

引用格式: LI Cailin, SU Benya, GUO Baoyun, et al. Camera Calibration Method with Multi-condition Constraints Based on Laser Points[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0415001

李彩林, 苏本娅, 郭宝云, 等. 基于激光点云多条件约束的相机检校方法[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0415001

基于激光点云多条件约束的相机检校方法

李彩林, 苏本娅, 郭宝云, 王志勇, 朱夫宏

(山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000)

摘 要: 为了克服相机检校对二维/三维检校场的依赖, 提出一种基于激光点云多条件约束的相机检校方法。该方法通过对相机获取的多视影像进行光束法平差获得初始相机参数; 利用影像点云与其最近的激光点云之间的位置关系, 以共线方程为基础模型, 建立多条件约束的相机检校数学模型; 使用不等式约束的最小二乘法平差迭代解算相机参数。将本文方法与基于三维控制场的检校精度进行了实验对比分析, 结果表明本文方法与基于三维控制场的检校精度相当, 两者反投影平均误差相差小于 0.1 pixel, 验证了本文方法在没有传统检校场的情况下进行相机检校的可行性。

关键词: 相机检校; 二次曲面; 多条件约束; 激光点云; 多视影像

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215004.0415001

Camera Calibration Method with Multi-condition Constraints Based on Laser Points

LI Cailin, SU Benya, GUO Baoyun, WANG Zhiyong, ZHU Fuhong

(Institute of Architecture and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000 China)

Abstract: A camera calibration method based on multi-condition constraints of laser point cloud is proposed to overcome the dependence of camera calibration on the 2D/3D calibration field. The initial camera parameters are obtained by bundle adjustment from the multi-view image obtained by the camera. Then, based on the collinear equation, the mathematical model of the multi-condition constraints camera calibration is established by using the position relationship between the image point cloud and its nearest laser point cloud. Furthermore, the least square method with inequality constrains is used to calculate the camera parameters iteratively. The camera calibration accuracy of the method is compared with that of the 3D control field. The experiment results show that it is equivalent to the calibration accuracy based on the 3D control field. The average error difference between the two laser point cloud reflection is less than 0.1 pixel, which further verifies the feasibility of the method without traditional control field.

Key words: Camera calibration; Quadric surface; Multi-condition constraints; Laser point; Multi-view image

OCIS Codes: 150.0155; 150.1488; 150.1135; 140.3460

0 引言

近年来, 利用无人机搭载相机的航空摄影测量成为一种新型的测量方式, 航空摄影测量由于效率高、灵活性强、成本低、操作方便等优点被广泛应用在城市测绘^[1]、地形勘测^[2]、实景三维建模^[3-4]等领域。航空摄影测量中相机是关键设备, 传统航空摄影测量搭载的是专业的量测相机, 而无人机搭载的多为操作方便、价格

基金项目: 国家自然科学基金(No.41601496, 41701525), 山东省艺术科学基金(Nos. ZD201806353, ZD202008267), 山东省自然科学基金(No.ZR2017LD002)

第一作者: 李彩林(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为数字摄影测量与计算机视觉。Email: licailin@sdut.edu.cn

通讯作者: 苏本娅(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字摄影测量。Email: sby0302@foxmail.com

收稿日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-12-28

<http://www.photon.ac.cn>

低廉的非量测相机(普通数码相机)^[5],但非量测相机并非专业的摄影测量相机,其参数未知且镜头存在较大的畸变。因此如何使用户通过一种简捷的相机检校方法获得相机参数对提高工作效率具有重要意义。

相机检校是通过解算相机成像的几何模型和相机镜头畸变模型获取相机参数和光学畸变参数的过程。现有的相机检校方法根据在检校过程中是否需要依赖特殊物体分为传统检校方法^[6-7]和自检校方法^[8-9]。传统的相机检校最初利用三维控制场^[10]作为空间参考,通过空间点与图像点之间的对应关系建立相机参数约束,从而解算相机参数,并且校准精度较高,但三维控制场建造维护代价高,并易受地形和气候的影响。因此灵活的二维检校模板(如棋盘格网^[11]、十字靶标^[12]、圆形图案^[13]等)在相机检校过程中被广泛使用。二维检校模板进行相机检校,检校精度较高,鲁棒性较好但检校模板制作过程较为繁琐、精度要求较高,并且在噪声、图形模糊的情况下很难在光学影像上提取到精确的像点坐标^[14-15]。为了克服相机检校对二维/三维控制场的依赖,NABIL E等^[16]提出基于未知的三维场景作为相机检校的控制场,确定三维场景中的特征点在不同视点下图像平面上的投影,通过投影之间的关系确定投影矩阵,再结合绝对二次曲线图像建立非线性函数,从而解算出相机参数,该方法简单、稳定性强。WANG X^[17]提出使用不同焦距拍摄场景的两张图像并对两张图像中特征点建立约束关系,然后利用最小二乘方法优化主点坐标,最后采用遗传算法对Kruppa方程优化求解相机参数。XU L等^[18]在WANG X的基础上通过采用RANSAC算法的MIC和MAS统计方法获得影像高精度的特征点匹配对,基于获取的激光点云数据通过Kruppa方程确定焦距的初始化范围,然后通过粒子群优化算法解算相机参数。GNEENISS A等^[19]利用激光点云作为控制,通过稳健的最小二乘曲面算法将影像三维点与激光点云表面进行匹配,然后在空中三角测量过程中对相机的内方位元素进行检校,取得了良好的效果。然而这些方法在相机检校的过程中只能解算相机内参数,并未考虑相机镜头存在的畸变。

为解决缺少传统控制场相机检校困难以及相机镜头存在畸变的问题,本文提出了利用激光点云作为整体控制场的相机检校方法。该方法通过自由网光束法平差^[20]获取的相机参数作为相机检校模型的初始参数值,然后拟合激光点云局部最邻近二次曲面,结合影像三维点到最邻近激光点的最邻近距离建立多条件约束,并基于共线方程构建相机检校模型,迭代平差解算相机参数,从而实现相机检校。为缺少传统控制场的相机检校提供了有效、可行的解决方法。

1 相机检校模型构建与模型的解算原理

1.1 激光点云局部表面约束模型建立

对相机采集的多视光学影像进行自由网光束法平差,获取影像稀疏三维点云、初始相机参数。通过软件Geomagic手动在影像稀疏三维点云和激光点云中分别选取5对近似同名点对,使用空间相似变换进行影像三维点云和激光点云的粗配准,粗配准的结果作为影像外方位元素的初值,其精度越高,则获取的外方位元素初值越精确,同时也可减少相机参数迭代平差求解次数。并在粗配准过程中将影像稀疏三维点云转换到激光点云坐标系中,从而更快速地构建激光点云局部表面约束模型。激光点云局部表面约束模型具体构建方法如下:假设影像稀疏三维点的数量为 N ,遍历每一个影像三维点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, $i=1, 2, \dots, N$,在三维激光点云中搜索与其邻近的 n 个激光点进行二次曲面拟合,将拟合得到的曲面作为局部真实表面的逼近,则 P_i 对应激光点云中的同名点应落在所拟合的曲面上。采用二次曲面作为局部表面拟合模型,即

$$Z_L = A_i X_L^2 + B_i X_L Y_L + C_i Y_L^2 + D_i X_L + E_i Y_L + F_i \quad (1)$$

式中, X_L, Y_L, Z_L ($L=1, 2, \dots, n$)为 P_i ($i=1, 2, \dots, N$)最邻近的 n 个激光点坐标, $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i$ 为第 i 个影像三维点 P_i 对应的最邻近二次曲面拟合参数。

由于影像稀疏三维点的数量一般很大,如果对每一个影像三维点都构建最邻近二次曲面,则构建的最邻近二次曲面过多从而导致计算速度变慢。为此本文通过均匀选取部分影像三维点来进行最邻近二次曲面构建,同时在曲面构建的过程中满足曲面范围要尽量小来限制最邻近二次曲面的构建,若 n 个邻近激光点到当前影像三维点的最远距离大于3倍激光点云的平均距离时,则不构建该影像三维点的最邻近二次曲面,从而大大减少了曲面的数量,也可以加快模型构建的速度。

1.2 多条件约束的相机检校模型构建

以激光点云为整体控制、以共线方程为基础数学模型,并将以下条件作为约束条件来构建相机检校

模型。

- 1) 影像三维点云中每一个三维点都落在其对应的最邻近曲面上。
- 2) 影像三维点坐标、像点坐标、相机参数、影像的外方位元素、畸变参数应满足共线方程。
- 3) 影像三维点与最邻近的激光点云点距离足够小。

基于以上三个约束条件构建的相机检校的数学模型表达式为

$$\begin{cases} x - x_0 - \Delta x = -f \frac{a_1(X_i - X_s) + b_1(Y_i - Y_s) + c_1(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \\ y - y_0 - \Delta y = -f \frac{a_2(X_i - X_s) + b_2(Y_i - Y_s) + c_2(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \\ Z_L = A_i X_L^2 + B_i X_L Y_L + C_i Y_L^2 + D_i X_L + E_i Y_L + F_i \\ \sqrt{(X_i - X_L^i)^2 + (Y_i - Y_L^i)^2 + (Z_i - Z_L^i)^2} < \delta \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) \\ r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, X_L^i, Y_L^i, Z_L^i 为影像三维点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 对应的最邻近激光点。 x, y 为 P_i 对应影像中的像点坐标, X_s, Y_s, Z_s 为 P_i 对应影像的摄站位置, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 为旋转矩阵元素, f 为相机焦距, x_0, y_0 为像主点坐标, $\Delta x, \Delta y$ 为像点畸变改正参数, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 为相机径向和切向畸变参数。

1.3 相机参数迭代平差解算

基于共线方程将最邻近曲面和最邻近距离作为约束条件,这两个约束条件将影像稀疏点云、激光点云、相机检校模型三者建立联系,因此多条件约束的相机检校模型在不破坏共线方程的条件下,利用获取的初始相机参数、影像三维点坐标、影像初始外方位元素作为相机检校模型迭代平差解算的初值,然后利用光束法平差最小二乘算法迭代不断解算、优化、更新相机参数,最终获得精确的相机参数。

将式(2)多条件约束的相机检校模型改为不等式约束的非线性最小二乘问题,即

$$\begin{cases} v_x = -f \frac{a_1(X_i - X_s) + b_1(Y_i - Y_s) + c_1(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} - (x - x_0 - \Delta x) \\ v_y = -f \frac{a_2(X_i - X_s) + b_2(Y_i - Y_s) + c_2(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} - (y - y_0 - \Delta y) \\ V_s = A_i X_L^2 + B_i X_L Y_L + C_i Y_L^2 + D_i X_L + E_i Y_L + F_i - Z_L \\ \sqrt{(X_i - X_L^i)^2 + (Y_i - Y_L^i)^2 + (Z_i - Z_L^i)^2} < \delta \end{cases} \quad (4)$$

该问题为不等式约束的非线性最小二乘问题,采用以下迭代方法求解该最小二乘问题。令

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$V_d = \sqrt{(X_i - X_L^i)^2 + (Y_i - Y_L^i)^2 + (Z_i - Z_L^i)^2}$$

则有

$$P_1 \sum \mathbf{V}^T \mathbf{V} + P_s \sum \Sigma V_s^2 + P_d \sum V_d^2 = \min \quad (6)$$

式中, P_1 为像点观测的权重, P_s 为影像三维点偏离二次曲面的虚拟观测的权重, P_1 和 P_s 根据先验方差确定, P_d 为影像点与最邻近激光点距离权重,其表达式为

$$P_d = \begin{cases} 0 & \sqrt{(X_i - X_L^i)^2 + (Y_i - Y_L^i)^2 + (Z_i - Z_L^i)^2} < \delta \\ 3P_1 & \sqrt{(X_i - X_L^i)^2 + (Y_i - Y_L^i)^2 + (Z_i - Z_L^i)^2} > \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中, δ 为影像点与最邻近激光点距离,根据实验经验, δ 选取为 1.5 倍的点云平均间距。以粗略空间相似变换后相机参数、影像三维点和影像方位元素为参数初值,搜索影像三维点最邻近的 n 个激光点,并由这些激

光点云构建二次曲面,如果影像三维点与最邻近二次曲面的偏差足够小且影像三维点与最邻近的激光点云距离足够小则迭代平差结束,否则按式(4)~(7)迭代求解相机参数、影像三维点位置以及影像外参数。反复以上过程直到参数变化足够小。

通过平差后的总单位权中误差 σ_0 以及像点观测值的平均单位权中误差 σ_1 对相机检校的效果和精度进行评定,计算表达式为

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{P_1 \sum V^T V + P_s \sum V_s^2 + P_d \sum V_d^2}{n - r_t - r_p - r_c}} \quad (8)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{P_d \sum V_d^2}{n_1}} \quad (9)$$

式中, n 为观测方程个数(包括虚拟二次曲面观测方程和不等式方程), n_1 表示不等式方程个数, r_t 表示外方位元素, r_p 表示三维点坐标, r_c 表示相机参数个数。

2 相机检校总体方案

通过对相机采集的多视光学影像进行自由网光束法平差,获取影像稀疏三维点云、多视光学影像在自由网坐标系下的相对位置姿态以及初始相机参数;然后在影像点云和激光点云中手动选取5对同名点执行粗配准,从而将影像点云和激光点云大体调整到一致的位置上;最后以激光点云整体表面为控制,遍历每一个影像三维点,使用K-D树查找其在激光点云中最邻近的 n 个点,并由该 n 个邻近点构建最邻近局部二次曲面,将每个影像三维点调整到局部曲面上,并将影像三维点应落在激光点云局部曲面上以及影像三维点到最邻近激光点距离足够小作为两个约束条件,结合共线方程构建相机检校模型。在此过程中,不断平差迭代更新相机参数、影像的外方位元素和影像三维点坐标,从而求取精确的相机参数。总体算法流程如图1所示。

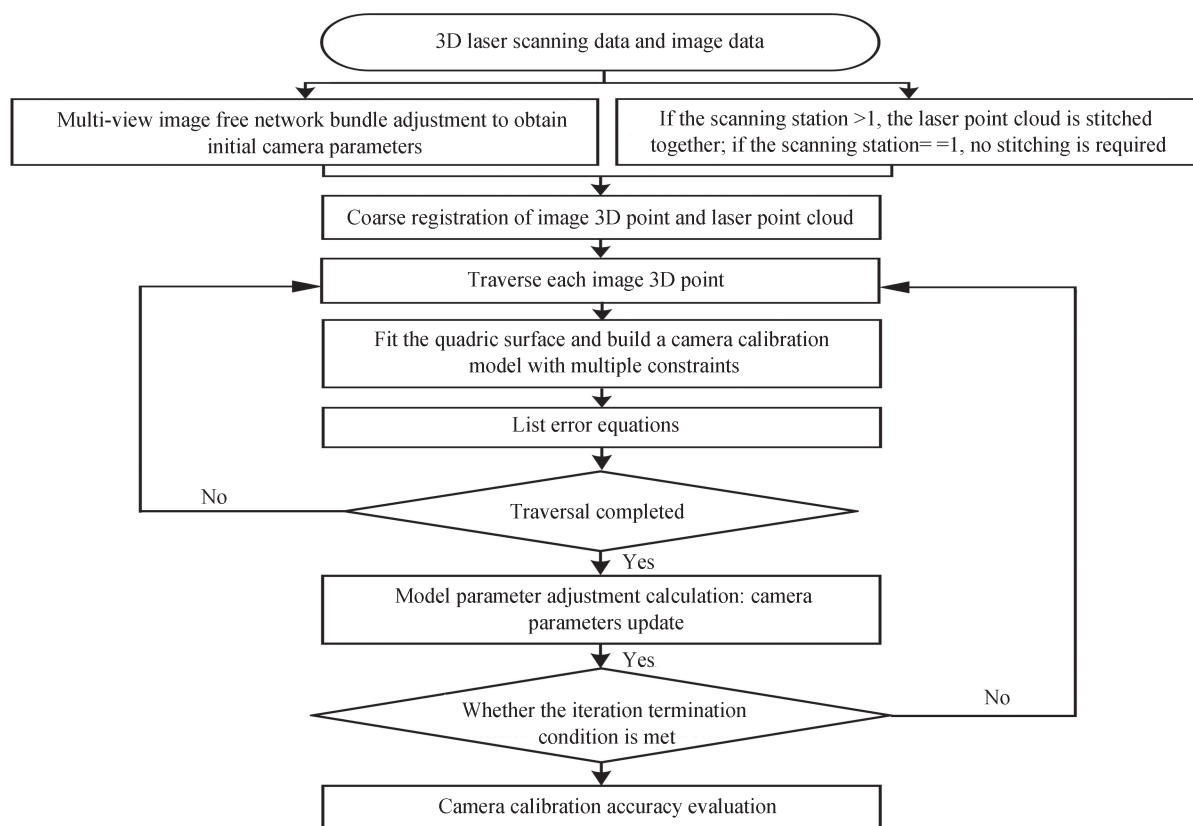


图1 总体算法流程

Fig.1 Flow of overall algorithm

3 实验结果与分析

3.1 数据说明

采用型号为Canon EOS5D Mark II、焦距为50 mm定焦镜头的数码相机和型号Z+F IMAGER®5 006 h的三维激光扫描仪分别获取两组非平面目标物体的光学影像和三维激光点云数据进行相机检校实验。为了和基于三维控制场的相机检校精度进行对比分析,使用该数码相机从不同位置和角度获取某三维控制场的光学影像,如图2所示。该三维控制场是由不在同一个空间平面上布设的76个黑白棋盘组成,黑白棋盘的十字中心位置使用高精度全站仪精确测量,测量误差小于等于1 mm。



图2 不同姿态的三维控制

Fig.2 3D control field with different postures

使用Smart3D软件分别对相机采集的两组光学影像进行自由网光束法平差^[20],从而获得影像稀疏三维点、初始的相机参数,然后从影像稀疏三维点云和对应的三维激光点云之间粗略选取5对同名点(如图3)进行粗配准,两组数据的基本信息见表1。

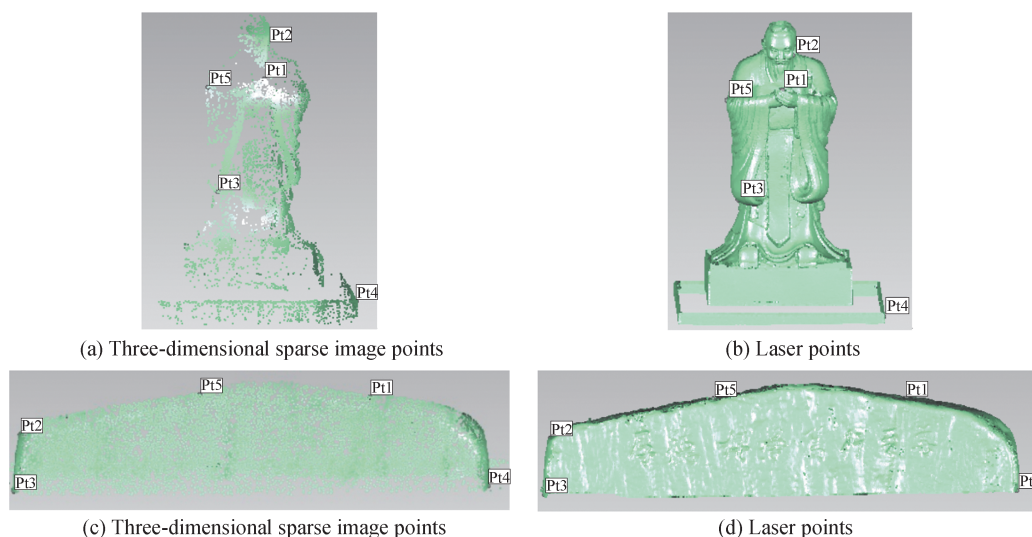


图3 孔子雕像和石碑同名点初始选取

Fig.3 Initial homonymy points selection of Confucius statue and stone

表1 实验数据基本信息说明表

Table1 Basic information of experiment data

Date	Number of images	Image size(pixel×pixel)	Number of image 3D points	Number of laser points
Confucius statue	62	3 168×2 112	8 375	713 209
Stone	39	3 168×2 112	14 297	313 937

3.2 相机检校结果比较

将本文方法与基于高精度三维控制场的检校方法检校出的相机参数进行比较分析,两种方法的相机参数检校结果如表2。

从表2中两种方法的检校结果可以看出,本文方法所解算出的相机参数结果比较稳定,精度与三维控制

表2 相机检校结果比较
Table2 Comparison of camera calibration results

	3D control field	Proposed method			
		Confucius statue		Stone	
		Initial parameters	Parameters after calibration	Initial parameters	Parameters after calibration
$f(\text{pixel})$	4 642.07	4 599.21	4 608.82	4 607.99	4 605.99
$x_0(\text{pixel})$	1 581.02	1 570.44	1 579.97	1 585.44	1 586.42
$y_0(\text{pixel})$	1 041.89	1 060.56	1 051.27	1 057.41	1 051.27
k_1	-7.11×10^{-9}	-2.92×10^{-13}	-3.38×10^{-9}	-6.63×10^{-9}	-6.5×10^{-9}
k_2	1.59×10^{-16}	-1.46×10^{-25}	1.64×10^{-17}	1.65×10^{-16}	5.41×10^{-17}
k_3	2.54×10^{-23}	1.91×10^{-38}	6.28×10^{-24}	1.91×10^{-23}	4.54×10^{-23}
p_1	1.06×10^{-7}	2.12×10^{-7}	-5.59×10^{-8}	1.58×10^{-7}	1.62×10^{-7}
p_2	5.48×10^{-8}	-9.56×10^{-8}	1.49×10^{-8}	6.22×10^{-8}	9.37×10^{-8}
σ_0	0.224	\	0.363	\	0.260
$\sigma_1(\text{pixel})$	0.257	\	0.356	\	0.242

场的检校精度基本接近。本文方法以激光点云为整体控制,利用激光点云与影像三维点之间的位置关系建立多条件约束,从而在平差迭代过程中解算相机参数。本文方法使用两组数据分别获取的相机参数初值中焦距参数相差8个像素左右,主点参数相差10个像素左右,镜头畸变参数精度高于 10^{-7} 量级,可见两组数据获取的各参数初值较为接近,为后续平差迭代求解相机精确参数提供了可靠的初值。两组数据在检校后的参数值与检校前的参数初值像素变化较小,检校后的焦距与初值的最大差异为9个像素左右,主点参数与其初值最大差异为10个像素左右,镜头畸变参数之间的差异更小。因此通过较少的平差迭代就可以实现相机参数的收敛。

利用解算的相机初始参数和相机检校后参数将孔子雕像和石碑的光学影像分别进行三维重建,重建过程中相机参数保持不变,图4、图5为本文方法对两组目标物重建的结果。由图4和图5可以看出由相机初始参数重建的孔子雕像和石碑的三维模型效果较好,纹理特征较为清晰,然而在两个三维模型中仍存在部分缺陷;经过相机检校后,明显改善了孔子雕像和石碑的光学影像存在的畸变问题,得到了更加真实、完整的



图4 检校前后孔子雕像三维重建

Fig.4 Three-dimensional reconstruction of Confucius statue before and after camera calibration

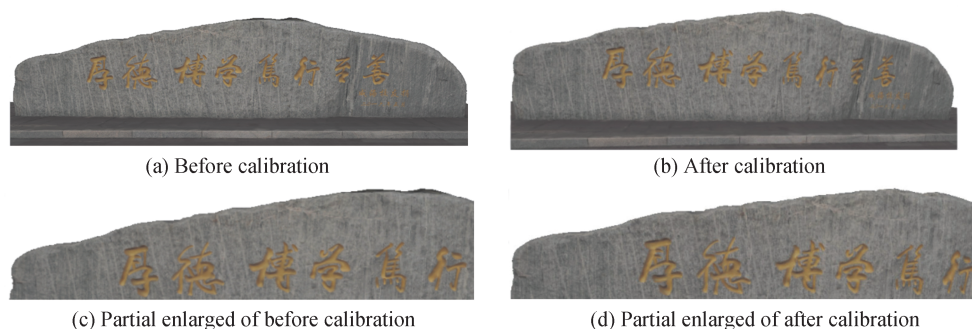


图5 检校前后石碑三维重建

Fig.5 Three-dimensional reconstruction of stone before and after camera calibration

三维模型。

为了对光学影像重建结果更加准确地描述,以孔子雕像和石碑的扫描数据(三维模型)作为真实数据,将光学影像数据生成的点云模型与激光扫描模型进行对比,通过精确度和完整度对模型重建精度进行定量评估。精确度为点云模型到激光扫描模型的平均距离,其值越大,模型的精确度越低;完整度为激光扫描模型到点云模型的平均距离,其值越小,模型重建完整度越高。表3对使用相机初始参数和检校后参数的光学影像重建的三维模型精度进行统计,由表3可知,相机检校前后的孔子雕像和石碑的三维模型的精确度和完整度的平均距离误差在6 mm左右,且相机检校后的孔子雕像和石碑的三维模型的精确度和完整度相对于检校前明显提高了,验证了本文方法的可行性和有效性。

表3 三维重建模型精度统计(单位:mm)

Table3 3D reconstruction model accuracy statistics(unit: mm)

3D model accuracy	Confucius statue		Stone	
	Initial parameters	Parameters after calibration	Initial parameters	Parameters after calibration
Accuracy	19.8	14.8	17.9	12.4
Integrity	21.3	15.4	16.2	9.8

3.3 相机检校精度分析

利用检校得到的相机参数,根据共线方程将激光三维点投影到光学影像上,计算并统计投影点与实际像点之间的差值,从而得到每张影像的反投影误差,本文使用反投影误差对相机检校精度进行分析。由图6可知数据I和数据II的平均反投影误差分别为0.356像素、0.242像素。由于检校过程中每组实验使用的光学影像数量较多,因此随机挑选10张光学影像并使用折线图表示每张影像的反投影误差。由图6可知,数

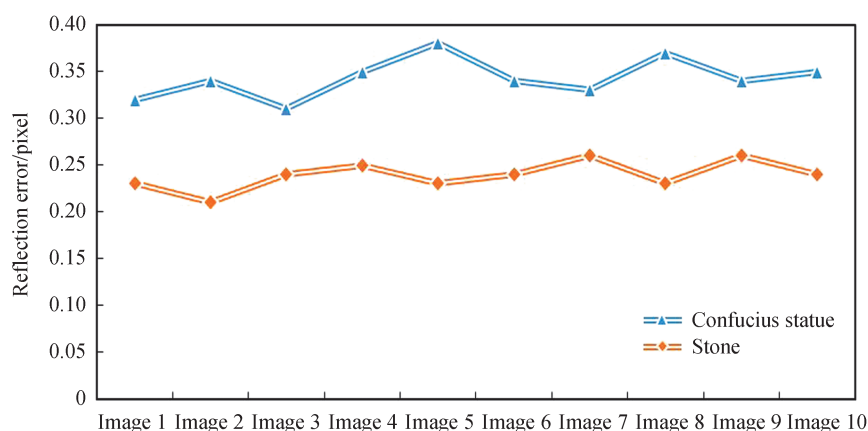


图6 反投影误差

Fig.6 Reflection error

据 I 和数据 II 选取的影像的反投影中误差都在 0.4 像素以内。图 7 为两组数据的激光点投影到各自任一幅影像上的反投影效果。由投影效果图可以看出经过相机检校后,激光点云与光学影像的轮廓很好地吻合在一起,验证了解算的相机参数的准确性。

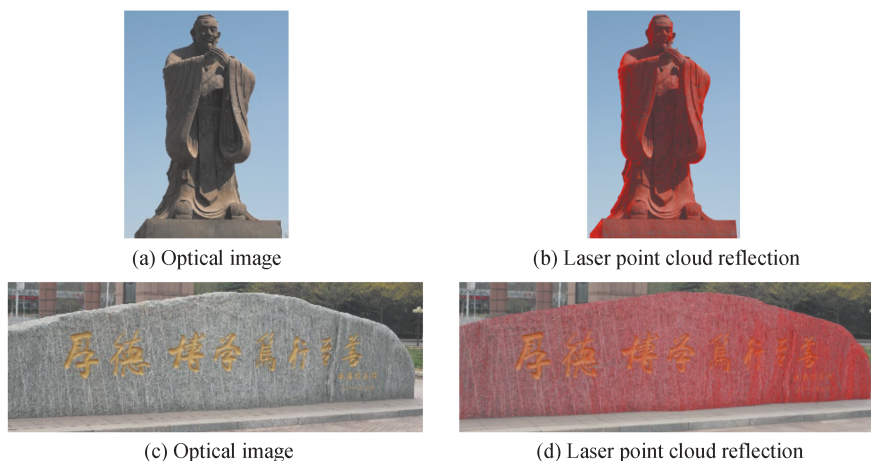


图 7 孔子雕像和石碑的激光点云反投影效果图

Fig.7 Effect of laser point cloud reflection of Confucius and stone statue

统计了相机检校平差解算过程中每次迭代的总单位权中误差分布,即每次迭代时相机检校的精度变化,如图 8 所示。由图 8 可知,两组数据均通过较少的迭代次数便实现了相机参数的收敛,而且随着平差过程中迭代次数的增加,两组数据的总单位权中误差都明显减小,最后趋于稳定。

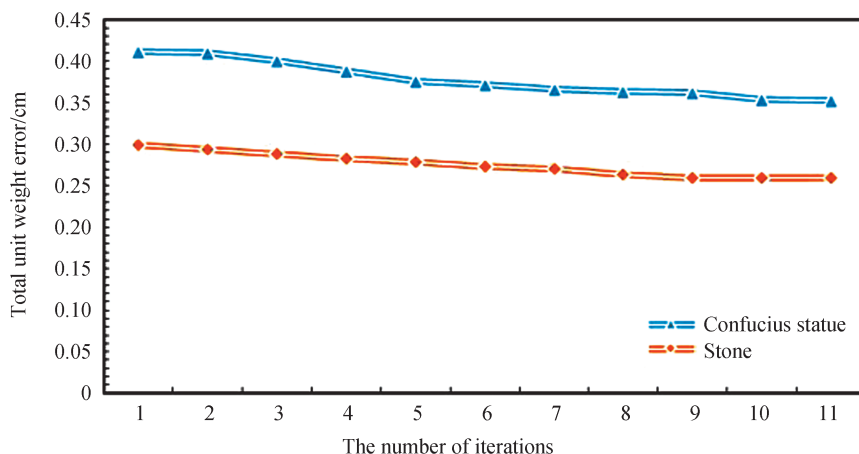


图 8 平差过程中每次迭代的总单位权中误差分布

Fig.8 The error distribution of the total unit weight of each iteration in the adjustment process

为了检测激光点云密度对相机检校精度的影响,通过降低激光点云密度(表 4 中第一行的百分数为对目标物体激光点云的采样比例)。通过将孔子雕像和石碑的完整激光点云按照不同比例执行采样,从而改变激光点云的密度。表 4 将不同采样比例下的激光点云对相检校的精度影响进行统计分析,由表 4 可知,随着采样比例的增大,孔子雕像和石碑单位面积内的激光数量增加即激光点云密度增加,孔子雕像和石碑的 σ_0 和 σ_1 逐渐减小,相机检校精度提高。但当激光点云的采样比例为 5% 时,激光点云的密度较小(孔子雕像和石碑的激光点云密度分别为 $2822/m^2$ 、 $1986/m^2$)相机检校精度较低。分析其主要原因,影像三维点构建最邻近曲面时,由于激光点云较为稀疏即激光点云之间的点间距离较大,导致构建的影像三维点的最邻近曲面数量减少,从而影响了相机检校的精度。这一定程度上表明相机检校精度受激光点云密度的影响并且当激光点云密度比较小时,相机检校精度较低。

表4 激光点云不同采样比例对相机检校精度的影响
Table 4 Effect of different sampling proportions of laser point cloud on the accuracy of camera inspection

		5%	20%	35%	50%	65%	80%	95%	100%
Confucius statue	Number of laser points	35 665	142 661	249 658	356 604	463 650	570 647	677 544	713 209
	Density of laser points/m ⁻²	2 822	1 1291	19 763	28 228	36 702	45 172	53 634	56 457
	σ_0	0.487	0.394	0.378	0.369	0.368	0.368	0.369	0.363
	σ_1 /pixel	0.409	0.368	0.359	0.359	0.358	0.359	0.357	0.356
Stone	Number of laser points	15 696	62 787	109 877	156 968	204 059	251 149	298 240	313 937
	Density of laser points/m ⁻²	1 986	7 947	13 908	19 869	25 830	31 791	37 752	39 739
	σ_0	0.389	0.274	0.263	0.263	0.262	0.263	0.264	0.260
	σ_1 /pixel	0.366	0.259	0.246	0.244	0.250	0.253	0.243	0.242

4 结论

为了避免设置特定的控制场来提高相机检校的灵活性,本文将目标物的激光点云作为整体控制场,建立基于最邻近二次曲面和影像三维点与激光点云的最邻近距离为双重约束的数学模型,然后与含有畸变参数的共线方程相结合构建多条件约束的相机检校模型,最后通过参数平差优化迭代求解相机参数。实验结果表明,与传统的三维检校方法相比,该方法检校过程操作简单,检校精度与基于三维控制场的检校方法精度相当。通过两组实验数据分别获得的初始相机参数值较为接近,为后续平差迭代求解相机精确参数提供了可靠的初值,并且由于获取的初值参数的精度较高,因此通过较少的平差迭代就实现了相机参数的收敛。两组实验数据的反投影误差表明,本文方法的相机检校精度可以获取真实可靠的相机参数,有效提高相机检校、三维重建和视觉测量等工作的效率。同时实验验证了相机标检校精度与激光点云密度具有一定的相关性,因而可选用密度较大的激光点云来确保较高的相机检校精度。

参考文献

- [1] SHI Jing, XIE Weiqiu. Application of unmanned aerial vehicle aerial survey technology in basemap making for survey of rural land contract management right[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (9): 92-95.
史经, 谢伟秋. 无人机航测技术在农村土地承包经营权确权调查底图制作中的应用[J]. 测绘通报, 2017, (9): 92-95.
- [2] YUAN Xiaowei, CAI Yang, SHI Junbo, et al. BeiDou-supported aerotriangulation for UAV aerial images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1573-1579.
袁修孝, 蔡杨, 史俊波, 等. 北斗辅助无人机航摄影像的空中三角测量[J]. 武汉大学学报, 2017, 42(11): 1573-1579.
- [3] LUIS L, DE S, VALERO P, et al. Using small unmanned aerial vehicle in 3D modeling of highways with tree-covered roadsides to estimate sight distance[J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2625.
- [4] LI X, LI W, ZHANG Q. Application of topcon sirius UAV in the large scale mapping and three dimensional true modeling [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, (10): 159.
李鑫龙, 李伟明, 张清民. 天狼星无人机摄影测量系统在大比例尺测图与三维建模中的应用[J]. 测绘通报, 2018, (10): 159.
- [5] YANG Wenyun, HU Haiyan. Calibration of no-metric digital camera and accuracy analysis[J] Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (s1): 206-209.
杨韞澜, 胡海彦. 非量测型数码相机检校及量测精度分析[J]. 测绘通报, 2017, (s1): 206-209.
- [6] CAI Xinghua, GAO Feng, CHU Boc, et al. Two-dimensional visio measurment method with immediate planecalibration [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712001.
柴兴华, 高峰, 楚博策, 等. 一种即时平面标定的二维视觉测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712001.
- [7] BIN C, BING P. Camera calibration using synthetic random speckle pattern and digital image correlation[J]. Optics Lasers in Engineering, 2020, 126: 105919.
- [8] ZHAO Shuang, LI Xuejun, LIU Tao, et al. Camera self-calibration method based on large scale aerial image coplanarity constraint[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1): 98-106.
赵爽, 李学军, 刘涛, 等. 基于大比例尺航空影像共面约束条件的相机自检校方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 98-106.
- [9] GENG L, LI S, SU S, et al. A new camera self-calibration method based on CSA[C]. 2013 Visual Communications and Image Processing (VCIP), IEEE, 2013: 1-6.
- [10] HUANG L, DA F P, GAI S Y. Research on multi-camera calibration and point cloud correction method based on three-

- dimensional calibration object[J]. *Optics Lasers in Engineering*, 2019, 115: 32-41.
- [11] BOK Y S, HA H, KWEON I S. Automated checkerboard detection and indexing using circular boundaries[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2016, 71: 66-72.
- [12] CUI Hongxia, CHEN Lijun, WANG N, et al. Calibration method with implicit constraints for multi-view combined camera using automatic coding of marker points[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110003.
崔红霞, 陈丽君, 王宁, 等. 基于标志自动编码的多视组合相机隐式约束标定方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 279-288.
- [13] LU Xiaodong, XUE Junpeng, ZHANG Qican. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008.
卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304008.
- [14] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] BIN C, BING P. Camera calibration using synthetic random speckle pattern and digital image correlation [J]. *Optics Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105919.
- [16] NABILE A, MOSTAFA M, ABDERRAHIM S, et al. Camera self-calibration with varying intrinsic parameters by an unknown three-dimensional scene[J]. *The Visual Computer*, 2014, 30(5): 519-530.
- [17] WANG X, GAO H Y, ZHAO M M. Multi-step self-calibration method based on Kruppa equations [J]. *Computer Science*, 2012, (9): 272-274.
- [18] XU L J, FENG J, LI X L, et al. A LiDAR data-based camera self-calibration method [J]. *Measurement Science Technology*, 2018, 29(7): 075205.
- [19] GNEENISS A S, MILLS J P, MILLER P E. In-flight photogrammetric camera calibration and validation via complementary lidar[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2015, 100: 3-13.
- [20] CAO M W, LI J L, JIA W, et al. Robust bundle adjustment for large-scale structure from motion[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(21): 21843-21867.