

# 一种全景相机系统的标定方法研究

崔红霞,李婷婷,王 宁,陈丽君

(渤海大学 信息科学与技术学院,辽宁 锦州 121000)

**摘要:**由多个摄像机组合构成的环视全景相机多应用于环境或者目标物体的全景拼接及全景高精度三维重建,相机系统的高精度标定是其应用的关键。为满足三维重建对环视全景相机的高精度标定要求,针对传统标定方法中没有充分利用两相机之间存在的固定的相对关系,影响到标定结果的精度和可靠性等问题,研究了一种稳健的相机高精度标定方法,也就是通过引入相机间固定的相对定向几何约束条件,建立附有约束条件的自检校光束法平差环视相机标定模型,解算相机的内外方位元素和内部相机间的几何关系。与传统检校方法的对比实验表明,约束条件的引入能够有效提升环视相机的标定稳定性,为全景相机系统的进一步应用提供稳健的高精度检校参数。该方法可推广到其他类似的全景相机系统的标定中。

**关键词:**机器视觉;全景相机;相对定向;光束法平差;三维重建

**中图分类号:**TP391.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2019)07-0194-06

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2019.07.039

## A Calibration Method for a Panoramic Camera System

CUI Hong-xia, LI Ting-ting, WANG Ning, CHEN Li-jun

(School of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The omnidirectional panoramic camera composed of multiple cameras is mostly used for panoramic mosaic of environment or target objects and panoramic high-precision three-dimensional reconstruction. The high precision calibration of the panoramic camera is the key to its application. In order to meet the requirement of high-precision calibration of omnidirectional panoramic camera for three-dimensional reconstruction, the traditional calibration methods do not make full use of the fixed relative relationship between the two cameras, which affects the accuracy and reliability of the calibration results. To solve these problems, we study a robust camera calibration method with high accuracy. By introducing the fixed relative orientation geometric constraints between cameras, a self-calibration beam adjustment panoramic camera calibration model with constraints is established. The geometric relationship between the inside and outside orientation elements of the camera and the inside camera is solved. Compared with the traditional calibration method, the experiment shows that the introduction of constraints can effectively improve the calibration stability of the ring-view camera, and provide robust calibration parameters for the further application of panoramic camera system. This method can be extended to the calibration of other similar panoramic camera systems.

**Key words:** machine vision; panoramic camera; relative orientation; bundle adjustment; three-dimensional reconstruction

## 0 引言

全景相机<sup>[1-3]</sup>是近年来摄影测量学和计算机视觉等领域研究的热点,多用于虚拟现实、智能交通、文物保护、影视拍摄等领域。一般地,全景相机由多个相机组成,以获取不同视角影像,是实现三维场景高精度快速重建的手段之一<sup>[4-6]</sup>。全景相机的标定内容包括确定相机的内方位元素(像主点、主距和畸变参数)以及相机的外方位元素<sup>[7]</sup>和相机间固定的相对定向关系。

传统的标定方法是在同一参考坐标系下对每台相机的内外方位元素分别标定,再利用外参数间接解算相机间的相对约束关系。这一类方法操作简单方便,但没有利用到相机之间的相对定向关系。文献[8-9]以立体相机为研究对象,利用激光扫描技术对相机进行标定并提高三维重建结果的精度,但没有利用相机间的约束条件;文献[10-12]以立体相机为研究对象,有约束条件限制,按照附有约束条件的间接平差模型进行

收稿日期:2018-09-25

修回日期:2019-02-13

网络出版时间:2019-03-21

**基金项目:**国家自然科学基金(41371425);辽宁省自然科学基金(20170540015);渤海大学实用型(攻关性)项目(071704103)

**作者简介:**崔红霞(1965-),女,博士,教授,硕导,研究方向为图像处理;李婷婷(1993-),女,硕士研究生,研究方向为图像处理。

**网络出版地址:**http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190321.0942.064.html

自检校光束法整体平差解算,有效地增加平差系统的多余观测数,提高标定的精度和稳健性;文献[13-16]以全景相机为研究对象,利用基于二次曲线、线性矩阵的奇异值、圆形标志点等方法对全景相机的各组成相机进行单机标定,再解算相机间的相对定向关系,实验结果显示,标定方法可行、有效,具有较高的标定精度。文中建立了一种附加约束条件的全景相机标定方法,即以共线条件方程为基础,将相机间内在的几何约束引入到自检校光束法平差模型,以实现一种全景相机系统的标定。

## 1 全景相机系统的标定

文中采用的全景相机由八个处于同一平面的网络摄像机构成,通过同步曝光的方式进行影像采集。标定场由分布在四个平面的800多块标志板组成。如图

$$\begin{aligned} x_{s_i} - x_{s_0} - \Delta x_{s_i} &= -f_s \frac{a_1(X_{As_i} - X_{Ss}) + b_1(Y_{As_i} - Y_{Ss}) + c_1(Z_{As_i} - Z_{Ss})}{a_3(X_{As_i} - X_{Ss}) + b_3(Y_{As_i} - Y_{Ss}) + c_3(Z_{As_i} - Z_{Ss})} \\ y_{s_i} - y_{s_0} - \Delta y_{s_i} &= -f_s \frac{a_2(X_{As_i} - X_{Ss}) + b_2(Y_{As_i} - Y_{Ss}) + c_2(Z_{As_i} - Z_{Ss})}{a_3(X_{As_i} - X_{Ss}) + b_3(Y_{As_i} - Y_{Ss}) + c_3(Z_{As_i} - Z_{Ss})} \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta x_{s_i} &= (x_{s_i} - x_{s_0})(k_{1s}r_{s_i}^2 + k_{2s}r_{s_i}^4) + [2(x_{s_i} - x_{s_0})^2 + r_{s_i}^2]p_{1s} + 2p_{2s}(x_{s_i} - x_{s_0})(y_{s_i} - y_{s_0}) + b_{1s}(x_{s_i} - x_{s_0}) + b_{2s}(x_{s_i} - x_{s_0}) \\ \Delta y_{s_i} &= (y_{s_i} - y_{s_0})(k_{1s}r_{s_i}^2 + k_{2s}r_{s_i}^4) + 2p_{1s}(x_{s_i} - x_{s_0})(y_{s_i} - y_{s_0}) + [2(y_{s_i} - y_{s_0})^2 + r_{s_i}^2]p_{2s} \\ r_{s_i} &= \sqrt{(x_{s_i} - x_{s_0})^2 + (y_{s_i} - y_{s_0})^2} \end{aligned}$$

其中,  $s(s=1,2,\dots,8)$  为相机编号;  $(x_{s_i}, y_{s_i})$  为  $s$  号相机像点的像平面坐标,其中  $i=1,2,\dots,n$ ;  $x_{s_0}, y_{s_0}$ 、 $f_s$  为相机影像的内方位元素;  $(X_{Ss}, Y_{Ss}, Z_{Ss})$  为摄站点的物方空间坐标;  $(X_{As_i}, Y_{As_i}, Z_{As_i})$  为相机物方点的物方空间坐标;  $a_j, b_j, c_j (j=1,2,3)$  为影像的3个外方位角元素组成的9个方向余弦;  $\Delta x_{s_i}$  和  $\Delta y_{s_i}$  分别表示相机影像的  $x, y$  方向的畸变误差;  $k_{1s}, k_{2s}$  为影像径向畸

变参数,  $p_{1s}, p_{2s}$  为影像切向畸变参数,  $b_{1s}, b_{2s}$  为影像仿射畸变参数。

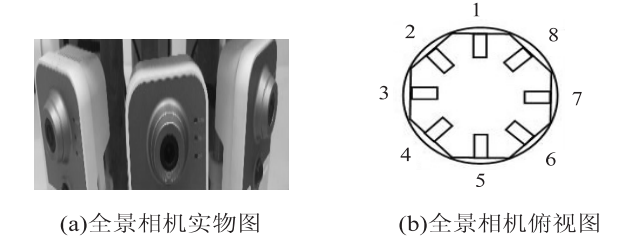


图1 全景相机

### 1.1 传统的相机检校方法

相机检校通常使用的方法有单像空间后方交会、自检校光束法区域网平差等。其数学模型为带有畸变方程的共线方程式,如下:

变参数,  $p_{1s}, p_{2s}$  为影像切向畸变参数,  $b_{1s}, b_{2s}$  为影像仿射畸变参数。

式1中共线方程的观测值与未知数之间是非线性函数,需要对其进行线性化,用一阶泰勒级数公式展开,再求得各相机相应元素改正数的系数,得到共线方程线性化公式如下:

$$\begin{aligned} c_{11}\Delta X_{Ss} + c_{12}\Delta Y_{Ss} + c_{13}\Delta Z_{Ss} + c_{14}\Delta\varphi_s + c_{15}\Delta\omega_s + c_{16}\Delta\kappa_s - c_{11}\Delta X_{s_i} - c_{12}\Delta Y_{s_i} - c_{13}\Delta Z_{s_i} + c_{17}\Delta x_{s_0} + \\ c_{18}\Delta y_{s_0} + c_{19}\Delta f_s + c_{31}\Delta k_{1s} + c_{32}\Delta k_{2s} + c_{33}\Delta p_{1s} + c_{34}\Delta p_{2s} + c_{35}\Delta b_{1s} + c_{36}\Delta b_{2s} - l_{xs} = 0 \\ c_{21}\Delta X_{Ss} + c_{22}\Delta Y_{Ss} + c_{23}\Delta Z_{Ss} + c_{24}\Delta\varphi_s + c_{25}\Delta\omega_s + c_{26}\Delta\kappa_s - c_{21}\Delta X_{s_i} - c_{22}\Delta Y_{s_i} - c_{23}\Delta Z_{s_i} + c_{27}\Delta x_{s_0} + \\ c_{28}\Delta y_{s_0} + c_{29}\Delta f_s + c_{41}\Delta k_{1s} + c_{42}\Delta k_{2s} + c_{43}\Delta p_{1s} + c_{44}\Delta p_{2s} - l_{ys} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{44}$  为相应的偏导数系数;  $\Delta X_{Ss}, \Delta Y_{Ss}, \Delta Z_{Ss}, \Delta\varphi_s, \Delta\omega_s, \Delta\kappa_s, \Delta X_{s_i}, \Delta Y_{s_i}, \Delta Z_{s_i}, \Delta x_{s_0}, \Delta y_{s_0}, \Delta f_s, \Delta k_{1s}, \Delta k_{2s}, \Delta p_{1s}, \Delta p_{2s}, \Delta b_{1s}, \Delta b_{2s}$  为每台相机相应元素改正数。

### 1.2 附有约束条件的全景相机检校方法

在传统的单机相机检校的自检校光束法平差模型的基础上,文中引入相机间约束条件即相对定向关系<sup>[17]</sup>,建立了附有约束条件的全景相机自检校光束法平差方法。以相邻相机  $m, n (m=1,2,\dots,7; n=2,3,\dots,8)$  为例,相机间的相对定向约束条件如下:

$$R_n^m = (R_m)^{-1} \cdot R_n \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X_n^m \\ Y_n^m \\ Z_n^m \end{bmatrix} = (R_m)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_n - X_m \\ Y_n - Y_m \\ Z_n - Z_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} R_0 &= [a \quad b \quad c]^T \\ a &= \begin{bmatrix} \cos\varphi * \cos\kappa - \sin\varphi * \sin\omega * \sin\kappa \\ -\cos\varphi * \sin\kappa - \sin\varphi * \sin\omega * \cos\kappa \\ -\sin\varphi * \cos\omega \end{bmatrix}^T \\ b &= \begin{bmatrix} \cos\omega * \sin\kappa \\ \cos\omega * \cos\kappa \\ -\sin\omega \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} \sin\varphi * \cos\kappa + \cos\varphi * \sin\omega * \sin\kappa \\ -\sin\varphi * \sin\kappa + \cos\varphi * \sin\omega * \cos\kappa \\ \cos\varphi * \cos\omega \end{bmatrix}^T$$

其中,  $o = m, n$ ;  $\varphi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$  为该相机对应的旋转角;  $\mathbf{R}_n^m$  为相邻相机  $m$  和  $n$  的相对旋转矩阵;  $\mathbf{R}_m$  和  $\mathbf{R}_n$  为相邻相机  $m$  和  $n$  的单独旋转矩阵;  $[X_n^m \ Y_n^m \ Z_n^m]^T$  是相机  $m$  和  $n$  的相对线元素;  $[X_n \ Y_n \ Z_n]^T$  为  $n$  号相机的外方位线元素坐标;  $[X_m \ Y_m \ Z_m]^T$  为  $m$  号相机的外方位线元素坐标。

考虑到全景相机系统中各个摄像机都是紧固相连的,可以假定相机之间的相对位置姿态是稳定的。利用全景相机在不同时刻拍摄若干组影像,则  $p$  时刻和  $q$  时刻相邻相机  $m$  和  $n$  之间存在如下约束关系:

$$(\mathbf{R}_n^m)^p - (\mathbf{R}_n^m)^q = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X_n^m \\ Y_n^m \\ Z_n^m \end{bmatrix}^p - \begin{bmatrix} X_n^m \\ Y_n^m \\ Z_n^m \end{bmatrix}^q = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & [(\Delta\varphi_m + \Delta\varphi_n + \Delta\omega_m + \Delta\omega_n + \Delta\kappa_m + \Delta\kappa_n)^p - (\frac{\partial R_n^m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial R_n^m}{\partial \varphi_n} \Delta\varphi_n + \frac{\partial R_n^m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial R_n^m}{\partial \omega_n} \Delta\omega_n + \frac{\partial R_n^m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m + \\ & \frac{\partial R_n^m}{\partial \kappa_n} \Delta\kappa_n)^q]_{21} - L_{21} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式 8 和式 9 方法相同,再将式 10 展开,如下:

$$\begin{aligned} & (\frac{\partial X_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial X_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial X_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial X_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial X_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m + \frac{\partial Y_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Y_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Y_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial Y_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \\ & \frac{\partial Y_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m + \frac{\partial Z_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Z_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Z_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial Z_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial Z_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m)^p - (\frac{\partial X_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial X_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial X_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \\ & \frac{\partial X_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial X_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m + \frac{\partial Y_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Y_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Y_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial Y_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial Y_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m + \frac{\partial Z_m}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \frac{\partial Z_n}{\partial X_n^m} \Delta X_n^m + \\ & \frac{\partial Z_m}{\partial \varphi_m} \Delta\varphi_m + \frac{\partial Z_m}{\partial \omega_m} \Delta\omega_m + \frac{\partial Z_m}{\partial \kappa_m} \Delta\kappa_m)^q - L_{W_i} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

文中探讨的全景相机标定方法,所采用的全景相机是由 8 个网络摄像机组组合而成,所涉及到的约束条件有 7 组,每相邻两相机之间的相对定向关系都是不变的。以 1.1 节的传统相机检校误差方程与相机间相对定向约束条件的误差方程<sup>[18-20]</sup>相结合,构建附有约束条件的全景相机的自检校光束法误差方程,其中方程 2 写成矩阵形式,如式 13 所示,式 7~10 写成矩阵的形式,如式 14 所示。

$$V_s = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 - L_1 \quad (13)$$

$$\mathbf{C} X_3 - L_2 = 0 \quad (14)$$

式 13、式 14 组成附有约束条件的间接平差模型。其中,  $V_s$  为观测数的改正值;  $X_1$  为相机内方位元素改正值;  $X_2$  为相机自身畸变参数改正值;  $X_3$  为相机外方位元素的改正值;  $L_1$ 、 $L_2$  为误差方程的常数项(其中  $i, j, \dots, p$  为每台相机的像点号),  $m$ 、 $n$  为相邻相机( $m = 1, 2, \dots, 7; n = 2, 3, \dots, 8$ );  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $C$  分别为所对应

$$\text{其中, } \mathbf{R}_n^m = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, a_{ij}(i, j = 1, 2, 3) \text{ 为}$$

相对旋转矩阵中的元素。

结合式 5 和式 6,考虑到式 5 中旋转矩阵的正交性,以主对角线以下的三个元素为例是相互独立的<sup>[11-12]</sup>。

具体约束方程为:

$$W_1 = a_{21} = [(\mathbf{R}_n^m)^p - (\mathbf{R}_n^m)^q]_{21} = 0 \quad (7)$$

$$W_2 = a_{31} = [(\mathbf{R}_n^m)^p - (\mathbf{R}_n^m)^q]_{31} = 0 \quad (8)$$

$$W_3 = a_{32} = [(\mathbf{R}_n^m)^p - (\mathbf{R}_n^m)^q]_{32} = 0 \quad (9)$$

$$W_4 = [X_n^m \ Y_n^m \ Z_n^m]^{T(p)} - [X_n^m \ Y_n^m \ Z_n^m]^{T(q)} = 0 \quad (10)$$

需要对约束方程线性化,按一阶泰勒级数公式将式 7 展开得到的线性化公式,如式 11。

即:

项的系数矩阵。根据式 13、式 14 构建其对应的附有约束条件的间接平差法方程,如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ N_{cc}^{-1}(\mathbf{C} N_{bb}^{-1} L_2 - L_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^T \mathbf{P} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{B} = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4]$ ,  $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T$ ,  $\mathbf{P}$  为权矩阵;  $N_{cc} = \mathbf{C}^T N_{bb}^{-1} \mathbf{C}$ ,  $N_{bb} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$ 。由式 16 可求解所有影像内参数、外方位元素和影像待定点坐标的改正数,如下所示:

$$\mathbf{X} = (N_{bb}^{-1} - N_{bb}^{-1} \mathbf{C}^T N_{cc}^{-1} \mathbf{C} N_{bb}^{-1}) L_1 + N_{bb}^{-1} \mathbf{C}^T N_{cc}^{-1} L_2 \quad (16)$$

解算过程中,为提高鲁棒性,利用验后定权迭代法进行迭代求解,并且迭代过程剔除残差大于 2 倍中误差的观测值;最后,利用任意时刻相邻相机获取的像对的外方位元素,根据式 3、式 4 计算其相对定向元素,

即可反算出任意相邻相机的位置和姿态<sup>[10-12]</sup>。

2 实验分析

文中所采用的实验检校场为三维标定场,由 800 余个标志板组成,实验对象为 8 个网络摄像头组成的全景相机,摄像机焦距约为 4 mm,获取的影像大小均为 2 048 pixel×1 920 pixel,拍摄距离约为 2 600 mm,标志板为 70 mm×70 mm 的标志物,实验场中分别对每块标志板进行数字编号,并以高精度全站仪测定所有控制点的三维空间坐标。对于第  $i$  (1,2,⋯,8) 个子相

机的第  $j$  幅影像( $j=1,2,3,4$ ),首先人工量测 4-6 个控制点,使其均匀分布于影像,以直接线性变换计算初始外方位元素,用于控制点反投影计算;利用初始的外方位元素以共线方程计算初始像点坐标以确定椭圆的区域;从起始点进行 8 邻域跟踪确定椭圆边界;基于最小二乘椭圆拟合的方法提取椭圆中心点坐标作为控制点精确的像点坐标并对其编码(如图 2 所示,1 号相机在同一摄站获取的不同角度影像的像点提取和编码)。图 2 是以 1 号相机为例在不同角度拍摄的检校场的局部图。

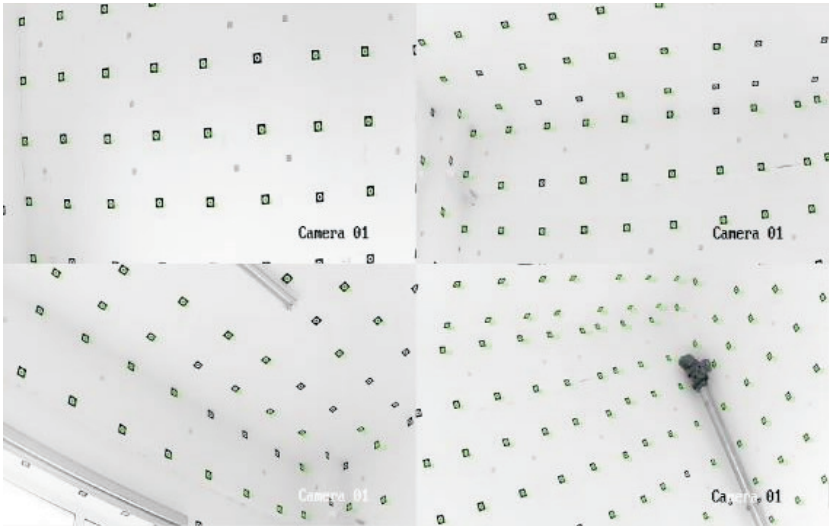


图 2 不同角度拍摄的检校场的局部图

将全景相机在不同摄站、不同姿态获取的实验场影像组合成 6 组影像,前 3 组影像,采用了三个摄站,每个相机在各摄站仅有四个姿态的影像;后 3 组影像,每个摄站 8 个姿态的影像;利用各组影像包含的标志点的空间坐标和像点坐标,完成传统方法和文中方法的检校实验。

2.1 检校结果分析

设方法 A 是传统独立相机的检校方法,方法 B 是采用了相机间的固定相对定向关系的检校方法;以相机 1、2、3 为例,分别以两种方法解算相邻相机的相对定向参数(位置、姿态),每相邻两相机之间的相对定向参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 相机 1、2 的相对定向参数比较

	$X_n^m$ /mm	$Y_n^m$ /mm	$Z_n^m$ /mm	$\varphi_n^m$ /(°)	$\omega_n^m$ /(°)	$\kappa_n^m$ /(°)
A(1-3)	-107.361	-7.969 4	43.202 9	-42.036 2	-2.160 6	-1.342 4
	-113.819	-7.485 3	48.552 8	-42.268 1	-2.068	-1.378 3
	-109.681	-8.668 8	30.920 2	-42.028 5	-2.321 6	-1.358 6
A(4-6)	-112.817	-7.641 8	48.987 4	-42.353 3	-2.570 6	-1.410 4
	-109.295 6	-6.004 9	49.233 1	-42.036 2	-2.373 3	-1.345 8
	-110.425	-8.393 1	45.150 2	-42.438 6	-2.314 2	-1.757 9
B(1-3)	-110.676 7	-6.045 6	45.555 7	-42.213 9	-2.282	-1.375 6
	-112.029 9	-6.388	48.552 8	-42.036 2	-2.268	-1.342 4
	-111.290 1	-5.185 1	46.313 6	-42.337	-2.394 7	-1.517 3
B(4-6)	-110.255 1	-6.142	45.552 7	-42.105 7	-2.235 3	-1.325 9
	-111.547 7	-6.136 1	46.517 9	-42.152	-2.212	-1.360 2
	-110.123 9	-6.528 2	45.134 3	-42.213 9	-2.291 6	-1.338 3

表 2 相机 2、3 的相对定向参数比较

	$X_n^m/mm$	$Y_n^m/mm$	$Z_n^m/mm$	$\varphi_n^m/(^{\circ})$	$\omega_n^m/(^{\circ})$	$\kappa_n^m/(^{\circ})$
A(1-3)	-100.105	2.305 3	33.386 1	-43.290 7	2.330 6	-2.007 5
	-90.474 1	8.122 7	27.588 9	-43.251 3	2.856 9	-1.316 3
	-96.502 5	5.210 9	34.703 9	-43.401	2.626 9	-1.585 2
A(4-6)	-94.390 8	6.160 7	35.215 6	-43.188 4	2.893	-1.679 4
	-93.793 5	3.592 9	32.393 2	-43.243 5	2.575 7	-1.391
	-98.134 7	5.268 7	34.488 8	-43.661 8	2.487 2	-1.471
B(1-3)	-98.271 8	6.750 6	34.842 6	-43.314 3	2.634 1	-1.611 6
	-96.372 8	7.068 1	36.878 4	-43.322 2	2.621	-1.369 5
	-98.080 4	7.897 6	37.27	-43.529 3	2.534 6	-1.579 4
B(4-6)	-96.704 9	7.729 7	36.065 7	-43.385 2	2.673 4	-1.547 7
	-96.602	7.592 3	36.024 9	-43.306 4	2.667 6	-1.530 1
	-97.271 8	6.993 3	35.768	-43.456 2	2.590 7	-1.542

由表 1、表 2 可以看出,利用方法 A(传统方法)检校单个相机再计算相机之间相对定向关系)的前 3 组相对定向参数波动很大,其原因在于外方位线元素和角元素之间存在很大的相关性,内外方位元素以及畸变参数之间存在很大的相关性,其检校的稳健性和精度受影像的姿态、摄站的布置、控制点的分布和数量等复杂因素的复合影响较大,因此导致整个检校结果的波动大<sup>[1,11,14,16]</sup>;方法 B 因引入了固定的相对定向约束条件有利于克服参数之间的相关性,前 3 组数据的波动性低于方法 A,但还是存在波动。后 3 组数据,因增加了每个摄站的影像数(不同姿态),方法 A 的检校结果也能趋于稳定,其 8 个子相机之间内部两两相机的相对定向三个方向的线元素的最大标准差(单位: mm)分别为 2.352、2.474、2.619,最小标准差分别为

1.230、1.391、1.465;内部各两两相机之相对定向角元素的最大标准差分别为 0.212、0.134、0.221,最小标准差分别为 0.05、0.04、0.01。方法 B 三个方向线元素的最大标准差分别为 1.031、0.513、0.693,最小标准差分别为 0.108、0.007、0.026;相对定向角元素的最大标准差分别为 0.006、0.028、0.008,最小标准差分别为  $5.06\times10^{-4}$ 、 $7.43\times10^{-5}$ 、 $8.06\times10^{-5}$ 。方法 B 的内部相对定向关系波动更小、可以忽略不计,更趋于稳定。

2.2 检校精度分析

标定场共有 809 个均匀分布的标志点,选择其中分布均匀的 112 个作为检查点,其余为控制点。利用方法 B 的检校结果,统计检查点在 8 个独立相机影像上的反投影像点中误差和检查点在 X、Y 和 Z 方向上的坐标中误差,如表 3 所示。

表 3 相机检查点误差统计

相机序号	RMS $x/\mu m$	RMS $y/\mu m$	RMS $xy/\mu m$	RMS $X/mm$	RMS $Y/mm$	RMS $Z/mm$
1	0.33	0.38	0.50	1.389 0	0.571 5	2.476 0
2	0.54	0.61	0.81	1.281 0	0.604 1	1.992 9
3	0.29	0.34	0.45	1.424 3	0.521 4	2.218 9
4	0.61	0.78	0.99	1.916 8	0.816 8	2.422 7
5	0.40	0.45	0.60	1.091 8	0.463 8	1.762 0
6	0.54	0.61	0.81	0.936 6	0.538 9	1.314 4
7	0.28	0.41	0.50	1.003 4	0.454 0	2.129 0
8	0.46	0.50	0.68	1.064 0	0.847 1	2.284 3

从表 3 可以看出,基于文中检校方法,7 个相机的反投影像点平面中误差均控制在 0.81  $\mu m$  以内,即小于 1/3 pixel(像元尺寸为 2.5  $\mu m$ ),其中 4 号相机的反投影误差大于 1/3 pixel 小于 1/2 pixel。检查点物方空间坐标误差在 X 方向和 Y 方向比 Z 方向小,X 方向

的误差在 2 mm 以内、Y 方向的误差在 1 mm 以内、Z 方向误差控制在 2.5 mm 内;考虑到摄影距离 2 600 mm,平面方向的相对精度达到 1/1 858,深度方向(Z 方向)的相对精度约为 1/1 253。但个别检查点本身误差较大,测量精度不高,尤其在深度方向的精度较差。



### 3 结束语

传统两个或两个以上相机组成的系统标定沿用单相机检校方法,方法简单,但容易出现相机之间的相对定向计算结果不一致的稳健性问题;对于多个相机组成的全景相机,各相机之间的相对定向关系标定的不一致,直接影响全景虚拟拼接成像的精度和稳定性,甚至无法全景虚拟成像。文中拓展单相机和立体相机检校方法,提出了一种附有约束条件的全景相机标定方法。多个网络摄像头构建的全景相机系统的标定实验证明,引入相对定向关系的标定方法能取得稳健的标定结果且检校精度较高,可推广至其他类似的全景相机系统的标定。为进一步提高测量精度,需要进一步分析控制点的数量、分布、控制点测量精度对全景相机检校精度的影响;进一步分析摄站的设置对检校精度的影响,研究相邻相机相对定向角元素和线元素约束条件的定权方法以提高检校精度。

#### 参考文献:

- [1] 梁荷东. 基于多摄像机的全景图像获取平台设计[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [2] 高露露,刘建军,任鑫,等. 基于结构相似度的全景相机立体像对图像质量评价[J]. 激光与光电子学进展,2014,51(7):55-61.
- [3] REN X, LI C L, LIU J J, et al. A method and results of color calibration for the Chang'e-3 terrain camera and panoramic camera[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(12):1557-1566.
- [4] 王珊,徐晓. 基于双目单视面的三维重建[J]. 光学学报,2017,37(5):199-207.
- [5] PROZOROV A V, PRIOROV A L. Three-dimensional reconstruction of a scene with the use of monocular vision[J]. Measurement Techniques, 2015, 57(10):1137-1143.
- [6] 陈坤,刘新国. 基于光线的全局优化多视图三维重建方法[J]. 计算机工程,2013,39(11):235-239.
- [7] GRUSSENMEYER P, KHALIL O A. Solutions for exterior

orientation in photogrammetry; a review[J]. Photogrammetric Record, 2010, 17(100):615-634.

- [8] 杜森,高明章,魏纪原. 基于激光点云辅助的相机标定方法研究[J]. 激光杂志,2016,37(10):89-93.
- [9] 程梦娇,申夏晶,肖江剑,等. 基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法[J]. 光学学报,2017,37(3):249-257.
- [10] 崔红霞,王鸿雁,刘佳琪,等. 一种低成本立体摄像机系统的标定和定量评价[J]. 激光与光电子学进展,2016,53(2):147-153.
- [11] 郑顺义,黄荣永,郭宝云,等. 附约束条件的立体相机标定方法[J]. 测绘学报,2012,41(6):877-885.
- [12] RAPCZYNSKI M, LILIENBLUM E, VON ENZBERG S, et al. Simultaneous multi-camera calibration based on phase-shift measurements on planar surfaces[C]//2014 IEEE international instrumentation and measurement technology conference. Montevideo, Uruguay: IEEE, 2014:175-180.
- [13] 梅文胜,胡帅朋,李谋思,等. 基于普通数码相机的旋转全景摄影测量方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2017,42(2):243-249.
- [14] 王珂,李瑞峰,赵立军. 基于统一球面投影机理的全景相机标定方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(z1):99-102.
- [15] 吴凡路,刘建军,任鑫,等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. 光学学报,2013,33(11):139-145.
- [16] 张烁,申振荣,魏士俨,等. 月面巡视探测器导航和全景相机标定方法研究[J]. 测绘通报,2014(1):25-27.
- [17] AHMAD F, KHAN R A. Eigenvectors of a rotation matrix[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 2009, 62(3):297-310.
- [18] 周麒,杨永明,王振洲. 基于双目立体视觉的结构光测量技术[J]. 计算机工程,2018,44(7):244-249.
- [19] ALEMN-FLORES M, ALVAREZ L, GOMEZ L, et al. Camera calibration in sport event scenarios[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(1):89-95.
- [20] 李竹良,赵宇明. 基于单幅图片的相机完全标定[J]. 计算机工程,2013,39(11):5-8.