效性,能够满足光学测量系统中对相机镜头主点与旋转中心之间距离标定的要求。在未来的工作中,需对闭环控制系统进行研究,以进一步提高计算转轴中心的定位精度和速度。

参 考 文 献

- [1] Wang Z Z. Principle of photogrammetry: continued [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007. 王之卓. 摄影测量原理: 续编[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [2] Ergün B. An expert measurement system for photogrammetric industrial application [J]. Measurement, 2006, 39(5): 415-419.
- [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] Wu Q Y, Li J Z, Su X Y, et al. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1224-1227. 吴庆阳, 李景镇, 苏显渝, 等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1224-1227.
- [5] Chen J H, Guo W S. Method of panoramic image stitching for theodolite-camera system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051001. 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.
- [6] Xu Y A, Yang Q, Huai J P. Calibration of the axis of the turntable in 4-axis laser measuring system and registration of multi-view [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(5): 659-662. 徐永安, 杨钦, 怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 659-662.
- [7] Li Y, Lu S J, Song F, et al. Three-dimensional

- capture and display of real scene with video speed[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1706-1710.
- 李勇, 卢世江, 宋芳, 等. 真实场景的三维视频采集及显示[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1706-1710.
- [8] Zhang S D, Lu B H, Ding Y C. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(6): 533-536.
- 张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(6): 533-536.
- [9] 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.
- 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.
- [10] Yang Z, Shang Y. External parameter calibration of camera mounted on a controllable rotating platform[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(2): 147-154.
- 杨振, 尚洋. 固连于可控旋转平台相机的外参标定[J]. *实验力学*, 2014, 29(2): 147-154.
- [11] Li J R, Wang Z Q, Wang C X, *et al.* Demarcate method for the distance between optical lens node and rotating center[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1): 61-64.
- 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- 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.
- [14] Li P, Wang J N. Overview of camera calibration methods [J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2007(4): 77-79.
- 李鹏, 王军宁. 摄像机标定方法综述[J]. *山西电子技术*, 2007(4): 77-79.
- [15] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] Sun F F, Qiao Y F, Chen N. Current status and development of optical measure system [C] // *Proceedings of 2006 National Symposium on Photoelectronics and Photoelectric Information Technology*, January 1, 2006, Harbin, China. [S. l.: s.n.], 2006: 162-166.
- 孙芳方, 乔彦峰, 陈宁. 光学测量系统的现状与发展 [C] // *2006 全国光电子与光电信息技术学术研讨会*, 2016-01-01, 哈尔滨, 中国. [出版地不详: 出版者不详], 2006: 162-166.
- [17] Zhang G J. *Machine vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 84-89.
- 张广军. *机器视觉* [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 84-89.
- [18] Zhu D X. A derivation of the law of fixed axis rotation of rigid body[J]. *Physics of Guangxi*, 1994, 15(4): 18-19.
- 朱殿雄. 刚体定轴转动定律的一种推导[J]. *广西物理*, 1994, 15(4): 18-19.
- [19] Gander W, Golub G H, Strebler R. Least-squares fitting of circles and ellipses [J]. *BIT Numerical Mathematics*, 1994, 34(4): 558-578.
- [20] Guan Y H, Zhou X Z, Liu C R. Reliability analysis of multiple points coordinates on an arc to fitting circle center position [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2012(4): 54-57.
- 关叶沅, 周西振, 刘传瑞. 一段圆弧上多点坐标拟合圆心位置的可靠性分析[J]. *勘察科学技术*, 2012(4): 54-57.