

一种低成本立体摄像机系统的标定和定量评价

崔红霞 王鸿雁 刘佳琪 刘畅

渤海大学信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013

摘要 低成本立体摄像机需要高精度的标定和定量的精度评定才能应用于三维重建。推导了同步解算摄像机间的平台参数和摄像机内部参数的自检校光束法平差模型。利用全部标定参数及其协方差矩阵,建立了基于相对定向的立体摄像机标定精度的定量评价理论模型。利用低成本网络摄像机构建立体摄像机系统,对其实施标定和精度定量评定。实验表明,同步标定立体摄像机的内部参数、平台参数可以提高标定的精度和稳健性。考虑参数相关性的定量评价模型,能够更稳健地反映立体摄像机的标定精度。

关键词 机器视觉; 摄像机标定; 误差传播; 多目视觉; 三维重建

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.021503

Calibration and Quantitative Evaluation for a Low-Cost Stereo-Camera System

Cui Hongxia Wang Hongyan Liu Jiaqi Liu Chang

College of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China

Abstract Aiming at realizing three-dimension reconstruction, both the high-precision calibration of the low-cost stereo-camera system and the assessment of the quantitative accuracy are accomplished. The self-calibration bundle adjustment model that can calculate the platform parameters between cameras and internal parameters of camera is deduced. Based on relative orientation of the stereo-camera, a theoretical model for accuracy evaluation of ration is established by taking advantage of total calibration parameters and its covariance matrix. A stereo-camera system is established by using low-cost web camera. The calibration and accuracy evaluation of ration of the proposed system is carried out. Experimental results show that simultaneous determination of internal parameters and platform parameters of stereo-camera can improve the calibration accuracy and the stability. Quantitative evaluation model of considering parameters relativity can reflect the calibration accuracy for the stereo-camera system robustly.

Key words machine vision; camera calibration; error propagation; multi-vision; 3D reconstruction

OCIS codes 150.1488; 150.6910; 150.5495

1 引言

双目或者多目立体测量系统一般由两个或者多个相对几何关系固定的摄像机构成,以此类系统获取被测目标和场景的多个视角的影像,利用特征提取、立体匹配获取各影像的同名点对,基于交会测量的原理实现待测目标、场景的高精度快速三维重建^[1-4]。用于测量目的的双目或多目视觉测量系统在使用前,需要高精度标定^[5],标定内容包括各摄像机的内部参数和平台参数。其中,内部参数包括每个摄像机的内方位元素、畸变参数,平台参数则以各摄像机像空坐标系之间的相对定向关系(3个旋转角和3个线元素)来表达。为了达到高精度测量的目的,常采用分步方法来标定此类立体测量系统,即在同一个参考坐标系下分别对每个摄像机的内、外参数进行标定,利用标定的外参数计算摄像机间的相对定向关系也就是平台参数。但是标定过程没有考虑两个摄像机间的相对定向约束关系,导致立体摄像机各时刻获取的平台参数存在差异,为提高标定结果的精度和可靠性,一类采用对平台参数再次优化的方法^[6-11];另一类则为引入约束条件的分步标定法,即将相机间的相对定向关系作为约束条件引入立体摄像机的标定,求解两个摄像机的内、外方

收稿日期: 2015-08-21; 收到修改稿日期: 2015-10-27; 网络出版日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(41371425)、辽宁省自然科学基金(2013010251-401,2013020048)

作者简介: 崔红霞(1969—),女,博士,教授,主要从事摄影测量和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: cuihongxia87021@163.com

位元素,间接解算平台参数。文献[12]利用该方法标定双目拼接组合相机,用于航空摄影测量;文献[13]以该方法标定一套结构光立体测量系统,并用于物体三维重建。两种方法相较,后者在标定算法中引入了摄像机间的固定的几何约束关系,选权及解算过程更复杂,但稳健性更强。

为降低视觉测量系统的成本,本文选用低成本的高清网络摄像头构建了立体视觉测量系统,此类摄像头价格仅在几百元,远低于已被计算机视觉和摄影测量领域广泛采用的上万元的数码相机。为了将此类摄像头用于量测的目的,不但需要标定各摄像机的内部参数和摄像机间的相对定向参数,而且对此类多目视觉测量系统的标定精度和稳定性进行定量的评定也极为重要。本文推导了内部参数和平台参数直接解算的自检校光束法平差模型,以同步标定立体摄像机系统的内部参数和平台参数。此外,利用相对定向原理,提出基于相对定向原理的立体摄像机标定精度定量评定模型,以定量评价立体摄像机标定的精度和稳定性。

2 立体摄像机系统的构成

如图1所示,设计的多目摄像机系统能实现场景三维重建。任意两个摄像机可组成一个立体摄像机,摄像机固定在底座的支架上,摄像机分为上、下两层,上、下相邻的两个摄像机,左、右相邻的两个摄像机可分别组成立体摄像机系统。



图1 多目立体摄像机系统

Fig.1 Multi-vision stereo-camera system

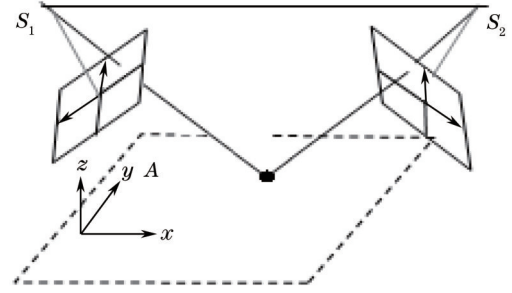


图2 立体摄像机的坐标系统

Fig.2 Stereo-camera coordinate system

令 S_i 为 i 号摄像机的投影中心,在物方坐标系的外方位线元素矢量为 $(X_{s_i}^m, Y_{s_i}^m, Z_{s_i}^m)^T$; 角元素为 $(\varphi_i^m, \omega_i^m, \kappa_i^m)$, 由角元素构造的旋转矩阵为 R_i^m ; 物方点 $P_{j,i}(X_{j,i}, Y_{j,i}, Z_{j,i})$ 在摄像机像平面上的像点为 $p_{j,i}(x_{j,i}, y_{j,i})$, 其中 $j=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, 3, \dots, 16$ 。理想情况下,物点 $P_{j,i}$ 、无畸变的像点 $p_{j,i}$ 及投影中心 S_i 是严格共线的,像空间坐标系和物方摄影测量坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_{j,i} - x_{i,0} - \Delta x_{j,i} \\ y_{j,i} - y_{i,0} - \Delta y_{j,i} \\ -f_i \end{bmatrix} = \lambda_{j,i} \cdot (R_i^m)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{j,i} - X_{s_i} \\ Y_{j,i} - Y_{s_i} \\ Z_{j,i} - Z_{s_i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 λ_j 为比例因子,像主点坐标 $(x_{i,0}, y_{i,0})$ 、主距 f_i 为摄像机的内方位元素。 $\Delta x_{j,i}$, $\Delta y_{j,i}$ 为像点 $p_{j,i}(x_{j,i}, y_{j,i})$ 的畸变差,采用较为严格的7参数畸变模型^[14]

$$\begin{cases} \Delta x_{j,i} = \bar{x}_{j,i} r_{j,i}^2 k_{1i} + \bar{x}_{j,i} r_{j,i}^4 k_{2i} + \bar{x}_{j,i} r_{j,i}^6 k_{3i} + (2\bar{x}_{j,i}^2 + r_{j,i}^2) p_{1i} + 2p_{2i} \bar{x}_{j,i} \bar{y}_{j,i} + b_{1i} \bar{x}_{j,i} + b_{2i} \bar{x}_{j,i} \\ \Delta y_{j,i} = \bar{y}_{j,i} r_{j,i}^2 k_{1i} + \bar{y}_{j,i} r_{j,i}^4 k_{2i} + \bar{y}_{j,i} r_{j,i}^6 k_{3i} + 2p_{1i} \bar{x}_{j,i} \bar{y}_{j,i} + (2\bar{y}_{j,i}^2 + r_{j,i}^2) p_{2i} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $r_{j,i}^2 = (x_{j,i} - x_{i,0})^2 + (y_{j,i} - y_{i,0})^2$, $\bar{x}_{j,i} = (x_{j,i} - x_{i,0})$, $\bar{y}_{j,i} = (y_{j,i} - y_{i,0})$, k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数, p_1, p_2 为偏心畸变系数, b_1, b_2 为影像坐标的仿射变形和剪切变形系数。 $(x_{i,0}, y_{i,0})$ 、 f_i 以及7个畸变系数统称为 i 号摄像机的内部参数。以1,2号摄像机组成立体摄像机,1号摄像机为参考摄像机,在静态的摄影测量环境中,1,2号摄像机具有固定的几何约束关系。立体摄像机的平台参数包括三个平移因子和三个旋转角,其中平移矢量定义为 $[X_2^1 \ Y_2^1 \ Z_2^1]^T$, 相对旋转角为 φ_2^1 、 ω_2^1 、 κ_2^1 , 其对应的旋转为 R_2^1 。对于 T 时刻获取的立体像对 I_1 、 I_2 , 以 I_1 的像空间坐标系为参考坐标系, I_2 相对于参考坐标系的外方位元素也就是立体摄像机的平台参数,

$$\begin{cases} [X_2^1 \ Y_2^1 \ Z_2^1]^T = R_1^{-1} [X_{s_2} - X_{s_1} \ Y_{s_2} - Y_{s_1} \ Z_{s_2} - Z_{s_1}]^T \\ R_2^1 = (R_1^m)^{-1} R_2^m \end{cases}. \quad (3)$$

用于测量目的的立体摄像机,每个摄像机内部参数(包括内方位元素、畸变系数),以及平台参数都需要高精度标定。

3 立体摄像机系统的标定与精度评定

3.1 立体摄像机的标定

在静态的环境中,摄像机间的几何约束关系不变。因此,以其中的一个摄像机为主摄像机,其他摄像机的外方位元素能用主摄像机的外方位元素和平台参数来表达。如上所述,1、2号摄像机组成立体摄像机,1号摄像机为参考摄像机,(3)式代入(2)式,则以 I_1 的外方位元素和立体摄像机的平台参数表示的 I_2 的共线方程为

$$\begin{bmatrix} x_{j,2} - x_{20} - \Delta x_{j,2} \\ y_{j,2} - y_{20} - \Delta y_{j,2} \\ -f_2 \end{bmatrix} = \lambda_j (\mathbf{R}_2)^{-1} \left\{ (\mathbf{R}_1)^{-1} \begin{bmatrix} X_j^m - X_{s_1} \\ Y_j^m - Y_{s_1} \\ Z_j^m - Z_{s_1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_2^1 \\ Y_2^1 \\ Z_2^1 \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, n$ 。

由(2)式(其中, $i = 1$)导出 I_1 的共线方程以及 I_2 的共线方程(4)式分别按照泰勒级数展开,以像点坐标为观测值的自检校光束法平差的总误差方程为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & B_1 & C_1 & 0 \\ 0 & A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $X_1 = [\Delta x_{0_1}, \Delta y_{0_1}, \Delta f_1, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta b_1, \Delta b_2]^T$, $X_2 = [\Delta x_{0_2}, \Delta y_{0_2}, \Delta f_2, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta b_1, \Delta b_2]^T$ 分别为1、2号摄像机的内部参数(内方位元素和畸变参数)改正数向量, $X_3 = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T$ 为空间点坐标未知数增量向量, $X_4 = [\Delta \varphi_1, \Delta \omega_1, \Delta \kappa_1, \Delta X_{s_1}, \Delta Y_{s_1}, \Delta Z_{s_1}]^T$ 为 I_1 的外方位元素改正数向量,立体摄像机平台参数改正数向量为 $X_5 = [\Delta \varphi_2, \Delta \omega_2, \Delta \kappa_2, \Delta X_2^1, \Delta Y_2^1, \Delta Z_2^1]^T$ 。 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_2$ 分别为对应系数向量, L_1, L_2 分别为 I_1, I_2 的像点坐标观测向量、常数向量。显然,(5)式模型仍为间接平差模型,如果有 l 个立体像对, n 个未知物方点,未知数个数 $6 + 6l + 3n + 2 \times 10$; 而利用常规的自检校光束法平差,未知数个数 $12l + 3n + 2 \times 10$ 。显然,当立体像对数大于2时,前者的未知数个数小于传统的自检校光束法平差,但观测值个数相等,其自由度更大,稳健性更强;根据最小二乘平差原理,构建法方程,求解未知数,反复迭代趋近,逐次修正各系数及常数项值,计算得到立体像对左、右影像的内部元素、左影像的外方位元素、平台参数、空间点坐标(包括控制点坐标)。

3.2 立体摄像机标定的精度定量估计

如图2所示,若立体摄像机的内部参数和平台参数已知且无误差,像点坐标无误差,则立体像对同名光线在核面内相交,即模型点上下视差为零^[5]。固定1号摄像机,同名点对 p_{j1}, p_{j2} 和摄影基线共面,其中,摄影基线矢量为 $[X_2^1, Y_2^1, Z_2^1]^T$,共面条件为^[5]

$$F = \begin{vmatrix} X_2^1 & Y_2^1 & Z_2^1 \\ X_{1,j} & Y_{1,j} & Z_{1,j} \\ X_{2,j} & Y_{2,j} & Z_{2,j} \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

式中 $\begin{bmatrix} X_{1,j} \\ Y_{1,j} \\ Z_{1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,j} - x_{01} + \Delta x_{1,j} \\ y_{1,j} - y_{01} + \Delta y_{1,j} \\ -f_1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} X_{2,j} \\ Y_{2,j} \\ Z_{2,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2,j} - x_{02} + \Delta x_{2,j} \\ y_{2,j} - y_{02} + \Delta y_{2,j} \\ -f_2 \end{bmatrix}$, $\Delta x_{i,j}, \Delta y_{i,j}$ ($i=1,2$) 为同名像点对的畸变改正

量,如(2)式所示。 a'_k, b'_k, c'_k ($k=1,2,3$) 为影像 I_2 的旋转矩阵的9个元素。由共面条件(6)式,进一步得到同名点对 p_{j1}, p_{j2} 的模型点上下视差

$$Q_j = \frac{F_j}{X_{1,j}Z_{2,j} - Z_{1,j}X_{2,j}} = N_{1,j}Y_{1,j} - N_{2,j}Y_{2,j} - Y_2^1, \quad (7)$$

式中 $N_{1,j} = \frac{X_2^1 Z_{2,j} - Z_2^1 X_{2,j}}{X_{1,j} Z_{2,j} - Z_{1,j} X_{2,j}}$, $N_{2,j} = \frac{X_2^1 Z_{1,j} - Z_2^1 X_{1,j}}{X_{1,j} Z_{2,j} - Z_{1,j} X_{2,j}}$ 。

将6个平台参数、20个内部参数(包括各摄像机内方位元素和畸变系数)视为未知数,则全微分的矩阵形式为

$$dQ_j = [M_1 \quad M_2 \quad M_3] \cdot dX, \quad (8)$$

式中

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_j}{\partial x_{01}} & \frac{\partial Q_j}{\partial y_{01}} & \frac{\partial Q_j}{\partial f_1} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{1_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{2_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{3_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial p_{1_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial p_{2_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial b_{1_1}} & \frac{\partial Q_j}{\partial b_{2_1}} \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_j}{\partial x_{02}} & \frac{\partial Q_j}{\partial y_{02}} & \frac{\partial Q_j}{\partial f_2} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{1_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{2_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial k_{3_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial p_{1_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial p_{2_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial b_{1_2}} & \frac{\partial Q_j}{\partial b_{2_2}} \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_j}{\partial \varphi_2^1} & \frac{\partial Q_j}{\partial \omega_2^1} & \frac{\partial Q_j}{\partial \kappa_2^1} & \frac{\partial Q_j}{\partial X_2^1} & \frac{\partial Q_j}{\partial Y_2^1} & \frac{\partial Q_j}{\partial Z_2^1} \end{bmatrix},$$

$$dX = [X_1 \quad X_2 \quad X_3], \quad X_1 = [\Delta x_{01} \quad \Delta y_{01} \quad \Delta f_1 \quad \Delta k_{1_1} \quad \Delta k_{2_1} \quad \Delta k_{3_1} \quad \Delta p_{1_1} \quad \Delta p_{2_1} \quad \Delta b_{1_1} \quad \Delta b_{2_1}],$$

$$X_2 = [\Delta x_{02} \quad \Delta y_{02} \quad \Delta f_2 \quad \Delta k_{1_2} \quad \Delta k_{2_2} \quad \Delta k_{3_2} \quad \Delta p_{1_2} \quad \Delta p_{2_2} \quad \Delta b_{1_2} \quad \Delta b_{2_2}],$$

$$X_3 = [\Delta \varphi_2^1 \quad \Delta \omega_2^1 \quad \Delta \kappa_2^1 \quad \Delta X_2^1 \quad \Delta Y_2^1 \quad \Delta Z_2^1].$$

左影像 I_1 的内方位元素和偏导数表示为

$$\frac{\partial Q_j}{\partial x_{01}} = \frac{\begin{vmatrix} X_2^1 & Y_2^1 & Z_2^1 \\ -1 & 0 & 0 \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial y_{01}} = \frac{\begin{vmatrix} X_2^1 & Y_2^1 & Z_2^1 \\ 0 & -1 & 0 \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial f_1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ 0 & 0 & -1 \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial k_1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ (x_{1j} - x_0)r_{1j}^2 & (y_1 - x_0)r_{1j}^2 & 0 \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}. \quad (9)$$

同理,右影像 I_2 的内方位元素和偏导数表示为

$$\frac{\partial Q_j}{\partial x_{02}} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ -a_1 & 0 & 0 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial y_{02}} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ 0 & -b_2 & 0 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial f_2} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ 0 & 0 & -c_3 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial k_1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ (x_{2j} - x_0)r_{2j}^2 & (y_{2j} - x_{02})r_{2j}^2 & 0 \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}. \quad (10)$$

平台参数的偏导数表示为

$$\frac{\partial Q_j}{\partial X_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial Y_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial Z_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ X_{2j} & Y_{2j} & Z_{2j} \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad \frac{\partial Q_j}{\partial \varphi_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ -Z_{2j} & X_{1j} & 0 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \omega_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ -Y_{2j} \sin \varphi & X_{2j} \sin \varphi - Z_{2j} \cos \varphi & -X_{2j} \cdot b_3 + Y_{2j} \cdot a_3 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}},$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \kappa_2^1} = \frac{\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_{1j} & Y_{1j} & Z_{1j} \\ -X_{2j} \cdot c_3 + Z_{2j} \cdot b_3 & X_{2j} \cdot c_3 - a_3 \cdot Z_{2j} & -X_{2j} \cdot b_3 + Y_{2j} \cdot a_3 \end{vmatrix}}{X_{1j}Z_{2j} - Z_{1j}X_{2j}}. \quad (12)$$

根据协方差传播定律,令立体摄像机标定平差解算过程同时获取的摄像机内部元素和平台参数的协方差阵为 σ_x (若不考虑参数之间的相关性,则 σ_x 为对角阵)。则由(8)式进一步推导出模型点上下视差的方差为

$$M_{Q_j} = [M_1 \quad M_2 \quad M_3] \cdot \sigma_x \cdot [M_1 \quad M_2 \quad M_3]^T. \quad (13)$$

假如立体像对上有 n 对同名像点,且摄影比例尺为 $m = f/H$ (其中, m 为焦距, H 为摄影距离),则模型点归化到影像上的上下视差总体的平均理论精度可计算为

$$\delta_{\text{RMS}_M} = m \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_{Q_j}}. \quad (14)$$

而实际精度则定义为所有模型点上下视差中误差,表示为

$$\delta_{\text{RMS}_Q} = m \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_j}. \quad (15)$$

理论精度应高于实际精度,能反映实际精度,且二者都能反映立体摄像机平台参数和内部参数的真实精度。由于摄像机的内方位元素、畸变系数和外方位元素同步解算,参数之间存在不可避免的相关性,若不考虑参数相关性时,则得到的理论精度会低于实际精度,无法正确地反映立体摄像机参数的真实精度。

4 实验分析

采用如图1所示的多目视觉测量系统,2015年3月8日以1、2号摄像机组成立体摄像机,其中,两个摄像机焦距均约为4 mm,获取的影像大小均为1280 pixel×720 pixel。以该立体摄像机以不同的位置和角度获取了平面格网的12个立体像对,拍摄距离均约为1000 mm;标定板上相邻两个标志点的距离为50 mm。对于每个立体像对,以半自动的方式对影像格网点进行精密提取和识别,其中均匀分布的30个格网点的影像坐标作为控制点,30个点作为检查点。以传统分步标定的方法为方法A,2.1节所述为方法B。如表1所示,可以看出,方法A中各像对独立解算的平台参数的线元素的最大差异发生在Y方向,其值达到8 mm,角元素的最大差发生在 ω 方向,最大达到0.6°;方法A获取的各像对相对定向元素的均值作为立体摄像机的平台参数,存在不确定性;而方法B确定唯一的一组平台参数,标定结果稳定。

表1 立体摄像机的平台参数

Table 1 Platform parameters for the stereo camera

	X_2^1/mm	Y_2^1/mm	Z_2^1/mm	$\varphi_2^1/(\text{°})$	$\omega_2^1/(\text{°})$	$\kappa_2^1/(\text{°})$
1 st image pair	117.1131	-218.3595	-39.7808	1.2477	-12.1821	2.8958
2 nd image pair	119.764	-217.7594	-31.7789	1.6079	-12.6593	2.9905
3 rd image pair	110.8935	-222.1837	-39.8294	1.6554	-12.2466	2.977
4 th image pair	121.859	-220.3818	-40.5095	1.1671	-12.7077	3.1741
5 th image pair	119.0064	-212.9153	-35.7196	1.3472	-12.1169	2.9354
6 th image pair	121.8271	-214.1614	-34.1385	1.1822	-12.3862	2.7369
7 th image pair	120.0664	-215.1384	-40.8577	1.3915	-12.4131	3.1968
8 th image pair	117.0357	-219.4388	-39.0016	1.4873	-12.3071	2.8212
9 th image pair	119.1732	-217.3056	-39.3373	1.2514	-12.0194	3.1617
10 th image pair	120.2711	-216.1119	-32.5562	1.1776	-12.5255	2.9162
11 th image pair	110.1797	-220.3444	-35.0382	1.1693	-12.1139	2.9585
12 th image pair	112.4119	-210.5677	-33.7196	1.4541	-12.4571	3.0104
Average value of method A	117.4668	-217.056	-36.8556	1.344892	-12.3446	2.981208
Method B	114.830	-225.984	-41.338	1.16631	-12.9765	2.71446

如图3所示,分别利用方法A、B标定的参数(包括各摄像机的内方位元素、畸变系数以及立体摄像机的平台参数)以(15)式计算12个立体像对的上下视差的实际精度,方法B的实际精度普遍高于方法A。当将各标定参数视为独立参数,忽略参数之间的相关性时,方法B的理论精度 δ_{RMS_T} 为 $\pm 1.67 \sim \pm 2.65$ pixel,波动大且高于其实际精度 $\pm 0.81 \sim \pm 1.42$ pixel,无法反映立体摄像机标定的真实精度;而考虑参数之间的相关性计算得到的理论精度 δ_{RMS_M} 在 $\pm 0.66 \sim \pm 1.14$ pixel内波动,波动范围小且低于实际精度,能够反映立体摄像机标定的真实精度。

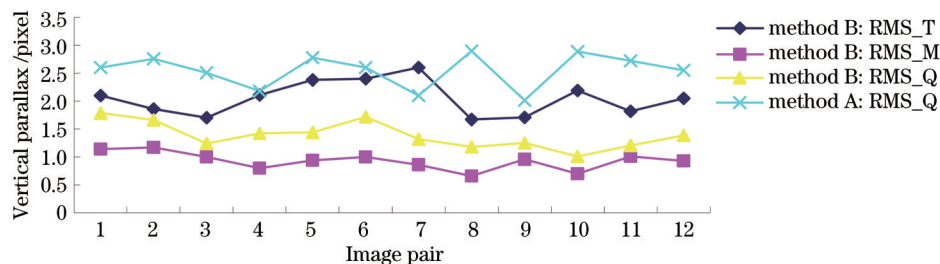


图3 立体像对上下视差中误差

Fig.3 Error of vertical parallax for stereo image pair

2015年3月14日以立体摄像机获取标定板的任意8个立体像对,半自动高精度提取格网点坐标,利用方法A、B的标定结果,以空间前方交会分别计算各像对内的30个检查点的物方空间坐标,其在 X 、 Y 和 Z 三个方向上的平均中误差分别为1.88, 1.99, 3.43 mm以及1.37, 1.33, 2.75 mm,方法B的三维测量精度普遍高于方法A。考虑到摄影距离约为1000 mm,该立体摄像机的三维测量的平面相对精度可以达到1/526,高程的相对精度可以达到1/363,。如图4所示,利用方法B标定的内方位元素和畸变系数,依据(2)式以纠正原始的存在畸变的立体像对,得到理想的无畸变影像。

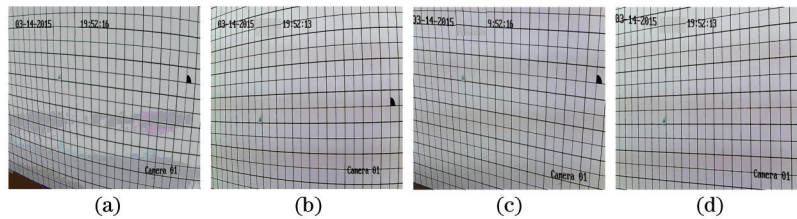


图4 影像畸变纠正。(a) 畸变左图像; (b) 畸变右图像; (c) 无畸变左图像; (d) 无畸变右图像
Fig.4 Distortion correction for image. (a) Left image with distortion; (b) right image with distortion; (c) left image without distortion; (d) right image without distortion

5 结 论

利用本文方法标定低成本网络摄像头构成的双目立体摄像机,获得了较稳定的标定结果,定量分析表明,该系统可以用于中等精度的三维重建。参数之间存在不可避免的相关性,基于双目或多目视觉测量的三维重建需要使用同步标定的内方位元素、畸变参数、平台参数。此外,为正确评定双目或者多目立体摄像机、单摄像机标定的精度,应该提供全部标定参数及其协方差矩阵。项目组正采用该方法对图1的其他摄像机进行标定。为了进一步提高标定的精度,在实际应用中,还需要进一步提高平面标定板的精度和像点量测的精度,同时增加摄站,并使每个物方点都能多条光束交会。在高精度的摄影测量应用中还需要考虑畸变随距离变化的因素,探索高精度的畸变模型。此外,利用该方法,项目组正在基于三维室外控制场对系列多视组合航空相机^[16]实施高精度静态标定和精度评定。

参 考 文 献

- Zheng Shunyi, Wang Xiaonan, Ma Dian. A convenient 3D reconstruction method of small objects[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 147-152.
郑顺义, 王晓南, 马 电. 一种便捷式小型物体三维重建方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2): 147-152.
- Zhang Jianqing, Xiang Hui, Zheng Shunyi. Analysis of teeth repositioning based on stereo images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan Univers, 2008, 33(9): 934-938.
张剑清, 向 辉, 郑顺义. 基于立体图像的牙体重定位分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(9): 934-938.
- Sun Junhua, Wu Ziyang, Liu Qianzhe, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633-640.
孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
- Zhou Jiali, Zhang Shuyou, Yang Guoping. A 3D face reconstruction and recognition method based on passive binocular stereo vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(2): 123-131.
周佳立, 张树有, 杨国平. 基于双目被动立体视觉的三维人脸重构与识别[J]. 自动化学报, 2009, 35(2): 123-131.
- Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- Sun Dongmei, Zhang Guangming, Chen Yuming. Camera extrinsic parameters calibration algorithm research of binocular vision system[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(4): 598-602.
孙冬梅, 张广明, 陈玉明. 双目视觉测量系统摄像机外部参数标定研究[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 598-602.
- Lin Yimin, Lü Naiguang, Lou Xiaoping, *et al.*. Robot vision system for 3D reconstruction in low texture environment[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 540-549.
林义闽, 吕乃光, 娄小平, 等. 用于弱纹理场景三维重建的机器人视觉系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 540-549.
- Shi Yi, Liu Changjie, Guo Yin, *et al.*. Measurement system of geometric parameters for overhead line system based on binocular vision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1936-1942.

- 石 轶, 刘常杰, 郭 寅, 等. 基于双目视觉的接触网几何参数测量系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1936-1942.
- 9 Bruno F, Bianco G, Muzzupappa M, *et al.*. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(4): 508-518.
- 10 Deng Jianhui, Ma Zi, Hu Ying. Line structured light parameter calibration based on stereovision[J]. Journal Optoelectronics Laser, 2011, 22(12): 1836-1841.
- 聂建辉, 马 孜, 胡 英. 利用立体视觉的线结构光参数标定[J]. 光电子·激光, 2011, 22(12): 1836-1841.
- 11 Fan Yabing, Huang Guiping, Gao Baohua, *et al.*. Quick calibration for external parameter in trinocular stereo industrial photogrammetry system[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2012, 21(5): 48-52.
- 范亚兵, 黄桂平, 高宝华, 等. 三目立体工业摄影测量系统外部参数的快速标定[J]. 测绘工程, 2012, 21(5): 48-52.
- 12 Tommaselli A M G, Galo M, De Moraes M V A, *et al.*. Generating virtual images from oblique frames[J]. Remote Sensing, 2013, 5(4): 1875-1893.
- 13 Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Guo Baoyun, *et al.*. Stereo-camera calibration with restrictive constraints[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(6): 877-885.
- 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.
- 14 Cui Hongxia, Sun Jie, Lin Zongjian, *et al.*. Research on calibration of the non-measurement camera[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(1): 105-108.
- 崔红霞, 孙 杰, 林宗坚, 等. 非量测数码相机的畸变差检测研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(1): 105-108.
- 15 Yuan Xiuxiao, Wu Zhenli, Ji Shunping. Theoretical accuracy effect on vertical parallax of relativities between exterior orientation elements obtained via POS[J]. Geomatics And Information Science of Wuhan University, 2009, 34(8): 889-893.
- 袁修孝, 吴珍丽, 季顺平. POS 影像外方位元素相关性对模型上下视差理论精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(8): 889-893.
- 16 Cui Hongxia, Lin Zongjian, Meng Wenli *et al.*. Relative self-calibration of large frame digital camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 81-85.
- 崔红霞, 林宗坚, 孟文利, 等. 大面阵数码相机相对自检校[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 81-85.

栏目编辑: 苏 岑