

大型槽式太阳能反射镜面摄影测量方法

王君¹, 董明利¹, 李巍², 孙鹏^{1,2}

¹北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192;

²北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876

摘要 大型槽式太阳能反射镜面尺寸大,对测量精度要求高,需要高精度的测量方法完成对其面形的三维重构。为了提高反射镜面形检测的精度和效率,提出并实现了一种基于大尺寸摄影测量技术的大型槽式太阳能反射镜面检测方法。针对大型槽式太阳能反射镜面,该方法首先利用凸包检测法筛选不共线的像点对,然后利用五点相对定向方法求解相机相对外参数以及利用光束平差方法对测量点的三维坐标进行优化迭代,最后将测量点拟合的抛物曲面的信息和反射镜的设计参数进行对比分析,从而完成大型槽式太阳能反射镜面的面形检测。利用该方法在尺寸为 12.0 m×5.7 m×1.4 m 的槽式太阳能反射镜上进行测量实验,结果表明反射镜上的测量点的均方根误差不超过 0.033 mm,拟合曲面的 z 轴误差平均值和标准差分别为 1.050 mm 和 1.466 mm,这些数据可以满足大型太阳能反射镜面形检测精度的要求,验证了摄影测量方法的可行性。

关键词 测量; 槽式太阳能反射镜; 面形检测; 大尺寸摄影测量; 相对定向; 光束平差

中图分类号 TH701; P234.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051204

Photogrammetric Method for Large Trough Solar Reflector

Wang Jun¹, Dong Mingli¹, Li Wei², Sun Peng^{1,2}

¹Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

²Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Large trough solar reflector surface has large size and high measurement accuracy requirements, which needs high precision measurement method to reconstruct its 3D shape. In order to improve the detection accuracy and efficiency of the large trough solar reflector surface, a large trough solar reflector shape detection method is proposed and implemented based on large scale photogrammetry technology. In the view of the large trough solar reflector surface, at first the convex envelope detection method is used to select non-collinear image points, then the five points relative orientation method is used to solve the relative external parameters of the cameras and the bundle adjustment method is implemented for the optimization iteration of 3D coordinates of measuring points. Finally, the information of the parabolic surface fitted by the measuring points and the design parameters of the reflector are compared and analyzed, then the shape detection of large trough solar reflector surface is completed. Using the proposed method, a measurement experiment is conducted on the trough solar reflector with the size of 12.0 m×5.7 m×1.4 m, the results show that the root mean square error of the measuring points on the reflector is less than 0.033 mm, the average z -axis error and the standard deviation of the fitted parabolic surface are 1.050 mm and 1.466 mm, respectively. These data can meet the surface shape detection accuracy requirements of large trough solar reflector, and the feasibility of the photogrammetry method is verified.

Key words measurement; trough solar reflector; shape detection; large scale photogrammetry; relative orientation; bundle adjustment

OCIS codes 120.0280; 120.6650; 350.6050

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51475046)、北京市教委市属高校创新能力提升计划项目

作者简介: 王君(1978—),男,博士,副教授,主要从事视觉测量技术、精密测量技术与仪器方面的研究。

E-mail: wangjun@bistu.edu.cn

1 引言

太阳能等新型能源的利用与开发是未来能源领域的发展趋势^[1-2]。与其他形式的太阳能热发电技术相比,槽式太阳能热发电技术具有低能耗、无污染的特点,是目前最经济的可再生能源发电技术,开发前景非常广阔。槽式抛物面反射镜太阳能热发电系统由聚光集热系统、热传输和热交换系统、储热系统及发电系统4部分组成^[3-4],其工作原理为:太阳辐射积聚到吸热器上,加热真空集热管内流通的导热油,产生高温,再通过换热设备加热水产生高温高压的蒸汽,为转化电能提供充足的热能。因此,槽式聚光器镜面加工装配的准确性直接影响到系统的光热转换效率。为了确保槽式太阳能反射镜面参数误差在设计范围之内,需要一种测量方法对反射镜面误差进行检测^[5]。

近些年来,出现了许多对槽式太阳能反射镜面进行测量的方法,主要分为三类,分别是激光扫描法、叠栅偏折法和摄影测量法^[6]。激光扫描法通过激光束逐点扫描镜面,利用相机拍摄经过镜面反射到目标上的激光光点图样,由反射光线的位置求得法线方向,进而确定该反射镜面上各点斜率^[7-8],该方法测量精度较高,可达到0.1 mrad,但对大尺寸的槽式太阳能反射镜面来说,这种逐点测量的方法效率太低;叠栅偏折法(又称为条纹反射法)是在光屏上投射黑白相间的条纹,用相机拍摄条纹经被测镜面反射后的图像,条纹会被待测反射镜面形调制,经过相移算法和图像处理即可还原曲面外形轮廓^[9-10],精度约为1 mrad,但该方法一般都是在室内生产线上进行在线测量,并不适用于室外大尺寸的槽式太阳能整体镜面的面形测量^[11];摄影测量法需要通过相机在不同位置对镜面进行成像,将采集到的镜面图像进行去噪、锐化、提取像点中心等处理,然后再利用计算机图像匹配进行自动处理,最后经

相关数学计算得到待测点精确的三维坐标^[12],通过测得的三维点坐标拟合面形,可以计算面形的截断因子,从而对槽式太阳能反射镜面精度进行评价。与其他两种方法相比,摄影测量法精度高,其精度高达0.025 mrad/m,且不受测量面形形状的限制,尤其适合对槽式太阳能反射镜面的测量^[13-14]。

考虑到大型槽式太阳能反射镜面尺寸大、面形复杂、测量精度高等问题,本文利用摄影测量方法对大尺寸槽式太阳能反射镜面的面形精度进行测量,首先利用凸包检测法筛选不共线的像点对,然后利用五点相对定向方法求解相机的外参数,再用空间前方交会方法对复杂面形的被测目标点进行三维重建,最后利用光束平差方法对目标点的三维坐标进行优化迭代,然后拟合曲面,实现对大型槽式太阳能反射镜面面形的高精度检测。

2 测量原理

摄影测量是一种高精度的非接触测量方法,其测量结果精度高,稳定可靠,特别适合大尺寸物体检测,是大型槽式太阳能反射镜检测的首选方法。摄影测量是建立在立体视差原理的基础上,利用空间相互关系已知的多个摄像机获取同一被测目标的图像,解算被测物体的三维几何信息,其中双目立体视觉是最简单的摄影测量模型,下面以双目立体视觉模型为基础介绍摄影测量原理。

双目立体视觉模型由两个摄像机组成,如图1所示。两个摄像机与目标物体在空间形成三角关系,利用空间点在两摄像机像平面上成像点坐标求取空间点的三维坐标 $P(X_s, Y_s, Z_s)$ 。设相机1坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 为世界坐标系,有效焦距为 f_{c1} ,像平面坐标系为 $O_1-x_1y_1$, $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 为相机2坐标系,有效焦距为 f_{c2} ,像平面坐标系为 $O_2-x_2y_2$ ^[15]。图像坐标系和世界坐标系之间的关系为:

$$\rho \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f_{ci} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_1} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_2} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1,2, \quad (1)$$

式中 a_x 和 a_y 为像平面坐标系坐标轴的尺度因子, u_0 和 v_0 为像平面坐标系中心点的像素坐标。 \mathbf{M}_2 中的 \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵与平移矩阵,0为 3×1

向量,1为矩阵中的一个元素。 \mathbf{M}_1 为摄像机的内参数矩阵,可以通过靶标预先标定得到; \mathbf{M}_2 为摄像机的外参数矩阵,可以利用外极线几何求得摄像机相

对于世界坐标系的外方位参数。

如图 2 所示,外极线几何描述了空间三维特征点与两相机中对应成像点之间固有的几何关系,即空间点 M 、两相机像面上对应像点 m 和 m' 、两相机的原点 O_c 和 O'_c 位于同一平面上,构成共面几何约束。射线 $O_c M$ 在第二个像平面 I' 上的投影为射线 $e'm'$,称为像点 m' 在像平面 I' 上的对极线 l' ;同理,存在像点 m 在像平面 I 上的对极线 l ,它们分别是平面 $O_c M O'_c$ 与两像平面的交线,称为图像点在对应图像面内的两条外极线, e 及 e' 点称为外极点。

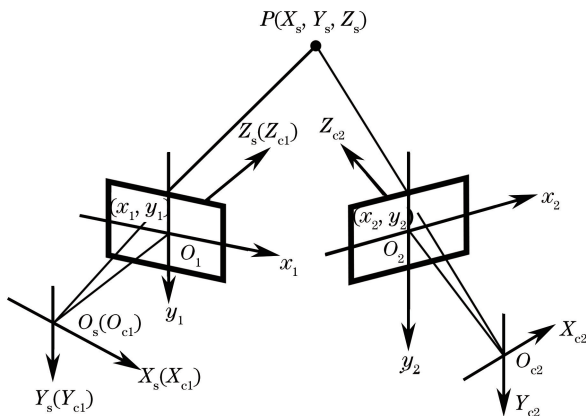


图 1 双目立体摄像机测量模型

Fig. 1 Binocular stereo camera measurement model

义在一定比例因子的基础上,只有 5 个自由度(2 个平移参数,3 个旋转参数),因此具有更少的退化模型,针对平面和二次标准曲面等特殊的测量场景也可以精确计算,更适合于大尺寸的槽式太阳能镜面测量,在像面坐标中找到 5 对不共线的特征像点坐标就可以对其进行求解^[16],从而确定摄像机的相对外参数。

本质矩阵 E 的公式为:

$$E = t \times R = [t]_{\times} R = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} R, \quad (3)$$

本质矩阵 E 具有两个约束条件:

$$\begin{cases} \det(E) = 0 \\ 2EE^T - \text{tr}(EE^T)E = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\det()$ 表示求行列式, $\text{tr}()$ 表示求矩阵的迹。为了确保待匹配的所有像面坐标不共线,本研究利用凸包检测法^[17]来选取像面上不共线的 5 个点坐标计算摄像机的外方位参数。该方法首先求解所有点的凸包图像,然后提取凸包的顶点,在顶点中选取 4 个距离最远的点,根据这 4 个点的位置求出其中心位置,距离中心点最近的像面点即为第 5 个点。

平面凸包定义为:对于一个简单多边形来说,对于边界上或内部的任意两个点,连接这两个点所组成的线段,其上所有的点都在多边形的边界上或内部,则该多边形被称为凸包多边形,如图 3 所示。

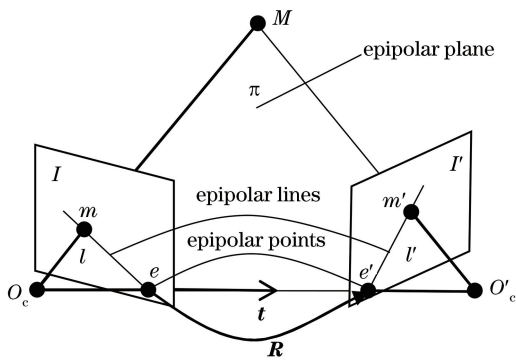


图 2 外极线几何原理

Fig. 2 Principle of epipolar geometry

具体地,当摄像机内参数确定后,外极线几何可以由本质矩阵描述,归一化图像坐标系对应像点为 $\tilde{m} \leftrightarrow \tilde{m}'$,由于 $m' \perp t \times m'$,则此时的外极线几何数学描述可以简化为:

$$\tilde{m}'^T [t]_{\times} R \tilde{m} = \tilde{m}'^T E \tilde{m} = 0, \quad (2)$$

式中 \tilde{m} 和 \tilde{m}' 分别表示空间特征点在两幅图像中对应像点在摄像机坐标系下的坐标, R 和 $[t]_{\times}$ 分别表示坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。同基础矩阵一样,表征两相机外参数 (R, t) 的本质矩阵 E 也是定

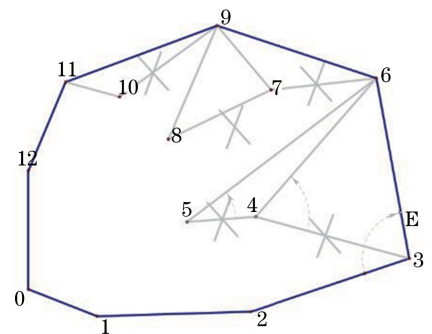


图 3 凸包多边形

Fig. 3 Convex envelope polygon

在计算出凸包多边形之后,提取凸包顶点,得到顶点坐标。计算凸包顶点中任意 4 个点之间的距离,为了让所选 4 个点的位置尽量分散,选取距离最大的 4 个点作为测试数据点。图 4(a)为根据实际测量得到的像面点坐标绘制的凸包轮廓,凸包轮廓正好有 4 个顶点,根据上述描述,得到 4 个顶点的坐标,利用得到的 4 个顶点坐标求取其中心点。为防止中心点与凸包顶点重复,从原始数据中剔除所有

凸包顶点,然后计算剩余点到中心的距离。距离最短的点即为第5个点。图4(b)所示为筛选出的5个不共线的像点。

凸包检测法可以有效避免筛选到的5对像点共

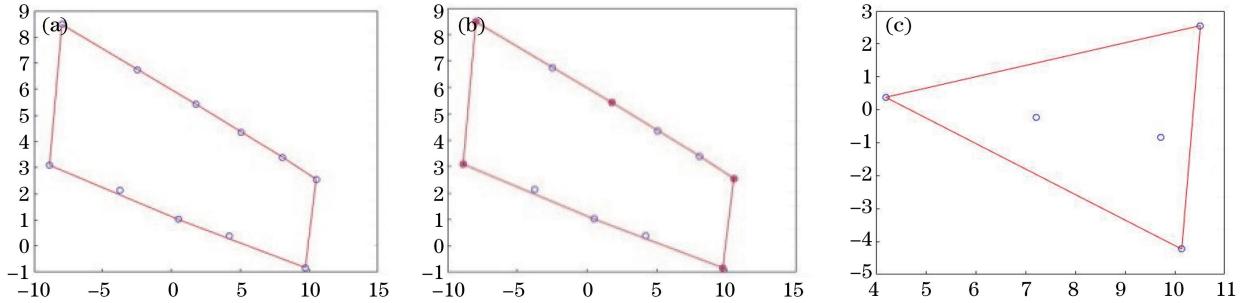


图4 凸包检测法选取像面上不共线的像点。(a)筛选出凸包4个顶点;(b)筛选出5个不共线像点;(c)仅有3个凸包顶点

Fig. 4 Selecting the non-collinear image points on image surface through convex envelope contours detection method.

(a) Selecting four vertices of convex envelope; (b) selecting five non-collinear image points;

(c) only three vertices of convex envelope

3 测量方法

利用凸包检测法筛选出待匹配的5个不共线的像点对之后,就可以利用五点相对定向方法求解两视图下的摄像机外参数,以双目立体视觉模型为基础可以扩展到多目立体视觉,在所有视图中确立世界坐标系,建立所有视图站位间的外参数转换链,将得到的所有视图的外参数都转换到预定义的世界坐标系下,以高精度同名像点自动匹配技术作为光束平差的迭代优化条件,然后通过光束平差迭代优化算法解算被测点精确的空间三维坐标,最终实现相机内参数自校准优化、成像基站外方位参数校正补偿及被测空间特征点精确三维坐标求解,完成大型槽式太阳能反射镜面摄影测量系统的全局相对定向。具体测量流程如图5所示,详细步骤如下:

1) 在太阳能镜面上布置十字靶标,以编码点和标志点作为测量点,在太阳能镜面前固定好预先标定的靶标和基准尺,以十字靶标的横向和纵向长度为长度约束,对太阳能镜面测量场进行拍照成像;

2) 提取每幅图像上测量点的像点坐标,以所有图片中测量点数量最多的图片作为基准图,其他图像依次与其进行像点匹配,筛选出满足定向数量阈值条件的匹配序列对(五点算法阈值条件为5),不满足定向条件的图片则留到计算出所有测量点的空间三维坐标后,再利用后方交会计算摄像机的外参数;

3) 将满足定向条件的图片序列依次两两求取本质矩阵,利用五点相对定向方法求取摄像机的相对外参数信息;

线的情况。在求解过程中如果像面坐标只有5个点,如图4(c)所示,此时检测凸包只有三个顶点,这种情况下可越过凸包求解5个点的步骤,直接进行线性拟合判断所有点是否共线。

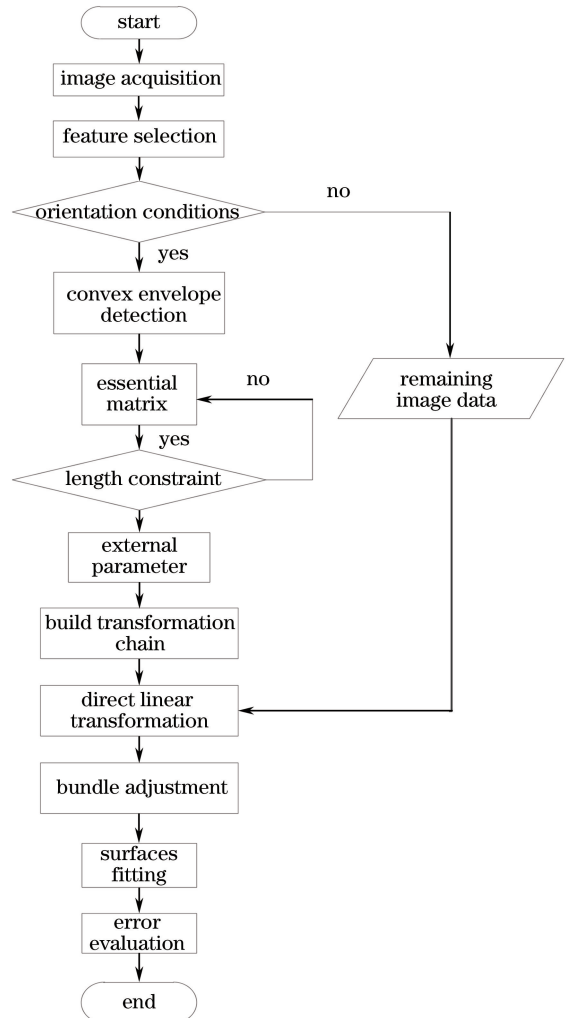


图5 槽式太阳能反射镜面测量流程图

Fig. 5 Flow chart of trough solar reflector surface measurement

4) 利用长度约束检测求解本质矩阵的过程中,

若出现退化场景或歧义解的情况,则将组合中的基准图换成前一幅已经定向完成的图片,重新进行像点匹配,直到重建十字靶标上的特征点空间距离值满足长度约束条件为止;

5) 建立所有图像站位间的外参数转换链 L ,如图 6 所示,将所有站位都转换到站位 2 所在的世界坐标系下就可以建立所有图像站位的转换链,将满足定向条件和长度约束的图片外参数转换到预定义的世界坐标系下;

6) 利用以上过程解算得到的摄像机外参数和提取的测量点像面坐标信息,通过前方交会方法重建编码点的空间坐标;

7) 利用步骤 6) 中的测量点空间坐标,通过单像空间交会方法^[18]实现步骤 2) 中不满足定向条件的图片的外参数计算,从而完成所有图片的全局相对定向;

8) 通过光束平差方法对步骤 7) 得到的外参数和测量点空间坐标进行迭代优化,利用优化得到的测量点坐标拟合抛物曲面,与曲面设计参数进行误差评定。

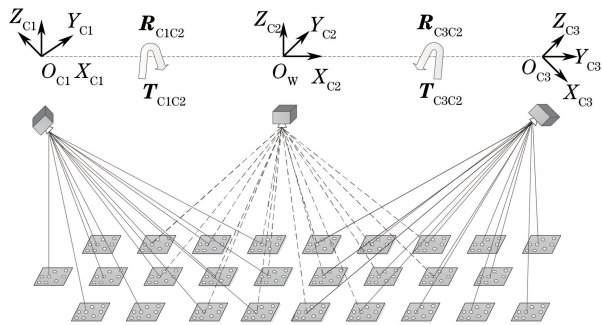


图 6 相机外参数转换示意图

Fig. 6 Schematic of cameras extrinsic parameters conversion

4 实验结果及分析

为验证测量方法在实际测量条件下的精度和可靠性,选取如图 7 所示的大型槽式太阳能反射镜面为检测对象,反射镜面的尺寸为 $12.0 \text{ m} \times 5.7 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$,考虑到在线检测的效率问题和实际需求,没有必要对反射镜上的每一个点进行测量,因此在其上布置 $M=252$ 个测量点,均匀覆盖在槽式太阳能反射镜上。选用镜头焦距为 25 mm 的尼康 D800s 相机在 40 个不同的位置拍摄 $L=240$ 张照片,合理地规划拍照位置,保证每个测量点至少在 20 张照片中获得有效成像(图 8),拍摄的图片中包含所有测量点共线、所有测量点共面、测量点数量不满足定向

条件等情况,利用摄影测量方法解算测量点的三维坐标,并根据测量点的三维空间信息拟合抛物曲面方程,并将其与设计参数进行对比。



图 7 大型槽式太阳能反射镜面测量场

Fig. 7 Large trough solar reflector surface measurement field



图 8 摄影测量相机采集图像(局部)

Fig. 8 Photo taken by the photogrammetric camera (segment)

具体地,在实验中以光束平差后的测量点绝对误差和拟合曲面的焦距误差两种数据作为大型槽式太阳能反射镜面的检测标准。槽式太阳能抛物面反射镜的设计方程为 $z = x^2 / (4f)$,其中设计焦距 $f = 1710 \text{ mm}$ 。利用计算得到的测量点空间坐标信息拟合的曲面方程为 $z' = x^2 / (4f')$,其中拟合曲面焦距 $f' = 1711.916 \text{ mm}$,定义拟合抛物曲面的 z 轴误差为:

$$\epsilon_z = \| z'_i - z_i \| = \left\| \frac{x_i^2}{4f'} - \frac{x_i^2}{4f} \right\|, i = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

式中 m 表示反射镜面上测量点的数量。表 1 统计了大型槽式太阳能反射镜测量场相机外方位参数误差,其中, $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ 表示三个正交方向的平移向量绝对误差, $\Delta \varphi, \Delta \Omega, \Delta \kappa$ 表示三个坐标轴的旋转角度绝对误差。表 2 统计了大型槽式太阳能反射镜测量场中布置的测量点重建后的空间坐标均方根(RMS)绝对误差 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 和利用这些测量点拟合得到的抛物曲面的 z 轴误差 ϵ_z 。

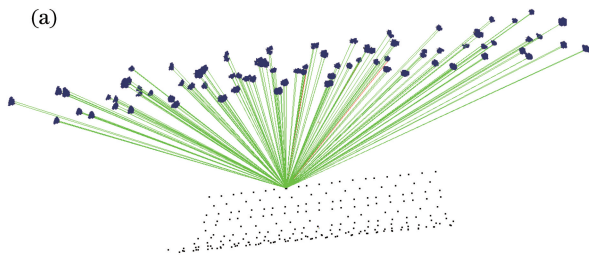
由表 1 和表 2 可知,通过摄影测量方法可以准

确地给出大型槽式太阳能反射镜测量场中各相机成像基站相对方位信息和反射镜上测量点的空间坐标信息,利用这些测量点拟合的抛物面的焦距可以从

表 1 相对定向计算得到的外参数绝对误差

Table 1 Extrinsic parameter absolute error results obtained by relative orientation

Absolute error	Mean	Maximum	Minimum	Standard
$\Delta X_i / \text{mm}$	1.077	6.544	0.050	1.881
$\Delta Y_i / \text{mm}$	2.668	10.080	0.008	3.634
$\Delta Z_i / \text{mm}$	1.587	7.699	0.012	1.896
$\Delta \varphi / (^\circ)$	0.002	0.071	0	0.015
$\Delta \Omega / (^\circ)$	0.019	0.198	0	0.024
$\Delta \kappa / (^\circ)$	0.007	0.148	0	0.015



一定程度上反映大型槽式太阳能反射镜的加工和定位精度。为了还原测量过程和展示反射镜上测量点的测量结果,图 9(a)给出了测量场中各相机成像基站和测量点的相对方位信息,图 9(b)给出了利用测量点拟合出的抛物曲面信息。

表 2 光束平差后测量点的 RMS 绝对误差和 ϵ_z

Table 2 RMS absolute errors of measuring points and ϵ_z after bundle adjustment

Error	Mean	Maximum	Minimum	Standard
$\Delta X / \text{mm}$	0.013	0.033	0.010	0.003
$\Delta Y / \text{mm}$	0.008	0.020	0.006	0.002
$\Delta Z / \text{mm}$	0.008	0.020	0.006	0.002
ϵ_z / mm	1.050	5.547	0.005	1.466

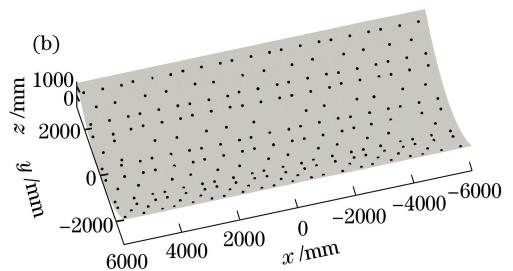


图 9 大型槽式太阳能反射镜面测量结果。(a)摄像机位姿分布图;(b)利用测量点拟合的抛物曲面

Fig. 9 Measurement results of large trough solar reflector surface. (a) Position distribution of the camera; (b) parabolic surface fitting by measuring points

5 结 论

将摄影测量方法应用到大型槽式太阳能反射镜面形测量中,研究了多相机相对定向模型,同时分析了空间点三维重建的不确定性。在实际条件下,针对槽式太阳能反射镜面形检测的特殊性,利用凸包检测法和五点相对定向方法求解相机外参数,用前方交会方法计算反射镜上测量点的空间坐标,通过光束平差方法对测量点进行优化迭代。实验结果表明,测量点空间坐标 RMS 误差最大值不超过 0.033 mm,拟合曲面的 z 轴误差平均值为 1.050 mm,标准差为 1.466 mm。该研究可以为大型槽式太阳能反射镜面形检测提供指导。

参 考 文 献

- [1] Kuravi S, Trahan J, Goswami D Y, *et al.* Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2013, 39(4): 285-319.
- [2] Zheng J T, Pei J. Status quo of developing power

generation technology by using heat of light-concentrating solar energy in china [J]. *Thermal Power Generation*, 2011, 40(2): 8-9.

郑建涛,裴杰.我国聚光型太阳能热发电技术发展现状[J].*热力发电*,2011,40(2):8-9.

- [3] Chen J, Liu J Z, Shen W J, *et al.* Status quo in research of solar energy thermal power generation system [J]. *Thermal Power Generation*, 2012, 41(4): 17-22.

陈静,刘建忠,沈望俊,等.太阳能热发电系统的研究现状综述[J].*热力发电*,2012,41(4):17-22.

- [4] Wang Z M, Tian R, Qi J C, *et al.* Study on structural design and optical performance of inverted trapezoidal cavity solar receiver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1222003.

王志敏,田瑞,齐井超,等.倒梯形腔体接收器的结构设计及光学性能研究[J].*光学学报*,2017,37(12):1222003.

- [5] Wu P C, Zhu T Y, Cao F, *et al.* Light band characteristics of parabolic trough solar collectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 071202.

- 吴鹏程, 朱天宇, 曹飞, 等. 槽式太阳能集热器光带特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 071202.
- [6] Zhao M Z, Jiang X, Song S J, *et al.* Development situation and potential analysis about parabolic trough solar thermal power technique in China [J]. *Energy Engineering*, 2013(2): 27-30.
赵明智, 姜鑫, 宋士金, 等. 槽式太阳能热发电技术在中国的发展现状及潜力分析[J]. 能源工程, 2013(2): 27-30.
- [7] Kearney D, Morse F. Bold, decisive times for concentrating solar power [J]. *Solar Today*, 2010, 24(4): 32.
- [8] Guven H M, Bannerot R B. Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1986, 108(4): 275-281.
- [9] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, *et al.* Alignment technique using Moiré fringe based on self-referencing interferometer in lithographic tools [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204006.
杜聚有, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204006.
- [10] Zhu G, Lewandowski A. A new optical evaluation approach for parabolic trough collectors: first-principle optical intercept calculation [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2012, 134(4): 041005.
- [11] Dunn E, Frahm J M. Next best view planning for active model improvement [C]. *British Machine Vision Conference*, 2009: 1-11.
- [12] Chen J C, Sun Z M, Zhao L P. PSO/GA based optimal placement of stereo-vision measurement system [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(1): 71-74.
陈杰春, 孙志明, 赵丽萍. 基于 PSO/GA 的立体视觉测量系统优化布局 [J]. 机床与液压, 2014, 42(1): 71-74.
- [13] Pottler K, Lüpfert E, Johnston G H G, *et al.* Photogrammetry: a powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(1): 94-101.
- [14] Kuravi S, Trahan J, Goswami D Y, *et al.* Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2013, 39(4): 285-319.
- [15] Wang W. Research on the key technologies of 3D coordinate measurement with the virtual controlling network of single camera [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 57-70.
王伟. 单像机虚拟控制网络三维坐标测量关键技术研究 [D]. 天津大学, 2014: 57-70.
- [16] Hartley R, Li H. An efficient hidden variable approach to minimal-case camera motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(12): 2303-2314.
- [17] Wang W, Gu G Q, Zhang M R. Research and application of convex hull algorithm for street containment based on state space analysis [J]. *Computer Applications and Software*, 2014, 31(8): 276-279.
王伟, 顾国强, 章民融. 基于状态空间分析的街面围堵凸包算法研究与应用 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(8): 276-279.
- [18] Li W, Dong M L, Sun P, *et al.* Relative orientation method for large-scale photogrammetry with local parameter optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 2053-2060.
李巍, 董明利, 孙鹏, 等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2053-2060.