

DOI:10.13203/j.whugis.20140994



文章编号:1671-8860(2017)02-0243-07

# 基于普通数码相机的旋转全景摄影测量方法

梅文胜<sup>1</sup> 胡帅朋<sup>1</sup> 李谋思<sup>1</sup> 祁洪宇<sup>1</sup> 徐 芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘 要:**普通数码相机固定在高精度旋转平台上可集成为旋转全景相机,水平旋转多位置拍摄,可获取全景影像。给出了旋转全景相机的成像几何关系模型,实现了旋转全景相机的标定,利用稀疏分布的少量控制点(最少 3 个),即可解算出平台旋转中心坐标与起始方位角,及每张像片的外方位元素,再利用多站旋转拍摄的影像进行前方交会就可获得物方点坐标。实验结果表明,本文提出的方法在实际摄影测量中可少受视野和控制点数量的限制,通过较少的控制点即可解算出物方点坐标,且测量精度较好。该方法是在困难场景进行近景摄影测量的一种新的有效手段。

**关键词:**旋转全景相机;中心偏移;相对姿态;外方位元素传递;稀少控制点

**中图法分类号:**P232;P258 **文献标志码:**A

随着普通数码相机性能及技术指标的迅速提升,基于普通数码相机的数字近景摄影测量已经在工业测量、工程测量、机器视觉、场景重建等领域得到了广泛的应用。普通数码相机应用于近景摄影测量时面临有两个关键问题,一是相机的视场较小,二是必须在被测物体表面或周围布设一定数量的控制点<sup>[1]</sup>,在很大程度上限制了普通数码相机的摄影测量应用范围。摄影全站仪将量测型数码相机安装在全站仪望远镜上<sup>[2]</sup>,在每一测站旋转摄影,每个测站旋转摄影得到的影像可以经过纠正,最后得到一张全景影像,用于辅助测量,弥补了相机视场小的问题;另外,利用全站仪测量导线点,结合近距离的检校条,大大减少了外业工作量。多基线摄影测量方法<sup>[3-6]</sup>是用普通数码相机采用短基线获取大重叠度的序列影像,在测站上采用旋转摄影方式将短基线和多影像相结合<sup>[3]</sup>,提高了最大交会角和测量精度,但仍需在测区范围内布设控制点。

在近景摄影测量中,经常会遇见控制点分布较为分散,被测物周围或测区范围内不能覆盖有足够数量控制点的情况。本文提出了一种利用普通数码相机的新的近景摄影测量方案,解决难以在被测物体上或测区范围内布设控制点的问题。该方法可以在被测物周围或被测物对面布设控制点,将一台普通数码相机安置在全景平台上进行

旋转拍摄,获取覆盖水平 360°的影像。相机与旋转平台连成刚体,旋转的像片之间相对位置姿态关系保持不变,相机在全景三维控制场中检校后,实际场景测量时,只要布设少量的、分布稀疏的控制点,即可根据多测站上旋转拍摄的影像进行前方交会获取物方点坐标。该方案能够解决普通数码相机视场角小和控制点分布受限制的难题。

本文方法与摄影全站仪布设控制点方式不同<sup>[2]</sup>,在 360°范围内布设 3 个以上控制点即能实施摄影测量,而摄影全站仪是在安置测站时进行导线测量获取测站坐标;多基线旋转摄影测量需在被测区域内布设控制点,本文方法在控制点布设时不会受此限制,在控制点布设方面优于多基线旋转摄影测量。

## 1 旋转全景相机的成像模型

将一台普通数码相机安置在一个高精度的旋转平台上(以下称为旋转全景相机),采用机械连接件,相机与旋转平台连成刚体,平台置平后可以 360°水平旋转,旋转中心和相机投影中心的相对位置和姿态始终保持不变。

设旋转相机坐标系统为右手坐标系(图 1),包括像空间坐标系( $S-x, y, z$ )、旋转坐标系( $O-U, V, W$ )和物方空间坐标系( $G-X, Y, Z$ )。像

收稿日期:2015-08-23

项目资助:国家自然科学基金(41071292)。

第一作者:梅文胜,博士,教授,主要从事精密工程测量、自动化测量系统等方面的教学与科研工作。wshmei@sgg.whu.edu.cn

空间坐标系以相机投影中心为原点,旋转坐标系以旋转中心  $O$  为原点。

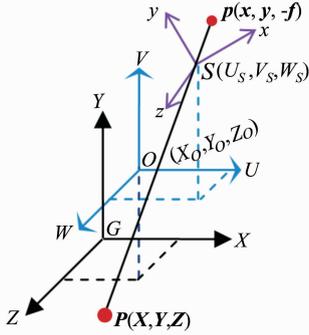


图1 全景相机的坐标系

Fig. 1 Panoramic Camera Coordinate Systems

空间坐标系 ( $S-x, y, z$ ) 与旋转坐标系

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\alpha) \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\alpha) \cdot \left[ \lambda \mathbf{R}_S \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ V_s \\ W_s \end{bmatrix} \right], \mathbf{R}_Y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $(X, Y, Z)$  为物方点在物方空间坐标系中的坐标;  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为旋转中心  $O$  在物方空间坐标系中的坐标;  $\mathbf{R}_Y(\alpha)$  是旋转平台水平角对应的旋转矩阵。

在每一摄站上, 旋转平台置平后, 旋转相机根据设定的角度  $\beta$  旋转拍摄影像。布设控制点时, 要求至少在 3 张像片上各有 1 个控制点。在旋转拍摄过程中旋转坐标系原点位置不变, 只有水平角发生变化, 旋转坐标系原点位置不变, 每张像片的姿态可根据旋转角度计算得到, 即旋转坐标系初始位置 ( $\alpha_0$ ) 的旋转矩阵乘以  $\mathbf{R}_Y(\alpha)$ 。从第 2 张影像起的每一张影像的姿态都能够根据角度  $\alpha (\alpha = \alpha_0 + (i-1)\beta)$  和式(2)计算得到。

## 2 旋转全景相机检校

旋转相机检校的目的是获取相机与旋转平台的相对位置与姿态, 即相机与旋转坐标系的相对位置 ( $U_s, V_s, W_s$ ) 与姿态  $\mathbf{R}_S$ , 同时还可以获得旋转坐标系与物方坐标系的相对位置 ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) 和旋转坐标系的初始角度  $\alpha_0$ , 分两步进行。

第一步: 在室内三维控制场内的不同位置上, 可手持数码相机对控制点拍摄多张像片, 根据已知控制点, 对相机的内方位元素 ( $f, x_0, y_0$ ) 和畸

( $O-U, V, W$ ) 间存在如下关系式:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_S \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ V_s \\ W_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_S = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $(U, V, W)$  是物方点在旋转坐标系的坐标;  $(x, y, -f)$  是像点在像空间坐标系的坐标;  $(U_s, V_s, W_s)$  是投影中心  $S$  在旋转坐标系的坐标;  $\mathbf{R}_S$  为从像空间坐标系到旋转坐标系的旋转矩阵。

平台严格置平后, 旋转坐标系 ( $O-U, V, W$ ) 与物方空间坐标系 ( $G-X, Y, Z$ ) 之间的关系如下:

变参数 ( $k_1, k_2, p_1, p_2$ ) 进行标定, 获取结果作为真值参与后续计算<sup>[1]</sup>。

第二步: 在室内全景三维控制场内选取多个摄站, 在每一摄站上拍摄  $360^\circ$  水平角的全景影像, 方法为每次旋转相机相同的水平角度 ( $360^\circ/n$ ) 拍摄影像, 直至覆盖  $360^\circ$  水平角。标定内容包括相机投影中心与旋转中心的偏移量 ( $U_s, V_s, W_s$ ) 和相对姿态  $\mathbf{R}_S$ , 旋转坐标系原点在物方空间坐标系中的位置 ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) 和初始角度  $\alpha_0$ 。

式(2)中 ( $U_s, V_s, W_s$ ) 和  $\mathbf{R}_S$  对每张像片都是固定值,  $(X_0, Y_0, Z_0)$  和  $\alpha_0$  对同一摄站是不变的。本文借鉴文献[7]的方法, 直接解求旋转矩阵  $\mathbf{R}_S$  的 9 个方向余弦, 来代替两个坐标系间的 3 个角度  $\varphi, \omega, \kappa$ 。这种基于方向余弦的解法, 已经在连续像对相对定向、模型连接、前方交会、绝对定向、线阵全景相机检校等应用中得到了广泛应用<sup>[7-11]</sup>。文献[12]指出, 在利用共线方程时, 直接解算方向余弦值方法是无需依赖位置与姿态初始值的, 该方法也明显优于单位四元数方法。

以像点坐标为观测值, 由式(2)可导出相机检校误差方程式的一般式, 如式(3), 9 个方向余弦组成的 6 个正交限制条件公式参见文献[7], 按照附有限制条件的间接平差法, 采用 Givens 正交变换, 就可解求出包括 9 个方向余弦值的 16 个未知数。

$$\begin{aligned} v_x &= a_{11} \Delta U_s + a_{12} \Delta V_s + a_{13} \Delta W_s + a_{14} \Delta \alpha_1 + a_{15} \Delta \alpha_2 + a_{16} \Delta \alpha_3 + a_{17} \Delta b_1 + a_{18} \Delta b_2 + a_{19} \Delta b_3 \\ &\quad + a_{1a} \Delta c_1 + a_{1b} \Delta c_2 + a_{1c} \Delta c_3 + a_{1d} \Delta X_0 + a_{1e} \Delta Y_0 + a_{1f} \Delta Z_0 + a_{1g} \Delta \alpha_0 - l_x \\ v_y &= a_{21} \Delta U_s + a_{22} \Delta V_s + a_{23} \Delta W_s + a_{24} \Delta \alpha_1 + a_{25} \Delta \alpha_2 + a_{26} \Delta \alpha_3 + a_{27} \Delta b_1 + a_{28} \Delta b_2 + a_{29} \Delta b_3 \\ &\quad + a_{2a} \Delta c_1 + a_{2b} \Delta c_2 + a_{2c} \Delta c_3 + a_{2d} \Delta X_0 + a_{2e} \Delta Y_0 + a_{2f} \Delta Z_0 + a_{2g} \Delta \alpha_0 - l_y \end{aligned} \quad (3)$$

### 3 旋转全景摄影前方交会

(1) 利用少量控制点进行后方交会,解算相机与旋转平台转轴的几何姿态,即旋转平台在初始位置时的水平角  $\alpha_0$  和旋转平台中心坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。

由于通过检校已获得了相机投影中心与旋转中心的位置和姿态  $(U_s, V_s, W_s)$  和  $\mathbf{R}_s$ , 因此, 后方交会所求解的是每一摄站上的 4 个未知数, 即旋转坐标系原点在物方空间坐标系中的位置  $(X_0, Y_0, Z_0)$  和旋转坐标系初始角度  $\alpha_0$ 。利用控制点解算未知数的误差方程式:

$$\begin{aligned} v_x &= a_{1d} \Delta X_0 + a_{1e} \Delta Y_0 + a_{1f} \Delta Z_0 + a_{1g} \Delta \alpha_0 - l_x \\ v_y &= a_{2d} \Delta X_0 + a_{2e} \Delta Y_0 + a_{2f} \Delta Z_0 + a_{2g} \Delta \alpha_0 - l_y \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 传递每张照片的外方位元素, 进行多照片前方交会, 计算待测点物方坐标。

在旋转拍摄过程中只有水平角存在, 旋转坐标系原点位置不变。每张像片的旋转角度可根据该摄站初始角度  $\alpha_0$  和旋转角度  $\beta = (360^\circ/n)$  计算

$$\begin{cases} x = -f \\ \frac{(a_1 \cos \alpha - c_1 \sin \alpha)(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + (a_1 \sin \alpha + c_1 \cos \alpha)(Z - Z_0) - a_1 U_s - b_1 V_s - c_1 W_s}{(a_3 \cos \alpha - c_3 \sin \alpha)(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + (a_3 \sin \alpha + c_3 \cos \alpha)(Z - Z_0) - a_3 U_s - b_3 V_s - c_3 W_s} \\ y = -f \\ \frac{(a_2 \cos \alpha - c_2 \sin \alpha)(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + (a_2 \sin \alpha + c_2 \cos \alpha)(Z - Z_0) - a_2 U_s - b_2 V_s - c_2 W_s}{(a_3 \cos \alpha - c_3 \sin \alpha)(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + (a_3 \sin \alpha + c_3 \cos \alpha)(Z - Z_0) - a_3 U_s - b_3 V_s - c_3 W_s} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_x = b_{11} \Delta X + b_{12} \Delta Y + b_{13} \Delta Z - l'_x \\ v_y = b_{21} \Delta X + b_{22} \Delta Y + b_{23} \Delta Z - l'_y \end{cases} \quad (8)$$

实际工作中, 只需要 3 个以上控制点, 就可以解算出所有像片的外方位元素, 从而根据前方交会获得所需要的物方点坐标。

### 4 实验分析

实验采用尼康 D700 数码相机和 TCA2003 全站仪, 将相机用一个机械的固定支架安置在全站仪上, 相机与全站仪连成刚体。实验采用全站仪代替高精度旋转平台有两个目的, 一是用全站仪可以进

得到:

$$\alpha = \alpha_0 + (i - 1)\beta \quad (5)$$

式中,  $i - 1$  为相机的旋转次数。

根据相机的几何姿态参数和相机旋转角度, 获取旋转拍摄的多张影像外方位元素, 即根据第一张像片的外方位元素, 利用式(2)解算其余像片的外方位元素, 即像片的线元素为  $\mathbf{R}_Y(\alpha)(U_s V_s W_s)^T$ , 旋转矩阵为  $\mathbf{R}_Y(\alpha)\mathbf{R}_s$ 。

待测点的物方坐标为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= R_Y(\alpha_0 + (i - 1)\beta) \cdot \\ \left[ \lambda \mathbf{R}_s \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ V_s \\ W_s \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

若存在有多张像片, 应通过多张像片进行前方交会, 采用最小二乘方法计算出待测点的物方坐标。当以像点坐标作为观测值  $(x, y)$ , 待定点物方坐标  $(X, Y, Z)$  作为未知数时, 可对式(7)线性化, 列出误差方程式(8), 限于篇幅这里不列出各偏导数系数和常数项所对应的计算公式。

行水平旋转, 实现旋转摄影; 另外, 全站仪中心坐标即是旋转中心坐标, 可以检验摄影测量方式(后方交会)计算的旋转中心坐标的正确性。

在全景三维控制场  $(12 \text{ m} \times 6 \text{ m})^{[13]}$  内采集影像, 全景控制场内共有 400 多个控制点。首先, 利用控制场东侧(东墙及标志杆)上的控制点检校相机内方位元素  $(f, x_0, y_0)$  和畸变参数  $(k_1, k_2, p_1, p_2)$ ; 然后, 在控制场中的 4 个摄站进行了全景摄影, 旋转角  $b$  为  $72^\circ$ , 每站拍摄 5 张像片, 影像间仅有少量重叠见图 2。摄站与后方交会控制点分布如图 3 所示, T1、T2、T3、T4 分别代表 4 个摄站, 1204、1E04、W302、W502 为后方交会控制点。



图 2 旋转相机在第 1 摄站拍摄的 5 张影像

Fig. 2 Five Images of Rotation Camera at First Station

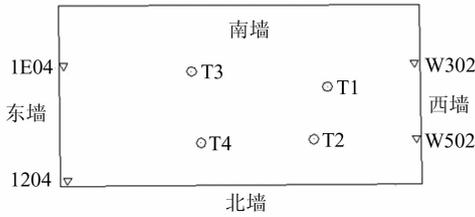


图3 摄站与后方交会控制点分布

Fig. 3 Camera Station and Resection Control Point Distribution

4.1 旋转相机检校及分析

按照一般的相机检校方法可获得相机的内外方位元素、畸变参数、相机与旋转平台的相对位置( $U_s, V_s, W_s$ )与姿态  $R_s$ , 同时还可以获得旋转坐标系与物方坐标系的相对位置( $X_o, Y_o, Z_o$ )和旋转坐标系的初始角度  $\alpha_0$ . 表1列出解求的相机内方位元素及畸变参数。旋转相机自身的稳定性和旋转中心坐标( $X_o, Y_o, Z_o$ )的解算精度是本文方法成功的关键, 因此在实验部分对此进行验证。

表1 相机检校的内方位元素及畸变参数

Tab. 1 Interior Orientation Parameters and Distortion Parameters of Camera Calibration

内方位元素(pixel)		畸变参数	
$x_0$	-11.771 9	$k_1$	1.98674139417986E-08
$y_0$	-6.896 3	$k_2$	2.50443892171322E-15
$f_x$	2 409.478 9	$p_1$	-1.17294883186375E-07
$f_y$	2 408.963 7	$p_2$	5.38090559320636E-08

表1的结果是4张像片整体平差所得, 共863个像点,  $x$ 最大改正数1.968pixel, 中误差为0.413 pixel;  $y$ 最大改正数为1.958 pixel, 中误差为0.3066pixel。

(1) 旋转相机检校结果及稳定性分析

旋转相机检校的目的是获取相机与旋转平台的相对位置与姿态, 即像空间坐标系与旋转坐标系的相对位置( $U_s, V_s, W_s$ )和姿态  $R_s$ , 但相机旋转过程中的稳定性是至关重要的, 本实验对每次旋转获得的位置与姿态进行比较, 各摄站检校结果见表2, 将  $R_s$  中的9个方向余弦用  $\varphi, \omega, \kappa$  表示。

相机检校精度受控制点数量与分布的影响, 4个摄站的检校结果略有差别。表2结果显示, 相机与旋转平台的相对稳定性较好, 线元素中  $U_s$  相差最大, 仅为0.88 mm, 角元素中  $\varphi$  相差最大为31"。在实际应用中, 将4个摄站所有像片进行整体平差, 可得到一组参数, 在后续计算中可直接应用。

(2) 旋转中心坐标解算精度分析

旋转中心坐标( $X_o, Y_o, Z_o$ )作为已知值参与到前方交会中计算物方点的坐标, 因此旋转中心

表2 像空间坐标系与旋转坐标系相对位置与姿态  
Tab. 2 Relative Position and Attitude of the Image Space Coordinate System and the Rotation Coordinate System

摄站	线元素/mm		
	$U_s$	$V_s$	$W_s$
1	-23.98	308.44	-51.57
2	-24.16	308.35	-51.64
3	-23.66	308.24	-51.48
4	-23.28	307.84	-51.35

摄站	角元素/( $^{\circ}$ ' ")		
	$\varphi$	$\omega$	$\kappa$
1	0 52 44.00	0 35 10.00	-0 18 09.00
2	0 52 46.00	0 35 20.00	-0 18 15.00
3	0 52 26.00	0 35 17.00	-0 18 12.00
4	0 52 15.00	0 35 32.00	-0 18 09.00

坐标的精度至关重要。本文利用精密全站仪测得的水平角观测值, 在“科傻”地面控制网平差软件中计算获取仪器旋转中心的高精度坐标, 同时用少量控制点(4个)采用摄影测量空间后方交会解算旋转中心坐标。表3为用全站仪获取的旋转中心坐标和摄影测量空间后方交会的旋转中心坐标的对比。

表3 旋转中心坐标对比/mm

Tab. 3 Comparison of Rotation Center Coordinates/mm

摄站	线元素	全站仪	全站仪	摄影测量	差值
		后交结果	后交精度	后交结果	
1	$X_o$	-6 907.75	0.03	-6 907.48	-0.27
	$Y_o$	10 165.37	0.15	10 165.71	-0.34
	$Z_o$	-10 176.51	0.08	-10 176.45	-0.06
2	$X_o$	-8 573.91	0.03	-8 573.36	-0.55
	$Y_o$	10 173.51	0.12	10 173.80	-0.29
	$Z_o$	-10 620.16	0.09	-10 619.91	-0.25
3	$X_o$	-6 397.54	0.03	-6 397.13	-0.43
	$Y_o$	10 179.18	0.05	10 178.69	0.49
	$Z_o$	14 462.56	0.10	-14 463.82	1.26
4	$X_o$	-8 669.62	0.03	-8 669.35	-0.27
	$Y_o$	10 177.03	0.04	10 176.87	0.16
	$Z_o$	-14 175.53	0.07	-14 175.97	0.44

表3结果显示, 用摄影测量空间后方交会计算出的旋转中心坐标与全站仪测量结果偏差较小, 最大偏差为1.26 mm。因此, 应用本文提出的方法是可行的, 即用少量(本实验用4个)控制点可以解算出旋转中心的坐标。

4.2 前方交会精度分析

(1) 多站旋转摄影前方交会精度

对旋转相机在全景控制场内的4个摄站拍摄的20张影像进行处理, 利用4个控制点解算出旋转中心坐标及旋转相机初始角, 根据相机与旋转平台的相对位置与姿态, 推算出每一张像片的外方位元素, 再按多站前方交会的方式计算控制场

内四面墙上标志点坐标,并与标志点的已知坐标比较。参见图 2,控制场东侧标志较多,均为平面圆形标志;北墙和南墙受场地条件限制布设的标志点较少,大部分为球形标志;西墙中间为平面圆形标志,两边为球形标志,平面圆形标志采用反光材料制作,且有黑色反衬,图像上中心识别精度较

高,而球形标志因与背景反差较小,中心识别精度相对较低。比较分析时保留 3 站以上交会点,按东、西、南、北四面墙分开统计,结果见表 4,平均相对误差是采用 4 站的平均位置到 4 面墙的距离来计算的,为保持平均相对误差计算的一致性,东侧的平面标志只选取了墙上的标志。

表 4 多站旋转摄影前方交会精度统计/mm

Tab. 4 Intersection Precision Statistics of Multi-station Rotary Photography /mm

	东墙(103 点)			西墙(30 点)			南墙(21 点)			北墙(33 点)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
最大差值	1.05	0.92	2.25	2.15	0.68	2.48	3.14	1.84	1.47	2.76	1.35	0.28
最小差值	-1.02	-0.76	-2.95	-0.48	-2.52	-1.76	0.07	-1.58	-1.47	-0.66	-1.33	-3.07
中误差	0.41	0.35	1.52	0.97	0.91	1.35	1.73	0.94	0.96	1.19	0.75	1.32
平均摄影距离	6 200			5 100			3 300			1 900		
平均相对误差	1/15 100	1/17 700	1/4 100	1/5 200	1/5 600	1/3 800	1/1 900	1/3 500	1/3 400	1/1 600	1/2 500	1/1 400

(2) 与多基线前方交会精度对比

东墙标志较多且其中心识别精度较高,选出 4 站中东墙的像片 4 张,采用传统的多基线前方交会,计算结果与东墙的结果对比。在东墙范围内选择了 1702、1710、1E02 和 1E09 作为控制点,受 4 张像片交会视场范围的限制,这 4 个点在 T1、T2 站的像片上分布在中部约 1/4 的区域。其计算结果见表 5、表 6。

由表 5 知,单片后方交会解算的摄影中心坐标与采用全站仪中心坐标推算出的摄影中心坐标的差值明显比表 3 中的差值要大,这是因为旋转摄影前方交会时控制点选择更加方便,较容易布设分布合理的控制点。

由表 6 知,多基线前方交会时在控制点覆盖范围内的前方交会精度较好,甚至略高于表 4 中多站旋转摄影前方交会的精度,但在控制点覆盖

表 5 单片后方交会与全站仪推算摄影中心坐标对比/mm

Tab. 5 Photography Center Coordinates Comparison Resection with Total Station/mm

摄站	线元素	全站仪推算值	单片后方交会	差值
1	$X_o$	-6 930.19	-6 936.47	6.28
	$Y_o$	10 473.95	10 470.28	3.67
	$Z_o$	-10 228.36	-10 228.06	-0.30
2	$X_o$	-8 595.80	-8 591.85	-3.95
	$Y_o$	10 482.03	10 481.68	0.35
	$Z_o$	-10 671.93	-10 672.12	0.08
3	$X_o$	-6 418.94	-6 419.01	0.07
	$Y_o$	10 487.15	10 488.76	-1.61
	$Z_o$	-14 515.61	-14 515.85	0.24
4	$X_o$	-8 693.64	-8 695.53	1.89
	$Y_o$	10 485.11	10 484.14	0.97
	$Z_o$	-14 227.15	-14 228.28	1.13

表 6 多基线前方交会精度统计/mm

Tab. 6 Intersection Precision Statistics of Multi-Baseline/mm

位置	控制点覆盖范围内(61 点)			控制点覆盖范围外(42 点)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
最大差值	0.54	0.44	1.37	0.91	0.98	0.92
最小差值	-0.59	-0.74	-3.65	-3.73	-1.83	-11.22
中误差	0.22	0.24	1.42	1.82	0.69	5.88
平均摄影距离	6 200			6 200		
平均相对误差	1/28 400	1/25 700	1/4 400	1/3 400	1/9 000	1/1 100

范围外的点的精度下降明显。因此,旋转摄影测量方法的前方交会精度与多基线前方交会的精度相近,但其整体精度更加均匀,布设控制点时所受限制较少,布设更加方便,较适用于被测物体周围控制点布设困难的摄影测量工作。

5 结 语

在进行摄影测量的外业工作时,遇到不能在被测物上或周围布设足够数量控制点的情况,采用常规近景摄影测量方法不能满足区域网平差要求,也将无法完成任务。本文提出了一种利用普

通数码相机进行全景摄影测量的解决方法,设备简单、成本较低,能够解决实际工作中控制点稀少时的摄影测量问题。

本文一台普通数码相机通过机械连接件安置在一个全景旋转平台上,组成的刚体称为旋转相机,平台置平后可以进行水平旋转,相机拍摄多张影像。在全景控制场内检校旋转相机,可以获得相机的内方位元素、畸变系数和相机投影中心与旋转中心的相对位置与姿态,这些值作为固定值参与后续物方点坐标计算。在实际场景中,要求至少在3张像片上各有1个控制点,可解算出旋转中心坐标和旋转坐标系的初始角度。根据检校出的相机旋转的几何姿态关系参数,将旋转拍摄的多张影像外方位元素进行传递。最后就可以根据多摄站上旋转拍摄的影像进行前方交会获取物方点坐标。

本文全景三维控制场数据、全站仪观测数据对旋转中心坐标进行了验证。实验结果表明,本文提出的旋转全景影像的摄影测量处理与方法可以解决现实场景中的受视野限制、控制点稀少的难题,是在困难场景进行近景摄影测量的一种新的、有效的手段。

## 参 考 文 献

- [1] Feng Wenhao. Close Range Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001:98-104 (冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2001:98-104)
- [2] Zhang Zuxun, Zhan Zongqian, Zhen Shunyi, et al. Photo Total Station System[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005(11):1-6 (张祖勋, 詹总谦, 郑顺义, 等. 摄影全站仪系统[J]. 测绘通报, 2005(11):1-6)
- [3] Zhan Zongqian. Research on Camera Calibration Based on Completely Flat Liquid Crystal Display [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006 (詹总谦. 基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究[D]. 武汉:武汉大学, 2006)
- [4] Zhan Zongqian, Zhang Zuxun, Zhen Shunyi, et al. 3D Model Reconstruction Based on Multi-baseline Stereo Matching [J]. *Geospatial Information*, 2004, 2(6): 17-19 (詹总谦, 张祖勋, 郑顺义, 等. 基于多基线立体匹配技术的三维重建[J]. 地理空间信息, 2004, 2(6): 17-19)
- [5] Zhang Jianqing, Hu Anwen. Method and Precision Analysis of Multi-baseline Photogrammetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 847-851 (张剑清, 胡安文. 多基线摄影测量前方交会方法及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(10): 847-851)
- [6] Zhang Yongjun, Zhang Yong. Analysis of Precision of Relative Orientation and Forward Intersection With High-Overlap Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(2): 126-130 (张永军, 张勇. 大重叠度影像的相对定向与前方交会精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(2): 126-130)
- [7] Chen Yi. New Computation Method of Collinearity Equation Suiting Digital Photogrammetry[J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(5): 660-663 (陈义. 数字摄影测量共线方程的一种新解法[J]. 同济大学学报, 2004, 32(5): 660-663)
- [8] Chen Yi, Lu Jue, Zheng Bo. Research on Close-Range Photogrammetry with Big Rotation Angle [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 4(11): 458-463, 468 (陈义, 陆钰, 郑波. 近景摄影测量中大角度问题的探讨[J]. 测绘学报, 2008, 4(11): 458-463, 468)
- [9] Lu Jue, Chen Yi, Zheng Bo. Research on Dependent Relative Orientation in Multi-baseline Close-range Photogrammetry[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(3): 442-447 (陆钰, 陈义, 郑波. 多基线近景摄影测量连续像对相对定向[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 442-447)
- [10] Chen Yi, Shen Yunzhong, Liu Dajie. A Simplified Model of Three Dimensional-Datum Transformation Adapted to Big Rotation Angle[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(12): 1 101-1 105 (陈义, 沈云中, 刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(12): 1 101-1 105)
- [11] Xu Fang, Mei Wensheng, Zhang Li. Research on the Calibration Model of Linear Array Panoramic Camera[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 417-421 (徐芳, 梅文胜, 张利. 线阵全景相机检校模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(4): 417-421)
- [12] Xu Fang, Mei Wensheng. Camera Calibration Effects of Rotation Matrix Expression[J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(2): 13-17, 21 (徐芳, 梅文胜. 旋转矩阵表达方法对相机检校的影响[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(2): 13-17, 21)
- [13] Mei Wensheng, Xu Fang, Chen Xiao. Design and Establish of Panoramic Indoor 3D Control Field[J]. *Journal of Geomatics*, 2011, 36(6): 39-42, 45 (梅文胜, 徐芳, 陈潇. 室内全景三维控制场设计与建立[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(6): 39-42, 45)

## Rotation Panorama Photogrammetry Method Based on Digital Camera

MEI Wensheng<sup>1</sup> HU Shuai peng<sup>1</sup> LI Mousi<sup>1</sup> QI Hongyu<sup>1</sup> XU Fang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatic, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Rotating panoramic camera is a common digital camera mounted on a rotating platform of high accuracy. A panoramic image is got with the camera horizontally rotating to shoot image in multi-location. The paper presents the imaging geometry model of rotating panoramic camera. We calibrate the rotating panoramic camera parameters. With few control points (more than 3), the coordinates of the rotating center, the rotating initial azimuth, and exterior orientation elements of each image are calculated. The object coordinates are got by space intersection of multi-station rotating images. The experiments show that the method is less restricted by vision and numbers of control point in actual photogrammetry. The precision of object coordinates is good with few control points. The method is a new effective means of close range photogrammetry in difficult scenes.

**Key words:** rotating panoramic camera; center offset; relative attitude; exterior orientation elements pass; few control points

**First author:** MEI Wensheng, PhD, professor, specializes in the precise engineering surveying and automatic measurement system.  
E-mail: wshmei@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41071292.